

普通高等教育机电类规划教材

锻造工艺学

哈尔滨工业大学 吕炎 主编

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

锻 造 工 艺 学

主编 吕 炎

协编 (按章的编写顺序)

刘海华 高士友 薛克敏 郭会光 崔世强

王 真 徐亦公 单德彬 刘润广 李克智

主审 李林章



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书对锻造工艺的基本问题作了系统的论述。全书共分十二章。主要介绍了自由锻工艺、模锻工艺的基本原理、模具设计的原则、方法和锻造的热规范,同时对精密模锻、模锻的后续工序、高合金钢和有色金属的锻造特点等也概要地作了介绍。本书以成形规律为主线,系统介绍了各类设备的工作特点和工艺特点,并加强了工艺分析。

本书为高等学校锻压专业教材,也可供有关技术人员参考。

锻 造 工 艺 学

哈尔滨工业大学 吕 炎 主编

责任编辑:杨 燕 责任校对:刘志文
封面设计:姚 毅 版式设计:霍永明
责任印刷:卢子祥

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

北京交通印务实业公司印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

开本787×1092¹/₁₆·印张19.25·字数470千字

1993年5月北京第1版·1995年5月北京第1次印刷

印数 0 001—6 100定价:11.40元

ISBN 7-111-04425-8/TG·935 (课)

前 言

《锻造工艺学》是一门论述锻造成形理论、各种锻造工艺及锻模设计方法的专业教材。本书是根据1993年9月在太原召开的第六次全国锻压专业教学指导委员会会议上通过的编写大纲编写的。

本教材共十二章，主要对自由锻、模锻、锻造的热规范等进行了详细论述，对精密模锻、高合金钢和有色金属的锻造特点等也概要地作了介绍。本教材以变形分析为基础、以成形规律为主线、以质量问题为重点，并综合考虑了各类锻造设备的工作特点和工艺特点。本教材注意与《塑性成形原理》课程的结合，并加强了工艺分析。

本书执笔者：第一、四、六章为哈尔滨工业大学吕炎；第二章为哈尔滨工业大学刘海华；第三章为燕山大学高士友；第五章第一~三节为哈尔滨工业大学薛克敏；第五章第四节为太原重型机械学院郭会光；第七章为河北机电学院崔世强；第八章第一~六节为哈尔滨工业大学王真；第九章为山东工业大学徐亦公；第十章为哈尔滨工业大学单德彬；第十一章为哈尔滨工业大学刘润广；第十二章和第八章第七节为华北工学院李克智。

本书由哈尔滨工业大学吕炎教授主编，太原重型机械学院李林章教授主审。

1994年3月在清华大学召开了《锻造工艺学》教材审稿会，参加会议的有：太原重型机械学院李林章教授；清华大学陆其仁教授、叶庆荣教授；重庆大学苏长清教授；燕山大学高新教授；华南理工大学林法禹教授等。

在本教材大纲的拟定和编写过程中得到了清华大学、华中理工大学、上海交通大学、西北工业大学、吉林工业大学、燕山大学、南昌航空学院、天津大学、太原重型机械学院、华北工学院、山东工业大学、华南理工大学、合肥工业大学、大连铁道学院等兄弟院校的支持和协助，在此深表谢意！

由于学术水平所限，书中缺点错误在所难免，恳切希望大家批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论..... 1

一、锻造生产的特点及其在国民经济中的作用..... 1

二、锻造方法的分类及工艺流程..... 2

三、我国锻造生产的历史、现状及发展趋势..... 2

四、本课程的性质与任务..... 4

第二章 锻造用原材料及下料方法..... 5

第一节 锻造用钢锭及型材..... 5

一、钢锭的冶炼..... 5

二、钢锭的结构..... 5

三、钢锭的内部缺陷..... 6

四、型材的常见缺陷..... 7

第二节 下料方法..... 7

一、剪切法..... 8

二、锯切法..... 9

三、砂轮片切割法..... 10

四、折断法..... 10

五、气割法..... 10

六、其它下料方法..... 10

第三章 锻造的热规范..... 11

第一节 金属的锻前加热..... 11

一、加热的目的..... 11

二、加热方法..... 11

第二节 金属加热时产生的缺陷及防止措施..... 13

一、氧化..... 13

二、脱碳..... 15

三、过热..... 16

四、过烧..... 17

五、裂纹..... 17

第三节 锻造温度范围的确定..... 19

一、始锻温度的确定..... 19

二、终锻温度的确定..... 20

第四节 金属的加热规范..... 21

一、加热规范制定的原则及方法..... 21

二、钢锭的加热规范..... 27

三、中、小型钢坯的加热规范..... 28

第五节 少无氧化加热..... 29

一、快速加热..... 29

二、介质保护加热..... 30

三、少无氧化火焰加热..... 30

第六节 金属的锻后冷却..... 31

一、锻后冷却常见缺陷产生的原因和防止措施..... 31

二、锻件的冷却方法..... 33

三、锻件的冷却规范..... 31

第七节 锻件的热处理..... 31

一、中、小锻件热处理..... 35

二、大型锻件热处理..... 35

第四章 自由锻主要工序分析..... 38

第一节 概述..... 38

一、影响金属塑性变形流动的几个基本因素..... 38

二、局部加载时沿加载方向的应力分布规律..... 39

三、金属塑性变形的不均匀性..... 40

四、塑性变形时金属的流动方向..... 40

第二节 镦粗..... 46

一、镦粗工序的主要质量问题和变形流动特点..... 46

二、镦粗时的注意事项..... 50

第三节 拔长..... 51

一、矩形截面坯料的拔长..... 51

二、圆截面坯料的拔长..... 56

三、空心件拔长..... 59

第四节 冲孔..... 61

一、冲孔的受力变形分析..... 61

二、冲孔的质量分析..... 64

第五节 扩孔..... 65

一、冲子扩孔..... 66

二、芯轴扩孔..... 66

三、辗压扩孔..... 68

第六节 弯曲..... 69

第五章 自由锻工艺..... 70

IV

第一节 自由锻件的分类	70
第二节 自由锻件变形方案的确定	70
第三节 自由锻工艺过程的制定	75
一、锻件图的制定	75
二、确定坯料的重量和尺寸	76
三、确定变形工艺和锻造比	78
四、确定锻造设备吨位	79
五、自由锻工艺过程制定举例	82
第四节 大型锻件锻造的特点	84
一、钢锭冶金质量对锻件的影响	84
二、大型钢锭的加热特点	85
三、热锻变形对金属组织和性能的影响	85
四、大锻件变形工艺分析	88
五、大型锻造工艺实例	92
第六章 模锻成形工序分析	100
第一节 概述	100
一、控制锻件的最终形状和尺寸	100
二、控制金属的流动方向	100
三、控制塑性变形区	100
四、提高金属的塑性	101
五、控制坯料失稳提高成形极限	101
第二节 开式模锻	101
一、开式模锻各阶段的应力应变分析	102
二、开式模锻时影响金属成形的主要因素	104
第三节 闭式模锻	109
一、闭式模锻的变形过程分析	109
二、坯料体积和模膛体积变化对锻件尺寸的影响	111
三、打击能量和模压力对成形质量的影响	111
四、各类锻压设备闭式模锻的特点	111
第四节 挤压	114
一、挤压的应力应变分析	114
二、挤压时筒内金属的变形流动	114
三、关于“死区”的应力应变分析	117
四、挤压时常见缺陷的分析	118
五、径向挤压	121
第五节 顶锻	123
一、顶锻	123
二、电热顶锻	125
三、在带有导向的模具中顶锻	126

第七章 模锻工艺	127
第一节 常用模锻设备及其工艺特点	127
一、模锻锤	127
二、热模锻压力机	128
三、螺旋压力机	130
四、平锻机	131
第二节 模锻工艺及模锻件分类	133
一、长轴类锻件	133
二、短轴类(圆饼类)锻件	135
三、顶锻类锻件	136
四、复合类型锻件	136
第三节 模锻件图设计	136
一、锤上模锻锻件图设计	137
二、热模锻压力机上模锻件图设计特点	144
三、螺旋压力机上模锻件图设计特点	145
四、平锻机上模锻件图设计特点	146
第四节 模锻工艺过程制定的内容和模锻工艺方案选择	148
一、模锻工艺过程制定的内容	148
二、模锻工艺方案选择	148
第五节 模锻变形工步的确定	151
一、长轴类锻件制坯工步选择	151
二、短轴类锻件制坯工步选择	156
三、顶锻类锻件变形工步确定	157
第六节 坯料尺寸的确定	162
一、长轴类锻件	162
二、短轴类锻件	164
三、顶锻类锻件	164
第七节 设备吨位的确定	165
一、模锻锤吨位的确定	165
二、热模锻压力机吨位的确定	168
三、螺旋压力机吨位的确定	168
四、平锻机吨位的确定	169
第八章 锻模设计	170
第一节 锤用锻模	170
一、模锻模膛设计	170
二、制坯模膛设计	178
三、锻模结构设计	185
第二节 热模锻压力机用锻模	197
一、模膛设计特点	198
二、锻模结构特点	201
第三节 螺旋压力机用锻模	207

一、锻模设计特点.....	208	二、模膛的尺寸精度和磨损.....	252
二、锻模结构特点.....	210	三、模具温度和锻件温度的波动.....	252
第四节 平锻机用锻模.....	215	四、模具和锻件的弹性变形.....	253
一、平锻模的固定及固定空间.....	215	五、锻件的形状与尺寸.....	253
二、平锻模结构设计特点.....	217	六、成形方案.....	253
三、模膛设计.....	217	七、模膛和模具结构的设计.....	253
第五节 自由锻锤上模锻与胎模锻锻模.....	222	八、润滑情况.....	253
一、胎模锻锻模.....	222	九、设备.....	254
二、固定模锻锻模.....	222	十、工艺操作.....	254
第六节 锻模材料.....	225	第三节 精密模锻的成形方法.....	254
一、锤锻模用材料.....	225	第四节 关于精密模锻时模膛充填问题的分	
二、摩擦压力机锻模用材料.....	226	析.....	256
三、热模锻压力机锻模用材料.....	226	第五节 精密模锻工艺设计特点.....	256
四、平锻机锻模用材料.....	227	一、精锻件图的设计特点.....	257
五、液压机锻模用材料.....	227	二、加热、清理和冷却.....	257
第七节 锻模设计实例.....	228	第六节 精密模锻模具设计特点.....	259
一、锻件图设计.....	228	一、模具结构类型.....	259
二、计算锻件的主要参数.....	229	二、模膛设计中的几个问题.....	261
三、锻锤吨位的确定.....	229	三、模具的强度设计.....	262
四、确定飞边槽的型式和尺寸.....	230	四、模具的刚度问题.....	263
五、终锻模膛设计.....	230	第七节 精密模锻的润滑.....	264
六、预锻模膛设计.....	230	第八节 精密模锻实例.....	265
七、绘制计算毛坯图.....	231	一、直齿圆锥齿轮的精密模锻.....	265
八、制坯工步选择.....	234	二、十字轴闭塞式锻造.....	267
九、确定坯料尺寸.....	234	第十一章 高合金钢和有色金属的锻造	
十、制坯模膛设计.....	235	特点.....	269
十一、锻模结构设计.....	236	第一节 高合金钢的分类和锻造特点.....	269
十二、连杆模锻工艺流程.....	237	一、高合金钢的分类.....	269
第九章 模锻的后续工序.....	238	二、高合金钢的锻造特点.....	269
第一节 切边、冲孔及其模具设计.....	238	第二节 高速钢的锻造.....	270
一、切边和冲孔的基本方式及模具类		一、对高速钢使用性能的要求.....	270
型.....	238	二、高速钢的碳化物偏析及其对性能的影响.....	270
二、切边模.....	239	三、高速钢锻造前的加热.....	271
三、冲孔模和切边冲孔复合模.....	243	四、高速钢的锻造方法.....	273
四、切边力和冲孔力的计算.....	244	五、锻后冷却和热处理.....	276
第二节 精压和校正的应用及模具设计.....	245	第三节 不锈钢的锻造.....	276
一、精压.....	245	一、不锈钢的分类.....	276
二、校正.....	247	二、不锈钢的可锻性.....	276
第三节 模锻件的表面清理.....	243	三、各类不锈钢的锻造特点.....	277
第十章 精密模锻工艺.....	250	四、锻造不锈钢的注意事项.....	278
第一节 概述.....	250	第四节 铝合金的锻造.....	280
第二节 关于锻件精度问题的分析.....	251	一、铝合金的可锻性.....	280
一、坯料体积的偏差.....	251		

VI

二、锻造温度范围.....	281	二、搜集基础资料.....	291
三、锻模设计特点.....	281	三、选定评价的技术经济指标.....	292
四、锻造工艺过程.....	282	四、列举可能的方案.....	293
第五节 铜合金的锻造.....	283	五、计算技术参数.....	293
一、铜合金的可锻性.....	283	六、计算经济参数.....	293
二、锻造温度范围.....	283	七、排队、选优.....	293
三、锻造工艺过程.....	285	八、敏感性分析.....	293
第六节 钛合金的锻造.....	287	九、定性分析对比.....	294
一、钛合金的可锻性.....	287	十、可能性分析.....	294
二、锻造温度范围.....	287	十一、结论或决策.....	294
三、锻模设计特点.....	288	第二节 工艺方案确定的原则.....	294
四、锻造工艺过程.....	288	第三节 锻造工艺方案的比较.....	296
第十二章 锻造工艺方案的技术经济分 析.....	291	一、锻件成本估算.....	296
第一节 工艺方案技术经济分析的一般程 序.....	291	二、成本批量曲线及方案比较.....	297
一、确定分析目标.....	291	三、锻件的合理生产批量.....	298
		参考文献.....	299

第一章 绪 论

锻造生产广泛应用于机械、冶金、造船、航空、航天、兵器以及其它许多工业部门，在国民经济中占有极为重要的地位，其主要任务是解决锻件的成形及其内部组织性能的控制，以获得所需几何形状、尺寸和质量的锻件。锻造生产能力及其工艺水平，对一个国家的工业、农业、国防和科学技术所能达到的水平影响很大。

锻造生产初期是用手锤、铁砧靠人力使金属变形的。目前已具有锤上锻造、水压机上锻造、热模锻压力机上锻造、螺旋压力机上锻造、平锻机上锻造等多种工艺。有自由锻和各种各样的模锻。

锻造生产发展的过程是锻造工具和锻件对立统一的过程，两者中锻件经常是最积极和最活跃的一方面。往往由于要生产某一种新的锻件，旧的工具，老的生产方法满足不了要求，便产生了矛盾，于是人们就创造出新的工具和新的生产方法与其相适应，使矛盾双方得到暂时的统一。例如，随着生产的发展，需要生产更大的锻件，原有的手工锻造满足不了要求，于是便出现了锤、水压机……。随着锻件批量的增大及形状愈来愈复杂，一般自由锻满足不了要求，便产生了胎模锻、模锻等。随着对某些大批量生产的锻件少切屑或无切屑的要求，近年来出现了很多高效率、高精度的锻造设备，例如冷锻机、精锻机、热锻机、高速锤等。锻件之所以成为最活跃的因素，是因为它体现了社会发展的要求。当然，每一种新的工具出现以后，它又反作用于锻件，促进锻造生产的发展。随着工业的发展，在锻件和工具之间还将不断出现新的矛盾，随着新矛盾的解决，锻造生产将会得到不断完善和发展。

一、锻造生产的特点及其在国民经济中的作用

一般机器或机械上的金属零件的传统生产过程是：冶炼→制坯→切削加工→热处理。制坯是为切削加工零件提供毛坯。通常有三条途径：一是用铸造方法生产毛坯——铸件；二是将铸锭轧（挤、锻）成一定规格的棒材或型材；三是用锻造方法生产毛坯，将坯料（或直接将锭料）锻成所需形状、尺寸的锻件。在这三种制坯方法中，铸造方法可以提供接近零件形状、尺寸的铸件，但是，由于其组织、性能较差，通常只用于性能要求低的零、部件。后两种方法制坯，由于锭料经受了塑性变形和再结晶，粗大的树枝状结晶组织被破碎，疏松和孔隙被压实、焊合，内部组织和性能得到了较大改善。冶金厂用轧制（挤压）方法生产棒材或型材时，生产率高，但其截面形状通常是简单的圆形或方形。如直接用其加工零件，切削加工量较大，材料损耗多，而金属纤维组织常常被切断，使零件使用性能降低。用锻造方法提供毛坯，则可以克服上述两种方法的弊病。因此，它对很多零件来说，是一种既质量高又经济实用的制坯方法。特别是对性能要求高，形状较复杂的零件，其优越性更为突出。因此，锻造方法得到了愈来愈广泛的应用。例如，发电设备中主轴、转子、叶轮、护环等重要零件均是由锻件制成的。又如，飞机上锻件的重量占85%；坦克上锻件的重量占70%；汽车上锻压件重量占80%；机车上锻压件重量占60%；兵器上大部分零件都是经锻造制成的。

但是，应当看到，在当前这个充满着竞争的年代，为求得生存和发展，每个加工行业都在努力完善自己，因此，上述的统计数字，将不是一成不变的。例如，长期以来，各类曲轴

生产属锻造业的垄断领域，但由于铸造技术的飞速发展，目前，在一些国家，曲轴铸件已取代了部分曲轴锻件。又例如，蜗轮叶片自问世以来，几乎被认为非锻莫属，但现在美国越来越多地采用铸造蜗轮叶片。生产上的这种取代现象，反映了人类社会的发展和科学技术的进步。在这个过程中，锻造业的地位和作用，并没有降低和后退，相反，而是朝着更高的水平发展。近几十年来，锻造行业中出现了冷锻、冷挤、冷精压、精锻、温挤、等温成形、精密辗压、错距旋压等少或无切屑锻造新工艺，其中一些新工艺的加工精度和表面粗糙度已达到了车加工、铣加工、甚至磨加工的水平。例如螺钉、螺母、销钉等标准件，原本是切削加工的产品，现在很多已由锻造加工所代替。一台自动冷锻搓丝机每分钟可生产螺钉120件，相当于8~10台多轴自动车床的生产效率，这不仅节约了大量原材料，而且零件性能得到了较大提高。这说明，锻造行业不仅能提供毛坯，而且已能够直接提供零件。

毫无疑问，随着锻造技术的日益发展，锻造方法在工业生产中的作用，锻造生产对国民经济的贡献将更为重大，锻造方法多用于毛坯生产的现状将会得到改变。随着锻造方法和设备的不断完善和提高以及新的锻压技术的出现，锻造生产的领域将会更加广阔。

二、锻造方法的分类及工艺流程

目前锻造生产设备主要有：自由锻锤、模锻锤、螺旋压力机、水压机、热模锻压力机、平锻机、无砧座锤、高速锤、扩孔机、冷锻机、热锻机、精锻机等。

按所用工具的不同，锻造可分为自由锻和模锻两大类。

只用简单的通用性工具，或在锻压设备的上、下砧间直接使坯料成形而获得所需锻件的方法称为自由锻。根据锻造设备的类型及作用力的性质，自由锻可分为手工锻造、锤上自由锻造和水压机上自由锻造。

利用模具使坯料变形而获得锻件的锻造方法称为模锻。按变形的特点，模锻可分为开式模锻和闭式模锻。按所用设备的不同，模锻可分为锤上模锻、热模锻压力机上模锻、螺旋压力机上模锻、平锻机上模锻、水压机上模锻和高速锤上模锻等。按所生产的锻件的精度等级差别，模锻可分为普通模锻和精密模锻。

锻造工艺流程是指生产一个锻件所经过的锻造生产过程。以模锻为例，其锻造工艺流程是：备料→加热→模锻（可能在一台设备上完成，也可能依次在几台设备上完成）→切边、冲孔→热处理→酸洗、清理→校正。

一种锻件选用哪一种锻造方法生产，与其形状、尺寸、技术要求和批量大小等很多因素有关。

通常，单件、小批生产采用自由锻方法；而批量大时，则采用模锻方法生产。但有些航空等重要产品上的锻件，虽然批量不大，但由于流线和性能等方面的要求，以及要求工艺的一致性，通常也采用模锻方法生产。

大型锻件，由于受设备吨位的限制等原因，通常采用自由锻方法生产。

不同类型的锻件，锻造工艺过程是不一样的。同一锻件，用不同的设备模锻时，由于各种设备的特点不同，模锻工艺方案也往往是不同的。

三、我国锻造生产的历史、现状及发展趋势

早在2500多年前，我国的春秋时期就已应用锻造方法制造生产工具和各类兵器，并已达到了较高的技术水平，例如，在秦始皇陵兵马俑坑的出土文物中有三把合金钢锻制的宝剑，其中一把至今仍光艳夺目，锋利如昔。但是，由于长期的封建统治，我国的生产力长期处于

停滞状态。解放前,我国的机械制造业非常落后,而锻造生产更是其中最落后的一环。当时,我国的锻造生产基本上采用手工锻造,仅少数工厂采用小吨位的自由锻锤,生产一些形状简单的自由锻件。全国仅三、四个铁路机车修理厂有几台3~5t的自由锻锤,这些工厂也都是为英、俄、德等帝国主义国家对我国进行侵略和掠夺而服务的。解放前,我国锻工的劳动条件极为恶劣。

新中国成立后,我国的锻造业可以说是从无到有,从小到大地建立起来了。随着我国工业体系的建立,在我国很多大、中型企业里建立了用近代锻压设备装备起来的锻压车间,较大的设备有5t自由锻锤、120000kN自由锻水压机、16t蒸汽-空气模锻锤、300000kN模锻水压机、10000kN螺旋压力机、120000kN热模锻压力机、20000kN平锻机、40000kN精压机、100kJ无砧座锤、63000kN液压螺旋压力机。并建造了与锻造设备相配套的加热设备,其中一些锻压车间采用了燃气和燃油加热炉,近些年电加热炉得到了愈来愈多的应用。此外,为了减轻工人的劳动强度,在一些锻压车间里还安装了操作机和装、出料机等。

目前我国工业、农业、国防产品中所需的各种锻件基本上都可以自给,其中最大的自由锻件重量达260t。精密锻造工艺已有了一定的发展。计算机辅助设计在锻造生产中已开始应用。

综上所述,建国以来,我国锻造行业已形成了具有自己特点的体系,为发展我国的社会主义经济和巩固国防奠定了有利的基础。

但是我国的锻造生产与先进国家的水平相比还有一定差距,主要表现在:

1)在锻造生产中模锻件所占的比重较低,如美、英、德等发达国家模锻件占锻件总重量的70%以上,而我国尚不足30%。

2)我国锻件专业化生产线的数量和规模少于工业发达国家,而且机械化、自动化的水平也较低。

3)我国的精锻技术水平和大型锻件的生产技术水平与一些工业发达国家相比较低,一些航空产品上的精锻件和重要的大型自由锻件还常常需从国外进口。

4)在计算机辅助设计和辅助制造方面,一些发达国家已进入实用阶段。在新产品研制时,一些发达国家先通过计算机模拟,获得一些重要的优化参数,然后进行工装设计和试验,在这些方面,我国还刚刚起步。

锻造生产发展的趋势是:

1)锻造生产发展的总趋势是使锻件的形状、尺寸和表面质量最大限度地与产品零件相接近,以达到少、无切屑加工的目的,为此应逐步发展和完善精密成形新技术,发展高效精密的锻压设备等。

2)为适应大批量生产的需要,应发展专业化的连续生产线,建立地区性的专门化锻造中心,如轴承锻造中心、齿轮精锻中心、曲轴锻造中心、连杆锻造中心、火车轴锻造中心、台阶轴精锻中心、叶片轮盘精锻中心和标准件锻造中心等,以利于进行技术改造及采用最新设计和先进工艺。

3)为适应新产品开发,缩短研制周期,应发展柔性加工技术和CAD/CAM技术。

CAD是在人的参与下,以计算机为中心的一整套系统,它对模锻工艺及模具进行最优化设计,其中包括资料检索、工艺计算、方案拟定、自动绘图和打出数控加工纸带。CAM也是在人的参与下,计算机对工件的制造进行监督、控制和管理。将CAD的结果通过CAPP(计

计算机辅助加工工艺)直接传送给CAM的系统叫作CAD和CAM的集成,简称为CAD/CAM。

锻模的CAD/CAM的主要优点有:

1)设计速度快,准确性高,且可将设计人员从繁重的重复性劳动中解脱出来。

2)可以把多方面的经验和研究成果集中起来,方便地应用于设计加工,从而提高了设计质量。

3)可以实现多方案比较设计,达到优化的目的。

4)为提高我国机械产品的质量及其在国际上的竞争力,应加强锻件的组织、性能控制,不断提高我国锻件的内在质量。

5)为减轻工人的体力劳动,应不断提高机械化、自动化的水平。

6)为改善劳动条件,根据热源情况,应注意发展以煤气、油、电等为热源的先进加热技术。

四、本课程的性质与任务

“锻造工艺学”是研究如何利用各种锻造方法有效地生产锻件或零件的一门技术科学。人们在长期的生产活动中,在锻造方面已积累了丰富的经验,“锻造工艺学”课程应反映这方面的实践知识,并予以必要的理论分析,即应将塑性变形的一些理论与锻造工艺的实践知识相结合。

通过本课程的学习,应使学生:

1)基本掌握自由锻工艺设计、模锻工艺设计和锻模设计的方法

2)具有初步的进行锻造工艺分析的能力。

3)具有初步的分析和解决锻件质量问题的能力。

“锻造工艺学”课程实践性强,仅靠课堂教学是不够的,必须配合其它教学环节,如专业生产实习、课程实验、课堂讨论、练习、课程设计等,才能有效地完成教学任务。

第二章 锻造用原材料及下料方法

锻造用的金属材料包括碳素钢、合金钢、有色金属及其合金等。按加工状态可分为铸锭、轧材、挤压棒材和锻坯等。大型锻件和某些合金钢的锻造一般直接用铸锭锻制，中小型锻件一般用轧材、挤压棒材和锻坯生产。为便于进行锻件质量分析和控制，对所加工的坯料首先应有所了解。

第一节 锻造用钢锭及型材

一、钢锭的冶炼

冶炼工艺的主要任务是：保证钢液的化学成分符合钢种的要求，提高钢液纯净度或最大限度地减少硫、磷、非金属夹杂物及气体的含量。

大型锻件用的钢锭，主要靠碱性平炉、酸性平炉和电炉冶炼。

碱性平炉是用碱性炉渣炼钢，其优点是对炉料要求不高，这是因为碱性炉渣可排除大量的硫、磷夹杂元素。其缺点是氢在碱性炉渣中的溶解度和扩散能力较大，碱性平炉钢液中含氢量高达6~8ppm(1ppm=1.125cm³/100g)。钢液中非金属夹杂物主要是氧化物和硫化物。

酸性平炉是用酸性炉渣炼钢。酸性炉渣不易去除硫、磷夹杂元素，所以对原料要求较高，应预先进行精选。氢在酸性炉渣中的溶解度和扩散能力较小，因而酸性平炉钢液中的含氢量较低，一般为4~6ppm。钢液中非金属夹杂物主要是硅酸盐，且呈球状分布。

我国生产的汽轮发电机转子锻件所用的钢锭，主要是用双联法冶炼，即先将原料在碱性平炉中冶炼，去除硫、磷夹杂元素，然后再将半成品钢液转入酸性平炉中精炼。双联法冶炼具有碱性平炉与酸性平炉的双重优点，但操作较复杂，生产周期长，成本也比较高。

碱性电炉冶炼是靠高温电弧熔炼。碱性电炉冶炼的周期短，且不受炉气污染的影响。再经还原气氛处理，钢液中的非金属夹杂得到进一步排除，含硫、磷量可降低到0.015%以下。但是碱性电炉钢液中氢含量较高，一般为5~7ppm。

对于重要用途的锻件，为提高钢锭质量，可采用真空冶炼法、电渣重熔法等。详见本书第五章第四节。

二、钢锭的结构

钢锭是由冒口、锭身和底部组成，如图2-1所示。由于钢液在凝固过程中各处的冷却与传热条件很不均匀，钢液是由模壁向锭心、由底部向冒口逐渐冷凝选择结晶，从而造成钢锭的结晶组织、化学成分及夹杂物分布不均。从钢锭纵剖面结构示意图2-1可知，钢锭表层为细小等轴结晶区（亦称激冷区），往里为柱状结晶区，再往里为倾斜树枝状结晶区，心部为粗大等轴结晶区。由于选择结晶的缘故，心部上端聚集着轻质夹杂物和气体，并形成巨大收缩孔，其周围还产生严重疏松。心部底端为沉积区，含有比重[⊖]较大的夹杂物。因此，钢锭

[⊖] 按新标准规定，比重用密度表示，但考虑到行业习惯，此处仍用比重。

的内部缺陷主要集中在冒口、底部及中心部分，其中冒口和底部作为废料应予切除。但由于冒口具有补充锭身的收缩、容纳上浮的夹杂物和气体、纯净锭身的作用，因此，冒口应占钢锭的一定比例。

目前我国锻造用大型钢锭有两种规格，一种是普通锻件用的4%锥度，高径比为1.8~2.3，冒口比例为17%的钢锭；另一种是优质锻件用的11%~12%锥度、高径比为1.5左右、冒口比例为20%~24%的钢锭。锭身呈多角形的钢锭，凝固均匀，可有效防止产生角偏析。大型钢锭有八角形、十二角形和二十四角形等。通常，钢锭愈大，锭身角数愈多。锭身锥度增大，有利于钢液中的夹杂和气体上浮，有利于凝固补缩和减少偏析程度。但是，如果锥度太大，反而会扩大负偏析。

为了提高钢锭的冶金质量，减少缺陷，提高锻造生产率，现在已经设计制造了许多异型钢锭。如锻造长轴类锻件，采用细长型钢锭；锻制圆环形锻件，采用空心钢锭等。

三、钢锭的内部缺陷

钢锭的常见缺陷有：偏析、夹杂、气体、气泡、缩孔、疏松、裂纹和溅疤等，它们的性质、特征和分布情况对锻造工艺和锻件质量都有影响，下面将分别说明。

(1) 偏析 指各处成分与杂质分布的不均匀现象，包括枝晶偏析和区域偏析等。偏析是由于选择性结晶、溶解度变化、比重差异和流速不同造成的。偏析会造成力学性能不均匀和裂纹缺陷。

(2) 夹杂 主要指冶炼时产生的氧化物、硫化物、硅酸盐等非金属夹杂。有时也包括浇注系统不清洁，耐火材料质量不良带入的外来夹渣物。夹杂是一种异相质点，它的存在对热锻过程和锻件质量均有不良影响，它破坏金属的连续性，在应力作用下，在夹杂处产生应力集中，会引发显微裂纹，成为锻件疲劳破坏的疲劳源。如低熔点夹杂物过多地分布于晶界上，在锻造时会引起热脆现象。可见，夹杂不利于铸锭的锻造性能和锻后的力学性能。

(3) 气体 主要指钢锭中的有害气体，如氢、氧等。对于白点敏感钢种，当氢含量高，加上冷却时组织应力作用，容易产生白点缺陷。钢中氢含量高时还将引起脆性，热锻工艺性将明显下降。

(4) 气泡 它主要产生在钢锭的冒口、底部及中心部位。在切除冒口和底部后，只要气泡不是敞开的或气泡内壁未被氧化，通过锻造可以焊合，否则在锻造时会产生裂纹。

(5) 缩孔 它是在最后凝固的冒口区形成，由于冷凝固结晶时没有钢液补充而形成空洞性缺陷组织，同时含有大量杂质，因此必须切除。

(6) 疏松 它主要集中在钢锭中心部位，产生的原因与缩孔相同，它使钢锭组织致密度降低，锻造时要求采用大变形疏松才能消除，否则对锻件的力学性能会产生不良影响。

(7) 溅疤 当采用上注法浇注时，钢液因冲击模底而飞溅到模壁上，溅珠和钢锭不能凝固成一体，形成溅疤。在锻造前必须铲除溅疤，否则会在锻件上形成严重的夹层。

综上所述，钢锭的冶金缺陷与冶炼、浇注过程、冷凝固结晶条件、钢锭模具设计、耐火材

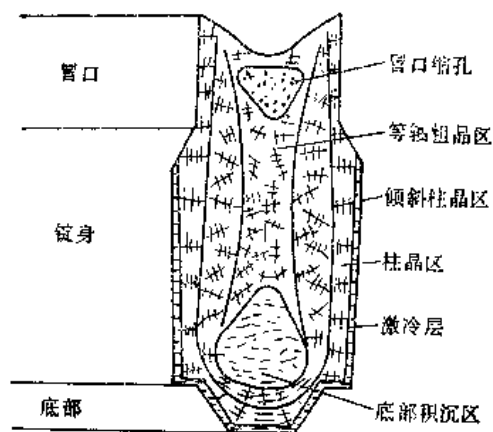


图2-1 钢锭纵剖面组织结构

料质量等有关。

四、型材的常见缺陷

铸锭经过轧制、挤压和锻造加工等方法形成不同断面和尺寸的型材,由于经过变形,型材的组织结构得到改善,变形越充分,残存的铸造缺陷越少,材料的质量和性能越好。但在轧制、挤压和锻造过程中可能产生新的缺陷,下面是型材的常见缺陷:

(1)划痕 金属在轧制过程中,由于各种意外原因在其表面划出伤痕,深度达 $0.2\sim 0.5\text{ mm}$,会影响锻件的质量。

(2)折迭 型材在成形过程中,由于变形过程不合理,已氧化的表层金属被压入金属内部而形成折迭。在折迭处,易产生应力集中,影响锻件的性能。

(3)发裂 铸锭皮下气泡被轧扁、拉长、破裂形成发状裂纹,深度约为 $0.5\sim 1.5\text{ mm}$ 。在高碳钢和合金钢中易产生此缺陷。

(4)结疤 浇注时,钢液飞溅而凝固在铸锭表面,在轧制过程中被辗轧成薄膜而附于轧材表面,其深度约为 1.5 mm 。

(5)碳化物偏析 通常在含碳量高的合金钢中易出现这种缺陷。其原因是钢中的莱氏体共晶碳化物和二次网状碳化物在开坯和轧制时未被打碎和不均匀分布造成的。碳化物偏析会降低钢的锻造性能,容易引起锻件开裂等。

(6)白点 它是隐藏在锻坯内部的一种缺陷,在钢坯的纵向断口上呈圆形或椭圆形的银白色斑点,在横向断口上呈细小裂纹,显著降低钢的韧性。白点的大小不一,长度由 $1\sim 20\text{ mm}$ 不等或更长。一般认为白点是由于钢中存在一定量的氢和各种内应力(组织应力、温度应力、塑性变形后的残余应力等)共同作用下产生的。当钢中含氢量较多和热压力加工后冷却太快时容易产生白点。为避免产生白点,首先应提高冶炼质量,尽可能降低氢的含量;其次在热加工后采用缓慢冷却的方法,让氢充分逸出和减少各种内应力。

(7)非金属夹杂 夹杂物在轧制时被辗轧成条带状。夹杂物破坏了基体金属的连续性,严重时会引起锻件开裂。

(8)铝合金的氧化膜 在熔炼过程中,敞露的熔体液面与大气中的水蒸气或其它金属氧化物相互作用时形成的氧化膜,在浇注时被卷入液体金属内部,铸锭经轧制或锻造,其内部的氧化膜被拉成条状或片状,降低了横向力学性能。

(9)粗晶环 铝合金、镁合金挤压棒材,在其圆断面的外层区域,常出现粗大晶粒,故称为粗晶环。粗晶环的产生原因与许多因素有关,其中主要是由于挤压过程中金属与挤压筒之间的摩擦过大引起。有粗晶环的棒料,锻造时容易开裂,如粗晶环保留在锻件表层,将会降低锻件的性能。因此,锻前通常须将粗晶环车去。

在上述中,划痕、折迭、发裂、结疤和粗晶环等均属于材料表面缺陷,锻前应去除,以免在锻造过程中继续扩展或残留在锻件表面上,降低锻件质量或导致锻件报废。

碳化物偏析、非金属夹杂、白点等属于材料内部缺陷,严重时将显著降低锻造性能和锻件质量。因此,在锻造前应加强材料质量检验,不合格材料不应投入生产。

第二节 下料方法

原材料在锻造之前,一般需按锻件大小和锻造工艺要求分割成具有一定尺寸的单个坯

料。当原材料为铸锭时，由于其内部组织、成分不均匀，通常用自由锻方法进行开坯，然后将锭料两端切除，并按一定尺寸将坯料分割开来。当原材料为轧材、挤材和锻坯时，其下料工作一般在锻工车间的下料工段进行，常用的下料方法有剪切法、锯切法、砂轮片切割法、冷折法、气割法、车削法和剁断法等，各种方法的毛坯质量、材料的利用率、加工效率往往有很大不同。选用何种方法，视材料性质、尺寸大小、批量和对下料质量的要求进行选择。

一、剪切法

剪切下料是一种普遍采用的方法，其特点是效率高、操作简单，断口无金属损耗、模具费用低等。剪切下料通常是在专用剪床上进行，也可以在一般曲柄压力机、液压机和锻锤上进行。

剪切过程如图2-2所示，在刀片作用力影响下，坯料产生弯曲和拉伸变形，当应力超过剪切强度时发生断裂。这种下料方法的缺点是：

- 1) 坯料局部被压扁。
- 2) 端面不平整。
- 3) 剪断面常有毛刺和裂缝。

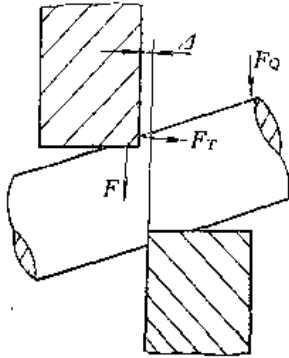


图2-2 剪切示意图

F —剪切力 F_T —水平阻力 F_Q —压板阻力

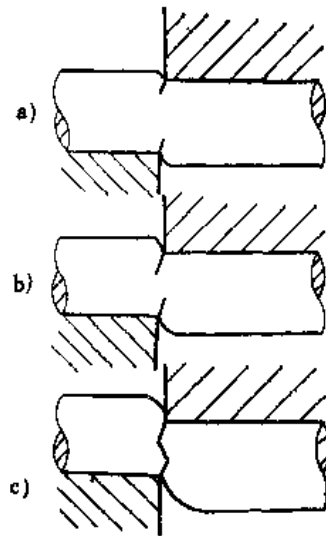


图2-3 剪切下料过程

a) 出现裂缝 b) 裂缝扩展 c) 断裂

剪切下料过程可分为三个阶段，如图2-3所示。剪切第一阶段，刀刃压进棒料，塑性变形区不大，由于加工硬化的作用，刃口端处首先出现裂纹。剪切第二阶段，裂纹随刀刃的深入而继续扩展。剪切第三阶段，在刀刃的压力作用下，上下裂纹间的金属被拉断，造成S形断面。

剪切端面质量与刀刃锐利程度、刃口间隙 Δ 大小，支承情况及剪切速度等因素有关。刃口圆钝时，将扩大塑性变形区，刃尖处裂纹出现较晚，结果剪切端面不平整；刃口间隙大，坯料容易产生弯曲，结果使断面与轴线不相垂直；刃口间隙太小，容易碰损刀刃，若坯料支承不利，因弯曲使上下两裂纹方向不相平行，断口则偏斜。剪切速度快，塑性变形区和加工硬化集中，上下两边的裂纹方向一致，可获得平整断口；剪切速度慢时，情况则相反。

剪床上的剪切装置如图2-4所示，棒料2送进剪床后，用压板3固紧，下料长度 L_0 由可

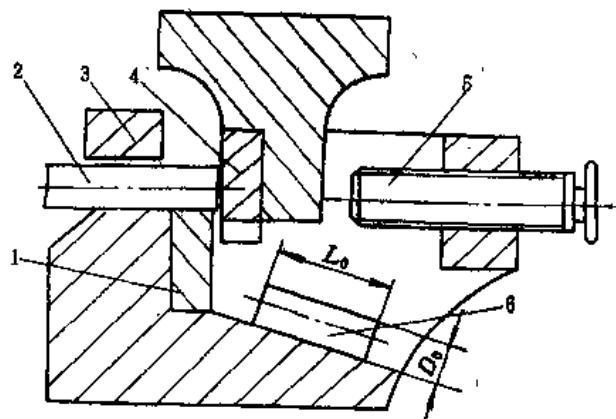


图2-4 剪床下料

1—下刀片 2—棒料 3—压板 4—上刀片
5—定位螺杆 6—坯料

调定位螺杆5定位,在上刀片4和下刀片1的剪切作用下将坯料6剪断。

有关剪切模的设计资料可参阅《锻模设计手册》

按剪切时坯料温度不同分为冷剪切和热剪切。冷剪切生产率高,但需要较大的剪切力。强度高塑性差的钢材,冷剪切时产生很大的应力,可能导致切口出现裂纹,甚至发生崩裂,因此应采用热切法下料。截面大或直径大于120mm的中碳钢,应进行预热剪切。高碳钢及合金钢均应预热剪切。高碳钢和合金钢应按化学成分和尺寸大小确定预热温度,可在400~700℃范围内选定。

为避免坯料在剪切过程中发生弯转,生产中有时采用带支承的剪切下料,如图2-5所示。剪切质量有一定改善,但仍有断口倾斜,端面不平 and 拉裂现象。

为提高坯料剪切精度和端面平整度,近年来生产中采用了轴向加压剪切法。该剪切法目前主要用于剪切小直径的有色金属棒料。

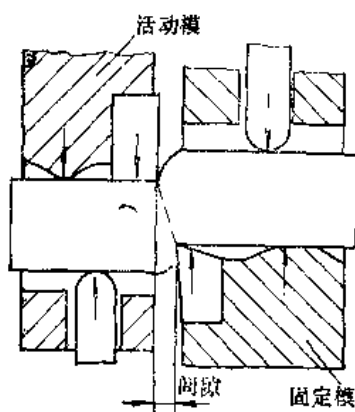


图2-5 带支承的剪切下料

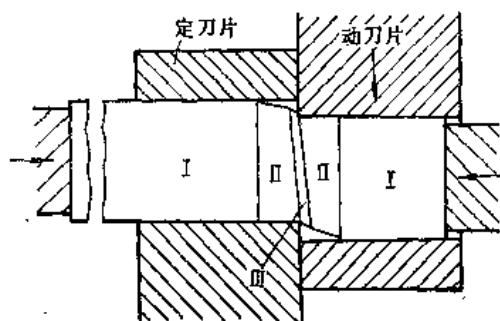


图2-6 轴向加压剪切

图2-6为棒料轴向加压剪切示意图。棒料的内部变形可分为三个区域,其中I区是弹性变形区,II区是塑性变形区,III区是剧烈剪切变形区。由于轴向加压提高了静水压力,改善了材料的塑性,抑制了裂纹的产生和发展,从而有可能使塑性剪切变形延续到剪切的全过程,获得平整光洁的剪切断面。在轴向加压的同时,会使拉缩区金属沿轴向转移时所受的阻力增大,因而减小了剪切的几何畸变,这两方面的效果都可以使剪切质量提高。

试验表明,剪切质量并非随预加轴向力的增大而直线提高,过高的轴向力会使刃口过快磨损,增大了模具和变形金属间粘结的可能性,需根据不同的材料和对剪切质量的要求,选择适当的轴向力。如纯铝棒材的剪切,只需20~30MPa的压力,便可得到良好的剪切质量。当轴向力达到一定值时,棒材或毛坯会因镦粗而堵塞刀孔。因此,在设计剪切模具时,应考虑顶出器,顶出力大致为轴向力的5%~10%。

二、锯切法

锯床下料极为普遍,虽然生产率较低,锯口损耗较大,但下料长度准确,锯割端面平整,特别用在精锻工艺中,是一种主要的下料方法。各种钢、有色合金和高温合金,均可在常温下锯切。

常用的下料锯床有圆盘锯、带锯、弓形锯等。

圆盘锯使用圆片状锯片,锯片的圆周速度为0.5~1.0m/s,比普通切削加工速度低,故锯切生产率较低。锯片厚度一般为3~8mm,锯屑损耗较大。圆盘锯可锯切的材料直径可达

750mm, 视锯床的规格而定。

带锯有立式、卧式、可倾立式等。其生产率是普通圆锯床的1.5~2倍, 切口损耗为2~2.2mm, 主要用于锯切直径在350mm以内的棒料。

弓形锯是一种往复锯床, 锯片厚度为2~5mm, 一般用来锯切直径为100mm以内的棒料。

如采用合适的夹具, 锯床还可锯切各种异形截面材料。

三、砂轮片切割法

砂轮片切割法适于切割小截面棒料、管料和异形截面材料。优点是设备简单, 操作方便, 下料长度准确, 端面平整。但砂轮片耗量大, 易崩碎, 噪声大。

四、折断法

其工作原理如图2-7所示, 先在待折断处开一小缺口, 在压力 F 作用下, 在缺口处产生应力集中使坯料折断。

折断下料法生产率高, 断口金属损耗小, 所用工具简单, 无需专用设备, 尤其适用于硬度较高的钢, 如高碳钢和合金钢, 不过这类钢在折断之前应预热至300~400℃

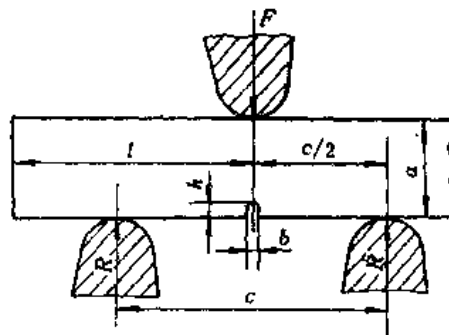


图2-7 折断下料示意图

五、气割法

当其它下料方法受到设备功率或下料断面尺寸的限制时, 可以采用气割法下料。它是利用气割器或普通焊枪, 把坯料局部加热至熔化温度, 逐步使之熔断。

对于含碳量低于0.7%的碳素钢, 可直接进行气割, 含碳量在1%~1.2%的碳素钢或低合金钢均需预热至850~700℃后才可以气割, 高合金钢及有色金属不宜用气割法下料。

气割所用设备简单, 便于野外作业, 可切割各种截面材料, 尤其适用于对厚板材料进行曲线切割。气割法的主要缺点是切割面不平整, 精度差, 断口金属损耗大, 生产效率低等。

六、其它下料方法

其它下料方法还有摩擦锯切割法、电机械锯割法、阳极机械切割法、电火花切割法等, 这里不再一一叙述, 可参考有关手册。

当然, 随着科学技术的发展, 会给下料提供新的途径, 例如将激光技术应用于板料切割, 割缝小, 金属损失小, 而且切割精度高, 甚至可直接得到零件, 如样板零件等。

第三章 锻造的热规范

本章将介绍金属的锻前加热、锻后冷却和热处理及其它有关方面的内容。重点讨论它们的热规范。所谓热规范主要是对加热和冷却的速度而言。这些因素对锻件质量有很大的影响，因此需要掌握它们的规律性，达到控制它们的目的，以获得组织性能优良的锻件。

第一节 金属的锻前加热

一、加热的目的

金属的锻前加热是锻件生产过程中的重要工序之一。能否把金属坯料转化为高质量的锻件，对压力加工领域来说主要面临两个方面的问题：①金属的塑性；②变形抗力。因而锻造生产中，金属坯料锻前大部分需要加热以改善这两个条件。所以，锻前加热的目的可以概括为：提高金属的塑性，降低变形抗力，使其易于流动成形并获得良好的锻后组织。

通常金属加热时，随温度的升高，原子的动能增大，离开其平衡位置的可能性也增大，与常温相比，位错容易运动，滑移容易进行，于是变形抗力降低。另外，高温时原子的活动能力增大，扩散速度加快，易于进行恢复与再结晶，因此金属的塑性提高。有同素异构转变的材料加热时，在一定的温度区间有相态转变，正确地利用这一规律，恰当地选择加热温度，就可以使金属坯料在塑性较好的组织状态下成形。

二、加热方法

根据金属坯料加热时所用的热源不同，目前生产中应用的加热方法有火焰加热法和电加热法两大类。

1. 火焰加热

火焰加热是利用燃料（煤、油、煤气等）燃烧时所产生的热量，通过对流、辐射把热能传给坯料表面。然后由表面向中心热传导，使整个坯料加热。火焰加热方法的优点是：燃料来源方便，加热炉修造容易，加热费用较低，加热的适应性强等。因此，这类加热方法广泛用于各种大、中、小型坯料的加热。其缺点是：劳动条件差，加热速度慢，加热质量差，热效率低等。

2. 电加热

电加热是用电能转换为热能来加热坯料的方法。按其传热方式可分为电阻加热和感应电加热。

（1）电阻加热 电阻加热的传热原理与火焰加热相同。根据电阻发热元件的不同，有电阻炉加热、接触电加热、盐浴炉加热等。

1) 电阻炉加热：电阻炉加热是利用电流通过炉内的电热体产生的热量，加热炉内的金属坯料，其原理如图

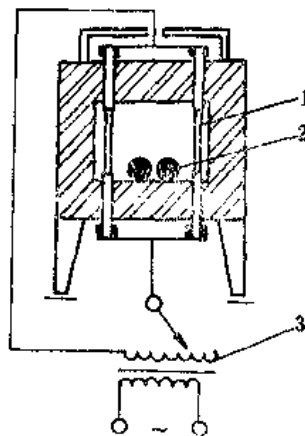


图3-1 电阻炉原理图

3-1所示。这种方法的加热温度受到电热体的使用温度 1—电热体（碳化硅棒） 2—坯料 3—变压器

的限制,热效率也比其它电加热法低。但对坯料加热的适应范围较大,便于实现加热的机械化、自动化,也可用保护气体进行少无氧化加热。

2)接触电加热:接触电加热是以低压大电流直接通入金属坯料,由金属坯料自身的电阻在通过电流时产生的热量,使金属坯料加热,其原理如图3-2所示。为了避免短路,常采取低电压的方法,以得到低电压的大电流。所以接触电加热用的变压器副端空载电压只有2~15V。

接触电加热具有加热速度快、金属烧损少、加热范围不受限制、热效率高、耗电少、成本低、设备简单、操作方便、适用于长坯料的整体或局部加热等优点。但对坯料的表面粗糙度和形状尺寸要求严格,特别是坯料的端部,下料时必须规整,不得产生畸变。此外,加热温度的测量和控制也比较困难。

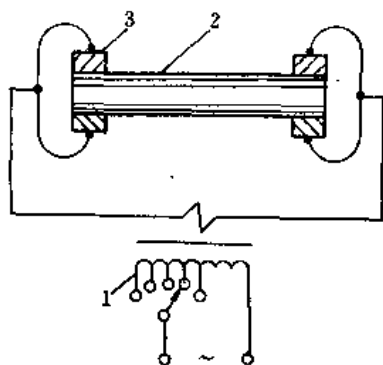


图3-2 接触电加热原理图
1—变压器 2—坯料 3—触头

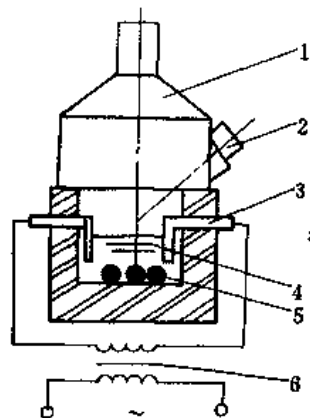


图3-3 电极盐浴炉原理图
1—排烟罩 2—高温计 3—电极
4—熔盐 5—坯料 6—变压器

3)盐浴炉加热:盐浴炉加热是电流通过炉内电极产生的热量把导电介质熔融,通过高温介质的对流与传导将埋入介质中的金属坯料加热,内热式电极盐浴炉原理如图3-3所示。这种方法加热速度快,加热温度均匀,可以实现金属坯料的整体或局部的无氧化加热。但其热效率较低,辅助材料消耗大,劳动条件差。

(2)感应电加热 感应电加热近年来应用越来越广泛,特别是大量用于精密成形的加热。这是因为它具有加热速度快、加热质量好、温度易于控制、金属烧损少、操作简单、工作稳定、便于实现机械化、自动化。这些都有利于锻件质量的提高。另外,感应电加热劳动条件好,对环境没有污染。其缺点是:设备投资费用高、每种规格感应器加热的坯料尺寸范围窄、电能消耗大(大于接触电加热,小于电阻炉加热)。

感应电加热的原理见图3-4,将金属坯料放入通过交变电流的螺旋线圈(感应圈)。线圈产生的感应电动势,在坯料表面形成强大的涡流,使坯料内部的电能直接转变为热能加热坯料。

感应电加热时,电流密度沿坯料横截面的分布情况是:中心电流密度小,表层电流密度大,这种现象称为趋肤效应。电流通过表层的厚度 $\delta(\text{cm})$ (电流透入深度)为:

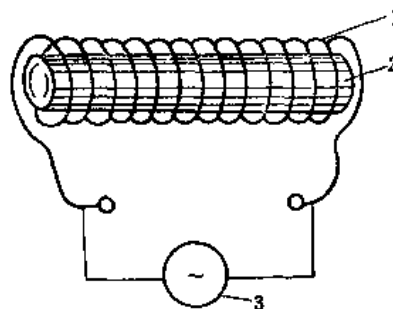


图3-4 感应电加热原理图
1—感应器 2—坯料 3—电源

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (3-1)$$

式中 f ——电流频率(Hz);

μ_r ——相对磁导率, 对各类钢, 在760℃(居里点)以上时, $\mu_r = 1$;

ρ ——电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)。

由于趋肤效应, 表层金属主要是因电流通过而被加热, 心部金属则靠外层热量向内传导加热。对于大直径的坯料, 为了提高加热速度, 应选用低电流频率, 以增大电流透入深度。而对小直径坯料, 由于截面尺寸较小, 可采用较高电流频率, 这样能够提高电效率。

按所用电流频率不同, 感应电加热可以分为: 高频加热($f = 10^5 \sim 10^6 \text{Hz}$), 中频加热($f = 500 \sim 10000 \text{Hz}$)和工频加热($f = 50 \text{Hz}$)。在锻压生产中, 以中频感应电加热应用最多。

上述各种电加热方法的应用范围见表3-1。由于目前我国电力工业还比较薄弱, 锻造生产中还不能大量采用电加热。随着我国电力工业的迅速发展, 为了适应特殊材料锻造工艺的需要, 满足各种精密成形工艺的要求, 今后电加热方法的应用必将日益扩大。

表3-1 各种电加热方法的应用范围

电加热类型	应 用 范 围			单位电能消耗 (kW·h/kg)
	坯料规格	加热批量	适 用 工 艺	
工频电加热	坯料直径大于150mm	大批量	模锻、挤压、轧锻	0.35~0.55
中频电加热	坯料直径为20~150mm	大批量	模锻、挤压、轧锻	0.40~0.55
高频电加热	坯料直径小于20mm	大批量	模锻、挤压、轧锻	0.60~0.70
接触电加热	直径小于80mm细长坯料	中批量	模锻、电镀、卷簧、轧制	0.30~0.45
电阻炉加热	各种中、小型坯料	单件、小批	自由锻、模锻	0.50~1.0
盐浴炉加热	小件或局部无氧化加热	单件、小批	精密模锻	0.30~0.80

加热方法的选择要根据具体的锻造要求和能源情况及投资效益、环境保护等多种因素确定。如对于大型锻件往往以火焰加热为主; 而对于中、小型锻件可以选择火焰加热和电加热。但对于精密锻造应选择感应电加热或其它无氧化加热方法, 如控制炉内气氛法、介质保护加热法、少无氧化火焰加热等。

第二节 金属加热时产生的缺陷及防止措施

金属在加热过程中, 外部热量的输入将引起坯料内部能量状态的变化。这种变化既有提高金属塑性、降低变形抗力等有利于锻造的一面, 又有产生加热缺陷的不利方面。所产生的加热缺陷可分为: 由于坯料外层组织化学状态的变化引起的缺陷, 如氧化和脱碳; 由内部组织结构的异常变化引起的缺陷, 如过热和过烧; 另外, 由于温度在坯料内部分布不均匀引起的内应力(如温度应力, 组织应力)过大产生的坯料开裂等。下面概要地介绍这些缺陷产生的原因和防止措施。

一、氧化

钢料加热到高温时, 其表层的铁离子与炉气中的氧化性气体(O_2 、 CO_2 、 H_2O 和 SO_2)发生

化学反应，使金属表层形成氧化皮的现象，称为氧化（或烧损）。氧化过程的主要化学反应式为：

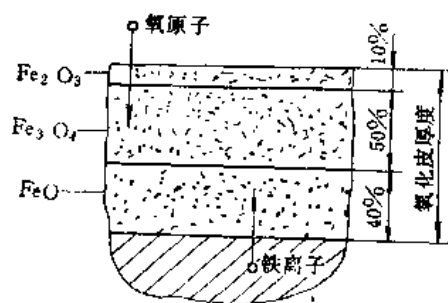
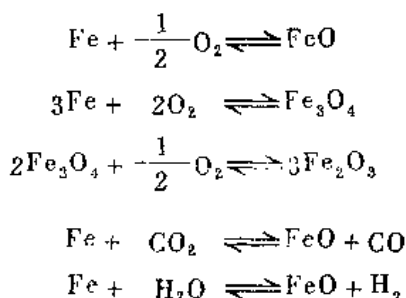


图3-5 氧化铁皮形成过程示意图

氧化过程的实质是一种扩散过程，伴随着钢坯中的铁以离子状态由内部向表面扩散，炉气中的氧以原子状态吸附到钢坯表面并向内部扩散。使氧化反应不断向钢坯内部深入，结果形成由三层不同的氧化铁组成的氧化皮，如图3-5所示。

氧化主要受内因（被加热的金属）和外因（加热环境）两个方面的影响。

内因是金属的化学成分，当含碳量大于0.3%时，由于钢坯表层氧化反应形成的CO降低了氧化性气体对其表层的作用，氧化皮将减少。Cr、Ni、Al、Mo等合金元素能在钢坯的表面形成致密的氧化膜，其透气性很小，阻止了氧化性气体向钢坯内部的扩散，而且其膨胀系数与钢几乎一致，能牢固地附在钢坯的表面而不脱落，阻止了氧化的进行。当Ni、Cr含量为13%~20%时，几乎不产生氧化。

外因包括炉气成分、加热温度和加热时间。

炉气成分：根据炉气的性质，火焰炉的炉内气氛通常分为氧化性气氛、还原性气氛和中性气氛。炉气的性质是由燃烧时的空气供给量决定的，当燃烧条件一定时，燃烧所消耗的空气量是一定的。当空气供给过多时，多余空气中带的氧化性气体使炉内呈氧化性气氛，空气的供给不足时，炉内有过量的CO、H₂而呈还原性气氛。在还原性气氛的炉内加热坯料时，氧化很少甚至不氧化。

加热温度：加热温度升高时，氧化扩散速度加快，氧化烧损也就严重，因此形成的氧化

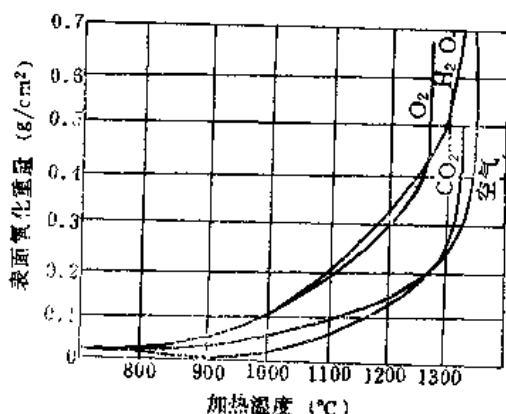


图3-6 加热温度对氧化的影响

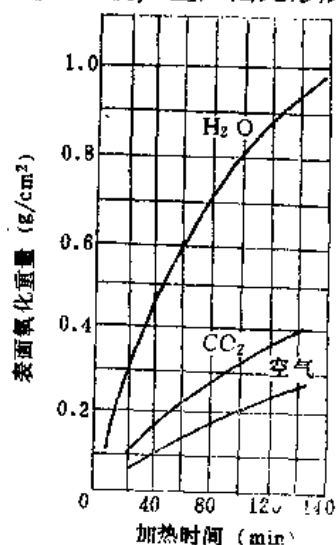


图3-7 加热时间对钢氧化的影响

皮较厚。900℃以前的氧化速度很慢，但当温度超过900~950℃时，氧化加剧，如图3-6所示。

加热时间：钢料处在氧化性介质中的加热时间越长，氧化扩散量越大，于是形成的氧化

皮也越厚（如图3-7所示）。特别是高温阶段的加热，时间越长，其影响越大。

金属的氧化烧损危害很大，一般情况下，钢料每加热一次便有1.5%~3%的金属被烧掉，见表3-2。同时氧化皮还加剧模具的磨损，降低锻件的表面质量。残留氧化皮的锻件，在机械加工时刀具刃口很快磨损。因此减少或消除加热时金属的氧化烧损对锻造生产来说是非常重要的。在加热工艺上通常采用如下措施：

表3-2 采用不同加热方法时钢的一次烧损率

炉 型	烧损率 δ (%)	炉 型	烧损率 δ (%)
室式炉 (煤炉)	2.5~4	电阻炉	1~1.5
油 炉	2~3	接触电加热和感应加热	<0.5
煤气炉	1.5~2.5		

1)在保证锻件质量的前提下，尽量采用快速加热，缩短加热时间，尤其是缩短高温下停留的时间，在操作时尽量采用少装勤装的方法。

2)在燃料完全燃烧的条件下，尽可能减少空气过剩量，以免炉内剩余氧气过多，并注意减少燃料中的水分。

3)炉内应保持不大的正压力，防止冷空气的吸入。

另外，采用少无氧化加热也是减少或消除氧化的有利措施之一（见本章第五节）。

二、脱碳

钢料在加热时，其表层的碳和炉气中的氧化性气体（如 O_2 、 H_2O 、 CO_2 等）及某些还原性气体（如 H_2 ）发生化学反应，造成了钢料表面含碳量的降低，这种现象称为脱碳。脱碳的实质是高温下钢中的碳与氢或氧发生作用而产生甲烷或一氧化碳。其化学反应式如下：



脱碳也是扩散作用的结果。一方面炉气中的氧向钢内扩散；另一方面钢中的碳向外扩散，这样便使钢表面形成了含碳量低的脱碳层。从整个过程来看，脱碳层只在脱碳速度超过氧化速度时才能形成，或者说，在氧化作用相对较弱的情况下，可形成较深的脱碳层。

影响脱碳的因素与氧化一样，受钢的化学成分等内因和加热时的炉气成分、加热温度和时间等外因两方面的影响。

化学成分：钢的化学成分对脱碳的影响是，钢中含碳量越高，脱碳的倾向就越大。某些合金元素使脱碳层加深，如C、W、Al等。而有些合金元素则能阻止脱碳，如Cr、Mn等。但是，Si、Ni和V对脱碳无影响。

炉气成分：炉气成分中脱碳能力最强的介质是 H_2O (汽)，其次是 CO_2 和 O_2 ，最后是 H_2 。而CO的含量增加可减少脱碳。一般在中性介质或弱氧化性介质中加热可减少脱碳。

加热温度：钢在氧化性气氛中加热时，既产生氧化，同时也产生脱碳。在温度低于1000℃时，由于钢料表面的氧化皮阻碍碳的扩散，因此脱碳过程比氧化慢。随着温度的升高，氧化速度加快，同时脱碳速度也加快，但是，此时氧化皮失去保护能力，因此达到某一

温度后，脱碳就比氧化更激烈。如GCr15钢在1100~1200℃时产生强烈的脱碳现象。

加热时间：加热时间越长，脱碳层就越厚，但二者不成比例关系。如高速钢在1000℃下经0.5h，脱碳层达0.4mm，经4h达1.0mm，经12h达1.2mm。

对大多数钢来说，脱碳使其性能变坏，因此，一般将脱碳视为缺陷。特别是高碳工具钢、轴承钢、高速钢及弹簧钢的脱碳更是严重的缺陷。

脱碳使锻件的表面变软，强度和耐磨性降低。当脱碳层厚度小于加工余量时，对锻件性能没有什么危害，反之就要影响到锻件质量。因此，在进行精密锻造生产时，坯料锻前加热应避免产生脱碳。

一般用于防止氧化的措施，同样也可用于防止脱碳。

三、过热

当坯料加热温度超过始锻温度，或坯料在高温下停留时间过长而引起晶粒粗大的现象称为过热。晶粒开始急剧长大的温度叫做过热温度。钢的过热温度主要取决于它的化学成分，对于不同的钢种，其过热温度也不同（见表3-3）。通常钢中有些元素会增加其过热倾向，如C、Mn、S、P等元素，而Ti、W、V、N等元素可减小钢的过热倾向。

表3-3 一些钢的过热温度

钢 种	过热温度(°C)	钢 种	过热温度(°C)
45钢	1300	18CrNiWA	1300
45Cr	1350	25MnTiB	1350
40MnB	1200	GCr15	1250
40CrNiMo	1250~1300	60Si2Mn	1300
42CrMo	1300	W18Cr4V	1300
25CrNiW	1350	W6Mo5Cr4V2	1250
30CrMnSiA	1250~1300		

生产实践表明，某些钢的过热对锻造过程的影响不是很大，甚至过热较严重的钢材（只要没有过烧），在足够大的变形程度下一般可以消除。过热的结构钢经正常的热处理（正火、淬火）之后，其组织可以改善，性能也随之恢复。但是，有些过热的钢，如果锻造时的变形度较小，终锻温度偏高，则锻后将出现非正常组织（即过热组织）。

过热的组织由于晶粒粗大，要引起力学性能（特别是冲击韧性）的降低。这是因为与细晶相比，粗晶粒钢晶界总面积减少，从而使晶界杂质密度增加，晶粒之间的结合力减弱。

近年来在对过热的大量研究中，人们将钢的过热又分为“稳定过热”和“不稳定过热”。例如文献[23]在对具有相变重结晶的钢的研究中，即将这类钢的过热分为“稳定过热”和“不稳定过热”。

所谓不稳定过热，是指由于单纯的原高温奥氏体晶粒粗大形成的过热。这种过热用一般热处理方法可以消除。

所谓稳定过热，是指钢经加热后除原高温奥氏体粗大外，沿奥氏体晶界大量析出第二相（包括杂质元素组成的化合物，如硫化物、碳化物、碳氮化物等）质点以及其它促使原高温奥氏体晶界稳定化的因素。这种过热用一般的热处理方法不易改善或消除。

因此，为避免锻件产生过热，在锻造工艺上通常采用如下措施：

- 1) 严格控制加热温度, 尽可能缩短高温保温时间, 加热时坯料不要放在炉内局部高温区。
- 2) 在锻造时要使锻件有足够的变形量, 因为足够的变形量能够破碎粗大的奥氏体晶粒和分散晶界上的析出相。对于需要预制坯的模锻件, 应保证终锻时锻件各部分有适当的变形量。
- 3) 测温用的热工仪表必须校正准确。

四、过烧

当金属加热到接近其熔化温度(称为过烧温度), 并在此温度下停留时间过长时, 不仅晶粒粗大, 而且由于晶界发生局部熔化, 氧化性气体进一步侵入晶界, 使晶间物质氧化, 形成易熔共晶氧化物, 使晶粒间结合完全破坏。因此对过烧的坯料进行锻造时, 轻则在表面引起网络状裂纹, 一般称之为“龟裂”, 严重时将导致坯料破裂成碎块, 其断口无金属光泽。所以, 过烧是加热的致命缺陷, 最后坯料只能报废。如果坯料只是局部过烧, 可将过烧的部分切除掉。

钢的过烧温度主要受其化学成分的影响, 并且因不同的钢种而异, 见表3-4。通常钢中的Ni、Mo等元素易使其产生过烧。而Al、Cr、W等元素则能减小其过烧。

表3-4 一些钢的过烧温度

钢 种	过烧温度(°C)	钢 种	过烧温度(°C)
45	>1400	W18Cr4V	1360
45Cr	1390	W6Mo5Cr4V	1270
30CrNiMo	1450	2Cr13	1180
4Cr10Si2Mo	1350	Cr12MoV	1160
50CrV	1350	T8	1250
12CrNi3A	1350	T12	1200
60Si2Mn	1350	GH135合金	1200
60Si2MnBE	1400	GH36合金	1220
GCr15	1350		

减少和防止过烧的办法就是严格遵守加热规范, 特别是要控制出炉温度及在高温时的停留时间。

五、裂纹

如果钢在加热过程的某一温度下, 内应力超过它此时的强度极限, 那么就要产生裂纹。通常内应力有温度应力、组织应力和残余应力。

1. 温度应力

钢料加热时, 其表面和中心之间存在的温度差引起不均匀膨胀, 使表面形成压应力, 中心部分形成拉应力。这种由于温度不均而产生的内应力叫温度应力。温度应力的大小与钢的性质、断面温度差有关。一般只有在钢料出现温度梯度, 并处于弹性状态时, 才会产生较大的温度应力并引起开裂。钢在温度低于500~550℃时处于弹性状态, 因此当其处于这个温度范围以下时, 必须考虑温度应力的影响。因为这时, 如果温度应力超过强度极限, 就会产生裂纹而造成钢料的破坏。当温度超过500~550℃时, 钢料塑性较好, 抗力较低, 通过局部塑性变形可以使温度应力得到部分消除, 此时就不会造成钢料破坏了。

温度应力一般都是三向应力状态。生产实践和理论计算表明, 圆柱坯料中心部分产生的轴向温度应力较切向和径向温度应力都大(而且是拉应力), 因此钢料加热时心部产生裂纹

的倾向性较大。温度应力在钢料断面上的分布如图3-8所示。其值可按式计算:

圆柱坯料表面的温度应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= 0 \\ \sigma_z = \sigma_\theta &= -\frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\Delta t}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

圆柱坯料中心的温度应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r = \sigma_\theta &= \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\Delta t}{4} \\ \sigma_z &= \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\Delta t}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

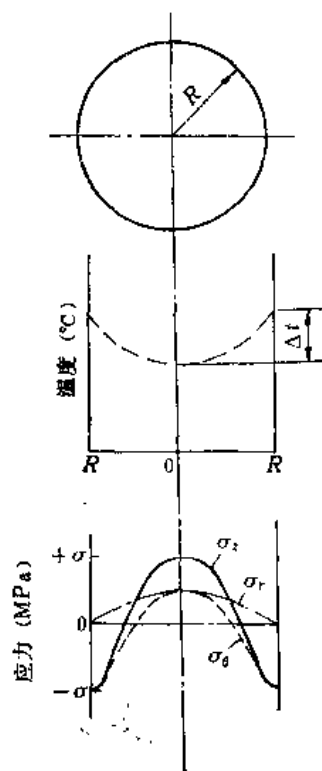


图3-8 钢料加热过程瞬间温度应力沿断面分布示意图

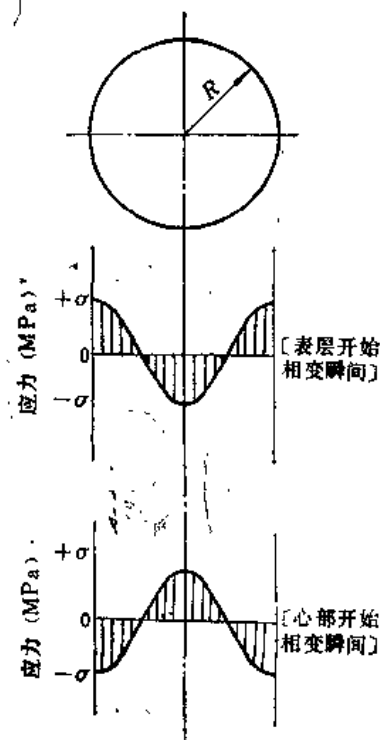


图3-9 钢料加热过程切向组织应力沿断面分布示意图

式中 σ_z ——轴向应力(MPa);
 σ_θ ——切向应力(MPa);
 σ_r ——径向应力(MPa);
 Δt ——坯料断面最大温差(°C);
 α ——钢料的线膨胀系数(°C⁻¹);
 E ——弹性模量(MPa);
 ν ——泊松比。

理论研究表明, 温度应力随时间的变化规律与断面温差随时间的变化规律相同。材料的断面尺寸越大, 则其温差也越大, 因而产生的温度应力也越大。

2. 组织应力

具有相变的钢在加热过程中, 表层首先发生相变, 心部后发生相变, 并且相变前后组织

的比容发生变化,这样引起的内应力叫组织应力。

组织应力也是三向应力状态,其中切向应力最大,其在钢料截面上的分布如图3-9所示。由图可知,随温度的升高,表层先发生相变由珠光体转变为奥氏体,比容减小,于是在表层引起拉应力,心部为压应力。此时组织应力与温度应力反向,使总的应力值减小。当温度继续升高时,心部也发生相变,此时引起的组织应力是心部为拉应力,表层为压应力,虽然与温度应力同向,使总的应力值增大,但这时钢料已接近高温,不会造成开裂。

3. 残余应力

钢锭在凝固和冷却过程中,由于外层和中心冷却次序不同,各部分间的相互牵制还要产生残余应力。外层冷却快,中心冷却慢,因此残余应力在外层为压应力,在中心部分为拉应力,其符号与温度应力相同,所以,钢锭加热时,对残余应力应给予足够的重视。

总之,钢料的加热,特别是在 $500\sim 550^{\circ}\text{C}$ 以下加热时,应避免加热速度过快,因为此时钢料的塑性较低,温度应力较大,在温度应力和坯料中原有的残余应力的共同作用下,有可能产生裂纹。所以,为防止裂纹的产生,对钢料的加热,特别是断面尺寸大的大钢锭和导热差的高合金钢的加热,其低温阶段必须缓慢加热,并且制定和遵守正确的加热规范。

第三节 锻造温度范围的确定

钢的锻造温度范围,是指开始锻造温度(始锻温度)和结束锻造温度(终锻温度)之间的一段温度区间。

通过长期生产实践和大量试验研究,现有金属材料的锻造温度范围均已确定,可从有关手册查得。但是随着金属材料科学技术不断发展,今后必定会有更多的新的金属材料需要锻造。因此,仅会选用锻造温度范围是不够的,还必须掌握确定锻造温度范围的科学方法。

确定锻造温度范围的基本原则是:要求在锻造温度范围内金属具有良好的塑性和较低的变形抗力;能锻出优质锻件;锻造温度范围尽可能宽广些,以便减少加热火次,提高锻造生产率。

确定锻造温度范围的基本方法是:以合金平衡相图为基础,再参考塑性图、抗力图和再结晶图,由塑性、质量和变形抗力三个方面加以综合分析,从而定出始锻温度和终锻温度。

一般来讲,碳钢的锻造温度范围,根据铁-碳平衡图便可直接确定。对于多数合金结构钢的锻造温度范围,可以参照含碳量相同的碳钢来考虑。但对塑性较低的高合金钢,以及不发生相变的钢种(如奥氏体钢、铁素体钢),则必需通过试验,才能订出合理的锻造温度范围。

一、始锻温度的确定

确定钢的始锻温度,首先必须保证钢无过烧现象。因此对碳钢来讲,始锻温度应比铁-碳平衡图的固相线低 $150^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$,如图3-10所示。此外,还应考虑到坯料组织、锻造方式和变形工艺等因素。

如以钢锭为坯料时,由于铸态组织比较稳定,产生过烧的倾向性小,因此,钢锭的始锻温度比同钢种钢坯和钢材要高 $20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。采用高速锤精锻时,因为高速变形产生很大的热效应,会使坯料温度升高以致引起过烧,所以,其始锻温度应比通常始锻温度约低 100°C 左右^[62],对于大型锻件锻造,最后一火的始锻温度,应根据剩余锻比确定,以避免锻后晶粒粗大,这对不能用热处理方法细化晶粒的钢种尤为重要。

二、终锻温度的确定

在确定终锻温度时,如果温度过高,会使锻件晶粒粗大,甚至产生魏氏组织。相反,终锻温度过低,不仅导致锻造后期加工硬化严重,可能引起断裂,而且会使锻件局部处于临界变形状态,产生粗大晶粒。因此,通常钢的终锻温度应稍高于其再结晶温度。这样,既保证坯料在终锻前仍有足够的塑性,又可使锻件在锻后能够获得较好的组织性能。

按照上述原则,碳钢的终锻温度约在铁-碳平衡图 A_1 线以上 $25\sim 75^\circ\text{C}$,如图3-10所示。由图可见,中碳钢的终锻温度虽处于奥氏体单相区,组织均匀,塑性良好,完全满足终锻要求。低碳钢的终锻温度处于奥氏体和铁素体的双相区内,但因两相塑性均较好,不会给锻造带来困难。高碳钢的终锻是处于奥氏体和渗碳体的双相区,在此温度区间锻造,可借助塑性变形作用将析出的渗碳体破碎呈弥散状,以免高于 A_{cm} 线终锻而使锻后沿晶界析出网状渗碳体。

还须指出,钢的终锻温度与钢的组织、锻造工序和后续工序等也有关。

对于无相变的钢种,由于不能用热处理方法细化晶粒,只有依靠锻造来控制晶粒度。为了使锻件获得细小晶粒,这类钢的终锻温度一般偏低。

当锻后立即进行锻件余热热处理时,终锻温度应满足余热热处理的要求。如锻件的材料为低碳钢,终锻温度稍高于 A_3 线。

一般精整工序的终锻温度,允许比规定值低 $50\sim 80^\circ\text{C}$ 。

各类钢的锻造温度范围概括于表3-5。从表中可看出,各类钢的锻造温度范围相差很大。一般碳素钢的锻造温度范围比较宽,达到 $400\sim 580^\circ\text{C}$ 。而合金钢,尤其是高合金钢则很窄,只有 $200\sim 300^\circ\text{C}$ 。因此在锻造生产中,高合金钢锻造最困难,对锻造工艺的要求甚为严格。

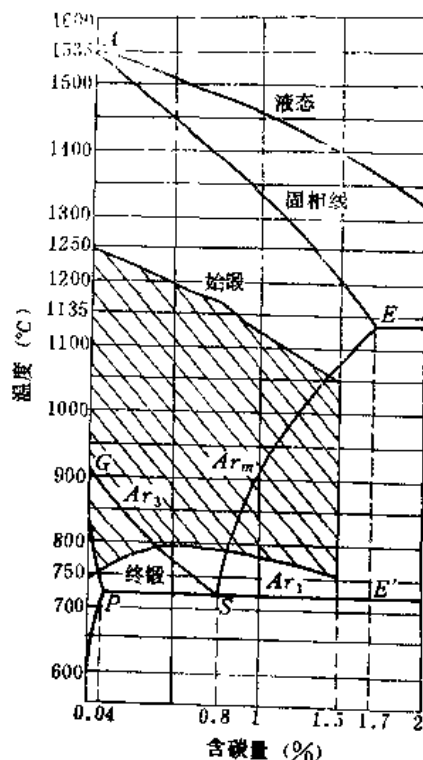


图3-10 碳钢的锻造温度范围

表3-5 各类钢的锻造温度范围

钢 种	始锻温度($^\circ\text{C}$)	终锻温度($^\circ\text{C}$)	锻造温度范围($^\circ\text{C}$)
普通碳素钢	1280	700	580
优质碳素钢	1200	800	400
碳素工具钢	1100	770	330
合金结构钢	1150~1200	800~850	350
合金工具钢	1050~1150	800~850	250~300
高速工具钢	1100~1150	900	200~250
耐热钢	1100~1150	850	250~300
弹簧钢	1100~1150	800~850	300
轴承钢	1080	800	280

第四节 金属的加热规范

钢料在锻前加热时,应尽快达到所规定的始锻温度。但是,如果温度升得太快,由于温度应力过大,可能造成钢料破裂。相反,升温速度过于缓慢,会降低生产率,增加燃料消耗。因此在实际生产中,金属坯料应按一定的加热规范进行加热。

所谓加热规范是指坯料从装炉开始到加热完了整个过程对炉子温度和坯料温度随时间变化的规定。为了应用方便和清晰起见,加热规范采用炉温-时间的变化曲线(又称加热曲线)来表示。锻压生产常用的加热规范有:一段、二段、三段、四段及五段加热规范。其加热曲线如图3-11所示。

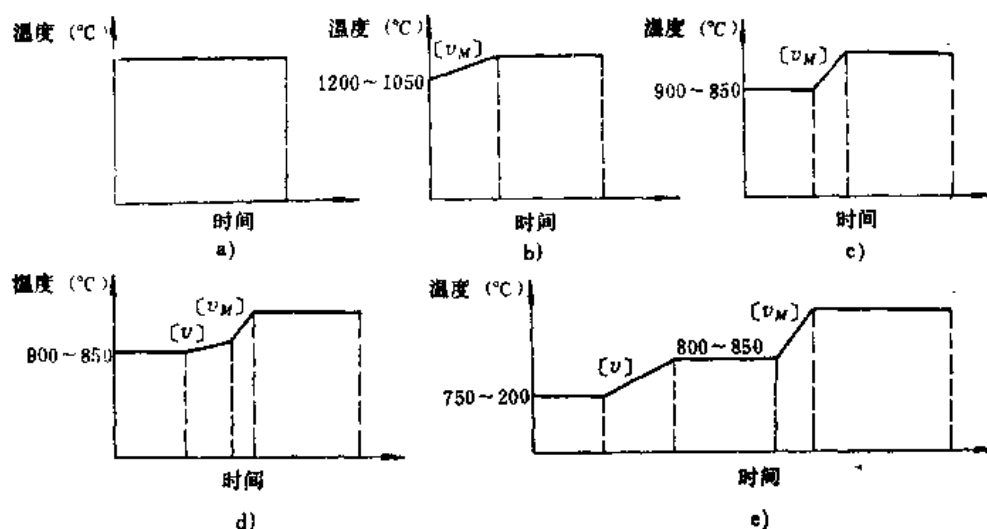


图3-11 锻造加热曲线类型

a)一段加热曲线 b)二段加热曲线 c)三段加热曲线 d)四段加热曲线 e)五段加热曲线
[v]金属允许的加热速度 [v_M]最大可能的加热速度

一、加热规范制定的原则及方法

加热规范通常包括装炉温度、加热各个阶段炉子的升温速度、各个阶段加热(保温)时间和总的加热时间,以及最终加热温度、允许的加热不均匀性和温度头等。一般情况下,制定正确的加热规范应保证金属在加热过程中不产生裂纹、过热和过烧,加热均匀、氧化脱碳少,加热时间短、生产效率高和节省燃料等,总之应保证高效、优质、低消耗。

为了更好地阐明加热规范制定的原则和方法,本节介绍五段加热曲线(图3-12),它适用于高合金钢冷锭及大型碳素结构钢冷锭的加热。在加热规范中,核心问题是确定加热过程中不同时期的加热温度、加热速度和加热时间,现结合图3-12讨论如下:

1. 装炉温度

通常装炉温度对热扩散性好及断面尺寸小的钢料影响不大,但对热扩散性差及断面尺寸大的钢料,则应限制装炉温度,尤其对大钢锭及高合金钢,除限制装炉温度外,还应在该温度下进行保温。因为在开始预热阶段,钢料温度低、塑性差,而且在200~400℃范围内存在

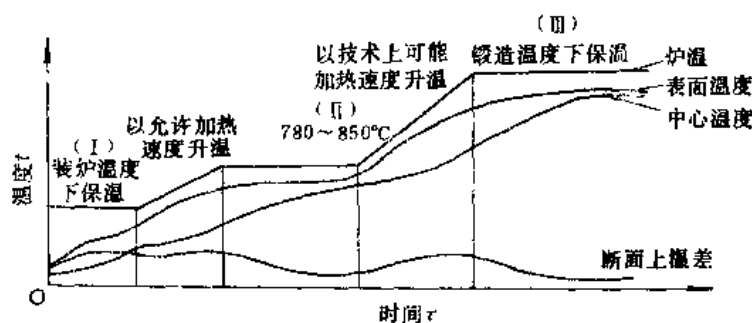


图3-12 大钢锭的加热曲线

兰脆区。但在450℃以后，塑性指标 δ 、 ψ 显著提高，而 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 逐渐降低。所以，一般高速钢的装炉温度为450~600℃，高锰钢为400~450℃。

装炉温度可根据温度应力和钢料断面最大允许温差 $[\Delta t]$ 来确定。圆柱体坯料的最大允许温差 $[\Delta t]$ (℃)可用下式计算。

$$[\Delta t] = \frac{1.4[\sigma]}{\alpha E} \quad (3-4)$$

式中 $[\sigma]$ ——许用应力(MPa)，可按相应温度的强度极限计算；

α ——线膨胀系数(℃⁻¹)；

E ——弹性模量(MPa)。

由上式得出的最大允许温差，再按不同热阻条件下最大允许温差与允许装炉温度的理论计算曲线(图3-13)，确定出允许装炉温度。通常上述计算值偏低，因此确定装炉温度还应参考有关经验资料与实验数据。图3-14是通过实践总结的钢锭装炉温度及在该温度下的保温时间。该图中关于钢号的分组见表3-9。

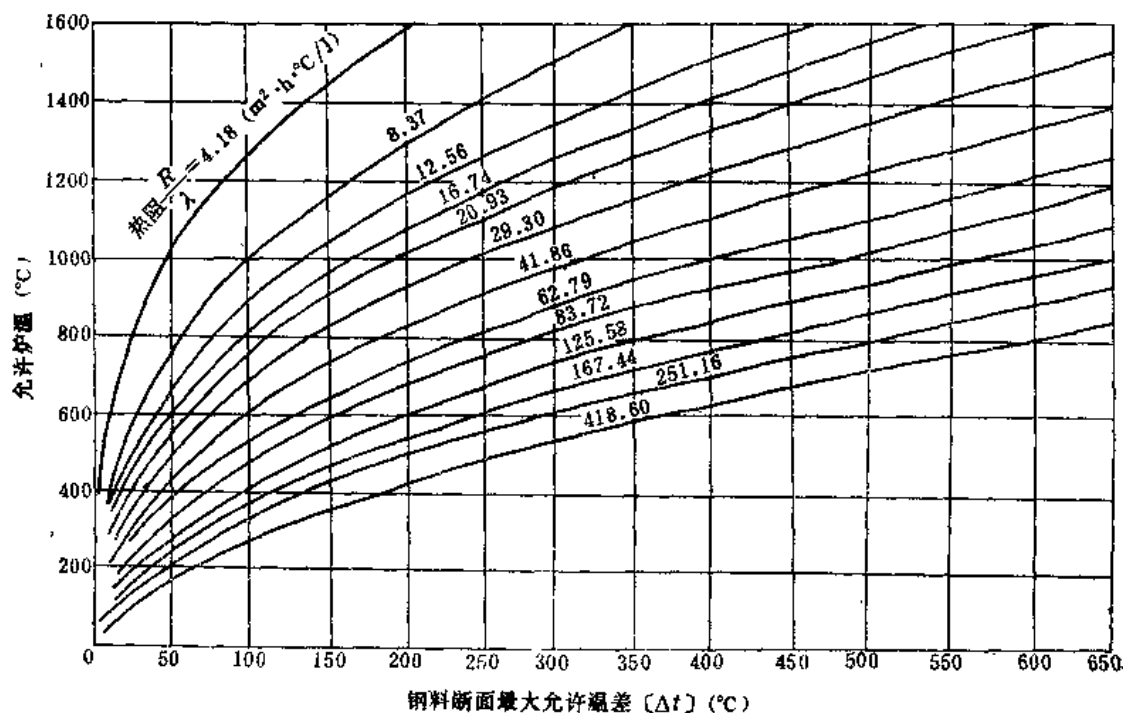


图3-13 圆柱坯料允许装炉温度与最大允许温差的关系

R —坯料半径 λ —导热系数

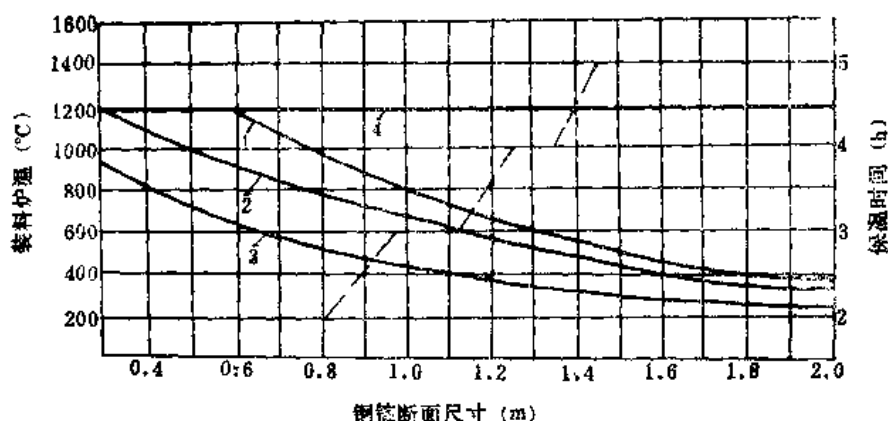


图3-14 钢锭加热的装炉温度及保温时间

1—I组冷锭的装炉温度 2—II组冷锭的装炉温度 3—III组冷锭的装炉温度 4—热锭的装炉温度
——装炉温度 ---在装炉温度下的保温时间

2. 加热速度

加热速度一般有两种表示方法，一种是采用单位时间内金属表面温度升高的多少 ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)；另一种用单位时间内金属截面热透的数值 (mm/min)。

金属在加热过程中，要经常用到最大可能的加热速度和允许的加热速度。前者是指炉子按最大供热能量升温时所能达到的加热速度，它与炉子的结构型式、燃料种类及燃烧情况、坯料的形状和尺寸及其在炉中的放置方法等有关。后者是指加热过程中，在不破坏金属完整性的条件下所允许的加热速度，它主要取决于加热过程中产生的温度应力，而温度应力的六大小又与金属的热扩散率、热容量、线膨胀系数、力学性能及坯料尺寸等有关。圆柱体坯料允许的加热速度 $[v]$ 通常可用下式计算：

$$[v] = \frac{5.6\kappa[\sigma]}{\alpha E R^2} \quad (3-5)$$

式中 κ ——热扩散率 (m^2/h)，与导热系数 λ ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)、比热容 c ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$) 及密度 ρ (kg/m^3) 的大小有关，即 $\kappa = \lambda / c\rho$ ；

$[\sigma]$ ——许用应力 (MPa)，可用相应的强度极限计算；

α ——线膨胀系数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)；

E ——弹性模量 (MPa)；

R ——坯料半径 (m)。

由上式可以看出，金属的热扩散率和强度极限越大，允许的加热速度越大；金属坯料的断面尺寸、弹性模量和线膨胀系数越大，允许的加热速度越小。通常碳钢的热扩散率比高合金钢大，虽然强度极限比高合金钢低，但它产生的温度应力相对较小，因此碳钢允许的加热速度比高合金钢大。

由于钢材或钢锭有内部缺陷存在，实际允许的加热速度要比计算值低。但是，对于热扩散率高、断面尺寸小的钢料，即使炉子按最大可能的加热速度加热，也很难达到实际允许的加热速度。因此，对于碳素钢和有色金属，其断面尺寸小于 200mm 时，根本不用考虑允许的加热速度。然而，对于热扩散率低、断面尺寸大的钢料，由于允许的加热速度较小，在炉温低于 $700 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 时，应按允许的加热速度加热，当炉温超过 $700 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 时，可按最大可能的加热速度加热。

影响加热速度的主要因素是炉温，确切地说是炉温和金属表面的温度差。炉温愈高，温差愈大，则金属得到的热量愈多，加热速度愈快。根据传热学的计算，金属在炉内每小时以辐射和对流方式所得到的热量 $Q(\text{J/h})$ 按下式计算：

$$Q = C_{\text{折合}} \left[\left(\frac{T_{\text{炉}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{金}}}{100} \right)^4 \right] S_{\text{金}} + a_{\text{对流}} (t_{\text{炉}} - t_{\text{金}}) S_{\text{金}} \quad (3-6)$$

式中 $T_{\text{炉}}$ ——炉内热气体的热力学温度(K)，即 $T_{\text{炉}} = t_{\text{炉}} + 273^\circ\text{C}$ ；

$T_{\text{金}}$ ——被加热金属的热力学温度(K)，即 $T_{\text{金}} = t_{\text{金}} + 273^\circ\text{C}$ ；

$C_{\text{折合}}$ ——炉气、炉围和金属的辐射折合系数，一般 $C_{\text{折合}} = 3 \sim 3.5 (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4))$ ；

$S_{\text{金}}$ ——金属受热面积(m^2)；

$a_{\text{对流}}$ ——对流换热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$)，它与炉内气体流速成正比。

由上式可以看出，单位时间内金属得到的热量与炉温四次方、金属的原始温度和受热面积、炉子结构、炉气成分及对流换热系数等有关。因此，要提高加热速度可采取如下措施：首先，提高炉温，采用快速加热；其次，合理布排炉内金属，使其尽可能达到多面加热（见图3-15）；再次，合理设计炉膛尺寸，特别是炉膛高度，造成炉内强烈循环，增加辐射换热及对流换热等。

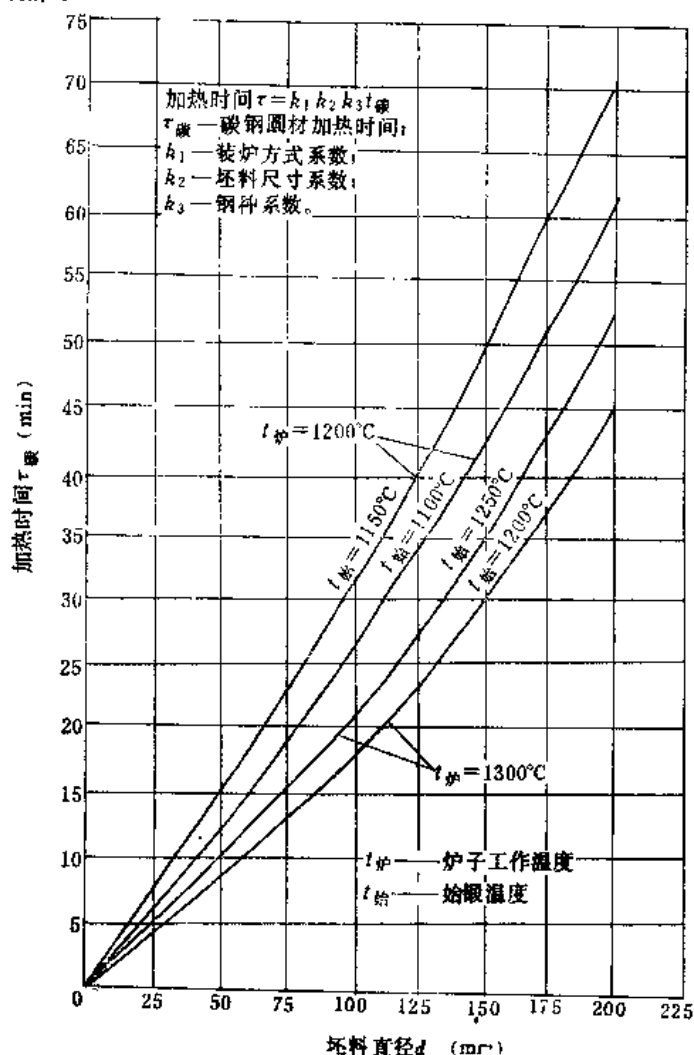






图3-15 碳素钢坯在室式炉中单个放置时的加热时间

装炉方式系数	k_1
 d (□)	1 (1.25)
 d	1.2 (1.4)
 $d/2$	1.32 (1.5)
	2 (3)
坯料尺寸系数	k_2
$l/d > 3$	1
2	0.98
1.5	0.92
1	0.71
钢种系数	k_3
碳素结构钢 低合金钢	1
碳素工具钢 中合金钢	1.25 ~1.3
高合金钢	1.3 ~1.5

d ——坯料直径；
 l ——坯料长度。

当坯料表面加热到始锻温度时，炉温和坯料表面的温差称为温度头。生产上常用提高温度头的办法来提高加热速度。对于含碳 0.4%、直径为 100mm 的圆钢坯，温度头和加热时间的关系见表 3-6。

表 3-6 温度头和加热时间的关系

温度头 (°C)	25	50	100	150	200
加热时间比没有温度头时所减少的百分数 (%)	~25	~35	50	57	62

断面上的温度差和温度头的提高受到加热工艺及设备本身的限制，对于不同种类的钢锭或钢坯其数值是不同的。为使坯料断面上温度均匀，对碳素结构钢及低合金钢的钢锭，断面允许温度差为 50~100℃，高合金钢的钢锭断面允许温差不大于 40℃。为保证钢料断面上温差不致过大，对于钢锭，加热时温度头取 30~50℃；对于热扩散率较高的轧材取 40~80℃，快速加热时，温度头高达 100~200℃。

所谓快速加热，就是以技术上可能做到的加热速度来加热金属。一般把炉温升高到 1400~1500℃，把室温的钢料直接放到高温炉中加热。

3. 均热保温

通常的保温包括装炉温度下的保温，700~850℃的保温，加热到锻造温度下的保温（通常均热保温就是对此而言的）。见图 3-12 中相应的三段平台。

装炉温度下（即图中平台Ⅰ）保温的目的是防止金属在加热过程中，因温度应力而引起破坏，特别是钢在 200~400℃很可能因蓝脆而发生破坏。700~850℃（即图中平台Ⅱ）保温的目的是为了减少前段加热后钢料断面上的温差，从而减小钢料断面内的温度应力和使锻造温度下的保温时间不至过长。对于有相变的钢，当其几何尺寸较大时，为了不至于因相变吸热使内外温差过大，更需要在第Ⅱ段保温。终锻温度下（即图中平台Ⅲ）保温的目的，除减少钢料断面上的温差以使温度均匀外，还有借助扩散作用，使组织均匀化，减少变形不均匀，这样不但提高了金属的塑性，而且对提高锻件质量也具有重要影响。如高速钢在锻造温度下保温的目的，就是使碳化物溶于固溶体中。但是对有些钢，如铬钢 (GCr15) 在高温下易产生过热，因此在锻造温度下的保温时间不能太长，否则将产生过热与过烧。

保温时间的长短，要从锻件质量、生产效率等方面进行综合考虑，特别是终锻温度下的保温时间尤为重要。因此终锻温度下的保温时间规定有最小保温时间和最大保温时间。

最小保温时间是指能够使钢料温差达到规定的均匀程度所需最短的保温时间。其具体的确定可参照图 3-16 和图 3-17。从图 3-16 中可以看出，最小保温时间与温度头和坯料尺寸有关，温度头越大，坯料直径越大时，坯料断面的温差也越大，因此相应的最小保温时间也越大。相反，最小保温时间则越短。

最大保温时间主要是从生产角度考虑的。如生产中设备出现故障或其它原因等，使钢料不能及时出炉，这样钢料在高温阶段停留时间过长，容易产生过热，因此规定了最大保温时间。当保温时间超过最大保温时间时，应把炉温降到 700~850℃待料，对易过热的钢种更要注意，如前面介绍的 GCr15 钢等。最大保温时间可参考表 3-7。

4. 加热时间

加热时间是指坯料在炉中均匀加热到规定温度所用的时间。它是加热各个阶段保温时间

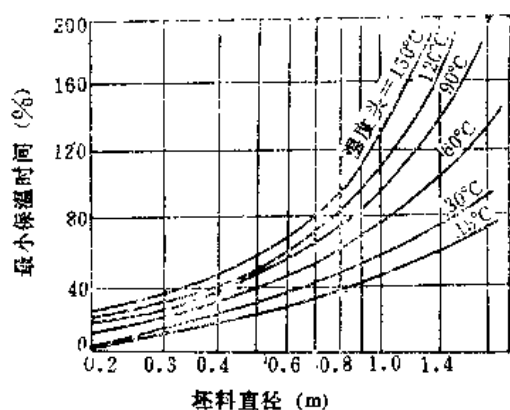


图3-16 最小保温时间与温度头、坯料直径的关系
(%—表示最小保温时间为表面加热时间的百分数)

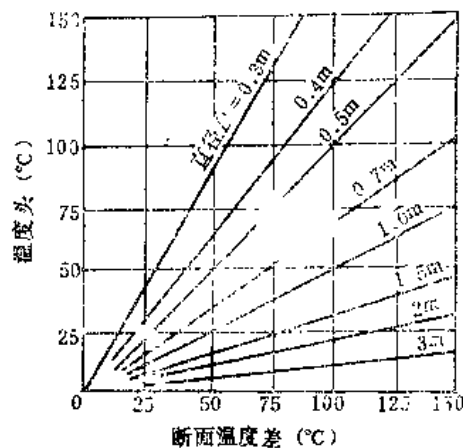


图3-17 炉温为1200℃时钢料断面温差与温度头、坯料直径的关系

(前面已介绍)和升温时间的总和。其确定方法有:根据传热理论进行计算,利用经验公式计算和根据实验数据或图表确定等。根据传热理论进行计算的方法,由于公式复杂,准确性差,在实际生产中很少采用,这里不作介绍,主要介绍后两种方法。

(1)经验公式计算 对钢锭或大型钢坯,其在室式炉中从0~1200℃的加热时间 τ (h)采用下式计算:

$$\tau = a k_1 D \sqrt{D} \quad (3-7)$$

式中 D ——钢料直径(m),方形、矩形截面采用边长(矩形截面采用短边边长);

a ——与钢料成分有关的系数(碳钢 $a=10$,高碳钢和高合金钢 $a=20$);

k_1 ——与钢料断面形状和在炉内堆放情况有关的系数,其值为1~4,可参阅图3-15中的 k_1 值。

对钢材或中小钢坯,其在连续炉或半连续炉中的加热时间(h)可按下式计算:

$$\tau = a_0 D \quad (3-8)$$

式中 D ——钢料直径或边长(cm);

a_0 ——与钢料化学成分有关的系数,对碳素结构钢 $a_0=0.1\sim0.15$,合金结构钢 $a_0=0.15\sim0.20$,工具钢和高合金钢 $a_0=0.3\sim0.4$ 。

式(3-7)和式(3-8)的计算结果与实际情况往往误差较大,这是由于在实际情况中有许多影响因素未考虑进去造成的。因此只能作为参考使用。

(2)用实验数据和图表确定 这种加热时间的确定方法是根据大量生产实践总结而成的,其准确性、可靠性较大,也是目前广泛使用的方法之一。

图3-15中的曲线是碳钢在室式炉中单件加热时间和钢料直径的关系曲线。对于直径小于200mm的钢材其加热时间可由该图查得,但是考虑到装炉方式、坯料尺寸和钢的成分等因素的影响,查得的 $\tau_{\text{碳}}$ 值还应乘以相应的系数 k_1 、 k_2 和 k_3 ,即 $\tau = k_1 k_2 k_3 \tau_{\text{碳}}$ (其中 k_1 中的括号内

表3-7 钢锭加热的最大保温时间

钢锭重量(t)	钢锭尺寸(mm)	最大保温时间(h)
1.6~5	380~604	30
6~20	647~960	40
22~42	1029~1265	50
≥43	≥1357	60

数值为方钢的修正值)。

例如, 加热一组 $\phi 100\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的 T9 钢, 始锻温度为 1100°C , 炉温为 1200°C , 坯料之间距离约 100mm , 求加热时间。

按图 3-15 曲线查得相应的加热时间为 26min 。

按图 3-15 中的表格查得 $k_1 = 1.2$, $k_2 = 0.92$, $k_3 = 1.25$, 加热时间为

$$\tau = 1.2 \times 0.92 \times 1.25 \times 26\text{min} = 35.88\text{min} = 36\text{min}$$

直径为 $200 \sim 350\text{mm}$ 的钢坯在室式炉中单件加热时间可参考表 3-8 的数据确定。对于多件

表 3-8 钢坯 (直径为 $200 \sim 350\text{mm}$) 加热时间

钢 种	装炉温度 ($^{\circ}\text{C}$)	每 100mm 的平均加热时间 (h)
低碳钢、中碳钢、低合金钢	≤ 1250	$0.6 \sim 0.77$
高碳钢、合金结构钢	≤ 1150	1
碳素工具钢、合金工具钢、轴承钢、高合金钢	≤ 900	$1.2 \sim 1.4$

及短料加热, 同样应乘以相应的系数 k_1 和 k_2 (见图 3-15 修正系数表)。

总之, 在制定加热规范时, 主要从钢料的断面尺寸、化学成分、塑性、强度极限、导热性、线膨胀系数、组织特点及在加热时的变化和坯料的原始状态等方面进行综合考虑, 这样才能制定出较为合理的加热规范。

二、钢锭的加热规范

大型自由锻件与高合金钢锻件多以钢锭为原材料。

按钢锭的规格大小可分为大型钢锭和小型钢锭。一般把重量为 $2 \sim 2.5\text{t}$ 、直径为 $500 \sim 550\text{mm}$ 的钢锭称为大型钢锭, 此外便是小型钢锭。

按加热装炉时钢锭的温度高低可分为冷锭与热锭。冷、热钢锭的加热工艺差别很大, 为此下面分别进行讨论。

1. 冷锭加热规范

冷锭是指锻前加热装炉时钢锭温度为室温的钢锭。冷锭加热的关键在低温阶段。因为冷锭加热在低于 500°C 时塑性很差, 加上冷锭内部的残余应力又与温度应力同向, 钢锭存在的各种组织缺陷还会造成应力集中, 如果加热规范制订不当, 容易引起裂纹。所以, 冷锭加热

表 3-9 钢按塑性和导热性高低分组

组别	钢 的 类 型	钢 号 举 例	钢的塑性及导热性
I	低、中碳素结构钢 部分低合金结构钢	10~45 15~30Mn 15Cr~35Cr	较 好
II	中碳素结构钢 低合金结构钢	50~65 35Mn~50Mn 40Cr~55Cr 20MnMo 12CrMo~35CrMo 20MnSi~55MnSi 18CrMnTi 35CrMnSi 38SiMnMo	次 之
III	中合金结构钢 碳素工具钢 合金工具钢 部分特殊钢	34CrNi1Mo~34CrNi3Mo 30Cr2MoV 32Cr3WMoV 20Cr3MoWV 20Cr2Mn2Mo T7~T12 5CrMnMo 5CrNiMo 3Cr2W8 60CrMnMo 9CrV 9Cr2 GCr15 1Cr13~4Cr13 1Cr18Ni9Ti 2Cr18Ni11Ti	较 差

在低温阶段时，必须限制装料炉温和加热速度。

大型冷锭的加热，首先应按钢的塑性和导温性高低分组（见表 3-9），然后再以断面尺寸大小确定加热规范。由于钢锭的断面尺寸大，产生的温度应力也大，因此大型冷锭均采用二段、三段、四段或五段的分段加热规范。

图3-18为实际生产采用的19.5t20MnMo冷锭加热规范。图3-19为19.5t20MnMo冷锭加热试验的温度实测曲线。从图3-19可见，在加热的低温阶段断面温差不大，而且最大温差出现在锭温 600℃ 以上，这时钢锭已具有一定塑性；温度应力也不会造成开裂。

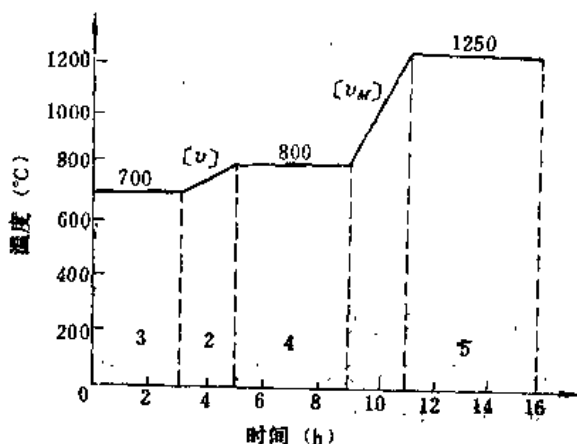


图3-18 19.5t20MnMo冷锭的加热规范

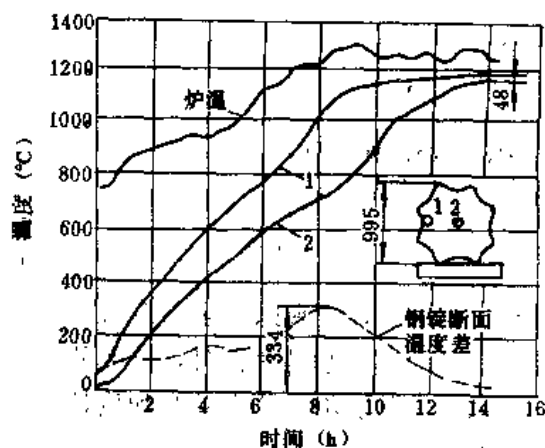


图3-19 19.5t20MnMo冷锭加热试验的实测曲线
1—钢锭的表面温度 2—钢锭的中心温度

小型冷锭的加热，由于钢锭断面尺寸小，加热时温度应力不大。一般碳素钢和低合金钢小锭，均采用快速的一段加热规范。但对高合金钢小锭，因钢的低温导温性差，和大型冷锭加热一样，也采用分段加热规范。

对于大型冷钢坯的加热规范，可参考相应冷锭的加热规范。

2. 热锭加热规范

由炼钢车间脱模后直接送到锻压车间，表面温度不低于 600℃ 的钢锭称为热锭。热锭不仅避免产生残余应力和降低温度应力，还可缩短加热时间，节约燃料消耗。一般热锭加热时间只有冷锭加热时间的一半，甚至更短。

热锭加热由于处于塑性状态，温度应力没有造成危险。况且开始时锭心温度高，加热引起的断面温差小，也不会产生很大的应力。因此热锭装炉炉温不受限制，入炉便以最大加热速度加热。由于各种钢在高温时的导温性都很相近，所以热锭的加热规范，只取决于断面尺寸，而与钢的种类无关。

图3-20为实际生产采用的88t9CrV热锭加热规范。图3-21为88t9CrV热锭加热试验的温度实测曲线。由图3-21看到，在热锭加热的开始阶段，由于中心温度高于表面，随着表面温度不断升高，断面温差逐渐减小至零。当表面温度高于中心后，尽管断面又会出现温差，这时处于高温，已无危险。

由上述可见，采用热锭加热可以避免钢锭加热时开裂并可以缩短加热时间，节约能耗。因此，实际生产中大型钢锭应尽可能地采用热锭加热。

三、中、小型钢坯的加热规范

一般中、小自由锻件和模锻件，主要采用钢坯为原材料。

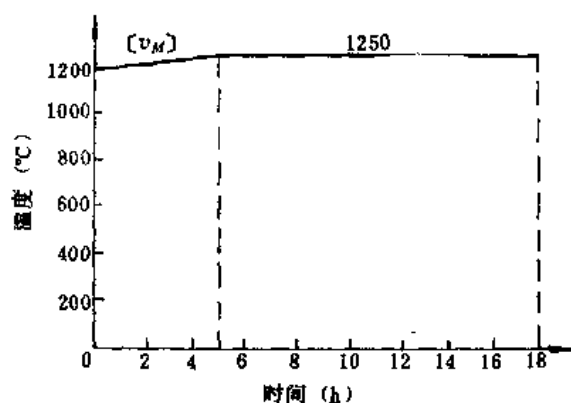
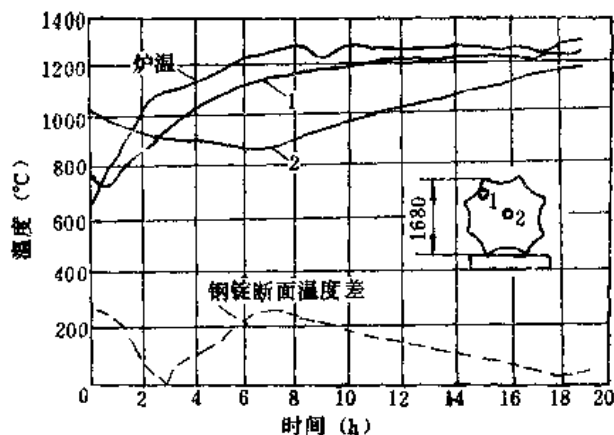


图3-20 88 t 9 CrV热钢锭的加热规范

图3-21 88 t 9 CrV热钢锭加热试验的实测曲线
1—钢锭表面温度 2—钢锭中心温度

中、小型钢坯的特点是：①尺寸较小；②经过变形强度和塑性都提高了；③铸造时的残余应力消除了。

由于断面尺寸较小，加热时引起的温度应力也小，加之强度及塑性均提高了，故加热时不易产生裂纹破坏。因此，可以进行快速加热。例如直径 $\phi 150 \sim 200 \text{ mm}$ 以下的碳素结构钢钢坯和直径小于 $\phi 100 \text{ mm}$ 的合金结构钢钢坯，可以用技术上可能的加热速度来加热，炉子温度一般为 $1300 \sim 1350^\circ\text{C}$ ，这时温度头为 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ 左右。

直径等于 $200 \sim 350 \text{ mm}$ 的碳素结构钢坯（含碳量大于 $0.45\% \sim 0.50\%$ ）和合金结构钢钢坯，采用三段加热规范。装料温度稍低一些，约在 $1150 \sim 1200^\circ\text{C}$ 范围。装炉后要进行保温，这时保温时间约为整个加热时间的 $5\% \sim 10\%$ 。接着，以最大可能的速度加热，当加热到始锻温度后需均热，这时保温时间也为整个加热时间的 $5\% \sim 10\%$ 。

对导热性较差、热敏感性强的合金钢坯（如高铬钢、高速钢），装炉温度为 $400 \sim 650^\circ\text{C}$ 。

第五节 少无氧化加热

少氧化或无氧化加热是广泛应用于精密成形工艺的一种加热方法。它不但可以减少金属的氧化烧损（烧损量小于 0.5% ），提高加热质量，而且还可以提高锻件的尺寸精度和降低表面粗糙度数值，以及提高模具的使用寿命等。因此，它是现代加热技术的发展方向。

目前的精密成形工艺中，实现少无氧化加热的方法主要有：快速加热、介质保护加热和少无氧化火焰加热等。

一、快速加热

所谓快速加热就是采用技术上可能的加热速度来加热金属。通常包括火焰加热法的辐射快速加热和对流快速加热，电加热法的感应电加热和接触电加热等。此外，还可采用火焰炉与感应炉联合进行快速加热，即先在火焰炉中将坯料加热到 $700 \sim 900^\circ\text{C}$ ，然后在感应器中快速加热到锻造温度。以上快速加热方法，由于加热速度很快，坯料表面氧化很少，因此，可实现少无氧化加热。

目前, 坯料进行少氧化快速加热所能达到的最大直径是: 火焰快速加热为150~160mm, 感应加热为30~50mm。

二、介质保护加热

介质保护加热是通过保护介质把金属坯料与氧化性炉气隔开而进行的加热。它可以避免金属坯料的氧化, 从而达到少无氧化加热。

常用的保护介质按其形态的不同可分为:

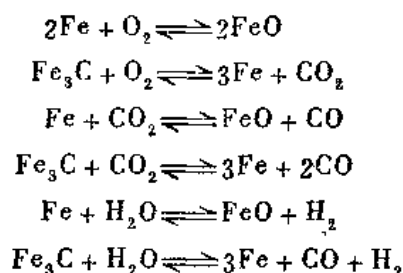
- 1) 气体介质: 如惰性气体、石油液化气以及利用燃料不完全燃烧所产生的保护气体等;
- 2) 液体介质: 如熔融玻璃、熔融盐等;
- 3) 固态介质: 如玻璃粉、珐琅粉、石墨粉以及金属镀膜等。

三、少无氧化火焰加热

采用火焰加热的方法, 通过控制燃烧炉气的性质, 使钢料加热且少无氧化, 称为少无氧化火焰加热。

少无氧化火焰加热法包括敞焰少无氧化加热方法、平焰少无氧化加热方法等^[20]。这里仅介绍其工作原理。

金属坯料在火焰炉中加热时, 由于 O_2 、 CO_2 和 H_2O 与金属表面接触而发生氧化与脱碳, 其反应式如下:



上述反应式为可逆反应, 向右是氧化反应, 向左是还原反应。CO 和 H_2 为还原性气体, O_2 、 CO_2 和 H_2O 是氧化性气体。能否实现无氧化加热取决于它们的相对比值。如果增加CO及 H_2 的浓度(即分压增加), 则平衡便向反应式的左方进行。于是FeO得到还原, 减少了金属氧化。这便是少无氧化火焰加热法的工作原理。图3-22是炉气和被加热钢材系统的平衡图。图中AB线为炉气氧化作用与还原作用之间的分界线。由图中可见, 对锻造加热炉(炉温为1000~1300℃),

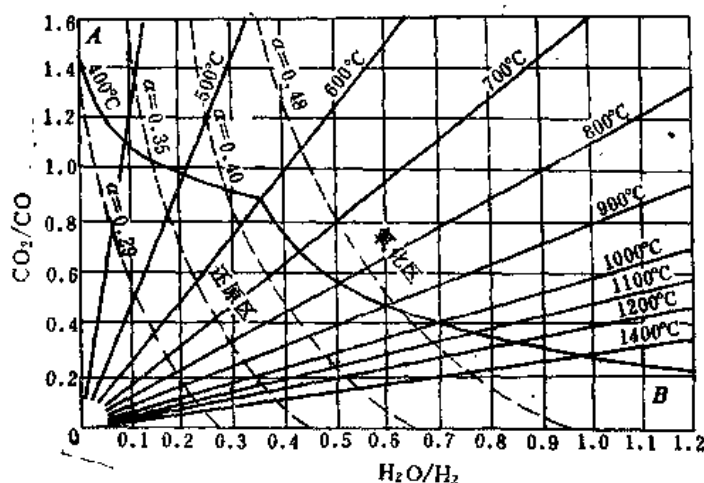


图3-22 炉气和被加热钢材系统的平衡图

只有当空气过剩系数 α ($\alpha = L_{\text{实}}/L_{\text{理}}$, $L_{\text{实}}$ 为燃料燃烧实际供给的空气量, $L_{\text{理}}$ 为燃料燃烧理论计算的空气量) 降至 0.5 或更低时, 才会形成加热炉正常工作条件的无氧化气体, 这时,

$$\frac{[\text{CO}_2]}{[\text{CO}]} \leq 0.3, \quad \frac{[\text{H}_2\text{O}]}{[\text{H}_2]} \leq 0.84。$$

要保持上述比值必需减少空气量, 金属才不发生氧化或氧化很少。

第六节 金属的锻后冷却

锻后冷却的重要性并不亚于锻前加热和锻造变形过程, 有时钢料采用正常的加热规范和适当的锻造, 虽然可以保证获得高质量的锻件, 但是, 如果锻后冷却方法选择不当, 锻件还有可能产生裂纹甚至报废, 这在实际生产中时有发生, 因此应予重视。

所谓锻后冷却是指结束锻造后从终锻温度冷却到室温的过程。对于一般钢料的小锻件锻后可直接放在地上空冷, 但对合金钢锻件或大锻件, 则应考虑合金元素含量和断面尺寸大小来确定合适的冷却规范。否则容易产生各种缺陷。常见的缺陷有: 裂纹、白点、网状碳化物等。下面分别介绍这些缺陷产生的原因和防止措施。

一、锻后冷却常见缺陷产生的原因和防止措施

1. 裂纹

冷却裂纹是由于冷却过程中产生的内应力引起的。由于锻件冷却后期温度低塑性差, 因此其冷却内应力较加热时的内应力的危险性更大。按冷却时内应力产生的原因不同有: 温度应力、组织应力和残余应力。

(1) 温度应力 温度应力是锻件冷却过程中内外温度不同造成冷缩不均而产生的, 如图 3-23 所示。冷却初期, 锻件表面温度较心部低, 表面的收缩受到心部的阻碍, 在表面产生拉

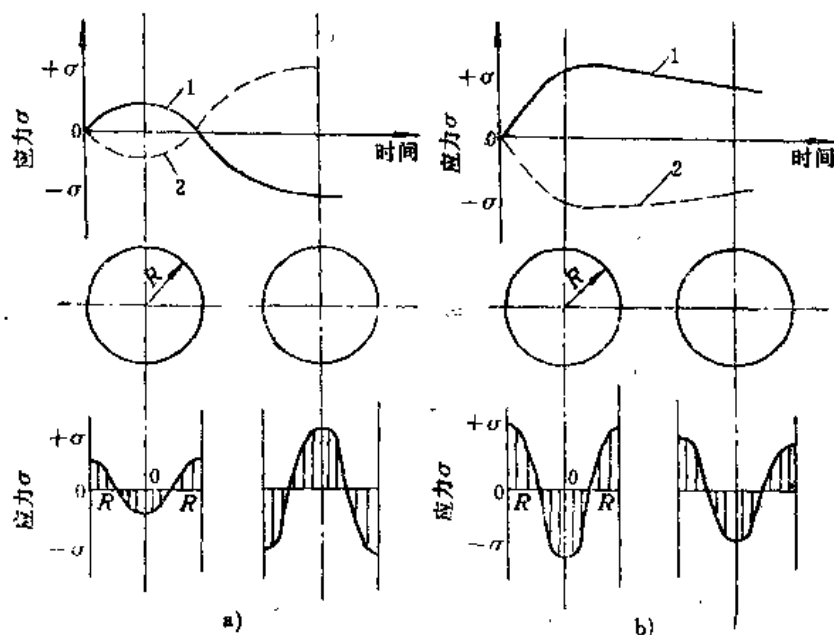


图3-23 锻件冷却过程中温度应力(轴向)变化和分布示意图

a) 软钢锻件 b) 硬钢锻件

1—表面应力 2—心部应力

应力，而心部产生与其平衡的压应力。随着冷却的继续进行将发生下列两种变化。

1) 如锻件材料为抗力小易变形的软钢，可以产生微量变形，松弛冷却初期表面产生拉应力，并逐渐减小至零。到了冷却后期，表面温度已接近常温，基本不再收缩，而心部温度尚高继续收缩，此时，心部的收缩受到表面的阻碍，结果导致温度应力方向的改变，即表面由拉应力变为压应力，而心部由压应力变为拉应力。见图3-23a。

2) 若锻件材料为抗力大难变形的硬钢，在冷却初期表面产生的拉应力得不到松弛，到了冷却后期，虽然心部收缩对表面产生附加压应力，但这只能使冷却初期表面产生的拉应力有一定的降低，而不会使温度应力方向发生改变，即表面仍为拉应力，心部仍为压应力，见图3-23b。

从上述分析中可以看出，第一种情况出现内裂的倾向性较大，而第二种情况则往往出现外裂。

冷却时的温度应力与加热一样也是三向应力状态，而且也是轴向应力最大。

(2) 组织应力 锻件在冷却过程中如有相变发生，由于锻件表面和心部相变不同时进行还要产生组织应力，如图3-24所示。

组织的变化是在一定的温度区间内完成的，当锻件表面冷却到马氏体转变温度时，表面首先进行马氏体转变，而心部仍处于奥氏体状态。由于二者的相变时间及比容不同（前者比容为 $0.127\text{cm}^3/\text{g}$ ，后者为 $0.12\sim 0.125\text{cm}^3/\text{g}$ ），因此锻件表面的体积膨胀受到心部的制约。这时引起的组织应力是表面为压应力，心部为拉应力。然而心部温度较高，塑性较好，通过局部塑性变形可以缓和上述组织应力。随锻件冷却过程的进行，心部也发生了马氏体转变，而且随心部马氏体含量的逐渐增加，其体积膨胀也越来越大，而表面体积却不再发生变化。此时心部的膨胀又受到表面的阻碍，结果引起组织应力的反向，表面变为拉应力，心部变为压应力。

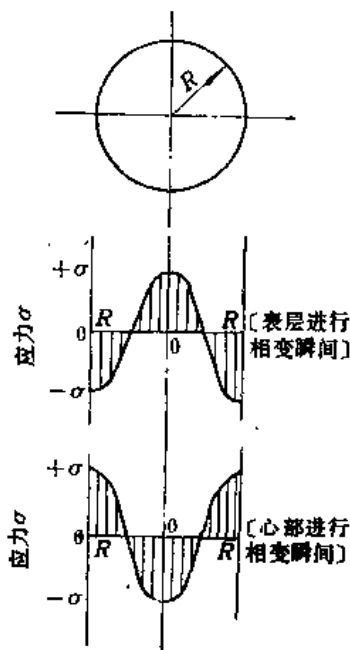


图3-24 锻件冷却过程中组织应力（切向）的变化和分布示意图

冷却时的组织应力和加热时一样也是三向应力状态，且切向应力最大，这就是有时引起表面纵裂的原因之一。

(3) 残余应力 加热后的钢料在锻造过程中，由于变形不均或加工硬化所引起的内应力，如未能及时得到再结晶软化将其消除，便会在冷却终了时保留下来构成残余应力。残余应力在锻件内的分布根据变形不均的情况而有所不同，可能是表面为拉应力，心部为压应力，或者与此相反。

从上面的讨论可以看出，锻件在冷却过程中总的内应力为上述三种应力的叠加。当总的内应力超过材料某处的强度极限时，便会在锻件相应的部位产生裂纹。

一般情况下，锻件尺寸愈大，导热系数愈小，冷速愈快，温度应力和组织应力则愈大。

冷却初期（锻件表面温度较低心部温度尚高）温度应力引起锻件开裂的可能性较大。但一般的冷却裂纹是由组织应力引起的，如高速钢、Cr12MoV 钢及马氏体不锈钢锻件的冷却裂纹多属此种情况。原因是这类材料马氏体转变引起的组织应力是在较低温度下产生的，并且此时材料的塑性较低。如高速钢锻件在室温仍进行由残余奥氏体向马氏体的转变，使锻件表面的拉应力不断增大并产生裂纹。故在生产中规定高速钢锻件锻后 24h 之内必须进行退火。

如果迭加后的内应力没有造成破坏，冷却终了便保留下来，构成锻件内的残余应力。

2. 白点

白点也是锻件在冷却过程中产生的一种内部缺陷。它的存在对钢的性能极为不利，它使钢的力学性能降低，热处理时易使零件产生淬火开裂，使用时易造成零件断裂。原因是白点处为应力集中点，在交变和重复载荷作用下，常常成为疲劳源而导致零件疲劳断裂。国外曾发生过电站设备中的转子和叶轮由于白点的存在而造成的严重事故。因此，白点是一种危险性较大的缺陷。

白点多发生在珠光体类和马氏体类合金钢中，碳素钢程度较轻，奥氏体和铁素体类钢极少发现白点，莱氏体合金钢也未发现白点。

白点在钢的纵向断口上呈圆形或椭圆形的银白色斑点。而在横向上呈细小的裂纹。合金钢中的白点色泽光亮，碳素钢较暗。白点的尺寸由几毫米到几十毫米。从显微组织上观察，白点附近区域没有发现塑性变形的痕迹。因此，白点是纯脆性的。

关于白点的形成原因，一般认为是由于钢中的氢和组织应力共同作用的结果。冷却速度愈快时，它们的作用愈显著，而锻件尺寸愈大，白点也愈易形成。因此锻造白点敏感性钢的大锻件时（如前面提到的电站转子和叶轮），应特别注意冷却速度。

3. 网状碳化物

过共析钢和轴承钢终锻温度高并在锻后缓冷时，特别是在 $A_{r_m} \sim A_{r_1}$ 区间缓冷，将由奥氏体中大量析出二次碳化物，这时碳原子由于具有较大的活动能力和足够的时间扩散到晶界，于是沿着奥氏体晶界形成网状碳化物。当网状碳化物较严重时，用一般热处理方法不易消除，使材料的冲击韧性降低，热处理淬火时常引起龟裂。

另外，奥氏体不锈钢（如 1Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti 等）在 800~550℃ 范围内缓冷时，有大量含铬的碳化物沿晶界析出而形成网状碳化物。这类钢由于碳化物的析出使晶界出现贫铬现象，导致了抗晶间腐蚀能力的降低。

上述各种缺陷均与冷却速度有关，因此防止的措施之一是确定合适的冷却速度。

二、锻件的冷却方法

根据锻件在锻后的冷却速度，冷却方法有三种：即在空气中冷却，速度较快；在坑（箱）内冷却，速度较慢；在炉内冷却，速度最慢。

1. 在空气中冷却

锻件锻后单个或成堆直接放在车间地面上冷却，但不能放在潮湿处或金属板上，也不要放在有过堂风的地方，以免锻件冷却不均或局部急冷引起裂纹。

2. 在坑（箱）内冷却

锻件锻后放到地坑或铁箱中封闭冷却，或埋入坑内砂子、石灰或炉渣内冷却。一般锻件入砂温度不应低于 500℃，周围积砂厚度不能少于 80mm。锻件在坑内的冷却速度，可以通过

不同绝热材料及保温介质来进行调节。

3. 在炉中冷却

锻件锻后直接装入炉中按一定的冷却规范缓慢冷却。由于炉冷可通过控制炉温准确实现规定的冷却速度，因此适于高合金钢、特殊钢锻件及各种大型锻件的锻后冷却。一般锻件入炉时的温度不得低于 $600\sim 650^{\circ}\text{C}$ ，装料时的炉温应与入炉锻件温度相当。常用的冷却规范有等温冷却和起伏等温冷却。

三、锻件的冷却规范

制订锻件锻后的冷却规范，关键是选择合适的冷却速度，以免产生前述各种缺陷。通常，锻后冷却规范是根据坯料的化学成分、组织特点、原料状态和断面尺寸等因素，参照有关手册资料确定的。

一般来讲，坯料的化学成分越单纯，锻后冷却速度越快；反之则慢。按此，对成分简单的碳钢与低合金钢锻件，锻后均采取空冷。而合金成分复杂的中高合金钢锻件，锻后应采取坑冷或炉冷。

对于含碳较高的钢种（如碳素工具钢、合金工具钢及轴承钢等），如果锻后采取缓慢冷却，在晶界会析出网状碳化物，将严重影响锻件使用性能。因此，这类锻件在锻后先空冷、鼓风或喷雾快速冷却到 700°C ，然后再把锻件放入坑中或炉中缓慢冷却。

对于没有相变的钢种（如奥氏体钢、铁素体钢等），由于锻后冷却过程无相变，可采取快速冷却。此外，为了获得单相组织，防止铁素体钢 475°C 脆性，也要求快速冷却。所以，这类锻件锻后通常采用空冷。

对于空冷自淬的钢种（如高速钢、马氏体不锈钢、高合金工具钢等），因空冷便发生马氏体相变，由此会引起较大组织应力，而且容易产生冷却裂纹。所以，这类锻件锻后必须缓慢冷却。

对于白点敏感的钢种（如铬镍钢 $34\text{CrNiMo}\sim 34\text{CrNi4Mo}$ 等），为了防止冷却过程产生白点，应按一定冷却规范进行炉冷。

采用钢材锻造的锻件，锻后的冷却速度可快些，而用钢锭锻造的锻件，锻后的冷却速度要慢。此外，对于断面尺寸大的锻件，因冷却温度应力大，在锻后应缓慢冷却，而对断面尺寸小的锻件，锻后则可快速冷却。

有时，在锻造过程中也要将中间坯料或锻件局部冷却到室温，叫做中间冷却。例如，为了进行毛坯探伤或清理缺陷，需要中间冷却。又如多次锻造大型曲轴时，先锻中部而后锻两端，当中部锻完后应进行中间冷却，以免再加热两端时影响质量。中间冷却规范的确定和锻后冷却规范相同。

第七节 锻件的热处理

锻件在机械加工前后，一般要进行热处理。机械加工前的热处理称为锻件热处理（也称毛坯热处理或第一热处理）。机械加工后的热处理称为零件热处理（也称最终热处理或第二热处理）。通常，锻件热处理是在锻压车间内进行的。

由于在锻造生产过程中，锻件各部分的变形程度、终锻温度和冷却速度不一致，锻后必然导致锻件组织不均匀、残余应力和加工硬化等现象。为了消除上述不足，在锻后还需进行

锻件热处理，其目的是：

- 1) 调整锻件的硬度，以利锻件进行切削加工。
- 2) 消除锻件内应力，以免在机械加工时变形。
- 3) 改善锻件内部组织，细化晶粒，为最终热处理作好组织准备。
- 4) 对于不再进行最终热处理的锻件，应保证达到规定的力学性能要求。

实际锻造生产常用的锻件热处理方法有：退火、正火、淬火、回火、调质和等温退火等。

一、中、小锻件热处理

中小锻件根据钢种和工艺要求不同，常采用以下热处理方法。

1. 退火

一般亚共析钢采用完全退火（通常称退火），共析钢和过共析钢锻件采用球化退火（不完全退火）。完全退火是把锻件加热到 A_{c3} 以上 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ ，经一定时间保温后随炉缓冷。而球化退火是将锻件加热到 A_{c1} 以上 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ ，经较长时间保温后随炉缓冷。由于钢中渗碳体凝聚成球状，便可获得球状的珠光体组织。

锻件经过退火处理后，由于再结晶作用，可以细化晶粒，消除残余应力，降低锻件硬度，提高塑性和韧性，改善切削性能，并为最终热处理做好组织准备。

2. 正火

对于亚共析钢、共析钢和过共析钢锻件，除了细化晶粒，消除内应力外，如还要求增加强度和韧性，或为了消除网状的碳化物，便应采用正火。正火一般是把锻件加热到 A_{c3} 或 A_{cm} 以上 $50 \sim 70^\circ\text{C}$ （高合金钢锻件为 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ ），经保温后在空气中冷却。

如正火后锻件硬度较高，为了降低硬度还应进行高温回火。

3. 调质

一些亚共析钢（中碳钢和低合金钢）锻件，尤其是不再进行最终热处理时，为了获得良好的综合力学性能，采用调质处理较为合适，即淬火后再进行高温回火。

锻件热处理是按一定的热处理规范进行的，根据锻件钢种、断面尺寸及技术要求等，并参考有关手册和资料制订。其内容包括：加热温度、保温时间和冷却方法等。一般也是采用温度-时间曲线来表示。

近年来国内外生产一些小型模锻件时，为了使锻后锻件的自身热量得到利用，在终锻后直接进行淬火处理。这种把锻造和热处理紧密结合到一起的新工艺，称之为锻件余热处理（亦称锻热淬火）。

生产实践表明，锻件余热处理具有极其可观的技术经济效益。由于生产周期大大缩短，提高了生产效率，节约了能源消耗，经济效益十分显著。此外，由于锻件余热处理同时具有变形强化和热处理强化的双重作用，锻件还可获得良好的综合力学性能——高强度和高韧性，这是单一锻造或热处理所不能达到的。

二、大型锻件热处理

由于大型锻件的断面尺寸大，生产过程复杂，其热处理应考虑以下特点：①组织性能很不均匀；②晶粒粗大不均；③存在较大残余应力；④一些锻件容易产生白点缺陷。因此，大型锻件热处理的任务，除了消除应力、降低硬度之外，主要是预防锻件出现白点；其次则是使锻件化学成分均匀化，调整与细化锻件组织。

需要指出,大型锻件热处理通常是与锻后冷却结合在一起进行的。

1. 防止白点处理

对白点敏感的大型锻件进行锻后冷却与热处理时,若能将氢大量扩散出去,同时尽量减小组织应力,就可避免产生白点。一般认为氢含量低于 $2 \sim 3 \text{ cm}^3/100\text{g}$ 便不会产生白点(此极限氢含量与钢的成分、锻件尺寸、偏析程度有关)。

氢在钢中的扩散速度和锻件的温度、组织、尺寸等有关,氢的扩散速度与温度的关系如图3-25所示。由图可见,锻件在锻后的冷却过程中,当温度降至 650°C 及 300°C 时,氢在钢中的扩散速度很大。如在此温度附近保温停留,便可使氢大量扩散出去。

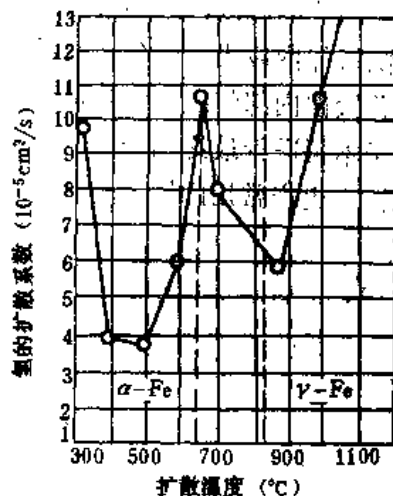


图3-25 氢的扩散速度与温度的关系曲线

由于锻后冷却过程所产生的组织应力是由奥氏体转变而引起的。因此,欲使组织应力减小,则要求奥氏体转变迅速、均匀、完全。从奥氏体等温转变曲线(即C曲线)可知,位于C曲线鼻尖处温度时,奥氏体转变最快,对于珠光体钢为 $620 \sim 660^\circ\text{C}$,对于马氏体钢为 $580 \sim 660^\circ\text{C}$ 及 $280 \sim 320^\circ\text{C}$ 。因此,当锻件冷却到上述温度进行等温转变,便可使奥氏体转变迅速、均匀、完全,这样也就大大减小了组织应力。

综上所述可以看到,减小组织应力产生的奥氏体等温转变温度,也正好是钢中氢扩散最快的温度范围。按此原理,大型锻件防止白点的锻后冷却与热处理如图3-26所示。

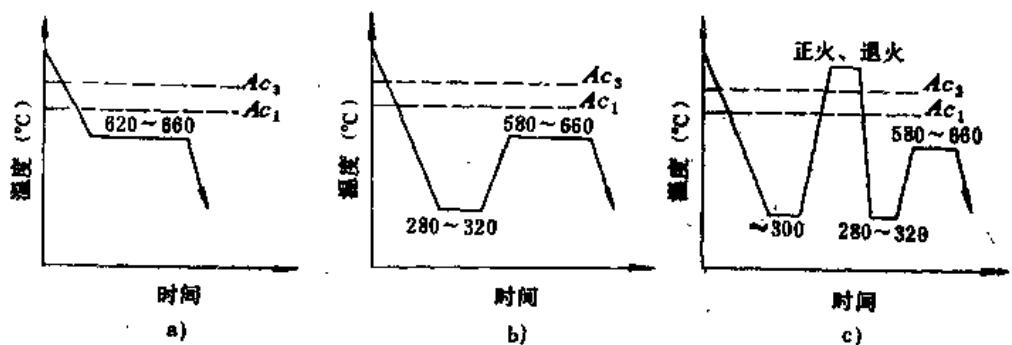


图3-26 大型锻件防止白点的锻后冷却与热处理曲线

a) 等温冷却 b) 起伏等温冷却 c) 起伏等温退火

- 1) 等温冷却(图3-26a), 适用于白点敏感性较低的碳钢及低合金钢锻件。
- 2) 起伏等温冷却(图3-26b), 适用于白点敏感性较高的小截面合金钢锻件。
- 3) 起伏等温退火(图3-26c), 适用于白点敏感性较高的大截面合金钢锻件。

2. 正火回火处理

对于白点不敏感钢种和铸锭经过真空处理的大型锻件,由于锻件基本不会产生白点,在锻后则采取正火回火处理,使锻件细化晶粒、均匀组织。

在实际生产中,多数锻件是锻后接着热装炉进行正火回火处理,如图3-27a所示。锻后

空冷锻件只能冷装炉进行正火回火处理，如图 3-27b 所示。正火后进行过冷的目的是为了降低锻件心部温度，经适当保温使温度均匀，同时也能起到除氢的作用。过冷温度因钢种不同而不同，一般热装炉为 $350 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 或 $400 \sim 450^{\circ}\text{C}$ ，冷装炉为 $300 \sim 450^{\circ}\text{C}$ 。

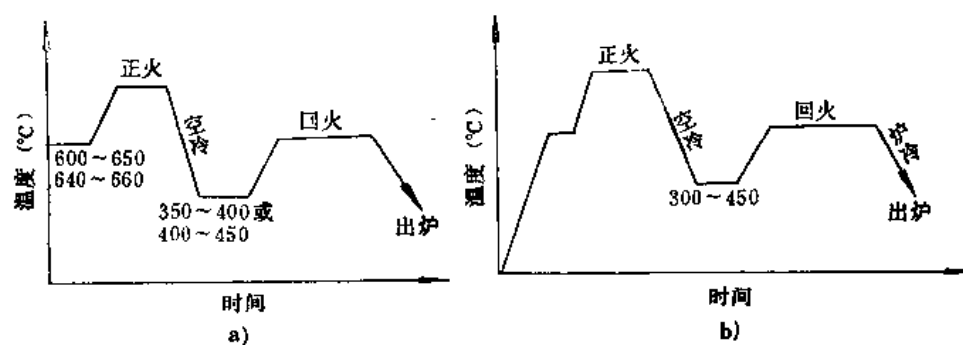


图3-27 大型锻件正火回火热处理曲线
a)热装炉 b)冷装炉

第四章 自由锻主要工序分析

第一节 概 述

塑性加工中锻件的成形问题，实质上就是金属的塑性流动问题。要使坯料成形为锻压件，需要解决用什么工具，如何施加外力的问题，这就需要研究金属塑性变形及其流动的规律。只有正确地认识了金属塑性变形及其流动的规律才能自觉和有效地利用它来解决锻件的成形问题。金属塑性变形的屈服准则和应力应变关系等在“金属塑性成形原理”课中已有论述，这里仅介绍有关金属塑性变形及其流动规律的其它几个问题。

一、影响金属塑性变形流动的几个基本因素^{〔1〕〔2〕}

金属的塑性流动主要取决于两个方面：①工具和坯料的关系；②坯料各部分之间的关系。对于不同的变形工序，由于这两个方面的情况不一样，其具体的变形情况也不一样。当然，温度场和材料本身的均匀情况也是有影响的。通过对所有塑性加工成形工序的分析和概括，就①、②两点而论，可以认为塑性加工成形时各工序的金属变形流动特点主要取决于下面三个基本因素。

1. 加载情况

是整体加载（例如锻粗，见图4-1），还是局部加载（例如拔长、冲孔，见图4-2、4-3）？是拉伸还是压缩？是对称加载还是非对称加载？

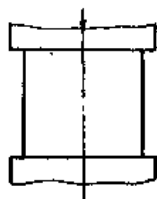


图4-1 锻粗（整体加载）

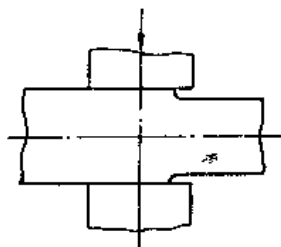


图4-2 拔长（局部加载）

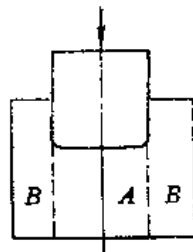


图4-3 冲孔（局部加载）

加载情况是三个基本因素中最重要，它反映了工具与坯料之间的关系。不同的加载情况，在坯料内引起的应力场和变形情况是不一样的。

2. 受力情况

是整体受力，还是局部受力？

受力情况实际上反映的是应力场问题，它是工具对坯料作用的结果；它又是引起不同塑性变形情况的依据。

整体加载时，坯料整体受力；而局部加载时，坯料也可能整体受力，例如冲孔（图4-3）。因此，这里就存在一个直接受力区和间接受力区的问题。间接受力区的受力主要是由于直接受力区金属的变形引起的。

3. 变形情况

是整体塑性变形，还是局部塑性变形？

局部塑性变形时，存在变形区和不变形区（即所谓外端），外端对变形区金属的变形和流动将产生影响。

整体加载或整体受力时，可以产生整体变形，也可以产生局部变形，例如局部镦粗、电热镦粗、拉拔等等。这里有一个局部塑性变形区的控制问题^{〔1〕〔2〕}，即根据需要，采用恰当的措施，使部分金属满足屈服准则，部分金属不满足屈服准则。

二、局部加载时沿加载方向的应力分布规律^{〔1〕〔26〕〔29〕}

局部加载是锻压过程中最为普遍的情况，绝大多数塑性加工工序都是局部加载，例如拔长、冲孔、轧制、芯轴扩孔、辗扩等。虽然对于不同工序，它们各自的应力应变状态和变形流动情况不尽相同，但是由于局部加载这一基本特征所决定的各工序变形体内部的力学特性都有着某些共同的本质的规律性，该规律性可表述为：局部加载时沿加载方向的正应力随受力面积不断扩大，其绝对值逐渐减小。这就是局部加载时沿加载方向应力分布的一般规律。这一规律适用于在加载方向上，坯料尺寸较大而加载工具的作用面积与此作用面的总面积之比较小的情况，例如，前述的拔长、冲孔、轧制等。这一规律对弹性状态和塑性状态都是适用的，例如圆截面坯料在平砧上小压下量拔长时，变形区集中在上部 and 下部，而中间变形小（图4-4）；高坯料小送进量拔长时，上部和下部变形大，中间变形小（图4-5）；开式冲孔

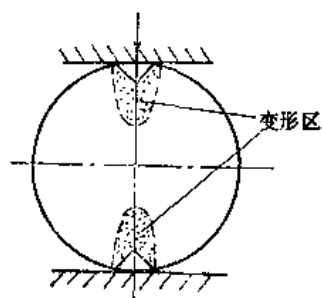


图4-4 圆截面坯料在平砧上小压下量拔长时的变形情况

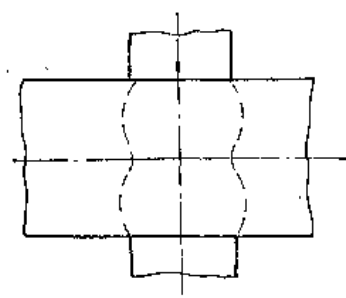


图4-5 矩形截面坯料小送进量拔长时的变形情况

时，在直接受力区内，变形首先发生在靠近冲头的一段距离内（图4-6）等，都是由这一规律决定的。以冲孔为例，冲头下部的金属为直接受力区（A区），其余为间接受力区（B区）。由于坯料为一整体，冲头下面的A区金属被压缩时，必然拉着紧挨着的B区金属向下移动，于是通过A区的变形（弹性变形或塑性变形）将外力传给了与其相邻的 b_1 区金属（图4-7），

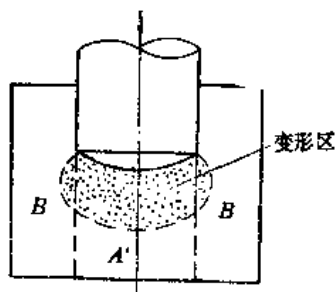


图4-6 冲孔时的变形情况

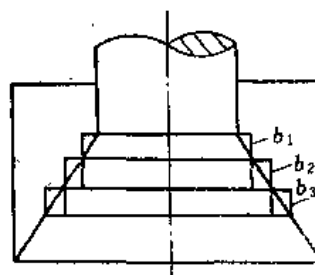


图4-7 冲孔时沿加载方向受力面积逐渐扩大的示意图

使受力面积增大。再往下时，由于同样的原因受力面积又扩大到 b_2 区、 b_3 区……。结果沿加载方向受力面积不断扩大。当A区金属拉着B区金属往下移动时，B区金属则反抗前者的作用力图保持原状，它们之间是通过切应力相互作用的（图4-8）。因此，沿加载方向受力面积不断扩大，作为该方向的应力值（指绝对值）将逐渐减小，以满足不同截面（指垂直于加载方向的截面）之间力的平衡。由于这样的受力情况，在冲头下部的一段距离内，轴向压应力较大，在其它条件相同的条件下，此处较易满足屈服准则，因此冲孔时变形首先从此处开始。

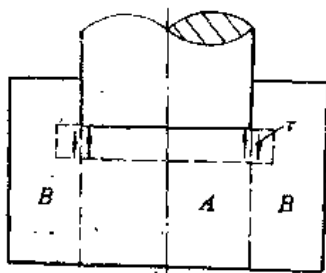


图4-8 A区与B区相互作用的示意图

三、金属塑性变形的不均匀性

塑性加工时，由于金属本身性质（成分、组织）不均匀和各处受力情况不同，金属内各处的变形情况也不同，变形首先发生在那些先满足屈服准则的部分。因此，有的地方先变形，有的地方后变形；有的地方变形大，有的地方变形小，实际上，塑性变形一般都是不均匀的（见本章和第六章各变形工序分析）。

塑性变形的不均匀性包括两方面的含义：

- 1) 塑性变形程度的不均匀性（指变形最后结果而言）
- 2) 塑性变形的不同时性（时间上有先后）。

由于塑性变形的不均匀性，将在各部分变形金属之间产生相互影响，产生附加应力（例如镦粗和冲孔时坯料侧表面切向产生的附加拉应力等）和残余应力等，带来一些不良的影响。但是，有时也可以有意识地利用某些因素造成的塑性变形不均匀，实现变形工艺上和组织性能上的某些要求^{[1][2]}。这将在本书有关章节中具体介绍。

四、塑性变形时金属的流动方向

塑性变形时金属的流动方向是塑性加工中经常遇到的一个重要问题。但是这个问题至今还未完全解决，还存在一些不同的观点。早期C.N. 古布金提出了“最小阻力定律”。1947年古布金曾用文字描述如下：“如果物体在变形过程中质点有向各个方向移动的可能性时，则

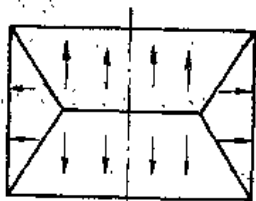


图4-9 金属流动方向

物体各质点将是向着阻力最小的方向移动的。”在有摩擦的条件下镦粗时，古布金认为“根据最小阻力定律，变形体内各点朝距周边最短的方向移动”。并得出了图4-9所示的流动方向图。后来1960年出版的他的著作《金属塑性变形》一书中作了修正。他指出：“最短法线方向并不是在任何时候都是最小阻力方向”。1954年И.Я. 塔尔诺夫斯基在他编著的《金

属塑性加工变形》一书中提出，在不同的摩擦条件下金属的流动有图4-10所示的三种情况。我们在文献^[30]中进行了13组试验，测量和分析了9872组数据，绘制了在不同条件下的流动方向图，并从大量的试验结果中得出结论，认为不仅摩擦系数，而且坯料尺寸的相对比例和“一次压下量”等对金属的流动方向都有重要影响。例如，当坯料长度 L_0 与宽度 b_0 之比

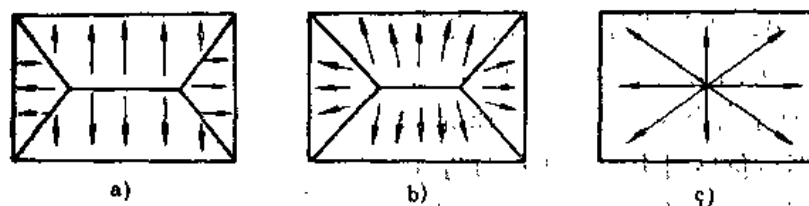
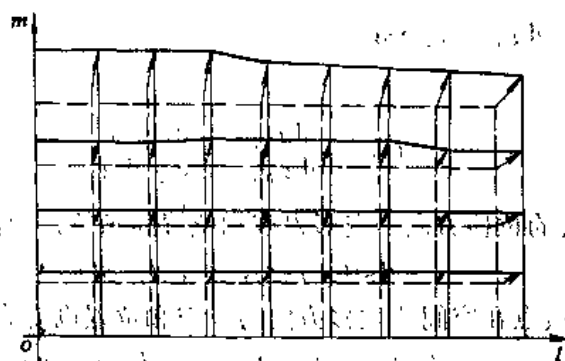


图4-10 金属流动方向示意图
a)摩擦系数非常大时 b)一般摩擦时 c)没有摩擦时

$\left(\frac{L_0}{b_0}\right)$ 等于2时, 尽管摩擦系数很大, 金属质点也不是沿垂直于周边的方向流动(图4-11);

而当 $\frac{L_0}{b_0} \geq 4$ 时, 在一般摩擦条件下, 在水平面上, 金属质点在一定区域内几乎垂直地向周



相对压下量为25.44%

图4-11 $\frac{L_0}{b_0} = 2$ 在摩擦系数很大时金属流动示意图(四分之一截面)^[30]

(实线——变形后网格, 虚线——变形前网格)

边流动(图4-12)。根据对上述现象的分析, 本书作者认为: ①金属的流动是由塑性变形引起的, 没有塑性变形就没有流动, 因此, 研究金属的流动问题时应当首先从微体的塑性变形和位移出发, 而不能看作是刚体的移动; ②变形体内一点的流动方向不仅与该点的应力应变状态有关, 而且相邻金属对该点的流动方向也有较大的影响, 即是说, 质点的流动方向是取决于整个变形体的应力场情况。

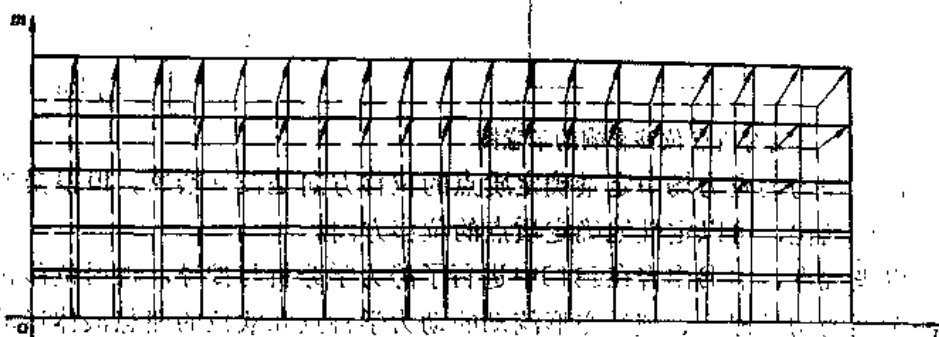


图4-12 $\frac{L_0}{b_0} \geq 4$ 在一般摩擦条件下的金属流动示意图^[30, 32]

(实线——变形后网格, 虚线——变形前网格)

假设从变形体中取一六面微体, 为便于分析, 取主轴 l 、 m 、 n 为坐标轴, 如果该微体在某一瞬间在 n 方向受微小的压缩变形, 微体变形前后在 l - m 平面上的投影如图4-13所示。 A 点在微体变形后位移到 A' 点。 AA' 即为 A 点在 l - m 平面上位移的大小和方向, 用 $d\bar{u}_A$ 表示, 它在 l 和 m 轴上的投影分别为 du_{Al} 和 du_{Am} , 于是:

$$d\bar{u}_A = du_{Al} + d\bar{u}_{Am} \quad (4-1)$$

$d\bar{u}_A$ 的方位由下式确定:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{du_{Al}}{du_{Am}} \quad (4-2)$$

因为 $du_{Al} = \varepsilon_l dl$, $du_{Am} = \varepsilon_m dm$

所以

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{du_{Al}}{du_{Am}} = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_m} \frac{dl}{dm} \quad (4-3)$$

式(4-3)说明质点的位移方向是变形程度和位置的函数, 即:

$$\operatorname{tg} \alpha = f(\varepsilon_l, \varepsilon_m, l, m) \quad (4-4)$$

同样可以证明, 质点在空间的位移方向与应变和位置也存在同样的关系, 即

$$\operatorname{tg} \alpha = f(\varepsilon_l, \varepsilon_m, \varepsilon_n, l, m, n) \quad (4-5)$$

对于矩形坯料中微体 P 上的质点 A , 位移方位除与微体 P 的应力应变有关外, 还受相邻金属 R 和 S 的变形和位移影响 (见图4-14), 如建立以动点 O' 为原点的浮动坐标 l' - m' (如图示), 则 A 点的位移方向将是沿两坐标轴位移的合成方向。

在非均匀应力场中, 沿 l 和 m 方向各点的应力应变状态都是变化的, 经推导可得 A 点的位移方向为:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\int_{l_A}^{l_A'} \varepsilon_l dl}{\int_{m_A}^{m_A'} \varepsilon_m dm} \quad (4-6)$$

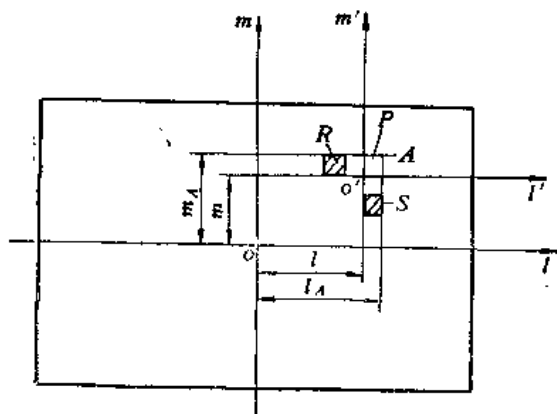


图4-14 相邻金属对质点位移影响的示意图

因此, 在非均匀应力场中定量确定质点的位移方向是较复杂的。但根据塑性成形理论, 经过一定近似简化, 可以定性地确定质点的位移方向。

根据以上观点, 本书作者在[31]中进行了静力学分析与推导, 根据位移和应变的关系、应力应变关系的增量理论、塑性变形流动的动力学特点和欧拉的理想液体运动微分方程等得出了以下结论: “塑性变形时, 在主轴方向, 金属质点是沿着主应力增大 (指代数值, 下同) 的方向位移的。在空间, 金属质点是沿着三个位移的合成方向流动; 在 σ_1 - σ_2 平面上, 金属质点主要向着最大主应力 (指代数值) 增大的方向流动 (在非轴对称的情况, 由于 σ_2 的影

响,实际上有一定偏移);如果在所研究的平面(例如子午面)内仅有中间主应力和最小主应力,则金属质点主要向着较大主应力增大方向流动。对于均匀应力场,取几何对称轴为坐标轴时,金属质点主要在最大主应力 σ_1 的方向背离坐标轴(σ_2 轴)流动”。这一结论适用于所有塑性加工工序变形区内金属的流动问题。对于锻造领域,由于绝大多数锻造工序都属三向压应力情况,因此可作适当简化。由于这时最大主应力也是压应力,如果把这一压应力理解为金属流动时受到的工具或相邻金属作用的阻力,则这一最大主应力的增大方向也就是最小阻力(增大)的方向,于是可以描述为:“在三向压应力的情况金属主要向着最小阻力(增大)的方向流动。”

在上述观点中包括了古布金的说法,但又有区别:

- 1)应用范围比古布金的“最小阻力定律”广。
- 2)在三向压应力情况下增加了“主要”二字,即考虑了中间主应力和相邻金属的影响。

在推导过程中为使问题简化,结论中所讨论的是瞬间的流动方向;整个分析过程都采用了主轴坐标。

由于金属的流动方向不仅取决于某一点本身的应力状态和应力顺序,而且还取决于相邻金属的应力状态和应力顺序,即取决于整个应力场。而实际的变形工序中由于各种因素的影响,多数工序的应力场是不均匀的,但是除了个别的情况外,应力场是连续的。因此对复杂的应力场我们应按应力应变顺序是否相同来分区进行研究。在每个区域内各点虽然偏离的程度有差异,但主要流动方向是大致相近的,这对定性分析工艺问题影响不大。

上面对流动方向问题从理论上进行了讨论,下面结合几个工序介绍其应用。在本章和第六章中还将结合各工序进行分析。

确定变形工序的金属流动方向时一般可按下列程序:

- 1)根据变形条件和受力情况分析进行应力应变分区。
- 2)作出应力应变状态图和定出最大主应力。
- 3)根据受力情况定出最大主应力的增大方向和金属流动方向。

1.拉拔(图4-15)

拉拔时变形区是轴对称的,整个变形区的应力应变顺序是一样的,故不需分区。主应力简图亦见图4-15。轴向主应力 σ_1 是最大主应力。最大主应力的增大方向与拉力方向一致。故金属主要沿着拉力的方向流动。

2.矩形坯料在平砧间镦粗(图4-16)

矩形坯料在平砧间镦粗时,假设接触面上沿各个方向的摩擦系数相同。以质点A为例,考虑到其相邻金属的影响,其应力状态和应力顺序如图4-16c所示。 l 方向是最大(指代数值)主应力方向。边上的 $\sigma_1 = 0$,在 $l = 0$ 处, σ_1 为某一负值,故增大的方向由中心向外(这也是阻力最小的方向)。由于 σ_2 的影响,金属流动方向和 l 方向有一定偏离(如图示)。因为在 m 方向 σ_2 有一定的增大,故有位移,位移量的大小取决于A点的位置及其应变值 ϵ_2 。

在B点,金属的流动方向与 l 一致,因为在 m 方向上 σ_2 无增量(两边的应力相等),故无位移。

同样,可以求出D点金属流动的大致方向(如图示);在角的等分线上(此处 $\sigma_1 = \sigma_2$)C点的流动方向与长边的夹角 $\alpha \approx 45^\circ$ 。

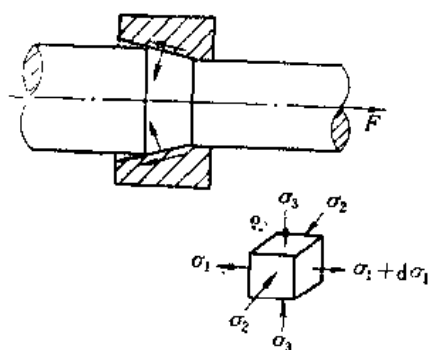


图4-15 拉拔时的受力情况和主应力简图

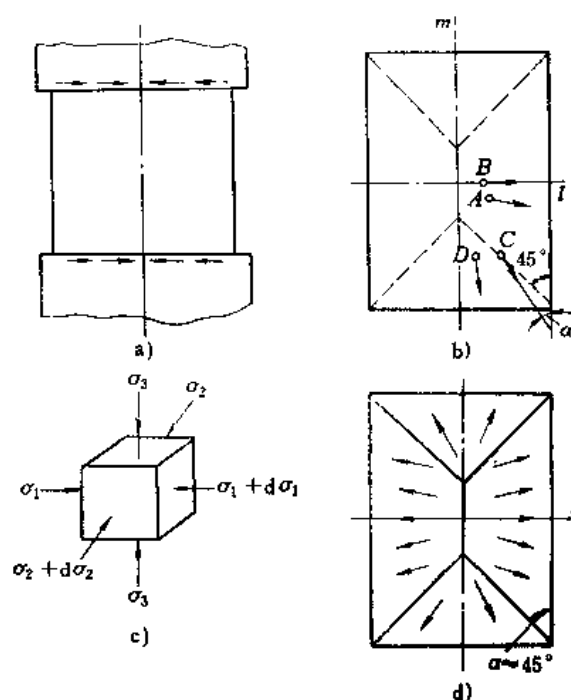


图4-16 矩形坯料镦粗时的受力情况、主应力简图及金属流动方向示意图

根据以上分析便可作出金属的流动方向图，如图4-16d所示。这与实际测得的情况是基本符合的。

用同样的方法可求出方柱体坯料镦粗时的流动方向（见图4-17），在 l 方向和 m 方向金属流动的数量相等。

3. 拔长

矩形截面坯料在平砧上拔长，就每次压缩而言，变形区的流动情况与镦粗时相近，但两者又有差别。当送进长度 l 大于坯料宽度 a 时（图4-18），金属多沿横向流动，坯料宽度增

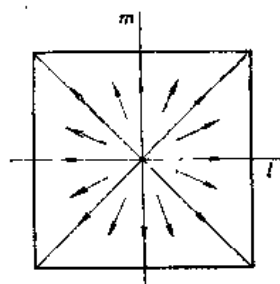


图4-17 方柱体坯料镦粗时金属流动方向示意图

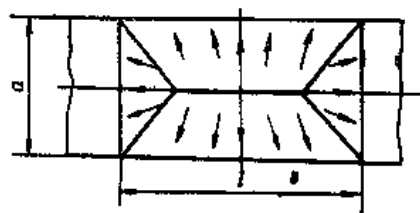


图4-18 矩形截面坯料拔长时金属流动方向示意图

加的多，长度增加的少；当 l 小于 a 时，金属多沿轴向流动（图4-19），坯料轴向伸长的多，横向展宽的少。因此，生产中操作时，为提高拔长效率应适当减小送进量（但也不易太小），若欲使坯料展宽时，送进量应大些。但是在送进长度 l 与宽度 a 相等（图4-20）时，两个方向的金属流动量并不等，即沿轴向的金属流动量多于横向。这是由于外端金属影响的结果。外端增大了横向的阻力 σ_2 。这时在对角线上不再是 $\sigma_1 = \sigma_2$ 了。于是其流动方向图与自由镦粗时也不同，主要是轴向流动的区域Ⅰ、Ⅱ的面积扩大了，如图中虚线所示。

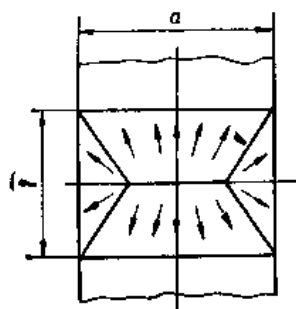


图4-19 小送进量拔长时金属流动方向示意图

在V形型砧或圆形型砧中拔长圆断面坯料时（图4-21），由于工具的侧面压力使横向的主应力 σ_2 远远小于轴向的主应力 σ_1 ，于是大量金属沿轴向流动。这就是用型砧拔长时效率较高的原因。

4. 环形件镦粗

环形件在有摩擦的条件下镦粗时，最小主应力 σ_3 是轴向，最大主应力 σ_1 是径向，中间主应力 σ_2 是切向，由于切向的应力是均匀分布的，故切向金属无相对位移，金属在子午面上变形流动，轴向缩短，径向伸长。由于在内外侧边缘上最大主应力 $\sigma_1 = 0$ ，中间某处 σ_1 为负值，增量方向沿径向由中间向内和向外。于是，靠近内壁的金属沿径向向内孔流动，靠近外周的金属沿径向向外流动，这样在环形件内就出现了流动分界面，如图4-22中的双点划线所示。

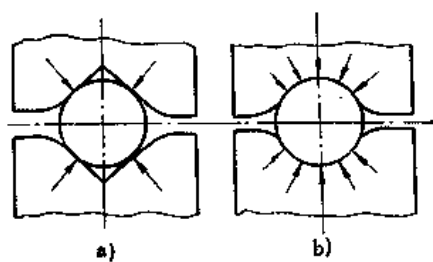


图4-21 圆截面坯料在型砧间拔长时的受力情况

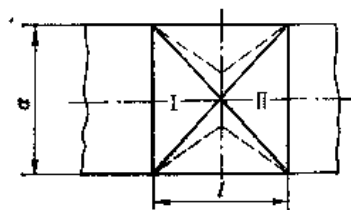


图4-20 送进长度等于坯料宽度时金属的流动分区示意图

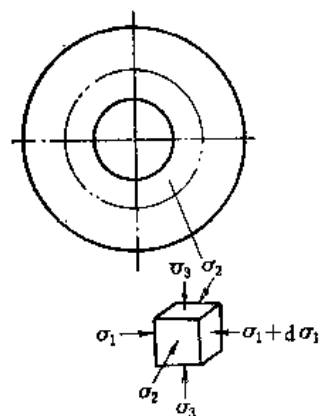
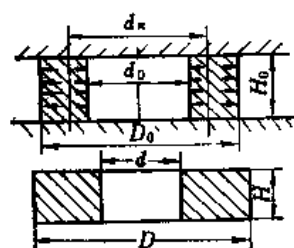


图4-22 环形件镦粗时的主应力简图及流动分区示意图

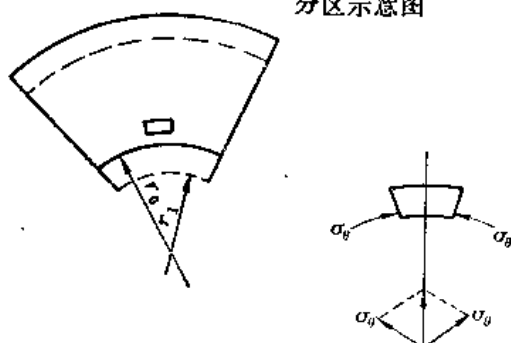


图4-23 环形件镦粗时受力分析简图

应当指出，分界面的位置不是在圆环壁厚的中间处，而是偏于内侧，其原因是金属向内孔流动时，直径缩小，沿切向受压应力，该切向压应力可以引起一个径向的压应力（图4-23）。这个由金属内力引起的径向压应力与内圈的摩擦阻力方向是一致的。

由于内孔直径缩小时要由内力引起径向向外的应力, 因此, 在没有摩擦的条件下镦粗环形件时, 坯料外径增大, 内孔直径也增大。

第二节 镦 粗

使坯料高度减小, 横截面增大的成形工序称为镦粗。在坯料上某一部分进行的镦粗称为局部镦粗。

镦粗用于:

- 1) 由横截面积较小的坯料得到横截面积较大而高度较小的锻件。
- 2) 冲孔前增大坯料横截面积和平整坯料端面。
- 3) 提高下一步拔长时的锻造比。
- 4) 提高锻件的力学性能和减小力学性能的异向性。
- 5) 反复进行镦粗和拔长可以破碎合金工具钢中的碳化物, 并使其均匀分布。

一般镦粗时, 坯料内的应力场和应变场是很不均匀的。镦粗的坯料有圆截面、方截面和矩形截面等。

本节主要结合圆截面坯料讨论镦粗时的变形流动规律和质量控制问题。对矩形截面和方截面坯料, 仅就其应力应变特点作一般性介绍。

一、镦粗工序的主要质量问题和变形流动特点

坯料镦粗时的主要质量问题有: 侧表面易产生纵向或呈 45° 方向的裂纹, 锭料镦粗后上、下端常保留铸态组织; 高坯料镦粗时常由于失稳而弯曲等。

镦粗时作用力是沿轴向, 而侧表面上的纵向裂纹是由切向拉应力引起的, 切向拉应力的产生与镦粗时不均匀变形有关; 锭料镦粗后上、下端保留铸态组织也与镦粗时的不均匀变形有关。下面先研究镦粗时的变形流动特点, 然后分析上述质量问题产生的具体原因和防止措施, 一般坯料($\frac{H_0}{D_0} = 0.8 \sim 2$)在平板间镦粗时, 外观呈现鼓形, 即中间直径大, 两端直径小(图4-24)。用网格或硬度试验等方法可以观察到坯料镦粗后其内部变形的情况, 图4-25

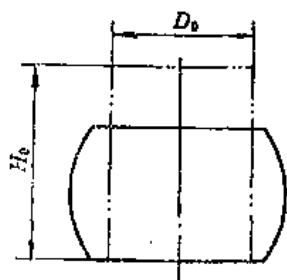


图4-24 平砧镦粗

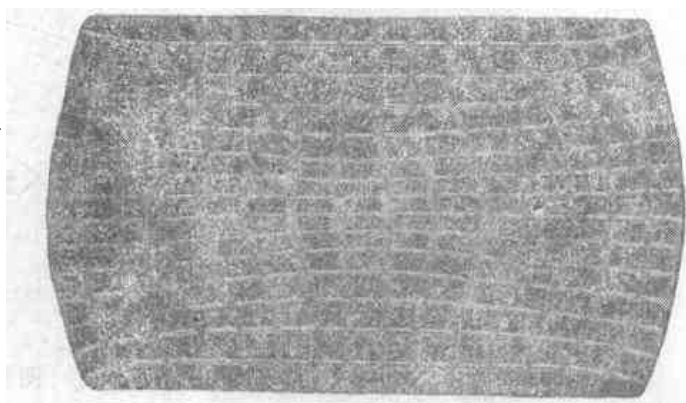


图4-25 平砧镦粗时坯料子午面的网格变化

是用网格法试验的情况。从对试件变形前后网格的测量和计算可以看出镦粗时坯料内部的变形是不均匀的。变形程度沿轴向和径向的分布如图4-26所示。

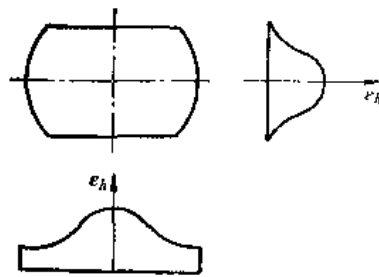


图4-26 镦粗时变形程度沿轴向和径向的分布
 e_h —高度方向变形程度

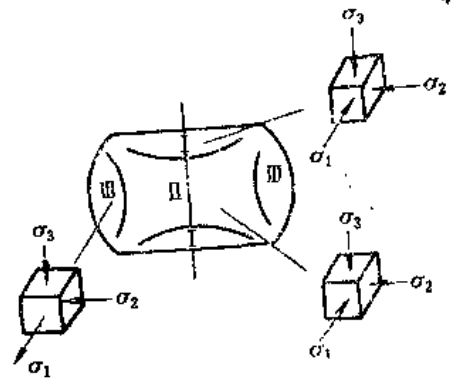


图4-27 镦粗时按变形程度分区和
各区应力情况

变形区按变形程度大小大致可分为三个区（图4-27）。第Ⅰ区变形程度最小，第Ⅱ区变形程度最大，第Ⅲ区变形程度居中。在常温下镦粗时产生这种变形不均匀的原因主要是工具与坯料端面之间摩擦力的影响，这种摩擦力使金属变形困难，使变形所需的单位压力增高。从高度方向看，中间部分（Ⅱ区）受到的摩擦影响小，上、下两端（Ⅰ区）受到的影响大。在接触面上，由于中心处的金属流动还受到外层的阻碍，故愈靠近中心部分受到的摩擦阻力愈大（即 σ_2 、 σ_3 大），变形愈困难。由于这样的受力情况，所形成的近似锥形的第Ⅰ区比第Ⅱ区变形困难，一般称为困难变形区。

在平板间热镦粗坯料时，产生变形不均的原因除工具与毛坯接触面的摩擦影响外，温度不均也是一个很重要的因素，与工具接触的上、下端金属（Ⅰ区）由于温度降低快，变形抗力大，故较中间处（Ⅱ区）的金属变形困难。

由于以上原因，使第Ⅰ区金属的变形程度小和温度低，故镦粗坯料时此区铸态组织不易破碎和再结晶，结果仍保留粗大的铸态组织。而第Ⅱ区由于变形程度大和温度高，铸态组织被破碎和再结晶充分，从而形成细小晶粒的锻态组织，而且坯料中部的原有孔隙也被焊合了。

由于第Ⅱ区金属变形程度大，第Ⅲ区变形程度小，于是第Ⅲ区金属向外流动时便对第Ⅱ区金属作用有压应力，并使其在切向受拉应力。愈靠近坯料表面切向拉应力愈大。当切向拉应力超过材料当时的强度极限或切向变形超过材料允许的变形程度时，便引起纵向裂纹。低塑性材料由于抗剪切的能力弱，常在侧表面产生 45° 方向的裂纹。

由上述可见，镦粗时的侧表面裂纹和内部组织不均匀都是由于变形不均匀引起的。镦粗时产生这种变形不均匀的原因，一是工具与坯料接触面的摩擦影响；二是与工具接触的部分金属由于温度降低快， σ_r 较高。因此，为保证内部组织均匀和防止侧表面裂纹产生，应当改善或消除引起变形不均的因素或采取合适的变形方法。通常采取的措施是：

1. 使用润滑剂和预热工具

镦粗低塑性材料时常用的润滑剂有玻璃粉、玻璃棉和石墨粉等，为防止变形金属很快地冷却，镦粗用的工具均应预热至 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 。

2. 采用凹形毛坯

锻造低塑性材料的大型锻件时，镦粗前将坯料压成凹形（图4-28a），可以明显提高镦粗时允许的变形程度。这是因为凹形坯料镦粗时沿径向有压应力分量产生（图4-28b、c），对侧表面的纵向开裂起阻止作用。

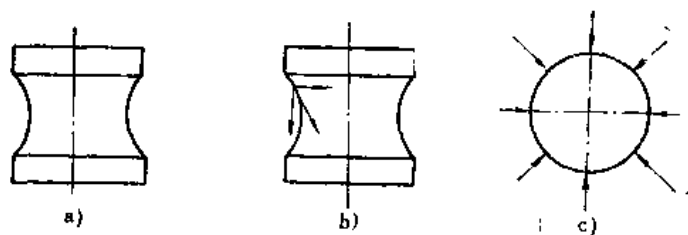


图4-28 凹形坯料锻粗时的受力情况

3. 采用软金属垫

热锻粗大型和较大型的低塑性材料锻件时，在工具和坯料之间放置一块温度不低于坯料温度的软金属垫板（图4-29a）。由于放置了这种易变形的软垫（一般采用碳素钢），变形金属不直接受到工具的作用。由于软垫的变形抗力较低故先变形并拉着坯料作径向流动，结果坯料的侧面内凹（图4-29b）；当继续锻粗时软垫直径增大，厚度变薄，温度降低，变形抗力增大，而此时坯料明显地锻粗，侧面内凹消失，呈现圆柱形，再继续锻粗时，可获得程度不太大的鼓形（图4-29d）。

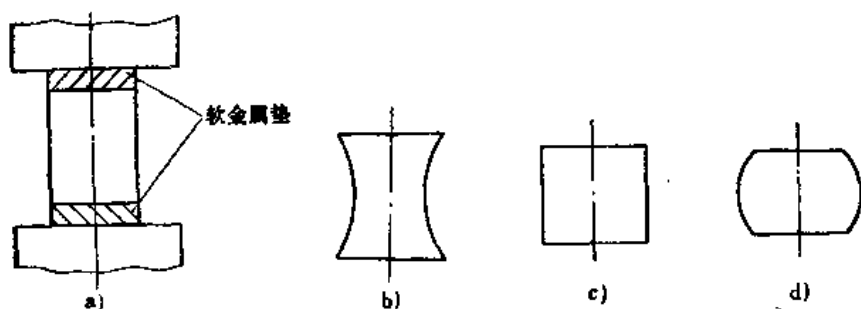


图4-29 采用软金属垫板锻粗时坯料变形过程图

由于锻粗过程中坯料侧面内凹，沿侧表面有压应力分量产生，因此产生裂纹的倾向显著降低。又由于坯料上、下端面部分也有了较大的变形，故不再保留铸态组织了。

4. 采用柳镦、叠镦和套环内镦粗

(1) 柳镦 高速钢坯料锻粗时常因出现鼓形而产生纵向裂纹，为了避免产生纵向裂纹常采用柳镦。柳镦就是预先将坯料端部局部成形，再重击锻粗把内凹部分镦出，然后镦成圆柱形。对于小坯料可先将坯料斜放，轻击，旋转打校成图4-30的形状。对于较大的坯料可先

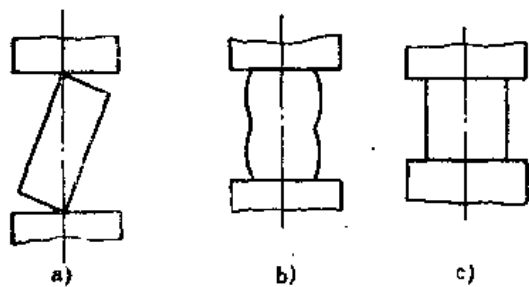


图4-30 柳镦

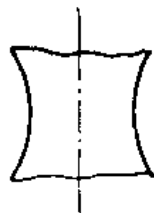


图4-31 用柳镦成形后的毛坯

用辚铁辚成图4-31的形状。

(2) 叠锻 叠锻主要用于扁平的圆盘锻件, 将两件叠起来锻粗, 形成鼓形(图4-32a), 然后各自换成图4-32b的形状继续锻粗消除鼓形。叠锻不仅能使变形均匀, 而且能显著地降低变形抗力。

(3) 在套环内锻粗 这种锻粗方法是在坯料的外圈加一个碳钢外套(图4-33), 靠套环的径向压力来减小由于变形不均而引起的附加拉应力, 锻粗后将外套去掉。这种锻造方法主要用于锻粗低塑性的高合金钢。

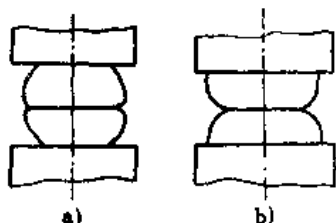


图4-32 叠锻

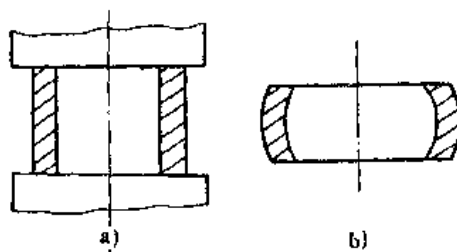


图4-33 套环内锻粗

5. 采用反复锻粗拔长的锻造工艺

反复锻粗拔长工艺有单向(轴向)反复锻拔、十字反复锻拔、双十字反复锻拔等多种变形方法。其共同点是使锻粗时困难变形区在拔长时受到变形, 使整个坯料各处变形都比较均匀。这种锻造工艺在锻造高速工具钢、Cr12型模具钢、铝合金和钛合金时应用较广(见第十一章)。

上面分析的是一般坯料($\frac{H_0}{D_0} = 0.8 \sim 2.0$)锻粗时的质量问题和变形流动特点, 下面介绍高坯料($\frac{H_0}{D_0} \geq 3$)和矮坯料($\frac{H_0}{D_0} \leq 0.5$)锻粗时的情况。

锻粗高坯料($\frac{H_0}{D_0} \approx 3$)时, 常常先要产生双鼓形(图4-34), 上部和下部变形大, 中部变形小。在锤上、水压机上或热模锻压力机上锻粗时均可能产生双鼓形, 而在锤上锻粗时更容易产生。

较高坯料锻粗时产生双鼓形是由其应力场决定的^[35]。与工具接触的上、下端金属由于摩擦等因素的影响, 形成近似锥形的困难变形区, 外力通过它作用到坯料的其它部分(图4-35a), 在困难变形区的外圈切一个薄环(图4-35b), 该环受内压力作用, 处于径向、轴向受压而切向受拉的应力状态(图4-35c)。由于受异号应力作用, 上、下端外圈金属较坯料中部易于满足塑性条件, 优先进行塑性变形, 因此导致双鼓形的形成。

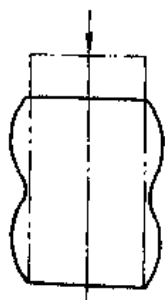


图4-34 较高坯料锻粗时形成双鼓形

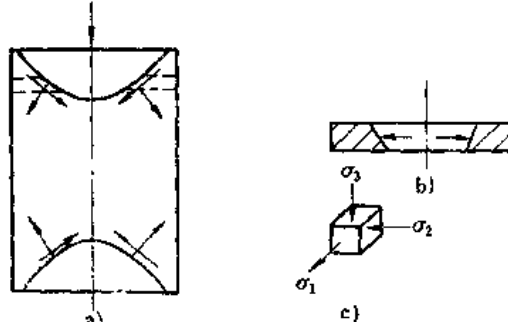


图4-35 较高坯料锻粗时的受力情况

在锤上镦粗时, 尤其每次的锤击力不大时, 打击能量首先被上、下端金属的塑性变形所吸收, 故更易产生双鼓形。

坯料更高 $\left(\frac{H_0}{D_0} > 3\right)$ 时, 镦粗时容易失稳而弯曲, 尤其当坯料端面与轴线不垂直, 或坯料有初弯曲, 或坯料各处温度和性能不均, 或砧面不平时更容易产生弯曲。弯曲了的坯料如不及时校正而继续镦粗则要产生折迭。

矮坯料 $\left(\frac{H_0}{D_0} \leq 0.5\right)$ 镦粗时, 按变形程度大小也可分为三个区, 但由于相对高度较小, 内部各处的变形条件相差不太大, 内部变形较一般坯料 $\left(\frac{H_0}{D_0} = 0.8 \sim 2.0\right)$ 镦粗时均匀些, 鼓形度也较小。这时, 与工件接触的上、下端金属也有一定程度的变形, 并相对于工具表面向外滑动。而一般坯料镦粗初期端面尺寸的增大主要是靠侧表面的金属翻上去的。

以上分析了圆截面坯料镦粗的问题, 下面概要介绍矩形截面坯料镦粗时的应力应变分析。

矩形截面坯料在平砧间镦粗(图4-36a)时, 由于沿 m 和 l 两个方向受到的摩擦阻力不同, 变形体内各处的应变情况也是不同的。在图4-36b中可以分为四个区域。在I、II区内, m 方向(长度方向)的阻力大于 l 方向(宽度方向)的阻力。在 l 轴上, m 方向的阻力最大。三个方向应力绝对值大小的顺序是: $|\sigma_n| > |\sigma_m| > |\sigma_l|$, 根据应力应变关系, 坯料在高度方向被压缩后, 金属沿 l 方向的伸长应变较大, m 方向则较小, 如图4-36c所示, 在对称轴(l 轴)上, 伸长应变最大。在III区和IV区内, l 方向的阻力大于 m 方向的阻力, 于是镦粗时, m 方向的伸长应变较大, 如图4-36d所示, 在对称轴(m 轴)上伸长应变最大。因此矩形坯料镦粗时, 较多金属沿宽度方向流动, 并趋于形成椭圆形。

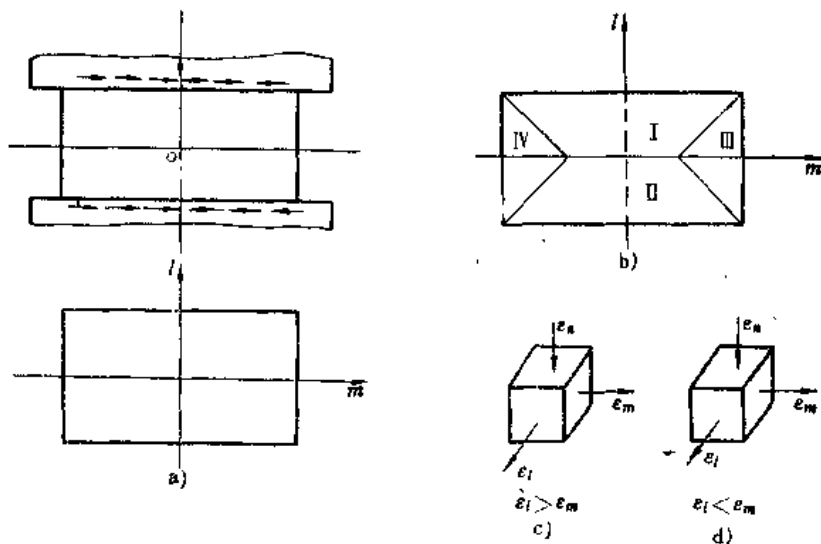


图4-36 矩形截面坯料镦粗时的应力应变关系

二、镦粗时的注意事项

1) 为防止镦粗时产生纵向弯曲, 圆柱体坯料高度与直径之比不应超过 $2.5 \sim 3$, 在 $2 \sim 2.2$ 的范围内更好。对于平行六面体, 其高度和较小基边之比应小于 $3.5 \sim 4$ 。

镦粗前坯料端面应平整，并与轴线垂直。

镦粗前坯料加热温度应均匀，镦粗时要把坯料围绕着它的轴线不断地转动，坯料发生弯曲时必须立即校正。

2) 镦粗时每次的压缩量应小于材料塑性允许的范围。如果镦粗后进一步拔长时，应考虑到拔长的可能性，即不要镦得太矮。禁止在终镦温度以下镦粗。

3) 对有皮下缺陷的锭料，镦粗前应进行倒棱制坯，其目的是焊合皮下缺陷，使镦粗时侧面不致产生裂纹，同时也去掉钢锭的棱边和锥度。

4) 为减小镦粗所需的力量，坯料应加热到该种材料所允许的最高温度。

5) 镦粗时坯料高度应与设备空间尺寸相适应。

在锤上镦粗时，应使

$$H_{\text{锤}} - H_0 > 0.25 H_{\text{锤}} \quad (4-7)$$

式中 $H_{\text{锤}}$ ——锤头的最大行程；

H_0 ——坯料的原始高度。

在水压机上镦粗时，应使

$$H_{\text{水}} - H_0 > 100 \text{ mm} \quad (4-8)$$

式中 $H_{\text{水}}$ ——水压机工作空间最大距离；

H_0 ——坯料的原始高度。

第三节 拔 长

使坯料横截面减小而长度增加的成形工序称为拔长。

本节主要结合拔长时的生产率和质量问题，研究拔长时金属的变形和流动特点，并确定合理的工艺参数和工艺方法。

拔长可分为矩形截面坯料的拔长，圆截面坯料的拔长和空心坯料的拔长等三类。现分别介绍如下。

一、矩形截面坯料的拔长

拔长是在长坯料上局部进行压缩（图4-37），属于局部加载、局部受力、局部变形的情况。其变形区的变形和流动与镦粗相近，但又区别于自由镦粗，因为它是在两端带有不变形金属的镦粗。这时，变形金属的变形和流动除了受工具的影响外，还受其两端不变形金属的影响。下面先分析拔长时宏观尺寸变化的情况。

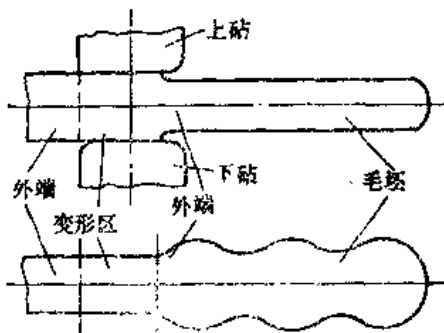


图4-37 拔长

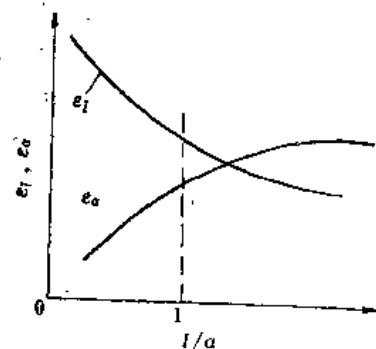


图4-38 轴向和横向变形程度随相对送进量变化的情况

矩形截面坯料拔长时宏观尺寸变化的规律与六方形坯料的镦粗近似。在本章第一、二节已经介绍：当相对送进量（送进长度 l 与宽度 a 之比，即 l/a ，也叫进料比）较小时，金属多沿轴向流动，轴向的变形程度 ε_l 较大，横向的变形程度 ε_a 较小；随着 l/a 的不断增大， ε_l 逐渐减小， ε_a 逐渐增大。 ε_l 和 ε_a 随 l/a 变化的情况如图4-38所示。由图中可看出，在 $\frac{l}{a} = 1$ 处， $\varepsilon_l > \varepsilon_a$ ，即拔长时沿横向流动的金属量少于沿轴向流动的金属量。而在自由镦粗时沿轴向和横向流动的金属相等。这是由于拔长时两端不变形金属的影响造成的，它阻止了变形区金属横向的变形和流动。关于外端金属对变形区内部金属变形的影响将结合拔长时的质量分析进行介绍。

1. 矩形截面坯料拔长时的生产率

将截面积为 A_0 的坯料拔长到截面积为 A_n 的锻件所需的时间主要取决于总的压缩（或送进）次数，总的压缩次数 N 等于沿坯料长度上各遍压缩所需送进次数的总和，再加上为了修正锻件所需要的压缩次数，后者取为拔长时所需总压缩次数的一半。所以

$$N = 1.5 \sum_{k=1}^{k=n} i_k \quad (4-9)$$

式中 i_k ——沿坯料长度进行第 k 遍压缩的次数

$$i_k = \frac{l_{k-1}}{l}$$

总的压缩次数与每次压缩的变形程度及进料比等有关。要提高拔长时的生产率必须正确地选择相对压缩程度和进料比。

(1) 相对压缩程度 ε_n 的确定 相对压缩程度 ε_n 大时，压缩所需的遍数和总的压缩次数可以减少，故生产率高。但在实际生产中 ε_n 常受到一定限制。如果金属的塑性较差， ε_n 应按金属塑性所允许的数值确定；如果金属的塑性好，每次的变形程度可以大些，但是每次压缩后应保证宽度 a_n 与高度 h_n 之比 $\frac{a_n}{h_n} < 2.5$ 。否则翻转 90° 再压时坯料可能弯曲。

(2) 进料比 (l_{n-1}/a_{n-1}) 的确定 进料比 l_{n-1}/a_{n-1} 小时， ε_l 大，即在同样的相对压缩程度 ε_n 下，横截面减小的程度大，可以减少所需的压缩遍数。但是送进比 l_{n-1}/a_{n-1} 小时对于一定长度的毛坯，压缩一遍所需的送进次数增多。因此有必要确定一个最佳的送进值，这样在一定的变形程度下，所需的送进次数最少。这个最佳送进值可以按一定的公式计算出来，但是实际生产中确定送进量时常取 $l = (0.4 \sim 0.8)b$ 。式中 b 为平砧的宽度。

2. 矩形截面坯料拔长时的质量分析

在平砧上拔长锻料和低塑性材料（如高速钢等）的钢坯时，在坯料外部常常引起表面横向裂纹（图4-39a）及角裂（图4-39b），在内部常引起组织和性能不均匀、内部的纵向裂纹（图4-39c）和横向裂纹（图4-39d）等。

各种裂纹产生的原因与拉应力（或剪应力）的作用有关，而矩形截面坯料在平砧上拔长时坯料所受的作用力和摩擦力都是压力。与镦粗相似，上述拉应力（或切应力）的产生都是由于变形不均引起的。因此要分析上述缺陷产生的原因，确定合理的工艺参数和工艺方法必须从变形分析出发。

矩形截面坯料拔长时的送进量和压下量对质量的影响是很大的。其内部的变形情况与镦

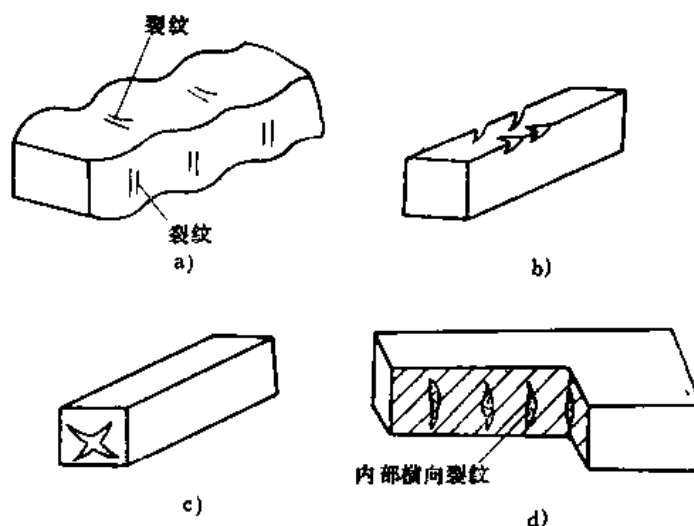


图4-39 矩形截面坯料拔长时产生的裂纹
a)侧表面裂纹 b)角裂 c)对角线裂纹 d)内部横向裂纹

粗很近似，当送进量较大 ($l > 0.5h$) 时 (见图4-40)，轴心部分变形大，处于三向压应力状态，有利于焊合坯料内部的孔隙、疏松，而侧表面 (确切地说应是切向) 受拉应力，当送进量过大 ($l > h$) 和压下量也很大时，此处可能因展宽过多而产生较大的拉应力引起开裂 (犹如镦粗时那样)。但是拔长时由于受两端未变形部分 (或称为外端) 的牵制，变形区内的变形分布和镦粗时也有一些差异，表现在每次压缩时沿接触面 $A-A$ (图4-41a和图4-40) 也有较大的变形，由于工具摩擦的影响，该接触面中间变形小，两端变形大，其总变形程度与沿 $O-O$ 是一样的。图4-41b是一次压缩后 $A-A$ 及 $O-O$ 面沿轴向的变形分布。但是，沿接触面 $A-A$ 及其附近的金属主要是由于轴心区金属的变形而被拉着伸长的。因此，在压缩过程中一直受到拉应力，与外端接近的部分受拉应力最大，变形也最大，因而常易在此处产生表面横向裂纹。由上述分析可见：拔长时，外端的存在加剧了轴向的附加应力。尤其在边角部分，由于冷却较快，塑性降低，更易开裂。高合金工具钢和某些耐热合金拔长时，常易产生角裂，操作时需注意倒角。

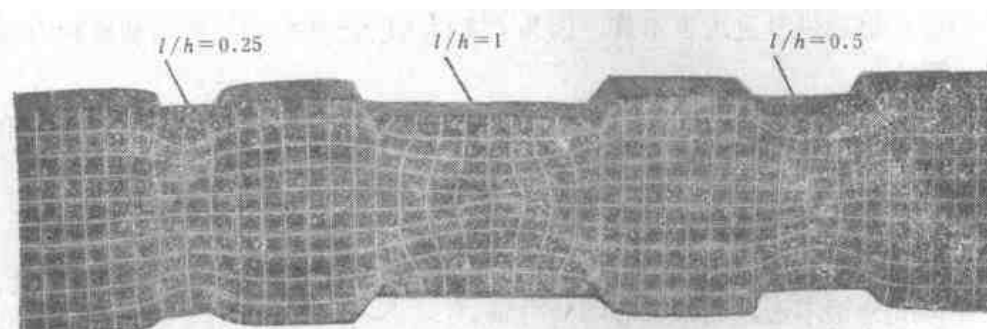


图4-40 拔长时坯料纵向剖面的网格变化

拔长高合金工具钢时，当送进量较大，并且在坯料同一部位反复重击时，常易沿对角线产生裂纹 (图4-39c)，一般认为其产生的原因是：坯料被压缩时，沿横截面上金属流动的情况如图4-42a所示， A 区 (困难变形区) 的金属带着靠着它的 a 区金属向轴心方向移动， B 区的金属带着靠近它的 b 区金属向增宽方向流动，因此， a 、 b 两区的金属向着两个相反

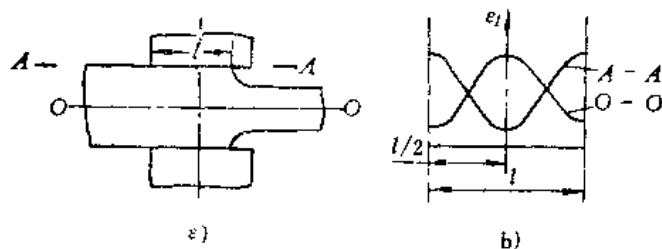


图4-41 拔长时的变形分布

的方向流动，当坯料翻转 90° 再锻打时， a 、 b 两区相互调换了一下（图4-42b），但是其金属的流动仍沿着两个相反的方向，因而 DD_1 和 EE_1 便成为两部分金属最大的相对移动线，在 DD_1 和 EE_1 线附近金属的变形最大。当多次反复地锻打时， a 、 b 两区金属流动的方向不断改变，其剧烈的变形产生了很大的热量，使得两区内温度剧升，此处的金属很快地过热，甚至发生局部熔化现象，因此在切应力作用下，很快地沿对角线产生破坏。有时当坯料质量不好，锻件加热时间较短，内部温度较低，或打击过重时，由于沿对角线上金属流动过于剧烈，产生严重的加工硬化现象，这也促使金属很快地沿对角线开裂。拔长时，若送进量过大，沿长度方向流动的金属减少，沿横截面上金属的变形就更为剧烈，沿对角线产生纵向裂纹的可能性也就更大。

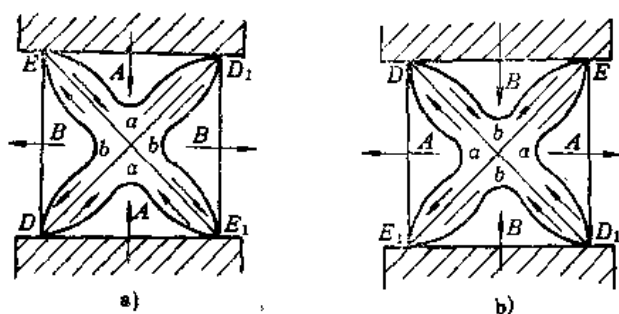


图4-42 拔长时坯料横截面上金属流动的情况

由以上可见，送进量较大时，坯料可以很好地锻透，而且可以焊合坯料中心部分原有的孔隙和微裂纹，但送进量过大也不好，因为 l/h 过大时，产生外部横向裂纹和内部纵向裂纹的可能性也增大。

在拔长大锭料时，常常遇到 $l < 0.5h$ 的情况，这时坯料内部的变形也是不均匀的，但和 $l > 0.5h$ 时不一样，例如当 $l = 0.25h$ 时（图4-43），变形情况如图4-40所示，上部和下部分变形大，中部变形小，变形主要集中在上、下两部分，中间部分锻不透，而且轴心部分沿轴向受附加拉应力，在拔长锭料和低塑性材料时，轴心部分原有的缺陷（如疏松等）进一步扩大，易产生横向裂纹（图4-39d）。应当指出，这时上、下部分变形大，中间部分变形小是由于主作用力沿高度方向的分散分布引起的（见第一节），由于上部和下部 $\{\sigma_s\}$ 较大，故易满足塑性条件。因此，它与高坯料锻粗时产生双鼓形的原因是不一样的。

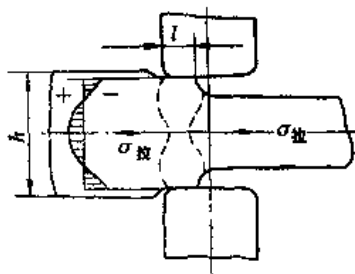


图4-43 小送进量拔长时的变形和应力情况

综合以上分析可以看出,送进量过大和过小都不好,因此正确地选择送进量是非常必要的。根据试验和生产经验,一般认为 $l/h = 0.5 \sim 0.8$ 时,相对讲较为合适。 $l/h = 0.5 \sim 0.8$ 虽较为合适,但由于工具摩擦和两端不变形部分的影响,一次压缩后沿轴向和横向的变形分布仍是不均匀的。为获得较为均匀的变形,使锻件锻后的组织和性能均匀些,拔长操作时,应使前后各遍压缩时的进料位置相互错开,图4-44是前后两遍的进料位置完全重叠的情况,图4-45是前后两遍的进料位置相互错开的情况。随进料位置的交错,两次压缩的最大变形区和最小变形区交错开了。

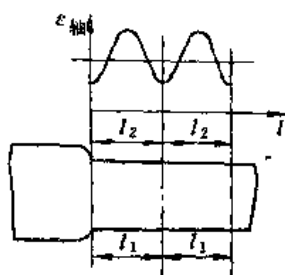


图4-44 拔长时前后两遍进料位置完全重叠时的变形分布

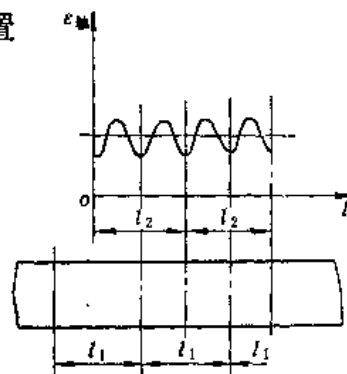


图4-45 拔长时前后两遍进料位置相互交错开时的变形分布

此外,为防止前面所述的裂纹产生,拔长时还应针对锻件的具体特点,采用适当的操作方法和合适的工具等。例如拔长高速钢时,应采用“两轻一重”的操作方法(即始锻和接近终锻温度时应轻击,在 $9000 \sim 1050^\circ\text{C}$ 钢材塑性较好时,应予重击,以打碎钢中大块的碳化物),并避免在同一处反复锤击。又例如拔长低塑性钢材和铜合金时,锤砧应有较大的圆角,或沿送进方向做成一定的凸弧或斜度(图4-46),这样,压缩时由于产生了水平方向的分力,抵消了一部分摩擦力的影响,从而有利于接触面附近金属的轴向流动。由于改善了受力情况和应力状态,从而降低了变形不均匀的程度和裂纹产生的可能性。

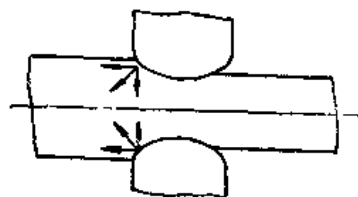


图4-46 凸弧形砧子拔长

在大型锻件的锻造中,保证锻件中心部分能够锻透是一个重要问题。因为钢锭轴心部分有疏松、气孔、微裂纹等缺陷,钢锭愈大,缺陷愈严重。在大转子的生产中,常常由于中心缺陷未消除而报废。为了能够使中心部分锻透,拔长时一般采用宽砧、大送进量,用走扁方的方法进行锻造。但有时中心部分质量还不能保证。目前我国一些工厂,开始采用表面降温锻造法(或称中心压实法)来生产一些重要的轴类锻件。这时,变形主要集中在中心部分,并且中心部分金属处于高温和高静水压的三向压应力状态,使疏松、气孔、微裂纹等得以焊合,使锻件内部质量有较大提高(详见第五章)。

拔长过程中常易产生的另一些质量问题是表面折迭、端面内凹和倒角时对角线裂纹等。

图4-47是一种表面折迭的形成过程,表面折迭是由于送进量很小、压下量很大,上、下两端金属局部变形引起的。避免产生这种折迭的措施是增大送进量,使两次送进量与单边压缩量之比大于 $1 \sim 1.5$ (即 $\frac{2l}{\Delta h} > 1 \sim 1.5$)。

图4-48是另一种折迭,是由于拔长时压缩得太扁,翻转 90° 立起来再压时,由于坯料弯

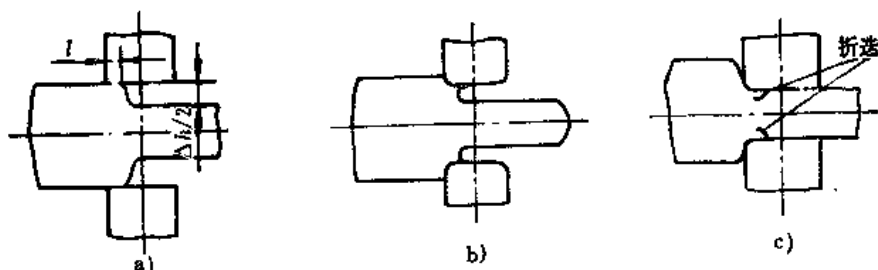


图4-47 表面折迭形成过程

曲并发展而形成的。避免产生这种折迭的措施是减小压缩量，使每次压缩后的锻件宽度与高度之比小于 $2 \sim 2.5$ ，即 $(a_n/h_n) < 2 \sim 2.5$ 。

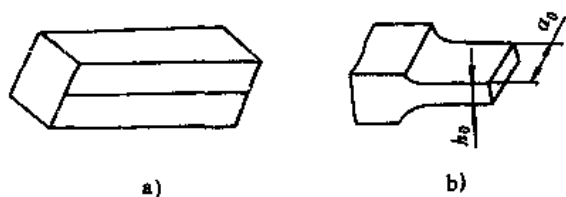


图4-48 侧表面折迭

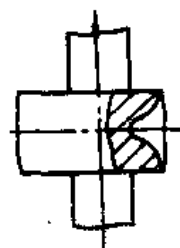


图4-49 端面内凹

端面内凹（图4-49）也是由于送进量太小、表面金属变形大、轴心部分金属未变形或变形较小而引起的。防止的措施是保证有足够的压缩长度和较大的压缩量，端部所留的长度应满足下列规定：

对矩形坯料（图4-50a）

$$\text{当 } \frac{B}{H} > 1.5 \text{ 时, } A > 0.4B$$

$$\text{当 } \frac{B}{H} < 1.5 \text{ 时, } A > 0.5B$$

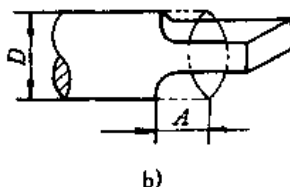
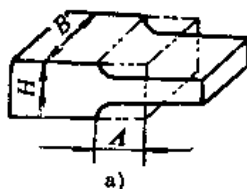


图4-50 端部拔长时的坯料长度

对圆截面坯料（图4-50b）， $A > 0.3D$ 。

倒角时的对角线裂纹是由于倒角时不均匀变形和附加拉应力引起的，常常在打击较重时产生。因此，倒角时应当锻得轻些。对低塑性材料最好在圆形砧内倒角（图4-51a、b）。

二、圆截面坯料的拔长

用平砧拔长圆截面坯料，当压下量较小时，接触面较窄较长（图4-52），沿横向阻力最小，所以金属多作横向流动，轴向流动的少，与拔长的目的正相反。

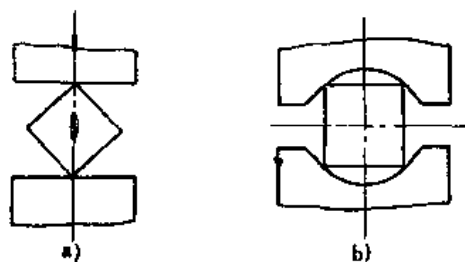


图 4-51 倒角
a) 倒角时的裂纹 b) 圆形砧内倒角

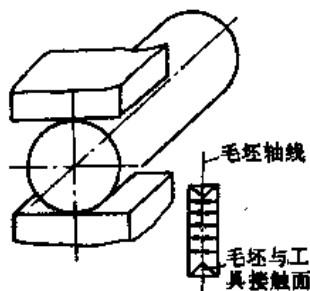


图4-52 平砧小压下量拔长圆截面坯料时金属的流动情况

用平砧采用小压缩量拔长圆截面坯料时, 不仅生产效率低, 而且常易在锻件内部产生纵向裂纹 (图4-53), 其原因是: ①工具与金属接触时, 首先是一条线, 然后逐渐扩大 (图4-54), 接触面附近的金属受到的压应力大, 故这个区 (ABC 区) 首先变形, 但是 ABC 区



图4-53 平砧拔长圆截面坯料时的纵向裂纹

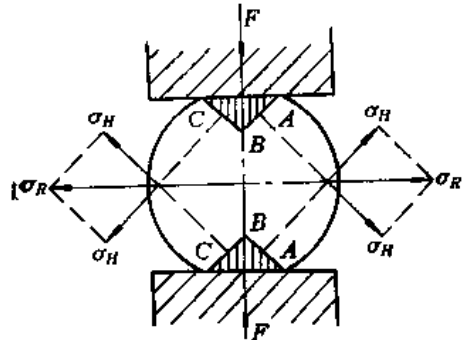


图4-54 平砧小压下量拔长时圆截面坯料的受力情况

很快成为困难变形区, 其原因是, 随着接触面的增加, 工具的摩擦影响增大, 而且温度降低较快, 故变形抗力增加, 因此, ABC 区就好像一个刚性楔子。继续压缩时 (但 Δh 还不太大时), 通过 AB 、 BC 面, 沿着与其垂直的方向, 将应力 σ_H 传给坯料的其它部分, 于是坯料中心部分便受到合力 σ_R 的作用。②由于作用力在坯料中沿高度方向分散地分布, 上、下端的压应力 $|\sigma_H|$ 大, 于是变形主要集中在上、下部分 (详见第一节), 轴心部分金属变形很小 (图4-55), 因而变形金属便主要沿横向流动, 并对轴心部分金属作用以附加拉应力。

附加拉应力和合力 σ_R 的方向是一致的。愈靠近轴心部分受到的拉应力愈大。在此拉应力的作用下, 使坯料中心部分原有的孔隙、微裂纹继续发展和扩大。当拉应力的数值大于金属当时的强度极限时, 金属就开始破坏, 产生纵向裂纹。

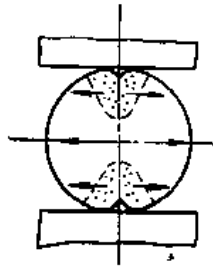


图4-55 变形不均引起坯料中心附加拉应力的示意图

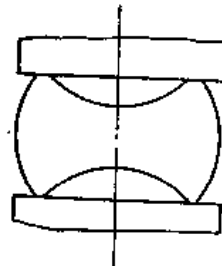


图4-56 平砧大压下量拔长时坯料的变形情况

拉应力的数值与相对压下量 $\Delta h/h$ 有关, 当变形量较大时 ($\Delta h/h > 30\%$), 困难变形区的形状也改变了 (图4-56), 这时与矩形断面坯料在平砧下拔长相同。轴心部分处于三向压应力状态。

借助于光弹试验可以近似地测出圆截面坯料在平砧下拔长时金属内部的应力分布 (图4-57)。当 $\varepsilon \approx 0$ 时 (图4-57a), σ_1 是压应力, σ_2 是拉应力, 在截面中心处 σ_2 的数值 (代数) 最大。其值在该处随变形程度的增加而逐渐减小。例如当 $\varepsilon = 7.5\%$ 时, σ_2 (中心) 小一些; $\varepsilon = 29\%$ 时, σ_2 (中心) 为零; $\varepsilon > 30\%$ 时, 中心处的 σ_2 变为压应力。

因此, 圆截面坯料用平砧直接由大圆到小圆的拔长是不合适的。为保证锻件的质量和提

下面两种方法

1) 在平砧下拔长时, 先将圆截面坯料压成矩形截面, 再将矩形截面坯料拔长到一定尺寸, 然后再压成八边形, 最后压成圆形 (图4-58), 其主要变形阶段是矩形截面坯料的拔长。

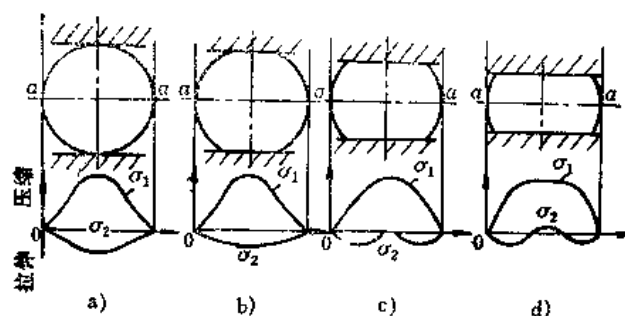


图4-57 平砧压缩圆形试件时用光弹法测得应力分布

a) $\varepsilon = 0$ b) $\varepsilon = 7.5\%$ c) $\varepsilon = 29\%$ d) $\varepsilon \geq 30\%$



图4-58 平砧拔长圆截面坯料时截面变化过程

2) 在型砧(或棒子)内进行拔长。它是利用工具的侧面压力限制金属的横向流动, 迫使金属沿轴向伸长。在水压机型砧内拔长与平砧相比可提高生产率20%~40%, 在型砧(或棒子)内拔长时的应力状态可以防止内部纵向裂纹的产生。图4-59是在圆形型砧内拔长时用光弹方法测得的应力分布情况。由图中可看出: 当包角 $\alpha \geq 90^\circ$ 之后便消除了纵向裂纹产生的可能性。

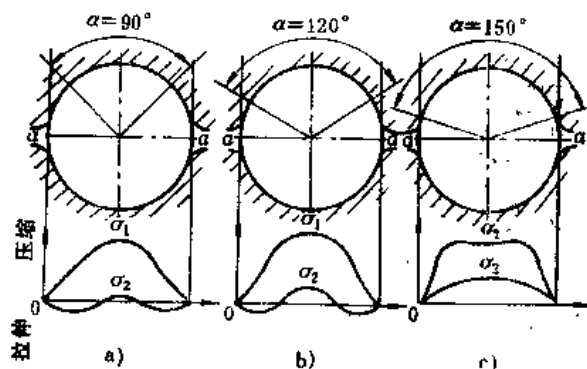
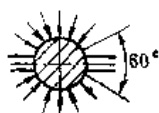

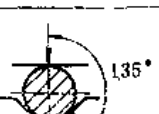
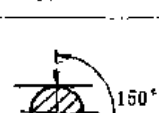
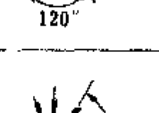


图4-59 型砧内压缩圆形试件时用光弹法测得的应力分布

拔长用的型砧有圆形型砧和V形型砧两类。型砧的形状对拔长效率、锻透深度、金属的塑性和表面质量有很大影响。常用的型砧形状见表4-1。

用表4-1中第5、6两种型砧拔长时, 轴心部分一般不易锻透, 并产生较大的自由展宽, 这种展宽要降低拔长的效率, 此外在锻件内部由于附加拉应力的作用还可能引起裂纹。为使轴心部分锻透, 减小展宽以提高拔长效率和防止内部裂纹, 可以采用封闭式的型砧(表4-1第1种), 这种型砧上、下均是半圆形, 与坯料直径相差不多。用这种型砧可以使变形深透到锻件的轴心部分, 并使展宽达到最小值。但是, 每一种尺寸的封闭式型砧, 所能锻造的锻

表4-1 型砧形状对拔长效率、锻透深度和金属塑性等的影响

序号	型砧形状	展宽	应用情况	变形特征	相同压下次数 的表面质量	相同压下量 和送进量的 拔长效率	能锻造的 直径范围
1		实际上没有	用于塑性很低的金属	变形深透 (中心部分有较大变形)	很高	很高	很小
2		不大	用于塑性低的金属	变形深透	较低	高	很小
3		中等	用于塑性低的金属	沿断面变形较均匀	较低	高	小
4		中等	用于塑性中等的金属	外层变形大 中心部分变形较小	低	中等	较小
5		较大	用于塑性中等的金属	外层变形大、中心变形小	低	中等	较大
6		大	用于塑性较好的金属	外层变形大 中心变形小	高	较低	大

件直径范围很小，当锻件的锻造比要求较大时，如采用这种型砧，则需要有一系列大小尺寸的很多砧块，故不经济。因此生产中拔长一般钢料时，常采用较大开口的型砧，它允许有较大的压下量，可以在较大的尺寸范围内进行锻造，封闭式型砧常用于拔长低塑性的钢料和最后修正用。例如对某些低塑性的高温合金锭料，先在封闭式型砧中拔长，此时锭料在几个方向都受到压力，不易开裂，待材料塑性提高后，再用顶角为 $95^\circ \sim 120^\circ$ 左右的上、下 V 形型砧锻造。

三、空心件拔长

空心件拔长一般叫芯轴拔长。芯轴拔长是一种减小空心坯料外径（壁厚）而增加其长度的锻造工序，用于锻制长筒类锻件（图4-60）。

芯轴上拔长与矩形截面坯料拔长一样，被上、下砧压缩的那一段金属是变形区，其左右

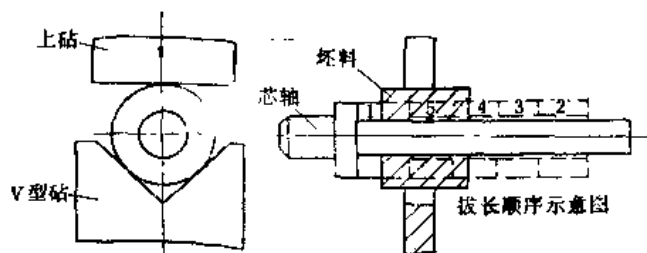


图4-60 芯轴拔长

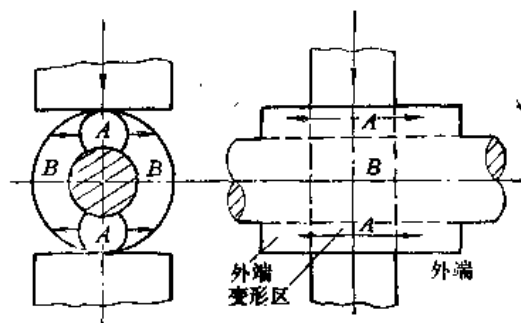


图4-61 芯轴拔长时金属的变形情况

两侧金属为外端。变形区又可分为A、B区（图4-61）。A区是直接受力区，B区是间接受力区。B区的受力和变形主要是由于A区的变形引起的。

在平砧上进行芯轴拔长时，变形的A区金属沿轴向和切向流动（图4-61）。

A区金属轴向流动时，借助于外端的作用拉着B区金属一道伸长；而A区金属沿切向流动时，则受到外端的限制，因此，芯轴拔长时，外端金属起着重要作用。外端对A区金属切向流动的限制愈强烈，愈有利于变形区金属的轴向伸长；反之，则不利于变形区金属的轴向流动。如果没有外端存在时，则环形件（在平砧上）将被压成椭圆形，并变成扩孔变形了。

外端对变形区金属切向流动限制的能力与空心件的相对壁厚（即空心件壁厚与芯轴直径的比值 $\frac{t}{d}$ ）有关。 $\frac{t}{d}$ 愈大时，限制的能力愈强； $\frac{t}{d}$ 愈小时，限制的能力愈弱。

当 $\frac{t}{d}$ 较小时，即外端对变形区切向流动限制的能力较小时，为了提高拔长效率，可以将下平砧改为V形型砧，借助于工具的横向压力限制A区金属的切向流动。当 $\frac{t}{d}$ 很小时，还可以把上、下砧都采用V形型砧。

芯轴拔长过程中的主要质量问题是孔内壁裂纹（尤其是端部孔壁）和壁厚不均。

孔壁裂纹产生的原因是：经一次压缩后内孔扩大，转一定角度再一次压缩时，由于孔壁与芯轴间有一定间隙，在孔壁与芯轴上、下端压靠之前，内壁金属由于弯曲作用受切向拉应力，如图4-62所示。另外，内孔壁长时间与芯轴接触，温度较低，塑性较差，当应力值或伸长率超过材料当时允许的指标时便产生裂纹。

A区金属切向流动的愈多，即内孔增加愈大时，愈易产生孔壁裂纹。因此在平砧上拔长时， $\frac{t}{d}$ 愈小（即孔壁愈薄）时愈易产生裂纹。

采用V形型砧，可以减小孔壁裂纹产生的倾向。

在芯轴上拔长时空心件端部更容易产生孔壁裂纹的原因是：①由于芯轴对变形区金属摩擦阻力的作用，空心件端部呈如图4-63所示的形状，下一次压缩时端部孔壁与芯轴间的间隙比其它部分大；②由于端部的外侧没有外端，故此处被压缩时，切向拉应力很大；③端部金

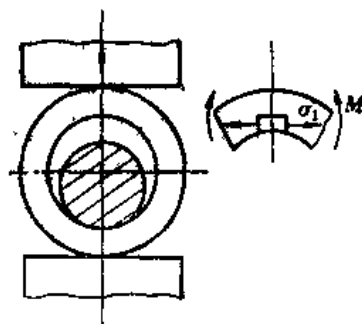


图4-62 芯轴拔长时内壁金属的受力情况

属与冷空气长时接触, 降温较大, 塑性较低。

因此为提高拔长效率和防止孔壁产生裂纹, 对于厚壁锻件 ($t/d > 0.5$), 一般采用上平砧和下 V 形型砧; 对于薄壁空心锻件 ($t/d \leq 0.5$), 上、下均采用 V 形型砧。在锤上拔长厚壁锻件时, 有时为了节省 V 形型砧的制造费用等, 上、下都用平砧, 但必须先锻成六方形再进行拔长, 达到一定尺寸后再锻成圆形。

为了防止孔壁裂纹的产生, 锻件两端部锻造终了的温度应比一般的终锻温度高 $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$; 锻造前芯轴应预热到 $150 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 。

为使锻件壁厚均匀和端部平整, 坯料加热温度应当均匀, 操作时每次转动的角度应一致。

在芯轴上拔长后取出芯轴也是一个重要问题, 应采取以下两点措施:

1) 芯轴上作出 $\frac{1}{100} \sim \frac{1}{150}$ 的斜度, 一头有凸缘, 表面加工比较平滑, 工作时涂油及石墨作润滑剂。

2) 按图 4-60 中的顺序拔长, 以使锻件孔壁与芯轴间形成间隙, 尤其最后一遍拔长时应特别注意。

在锤上锻造时如果芯轴被“咬住”, 可将锻件放在平砧上, 沿轴线轻压一遍, 然后翻 90° 再轻压, 使锻件内孔扩大一些, 即可取出芯轴。

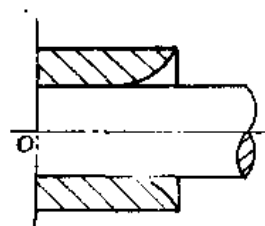


图 4-63 芯轴拔长时端部金属的变形情况

第四节 冲孔

在坯料上锻制出透孔或不透孔的工序叫作冲孔。

一、冲孔的受力变形分析

冲孔是局部加载、整体受力、整体变形。因为是局部加载、整体受力, 可以将坯料分为直接受力区 (A 区) 和间接受力区 (B 区) 两部分 (图 4-64)。B 区的受力 (指径向和切向) 主要是由 A 区的变形引起的。先分别讨论 A 区和 B 区的应力和应变情况, 再分析开式冲孔的质量问题和工艺参数的确定。

A 区和 B 区的应力应变情况:

1. A 区

A 区金属的变形可看做是环形金属包围下的墩粗。A 区金属被压缩后高度减小, 横截面积增大, 向四周径向外流, 但受到环壁的限制, 故处于三向受压的应力状态, 其应力应变简图如图 4-64 所示。

通常 A 区内的金属不是同时进入塑性状态的。其原因, 一是与冲头接触部分的金属, 由于摩擦等因素的影响成为困难变形区; 二是当坯料较高时变形是由上往下逐渐发展的 (图

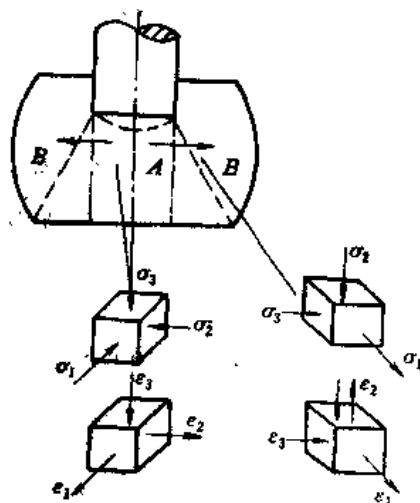


图 4-64 开式冲孔时的应力应变简图

4-6)。后者是由于沿加载方向受力面积逐渐扩大, 应力的绝对值逐渐减小造成的。(详见本章第一节)。A区内离冲头愈远, $|\sigma_3|$ 愈小, 因此, 仅冲头下部的一段距离内(而非全高)的金属满足塑性条件, 产生塑性变形。随着冲头下降, 变形区也逐渐下移(图4-65)。

由于是环形金属包围下的镦粗, 故冲孔时的单位压力比自由镦粗时要大, 而且环壁愈厚时单位冲孔力也愈大。这是因为在与B区的交接处 σ_1 和 σ_3 为:

$$\sigma_1 = -1.1\sigma_s \ln \frac{D}{d}, \quad \sigma_3 = -\sigma_s + \sigma_1 = -\sigma_s - 1.1\sigma_s \ln \frac{D}{d}$$

经运算后可得单位冲孔力的公式为:

$$p = \sigma_s \left(2 + 1.1 \ln \frac{D}{d} \right) \quad (4-10)$$

可见 $\frac{D}{d}$ 愈大(即环壁愈厚)时, $|\sigma_1|$ 和

$|\sigma_3|$ 愈大, 单位冲孔力 p 也愈大。

2. B区

B区之受力和变形主要是由于A区的变形引起的。B区受力后首先呈弹性状态, 然后进入塑性状态。在弹性状态时径向受压应力, 切向受拉应力, 其分布如图4-66所示。从应力分布情况可知内圈最易满足塑性条件, 于是从内向外逐次进入塑性状态。

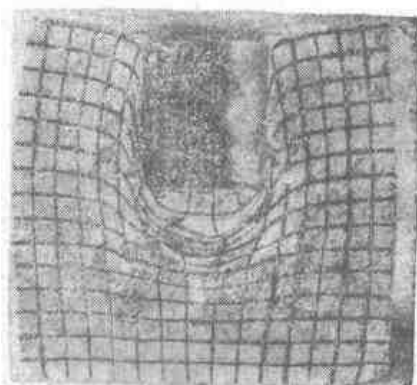


图4-65 冲孔变形的网格照片

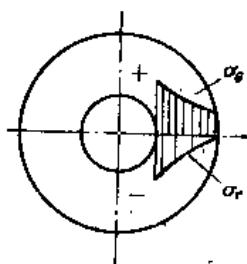


图4-66 弹性状态B区的受力情况

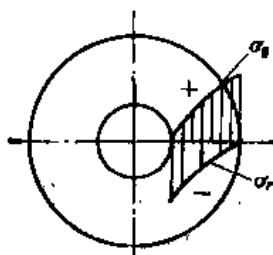


图4-67 塑性状态B区的受力情况

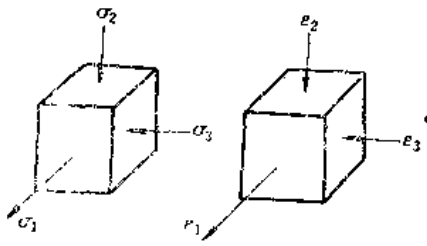
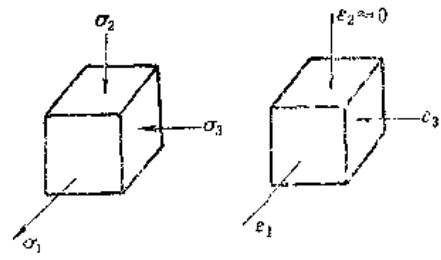
在塑性状态时, 径向和切向的应力分布情况如图4-67所示。

由于作用力分散传递的影响, B区金属在轴向也受一定的压应力, 而愈靠近A区其轴向压应力也愈大。

B区的应力应变简图如图4-64所示。

在B区内塑性变形也是由上向下逐渐发展的。总的变形趋势是: 径向压缩变形, 切向伸长变形, 而轴向的应变可能是伸长, 也可能是缩短, 主要取决于径向压应力的大小; 即取决于环壁的厚度。一般有三种可能的情况:

1) $\frac{D}{d}$ 较小, 即环壁较薄时, 这时 $|\sigma_r|$ 较小, $|\sigma_θ|$ 较大, 应力顺序(按代数值)是 σ_r 、 $\sigma_θ$ 、 σ_z , 即 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 , 且这时 $\sigma_θ \approx \sigma_r$ 。根据说明应力与应变关系的增量理论可得, 切向为正应变, 径向和轴向是负应变(图4-68), 再加上冲孔时“拉缩”的影响, 冲孔后坯料高度减小。

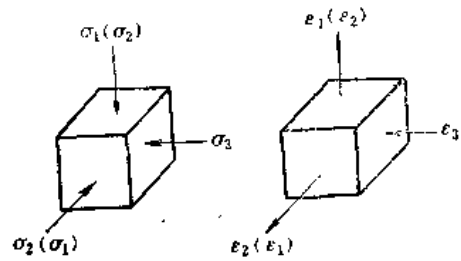
图4-68 $\frac{D}{d}$ 较小时环壁区的应力应变简图图4-69 $\frac{D}{d}$ 较大时环壁区的应力应变简图

2) $\frac{D}{d}$ 较大 $\left(\frac{D}{d} \approx 5\right)$, 即环壁较厚时, $|\sigma_r|$ 较大, σ_θ 较第一种情况小, $\sigma_z \approx \frac{1}{2}$

$(\sigma_r + \sigma_\theta)$ 。于是轴向应变很小, 冲孔后坯料高度变化不大。其应力应变简图如图4-69所示。

3) $\frac{D}{d}$ 很大, 即环壁很厚时, 由于外侧的

σ_θ 、 σ_r 、 σ_z 均较小。可能处于弹性状态, 仅内侧发生塑性变形。这时内侧的 σ_r 和 σ_θ 都是压应力, 应力顺序是 σ_z 、 σ_θ 、 σ_r , 即 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 。根据应力应变关系可算得轴向是伸长变形, 即冲孔后坯料内侧高度增加。其应力应变简图如图4-70所示。

图4-70 $\frac{D}{d}$ 很大时环壁区的应力应变简图

综合上述 A、B 两区的情况可知:

1) 开式冲孔时, 冲头下部的 A 区金属被镦粗后径向外流, 使 B 区金属也随之变形。

2) 当坯料较高时, 无论 A 区或 B 区, 塑性变形都是由上向下逐渐发展的。

3) 环壁的厚度对冲孔后坯料的高度有较大影响: 环壁较薄时, 冲孔后的坯料高度降低较多; 环壁较厚 $\left(\frac{D}{d} \approx 5\right)$ 时, 高度降低较小或几乎不降低(图4-71); 环壁很厚时, 坯料内壁高度略有增加(象打硬度时那样)。因此, 生产中确定冲孔前坯料高度时可按下列公式计算:

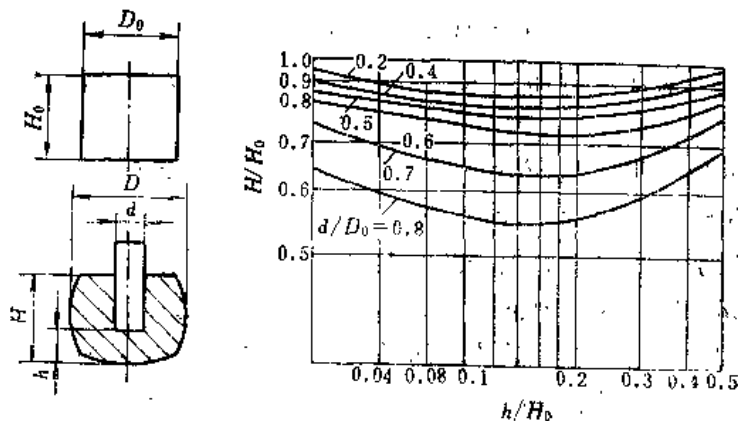


图4-71 冲孔深度与锻件高度的关系

$$\text{当 } \frac{D}{d} \geq 5 \text{ 时, 取 } H_0 = H \quad (4-11)$$

$$\text{当 } \frac{D}{d} < 5 \text{ 时, 取 } H_0 = (1.1 \sim 1.2)H \quad (4-12)$$

式中 H ——冲孔后要求的高度;

H_0 ——冲孔前坯料的高度。

二、冲孔的质量分析

开式冲孔的主要质量问题是“走样”、裂纹和孔冲偏等, 分别介绍如下:

1. “走样”

开式冲孔时坯料高度减小, 外径上小下大, 而且下端凸出, 上端凹进 (图 4-72), 这

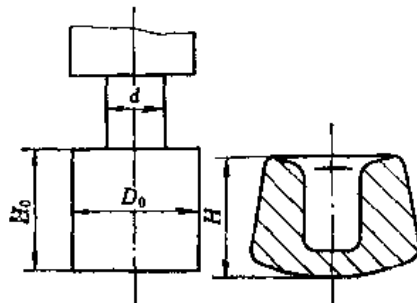


图4-72 冲孔时的“走样”现象

些现象统称“走样”。 $\frac{D}{d}$ 愈小时, “走样”愈严重。在生产中不希望“走样”过大, 为减小“走样”, 一般取 $\frac{D}{d} \approx 3$ 。

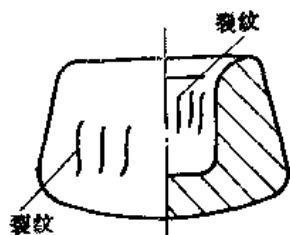


图4-73 冲孔时的裂纹

2. 裂纹

低塑性材料开式冲孔时常在外侧表面和内孔圆角处产生纵向裂纹 (图 4-73)。外侧表面裂纹的产生是由于 A 区金属向外流时 B 区的外径被迫地扩大, 使外层金属受到切向拉应力, 当超过金属当时的强度极限时, 便产生裂纹破坏。

冲孔后外径 (mm) 增大的规律可以用下式表示:

$$D_{\max} = 1.13 \sqrt{\frac{1.5}{H} [V + A(H - h)] - 0.5 S_0} \quad (4-13)$$

式中 V ——坯料体积 (mm³);

A ——冲头横截面面积 (mm²);

S_0 ——坯料横截面面积 (mm²);

H ——冲孔后的高度 (mm);

h ——冲头下面坯料的厚度 (mm)。

上式表明, D/d 愈小时 (即 A 大, S_0 小), D_{\max} 愈大, 最外层金属的切向伸长变形大, 故容易产生裂纹。

由以上分析可以看出, D_0/d 太小是不好的, 会产生“走样”过大和裂纹, 故生产中常取 $D_0/d = 3$ 也有些厂取 $D_0/d \geq (2.5 \sim 3)$ 。

冲孔时内孔圆角处的裂纹是由于此处温度降低较多, 塑性较低, 加之冲子一般都有锥度, 当冲子往下运动时, 此处便被胀裂。因此, 冲子的锥度不宜过大, 当冲低塑性材料时, 如 Cr12 型钢, 不仅要求冲子锥度较小, 而且要经过多次加热逐步冲成。

大型锻件在水压机上冲孔时, 当孔径大于 $\phi 450 \text{ mm}$ 时, 一般采用空心冲头冲孔 (图 4-74), 这样可以减小 B 区外层金属的切向拉应力, 避免产生侧面裂纹, 并能除掉锭料中心部分

质量不好的金属。

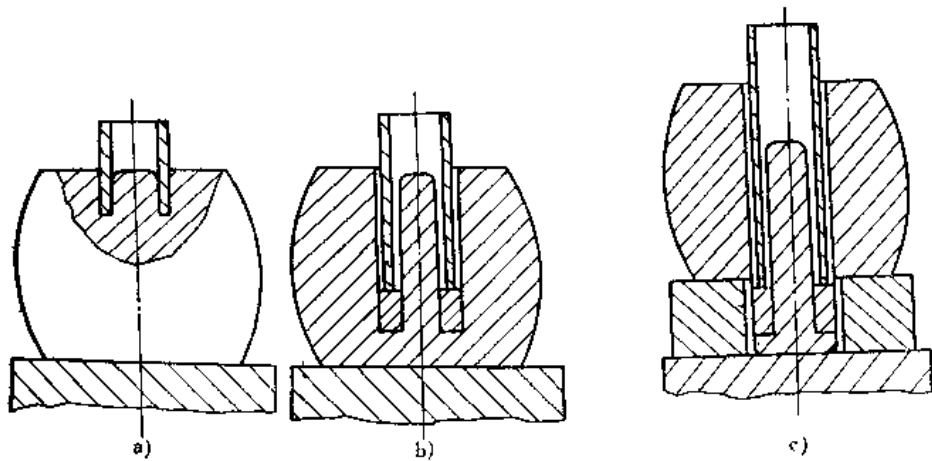


图4-74 空心冲头冲孔过程示意图

3. 孔冲偏

冲孔过程中的另一个问题是孔冲偏。引起孔冲偏的原因很多，如冲子放偏，环形部分金属性质不均，冲头各处的圆角、斜度不一致等，均可使孔冲偏。原坯料愈高，愈容易冲偏。因此冲孔时，坯料高度 H_0 一般小于直径 D_0 ，在个别情况下，采用 $H_0/D_0 \leq 1.5$ 。

冲头的形状对冲孔时金属的流动有很大影响，例如锥形冲头和椭圆形冲头均有助于减小冲孔时的“走样”，但这样的冲头很容易将孔冲歪，因此，自由锻冲孔时，冲头一般用平头的，在转角处取不太大的圆角。

第五节 扩 孔

减小空心坯料壁厚而增加其内、外径的锻造工序叫扩孔。

常用的扩孔方法有冲子扩孔（图4-75）、芯轴扩孔（又叫马杠扩孔，见图4-76），辗压扩孔（图4-77）、楔扩孔、液压扩孔和爆炸扩孔等。

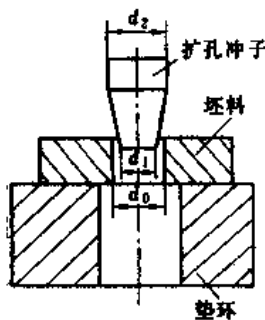


图4-75 冲子扩孔

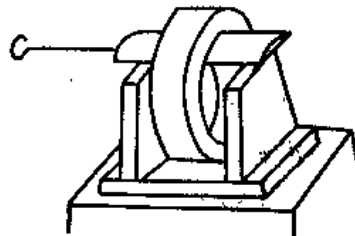


图4-76 芯轴扩孔

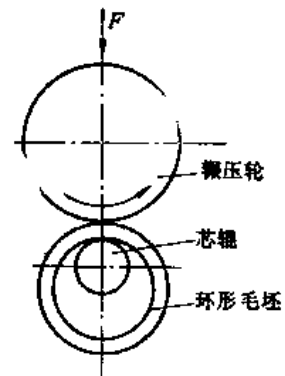


图4-77 辗压扩孔

从变形区的应变情况看，扩孔可分为两组。第一组类似拔长的变形方式，如马杠扩孔（芯轴扩孔）和辗压扩孔；第二组类似胀形的变形方式，如冲子扩孔、楔扩孔、液压扩孔和爆炸扩孔等。

本节仅介绍冲子扩孔、芯轴扩孔和辗压扩孔。

一、冲子扩孔

冲子扩孔(图4-75)时,坯料径向受压应力,切向受拉应力,轴向受力很小,与开式冲孔时B区的受力情况近似。坯料尺寸的相应变化是壁厚减薄,内外径扩大,高度有较小变化。

冲子扩孔所需的作用力较小,这是由于冲子的斜角较小,较小的轴向作用力可产生较大的径向分力,并在坯料内产生数值更大的切向拉应力。另外坯料处于异号应力状态,较易满足塑性条件。

由于冲子扩孔时坯料切向受拉应力,容易胀裂,故每次扩孔量 Δ 不宜太大(Δ 可参照表4-2选用)。

表4-2 每次允许的扩孔量 Δ

d_2 (mm)	Δ (mm)
30~115	25
120~270	30

冲子扩孔时锻件的壁厚受多方面因素的影响,例如,坯料壁厚不等时,将首先在壁厚处变形;如果原始壁厚相等,但坯料各处温度不同,则首先在温度较高处变形;如果坯料上某处有微裂纹等缺陷,则将在此处引起开裂。总之,冲子扩孔时,变形首先在薄弱处发生。因此冲子扩孔时,如控制不当可能引起壁厚差较大。但是如果正确利用上述因素的影响规律也可能获得良好的效果。例如,扩孔前将坯料的薄壁处沾水冷却一下,以提高此处的变形抗力,将有助于减小扩孔后的壁厚差。

扩孔前坯料的高度尺寸按下式计算:

$$H_0 = 1.05H \quad (4-14)$$

式中 H_0 ——扩孔前坯料高度;

H ——锻件高度。

冲子扩孔一般用于 $\frac{D}{d_2} > 1.7$ 和 $H \geq 1.125D$ 的壁不太薄的锻件(D 为锻件外径)。壁较薄的锻件可以在马杠上扩孔。

二、芯轴扩孔

芯轴扩孔(马杠上扩孔)的应力应变情况与冲子扩孔不同,而近似于拔长。但是,它与长轴件的拔长又不同,它是环形坯料沿圆周方向的拔长,是局部加载、整体受力、局部变形。马杠上扩孔时,变形区金属沿切向和宽度(高度)方向流动。这时除宽度(高度)方向的流动受到外端的限制外,切向的流动也受到限制(图4-78)。外端对变形区金属切向流

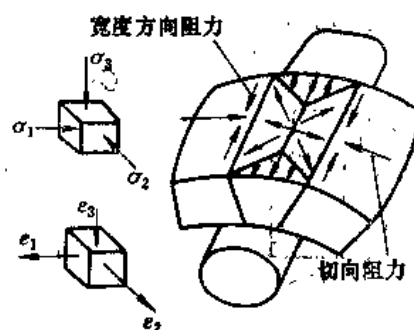


图4-78 马杠上扩孔时金属的变形流动情况

动的阻力大小与相对壁厚 $\left(\frac{t}{d}\right)$ 有关。 $\left(\frac{t}{d}\right)$ 愈大时,阻力也愈大。

马杠上扩孔时变形区金属主要沿切向流动，并增大内、外径，其原因是：

- 1) 变形区沿切向的长度远小于宽度（即锻件的高度）。
- 2) 马杠上扩孔的锻件一般壁较薄，故外端对变形区金属切向流动的阻力远比宽度方向的小。
- 3) 马杠与锻件的接触面呈弧形，有利于金属沿切向流动。

因此马杠上扩孔时锻件尺寸的变化是壁厚减薄，内、外径扩大，宽度（高度）稍有增加。其应力应变简图亦示于图4-78，由于变形区金属受三向压应力，故不易产生裂纹破坏。因此，马杠上扩孔可以锻制薄壁的锻件。

马杠上扩孔时坯料宽度（高度）增大的数值与 $\frac{d}{d_0}$ 及 $\frac{H}{D}$ 有关，见图4-79。在确定扩孔前坯料高度时可按下式计算：

$$H_0 = 1.05KH \quad (4-15)$$

式中 K ——考虑扩孔时宽度（高度）增大的系数，可按图4-79选用；

H ——锻件高度。

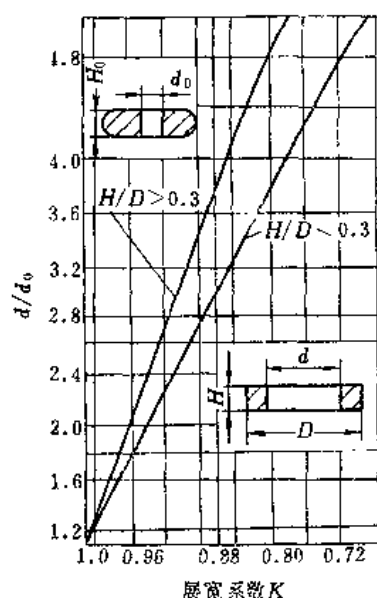


图4-79 芯轴扩孔展宽系数 K 选择图线

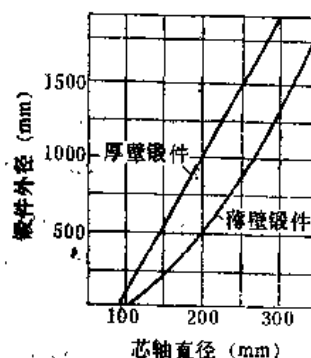


图4-80 水压机上芯轴扩孔所用芯轴直径选择图线

扩孔用的芯轴，相当于一根受均布载荷的梁，随着锻件壁厚的减薄，芯轴上所受的均布载荷变大。为了保证芯轴强度和刚度，其尺寸大小应合适，并且马架间的距离也不宜过大。锤上扩孔时，芯轴最小直径可参考表4-3选用。在水压机上扩孔时，芯轴最小直径可参考图4-80选用。扩孔时应随着壁厚减薄和宽度（高度）增加更换直径大一些的芯轴。

表4-3 锤上芯轴扩孔用最小芯轴直径

锻锤吨位 (t)	芯轴 ^① 最小直径 (mm)	锻锤吨位 (t)	芯轴 ^① 最小直径 (mm)
0.3~0.5	40	2.0	100
0.75	60	3.0	120
1.0	80	5.0	160

① 芯轴材料：40Cr

在马杠上扩孔时, 为保证壁厚均匀, 每次转动量和压缩量应尽可能一致。另外为提高扩孔的效率, 可以采用窄的上砧($b = 100 \sim 150 \text{ mm}$)。

三、辗压扩孔

辗压扩孔时的应力、应变和变形、流动情况与芯轴扩孔相同。其特点是: 工具是旋转的, 变形是连续的, 即环形毛坯的轧制。辗压扩孔时一般压下量较小, 故具有表面变形的特征。

在辗环机(又称扩孔机)上, 可以轧制火车轮箍、轴承套圈、齿圈和法兰等环形锻件。辗压工艺有如下优点:

- 1) 锻件精度较自由锻时高。
- 2) 锻件断面形状接近于零件形状, 金属流线分布合理, 可提高零件的使用性能和寿命。
- 3) 材料利用率可提高 $10\% \sim 20\%$, 切削加工时间可减少 $15\% \sim 25\%$ 。
- 4) 劳动条件好。

用辗压法生产环形件的尺寸范围很广, 直径范围为 $40 \text{ mm} \sim 5 \text{ m}$, 重量可达 6 t 或更大。

图4-81是辗环工作原理图。环形坯料1套在芯辊2上, 在气缸压力 F 作用下, 旋转的辗压轮压下, 毛坯壁厚减薄, 金属沿切线方向伸长(轴向也有少量展宽), 环的内、外径尺寸增大。在摩擦力 F_f 的作用下, 辗压轮带动毛坯和芯辊一起旋转, 因此, 毛坯的变形是一个连续的过程。当环的外径增大到与导向辊4接触时, 使环在外径增大的同时产生弯曲变形, 环的几何中心向机床中心线的左方偏移。另外, 导向辊在辗压过程中使环转动平稳, 环的中心不致左右摆动。当环外圈与信号辊5接触时, 辗压轮停止压下, 并开始回程。卸料机构将锻件自动卸下。锻件的外径尺寸由辗压终了时辗压轮、导向辊和信号辊三者的位置决定。

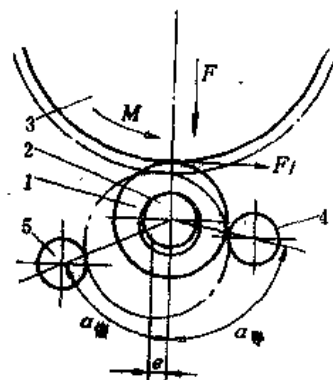


图4-81 辗扩工作原理图
1—环形坯料 2—芯辊 3—辗压轮 4—导向辊
5—信号辊

为了保证辗压件的质量, 根据生产实践经验, 导向辊与机床中心线夹角 $\alpha_{\text{导}}$ 应大于 65° , 信号辊与机床中心线夹角 $\alpha_{\text{信}}$ 应大于 55° 。

在径向辗环机上, 由于金属变形具有表面变形特点(因为变形区沿切向的长度很小, 相当于拔长时由于进料比 $(\frac{l}{h})$ 很小产生的双鼓形一样), 锻件端面有凹坑, 如图4-82所示。

而采用径向—轴向辗环机可解决这一问题。用一对径向轧辊和一对轴向轧辊分别轧制环的壁厚和高度(图4-83), 可以得到端面平直的锻件并可减少模具更换的次数。

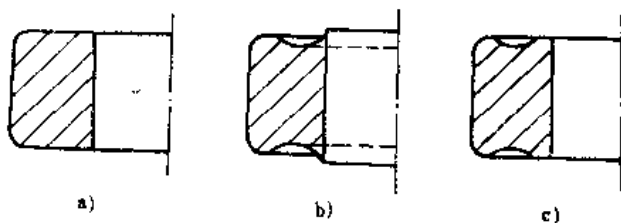


图4-82 辗压扩孔时的端面凹坑
a) 坯料 b) 辗压时孔型不封闭 c) 辗压时孔型封闭

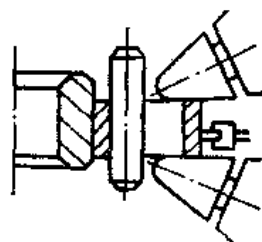


图4-83 径向轴向—辗压示意图

第六节 弯 曲

将坯料弯成所规定外形的锻造工序称为弯曲，这种方法可用于锻造各种弯曲类锻件，如起重吊钩、弯曲轴杆等。

坯料在弯曲时，弯曲变形区的内侧金属受压缩，可能产生折叠，外侧金属受拉伸，容易引起裂纹。而且弯曲处坯料断面形状要发生畸变（图4-84），断面面积减小，长度略有增加。弯曲半径越小，弯曲角度越大，上述现象则越严重。

由于弯曲具有上述变形特点，在确定坯料的形状和尺寸时，考虑到弯曲变形区断面减小，一般坯料断面应比锻件断面稍大（约增大10%~15%），锻时先将不弯曲部分拔长到锻件尺寸，然后再进行弯曲成形。此外，要求坯料加热均匀，最好仅加热弯曲段。

当锻件有数处弯曲时，弯曲的次序一般是先弯端部及弯曲部分与直线部分交界的地方，然后再弯其余的圆弧部分（图4-85）。

自由锻的基本工序还有错移和扭转等，此处不再一一介绍。

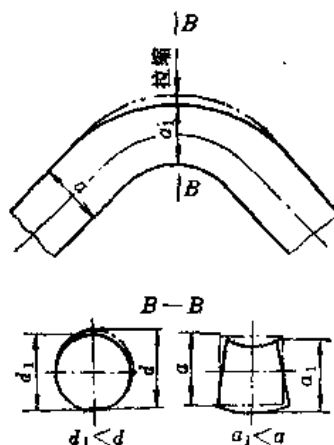


图4-84 弯曲时坯料形状变化情况

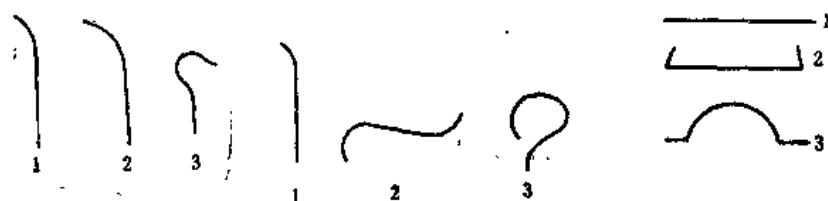


图4-85 弯曲顺序示意图

第五章 自由锻工艺

自由锻工艺过程的实质是利用简单的工具逐步改变坯料的形状、尺寸和状态、以获得所要求形状、尺寸和性能的锻件的加工程序。

由于自由锻所用的工具简单,通用性强,灵活性大,因此适合单件和小批量锻件的生产。自由锻件是由坯料逐步变形而成,由于工具只与坯料部分接触,故所需设备吨位比模锻小得多,所以自由锻也适用于锻造大型锻件。

对于碳钢和低合金钢的中小型锻件,原材料大多是经锻轧而质量较好的钢材,在锻造时主要是成形问题,要求掌握金属的流动规律,灵活地运用各种变形工序,以便有效而准确地获得所需形状和尺寸的锻件。而对大型锻件和高合金钢锻件,一般是以内部组织较差的钢锭为原材料,锻造时的关键是质量问题,为了保证锻件的内部质量,除了提高原材料冶金质量外,还应从锻造工艺方面采取措施。

第一节 自由锻件的分类

自由锻是通用性很强的工艺方法,它可以锻造多种多样的锻件,锻件形状复杂程度相差很大,为了便于安排生产和制订工艺规程,应按照锻造工艺特点将锻件分类,即把形状特征相同、变形过程类似的锻件归为一类,按此,自由锻件按工艺特点分为七类:

第Ⅰ类 包括光滑的实心圆柱体和有台阶的实心圆柱体锻件。这类锻件包括各种传动轴、推力轴、机车轴、偏心轴、立柱、其它如螺栓、铆钉等也属于这一类。图5-1a是该类锻件的部分实例。

第Ⅱ类 包括各种实心的矩形断面锻件,例如方杆、砧块、锤头、模块、方铁、各类连杆、摇杆、杠杆等。图5-1b是该类锻件的部分实例。

第Ⅲ类 包括各种曲轴和曲柄轴。图5-1c是该类锻件的部分实例。

第Ⅳ类 包括各种带孔和不带孔的盘形锻件,例如圆盘、突缘盘、汽轮机叶轮,齿轮等。(图5-1d)。

第Ⅴ类 包括各种空心锻件,例如圆环、空心容器、圆筒、炮筒、汽缸、空心轴等(图5-1e)。

第Ⅵ类 包括各种弯曲的锻件,例如各种吊勾、弯杆、铁锚、船尾架、船架等(图5-1f)。

第Ⅶ类 包括其它各种复杂形状的锻件,例如高压容器封头、十字头、羊角、吊环螺钉等(图5-1g)。

第二节 自由锻件变形方案的确定

变形方案的确定是自由锻工艺中最重要的部分,也是初学者最感困难的部分,因为它比

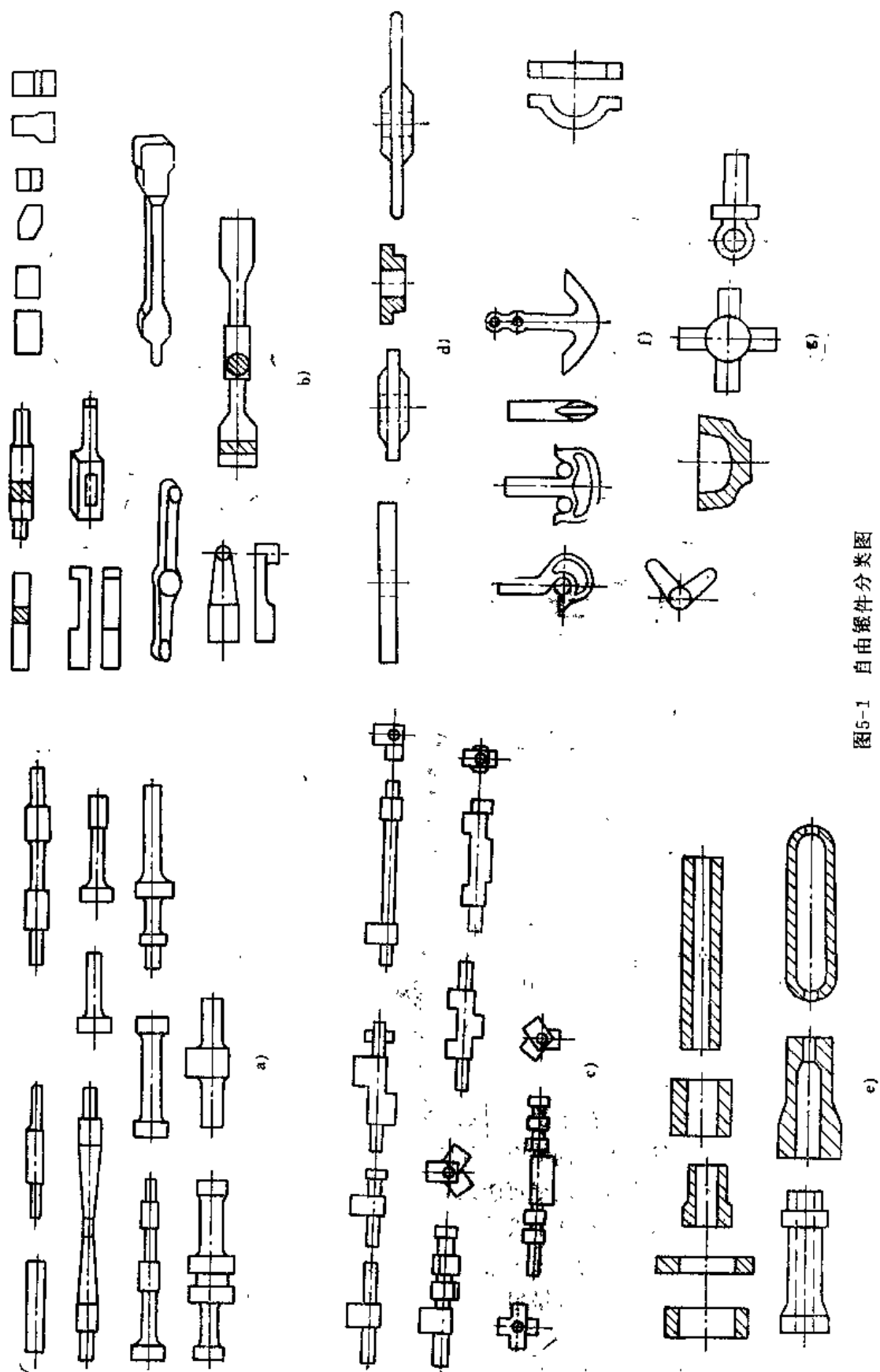


图5-1 自由锻件分类图

较灵活,没有统一的规律,影响它的因素很多,如锻件技术要求、工人操作经验、生产管理水平、车间设备条件、工具辅具情况、坯料供应状态、生产批量大小等等。因此要求制定工艺者不仅掌握各基本工序的变形和流动特点,锻件的具体情况和技术要求,而且要充分考虑上述诸因素的影响,要全面考虑实现工艺方案的可能性、锻件质量的可靠性和经济上的合理性。

由于长期实践经验的积累,对某些典型锻件的成形过程已渐趋一致,或者可能有的几个方案也大致已定,掌握这些基本知识,结合实际工作经验就可以掌握任何锻件变形方案的制定。

对于第Ⅰ、Ⅱ类锻件的变形工艺,主要采用拔长工序。当坯料直接拔长不能满足锻比要求时,或锻件要求横向力学性能较高时,以及锻件带有台阶尺寸相差较大的法兰时,则应采用镦粗—拔长—变形工艺。图5-2为传动轴的锻造过程。图5-3为摇杆的锻造过程。

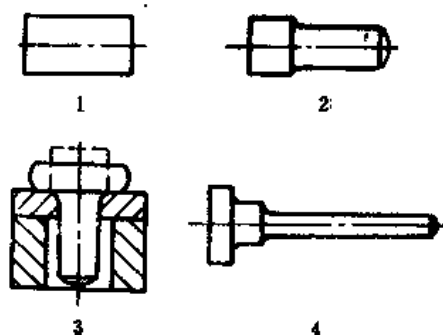


图5-2 传动轴的锻造过程

1—下料 2—拔长 3—镦出法兰 4—拔出锻件

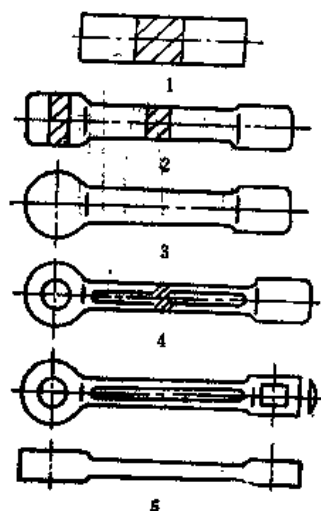


图5-3 摇杆的锻造过程

1—下料 2—扁方拔长 3—切扣大头 4—大头冲孔杆部压槽 5—小头冲孔切头

对于第Ⅲ类(曲轴类)锻件的锻造,其基本工序有拔长、错移和扭转。锻造曲轴时,应尽可能采用那些不切断纤维,不使钢锭中心部的材料露出表面,不扭转或扭转角度不大的方案。如果批量较大和条件允许时,应尽可能采用全纤维锻造。图5-4是三拐曲轴的一种锻造过程,图5-5是195型单拐曲轴的全纤维锻造过程。

对于第Ⅳ类(饼块类)锻件的变形工艺,一般均以镦粗成形。当锻件带有凸肩时,可以根据凸肩尺寸,选取垫环镦粗或局部镦粗。如锻件有孔而且可以冲出时,还需采用冲孔工序。图5-6为齿轮坯的锻造过程。

对于第Ⅴ类(空心类)锻件的变形工艺,一般均需镦粗、冲孔。有的稍加修整便可达到锻件尺寸,有的需要扩孔扩大其内、外径(图5-7),有的还需芯轴拔长以增加其长度(图

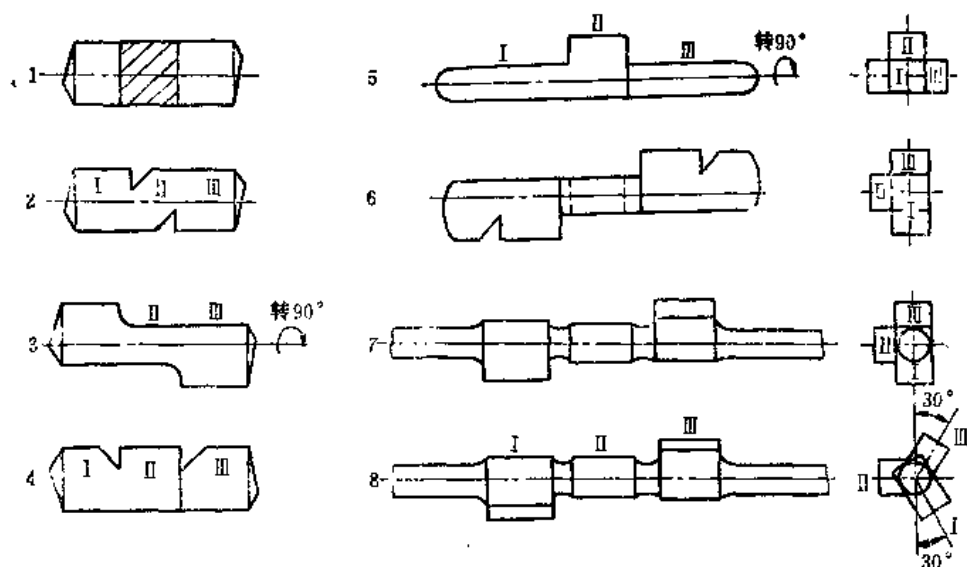


图5-4 三拐曲轴的锻造过程

1—下料 2—压槽 (卡出Ⅱ段) 3—错移、压出Ⅱ拐扁方 4—压槽 (Ⅰ、Ⅲ分段) 5—压出Ⅰ、Ⅲ拐扁方 6—压槽 (Ⅰ、Ⅲ与曲拐分段) 7—拌出中间、两端轮廓 8—扭转, Ⅰ、Ⅲ拐各扭 30°

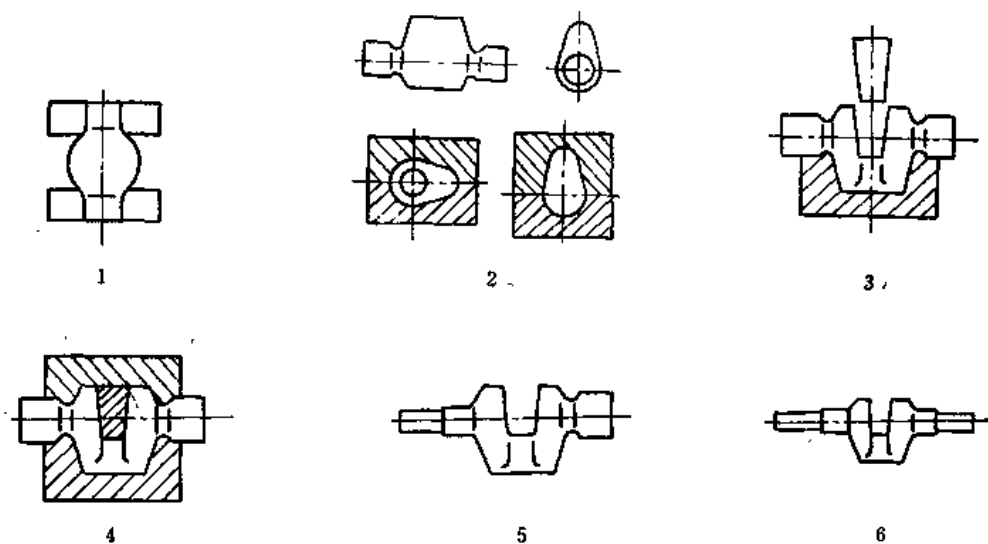


图5-5 195型单拐曲轴的全纤维锻造过程

1—锻粗曲拐 2—克挑形 3—开槽 4—成形曲拐 5—拔轴杆 6—调头拔轴杆、校直

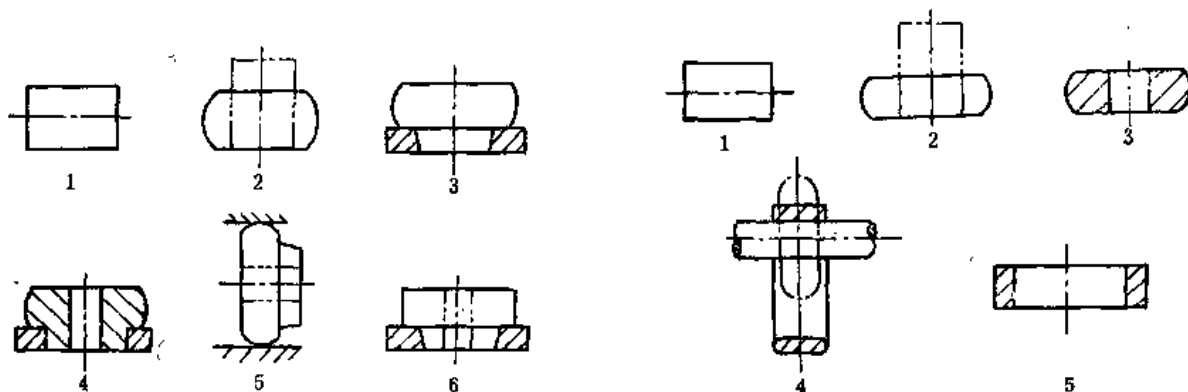


图5-6 齿轮的锻造过程

1—下料 2—锻粗 3—锻挤凸头 4—冲孔 5—滚圆 6—平整

图5-7 圆环的锻造过程

1—下料 2—锻粗 3—冲孔 4—芯轴扩孔 5—平整端面

5-8), 至于采取哪种变形工艺方案, 这取决于锻件几何尺寸的相互关系。空心锻件的主要尺寸是外径(D)、内径(d)和高度(H)。编制空心锻件变形工艺方案时, 根据锻件的具体尺寸关系, 可参考图5-9、图5-10选择制订。必须指出, 上述选择空心锻件工艺方案的图线, 都是在一定生产条件下的经验总结, 均有局限性, 使用时应加以分析。

对于第Ⅵ类(弯曲类)锻件的锻造, 其基本工序是弯曲, 弯曲前的制坯工序一般采用拔

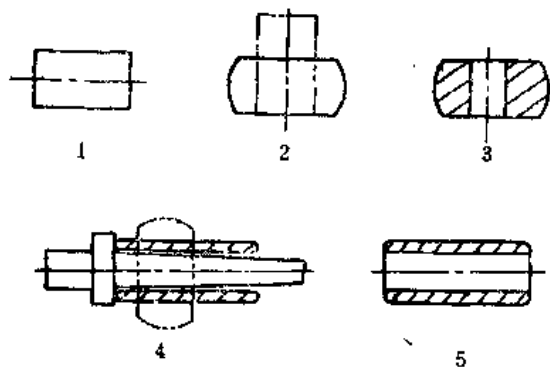


图5-8 圆筒的锻造过程

1—下料 2—锻粗 3—冲孔 4—芯轴拔长 5—锻件

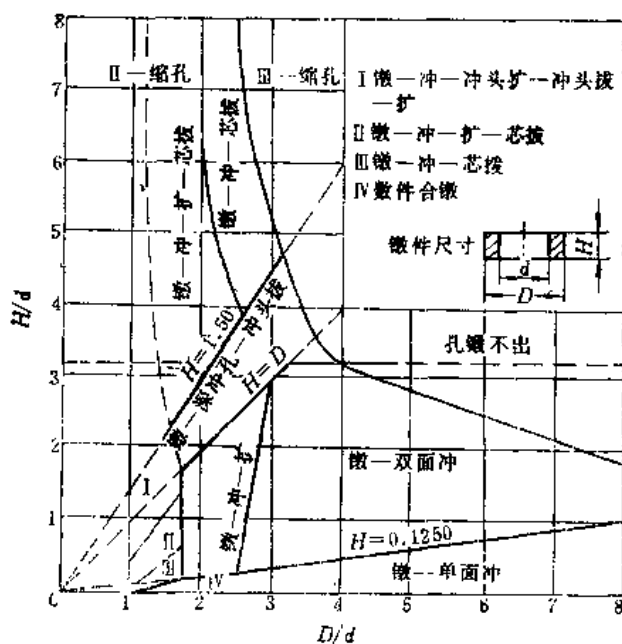


图5-9 锤上锻造空心锻件的工艺方案选择图线

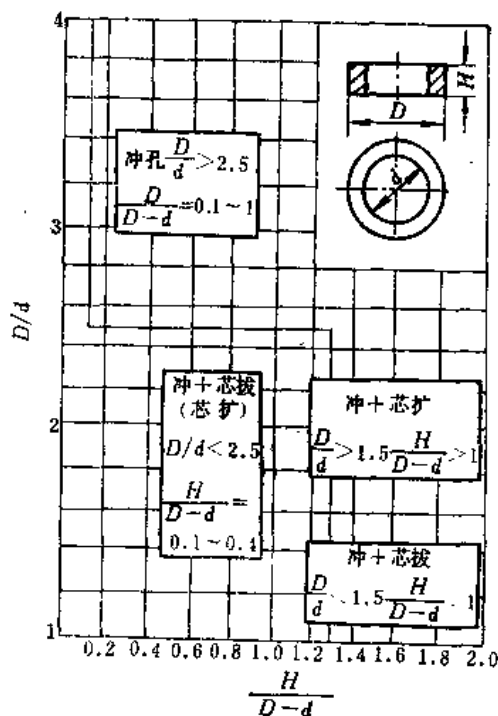


图5-10 水压机锻造空心锻件的工艺方案选择图线

长。当锻件上有数处弯曲时, 则弯曲的次序一般是先弯端部及弯曲部分与直线部分交界的地方, 然后再弯其余的圆弧部分。为了保证形状尺寸精确, 并提高生产率, 建议在弯曲中多采用垫模。设计垫模时应保证操作方便, 正确可靠。图5-11为吊钩的锻造过程, 图5-12为卡瓦的锻造过程。

对于第Ⅶ类(复杂形状类)锻件, 其锻造难度较大, 应根据锻件形状的特点, 采取适当工序组合锻造。

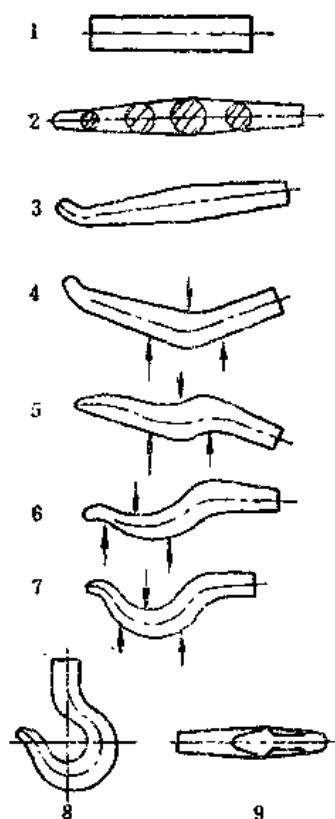


图5-11 20t吊钩的锻造过程

1—下料 (105kg) 2—用锤子拔杆部并调头拔头部
3—弯曲头部 4—弯曲根部 5—旋转180°弯曲根部
6—弯曲端部 7—弯曲中部 8—直立微弯 9—锻出
斜面

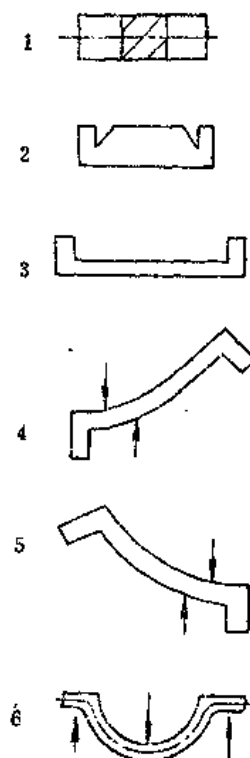


图5-12 卡瓦的锻造过程

1—下料 (120kg) 2—压槽卡出两端 3—拔长中
间部分 4—弯曲左端圆弧 5—弯曲右端圆弧 6—
弯曲中间圆弧

第三节 自由锻工艺过程的制定

自由锻工艺过程的内容包括:

- 1) 根据零件图绘制锻件图;
- 2) 确定坯料重量和尺寸;
- 3) 确定变形工艺和锻比;
- 4) 选择锻压设备;
- 5) 确定锻造温度范围、加热和冷却规范;
- 6) 确定热处理规范;
- 7) 填写工艺卡片等。

在制定自由锻工艺过程时, 应结合生产条件、设备能力和技术水平等实际情况, 力求经济上合理, 技术上先进, 以确保正确指导生产。

一、锻件图的制定

锻件图是编制锻造工艺、设计工具、指导生产和验收锻件的主要依据, 也是联系其它后续加工工艺的重要技术资料, 它是根据零件图考虑了加工余量, 锻件公差、锻造余块、检验试样及工艺卡头等绘制而成的。

一般锻件的尺寸精度和表面粗糙度，达不到零件图的要求，锻件表面应留有供机械加工的金属层，称为机械加工余量（以下简称余量）。余量的大小主要取决于：零件的形状尺寸和加工精度、表面粗糙度要求、锻造加热质量、设备工具精度和操作技术水平等。零件的公称尺寸加上余量即为锻件公称尺寸，对于非加工表面，则无需加放余量。

在锻造生产中，由于各种因素的影响，如终锻温度的差异、锻压设备工具的精度和工人操作技术上的差异，锻件实际尺寸不可能达到公称尺寸，允许有一定的误差，称为锻造公差。这时，锻件尺寸大于其公称尺寸的部分称为上偏差（正偏差），小于其公称尺寸的部分称为下偏差（负偏差）。锻件上不论是否需经机械加工的部分，都应注明锻造公差。通常锻造公差约为余量的 $1/4 \sim 1/3$ 。

机械加工余量与锻造公差的相互关系如图5-13所示，锻件的余量和公差具体数值可查阅有关手册，或按工厂标准确定。

为了简化锻件外形或根据锻造工艺需要，在零件上较小的孔、狭窄的凹档、直径差较小而长度不大的台阶等（图5-14）难于锻造的地方，通常都需填满金属（这部分附加的金属叫做锻造余块），但这样做增加了机械加工工时和金属损耗。因此，是否加放余块，应根据零件形状、锻造技术水平、加工成本等综合考虑确定。

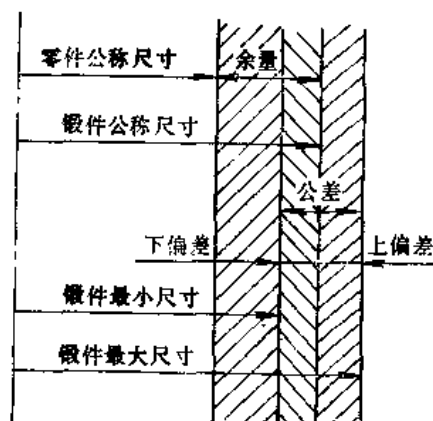


图5-13 锻件的各种尺寸和余量公差

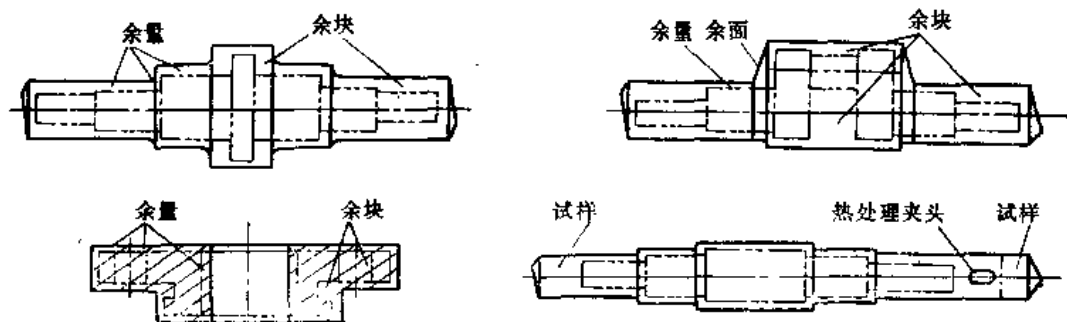


图5-14 锻件的各种余块

除了锻造工艺要求加放余块之外，对于有特殊要求的锻件，尚需在锻件的适当位置添加试样余块（供检验锻件内部组织和力学性能试验用）、热处理或机械加工用夹头等。可见，当考虑了锻造成形特点和各种工艺余块之后，所设计的锻件形状与零件形状往往不一样。

当余量、公差和余块等确定之后，便可绘制锻件图。锻件图上的锻件形状用粗实线描绘。为了便于了解零件的形状和检查锻后的实际余量，在锻件图内用假想线画出零件简单形状。锻件的尺寸和公差标注在尺寸线上面。零件的尺寸加括号标注在尺寸线下面。如锻件带有检验试样、热处理夹头时，在锻件图上应注明其尺寸和位置。在图上无法表示的某些条件，可以技术条件方式加以说明。

二、确定坯料的重量和尺寸

自由锻用原材料有两种：一种是钢材、钢坯、多用于中小型锻件；另一种是钢锭，主要用于大中型锻件。

1. 坯料重量的计算

坯料重量 $G_{\text{坯}}$ (kg)应包括锻件重量和各种损耗的重量，可按下列式计算：

$$G_{\text{坯}} = (G_{\text{锻}} + G_{\text{芯}} + G_{\text{切}})(1 + \delta\%) \quad (5-1)$$

式中 $G_{\text{锻}}$ ——锻件重量(kg)，可根据锻件公称尺寸算出其体积，再乘以密度即可求得；

$G_{\text{芯}}$ ——冲孔芯料损失(kg)，其取决于冲孔方式，冲孔直径(d)和坯料高度(H_0)，具体可按下列式计算：

$$\text{实心冲孔 } G_{\text{芯}} = (1.18 \sim 1.57)d^2 H_0$$

$$\text{空心冲孔 } G_{\text{芯}} = (4.32 \sim 4.71)d^2 H_0$$

$$\text{垫环冲孔 } G_{\text{芯}} = 6.16d^2 H_0$$

$G_{\text{切}}$ ——锻件拔长端部由于不平整而应切除的料头重量(kg)，其与锻件拔长后的直径(D)或截面宽度(B)和高度(H)有关。具体可按下列式计算：

$$\text{圆形件 } G_{\text{切}} = (1.65 \sim 1.8)D^3$$

$$\text{矩形件 } G_{\text{切}} = (2.2 \sim 2.36)B^3 H$$

在采用钢锭锻造时，为保证锻件重量，还应考虑必须切去的钢锭冒口和锭底的重量。

δ ——钢料加热烧损率，与所用加热设备类型等因素有关，可按第三章表3-2选取。

2. 坯料尺寸计算

坯料尺寸的确定与所用工序有关，当所采用的锻造工序不同时，计算坯料尺寸的方法也不同。由于坯料的重量已求出，再除以密度 ρ 即可算出体积 $V_{\text{坯}}$ ，即

$$V_{\text{坯}} = G_{\text{坯}} / \rho \quad (5-2)$$

当头道工序采用镦粗法锻造时，为避免产生弯曲，坯料的高径比应小于2.5，为便于下料，高径比则应大于1.25，即

$$1.25 \leq \frac{H_0}{D_0} \leq 2.5$$

根据上述条件，便可导出计算坯料直径 D_0 （或方形边长 a_0 ）的公式：

$$D_0 = (0.8 \sim 1.0) \sqrt[3]{V_{\text{坯}}} \quad (5-3)$$

$$a_0 = (0.75 \sim 0.9) \sqrt[3]{V_{\text{坯}}} \quad (5-4)$$

当头道工序为拔长时，原坯料直径应按锻件最大面积 $S_{\text{锻}}$ ，并考虑锻比 K_L 和修整量等要求来确定。从满足锻比要求的角度出发，原坯料截面积 $S_{\text{坯}}$ ：

$$S_{\text{坯}} = K_L S_{\text{锻}} \quad (5-5)$$

由此便可算出原坯料直径 D_0 ，即

$$D_0 = 1.13 \sqrt{K_L S_{\text{锻}}} \quad (5-6)$$

初步算出坯料直径（或边长）后，应按国家标准选择直径（或边长），再根据选定的直径（或边长）计算坯料高度（即下料长度），

$$\text{圆坯料 } H_0 = V_{\text{坯}} / \left(\frac{\pi}{4} D_0^2 \right) \quad (5-7)$$

$$\text{方坯料 } H_0 = V_{\text{坯}} / a_0^2 \quad (5-8)$$

3. 钢锭规格的选择

当选用钢锭为原材料时,选择钢锭规格的方法有两种。

第一种方法:首先确定各种金属损耗,求出钢锭利用率 η ;

$$\eta = [1 - (\delta_{冒口} + \delta_{锭底} + \delta_{烧损})] \times 100\% \quad (5-9)$$

式中 $\delta_{冒口}$ 、 $\delta_{锭底}$ ——分别为被切去冒口和锭底的重量占钢锭重量的百分数;

碳素钢锻件 冒口切除 18%~25%

锭底切除 5%~7%

合金钢锻件 冒口切除 25%~30%

锭底切除 7%~10%

$\delta_{烧损}$ ——加热烧损率。

然后计算钢锭的计算重量 $G_{锭}$

$$G_{锭} = \frac{G_{锻} + G_{损}}{\eta} \quad (5-10)$$

式中 $G_{锻}$ ——锻件重量;

$G_{损}$ ——除冒口、锭底及烧损以外的损耗重量。

根据钢锭的计算重量,参照有关钢锭规格表,选取重量相等或稍大的钢锭规格即可。

第二种方法:根据锻件类型参照经验资料先定出概略的钢锭利用率 η ,然后求得钢锭的计算重量 $G_{锭} = G_{锻}/\eta$,再从有关钢锭规格表,选取所需的钢锭规格。

三、确定变形工艺和锻造比

变形工艺的内容包括:确保锻件成形必需的工序、决定工序顺序、设计工艺尺寸等。

锻件所需变形工序及工序顺序应根据锻件形状、尺寸和技术要求,并考虑具体生产条件等而确定。具体确定方法可参见本章第二节。

工序尺寸设计是与工序、工序顺序选择同时进行的,在确定工序尺寸时应注意下列各点:

1) 工序尺寸必须符合工艺特点。

2) 必须保持各部分有足够的体积。例如台阶尺寸相差较大的轧辊形锻件的辊身,可按其公称长度下料,或按其计算重量(直径应加正公差)下料。

3) 多火次锻打大件时必须注意中间各火次加热的可能性。

4) 有些长轴类锻件的轴向尺寸要求精确,且沿轴向又不能镦粗(例如曲轴),必须预计到轴向在修整时会略有伸长。

锻造比是表示变形程度的一种方法,是衡量锻件质量的一个重要指标。锻造过程锻造比的计算方法是按拔长或镦粗前后锻件的截面比或高度比计算,即 $K_L = \frac{S_0}{S} = \frac{D_0^2}{D_1^2}$ 或 $K_L =$

$\frac{H_0}{H_1}$ (S_0 、 S_1 、 D_0 、 D_1 、 H_0 、 H_1 分别是锻造前、后的截面积、直径和高度)。如果采用两

次镦粗、拔长,或者两次镦粗间有拔长时,按总锻造比等于两次分锻造比之和计算,即 $K_{L总} = K_{L1} + K_{L2}$ 。锻造比大小反映了锻造对锻件组织和力学性能的影响,一般规律是:锻造过程随着锻造比增大,由于内部孔隙焊合,铸态树枝晶被打碎,锻件的纵向和横向的力学性能均得到明显提高。当锻造比超过一定数值后,由于形成纤维组织,横向力学性能(塑性、韧性)急剧下降,导致锻件出现各向异性。因此,在制订锻造工艺规程时,应合理地选择锻

造比大小。

对于用钢材锻制的锻件（奥氏体钢锻件除外），由于钢材经过了大变形的锻或轧，其组织和性能已得到改善，一般不需考虑锻造比；用钢锭（包括有色金属铸锭）锻制的大型锻件，必须考虑锻造比，可参照表5-1选用。

表5-1 典型锻件的锻造比

锻 件 名 称	计算部位	总锻造比	锻 件 名 称	计算部位	总锻造比
碳素钢轴类锻件	最大截面	2.0~2.5	曲 轴	曲 拐	≥ 2.0
合金钢轴类锻件	最大截面	2.5~3.0		轴 颈	≥ 3.0
热 轧 辊	辊 身	2.5~3.0①	锤 头	最大截面	≥ 2.5
冷 轧 辊	辊 身	3.5~5.0②	模 块	最大截面	≥ 3.0
齿 轮 轴	最大截面	2.5~3.0	高压封头	最大截面	3.0~5.0
船用尾轴、中间轴、推力轴	法 兰	> 1.5	汽轮机转子	轴 身	3.5~6.0
	轴 身	≥ 3.0	发电机转子	轴 身	3.5~6.0
水轮机主轴	法 兰	最好 > 1.5	汽轮机叶轮	轮 毂	4.0~6.0
	轴 身	≥ 2.5	旋翼轴、涡轮轴	法 兰	6.0~8.0
水压机立柱	最大截面	≥ 3.0	航空用大型锻件	最大截面	6.0~8.0

① 一般取3.0，对小型轧辊可取2.5；

② 支承辊锻造比可减小到3.0。

四、确定锻造设备吨位

自由锻常用设备为锻锤和水压机。这些设备虽无过载损坏问题，但若设备吨位选得过小，则锻件内部锻不透，而且生产率低，反之，若设备吨位选得过大，不仅浪费动力，而且由于大设备工作速度低，同样也影响生产率和锻件成本。因此，正确确定设备吨位是编制工艺规程的重要环节之一。

锻造所需设备吨位，主要与变形面积、锻件材质、变形温度等因素有关。在自由锻中，变形面积由锻件大小和变形工序性质而定。锻粗时锻件与工具的接触面积相对于其它变形工序要大得多，而很多锻造过程均与锻粗有关，因此，常以锻粗力的大小来选择设备。

确定设备吨位的方法有：理论计算法和经验类比法两种。

1. 理论计算法

理论计算法是根据塑性成形理论建立的公式来计算设备的吨位。尽管目前这些计算公式还不够精确，但仍能给设备确定吨位提供一定的参考依据。

用水压机锻造时，由于压力变化比较平稳，故可根据锻件成形所需的最大变形力来选择设备吨位。

水压机锻造时，锻件成形所需最大变形力可按以下公式计算：

$$F = pA \quad (5-11)$$

式中 A ——锻件与工具的接触面在水平方向上的投影面积；

p ——锻件与工具接触面上的单位流动压力（即平均单位压力）。

单位流动压力 p 需根据不同情况分别计算：

(1) 圆形锻件镦粗

$$\text{当 } \frac{H}{D} \geq 0.5 \text{ 时, } p = \sigma_s \left(1 + \frac{\mu}{3} \frac{D}{H} \right)$$

$$\text{当 } \frac{H}{D} < 0.5 \text{ 时, } p = \sigma_s \left(1 + \frac{\mu}{4} \frac{D}{H} \right)$$

式中 D, H ——分别为锻造终了锻件的直径和高度,

σ_s ——流动应力, 是金属在相应变形温度、速度下的真实应力,

μ ——摩擦系数, 热锻时 $\mu = 0.3 \sim 0.5$, 如无润滑, 一般取 $\mu = 0.5$

(2) 方形锻件镦粗 长为 L 、宽为 B 、高为 H 的锻件, 单位流动压力的计算公式如下:

$$p = 1.15\sigma_s \left[1 + \frac{3L-B}{6L} \mu \frac{B}{H} \right]$$

(3) 矩形坯料在平砧间拔长 单位流动压力的计算公式如下:

$$p = 1.15\sigma_s \left[1 + \frac{\mu}{3} \frac{l}{h} \right]$$

式中 l ——送进量;

h ——锻件高度。

(4) 圆形坯料在圆弧砧上拔长时, 按下式计算单位流动压力:

$$p = \sigma_s \left(1 + \frac{2}{3} \mu \frac{l}{d} \right)$$

式中 d ——锻件直径。

用锻锤锻造, 由于其打击力是不定的, 所以应根据锻件成形所需变形功来选择设备的打击能量或吨位。

圆柱体锻件镦粗变形功为:

$$W = \sigma_s V \left[\ln \frac{H_0}{H} + \frac{1}{9} \left(\frac{D}{H} - \frac{D_0}{H} \right) \right] \quad (5-12)$$

式中 D_0, H_0 ——坯料的直径和高度;

D, H ——锻件的直径和高度;

V ——锻件的体积。

长板形锻件镦粗变形功为:

$$W = \sigma_s V \left[\ln \frac{H_0}{H} + \frac{1}{8} \left(\frac{b}{H} - \frac{b_0}{H} \right) \right] \quad (5-13)$$

式中 b_0, H_0 ——坯料的宽度和高度;

b, H ——镦粗后宽度和高度。

根据最后一击的变形功 W (变形程度可取 $\varepsilon = 0.03 \sim 0.05$), 考虑锻锤的打击效率 η , 便可算出所需打击能量 $E(J)$, 即

$$E = \frac{W}{\eta} \quad (5-14)$$

通常锻锤吨位是以落下重量 $G(kg)$ 表示, 与打击能量有如下关系:

$$G = \frac{2g}{v^2} \frac{W}{\eta} \quad (5-15)$$

式中 g ——重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$;
 v ——锻锤打击速度, 一般取 $v = 6 \sim 7 (\text{m/s})$;
 η ——打击效率, 一般取 $\eta = 0.7 \sim 0.9$ 。

如取 $v = 6.5 \text{ m/s}$, $\eta = 0.8$, 则得

$$G = \frac{W}{1.72} \quad (5-16)$$

2. 经验类比法

经验类比法是在统计分析生产实践数据的基础上, 总结归纳出的经验公式或图表来估算锻造所需设备吨位的一种方法, 应用时只需根据锻件的某些主要参数(如重量、尺寸、材质)便可迅速确定设备吨位。

锻锤吨位(kg)可按如下公式计算:

$$\text{锻粗时 } G = (0.002 \sim 0.003) K S \quad (5-17)$$

式中 K ——与钢料强度极限 σ_s 有关的系数,

表5-2 系数 K

σ_b (MPa)	K
400	3~5
600	5~8
800	8~13

表5-3 自由锻锤锻造能力

设备吨位(t)		0.25	0.5	0.75	1.0	2.0	3.0	5.0
锻件类型	$D(\text{mm})$	<200	<250	<300	≤400	≤500	≤600	≤750
	$H(\text{mm})$	<35	<50	<100	<150	<250	≤300	≤300
圆 环	$D(\text{mm})$	<150	<350	<400	≤500	≤600	≤1000	≤1200
	$H(\text{mm})$	≤60	≤75	<100	<150	≤200	<250	≤300
圆 筒	$D(\text{mm})$	<150	<175	<250	<275	<300	<350	≤700
	$d(\text{mm})$	≥100	≥125	>125	>125	>125	>150	>500
	$H(\text{mm})$	≤150	≤200	≤275	≤300	≤350	≤400	≤550
圆 轴	$D(\text{mm})$	<80	<125	<150	≤175	≤225	≤275	≤350
	$G(\text{kg})$	<100	<200	<300	<500	≤750	≤1000	≤1500
方 块	$H(\text{mm})$	≤80	≤150	≤175	≤200	≤250	≤300	≤450
	$G(\text{kg})$	<25	<50	<70	≤100	≤350	≤800	≤1000
扁 方	$B(\text{mm})$	≤100	≤160	<175	≤200	<400	≤600	≤700
	$H(\text{mm})$	≥7	≥15	≥20	≥25	≥40	≥50	≥70
锻件成型	$G(\text{kg})$	5	20	35	50	70	100	300
吊 钩	起重量(t)	3	5	10	20	30	50	75
钢锭直径(mm)		125	200	250	300	400	450	600
钢坯边长(mm)		100	175	225	275	350	400	550

按表5-2确定;

S ——锻件锻粗后的横截面积(cm^2)。

拔长时 $G = 2.5s$

(5-18)

式中 S ——坯料横截面面积(cm^2)。

自由锻用锻锤的锻造能力范围可参照表5-3。

五、自由锻工艺过程制定举例

现以齿轮零件(图5-15)为例,说明其自由锻工艺过程的制定。该零件材料为45钢,生产数量20件,由于生产批量小,采取自由锻工艺。

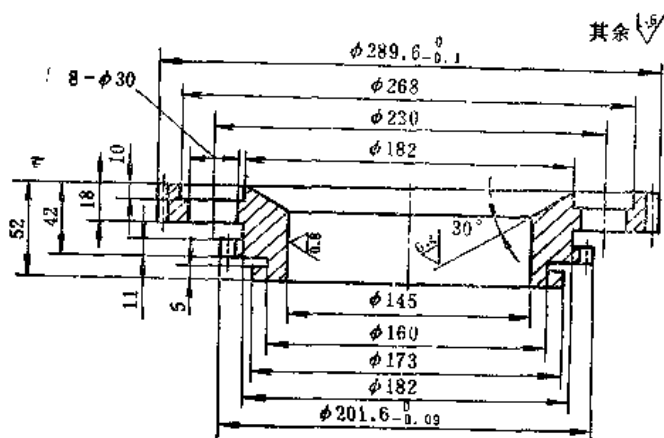


图5-15 齿轮零件图

1. 设计、绘制锻件图

由于采用自由锻,要锻出零件的齿形和圆周长的狭窄凹槽,技术上是不可能的,应加上余块,简化锻件外形以便锻造。

根据“圆环类自由锻件机械加工余量和公差(JB4249.6—86)”查得:锻件水平方向的双边余量和公差为 $a = 12 \pm 5\text{mm}$, 锻件高度方向双边余量和公差为 $b = 10 \pm 4\text{mm}$, 内孔双边余量、公差为: $14 \pm 6\text{mm}$, 于是便可绘出齿轮的锻件图(图5-16)。

2. 确定变形工艺和工具

根据锻件尺寸 $D = 213\text{mm}$, $d = 131\text{mm}$, $H = 62\text{mm}$, 得 $D/d = 1.62$, $H/d = 0.47$, $H/D = 2.9$, 参照图5-9, 其变形工序为: 锻粗—冲孔—冲子扩孔。根据锻件形状特点, 经过分析比

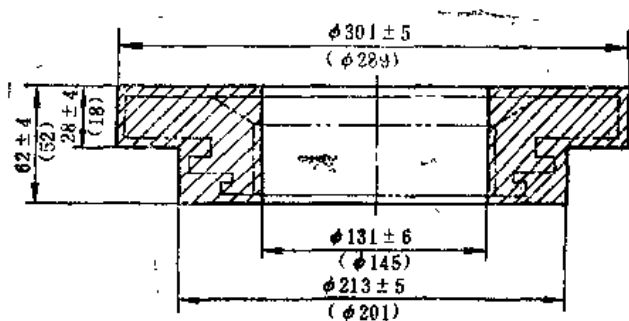


图5-16 齿轮锻件图

较, 决定采取垫环局部锻粗—冲孔—冲子扩孔变形工艺方案。工序顺序、工序尺寸如图5-17所示。

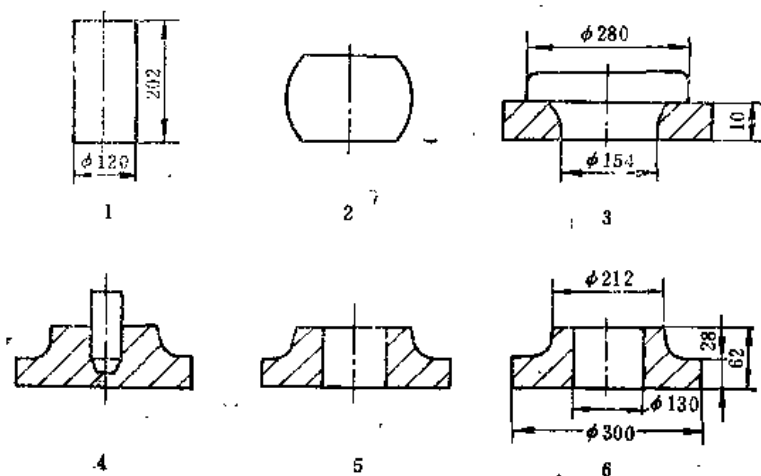


图5-17 齿轮锻造工艺过程

1—下料 2—锻粗 3—垫环局部锻粗 4—冲孔 5—冲子扩孔(三次) 6—修整

为便于去除氧化皮, 在垫环上锻粗之前应进行自由锻粗。自由锻粗后的坯料直径应略小于垫环内径。垫环锻粗后坯料上端直径应比锻件最大直径小些。为了避免扩孔产生裂纹, 冲子扩孔前需再次加热。扩孔分三次进行, 每次扩孔量为: 20mm、25mm、25mm, 最后修整锻件。

垫环孔腔体积 $V_{\text{垫}}$ 应比锻件凸肩体积 $V_{\text{肩}}$ 大10%~15% (厚壁件取小值, 薄壁件取大值, 本锻件取12%), 经计算 $V_{\text{肩}} = 726000 \text{ mm}^3$ 。于是得到:

$$V_{\text{垫}} = 1.12V_{\text{肩}} = 813000 \text{ mm}^3$$

考虑到冲孔时会产生拉缩, 垫环高度 $H_{\text{垫}}$ 应比锻件凸肩高度 $H_{\text{肩}}$ 增大15%~35% (厚壁件取小值, 薄壁件取大值, 本例取20%)。

$$H_{\text{垫}} = 1.2H_{\text{肩}} \approx 40 \text{ mm}$$

根据体积不变条件, 可求得垫环内径 $d_{\text{垫}}$ 为:

$$d_{\text{垫}} = 1.13\sqrt{V_{\text{垫}}/H_{\text{垫}}} \approx 160 \text{ mm}$$

3. 计算原坯料尺寸

(1) 原坯料体积 V_0 。包括锻件体积 $V_{\text{锻}}$ 、芯料体积 $V_{\text{芯}}$ 和烧损体积, 即

$$V_0 = (V_{\text{锻}} + V_{\text{芯}}) \times (1 + \delta\%)$$

锻件体积按公称尺寸计算, $V_{\text{锻}} = 2333000 \text{ mm}^3$

$$\text{冲孔芯料体积 } V_{\text{芯}} = \pi/4 d_{\text{冲}}^2 H_{\text{芯}} = \frac{\pi}{4} \times 60^2 \times 13 \text{ mm}^3 = 36757 \text{ mm}^3$$

(2) 原坯料直径 D_0 和高度 H_0 。由于第一道工序是锻粗, 坯料直径按以下公式计算:

$$\begin{aligned} D_0 &= (0.8 \sim 1.0) \sqrt[3]{V_0} = (0.8 \sim 1.0) \sqrt[3]{2452698} \text{ mm} \\ &= 107.9 \sim 134.9 \text{ mm} \text{ 取 } D_0 = 120 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$H_0 = V_0 / \left(\frac{\pi}{4} D_0^2 \right) = 2452698 / \left(\frac{\pi}{4} \times 120^2 \right) \text{ mm} = 217 \text{ mm}$$

4. 选择锻造设备吨位

根据锻件形状尺寸查表5-3, 选用0.5t自由锻锤。

5. 确定锻造温度范围

45钢的始锻温度为1200℃, 终锻温度为800℃。

6. 填写工艺卡片(从略)。

第四节 大型锻件锻造的特点

大型锻件泛指在大型锻压设备上锻造的体形尺寸与单件重量较大的重型锻件, 其中主要是大型自由锻件。在重型机械制造行业, 通常把在10000kN以上锻造水压机或5t以上锻锤上锻造的重型锻件, 称为大锻件。

目前, 大锻件的单件重量已达250t, 大型锻造钢锭重量达到600t。

大锻件多数是各种大型机器设备中的关键零部件, 例如, 火力发电设备中的汽轮机转子, 发电机护环, 水轮机主轴, 核电用管板、封头; 冶金工业中轧钢机轧辊; 石化工业中反应器筒体, 船舶工业中的曲轴、舵杆; 重型机器制造业中的各种大轴和高压工作缸, 国防工业中的炮管以及大型轴承圈、齿轮坯、模块等基础件。因此, 大型锻件的生产进步对国民经济的发展具有重要的意义, 而且其科技水平、生产能力、经济技术指标, 往往成为衡量一个国家工业发展水平的重要标志。

大锻件生产的主要特点有:

(1) 质量要求严格 由于大锻件多数是机器中的关键件, 一般工作条件特殊, 受力状况复杂, 所以要求其质量必须可靠, 性能必须优良, 才能确保安全运行。随着工业机器向高性能、高参数、大型化方面发展, 对锻件的技术条件和质量水平要求日益提高。但是, 目前原材料冶金质量的提高, 锻造、热处理技术的优化与控制, 质量分析与测试技术的进展, 还不能与之相适应, 于是, 如何提高大锻件的质量问题, 就成为大锻件生产中的主要矛盾。

(2) 工艺过程复杂 大锻件的生产过程包括: 冶炼、铸锭、加热、锻造、粗加工、热处理等。工艺环节多, 周期长、连续性强、集体劳动, 生产技术复杂。

(3) 生产费用高 大锻件的原材料、能源、劳动力及工具消耗大, 生产周期长, 占用大型设备多, 因而生产成本低。所以, 提高材料利用率, 降低消耗, 减少废品率, 在技术和经济上具有重要的意义。

以下简要介绍大型锻件锻造中几个主要问题。

一、钢锭冶金质量对锻件的影响

由于大锻件多用钢锭直接锻造, 因此可以说, 优质钢锭是生产优质大锻件的基础。

优质钢锭主要指: 钢中夹杂物少, 钢质纯净度好, 结晶结构合理, 钢锭缺陷少。

钢的冶炼、浇铸过程以及钢锭的形状、尺寸等参数对钢锭质量有着重要的影响。

钢锭的主要缺陷有缩孔、疏松、偏析、夹杂、气体、裂纹等。有关这些缺陷对锻件质量的影响在第二章中已有介绍。当前提高钢锭冶金质量应注意如下几个问题。

1) 认真提高炼钢炉料、辅料和耐火材料的质量。提高钢液纯净度, 防止冶铸过程中受到污染。

2) 积极采用实用的炉外精炼技术。所谓炉外精炼, 也称为二次炼钢, 即把一次冶炼的钢液, 再在精炼炉或钢包内进行精炼提纯, 从而使冶金质量提高一步。炉外精炼的方法很多,

功能各异,但是,炉外精炼对提高钢液质量确有明显的效果。随着锻件技术要求的提高和特殊钢产量的上升,适合我国情况的炉外精炼技术得到了广泛的应用。

例如,大型电站锻件用钢及新型合金钢采用钢包精炼法。它是将初炼钢水兑入钢水包,然后进行真空脱气及电弧加热,并使钢液在电磁搅拌作用下得到熔渣的精炼。结果钢液脱氢脱氧率达到60%,硫含量降至0.01%~0.001%,几乎没有夹杂。力学性能均匀,锻件质量显著提高。

再如,电渣重熔法,它是将一般方法冶炼的钢,制成自耗电极,再重熔为液滴,经渣洗精炼,逐渐结晶成电渣锭。其脱气率达50%~60%,钢中夹杂总含量降至0.01%~0.005%。无明显偏析,组织结构致密,塑性良好,结晶结构合理,污染少。用该法生产的轴承钢,制件寿命明显提高。我国已拥有当今世界上最大的200t级的大型电渣炉,并已成功地生产了许多优质大锻件。

3)发展电炉炼钢,逐步淘汰平炉炼钢。随着电力工业的发展,电炉炼钢将会取代平炉炼钢,这样钢液质量将会明显改善。

4)改进铸锭技术,严格控制浇注温度与浇注速度。积极采用发热冒口、保护浇注等技术。推广大钢锭下注法,减少钢锭底部夹杂,提高表面质量。

对于大型重要合金钢锻件,多采用真空处理。例如,在我国已成功采用真空碳脱氧方法制造了许多大型电站锻件。真空碳脱氧是将钢液先不进行硅、铝终脱氧就真空浇注,于是,未脱氧的钢液在真空条件下,靠自身的碳脱去钢中的氧,形成CO与CO₂排出。脱气效果显著,氢含量降至0.4~1.2ppm。去除夹杂效果明显。

总之,提高钢液纯净度,改善铸锭冶金质量,不仅为生产优质锻件提供了良好的前提条件,而且对锻压工艺的改进、钢锭利用率提高都起了重要的作用。

二、大型钢锭的加热特点

大型钢锭或钢坯的横断面尺寸大,加热时内外温度差比中小型锻坯大得多,温度应力也大得多,尤其当加热速度过快时,温度差会更大。假若钢料化学成分复杂,导温系数小,塑性差,又处在低温加热阶段,即弹塑性转变以前。这时温度应力、残余应力以及组织应力的代数值,一旦超过钢料的强度极限,就会引起加热裂纹。

为了保证大锻件的质量,加热时要保证充分均匀热透,以防在锻压时发生不均匀变形,导致组织性能不均匀和附加内应力,恶化锻件承载能力。

对某些高合金重要锻件用钢,加热时要保证进行高温扩散,以减少偏析和不均匀结构对锻件质量的不良影响。

关于大型钢锭的加热规范见本书第三章第四节。

三、热锻变形对金属组织和性能的影响

由于大锻件用钢锭直接锻造,钢锭中粗大不均的铸态结构、偏析、疏松、夹杂、气体、孔洞等冶金缺陷,必须通过锻造热变形来消除或改善。打碎铸态结构,锻合内部孔隙,分散非金属夹杂与异相质点,产生比较细小而均匀的再结晶组织和合理的纤维分布,从而满足优质锻件对组织性能的要求。

1. 破碎铸态结构获得再结晶组织

锻造热变形时,当达到一定的变形程度后,铸态的粗晶、树枝状结构以及晶界物质便被击碎,热变形的同时,发生动态再结晶,热变形停止,又会产生静态再结晶。经过充分的锻

造热变形和动、静态回复、再结晶联合作用，铸态组织将转变为再结晶组织。

就热锻变形组织而言，晶粒度和均匀度主要取决于合适的变形温度和变形程度及其分布的均匀性。只要变形程度、变形温度不在临界范围内，而且匹配合理，分布均匀，便能得到比较理想的细小而均匀的再结晶组织。对于需要多次加热锻造才能锻成的锻件，最后一火热锻参数的控制具有决定的作用。

对于无相变的铁素体不锈钢、奥氏体不锈钢等，由于不能通过热处理细化晶粒，所以通过热锻使晶粒细化、均匀化显得更为重要。

2. 改善碳化物及夹杂的分布

钢中的碳化物、非金属夹杂以及过剩相，其物理性质和力学性能与基体材料有很大的差异。如果偏析于晶界或呈团、片状连续分布，对制件使用性能有不良影响。尤其对一些高合金钢锻件，这种影响更大。例如，做刀具用的高速钢及轴承用钢，要求碳化物最好呈弥散分布，只有这样性能才能均匀，使用寿命才能增加。对于汽轮机转子类的重要大锻件则要求内部的硫化物、氧化物、硅酸盐等非金属夹杂要尽可能少，并呈细小分散状分布。这都需要通过热锻时充分的塑性变形、不同方向的塑性流动，使夹杂物变形、破碎、均布，再加上高温扩散和相互溶解来实现。

3. 锻合内部孔隙

钢锭内部的孔隙性缺陷，如疏松、气孔、微裂等宏观或微观孔洞，类孔隙性缺陷，如夹杂、偏析、粗晶等不密实组织，如果不被锻合压实，则锻件致密性低，力学性能差，容易发生断裂等灾难性事故。所以，锻合压实孔隙一直是大型锻造中的重要课题。通过塑性变形模拟实验和大量生产实践证明：锻合压实孔隙缺陷的基本条件是：

1) 锻造时应有良好的应力状态。例如，有足够大的静水压应力。因为在三向压应力作用下，金属塑性将会提高，孔隙变形时不致裂开或者扩大。此外，受力变形要利于金属塑性流动，利于孔隙失稳、闭合。

2) 锻压时有足够大的变形量。锻坯只有发生了较大的塑性变形后，内部孔穴才可能产生变形、并完全闭合。

3) 有足够高的变形温度。不仅因为高温下锻坯易于塑性变形，而且，孔隙在高温下容易闭合、焊合、并发生金属键结合，提高了锻合效果。

孔隙锻合的机理是：在上述变形条件下，首先发生屈服、变形，进而闭合、压紧。最后在高温、高压作用下焊合、压实。经过合理锻压的坯料，其致密性、连续性和综合力学性能将会显著得到改善。

在一般平砧锻造条件下，锻坯心部不可能产生足够大的静水压应力。所以，对中心的球形空洞，锻合过程主要经过压扁、闭合、焊合三个阶段。而与最大压应变方向垂直的柱状孔洞同样也经过上述三个阶段锻合。但是，初始阶段的收缩变形量加大。如果进行表面降温锻造（中心压实法），则由于冷硬表层对中心变形的限制，中心区的静水压应力增大，有利孔洞的变形和锻合。

4. 形成纤维组织

随着锻造变形的增大，钢锭中晶粒沿金属塑性流动的主变形方向被拉长，晶界物质随之也发生了改变。其中塑性夹杂物，如硫化物则被拉成条状，而脆性夹杂物，如氧化物及部分硅酸盐，将被破碎，并沿主变形方向呈链状分布。晶界上的过剩相和杂质被拉长后也呈定向

分布。这种不均匀的分布，即使经过再结晶，也不会消失，于是锻件中留下明显的变形条纹。经过腐蚀清楚可见。这种方向性的热变形组织结构，称为“纤维组织”或“流线”。

锻件中出现纤维组织的内因是钢中晶界物质的存在。外因是锻造沿某方向变形流动的结果。假如只进行拔长，在锻造比达到3时，便出现了纤维组织。如先镦粗而后再拔长，则拔长锻造比达到4~5时，才能形成纤维组织。这是因为金属塑流方向的改变，影响了定向纤维的形成。

锻件纤维的分布，取决于金属的流动，因此制订合理的锻压工艺，控制塑性流动，得到正确的流线分布，将能改善制件的承载能力，防止失效破坏。因为明显的纤维组织，必然造成力学性能和理化性质的方向性，那么根据零件工作时受力、破坏状况，设计纤维流向，使其与制件工作面相适应，与正应力平行，与剪应力垂直，则使用性能将会提高。现举例如下：

对于曲轴，因曲拐处受扭转剪应力，轴颈磨损严重。所以希望锻压成形时，纤维能沿外轮廓连续分布。其纤维流向与最大工作拉应力方向一致，与剪应力垂直。而且力线密集处，流线密集，因此使用性能显著提高。如图5-18所示，曲轴制造工艺的改进就是使纤维合理分布。最初用扁钢坯先加工出曲拐，再加热扭出各拐相互间的角度。这种方法切断了主轴颈和连杆轴颈的纤维（见图5-4），降低了曲轴承载能力和使用寿命。半纤维锻造，是用六方型钢坯，错挤出六个曲拐，大部分纤维按零件外形分布，但曲拐连杆轴颈处还需要切削加工，该处纤维被切断，对使用性能有不良影响。最后采用全纤维弯曲锻造。即每次弯曲锻造出一个拐，依次完成六个曲拐的成形。这样每个曲拐的纤维连贯，分布合理。所以这种方法锻制的曲轴质量最好，寿命最高，材料最节约。同理，起重机吊钩，也要经弯曲、模锻成形，以确保纤维连贯，并沿工作表面合理分布。

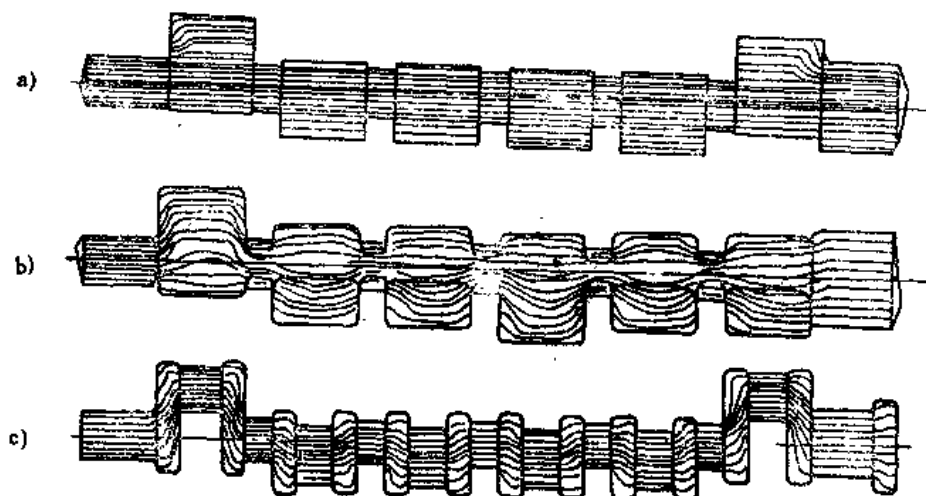


图5-18 六拐曲轴锻件中纤维分布图

a) 切断纤维锻造 b) 半连续纤维锻造 c) 全纤维弯曲锻造

对于锤头、模块等锻件，因为要求各向同性，所以要反复锻拔，不希望有明显的异向性。

再如，轴承圈、齿轮圈等制件，希望流线最好与工作表面相适应，以防纤维不连续或露头形成微观缺陷、应力集中，造成疲劳破损，降低使用寿命。

当钢中存在大量的非金属夹杂时，锻件中还会产生层状（木纹状）断口，使横向力学性能严重下降。

5. 锻造对锻件性能的影响

因为通过锻造，钢锭中的宏观及微观缺陷得到锻合压实，晶粒破碎再结晶，组织结构的

致密性、均匀性都有所提高,因而,综合力学性能相应提高。例如,在平砧上拔长钢锭时,当锻造比增加到3,纵向和横向的塑性和强度指标均有明显的增长。继续增加锻造比,不仅增长减缓,而且由于形成了纤维组织,横向塑性、韧性指标将明显低于纵向,出现了异性性。图5-19为碳钢拔长试验时,锻造比与力学性能的关系。由图可知,拔长锻造比(K_L)为2以前,各项性能指标增长都很快。当锻比达到3~4时,强度指标增长减慢,而横向塑性、韧性指标下降,异性性增大。

应当指出,锻造比系习惯上常用的参数,它既不能说明锻压变形的热力学条件,又不能反映应力状态与变形分布,因而以上数据,仅能说明在普通热锻条件下,变形与性能间的一般关系。但是,以变形组织的改善判断力学性能的提高的概念是正确的。

四、大锻件变形工艺分析

如前所述,钢锭内部的组织是不均匀的,钢锭内存在大量缺陷。通过热塑性变形可以改善其组织,并消除其中的部分缺陷,如缩孔和疏松等。但是要生产出合格的大锻件,必须根据对锻件组织性能的具体要求,恰当地选用变形工艺。因此,有必要对大锻件锻造中常用变形工艺的特点进行具体分析。

1. 普通平砧拔长

拔长是轴类锻件成形的基本工序。

拔长是大锻件最主要的变形工序。它不仅工作量大,占用设备台时多,而且还是改善锻坯组织性能,提高锻件内部质量的主要方法。

普通平砧拔长的变形简图如图5-20所示。其上下砧宽相等。每次压缩时形成的应力、应变场和金属流动状况,主要取决于拔长工艺参数。如相对送进量(L_0/H_0)或者砧宽比(L_1/H_1)

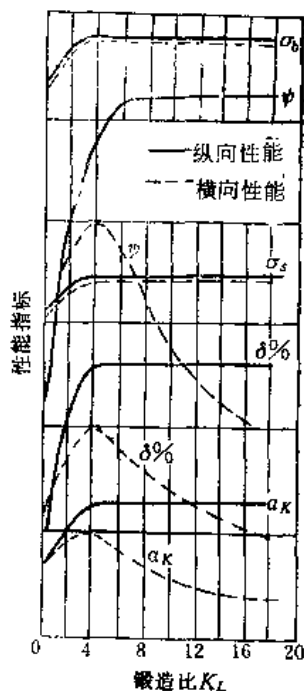


图5-19 碳素钢锭拔长锻比对制件性能的影响

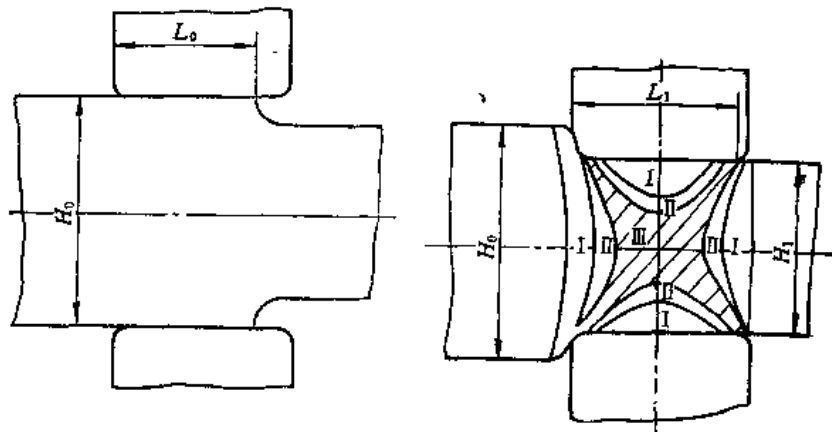


图5-20 普通拔长变形简图

I—难变形区或粘滞区 II—小变形区 III—大变形区或易变形区

H_0)。该两参数分别代表拔长压缩时, 开始阶段及压缩终了, 砧面与坯料接触面的相对尺寸。相对压缩量($\varepsilon_h = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \times 100\%$), 代表拔长变形时, 每次压缩的变形程度。此外, 还和锻坯内的温度分布及外摩擦情况有关。

当 $\frac{L_0}{H_0} = 0.5$, $\varepsilon_h = 20\%$ 时, 坯料内部的等效应变($\bar{\varepsilon}$)和静水应力(σ_m/σ)的分布如图 5-21 所示。其中 σ 系指该点的流动应力。因平砧拔长, 上、下、左、右对称变形、故图中仅给出变形区的四分之一。

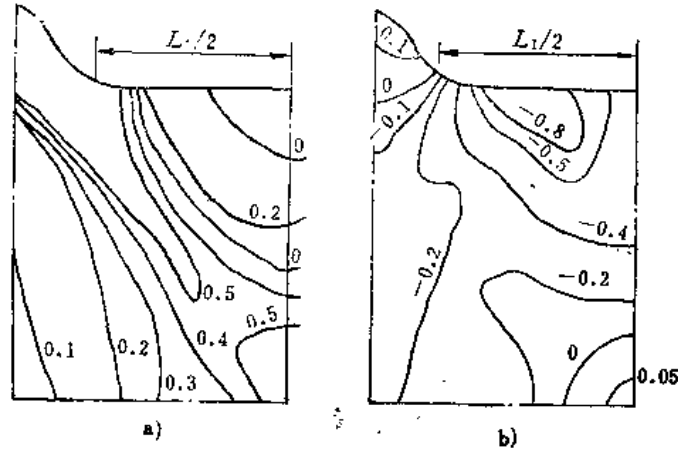


图5-21 普通平砧拔长时, 坯料内部等效应变($\bar{\varepsilon}$)和静水应力(σ_m/σ)的分布
($L_0/H_0 = 0.5$ $\varepsilon_h = 20\%$)
a) $\bar{\varepsilon}$ 分布 b) σ_m/σ 分布

由图可知, 在该变形参数下拔长, 坯心部应变强度较小, 而且有拉应力出现。这种变形特点称为中心产生 Mannesmann 效应。显然, 在这种情况下锻坯中心孔洞不可能锻合压实, 相反会导致中心裂纹。

2. 宽平砧强压法(WHF法)

宽砧高温大压下量锻造, 对锻合坯料内部缺陷有重要的作用。对锻坯中孔洞和多孔体锻压研究证明, 当砧宽比为 0.6~0.8, 压下率为 20%~25% 时最为合理, 因为在此参数下锻压, 坯料内应力、应变分布最合理(图 5-22), 中心孔穴和疏松组织将被有效地压实。

在用 WHF 法拔长时, 沿砧子外缘, 约占砧宽的 35%~50% 区域, 孔洞难以闭合。为了消除锻件中的全部孔隙, 拔长时, 两次压缩中间应有 10% 砧宽的搭接量, 并在翻转时注意错砧, 以达到均匀压实的目的。

3. FM 锻造法

FM 法(Free from Mannesmann)即中心无拉应力锻造法。它与平砧拔长相比, 区别在于下砧改为宽平台。不对称的砧型配置, 在锻坯内部产生不对称变形。按滑移线场原理, 采

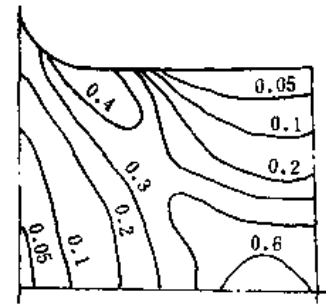


图5-22 $\frac{L_0}{H_0} = 0.7$, $\varepsilon_h = 20\%$ 时锻坯内等效应变($\bar{\varepsilon}$)的分布

用FM法后, 形成拉应力的部位移至坯料下部, 而中心部位则形成压应力。如图5-23所示。

FM法锻造的最佳工艺参数为, 砧宽比: 0.6, 压下率: 14%~15%。

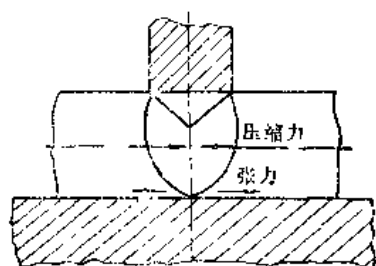


图5-23 FM法锻造原理

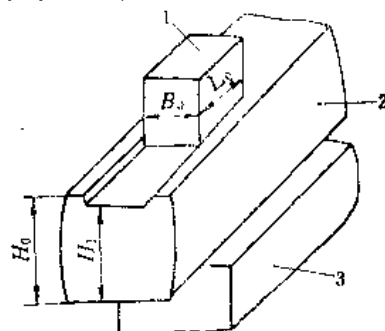


图5-24 中心压实法变形简图
1—窄上平砧 2—锻坯 3—下平台

4. 中心压实法

此法亦称表面降温锻造法。因最先由日本的馆野万吉和鹿野昭一提出, 又称J.T.S法。

中心压实法的实质是当锻坯高温加热锻造前, 表面先冷却降温(空冷或吹风、喷雾冷却)而中心还处于高温状态时, 用窄平砧沿锻坯纵向加压, 借助表层低温硬壳的限制作用, 达到显著压实中心的效果。如图5-24所示。

研究证明, 内外温度差由0℃增至250℃时, 锻坯中心缺陷锻合所需的临界压下率降低28%左右; 静水压应力增加3倍左右; 同时变形更能集中于中心; 断面上变形分布趋于均匀。根据J.T.S法的锻压效果提出的最佳工艺参数为: 内外温差 $\Delta t = 230 \sim 270^\circ\text{C}$; 砧宽比 $L_0/H_0 = 0.6$, $B_0/H_0 = 0.7$, 压下率, 两面垂直加压时取13%; 四面对称加压取7%~8%。J.T.S锻

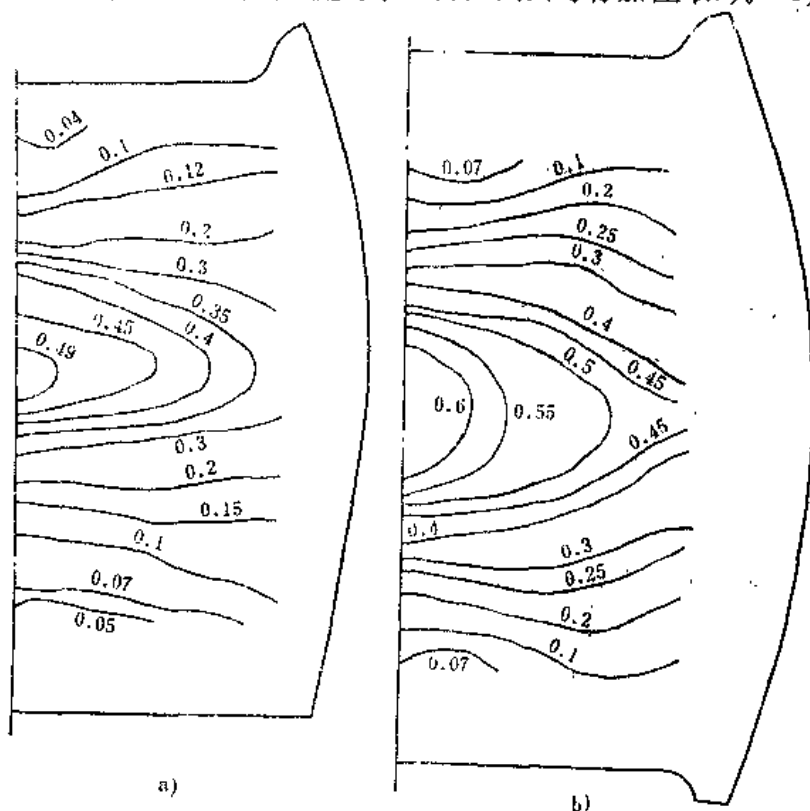


图5-25 中心压实时锻坯内等效应变分布

$L_0/H_0 = 0.6$ $B_0/H_0 = 0.7$

a) 单面加压 ($\Delta t = 250^\circ\text{C}$ $\epsilon_s = 13\%$) b) 双面对称加压 ($\Delta t = 250^\circ\text{C}$ $\epsilon_s = 8\%$)

造时, 锻坯内等效应变分布如图5-25所示。

5. 型砧拔长

锻造中常用的型砧拔长方法有上下V形型砧及上平下V形型砧拔长和上下圆弧砧拔长等。型砧拔长与平砧拔长相比, 锻坯横向流动小, 拔长效率高。当压下量足够时, 砧下孔洞不闭合区小, 而且翻转操作方便, 所以多用来锻造轴类锻件。从坯料中心孔隙闭合情况和变形分布均匀性方面研究认为: 工作角为 135° 的上下V形型砧最好。不仅大变形区面积大, 应变场均匀, 而且集中于心部, 对压合孔洞缺陷有利。上下圆弧砧次之。上平下V形型砧变形不对称, 但操作方便, 一般用于锻压钢锭钳把的工序。生产中上下V形型砧诸参数优选范围是: 砧宽比 $(L/D_0)0.6\sim0.8$, 压下率 $(\Delta H/D_0)15\%\sim22\%$, 工作角 $(\alpha)135^\circ\sim120^\circ$ 。

上下V形型砧锻造时, 锻件内部的等效应变分布, 如图5-26所示。

我国曾经成功地应用了一些新的锻造方法, 生产了一批合格锻件, 既增加了锻透性, 提高了内部质量, 又提高了生产效率。

宽砧大压下量锻造法 (亦称KD锻造法)。它是运用加大砧宽与压下量, 使锻坯充分压实并消除缺陷。例如在120MN锻造水压机上, 采用上下平砧 (砧宽1200~1700mm) 135° V形型砧 (砧宽1200mm), 压下量由200mm增加为450~550mm, 配合其它锻造工序, 成功地锻造出一批600~200MW重型转子锻件, 质量达到了国际先进水平。

有效压实锻造法 (又称极限锻造成形法)。它是充分利用锻件成形过程中截面形状的变化, 用上下平砧将锻坯尺寸压至极限尺寸。比如圆轴锻件, 极限方尺寸 $C=(0.93\sim0.95)D$, 并附以扩散加热, 从而获得最佳的锻造效果, 锻造时间也缩短了1/4。

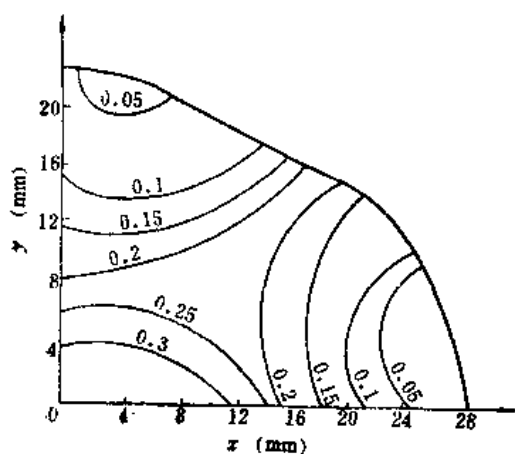


图5-26 上下V形型砧拔长等效应变 $\bar{\epsilon}$ 分布

135° V形型砧 $L/D_0=0.6$ $\Delta H/D_0=14.6\%$

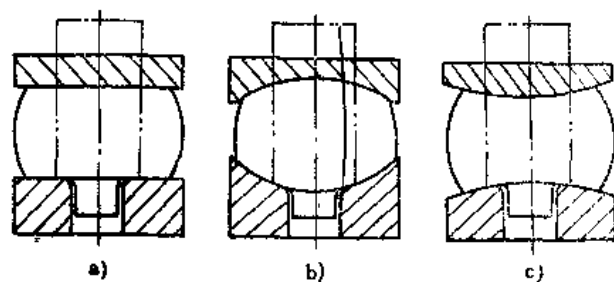


图5-27 带钳把锻粗的三种形式

a) 平面 (平板) 锻粗 b) 凹面 (球面) 锻粗
c) 凸面锻粗

6. 锻粗

大锻件锻造中锻粗主要有两种形式: 带钳把锻粗和无钳把锻粗。

带钳把锻粗。一般用作锻造轴类锻件时, 后续拔长的预备工序, 以增大拔长锻比, 改善制件的横向力学性能。

无钳把锻粗。既是圆盘形和方块形锻件的主变形工序, 又是空心锻件、冲孔前的预备工序。

带钳把锻粗, 按上锻粗板和下漏盘工作面形状分为: 平面锻粗、凹面锻粗和凸面锻粗。如图5-27所示。

对于高径比(H_0/D_0)在2.5~3以下的锻坯, 锻粗时不会发生纵弯曲现象。当锻压变形程度(ε_k)小于30%时, 中心缺陷不易锻合。图5-28示出凹面锻粗和凸面锻粗($\varepsilon_k = 40\%$)后, 锻坯内部等效应变和静水压应力分布状况。平面锻粗的应力应变场介于上述两者之间。

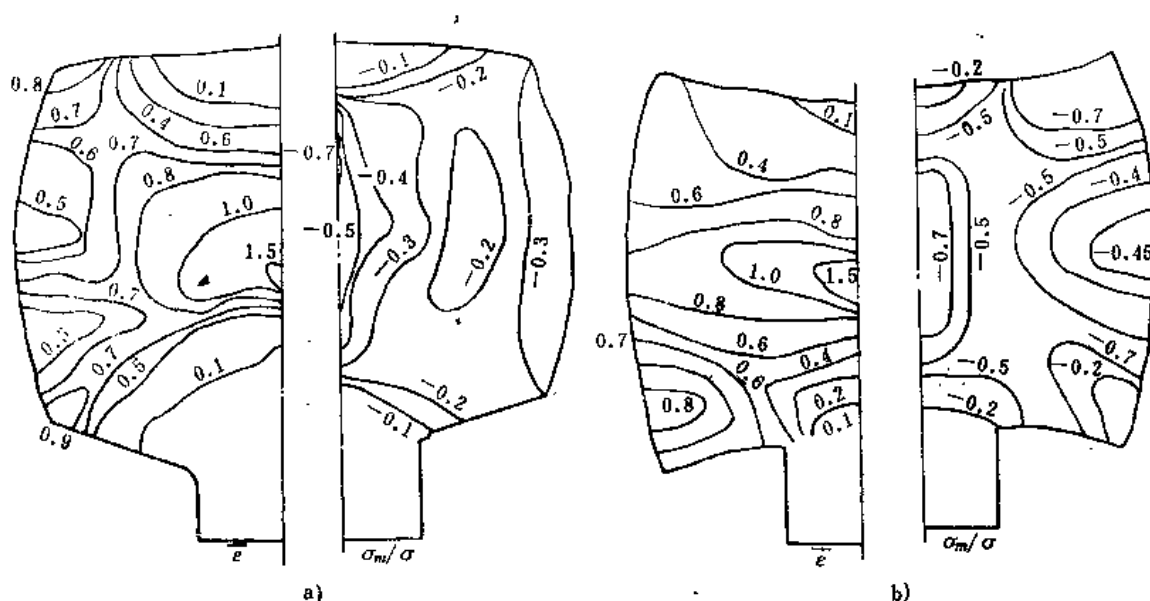


图5-28 带钳把锻粗的等效应变(ε)和静水压应力(σ_m/σ)分布

a)凹面锻粗 b)凸面锻粗

在锻粗时, 如将钢锭压成凹腰形(图5-29), 然后锻粗, 不仅可以减少侧面鼓肚, 而且还能增加变形量。

五、大型锻造工艺实例

1.600MW 汽轮机低压转子的锻造

(1)技术要求 汽轮机低压转子系电站设备中最重要的锻件。在工作时它承受高速旋转(3000r/min)产生的巨大离心力, 并承受扭转应力和弯曲应力, 因此要求强度高、韧性好、组织性能均匀、残余应力最小。为了确保转子长期安全运转, 对转子质量要作严格的检查。

600MW 低压转子用钢为33Cr2Ni4MoV。

气体含量: $H_2 \leq 2.0\text{ppm}$, $O_2 \leq 40\text{ppm}$, $N_2 \leq 70$

ppm。力学性能 $\sigma_{0.2} = 760\text{MPa}$, $\sigma_b = 860 \sim 970\text{MPa}$, $\delta = 16\%$, $\psi = 45\%$, $A_K = 42\text{J/cm}^2$, $FATT \ominus = 13^\circ\text{C}$ 。超声波探伤当量缺陷直径小于 $\phi 1.6\text{mm}$ 。内孔潜望镜和磁粉检验, 不允许有任何长度大于3mm的缺陷。金相检验, 晶粒度不大于ASTM \ominus No 2。夹杂物不大于No 3。此外, 对粗加工精度、残余应力、硬度均匀性等均有严格的要求。

(2)转子钢的冶炼与浇铸 先在电炉、平炉内初炼钢水, 要求低磷、高温, 例入钢包精炼炉, 经还原渣精炼, 氩气搅动, 真空碳脱氧, 净化钢液质量。再用24棱短粗胖锭模铸锭。

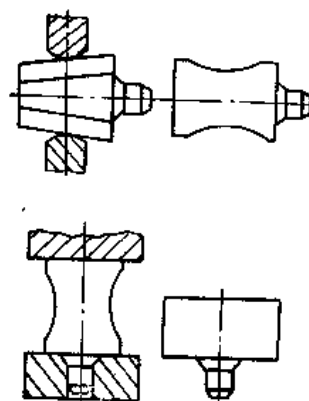


图5-29 钢锭先压成凹腰形然后锻粗

⊖ 脆性转变温度。

⊖ 美国材料。

凝固前加发热剂与稻壳, 保证充分收缩。最后热运至加热炉升温。

(3) 锻造 在试制阶段, 为充分可靠地锻造压实, 采用WHF与JTS联合锻压成形的方案, 保证了锻造的高质量。具体锻造过程见表5-4。

(4) 热处理 因为33Cr2Ni4MoV钢的淬透性好, 高温奥氏体稳定, 有粗晶与组织遗传倾向, 所以, 除严格控制最后一火加热规范和变形量外, 采用了多次重结晶, 即930℃、900℃、870℃三次高温正火。过冷至180~250℃有利于晶粒细化与扩氢。具体工艺见锻后热处理规范(图5-30)。

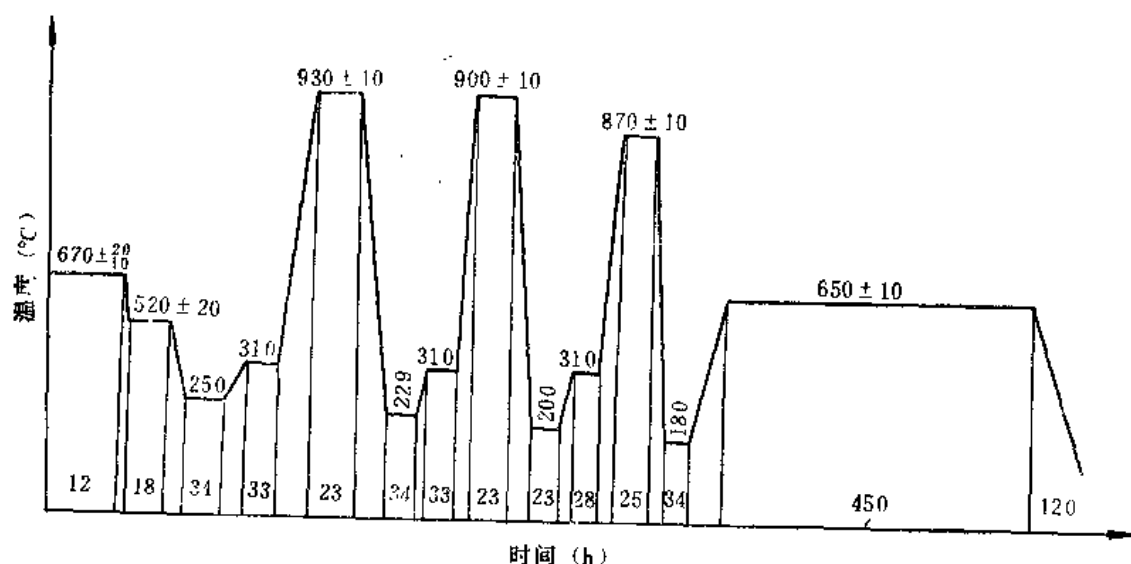


图5-30 600MW低压转子锻后热处理工艺

调质热处理, 840℃淬火, 590~570℃回火, 可以满足技术条件的要求。

经过全面检查, 该转子质量达到了国际先进水平(符合美国西屋电气公司验收标准)。

2.600MW发电机护环的锻造

(1) 技术要求 护环是火电设备中的关键锻件之一。护环热装在发电机转子两端, 用来紧箍转子端部线圈。护环受离心力、热套应力、弯曲应力和交变应力的作用。要求有足够高的强度、良好的韧性、一定的屈强比、均匀的力学性能与最小的残余应力和抗应力腐蚀能力。

护环用钢主要采用Mn-Cr系材料, 其中Mn18Cr18N(18-18钢)系抗应力腐蚀钢种。亦有用50Mn18Cr5N等钢种的。18-18钢中氮含量(N, 0.6~1.2)高, 生产难度大。力学性能: $\sigma_{0.2} = 1076\text{MPa}$, $\sigma_s = 1180\text{MPa}$, $\delta = 17\%$, $\psi = 30\%$, $A_K = 60\text{J/cm}^2$, 导磁率 $\mu \leq 1.1$, 晶粒度为1级, 残余应力在117MPa以下。还要求进行着色检查和超声波探伤。

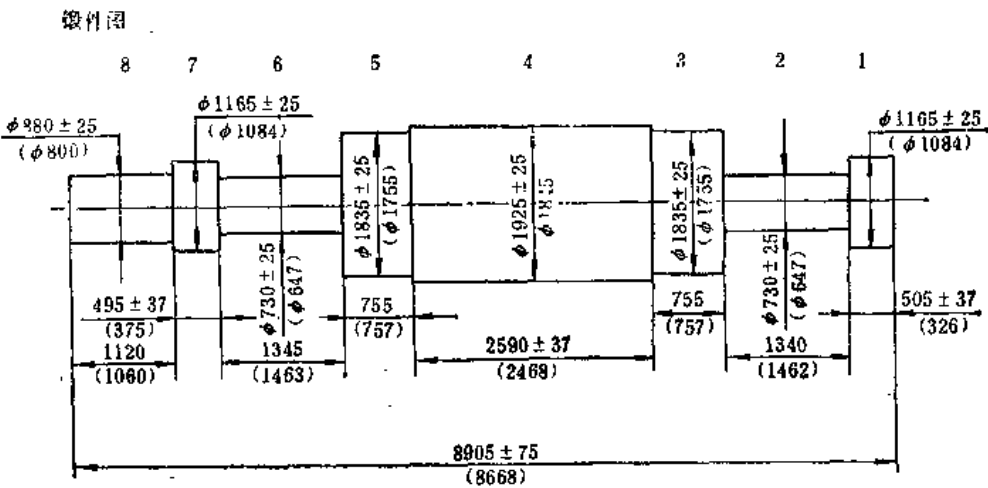
(2) 生产流程及其要点 普通炼钢制造—自耗电极—电渣重熔(ESR)—热锻成形—水冷—粗加工—固溶处理—形变强化—去应力处理—质量检查。

生产技术中的主要难点在于, 冶炼、重熔时, 保护钢中高氮量, 并严格控制钢中氧含量与微量元素的含量, 确保锻件的使用性能与工艺性。其次是热锻时预防开裂及粗晶、混晶组织。形变强化时, 注意保护尺寸精度及性能的均匀性。

其中, 热锻工艺的主要工序为, 下料、锻粗、冲孔、芯棒预扩孔、芯棒拔长、芯棒扩孔

表5-4 大型转子CAD锻造工艺卡片

零件名称	600MW汽轮机低压转子	钢 号	33Cr2Ni4MoV		
单件重量	116550kg	锻件级别	特		
钢锭重量	230t	设 备	12000t水压机		
钢锭利用率	0.506	锻 造 比	微粗	4.4	拔长 7.3
每钢锭制锻件	1	每锻件制零件	1		

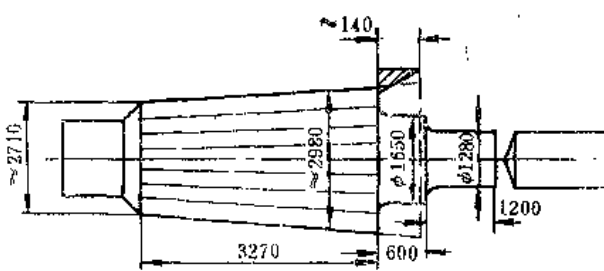
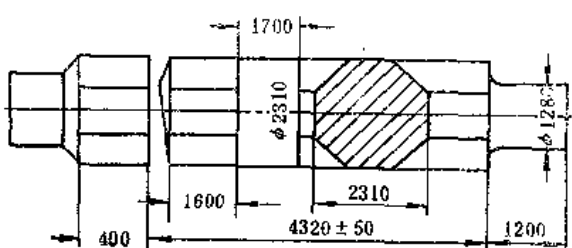
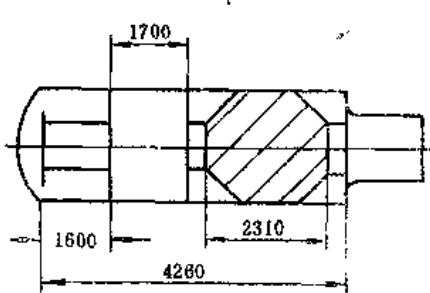


技术要求：

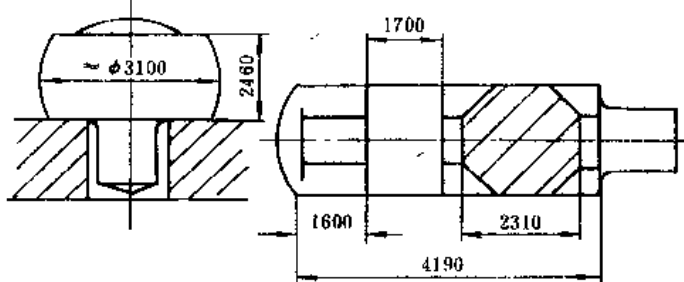
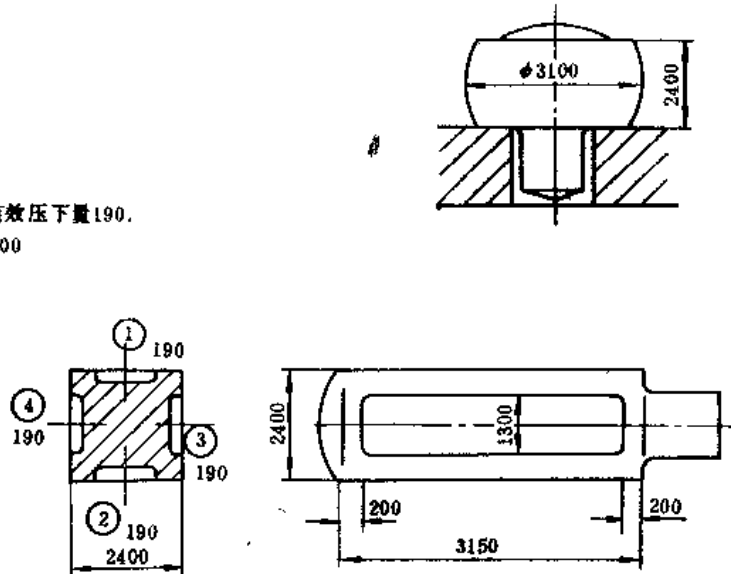
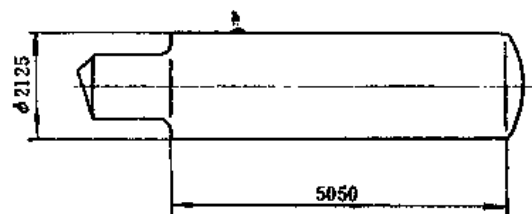
- 按照转子技术条件生产验收；
- 钢锭必须真空，采用单锥度冒口，钢锭热送至水压机车间；
- 钢锭第一热处理按专用工艺进行；
- 各工序必须严格执行工艺，精心操作。
- 生产路线：加热—锻造—热处理—发三金工
- 印记内容：生产编号、图号、熔炼炉号

编 制		校 对		批 准	
-----	--	-----	--	-----	--

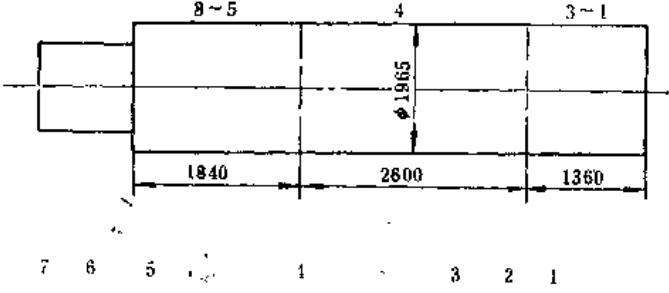
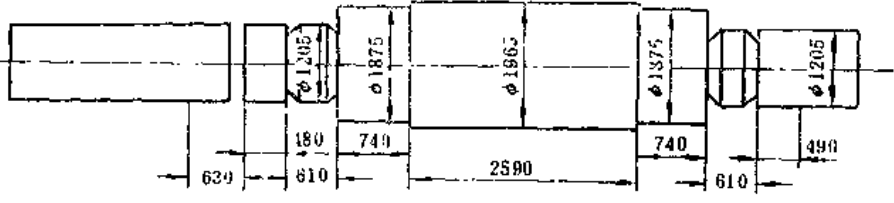
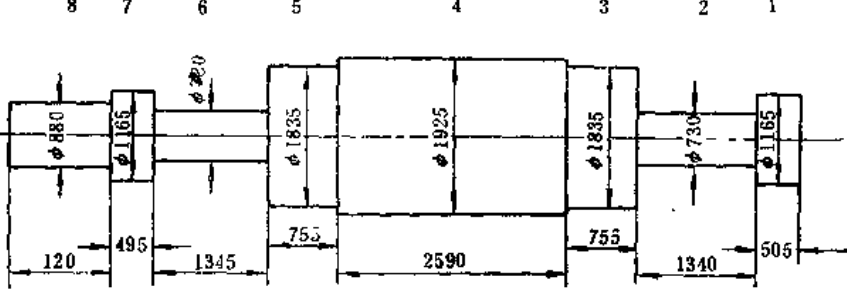
(续)

火次	温度	操作说明及变形过程简图
1	1260~750℃	<p>拔冒口端到图示尺寸, 压 $\phi 1280 \times 1200$ 钳口</p> 
2	1260~750℃	<p>用 $B=1700$ 宽平砧压方至 $\square 2160$, 按 WHF 法操作要领操作, 倒八方至 2310, 略液圆 $\phi 2310$, 割水口, 严格控制 4320 尺寸, 重压 $\phi 1280 \times 1200$ 钳口</p> 
3	1250~750℃	<p>立料, 微粗, 先用平板碾至 3900, 再换球面板碾至图示尺寸, 压方至 $\square 2160$, 其余要求同二火, 倒八方至 2310, 严格控制锭身及钳口长度, 略液圆 $\phi 2310$</p> 

(续)

火次	温度	操作说明及变形过程简图
4	1260 ~ 750°C	<p>立料，微粗。 压方至$\square 2160$， 倒八方2310（操作要求同第三火）</p> 
5	1260 ~ 750°C	<p>立料，微粗。 要求同第三火。 压方至$\square 2400$， 中心压实，每面有效压量190。 锤与锤之间搭接100</p> 
6	1220 ~ 750°C	<p>倒八方2125（注意防止产生折伤）， 滚圆$\phi 2125$， （若温度好，接着干下火）</p> 

(续)

火次	温度	操作说明及变形过程简图
7	1220~750℃	<p data-bbox="445 510 635 622">滚圆至$\phi 1965$, 分料, 滚两头至图示尺寸, 如图示分料</p>  
8	1220~750℃	 <p data-bbox="480 1485 676 1574"> 滚出各部 精滚各部至成品尺寸 割切修整出成品 </p>

至最终尺寸。锻造温度范围 $1220\sim 850^{\circ}\text{C}$ 。由于护环锻件为一短圆筒（图5-31），锻造工艺并不复杂。但是控制锻件质量却很困难。例如，加热时要均匀并充分高温扩散，还要严格防止粗晶。这就需要保持炉温均匀，严格控制加热温度与保温时间。锻造时，开始要轻压，防止开裂。压下量按加热温度高低确定。一般温度较低时，压下量减少，这也是为了预防开裂。

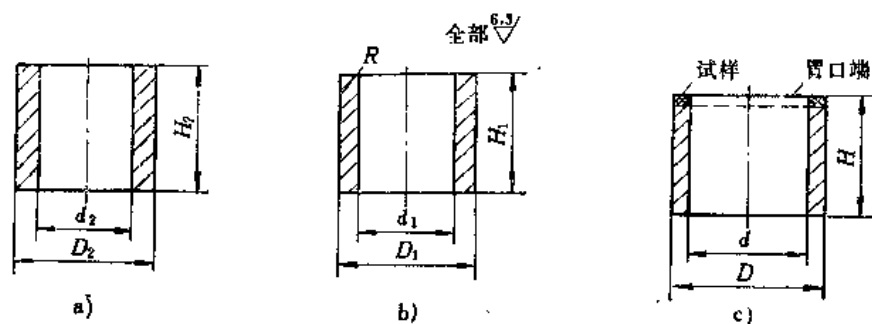


图5-31 护环锻件图
a) 环坯锻件图 b) 环坯粗加工图 c) 护环锻件图

如果发现有锻造裂纹，应立即清除，以防扩展。芯棒扩孔时，转动要均匀，每次压下量要均匀，以保证变形分布均匀，减少混晶现象。

变形强化的目的是为了提高护环的强度。利用加工硬化提高护环强度的方法很多，目前最常用的方法是液压胀形强化，包括一般液压胀形法和外补液法（图5-32、5-33）等。

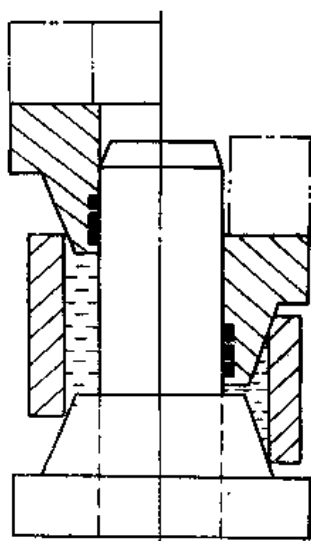


图5-32 护环液压胀形装置

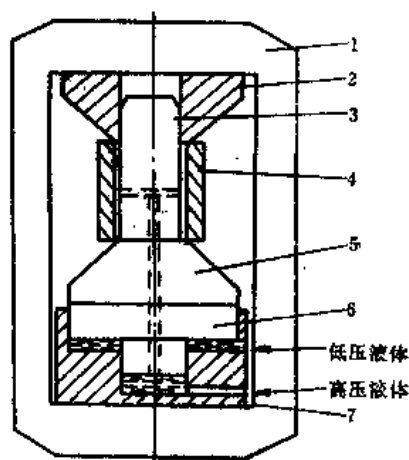


图5-33 外补液法装置
1—框架 2—上锥模 3—减力柱 4—护环
5—下锥模 6—柱塞 7—补液缸

一般液压胀形法是利用锻造水压机，对液压胀形装置的上冲头施压，使密封在环坯内的水压强增大，于是环坯在内压力下胀形强化。该方法受力均匀，生产率高，在我国已经稳定应用。

用一般液压胀形法生产护环，在胀形过程中如果护环突然破裂，容易对水压机造成损伤。另外，在自由锻水压机上生产护环，不便于组织专业化生产，用外补液法生产护环则可以克服上述弊端。

外补液法是将环坯置于专用水压机上加压密封，然后用超高压泵向环坯内注入超高压水，使环坯在内压作用下膨胀强化。我国某厂已用该法建立了专业化生产线。

护环强化方法还有楔块扩孔法和内增压法等，应当根据生产实际条件，分别选用，以期获得良好的经济技术效益。

护环强化后要进行350℃去应力处理。这对稳定尺寸有一定作用。

锻后水冷是为了防止该奥氏体钢的晶粒粗化。

固溶处理的作用是使碳化物完全固溶于奥氏体基体中去，从而保持力学性能均匀，电工性能稳定。

第六章 模锻成形工序分析

第一节 概 述

锻造生产初期,由于工具比较简单,只能生产一些简单形状的锻件。随着整个社会的发展,锻件的批量越来越大,形状愈来愈复杂,因此在自由锻的基础上出现了胎模锻和模锻。同时,锻造用的模具也随之不断完善,以适应锻造生产发展的需要。

模锻时金属的变形和流动也遵循本书第四章第一节所阐述的那些规律。总的看来,工具(模具)形状对金属变形和流动的主要影响如下。

一、控制锻件的最终形状和尺寸

模锻用的终锻模膛、气胀成形用的终成形模具等都是为了控制锻件最终的形状和尺寸。为保证锻件的形状和尺寸精度,设计模具时应注意以下两点:

- 1) 热锻时应考虑锻件和模具的热收缩;
- 2) 精密成形时还应考虑模具的弹性变形。

二、控制金属的流动方向

在本书第四章第一节已讲过,塑性变形时金属主要是向着最大主应力增大的方向流动的。在三向压应力的情况下,金属主要是向着最小阻力(增大)的方向流动。因此,工具对金属流动方向的控制就是对不同的毛坯依靠不同的工具,采取不同的加载方式,在变形体内建立不同的应力场来实现的。即通过改变变形体内的应力状态和应力顺序来得到不同的变形和流动情况。例如为获得图6-5a所示的锻件,若将毛坯放在孔板间锻挤,由于各区的应力状态和应力顺序不同(图6-7),金属有两个流动方向,一是向垫环的孔内流动;一是沿径向流入两垫环间的空隙处,因此在坯料内存在一个金属流动的分界面。当沿前一个流动方向的阻力较大、沿后一个方向流动的阻力较小时,金属便较多地向两垫环间的空隙处流动,于是锻件便不能很好成形。为得到合格锻件,将垫环改成开式锻模(图6-5c),由于模膛的侧壁阻力和桥口部分的摩擦阻力作用,使分界面的位置向外移动,因此使更多的金属流入模孔内,从而保证了锻件的成形。再如拔长、辊锻和轧制时,如采用平砧或平辊,则沿横向流动的金属量较多。如改用型砧和型辊则有利于提高延伸的效率。其原因就是工具的侧面压力使横向的主应力 σ_2 远小于轴向的主应力 σ_1 ,使更多的金属沿最大主应力(最小阻力)的增大方向(即轴向)流动。

三、控制塑性变形区

这主要是靠利用不同工具在坯料内产生不同的应力状态,使部分金属满足屈服准则,而另一部分金属不满足屈服准则,达到控制变形区的目的。例如拉拔时,利用工具的作用,在变形区形成异号应力状态(图6-1),使此处优先于杆部(单向拉伸应力状态)满足屈服准则而变形。又例如缩口时,利用工具的作用,在变形区沿切向造成很大的压应力(图6-2),使此处先于其它部分满足屈服准则而变形。

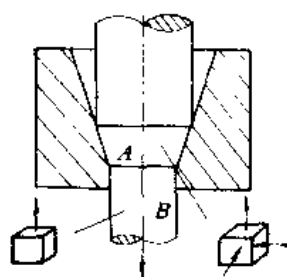


图6-1 拉拔时的主应力简图
A—变形区 B—传力区

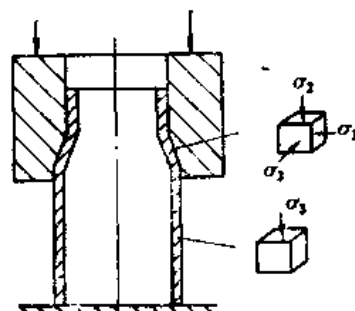


图6-2 缩口时的主应力简图

四、提高金属的塑性

金属的塑性与应力状态有很大关系，静水压力愈大，材料的塑性愈高。而各种应力状态是通过相应的工具在坯料中建立的。例如拉拔时变形区为两向压应力一向拉应力状态，传力区是单向拉应力状态，材料的塑性较低，而挤压时变形区是三向压应力状态，材料塑性较高；又如扩孔时，用冲头扩孔或楔扩孔，由于切向受拉应力，材料塑性较低，而在芯轴上扩孔或辗压扩孔时，则具有较高的塑性。

五、控制坯料失稳提高成形极限

长杆料顶锻时容易产生失稳而弯曲，并可能发展成折迭。为控制顶锻时失稳，要求模孔直径 D 小于1.25倍坯料直径 d_0 (即 $D < 1.25d_0$)，这样，则可依靠模壁限制弯曲的发展，避免折迭的产生。又如弯曲管坯时，变形区较易失稳，先变成椭圆形，随后在内侧产生折皱，但如用适当形状的模具 (图6-3) 或芯轴 (图6-4)，让管坯从其内 (或其外) 强制通过，则变形区的失稳将受到模具 (或芯轴) 的限制，从而获得理想的制品。

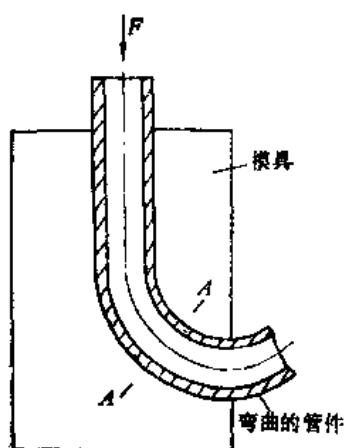


图6-3 在模具内弯曲管坯示意图

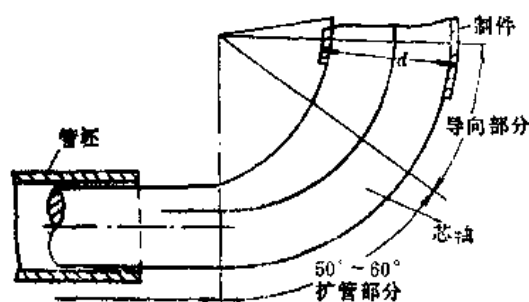
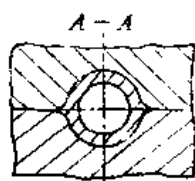


图6-4 锥形芯轴扩管弯曲法所用的芯轴

第二节 开式模锻

为获得图6-5a所示的锻件，将坯料放在孔板间进行锻挤 (图6-5b)，使金属挤入孔内。

坯料内各处的金属由于具体的受力情况不同分别向两个方向流动,即沿径向流入两垫环间的空隙处和沿轴向流入垫环的孔内。在坯料内每一瞬间都有一个流动的分界面,分界面的位置取决于沿两个方向流动的阻力大小。因此,为使较多的金属流入孔内获得要求的锻件,必须创造条件增加沿径向外流的阻力,但是这样做不仅浪费了大量金属,还增加了切削加工量,于是人们在实践中改进了工具,将孔板改为模具(图6-5c)。这样,除了垂直方向的模壁引

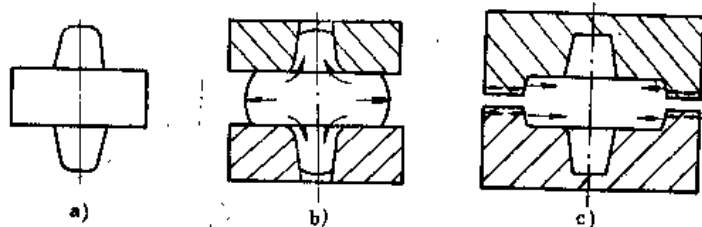


图6-5 孔板间锻粗和开式模锻

起的阻力外,由于飞边部分减薄了,阻力也增大。径向阻力的增大,保证了金属流入孔内,充满模膛,最后多余的金属由飞边处流出,这即是开式模锻。开式模锻时,金属变形流动的过程见图6-6,由图中可看出模锻变形过程可以分为三个阶段:第Ⅰ阶段是由开始模压到金属与模具侧壁接触为止;第Ⅰ阶段结束到金属充满模膛为止是第Ⅱ阶段;金属充满模膛后,多余金属由桥口流出,此为第Ⅲ阶段。下面先分析各阶段的应力应变和金属变形流动的特点,然后再讨论各因素对金属充填模膛的影响。

一、开式模锻各阶段的应力应变分析

1. 第Ⅰ阶段

如前所示,第Ⅰ阶段是由开始模压到金属与模具侧壁接触为止,这阶段犹如孔板间锻粗(在没有孔腔时犹如自由锻粗)。为使问题简化,假设模孔无斜度(图6-7)。第Ⅰ阶段属于局部加载,整体受力,整体变形。变形金属可分为A、B两区。A区为直接受力区,B区的受

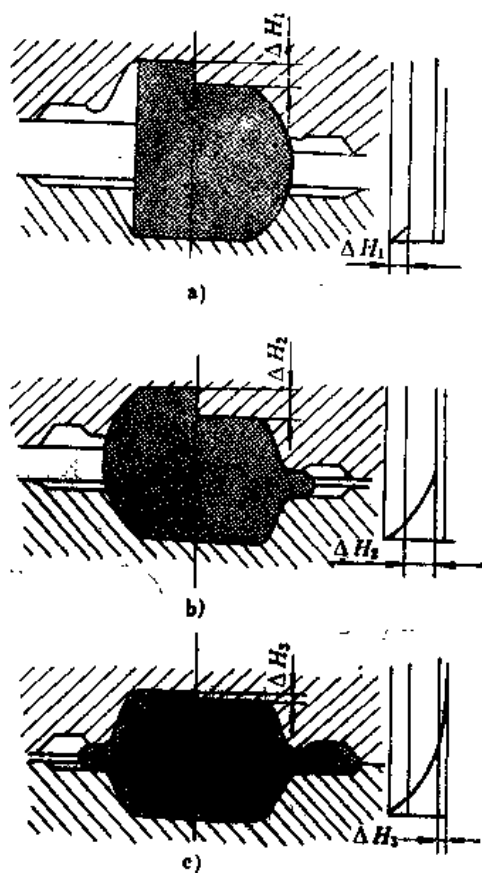


图6-6 开式模锻时金属流动过程的三个阶段

力主要是由A区的变形引起的。A区的受力情况犹如环形件锻粗,故又可分为内外两区,即A内和A外,其间有一个流动分界面。应当指出,这时由于B区金属的存在使A内区金属向内流动的阻力增大,故与单纯的环形件锻粗相比流动分界面的位置要向内移。B区内金属的变形犹如在圆形砧内拔长。各区的应力应变情况如图6-7所示。

各区金属主要沿最大主应力的增大方向流动(如图中箭头所示),即A内区和B区的金属向内流动,流入模孔内;A外区的金属向外流动。在坯料内每一瞬间都有一个流动的分界面,分界面的位置取决于两个方向金属流动的阻力大小。

2. 第Ⅰ阶段

第Ⅰ阶段，金属也有两个流动方向，金属一方面充填模膛，一方面由桥口处流出形成飞边，并逐渐减薄。这时由于模壁阻力，特别是飞边桥口部分的阻力（当阻力足够大时）作用，迫使金属充满模膛。由于这一阶段金属向两个方向流动的阻力都很大，处于明显的三向压应力状态，变形抗力迅速增大。

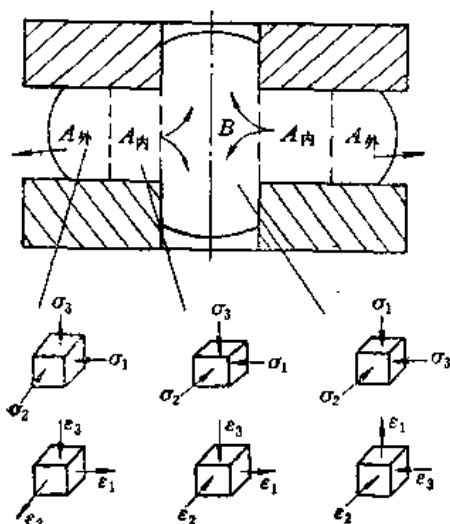


图6-7 孔板间墩粗时各变形区的应力应变简图

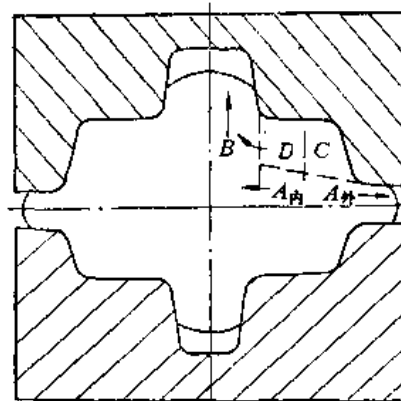


图6-8 开式模锻时各变形区的应力应变简图

根据对第Ⅰ阶段变形试验结果的应力应变分析，这一阶段凹圆角充满后变形金属可分为五个区（图6-8）。A区内金属的变形件犹如一般环形件墩粗，A外为外区，A内为内区。B区内金属的变形犹如在圆型砧内摔圆。C区为弹性变形区，D区内金属的变形犹如外径受限制的环形件墩粗。各区的应力应变简图和金属流动方向如图6-8所示。图6-9是变形过程中某一微量压缩前后的网格变化情况。

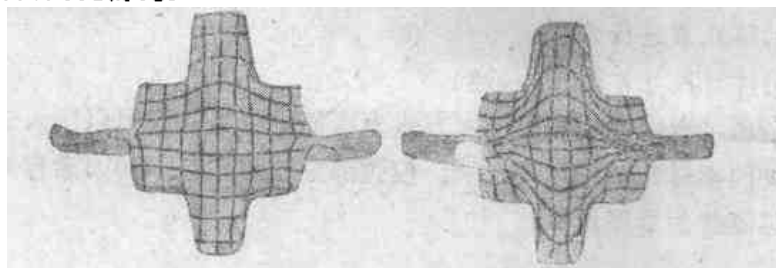


图6-9 模锻第Ⅱ阶段子午面的网格变化

应当指出，在凹圆角未充满前，金属的变形和分区情况还要更复杂一些，这里不作介绍。

3. 第Ⅱ阶段

第Ⅱ阶段主要是将多余金属排入飞边。此时流动分界面已不存在，变形仅发生在分模面

附近的一个区域内（图6-10），其它部位则处于弹性状态。变形区的应力应变状态与薄件镦粗一样，如图6-11所示。

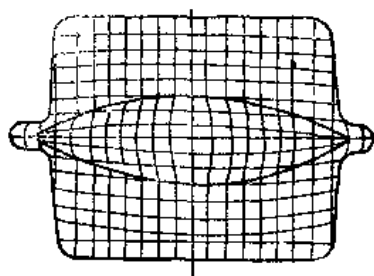


图6-10 模锻第Ⅲ阶段子午面的网格变化

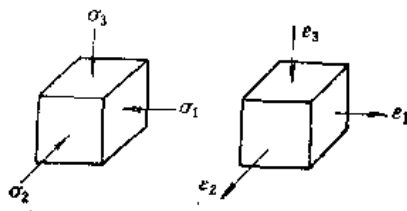


图6-11 模锻第Ⅲ阶段变形区的应力应变简图

此阶段由于飞边厚度进一步减薄和冷却等关系，多余金属由桥口流出时的阻力很大，使变形抗力急剧增大。

第Ⅲ阶段是锻件成形的关键阶段，第Ⅲ阶段是模锻变形力最大的阶段，从减小模锻所需的能量来看，希望第Ⅲ阶段尽可能短些。因此研究锻件的成形问题，主要研究第Ⅲ阶段，而计算变形力时，则应按第Ⅲ阶段。

二、开式模锻时影响金属成型的主要因素

从开式模锻变形金属流动过程的分析中可以看出，变形金属的具体流动情况主要取决于各流动方向上阻力间的关系，此外，载荷性质（即设备工作速度）等也有一定影响。开式模锻时影响金属变形流动的主要因素有：

- 1) 模膛（模锻件）的具体尺寸和形状。
- 2) 飞边槽桥口部分的尺寸和飞边槽的位置。
- 3) 终锻前坯料的具体形状和尺寸。
- 4) 坯料本身性质的不均匀情况，主要指由于温度不均引起的各部分金属流动极限 σ_s 的不均匀情况。
- 5) 设备工作速度。

本节主要结合1)、2)、5)等三个方面的因素进行具体分析，关于坯料尺寸形状对金属流动的影响将在本书第八章进行分析。

1. 模膛（模锻件）尺寸和形状的影响

一般地说，金属以镦粗方式比以压入方式充填模膛容易。这里以压入成形为例，首先分析锻件本身的各种因素对充填模膛的影响。模膛部分的阻力与下列因素有关：

- 1) 变形金属与模壁的摩擦系数；
- 2) 模壁斜度；
- 3) 孔口圆角半径；
- 4) 模膛的宽度与深度；
- 5) 模具温度。

孔壁加工的表面粗糙度低和润滑较好时，摩擦阻力小，有利于金属充满模膛。

模膛制成一定的斜度是为了模锻后锻件易于从模膛内取出，但是模壁斜度对金属充填模

膛是不利的。因为金属充填模膛的过程实质上是一个变截面的挤压过程, 金属处于三向压应力状态 (图6-12)。为了使充填过程得以进行, 必须使 $|\sigma_3| \geq \sigma_f$ (在上端面 $\sigma_1 = 0$, $\sigma_3 = \sigma_f$)。为保证获得一定大小的 σ_3 , 当模壁斜度愈大时所需的压挤力 F 也愈大。在不考虑摩擦的条件下, 所需的压挤力 F 与 $\tan \alpha$ 成正比, 即 $F \propto \sigma_3 \tan \alpha$ 。但如果考虑摩擦的影响, 尤其当摩擦阻力较大 ($= \tau_f$) 时, 所需压挤力的大小或充填的难易程度就不与 $\tan \alpha$ 成正比关系了, 因为摩擦力在垂直方向的分力 $\tau \cos \alpha$ 随 α 角增大而减小 (图6-13)。

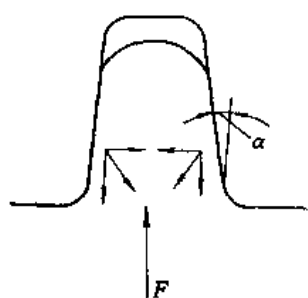


图6-12 模壁斜度对金属充填模膛的影响

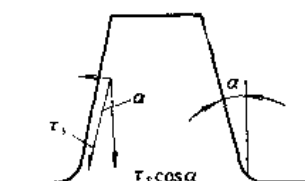


图6-13 摩擦力对金属充填模膛的影响

模具孔口的圆角半径对金属流动的影响很大, 当 R 很小时, 在孔口处金属质点要拐一个很大的角度再流入孔内, 需消耗较多的能量, 故不易充满模膛, 而且 R 很小时, 对某些件还可能产生折迭 (见第七章图7-18) 和切断金属纤维 (见第七章图7-19)。同时模具此处温度升高较快, 模锻时容易被压塌, 结果使锻件卡在模膛内取不出来, 当然孔口处 R 太大要增加金属消耗和机械加工量。总的看来, 从保证锻件质量出发, 孔口的圆角半径应适当地大一些。

模膛愈窄时, 在其它条件相同的情况下, 金属向孔内流动时的阻力将愈大, 孔内金属温度的降低也愈严重, 故充满模膛愈困难。模膛愈深时, 在其它条件相同的情况下, 充满也愈困难。

模具温度较低时, 金属流入孔部后, 温度很快降低, 变形抗力增大, 使充填模膛困难, 尤其当孔口窄 (小) 时更为严重。在锤和水压机上模锻铝合金、高温合金锻件时, 模具一般均预热到 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 。但是, 模具温度过高也是不适宜的, 它会降低模具的寿命。

2. 飞边槽的影响

常见的飞边槽型式如图6-14所示。它包括桥口和仓部。桥口的主要作用是阻止金属外流, 迫使金属充满模膛。另外, 使飞边厚度减薄, 以便于切除。仓部的作用是用以容纳多余的金属, 以免金属流到分模面上, 影响上下模打靠。

设计飞边槽, 最主要的是确定桥口的高度和宽度。桥口阻止金属外流的作用主要是由于沿上下接触面摩擦阻力作用的结果, 这一摩擦阻力的大小为 $2b\tau$, (设摩擦力达最大值, 等于 τ_f , 见图6-15)。由该摩擦力在桥口处引起的径向压应力 (或称桥口阻力) 为 $\sigma_1 = \frac{2b\tau_f}{h_{\text{飞}}} =$

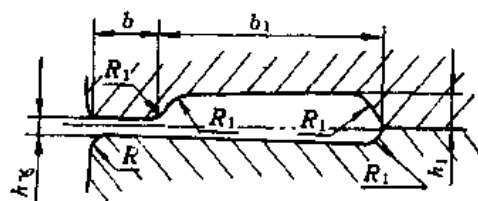


图6-14 飞边槽

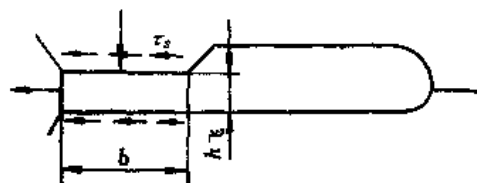


图6-15 飞边槽桥口处的摩擦阻力

$\frac{b}{h-k}$ σ_{τ} 。即桥口阻力的大小与 b 和 $h-k$ 有关。桥口愈宽，高度愈小，亦即 $b/h-k$ 愈大时，阻力也愈大。

从保证金属充满模膛出发，希望桥口阻力大一些，但是若过大，变形抗力将会很大，可能造成上下模不能打靠等。因此阻力的大小应取得适当，应当根据模膛充满的难易程度来确定，当模膛较易充满时， $b/h-k$ 取小一些，反之取大一些。例如对锻粗成形的锻件（图6-16a），因金属容易充满模膛， $b/h-k$ 应取小一些；对压入成形的锻件（图6-16b），金属较难充满模膛， $b/h-k$ 应取大一些。

桥口部分的阻力除了与 $b/h-k$ 有关外，还与飞边部分的变形金属的温度有关，变形过程中，如果此处金属的温度降低很快，则此处金属的变形抗力较锻件本体部分的高，从而使桥口处的阻力增大，例如胎模锻造时（指合模），由于飞边同时与上下模长时间接触，冷却特别快，飞边部分金属变形抗力急剧增加使桥口部分的阻力很大，锻件很难继续变形，上、下模不能打靠，必须将飞边切除，重新加热后再锻。因此胎模锻造时，桥口部分的 $b/h-k$ 值应比锤上模锻时小，约为相同吨位模锻锤的 $b/h-k$ 值的1/2左右。

螺旋压力机上模锻时，由于每分钟的行程次数少，锻件与锻模接触的时间亦较长，飞边部分金属冷却的亦较快，因此螺旋压力机上模锻时桥口部分的 $b/h-k$ 值亦较锤上模锻时小一些，但是比胎模锻时大。

高速锻的情况与胎模锻和螺旋压力机上模锻时相反，由于它的变形速度快，变形时间极短，一次打击成形，以及由于径向惯性力的作用和飞边温度降低较少，飞边桥口处的阻力较小，有较多的金属流出，造成模膛不易充满。因此，高速锻时，桥口的高度应比锤上模锻时小。对较难充满的锻件还必须采取其它措施，例如采用无飞边或小飞边模锻。

在具体设计时，仅考虑 b 与 $h-k$ 的相对比值是不够的，还应考虑 b 与 $h-k$ 的绝对值，在实际生产中 b 取得太小是不合适的，太小了容易被打塌，或很快被磨损掉，具体数据可参考有关资料。

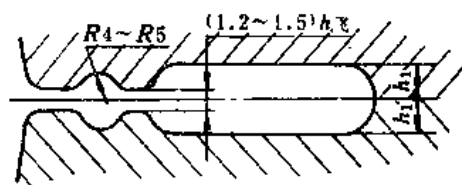


图6-17 桥口有制动槽的飞边槽

制动槽。

下面就飞边槽发展的过程作简要介绍。

对图6-14型式的一般飞边槽，即使选用了适当的 b 和 $h-k$ ，模锻时流入飞边部分的金属还

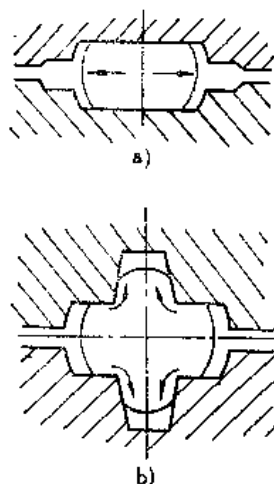


图6-16 金属充满模膛的型式
a) 锻粗成形 b) 压入成形

同一锻件的不同部分充满的难易程度也不一样，有时可以在锻件上较难充满的部分加大桥口阻力，即增大 b 或减小 $h-k$ 。从模具制造方便出发，生产中常常是加大此处的桥口宽度。此外，对锻件上难充满的地方，还常常在桥口部分加一个制动槽，即图6-17的型式，例如模锻带有叉形部分的锻件时，在叉形部分常使用

是很多的,一般占锻件重量的20%~30%,造成了大量的金属浪费。这是由于模锻过程中桥口高度 h_f 是随着锤头下行逐步减小的。模锻初期,由于 h_f 较大,产生的阻力小,而毛坯在高度中间处变形最大,因此,大量金属流入飞边槽,直到最后阶段 h_f 较小时,才能建立足够大的阻力。

为此要减小飞边部分金属的消耗,应当从模锻初期就建立足够大的阻力。因而,人们改变了分模面的位置,将飞边设置在变形较困难的毛坯端部(图6-18)。模锻初期,中间部分金属的变形流动就受到了侧壁的限制,迫使金属充满模膛,因此大大减少了飞边金属的消耗。这种飞边槽的模锻,在生产上叫作小飞边模锻。

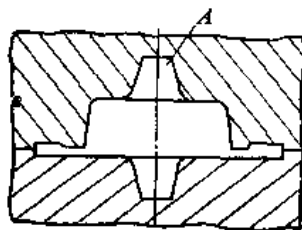


图6-18 小飞边模锻

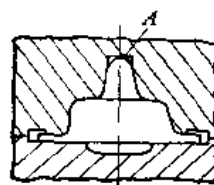


图6-19 小飞边模锻A处未充满情况

采用小飞边模锻时,因为分模面的位置要靠近一端,因此,锻件的形状也要有一些改变,这对于某些锻件(例如连杆等)是不允许的。另外,对某些形状的锻件,在模锻最后阶段,变形区集中在分模面附近,远离分模面的部分A常不易充满,如图6-19所示。因此,小飞边在锤上应用受到一定限制。但在平锻机上,由于具体情况与锤不同,小飞边应用较广。在螺旋压力机上有用于模锻一些圆形锻件。

50年代,人们设计了一种楔形飞边槽(图6-20)它主要依靠桥口斜面产生的水平分力阻止金属外流。

楔形飞边槽从模锻初期就产生了足够大的阻力。与第一种飞边槽相比,这种飞边槽可使飞边部分金属消耗减少一倍,模具寿命提高1.55~3.5倍。但是,由于这种飞边在与锻件联结处要较厚些,切边较困难,故这种飞边槽在实际应用中受到一定限制,一般用于圆形锻件。

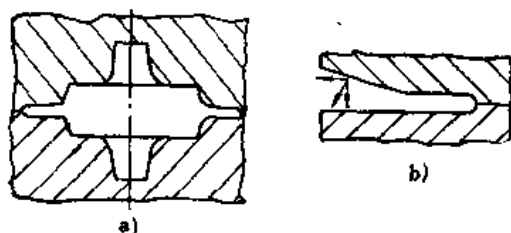


图6-20 楔形飞边槽

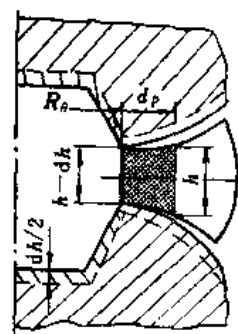


图6-21 扩张型飞边槽

实际生产中,有些锻件形状简单,比较容易充满成形,但由于某些原因变形力较大,常易产生模锻不足(欠压),模具也易磨损。为减小变形力,消除模锻不足等缺陷,近来,人们设计了如图6-21所示的扩张型飞边槽[56]。这种飞边槽的特点是:在模锻的第一和第二阶段,桥口部分对金属外流有一定的阻碍作用(但比前几种飞边槽的作用小),而最后阶段,对多余金属的外流则没有任何阻碍作用,因而可以较大程度地减小变形力,使上下模压靠。要保证扩张型飞边槽这一作用的实现,关键是桥口部分设计合适的斜度,它应该根据锻件和

坯料的形状、尺寸以及模锻过程中的变形情况来确定。扩张型飞边槽目前主要用于某些回转类锻件。

还应该提到的是在小飞边出现之前,为减少飞边部分金属的消耗,人们曾采用了无飞边模锻,其模壁结构如图6-22所示。其特点是凸凹模间间隙的方向与模具运动的方向相平行,在模锻过程中间隙的大小不变。由于间隙很小,金属流入间隙的阻力一开始就很大,这有利于金属充满模膛,适用于精密模锻。

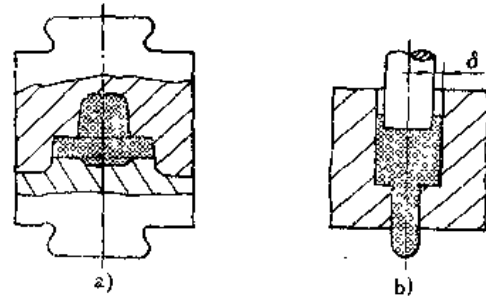


图6-22 无飞边模锻

在正常工作情况下,采用无飞边模锻,一般不产生飞边,故可以节约金属和节省切边设备。但在实际生产中,当毛坯体积不准确时,常常产生纵向毛刺或充不满。操作时毛坯放偏了,将造成一边有纵向毛刺,一边充不满。另外,由于无飞边模锻时处于很高的三向压应力状态,变形抗力很大,模具容易损坏。由于这些原因,使它的应用受到一定限制,例如在锤上模锻时很少采用,而很快被小飞边所代替。小飞边继承了无飞边利用侧壁的一面,又继承了第一种飞边槽可以容纳多余金属的一面,因而得到了一定的应用。在平锻机上模锻时,由于毛坯体积可以得到较准确地控制,毛坯定位也较准确等,所以无飞边和小飞边得到了广泛的应用。

总之,现有的各种型式的飞边槽各有优缺点以及合适的应用范围。因此,设计时应根据具体情况正确选用。例如,有人认为在预锻时采用楔形飞边槽,终锻时采用一般飞边槽,这样既充分利用了楔形飞边槽的优点,同时又避免了它的缺点。

飞边槽的结构尚需进一步完善,可以肯定,为满足生产发展的需要,将来还要出现其它型式的飞边槽。

3. 设备工作速度的影响

一般地说,设备工作速度高时,金属变形流动的速度也快,这将使摩擦系数有所降低,金属流动的惯性和变形热效应的作用也显得突出了,正确地利用这些因素的作用,有助于金属充填模膛,得到外形复杂、尺寸精确的锻件。

在高速锤上模锻时,由于变形金属具有很高的流动速度,所以在工具停止运动时,变形金属仍可以依靠流动惯性继续充填模膛。例如,根据目前实践的情况,在高速锤上模锻时,可以锻出厚度为1.0~1.5mm的薄肋;在模锻锤上一般是1.5~2mm;而压力机上一般则是2~4mm,详见表6-1。

表6-7 设备工作速度对金属充填模膛的影响 (mm)

锻件特征尺寸	锻 压 设 备 类 型		
	高 速 锤	模锻锤、螺旋压力机	曲柄压力机
最小壁厚	1.5	2.0	3.0~4.0
最小肋厚	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~4.0
最小幅板厚	1.0	1.5~2.0	2.0~3.0
最小圆角半径	0~1.0	2.0~3.0	3.0~5.0

第三节 闭式模锻

闭式模锻亦称无飞边模锻。关于闭式模锻，上节中已有部分介绍。其优点是：①减少飞边材料损耗（飞边金属约为锻件重量的10%~50%，平均约为30%）；②节省切边设备；③有利于金属充满模膛，有利于进行精密模锻；④闭式模锻时金属处于明显的三向压应力状态，有利于低塑性材料的成形等。闭式模锻能够正常进行的必要条件主要是：①坯料体积准确；②坯料形状合理并能在模膛内准确定位；③能够较准确地控制打击能量或模压力；④有简便的取件措施或顶料机构。由于以上条件，使闭式模锻在模锻锤和锻压机上的应用受到一定限制。

闭式模锻较适用于轴对称变形或近似轴对称变形的锻件，目前应用最多的是短轴线类的回转体锻件。

一、闭式模锻的变形过程分析

闭式模锻的变形过程如图6-23所示，可以分为三个变形阶段：①第Ⅰ阶段是基本成形阶段；②第Ⅱ阶段是充满阶段；③第Ⅲ阶段是形成纵向飞边阶段。各阶段模压力的变化情况如图6-24所示。

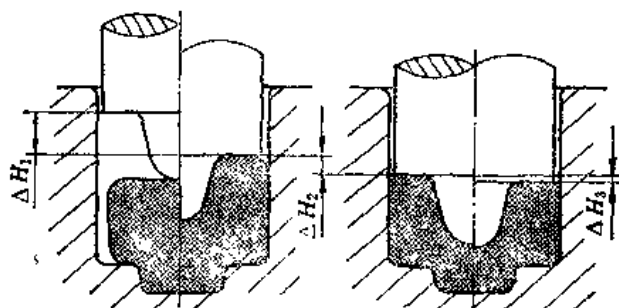


图6-23 闭式模锻变形过程简图

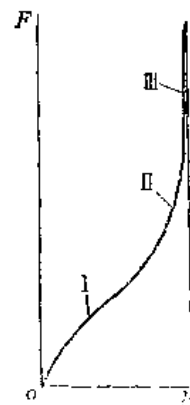


图6-24 闭式模锻各阶段模压力的变化情况

为避免与其它章节重复，这里仅介绍各阶段的变形特点，不进行应力应变分析。

1. 第Ⅰ阶段——基本成形阶段

第Ⅰ阶段由开始变形至金属基本充满模膛，此阶段变形力的增加相对较慢，而继续变形时变形力将急剧增加。

根据锻件和坯料的不同情况，金属在此阶段的变形流动可能是镦粗成形、压入成形、冲孔成形或者是挤压成形；可以是整体变形或者是局部变形。

挤压成形又分为正挤压、反挤压和径向挤压，将在下一节中分析。闭式模锻与挤压工艺的差别，只是在于前者最终充满整个模膛，而后者金属挤出端是处于无约束的自由状态。

2. 第Ⅱ阶段——充满阶段

第Ⅱ阶段是由第Ⅰ阶段结束到金属完全充满模膛为止。此阶段结束时的变形力比第Ⅰ阶段末可增大2~3倍，但变形量 ΔH_2 却很小。

无论在第Ⅰ阶段以什么方式成形，在第Ⅱ阶段的变形情况都是类似的，此阶段开始时，坯料端部的锥形区和坯料中心区都处于三向等（或接近等）压应力状态（图6-25），不发生

塑性变形。坯料的变形区位于未充满处附近的两个刚性区之间（图中阴影处），并且随着变形过程的进行逐渐缩小，最后消失。

此阶段作用于上模和模膛侧壁的正应力 σ_z 和 σ_R 的分布情况如图6-25所示。模压力 F 和模膛侧壁作用力 F_Q 分别为：

$$F = 2 \int_0^R \pi R \sigma_z dR \quad (6-1)$$

式中 R ——锻件的半径(mm)。

$$F_Q = \int_0^H D \sigma_R dH \quad (6-2)$$

式中 H ——锻件的高度(mm)。

锻件的高径比 H/D 对 F_Q/F 的影响如图6-26所示。

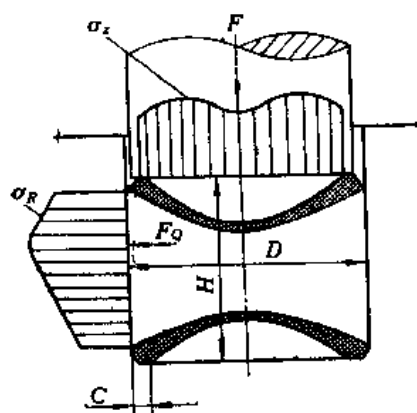


图6-25 充满阶段变形特点示意图

第Ⅲ阶段——形成纵向飞边阶段

此时坯料基本上已成为不变形的刚性体，只有在极大的模压力作用下，或在足够的打击能量作用下，才能使端部的金属产生变形流动，形成纵向飞边。飞边的厚度越薄、高度越大，模膛侧壁的压应力 σ_R 也越大。例如在模锻锤上闭式模锻如图6-27所示的低碳钢锻件，当飞边为 $0.3\text{mm} \times 6.3\text{mm}$ 时， $\sigma_{R\max}$ 可达 1300MPa ；若飞边增大到 $0.3\text{mm} \times 35 \sim 45\text{mm}$ ， $\sigma_{R\max}$ 可达 $2000 \sim 2500\text{MPa}$ ，这样大的 σ_R 将使模膛迅速损坏。

这个阶段的变形对闭式模锻有害无益，是不希望出现的。它不仅影响模具寿命，而且容易产生过大的纵向飞边，清除比较困难。

由上述分析可以看出：

1) 闭式模锻变形过程宜在第Ⅱ阶段未结束，即在形成纵向飞边之前结束，应该允许在分模面处有少量充不满或仅形成很矮的纵向飞边。

2) 模壁的受力情况与锻件的 H/D 有关， H/D 越小，模壁受力状况越好。

3) 坯料体积的精确性对锻件尺寸和是否出现纵向飞边有重要影响，该问题将在下一段中讨论。

4) 打击能量或模压力是否合适对闭式模锻的成形情况有重要影响。

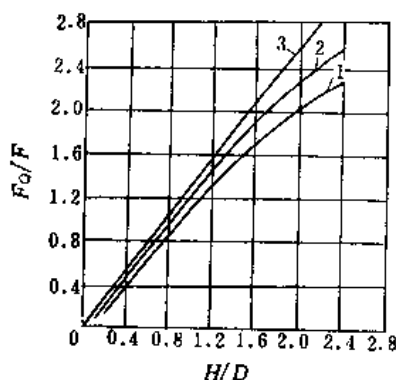


图6-26 锻件高径比 (H/D) 对 F_Q/F 的影响

1— $C/D = \frac{1}{20}$ 2— $C/D = \frac{1}{100}$ 3— $C/D = \frac{1}{200}$

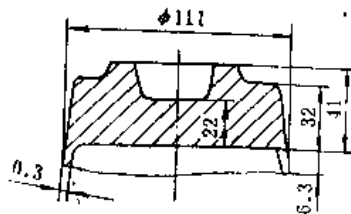


图6-27 带纵向飞边的闭式模锻件

5) 坯料形状和尺寸比例是否合适, 在模膛中定位是否正确对金属分布的均匀性有重要影响。坯料形状不合适和定位不正确, 将可能使锻件一边已产生飞边而另一边尚未充满 (图6-28)。生产中, 整体都变形的坯料一般以外形定位, 而仅局部变形的坯料则以不变形部位定位。为防止模锻过程中产生纵向弯曲引起的“偏心”流动, 对局部镦粗成形的坯料, 应使变形部分的高径比 $\frac{H_0}{D_0} \leq 1.4$; 对冲孔成形的坯料, 一般使 $\frac{H_0}{D_0} \leq 0.9 \sim 1.1$ 。

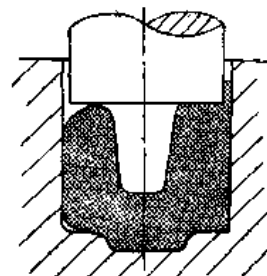
二、坯料体积和模膛体积变化对锻件尺寸的影响

闭式模锻时坯料体积和模膛体积的变化主要反映在锻件的高度尺寸上, 锻件高度尺寸偏差值 ΔH 与坯料体积和模膛体积偏差值 ΔV 的关系如下:

$$\Delta H = \frac{4\Delta V}{\pi D^2} \quad (6-3)$$

式中 D ——锻件最大外径。

图6-28 闭式模锻时金属分布不均的情况



由上式可以看出, 锻件的最大外径对高度偏差值有很大影响。影响 ΔV 值的因素有两方面: 一方面是影响坯料实际体积的因素, 其中主要是坯料直径和下料长度的公差、还有烧损量的变化、实际锻造温度的变化等; 另一方面是影响模膛实际体积的因素, 其中主要是模膛的磨损、还有压机因工作载荷变化引起的弹性变形量的变化、锻模温度的变化等。这些因素对 ΔV 值的影响, 在具体的生产条件下, 都是可以计算或按统计数值估算的。

对于液压机和锤类设备, 在正确操作的条件下, ΔH 可以只表现为锻件高度尺寸的变化, 但对于行程一定的机械压机类设备, ΔH 则表现为模膛充满程度或产生飞边, 当飞边过大时将造成设备超载 (锻压机闷车和平锻机夹紧滑块保险机构松脱)。

为了保证锻件高度尺寸公差 (或限制 ΔH 的允许值), 可以在考虑其它因素影响的条件, 确定坯料允许的重量公差。

三、打击能量和模压力对成形质量的影响

打击能量和模压力对成形质量的影响如表6-2所示。

由该表可以看出:

1) 在不加限程装置的情况下, 打击能量 (或模压力) 合适时, 成形良好, 而过大时则产生飞边; 过小时则充不满。

2) 闭式模锻时, 对体积准确的坯料, 增加限程装置, 可以改善因打击能量 (或模压力) 过大而产生飞边的情况, 以获得成形良好的锻件。

3) 对机械压力机, 由于行程一定, 模压力大小和成形情况取决于坯料体积的大小。

应当指出, 闭式模锻时采取有效措施 (见第十章第六节) 吸收剩余打击能量和容纳多余金属是保证成形质量、改善模具受力情况、提高模具寿命的重要途径。

四、各类锻压设备闭式模锻的特点

1. 液压机

液压机闭式模锻一般不产生飞边, 在合理选用设备吨位的条件下, 可以靠控制压力大小使变形过程在产生飞边之前结束。

2. 平锻机

平锻机上闭式模锻, 由于采用较高精度的冷拉棒料, 坯料长度可以准确调节, 靠坯料的

表6-2 打击能量和模压力对成形质量的影响

载荷情况	载荷大小	坯料体积大小	成形情况	
			不加限程装置	加限程装置
冲击性载荷	打击能量合适	大	成形良好, 但锻件偏高	
		小	成形良好, 但锻件偏低	充 不 满
		正 好	成形良好, 锻件高度合乎要求	
	打击能量过小	大	充 不 满	
		小		
		正 好		
	打击能量过大	大	产 生 飞 刺	产生飞刺
		小		充 不 满
		正 好		成形良好
可控制的静载荷 (如液压机)	模压力合适	大	成形良好, 但锻件偏高	
		小	成形良好, 但锻件偏低	充 不 满
		正 好	成形良好, 且高度合乎要求	
	模压力过小	大	充 不 满	
		小		
		正 好		
	模压力过大	大	产 生 飞 刺	产生飞刺
		小		充 不 满
		正 好		成形良好
不可控制的静载荷 (如油缸压力机, 力的大小取决于料的大小)	模压力适合	正 好	成形良好, 且高度合乎要求	
	模压力过小	小	充 不 满	
	模压力过大	大	产 生 飞 刺	

不变形部分定位, 以及行程一定等, 保证了较小的 ΔV 值, 因而可以不产生或只产生很小的飞边。若因意外情况产生很大的飞边时, 由于侧向力急剧增大, 夹紧滑块保险机构使凹模张开, 自行卸载, 而且当工作载荷消除后, 保险机构自行恢复, 又可立即工作。另外, 凹模是分开式, 便于取件, 这些条件保证了平锻机上闭式模锻工艺的稳定性。

3. 锻压机

锻压机虽具有和平锻机类似的工作特性, 但不具有保证闭式模锻工艺稳定性的条件, 超载“闷车”也不能自行卸载和自行恢复。因此, 只在具有保证工艺稳定性的条件下, 才能采用闭式模锻。例如图6-29为锻压机闭式模锻齿轮的工步图。其特点是靠锻件内孔的飞边槽起调节 ΔV 的作用, 保证锻件高度尺寸和不产生纵向飞边。

4. 模锻锤

模锻锤上闭式模锻在生产中存在的主要问题是锻模寿命低, 常产生较大的纵向飞边和锻件不易脱模等。产生纵向毛边和锻模寿命低的重要原因之一是模锻锤的打击强度大和打击能

量不易准确控制,因而常常有较大的剩余能量。打击强度是指锻件平面图单位面积上打击一次的打击能量。

5. 螺旋压力机

螺旋压力机由于其系统刚度的限制,最大打击力(即冷击力)有一定的限度, $F_{\max} = (2 \sim 2.7) F_{\text{公称}}$ ($F_{\text{公称}}$ 为螺旋压力机公称压力)。因此,对产生纵向飞边也有一定的限制作用。

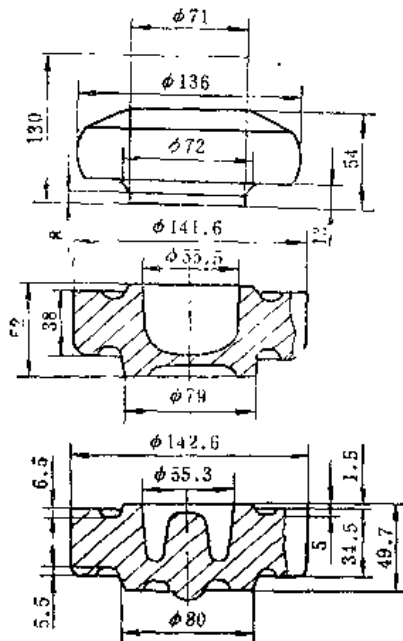


图6-29 锻压机闭式模锻齿轮工步简图

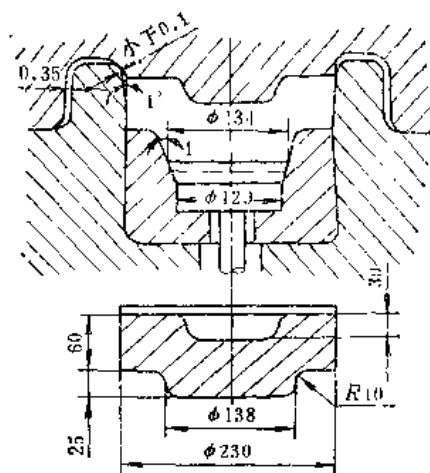


图6-30 螺旋压力机上带有双向导锁的闭式锻模

图6-30所示为一种螺旋压力机闭式模锻的锻模结构,其特点是采用了双向导锁,使锻模模腔在变形力增大时可以有较大的弹性变形,从而可以靠少量改变锻件外径尺寸调节 ΔV 值,同时靠锻模承压面吸收剩余能量和保证锻件最小高度尺寸。

螺旋压力机的顶出机构有助于锻件出模。

6. 高速锤

高速锤的打击能量可以比较准确地控制,也有顶出机构,这都有利于在该设备上进行闭式模锻。从高速成形时金属的流动特点看,也宜采用闭式模锻(见第二节)。

高速锤上闭式模锻的主要问题是模具寿命低,解决这一问题的关键是严格控制打击能量和坯料体积,以及解决剩余能量的吸收问题。

7. 自由锻锤

在自由锻锤上进行胎模锻时的打击强度远小于模锻锤,因此,打击能量较易控制,而且模具的弹性变形可以吸收一部分剩余能量,取件也比较方便,因此,闭式模锻在胎模锻生产中应用较多。

综合以上分析可以看出,闭式模锻除了在模锻锤和锻压机上应用受到一定限制外,在液压机、平锻机、螺旋压力机、高速锤和胎模锻生产中都是可行的,而且事实上,它目前已是平锻机、胎模锻和螺旋压力机生产短轴线类锻件的主要模锻方法。

第四节 挤 压

挤压是金属在三个方向的不均匀压应力作用下,从模孔中挤出或流入模膛内以获得所需尺寸、形状的制品或零件的锻造工序。目前不仅冶金厂利用挤压方法生产复杂截面型材,机械制造厂也常常利用挤压方法生产各种锻件和零件。

采用挤压工艺不但可以提高金属的塑性,生产复杂截面形状的制品,而且可以提高锻件的精度,改善锻件的力学性能,提高生产率和节约金属材料等。例如,发动机上的小叶片,原来用方坯铣制,采用挤压工艺后,叶身部分仅需抛光即可了。采用冷挤压工艺,效果更佳。我国目前的冷挤压零件,一般尺寸精度可达3级,表面粗糙度可达 $R_a 0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 。因此,挤压是一种先进的少屑或无屑的锻压工艺。

挤压可以在专用的挤压机上进行,也可以在水压机、曲柄压力机或摩擦压力机上进行,对于较长的制件,可以在卧式水压机上进行。近年来我国高速锤挤压工艺得到了迅速发展。

根据挤压时坯料的温度可分为热挤压、温热挤压和冷挤压。根据金属的流动方向与冲头的运动方向可分为正挤压、反挤压、复合挤压和径向挤压。国内、外近年来又出现和使用静液挤压、水电效应挤压等。

挤压时金属的变形流动对挤压件的质量有着直接的影响,本节从分析正挤压时的应力应变和变形流动入手,研究提高挤压件质量的措施。

一、挤压的应力应变分析

挤压也是局部加载、整体受力,变形金属也可分为A、B两区(图6-31)。A区是直接受力区,B区的受力主要是由A区的变形引起的。当坯料不太高时,A区的变形相当于一个外径受限制的环形件镦粗,B区的变形犹如在圆形砧内拔长。两区的应力应变简图如图6-31所示。

根据对A、B两区应力和应变情况的分析,很容易算得在A、B两区的交界处,两区的轴向应力相差 $2\sigma_s$,即此处存在轴向应力的突变。

$$\text{在 A 区: } \sigma_{\text{径}} - \sigma_{\text{轴A}} = \sigma_s$$

$$\text{在 B 区: } \sigma_{\text{轴B}} - \sigma_{\text{径}} = \sigma_s$$

将两式相加后便得:

$$\sigma_{\text{轴B}} - \sigma_{\text{轴A}} = 2\sigma_s$$

坯料较低时,该轴向应力突变的情况可以通过试验测出,见图6-31中的应力分布曲线。这种轴向应力突变的现象在闭式冲孔(反挤)、孔板间镦粗、开式模锻的第Ⅰ和第Ⅱ阶段等工序中都是存在的。

二、挤压时筒内金属的变形流动

挤压时筒内金属的变形流动是不均匀的,在平底凹模内正挤时,金属在挤压筒内的流动大致有以下三种情况:

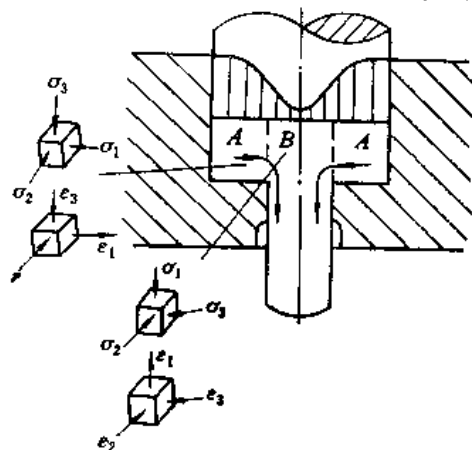


图6-31 挤压时各变形区的应力应变简图

1) 第一种情况 (图6-32a) 仅区域Ⅰ内金属有显著的塑性变形, 称为剧烈变形区, 在区域Ⅱ内变形很小, 可近似地认为金属只是被冲头推移。由图6-33a可看到区域Ⅱ内网格几乎不弯曲, 当摩擦系数较小和整个毛坯性质较均匀时可观察到这种情况。在凹模出口附近的a区内 (图6-32a), 金属变形极小, 称为死角或死区。死角区的大小受摩擦力、凹模形状等因素的影响。在第一种情况下死角区较小。

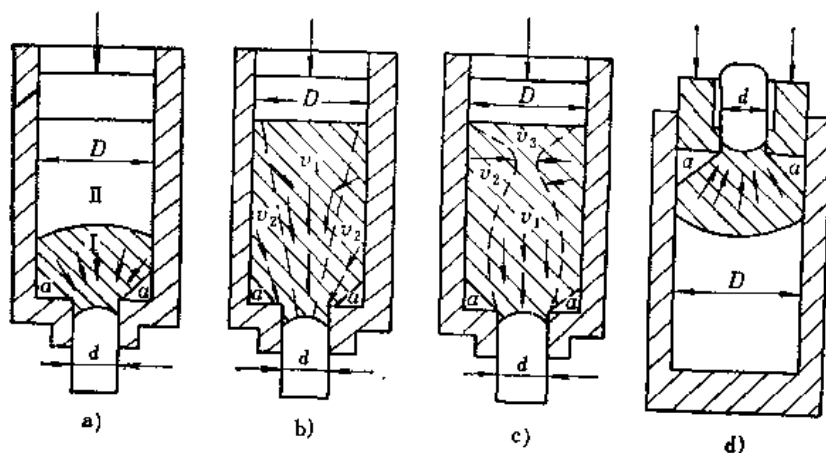


图6-32 挤压时金属在挤压筒内的流动情况

2) 第二种情况 (图6-32b) 是挤压筒内所有金属 (包括A区和B区) 都有显著的塑性变形, 并且轴心部分的金属比筒壁附近的金属流动得快 (图6-33b), 死角区较第一种情况大。

3) 第三种情况 (图6-32c) 是挤压筒内金属变形不均匀, 轴心部分金属流动得很快, 靠近筒壁部分的外层金属流动很慢, 死角区也较大。在坯料较高和摩擦系数较大时, 随着冲头向下运动, A区金属的变形往往先从上部开始, 并向轴心部分流动 (图6-33c), 而中间高度处的金属变形很小。由于这样变形和流动的结果, 从宏观组织中可以看到, 原坯料后端的外层金属经挤压后进入了零件的前端。而在一些文献中则认为坯料外层金属这种前后位置倒换的现象是由于挤压筒内金属倒流的结果。这种看法是不符合实际情况的。

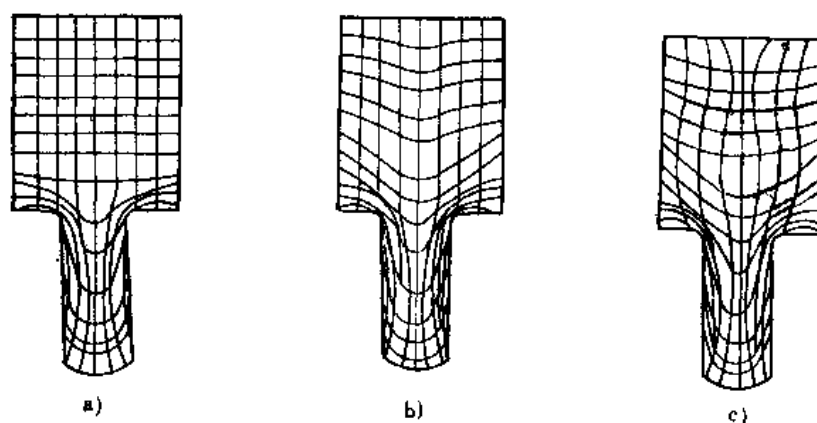


图6-33 挤压时纵向剖面网格变化图

上述三种情况的出现主要取决于A区的受力和变形情况。在A区内沿着高度方向最小主应力 (轴向应力) σ_z 的数值变化受三方面因素的影响。

1) 环形受力面积与挤压筒横截面积的比值 (这与挤压比有关, 挤压比愈小这个比值愈小)。

2) 摩擦系数大小 (这取决于润滑情况好坏)。

3) 在筒内的坯料高度。

如不考虑摩擦的影响, 且坯料较高时, 在凹模口处由于环形受力面积小, $|\sigma_s|$ 较大; 在远离凹模口处由于受力面积大, $|\sigma_s|$ 较小。挤压比愈小时, 两处 $|\sigma_s|$ 的差值愈大。当坯料较低时由于沿高度上的差值较小, 可以认为 σ_s 是均匀的。

在考虑摩擦的影响时, 凹模筒壁对坯料的摩擦阻力抵消了一部分主作用力, 这就与前一种因素的影响相反, 它使凹模口处 A 区的 $|\sigma_s|$ 减小。摩擦系数愈大和坯料愈高时, 这种影响愈显著。

由于上述因素对 A 区内沿高度方向 σ_s 数值的不同影响, 在各种不同的具体条件下, 会出现不同的变形和流动情况。现讨论如下:

1) 当坯料很高 (h 很大) 但摩擦系数 μ 较小时, 变形主要在孔口附近, 即产生第一种变形流动情况。这时在孔口附近环形面积上的 $|\sigma_s|$ 较大, 而上部的 $|\sigma_s|$ 较小。摩擦的存在虽然起相反的作用, 但由于 μ 较小, 不如前者的影响大。因此, 孔口附近的 A 区金属较易满足塑性条件。

当挤压比较小 (即环形面积相对较小) 时, 产生这种变形情况的倾向更大。

2) 当 h 很高和 μ 较大时, 产生第三种变形流动情况。这时, 由于摩擦阻力大, 抵消了很大一部分作用力, 使 A 区的轴向应力 $|\sigma_s|$ 在冲头附近比其它部位都大, 故此处较易满足塑性条件, 变形较大。当然在冲头附近 A 区金属被压缩变形的同时, B 区金属要有伸长变形, 并向孔口部分流动, 于是便产生图6-32c 和图6-33c 的情况。当 B 区金属流动时, 孔口附近的 A 区金属由于受 B 区金属附加拉应力的作用, 也将随着塑性变形。但 A 区中间高度处的金属由于 $|\sigma_s|$ 小, 不易满足塑性条件, 变形很小。

当挤压比较大时, 由于受力面积变化造成的影响 (即第一种因素的影响) 较小, 摩擦系数的影响就更为突出, 产生这种变形流动情况的倾向更大。

3) 当 h 较高和 μ 较大时, 上述因素造成的两方面的影响相近, A 区各处均有塑性变形, 即产生第二种变形流动情况。这时, 由于筒壁摩擦阻力的影响, 轴心区金属比外周的金属流动快。

4) 当 h 很小时, 由上述因素造成的两方面的影响均不明显, A 区各处的应力应变情况相近, 各处均同时有塑性变形。

5) 反挤时 (图6-32d) 由于只有第一种因素的影响, A 区在孔口处的轴向应力 $|\sigma_s|$ 大, 最易满足塑性条件, 故变形主要集中在孔口附近, 与第一种变形流动情况相近。

对挤压时金属变形流动影响的因素除以上三者外, 模具的形状、预热温度、坯料的性质等均有一定的影响。

模具的形状对筒内金属的变形和流动有重要影响, 由图6-34可以看出, 中心锥角的大小直接影响金属变形流动的均匀性。中心锥角 $2\alpha = 30^\circ$ 时, 变形区集中在凹模口附近, 金属流动最均匀, 这时挤出部分横向坐标网线的弯曲不大。外层和轴心部分的差别最小, 死角区也最小。随着中心锥角增大, 变形区的范围逐渐扩大, 挤出金属的外层部分和轴心部分的差别也增大, 死角区也相应增大。对平底凹模, 即当中心锥角 $2\alpha = 180^\circ$ 时, 变形区和变形的不均匀程度都将达到最大。

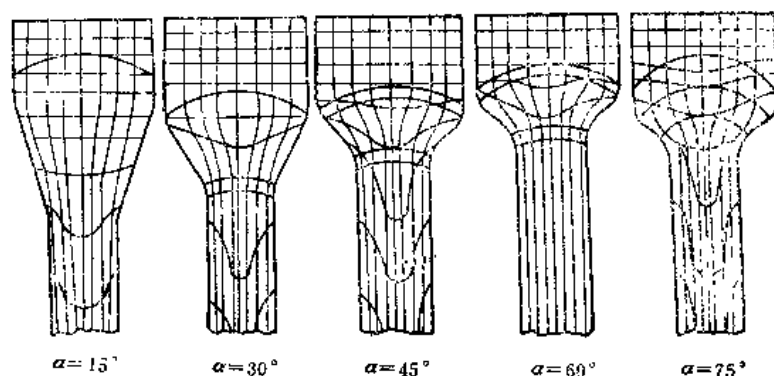


图6-34 凹模锥角大小对挤压时金属流动的影响

应当指出, 采用锥角模具后, 筒内金属特别是孔口附近金属的应力应变状态将发生很大的变化。例如 $2\alpha = 150^\circ$ 时, 还可能分为 A 、 B 两区, 而 $2\alpha = 30^\circ$ 时, 就可能不存在两区了, 因为这时在锥角处的径向水平分力很大 (图6-35), 变形由挤压而变为缩颈了。

减小锥角可以改善金属的变形流动情况, 但不是在所有情况下都能用的, 一方面是受挤压件本身形状的限制; 另一方面是某些金属, 例如铝合金挤压时, 为防止脏东西挤进制件表面, 均采用 180° 的锥角 (即平底凹模)。

模具的预热温度愈低, 变形金属的性能愈不均匀 (主要指流动应力 σ_f), 挤压时的变形流动不均匀性愈严重。

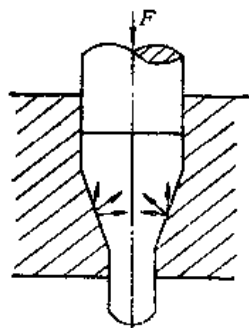


图6-35 凹模锥角很小时的挤压

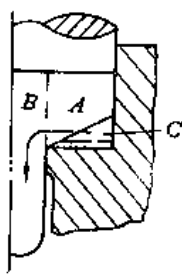


图6-36 挤压时的“死区”

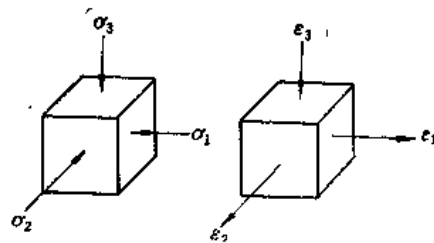


图6-37 “死区”的应力应变简图

三、关于“死区”的应力应变分析

“死区”形成的原因主要是凹模底部摩擦的影响, 愈靠近凹模侧壁处摩擦阻力愈大, 而孔口部分较小, 因此“死区”一般呈三角形 (见图6-36中 C 区), 另外热挤压时, 愈靠近筒壁处, 金属温度降低愈多, 变形也愈困难。

在挤压过程中该区金属有两种可能情况:

1) 一般情况下此区还是可以变形的, 其应力应变简图如图6-37所示, 该区高度减小, 被压成扁薄状, 金属被挤入凹模孔口内, 这样的变形情况在多数试件上是可以观察到的。

此区的径向应力 σ_r 除了要能使相邻的 B 区金属产生塑性变形外, 还要能克服摩擦力的作用, 故该区比其上部的 A 区金属难满足塑性条件, 不易塑性变形, 但是在一定的条件下,

例如当其上部的金属变形强化（或 B 区金属流动时对其作用有附加拉应力）后，该区可能满足塑性条件，产生塑性变形。

一般外径受限制的环形件镦粗时， C 点处金属的位移量是很小的，但挤压时由于 B 区金属的附加拉应力作用， C 点处金属常常被拉进凹模孔内，尤其当润滑较好或凹模有一定锥角时，位移的距离更大。

2) 如果摩擦阻力很大或此处金属温度降低较大时，此区与其上部的 A 区金属相比不易满足塑性条件，于是便成为真正的“死区”了，这时，由于该区金属不变，而与其相邻的上部金属有变形和流动，于是便在交界处发生强烈的剪切变形，并可能引起金属剪裂（图6-38）。有时可能由于上部金属的大量流动带着死区金属流动而形成折迭，如图6-39所示。

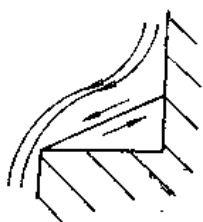


图6-38 “死区”附近的金属流动和受力情况

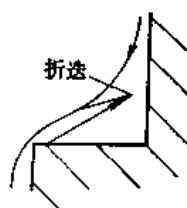


图6-39 折迭的形成情况

应当指出，在与“死区”交界处产生的强烈剪切变形对挤压件的组织和性能有重要影响，有关这方面的内容我们在《锻件组织和性能控制》一书中作了介绍，这里不再重复。

为减小“死区”的不良影响，可改善润滑条件和采用带锥角的凹模，锥角的作用在于使作用力在平行于锥面的方向有一个分力，该分力与摩擦力的方向相反（图6-40），从而有利于金属的变形和流动。根据不同的条件可以通过计算确定一个合适的锥角，以抵消摩擦的影响。

以上介绍的是实心件的挤压情况，空心件的挤压模具如图6-41所示，其中图a为正挤压，图b为反挤压。空心件挤压时的应力应变情况与实心件挤压基本相似，这里不再分析。

四、挤压时常见缺陷的分析

在挤压筒内可能产生的缺陷除“死角区”的剪裂和折迭等外，还有挤压缩孔，而在杆部常易产生各种形式的裂纹。分别讨论如下：

1. 挤压缩孔（图6-42）

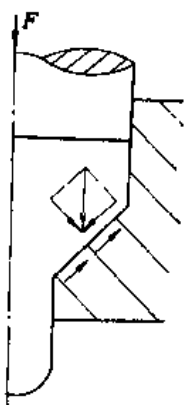


图6-40 凹模锥角对改善金属流动的影响图

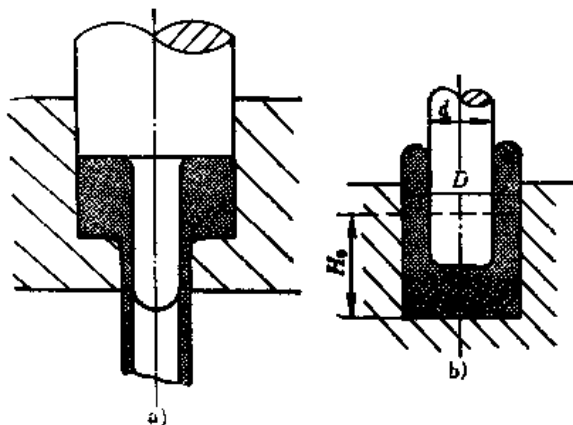


图6-41 空心件的挤压模具

挤压缩孔是挤压矮坯料时常易产生的缺陷,这时由于B区金属的轴向压应力很小,故当A区金属往凹模孔流动时便拉着B区金属一道流动,使其上端面离开冲头并呈凹形,再加上径向压应力的作用便形成这样的缩孔。

2. 裂纹

在挤压筒内尽管可能产生挤压缩孔和“死区”剪裂等缺陷,但变形金属处于三向受压的应力状态,能使金属内部的微小裂纹得以焊合,使杂质的危害程度大大减小,尤其当挤压比较大时,这样的应力状态对提高金属的塑性是极为有利的。但是在挤压制品中常常产生各种裂纹,如图6-43所示。这些裂纹的产生与筒内的不均匀变形(主要是“死区”引起的)有很大关系,但更重要的是凹模孔口部分的影响。

挤压时,变形金属在经过孔口部分时,由于摩擦的影响,表层金属流动慢,轴心部分流动快,使筒内已经形成的不均匀变形进一步加剧,内外层金属流动速度有差异,但两者又是一个整体,因此必然要有相互平衡的内力(即附加应力),外层受拉应力,内层受压应力,图6-43a所示的裂纹就是附加拉应力作用的结果。当坯料被挤出一段长度而成为外端金属后,则更增大了附加拉应力的数值。

如果凹模孔口形状复杂,例如挤压叶片时,由于厚度不均,各处的阻力也不一样,较薄处摩擦阻力大,冷却也较快,故流动较慢,受附加拉应力作用,常易在此处产生裂纹(图6-43b),尤其挤压低塑性材料更是如此。

挤压空心件时,如果孔口部分冲头和凹模间的间隙不均匀,间隙小处,由于摩擦阻力相对较大,金属温度降低也较大,金属流动较慢,受附加拉应力作用,可能产生如图6-43c所示

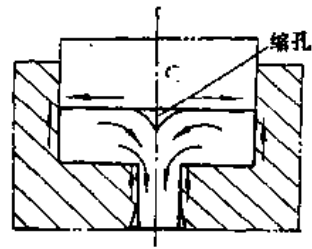


图6-42 挤压缩孔

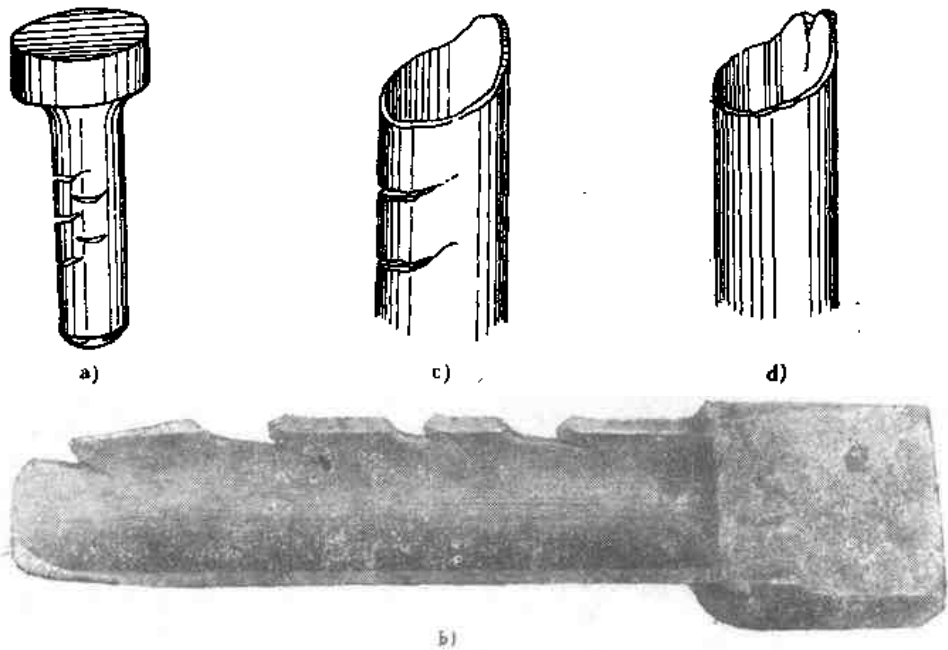


图6-43 挤压时的裂纹

的横向裂纹。流动快的部分由于受流动慢的部分的限制，受附加压应力。但是其端部却是受切向拉应力作用，因此常常产生纵向裂纹，如图6-43d所示。

凹模孔口部分的表面状态（如粗糙度）是否一致，润滑是否均匀，圆角是否相等，凹模工作带长度是否一致等，对金属的变形也都有很大影响。

总之，孔口部分的变形流动情况对挤压件的质量有着直接影响。

因此，要解决挤压件的质量问题，一方面使筒内变形尽可能均匀，另一方面还应重视孔口部分的变形均匀问题，可以从下列几方面着手：

1) 减小摩擦阻力。如改善模具表面粗糙度，采用良好的润滑剂和采用包套挤压等。例如，冷挤压钢材时，需将坯料进行磷化和皂化。磷化的目的是在坯料表面形成多孔性组织，以便较好地储存润滑剂。皂化的作用是润滑。又如热挤压合金钢和钛合金时，除了在坯料表面涂润滑剂外，在坯料和凹模孔口间加玻璃润滑垫（图6-44），热挤铝合金型材时，为防止产生粗晶环等，常在坯料外面包一层纯铝。

2) 在锻件图允许的范围内，在孔口处作出适当的锥角或圆角。

3) 用加反向力的方法进行挤压，见图6-45。这有助于减小内、外层变形金属的流速差和附加应力，挤压低塑性材料时宜采用。

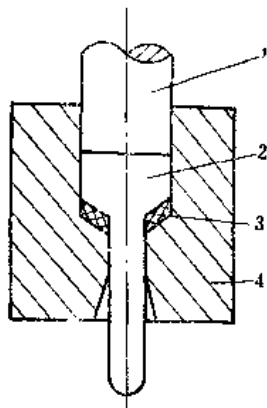


图6-44 带润滑垫的挤压
1—头 2—坯料 3—润滑垫 4—凹模

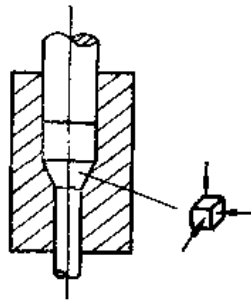


图6-45 带反向推力的挤压

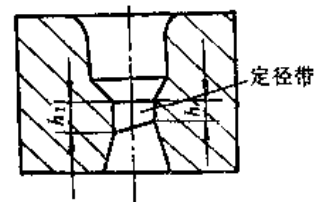


图6-46 具有不同定径带长度的挤压凹模

4) 采用高速挤压，因为高速变形时摩擦系数小一些。

对形状复杂的挤压件可以综合采取一些措施，在难流动的部分设法减小阻力，而在易流动的部分设法增加阻力，以使变形尽可能均匀，常用的措施是：

1) 在凹模孔口处采用不同的锥角。

2) 凹模孔口部分的定径带采用不同的长度（图6-46）。

3) 设置一个过渡区，使金属通过凹模孔口时变形尽可能均匀些（图6-47）。

近年来我国开始采用冷静液挤压（图6-48）和热静液挤压技术。静液挤压是挤压杆压于液体介质中，使介质产生超高压（可达2000~3500MPa或更高些），由于液体的传力特点使毛坯顶端的单位压力与周围的侧压力相等。

由于毛坯与挤压筒之间无摩擦力，变形较均匀，另外由于挤压过程中液体不断地从凹模和毛坯之间被挤出，即液体以薄层状态存在于凹模和毛坯之间，形成了强制润滑，因而凹模与毛坯间摩擦很小，变形便较均匀，产品质量较好。由于变形均匀，附加拉应力小，因而可以挤压一些低塑性材料。

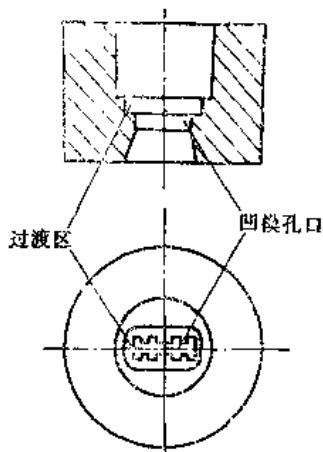
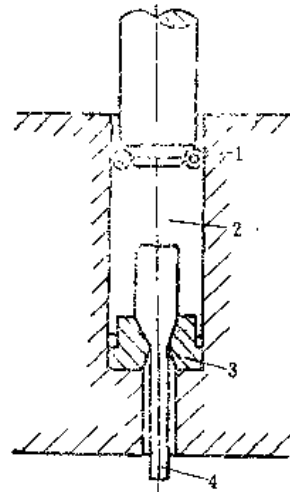


图6-47 具有过渡区的挤压凹模

图6-48 冷却液挤压装置示意图
1—密封 2—油 3—凹模 4—工件

五、径向挤压

径向挤压是指金属流出凹模孔口时的流动方向与凸模的运动方向相垂直。

径向挤压是近些年迅速发展起来的一项新工艺。利用径向挤压方法可以生产象十字接头（图6-49）和周缘带叶片的钛合金整体涡轮等形状复杂、尺寸精确的无飞边模锻件。由于它在实现锻件精化、节省原材料、提高产品质量和降低产品成本等方面具有许多优点，正受到愈来愈多的重视。

径向挤压时的应力、应变情况与正挤压基本类似，这里不再分析，现主要介绍径向挤压的变形过程和张模力两个问题。

1. 径向挤压的变形过程

对不同形状的零件，径向挤压时的变形过程和力的变化情况不完全相同。径向挤压的变形过程是先墩粗再径向挤压。以十字接头为例^[57]，变形过程分四个阶段：①墩粗变形阶段；②稳定侧挤阶段；③充填侧腔阶段；④挤压完成阶段。各阶段金属的变形情况和力的变化曲线如图6-50和图6-51所示。

在墩粗变形阶段，坯料在凸模的作用下产生墩粗变形并很快充满挤压筒。由于处在四个水平侧腔方向的金属系自由表面，故坯料在局部墩粗的同时，便开始流入侧腔。此阶段挤压力（OA段）增加较快，但数值不大。

在稳定侧挤阶段，金属大量流向侧腔，并形成四个侧枝，直到金属的前端碰到模壁为止。此阶段金属的流动比较稳定，挤压力（AB段）增加缓慢，曲线平坦。

在充填侧腔阶段，挤压筒内的金属继续挤入侧腔，这时侧腔内金属的变形类似沿水平方向的墩粗。常常是侧枝前端和根部的尺寸先增大，然后逐渐向中段扩展。此阶段挤压力（BC

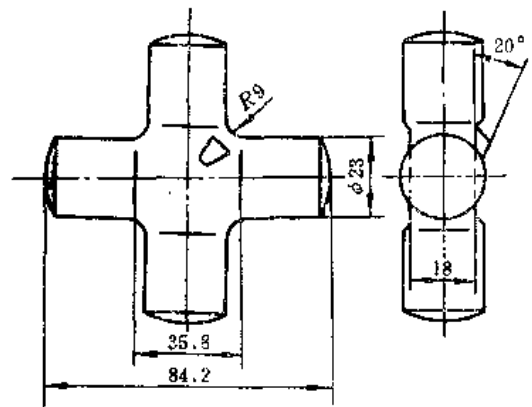


图6-49 十字接头锻件图

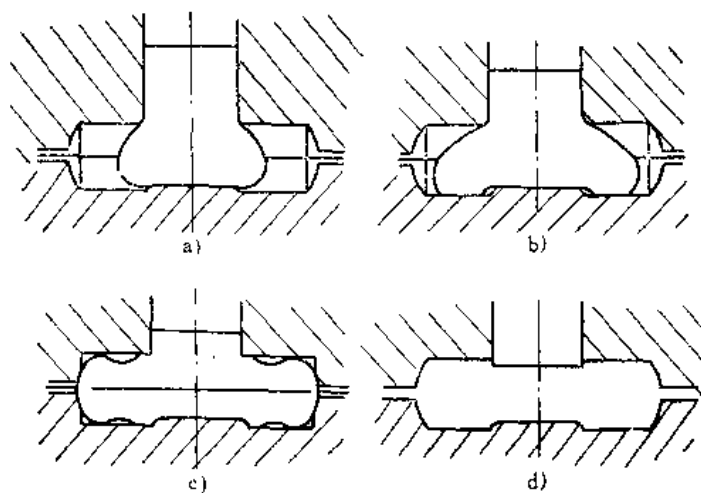


图6-50 十字接头的径向挤压过程示意图

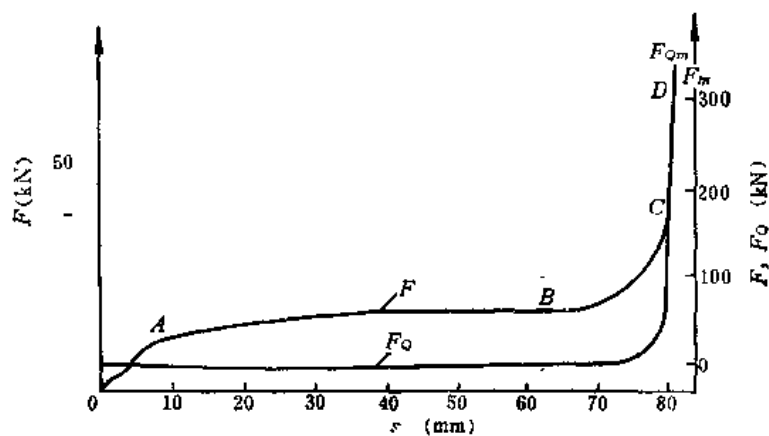


图6-51 挤压力和张模力随工作行程变化的曲线

F —挤压力 F_Q —张模力

段)很快上升。

在挤压完成阶段,最终充满型腔和向排料孔排除多余金属。该阶段凸模的行程很小,但挤压力(CD 段)急剧上升,最后达到最大值。

十字接头挤压后的网格变化情况如图6-52所示。

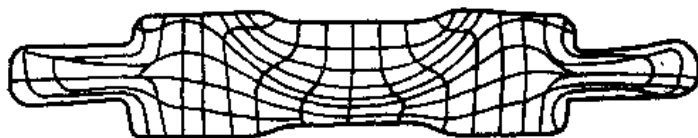


图6-52 十字接头挤压后的网格变化图

2. 张模力

为了在径向挤压后能够完整地取出锻件,凹模一般应做成分开式的(图6-53)。因此,在成形过程中变形件对凹模有一个作用力,力图使两部分张开,此力一般称为张模力,为了保证锻件在高度方向的尺寸精度,径向挤压时应当有足够吨位的模压装置。

在十字接头件的成形过程中,张模力的变化情况如图6-51中的 F_Q 曲线所示。

在墩粗变形阶段和稳定侧挤变形阶段,由于挤压筒内金属向下流动时,借助摩擦的作用,带着挤压筒下移,张模力为负值,在充填侧腔阶段,张模力变为正值,并迅速增加,在最后阶段,张模力与挤压力一样,急剧上升,最后达最大值。

十字接头件最后阶段的张模力的计算公式如下:

$$F_Q = (A_{\text{锻}} - A_{\text{筒}}) p_{\text{张}} + 4d_k l_k \sigma, \quad (6-4)$$

式中 $A_{\text{锻}}$ ——锻件的水平投影面积(mm^2);

$A_{\text{筒}}$ ——挤压筒的横截面积(mm^2);

$p_{\text{张}}$ ——张模单位压力(MPa)。

$p_{\text{张}}$ 可按式计算:

$$p_{\text{张}} = (1 \sim 0.8) p_{\text{平均}} \quad (6-5)$$

$$p_{\text{平均}} = \frac{F}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

式中 $p_{\text{平均}}$ ——平均挤压力(MPa);

F ——总挤压力(N);

D ——挤压筒直径(mm)。

对如图6-49所示的十字接头铅试件,挤压力的计算值为100.1kN,实测为104kN,张模力的计算值为324kN,实测为338kN。

由上列数据可以看出,径向挤压时的张模力是很大的。而且锻件的水平投影面积愈大时,张模力也愈大。因此,在进行径向挤压工艺时,应当有可靠的压模机构或采用双动压力机。

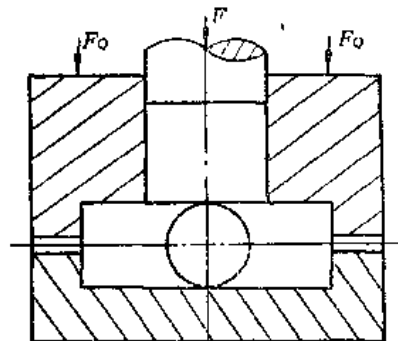


图6-53 十字接头径向挤压模具示意图

第五节 顶 镦

本节研究细长杆形坯料的局部增粗工艺。

对细长杆件沿轴向进行压缩(图6-54),当压力超过一定数值(临界载荷 F_k)后,杆件便失去稳定而产生弯曲。因此,细长杆形坯料的局部增粗工艺关键是使坯料不产生弯曲,或仅有少量弯曲而不致发展成折迭。

本节简要介绍顶镦、电镦和在带有导向的模具中镦粗等三方面内容。

一、顶 镦

坯料端部的局部镦粗称为顶镦或称聚料,顶镦可以在自由锻锤、螺旋压力机、水平锻机和自动冷镦机等设备上。象螺钉、发动机的气阀、汽车上的半轴等用顶镦生产最为适宜。顶镦的生产效率较高,故在生产中应用较普遍。本节主要分析水平锻机上的顶镦。该设备上的顶镦问题分析清楚了,其它设备上的顶镦问题也就不难解决了。

坯料顶镦时(图6-55),如果变形部分长度 l_b 不太长时,不会有什么问题。如果 l_b 较长时,则常常由于失稳先产生弯曲,然后发展成折迭,顶镦时的主要问题就是折迭。因此,

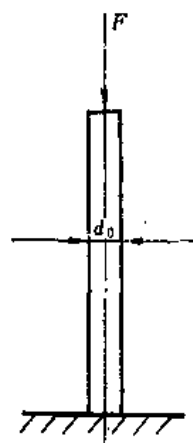


图6-54 细长杆件的压缩

研究顶锻问题应首先以防止折迭为主要出发点，其次是尽可能减少顶锻次数以提高生产率。

顶锻实际上是在特定条件下的镦粗，人们在长期的生产实践中发现，当 $l_B < 3d_0$ 和坯料端部较平时，可以一次顶锻到任意大的直径，这就是顶锻（局部镦粗）第一规则。实际生产中由于坯料端面常常有斜度等，容易引起弯曲，生产中一次行程允许的镦粗比 ψ 许的数值按表 6-3 确定。

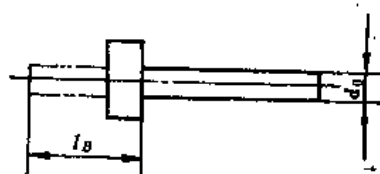


图6-55 顶锻

表6-3 一次行程 ψ 许的数值

冲头形式 坯料直径 (mm)	平 冲 头		冲 孔 冲 头	
	$d_0 \leq 50$	$d_0 > 50$	$d_0 \leq 50$	$d_0 > 50$
0~3° (锯切)	$\psi_{\text{许}} = 2.5 + 0.01d_0$	$\psi_{\text{许}} = 3$	$\psi_{\text{许}} = 1.5 + 0.01d_0$	$\psi_{\text{许}} = 2$
3°~6° (剪切)	$\psi_{\text{许}} = 2 + 0.01d_0$	$\psi_{\text{许}} = 2.5$	$\psi_{\text{许}} = 1 + 0.01d_0$	$\psi_{\text{许}} = 1.5$

在平锻机上顶锻时，大多数锻件变形部分长度 l_B 均大于 $3d_0$ ，例如气阀的 $l_B/d_0 \approx 13$ 。对这样的细长杆进行顶锻，产生弯曲是不可避免的，关键的问题是如何防止发展成折迭。为此，当 $l_B > 3d_0$ 时，顶锻一般均在模具内进行，靠模壁来限制弯曲的进一步发展。图6-56是在凹模内顶锻的情况，图6-57是在凸模内顶锻的情况。

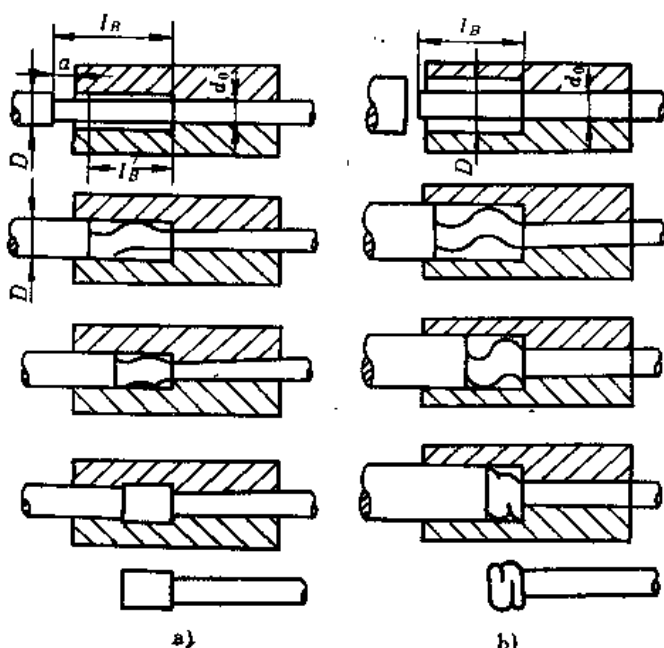


图6-56 凹模内顶锻

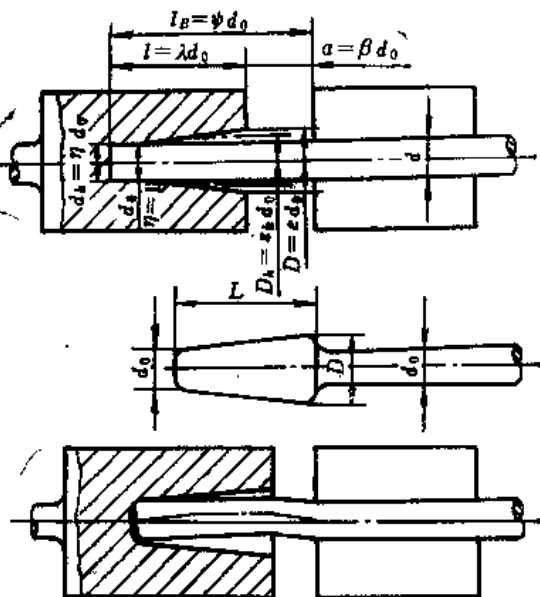


图6-57 凸模内顶锻

在凹模内顶锻时，如凹模直径与坯料直径之比 D/d_0 不太大，顶锻初期产生的一些弯曲，在与模壁接触后便不再发展，随着坯料加粗变形而充满模膛。但是， D/d_0 较大时，折迭仍可能产生（图6-56b）。因此对一定直径的坯料，防止折迭产生的关键是控制凹模直径。

根据生产实践，一般规定如下：

- 1) 当顶镦后直径 $D \leq 1.5d_0$ 时，则露在外面的坯料长度 $a \leq d_0$ 。
- 2) 当 $D \leq 1.25d_0$ 时，则取 $a \leq 1.5d_0$ 。

此即顶镦（局部镦粗）第二规则，通常 $D = 1.5d_0$ 用于 $l_b/d_0 < 10$ 的情况； $D = 1.25d_0$ 用于 $l_b/d_0 > 10$ 的情况。

由该规定可见，每次顶镦的镦缩量是有限的，当坯料的 l_b 较长时，需要经过多次顶镦，使坯料尺寸满足 $l_b \leq (2.2 \sim 2.5)d_0$ 的要求后再顶镦到所需的尺寸和形状。

在凹模内顶镦时，金属易从坯料端部和凹模分模面间挤出而形成毛刺，这样在下一次顶镦时，毛刺被压入锻件内部，形成折迭，所以生产中常采用凸模内顶镦。

在凸模内顶镦时，坯料产生的弯曲也是靠模壁来限制的。模膛直径较大时，也可能产生折迭，防止折迭的产生也是靠控制模膛的直径来实现的。

模膛大头直径 D （或镦缩长度 a ）愈小时，愈不易产生弯曲和折迭，但是过小了，要增加工步次数，降低生产效率。因此，有必要确定 D （或 $a = \beta d_0$ ）的临界值（超过此值时就要产生折迭）。

根据科研和生产实践，一般规定如下：

- 1) 当 $D \leq 1.5d_0$ 时， $a = \beta d_0 \leq 2d_0$ ；
- 2) 当 $D \leq 1.25d_0$ 时， $a = \beta d_0 \leq 3d_0$ 。

此即顶镦（局部镦粗）第三规则。当 $\varphi = \frac{l_b}{d_0}$ 较大时，需要进行多次顶镦，顶镦次数和工步尺寸的计算见本书第七章第五节。

二、电热镦粗

电热镦粗的变形过程如图6-58所示。镦粗过程的某一瞬间变形部分的长度与其平均直径之比均小于 $2.5 \sim 3$ ，因此，在一般情况下，不会产生弯曲和折迭。电热镦粗的基本工作原理如图6-59所示，垫铁1和活动夹头2接在降压变压器8的副绕组电路上，变压器的初级绕组通过接触器接在50Hz的电力网路上。工作时，夹头2夹住坯料6（夹持的松紧度决定于液压缸4的压力），坯料一端被液压缸5的活塞由砧头3顶向垫铁1，这时1和2成为变压器的两个电极。通电后坯料A段迅速被加热，当达到 $900 \sim 1150^\circ\text{C}$ 时，A段由于液压缸5的压缩被镦粗，随着砧头3向左移动，A段被连续地镦粗，直到砧头3抵住定位挡铁7为止。电

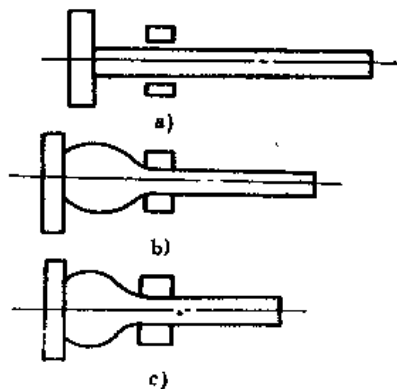


图6-58 电热镦粗变形过程
a) 初始情况 b) 中间阶段 c) 最后阶段

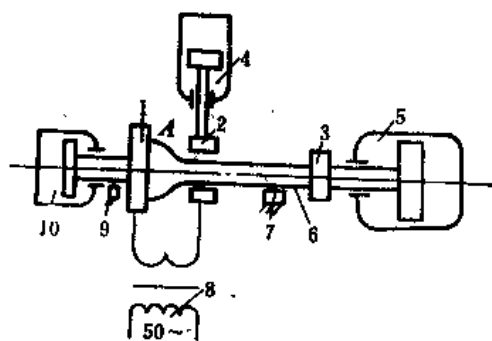


图6-59 电热镦粗工作原理图

镦初期, 在坯料被镦缩的同时, 垫铁 1 也要向左移动一段距离。(到挡铁 9 为止)。其目的是为了减小 $\frac{l_0}{d_0}$ 。垫铁 1 的向左移动是靠液压缸 5 和液压缸 10 的压力差产生的。

电热镦粗后坯料一般呈蒜头状, 温度尚保持在 $1000 \sim 1200^\circ\text{C}$ 左右, 立即卸去液压缸 5 和 6 的压力, 松开夹头, 将坯料运送到摩擦压力机或热模锻压力机上即可终锻成所需形状的锻件。

电热镦粗的生产率可达 $400 \sim 500$ 件/h。从目前已有的生产实践看, 电镦的坯料变形部分长度与其直径之比可达 35。

电镦能一次镦粗这样细长的杆件, 从变形的角度看是由于正确掌握和运用了金属塑性变形不均匀的规律 (即变形首先发生在那些变形抗力小, 或先满足塑性条件的部分), 是局部塑性变形区控制原理的运用。

三、在带有导向的模具中镦粗

在带有导向的模具中镦粗的变形过程如图 6-60 所示。镦粗开始时, 坯料稍有变粗和弯曲, 并与模具导向部分接触, 使弯曲受到限制。继续镦粗时, 位于导向部分的坯料 (B 区) 处

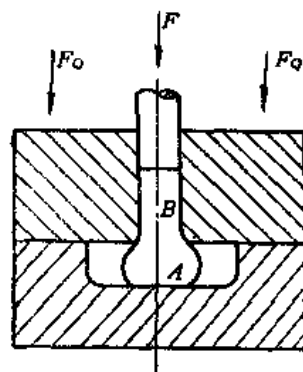


图 6-60 在带有导向的模具中的镦粗

于三向压应力状态, 且横向的变形被限制, 而下部的 A 区处于单向压应力状态, 因此变形便在 A 区发生。由于 A 区的 $\frac{h}{d}$ 值较小, 不会产生失稳弯曲。这种方法可以在一次行程内获得较大的压缩变形。适用于一般通用设备上细长坯料的镦粗。

由于采用这种方法镦粗时, A 区侧表面部分受到的附加拉应力比一般镦粗的大 (因为外区金属的切向伸长完全是由中心部分金属的向外扩张引起的), 容易开裂。因此, 对材料的塑性要求高一些。

用这种方法镦粗时, 有关导向凹模的受力情况和张模力的确定见前一节的径向挤压部分。

第七章 模 锻 工 艺

第一节 常用模锻设备及其工艺特点

常用模锻设备有模锻锤、热模锻压力机、螺旋压力机和平锻机等。

一、模锻锤

模锻锤包括蒸汽空气模锻锤、无砧座锤、高速锤和液压模锻锤。蒸汽空气模锻锤是普遍应用的模锻锤。一般将蒸汽空气模锻锤简称为模锻锤。模锻锤的结构如图7-1所示。模锻锤规格用落下部分重量表示,有1~16t多种。

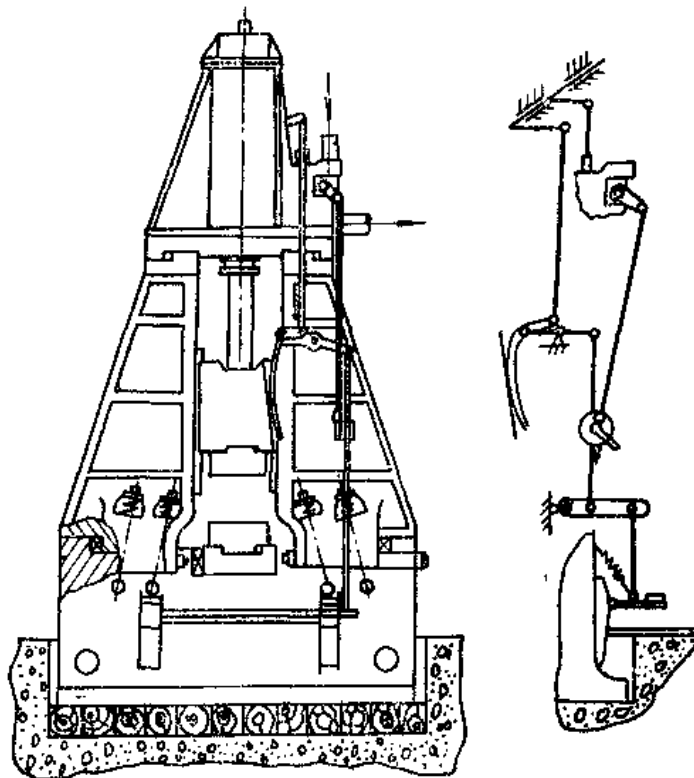


图7-1 模锻锤结构简图

与热模锻压力机相比,模锻锤的主要工作特性是:

- 1) 模锻锤靠冲击力使金属变形,锤头具有较高的打击速度,在行程的最后,速度可达 $7 \sim 9\text{m/s}$,且受力系统不是封闭的,冲击力通过下砧传给基础。
- 2) 锤头的行程不固定,单位时间内打击次数多。
- 3) 抗偏载能力和导向精度较差,且无顶出装置。

根据模锻锤的主要工作特性,锤上模锻具有下列工艺特点:

- 1) 由于靠冲击力使金属变形,可以利用金属的流动惯性充满模膛,上模模膛较下模模膛具有更好的填充性,锻件上难充满的部分应尽量放在上模。

2) 锤头行程不固定, 金属在各模膛中的变形是在锤头多次打击下完成的, 因此, 可在锤上实现拔长、滚压等各种模锻工步。模锻锤一般不需其它设备为其制坯, 具有广泛的适应性和通用性。

3) 模锻锤的导向精度较差、工作时的冲击和行程不固定、无顶出装置等因素使模锻件的精度不高。

模锻锤以其通用性好的优点被广泛应用。但是模锻锤因具有冲击震动大, 噪声大, 工人劳动条件差, 对厂房地基要求高, 锻件质量差等一系列严重问题, 因此在现代生产中将愈来愈多地被其它模锻设备所替代。

二、热模锻压力机

热模锻压力机简称锻压机, 它是针对模锻锤的缺点由一般曲柄压力机发展而成的。工作时, 依靠曲柄的传动, 使滑块作上、下往复运动进行锻压。热模锻压力机的结构和工作原理如图7-2所示, 其设备规格为6300~120000kN。

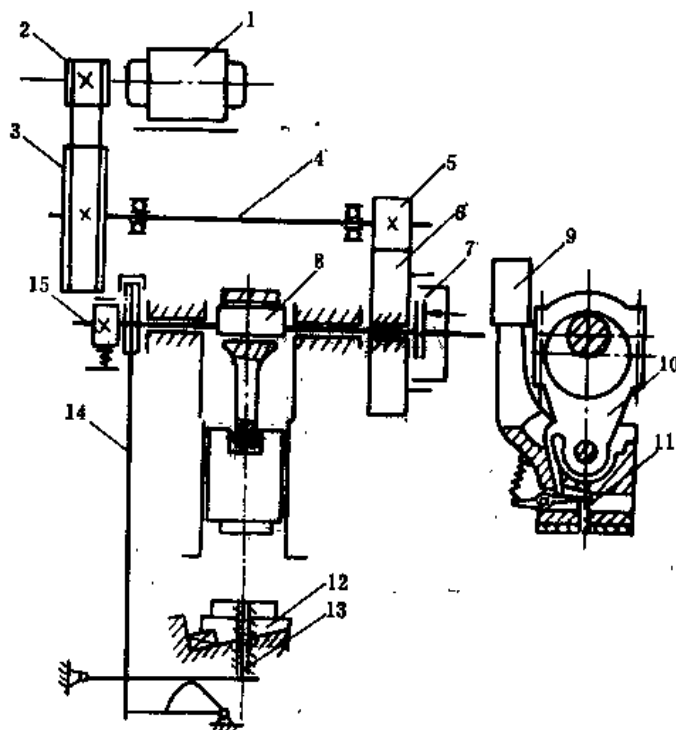


图7-2 热模锻压力机结构简图

1—电动机 2—小带轮 3—大带轮(飞轮) 4—中间轴 5—小齿轮 6—大齿轮(飞轮) 7—摩擦离合器 8—曲轴 9—连杆 10—象鼻形滑块 11—上顶杆 12—模式工作台 13—下顶杆 14—凸轮杠杆 15—制动器

热模锻压力机和模锻锤相比有以下工作特性:

- 1) 电动机通过飞轮释放能量, 滑块的压力基本上属于静压, 工作时无震动和噪音。
- 2) 机架和曲柄连杆机构的刚性大, 工作时弹性变形小。
- 3) 滑块行程一定, 每一模锻工步只需一次行程完成。
- 4) 滑块具有附加导向的象鼻形结构, 从而增加了导向长度, 提高了导向精度和承受偏载能力。

5) 具有上、下顶杆装置, 便于锻后工作脱模。

根据上述热模锻压力机的工作特性, 锻压机模锻工艺及模具设计具有以下特点:

1) 金属在模膛中的流动特点及充填能力与模锻锤不同。锤上模锻金属在高度方向的流动和充填能力较强；而在锻压机上，由于滑块的运动速度低，且金属在一次行程内完成变形，则金属在水平方向的流动较为强烈，以致形成较大的飞边。对于主要靠压入法充填模膛的锻件，可能产生较大的飞边而在模膛的深处仍未充满。此外，锤上模锻时金属充填上模的能力比下模强得多，而在锻压机上并无明显差别，如图7-3所示。该现象产生的主要原因在于锤上变形时金属的流动惯性所致（见第六章第二节）。而在压力机上成形时，由于滑块工作速度低，惯性作用不明显。为此，在热模锻压力机上，对于主要靠压入方式成形的锻件，应采用多模膛模锻使坯料逐步成形。在第一模膛内制出的坯料形状近似于锤上第一次打击后得到的形状，在第二模膛内制出的坯料则与锤上模锻第二次打击后的坯料形状相当，依次类推，直到获得最终锻件形状为止。各模膛相互间以及与终锻模膛间主要在高度方向的尺寸上稍有区别。实际生产中，锻压机模锻所需的模膛数一般不超过四个。

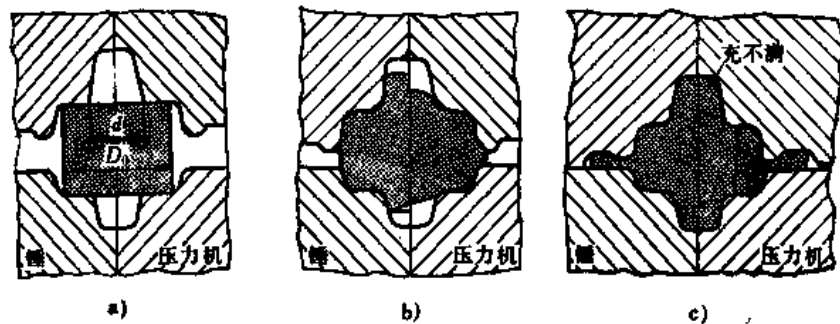


图7-3 金属在模锻锤及热模锻压力机上的充填情况

a) 变形开始前 b) 变形过程中 c) 变形结束时

2) 金属变形在滑块一次行程中完成，坯料内外层几乎同时发生变形，因此变形深透而均匀，锻件各处的力学性能基本一致，流线分布也较均匀，有利于提高锻件的内部质量。

3) 锻件尺寸精度高。高度方向尺寸由于滑块行程固定、机架刚性大而得到保证；水平方向尺寸由于滑块导向精确、模具设有导柱和导套而得到保证。此外，锻压机设有上、下顶出机构，故模锻件的模锻斜度较小，甚至可以锻出不带模锻斜度的锻件。

4) 由于具有静压力的特性，金属在模膛内流动较缓慢，这对变形速度敏感的低塑性合金的成形十分有利，故某些不适宜在锤上模锻的耐热合金、镁合金等金属可在锻压机上进行锻造。

5) 由于锻压机行程固定，因此不适合拔长和滚压等制坯工步。它只能完成断面变化不大（ $\leq 10\% \sim 15\%$ ）的制坯操作，若断面变化较大需采用拔长和滚压等制坯工步时，应利用其它设备制坯，例如采用辊锻机制坯，或利用锻锤、楔横轧机进行制坯，再在锻压机上模锻成形。

6) 锻压时坯料表面的氧化皮不易去除，因此应尽量采用电加热或少无氧化加热，在用一般加热方法加热时，需配备氧化皮清除装置，如采用高压水装置或机械刷进行清理。

7) 可以采用镶块组合结构模具，为防止设备闷车，上、下模分模面不能压靠，必须留有间隙。

鉴于热模锻压力机的优点，国内外先进的模锻厂普遍采用热模锻压力机代替模锻锤，并利用辊锻机制坯，坯料采用电感应加热装置，以满足大批量生产和专业化生产的需要。由于

热模锻压力机与同样能力的模锻锤相比造价高, 因此, 在生产规模不大的情况下采用热模锻压力机是不适宜的。

三、螺旋压力机

螺旋压力机包括摩擦压力机、液压螺旋压力机(亦称液压螺旋锤)和电动螺旋压力机, 其结构及工作原理如图7-4所示。螺旋压力机是介于模锻锤和热模锻压力机之间, 并属于锻锤类的一种设备。由于它的通用性强, 适应范围广, 因此在锻压生产中应用较多。螺旋压力机具有以下工作特性:

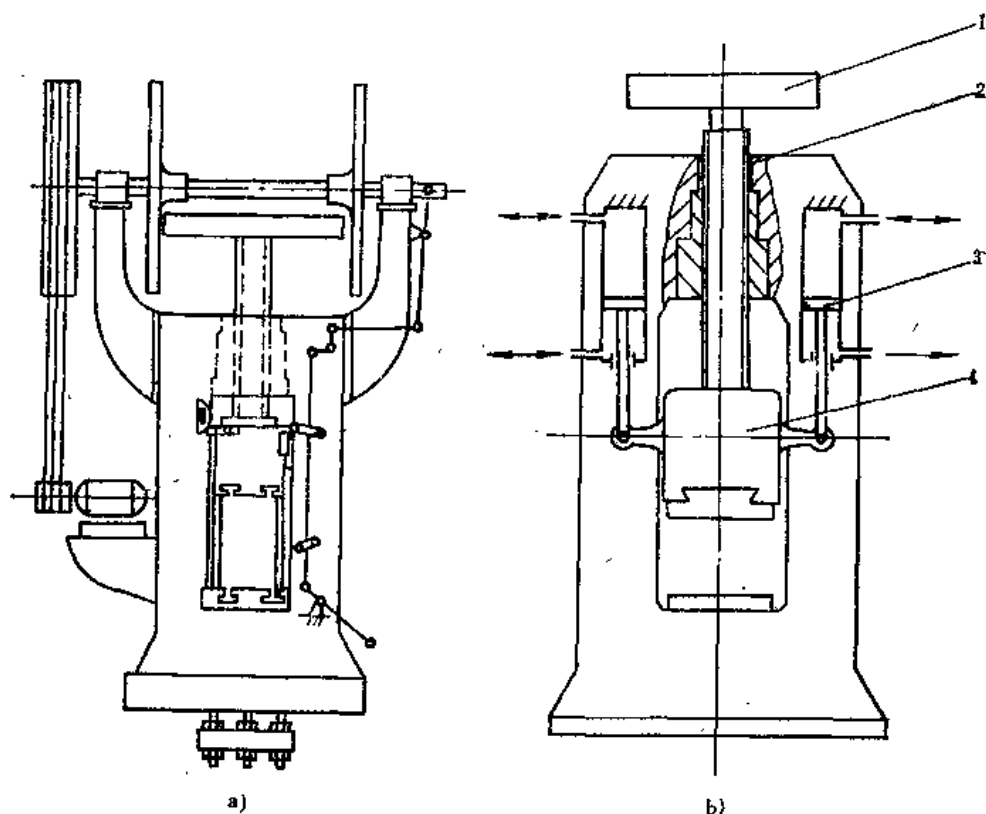


图7-4 螺旋压力机结构原理图

a) 摩擦压力机 b) 液压螺旋压力机

1—飞轮 2—螺杆 3—液压缸 4—滑块

1) 具有锻锤和压力机的双重工作特性。螺旋压力机在工作过程中带有一定的冲击作用, 滑块行程不固定, 具有锤类设备的工作特性; 而它又是通过螺旋副传送能量的, 在金属产生塑性变形的瞬间, 滑块和工作台之间所受的力, 由压力机的封闭框架所承受, 并形成一封闭的力系, 因此又具有压力机的工作特性。

2) 行程次数少、打击速度低。螺旋压力机是通过具有巨大惯性的飞轮的反复启动和制动, 把螺杆的旋转运动变为滑块的往复直线运动, 因此使得每分钟行程次数和打击速度受到一定限制。摩擦压力机每分钟的行程次数为 $9 \sim 40$ 次/min, 行程速度为 $0.5 \sim 1.0$ m/s; 液压螺旋压力机每分钟的行程次数为 $20 \sim 70$ 次/min, 行程速度为 $1.5 \sim 3.0$ m/s。

3) 摩擦压力机采用摩擦传动, 所以传动效率低。双盘摩擦压力机的效率仅为 $10\% \sim 15\%$, 所以该设备多为中小型设备。

由于上述设备的工作特性, 在模锻工艺上, 螺旋压力机模锻有如下特点:

1)因螺旋压力机具有锤类设备的工作特性,在一个模膛内可进行多次打击变形,从而可为大变形工序(如镦粗、挤压等)提供大的变形能量。同时,也可小变形工序(如终锻合模阶段、精压、压印等)提供较大的变形力,因而能满足各种主要锻压工序的力能要求。

2)因设备行程不固定,锻件精度不受设备自身弹性变形的影响,所以,可利用它进行精密模锻(如精锻齿轮、叶片等)和闭式模锻。再加上该设备具有顶出装置,因此,可得到高精度的锻件。

3)由于单位时间内的行程次数少,行程速度较低,所以,金属变形过程中的再结晶现象进行得充分,因而较适合模锻一些再结晶速度较低的低塑性合金钢和有色金属材料。

4)因该设备旋转运动的螺杆和往复直线运动的滑块间是非刚性联接,所以承受偏心载荷的能力差。一般情况下螺旋压力机只进行单模膛锻造,用自由锻锤、辊锻机等设备制坯。在偏心载荷不大的情况下,也可以布置两个模膛。但是模膛中心距离不应超过螺杆节圆的半径。

5)设备打击速度低,因此,既可采用整体式锻模,又可采用组合式锻模。

6)螺旋压力机可以完成多种工艺,除模锻外,还可作切边、弯曲、精压、校正、挤压和板料冲压等工序,是一种工艺适应性好,通用性强的设备。

由于以上工艺特点,螺旋压力机得到了广泛的应用。螺旋压力机与锻锤相比,它没有沉重而庞大的砧座,也不需要蒸汽锅炉和大型空气压缩机等辅助设备。与热模锻压力机相比,制造成本便宜,维修简单。因此,从基建、动力消耗和维修费用三方面来看,螺旋压力机是上述三种设备中最低的。

螺旋压力机在近20年来,结构不断改进,性能日趋完善。除在锻造行业普遍使用外,在五金、工具、医疗器械、陶瓷、建材和耐火材料等多种行业中,也得到广泛使用。

四、平锻机

平锻机相当于卧式的曲柄压力机。模锻锤、热模锻压力机和螺旋压力机等锻压设备,其工作部分是作垂直往复运动,而平锻机的工作部分是作水平往复运动。平锻机的传动原理如图7-5所示。

平锻机按其凹模分模方式不同可分为垂直分模平锻机和水平分模平锻机。垂直分模平锻机两个凹模的分模面处于垂直位置,一个锻件几个模锻工步的模膛按垂直方向上下排列。水平分模平锻机两个凹模的分模面处于水平位置,模膛按水平方向排列。由于在水平方向分模,棒料在模膛间移动方便,易于实现机械化,同时,机身受力也比较合理。近年来,这种型式的平锻机得到了发展。

平锻机具有热模锻曲柄压力机的特点,如设备刚度大,行程固定,锻件高度方向尺寸稳

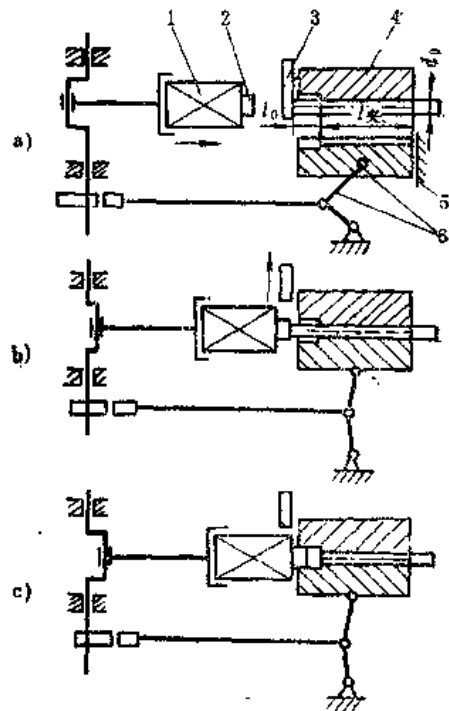


图7-5 平锻机传动原理示意图

1—主滑块 2—冲头 3—前定位板 4—固定凹模
5—活动凹模 6—侧滑块

表7-1 常用模锻设备主要工作特性及工艺特点比较

模 锻 设 备 类 别 及 规 格	设 备 工 作 特 性			设 备 结 构 特 点			工 艺 用 途 特 征	模 锻 结 构 型 式
	载荷性质	行程性质	最大工 作速度 (m/s)	行程次数 (次/min)	打击刚性 或 刚度	导向性能	承受偏 载能力	顶 料 装 置
模 锻 锤	单 作 用 (1~5t)	在变形过程中消耗全部打击能量	3~5	30~40	打击刚 性较好	较 好	较 好	无
	双 作 用 (1~16t)		6~8	40~80				
	无 钻 座 锤 (4~100t-m)		2~3	平 均 6~8	打击刚 性 好	较 差	较 差	无
	摩 擦 压 力 机 (400~25000kN)		0.5~1	9~40	刚 度 较 好	较 好	较 差	可有下顶杆
螺 旋 压 力 机	液 压 螺 旋 压 力 机 (4000~63000kN)		1.5~3	20~70				
热 模 锻 压 力 机 (6300~120000kN)		在变形过程中必须施加工作压力	0.25~0.5	40~80	刚 度 好	好	好	上、下顶杆
	垂 直 分 模 平 模 机 (2250~20000kN)		0.25~0.5	25~60				
	水 平 分 模 平 模 机 (3150~12500kN)		0.25~0.5	28~55	刚 度 好		好	无
平 模 机								

多模膛多击模锻,也可用于校正

主要用于单模膛多击模锻

主要用于单模膛多击模锻,需配用制坯设备,可用于挤压和锻造成形

可用于多模膛模锻

3~4模膛单击、模锻,可用于挤压成形,不宜进行拔长类制坯,对长轴类、锻件需配用制坯设备

多模膛单击模锻,适用长棒料开式和闭式模锻,可进行聚料、冲孔、穿孔、切边等工序,不适于模锻非对称锻件

定性好；工作时靠静压力，震动小，劳动条件好，不需庞大的基础；模具可采用组合式、镶块式锻模，节省模具钢等。

平锻机与其它曲柄压力机在工作特性上的主要区别是有两个互相垂直的分模面，主分模面在冲头与凹模之间；另一个分模面在可分两半凹模之间（见图7-5）。

平锻机在工艺上有如下特点：

1) 锻造时坯料水平放置，其长度不受设备工作空间的限制，可锻出立式锻压设备不能锻造的长杆类锻件，也可用长棒料逐个连续锻造。

2) 有两个分模面，因而可以锻出一般立式锻压设备难以锻成的，在两个方向有凹档、凹孔的锻件（如双凸缘轴套等），锻件形状更接近零件形状。

3) 平锻机导向性好，行程固定，锻件长度方向尺寸稳定性比锤上模锻高。但是，平锻机传动机构受力产生的弹性变形随锻压力的增大而增加。所以，要合理地预调模具闭合尺寸，否则将影响锻件长度方向尺寸的精度。

4) 平锻机可进行开式和闭式模锻，可进行终锻成形和制坯，也可进行弯曲、压扁、切料、穿孔、切边等工序。

但是，平锻机上模锻也有如下缺点：

1) 平锻机是模锻设备中结构最复杂的一种，价格贵，投资大。

2) 靠凹模夹紧棒料进行锻造成形，一般要用高精度热轧钢材或冷拔整径钢材，否则会夹不紧或在凹模间产生大的纵向毛刺。

3) 锻前需用特殊装置清除坯料上的氧化皮，否则锻件表面粗糙度比锤上锻件高。

4) 平锻机工艺适应性差，不适宜模锻非对称锻件。

常用模锻设备主要工作特性和工艺特点的比较见表7-1。

第二节 模锻工艺及模锻件分类

模锻工艺可按不同方法分类：

1) 按所用设备不同，模锻工艺可分为锤上模锻、热模锻压力机上模锻、螺旋压力机上模锻、平锻机上模锻等。

2) 按终锻模膛的结构不同，模锻工艺可分为开式模锻和闭式模锻。开式模锻两模间间隙的方向与设备运动的方向垂直，闭式模锻两模间间隙的方向与设备运动的方向平行。

3) 按所用模膛数目不同，可分为单模膛模锻和多模膛模锻。

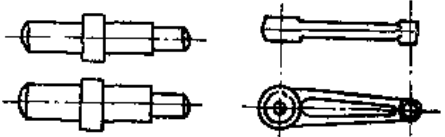

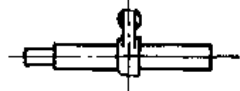
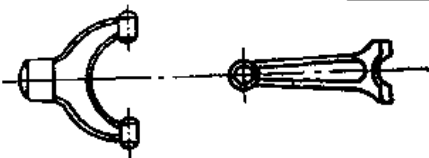

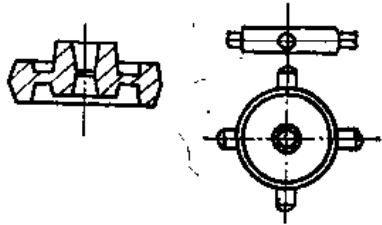
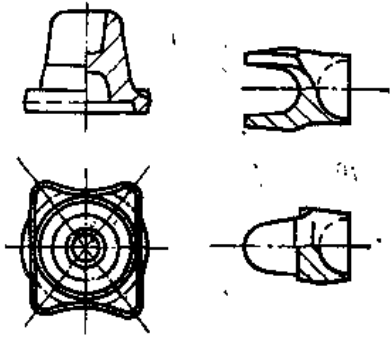
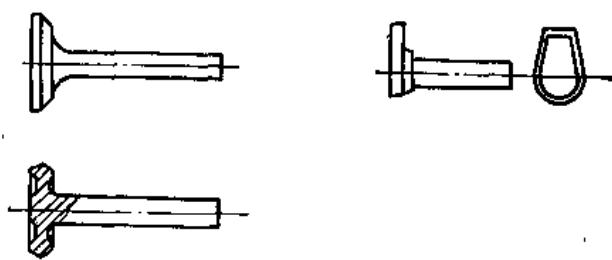
4) 按生产锻件精度不同，可分为普通模锻和精密模锻。普通模锻所生产的锻件符合对锻件普通级精度要求，精密模锻所生产的锻件应符合锻件精密级的要求。

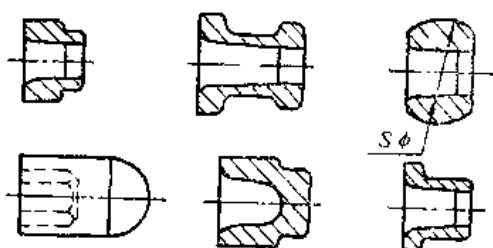
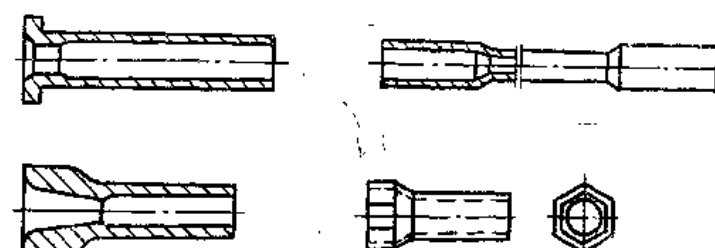
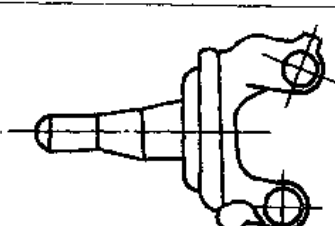
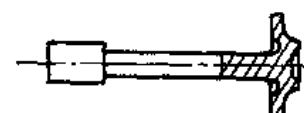
模锻工艺方法与锻件外形紧密相关。形状相似的锻件，其模锻工艺及锻模结构是基本相同的。因此，为了便于拟定工艺规程，合理进行锻件和锻模的设计，应将各种形状的模锻件分类。分类依据锻件外形和采用的工艺方法进行，可将锻件分为长轴类锻件、短轴类锻件（圆饼类锻件）、顶锻类锻件及复合类型锻件，如表7-2所示。

一、长轴类锻件

锻件轴线较长，长度方向尺寸明显大于宽度和高度方向的尺寸。模锻时，毛坯轴线方向（长度方向）与锻击方向垂直，金属主要沿高度和宽度方向流动，沿长度方向流动很少。

表7-2 模锻件分类

类 别	组 别	锻 件 图 例
长 轴 类 锻 件	直 长 轴 类	
	弯 曲 轴 类	
	枝 芽 类	
	叉 类	
短 轴 类 锻 件	简 单 形 状	
	较 复 杂 形 状	
	复 杂 形 状	
顶 墩 类 锻 件	具有粗大部分的杆类锻件	

类 别	组 别	锻 件 图 例
顶 锻 类 锻 件	具有透孔和不透孔的锻件	
	管 类 锻 件	
复 合 类 型 锻 件	具有粗大头部的长轴类锻件	
	具有等圆断面细长杆部的短轴类锻件	

长轴类锻件数量多、形状复杂, 根据锻件外形、主轴线和分模线的特征可分成四组。

第一组: 直长轴类锻件 锻件的主轴线和分模线为直线, 如连杆和台阶轴等。当锻件沿长度方向截面积变化较大时, 必须采用拔长、滚压制坯工步。

第二组: 弯曲轴类锻件 锻件的主轴线与分模线, 或其中之一呈曲线形状, 如曲轴。该类锻件工艺上除要求采用拔长或拔长加滚压制坯外, 还需采用弯曲或成型制坯。

第三组: 枝芽类锻件 锻件上带有突出的枝芽状部分, 如离合杆。终锻前除可能需要拔长或拔长加滚压制坯外, 为了便于锻出枝芽还应进行成型制坯或预锻。

第四组: 叉类锻件 锻件头部为叉形, 杆部或长或短。若叉类杆部较短, 除需要拔长或拔长加滚压制坯外, 还得进行弯曲制坯; 若叉类锻件的杆部较长, 则不需弯曲制坯, 只需采用带有劈开坪台的预锻工步。

二、短轴类(圆饼类)锻件

锻件主轴线尺寸较短, 在分模面上投影为圆形或长宽尺寸相差不大的锻件。模锻时, 还料轴线方向与打击方向相同, 金属沿高度、宽度和长度方向同时流动。终锻前, 常采用墩粗

台或压扁台进行制坯。按锻件断面几何形状复杂程度可分为三组。

第一组：简单形状 锻件平面图形为圆形，无深孔或无薄幅板锻件，如法兰、筒、环、无薄幅板齿轮等。

第二组：较复杂形状 如十字轴、有薄幅板齿轮等。

第三组：复杂形状 如万向节叉、有深孔的突缘等。

三、顶锻类锻件

顶锻类锻件采用顶锻工艺实现锻件成形。按其形状即可为长轴类锻件，也可是短轴类锻件。热顶锻工艺通常和平锻机上进行，也可在螺旋压力机和热模锻曲柄压力机上进行。冷顶锻可在具有整体凹模或可分凹模的自动冷锻机上完成，用以生产各种标准紧固件。该类锻件可分为三组。

第一组：具有粗大部分的杆类锻件 此类锻件头部无孔或带有不通孔，原坯料直径按杆部选用。模锻工步为聚料、预成形和终成形。头部可采用开式模锻或闭式模锻。

第二组：具有透孔和不透孔的锻件 此类锻件可有通孔或不通孔，原坯料直径由工艺需要确定。常用长棒料连续锻造，主要工步为聚料、冲孔、预成形、终成形、穿孔或切断等。

第三组：管类锻件 原坯料直径按锻件杆部管子的规格选用，采用单件后定位模锻。主要工步为聚料、预成形和终成形。

四、复合类型锻件

某些模锻件，兼有上述两类锻件的特征。对这些锻件可区分为下述两种。一种是具有粗大头部的长轴类锻件，例如汽车转向节。此种锻件的杆部一般都是变断面的或非圆断面的，因此一般是采用复合模锻工艺，即先按长轴类锻件进行模锻，然后再局部模锻头部。另一种是带等圆断面细长杆部的短轴类锻件，此类锻件具有一段可不变形的等圆断面杆部，仅从头部的几何形状来看，具有短轴类锻件的特征，例如汽车半轴。在大批量生产或同类型锻件品种较多的情况下，此类锻件宜于使用平锻机上模锻。平锻机模锻的主要变形工序特点是将长棒料进行多次局部锻粗和冲孔，此种锻件的细长杆部在平锻时是棒料的不变形部分。若采用一般模锻工艺，则宜于采用能进行局部锻粗成形的胎模锻和摩擦压力机上模锻，对于细长杆部，有时在模锻后还要在空气锤上用棒子进行拔长。

复杂类锻件应根据锻件的形状特点选用前三类锻件所需工步和设计方法进行。

第三节 模锻件图设计

模锻件图是确定模锻生产过程、制订工艺规范、设计锻模、检验锻件及制造锻模的依据，是模锻最重要的基本技术文件之一。锻件图是根据产品零件图设计的。它可分为冷锻件图和热锻件图。冷锻件图用于最终锻件检验，也是机械加工部门制订加工工艺、设计加工夹具的依据，一般冷锻件图简称锻件图。热锻件图是根据冷锻件图设计的，用于锻模的设计和制造，所以又被称为“制模用锻件图”。

各种不同模锻设备所生产的模锻件，其锻件图设计有许多相同之处，但又有其不同特点。本节以锤上模锻件锻件图设计为重点，对其它模锻设备上模锻锻件图只介绍其设计特点。

锻件图设计主要包括以下内容：

- 1) 选择分模面的位置和形状;
- 2) 确定机械加工余量、余块和锻件公差;
- 3) 确定模锻斜度;
- 4) 确定圆角半径;
- 5) 确定冲孔连皮的形式和尺寸;
- 6) 制定锻件技术条件;
- 7) 绘制锻件图。

一、锤上模锻锻件图设计

1. 分模面

分模面表现在锻件分模位置上是一条封闭的锻件外轮廓线。分模面位置和形状选择得正确与否会影响到锻件成形、锻件出模、锻件质量、材料利用率和锻模、切边模制造的复杂程度等。选择分模位置的最基本原则是：保证锻件容易从锻模模膛中取出，锻件形状尽可能与零件形状相同。此外，应争取获得锻粗充填成形的好效果。为此，锻件分模位置应选择在其具有最大的水平投影尺寸的位置上。如图7-6所示的连杆锻件，分模位置应选在A-A线上，而不应是B-B线或C-C线。

在保证上述基本原则的基础上，确定开式模锻的分模位置时，为提高锻件质量和生产过程的稳定性，还应满足下列要求：

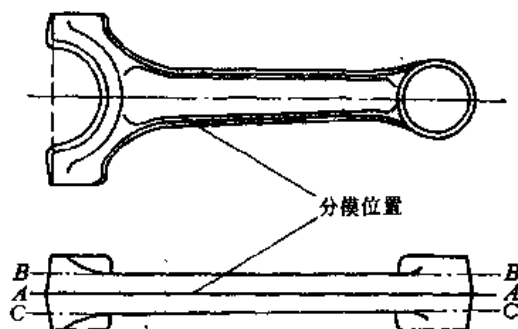


图7-6 连杆锻件分模位置

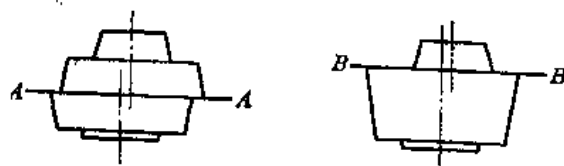


图7-7 齿轮锻件分模位置

1) 为了便于发现上、下模在模锻过程中的错移，分模位置应选在锻件侧面的中部，如图7-7所示，齿轮类锻件分模位置选在A-A线是正确的。

2) 为了使锻模结构简单，并防止上、下模错移，分模位置应尽可能用直线式，如图7-8中采用图a所示分模位置是合理的。

3) 头部尺寸较大的长轴类锻件，不宜用直线式分模，如图7-9所示。为使锻件较深尖角处能充满，应用折线式分模，使上、下模的模膛深度大致相等。

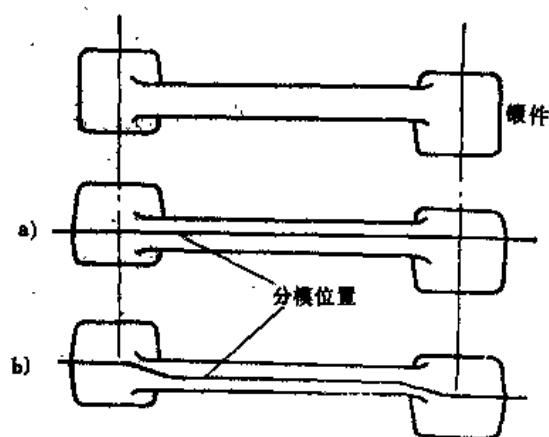


图7-8 锻件分模位置

4) 为了便于锻模、切边模加工制造和减少金属损耗，当圆饼类锻件的 $H \leq D$ 时，应取径向分模，如图7-10b所示，不应选图7-10c所示的轴向分模。

5) 有金属流线方向要求的锻件, 应考虑锻件工作时的受力特点。如图7-11所示锻件, I-I处在工作中承受剪应力, 其流线方向应与剪切方向相垂直, 因此应取I-I为分模位置。

2. 机械加工余量和锻件公差

普通模锻方法尚不能满足机械零件对形状和尺寸精度、表面粗糙度的要求, 因此, 零件全部表面或部分表面在模锻后需机械加工。在机械加工表面需留有机加工余量, 并给出适

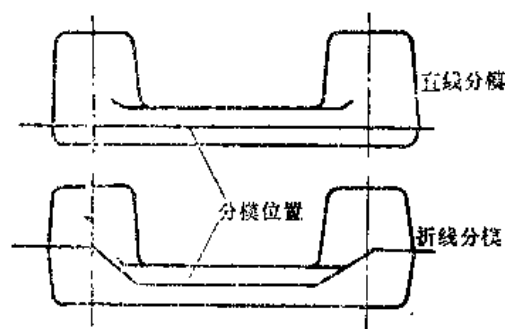


图7-9 锻件分模位置

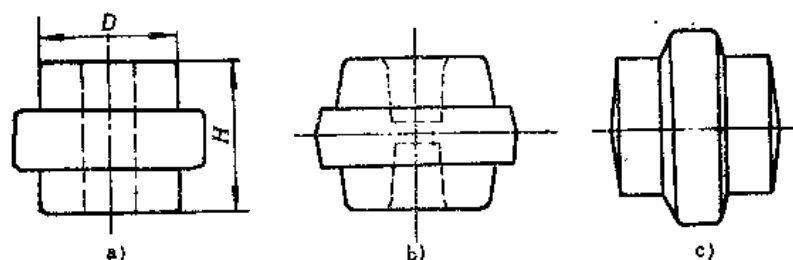


图7-10 圆饼类锻件分模位置
a) 零件图 b) 径向分模 c) 轴向分模

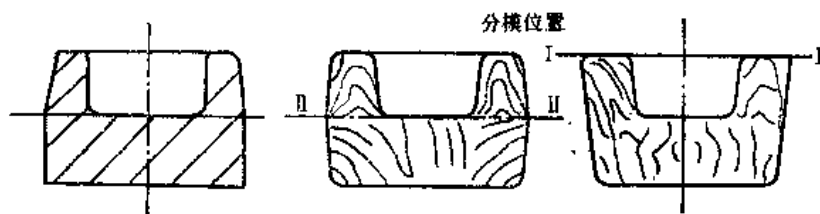


图7-11 有流线要求锻件的分模位置

当的锻件公差。

普通模锻件达不到零件要求的主要原因是: 毛坯在高温下产生表面氧化、脱碳以及合金元素蒸发或其它污染现象, 甚至产生表面力学性能不合格或其它缺陷, 导致必须从锻件表面加工掉一层金属, 才能保证零件尺寸精度、表面粗糙度和力学性能的要求; 毛坯体积变化及终锻温度波动, 锻件尺寸不易控制; 由于锻件出模的需要, 模膛侧壁必须带有斜度, 因此锻件侧壁需增加敷料; 模膛磨损和上、下模错移, 导致锻件尺寸出现偏差; 形状复杂的零件, 不能用模锻方法直接成形。综上所述, 模锻件必须加上机械加工余量和锻件公差。

锻件图尺寸与零件图尺寸的关系可参考第五章第三节。锻件上凡是需机械加工的表面, 都应附加机械加工余量, 锻件尺寸应为零件相应尺寸与机械加工余量之和, 而对于内孔尺寸应为零件相应尺寸与机械加工余量之差。此外, 对于重要的受力件, 要求100%取样试验, 或者为了检验与机械加工定位的需要, 还需考虑必要的工艺余块。机械加工余量的大小与零件的形状复杂程度和尺寸、加工精度、表面粗糙度、锻件材质和模锻设备等因素有关。过大

的加工余量，将增加切削加工量和金属损耗；加工余量不足，则将使锻件废品率增加。

由于受到多种工艺因素的影响，锻件实际尺寸不可能与名义尺寸相同，无论在高度方向还是水平方向都会有一定偏差，因而对锻件应规定允许的尺寸偏差范围，这对于控制锻模使用寿命和锻件检验都是必要的。锻件尺寸公差具有非对称性，即正偏差大于负偏差。这是由于高度方向影响尺寸发生偏差的根本原因是锻不足，而模膛底部磨损及分模面压陷引起的尺寸变化是次要的。水平方向的尺寸公差也是正偏差大于负偏差，这是因为模锻中模膛磨损和锻件错移是不可避免的现象，而且均属于增大锻件尺寸的影响因素。此外，正偏差的大小不会导致锻件报废，正偏差大些对稳定工艺、提高锻模使用寿命有好处，因此正偏差值有所放宽。

确定锻件机械加工余量和锻件公差的方法较多，各工厂采用方法不同。但可归纳为按锻件形状和按设备吨位两种方法。国家已颁布了“钢质模锻件公差及机械加工余量”标准，GB13362—90。模锻件的加工余量，根据估算锻件重量、加工精度及锻件复杂系数查表确定。锻件公差可根据锻件的尺寸、重量、精度级别、形状复杂系数以及锻件材质系数等因素查表确定。主要公差项目有：长度、宽度、高度公差，错差，残留飞边公差，直线度和平面度公差，中心距公差，表面缺陷等。各影响因素的确定方法如下：

(1) 锻件重量和尺寸 锻件重量根据锻件图的名义尺寸进行计算，在锻件图未设计前可根据锻件大小初定余量进行计算，并可按此重量查表确定公差和余量。

(2) 锻件形状复杂系数 锻件形状复杂系数(S)是锻件重量或体积(G_d, V_d)与其外廓包容体的重量或体积(G_b, V_b)的比值，即：

$$S = \frac{G_d}{G_b} = \frac{V_d}{V_b}$$

圆形锻件的外廓包容体重量 G_b 和体积 V_b (图7-12) 为：

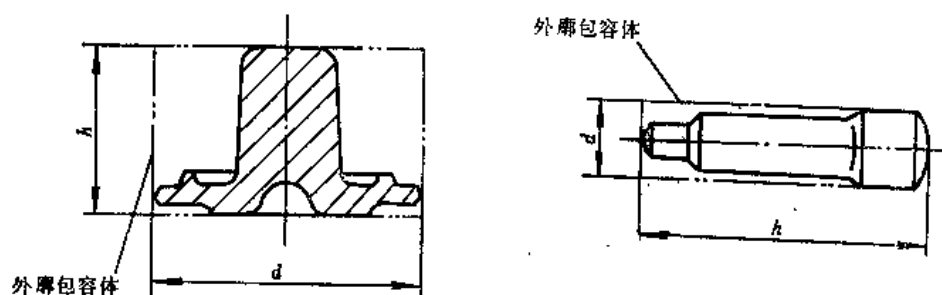


图7-12 圆形锻件的外廓包容体

$$G_b = \frac{\pi}{4} d^2 h \gamma \quad V_b = \frac{\pi}{4} d^2 h$$

式中 γ ——锻件所用材料密度。

非圆形锻件的外廓包容体重量 G_b 和体积 V_b (图7-13) 为：

$$G_b = l b h \gamma \quad V_b = l b h$$

锻件形状复杂系数可分为四个等级，见表7-3。

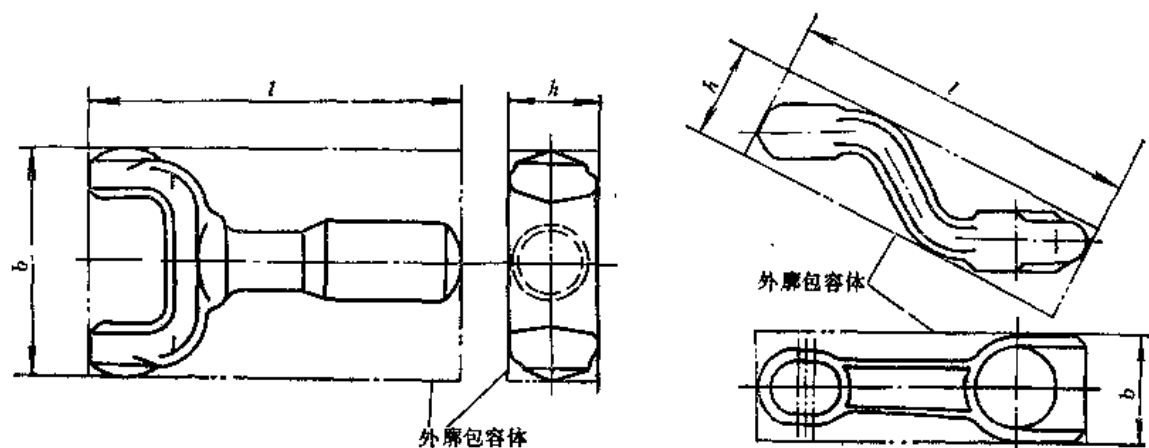


图7-13 非圆形锻件的外廓包容体

表7-3 锻件形状复杂程度等级

级 别	代 号	形状复杂系数值	形状复杂程度
I	S_1	0.63~1	简 单
II	S_2	0.32~0.63	一 般
III	S_3	0.16~0.32	较 复 杂
IV	S_4	≤ 0.16	复 杂

(3) 锻件材质系数 材质系数是按材料可锻性难易程度而划分等级的。材质系数不同, 公差不同。钢质模锻件可分为 M_1 和 M_2 两级。

M_1 : 含碳量小于0.65%的碳钢或合金元素总含量小于3.0%的合金钢。

M_2 : 含碳量大于或等于0.65%的碳钢或合金元素总含量大于或等于3.0%的合金钢。

(4) 锻件精度等级 钢质模锻件公差一般分为两级: 普通级和精密级。普通级公差系指用一般模锻方法能达到的精度公差。精密级公差有较高的精度, 适用于精密锻件。

模锻件机械加工余量和锻件公差与多种因素有关, 除上述因素外, 还与锻造加热等工艺条件、热处理变形量、校正的难易程度、机械加工的工序设计等因素有关。因此, 在确定机械加工余量和锻件公差时, 除应根据主要影响因素查表确定外, 尚应考虑到其它因素的影响, 并与机械加工部门协商决定。

3. 模锻斜度

为使锻件成形后顺利地由模膛中取出, 锻件侧表面上必须带有斜度, 称为模锻斜度。模锻斜度可以是锻件侧表面上附加的斜度, 也可以是侧表面上的自然斜度。锻件外壁上的斜度称为外模锻斜度(α), 锻件内壁上的斜度称为内模锻斜度(β)(图7-14)。

模锻时金属被压入模膛后, 锻模也受到弹性压缩, 外力去除后, 模壁要弹性恢复而夹紧

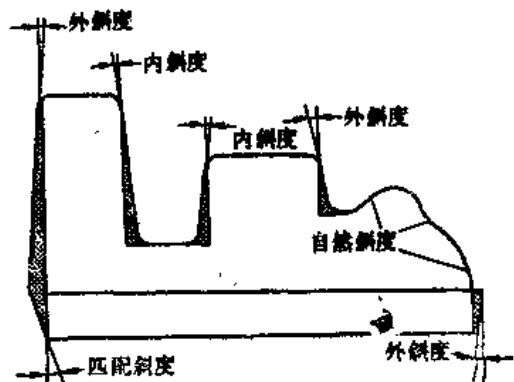


图7-14 锻件上的模锻斜度

锻件。同时,由于金属与模壁间有摩擦存在,故锻件不易取出。为了易于取出锻件,模壁需要一定的斜度 α ,模锻好的锻件侧面也具有相同斜度 α 。这样,锻件在模膛里成形后,模壁就会产生一个脱模分力 $F\sin\alpha$ 来抵消模壁对锻件的摩擦阻力 $F_T\cos\alpha$,从而减少取出锻件所需的力(图7-15)。即

$$F_{\text{取}} = F_T\cos\alpha - F\sin\alpha = F(\mu\cos\alpha - \sin\alpha)$$

从式中可看出,模锻斜度 α 值越大,取出力 $F_{\text{取}}$ 就越小。 α 大到一定值后锻件会自行从模膛中脱开。但由于 α 的加大会增加金属的消耗和机械加工余量,同时,模锻时金属所受到的模壁阻力也大,使金属充填困难。因此,在保证锻件能顺利取出的前提下,模锻斜度应尽可能取小值。

模锻斜度与锻件形状和尺寸、斜度的位置、锻件材料等因素有关。钢质模锻件的模锻斜度可按GB12361—90“钢质模锻件通用技术条件”的规定确定。对于窄而深的模膛,锻件难以取出,应采用较大的斜度。锻件内模锻斜度 β 应比外模锻斜度 α 大一级,因锻件在冷缩时,外壁趋向离开模壁,而内壁则包在模膛凸出部分不易取出。不同模锻材料所需模锻斜度不同,铝、镁合金较钢锻件和耐热合金锻件所需模锻斜度小。

模膛上的斜度是用指状标准铣刀加工而成,所以模锻斜度应选用 3° 、 5° 、 7° 、 10° 、 12° 、 15° 等标准度数,以便与铣刀规格相一致。同一锻件上的外模锻斜度或内模锻斜度不宜用多种斜度,一般情况下,内外模锻斜度各取其统一数值。

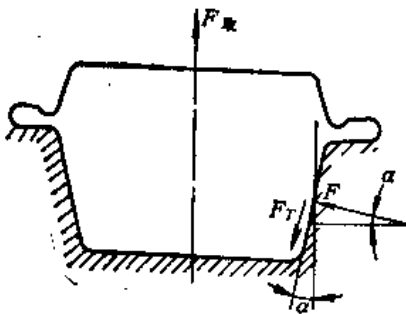


图7-15 锻件出模受力分析

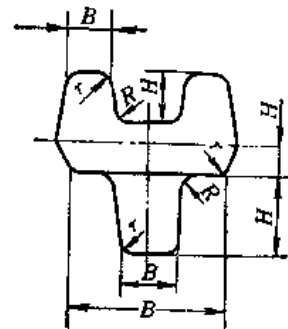


图7-16 模锻件的圆角半径

在确定模锻斜度时还应注意以下几点:

1) 为使锻件容易从模膛中取出,对于高度较小的锻件可以采用较大的斜度。如生产中对高度小于50mm的锻件,若查得的斜度为 3° 时,应改为 5° ;对高度小于30mm的锻件,若查得的斜度为 3° 或 5° 时,均改为 7° 。此时因锻件高度不大,由于增加斜度而多消耗的金属量不多。

2) 应注意上、下模模膛深度不同的模锻斜度的匹配关系,此时称为匹配斜度(图7-14)。匹配斜度是为了使分模线两侧的模锻斜度相互接头,而人为地增大了的斜度。

3) 自然斜度是锻件倾斜侧面上固有的斜度,或是将锻件倾斜一定角度所得到的斜度。只要锻件能够形成自然斜度,就不必另外增设模锻斜度。

4. 圆角半径

锻件上的圆角半径对于保证金属流动、提高锻模寿命、提高锻件质量和便于出模等十分重要。因此在锻件上各相交表面处必须做出圆角,不允许呈尖角状(图7-16)。

锻件上的凸圆角半径 r 称为外圆角半径。凹圆角半径 R 称为内圆角半径。锻件上的外圆角相当于模具模膛上的凹圆角，其作用是避免锻模在热处理时和模锻过程中因应力集中导致模具开裂，并保证锻件充满成形。如果外圆角半径过小，金属充满模膛的相应处则十分困难，而且容易引起锻模崩裂（图7-17）。若外圆角半径过大，机械加工余量将受到影响。锻件上的内圆角相当于模具模膛上的凸圆角，其作用是使金属易于流动充填模膛，防止产生折迭和模膛过早被压塌（图7-17，图7-18）。如果锻件内圆角半径过小，模锻时金属流动形

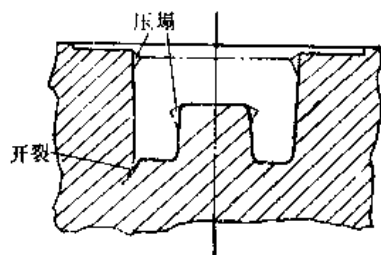


图7-17 圆角半径过小对模具的影响

成的纤维会被割断（图7-19），导致力学性能下降；还可能因此产生折迭，使锻件报废；或使模具模膛产生压塌变形，影响锻件出模。若内圆角半径太大，将使机械加工余量和金属损耗增加。对某些锻件，内圆角半径过大，会使金属过早流失，导致充不满现象发生。

圆角半径与锻件形状和尺寸有关。锻件高度尺寸大，圆角半径也应增大，其值可按 GB12361—90 “钢质模锻件技术条件” 的有关规定确定。

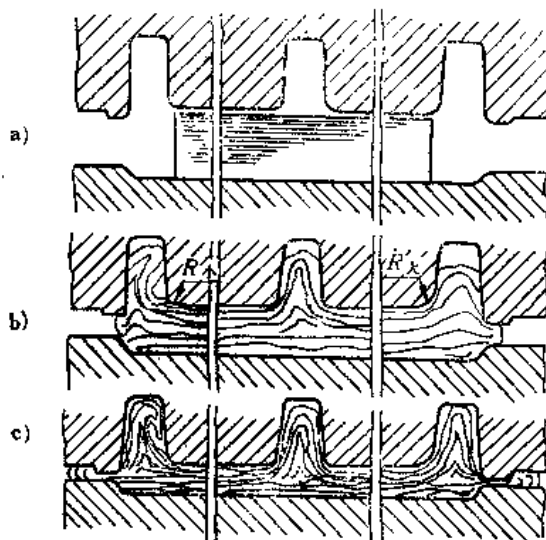


图7-18 折迭与圆角半径的关系

a) 模锻前情况 b) 模锻中间情况 c) 模锻最后情况



图7-19 圆角半径对金属纤维的影响

在确定锻件圆角半径时应注意以下两点：

- 1) 为便于制造模具所用刀具标准化，圆角半径 (mm) 应按以下标准数值选取：1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、5.0、6.0、8.0、10.0、12.0、15.0、20.0、25.0、30.0。
- 2) 为保证锻件凸角处的最小余量，有倒角时，取 $r_1 = \text{余量} + \text{零件的倒角值}$ ；无倒角时，取 $r_2 = \text{余量}$ 。

5. 冲孔连皮

对于有内孔的模锻件，锤上模锻不能直接锻出透孔，必须在孔内保留一层连皮，形成盲孔，然后在切边压力机上冲除。连皮厚度应设计合理，若连皮过薄，锻件成形需要较大的打击力并容易发生锻不足现象，从而导致模膛凸出部分加速磨损或打塌；若连皮太厚，会使锻

件冲除连皮困难,使锻件形状走样并造成金属浪费。所以在设计有内孔的锻件时,必须正确设计连皮的形状和尺寸。

(1) 平底连皮 (图7-20) 平底连皮是较常用的一种形式,通常用于 $d < 2.5h$, 或 $25\text{mm} < d < 60\text{mm}$ 的孔。连皮厚度 s 可按图7-21确定或按下式计算:

$$s = 0.45\sqrt{d - 0.25h} - 5 + 0.6\sqrt{h}$$

式中 d ——锻件内孔直径(mm);

h ——锻件内孔高度之半(mm)。

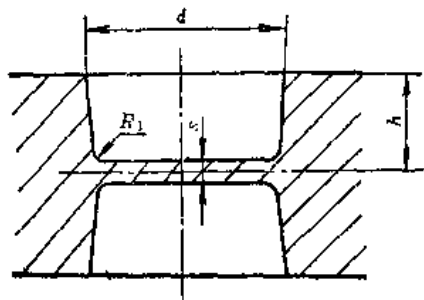


图7-20 平底连皮

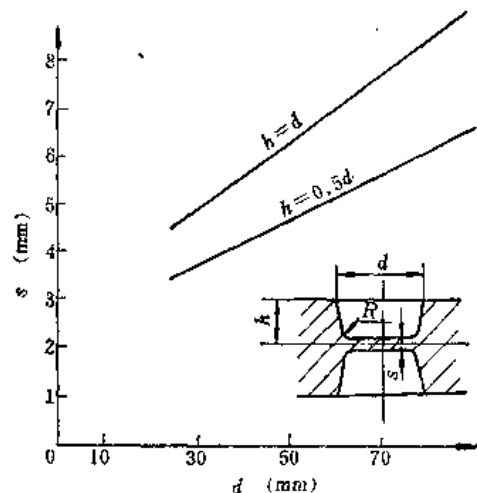


图7-21 平底连皮厚度

由于模锻成形过程中冲孔部分金属流动激烈,因此连皮处的圆角半径 R_1 应比锻件其它圆角半径 R 大些,可按下式确定:

$$R_1 = R + 0.1h + 2\text{mm}$$

(2) 斜底连皮 (图7-22) 斜底连皮用于较大的内孔,一般当 $d > 2.5h$ 或 $d > 60\text{mm}$ 时采用。对于较大的孔,若仍用平底连皮,则锻件内孔处的多余金属不易向四周排除,而且由于金属流动激烈容易在连皮四周处产生折迭,模膛内的冲头也会过早地磨损或压塌。为此采用斜底连皮。斜底连皮的特点是,由于增加了连皮周边的厚度,既有助于排除多余金属,又可避免形成折迭。但斜底连皮在被冲除时容易引起锻件变形。斜底连皮主要尺寸为:

$$s_1 = 1.35s$$

$$s_2 = 0.65s$$

$$d_1 = (0.25 \sim 0.3)d$$

式中 s ——按平底连皮计算的厚度(mm);

d_1 ——考虑坯料在模膛中定位所需平台直径(mm)。

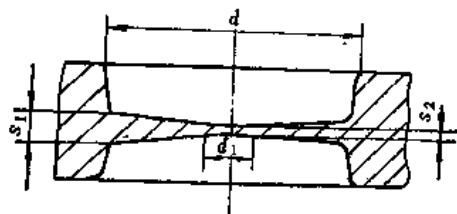


图7-22 斜底连皮

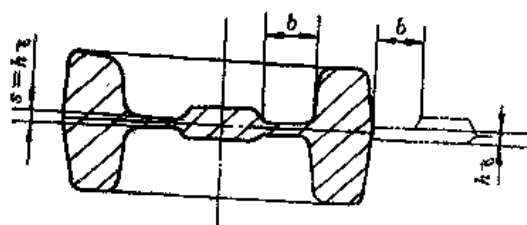


图7-23 带仓连皮

(3) 带仓连皮 (图7-23) 若锻件需采用预锻成形,对于比较大的孔,可在预锻模膛中采用斜底连皮,而在终锻模膛中采用带仓连皮。终锻成形时,内孔中多余的金属不是全部向

外排出，而是挤入连皮仓部，这样可避免折迭产生。带仓连皮的优点是周边较薄，易于冲除，且锻件形状不走样。

带仓连皮的厚度 s 和宽度 b ，按飞边槽桥口高度 h 和桥口宽度 b 确定。仓部体积应足够容纳预锻后斜底连皮上多余的金属。

(4) 拱底连皮 (图 7-24) 锻件内孔大 ($d > 15h$)，且高度又较小时，金属向外流出更为困难，仍用平底连皮是不合适的，应采用拱底连皮。拱底连皮可避免在连皮周边产生折迭或穿筋裂纹；可以容纳更多的金属；且冲切时比较省力。其尺寸可按式确定：

$$s = 0.4\sqrt{d}$$

$$R_2 = 5h$$

R_1 由作图选定

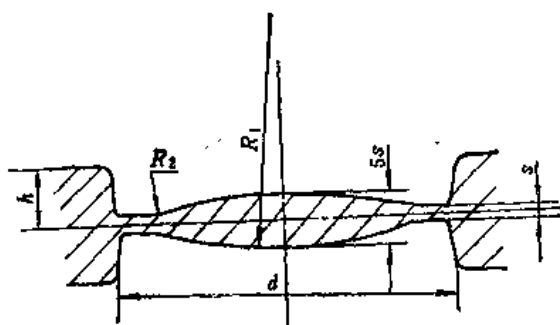


图7-24 拱底连皮

其尺寸可按式确定：

模锻件的连皮将损耗一部分金属，为了节约金属，在生产中可把连皮用来生产其它小锻件，或者同时模锻出两种锻件，常称为合锻或复合模锻。

对于直径小于25mm的小孔一般不在锻件上作出，因为对于这样小的孔，锻模的冲头部分极易压塌磨损。有时为了使锻件充填饱满，采用压凹的形式，此时不是为了节省金属，模锻后也不冲穿，例如连杆小头常采用压凹，以利小头成形。

6. 锻件图和锻件技术条件

锻件图 (冷锻件图) 是在零件图的基础上，加上机械加工余量、余块或其它特殊留量后绘制的图，图中锻件外形用粗实线表示，零件外形用双点划线表示，以便了解各处的加工余量是否满足要求。锻件的公称尺寸与公差注在尺寸线的上面，而零件的尺寸注在尺寸线下面的括号内。图7-25给出了齿轮和立柱的锻件图实例，齿轮锻件图为示意图，未详细注明尺寸公差；立柱锻件图是生产用图。

锻件图中无法表示的有关锻件质量和检验要求的内容，均应列入技术条件中说明。一般锻件技术条件包括以下内容：

- 1) 未注明的模锻斜度和圆角半径；
- 2) 允许错移量和残余飞边的宽度；
- 3) 允许的表面缺陷深度；
- 4) 锻后热处理方法及硬度要求；
- 5) 表面清理方法；
- 6) 需要取样进行金相组织和力学性能试验时，应注明在锻件上的取样位置；
- 7) 其它特殊要求，如直线度、平面度等。

模锻件技术条件可参照“钢质模锻件机械加工余量与公差标准”(GB12362—90)和“钢质模锻件通用技术条件”(GB12361—90)的有关规定制定。

二、热模锻压力机上模锻件图设计特点

热模锻压力机上模锻件图设计的原则、内容、方法与锤上模锻基本相同。锻件的机械加工余量和锻件公差仍按“钢质模锻件的公差及机械加工余量”标准(GB12361—90)的规定确

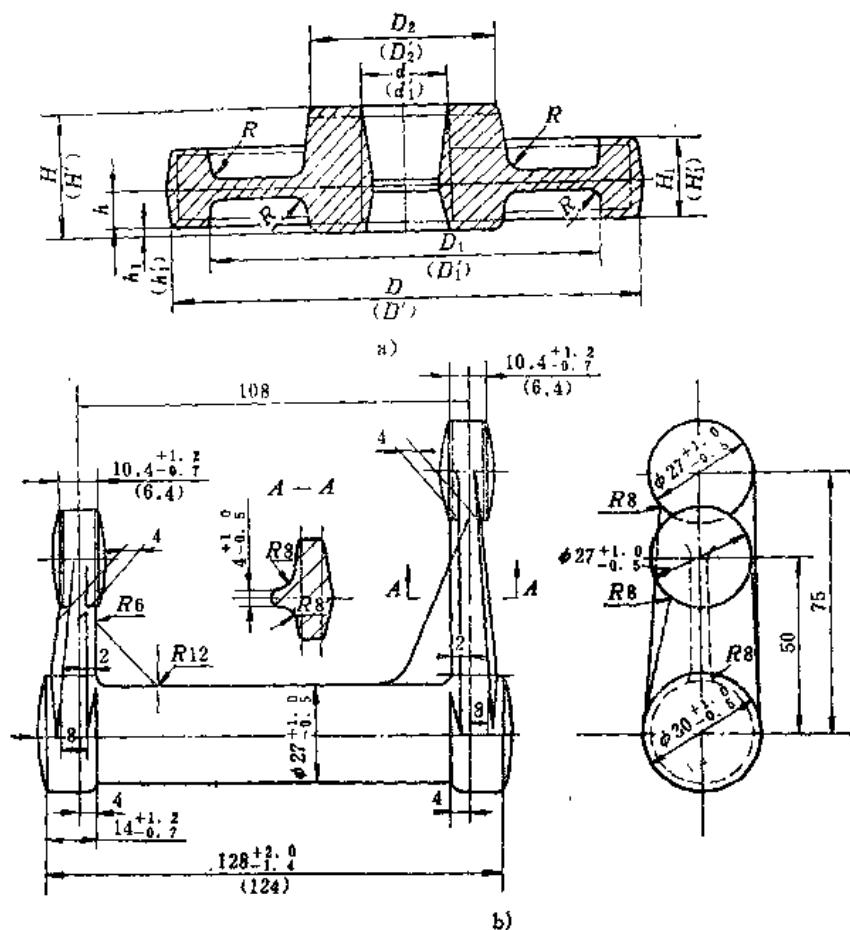


图7-25 锻件图
a) 齿轮 b) 立柱

定。根据热模锻压力机设备特点其锻件图设计有以下特点。

1) 由于热模锻压力机有顶出装置, 使锻件有可能顺利地由较深的模膛内取出, 因此可按成形要求较灵活地选择分模面。例如图7-26所示带有粗大头部的杆形锻件, 在锤上模锻时应以 A-A 为分模面, 头部沿轴向的内孔无法锻出, 飞边体积较多, 金属浪费大。若在压力机上模锻, 因模锻后可用顶杆将锻件顶出, 则可选取 B-B 为分模面, 将坯料垂直放在模膛中局部镦粗并冲孔成形, 可节约金属, 减少机械加工量。

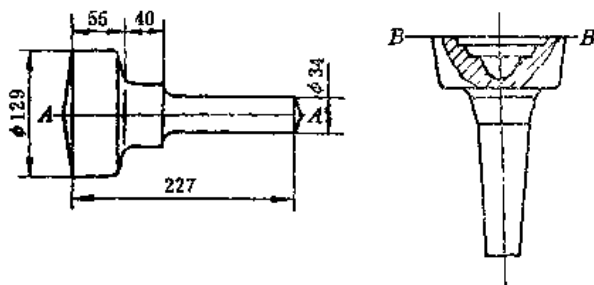


图7-26 杆形锻件的两种分模方法

2) 热模锻压力机上模锻不用顶杆时, 模锻件斜度与锤上模锻相同。若采用顶杆取出锻件, 模锻斜度一般比锤上模锻件小一级。外斜度为 $3^{\circ} \sim 7^{\circ}$, 一般常用 5° ; 内斜度为 $7^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。

三、螺旋压力机上模锻件图设计特点

螺旋压力机模锻锻件图设计过程和设计原则与锤上模锻件基本相同。但考虑到螺旋压力机结构及模锻工艺特点, 对于分模面位置选择和模锻斜度等参数的数值在设计中应有所区

别。

1. 分模面

对于长轴类锻件, 分模面选择原则与锤上模锻相同。但是, 由于螺旋压力机上开式模锻多为无钳口模锻, 当不采用顶杆装置时, 应特别注意减少模膛深度方向的尺寸, 以利于锻件出模。

对于顶镦类锻件和在两个方向上有凹坑的锻件, 如图7-27所示。由于螺旋压力机带有顶出装置, 可顶出锻件或凹模, 可采用组合凹模, 所以, 根据锻件形状的不同, 分模面的数目可以是一个或多个。同时, 对于上述两种锻件多采用无飞边或小飞边模锻, 上下模的分模位置基本固定, 一般设在金属最后充满处。

2. 机械加工余量和锻件公差

锻件机械加工余量和公差与锤上模锻相同, 可按“钢质模锻件的公差和余量标准 (GB12362—90) 确定。对于带有杆部的顶镦类锻件, 因杆部不变形, 可参考平锻机上模锻的有关标准。

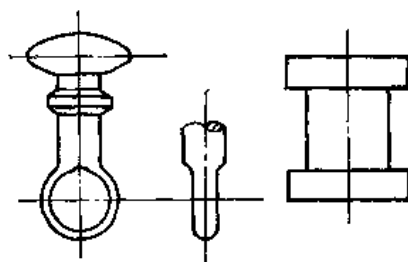


图7-27 两个方向有凹坑的锻件

3. 模锻斜度和圆角半径

螺旋压力机上模锻斜度的大小, 主要取决于有无顶杆装置, 同时也与锻件尺寸和材料种类有关。采用顶杆时其模锻斜度可减少1~2级。钢质模锻件的模锻斜度可按GB12361—90确定。

圆角半径(r 、 R)大小主要取决于锻件材质和尺寸, 钢质模锻件的圆角半径按GB12361—90选用。

对于有色金属模锻件的模锻斜度和圆角半径可查阅有关资料确定。

四、平锻机上模锻件图设计特点

由于平锻机设备的特点, 主要适用于生产顶镦类锻件, 其锻件图的设计方法与模锻锤、热模锻压力机、螺旋压力机上模锻有较多区别。

1. 分模面选择

平锻机具有两个互相垂直的分模面, 分别由凸模与凹模、固定凹模与活动凹模组成。因此, 可成形带双凸缘的锻件(图7-27)。

平锻常采用闭式模锻与开式模锻两种形式。对于使用前挡板的锻件, 因能控制变形金属的体积, 多采用闭式模锻(图7-28a)。对于使用后挡板或钳口挡板的锻件, 多采用开式模锻(图7-28b)。对于形状复杂的锻件, 虽然使用前挡板, 但也采用开式模锻, 以便利用飞边槽存贮多余金属。

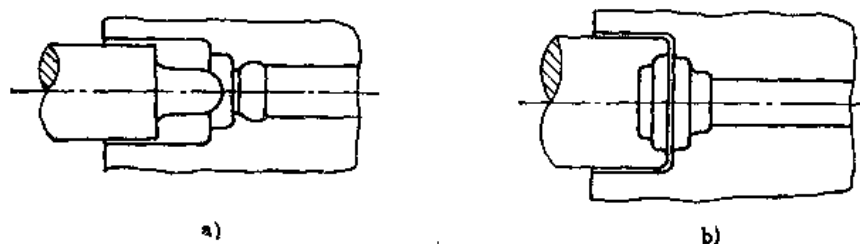


图7-28 模锻形式
a) 闭式模锻 b) 开式模锻

分模面位置应选择锻件最大轮廓处。图7-29 I、II、III分别为分模面选在锻件最大轮廓的前端面、中间和后端面的三种型式。型式I的优点是凸模结构简单，可保证头部和杆部的同心度，缺点是在切边时易产生纵向毛刺。型式II锻件切边质量好，但当凸凹模调整不好时，易产生错移。型式III锻件全部在凸模内成形，能获得内外径和前后台阶（若锻件形状要求）同心度好的锻件，但锻件在切边模膛内不易定位，并且锻件和坯料之间易产生错差，采用较少。

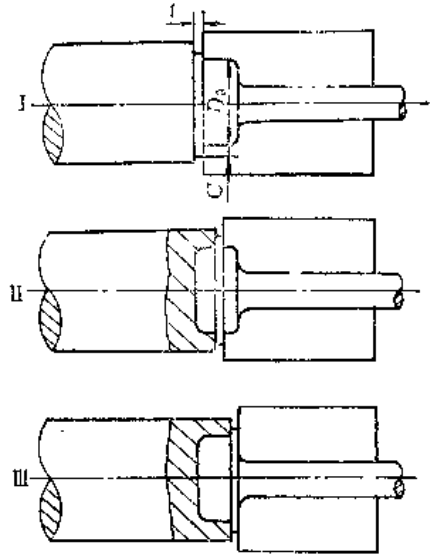


图7-29 分模面位置

2. 机械加工余量和公差

平锻件的机械加工余量可根据估算的锻件重量、加工精度和锻件形状复杂系数按GB 12362—90确定。

3. 模锻斜度

平锻件具有两个互相垂直的分模面，因此模锻斜度与锤上模锻件有所区别。

锻件在冲头内成形的部分及需采用冲头冲孔的锻件，为保证冲头在机器回程时，锻件外侧及内孔不被冲头拉毛，应在锻件外侧及内孔设置模锻斜度 α 和圆角半径 r （图7-30）。

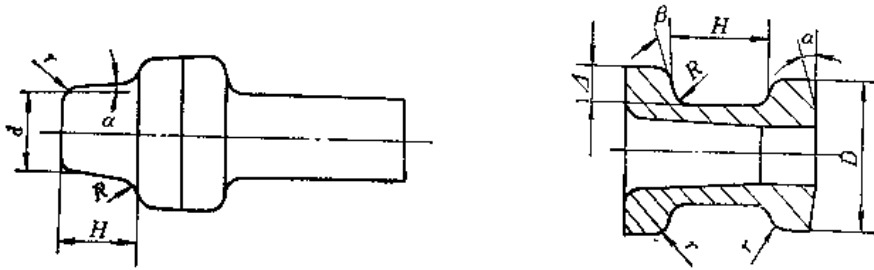


图7-30 平锻件模锻斜度及圆角半径

在凹模内成形的带双凸缘的锻件，在内侧壁上应设置模锻斜度 β ，其值由凸缘高度 Δ 决定。

平锻件的模锻斜度 α 、 β 、 r 值按钢质模锻件通用技术条件GB12361—90确定。

4. 圆角半径（图7-30）

在冲头中的成形部分

外圆角半径 $r = 0.1H + 1\text{mm}$

内圆角半径 $R = 0.2H + 1\text{mm}$

式中 H ——冲头中成形部分深度。

在凹模中的成形部分

外圆角半径

$$r = \frac{a_1 + a_2}{2} + s$$

一般应使 $r \geq 3 \text{ mm}$

式中 a_1 、 a_2 ——组成圆角相邻两边的余量值；

s ——零件的倒角值或圆角半径。

若按上式计算的圆角半径过小，可以增大相邻两边的余量以增大圆角半径，若不加大余量，而过分地增加圆角半径，就会过多地减少圆角部分的加工余量，并且容易引起由于黑皮而产生废品。

内圆角半径

$$R = 0.2\Delta + 0.1 \text{ mm}$$

一般 $R \geq 3 \text{ mm}$ ，但 R 不可过大， R 过大将使锻件重量和机械加工余量增加。

第四节 模锻工艺过程制定的内容和模锻工艺方案选择

一、模锻工艺过程制定的内容

模锻工艺过程即由坯料经过一系列加工工序制成模锻件的整个生产过程。模锻工艺过程由以下几种工序组成：

(1) 备料工序 按锻件所要求的坯料规格尺寸下料，必要时还需对坯料表面进行除锈、防氧化和润滑处理等。

(2) 加热工序 按变形工序所要求的加热温度和生产节拍对坯料进行加热。

(3) 锻造工序 可分为制坯和模锻两种工序(步)。制坯的方法较多，模锻工步有预锻和终锻，终锻是必不可少的工步。变形工序是根据锻件类型和选用的模锻设备确定的。

(4) 锻后工序 该类工序的作用是弥补模锻工序和其它前期工序的不足，使锻件最后能完全符合锻件图的要求。锻后工序包括有：切边、冲孔、热处理、校正、表面清理、磨残余毛刺、精压等。

(5) 检验工序 包括工序间检验和最终检验。工序间检验一般为抽检。检验项目包括有几何形状尺寸、表面质量、金相组织和力学性能等，具体检验项目根据锻件的要求确定。

模锻工艺过程制定包括以下内容：

1) 根据产品零件的形状、尺寸、技术要求和生产批量，结合具体生产条件，合理地选择模锻工艺方案。

2) 设计锻件图。

3) 确定所需的工序，并选择所用设备。

4) 确定模锻工艺流程并填写模锻工艺卡片。

一般模锻工艺流程如图7-31所示。某一锻件的工艺流程，要依据具体情况，对上述一般流程中的工序进行取舍，但组成工序的顺序一般不会有大的改变。

二、模锻工艺方案选择

选择合理的模锻工艺方案是锻造工艺设计的关键。选择模锻工艺方案时，应从具体生产条件出发，并综合考虑技术和经济两方面的问题。工艺方案选择的基本原则是保证锻件生产的技术可能性和经济合理性。在工艺上应满足对锻件质量和数量的要求，在经济上应使锻件生产成本低，有较好的经济效益。这里主要从技术角度说明模锻工艺方案的选择。

1. 模锻工艺的选择

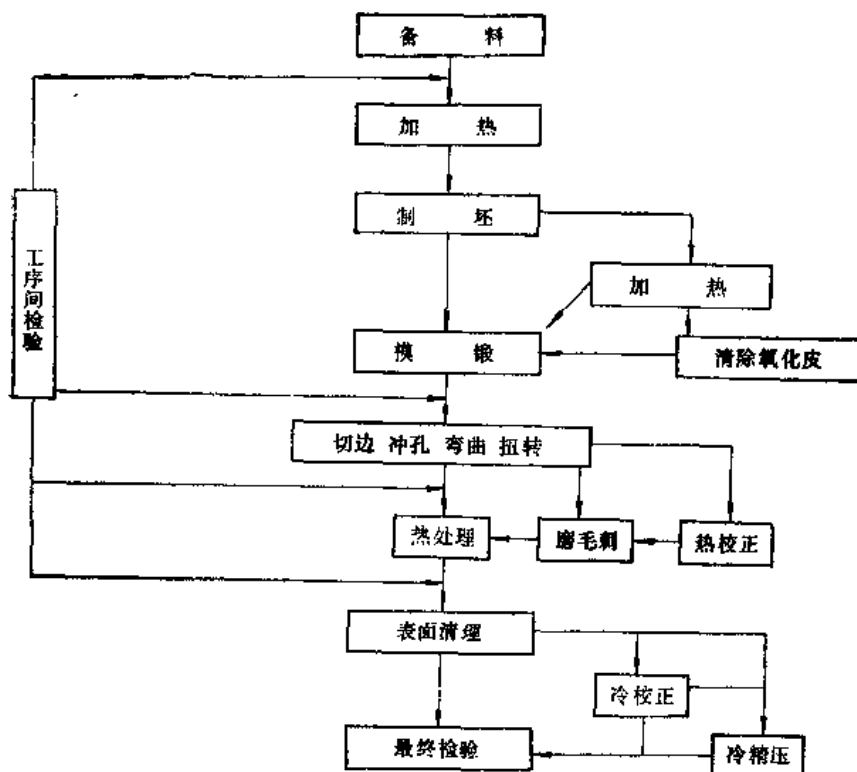


图7-31 模锻工艺的一般流程

同一锻件可以在不同设备上采用不同的工艺制造。不同的工艺方案所用的工艺装备（设备和模具等）不同，其经济效果也不同。当生产批量较大时，可采用模锻锤或热模锻压力机；若批量不太大时，可采用螺旋压力机或在自由锻锤上胎模锻及固定模锻。无论采用哪种工艺必须保证锻件的质量要求，工艺方案的选择还必须考虑工厂的具体条件，尽量根据工厂目前的设备状况选择合理的工艺方案。

2. 模锻方法的选择

模锻方法即在某种设备上锻件生产可采用的不同方法，如单件模锻、调头模锻、一火多件、一模多件、合锻等。合理选择模锻方法可以提高模锻生产率，简化模锻工步和降低材料消耗。

（1）单件模锻 对于模锻锤、热模锻压力机、螺旋压力机上模锻的锻件，通常一个坯料只锻一个锻件，尤其是较大的锻件都采用单件模锻。

（2）调头模锻 毛坯下料长度可供锻两个锻件，坯料整体加热，在第一个锻件锻完后，调转180°，用钳子夹住锻件，余下的坯料锻另一个锻件。采用这种方法可省去钳夹头，提高生产率，如图7-32所示。此种方法适用于单个锻件重2~3kg，长度不超过350mm的中、小锻

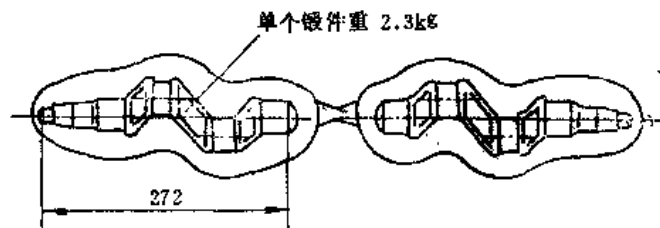


图7 32 调头模锻

件, 否则锻打、切边操作不便, 劳动强度大。对于细长、扁薄或带落差的锻件, 不宜采用调头模锻, 因在锻第二件时会使夹持着的第一个锻件变形。

(3) 一火多件 用一根加热好的棒料连续锻几个锻件, 每锻完一个锻件从棒料上分离下来, 再锻另一个锻件。一火多件是平锻机上模锻常用的锻造方法, 带杆锻件采用切断、空心锻件采用穿孔的方法使锻件分离。锤上一火多件模锻法利用切断模膛将锻件切下。

锤上模锻适于单件重量小于2.5kg的小锻件, 连续锻打的锻件数为4~6件, 件数太多时棒料过长操作不便, 而且由于最后锻造的温度过低, 影响锻模寿命和锻件质量。

(4) 一模多件 在同一模块上一次模锻数个锻件。适用于重量在0.5kg以下、长度不超过80mm的小型锻件。同时模锻的件数一般为2~3件(图7-33)。一模多件有时结合采用一火多件, 这时一根棒料所能锻造出的锻件为4~10件。

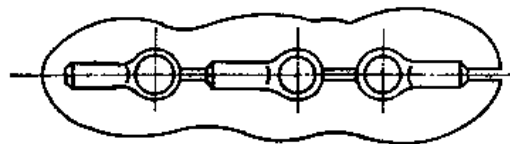


图7-33 一模多件模锻

对于截面差较大的某些锻件, 通过合理的排布, 能使金属分布均匀, 减少截面差, 简化模锻工步, 使锻件容易成形并可节省金属, 如图7-34所示。

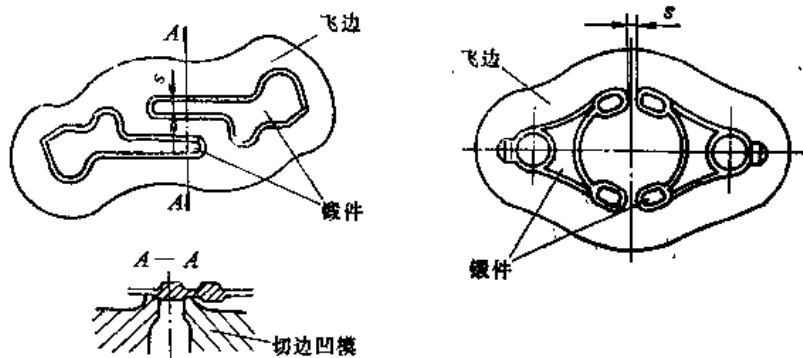


图7-34 一模多件模锻

一模多件可以大大提高生产率, 但对几个终锻模膛之间的位置精度应有更加严格的要求。

(5) 合锻 将两个不同的锻件组合在一起同时锻出, 然后再分开的锻造方法称为合锻。合锻可以使锻件易成形, 节省金属, 减少模具品种, 提高生产效率。

图7-35是连杆和连杆盖、曲轴左拐和右拐合锻的例子。图7-36是两种大小不同的圆形锻件组合一起锻造的实例。大锻件的内孔连皮用来生产小锻件, 这样可节省金属, 同时模锻出两个锻件, 提高了生产率。此种方法也可称为套锻。

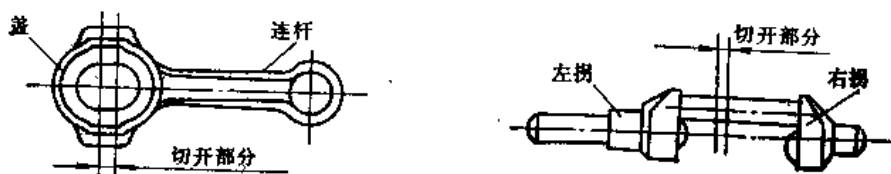


图7-35 锻件的合锻

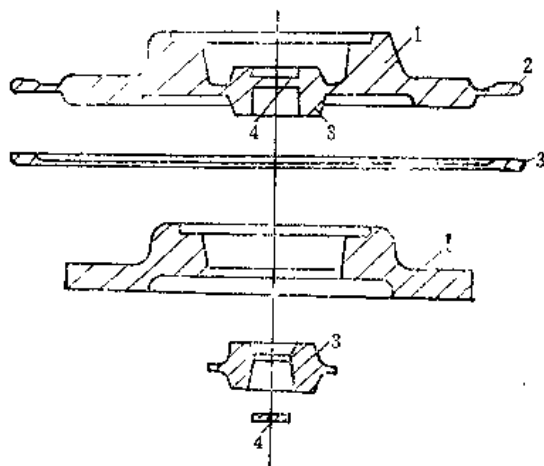


图7-36 锻件的合锻

1—大锻件 2—飞边 3—小锻件 4—连叉

第五节 模锻变形工步的确定

模锻时，坯料在锻模的一系列模膛中变形，坯料在每一模膛中的变形过程称为模锻工步。工步的名称和所用的模膛的名称相一致。例如拔长工步所用的模膛叫拔长模膛。

模锻工步根据其作用不同可分为模锻工步、制坯工步、切断工步三类。

模锻工步包括预锻工步和终锻工步，其作用是使经制坯的坯料得到最终锻件所要求的形状和尺寸。每类锻件都需要终锻工步，而预锻工步应根据具体情况决定是否采用。例如模锻时容易产生折迭和不易充满的锻件常采用预锻工步。

制坯工步的作用是改变原毛坯的形状，合理地分配坯料，以适应锻件横截面形状的要求，使金属能较好地充满模锻模膛。每类锻件所需的制坯工步是不同的，例如直长轴类锻件常用拔长、滚压、卡压等制坯工步（通常称第一类制坯工步）。而弯轴类和带枝芽的锻件除需采用第一类制坯工步外，还需采用弯曲、成形等制坯工步（通常称第二类制坯工步）。短轴类锻件一般都采用镦粗等制坯工步（通常称第三类制坯工步）。

预锻类锻件常用的制坯工步主要有积聚、冲孔。此外还有弯曲、压扁等。

主要模锻设备常用工步如下：

模锻锤模锻：拔长、滚压、卡压、成形、镦粗、压扁、预锻、终锻、切断等；

热模锻压力机模锻：镦粗、弯曲、卡压、压扁、成形、预锻、终锻等；

螺旋压力机上模锻：镦粗、压扁、卡压、弯曲、成形、预锻、终锻等。

平锻机模锻：聚集、预成形、预成形冲孔（预锻）、成形冲孔（终锻）、切边、压肩、弯曲、穿孔、切芯头、切断等。

在本节内，对长轴类和短轴类锻件仅介绍其制坯工步的选择，预锻工步的选用问题，在本书第八章中介绍。

一、长轴类锻件制坯工步选择

1. 计算毛坯

对于长轴类锻件，以模锻连杆为例，如果直接用等断面坯料在模锻模膛内锻造，坯料变形时，金属沿轴向流动的少，沿横向流动的多，近似于平面变形。因此，杆部有大量金属流

入飞边槽。不仅浪费了很多金属,而且使上、下模不能打靠。头部由于金属不足,不能充满。为了得到合格的锻件、节约金属和减少模膛磨损,应采用制坯工步,预先改变坯料的形状,改变金属沿轴向分配的情况。

坯料沿轴向的金属分配对不同锻件要求不同,合适的形状应该是在保证模膛充满的条件下,在模锻之后,锻件各处飞边均匀,亦即应使坯料上各截面的面积等于锻件上相应截面积加上飞边的截面积。按这一要求计算的坯料,通常称为计算毛坯。

计算毛坯是根据平面变形假设进行计算并经修正所得的具有圆形截面的中间坯料,其长度与锻件相等,而横截面积应等于锻件上相应截面积与飞边截面积之和。即,

$$S_{\text{计}} = S_{\text{锻}} + 2\eta S_{\text{飞}}$$

式中 $S_{\text{计}}$ ——计算毛坯截面积;

$S_{\text{锻}}$ ——锻件截面积,对于冲孔连皮及叉形锻件的内飞边应算在锻件内;

$S_{\text{飞}}$ ——飞边槽截面积;

η ——充满系数,形状简单的锻件取0.3~0.5,形状复杂的取0.6~0.8,常取0.7。

一般根据冷锻件图作计算毛坯图。首先应根据锻件的复杂程度及具体情况,从锻件图上选定具有代表性的若干个截面,计算出各截面面积 $S_{\text{计}}$ 值。然后,以计算毛坯的长度 $L_{\text{计}}$ 为横坐标,以算得的 $S_{\text{计}}$ 为纵坐标,在坐标纸上绘制计算毛坯的截面图。截面图作法如下:

通常用缩尺比 M 除 $S_{\text{计}}$,得到用直线段 $h_{\text{计}}$ 来表示的所取各截面面积值,

$$h_{\text{计}} = \frac{S_{\text{计}}}{M}$$

式中 M ——缩尺比,通常取为20~50 mm²/mm。

将计算出的 $h_{\text{计}}$ 绘制在坐标纸上,并连接各端点成光滑曲线,即得计算毛坯截面图,如图7-37所示。

因此,计算毛坯截面图的每一处高度代表计算毛坯的截面积;截面图曲线下的整个面积就是计算毛坯(锻件与飞边之和)的体积。

$$V_{\text{计}} = M A_{\text{计}}$$

式中 $V_{\text{计}}$ ——计算毛坯体积;

$A_{\text{计}}$ ——计算毛坯截面图曲线下的面积;

M ——缩尺比 (mm²/mm)。

计算毛坯上任一截面的直径 $d_{\text{计}}$ 可由下式计算:

$$d_{\text{计}} = 1.13\sqrt{S_{\text{计}}}$$

以 $L_{\text{计}}$ 为横坐标,以 $d_{\text{计}}$ 为纵坐标,在截面图的下方绘制计算毛坯直径图,见图7-37。计算坯料图包括三个组成部分,即锻件图、截面图和直径图。

根据计算毛坯截面图和直径图可计算出平均截面积 $S_{\text{均}}$ 和平均直径 $d_{\text{均}}$:

$$S_{\text{均}} = \frac{V_{\text{计}}}{L_{\text{计}}} = \frac{V_{\text{锻}} + V_{\text{飞}}}{L_{\text{计}}}, \quad h_{\text{均}} = \frac{S_{\text{均}}}{M}$$

$$d_{\text{均}} = 1.13\sqrt{S_{\text{均}}}$$

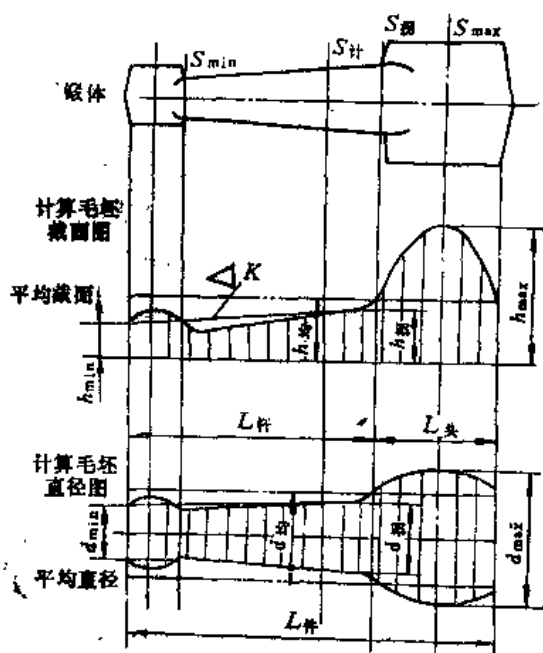


图7-37 计算毛坯图

通常将平均截面积 $S_{\text{均}}$ ($h_{\text{均}}$)和平均直径 $d_{\text{均}}$ 分别在计算毛坯截面图和直径图上用虚线表示出来。在计算毛坯直径图上, $d_{\text{计}} > d_{\text{均}}$ 处, 称为头部, $d_{\text{计}} < d_{\text{均}}$ 处, 称为杆部。头部和杆部也可由截面图上划分。

从计算毛坯截面图和直径图上都能较直观地看出中间坯料横截面积及外形的变化情况, 也说明了金属沿长度上的分配情况。所以, 计算毛坯图是长轴类锻件选择制坯工步、设计制坯模膛和确定坯料尺寸的重要依据, 在模锻工艺及模具设计中有着重要作用。

实际生产中遇到的锻件形状是千变万化的, 其计算毛坯也要较图7-37所示计算毛坯复杂, 因此, 设计中应根据其形状特点进行简化。

(1) 对头部带内孔的长轴类锻件 如连杆, 其计算坯料的截面图和直径图在头部具有突变的轮廓线, 为使制坯模膛制造简便和有利于终锻成形, 应按体积不变条件将截面图和直径图简化成圆滑的形状, 如图7-38所示。

(2) 对于弯曲轴线的锻件 应先将轴线展开成直线, 然后作计算毛坯的截面图和直径图。

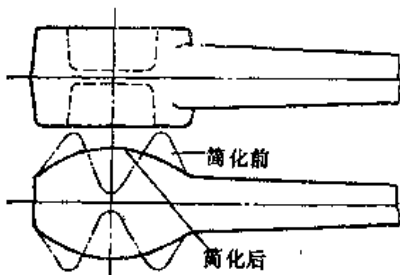


图7-38 计算毛坯轮廓简化

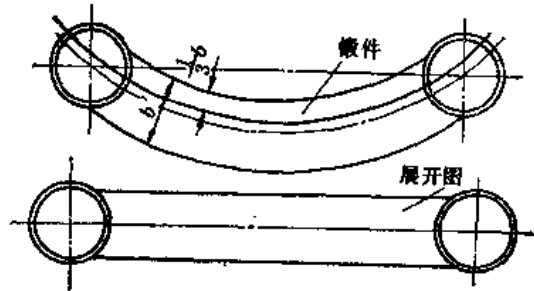


图7-39 简单弯曲件

对于曲率半径较大的简单弯曲件, 如图7-39所示, 应从锻件图上宽度内侧1/3处作为中性线将其展开成直线。

对于复杂弯曲件, 如多拐曲轴, 坯料在变形过程中明显被拉长, 因此, 不应将轴线展直, 而是当作直轴线锻件作计算毛坯。

对于锻件为 90° 弯曲的情况, 如图7-40所示, 轴线展开时, 两端的 L_1 和 L_3 长度不变, 只有 90° 弯曲部分 L_2 要考虑到拉长现象。有以下三种展直方案:

1) $L_2 = A12345B$ 折线长度, 用于弯曲部分带有枝芽的锻件。1、2、3、4、5各点是断面上的重心。

2) $L_2 = \widehat{AB}$, 圆弧半径为 OA , 用于弯曲时拉长现象较明显的情况。

3) $L_2 = \overline{AB}$, 用于没有枝芽的弯曲件, 即 $x = 0$ 。

(3) 复杂计算毛坯的简化 对于某些形状比较复杂的锻件, 其计算毛坯具有多头多杆时, 称为复杂计算毛坯, 如图7-41所示。

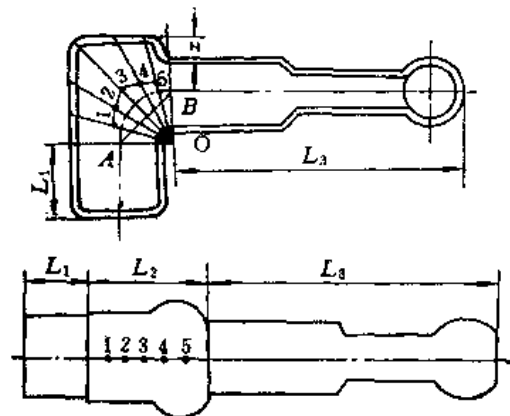


图7-40 90° 弯曲锻件展直

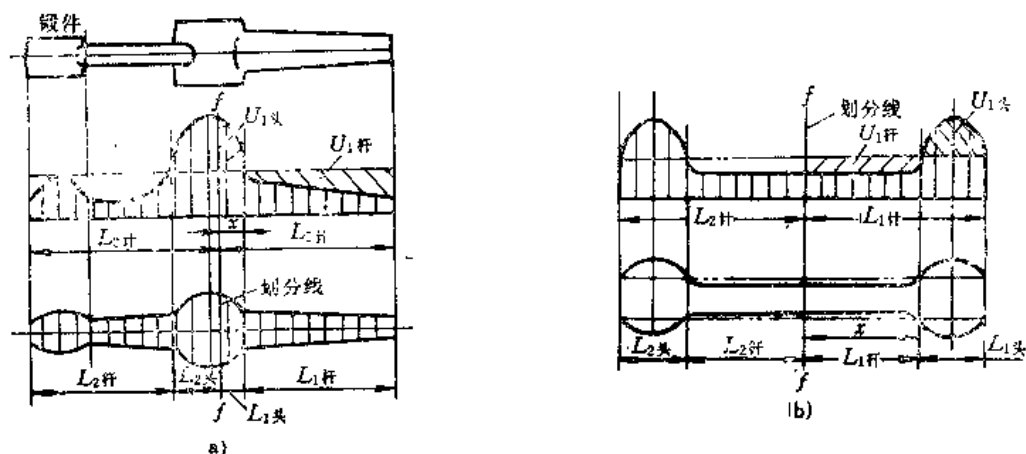


图7-41 复杂计算毛坯的转化

对于复杂计算毛坯，应根据截面图上面积相等的原则将其转化成几个简单计算毛坯，再按简单计算毛坯选择制坯工步。以图7-41所示锻件为例，转化从一端开始，使杆部多余的金属 $U_{1杆}$ 与头部缺少的金属 $U_{1头}$ 相等（图7-41a），或头部缺少的金属 $U_{1头}$ 与杆部多余的金属 $U_{1杆}$ 相等（图7-41b），从而找出两个简单计算毛坯的分界线 $f-f$ 。

2. 制坯工步选择

长轴类锻件常需采用第一类制坯工步，即拔长、滚压和卡压工步，使原坯料获得近似计算毛坯的形状。从对改变坯料的截面和使金属作轴向流动的能力来看，拔长工步最大，滚压工步次之，卡压工步最小。至于选用哪一种工步制坯需根据具体锻件的计算毛坯来确定。

如果计算毛坯的头部相对尺寸越大，则金属需要在头部的聚集量越多；若锻件的相对长度越长，则金属需要流动的距离也越大；如果锻件大，原坯料重，则在其它条件相同时金属需要转移的绝对量也越大。制坯变形工作量的大小可用以下繁重系数表示：

$$\alpha = \frac{d_{max}}{d_{均}}$$

$$\beta = \frac{L_{杆}}{d_{均}}$$

$$k = \frac{d_{拐} - d_{min}}{L_{杆}}$$

式中 α ——金属流入头部的繁重系数；
 β ——金属沿轴向流动的繁重系数；
 k ——杆部斜率；

d_{max} ——计算毛坯的最大直径；

d_{min} ——计算毛坯的最小直径；

$d_{拐}$ ——杆部与头部转接处的直径，即拐点直径。

拐点直径按照杆部体积守恒转化为锥形的大头直径（图7-37），可按下列式计算：

$$d_{拐} = \sqrt{3.82 \frac{V_{杆}}{L_{杆}} - 0.75 d_{min}^2 - 0.5 d_{min}^2}$$

式中 $V_{杆}$ ——计算毛坯杆部体积；
 $L_{杆}$ ——计算毛坯杆部长度。

拐点直径 $d_{拐}$ 也可以直接由计算毛坯的直径图或截面图求出近似值。

$$d_{拐} = 1.13 \sqrt{k \beta M}$$

α 值越大,表明流到头部的金属体积越多; β 值越大,则金属轴向流动的路程越长; k 值越大,表明杆部锥度大,小头或杆部一端的金属越为过剩;锻件重量 G 越重,表明金属量越大,制坯更为困难。因此,繁重系数代表了所需制坯变形工作量的大小,可以作为选择制坯工步的依据。

图7-42是根据锤上模锻生产经验总结而绘成的图表,对其它模锻设备也可参考应用。选择制坯工步时,可由计算毛坯计算得的繁重系数(α 、 β 、 k 、 G),从图表中查对出长轴类锻件所需第一类制坯工步的初步方案。

必须强调指出,上述方法所得出的方案,还应针对具体锻件和生产条件将工步方案作出必要的修改。

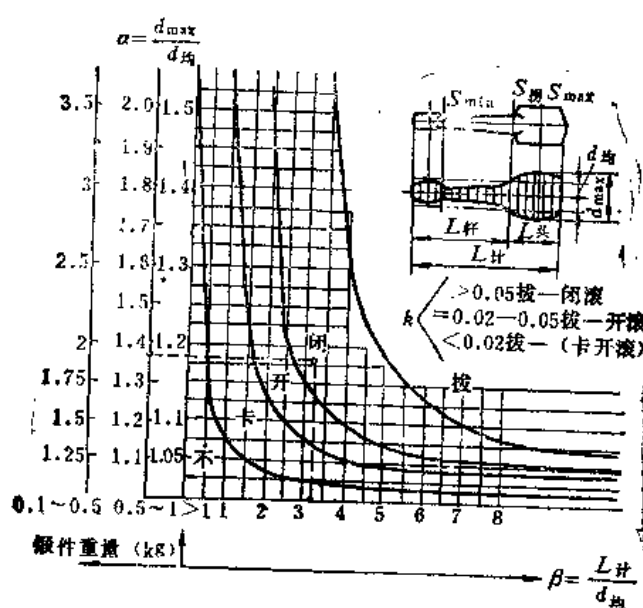


图7-42 长轴类锻件制坯工步选用范围图

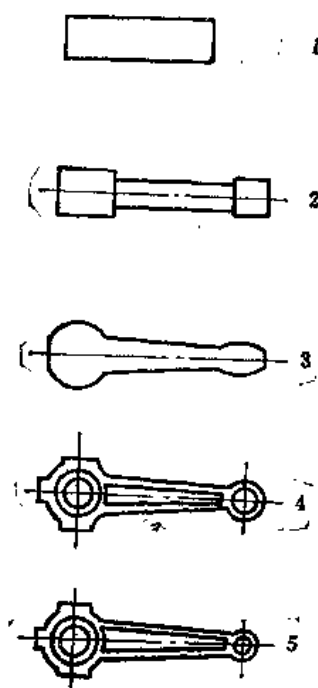


图7-43 直长轴类锻件变形工步

(1) 直长轴类锻件制坯工步的选择 直长轴类锻件制坯工步可根据其计算毛坯确定繁重系数,按照图7-42给出的图表选择制坯工步。对于有较丰富实践经验的技术人员,可以根据经验采用类比的方法选择制坯工步。图7-43给出了连杆锻件的模锻工步。

模锻锤上模锻制坯工步和模锻工步(预锻与终锻工步)可在同一模块上做出,因模锻锤行程不固定,有较好的制坯工艺性。对于热模锻压力机,由于行程固定,不适于采用拔长、滚压等制坯工步,因此,若锻件需采用拔长、滚压等制坯工步时,应利用辊锻机制坯或其它设备制坯。对于螺旋压力机,由于设备行程次数少且抗偏载能力差,因此,如需拔长、滚压工步也应在其它设备上进行。

(2) 弯曲轴类锻件制坯工步的选择 弯曲轴类锻件应根据展开成直线的计算毛坯,按上述方法选择第一类制坯工步。若锻造时锻件弯曲轴线方向与打击方向垂直,则应增加弯曲工步,坯料弯曲后再进入模锻模膛成形(图7-44)。若锻造时,锻件弯曲轴线方向与打击方向一致,不需弯曲工步,此时弯曲和锻件成形同时在模锻模膛中进行。

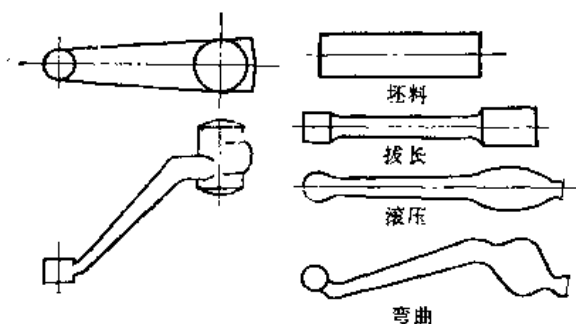


图7-44 弯曲轴线锻件变形工步

(3) 枝芽类锻件制坯工步选择 直长轴类锻件带有枝芽时, 除需采用拔长、滚压工步外, 还应根据枝芽大小和所处位置选用其它工步。若枝芽在分模面上, 如图7-45所示, 还要用成形制坯或不对称滚压工步, 迫使部分金属流向枝芽一边。

(4) 叉类锻件制坯工步的选择 对于带尾柄的叉形锻件, 除需拔长、滚压制坯工步外, 还应视尾柄长短选择其它工步。若叉形锻件的尾柄不长, 可作为弯曲轴线锻件看待, 采用弯曲工步, 如图7-46a所示; 若尾柄较长, 为了压出叉部, 必须利用预锻模膛将头部劈开, 如图7-46b所示。

二、短轴类锻件制坯工步选择

短轴类(圆饼类)锻件一般采用镦粗制坯, 形状较复杂的宜用成形镦粗制坯。在特殊情况下, 采用拔长、滚压或压扁制坯工步。

镦粗制坯的目的是避免终锻时产生折迭, 并兼有去除氧化皮从而提高锻件表面质量和提高锻模寿命的作用。

根据锻件形状特点, 坯料镦粗后的尺寸应按以下原则确定:

1) 轮毂较矮的锻件(图7-47), 如齿轮、十字轴等, 常采用镦粗制坯, 终锻成形。为了防止轮辐和轮缘间过渡区产生折迭, 镦粗后坯料直径 $D_{\text{镦}}$ 应在 $D_1 > D_{\text{镦}} > D_2$ 范围内。

2) 轮毂较高的锻件(图7-48), 为保证轮毂成形和防止产生折迭, 镦粗后坯料直径 $D_{\text{镦}}$

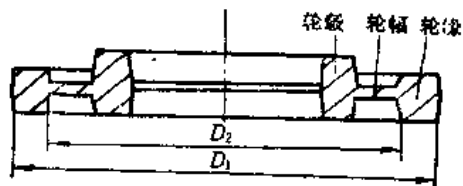


图7-47 轮毂矮的锻件

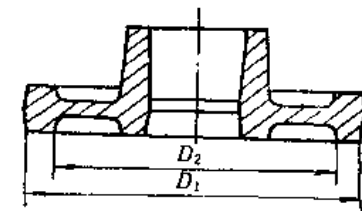


图7-48 轮毂高的锻件

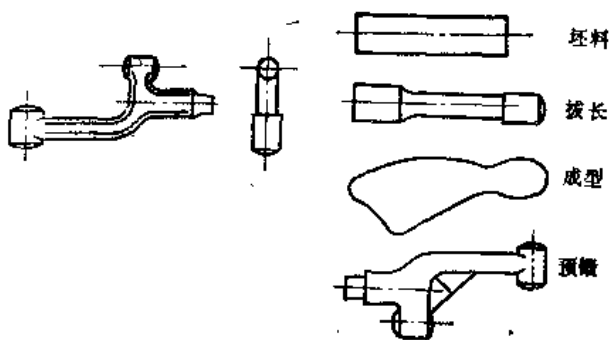
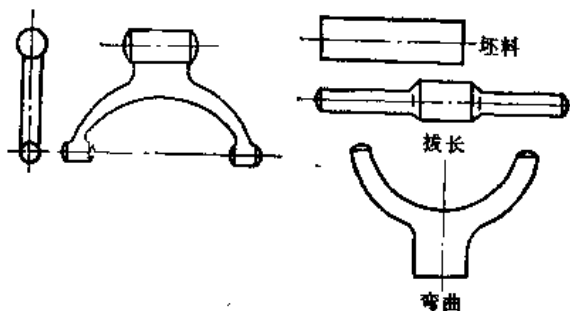
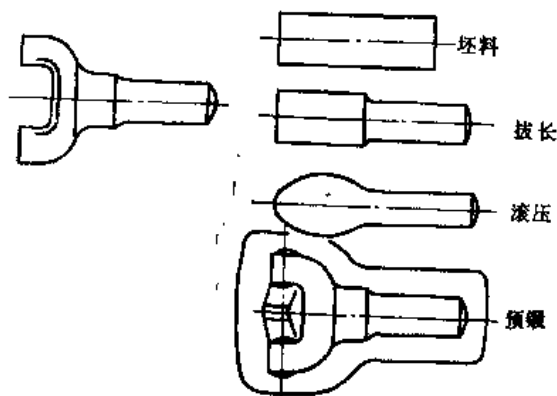


图7-45 带枝芽长轴类锻件变形工步



a)



b)

图7-46 叉形锻件变形工步

应在 $(D_1 + D_2)/2 > D_{\text{锻}} > D_2$ 范围内。

3) 轮毂高且有内孔和突缘的锻件，为便于坯料在终锻模膛中定位，有利于轮毂处充满，需采用镦粗—成形镦粗—终锻工步，如图7-49所示。成形镦粗后坯料尺寸与锻件尺寸间应满足以下关系（图7-50）。

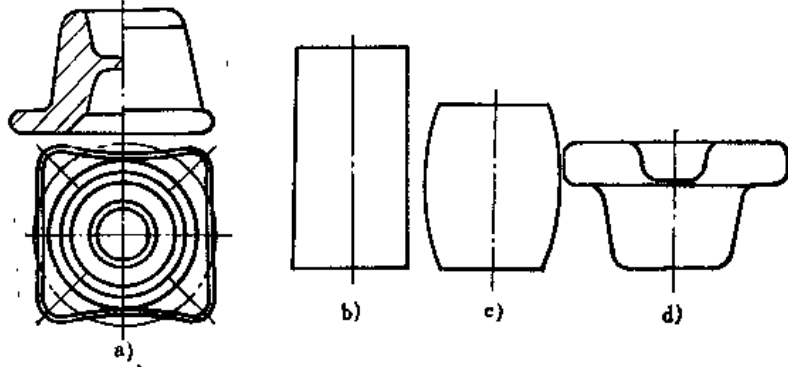


图7-49 高轮毂深孔锻件制坯过程

a) 锻件 b) 原坯料 c) 镦粗后的坯料 d) 成形镦粗后的坯料

$$H_1' > H_1 \quad D_1' \leq D_1 \quad d' \leq d$$

热模锻压力机上模锻圆饼类锻件时，为防止金属大量沿径向流动，多采用成形镦粗，即在具有一定形状的模膛内镦粗。成形镦粗常被称为预成形。

热模锻压力机具有良好的顶出装置，因此可进行挤压成形；如图7-51所示为经镦粗、挤压终锻成形的工件，简单锻件也可一次挤压成形（终挤）。图7-51a所示锻件可视为由圆饼类锻件经挤压出尾部而形成，是圆饼类锻件转化的结果，例如汽阀用正挤压得到阀杆。图7-51b所示为杯形锻件用反挤压法得到直立的周壁。

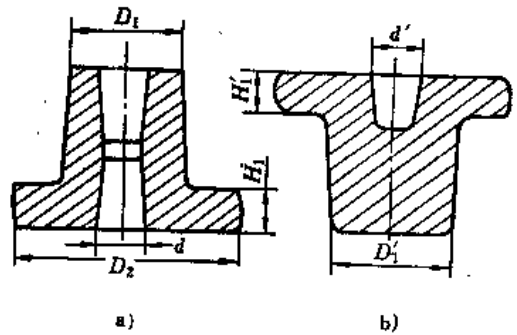


图7-50 高轮毂深孔锻件制坯形状尺寸

a) 锻件 b) 坯料

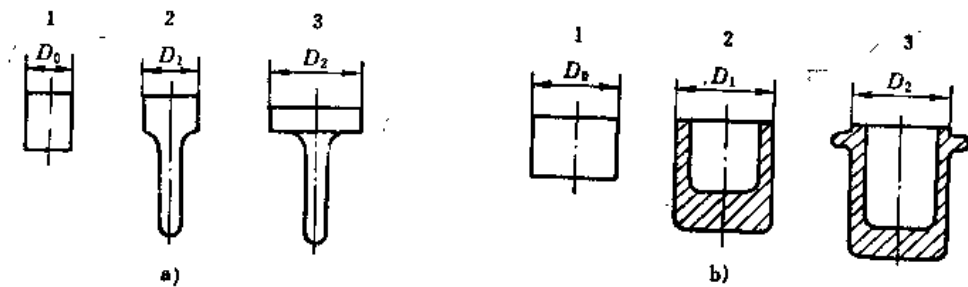


图7-51 热模锻压力机挤压成形过程

三、顶镦类锻件变形工步确定

顶镦类锻件通常可分为三组，见表7-2。顶镦类锻件多和平锻机和螺旋压力机上模锻。聚集（局部镦粗）是其模锻的基本工步。一次行程聚集金属量大小受顶镦规则的限制，顶镦

规则是在实践中总结出的一次行程顶锻坯料不产生折迭的限制条件。顶锻类锻件的制坯工步主要依据顶锻规则选择。平锻机上模锻与立式锻压设备上的一些局部锻粗工步的根本区别是棒料并非自由放入型槽，而是在局部夹紧的情况下使金属变形，所以它具有更大的稳定性。在第六章中已给出了顶锻类锻件的顶锻规则。

1. 具有粗大部分杆类锻件变形工步确定

此类锻件通常采用的工步是：聚集、预锻、终锻、切边等，基本变形工步是聚集。由第六章第五节可知，当坯料的变形部分长度与直径之比 l_B/d_0 小于表6-3中允许的 $\psi_{\text{许}}$ 时，可以在一次行程内顶锻到任意尺寸。当 $l_B/d_0 > \psi_{\text{许}}$ 时，则需先在凹模或凸模内聚集，直到满足顶锻第一规则，即 $l_B/d_0 \leq \psi_{\text{许}}$ 时再顶锻到所需尺寸。在凹模内聚集时，金属易从坯料端部和凹模分模面间挤出形成毛刺，在下次聚集时，毛刺会被压入锻件内部而形成折迭，所以生产中若需多次聚集通常采用凸模内聚集。凸模内聚集尚有金属锻粗变形和充满模膛较好的优点，所以凸模内聚集应用较广。

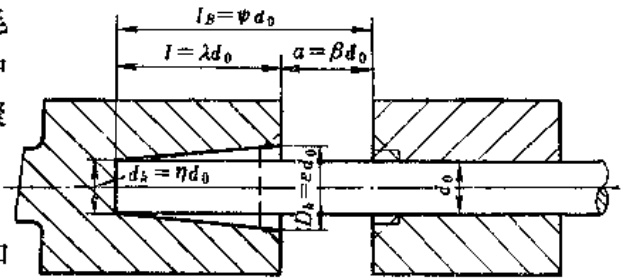


图7-52 锥形模膛的相对尺寸

在凸模内聚集时，所需的聚集工步次数和工步尺寸根据顶锻第三规则和体积不变条件进行计算。如图7-52所示，凸模锥形体积 $V_{\text{锥}}$ 与坯料变形部分体积 $V_{\text{坯}}$ 应相等：

$$V_{\text{锥}} = V_{\text{坯}}$$

$$\frac{\pi}{12} (D_k^2 + d_k^2 + D_k d_k) l = \frac{\pi}{4} d_0^2 l_B$$

等号两边同除以 d_0^3 得：

$$\frac{1}{3} \left(\frac{D_k^2}{d_0^2} + \frac{d_k^2}{d_0^2} + \frac{D_k d_k}{d_0^2} \right) \frac{l}{d_0} = \frac{l_B}{d_0}$$

$$\text{设 } \frac{l}{d_0} = \lambda, \quad \frac{D_k}{d_0} = e, \quad \frac{d_k}{d_0} = \eta, \quad \frac{l_B}{d_0} = \psi, \quad \frac{a}{d_0} = \beta,$$

$$\text{则 } \frac{1}{3} (e^2 + \eta^2 + e\eta) \lambda = \psi$$

$$e^2 + e\eta + \frac{1}{4} \eta^2 + \frac{3}{4} \eta^2 = \frac{3\psi}{\lambda}$$

$$e = \sqrt{\frac{3\psi}{\lambda} - \frac{3}{4} \eta^2} - \frac{\eta}{2}$$

上式中， ψ 为已知数， $\eta = 1.05 \sim 1.2$ ，第一道工序取小值。由图7-52， $\lambda = \psi - \beta$ 。由实践经验给定 $\beta = (1.2 + 0.2\psi) < 3$ ，所以，上式仅有一个未知数 e 。图7-53是一个 $e = f(\psi, \beta)$ 的线图。图中 abc 线是依据顶锻第三规则给出的限制曲线。设计时采用 abc 曲线以下的系数，可得到合格的产品，否则，将产生聚集弯曲折迭缺陷。根据 ψ 值与 abc 曲线的交点，即可求得 β 、 e 的极限值，进而设计出聚集工步尺寸，即：

$$d_k = \eta d_0$$

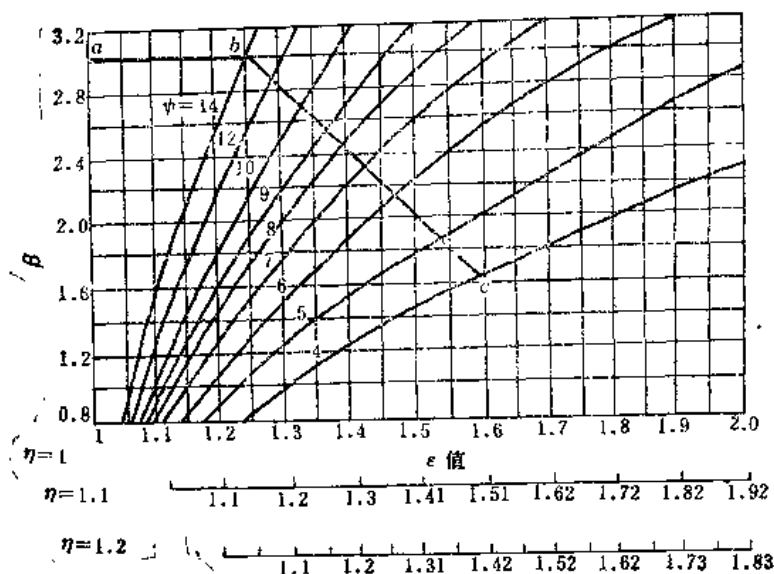


图7-53 锥形模膛聚集限制曲线

$$D_k = \varepsilon d_0$$

$$l = \lambda d_0 = (\psi - \beta) d_0$$

在第一次聚集后, 是否需要进行第二次、第三次……、第 n 次聚集, 可根据 $d_{均} = (D_k + d_k)/2$, $\psi_1 = l/d_{均}$, 检验 ψ_1 是否大于 $\psi_{许}$ 。若 $\psi_1 < \psi_{许}$, 就不再进行第二次聚集, 若 $\psi_1 > \psi_{许}$, 还需要进行第二次聚集, 依此类推, 直到满足顶锻第一规则为止。

为避免由于坯料尺寸偏差, 引起变形金属体积大于锥形模膛体积而产生毛刺, 模膛体积应比变形体积大些, 一般增大4%~8%, 随着聚集工步次数增多而减小。

在设计聚集工步时, 还应注意以下问题:

1) 在 $\psi \leq \psi_{许}$ 时, 按顶锻规则棒料可一次成形, 但有时为清除氧化皮, 获得表面光洁的锻件, 可附加采用一次聚集工步。

2) 当锻粗比 $\psi > 4.5$ 时, 在锥形模膛小端部分需设计一段长度为5~30mm的圆柱 (ψ 值大时, 取大值), 其目的是在凸模内装塞子, 以便于调整聚集坯料的体积, 并增加聚集的稳定性 (图7-54a)。

3) 当锻粗比 $\psi > 7$ 时, 在压缩系数 β 值允许的前提下, 为了增加聚集压缩量, 可以在锥形大头部分设计一个较大的锥体 (图7-54b)。

4) 当锻件有台阶 D 时 (图7-54c), 且直径 D 小于聚集规则允许的大端直径 D_k , 并又在压缩系数 β 允许范围内, 台阶 D 必须在第一次聚集时予以成形。否则在终锻时将为挤压成形。

5) 对于具有后法兰的锻件 (图7-54d), 例如汽车齿轮, 在第一道聚集时就应把法兰锻出, 否则以后工步难以成形。后法兰所需坯料锻粗比 ψ 不能超过自由聚集允许锻粗比 $\psi_{许}$ ($\psi \leq \psi_{许}$)。

6) 对于同时在凸模和凹模的模膛中聚集时, 例如汽轮发动机涡轮叶片的榫头, 应首先将坯料按单锥体设计 (图7-55), 然后再按体积不变条件换算成双锥体。由于坯料产生纵向弯曲处发生在自由端一侧, 所以, $L_{锥1}$ 应大于 $L_{锥2}$ 。

2. 具有透孔和不透孔锻件变形工步确定

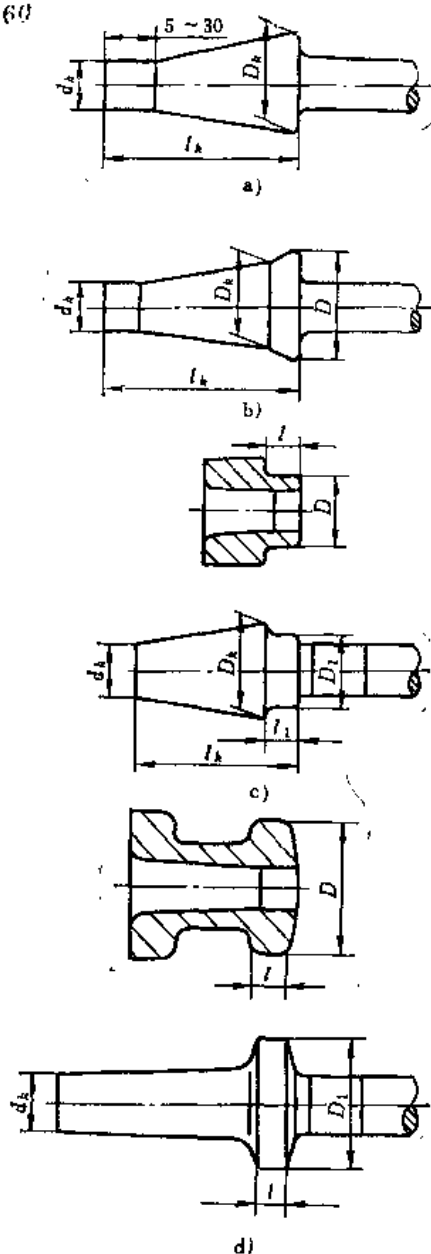


图7-51 凸模锥形聚集形式

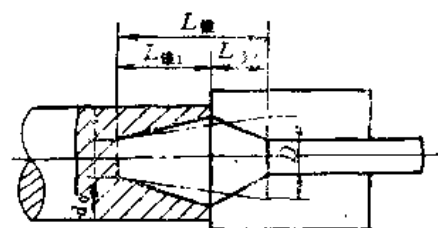


图7-55 双锥体聚集

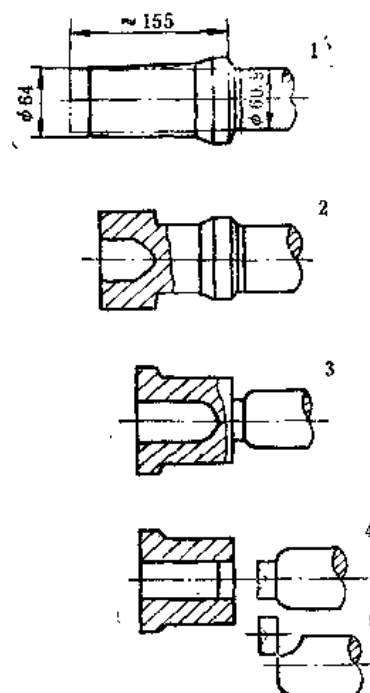


图7-56 透孔锻件联轴节滑套平锻工步

1—聚料 2—预锻 3—终锻 4—穿孔 5—切芯料

此类锻件通常采用的工步是：聚集、冲孔（1~4次）、终锻、穿孔等，如图7-56所示，其中基本变形工步是聚集和冲孔。制定该类锻件工艺时，首先要确定终锻成形（冲孔成形），并在此基础上确定冲孔次数、冲孔尺寸及坯料尺寸等。

设计终锻成形时，冲孔芯料（连皮）不能太厚，否则冲孔费力，冲头寿命短。当冲穿力大、且锻件支承面较小时，可能引起锻件底面压皱变形。若芯料太薄，在终锻成形的冲头回程时，可能将芯料拉断而将锻件带走，并可能增加冲孔次数。为此，合适的冲孔芯料尺寸，应使冲穿力大于终锻成形时的卸件力，而小于锻件支承面上的压皱变形力。

终锻成形形状如图7-57所示。生产中采用的冲孔连皮尺寸按下列经验公式确定：

对于尖冲头（图7-57a）

$$L = Kd$$

$$C = 0.5L$$

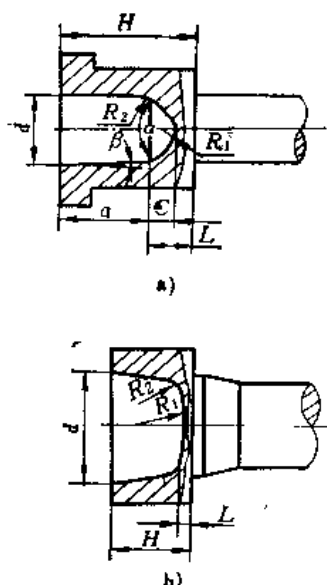


图7-57 终锻（冲孔）成形形状

$$R_1 = 0.2d$$

$$R_2 = 0.4d$$

系数 K 可按表7-4选取。冲头锥角 α 常用 60° 、 75° 、 90° 、 110° 、 120° 等。

表7-4 系数 K

$\frac{H}{d}$	0.4	0.8	≥ 1.2
K	0.2	0.4	0.5

对于平冲头（图7-57b）

$$L = 2 \sim 8 \text{ mm}$$

$$R_1 = (0.8 \sim 1.8)d$$

$$R_2 = (0.1 \sim 0.15)d$$

平冲头冲孔适用于 $H/d \leq 1$ 的深孔类环形锻件。平冲头冲孔具有一定的反挤压成形性质，

需较大的终锻变形力，且易造成锻件冲孔的壁厚差，但冲穿连皮省力，切面质量好，冲头寿命长。

尖冲头冲孔适用于 $H/d > 1$ 的深孔类环形锻件。冲孔时省力、壁厚均匀，但冲穿费力、冲头寿命短。

在冲孔过程中，根据冲孔力的变化情况可分为三个阶段，见图7-58。第一阶段，从冲头和金属坯料开始接触到冲孔部分直径达到孔径 d 时，相当于图7-58中曲线 $o-I$ 段，随冲孔深度增加，冲孔力急速增大。第二阶段相当于曲线上的 $I-II$ 段，随冲孔深度的增加，冲孔力稍有增大，直到冲孔过程基本结束。第三阶段相当于曲线上的 $II-III$ 段，因冲孔过程接近于闭式模锻的终锻阶段，冲孔深度即使略有增加，也将引起冲孔力急剧增大。

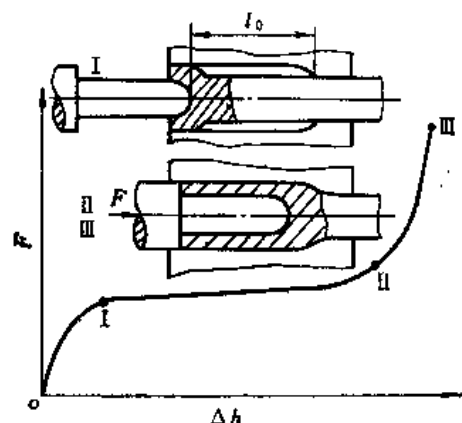


图7-58 冲孔力-行程关系图

平锻机的压力-滑块行程允许负荷图是给定的，若在一次行程中完成的冲孔深度过大，则需要很大的变形功。当平锻机及其飞轮储存的动能不足时，将引起平锻机飞轮转速急剧降低，甚至停车。另外，若平锻机一次行程中冲孔深度过大，坯料和冲头容易发生弯曲变形和冲偏。所以，对于深冲孔锻件，必须多次冲孔。生产中机器一次行程的冲孔深度常取为 $(1 \sim 1.5)d$ 。冲孔次数取决于冲孔深度 $l' = a + C$ 和冲孔直径的比值，冲孔次数按表7-5确定。

表7-5 确定冲孔次数表

l'/d	< 1.5	$1.5 \sim 3.0$	$3.0 \sim 5.0$
冲孔次数	1	2	3

3. 管类锻件

此类锻件通常采用的工步是：聚集、终锻和切边等，其基本变形工序也是聚集。管料顶锻根据其内外径变化不同和在凹模及凸模内成形不同可有如图7-59所示的五种情况。由于锻件形状不同，管料顶锻可在凹模中进行，也可在凸模中进行，但以在凹模内为主。在顶锻过程中，管坯难于夹紧，同时为保证凸模有良好的导向性，常采用后定料装置。

管料局部顶锻时，同样要满足管料顶锻规则，其基本参数与棒料有所不同。

当管坯变形部分长度 l_0 与壁厚 t 的比值 $l_0/t \leq 3$ 时，可在机器一次行程中自由顶锻到任意形状和尺寸。

当 $l_0/t > 3$ 时，应进行聚集。

壁厚 t 的变化规则为

$$t_n = (1.5 \sim 1.3)t_{n-1}$$

式中 t_n ——第 n 次聚集时的管壁厚度；

t_{n-1} ——第 $n-1$ 次聚集时的管壁厚度。

锻前加热长度不应超过变形区长度过多。成形中应先增加管壁厚度，再顶锻成形。

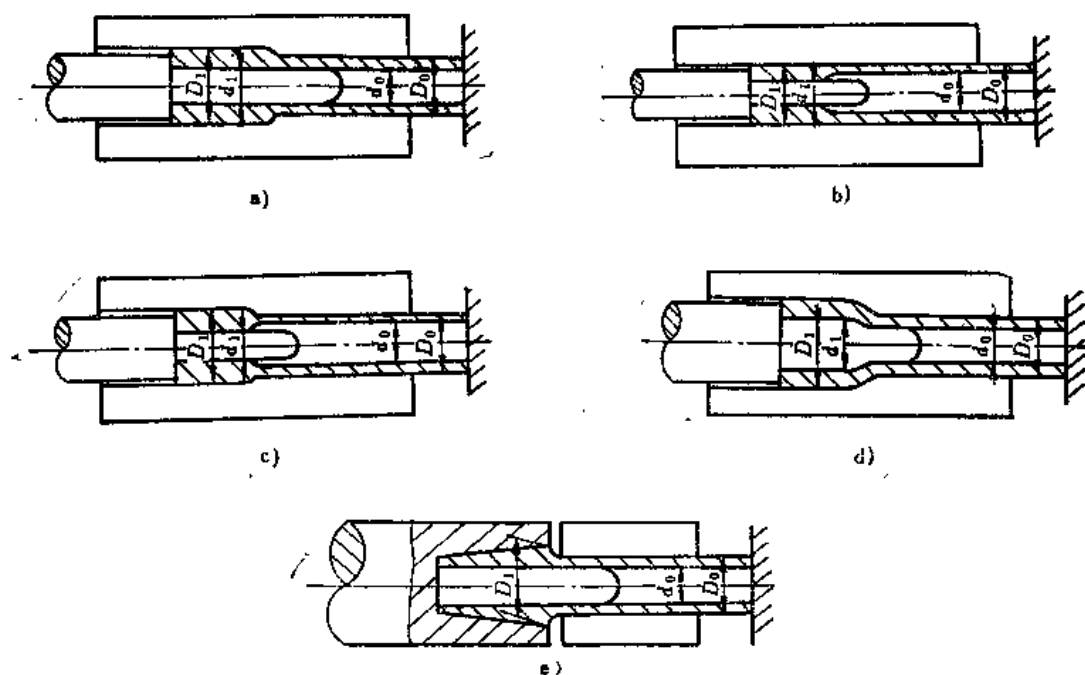


图7-59 管料顶锻方式

第六节 坯料尺寸的确定

模锻所需原坯料尺寸应依据坯料体积、锻件形状尺寸及模锻方法确定。坯料体积应包括锻件、飞边、连皮、氧化皮及钳料头等部分。坯料截面尺寸与模锻方法有关，计算出坯料体积和截面尺寸，就可确定下料长度。不同类别的锻件，由于其变形特点不同，所需坯料尺寸的计算方法亦不同。

一、长轴类锻件

长轴类锻件的坯料尺寸确定应以计算坯图为依据,并考虑到不同制坯的需要,计算出各种模锻方法所需的坯料截面积,然后再选取标准规格钢材,并确定坯料长度。

1. 坯料截面积

(1) 不用制坯工步

$$S_{\text{坯}} = (1.02 \sim 1.05) S_{\text{均}}$$

(2) 用卡压或成形制坯

$$S_{\text{坯}} = (1.05 \sim 1.3) S_{\text{均}}$$

(3) 用滚压制坯

$$S_{\text{坯}} = S_{\text{滚}} = (1.05 \sim 1.2) S_{\text{均}}$$

以上各式中 $S_{\text{坯}}$ ——坯料截面积;

$S_{\text{均}}$ ——计算毛坯图的平均截面积。

锻件只有一头一杆时,应选用大系数。锻件为两头一杆时,应选用小系数。

(4) 用拔长制坯

$$S_{\text{坯}} = S_{\text{拔}} = \frac{V_{\text{头}}}{L_{\text{头}}}$$

式中 $V_{\text{头}}$ ——包括氧化皮在内的锻件头部体积;

$L_{\text{头}}$ ——锻件头部长度。

(5) 用拔长和滚压制坯

$$S_{\text{坯}} = S_{\text{拔}} - K(S_{\text{拔}} - S_{\text{滚}})$$

在进行制坯操作时,是先拔长后滚压,拔长过程中金属沿轴向流动而使长度增加,滚压时头部得到一定的聚料。所以确定原坯料截面积时要考虑滚压的作用,适当减少坯料的截面积,减少部分为 $K(S_{\text{拔}} - S_{\text{滚}})$ 。计算时,分别求 $S_{\text{拔}}$ 和 $S_{\text{滚}}$,然后计算 $S_{\text{坯}}$ 。 K 是计算毛坯直径图杆部的锥度。求 $S_{\text{滚}}$ 时,应取系数等于 1.2。

(6) 用辊锻制坯 辊锻制坯坯料只能拔长,不能聚料,坯料尺寸按计算毛坯最大截面确定。

$$S_{\text{坯}} = S_{\text{计max}}$$

根据以上各式计算的坯料截面积,确定圆坯料的直径 $D_{\text{坯}}$ 或方坯料的边长 $A_{\text{坯}}$:

$$D_{\text{坯}} = 1.13 \sqrt{S_{\text{坯}}}$$

$$A_{\text{坯}} = \sqrt{S_{\text{坯}}}$$

按国家标准(GB702—72)选取标准规定的圆钢或方钢。

2. 坯料长度

坯料体积 $V_{\text{坯}}$ 按下式计算

$$V_{\text{坯}} = (V_{\text{件}} + V_{\text{飞}} + V_{\text{连}})(1 + \delta\%)$$

式中 $V_{\text{件}}$ ——锻件体积,包括锻件正公差之半;

$V_{\text{飞}}$ ——飞边体积;

$V_{\text{连}}$ ——连皮体积;

δ ——火耗,按第三章表3-2确定。

因此,坯料长度 $L_{\text{坯}}$ 为

$$L_{\text{坯}} = \frac{V_{\text{坯}}}{S'_{\text{坯}}} + L_{\text{钳}}$$

式中 $V_{\text{坯}}$ ——坯料体积；

$S'_{\text{坯}}$ ——钢材的截面积；

$L_{\text{钳}}$ ——钳夹头长度。

二、短轴类锻件

短轴类锻件坯料体积按前述方法计算。此类锻件常用镦粗制坯，所以坯料尺寸应以镦粗变形为依据进行计算。考虑到坯料在镦粗时不致产生弯曲，下料方便，以及节省材料，应使坯料长度 $L_{\text{坯}}$ 与直径 $D_{\text{坯}}$ （或方形坯料边长 $a_{\text{坯}}$ ）之比值 m 等于1.8~2.2。由此坯料直径 $D_{\text{坯}}$ 或边长 $a_{\text{坯}}$ 可在下式范围内选择：

$$D_{\text{坯}} = (0.8 \sim 0.9) \sqrt[3]{V_{\text{坯}}}$$

$$a_{\text{坯}} = (0.77 \sim 0.82) \sqrt[3]{V_{\text{坯}}}$$

计算出 $D_{\text{坯}}$ 或 $a_{\text{坯}}$ 后，再按国家标准规格选用坯料 $D'_{\text{坯}}$ 或 $a'_{\text{坯}}$ 。然后再按下式确定坯料的长度 $L_{\text{坯}}$ ：

$$L_{\text{坯}} = \frac{V_{\text{坯}}}{S'_{\text{坯}}} = 1.27 \frac{V_{\text{坯}}}{D'^2_{\text{坯}}} \quad (\text{圆形截面坯料})$$

$$\text{或} \quad L_{\text{坯}} = \frac{V_{\text{坯}}}{a'^2_{\text{坯}}} \quad (\text{方形截面坯料})$$

三、顶镦类锻件

具有粗大部分的杆类锻件和管类锻件，应尽量选取杆部直径和管子直径做为原坯料的直径。

穿孔类锻件要在平锻机上冲孔成形，为了确保冲孔成形质量，冲头直径和坯料直径应有适当的比值，否则，冲孔过程中坯料形状畸变严重。例如，当冲孔直径和坯料直径相等时，先产生镦粗变形，而后是反挤变形。这样，金属急剧地反复流动加速了模具的磨损，降低了模具寿命。

根据上述原理，为保证冲头对坯料仅起分流作用，而无明显的轴向流动，要求有一个合适的冲孔坯料——计算毛坯。计算毛坯的长度与锻件长度相等，各个截面积与相应的锻件截面积相等。因平锻件多为轴对称锻件，计算毛坯直径图比锤上模锻要简单得多。首先将终锻成形工步图依其几何图形特征分为三部分，见图7-60。第Ⅰ部分为简单圆筒（忽略内壁斜度），第Ⅱ部分为锥形空心体，第Ⅲ部分为圆柱体。这样划分后，计算毛坯直径图的第Ⅲ部分不变，第Ⅱ部分为过渡区，所以，绘制计算毛坯图的关键为第Ⅰ部分，该处计算毛坯直径 $d_{\text{计}}$ 为：

$$d_{\text{计}} = \sqrt{D_{\text{锻}}^2 - d_{\text{锻}}^2}$$

对于带孔锻件，坯料直径的确定应遵循以下原则：

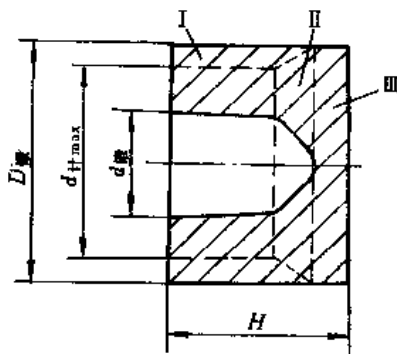


图7-60 穿孔锻件计算毛坯图

1) 当 $d_{\text{计}}/d_{\text{锻}} = 1.0 \sim 1.2$ 时, 取 $d_{\text{坯}} = (0.82 \sim 1.0)d_{\text{计}}$

即 $d_{\text{坯}} = (0.82 \sim 1.0)d_{\text{计}} = (0.82 \sim 1.0)(1.0 \sim 1.2)d_{\text{锻}} \approx d_{\text{锻}}$

坯料直径与锻件内孔直径基本相等, 这样可省去卡细、胀粗及切芯料工步, 大大简化了平锻工步及模具结构。

2) 当 $d_{\text{计}}/d_{\text{锻}} > 1.2$ 时, 为减少聚集工步, 选取 $d_{\text{坯}} > d_{\text{锻}}$, 此时坯料需卡细后再进行穿孔。为了减少坯料卡细程度和料头损失, 在不增加聚集工步的前提下, 力求用较小直径的棒料。

3) 当 $d_{\text{计}}/d_{\text{锻}} < 1.0$ 时, 为了防止金属在冲孔过程中先镦锻后挤压产生的倒流现象, 应选用较大直径的坯料, 并使 $d_{\text{坯}} < d_{\text{锻}}$, 此时坯料应在与冲孔芯料相连处扩径, 以便连续生产。

坯料直径按标准规格选定后, 即可确定每一锻件所需坯料长度 $L_{\text{坯}}$:

$$L_{\text{坯}} = 1.27 \frac{V_{\text{坯}}}{d_{\text{坯}}^2}$$

式中 $V_{\text{坯}}$ ——坯料体积。

$$V_{\text{坯}} = (V_{\text{锻}} + V_{\text{芯}} + V_{\text{飞}})(1 + \delta\%)$$

式中 $V_{\text{锻}}$ ——锻件体积, 按锻件图名义尺寸加正公差之半计算;

$V_{\text{芯}}$ ——冲孔芯料体积;

$V_{\text{飞}}$ ——飞边体积;

δ ——火耗, 按表3-2选择。

第七节 设备吨位的确定

选用适当的模锻设备是获得优质锻件、节省能量和保证正常生产的重要条件。关于模锻变形力的计算, 尽管有理论解的方法, 但模锻过程受到许多因素的影响, 这些因素不仅相互作用, 而且具有随机特征, 所以要全部考虑它们是不现实的。在生产上为方便起见, 多用经验公式或近似解的理论公式确定设备吨位。甚至更为简易的办法是, 参照类似锻件的生产经验用类比的方法判断所需的设备吨位。

一、模锻锤吨位的确定

1. 经验-理论公式

苏联学者A.B.烈别尔斯基在C.H.古布金、E.П.翁克索夫、M.B.斯托罗热夫等人理论推导的基础上, 结合生产实际简化得出计算双作用模锻锤吨位公式。

设想模锻成形时最后一次锤击力最大, 变形功在数值上为:

$$A_{\text{件}} = \varepsilon p_k V_{\text{件}}$$

式中 $A_{\text{件}}$ ——变形功(J);

ε ——最后一次锤击时的平均变形程度;

p_k ——最后一次锤击时的金属变形抗力或单位流动压力(MPa);

$V_{\text{件}}$ ——锻件体积(cm^3)。

根据生产经验, 最后一次锤击时的绝对变形量 Δh (cm) 与锻件直径 $D_{\text{件}}$ (cm) 有如下关系:

$$\Delta h = \frac{2.5(0.75 + 0.001 D_{\text{件}}^2)}{D_{\text{件}}}$$

因此, 平均变形程度为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{\text{均}}} = \frac{2.5(0.75 + 0.001D_{\text{件}}^2)}{D_{\text{件}}h_{\text{均}}}$$

式中 $h_{\text{均}}$ ——锻件平均高度(cm), 即 $h_{\text{均}} = \frac{V_{\text{件}}}{S_{\text{件}}}$ 。

单位流动压力除与材料变形抗力有关外, 还受到一些工艺因素影响, 可列式如下:

$$p_k = \omega z q \sigma$$

式中 ω ——变形速度系数, 与锻件尺寸有关, $\omega = 3.2(1 - 0.005D_{\text{件}})$;

z ——应力不均系数, 一般 $z = 1.2$;

q ——摩擦力、锻件形状、应力状态影响系数, 一般取 $q = 2.4$;

σ ——终锻时的流动应力(MPa)。

因此, 单位流动压力可按式计算:

$$p_k = 9.2(1 - 0.005D_{\text{件}})\sigma$$

锻件体积按下式确定:

$$V_{\text{件}} = \frac{\pi D_{\text{件}}^2}{4} h_{\text{均}}$$

将以上各参数代入上述锻件所需变形功的式中, 得

$$A_{\text{件}} = 18(1 - 0.005D_{\text{件}})(0.75 + 0.001D_{\text{件}}^2)D_{\text{件}}\sigma$$

最后一次锤击成形所耗变形功应包括飞边变形的需要

$$A = A_{\text{件}} + A_{\text{边}}$$

式中 $A_{\text{边}}$ ——飞边成形所需变形功, 可使之与锻件变形功联系而得到 $A_{\text{边}} = (\xi - 1)A_{\text{件}}$ 。
 $\xi > 1$ 。

因而

$$A = A_{\text{件}} + \xi A_{\text{件}} - A_{\text{件}} = \xi A_{\text{件}}$$

根据实践经验得出:

$$\xi = \left(1.1 + \frac{2}{D_{\text{件}}}\right)^2 > 1$$

至此, 可以列出圆饼类锻件最终锤击时所需变形功的计算公式

$$A = 18(1 - 0.005D_{\text{件}})\left(1.1 + \frac{2}{D_{\text{件}}}\right)^2(0.75 + 0.001D_{\text{件}}^2)D_{\text{件}}\sigma$$

双作用模锻锤有效变形能量(J)与锻锤落下部分重量(kg)在数值上具有如下关系

$$E = 18G$$

由于 $A = E$, 所以, 对于圆饼类锻件所需模锻锤吨位为:

$$G = (1 - 0.005D_{\text{件}})\left(1.1 + \frac{2}{D_{\text{件}}}\right)^2(0.75 + 0.001D_{\text{件}}^2)D_{\text{件}}\sigma$$

对于长轴类锻件, 计算锻锤吨位应计及形状因素, 此时模锻锤吨位 G' (kg)按下式计算

$$G' = G\left(1 + 0.1\sqrt{\frac{L_{\text{件}}}{B_{\text{均}}}}\right)$$

式中 G ——按换算直径 $D_{\text{件}} = 1.13\sqrt{A_{\text{件}}}$ ($A_{\text{件}}$ 为锻件水平投影面积) 计算的圆饼类锻件所需模锻锤吨位;

$L_{\text{件}}$ ——锻件长度;

$B_{\text{均}}$ ——锻件平均宽度。

应当指出, 该计算方法适用于锻件直径或换算直径小于 60cm 的锻件所需模锻锤吨位的计算。

2. 经验公式

根据锻件在分模面上的投影面积和锻件材料特点来计算。

双作用模锻锤

$$G = (3.5 \sim 6.3)KS$$

单作用模锻锤

$$G_1 = (1.5 \sim 1.8)G$$

无砧座锤

$$G_2 = 2G$$

式中 G ——锻锤吨位(kg);

K ——材料钢种系数, 可在 0.9~1.55 范围内查手册确定, 高强度钢材选用大系数;

S ——锻件和飞边 (按飞边仓的 50% 计算) 在水平面上的投影面积(cm^2)。

双作用模锻锤吨位计算式中的系数 3.5 用于生产率不高或锻件形状简单的锻件, 而系数 6.3 则用于要求高生产率或锻件形状复杂的锻件, 一般情况下可取中间值。

例 某锻件材料为 35 钢, 其水平投影面积为 162cm^2 , 锻件长度为 20.1cm , 求所需双作用模锻锤的吨位。

解 根据锻件投影面积计算换算直径和平均宽度为

$$D_{\text{件}} = 1.13\sqrt{162}\text{cm} = 14.4\text{cm}$$

$$B_{\text{均}} = \frac{162}{20.1}\text{cm} = 8\text{cm}$$

查手册表可得到 $\sigma = 60\text{MPa}$, 可先按圆饼类计算锻锤吨位, 然后换算成长轴类锻件所需吨位。

$$\begin{aligned} G &= (1 - 0.005 \times 14.4) \left(1.1 + \frac{2}{14.4} \right)^2 (0.75 + 0.001 \times 14.4^2) \times 14.4 \times 60\text{kg} \\ &= 1178\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G' &= G \left(1 + 0.1\sqrt{\frac{L_{\text{件}}}{B_{\text{均}}}} \right) = 1178 \left(1 + 0.1\sqrt{\frac{20.1}{8}} \right) \\ &= 1365\text{kg} \end{aligned}$$

从计算结果判定, 可选用 2t 模锻锤。

若用经验公式 $G = 6.3KS$ 计算, 取 $K = 1$, 则

$$S = \frac{\pi}{4} (14.4 + 2.5 \times 2)^2 \text{cm}^2 = 295.6\text{cm}^2$$

$$G = 6.3 \times 295.6\text{kg} = 1862.3\text{kg}$$

若用 $G = 3.5KS$ 计算, 则

$$G = 3.5 \times 295.6\text{kg} = 1034.6\text{kg}$$

计算表明, 选用1t或2t模锻锤均可。实际上1t模锻锤与2t模锻锤的燕尾槽尺寸是相同的, 可互换使用。

事实上计算公式不能完全反映锻件的实际需要, 可能偏大或偏小, 但只要在一定范围内, 不致于影响锻件成形即可。如果选用的锻锤吨位不足, 只要增加锤击次数, 同样可以达到锻件成形的目的。但必须指出, 锤击次数的增加是有限的, 否则由于次数增加过多, 坯料温度下降, 引起变形抗力直线上升, 将失去增加打击次数的意义, 无法达到成形的目的。

二、热模锻压力机吨位的确定

热模锻压力机吨位用公称压力表示, 其吨位应根据锻件终锻时的最大变形力确定。当锻件变形力超过公称压力时, 常会发生闷车, 引起设备事故。所以选用的设备吨位应稍大于锻件的最大变形力。

1. 理论-经验公式

对在分模面上投影为圆形的锻件, 其模锻所需压力(kN)为

$$F = 0.8(1 - 0.001D) \left(1.1 + \frac{20}{D} \right)^2 S \sigma$$

对在分模面上投影为非圆形的锻件, 其模锻所需压力(kN)为

$$F = 0.8(1 - 0.001D_1) \left(1.1 + \frac{20}{D_1} \right)^2 \left(1 + 0.1 \sqrt{\frac{L_{\text{件}}}{B_{\text{均}}}} \right) S \sigma$$

式中 D ——圆形锻件直径(mm);

D_1 ——非圆形锻件的换算直径(mm), $D_1 = 1.13 \sqrt{S}$;

S ——锻件在分模面上的投影面积(mm²);

$L_{\text{件}}$ ——非圆形锻件的长度(mm);

$B_{\text{均}}$ ——非圆形锻件的平均宽度(mm);

σ ——金属在终锻温度下的流动应力(MPa)。

式中 $(1 - 0.001D) \geq 0.7$, 即当 $D > 300\text{mm}$ 时, $(1 - 0.001D)$ 就以0.7计算。

2. 经验公式

$$F = (64 \sim 73) K S$$

式中 F ——模锻力(kN);

K ——钢种系数, 一般取0.9~1.25, 高强度钢材选用大系数;

S ——包括飞边桥部在内的锻件在平面图上的投影面积(cm²)。

三、螺旋压力机吨位的确定

螺旋压力机压力(kN)计算常用的公式有以下三种:

$$1. \quad F = \alpha \left(2 + 0.1 \frac{S \sqrt{S}}{V} \right) \sigma S$$

式中 α ——与锻模型式有关的系数, 对于开式模锻 $\alpha = 4$; 对于闭式模锻 $\alpha = 5$;

S ——锻件在平面图上的投影面积 (开式模锻时包括飞边桥部面积) (mm²);

V ——锻件体积(mm³);

σ ——终锻时金属的流动应力(MPa)。

$$2. \quad F = K S / q$$

式中 K ——系数, 在热锻和精压时, 约为80kN/cm², 锻件轮廓比较简单时, 约为50kN/cm²;

S ——锻件总变形面积（包括锻件面积、冲孔连皮面积及飞边面积）（ cm^2 ）；

q ——变形系数，变形程度小的精压件取1.6，变形程度不大的锻件取1.3，变形程度大的锻件取0.9~1.1。

上式适用于打击一次成形所需的设备吨位，若采用2~3次打击成形，则应按计算值减少1/2。

3. 根据已知锤上模锻时锻锤的吨位或热模锻压力机上模锻时的压力进行换算，换算公式为

$$F = K_1 G_{\text{锤}}$$

$$F = F_{\text{压}} / K_2$$

式中 F ——螺旋压力机的公称压力（ kN ）；

$G_{\text{锤}}$ ——锻锤吨位（ t ）；

$F_{\text{压}}$ ——热模锻压力机上模锻所需压力（ kN ）；

K_1 ——换算系数， $K_1 = 3500 \sim 4000$ ；

K_2 ——换算系数，对于精压、冷校正等小变形量工步， $K_2 = 1.5 \sim 2.0$ ；对于切边、冲孔等中等变形量工步， $K_2 = 1.0 \sim 1.5$ ；对于镦头等大变形量工步，设备应满足工步对能量的要求， $K_2 = 0.5 \sim 1.0$ 。但大变形量工步可分为若干中、小变形量工步并用多次打击来完成，故实际生产中不选用小于1.0的换算系数。

四、平锻机吨位的确定

1. 经验-理论公式

按终锻工步顶锻变形所需力计算：

$$F_{\text{闭}} = 0.5(1 - 0.001D)D^2\sigma$$

$$F_{\text{开}} = 0.5(1 - 0.001D)(D + 10)^2\sigma$$

式中 $F_{\text{闭}}$ ——闭式模锻时平锻机的压力（ kN ）；

$F_{\text{开}}$ ——开式模锻时平锻机的压力（ kN ）；

D ——锻件镦锻部分的最大直径（ mm ），应考虑收缩量和正公差尺寸；

σ ——终锻时的流动应力（ MPa ）。

上式只适用于 $D \leq 300\text{mm}$ 的锻件。如锻件镦锻部分为非圆形，可用换算直径 $D_1 = 1.13\sqrt{S}$ 代入公式计算， S 为包括飞边的锻件在平面图上的投影面积。

2. 经验公式

$$F = 57.5KS$$

式中 F ——平锻机的压力（ kN ）；

S ——包括飞边的锻件最大投影面积（ cm^2 ）；

K ——钢种系数，对于中碳钢和低合金钢，如45、20Cr，取 $K = 1$ ；对高碳钢及中碳合金钢，如60、45Cr、45CrNi，取 $K = 1.15$ ；对高合金钢，如GCr15、45CrNiMo，取 $K = 1.3$ 。

根据以上公式计算所得的模锻力选择平锻机。在确定平锻机吨位时还应同时考虑到，若锻件是薄壁及复杂形状的锻件，或锻件精度要求较高时，应选用较大规格平锻机；当模锻工步过多，平锻机模具固定空间尺寸不足时，可越级选用大规格平锻机。相反，如进行单模膛单件模锻时，因锻造温度较高，则可按下限选用较小规格平锻机。

第八章 锻模设计

在本书前两章中已介绍了模锻的主要成形工序和模锻工艺设计,本章介绍锻模设计。锻模是金属在热态或冷态下进行体积成形时所用模具的统称。由于各种模锻设备的工作特点有所不同,其锻模的结构有较大差别,而在模膛设计上也稍有差异。因此,本章是按设备进行分类,分别介绍各种设备上的锻模设计,且以锤锻模为主进行详细介绍,而对其它设备上的锻模仅讨论与锤用锻模设计的不同之处。

一个完善的锻模设计过程,首先应当考虑的是:能够获得满足尺寸精度要求和组织性能良好的锻件,同时要满足生产率的要求;其次还应考虑锻模要具有足够的强度和较高的寿命,并且制造简单,安装、调整、维修方便等要求。因此,设计锻模时应当进行综合分析。

第一节 锤用锻模

在前一章中已经介绍了锤上模锻通常生产长轴类和短轴类锻件(见表7-2)的情况,其锻造工步如图7-43至图7-46所示。常用的模锻工步是:终锻、预锻、拔长、滚压、弯曲、成形、墩粗等。本节介绍其模膛设计和锻模结构设计。

一、模锻模膛设计

模锻模膛包括终锻模膛和预锻模膛。所有锻件都要用终锻模膛,而预锻模膛则不一定都需要,要根据具体情况采用。

终锻模膛和预锻模膛所起的作用及设计方法均不同,下面分别介绍。

1. 终锻模膛设计

终锻是模锻工艺过程最重要的成形工步。模锻件的几何形状和尺寸是靠终锻模膛来保证的,任何锻件的模锻工艺过程都必须有终锻。

终锻模膛是锻件最后成形的模膛,通过它获得带飞边的锻件。终锻模膛是根据热锻件图设计的,模膛设计的主要内容是绘制热锻件图、确定飞边槽尺寸及钳口尺寸。

(1) 热锻件图的制定和绘制 热锻件图是将锻件图的所有尺寸计入收缩率而绘制的。对于钢锻件,收缩率一般取1.5%;而对于细长的杆类锻件、薄的锻件、冷却快或打击次数较多而使终锻温度较低的锻件,收缩率取1.2%、带大头的长杆类锻件,可根据具体情况将较大的头部和杆部取不同的收缩率。但是,由于终锻温度难以准确控制,不同锻件的准确收缩率往往需要在长期实践中进行修正。

一般情况下,热锻件图形状与锻件图形状是完全相同的。但在某些情况下,为了保证按热锻件图制造终锻模膛,能锻出合格的锻件,热锻件图的某些地方与锻件图是有差异的,这时应根据具体情况给予具体处理:

1) 终锻模膛易磨损处,应在锻件负公差范围内预先增加磨损量,以提高锻模寿命,保证锻件的合格率。例如图8-1所示的齿轮轮辐部分,其模膛的相应部分容易磨损,使锻出锻件的轮辐厚度 A 增加。因此,应将热锻件图上的尺寸 A 比锻件图上的相应尺寸减小 $0.5\sim 0.8\text{mm}$ 。

2) 锻件上形状复杂且较高的部分应尽量放在上模。如因特殊情况需放在下模时,由于下

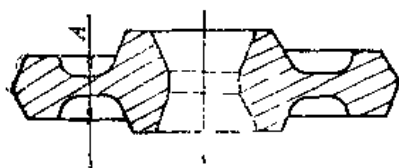


图8-1 齿轮锻件

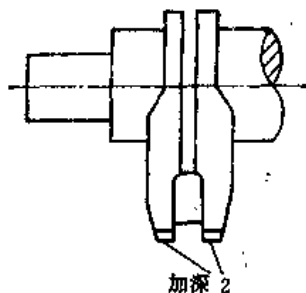


图8-2 曲轴锻件局部加厚

模局部较深处易积聚氧化皮,致使锻件在该处“缺肉”,如图8-2所示的曲轴,其热锻件图在曲柄端头加深约2mm。对某些具有高肋的锻件,其终锻模膛在相应部位应设有排气孔,以保证肋部充满。这时的热锻件图和锻件图就有所不同,如图8-3所示的叶轮。

3)当设备的吨位偏小,模锻不足现象严重时,应使热锻件图高度尺寸比锻件图上相应高度减小一些(接近于负偏差或更小一些),以抵消模锻不足的影响。相反,当设备吨位偏大或锻模承击面偏小时,则热锻件图高度尺寸应接近于正公差,以保证在承击面下陷时仍可锻出合格的锻件。

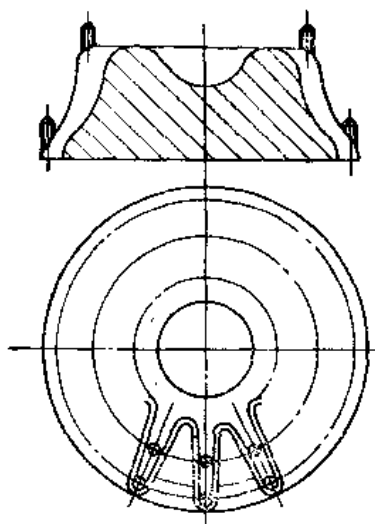


图8-3 叶轮锻件

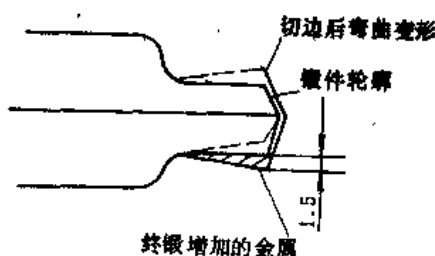


图8-4 切边或冲孔易变形锻件

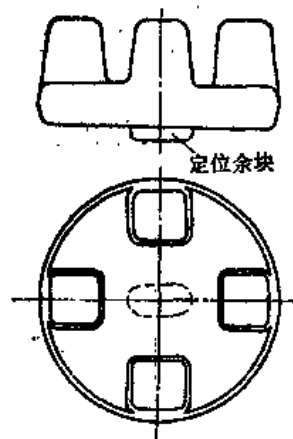


图8-5 需增设定位块的锻件

4)锻件的某些部位在切边或冲孔时易产生变形而影响加工余量时,则应在热锻件图的相应部位适当地增加一定的弥补量,以提高锻件的合格率,如图8-4所示。

5)当锻件的形状不能保证坯料在下模膛内或切边模内准确定位时,则应在热锻件图上增加必要的定位余块,以保证多次锻击过程中的定位以及切飞边时的定位。如图8-5所示。

在绘制热锻件图时需将分模面和冲孔连皮的位置、尺寸全部注明,还要写明未注明的圆角半径、模锻斜度与收缩率,但不需注明锻件公差、技术条件和零件的轮廓线。

(2)飞边槽及其设计 在本书第六章第二节中已介绍了飞边槽的作用,即:①增加金属流出模膛的阻力,迫使金属充满模膛;②容纳多余金属;③锻造时飞边起缓冲作用,减弱上下模的打击,防止模具的压塌和开裂。本节介绍飞边槽结构型式的选用及飞边尺寸的确定。

1)飞边槽的结构型式:飞边槽由桥口与仓部组成,其结构型式如图8-6所示。

型式Ⅰ：一般都采用此种型式。因桥口在上模，受热时间短，温度较低，桥口不易过热和磨损。

型式Ⅱ：当锻件的上模部分形状较复杂，切边需翻转时，为简化切边凸模形状而采用此型式。当整个锻件模膛完全位于下模时，为了简化锻模的制造亦采用此型式。

型式Ⅲ：此种结构的飞边槽特点是仓部较大，能容纳较多的金属，适用于大型和形状复杂的锻件。

型式Ⅳ：一般只用于锻件形状复杂、难以充满的局部地方，如高肋、叉口与枝芽等处。它能较大地增加桥口阻力，迫使金属充满深而复杂的模膛。

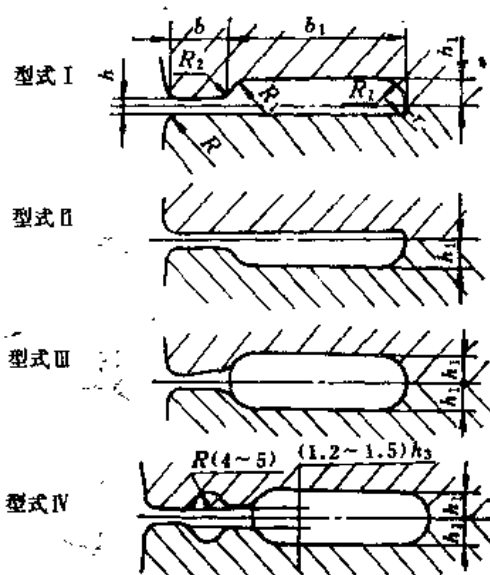


图8-6 飞边槽型式

2) 飞边槽尺寸的确定：飞边槽最主要的尺寸是桥口高度 h_f 、宽度 b 。 h_f 增大，阻力减小，而 h_f 减小则阻力增大。桥口宽度 b 增加时阻力也增加。

锻件的尺寸（准确地说是锻件在分模面上的投影面积）既是选择飞边槽尺寸的依据，也是选择设备吨位的主要依据。故生产中通常按设备吨位来选定飞边槽尺寸，如表8-1所列。

除了用吨位法确定飞边槽尺寸外，还可用计算方法确定。桥口高度 h_f 可用下式确定：

$$h_f = 0.015 \sqrt{S}$$

式中 S ——锻件在分模面上的投影面积(mm^2)。

表8-1 飞边槽尺寸

(mm)

锤 吨 位	h_f	h_1	b	b_1	备 注
1t夹板锤	0.6	3	8	20	
1t模锻锤	1~1.6	4	8	25	齿轮锁口 $b_1 = 30$
1.5t模锻锤	1.6~2	4	8	25~30	
2t模锻锤	2	4	10	30~35	齿轮锁口 $b_1 = 40$
3t模锻锤	3	5	12	30~40	齿轮锁口 $b_1 = 45$
5t模锻锤	3	6×2	12	50	齿轮锁口 $b_1 = 55$
10t模锻锤	5	6×2	16	50	

表8-1中的数据适用于一般情况，遇有下列特殊情况时，应作适当修正：

Ⅰ当选用的模锻锤吨位偏大时，为了防止金属向飞边槽流动过快而影响锻件成形，应适当减小 h_f 值。

Ⅱ当所选用的模锻锤吨位偏小时，为了减小飞边的变形阻力，防止锻压不足，在保证模膛充满的条件下，应适当增大 h_f 值。

Ⅲ当锻件形状比较复杂，为了增加飞边阻力，保证模膛充满，应适当加大 b 值。

Ⅳ当锻件形状比较简单，在保证锻件成形的前提下，为了减少锤击次数，可适当加大

h 值或适当减小 b 值。

V 对于短轴类锻件，当锻模带有封闭形状的锁扣时，为防止操作时因毛坯放偏而把飞边挤到锁扣里去，应适当加大仓部宽度 b_1 （见表8-1中备注栏中尺寸）。

(3) 钳口及其尺寸

1) 钳口的作用与型式：钳口是指在锻模的模锻模膛前面所做的空腔，它是由夹钳口与钳口颈两部分组成，用途是：

I 夹钳口在模锻时用来放置棒料及钳夹头。

II 钳口颈用于加强夹钳料头与锻件之间的连接强度。

III 齿轮类锻件在模锻时无夹钳料头，钳口是作为锻件起模之用。

IV 在锻模制造时，钳口作为浇铸模膛检验件（金属盐或铅）的浇口。

钳口型式如图8-7及图8-8、图8-9所示。其中图8-7是常用型式，图8-8是用于模锻齿轮类锻件，而图8-9则是用于模锻重量比较大的锻件。如果有预锻模膛，因预锻与终锻两模膛之间的距离较小，为了便于模具加工，可将两模膛的钳口开通，如图8-10所示。

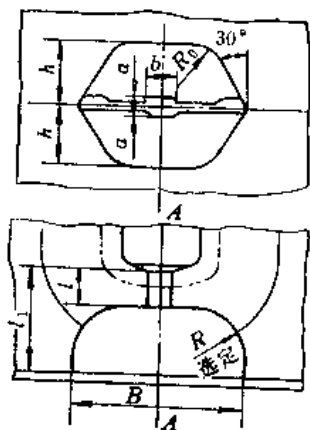


图8-7 钳口

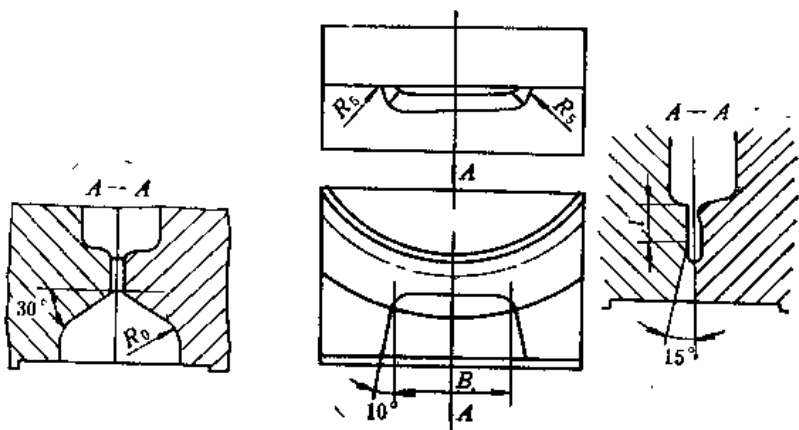


图8-8 特殊钳口

2) 钳口尺寸的确定：钳口的尺寸（如图8-7所示），主要依据夹钳料头的直径及模膛壁厚等尺寸来确定。应能保证夹料钳子能进行自由操作，在调头锻造时应能放置下锻件的相邻端部。详细情况可参阅《锻模设计手册》中的有关部分。

2. 预锻模膛设计

终锻时常见的缺陷有折迭和充不满等。这些缺陷都是由于终锻时金属不合理的变形流动引起的。如第六章开式模锻一节中所述，这与锻件本身的尺寸、形状、终锻前的坯料情况和模膛结构、型式等有关。

对终锻时容易产生折迭和不易充满的锻件，常采用预锻工步，以便合理地分配坯料各部分的金属体积，以避免折迭的产生和有利于金属充满模膛，同时可以减少终锻模膛的磨损。但应说明，并非所有可能产生上述缺陷的锻件都必需采用预锻。因为不少锻件通过采用完善的制坯工步也可以获得良好的质量。而且采用预锻模膛后也带来一些不利的因素，例如要增大模块尺寸，并引起偏心打击等。因此，预锻并不是在任何情况下都必需的。

下面从几种常见缺陷的分析入手，研究预锻模膛的设计问题。

(1) 折迭 折迭是金属在变形流动的过程中，已氧化的表层金属汇合在一起而形成的。

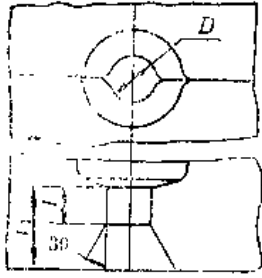


图8-9 圆形钳口

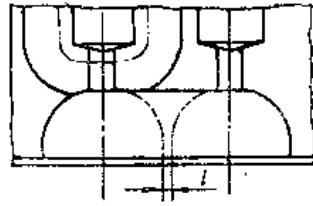


图8-10 公用钳口

各种不同形状的锻件，模锻时能否形成折迭以及形成折迭的部位和条件都是有一定规律的^[1]。这里仅就工字形断面的锻件和带孔锻件，从防止折迭出发介绍预锻模膛的设计。

图8-11是工字形锻件和带孔锻件模锻时形成折迭的部位，图8-12是折迭形成过程的示意图。模锻时折迭产生的条件主要是：

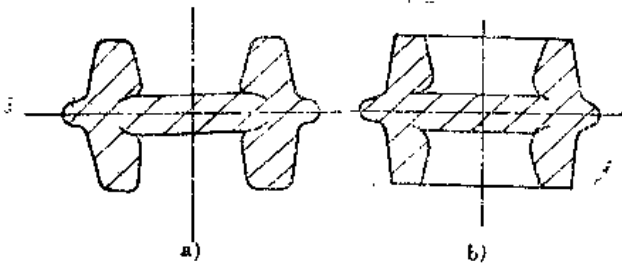


图8-11 产生折迭部位示意图
a) 工字形件 b) 带孔件

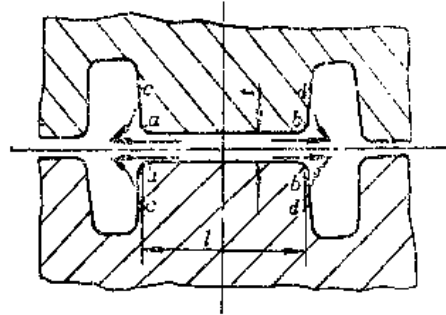


图8-12 工字形断面锻件折迭形成过程示意图

- 1) 靠近接触面附近的金属要有流动（见图8-12）。
- 2) 该部分金属必需沿水平方向外流。
- 3) 由中间部分排出的金属量较大。

三个条件中，靠近接触面 a 、 b 附近的金属能否有流动是与锻件的尺寸直接有关的，一般是不易改变的，而其余条件是可以人为控制的。因此，为防止折迭产生，应当：

- 1) 使中间部分金属在终锻时的变形量小一些，亦即由中间部分排出的金属量少一些。
- 2) 创造条件（例如增加飞边桥口部分的阻力或减小充填模膛的阻力）使终锻时由中间部分排出的金属量尽可能向上和向下流动，继续充填模膛。

例如，当 l/t （图8-12）较大时，模锻过程中，为防止折迭的产生，先进行预锻。预锻模膛可设计成如图8-13所示的形状，并取 $S_1 \approx S_2$ 。虽然预锻后坯料的实际面积大于预锻模膛的断面积，但是终锻时，在金属未填满模膛之前就已有部分金属流入飞边槽内了。

当 l/t 很大时，极易产生折迭，为使中间部分的金属在终锻时变形量更小些，则应预先锻成如图8-14所示的形状，在考虑预锻时打不靠的前提下，使面积 S_2 等于或略大于面积 S_1 。

当 l/t 不大，且 $h < 2b$ 时（图8-15），产生折迭的可能性较前面两种小，模膛也容易充满，这时在保证 $S_1 = S_2$ 的条件下预锻模膛设计成简单的矩形即可（图8-15）。

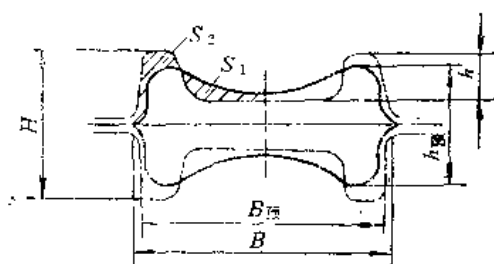


图8-13 工字形截面的预锻模膛

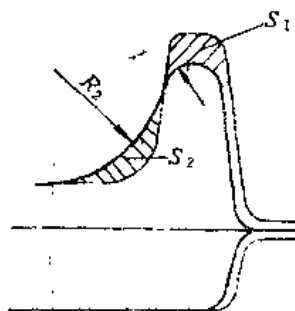


图8-14 预锻模膛

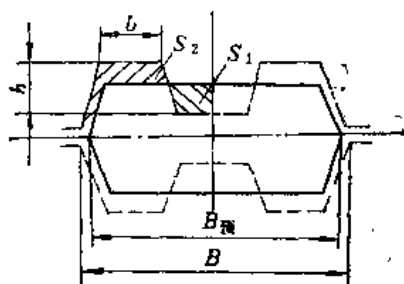


图8-15 工字形截面预锻模膛

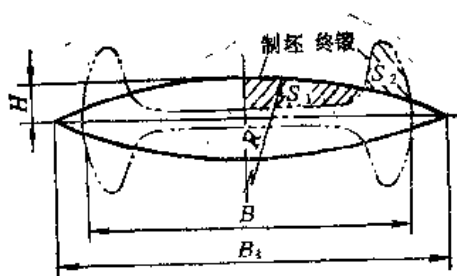


图8-16 工字形截面预锻模膛

这里应当提到，为防止工字形锻件终锻时产生折迭，有些工厂在制坯时采取了如下措施，获得了良好的效果。他们根据面积相等原则，使制坯模膛的横截面积接近于终锻模膛的横截面积（图8-16），并使制坯模膛的宽度比终锻模膛的相应宽度 B 大 $10 \sim 20\text{mm}$ ，即：

$$B_1 = B + 10 \sim 20\text{mm}$$

于是，由制坯模膛锻出的中间坯料覆盖终锻模膛有余，终锻时，首先出现飞边，在飞边桥口部分形成较大的阻力，迫使中心部分的金属以挤入的形式充填肋部。因中心部分金属充填肋部后已基本无剩余，故最后仅极少量金属流向飞边槽，从而可避免折迭的产生。

对于带孔的锻件，为防止折迭产生，预锻时用斜底的连皮，终锻时用带仓部的连皮（见第七章图7-22及图7-23），这样保证模锻最后阶段内孔部分的多余金属不是流向飞边，在锻件内部造成折迭，而是保留在冲孔连皮内，这样就避免了在锻件内产生折迭。

（2）充不满 模锻时，引起充不满的原因可能是：在模膛深而窄的部分由于阻力大不易充满；在模膛的某些部分（例如叉形件的内端角），由于金属很难流到而不易充满；制坯时某些部分坯料体积不足，或操作时由于放偏，某部分金属量不足引起充不满等。下面只分析研究前两种情况：

1) 带高肋的锻件模锻时产生的充不满情况如图8-17所示。

模锻时，在肋部由于摩擦阻力、模壁引起的垂直分力和此处金属冷却较快、变形抗力大等原因，常常产生充不满的情况。因此，为使肋部充满，一方面应设法减小金属流入肋部的阻力，另一方面应加大桥口部分的阻力，迫使金属向肋部流动，在设计预锻模膛时，一般采取下列具体措施：

1 增大过渡处的圆角半径 R 。

2 将带肋的部分放在上模。

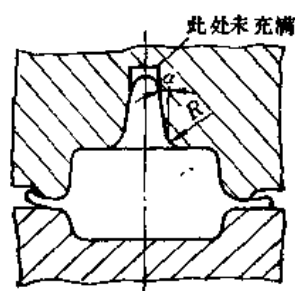


图8-17 高肋锻件

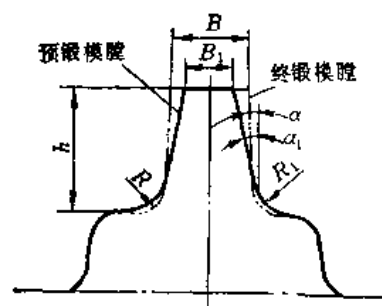


图8-18 高肋锻件的预锻模膛

Ⅱ 增大桥口部分的阻力，即加大 b/h 值。

但是，圆角半径 R 过大，要增大加工余量；桥口部分阻力过大，上下模不能打靠，甚至可能造成桥口被打塌等。因此，这些措施的效能是有一定限度的。

为解决这一矛盾，在锤上模锻时先进行预锻。设计预锻模膛时的主要出发点是减少终锻时金属充填肋部模膛的阻力。一般措施是在难充满的部分增大模膛的斜度（图8-18）。这样，预锻后的坯料终锻时，坯料和模壁间有了间隙，消除了模壁对金属的摩擦阻力和由模壁引起的向下垂直分力，使金属容易向上流动充满模膛。但是，由于增大了斜度，预锻模膛本身便不易被充满。为了使预锻模膛也能被充满，必需增大圆角半径。但圆角半径也不宜增加过大，因为过大了不利于终锻时充满模膛，甚至终锻时可能在此处将金属啃下并压入锻件内而形成折迭，一般取 $R_1 = 1.2R + 3\text{mm}$ 。

如果难充填的部分较大， B 较小，预锻模膛的拔模斜度不宜过大，否则预锻后 B_1 很小，冷却快，终锻时反而不易充满模膛。这时可设计成如图8-19所示的形状。

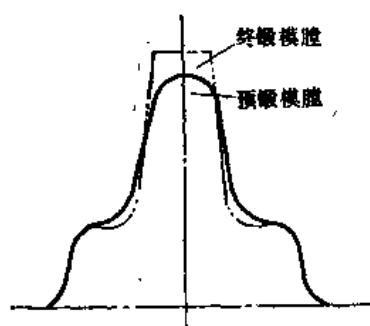


图8-19 高肋锻件的预锻模膛

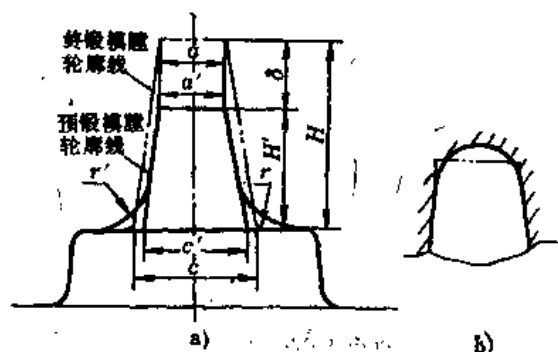


图8-20 高肋锻件的预锻模膛

关于锤上和热模锻压力机上预锻模膛的设计，文献[58]中介绍了另一种设计方法，如图8-20所示。其特点是适当减小预锻模膛的高度 ($\delta = 3 \sim 8\text{mm}$)，但保证顶端的水平尺寸和模膛斜度与终锻模膛的相应部分一致，例如 $a = a'$ 等。当然这时 $c' < c$ 。具体形状如图8-20a所示。对于很薄的肋，如果端部圆角又很小，为使圆角处能较好地充满，应把端部设计成大圆弧，如图8-20b所示。这一方案的实质是分两步成形：预锻时先成形上部分，终锻时该部分仅作刚性平移（当然方案b在终锻时端部尚需局部锻粗），金属与模壁间始终存在着一定间隙（在完全充满之前），从而能在较大程度上减小终锻时金属的流动阻力。

2) 叉形锻件模锻时，常常在内端角处产生充不满的情况（图8-21）。

将坯料直接进行终锻时, 金属的变形流动情况如图8-22所示。沿横向流动的金属先水平外流, 与模壁接触后, 部分金属转向内角处流动。由变形流动的情况决定了内角部分是最难充满的地方, 之所以在内端角部分不易充满, 还由于此处被排出的金属除沿横向流入模膛外, 有很大一部分沿轴向流入飞边槽 (图8-23), 造成内端角处金属量不足所致。

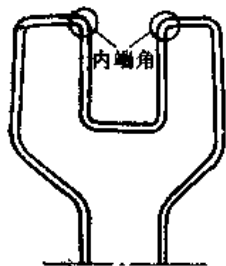


图8-21 叉类锻件内端角充不满

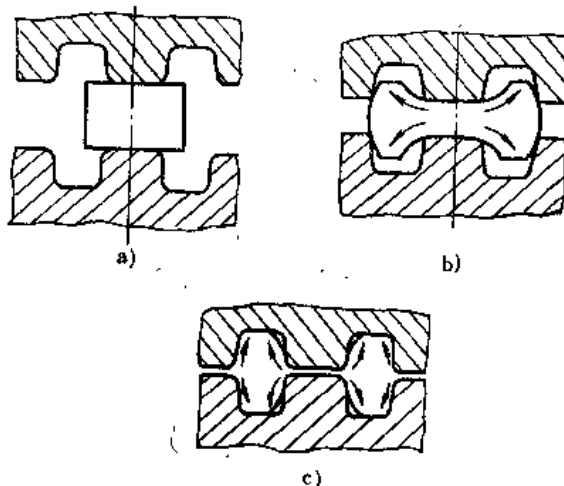


图8-22 叉类锻件金属的变形流动

因此, 为避免这种缺陷, 终锻前制坯时应当先将叉形部分劈开。这样, 终锻时就会改善金属的流动情况, 以保证内端角处充满。

在锤上模锻时, 需先进行预锻。为便于金属沿横向流入模膛, 预锻模膛应设计成如图8-24所示的形状。当需劈开部分窄而深时, 可设计成如图8-25所示的形状。为限制金属沿轴向大量流入飞边槽, 在模具上应设计有制动槽 (见图8-23)。

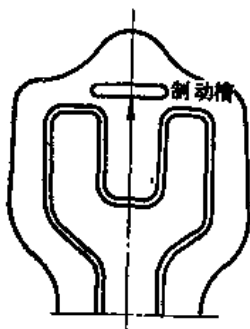


图8-23 轴向流动和制动槽

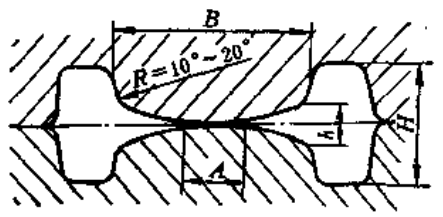


图8-24 叉形部分劈料台

3) 带枝芽的锻件模锻时, 常常在枝芽处充不满。

该类锻件模锻时在枝芽处充不满的原因通常是由于此处金属量不足。因此, 预锻时应在该处聚集足够的金属量。为便于金属流入枝芽处, 预锻模膛的枝芽形状应适当简化, 与枝芽连接处的圆角半径适当增大, 必要时可在分模面上设阻力沟, 加大预锻时流向飞边的阻力, 如图8-26所示。

预锻后的坯料进行终锻, 能减少终锻模膛的磨损, 提高整个锻模的寿命。如果仅为此而增加预锻, 这时的预锻模膛设计基本上和终锻模膛一样, 只是在模膛的凸圆角处及分模面剖口的圆角处, 将预锻模膛的圆角半径作得比终锻模膛的圆角半径略大一些 (增大1~2mm),

以免在终锻时在该处形成折迭。

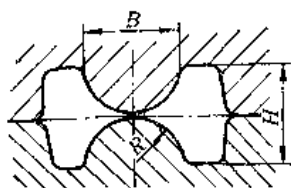


图8-25 叉形部分劈料台

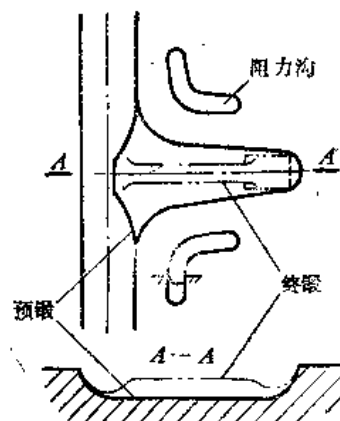


图8-26 带枝芽锻件的预锻模膛

二、制坯模膛设计

本书前一章已经以连杆为例说明制坯工步的作用是为了初步改变原坯料的形状，合理地分配坯料，以适应锻件横截面积和形状的要求，使金属能较好地充满模膛。

不同形状的锻件采用的制坯工步也是不同的。例如，长轴类锻件在锤上模锻时常用的制坯工步是拔长、滚压、弯曲、成形等；而短轴类锻件则常用镦粗或成形镦粗（形状较复杂的锻件）等制坯工步。上述各制坯工步所用的模膛分别叫做拔长模膛、滚压模膛、弯曲模膛、成形模膛等等。

下面从各制坯工步的变形分析入手，具体介绍各个制坯模膛的设计。

1. 滚压模膛设计

滚压工步是用以实现改变坯料的形状，减小某一部分截面积，增大另一部分的截面积，以获得接近计算毛坯图形状和尺寸的坯料的制坯工步。另外，滚压还可以起到清除氧化皮的作用。

将接近于计算毛坯平均直径的棒料放在滚压模膛内，然后进行锤击（图8-27）。首先杆部的高度减少，宽度增加，部分金属流入头部。由于钳口的阻止作用，使头部坯料加粗，而坯料总长稍有增加。因此滚压时金属的变形可以近似地看作是拔长和镦粗的组合（杆部拔长，头部镦粗）。杆部拔长是在两端受到阻碍的情况下进行的；头部的加粗是由于杆部金属流入头部所致。因此它与自由拔长和镦粗又不完全相同。由于杆部接触区较长和两端又都受到阻碍，沿轴向流动受到的阻力较大，故每次锤击后，大量金属横向流动，增加了坯料的宽度，仅有小部分金属流入头部。为了得到所要求的坯料尺寸，每次锤击后，翻转 90° 再行锤击，并反复进行，直到接近计算毛坯图的尺寸为止。

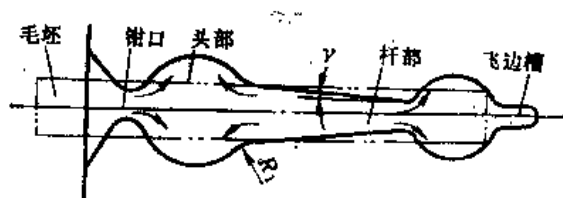


图8-27 滚压模膛

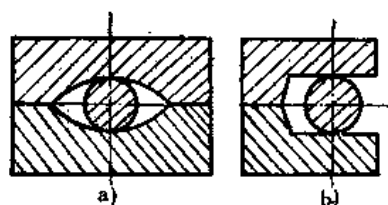


图8-28 滚压模膛的横断面形状

滚压次数愈多，愈接近计算毛坯的尺寸，但是滚压次数过多也不好，这不仅降低生产

率,而且坯料温度也要降低,使终锻时所需要的变形力(功)显著增加。因此在保证坯料质量的前提下,应尽可能地减少滚压次数。这就要求强化每次滚压的效果,其关键是使每次滚压时都有尽可能多的金属由杆部流入头部。具体从以下几方面考虑:

(1)滚压模膛的横截面积 以图8-28所示的两种截面形状为例,图a(闭式)借助于斜壁阻力的作用,有利于金属作轴向流动。闭式滚压的优点是:滚压的效率,滚压后坯料的表面比较光滑。缺点是这种截面的模膛用一般机床加工比较复杂。图b(开式)的优点是加工较简单,但滚压效率较低,滚压的坯料的表面质量也较低。当由坯料杆部排出的金属较多时,应采用闭式的结构。或者杆部采用闭式的,头部采用开式的,即所谓混合类滚压模膛。

(2)滚压模膛的高度 在杆部,模膛的高度应比计算毛坯相应部分的直径小一些。这样每次的压下量可以大一些,由杆部排入头部的金属可以多一些。虽然滚压到最后的坯料断面不是圆形,但是只要截面积相等即可。

例如在计算闭式滚压模膛杆部高度时,应采用:

1)滚压后的坯料截面积 $S_{滚}$ 等于计算毛坯图相应部分的截面积 $S_{计}$,即

$$S_{滚} = S_{计}$$

2)认为滚压后坯料椭圆截面之长径为短径的1.5倍(图8-29),即

$$\frac{B}{h} = \frac{3}{2}$$

$$S_{滚} = \pi \frac{B}{2} \frac{h}{2} = S_{计}$$

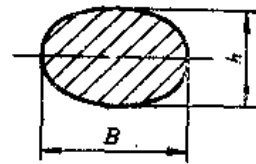


图8-29 滚压模膛高度

将上两式代入并经过化简便可求得杆部高度。

$$h = 0.922\sqrt{S_{计}}$$

在模锻锤上滚压时,上下模一般打不靠,故实际采用的模膛高度比计算的小一些,一般取:

$$h = (0.8 \sim 0.9)\sqrt{S_{计}}$$

$$\text{或 } h = (0.7 \sim 0.8)d_{计}$$

在头部,为了有助于金属的聚集,模膛的高度应等于或略大于计算毛坯图相应部分的直径。即:

$$h = (1 \sim 1.05)d_{计}$$

当头部靠近钳口时,可能要有一部分金属由钳口流出,这时系数取1.05。

(3)滚压模膛的纵截面形状 为了有助于杆部金属流入头部,一般在杆部设计 $2^\circ \sim 5^\circ$ 的斜度(如果毛坯图上原来就有,则可用原来的斜度)。

在杆部与头部的过渡处,应做成适当的圆角。

滚压模膛各部分的宽度对金属的轴向流动亦有影响。宽度愈小有利于金属的轴向流动。但是宽度太小,在滚压过程中要形成折迭(图8-30),因此在确定模膛宽度时,主要从避免折迭出发。滚压模膛各部分的宽度应大于坯料上相应部分在变形过程中所达到的最大宽度。

滚压模膛长度应根据热锻件长度 $L_{锻}$ 确定。由轴类件的形状不同其设计亦不同。如:对于直轴件

$$L = L_{锻} + (1 \sim 3) \text{ mm}$$

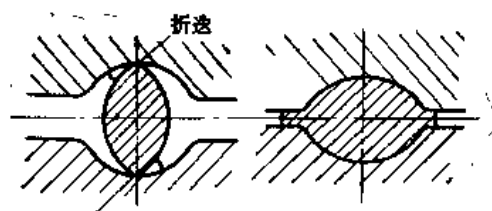


图8-30 滚压模膛的宽度

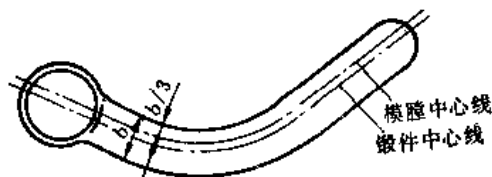


图8-31 弯曲时无拉伸的锻件

对于弯曲轴件, 如弯曲时无拉伸现象, 如图8-31所示, 则模膛长度 L 按锻件内侧 $1/3$ 宽度处的连线的展开长度计算, 其模膛应做成如图8-32所示的结构。

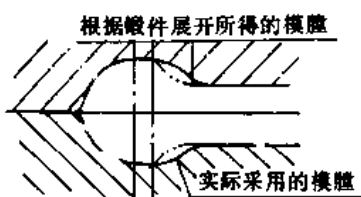


图8-32 滚压模膛

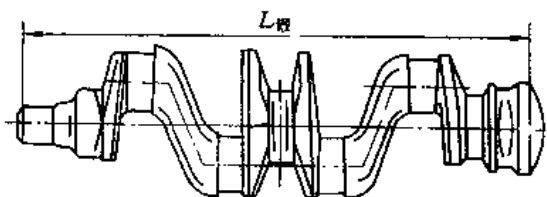


图8-33 弯曲时拉伸现象严重的锻件

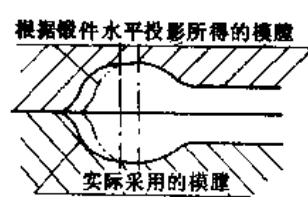


图8-34 滚压模膛

如弯曲时拉伸现象严重, 如图8-33所示, 模膛长度 L 按锻件水平投影的长度取值, 其模膛应作成如图8-34所示的结构。

总之滚压模膛从结构上可以分为以下几种:

(1) 开式 横截面为矩形, 如图8-35a所示, 此种模膛制造较方便, 但滚压时, 聚料作用较小, 适用于锻件各段截面变化较小的情况。

(2) 闭式 横截面为椭圆形, 如图8-35b所示。正如前面所分析的那样, 此种滚压模膛滚压时, 聚料效果好, 坯料表面光滑, 但模膛制造较复杂, 适用于锻件各部分截面变化较大的情况。

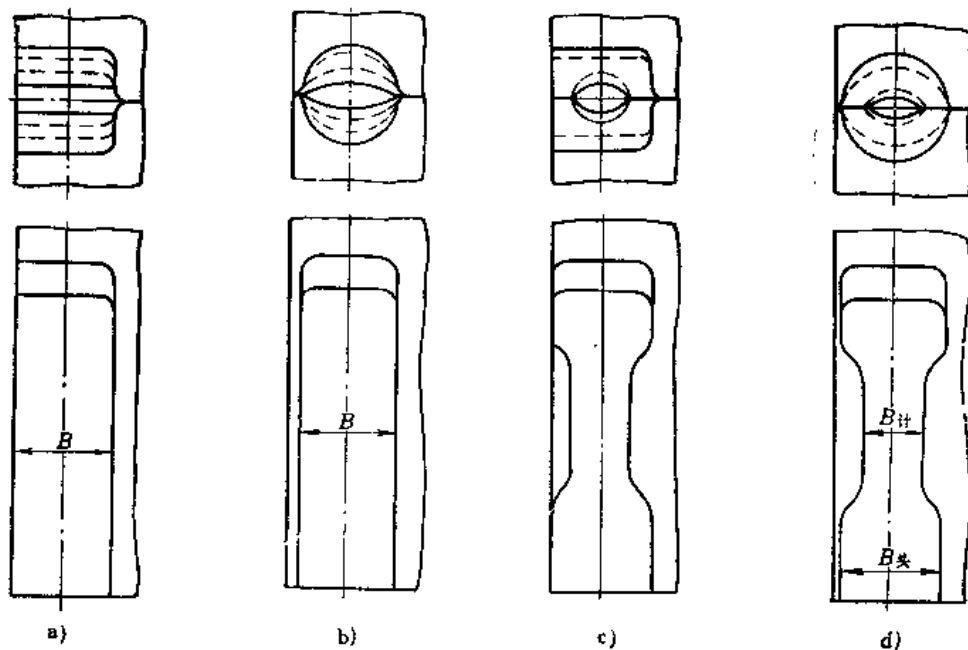


图8-35 滚压模膛

a) 开式 b) 闭式 c) 混合式 d) 不等宽闭式

(3)混合式 锻件的杆部采用闭式滚压,而头部采用开式滚压,如图8-35c所示,此种模膛通常用于锻件头部具有深孔或叉形的情况。

(4)不等宽式 模膛的头部较宽,杆部较窄,如图8-35d所示,当 $B_{\text{头}}/B_{\text{杆}} > 1.5$ 时采用。因杆部宽度过大不利于排料,所以在杆部取较小宽度。

(5)不对称式 上下模膛的深度不等,如图8-36所示,这种模膛具有滚压模膛与成形模膛的特点,适用于 $h'/h < 1.5$ 的杆类锻件。

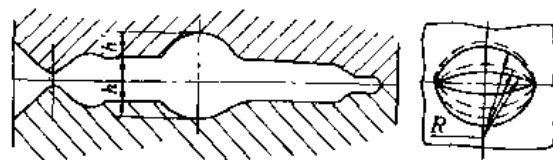


图8-36 不对称闭式滚压模膛

2. 拔长模膛设计

使坯料某部分的截面积减小,长度增加的变形工步叫拔长工步,用来完成拔长工步的模膛叫拔长模膛。

拔长模膛按横截面形状可分为开式和闭式两种。开式模膛的横截面形状为矩形,如图8-37a所示。这种型式结构简单,制造方便,应用较广。闭式模膛的横截面形状为椭圆形,如图8-37b所示。这种型式拔长效果较好,但操作较难,要求把坯料准确地放置在模膛中,否则坯料易弯曲,一般用于 $L_{\text{杆}}/d_{\text{杆}} > 1.5$ 的细长锻件。

按在锻模上的布置情况分为直式(图8-37a)和斜式(图8-37b)两种。

按工作特点也可分成两种:一种是杆部的最小高度和最大长度靠模具控制,如图8-37a所示;另一种是杆部的高度及长度完全靠操作者控制,如图8-37b所示。

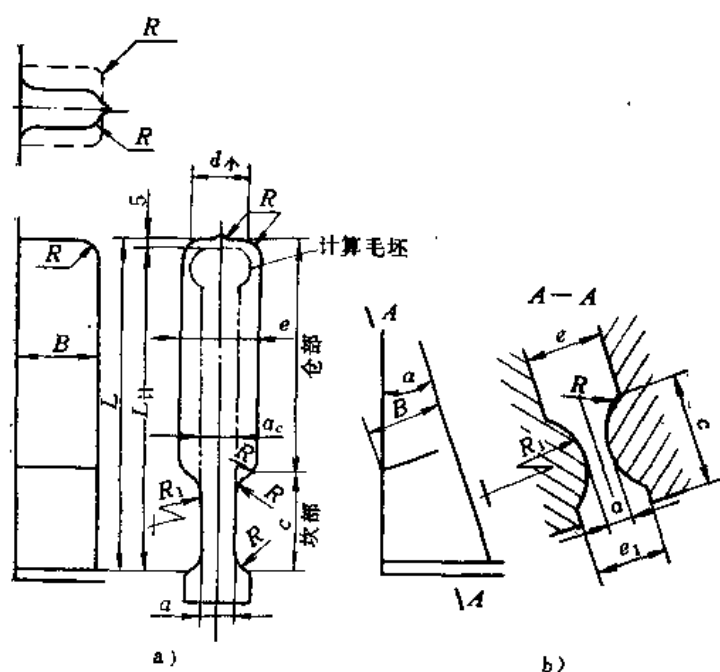


图8-37 拔长模膛

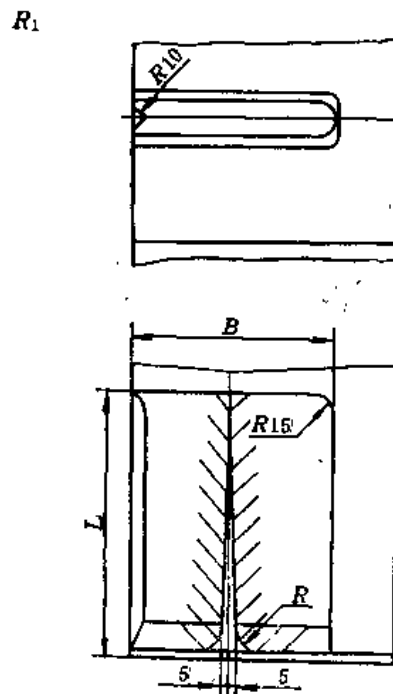


图8-38 拔长台

以上所介绍的拔长模膛是锤上模锻时最常采用的拔长模膛,当拔长部分较短时,可以采用较简易的拔长模膛,即拔长台(图8-38),它是在锻模的分模面上留出一平台,边缘倒圆角,用以进行拔长。

坯料拔长时也要考虑生产率问题,为此可以从以下几点着手:

- 1) 拔长模膛坎部的横截面形状;
- 2) 坎部的高度;
- 3) 坎部的长度;
- 4) 坎部的纵截面形状 (图8-37)。

如上所说开式拔长模膛具有很多优点,实际生产中应用较多,所以下面重点介绍开式拔长模膛的设计。

(1) 坎部的高度 h 坎部的高度 h 应该比计算毛坯的最小断面的边长再小些,这样每次的压下量可以大一些,拔长效率高一些,因此在计算坎部的高度时,可根据两个条件来确定。

1) 认为拔长后坯料的截面是矩形,并取

$$\frac{b_{\text{平均}}}{h} = 1.25 \sim 1.5$$

2) 根据计算毛坯的形状和尺寸。如果坯料杆部尺寸变化不大,拔长后不再进行滚压,其坎部的高度应保证能获得最小的断面,而较大的截面可以用上下模打不靠来保证。因此取:

$$b_{\text{计}} h = S_{\text{计最小}}$$

运算后可得:

$$h = (0.8 \sim 0.9) \sqrt{S_{\text{计最小}}}$$

$$\text{或 } h = (0.7 \sim 0.8) d_{\text{最小}}$$

拔长后需进行滚压的,则应保证拔长后获得平均截面或直径。如此考虑,取:

$$b_{\text{平均}} h = S_{\text{杆平均}}$$

运算后得:

$$h = (0.8 \sim 0.9) \sqrt{S_{\text{杆平均}}}$$

$$\text{或 } h = (0.7 \sim 0.8) d_{\text{平均}}$$

式中 $S_{\text{杆平均}} = V_{\text{杆}} / L_{\text{杆}}$;

$V_{\text{杆}}$ ——计算毛坯杆部体积;

$L_{\text{杆}}$ ——计算毛坯杆部长度。

系数的大小与 $L_{\text{杆}}$ 的大小有关,当 $L_{\text{杆}} > 500 \text{ mm}$ 时系数取小值,当 $L_{\text{杆}} < 200 \text{ mm}$ 时系数取大值,当 $200 \text{ mm} < L_{\text{杆}} < 500 \text{ mm}$ 时系数取中间值。

(2) 坎部的长度 c 为了提高拔长效率,每次的送进量应适当小些,因此坎部不宜太长。可取:

$$c = K d_0$$

式中 d_0 ——被拔长的原坯料直径。

系数 K 与被拔长部分长度 l_0 有关,可按照表8-2选用。

表8-2 系数 K

被拔长部分原始长度	$< 1.2 d_0$	$(1.2 \sim 1.5) d_0$	$(1.5 \sim 3.0) d_0$	$(3 \sim 4) d_0$	$> 4 d_0$
系 数	0.8~1.0	1.2	1.4	1.5	2.0

(3) 坎部的宽度 B 应考虑上下模一次就打靠时金属不流到外面; 翻转 90° 再锤击时, 不产生弯曲。取:

$$B = (1.3 \sim 2.0)d_0$$

系数值根据拔长模膛和坯料的具体情况选取。一般直式拔长模膛取较大值, 斜式的取较小值; 坯料直径大时取较小值, 坯料直径小时取较大值, 具体设计时可参阅《锻模设计手册》表4-23选取。

另外坎部的纵截面形状应做成凸圆弧形, 这样有助于金属的轴向流动, 可以提高拔长效率。

关于拔长模膛的其它尺寸确定可参阅《锻模设计手册》表4-21~表4-24或参阅《锻工手册》。

还有一种用于直轴类锻件的制坯模膛, 叫做压肩模膛。由于其形状与设计方法都与开式滚压模膛一样, 仅仅在操作上有些差别 (只是一次压扁, 不作 90° 翻转)。因此, 压肩模膛实质上也就是开式滚压模膛的特殊使用状态, 故从略。

3. 弯曲模膛设计

弯曲工步的作用是将坯料在弯曲模膛内压弯, 使其符合终锻模膛在分模面上的形状。在弯曲模膛中锻造时坯料不翻转, 但弯好后放在模锻模膛中锻造时需要翻转 90° 。

弯曲所用的坯料可以是原坯料, 也可以是经拔长、滚压等制坯模膛变形过的坯料。

按变形情况不同, 弯曲可分为自由弯曲式 (图8-39) 和夹紧弯曲式 (图8-40) 两种。自由弯曲式是坯料在拉伸不大的条件下进行弯曲成形的, 适用于具有圆浑形弯曲的锻件, 一般只有一个弯。夹紧弯曲, 是坯料在模膛内除了弯曲成形外, 还有显著的拉伸现象, 适用于多个弯的、具有急突弯曲形状的锻件。

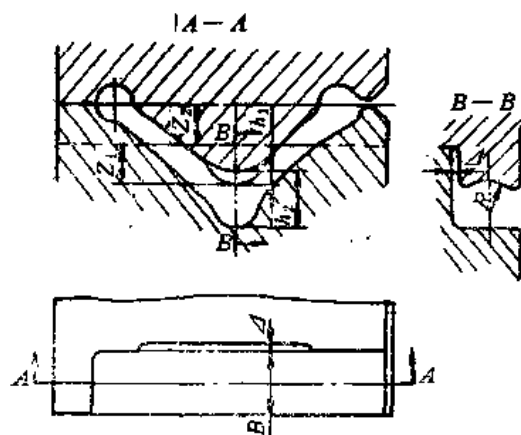


图8-39 自由弯曲的弯曲型槽

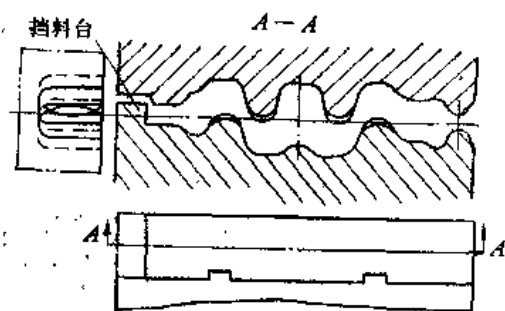


图8-40 夹紧弯曲的弯曲模膛

对需要进行夹紧弯曲的锻件, 在设计计算坯料时, 要估计到弯曲时轴线的伸长。

锤上模锻时弯曲模膛的设计要点是:

1) 弯曲模膛的形状是根据模锻模膛在分模面上的外形 (分模线) 来设计的。为了能将弯曲后的坯料自由地放进模锻模膛内, 并以锻粗方式充填模膛, 弯曲模膛的轮廓线应比模锻模膛在分模面上的外形尺寸小一些, 每边小 $1 \sim 5\text{mm}$ 。

2) 由于坯料在模锻模膛中锻造时其剧烈弯曲处可能产生折迭, 所以弯曲模膛的急突弯曲

处,应做成允许的最大圆角。

3)弯曲模膛在下模上应有两个支点,以支承压弯前的坯料。此两支点的高度应使坯料呈水平位置。

4)当用原坯料在弯曲模膛内压弯时,在弯曲模膛末端应做出挡料台,以供定位用;如坯料先经过滚压制坯,可利用钳口的颈部定位。

5)弯曲模膛分模面应做成上下模突出分模面部分的高度大致相等。

6)为了更好地定位和防止压弯时坯料偏向一边,弯曲模膛的突出部分(或仅上模膛的突出部分)在宽度方向应做成弧形凹坑(见图8-39中的B-B)。

7)为了防止碰撞,弯曲模膛下模空间应留有间隙。

4.成形模膛设计

成形工步与弯曲工步相似,也是用来使坯料变形,使其符合终锻模膛在分模面上的形状。它与弯曲不同的是:它是通过局部转移金属来获得所需要的形状,因此金属的流动量较大。

成形模膛按纵截面形状可分为对称式(见图8-41)和不对称式(图8-42)两种,常用的是不对称式。成形模膛的设计原则与方法同弯曲模膛。

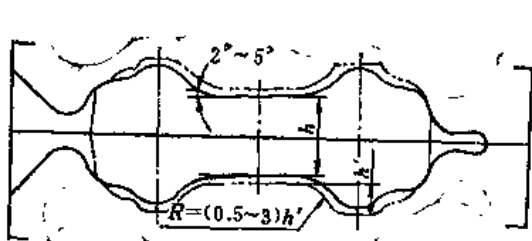


图8-41 对称式成形模膛

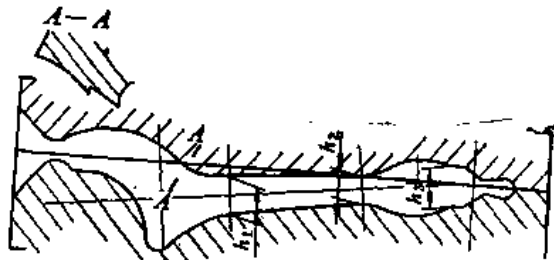


图8-42 不对称式成形模膛

对于有枝芽的锻件,为使枝芽部分在模锻时能较好的充满模膛,需采用成形模膛进行制坯。在设计成形模膛时应考虑能使金属更多地流到枝芽部分。为控制金属的展览,可采用闭式成形模膛。

5.镦粗台和压扁台设计

镦粗台是用来镦粗坯料以减小其高度,增大其直径,使镦粗后的坯料在终锻模膛内能够复盖一定的凸部与凹槽,以防止锻件产生折迭与充不满,并起清除坯料氧化皮、减少模膛磨损的作用,多用于短轴类锻件的制坯,如图8-43所示。

压扁台是用来压扁坯料以增大宽度,使压扁后的坯料能够复盖住终锻模膛的一定凸部与凹槽,起到与镦粗台相同的作用,压扁时坯料的轴线与分模面平行放置,主要用于锻件平面图近似矩形的情况(图8-44)。

根据锻件形状的要求,在镦粗或压扁的同时,也可以在坯料上压出凹坑,兼有成形镦粗的作用。

镦粗台或压扁台都设置在模块边角上,所占面积略大于坯料镦粗或压扁之后的平面尺寸。为了节省锻模材料,可以占用部分飞边槽仓部,但应使平台与飞边槽平滑过渡连接。

镦粗台一般安排在锻模的左前角上,平台边缘应倒圆,以防止镦粗时在坯料上产生压痕,

给锻件带来产生折迭的可能。

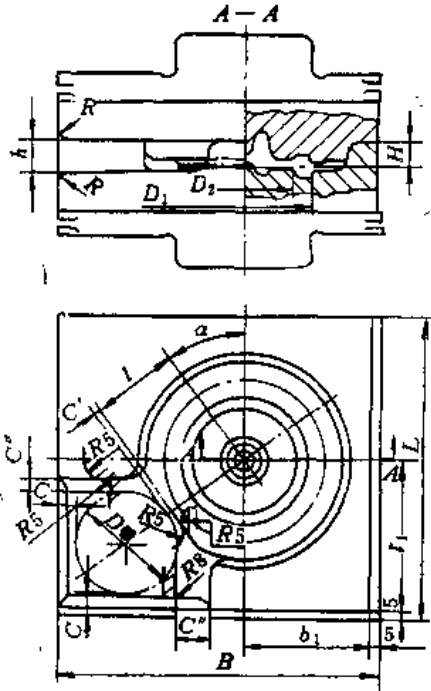


图8-43 锻粗台

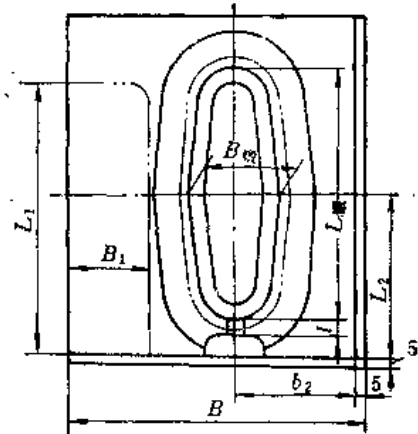


图8-44 压扁台

在设计锻粗台时,根据锻件的形状、尺寸和原坯料尺寸确定锻粗后坯料的直径 d (第七章中已详细介绍),再根据 d 确定锻粗平台的尺寸。

压扁台一般安排在锻模左边,为了节省锻模材料,也可占用部分飞边槽仓部。

压扁台的有关尺寸如下(见图8-44):

压扁台的长度 L_1

$$L_1 = L_{\text{压}} + 40 \text{ mm}$$

压扁台的宽度 B_1

$$B_1 = b_{\text{压}} + 20 \text{ mm}$$

式中 $L_{\text{压}}$ ——压扁后的坯料长度(mm);

$b_{\text{压}}$ ——压扁后的坯料宽度(mm)。

6. 切断模膛设计

若模锻件尺寸小,根据具体情况可以采用一棒多件地连续模锻,而切断模膛就是用来切断棒料上锻成的锻件。

根据切断模膛在锻模上的位置不同可分为前切刀(图8-45)和后切刀(图8-46)两种型式。前切刀可位于锻模的右前角或左前角,前切刀操作方便,但切断的锻件易堆积在锤导轨旁。后切刀通常放在左后角(图8-46),由此切下的锻件直接落到锻锤后边的传送带上,送到下一工位。

前切刀、后切刀的模膛尺寸可参阅《锻模设计手册》表4-32确定或参考《锻工手册》第五篇第二章。

三、锻模结构设计

锤锻模的结构设计对锻件质量、生产率、劳动强度、锻模和锻锤的使用寿命等有很大的影

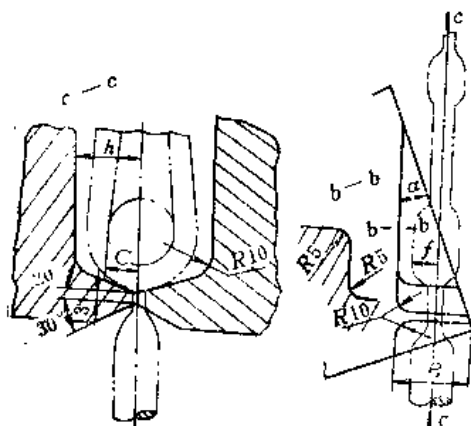


图8-45 前切刀

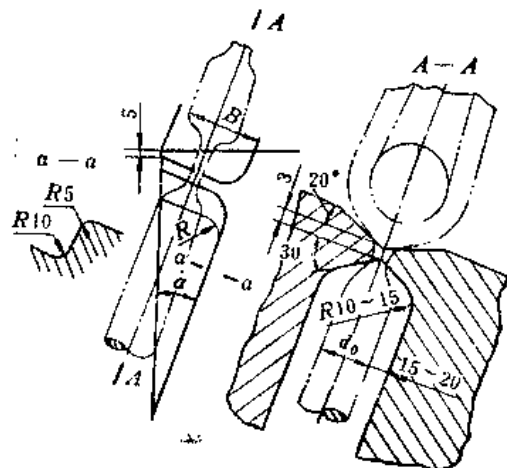


图8-46 后切刀

响, 因此应予以重视。

锤锻模的结构设计应着重解决下列问题:

- 1) 模膛的布排;
- 2) 错移力的平衡以及导向问题;
- 3) 锻模的强度;
- 4) 模块尺寸。

下面分别讨论。

1. 模膛的布排

模膛的布排是根据模膛数以及各模膛的作用及操作方便安排的。

如果锻模上仅有一个模膛(单模膛锻模), 只要使模膛中心与锻模中心一致即可。但在生产中, 锤上模锻通常采用的是多模膛锻模, 这时模膛的布排就比较复杂了。以连杆为例, 如果按照锻造的顺序排列, 即拔长、滚压、预锻、终锻, 从操作上看是比较方便的, 但是终锻模膛如放在最边上, 模锻时要产生很大的偏心力矩(图8-47), 使上下模错移, 相应地锻件沿分模面也产生错移。不仅如此, 在这样的受力条件下锤杆很容易折断, 导轨容易磨损等等。因此, 对多模膛锻模在排列模膛时需全面考虑各方面的因素。

(1) 终锻与预锻模膛的布排

1) 模膛中心与锻模中心: 锻模中心指锻模燕尾中心线与键槽中心线的交点, 它位于锤杆轴心线上, 是锻锤打击力的作用中心。

模膛中心即锻造时模膛承受锻件反作用力的合力作用点。可依据锻件在分模面上的面积重心确定。当变形抗力分布均匀时, 模膛中心即为模膛(包括飞边桥部)在分模面的水平投影的面积重心, 如图8-48所示。当变形抗力分布不均匀时, 模膛中心则由面积重心向变形抗力较大的一边移动距离 L , 如图8-49所示, L 值的大小根据模膛各部分变形抗力相差程度大小, 凭生产经验来确定。一般情况下不宜超过表8-3所示的数据。

当锻件形状复杂时可用算法或图解法求得模膛的面积重心, 但这种方法做起来比较麻

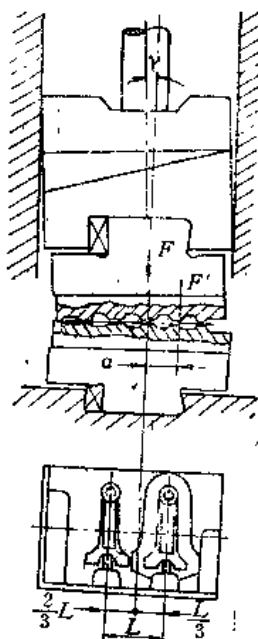


图8-47 偏心打击

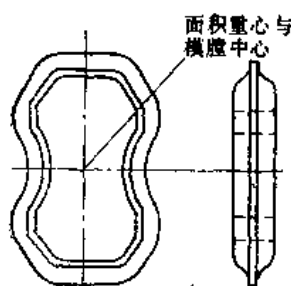


图8-48 模腔中心的确定

烦。而用样板实测法则比较简单，样板实测法是将模腔（包括飞边桥部）的水平投影的形状用厚薄均一的厚纸板（塑料板、铁皮皆可）剪成，然后分别从纸板的侧面任意两点吊起两次，找到两垂线的交点。再在纸板的交点处水平吊起，进行校核，直到纸板呈水平状态为止。此点位置即为所求的模腔面积重心。

当模腔中心与锻模中心位置相重合时，锻锤打击力与锻件反作用力在同一垂线上，不产生错移力，因而上下模不发生明显的错移，这是最理想的布排。当锻模模腔中心与锻模中心不相重合而偏移一段距离时，锻造时会产生偏心力矩，使上下模产生错移，造成锻件在分模面上的错差，增加设备的磨损。模腔中心与锻模中心的偏移量越大，偏心力矩也越大，上下模错移量以及锻件错差量就越大。因此终锻与预锻模腔布排设计的中心任务是最大限度减小模腔中心对锻模中心的偏移量。

2) 模腔的布排：当锻模无预锻模腔时，终锻模腔中心位置应取在锻模中心处。

当锻模有预锻模腔时，为了减少错差保证锻件质量，应力求终锻和预锻模腔中心靠近锻模中心。模腔布排要点如下：

1、在锻模前后方向上，两模腔中心一般情况下均应在键槽中心线上，如图8-50所示。

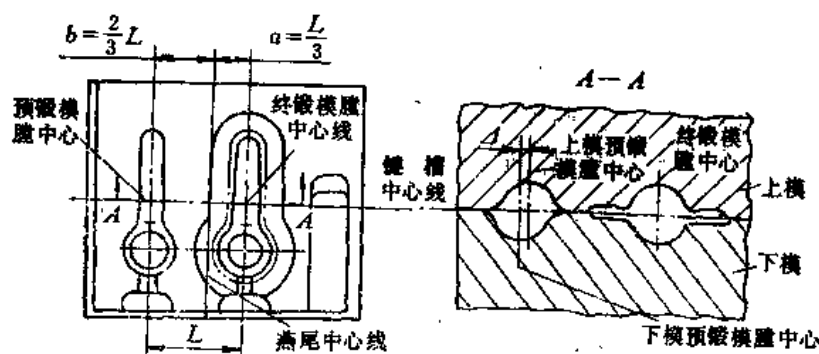


图8-50 模腔布排（型式I）

表8-4 允许的偏移量 α

设备吨位(t)	1	1.5	2	3	5	10
α (mm)	25	30	40	50	60	70

Ⅰ、在锻模左右方向上，终锻模腔与锻模中心线的偏移量 α 应不超过表8-4所列数值。

Ⅱ、预锻模腔中心线必须在燕尾宽度内，模腔超出燕尾的部分其宽度不得大于模腔总宽度的1/3。

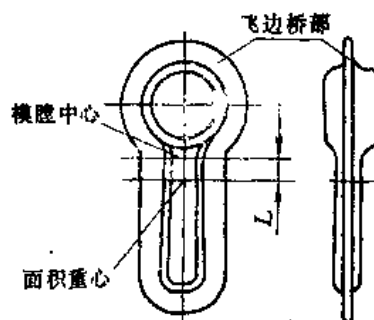


图8-49 模腔中心的确定

表8-3 移动距离L

锤吨位(t)	1~2	3	5
L (mm)	<15	<25	<35

Ⅳ、终锻与预锻模膛中心至锻模燕尾中心线距离之比,应等于或略小于 $1/2$,即 $a/b \leq 1/2$ 如图8-50所示。

Ⅴ、当锻件因终锻模膛偏移使错差量过大时,允许采用 $L/5 < a < L/3$,即 $2L/3 < b < 4L/5$,在这种条件下设计预锻模膛时,应当预先考虑错差量 Δ 。 Δ 值由实际经验确定,一般在 $1 \sim 4\text{mm}$ 的范围内,如图8-50中A-A剖面所示,锤吨位小者取小值,大者取大值。

Ⅵ、若锻件有宽大的头部(如大型连杆件),则两个模膛中心间距很大,超出上述规定值;或者终锻模膛因偏移使错差量超过允许值;或预锻模膛中心超出锻模燕尾宽度,这时应将两个模膛置于不同模块上联合锻造。这样两个模膛中心便可都处于锻模中心位置上,能更好地减少错差,提高锻模寿命,减少设备磨损。

Ⅶ、为减小终锻与预锻模膛中心距 L ,在保证模膛间模壁有足够强度下,应选用下列排列方法:

平行排列法,如图8-51所示,终锻和预锻模膛中心位于键槽中心线上, L 值减小的同时前后方向的错差量也较小,锻件质量较好。

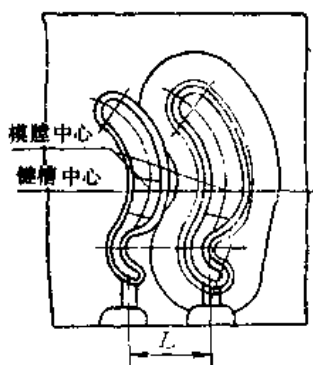


图8-51 平行排列

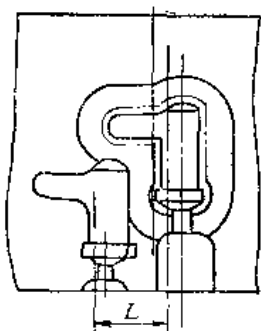


图8-52 前后错开排列

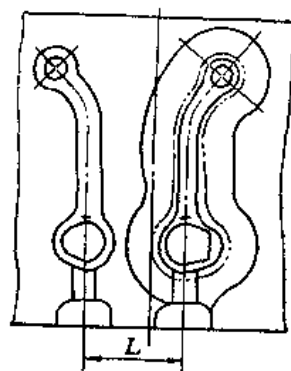


图8-53 反向排列

前后错开排列法,如图8-52所示,预锻和终锻模膛在前后方向为不等排列,这种排列能减小 L 值,但增加了前后方向的错移量,适用于该图所示的特殊形状的锻件。

反向排列法,如图8-53所示,预锻和终锻模膛反向布排,这种布排能减小 L 值,同时有利于去除坯料的氧化皮并使模膛更好充满,多用于上下模对称的大型锻件。

3)带平衡锁扣的模膛中心位置的确定:具有落差的锻件,其锻模模膛一般都采用平衡锁扣,为了减少错差量与锁扣的磨损,模膛中心并不与键槽中心相重合,而是沿着锁扣方向向前或向后偏离 b 值。可采用下列两种情况。

Ⅰ平衡锁扣凸出部分在上模,如图8-54所示。模膛中心应向平衡锁扣相反方向离开锻模中心,其距离 b_1 为:

$$b_1 = (0.2 \sim 0.4)h$$

Ⅱ平衡锁扣凸出部分在下模,如图8-55所示。模膛中心应向平衡锁扣方向离开锻模中心,其距离 b_2 为

$$b_2 = (0.2 \sim 0.4)h$$

4)终锻、预锻模膛前后方向的几种排列法

Ⅰ如图8-56所示排列法,锻件大头靠近钳口,这样布排模膛,使锻件重量大且难出模的一端接近操作者,使操作方便、省力。

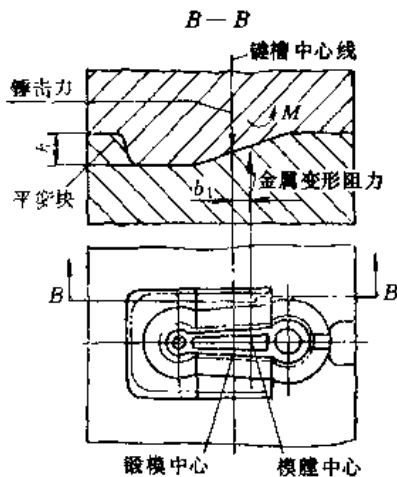


图8-54 模腔布排 (型式II)

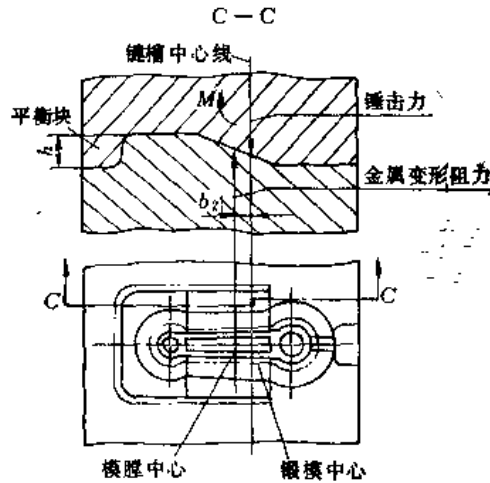


图8-55 模腔布排 (型式III)

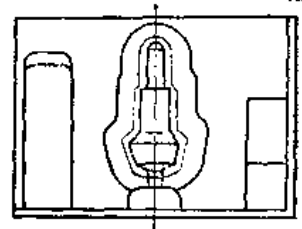


图8-56 终锻模腔排列 (型式I)

Ⅱ如图8-57所示的排列法，大头难充满部分放在钳口的对面，这对金属充满模腔有利。

Ⅲ当减小或取消夹钳头时，杆部应靠近钳口，如图8-57所示。这种布排法可利用锻件杆部作为夹钳料，从而省去夹钳料头。

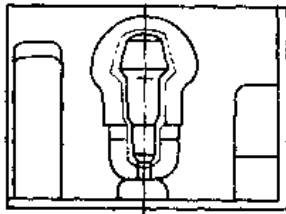


图8-57 终锻模腔排列 (型式II)

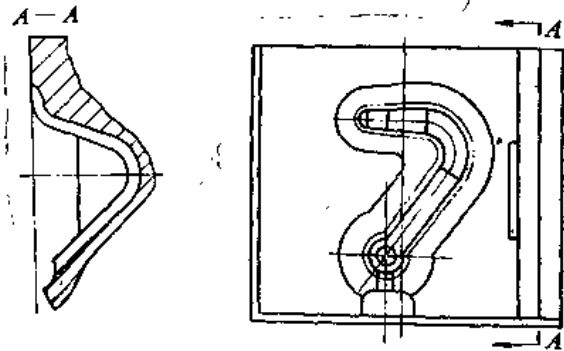


图8-58 弯曲模腔的位置

(2) 制坯模腔的布排

1) 制坯模腔尽可能按工艺顺序排列，操作时一般只允许改变一次方向，以缩短操作时间。

2) 模腔的排列应与加热炉、切边压力机的位置相适应。

3) 氧化皮最多的模腔是锻模中头道制坯模腔，如拔长模腔、滚压模腔，应位于吹风管对面，以防止氧化皮被吹落到终锻、预锻模腔内。

4) 弯曲模腔的位置应使锻件能以最简便的方式移动或翻转送入终锻模腔内，如图8-58所示。大型锻件更要考虑工人操作方便问题。

5) 拔长模腔位置如在锻模右边，应采用直式，如在左边，应采取斜式为宜，以方便工人操作。

6) 切刀位置，前切刀一般位于锻模的右前角，后切刀一般位于锻模的左后角，便于操作。

4. 错移力的平衡和导向

错移力的平衡是保证锻件尺寸精度的一个重要问题，而且也是影响设备寿命的一个重要问题。

错移力产生的原因大致有下列几方面:

1) 当锻造分模线不在同一平面上的锻件时 (即具有落差的锻件) (图8-59), 有水平方向的错移力。

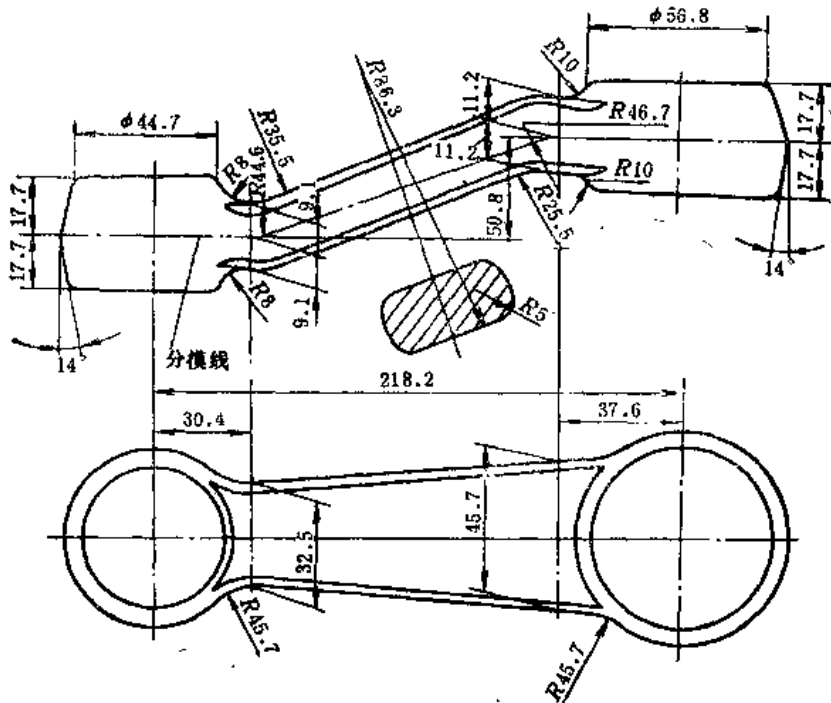


图8-59 有落差的锻件

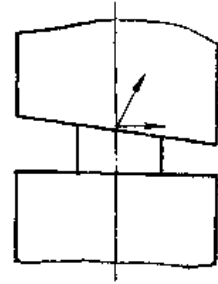


图8-60 上下砧面不平行

2) 如果由于某些原因使得模膛中心与锤杆中心不一致时, 模锻时会产生偏心力矩, 造成锻模的错移。

3) 如果设备的上下砧面不平行 (图8-60), 模锻时也要产生水平错移。

错移力不仅造成锻件水平尺寸的偏差, 而且还必然引起锻件高度方向尺寸的偏差, 后者对于一般小锻件影响不大, 但对大型锻件, 有时偏差甚至超过5mm。

由上述原因引起的错移力如果不设法平衡, 不仅使锻件产生错差, 而且还必然要作用到导轨和床身 (锤膀子、立柱) 上, 使导轨容易磨损, 床身容易损坏, 锤杆容易折断。

为减小错移力引起的错差, 可以:

- 1) 从设备方面: 使上、下砧面尽可能平行; 减小导轨间隙, 增加导向长度。
- 2) 从模具结构方面: 尽可能使模膛中心和锤杆中心 (或滑块中心) 相一致并采用导向装置。

以上两方面中, 设备的精度对减小锻件的错差有一定影响; 但是, 最根本、最有积极意义的是从模具设计方面采取措施, 因为后者的影响更直接, 具有决定性的作用。

下面针对错移力产生的几种情况, 就错移力的平衡和导向问题分别研究其相应有效和合理的模具结构。

(1) 锻件分模线不在同一平面时错移力的平衡 这即是上面所列的第一种情况。当锻件的分模面不在同一平面时错移力一般都比较大大, 尤其在冲击载荷的情况下比较危险。但是, 错移力的方向是很明显的。

对这类锻件锤上模锻时, 为平衡错移力和保证锻件质量, 一般采取如下措施:

1) 对小锻件可以成对地进行锻造 (图8-61)。



图8-61 对称式平衡锁扣

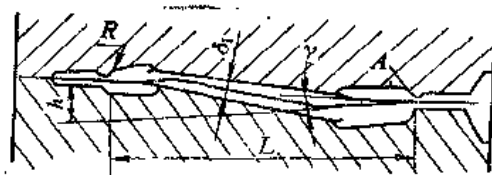


图8-62 倾斜式平衡锁扣

2) 如锻件较大时, 可将锻件倾斜一定角度 (图8-62), 由于倾斜了一个角度 γ , 使锻件各处的拔模斜度有变化, 为保证锻件锻后能取出, 需在局部地方增大余量, 这就造成了锻件重量增加和形状走样, γ 角愈大时情况愈严重。因此角度 γ 不宜过大, 一般 $\gamma \leq 7^\circ$ 为宜。

3) 如锻件落差较大 (15~50mm), 用第二种方法不宜解决时可采用平衡锁扣 (图8-63)。

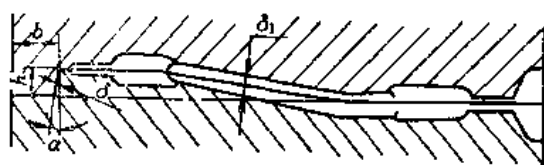


图8-63 平衡块式平衡锁扣

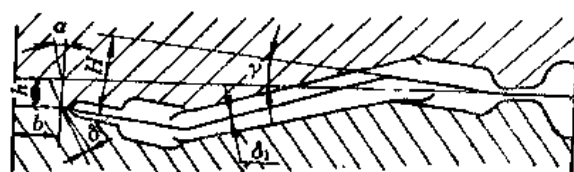


图8-64 混合式平衡锁扣

4) 如果锻件落差很大, 可以联合采用2)、3)两种方法 (图8-64)。

锁扣的高度等于锻件分模面落差高度, 由于锁扣所受的力可能很大, 容易损坏, 故锁扣的厚度应不小于 $1.5h$, 锁扣的斜度 α 值: 当 $h = 15 \sim 30\text{mm}$ 时 $\alpha = 5^\circ$; $h = 30 \sim 60\text{mm}$ 时 $\alpha = 3^\circ$ 。锁扣间隙: $\delta = 0.2 \sim 0.4\text{mm}$, 但必须小于锻件允许的错差之半。

(2) 模膛中心与锤杆中心不一致时错移力的平衡 这即是上面所列的第二种情况。为减小由这种原因引起的错移力, 设计时可通过计算并根据实践经验尽量使模膛中心与锤杆中心一致。但是也常常不易计算得很准确。另外, 有时工艺上需要终锻模膛中心偏离锤杆中心 (例如有预锻模膛时)。为平衡由这些原因引起的错移力, 一般采用导向锁扣。

导向锁扣的作用除了平衡上述错移力外, 还可以补充设备的导向。例如, 由于锤头与导轨有间隙, 或由于某种原因, 锤头向下运动时偏向某一侧 (例如装上模子后, 锤头的重心偏向一侧, 或者由于锤身倾斜等) 并稍有转动, 模锻时上、下模就不能对齐等等。当锤头和导轨的间隙愈大, 设备的精度愈差时, 在锻件上产生的错差则愈大, 尤其对某些形状的锻件, 例如对细长轴形的锻件, 当上、下模互相稍有转动时, 在锻件上就要产生较大的错差。另外, 对齿轮类型的锻件, 当发生错差时, 也不容易检查和调整。这时, 在模具上应设置导向锁扣。

采用导向锁扣不仅可以减少锻件错差, 而且也便于模具的安装和调整。

前面介绍过的平衡锁扣是用于平衡错移力的, 是设置在固定方位, 是不对称的。下面介绍的导向锁扣也能起平衡错移力的作用, 但其主要目的是导向。导向锁扣常用于下列情况:

1) 当要求锻件错差小于 0.5mm 时;

- 2) 细长的轴类锻件;
- 3) 一模多件的小锻件模锻;
- 4) 对齿轮类锻件及叉形和工字形锻件, 模锻时不易检查和调整其错移量的情况;
- 5) 冷切边的锻件;
- 6) 锤头与导轨间隙过大的情况。

常用的锁扣形式如下:

1) 圆形锁扣 (图8-65), 一般用于齿轮件和环形件。这些锻件的特点是: 根据锻件的外形很难确定错移的方向。

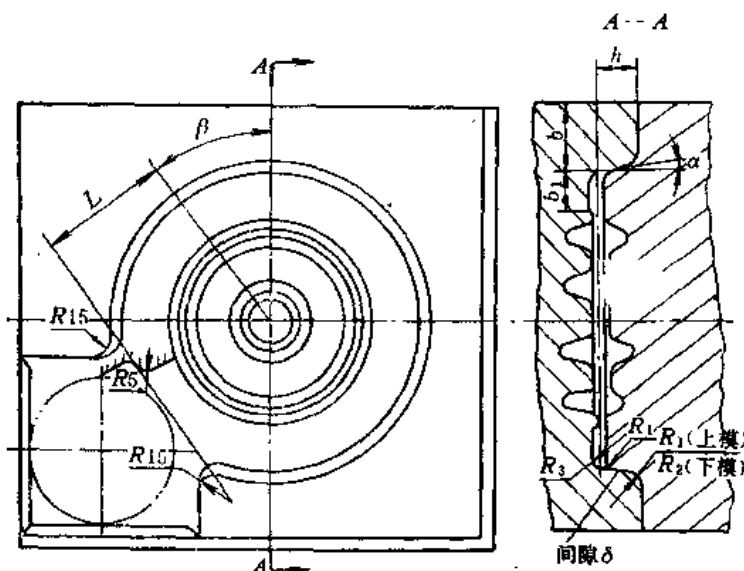


图8-65 圆形锁扣

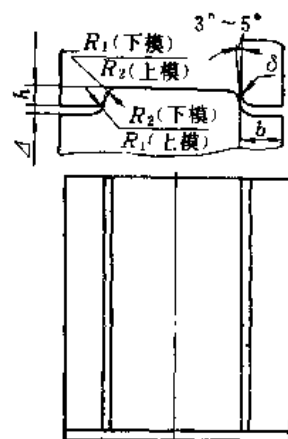


图8-66 纵向锁扣

2) 纵向锁扣 (图8-66), 一般用于直长轴类锻件。其特点是: 能保证轴类件在直径方向有较小的错移, 在一模多件的模锻中也常采用。

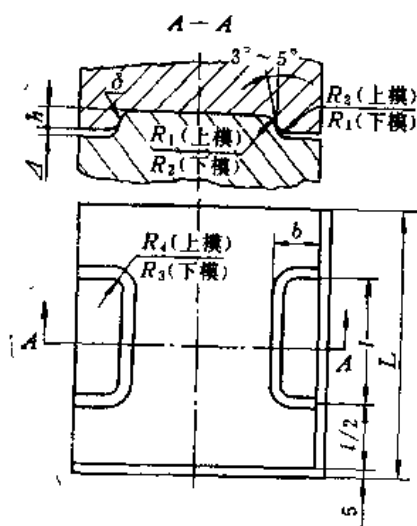


图8-67 侧面锁扣

3) 侧面锁扣 (图8-67), 用于防止上模与下模相对转动或在纵横任一方向产生错移, 但因制造困难, 采用较少。

4) 角锁扣 (图8-68), 作用和侧面锁扣相似, 但可在模块的空间位置设置二个或四个角锁扣。

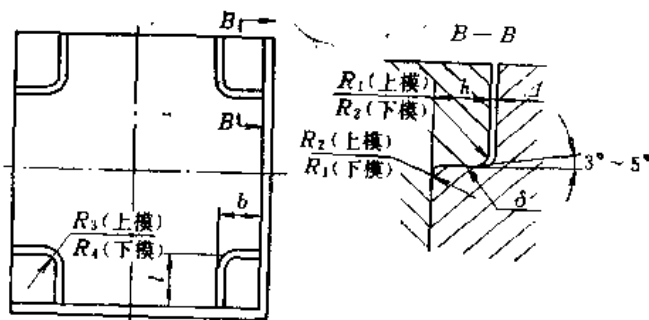


图8-68 角锁扣

设计锁扣时应保证有足够的强度。锁扣的高度、宽度和长度一般都按锻锤吨位确定，具体的尺寸可参见有关手册。

为防止锁扣相碰撞，在锁扣上有斜面，一般取 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。

在上、下锁扣间应有间隙，间隙的大小与锻件允许的水平错移量有关。对圆形锁扣，考虑到模锻时模具的热膨胀，间隙值的大小还与锁扣凸出部分在上模还是下模有关（上模的温度低些，热膨胀小些），具体的可参照有关手册决定。对其它形式的锁扣，间隙值按设备吨位确定，一般在 $0.2\sim 0.6\text{mm}$ 范围内，设备吨位小时，间隙值取小些，反之取大些。但是，这一间隙值是上、下模打靠时锁扣间的间隙尺寸，而在未打靠之前，由于上、下锁扣都有斜面，故间隙大小是变化的，从这里也可以清楚地看到，锁扣的导向主要是在模锻的最后阶段起作用的。与其它几种导向装置相比，导向的准确性要差些。

锁扣的其它尺寸确定见《锻工手册》有关部分。

采用锁扣可以减小锻件的错差，但是也带来了一些不足之处，例如模具的承击面减小，模块尺寸增大，减少了模具可翻新的次数，增加了制造费用等。因此，在考虑是否采用锁扣时应进行全面分析。

3. 模具强度

模锻变形时，通过模具将外力传给变形金属，与此同时，变形金属也以同样大小的反作用力作用于模具。模锻时，当模具内的应力值超过材料的强度极限时，模具便产生破坏。尤其在冲击载荷下并有应力集中时，模具就更容易破坏。

锤上锻模与强度有关的破坏形式主要有四种：

- 1) 在燕尾根部转角处产生裂纹（图8-69）；
- 2) 沿高度方向开始于模膛深处的纵向裂纹（图8-70）；
- 3) 模壁被打断（图8-71）；
- 4) 承击面被打塌。

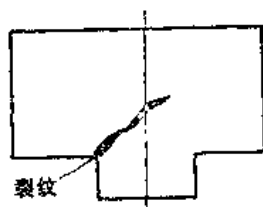


图8-69 燕尾根部裂纹

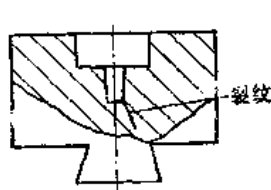


图8-70 模膛深处裂纹

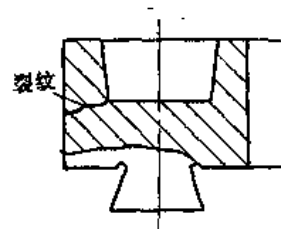


图8-71 模壁断裂

第1)种破裂形式在多模膛锻造情况下是常见的。在燕尾根部转角处的这种断裂主要是由于应力集中造成的。锤击时，燕尾与锤头和下砧的燕尾槽接触，而两侧是悬空的（间隙约为 0.5mm ），当偏心打击时，燕尾根部转角处的应力集中较大。例如模锻连杆的锻模，由于有预锻和终锻两个模膛，常常从燕尾根部转角处破坏。燕尾转角半径愈小，加工时愈不光洁、留有加工刀痕等情况下愈易破坏。燕尾部分热处理后的硬度愈高（相应的冲击韧性下降）和有残余的集中应力时也愈易破坏。

如果设计不合理或制造不良，造成模块两侧与锤头或下砧接触而使燕尾悬空时，更易发生这种损坏。从模具本身来看，如果锻模材质不好或纤维安排不合适时也易产生这种损坏。

第2)种断裂是由于模锻时模膛侧壁受很大的压力，相对于一定的模膛深度，当锻模的高

度(厚度)较小时,应力值可能超过材料的强度极限而引起断裂。当模膛的内圆角半径较小和模膛具有深而狭的凹槽或残留有加工刀痕时,由于应力集中,更易产生这种损坏。

第3)种是由于模壁太薄而引起的。模膛愈深,模壁斜度和模膛底部圆角半径愈小和留有加工刀痕时愈易产生这种破坏。

第4)种损坏是由于承击面太小,多余能量较大或猛烈空打而产生的。

上述各种形式的破裂,从外因来看一般是由下列两种原因引起的:

1)在极高的打击力作用下,由于应力值超过模具的强度极限,这时经一次打击或极少数打击模具便产生断裂;

2)在较低的应力下,经多次反复打击,由于疲劳而产生破裂。

模具的破裂可能是由于受力过载引起,但更常见的是疲劳破裂。

两种破裂形式可以从断口的特征加以区别。疲劳破裂断口一般分为两部分,一部分是疲劳裂纹发展形成的疲劳破裂部分,这部分由于疲劳裂纹的时进时停,常常呈现出贝壳形状;另一部分是突然断裂部分,突然断裂部分是凸凹不平的粗糙部分。而第一种破裂形式的裂纹是急速发展的,所以破断面不呈贝壳形状。

根据以上分析可见,设计锻模时,从强度出发应考虑以下几点:

- 1)模膛壁厚;
- 2)模块高度;
- 3)模具承击面;
- 4)燕尾根部的转角;
- 5)纤维方向的布置等。

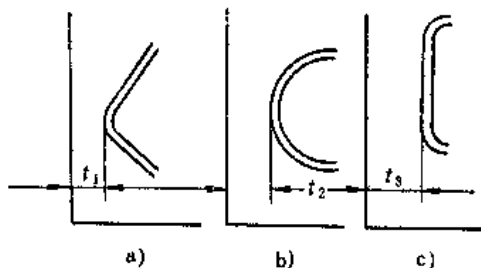


图8-72 模膛形状对模壁厚度的影响

由于锤上模锻时受力情况复杂,而且影响的因素又很多,因此很难进行理论计算,一般均根据经验公式或图表确定模具以下各参数。

(1)模壁厚度 一般根据模膛深度、模壁斜度和模膛底部的圆角半径来确定最小的模壁厚度。模壁厚度还与模膛在分模面上的形状有关,例如如图8-72a的情况,模壁厚度可以小些,而对图8-72b、c的情况模壁厚度则应相对地大一些。

对不同情况下的模壁厚度可根据表8-5确定。

(2)模块高度 模块高度根据终锻模膛最大深度和翻新要求参照表8-6和图8-73来确定。

(3)承击面积 承击面是指上下模接触面,即分模面积减去模膛和飞边槽及锁扣面积,如图8-74所示。承击面积按下式确定:

$$S = (300 \sim 400)G$$

式中 S ——锻模分模面的承击面积(cm^2);

G ——锻锤吨位(t)。

设计中承击面不能太小,否则容易造成分模面压陷或压塌。但是应当指出,随着锻锤吨位增大,单位吨位的承击面可相应减小,例如某厂5t模锻锤用的锻模承击面,只有900~1000 cm^2 ,经长期使用(直至模膛磨损)并未发现任何压塌现象。

不同吨位的锻锤,其最小承击面的允许值见表8-7。

(4)燕尾根部的转角 为减小应力集中应设计成圆角,一般取 $R5\text{mm}$ 。转角处应加工得光

表8-5 模膛壁厚

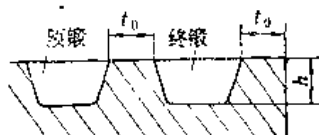
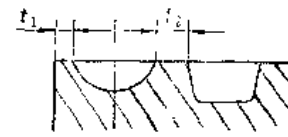
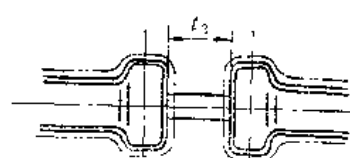
项 目	公 式	图 例
终（预）锻模膛的最小壁厚 t_0	$t_0 = (1 \sim 2)h$ 式中 h —模膛深度， h 小者系数取大值	
滚压模膛的最小壁厚 t_1, t_2	$t_1 = 5 \sim 10 \text{ mm}$ $t_2 = 10 \sim 15 \text{ mm}$	
一模多件模锻时，相邻两终（预）锻模膛间的最小壁厚 t_3	$t_3 = (0.5 \sim 1)h$	

表8-6 模块最小高度

(mm)

终锻模膛最大深度 $h < 32$	32~40	40~50	50~60	60~80	80~100	100~120	120~160	160~200
模块最小高度 H 170	190	210	230	260	290	320	390	450

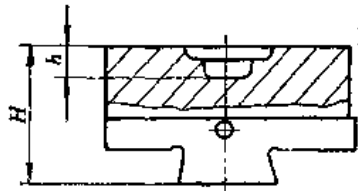


图8-73 模块高度

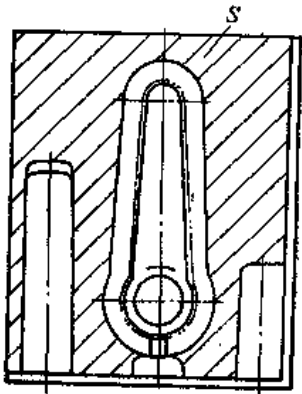


图8-74 承击面

表8-7 允许的最小承击面

锻 锤 吨 位 (t)	1	2	3	5	10	16
承 击 面 积 (cm ²)	300	500	700	900	1600	2500

洁些，避免留有刀痕。为保证燕尾部分有较高的韧性，热处理淬火时应采取措施，使此处冷却速度慢一些。

(5) 模块纤维方向 锻模寿命与其纤维方向密切相关, 任何锤锻模的纤维方向都不能与打击方向相同, 否则模膛表面耐磨性能下降, 模壁容易产生剥落现象。对于长轴类锻件, 当磨损是影响锻模寿命的主要原因时, 锻模纤维方向应与锻件轴线方向一致(图8-75a), 这样被切断的金属纤维少。当开裂是影响锻模寿命的主要原因时, 纤维方向应与键槽中心线方向一致(图8-75b), 这样裂纹不易发生和扩展。对短轴类锻件, 锻模纤维方向应与键槽中心线方向一致(图8-75c)。

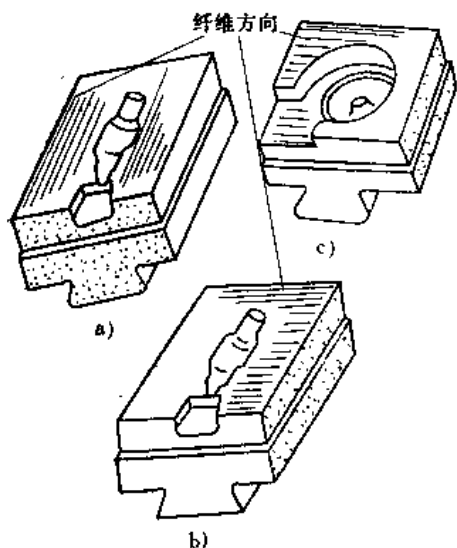


图8-75 锻模纤维方向

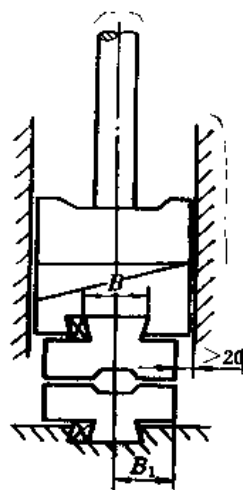


图8-76 模块宽度限制

4. 模块尺寸和标准

锻模尺寸与模膛数、模膛尺寸、模壁厚度、模膛的布排方法等有关, 确定锻模尺寸时还应考虑与设备技术规格相符合的问题。

(1) 锻模宽度 锻模宽度根据各模膛尺寸和模壁厚度确定。

为保证锻模不与锻锤导轨相碰, 锻模最大宽度应有所限制, 在任何情况下, 必须保持它们之间的距离大于20mm, 见图8-76。锻模的最小宽度也有要求, 至少超过燕尾10mm, 或者

燕尾中心线到锻模边缘的最小尺寸为 $B_1 \geq \frac{B}{2} + 10\text{mm}$ 。

(2) 锻模长度 锻模长度根据模膛长度和模壁厚度确定。较长的锻件有可能使锻模超长, 伸到模座和锤头之外, 两端呈悬空状态, 如图8-77所示。这种状况对锻模受力条件是不利的, 所以对伸出长度 f 应当有所限制, 一般规定 $f < H/3$ 。 H 是模块高度。

(3) 锻模高度 如前所述, 锻模的最小高度按终锻模膛的最大深度确定。但是上下模块的最小闭合高度应大于锻锤允许的最小闭合高度, 见图8-78。考虑到锻模翻修的需要, 通常锻模高度是锻锤最小闭合高度的1.35~1.45倍, 即 $H = (1.35 \sim 1.45)H_{\min}$ 。

(4) 锻模中心与模块中心的关系 如前所述, 锻模中心是燕尾中心线与键槽中心线的交点, 而模块中心是对角线的交点。锻模中心相对模块中心的偏移量不能太大, 否则模块本体重量将使锤杆承受较大的弯曲应力, 不但对锻件精度不利, 而且锻锤也受损害。偏移量应限制在 $a \leq 0.1A$ 和 $b \leq 0.1B$ 的范围内, 见图8-79。

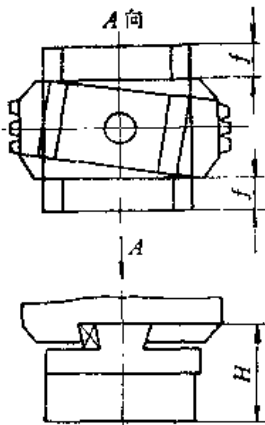


图8-77 模块长度

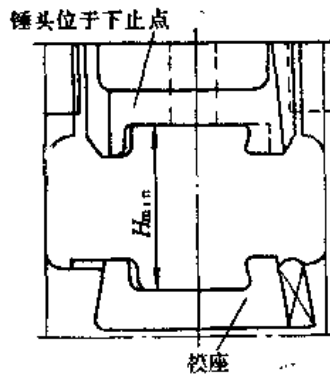


图8-78 锻锤最小闭合高度

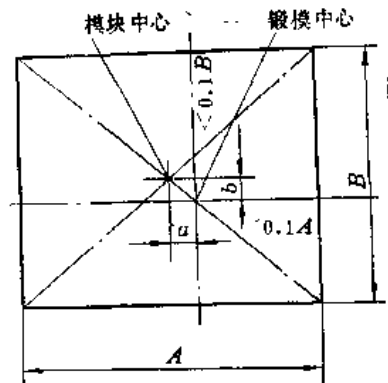


图8-79 锻模中心偏移范围

(5) 锻模重量 为了保证锤头的运动性能, 上模块重量应有所限制, 最大重量不应超过锤吨位的35%。如10t锻锤, 上模块重量不应超过3.5t。

(6) 检验角 锻模上两个加工侧面所构成的 90° 角称为检验角。其用途一是为了锻模安装调整时检验上下模膛对准的情况; 二是为了使锻模机械加工时有相互垂直的划线基准面。这两个侧面一般刨进深度5mm、高度50~100mm。检验角设置在前面与左边(或是右边), 应根据模膛安排的实际情况而定。利用闭式制坯模膛这一侧面作为检验角方起作用, 若以开式制坯模膛这一边作为检验角, 则失去意义。

(7) 模块规格 关于模块尺寸, 我国尚未制定统一的部颁标准, 各工厂均按厂标选用。

模具的损坏形式除了破裂和承击面被打塌外, 还有模膛的磨损、热裂和塑性变形。

磨损是模具与坯料在高压下相对摩擦的结果, 磨损使模具表面不平并且出现沟痕, 这种沟痕有可能引起应力集中造成模具破裂。

热裂是由于模具表面热冷交替反复变化引起异号的热应力的反复作用而产生的。热裂纹呈龟裂状, 多发生在模具的突出部分, 因为突出部分容易急冷急热。当模具材料的导热性差、热膨胀系数大和冷却措施不合适时, 更易产生热裂。

模膛发生塑性变形是由于模具硬度过低或变形抗力过大引起的。热锻时, 如果冷却不好使模具温升较高, 易引起模具退火而变软。

模膛的磨损、热裂和塑性变形主要与模具材料、工艺操作和模具的润滑有关。

锤上锻模设计实例可参阅《锻模设计手册》, 也可参阅《锻工手册》。

第二节 热模锻压力机用锻模

模锻锤目前虽然应用很广, 但由于其结构和工艺性存在不少缺点, 其发展受到一定限制。在大批量和专业化生产条件下, 国内外先进的模锻厂目前都普遍采用热模锻压力机代替模锻锤。

正如上一章所述, 相对于模锻锤, 热模锻压力机主要的工作特点是: ①滑块的行程一定; ②滑块的运动速度低, 工作时是静压力; ③有上下顶出装置; ④有良好的导向装置, 承受偏载的能力较强等。

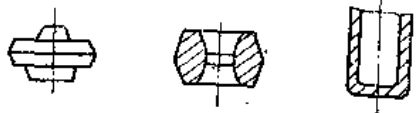
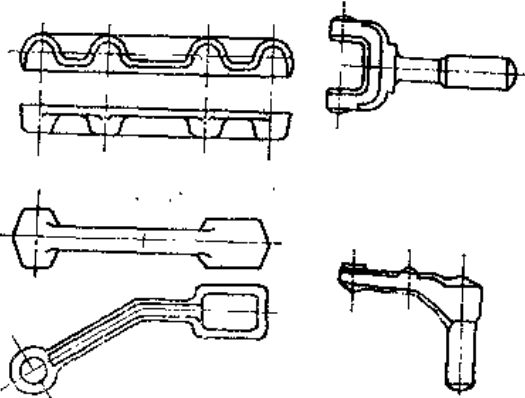
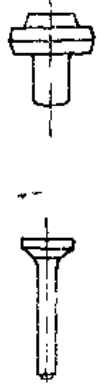
由于上述特点,表7-2中的前三类模锻件在热模锻压力机上大都可以生产。但是,由于滑块的行程一定,在其上不便于进行拔长和滚压等制坯工步。因此,它只能完成截面积变化不大($\leq 10\% \sim 15\%$)的制坯工作。当遇到截面积变化较大的锻件时,制坯工作应放在其它设备(锤、辊锻机等)上进行,或采用成形坯料(包括型钢和周期性断面坯料等)。

因为有上下顶出装置,某些顶锻类锻件可以在热模锻压力机上生产。

由于热模锻压力机工作时是静压力,金属充填模膛的能力不如模锻锤好,在模膛设计上与锤锻模稍有差异。在热模锻压力机上常常要用到预锻工步,有时一次预锻还不够,还需要两次或多次预锻。

在热模锻压力机上常用的变形工步是:终锻、预锻、镦粗、成形镦粗、压挤、压扁、弯曲、成形等,常生产的锻件类型如表8-8所示。第七章图7-51是热模锻压力机上模锻杯形锻件的成形工步图。

表8-8 锻件分类

第 一 类	第 二 类	第 三 类
		

由于在热模锻压力机上的工作条件较好,模具可以采用镶块式的组合结构。

本节主要介绍热模锻压力机锻模模膛设计特点及锻模结构特点。

一、模膛设计特点

热模锻压力机锻模常用的模膛有:终锻模膛、预锻模膛、镦粗模膛、压挤(成形)模膛等,下面分别讨论。

1. 终锻模膛设计

与锤上模锻相同,终锻模膛也是用于锻件最终成形的模膛。终锻模膛设计的内容除了确定模膛本体尺寸、选择飞边槽型式、设计钳口等这些与锤上模锻相同的内容外,还要设计排气孔和正确布置顶出器的位置。这里只谈关于飞边槽的选择、排气孔的设计,而顶出器的布置留待锻模结构特点中介绍。

(1) 飞边槽的选定 热模锻压力机用锻模的飞边槽型式和锤用锻模相似,但是,为防止压力机超载“闷车”现象的发生,飞边槽没有承击面,飞边槽的尺寸可按设备吨位确定。

在热模锻压力机上模锻,采用了较完备的制坯工步,金属在终锻模膛内的变形主要是以镦粗方式进行,飞边的阻力作用不像锤上模锻显得那么重要,而较多地是起着排泄和容纳多余金属的作用。因此,飞边槽桥口高度及仓部比锤上的相应大一些,其结构型式及尺寸如图8-80及表8-9所示。型式Ⅰ用得比较普遍,型式Ⅱ用于锻件形状较简单的情况。

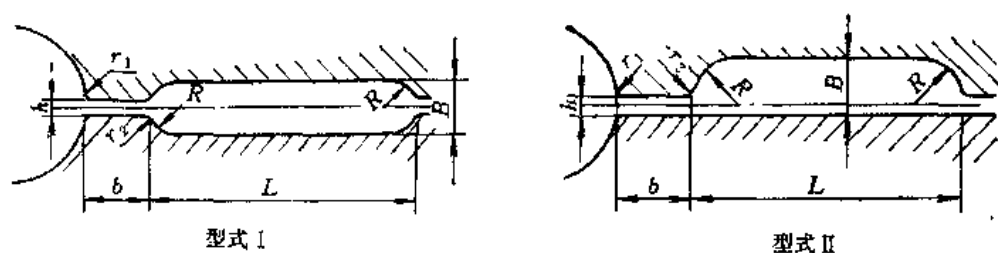


图8-80 飞边槽结构型式

表8-9 终锻飞边槽尺寸 (mm)

设备 (kN)	10000	16000	20000	25000	31500	40000	63000	80000	120000
尺寸									
h	2	2	3	4	5	5	6	6	8
b	10	10	10	12	15	15	20	20	24
B	10	10	10	10	10	10	10	12	18
L	40	40	40	50	50	50	60	60	60
r_1	1	1	1.5	1.5	2	2	2.5	2.5	3
r_2	2	2	2	2	3	3	4	4	4

(2) 排气孔 热模锻压力机上模锻与锤上模锻不同, 锤上模锻时, 金属在每一模膛内的变形是在锤头的多次打击下完成的, 而热模锻压力机上金属是在滑块的一次行程中完成变形。若模膛有深腔, 聚积在深腔内的空气受到压缩, 无法逸出而产生很大压力, 阻止金属向模膛的深腔处充填。所以, 在模膛深腔金属最后充填处应开设排气孔, 如图8-81所示。

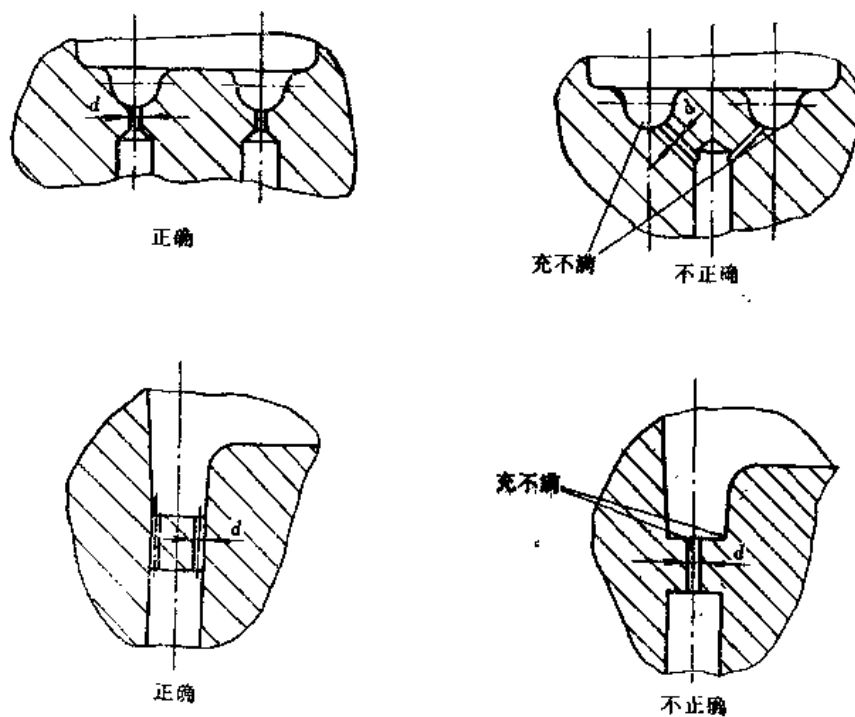


图8-81 排气孔布置

排气孔的直径 d 为 $\phi 1.2 \sim 2.0 \text{ mm}$, 孔深为 $5 \sim 15 \text{ mm}$, 后端可用 $\phi 4 \sim 5 \text{ mm}$ 的通孔与通道连通。对环形模膛, 排气孔一般对称设置。对深而窄的模膛一般只在底部设置一个。如模膛底部有顶出器或其它的排气缝隙时, 则不需要开排气孔。

2. 预锻模膛设计

如前所述, 热模锻压力机是靠静压力使金属变形的, 而且是在一次行程中完成金属变形。因此, 热模锻压力机上模锻的一般成形规律是: 金属沿水平方向流动剧烈, 向高度方向流动相对缓慢些。这就使得在热模锻压力机上模锻更容易产生充不满和折迭等缺陷。因此, 在设计预锻模膛时, 除应参考锤上预锻模膛的设计原则外, 还应考虑以下几点:

1) 预锻模膛的高度尺寸比终锻工步图相应大 $2 \sim 5 \text{ mm}$, 而宽度尺寸适当减小, 并使预锻件的横截面积稍大于终锻件相应的横截面积。

2) 若终锻件的横截面呈圆形, 则相应的预锻件横截面应为椭圆形, 横截面的椭圆度约为终锻件相应截面直径的 $4\% \sim 5\%$ 。

3) 应严格控制预锻件各部分的体积, 使终锻时多余的金属能合拢地流动, 避免由于金属回流而形成折迭等缺陷。例如对于齿轮的轮毂部分, 预锻工步的金属体积可比终锻工步大 $1\% \sim 6\%$ 。对于需要冲孔的锻件, 当孔径不大时, 预锻件的内孔深度与终锻件相应内孔深度之差不大于 5 mm (图8-82), 否则终锻时内孔将有较多的金属沿径向流动, 形成折迭。当孔径较大时, 还必须将终锻模膛设计成带仓连皮结构, 以容纳连皮处多余的金属。

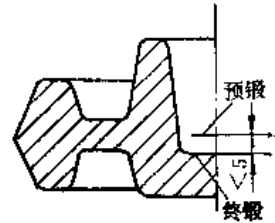


图8-82 预锻冲孔

4) 当终锻时金属不能以锻粗而主要以压入方式充填模膛时, 预锻模膛的形状与终锻模膛应有显著差别, 使预锻坯件的侧面在终锻模膛变形一开始就与模壁接触, 以限制金属径向剧烈流动, 迫使其流向模膛深处 (图8-83)。

预锻模膛的设计可参考《锻模设计手册》中图7-18至图7-29及表7-5进行。

3. 制坯模膛设计

压力机上常用的制坯模膛有锻粗模膛、压挤 (成形) 模膛和弯曲模膛等。

(1) 锻粗模膛 锻粗模膛有锻粗台和成形锻粗模膛两种, 分别介绍如下:

1) 锻粗台: 锻粗台的一般结构如图8-84所示, 其上、下模的工作面是平面, 用于对原坯料进行锻粗, 通常用于锻粗圆形件。

2) 成形锻粗模膛: 成形锻粗模膛的结构如图8-85所示, 其作用是使成形锻粗后的坯料易于在预锻模膛中定位或有利于金属成形。

(2) 压挤 (成形) 模膛 压挤模膛与锤上模锻的滚压模膛相似, 其主要作用是沿坯料纵向合理地分配金属, 以接近锻件沿轴向的截面变化, 如图8-86所示。

压挤时, 坯料主要是被延伸, 截面积减小而在某些部位如靠近长度方向的中部有一定的聚料作用。在某些情况下压挤可以代替辊锻。因此它在热模锻压力机模锻中用的较多。压挤还有去除坯料表面氧化皮的作用。

(3) 弯曲模膛 弯曲模膛的作用是将坯料在弯曲模膛内压弯, 使其符合于预锻模膛或终锻模膛在分模面上的形状。

弯曲模膛的设计原则与锤上模锻相似, 其设计依据是预锻模膛或终锻模膛的热锻件图在分模面上的投影形状。

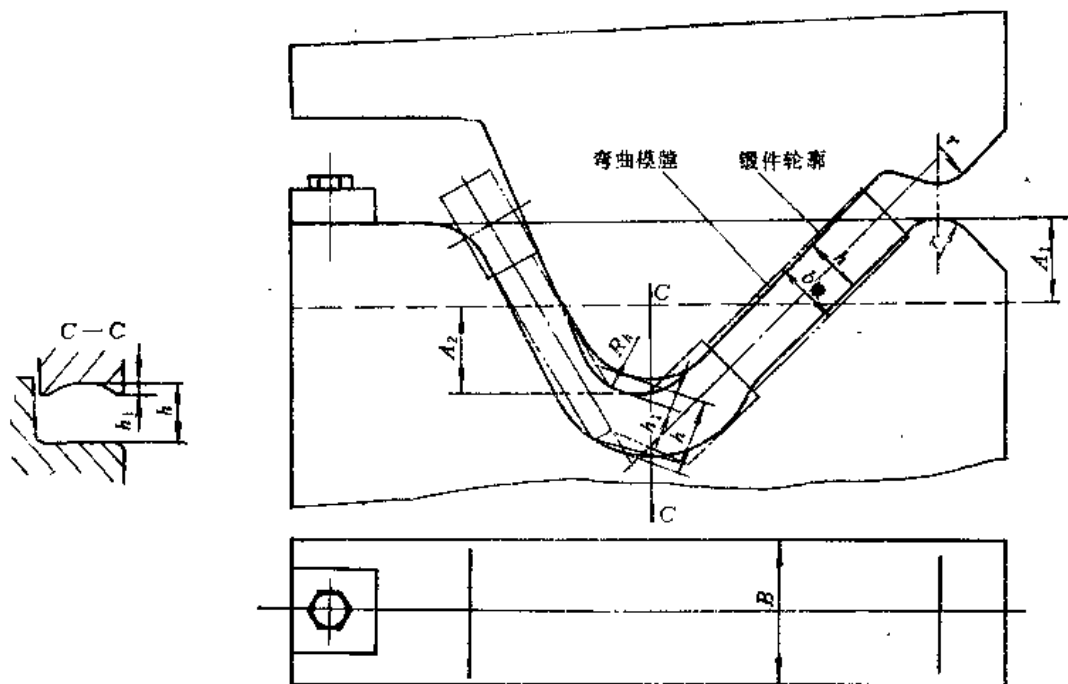


图8-87 弯曲模膛

专门的上下顶出装置，这些都是与锤用锻模的显著区别，下面就介绍关于模架、模块、导向装置及顶出装置的具体情况。

1. 模架

模架多是通用的，但是由于各种锻件所要求的工步数不同，镶块的形状不同（圆形或矩形），每个镶块内所设置的顶出器不同（一个或两个），所以，每台热模锻压力机都有一至几套通用模架。

模架是由上下模板、导柱导套、顶出装置以及紧固调整镶块用的零件组成的。在结构上应保证模块装拆、调整方便，紧固牢靠、通用性强。常用的有以下两种型式：

（1）压板式模架 这种模架是采用斜面压板来压紧镶块锻模的，如图8-88所示为矩形镶块用斜面压板式模架；而图8-89所示为圆形镶块用斜面压板式模架。

斜面压板式模架使用较多，它的优点是：镶块紧固刚性大，结构简单，但也有对于不同尺寸锻件的通用性较小，镶块的装拆调整不方便及镶块不能翻新等缺点。

（2）键式模架 这种型式的模架取消了压板式模架中的后挡板、斜面压板、侧向压紧以及模板上的凹槽。镶块、垫板、模板之间都用十字形布置的键进行前后、左右方向的定位和调整，如图8-90所示。

键式模架具有通用性强，一副模架可以适应各种不同尺寸的锻件及不同形状的镶块（圆形或矩形），而镶块的装拆、调整方便、镶块可以翻新等优点。但是它的垫板、键等零件的加工精度要求较高。

2. 模块

热模锻压力机用锻模的模块是装在模架上的。模块有以下两种型式：

（1）整体式模块 见图8-91。

（2）镶块式模块 上、下模块可分成两块或其中一个分成两块，一块为模座，一块为加

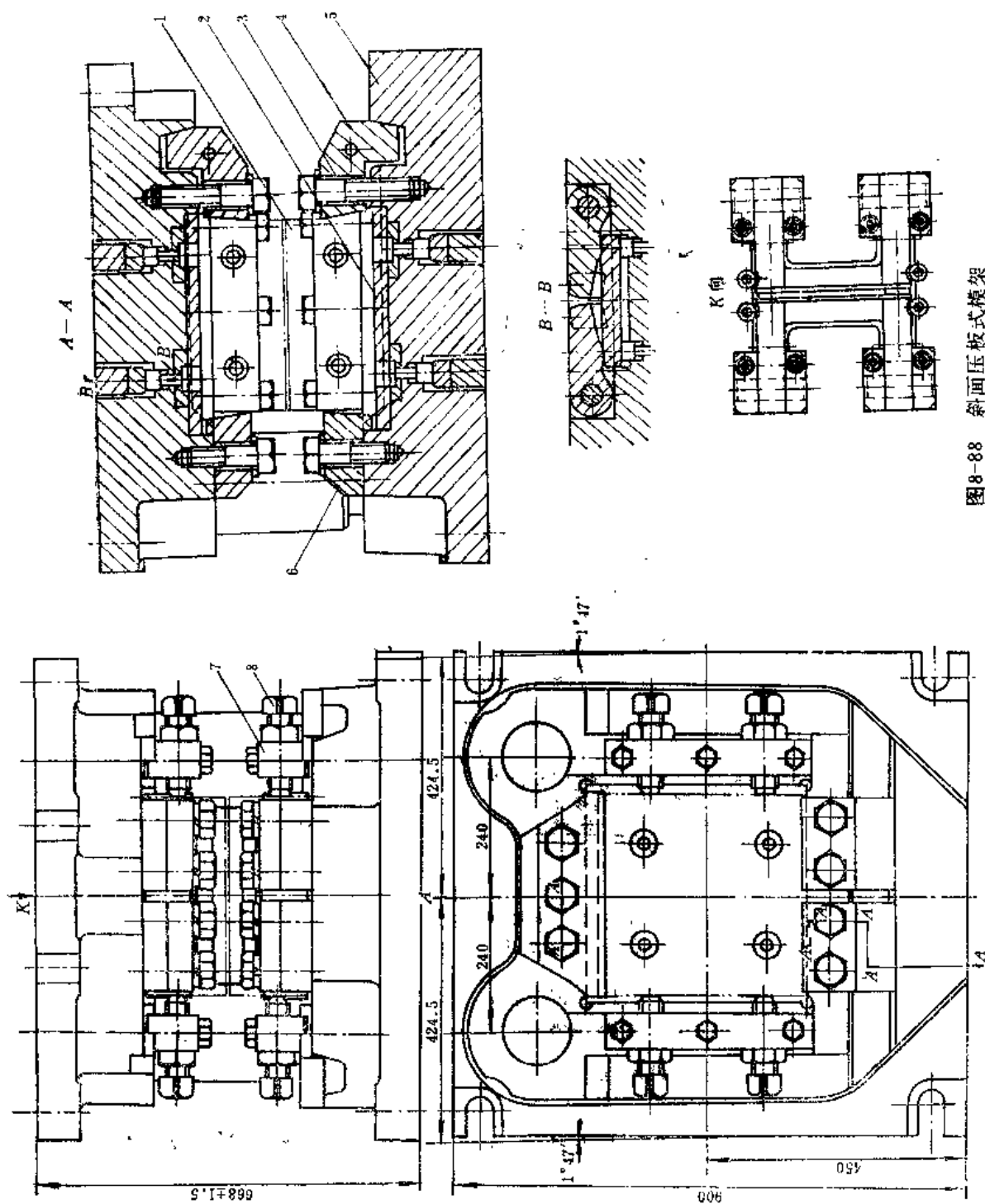


图 8-88 斜面压板式模架
1—镶块 2—垫板 3、8—螺钉 4—斜面压板 5—模板 6—后挡块 7—侧挡块

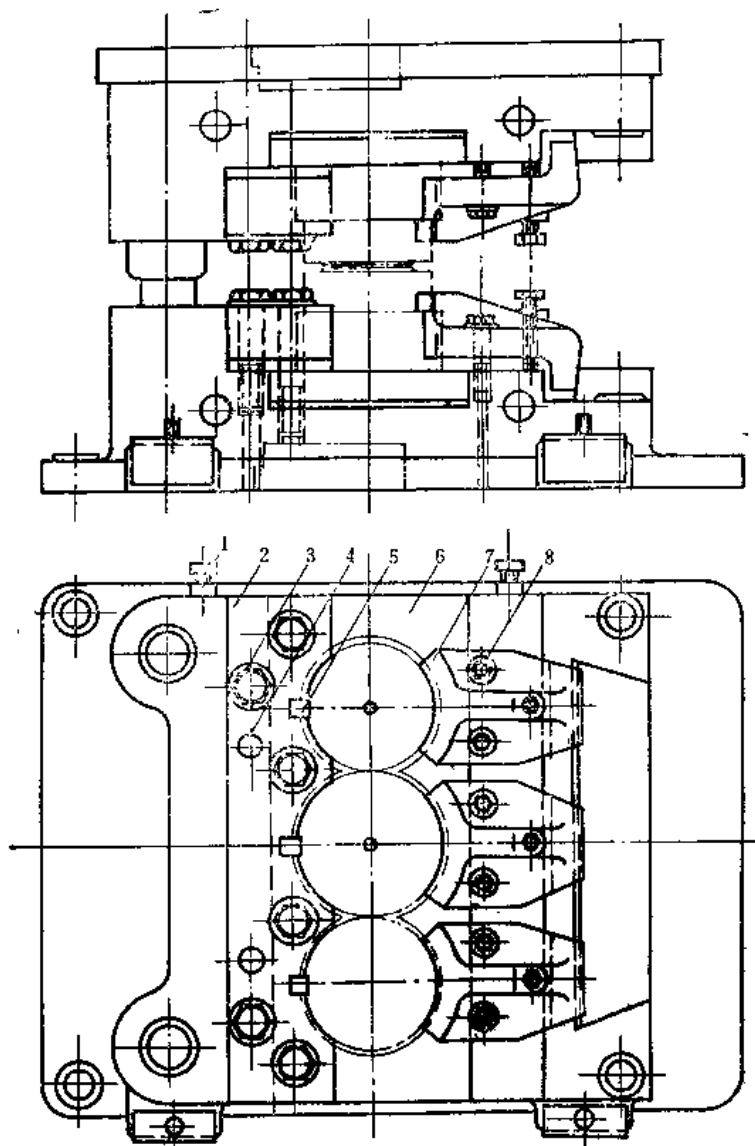


图8-89 斜面压板式模架

1、3、8—螺钉 2—后挡板 4—销钉 5—键 6—下模板 7—压板

工出模膛的镶块，这样可以使模座不用经常更换。图8-92就是几种组合式模块。其中图8-92中的a)、b)、c)是方形和矩形镶块组成的模块；而图中d)、e)是圆形镶块组成的模块。

镶块与模座之间可以采用螺钉紧固，也可以采用斜楔紧固。

3. 导向装置

热模锻压力机用锻模的导向装置是由导柱、导套组成的，如图8-93所示。大多数锻模采用双导柱设在模座后面或侧面，也有采用四导柱的，导柱长度应保证：压力机滑块在上止点位置时导柱不能脱离导套；在下止点位置时不碰盖板。

导向装置的具体设计可参考《锻模设计手册》中图7-75及表7-10～表7-21进行。

4. 顶出器

热模锻压力机的顶出器主要用于顶出锻件（预锻和终锻模膛）。顶出器的位置，应根据锻件的具体情况而定。例如，在一般情况下顶出器应顶在锻件的飞边上（图8-94a），也可以

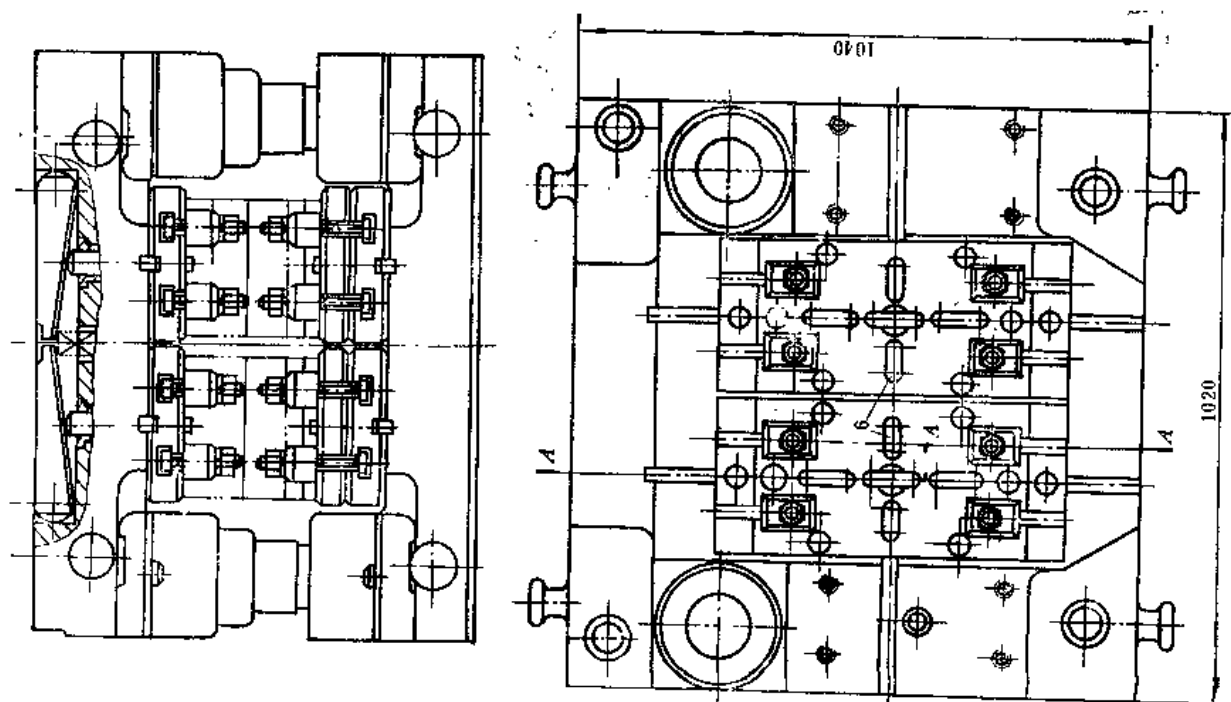


图8-90 键式模架
1—键块 2—压板 3—中间垫板 4—底层垫板 5—浇头键 6—导向键 7—螺钉

顶在具有较大孔径的冲孔连皮上 (图8-94b)。
对于连杆锻件 (图8-94c), 可以顶在小头及大头的叉部上。如果顶出器只能顶在锻件的本体上时, 则应尽可能顶在加工面上, 如图8-94d、e、f 所示。

为防止顶杆弯曲, 设计时应注意顶杆不能太细, 一般取 $\phi 10 \sim 30 \text{ mm}$ 。镶块上应有足够长度的导向部分, 镶块与顶杆之间留有 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ 的间隙。

5. 闭合高度

热模锻压力机是曲柄压力机类设备, 由其结构所决定, 其行程是固定的。因此模具在闭

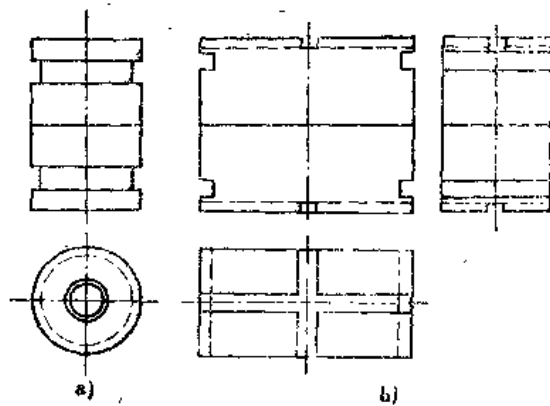


图8-91 整体式锻模
a) 圆形锻模 b) 矩形锻模

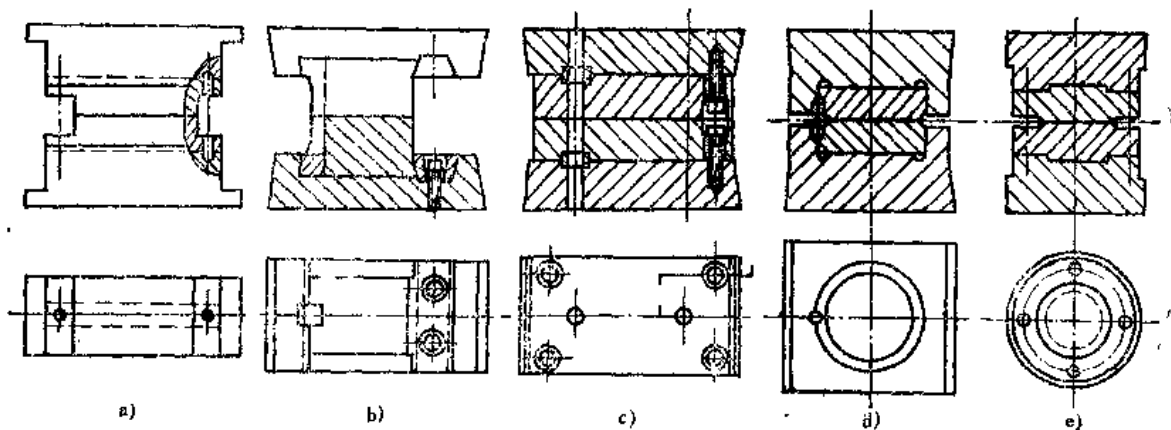


图8-92 镶块式锻模
a)、b)、c) 矩形镶块 d)、e) 圆形镶块

合状态, 各零件在高度方向上的尺寸关系如图8-95所示, 即:

$$H = 2(h_1 + h_2 + h_3) + h_4 = A + 0.6a$$

式中 H —— 模具的闭合高度;

h_1 —— 上下模座厚度;

h_2 —— 上下垫板厚度;

h_3 —— 上下镶块高度;

h_4 —— 上下模间隙;

A —— 压力机最小闭合高度;

a —— 工作台最大调节量。

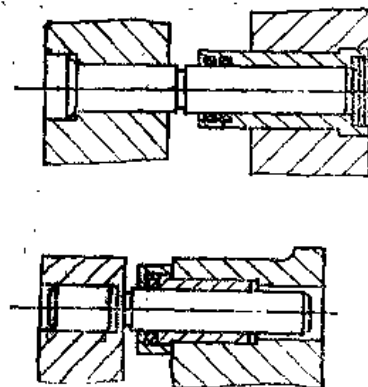


图8-93 导向装置

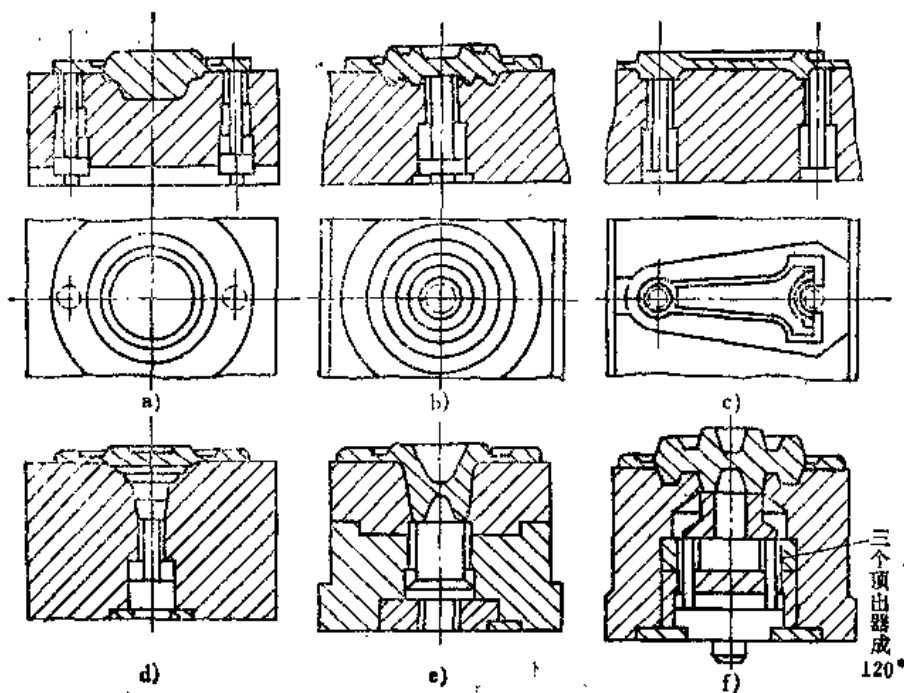


图8-94 顶出器的位置

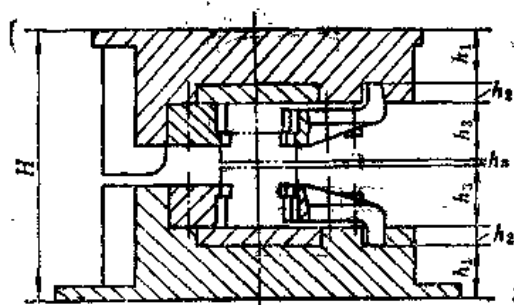


图8-95 模具闭合高度的组成

第三节 螺旋压力机用锻模

在中、小批量生产和精密成形中，螺旋压力机是应用较广的一种锻压设备。

正如上一章中所述，相对于模锻锤，螺旋压力机的主要工作特点是：①也是靠冲击力使金属变形，但滑块的打击速度低（约 $3 \sim 4 \text{ m/s}$ ）；②每分钟的打击次数少；③有顶出装置；④承受偏载的能力较差等。

在螺旋压力机上坯料在模膛中的变形一般是在多次打击下完成的，由于有下顶出装置，某些锻件可以立起来顶出。由于螺旋压力机不宜受偏心载荷，因此多用于单模膛的最后终锻，模膛的中心距离应不超过丝杠的节圆半径，而且由于其每分钟的打击次数少，对需要拔长、滚压、弯曲、预锻工步的锻件，一般需要用其它设备来制坯，或顺序地用两台螺旋压力机来完成。

正如第七章第五节所述，通常在螺旋压力机上所完成的变形工步是，终锻、预锻、镦

粗、顶锻、弯曲、成形、压扁等。在螺旋压力机上所生产的锻件类型如表8-10所示。

表8-10 锻件分类

	锻件简图	说明
第Ⅰ类	杯盘齿轮类	<p>1. 整体锻粗, 挤压成形</p> <p>2. 多采用闭式模具, 进行无飞边模锻</p>
	用组合凹模锻出的在两个方向有凹坑的锻件	采用组合凹模, 可得到在两个方向有凹坑、凹挡的锻件, 如法兰、三通阀体等
	精密锻件	是少元切削工艺在螺旋压力机上的应用
第Ⅱ类	长轴类	<p>1. 相当于锤上模锻的长轴类锻件, 又可分为直线主轴、弯轴、叉杆及带枝芽类锻件</p> <p>2. 采用开式模具, 进行有飞边模锻</p>
第Ⅲ类	顶锻类锻件	<p>1. 头部局部锻粗成形, 杆部不变形</p> <p>2. 多用开式模具, 进行小飞边模锻</p>

由于螺旋压力机的打击速度低, 模具可以采用组合式结构。

本节主要介绍螺旋压力机用锻模的设计特点和锻模的结构特点。

一、锻模设计特点

1) 螺旋压力机上开式模锻的模膛设计与锤锻模设计基本相同, 但是飞边槽尺寸及型式的选择稍有不同。螺旋压力机锻模飞边槽的基本型式如图8-96所示。由于螺旋压力机每分钟的行程次数少, 飞边槽桥口的高度比锤锻模大, 可按下列式计算:

$$h = 0.02\sqrt{S}$$

式中 h ——飞边槽桥部的高度;

S ——锻件的水平投影面积。

飞边槽尺寸也可按表8-11和表8-12根据压机吨位大小确定。

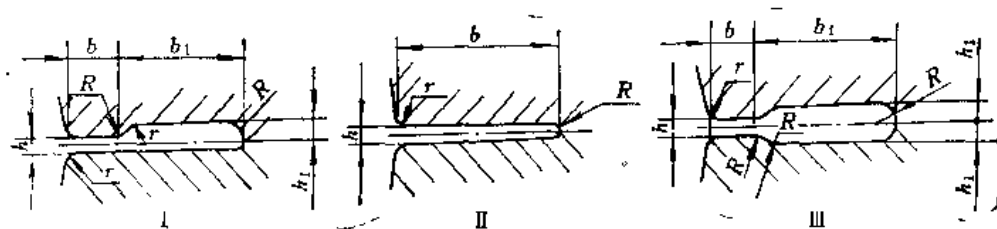


图8-96 飞边槽的类型

表8-11 钢锻件飞边槽尺寸

(mm)

设备吨位(kN)	h	h_1	b	b_1	r	R
≤ 1600	1.5	4	8	16	1.5	4
1600~4000	2.5	4	10	20	2.0	4
4000~6300	3.0	5	10	20	2.0	5
6300~10000	3.5	6	12	25	2.5	6
10000~25000	4.0	7	15	30	3.5	7

表8-12 有色金属锻件飞边槽尺寸

(mm)

设备吨位(kN)	h	h_1	b	b_1	r	R
≤ 1600	1.2	4	6	25	1.5	4
1600~4000	1.5	4	8	30	2.0	4
4000~6300	2.0	5	8	35	2.0	5
6300~10000	2.5	6	10	35	2.5	6
10000~25000	3.0	7	12	40	3.5	7

飞边槽型式选择的原则是：若采用制坯工艺使金属体积分配合理和采用小飞边模锻时，可采用第Ⅰ类飞边槽型式；对一些小锻件可采用第Ⅰ类飞边槽型式；对复杂形状的锻件和制坯后金属体积与锻件体积相差较大时，可采用第Ⅱ类飞边槽型式（见图8-96）。

2)螺旋压力机通常只有下顶出装置，所以锻件上的形状复杂部分应放在下模，以便于脱模。

3)当锻模上只有一个模膛时，模膛中心和锻模模架中心与压力机主螺杆中心应重合；当同时有预锻模膛和终锻模膛时，应将两模膛中心放置在锻模中心的两侧，且使两中心相对于锻模中心的距离为 $a/b \leq 1/2$ ； $a+b \leq D$ ，如图8-97所示。

4)因螺旋压力机的行程速度慢，模具的受力条件较好，所以开式模锻模块的承击面积一般可取锤锻模的1/3。

5)对于模膛比较深、形状较复杂、金属难于充满的部位，应设置排气孔。

6)由于螺旋压力机的行程不固定，上行程结束的位置也不固定，所以在模块上设计顶出器时，应在保证强度的前提下留有足够的间隙，以防顶出器将整个模架顶出，如图8-98所示。

7)螺旋压力机闭式模锻较适用于轴对称变形或近似轴对称变形的锻件。在闭式锻模设计

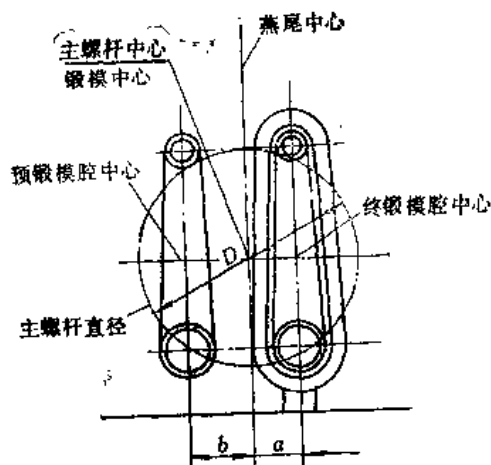


图8-97 模腔中心安排

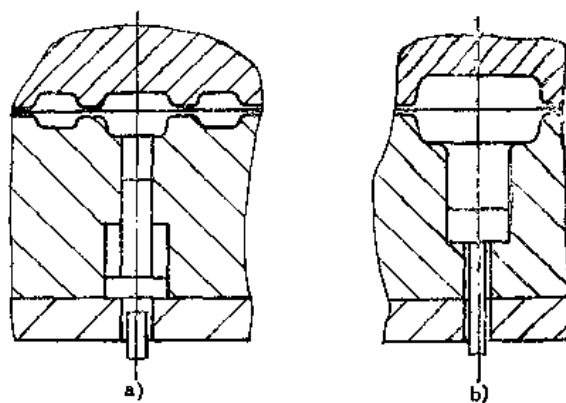


图8-98 顶出器的结构

中, 其冲头和凹模、顶杆和凹模之间的间隙值应适当。若间隙过大, 会形成纵向毛刺, 加速模具磨损且造成顶件困难; 如间隙过小, 因温度的影响和模具的变形, 会造成冲头和凹模、顶杆和凹模之间运动困难。通常按三级滑动配合精度选用, 冲头与凹模间的间隙按表8-13选取。

表8-13 冲头和凹模间的间隙值

(mm)

冲头直径	间隙值	冲头直径	间隙值
<20	0.05	60~120	0.10~0.15
20~40	0.05~0.08	120~200	0.15~0.20
40~60	0.08~0.10	>200	0.20~0.30

8) 设计闭式锻模的凹模和冲头时, 应考虑多余能量的吸收问题。当模膛已基本充满, 再进行打击时, 滑块的动能几乎全部为模具和设备的弹性变形所吸收。坯料被压缩后, 使模具的内径撑大, 模具承受很大的应力。因此在螺旋压力机上闭式模锻时, 模具的尺寸不取决于所模锻锻件的尺寸和材料, 而取决于设备的吨位。关于螺旋压力机闭式模具的计算截面请参考本书第十章中表10-3。

二、锻模结构特点

1. 锻模的结构型式

由于螺旋压力机具有模锻锤与热模锻压力机的双重特点, 其锻模的结构型式也有两种, 即锤锻模结构型式和热模锻压力机锻模结构型式, 如图8-99所示。

图8-99a、d为整体式和镶块式的锤锻模结构型式; b、c、e、f为整体式和组合式的热模锻压力机锻模结构型式。当车间既有模锻锤、又有摩擦压力机时, 要求同样能量设备可以通用, 这时可采用锤锻模结构型式, 以便于根据生产任务调节不同设备的负荷。大吨位摩擦压力机多用整体式锻模(见图8-99a、b)。

2. 模块、模座及紧固型式

模块分为圆形和矩形两种。前者主要用于圆形锻件或不太长的小型锻件; 后者主要用于长杆类锻件。模块尺寸应根据锻件尺寸而定, 但根据各个工厂的具体条件应尽可能使其标准化、系列化。

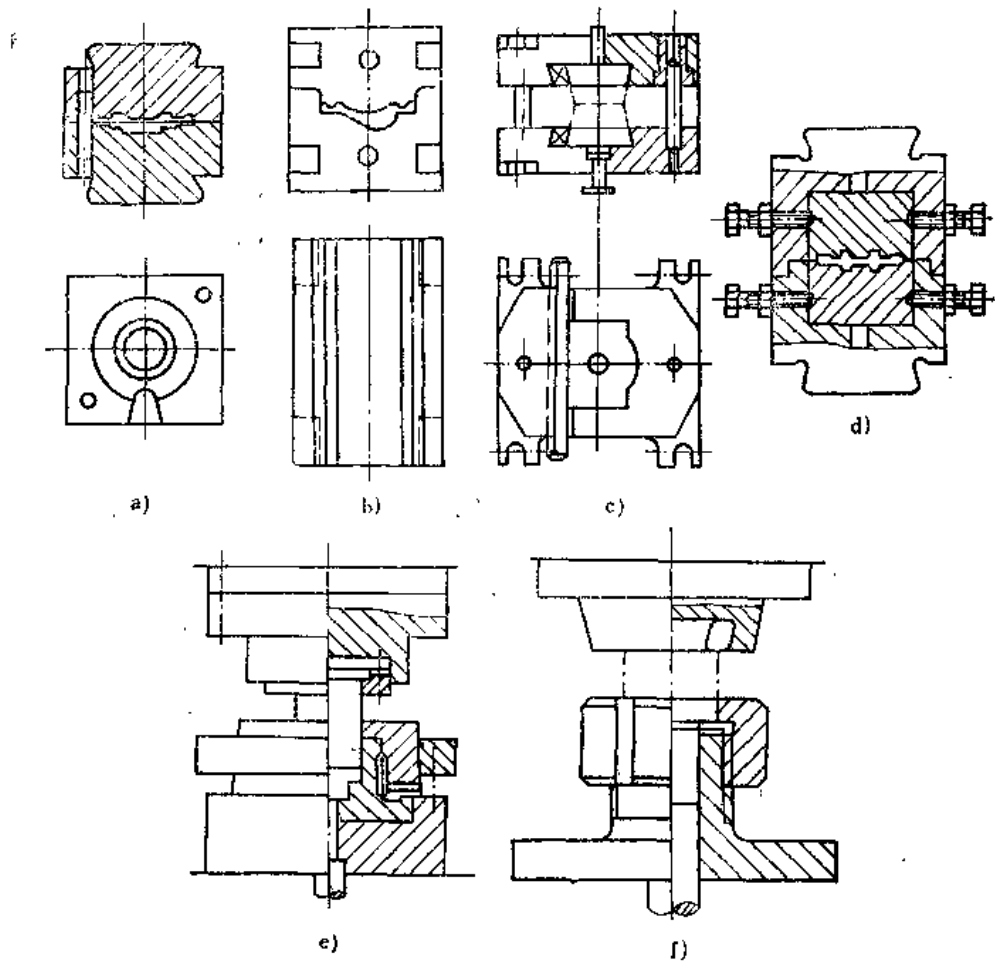


图8-99 摩擦压力机常用锻模结构型式

模座是锻模模架的主要零件。设计时要力求制造简单、装卸方便、易于保管、经久耐用。图8-99c所示的通用模座即可安装圆形模块又可安装矩形模块，减少了模座种类，便于生产管理。

为了便于调节上下模块间的相对位置，防止因模块和模座孔可能产生的变形影响其正常装卸，模块和模座孔之间应留有一定的间隙。

模块的紧固型式有以下几种：

(1) 斜楔紧固 这种紧固方法与锤锻模相同，如图8-100所示。

(2) 压板紧固 这种紧固方法的优点是紧固可靠，适用于圆形模块，特别是需要使用顶杆的圆形模块，采用压板紧固就更多，如图8-101所示。

(3) 螺栓紧固 这种紧固方法适用于圆形模块（见图8-102所示），也适用于矩形模块（见图8-103）。

(4) 焊接紧固（见图8-104） 它是用焊接的方法将模块固定，这种紧固方法结构简单，但是不能更换。所以只有在急件或一次性投产时才使用。

3. 导向装置

为了平衡模锻过程中出现的错移力，减少锻件错移，提高锻件精度和便于模具安装、调整，可采用导向装置。摩擦压力机锻模的导向装置有以下几种：

(1) 导柱导套 导柱导套导向用于生产批量大、精度要求较高的情况，其结构如图8-105

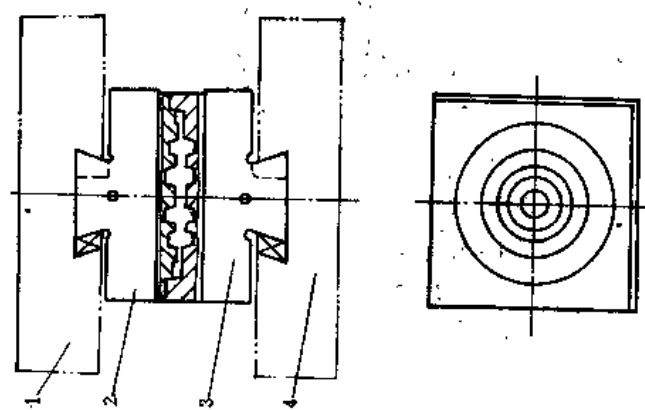


图8-100 用斜楔紧固的整体模
1—上模板 2—上模 3—下模 4—下模板

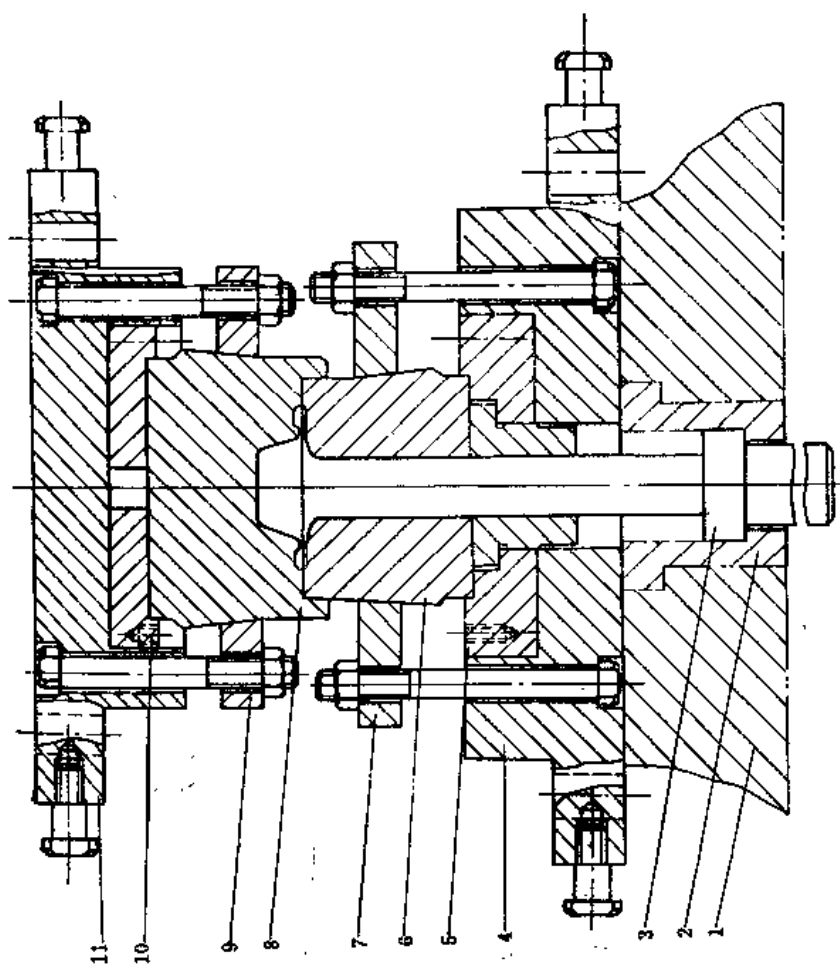


图8-101 用压板紧固模块
1—压力机工作台 2—衬套 3—顶杆 4—下模座 5—下垫板 6—下模 7—下压板 8—上模 9—上压板 10—上垫板 11—上模座

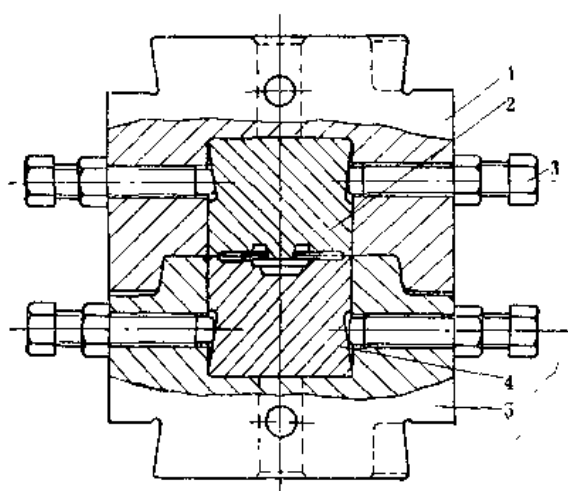


图8-102 用螺栓紧固模块

1—上模套 2—上模块 3—螺栓 4—下模块 5—下模套

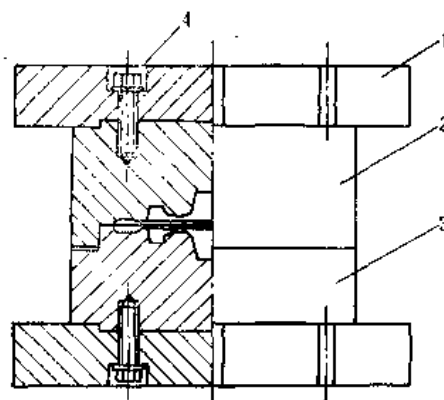


图8-103 用螺栓紧固模块

1—上底板 2—上模块 3—下模块 4—螺栓

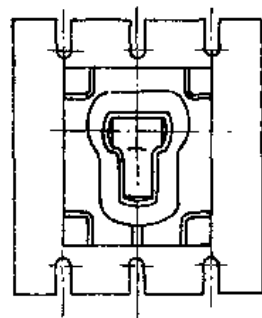
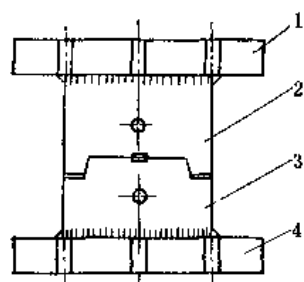


图8-104 用焊接法紧固模块

1—上底板 2—上模块 3—下模块 4—下底板

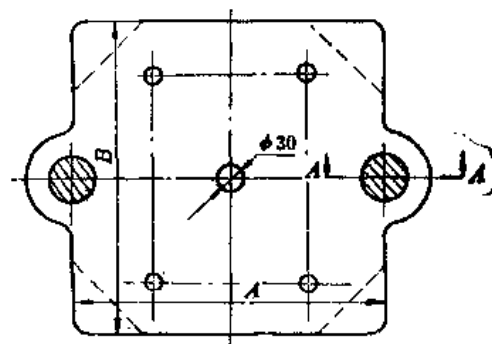
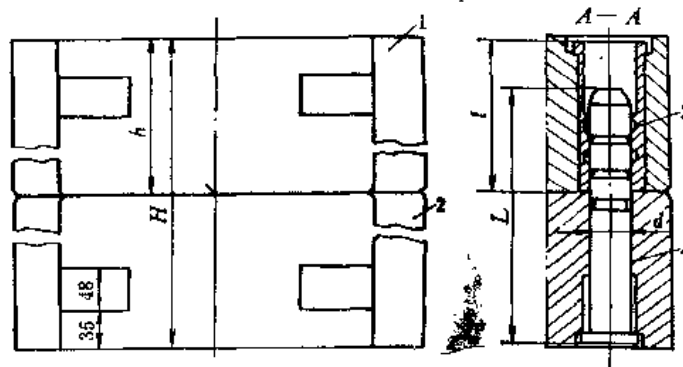


图8-105 导柱导套导向的模模

1—上模座 2—下模座 3—导套 4—导柱

所示。这种结构的导向装置导向性能好，但制造较困难。设计时可参考热模锻压力机（适用于大型摩擦压力机）或冷冲压模具（适用于中小型摩擦压力机）设计的有关部分。

(2) 导销 对于形状简单、精度要求不高、生产批量又不大的锻件，可采用导销导向。其结构如图 8-106 所示。导销的长度应保证：开始模锻时导销进入上模导销孔 15~20mm，在上下模打靠时导销不露出上模导销孔。

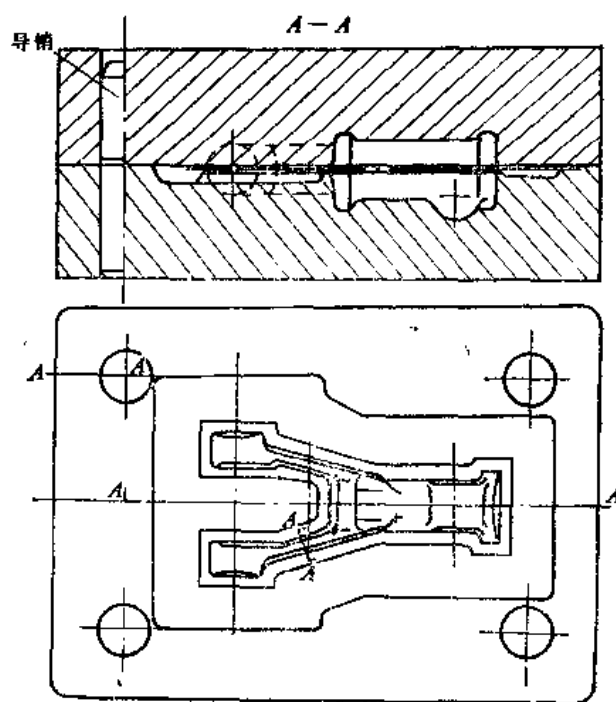


图8-106 用导销导向

(3) 凸凹模自身导向 凸凹模自身导向主要用于圆形锻件，实质上它是环形导销的变种型式。可分为圆柱面导向（见图8-107a）和圆锥面导向（见图8-107b）两种。前者的导向性能优于后者，多用于无飞边闭式模锻；后者多用于小飞边开式模锻。设计导向部分的间隙时，要考虑到模具因温度变化对间隙值的影响，一般取 $0.05 \sim 0.3\text{mm}$ 。导向的凹模孔口应做出较大的圆角（见图8-107b）或做成一段喇叭口形状，如图8-108所示。

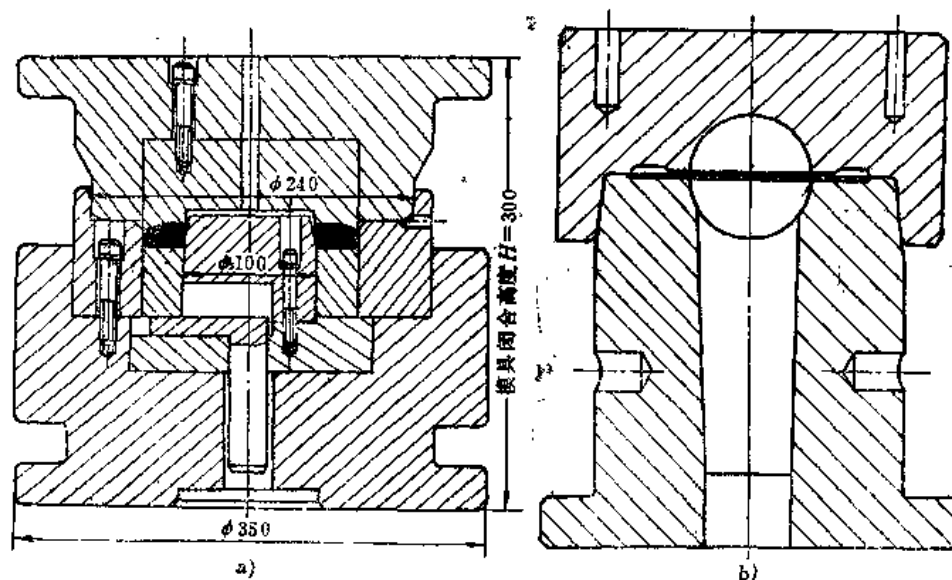


图8-107 凸凹模导向

a) 圆柱面导向 b) 圆锥面导向

(4) 锁扣 锁扣导向主要用于大型摩擦压力机开式锻模上，但有时也用在中、小型锻件生产上。摩擦压力机锻模锁扣导向与锤锻模的锁扣导向基本相同，分为平衡锁扣和一般锁

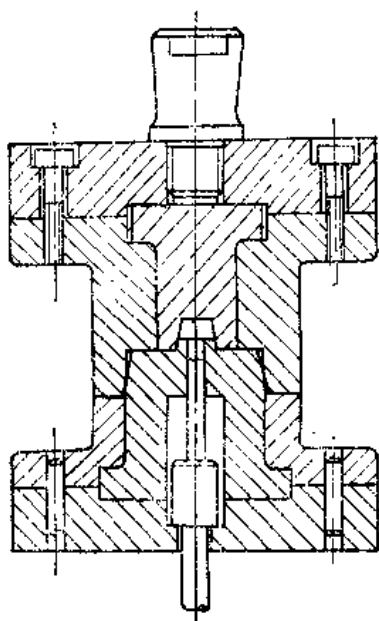


图8-108 导向口为喇叭形结构

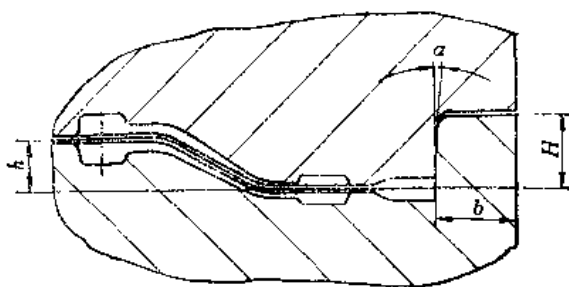


图8-109 平衡锁扣

扣。平衡锁扣用于分模面有落差的锻件，其结构见图8-109；一般锁扣则应根据锻件的形状和具体情况进行设计。通常，回转体锻件开式模锻时广泛采用圆形锁扣；错移力较大的锻件或非回转体锻件多采用侧面锁扣或角锁扣，其结构型式与锤锻模的相应锁扣相同。

以上几种导向装置的具体结构及设计可参考《锻工手册》图6-65～图6-67及表6-35。

第四节 平锻机用锻模

在前一章已经介绍，平锻机模锻通常用于生产顶锻类锻件（见第七章表7-2）。其模锻工步如图7-56和7-59所示。常用的模锻工步是终锻、预锻、顶锻、冲孔、穿孔、切边等。

平锻机是曲柄压力机类设备，因此也具有热模锻压力机的某些特点，即工作压力是静压力，而且由机架本身承受，滑块行程一定，有良好的导向装置等。但是平锻机用锻模在锻模结构上与模具设计上又区别于热模锻压力机，以下分别介绍。

一、平锻模的固定及固定空间

平锻机过载敏感性强，所以模具闭合长度、设备闭合长度是平锻机模具固定空间最重要的参数。模具固定空间的有关参数可查阅设备说明书或有关资料。但是，平锻机和一般锻压机不同，其连杆长度不能调节，模具闭合长度仅能靠斜楔调节2～4mm。

平锻机具有两个分模面，因而模具可分为三部分：冲头、固定凹模、活动凹模。图8-110为平锻模结构及固定简图。冲头通过夹持器7固定在主滑块凹槽内，它的后面紧靠在调节斜楔1上。斜楔1通过螺钉3的转动，完成升降动作，进而达到调节模具闭合长度的目的。夹持器的前后、垂直方向的固定，是通过压板4和螺钉5、6、2紧固的；而左右方向则靠夹持器的侧面与滑块凹槽侧面的配合使之受到限制，从而保证夹持器在三个方向上得以紧固。

凹模8分别安装在固定凹模座和活动凹模座上。前后方向由键12保证；左右、上下方向通过压板7和螺钉10、11压牢。三个方向的尺寸、位置调节可用垫片调节。似乎这种固定方法的可靠性不足，实际上当两半凹模处于夹紧状态和冲头施压时，由于凹模体在凹模座内各

向受压，不会发生移动。当冲头回程时，由于固定键12的作用，凹模件也不会被拖动。至于在活动凹模回程时，因拔模力不大，压板螺钉可将两片凹模牢固地固定在模座上。

根据锻件平锻工步数量的不同，冲头夹持器分为三个、四个、五个模膛等几种。工厂中冲头夹持器列为通用标准件，按实际需要供选用。

根据冲头固定部分的形状，常用的冲头夹持器有两种型式：大、中型平锻机广泛采用压盖-螺钉固定式；小型平锻机多用轴头式（见图8-111）。

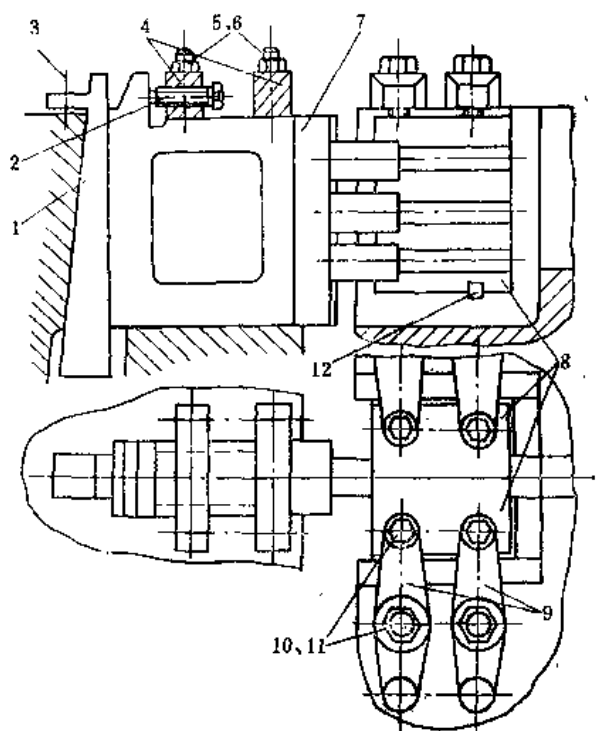


图8-110 平锻模结构及固定简图

1—调节斜楔 2,3,5,6,10,11—螺钉 4,9—压板 7—夹持器
8—凹模 12—键

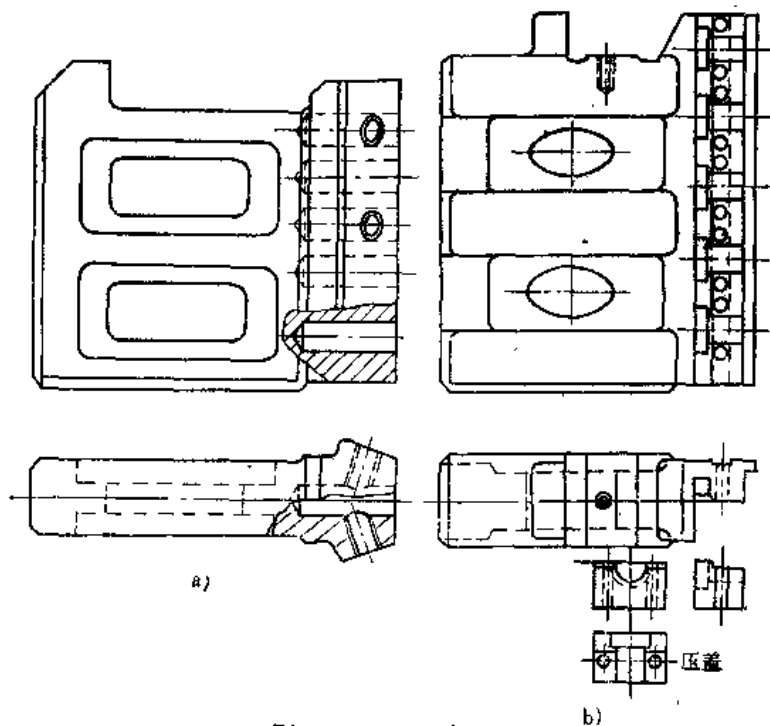


图8-111 冲头夹持器
a)轴头式 b)压盖式

二、平锻模结构设计特点

平锻模由冲头和凹模组成，其中凹模是可分的，并基本对称。

安排各工步的顺序位置，应符合操作顺序，并把变形力最大的工步布置在滑块的中心线或偏下的位置上。

凹模的轮廓尺寸（长、宽、高）由平锻机的模具固定空间尺寸所决定。凹模多做成组合式，模体用结构钢（45、40Cr）等制造，模膛部分做成镶块式，用热模具钢制造。凹模镶块多制成半圆柱体，也有制成立方体的，见图8-112。根据模膛各部分磨损情况的不同，模膛可全部采用镶块，也可局部采用镶块。镶块的尺寸根据受力情况而定，主要应保证镶块有足够的支承面积，以免在使用过程中，模体产生压皱变形。

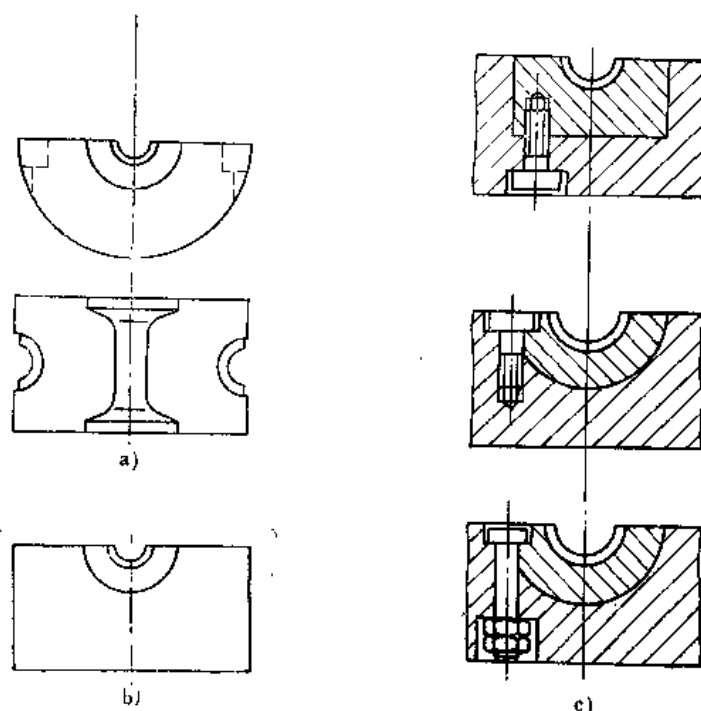


图8-112 凹模镶块

a) 半圆形镶块 b) 方形镶块 c) 镶块固定方法

冲头由两部分组成：工作部分和固定部分（图8-113）。固定部分有两个凸肩，前边的凸肩A（图8-113d），在金属产生塑性变形时承受压力，承压面积（环形面积）不能太小，否则在工作时冲头凸肩A和夹持器接触面上将产生压缩变形。后面的凸肩B在回程时承受卸件力的作用。在凸肩A处还要切出小平面S，以免使用过程中冲头转动，这一点对非圆形锻件特别重要。图8-113c为轴头式固定部分，它只有一个凸肩，用螺钉顶紧A处，以防止冲头转动和避免回程时冲头与夹持器脱离。

冲头的工作部分可与固定部分整体制造，也可设计成组合式。图8-113a、b为整体式冲头，多用于锥形聚集冲头。图8-113c~h为组合式，可节省模具钢，降低模具制造成本，应用很广。图8-113c适用于 $D=80\sim 150\text{mm}$ 的冲孔成形冲头；d适用于 $D\leq 80\text{mm}$ 的成形、穿孔、切边冲头；e、f、g适用于大直径锻件用冲头；h为滑动冲头，适用于头部尺寸H较大的锻件。

三、模膛设计

1. 终锻模膛设计

模膛形状和尺寸取决于热锻件图, 其型式见图8-114。

圆模直径: 闭式模锻 $D_{\text{凹}} = D_{\text{锻}}$

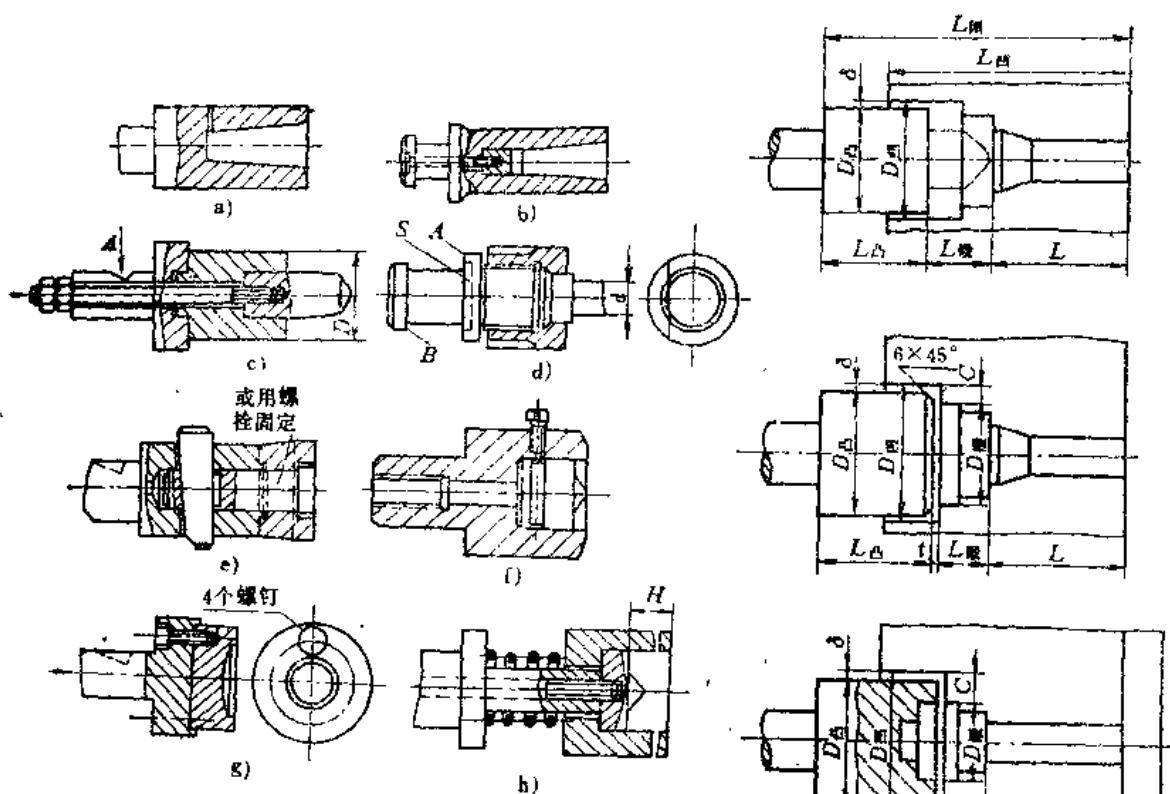


图8-113 冲头结构型式

图8-114 终锻模膛

开式模锻 $D_{\text{凹}} = D_{\text{锻}} + KC$

式中 $D_{\text{锻}}$ ——热锻件图直径;

C ——毛边宽度;

K ——系数, 当采用后定料装置时, $K = 2.5 \sim 3.0$; 当采用前定料装置时, $K = 2.0 \sim 2.5$ 。

冲头直径: $D_{\text{凸}} = D_{\text{凹}} - 2\delta$

式中 δ ——凸凹模间隙, 与设备吨位有关, $\delta = 0.2 \sim 0.75 \text{ mm}$, 大设备取大值。

冲头长度: $L_{\text{凸}} = L_{\text{闭}} - (L + L_{\text{锻}} + t)$

式中 $L_{\text{闭}}$ ——模具闭合长度;

L ——夹紧部分长度;

$L_{\text{锻}}$ ——锻件在凹模内成形部分的长度;

t ——毛边厚度。

预锻成形模膛设计是根据预锻工步图设计的, 设计方法与闭式终锻模膛的相同。

2. 聚集模膛设计

其模膛设计的依据是所计算的锥体尺寸, 见图8-115。

凸模直径: $D_{\text{凸}} = D_{\text{大头}} + 0.2(D_{\text{大头}} + L_{\text{锥}}) + 5 \text{ mm}$

凹模直径: $D_{\text{凹}} = D_{\text{凸}} + 2\delta_1$

凸模长度: $L_{凸} = L_{闭} - (L + \delta_2)$

导程长度: $L_{导} = L_{导} - L_{锥} + (15 \sim 25) \text{ mm}$

上述式中符号见图8-115。

氧化皮槽尺寸: 为储存模锻时脱落的氧化铁皮, 以免压入锻件形成凹坑, 在模膛上应开一个槽, 尺寸为 $a = 20 \sim 30 \text{ mm}$, $\alpha = 30^\circ \sim 60^\circ$ 。

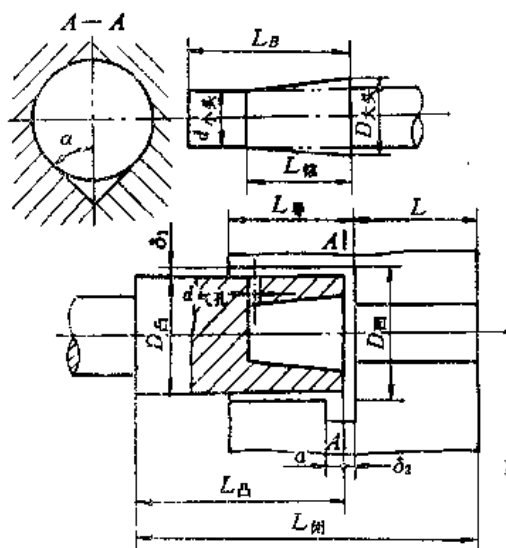


图8-115 聚集模膛

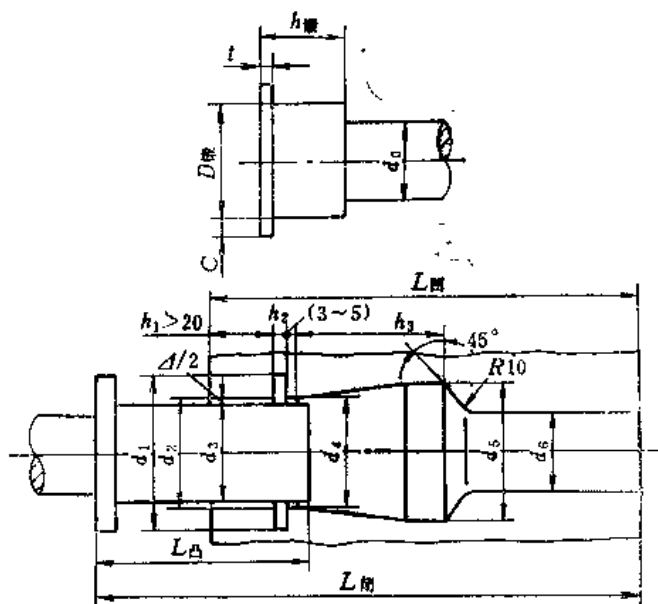


图8-116 切边模膛

3. 切边模膛设计

开式模锻件应切边, 通常在平锻模切边模膛中进行, 见图8-116。切边模膛的有关尺寸如下 (符号见图示):

$$d_1 = D_{锻} + 3C + 5 \text{ mm}$$

$$d_2 = d_3 + (1 \sim 2) \text{ mm}$$

$$d_3 = d_4 - \Delta$$

$$d_4 = D_{锻}$$

$$d_5 = d_4 + (8 \sim 10) \text{ mm}$$

$$d_6 = 1.02d_0 + 1 \text{ mm}$$

$$h_2 = (4 \sim 5)t$$

$$h_3 = h_{锻} + (10 \sim 15) \text{ mm}$$

4. 穿孔模膛设计

平锻件的穿孔工步也在平锻模上的穿孔模膛中进行, 见图8-117。穿孔模膛的有关尺寸如下 (符号见图示):

$$d_1 = d_0 + (5 \sim 10) \text{ mm}$$

$$d_2 = D_{锻1} + x$$

$$d_3 = D_{锻2} + x$$

$$d_4 = d_{锻}$$

$$d_5 = 1.01d_{锻} + 0.2 \text{ mm}$$

$$d_6 = d_0 + (1.5 \sim 3.0) \text{ mm}$$

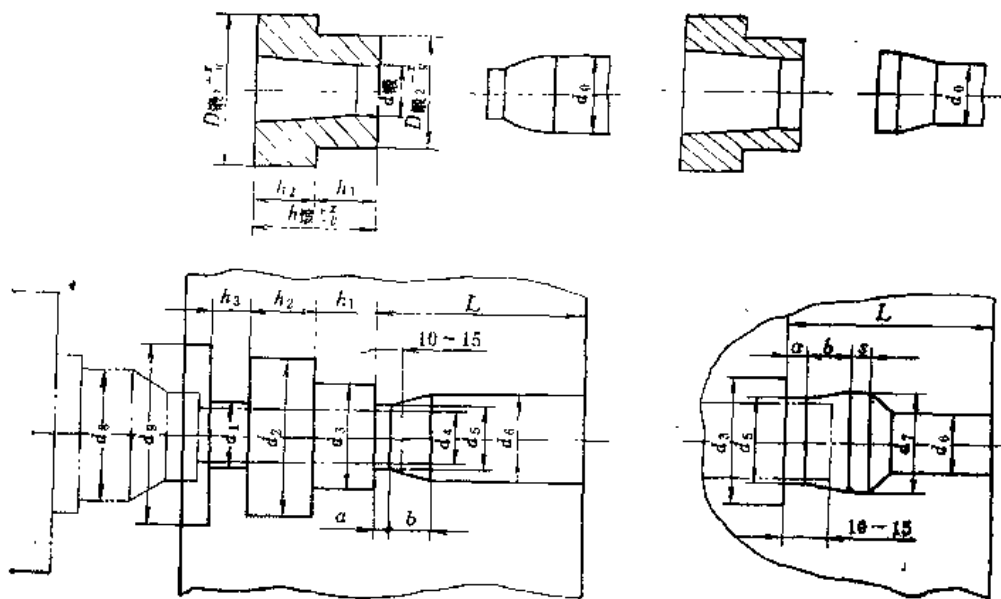


图8-117 穿孔模膛

$$d_7 = d_5 + 8 \text{ mm}$$

d_8 = 进入凹模中的冲头最大外径

$$d_9 = d_8 + (10 \sim 20) \text{ mm}$$

$$h_1 = h_{\text{锻1}} + y$$

$$h_2 = h_{\text{锻2}} + (10 \sim 15) \text{ mm}$$

$$h_3 \geq 20 \text{ mm}$$

$$S = 20 \sim 30 \text{ mm}$$

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$b = 35 \sim 45 \text{ mm}$$

5. 与活动凹模有关的模膛设计

(1) 卡细镶块 当棒料直径大于锻件的孔径时, 必须使用卡细镶块, 以局部减小棒料的截面积。

因垂直分模平锻机夹紧滑块的压力较小, 卡细变形量不能太大。同时, 为避免棒料卡细时金属流入分模面之间, 每次卡细变形量不能大于棒料直径的5% (从圆形卡细到圆形)。若需要卡细的变形量大, 可分为多次, 通过椭圆—圆形卡细。操作时, 每变形一次后放入下一模膛时, 必须将棒料转动90°, 这一点限制了非圆形锻件对多次卡细工步的应用。

(2) 胀粗镶块 当棒料直径小于锻件孔径时, 为便于连续生产, 必须使用胀粗镶块。

(3) 切断模膛 用长棒料连续模锻无孔或不透孔的锻件时, 或在有孔锻件冲穿后, 棒料直径和芯料直径之比大于1.25时, 则需采用切断工步。前者是从棒料上切去锻件, 后者是从棒料上切去芯料。切断模膛的结构见图8-118, 图中a所示结构为锻件在剪切时可保持不动, 而图b的结构是棒料在剪切过程中保持不动。

(4) 夹紧镶块 这是为了夹紧棒料而设的辅助镶块。夹紧镶块的摩擦阻力应大于变形力, 可按下列经验公式确定镶块长度:

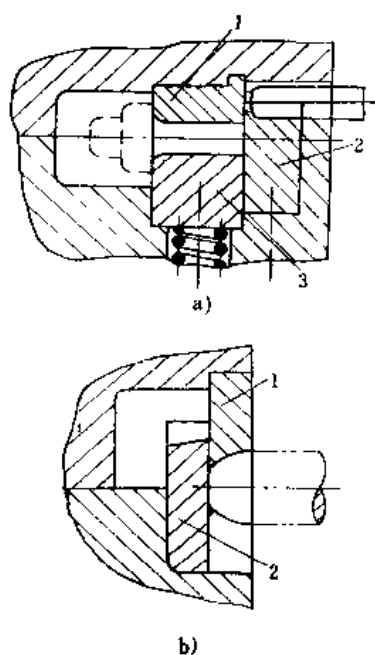


图8-118 切断模膛

1—固定刀片 2—活动刀片 3—夹紧凹模

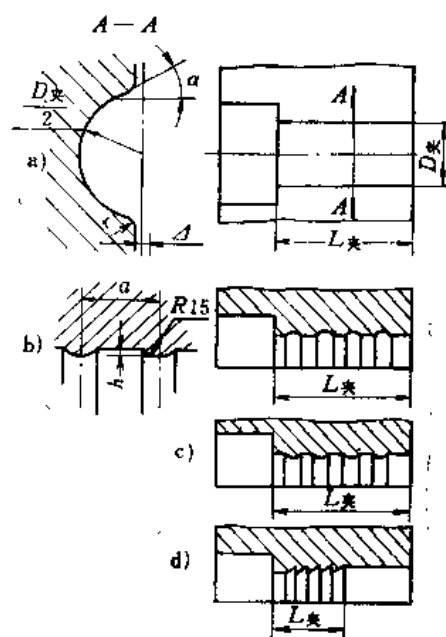


图8-119 夹紧模膛

平滑式 $L_{\text{夹}} = 2.5d_0 + 50$ 肋条式 $L_{\text{夹}} = 2.0d_0 + 30$ 式中 d_0 ——坯料直径。

平滑式夹紧模膛的尺寸设计见图8-119a。带肋条式夹紧模膛见图8-119b、c、d，它主要适用于通孔类锻件或杆部允许有压痕的锻件。

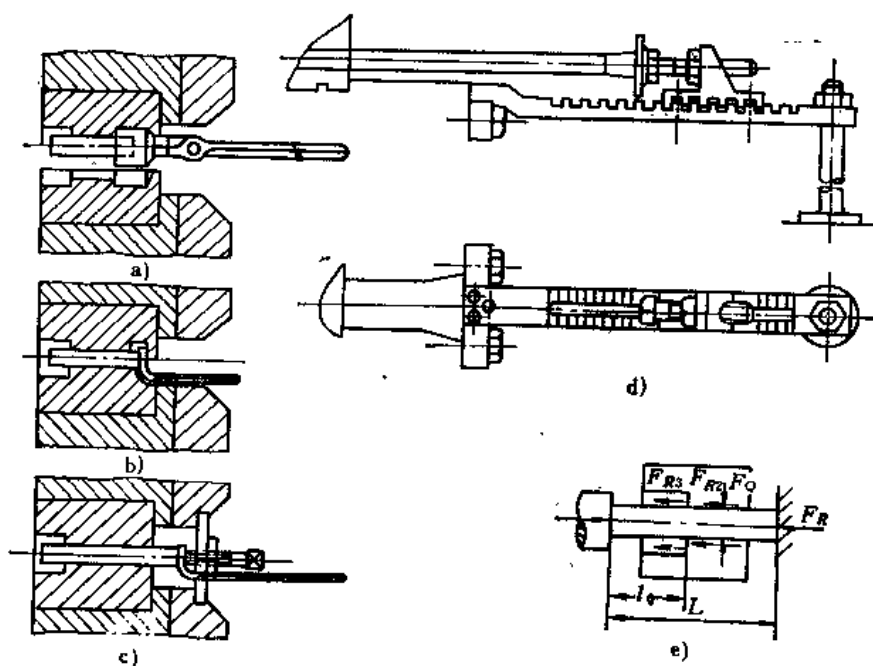


图8-120 后定料装置结构

a)定料钳 b)定料挡板 c)在机架上的定料挡板 d)在机架外的定料挡板 e)后定料挡板

(5) 后定料装置 其作用是使棒料定位准确, 保证变形部分的体积精确。单件模锻时, 棒料变形部分长度较短, 无法采用前定料; 锻件杆部长度公差要求严格, 用前定料装置不能保证精度; 夹紧模膛长度太长, 模体长度不足, 在这些情况下均宜采用后定料装置。其装置结构型式见图8-120。

(6) 其它模膛 根据平锻件形状的需要, 夹紧滑块还可用来压扁锻件头部, 压出与主滑块运动方向相垂直的凹坑或通孔; 将锻件压弯等。

以上滑块或模膛设计的具体要求, 可参考《锻模设计手册》。

第五节 自由锻锤上模锻与胎模锻锻模

一、胎模锻锻模

胎模锻是从自由锻工艺发展起来的一种锻造方法, 尽管在许多方面不及一般模锻, 但与自由锻相比, 却具有明显的优越性, 如锻件形状复杂、尺寸精度高、表面粗糙度小、变形均匀、流线清晰、节约材料、生产率高以及劳动强度较低等。胎模锻是使用非固定的简单模具, 适合于小批量的锻件生产。

胎模的种类甚多, 如图8-121所示。用于制坯的有摔模、扣模和弯曲模; 用于成形的有套模、热模和合模; 用于修整的有校正模、切边模、冲孔模和压印模等。

各种胎模在用途上具有多重性, 如摔模可用于压痕, 称为卡摔; 用于制坯的为型摔; 用于整径的为光摔; 用于校正整形的为校正摔, 如图8-122所示。摔模的共同特征是: 都用于圆形件合模终锻前的制坯、整形或摔光。

扣模除如图8-121b所示的双扇扣模形式外, 还有单扇扣模(图8-123), 常用于非圆形件合模前的制坯或成形以及局部扣形。

弯曲模大体上分为制坯弯曲和成形弯曲两种, 其结构特点如图8-124所示。

套模分带垫和无垫两种, 主要用于法兰件、齿轮、杯形件成形, 如图8-125所示。若生产双面法兰, 则应采用拼分套模, 如图8-126所示。

合模与单模膛锻模相似, 为了保证一定的精度, 在结构上有带导销、带导锁、导销-导锁及导框等形式。图8-121f为带导销形式的合模。由于合模用于最终成形, 因而所需变形力或锻锤吨位最大。

关于胎模的具体设计请参阅《锻工手册》第五篇第一章, 或参阅《锻模设计手册》第五章。

二、固定模模锻锻模

胎模锻是在一台锻锤上分别制坯、成形和修整, 因而劳动强度仍较大, 而且生产率不高。为了改善这种状况, 把胎模固定在自由锻锤上, 类似于一般模锻的情况, 从而可进一步发挥自由锻锤的潜力。

固定胎模锻与非固定胎模锻相比, 不仅劳动强度小, 生产率高, 而且操作更为安全, 锻件尺寸精度、表面粗糙度和模具寿命都有所改善。

自由锻锤机架与砧座是分开的, 而且砧座比模锻锤相应吨位的小些, 锤击时砧座跳动较大, 容易发生上下模块错移, 所以应采取措施, 如终锻模膛中心尽可能与锤杆中心(打击中心)一致; 锻模上设导锁或导销等。

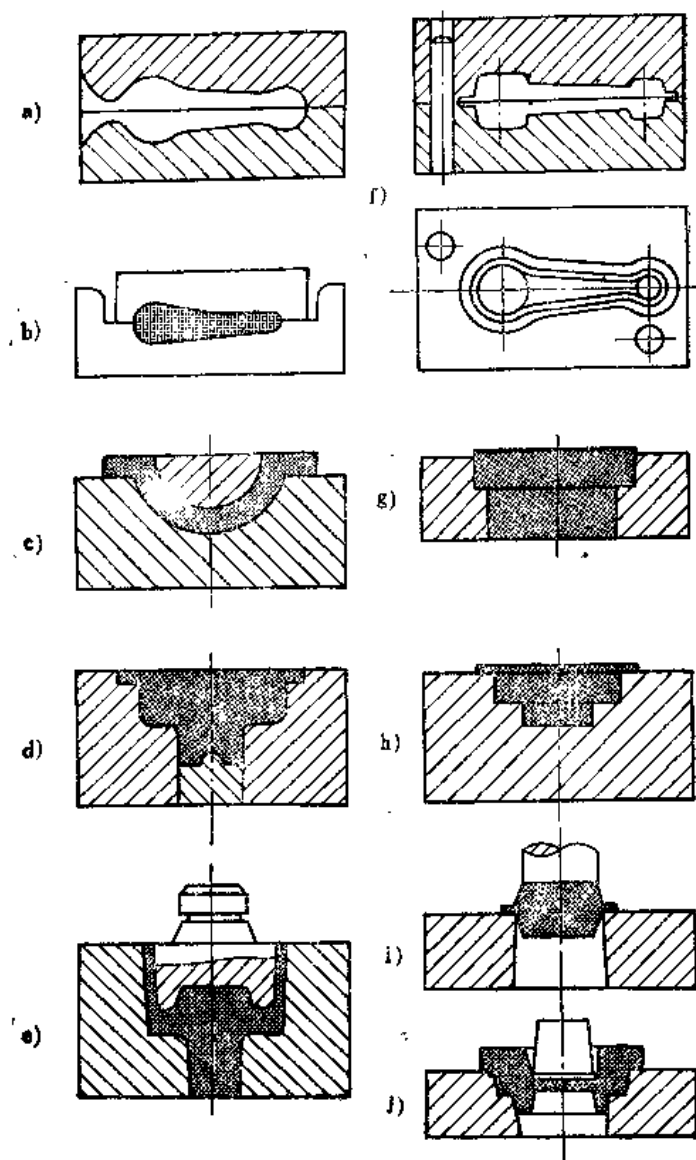


图8-121 胎模类型

a) 棒模 b) 扣模 c) 弯曲模 d) 套模 e) 闭式套模 f) 合模 g) 垫模 h) 跳模 i) 切边模 j) 冲孔模

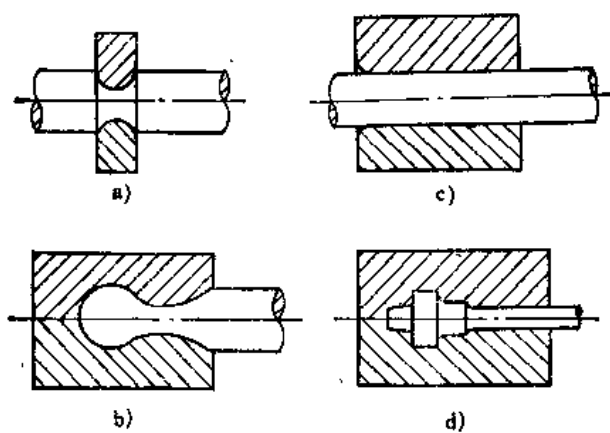
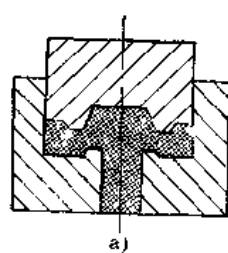


图8-122 棒模

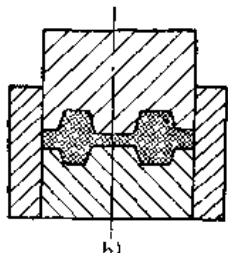
a) 卡棒 b) 型棒 c) 光棒 d) 校正棒



图8-123 单扇扣模



a)



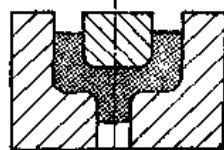
b)

图8-124 弯曲模结构

a)制坯弯曲 b)成形弯曲



a)



b)

图8-125 套模结构

a)无垫套模 b)带垫套模

图8-127示出了固定胎模的结构和安装情况，上下模块用燕尾和楔铁紧固在普通钢材制造的模座上，而模座也用同样方法紧固在锤头和砧座上。为了避免错移，采用了导锁。

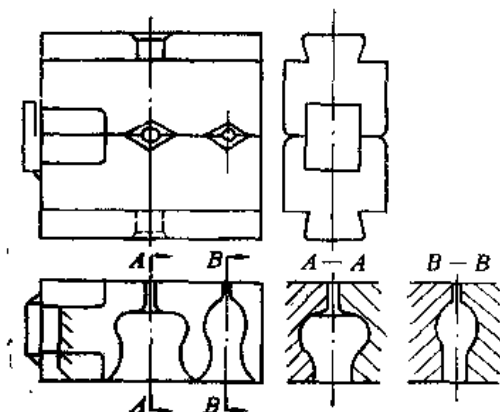
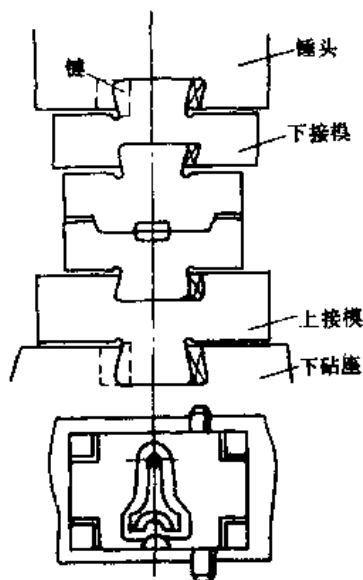
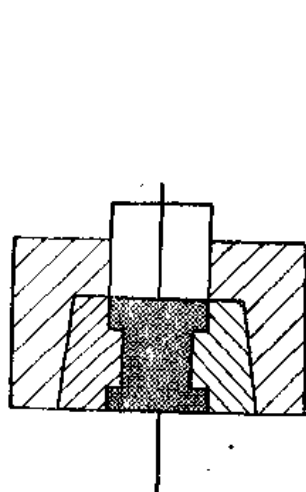


图8-126 拼分套模

图8-127 固定胎模

图8-128 制坯模

图8-128为固定式制坯胎模，靠键块与楔铁固定，可以进行拔长、滚挤。

制坯与终锻可在一套胎模上完成。如果由于工步多而安排有困难时，可用两台自由锻锤联合生产。

固定胎模中的模膛安排，参考锤上锻模的设计原则。

为了防止自由锻锤活塞碰撞工作缸的下法兰盘，应注意自由锻锤安模空间尺寸，使上下模块高度适当，并满足锻模翻修的需要。

对于空气锤，为了保证上模块能缩进气缸内，模座对角线尺寸至少应比锤杆直径小10~20mm，如图8-129所示。

图8-130示出了拖拉机后桥轴的固定模结构，具有独创性。该锻件用 $\phi 80\text{mm} \times 685\text{mm}$ 的坯料加热后直立放入模内，在3t自由锻锤上锤击三次成形。在模具底部装有顶出撬杆，可将锻件顶出。

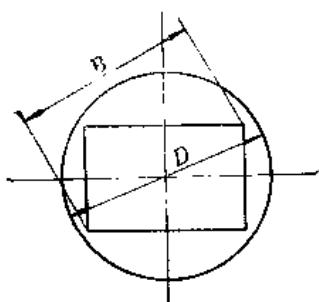
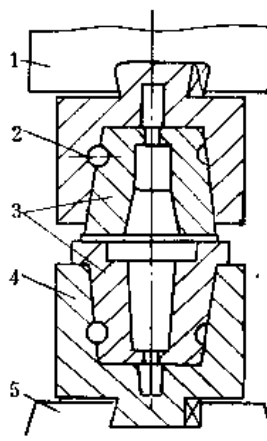


图8-129 模座尺寸与锤杆直径的关系

图8-130 拖拉机后桥轴的固定胎模
1—锤头 2—定位销 3—镶块 4—模本体 5—下砧座

第六节 锻模材料

锻模是用来使热金属坯料进行塑性变形而得到锻件的工具。工作时，其单位面积上承受很大的压力，锤锻模还要承受很大的冲击力（高达2000MPa）；由于变形金属的剧烈流动，模膛极易磨损，模具工作温度高达400~500℃（有时甚至高达600℃）；而且需在连续反复地加热冷却的条件下工作，使模膛表面容易产生热疲劳破坏。因此，热锻模具材料应具备下列性能：

- 1) 在高温下具有较高的强度、硬度和冲击韧性；
- 2) 较好的耐热疲劳性；
- 3) 良好的回火稳定性；
- 4) 淬透性能好；
- 5) 良好的导热性和抗氧化性；
- 6) 良好的加工工艺性能。

本节主要介绍模锻锤、摩擦压力机、热模锻压力机、平锻机及液压机等锻压设备的锻模材料的选用。

一、锤锻模用材料

锤锻模钢的含碳量一般在0.45%~0.60%之间，具有较高的冲击韧性和耐热疲劳性。

5CrNiMo钢是锤锻模制造中应用最多的材料，具有很高的淬透性和良好的综合力学性能，适合制造大型锻模（最小边长大于400mm）。

5CrMnMo钢在锤锻模制造中也经常应用，它不含镍，符合我国的资源情况。以锰代镍并不降低钢的强度，但使钢的韧性稍有降低。5CrNiMo钢具有良好的强度、耐磨性和韧性，有良好的淬透性。适合制造中型锻模（最小边长小于300~400mm）。

生产试验证明，5CrMnSiMoV钢可作为5CrNiMo钢的代用材料。它具有良好的淬透性、抗热疲劳性和高温强度，韧性接近于5CrNiMo钢。

6SiMnV有较好的综合力学性能，适合制造负荷不大的小型锻模（最小边长小于250mm），可以代替5CrMnMo钢。

表8-14所示是锤锻模材料及其热处理硬度,设计时可根据具体情况进行选用。

表8-14 锤锻模材料及其硬度

锻模种类	锻模或零件名称	锻 模 材 料		锻 模 硬 度			
		主 要 材 料	代 用 材 料	模 膛 表 面		燕 尾 部 分	
				HBS	HRC	HBS	HRC
锻 钢 锻 模	小 锻 模 (<1t 锤用)	5CrNiMo	5CrMnMo	327~444①	42~47①	321~364	35~39
	中小锻模(1~2t 锤用)			364~415②	39~44②		
	中型锻模(3~5t 锤用)			364~415①	39~44①	302~340	32~37
	大型锻模(>5t 锤用)			340~387②	37~42②		
	校 正 模	5CrMnSiMoV	5Cr2NiMoVSi③	321~364	35~39	286~321	30~35
				302~340	32~37	269~321	28~35
				390~460	42~47	302~340	32~37

① 用于模膛浅而形状简单的锻模。

② 用于模膛深、形状复杂的锻模。

③ 模块截面<300mm×300mm时HBS: 375~429。

模块截面>300mm×300mm时HBS: 350~388。

二、摩擦压力机锻模用材料

摩擦压力机同模锻锤一样是靠冲击力使金属变形,锻模材料也和模锻锤相近,即凸模、凹模镶块及整体凸凹模均可用5CrNiMo、5CrMnMo钢制作。实际上摩擦压力机锻模的工作条件比锤锻模好(大多是单模膛锻造;冲击力也比模锻锤小),故摩擦压力机锻模还可用4Cr5W2VSi和3Cr2W8钢制作。它们都有较好的抗氧化性和抗疲劳性,也有较好的淬透性,但是,在韧性及抗急冷急热性能上后者不如前者。

表8-15是摩擦压力机常用锻模材料及其热处理硬度。

表8-15 摩擦压力机锻模材料及其硬度

锻模零件名称	锻 模 材 料		硬 度 HBS
	主 要 材 料	代 用 材 料	
凸 模 镶 块	4Cr5W2VSi 3Cr2W8	5CrNiMo 5CrMnMo	390~490
凹 模 镶 块	3Cr2W8	5CrNiMo 5CrMnMo	390~440
凸 凹 模 模 体	45Cr	45	349~390
整 体 凸、凹 模	5CrMnMo	8Cr3	369~422

三、热模锻压力机锻模用材料

热模锻压力机是靠静压力使金属变形,模具的工作条件较好,对模具材料在韧性上的要求可比锤锻模稍低。所以,热模锻压力机锻模除了用5CrNiMo、5CrMnMo钢制作外,还可以用3Cr2W8V钢来制作。

近年来采用H13[⊖](美国牌号)钢制造压力机锻模的越来越多,实践证明,H13钢的综合性能很好。

⊖ 成分为C0.35%, Si1.0%, Mn0.3%, Cr5.0%, Mo1.5%, V0.9%。

以上是制造模膛镶块的常用材料，关于其它模具材料及其热处理硬度见表8-16。

表8-16 热锻压力机用锻模材料及其硬度

模具零件名称	锻 模 材 料		硬 度 d_B (mm)	HBS
	主 要 材 料	代 用 材 料		
模锻型槽镶块	5CrNiMo	5CrMnMo 4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1 4Cr5W2VSi 5Cr2NiMoVSi①	2.9~3.1	441~388
制坯型槽镶块	5CrMnMo	45	3.0~3.2	415~363
下 顶 杆	3Cr2W8	4Cr2W8	48~52HRC	
上 顶 杆	3Cr2W8	4Cr2W8	48~52HRC	

① 模块或镶块截面<300mm×300mm时，HBS：429~450；
模块或镶块截面>300mm×300mm时，HBS：400~420；
该钢种为新型热锻模材料，尚未纳标，但使用效果好，比用5CrMnMo钢的汽车前梁等锻模寿命提高0.5~2倍。

四、平锻机锻模用材料

平锻机锻模材料应用最多的是8Cr3，详细情况见表8-17。

表8-17 平锻机用锻模材料及其硬度

模具零件名称	锻 模 材 料		硬 度 d_B (mm) (HBS)	模具零件名称	锻 模 材 料		硬 度 d_B (mm) (HBS)
	主要材料	代用材料			主要材料	代用材料	
5000kN以下 平锻机整体凹模	8Cr3	5CrNiMo	2.9~3.1 (444~388)	小型积聚凸模	8Cr3	5CrNiMo	3.0~3.2 (415~363)
8000kN以上 平锻机整体凹模	8Cr3	5CrNiMo	3.0~3.2 (415~363)	大型成形凸模	8Cr3	5CrNiMo	3.1~3.3 (388~341)
带镶块的凹模体	8Cr3	5CrNiMo	3.2~3.4 (363~321)	小型成形凸模	8Cr3	5CrNiMo	3.0~3.2 (415~363)
夹紧凹模镶块	3Cr2W8V	8Cr3	2.9~3.1 (444~388)	整体冲孔凸模	8Cr3	5CrNiMo	3.0~3.2 (415~363)
卡压凹模镶块	3Cr2W8V	8Cr3	2.9~3.1 (444~388)	冲头镶块	3Cr2W8V	8Cr3	2.9~3.1 (444~388)
成形凹模镶块	3Cr2W8V	8Cr3	2.9~3.1 (444~388)	穿孔凸模	8Cr3	5CrNiMo	2.9~3.1 (444~388)
穿孔凹模镶块	3Cr2W8V	8Cr3	2.9~3.1 (444~388)	热切边凸模	8Cr3	5CrNiMo	3.0~3.2 (415~363)
切断凹模镶块	8Cr3	5CrNiMo	2.9~3.1 (444~388)	冷切边凸模	8Cr3	5CrNiMo	2.9~3.1 (444~388)
热切边凹模镶块	8Cr3	5CrNiMo	2.9~3.1 (444~388)	凸模模座	8Cr3	5CrNiMo	3.0~3.2 (415~363)
冷切边凹模镶块	3Cr2W8V	8Cr3	2.8~3.0 (477~415)	凸模夹座	8Cr3	5CrNiMo	3.0~3.2 (415~363)
大型积聚凸模	8Cr3	5CrNiMo	3.1~3.3 (388~341)				

五、液压机锻模用材料

基体钢是制造液压机锻模的主要材料。它是近几年来发展起来的新型模具材料，其成分

$$S = \frac{G_d}{G_b} = \frac{1400}{24 \times 10 \times 4 \times 7.85} = 0.19, \text{ 为 3 级复杂系数 } S_3。$$

由〔73〕查得：高度公差为 $\begin{matrix} +1.4\text{mm} \\ -0.6\text{mm} \end{matrix}$

长度公差为 $\begin{matrix} +1.0\text{mm} \\ -0.8\text{mm} \end{matrix}$

宽度公差为 $\begin{matrix} +1.5\text{mm} \\ -0.7\text{mm} \end{matrix}$

该零件需磨削加工，即加工精度为 F_2 ，由〔73〕查得高度及水平尺寸的单边余量均为 $1.7 \sim 2.2\text{mm}$ ，取 2mm 。

在大量生产条件下，连杆锻件在机械加工时用大小头端面定位，要求大小头端面在同一平面上的精度较高， 100mm 内为 0.6mm ，而模锻后的高度公差值较大，不满足上述要求，故锻件在热处理、清理后要增加一道平面冷精压工序。锻件精压后，机械加工余量可大大减小，取 0.75mm ，冷精压后的锻件高度公差取 0.2mm 。

连杆冷精压后，大小头高度尺寸为 $(38 + 2 \times 0.75)\text{mm} = 39.5\text{mm}$ ，单边精压余量取 0.4mm ，同时模锻后大小头头部的高度尺寸为 $(39.5 + 2 \times 0.4)\text{mm} = 40.3\text{mm}$ 。

由于精压需要余量，如锻件高度公差为负值时 (-0.6)，则实际单边精压余量仅 0.1mm ，为了保证适当的精压余量，锻件高度公差可调整为 $\begin{matrix} +0.4 \\ -0.4 \end{matrix}$ 。

由于精压后，锻件水平尺寸稍有增大，故水平方向的余量可适当减小。

(3) 模锻斜度 零件图上的技术条件中已给出模锻斜度为 7° 。

(4) 圆角半径 锻件高度余量为 $(0.75 + 0.4)\text{mm} = 1.15\text{mm}$ ，则需倒角的叉内圆角半径为 $(1.15 + 2)\text{mm} = 3.15\text{mm}$ ，取 3mm ，其余部分的圆角半径均取 1.5mm 。

(5) 技术条件：

- 1) 图上未标注的模锻斜度 7° ；
- 2) 图上未标注的圆角半径 1.5mm ；
- 3) 允许的错差量 0.6mm ；
- 4) 允许的残留飞边量 0.7mm ；
- 5) 允许的表面缺陷深度 0.5mm ；
- 6) 锻件热处理：调质；
- 7) 锻件表面清理：为了便于检查淬火裂纹，系用酸洗。

根据公差和余量，即可绘制锻件图，见图8-132。

二、计算锻件的主要参数

- 1) 锻件在水平面上的投影面积为 8000mm^2 ；
- 2) 锻件周边长度为 680mm ；
- 3) 锻件体积为 184000mm^3 ；
- 4) 锻件重量为 1.44kg 。

三、锻锤吨位的确定

总变形面积为锻件在水平面上的投影面积与飞边水平投影面积之和，参考表8-1，按 $1 \sim 2t$ 锤飞边槽尺寸考虑，假定飞边平均宽度为 23mm 。总的变形面积 $S = (8000 + 680 \times 23)\text{mm}^2 = 23640\text{mm}^2$ 。按双作用模锻锤吨位确定的经验公式

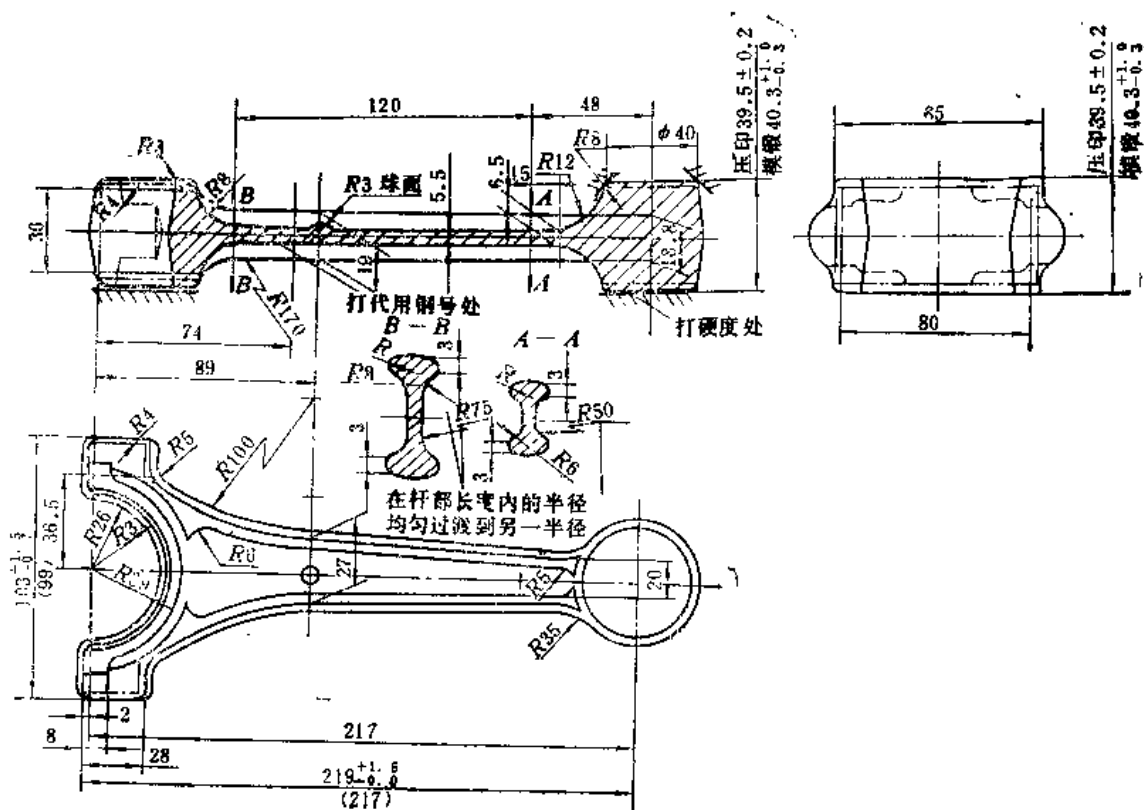


图8-132 连杆锻件图

$$M = 6.3KS = 6.3 \times 1 \times 235.4 \text{ kg} \approx 1500 \text{ kg}$$

选用1.5t模锻锤。

四、确定飞边槽的型式和尺寸

选用图8-6I型飞边槽，其尺寸按表8-1确定。选定飞边槽的尺寸为： $h_{\text{飞}} = 1.6 \text{ mm}$ ， $h_1 = 4 \text{ mm}$ ， $b = 8 \text{ mm}$ ， $b_1 = 25 \text{ mm}$ ， $R = 2 \text{ mm}$ ， $S_{\text{飞}} = 126 \text{ mm}^2$ 。

因锻件杆部断面积较小，考虑到拔长难以达到最小断面积，需增大飞边槽仓部宽度 b_1 ；大头部分叉口较宽分料困难，流入飞边槽的金属较少，则该处 b_1 减小到12mm。使模膛安排紧凑，且增加了承击面积。

$$\text{飞边体积 } V_{\text{飞}} = 680 \times 0.7 \times 126 \text{ mm}^3 = 60000 \text{ mm}^3$$

五、终锻模膛设计

终锻模膛是按照热锻件图来制造和检验的，热锻件图是在冷锻件图的基础上考虑1.5%冷缩率绘制而成。根据生产中的经验总结，考虑到锻模使用后承击面下陷，模膛深度减小及精压时的变形不均、横向尺寸增大等因素，修改了几处尺寸：辐板处增厚0.5mm；连杆小头高度40.3mm处，理论上应为40.9mm，实际取为41.6mm；大头上下平面做成斜面，将高度尺寸41.6mm上下各增加0.7mm；小头 $\phi 40 \text{ mm}$ 应为 $\phi 40.6 \text{ mm}$ ，面实际仍为 $\phi 40 \text{ mm}$ 等。绘制的热锻件图见图8-133。

六、预锻模膛设计

由于锻件形状复杂，需设置预锻模膛。

在叉部采用劈料台（见图8-134）

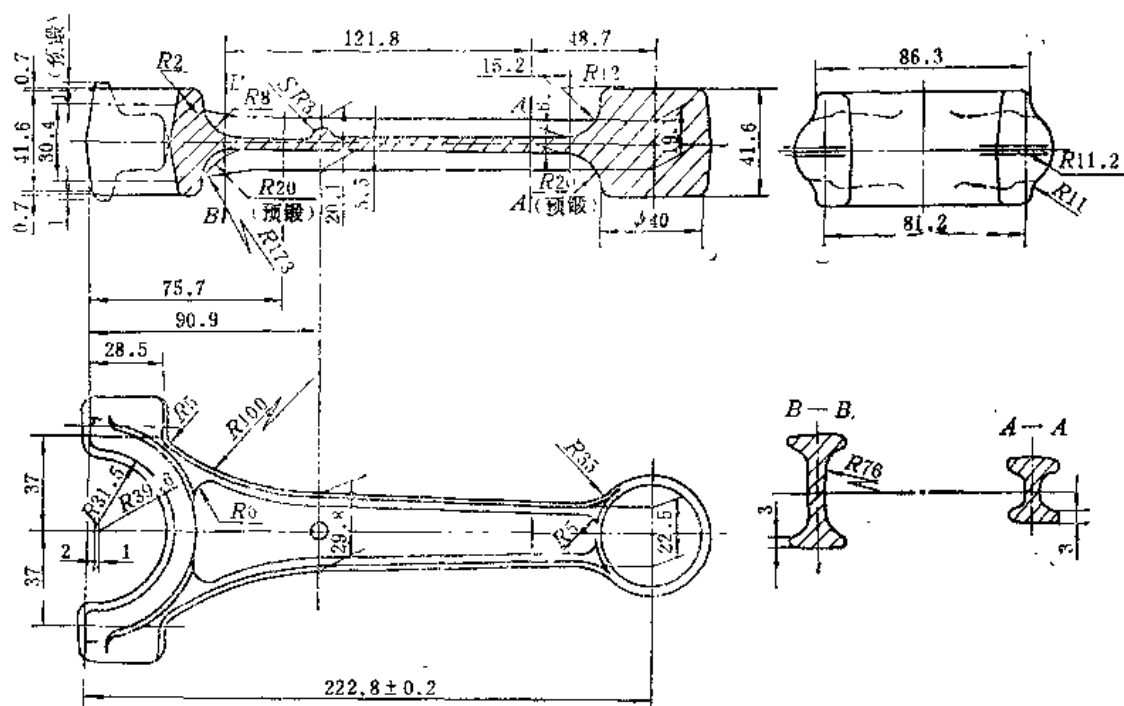


图8-133 连杆热锻件图

$$B_1 = 0.25B = 0.25 \times 31.5 \times 2 \text{ mm} \approx 16 \text{ mm}$$

$$h = (0.4 \sim 0.7)H = 0.5 \times 42 \text{ mm} = 21 \text{ mm}$$

实际取 $h = 20 \text{ mm}$

$$R = 25 \text{ mm}$$

劈料台的形状、尺寸详见图8-134中的B-B, C-C, A-A剖面。

在工字形断面杆部, 辐板较薄而宽, 为防止终锻时产生折纹, 应使预锻模膛面积稍小于或等于终锻模膛相应处的断面积 (不计预锻打不靠的断面积)。如图8-134F-F剖面所示, 辐板和肋转角处外圆角半径由 $R8 \text{ mm}$ 增大到 $R10 \text{ mm}$, 模膛高度减小为 16 mm , 均由作图确定, 使 $S_{\text{预}} \leq S_{\text{终}}$ 。

预锻模膛沿分模面处的圆角半径增大为 $R5 \text{ mm}$ 。此外, 预锻模膛与终锻模膛不同的地方均在热锻件图上注明 (见图8-133)。

七、绘制计算毛坯图

根据连杆的形状特点, 共选取13个截面, 分别计算 $S_{\text{锻}}$ 、 $S_{\text{计}}$ 、 $a_{\text{计}}$, 计算结果列于表8-18, 并在坐标纸上绘出连杆的截面图和计算毛坯图, 见图8-135。为了设计滚压模膛方便, 计算毛坯图按锻件热尺寸计算。

截面图所围面积即为计算毛坯体积, 得 $V'_{\text{计}} = 20 \times 12512 \text{ mm}^3 = 250240 \text{ mm}^3$ 。

$$\text{平均截面面积 } S_{\text{均}} = \frac{250240}{248} \text{ mm}^2 = 1009 \text{ mm}^2$$

$$\text{平均截面边长 } a_{\text{均}} = \sqrt{S_{\text{均}}} = 31.8 \text{ mm}。$$

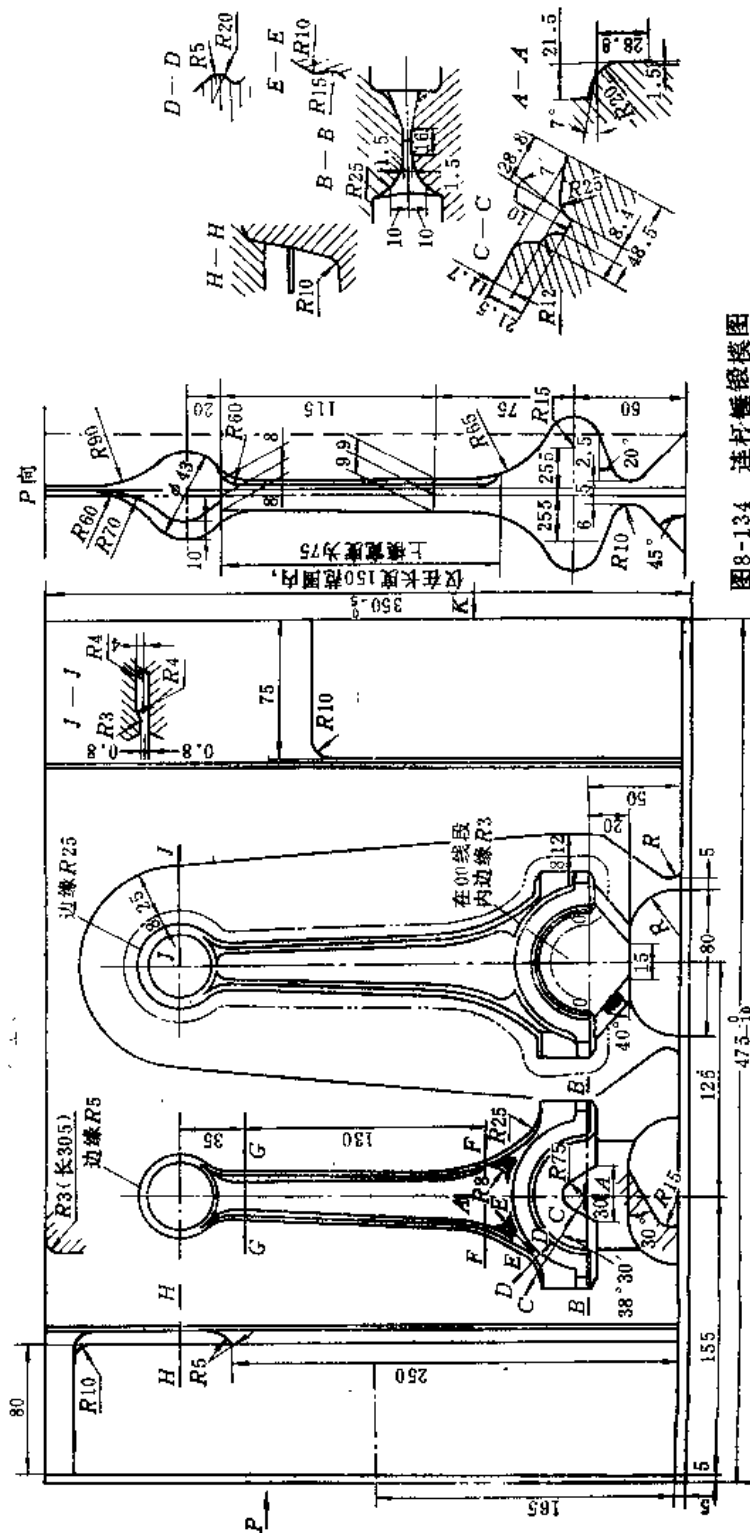
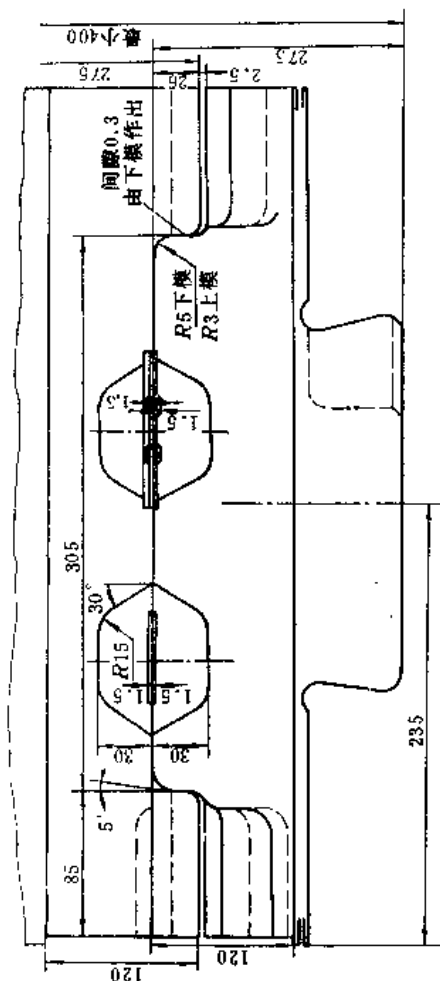
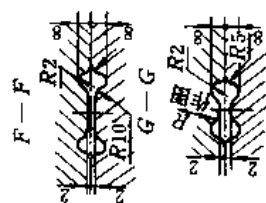
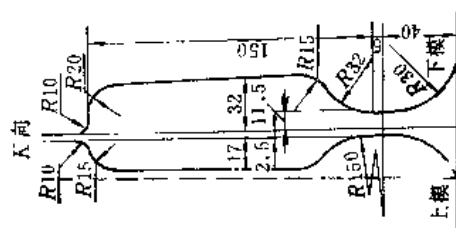


图8-134 连杆锻模图

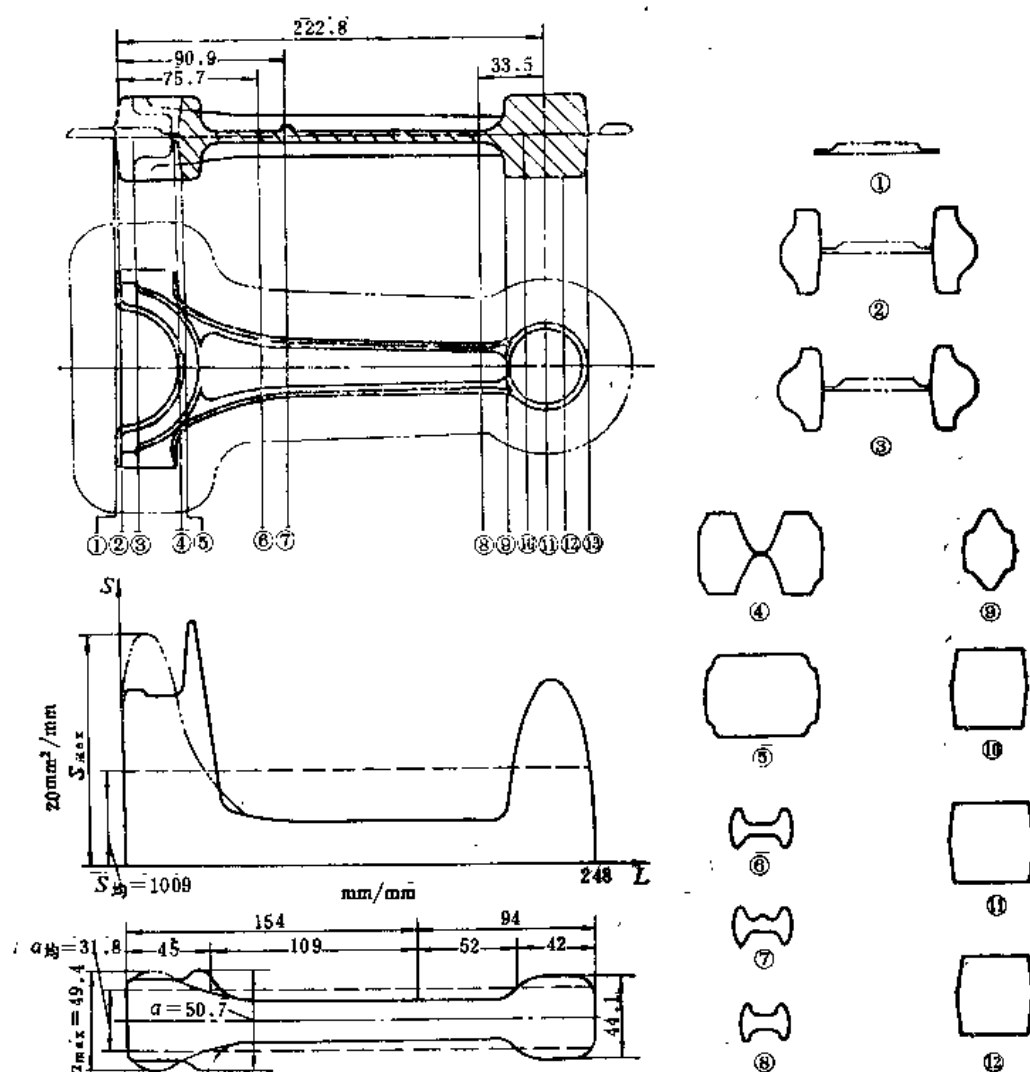


图8-135 连杆的截面图和计算毛坯图

表8-18 计算毛坯的计算数据

断面号	$S_{锻}$ (mm ²)	$1.4S_{-k}$ (mm ²)	$S_{计} = S_{锻} + 1.4S_{-k}$ (mm ²)	$a_{计} = \sqrt{S_{计}}$ (mm)	修正 $S_{计}$ (mm ²)	修正 $a_{计}$ (mm)	K	$h = K a_{计}$ (mm)
1	246	252	498	22.3	—	—	1.1	24.5
2	1658	176	1834	42.8	2000	44.7	1.1	49.2
3	1612	176	1788	42.3	2440	49.4	1.2	59.3
4	1888	176	2064	45.4	1480	38.5	1.1	42.4
5	2392	176	2568	50.7	1300	36.1	1.1	39.7
6	308	176	484	22	—	—	0.8	17.6
7	300	176	476	21.8	—	—	0.8	17.4
8	268	176	444	21.1	—	—	0.8	16.9
9	776	176	952	30.9	—	—	0.9	27.8
10	1600	176	1776	42.1	—	—	1	42.1
11	1764	176	1940	44.1	—	—	1	44.1
12	1600	176	1776	42.1	—	—	1	42.1
13	0	252	252	15.9	—	—	0.9	14.3

按体积相等修正截面图和计算毛坯图（见图8-135中双点划线部分）。修正后最大截面积为 2440mm^2 ，则最大截面边长为 $a_{\max} = 49.4\text{mm}$ 。

八、制坯工步选择

计算毛坯为二头一杆，应简化成二个简单计算毛坯来选择制坯工步。

$$\alpha_1 = \frac{a_{\max}}{a_{\text{均}}} = \frac{49.4}{31.8} = 1.53$$

$$\beta_1 = \frac{L_1}{a_{\text{均}}} = \frac{154}{31.8} = 4.8$$

$$G_{\text{坯}} > 1\text{kg}$$

由图7-42可知，此锻件应采用拔长—滚压制坯工步。为易于充满，应选用方坯料，先拔长，再开式滚压，模锻工艺方案为：拔长—开式滚压—预锻—终锻。

九、确定坯料尺寸

由截面图和计算毛坯图， $a_{\min} = 21.8\text{mm}$ ， $V_{\text{杆}} = 80305\text{mm}^3$ ， $L_{\text{杆}} = 109\text{mm}$ ，故可决定拐点处尺寸：

$$a_{\text{拐}} = \left(\sqrt{3.82 \times \frac{80305}{109}} - 0.75 \times 21.8 - 0.5 \times 21.8 \right) \text{mm} = 42.0\text{mm}$$

故杆部锥度为：

$$K = \frac{a_{\text{拐}} - a_{\min}}{L_{\text{杆}}} = \frac{42.0 - 21.8}{109} = 0.185$$

所需坯料的截面积为

$$S_{\text{坯}} = S_{\text{拔}} - K(S_{\text{拔}} - S_{\text{滚}})$$

$$S_{\text{拔}} = V_{\text{头}}/L_{\text{头}} = \frac{96000}{45} \text{mm}^2 = 2130\text{mm}^2$$

$$S_{\text{滚}} = 1.2S_{\text{均}} = 1.2 \times 1009\text{mm}^2 = 1211\text{mm}^2$$

因此

$$S_{\text{坯}} = (2130 - 0.185(2130 - 1211))\text{mm}^2 = 1960\text{mm}^2$$

$$a_{\text{坯}} = \sqrt{1960}\text{mm} = 44.27\text{mm}$$

实际取 $a_{\text{坯}} = 45\text{mm}$ 。

坯料体积为：

$$V_{\text{坯}} = V_{\text{杆}}(1 + \delta\%) = \frac{250240}{1.015^3}(1 + 3\%)\text{mm}^3 = 250000\text{mm}^3$$

式中 δ ——烧损率。

坯料长度

$$L_{\text{坯}} = \frac{V_{\text{坯}}}{a_{\text{坯}}^2} = \frac{250000}{45^2} \text{mm} = 123\text{mm}$$

根据坯料的重量和长度，宜采用调头模锻，一料两件，料长可取 $123 \times 2\text{mm} = 246\text{mm}$ ，经试锻，根据实际生产情况，下料长度再适当调整。

十、制坯模膛设计

1. 滚压模膛设计

1) 模膛高度 $h = K a_{\text{计}}$, 计算结果列于表8-18, 按各断面的高度值绘出滚压模膛纵剖面外形, 然后用圆弧或直线光滑连接并进行适当简化。

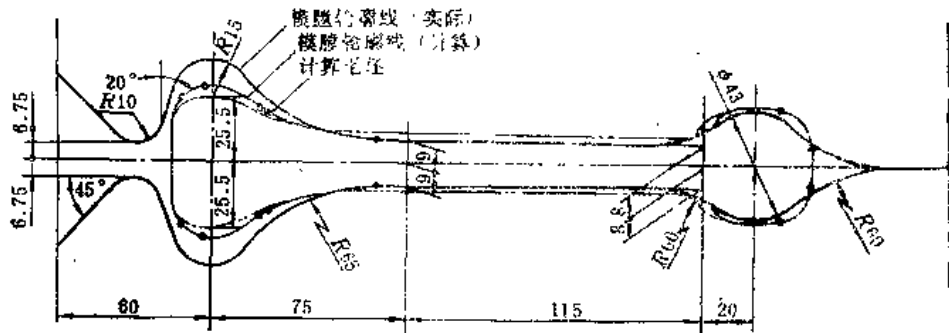


图8-136 开式滚压模膛

2) 模膛宽度为:

$$\text{杆部: } B_{\text{杆}} > \frac{S_{\text{杆均}}}{h_{\text{min}}} + 10 \text{ mm} = \left(\frac{464}{16.9} + 10 \right) \text{ mm} \approx 38 \text{ mm}$$

$$\text{头部: } B_{\text{头}} > d_{\text{max}} + 10 \text{ mm} = 1.13 \sqrt{S_{\text{max}}} + 10 \text{ mm} \approx 66 \text{ mm}$$

模膛头部和杆部的宽度取为一致, 根据实际生产情况, 模膛宽度取 $B = 80 \text{ mm}$ 。

3) 模膛长度 L 等于计算毛坯图的长度。

4) 修改个别尺寸: 模膛最大高度由 59.3 mm 改为 81 mm , 以容纳氧化皮; 小头部分作出了一定斜度, 简化后的滚压模膛如图8-136所示。

2. 拔长模膛设计

1) 拔长坎高度

$$h = k_2 \sqrt{V'_{\text{杆}} / L_{\text{杆}}} = 0.9 \times \sqrt{\frac{94800}{161}} \text{ mm} = 21.8 \text{ mm}$$

2) 拔长坎长度

$$c = k_3 d_{\text{坯}} = 1.1 \times 1.13 a_{\text{坯}} = 1.1 \times 1.13 \times 45 \text{ mm} = 56 \text{ mm}$$

3) 圆角半径

$$R = 0.25c = 0.25 \times 56 \text{ mm} = 14 \text{ mm}$$

$$R_1 = 10R = 140 \text{ mm}$$

4) 模膛宽度

$$B = k_4 d_{\text{坯}} + (10 \sim 20) \text{ mm} = (1.35 \times 51 + 10) \text{ mm} = 78.85 \text{ mm}$$

取 $B = 75 \text{ mm}$

5) 模膛深度

$$e = 1.2 d_{\text{小头}} = 1.2 \times 43 \text{ mm} = 51.6 \text{ mm}$$

6) 拔长模膛长度

$$L_{\text{拔}} = 195 \text{ mm}$$

为提高生产率, 可将拔长模膛的 h 减小, R 、 R_1 增大, C 增大。计算数值与实际数值比

较如表8-19所示。

表8-19 连杆锻模拔长模膛尺寸

(mm)

数 值	模膛尺寸	h	c	R	R_1
计 算 数 值		21.8	56	14	140
目前采用数值		14	77	30、32	150

采用图8-137实线所示的拔长模膛，拔长后的毛坯见图8-138a，拔长部分某些截面小于计算毛坯最小截面，但拔长部分长度比计算毛坯相应部分长度小，结果在滚压时靠近大小头的部分金属，除流向头部外，还向杆部流动，滚压后毛坯长度略有增长。滚压后毛坯形状见图8-138b。由此可知，拔长后需滚压时，为减少拔长打击次数，可减小拔长块高度，增大圆角、圆弧半径。拔长后坯料的长度可比相应的计算毛坯长度短一些，以减小滚压端部毛刺。

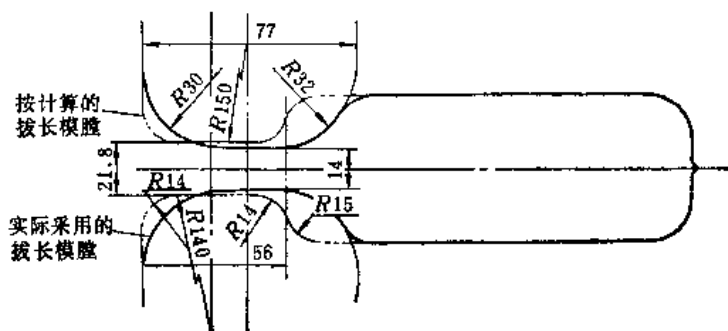


图8-137 拔长模膛

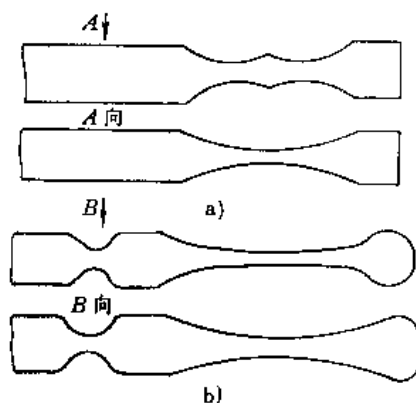


图8-138 拔长、滚压后的坯料形状
a) 拔长后的坯料 b) 滚压后的坯料

十一、锻模结构设计

模锻此连杆的1.5t模锻锤机组，加热炉在锤的右方，故拔长模膛布置在右边，滚压模膛在左边，预锻及终锻工步从左到右（图8-134）。

锻模采用纵向锁扣。为保证左右两边滚压和拔长模膛处上模锁扣强度，将两模膛中心线分别下移5mm和4.5mm。

锻件宽度为 $(81.2 + 2 \times 11.2) \text{ mm} = 103.6 \text{ mm}$ 。模壁厚度为 $t_0 = 1 \times \frac{43}{2} \text{ mm} = 21.5 \text{ mm}$ 。

预锻模膛与终锻模膛的中心距 $= (103.6 + 21.5) \text{ mm} = 125.1 \text{ mm}$ ，取为125mm。

考虑锻模应有足够的承击面，锁扣之间的宽度取305mm，承击面可达52000mm²。

燕尾中心线至检验边的距离为 $(155 + 125 \times \frac{2}{3}) \text{ mm} = 238 \text{ mm}$ ，取为235mm。

用实测方法找出终锻模膛中心离连杆大头前端115mm，结合模块长度及钳口长度定出键槽中心线的位置为165mm。

参考文献[50]、[73]，选择钳口尺寸： $B = 90 \text{ mm}$ ， $h = 40 \text{ mm}$ ， $R_0 = 15 \text{ mm}$ 。因采用调头

模锻, 钳口尺寸应考虑第一件终锻后飞边不影响第二件模锻, 故定为 $B = 80\text{mm}$, $h = 30\text{mm}$ 。
 钳口颈尺寸: $a = 1.5\text{mm}$, $b = 8\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$ 。预锻钳口颈尺寸需考虑两件连接处发生断裂等因素, 将其加大到几乎与整个钳口宽度相等。

模块尺寸选为: $475\text{mm} \times 350\text{mm} \times 275\text{mm}$ (宽 \times 长 \times 高)

1.5t 模锻锤导轨间距为 550mm , 模块与导轨之间的间隙大于 20mm , 满足安装要求。

十二、连杆模锻工艺流程

- 1) 下料: 5000kN 型剪机冷剪切下料。
- 2) 加热: 半连续式炉, $1220 \sim 1240^\circ\text{C}$ 。
- 3) 模锻: 1.5t 模锻锤, 拔长、开式滚压、预锻、终锻。
- 4) 热切边: 1600kN 切边压力机。
- 5) 磨毛刺: 砂轮机。
- 6) 热处理: 连续热处理炉, 调质, 硬度为 $d_B = 3.9 \sim 4.2\text{mm}$ 。
- 7) 酸洗: 酸洗槽。
- 8) 冷校正: 1t 夹板锤。
- 9) 冷精压: 10000kN 精压机。
- 10) 检验。

第九章 模锻的后续工序

普通模锻件均带有飞边，某些带孔锻件还有冲孔连皮，通常采用冲切法去除飞边和冲孔连皮；为了清除锻件表面氧化皮，以便于检验表面缺陷和切削加工，要进行表面清理；锻件在切边、冲孔、热处理和清理过程中若有较大变形，应进行校正；对于精度要求较高的锻件，则应进行精压。以上各工序，均在模锻工序之后进行，称为模锻的后续工序。

本章分别介绍切边、冲孔、校正、精压和表面清理的主要内容。

第一节 切边、冲孔及其模具设计

一、切边和冲孔的基本方式及模具类型

切边和冲孔通常在曲柄压力机上进行。

图9-1为切边和冲孔的示意图。切边模和冲孔模主要由凸模（冲头）和凹模组成。切边时，锻件放在凹模孔口上，在凸模的推压下，锻件的飞边被凹模剪切与锻件分离。由于凸凹模之间存在间隙，因此在剪切过程中伴有弯曲和拉伸的现象。通常切边凸模只起传递压力的作用，而凹模刃口起剪切作用。在特殊情况下，凸模与凹模同时起剪切作用。冲孔时，冲孔凹模起支承锻件的作用，而冲孔凸模起剪切作用。

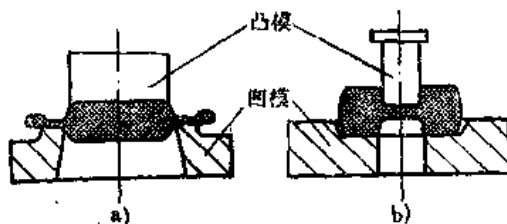


图9-1 切边和冲孔示意图
a)切边 b)冲孔

切边和冲孔分为热切（冲）和冷切（冲）两种方式。热切和热冲一般与模锻工序在同一火次内完成，即模锻结束后立即进行切边和冲孔。冷切和冷冲则是在模锻以后把锻件集中起来在常温下进行。

热切（冲）所需的压力比冷切（冲）小得多，约为后者的20%；同时，在热态下切边和冲孔，锻件具有较好的塑性，不易产生裂纹，但锻件容易变形走样。

冷切（冲）的优点是劳动条件好，生产率高，冲切时锻件走样小，凸凹模的调整和修配比较方便。其缺点是所需设备吨位较大，锻件易产生裂纹。

模锻件的冲切方法，应根据锻件的材料性质、形状尺寸以及工序间的配合等因素加以确定。通常，对于大、中型锻件，高碳钢、高合金钢、镁合金锻件以及切边后还需进行热校正、热弯曲的锻件，应采用热切和热冲。含碳量低于0.45%的碳钢和低合金钢的小型锻件以及非铁合金锻件，可采用冷切和冷冲。

切边、冲孔模分为简单模、连续模和复合模三种类型。简单模用来完成切边或冲孔的单一操作（图9-1）；连续模是在压力机的一次行程内同时进行一个锻件的切边和另一个锻件的冲孔（图9-2）；复合模是在压力机的一次行程中，先后完成同一锻件的切边和冲孔（图9-3）。

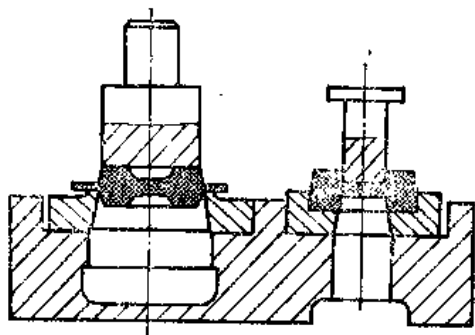


图9-2 切边-冲孔连续模

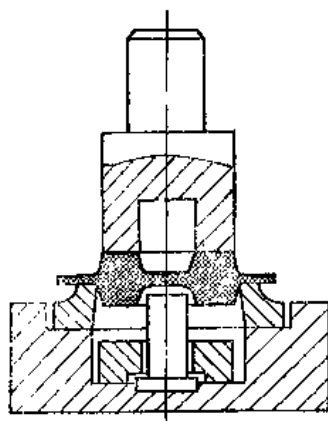


图9-3 切边-冲孔复合模

二、切边模

切边模一般由切边凹模、切边凸模、模座和卸飞边装置等零部件组成。

1. 切边凹模的结构及尺寸

切边凹模有整体式（图9-4）和组合式（图9-5）两种。整体式凹模适用于中小型锻件，特别是形状简单、对称的锻件。组合式凹模由两块以上模块组成，制造比较容易，热处理时不易淬裂，变形小，便于修磨、调整和更换，多用于大型或形状复杂的锻件。图9-5为连杆锻件的组合式切边凹模，由三块组成。其叉形舌部单独一块，杆部为两块。当刃口磨损后，可将各分块接触面磨去一层，修整刃口即可重新使用。

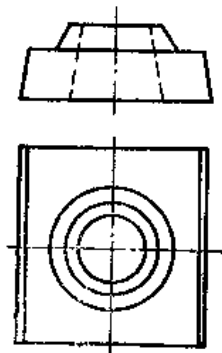


图9-4 整体式凹模

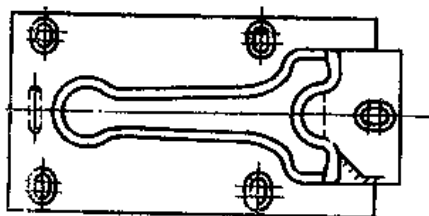


图9-5 组合式凹模

凹模的刃口一般有三种型式，如图9-6所示。图a为直刃口，当刃口磨损后，将顶面磨去一层即可使刃口恢复锋利，并且刃口的轮廓尺寸保持不变。直刃口维修方便，但由于剪切工作带增长，切边力较大，一般用于整体式凹模。图b为斜刃口，该形式切边省力，但易磨损，主要用于组合式凹模。图c为对咬刃口，上、下模有对称的尖锐刃口，切边时飞边在上、下模刃口接触时被对咬切断，主要用于低塑性镁合金锻件及特薄边锻件的切边。

前两种刃口型式，在刃口下部具有 5° 斜度的通孔，称为落料孔，用以保证切边后锻件自由落下。为使锻件平稳地放在凹模孔口之上并减少刃口修复时的磨削工作量，通常将刃口顶面做成凸台形式。凸台宽度 L 应比飞边桥部宽度略小些，凸台高度 h 随飞边桥部高度而定，一般取 $h = 10 \sim 15 \text{ mm}$ 。

切边凹模的刃口用来剪切锻件飞边，应制成锐角。刃口的轮廓线按锻件图上的轮廓线制

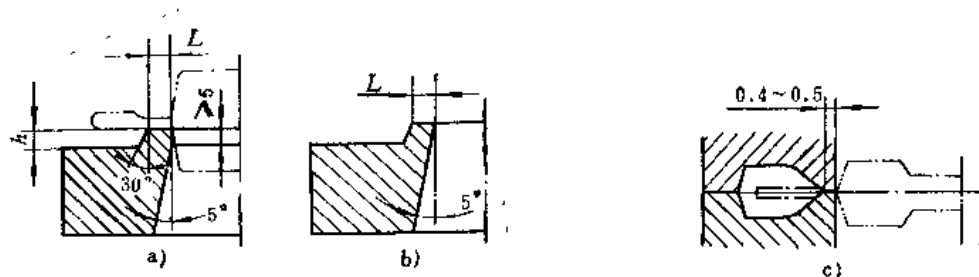


图9-6 凹模刃口型式
a)直刃口 b)斜刃口 c)对咬刃口

造。如为热切，则按热锻件图设计，并用铅件或铸盐件配制；如为冷切，则按冷锻件图配制。如果凹模刃口与锻件配合过紧，则锻件放入凹模困难，切边时锻件上的一部分敷料会连同飞边一起切掉，影响锻件质量；若凹模与锻件间隙过大，则切边后锻件有较大毛刺，增加了打磨毛刺的工作量。

切边凹模多用楔铁或螺钉紧固在凹模底座上。用楔铁紧固方式简单、牢固，一般用于整体凹模或由两块组成的凹模。螺钉紧固方法多用于三块以上的组合凹模，以便于调整凸凹模的间隙（图9-7）。

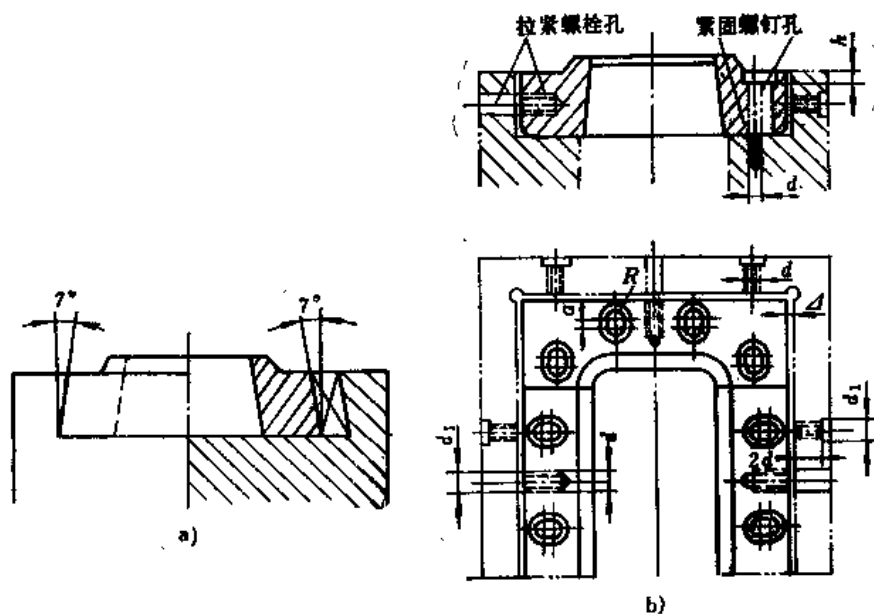


图9-7 凹模紧固方法
a)用楔铁紧固 b)用螺钉紧固

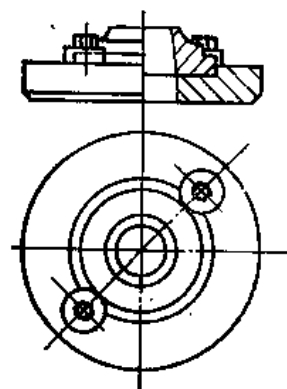


图9-8 用压板紧固的凹模

带导柱导套的切边模，凹模均采用螺钉固定，以调整凸凹模之间的间隙。

轮廓为圆形的小型锻件，也可用压板固定切边凹模（图9-8）。凸模与凹模之间的间隙靠移动模座来调整。

2. 切边凸模设计及固定方法

切边凸模起传递压力的作用，要求与锻件有一定的接触面积（推压面），而且其形状应基本吻合。不均匀的接触或推压面太小，切边时锻件因局部受压会发生弯曲、扭曲和表面压伤等缺陷，影响锻件质量，甚至造成废品。另外，为了避免啃坏锻件的过渡断面，应在该处

留出空隙 Δ (图9-9)。

为了便于凸模加工, 凸模并不需要与锻件接触面所有的表面形状都接触, 可适当简化 (图9-10)。为此, 一般选择锻件形状简单的一面作为切边时的承压面 (图9-11)。

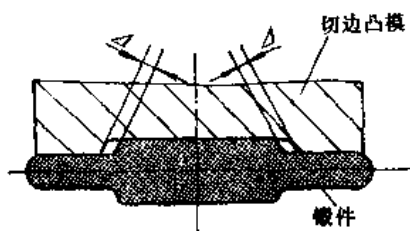


图9-9 切边凸模与锻件间的间隙

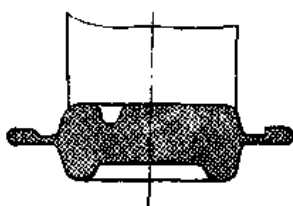


图9-10 简化凸模形状图

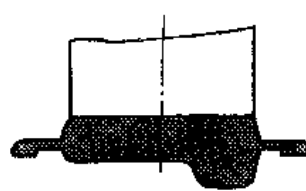


图9-11 锻件承压面的选取

切边时, 凸模一般会进入凹模内, 凸凹模之间应有适当的间隙 δ 。 δ 靠减小凸模轮廓尺寸保证。间隙过大, 不利于凸凹模位置的对准, 易产生偏心切边和不均匀的残余毛刺; 间隙过小, 飞边不易从凸模上取下, 而且凸凹模有互啃的危险。

切边模的性质不同, 间隙 δ 也不同。当凹模起切刃作用时 (图9-12a、b), 间隙 δ 可适当放大; 凸凹模同时起切刃作用时 (图9-12c), 间隙 δ 较小。对于凹模起切刃作用的凸凹模间隙 δ , 根据垂直于分模面的锻件横截面形状及尺寸不同, 按图9-12确定。

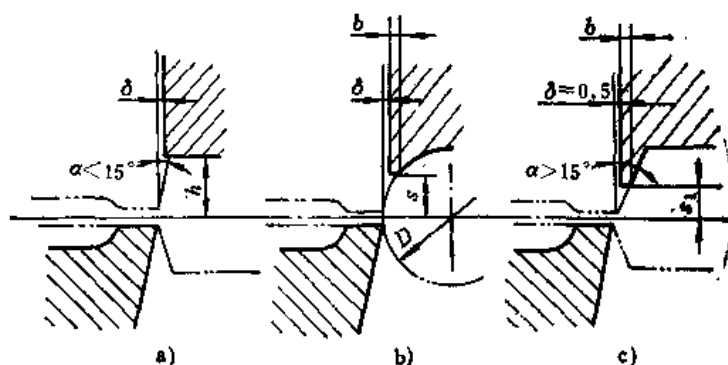


图9-12 切边凸凹模的间隙

当锻件模锻斜度大于 15° 时 (图9-12c), 间隙 δ 不宜太大, 以免切边时造成锻件边缘向上卷起, 并引起较大的残留毛刺。为此, 凸模应按图示形式与锻件配合, 并每边保持0.5mm左右的最小间隙。对于凸凹模同时起切刃作用的凸凹模间隙, 其数值可按下式计算:

$$\delta = Kt$$

式中 δ ——凸凹模单边间隙;

t ——切边厚度;

K ——材料系数, 对于钢、钛合金、硬铝, $K = 0.08 \sim 0.1$, 对于铝、镁、铜合金, $K = 0.04 \sim 0.06$ 。

为了便于模具调整, 沿整个轮廓线间隙应按最小值取成一致。凸模下端不可有锐边, 应从 S 和 S_1 高度处削平 (图9-12b、c)。 S 及 S_1 的大小可用作图法确定, 使凸模下端削平后的宽度 b , 对小型锻件为1.5mm, 中型锻件为2~3mm, 大型锻件为3~5mm。

凸模紧固方法主要有三种：①如图9-13a所示，用楔将凸模燕尾直接紧固在滑块上，前后用中心键定位；②如图9-13b所示，用压力机上的紧固装置，直接将凸模尾柄紧固在滑块上，其特点是夹持方便，适于紧固中小型锻件的切边凸模；③如图9-13c所示，对于大型锻件，可用压板、螺栓将凸模直接紧固在滑块上。此外，中小型锻件的切边凸模也常用键槽和螺钉或楔和燕尾固定在模座上，再将模座固定在压力机的滑块上。

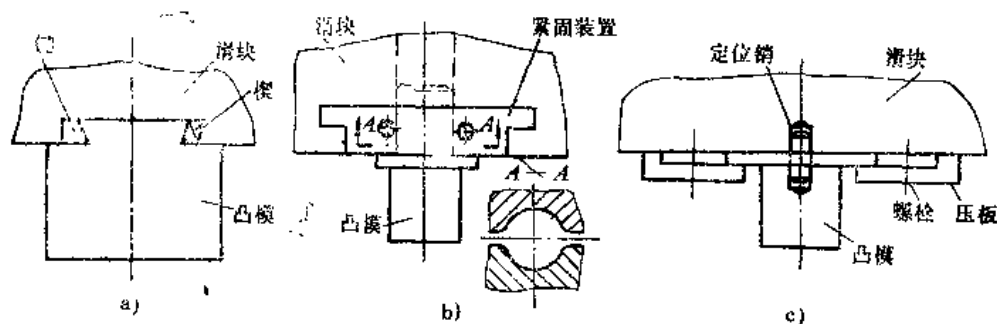


图9-13 凸模直接紧固在滑块上

3. 模具闭合高度

切边刚完时，上下模具的高度称为模具闭合高度 $H_{闭}$ 。它与切边压力机的封闭高度有关，如图9-14所示。切边压力机的封闭高度可以通过压力机连杆上的螺钉进行调整。调节量为 m ，故有最大封闭高度 H_{max} 和最小封闭高度 H_{min} 。 H_{max} 为滑块在下止点、螺杆调到最上位置时，滑块底面至工作台上表面之间的距离。 H_{min} 为滑块在下止点，螺杆调到最下位置时，滑块底面至工作台上表面之间的距离，即 $H_{min} = H_{max} - m$ 。模具闭合高度 $H_{闭}$ 应有一定的调节余地，其值在 H_{max} 与 H_{min} 之间，即：

$$H_{min} - H_{垫} + (15 \sim 20) \text{ mm} \leq H_{闭} \leq H_{max} - H_{垫} - (15 \sim 20) \text{ mm}$$

式中诸符号意义见图9-14。

求出模具闭合高度后，即可确定凸模高度 $H_{凸}$ ，如图9-15所示。其中应考虑切边时的切移量 e ，即凸模从接触锻件时起，到行程终了凸模推压锻件下行的距离。这段距离实际应为 $e + h_f/2$ ， h_f 为飞边桥口高度，其值甚小，可忽略不计，近似将 e 作为切移量。为了切净锻件上的飞边，切移量应大于飞边桥口高度，通常取 $e = (3 \sim 5)h_f$ 。

在图9-15的示例中，上模座高度 $H_{上}$ 、下模座高度 $H_{下}$ 事先已确定，因此凸模高度 $H_{凸}$ 可按以下两种情况计算确定。

当凸模推压面靠近飞边，需要伸入凹模刃口才能将飞边切净时（图9-15a），凸模高度为：

$$H_{凸} = H_{闭} - (H_{上} + H_{凹} + H_{下}) + e$$

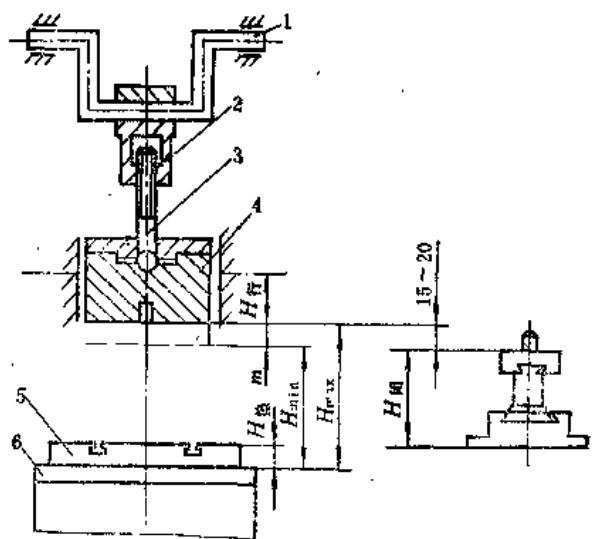


图9-14 压力机封闭高度与模具闭合高度的关系
1—曲轴 2—连杆 3—螺杆 4—滑块 5—垫板 6—工作台

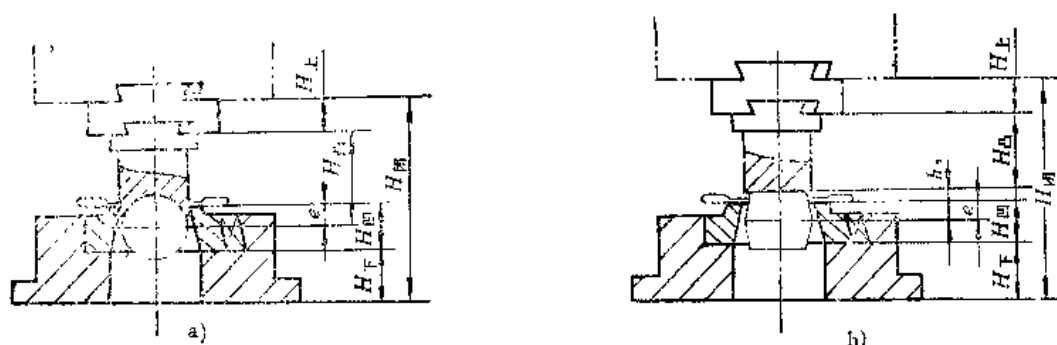


图9-15 凸模高度的计算

a) 凸模伸入凹模 b) 凸模不伸入凹模

当推压面远离飞边 (图9-15b), 即 h_n (推压面至锻件分模线距离) 大于飞边桥口高度的6~8倍时, 凸模不需要伸入凹模刃口便可将飞边切净, 则凸模高度为:

$$H_{凸} = H_{凹} - (H_{上} + H_{凹} + H_{下} + h_n) + e$$

4. 卸飞边装置

当凸凹模之间的间隙较小, 切边时又需凸模进入凹模时, 切边后飞边常常卡在凸模上不易卸除。所以当冷切边间隙 δ 小于0.5mm、热切边间隙 δ 小于1mm时, 在切边模上应设置卸飞边装置。

卸飞边装置有刚性的 (图9-16a、b) 和弹性的 (图9-16c) 两种。图9-16a是常用的一种结构, 适用于中小型锻件的冷、热切边。图9-16b是爪形卸飞边装置, 适用于大中型锻件的冷、热切边。对于高度尺寸较大的锻件, 为防止模具闭合后凸模肩部碰到卸料板, 可用图9-16c所示的卸飞边装置。

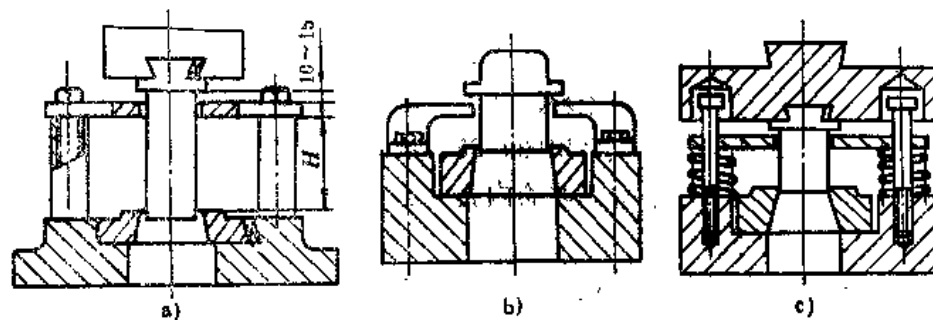


图9-16 卸飞边装置

三、冲孔模和切边冲孔复合模

1. 冲孔模

单独冲除锻件孔内连皮时, 可将锻件放在凹模内, 靠冲孔凸模端面的刃口将连皮冲掉, 如图9-17是冲孔模的结构简图。凸模刃口部分的尺寸按锻件孔形尺寸确定。凸凹模之间的间隙靠扩大凹模孔尺寸保证。

冲孔凹模起支承锻件的作用。凹模内凹穴对锻件进行定位, 其垂直方向的尺寸按锻件上

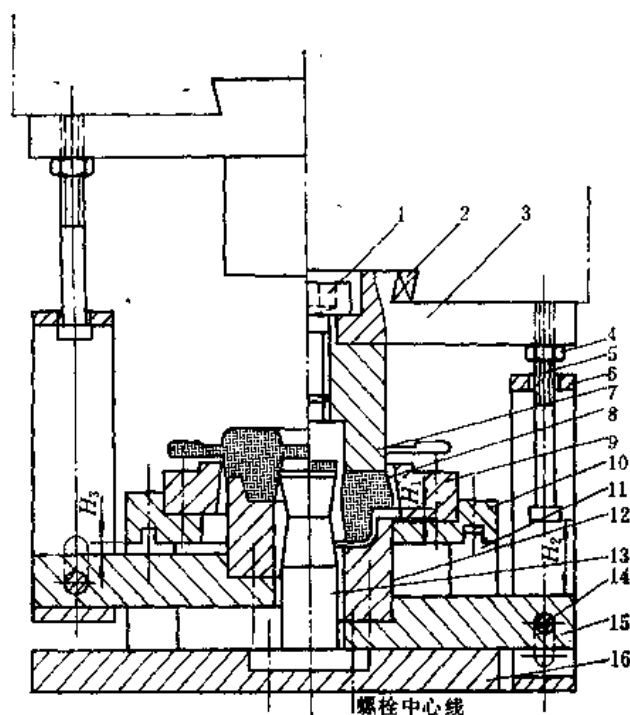


图9-19 切边冲孔复合模

1—螺栓 2—楔 3—上模板 4—螺母 5—拉杆 6—托架
7—凸模 8—锻件 9—凹模 10—垫板 11—支撑板 12—
顶件器 13—冲头 14—螺栓 15—横梁 16—下模板

整理上式可得

$$F = 0.8\lambda\sigma_s L(2.5t + B)$$

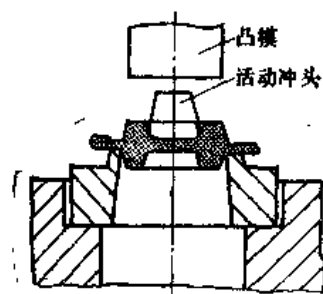


图9-20 简易切边冲孔复合模

第二节 精压和校正的应用及模具设计

一、精压

精压是提高锻件精度和降低表面粗糙度的一种工艺方法。其特点如下：

- 1) 一般模锻件所能达到的合理尺寸精度，其公差范围为 $\pm 0.5\text{mm}$ 。通过精压，可提高锻件的尺寸精度并降低表面粗糙度。尺寸公差可达到 $\pm 0.25\text{mm}$ 。
- 2) 精压可全部或部分代替零件的机械加工，因而可节省机械加工工时，提高劳动生产率；还可以节约原材料，降低成本。
- 3) 由于精压使锻件表层变形而产生硬化，可提高零件的表面强度和耐腐蚀性能。

1. 精压的分类及变形特点

根据金属的流动情况，可将精压分为平面精压和体积精压两大类。

(1) 平面精压 如图9-21所示，在两精压平板之间，对锻件上一对或数对平行平面加压，使变形部分尺寸精度提高、表面粗糙度降低的工序，称为平面精压。实质上，平面精压是平板间的自由锻粗。

(2) 体积精压 将锻件放入尺寸精度高、表面粗糙度小的模膛内（尺寸公差在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下，表面粗糙度 $R_a < 0.2\mu\text{m}$ ）进行锻压，使其整个表面都受到压挤产生少量变形，这一过程称为体积精压。经体积精压后，锻件的全部尺寸都得到提高，同时可提高锻件的重量精

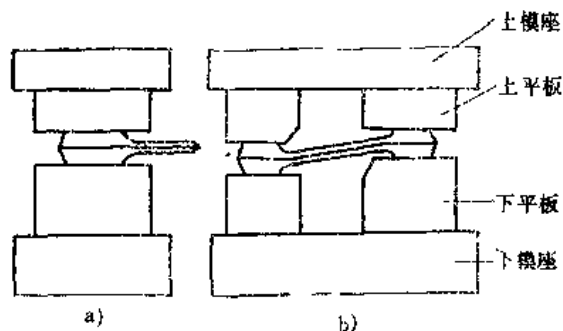


图9-21 平面精压

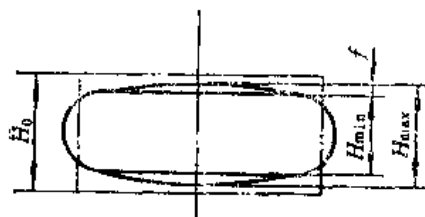


图9-22 平面精压时工件的变形

度。由于体积精压的变形抗力较大，模具寿命成为突出的问题，并需要较大吨位的设备，因而一般只适用于小型锻件，特别是有色金属锻件。

平面精压后，精压件中心有凸起现象（图9-22）。凸起值可达0.3~0.5mm，对精压件尺寸精度影响很大。产生凸起的主要原因是压板的局部弹性变形，这与压板上正应力分布不均匀有直接关系（图9-23）。为此可采取加强精压时的润滑以及提高压板刚度等措施。中间有孔的精压件，精压时接触面上应力分布较均匀，因而精压后平面的凸起较小。另外，为了减小精压平面上的凸起，可在冷精压之前先热精压一次。

2. 精压压力的确定

精压时所需压力主要与材料种类、精压温度和受力状态等有关，其值可按下式计算：

$$F = 10pA \quad (9-6)$$

式中 F ——精压力（kN）；

p ——平均单位压力（MPa），按表9-1确定；

A ——锻件精压时的投影面积（cm²）。

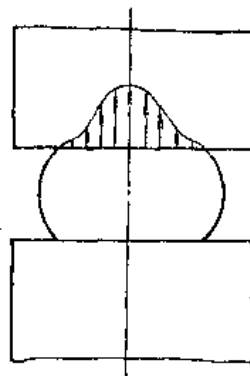


图9-23 精压面上的压应力分布

表9-1 不同材料精压时的平均单位压力

材 料	单位压力(MPa)	
	平面精压	体积精压
LY11、LD5及类似铝合金	1000~1200	1400~1700
10、15CrA、13Ni2A及类似钢	1300~1600	1800~2200
25、12CrNi3A、12Cr2Ni4A、21Ni5A、13CrNiWA、18CrNiWA、38CrA、40CrVA	1800~2200	2500~3000
35、45、30CrMnSiA、20CrNi3A、37CrNi3A、38CrMoAlA、40CrNiMoA	2500~3000	3000~4000
铜、金和银		1400~2000

注：热精压时，可取上表数值的50%~30%，曲面精压时，可取平面精压与体积精压的平均值。

3. 精压工序的安排

钢锻件的精压应在热锻件正火或退火之后进行；铝合金锻件当变形程度较小时，由于冷作硬化不明显，可在淬火时效后精压。若变形程度较大，应于热处理前精压，或热处理前预精压一次，热处理后作最后冷精压，以减少精压变形量。

4. 精压件图和精压坯料图

精压件图根据零件图绘制，并作为制造精压模具和检验精压件的依据。精压坯料图即模压件图，作为检验精压件坯料和制造锻模的依据，是根据精压件图并考虑到精压时的精压余量和精压后水平方向尺寸的变化等因素而绘制的。如果平面精压只在模锻件的局部地方进行，大部分仍保持着锻件的外形尺寸和公差，则可在模锻件图上注明精压尺寸和要求，如图9-24所示，不必另绘制精压件图。

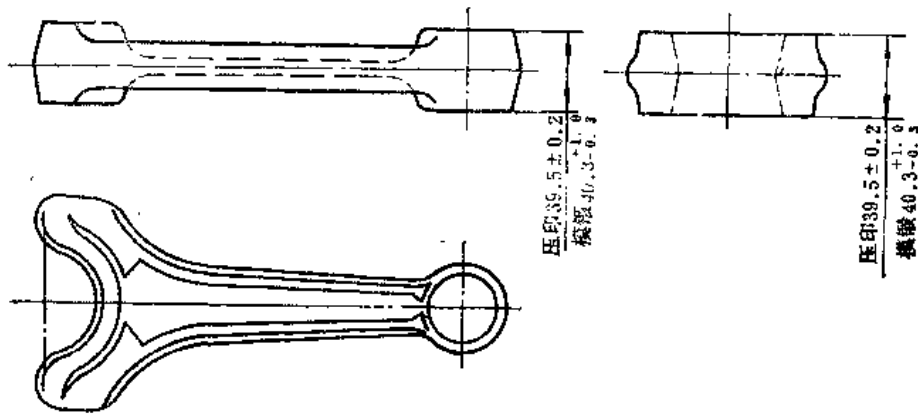


图9-24 精压尺寸和要求的标注

二、校正

有些锻件，如细长轴类锻件、带薄法兰盘锻件和落差较大的锻件等，在模锻、切边、冲孔、热处理等生产工序及其传递过程中，由于冷却不均、局部受力和碰撞等原因，常常会产生弯曲、扭转等变形。如果锻件的这种变形超出了锻件图技术条件的允许范围，就要进行校正，使锻件的形状和尺寸符合图样要求。

1. 校正的分类及其特点

校正分为热校正和冷校正两种。热校正通常与模锻同一火次，在切边和冲孔之后进行。它可以利用模锻锤的终锻模膛进行重复打击；也可以在校正设备（如摩擦压力机等）上的校正模膛中进行。热校正一般用于大型锻件、高合金锻件和容易在切边、冲孔时变形的形状复杂的锻件。冷校正作为模锻生产的最后工序，一般安排在热处理和清理工序之后进行。冷校正主要在夹板锤、摩擦压力机和曲柄压力机等设备的校正模膛中进行，一般用于结构钢的中小型锻件和容易在冷切边、冷冲孔、热处理和滚筒清理过程中产生变形的锻件。在某些情况下，为提高塑性、防止产生裂纹，锻件在冷校正前需进行退火或正火处理。

2. 校正模膛设计特点

热校正模膛根据热锻件图设计，冷校正模膛根据冷锻件图设计。无论是热校正模膛还是冷校正模膛，都应力求模膛形状简化、定位可靠、操作方便、制造简单。

校正模膛的设计有以下几个特点：

(1) 模膛水平方向的尺寸应适当放大 由于锻件在切边后留有毛刺，以及锻件在高度方向有欠压时，校正之后其水平尺寸有所增大。

(2) 模膛垂直方向尺寸应等于或小于锻件高度尺寸 通常小型锻件欠压量小，校正模膛高度可等于锻件高度，而大中型锻件欠压量较大，校正模膛高度应比锻件高度小一些，其差值可取为锻件高度尺寸的负偏差。

(3) 校正模膛间距与壁厚按校正部分形状确定 校正部分为平面时，锻件四周与模膛

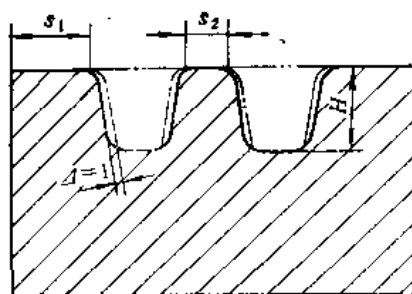


图9-25 平面校正时模膛间距与壁厚
 $s_1 \geq H, s_1 \leq 30; s_2 \geq H, s_2 \leq 20$

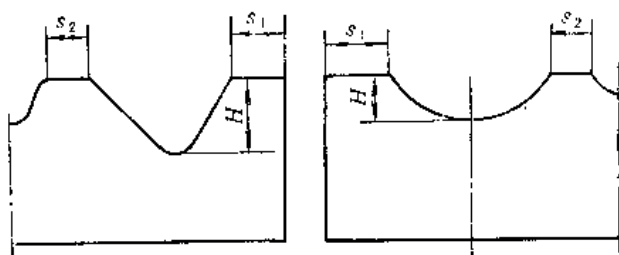


图9-26 具有斜面的锻件校正时模膛间距与壁厚
 $s_1 \geq 1.5H, s_1 \geq 40; s_2 \geq H, s_2 \leq 20$

之间留有空隙,其壁厚与模膛间距按图9-25确定。校正部分为斜面时模膛侧面与锻件接触,其壁厚与模膛间距按图9-26确定。锁扣部分与模膛的距离 s 一般取为25~30 mm (图9-27)。

(4) 校正模模膛边缘应做成圆角($R=3\sim 5\text{ mm}$), 模膛表面粗糙度值 $R_a=0.8\mu\text{m}$ 。

(5) 校正模应留有足够的支承面 用摩擦压力机校正时,校正模上的支承面按 $1\sim 1.3\text{ cm}^2/10\text{ kN}$ 来确定。

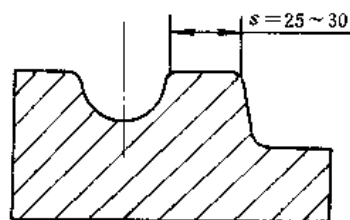


图9-27 锁扣与模膛间距

第三节 模锻件的表面清理

模锻件在生产过程中形成的氧化皮需要去除,以提高锻件表面质量,改善锻件的后续切削加工条件;为了检查锻件表面质量也需要进行表面清理。另外,冷精压和精密模锻也需要表面质量良好的坯料。

模锻前清理热坯料氧化皮的方法有:用钢丝刷、刮板、刮轮等工具清除,或用高压水清理。在锤上模锻采用制坯工步,也可去除一部分热坯料的氧化皮。

对于模锻后或热处理后锻件上的氧化皮,生产中广泛采用的清理方法有以下几种:

1. 滚筒清理

滚筒清理是将锻件(或混加一定比例的磨料和填加剂)装在旋转的滚筒中,靠相互的撞击和研磨,清除锻件表面的氧化皮及毛刺。这种清理方法设备简单,使用方便,但噪声大,适用于能承受一定撞击而不易变形的中小型锻件。

滚筒清理分为无磨料和有磨料清理两种,前者不加入磨料,但可加入直径为10~30 mm的钢球或三角铁等,主要靠互相碰撞清除氧化皮;后者要加入石英石、废砂轮碎块等磨料和苏打、肥皂水等填加剂,主要靠研磨进行清理。

2. 喷砂(丸)清理

喷砂或喷丸都以压缩空气为动力,将石英砂或钢丸,通过喷嘴喷射到锻件上,以打掉氧化皮。这种方法对各种结构形状和重量的锻件都适用。

3. 抛丸清理

抛丸清理是靠高速转动叶轮的离心力,将钢丸抛射到锻件上以除去氧化皮。抛丸清理生

产率高，比喷砂清理高1~3倍，清理质量也较好，但噪声大。另外，在锻件表面会打出印痕。

喷丸和抛丸清理，在击落氧化皮的同时，使锻件表面层产生加工硬化，但表面裂纹等缺陷可能被掩盖，因此，对于一些重要锻件应采用磁性探伤或荧光检验等方法来检验锻件的表面缺陷。

4. 酸洗清理

酸洗清理是将锻件放于酸洗槽中，靠酸与铁的化学反应达到清理的目的。酸洗清理的表面质量高，清理后锻件的表面缺陷（如发裂、折纹等）显露清晰，便于检查。对锻件上难清理的部分，如深孔、凹槽等效果明显，而且锻件也不会产生变形。因此，酸洗广泛应用于结构复杂、扁薄细长等易变形和重要的锻件。

碳素钢和低合金钢锻件的酸洗溶液是碳酸或盐酸。高合金钢和有色合金使用多种酸的混合溶液，有时还须使用碱-酸复合酸洗。

第十章 精密模锻工艺

第一节 概 述

精密模锻是在一般模锻基础上逐步发展起来的一种少无切削加工新工艺。与一般模锻相比,它能获得表面质量好、机械加工余量少和尺寸精度较高的锻件,从而能提高材料利用率,取消或部分取消切削加工工序,可使金属流线沿零件轮廓合理分布,提高零件的承载能力。因此,对于生产批量大的中小型锻件,若能采用精密模锻成形方法生产,则可显著提高生产率,降低产品成本和提高产品质量。特别是对一些材料贵重并难以进行切削加工的工件,其技术经济效益更为显著。有些零件,例如汽车的同步齿圈,不仅齿形复杂,而且其上有一些盲槽,切削加工很困难,而用精密模锻方法成形后,只需少量的切削加工便可装配使用。因此,精密模锻是现代机器制造工业中的一项重要新技术,也是锻压技术发展方向之一。

根据技术经济分析,零件的批量在2000件以上时,精密模锻将显示其优越性,如果现有的锻造设备和加热设备均能满足精密模锻工艺要求,则零件的批量在500件以上,便可采用精密模锻生产。

目前,一般模锻件所能达到的尺寸精度约为 $\pm 0.50\text{mm}$,表面粗糙度只能达到 $R_a 12.5\mu\text{m}$,而精锻件所能达到的一般精度为 $\pm 0.10 \sim 0.25\text{mm}$,较高精度为 $\pm 0.05 \sim \pm 0.10\text{mm}$,表面粗糙度可达 $R_a 0.8 \sim 3.2\mu\text{m}$ 。例如,用精密模锻生产的直齿圆锥齿轮,齿形不再进行机械加工,齿轮精度即可达到IT10级;精锻的叶片,轮廓尺寸精度可达到 $\pm 0.05\text{mm}$,厚度尺寸精度可达到 $\pm 0.06\text{mm}$ 。无疑,随着加工技术的发展,精锻件的精度水平还将不断提高。

目前,精密模锻主要应用于两个方面:

(1) 精化坯料 用精锻工序代替粗切削加工工序,即将精锻件直接进行精切削加工而得到成品零件,随着数控加工设备的大量采用,对坯料精化的需求愈来愈迫切。

(2) 精锻零件 一般是用于精密成形零件上难切削加工的部位,而其它部位仍需进行少量切削加工。有时,则直接用于生产成品零件。

精锻件与普通模锻件相比有如下特点:

1) 精锻件的形状比一般模锻件复杂,一般模锻件可以通过增加余块来简化形状,而精锻件则接近于零件的形状。

2) 精锻件的壁厚、肋宽等尺寸比一般模锻件的小,因为一般模锻件有加工余量,而精锻件一般不留加工余量或少留加工余量。

3) 精锻件的尺寸精度和表面质量比一般模锻件高。

由于精锻件形状复杂(对同一零件而言),与一般模锻件相比可能需要增加一些成形工序,或需采用新的成形方法。另外,由于精锻件的高度(厚度)、肋宽和壁厚比一般模锻件小(对同一零件而言),因此,无论是采用锻粗成形、压入成形或挤压成形都将使变形抗力增大,尤其是室温或中温成形时,都可能使模具的强度满足不了要求,这就需要采用一些可以降低变形抗力的工艺措施。例如采用局部塑性变形工序或等温模锻新工艺等。由于精锻件

的尺寸精度和表面质量要求高,常常在初步精成形后,还要再增加一道精整工序。

在拟定精密模锻工艺时应注意以下几个问题:

1) 在设计精锻件图时,不应当要求所有部位尺寸都精确,而只需保证主要部位尺寸精确,其余部位尺寸精度可低些。这是因为现行的备料工艺不能准确保证坯料的尺寸或重量,而塑性变形是遵守体积不变条件的,因此,必须利用某些部位来调节坯料的重量误差。

2) 对某些精锻件,恰当的选用成形工序,不仅容易保证成形质量,而且可以有效地减小单位变形力和提高模具寿命。

3) 坯料的表面质量(这里指氧化、脱碳、合金元素的贫化和表面粗糙度等)是实现精密模锻的前提。另外坯料形状和尺寸的正确与否及制坯质量等,对锻件的成形质量也有重要影响。

4) 设备的精度和刚度对锻件的精度有重要影响。但是模具精度的影响比设备更直接、更重要些,有了高精度的模具,在一般设备上也可以成形精度较高的锻件。

5) 在精密模锻工艺中,润滑是一项极为重要的工艺因素,良好的润滑可以有效地降低变形抗力,提高锻件精度和模具寿命。

6) 在高温和中温精密模锻时,应对模具和坯料的温度场进行测量和控制,它是确定模具材料、模具和精锻件热胀冷缩率以及坯料变形抗力的依据。

由于篇幅所限,本章仅介绍下面几个问题:

- 1) 关于锻件精度问题的分析;
- 2) 精密模锻的成形方法;
- 3) 关于精密模锻模膛充填问题的分析;
- 4) 精密模锻工艺设计特点;
- 5) 精密模锻模具设计特点;
- 6) 精密模锻的润滑;
- 7) 精密模锻实例。

第二节 关于锻件精度问题的分析

锻件的精度是一个综合性的技术问题,它与坯料体积的偏差、模具和锻件的弹性变形、模具和坯料(锻件)的热胀冷缩、模具设计和模具加工精度、设备精度等有关。正确分析这些因素的影响并采取有效的解决措施是保证锻件精度的重要环节。

一、坯料体积的偏差

在开式精密模锻中,坯料体积的偏差不影响锻件的尺寸偏差。但在闭式精密模锻中,当模膛的水平尺寸不变和不产生毛刺或毛刺体积不变时,坯料体积的偏差将引起锻件高度尺寸的变化。

坯料体积的偏差是由两方面因素引起的:一是下料不准确;二是坯料加热时,各个坯料烧损的程度不一样。目前精密下料可使坯料的重量偏差控制在1%以内,而一般下料方法约为3%~5%或更大。

因此,要提高锻件精度,首先要提高下料精度和改善加热情况,其次在锻件图设计和工艺设计时,应根据坯料体积可能的变化范围采取适当的措施。例如,增大锻件某一方向尺寸公差或采用开式模锻,使多余金属流入飞边槽;对某些带孔的锻件,在设计模具时,可利用

冲孔芯料来调节体积偏差。

二、模膛的尺寸精度和磨损

模膛的尺寸精度和使用过程中的磨损对锻件尺寸精度有直接影响。在模膛的不同部位，由于金属的流动情况和所受到的压力不同，其磨损程度也不相同。

在开式模锻中，模膛水平方向的磨损会引起锻件外径尺寸增大和孔径尺寸减小，模膛垂直方向的磨损会引起锻件高度尺寸增大。

在闭式模锻时，模膛磨损对锻件尺寸的影响，如图10-1所示。模膛磨损将引起锻件水平方向尺寸 $L(D)$ 增大。若坯料体积不变，且不产生飞边（或飞边体积不变），此时为了获得充填良好的锻件，其高度尺寸 H 将减小。在这种情况下，锻件高度尺寸的公差 ΔH 就不能由模膛垂直方向的磨损来决定，而应该是锻件水平方向尺寸磨损公差的函数。在模具设计时，锻件水平方向尺寸应取最小值，而高度方向尺寸应取最大值。当模具磨损达最大值时，锻件水平方向尺寸达最大值，而高度方向尺寸达最小值。按体积不变条件，锻件高度尺寸公差由水平尺寸公差决定，其关系式为：

矩形截面锻件：

$$-\Delta H = \Delta L \frac{H}{L} + \Delta B \frac{H}{B} \quad (10-1)$$

正方形截面锻件（ $L=B$ ）：

$$-\Delta H = 2\Delta L \frac{H}{L} \quad (10-2)$$

圆柱形锻件：

$$-\Delta H = 2\Delta D \frac{H}{D} \quad (10-3)$$

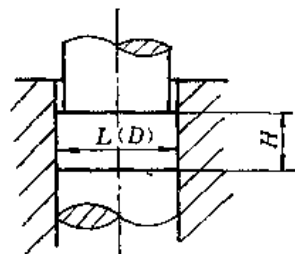


图10-1 闭式模锻锻件尺寸图

式中 L 和 B ——分别为锻件长边和短边尺寸；

ΔL 和 ΔB ——分别为锻件长边和短边尺寸的偏差；

D 和 ΔD ——分别为锻件直径尺寸和其偏差。

三、模具温度和锻件温度的波动

模具温度的波动将引起模膛容积的变化，其变化值可按下式计算：

$$\frac{\Delta V_t}{V_0} = e_1 + e_2 + e_3 \quad (10-4)$$

式中 ΔV_t ——模膛容积变化值， $\Delta V_t = V_t - V_0$ ；

V_0 ——设计时，预定模具温度下的模膛容积；

V_t ——锻造时实测模具温度下的模膛容积；

e_1, e_2 和 e_3 ——三个互相垂直方向上模膛尺寸的相对改变量。

如果模具温度分布均匀，当模具实测温度与设计预定的模具温度相差为 Δt 时，则：

$$\frac{\Delta V_t}{V_0} = 3e = 3\alpha \Delta t \quad (10-5)$$

式中 α ——模具材料的线膨胀系数。

对于淬硬钢，可取 $\alpha \approx 0.000012$ ，则有：

$$\frac{\Delta V_r}{V_0} = 0.000036 \Delta t \quad (10-6)$$

由模具温度和锻件温度波动引起的锻件尺寸改变，可按式计算：

$$\Delta L = -L\alpha\Delta t + L_{\text{模}}\alpha_{\text{模}}\Delta t_{\text{模}} \quad (10-7)$$

式中 ΔL —— L 方向锻件尺寸对公称尺寸的波动值；

L ——在公称温度下 L 方向的锻件尺寸；

Δt ——模锻结束时锻件温度对公称温度的波动值；

$L_{\text{模}}$ ——在公称温度下 L 方向的模膛尺寸；

$\Delta t_{\text{模}}$ ——模锻结束时模具温度对公称温度的波动值；

α 和 $\alpha_{\text{模}}$ ——锻件材料和模具材料的线膨胀系数。

应用式(10-7)时，应注意，提高终锻温度将使锻件尺寸减小，而提高模具温度则使锻件尺寸增大。

四、模具和锻件的弹性变形

精密成形时，由于应力作用，模具和坯料均产生弹性变形，这对锻件的尺寸精度有较大的影响。以模锻为例，模膛因受内压力作用，尺寸增大；而坯料受压则产生压缩弹性变形。外力去除后，两者都向相反方向弹复，结果使锻件尺寸增大。其数值是模具和锻件弹性变形量的总和。模具和锻件的弹性变形量，可根据材料的弹性模量、应力的数值和相应部分的尺寸来确定。但是应用弹性理论算出弹复值是十分困难的，实际的弹复值通常是通过各种工艺试验确定的。

五、锻件的形状与尺寸

锻件的形状与尺寸对可能达到的尺寸精度有一定的影响。例如具有薄壁高肋的锻件，模锻时常不易充满；又如呈扭曲形状的汽轮机叶片，模锻后锻件上各处的弹复量和冷收缩量均不一样；再如某些轴线弯曲的轴类锻件，模锻时由于分模面不在同一平面内，有时产生的错移力较大，即使采取平衡错移力的措施，也不能完全消除，使尺寸偏差增大。

六、成形方案

对一定形状的锻件，成形方案是否合理，对尺寸精度有很大影响。例如轴承套圈在一般扩孔机上进行开式辗扩时，径向尺寸很难准确控制，椭圆度和锥度较大。如果辗扩后增加一道精整工序，或在外径受限制的模具中辗扩时，尺寸精度和形位精度均可大幅度提高。又例如用辗锻方法生产的叶片和连杆锻件，尺寸精度较低，如果辗锻后再增加一道精整工序，则可使锻件精度有较大提高。再如齿轮类锻件，如齿形在端面，齿高较矮时，可利用带齿槽的冲头，在室温或中温（视材料硬度而定）直接压出齿形，而不必再精整形。对于齿形在端面且齿较高的锥形齿轮（如图10-16），该类零件一般为钢件，变形抗力较大，应先采用高温（1000~1100℃）初成形，经切边和清理后再进行温热（750~850℃）精压。温热精压是保证该类锻件尺寸精度和表面粗糙度的关键。而对于一端带齿的小尺寸电机齿轮（图10-2），采用挤压工艺可较好地保证齿形精度，不带齿的部分可作为挤压时的余料。

七、模膛和模具结构的设计

模膛和模具结构的设计，对锻件的精度有很大影响。如模膛的设计精度，冷缩量 and 弹复量采用的是否适当，模具的导向精度和刚度等都会影响锻件的尺寸精度。

八、润滑情况

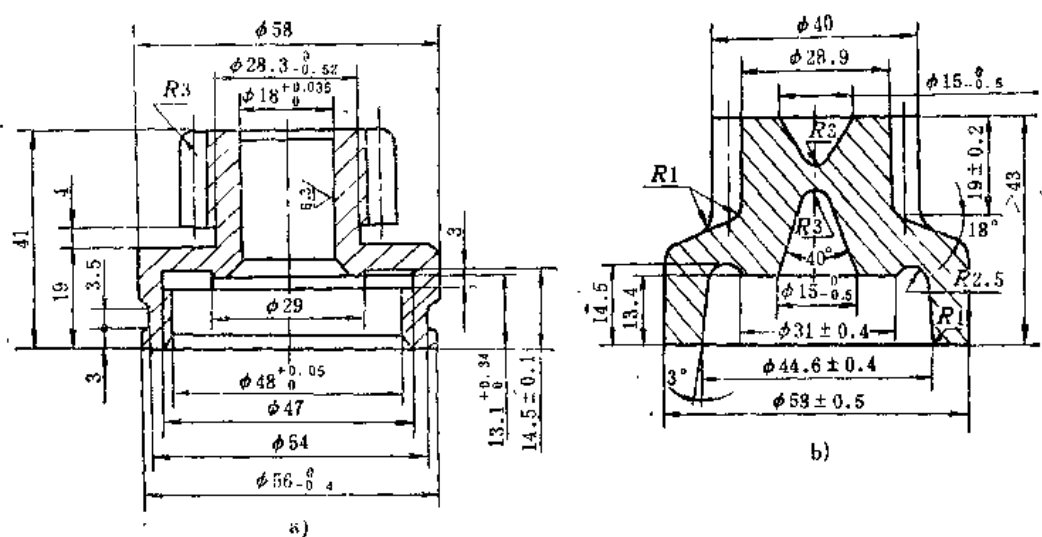


图10-2 电机齿轮的零件图和锻件图

a)零件图 b)锻件图

润滑条件直接影响金属充满模膛的难易程度以及金属的变形抗力和弹复量的大小,从而
影响锻件的尺寸精度。

九、设备

设备的精度、刚度及其吨位大小对锻件尺寸精度有一定影响。

十、工艺操作

实际的工艺操作是否符合技术操作规范,对锻件尺寸精度也有影响。例如在坯料成形过程中,实际变形温度偏高或偏低都将影响冷缩量 and 弹复量的大小,从而引起锻件尺寸的波动。

综上所述,坯料的形状与尺寸、模具、设备、润滑、工艺操作等对锻件的精度都有重要影响。成形方案、模具的正确设计和精确加工是保证锻件精度的最重要的环节。所以,精密模锻时应该控制上述各种因素。

第三节 精密模锻的成形方法

目前已用于生产的精密成形新工艺很多。按锻造温度不同可分为热精密成形、冷精密成形和温热精密成形。若按成形原理来分,则有小飞边开式模锻、闭式模锻、挤压、多向模锻、闭塞式锻造、径向锻造、精密辗压、精密冷搓、径向轧制、强力旋压、摆动辗压、粉末锻造、等温锻造、超塑成形等。按教材编写分工,本章仅介绍有关精密模锻方面的内容。

精密模锻中常用的成形方法有:小飞边开式模锻、闭式模锻、挤压、闭塞式锻造、等温锻造和体积精压等。

精密模锻时由于采用的坯料的体积较精确,因此小飞边模锻和闭式模锻应用较多。关于小飞边模锻、闭式模锻及挤压成形的原理和变形规律在第六章中已有介绍,此处不再重复。

闭塞式锻造是近年来发展十分迅速的一种精密成形方法,第六章第四节中介绍的径向挤压(图6-50)属于其中的一种。其成形过程是先将可分凹模闭合形成一个封闭模膛,同时对闭合的凹模施以足够的压力,然后用一个冲头或多个冲头,从一个方向或多个方向,对模膛

内的坯料进行挤压成形(图10-3)。这种成形方法也称之为闭模挤压、可分凹模锻造、径向挤压、多向模锻等。但锻件的成形原理都是一样的,都是在封闭的模膛内挤压成形,是传统闭式模锻的一个新发展。

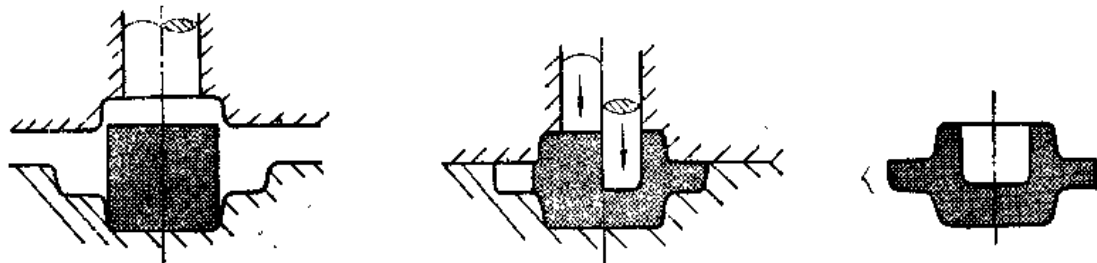


图10-3 闭塞式锻造过程示意图

闭塞式锻造的优点是:①生产效率高,一次成形便可获得形状复杂的精锻件,适于成形具有空腔和枝芽的锻件;②由于成形过程中坯料处于强烈的三向压应力状态,适于成形低塑性材料;③金属流线沿锻件外形连续分布,因此,锻件的力学性能好。

闭塞式锻造要求坯料下料准确,少无氧化加热,成形时应有良好的润滑,并要求在模膛内金属最后充满的部位设置仓部,以容纳模膛充满后的多余金属。闭塞式锻造时,作用在模膛上的单位压力很高,因此所需的合模力很大(见图6-51中的合模力曲线)。

闭塞式锻造可在专用的双动压力机上进行,也可在一般压力机上采用专用的模具来实现。

等温锻造常用于航空、航天工业中钛合金、铝合金、镁合金零件的精密模锻。在常规锻造条件下,这些金属材料的锻造温度范围比较窄,尤其在锻造具有薄的腹板、高肋和薄壁零件时,坯料的温度很快地向模具散失,变形抗力迅速增加,塑性急剧降低,不仅需要大幅度地提高设备吨位,也易造成锻件和模具开裂。

等温锻造常用的成形方法也是开式模锻、闭式模锻和挤压等,它与常规锻造方法的不同点在于:①锻造时,模具和坯料要保持在相同的恒定温度下。这一温度是介于冷锻和热锻之间的一个中间温度,对某些材料,也可等于热锻温度;②考虑到材料在等温锻造时具有一定的粘性,即应变速率敏感性,等温锻造时的变形速度应很低。根据生产实践,采用等温锻造工艺生产薄腹板的肋类、盘类、梁类、框类等精锻件具有很大的优越性。目前,普通模锻件肋的最大高宽比为6:1,一般精密成形件肋的最大高宽比为15:1,而等温精锻时肋的最大高宽比达23:1,肋的最小宽度为2.5mm,腹板厚度可达1.5~2.0mm。

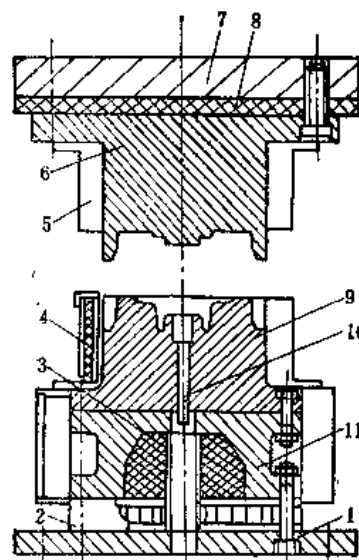


图10-4 等温锻造模具图

1—下模板 2—中间垫板 3、8—隔热层 4、5—加热线
6—凸模 7—上模板 9—凹模 10—顶杆 11—垫板

等温锻造时,常采用电感应法或电阻法加热模具,如图10-4所示。

等温开式模锻时, 由于桥口处坯料的温度高, 流动阻力小, 因此, 桥口的宽高比比一般开式模锻大 3 ~ 4 倍。

体积精压往往用于精密模锻的精整工序, 以提高锻件的精度。体积精压时, 锻件只发生少量变形, 其变形过程相当于模锻变形过程的第二、三阶段。

第四节 关于精密模锻时模膛充填问题的分析

关于模膛的充填问题在第六章第二节和第八章第一节中已进行了分析, 概括起来, 解决模膛充满问题的主要措施是: ①改变充填部位的斜度、圆角和形状尺寸, 减小金属流入模膛时的阻力; ②增大飞边桥口处的阻力, 由一般飞边→小飞边→无飞边; ③增大设备工作速度, 利用金属的流动惯性; ④采用等温成形工艺等。

对于一般模锻件, 采用上述措施通常可以满足成形要求。但精密成形时, 在模膛的“凹尖角”处常常不易充满, 通常采用的增大飞边阻力的办法, 会引起模压力的增大, 容易造成模具损坏。有时, 即使如此也达不到成形质量的要求。其原因是此时模具与坯料几乎全部接触, 坯料可以流通的通道几乎被堵死, 尽管静水压力很大, 但三个主应力间的差值很小, 不满足屈服准则, 坯料只是被弹性压缩, 而没有塑性变形。为此, 可采取如下措施:

1. 采用分流原理成形

例如, 精锻直齿轮 (图10-5) 时, 欲使齿部成形, 必须使幅板部位的金属有塑性变形, 否则冲头不能下行, 齿部也无充填的金属来源, 因此幅板中心处需留有孔, 而不能堵死。这样, 最后精锻时, 幅板处的金属产生塑性变形, 并有一分流面, 一部分流入内孔, 一部分外流充填齿部。

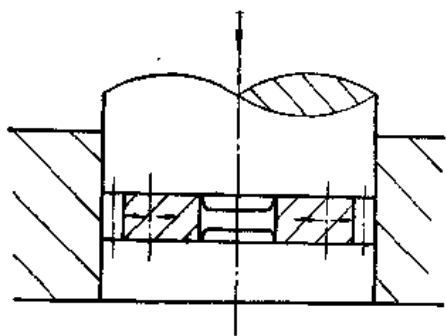


图10-5 采用分流原理精锻直齿轮示意图

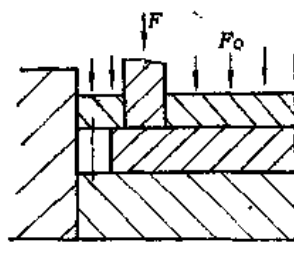


图10-6 采用闭塞式锻造方法精锻直齿轮示意图
 F —压力 F_0 —合模力

2. 采用闭塞式锻造方法成形

仍以直齿轮的精锻为例, 坯料经预锻后, 放入精锻模膛内, 在靠近齿形的部位局部加压, 其余部位被压住, 迫使局部变形区的金属流入齿部 (图10-6)。这时, 两侧被压住的部分需要有足够的合模力。这种成形方法最好在双动压力机上进行。

第五节 精密模锻工艺设计特点

精密模锻工艺的设计程序基本上与常规模锻工艺相同, 但工艺设计的内容有一些差别,

介绍如下:

一、精锻件图的设计特点

1. 机械加工余量

精锻件的机械加工余量比一般模锻件小, 可根据加工方法预留加工余量, 参见表10-1。

表10-1 钢质锻件机械加工余量 (单边余量) (mm)

机 械 加 工 工 序 名 称		锻 件 尺 寸						
		碳 素 钢				不 锈 钢		
		1~5	5~10	10~20	20以上	1~10	10~20	20以上
车、铣、刨		0.6	0.8	1.0	1.2	0.5	0.8	1.0
铣削或用砂轮粗磨	重要部分	0.3	0.3	0.5	0.75	0.2	0.3	0.5
	不重要部分	0.15~0.25				0.15~0.25		
磨 削		0.10~0.20				0.1~0.15		
抛 光		0.1				0.1		
滚 光		0.10~0.20				0.1~0.20		

注: 有色金属及合金锻件, 其加工余量比钢锻件小25%。

2. 模锻斜度

精锻件的模锻斜度比一般模锻件小, 通常铝合金锻件为 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$, 钢锻件为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$, 模锻斜度公差为 $\pm 0.5^{\circ}$ 或 $\pm 1^{\circ}$ 。

3. 圆角半径

精密成形时的圆角半径可参考表10-2。

4. 肋和腹板厚度

肋的工艺性主要取决于它的高度和宽度。目前普通模锻件肋的最大高宽比 $h:w=6:1$ 。对于投影面积小于 0.26m^2 的铝合金精锻件, 建议采用的最大高宽比为15:1, 通常采用的范围是 $h:w=8:1 \sim 15:1$ 。等温模锻时, 高宽比最大达23:1。

锻件上的腹板是锻件上的薄板部分。腹板过薄难以锻制。精密模锻件腹板厚度的设计与普通模锻件相同。其最小厚度 t 是根据腹板宽度 B 及其与肋高 h 的比值($B:h$)和锻件投影面积来确定的。设计时可参考腹板厚度的线图(图10-7)选取。

二、加热、清理和冷却

热精密模锻和温热精密模锻钢锻件时, 应采用无氧化加热的方法加热坯料(见第三章第五节)。加热前的坯料不应有氧化皮, 否则应予清除。必要时还应除去表面脱碳层。

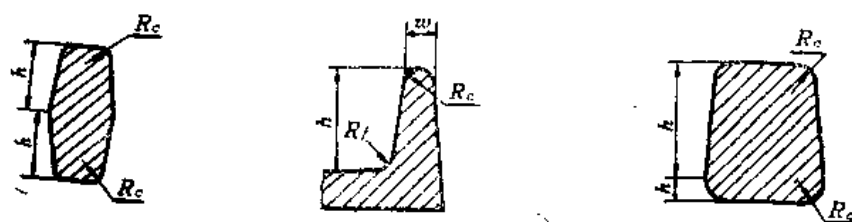
清除坯料氧化皮的常用方法有酸洗、干法滚筒清理、车削或无心磨削等。

清除锻件氧化皮的方法一般也是采用酸洗、干法滚筒清理以及湿法滚筒清理、喷砂或喷丸等。

精锻件的冷却与一般锻件不同之处主要是防止热锻件冷却过程中发生二次氧化, 所以应在保护介质中冷却。通常采用下述三种方法:

一般是把锻件放入干燥的细砂中冷却, 在批量生产中应把锻件有次序地分放在有格子的砂箱中; 当需要缓慢冷却锻件时, 可把锻件放在热砂箱或石棉粉中冷却, 为了更有效地保护锻件, 可在有保护气体的装置中进行冷却。

表10-2 一些实际生产的精密模锻件的圆角半径值



肋					内圆角半径	比 值	腹板厚度
肋 高 h (mm)	外圆角半径 R_o (mm)	肋 宽 w (mm)	高 宽 比 h/w	模锻斜度 (°)	R_f (mm)	R_f/R_o	(mm)

铝合金锻件 (圆顶肋)

14.2	1.8	3.6	4:1	5	3.0	1.7:1	3.0
21.3	2.0	3.0	7:1	0	6.4	2:1	3.1
21.3	2	4.1	5.25:1	0	3.0	1.5:1	4.1
23.6	1.5	3.3	7:1	0	2.2	1.5:1	5.1
28.4	1.3	2.5	11:1	0, 1	6.4	5:1	2
29.2	2.3	4.8	6:1	3	3.3	1.4:1	4.8
31	2.3	2.5	12:1	0	3.3	1.4:1	无腹板
32.5	1.5	3.0	10:1	1	6.4	4:1	3.0
34.2	3.3	6.4	5.5:1	0, 1.5	12.7	3.8:1	6.4
38.1	3.0	6.4	6:1	0	12.7	4.2:1	5.3
54	2.4	3.2	17:1	0	3.2	1.4:1	2.4
74.1	1.5	3.2	23:1	3	6.4	4:1	2

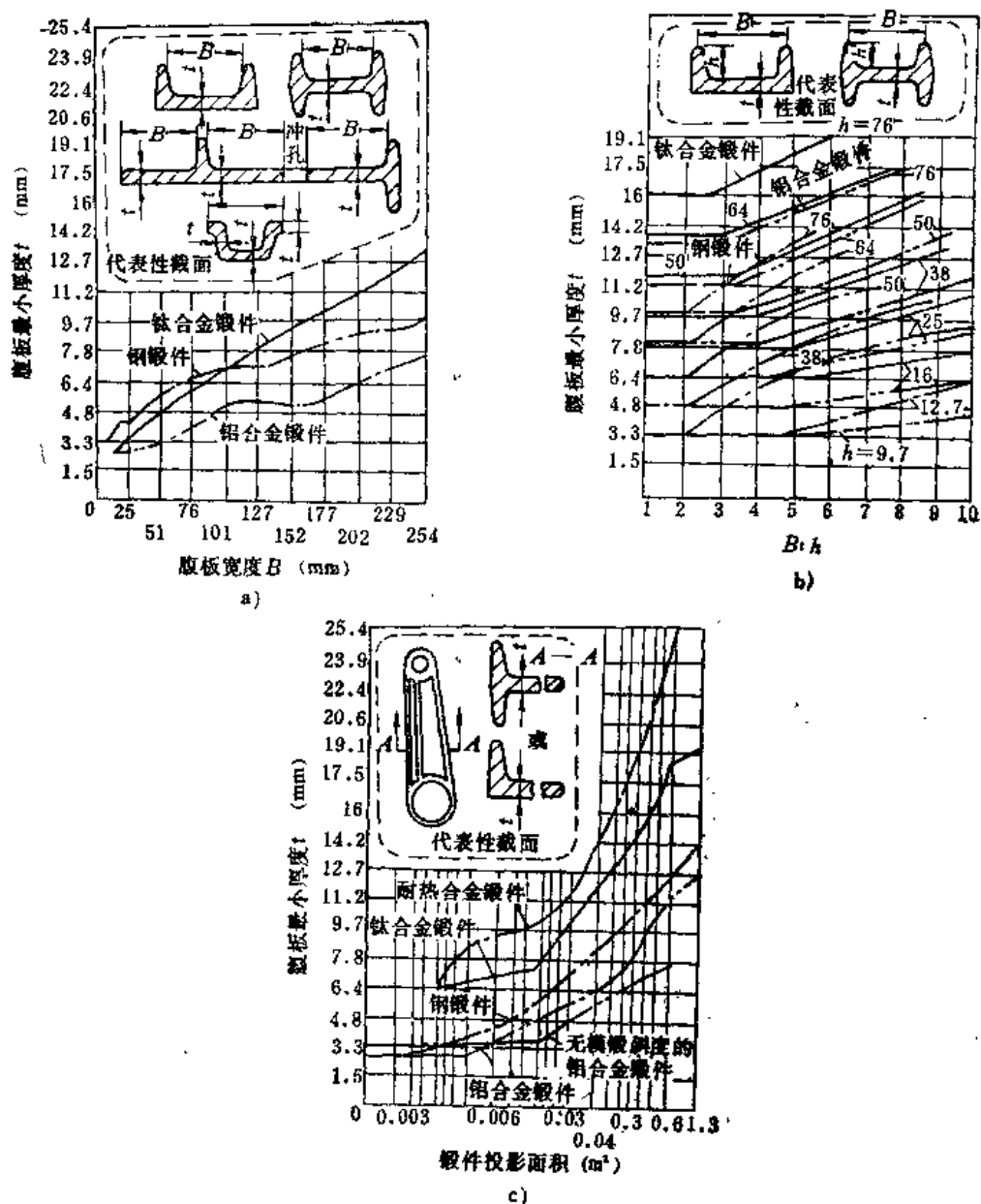
铝合金锻件 (平顶肋)

22.8	1.5	12.7	1.8:1	0	5.4	4.2:1	2.5
23.4	1.5	3.8	5:1	0	5.4	4.2:1	2

钢 锻 件

76.2	6.4	25.4	3:1	4①	12.7	2:1	12.7
------	-----	------	-----	----	------	-----	------

① 指最大模锻斜度。

图10-7 腹板最小厚度 t 的线图

第六节 精密模锻模具设计特点

在第八章中已介绍了各种锻造设备上常规成形模具的结构及其设计, 本节主要介绍精密模锻模具的结构类型、模膛设计以及强度设计和刚度设计中的一些问题。

一、模具结构类型

精密模锻模具按凹模结构形式可分为整体凹模 (如图10-8所示)、组合凹模 (如图10-9所示) 和可分凹模 (如图10-10所示) 三类。

图10-8所示的整体式凹模, 用于锤上模锻, 利用锁扣作为上、下模的导向。锁扣的间隙

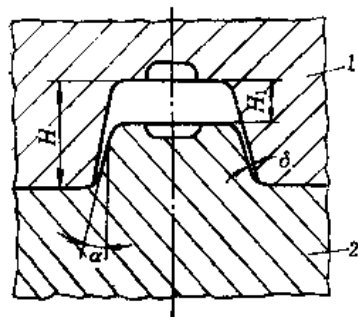


图10-8 整体凹模式无飞边模锻模
1—上模 2—下模

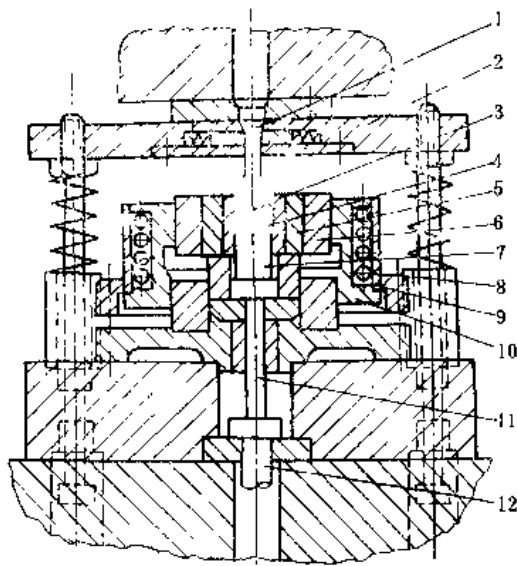


图10-9 组合凹模式中温反挤压模具
1—冲头 2—卸料板 3—凹模 4—挤压件 5—内预应力圈 6—外预应力圈 7—凹模顶块 8—加热器 9—金属套 10—固定圈 11—推杆 12—顶出器

δ 应保证锻件的错移量符合锻件图的要求。一般取 $\delta = 0.1 \sim 0.4 \text{ mm}$ ，锁扣的高度 $H = 2 \sim 2.5 H_1$ （ H_1 为锻件高度），斜度 $\alpha = 3^\circ \sim 5^\circ$ 。

图10-9为组合凹模式中温反挤压模具，采用三层组合凹模结构，利用预应力圈对凹模施加预应力。为了获得尺寸精度高的挤压件，模具中设置有加热器8，也可以通过压缩空气冷却模具，使其工作温度控制在规定的范围内。为了提高挤压件的表面质量，利用卸料板2和凹模顶块7刮刷冲头1和凹模3上的润滑剂残渣。

图10-10所示为在液压机或螺旋压力机上热挤压钛合金台阶轴锻件的可分式凹模模具。两个三棱柱形的半凹模7和8通过销轴9与连接推杆铰接，连接推杆固定在压力机的顶出器上。两半凹模安置在凹模座1中，支承面间的角度为 30° 。利用过渡圈5把冲头6固定在冲头固定器4中。利用支承环3作凹模顶起时的支承或作为冲头工作行程的限位。采用这种模具挤压锻件时，由于模具的弹性变形，在凹模分模面间会出现厚度为 $0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 、宽度为 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 的毛刺。

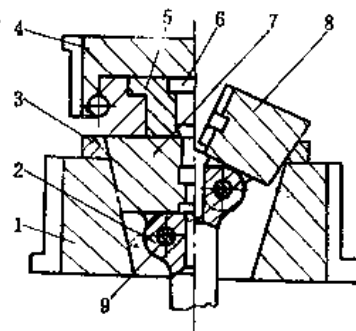


图10-10 挤压台阶轴锻件的可分式凹模
1—凹模座 2—连接推杆 3—支承环 4—冲头固定器 5—过渡圈 6—冲头 7—左凹模 8—右凹模 9—销轴

整体凹模制造比较简单，适用于模压单位变形压力不大的锻件。

组合凹模是精密模锻中常用的模具结构形式，其特点是：

- 1) 可以施加预应力，使凹模能承受较高的单位压力；
- 2) 节约模具材料和便于模具热处理；
- 3) 便于采用循环水或用压缩空气冷却模具。

可分凹模用于模锻形状复杂的锻件。当锻件需要两个以上的分模面，才能进行成形和顺

利地从模膛中取出时,采用这种结构。但模具较复杂,对模具加工要求很高。

采用可分凹模时,经常由于活动凹模部分的刚度不够而产生退让,在分模面上形成飞边,并造成锻件的椭圆度。如果飞边厚度稳定,可在模具设计时预先估计,以获得没有椭圆度的锻件。但由于各种因素的变化,飞边厚度往往是不稳定的,所以锻件的椭圆度是不易消除的。只有采用足够刚度的可分凹模,才能防止形成飞边,有效地消除锻件的椭圆度。

精密模锻模具的导向装置和顶出机构与常规成形模具相同,但导向精度要求更高些。

二、模膛设计中的几个问题

1. 模膛尺寸

在常规热成形中,终锻模膛尺寸系按热锻件图确定。由于仅考虑了锻件的冷却收缩,而不考虑其它因素,所以锻件的精度较低。对于精密模锻件,应根据本章第二节的分析,考虑各种因素的影响,合理地确定模膛尺寸。在简化设计中,模膛尺寸可按式确定,然后通过试锻加以修正。

如图10-11所示的模模,模膛直径应为:

$$D = D_{\text{公称}} + D_{\text{公称}} \alpha t - D_{\text{公称}} \alpha_{\text{模}} t_{\text{模}} - \Delta D_{\text{弹}} \quad (10-8)$$

式中 D ——模膛直径(mm);

$D_{\text{公称}}$ ——锻件相应外径的公称尺寸(mm);

α ——坯料的线膨胀系数($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

t ——终锻时锻件温度($^{\circ}\text{C}$);

$\alpha_{\text{模}}$ ——模具材料的线膨胀系数($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

$t_{\text{模}}$ ——模具工作温度($^{\circ}\text{C}$);

$\Delta D_{\text{弹}}$ ——模锻时模膛直径 D 的弹性变形绝对值(mm)。

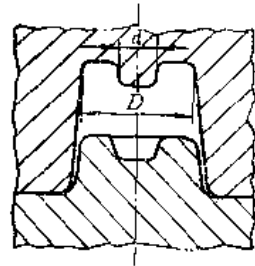


图10-11 模膛尺寸简图

冲头直径 d 按下式计算:

$$d = d_{\text{公称}} + d_{\text{公称}} \alpha t - d_{\text{公称}} \alpha_{\text{模}} t_{\text{模}} + \Delta d_{\text{弹}} \quad (10-9)$$

式中 d ——冲头(模膛冲孔凸台)直径(mm);

$d_{\text{公称}}$ ——锻件孔的公称直径(mm);

$\Delta d_{\text{弹}}$ ——模锻时冲头直径 d 的弹性变形值,当直径 d 变大时, $\Delta d_{\text{弹}}$ 为负值;当直径 d 减小时, $\Delta d_{\text{弹}}$ 为正值(mm)。

其余符号与式(10-8)相同。

关于模膛的磨损等因素,可在锻件公差中考虑。

2. 模膛的尺寸精度和表面粗糙度

模膛的尺寸精度和表面粗糙度是根据锻件图对锻件所要求的精度和表面粗糙度数值来选定的。如能在生产中严格控制各种影响锻件精度的因素,则精锻件的尺寸精度约比模具精度低2级(目前温锻件尺寸精度可达IT8~9级,热锻件可达IT10级左右)。一般来说,对中小型锻模和形状不太复杂的模膛,系按IT7级和IT8~9级精度制造;对大型锻模和形状复杂的模膛,可按IT8~9级和IT10~12级精度制造。如果锻件的精度要求高,则要相应提高模膛制造精度,因而增加了模具制造的困难。

模膛的表面粗糙度,应考虑加工的可能性。对有利于金属流动和减小摩擦来说,希望表面粗糙度数值低些。通常,模膛的重要部位表面粗糙度应在 $R_a 0.4\mu\text{m}$ 以下,一般部位表面粗糙度数值应为 $R_a 3.2 \sim 1.6\mu\text{m}$ 。

3. 有深凹穴和形状复杂的模膛布置

有深凹穴和形状复杂的模膛最好布置在上模中, 这样不仅有利于金属更好地充满模膛, 而且也便于清除氧化皮和润滑剂残渣。由于上模与锻件接触时间短, 温度较低, 故模具寿命较长。

闭式模膛和开式模膛一样, 在模膛中深穴处应有通气孔, 以便排出空气, 保证模膛充满。通气孔直径一般为 $1 \sim 1.5 \text{ mm}$ 。

三、模具的强度设计

关于开式模锻模具破坏的一般形式和原因在第八章已有介绍, 不再重复。这里简要介绍闭式模锻模具强度设计的有关问题。闭式模锻时, 模具承受的作用力是很大的, 当模具内的应力值超过材料的强度极限时, 模具便产生破坏。尤其是模具承受冲击载荷和有应力集中时, 模具更易破裂。这是由于模具承受冲击载荷时的受力特点所决定的。例如在冲击载荷下进行闭式模锻时 (图10-12), 当坯料充满模膛后, 如果锤头还有多余的能量, 则必然要继续向下运动。多余的能量主要由模具和设备的弹性变形所吸收。当多余能量较大时, 根据能量转换原理, 可以算得此时锤头的打击力是很大的, 远远超过锻件变形所需的力量, 而模具常常因为承受不了这么大的应力而破坏。尤其是在具有应力集中时更危险。因此, 静载荷与冲击载荷时模具的强度计算是有差别的。

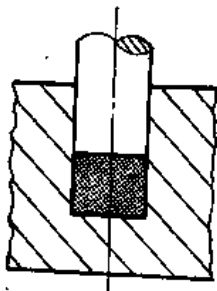


图10-12 锤上闭式模锻

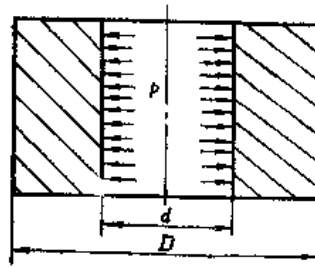


图10-13 机械压力机用锻模的整体凹模

以图10-13所示的凹模强度设计为例, 静载荷时, 是根据实际所需的变形大小进行设计的。当凹模材料选定后, 即可按弹性力学方法根据模膛直径 d 和工作压力 p 来决定凹模外径 D , 并核算其强度。对于圆形截面的凹模, 可按受内压的厚壁圆筒计算公式近似计算。当在冲击载荷下进行闭式模锻时, 模具的尺寸不取决于锻件变形所需变形力的大小, 而取决于模锻设备的吨位。因为在小吨位设备上模锻大尺寸的锻件, 多余能量较小, 而在大吨位设备上模锻小尺寸的锻件时, 多余能量则很大, 很容易引起模具破裂。当模具上存在应力集中时, 则更危险。表10-3是各种吨位摩擦压力机上闭式模具允许的纵截面积。

根据上述分析, 为防止锻模破裂, 在设计模具时, 一方面应提高模具本身的强度, 另一方面应尽可能减小多余能量和应力集中等的不良影响, 在生产实践中常采取如下措施:

(1) 采用预应力组合凹模 采用预应力组合凹模可以显著地提高其承载能力, 通过对一定尺寸的组合凹模进行强度计算可知, 内外层直径比为 $4 \sim 5$ 的三层组合凹模, 其强度是整体凹模的1.8倍; 两层组合凹模的强度是整体凹模的1.3倍。

(2) 避免 (或减小) 应力集中问题 对于整体模, 在锻模内凹的转角处常易产生应力集

表10-3 摩擦压力机上闭式模具的计算截面

	压机最大压力 (10kN)						
	40	63	100	160	250	400	630
1. 运动部分最大动能 E_d (J)	1250	2500	5000	10000	20000	40000	80000
2. 滑块最大行程 (mm)	204	270	310	360	420	500	600
3. 凹模和空心凸模允许的最小纵截面积 (mm^2)							
a. 当 $[\sigma] = 600 \text{ MPa}$ 时 (18CrNi-W)	670	1050	1700	2700	4100	6700	10500
b. 当 $[\sigma] = 720 \text{ MPa}$ 时 (5CrNiW, 5CrMnMo)	550	870	1400	2200	3500	5500	8800

中, 不论在模具热处理时或在模锻打击时都易产生。这种应力集中很易使模具产生疲劳或冲击破坏。加大圆角或降低模具表面粗糙度数值, 只能减轻应力集中的程度, 而不能从根本上避免。避免应力集中的有效措施是采用组合结构模具。图10-14为预应力组合凹模。原整体模四个角上应力集中很严重, 常常在拐角处产生破裂。现将凹模分为四块, 模锻时模内压力经过镶块A安全作用于外套B, 而外套B无小圆角, 故不会产生应力集中。

(3) 多余能量的吸收 为吸收多余能量可以采取两方面措施:

1) 在模具上设置挤出间隙, 使坯料成形后还有挤出一部分金属的可能。由于金属从孔隙中挤出从而吸收了多余的能量。

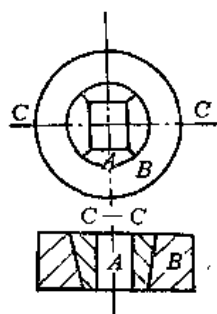


图10-14 预应力组合凹模

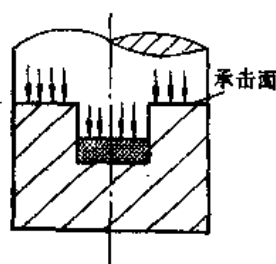


图10-15 有承击面的模具示意图

2) 采用承击面。如图10-15所示, 承击面除了保证锻件高度准确外还用来承受锤头的多余打击能量。承击面取多大合适, 尚无准确的公式。某厂设计模具时按每10J的多余打击能量取 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{4} \text{ cm}^2$ 的承击面, 生产中很少发生模具不正常损坏的现象。

四、模具的刚度问题

影响锻件尺寸精度的另一个问题是刚度问题, 包括模具刚度和设备刚度。

影响模具刚度的主要因素是模具结构, 另外模膛位置和模具材料等也有一定影响。

关于模具结构, 应力求简单。整体模的刚度较好, 采用组合模时应避免构件间有游隙和较大的弹性变形。

关于模膛位置, 应力求模膛中心与滑块(或锤杆)中心一致。否则会由于偏心力矩使上、下模产生相对转动, 造成锻件高度方向和水平方向尺寸偏差。

关于模具材料, 应选用硬度高、弹性模量大的材料做模具材料。

第七节 精密模锻的润滑

润滑在塑性成形过程中有着极为重要的作用。润滑可以减小金属在模膛中流动的阻力, 提高金属充满模膛的能力, 以及便于从模膛中取出锻件。合理地选用润滑剂, 可以有效地提高产品质量, 提高模具寿命, 提高劳动生产率, 降低变形力和变形功的消耗等。

精密模锻对润滑剂的要求可概括如下:

- 1) 对摩擦表面具有最大的活性和足够的粘度, 使润滑剂在摩擦表面形成足够厚的牢固的润滑层, 而且在塑性变形的高压作用下, 润滑剂也不会被挤出。
- 2) 具有良好的润滑性, 能有效地减小变形金属与模膛表面间的摩擦。
- 3) 具有良好的绝热性和热稳定性。
- 4) 保证锻件有较低的表面粗糙度数值, 并能保证锻件顺利脱模。
- 5) 残渣积聚较少, 容易从模具和锻件上清除。
- 6) 对锻件和模膛表面无氧化、腐蚀及其它有害的化学反应。

表10-4 热锻润滑剂 (成分配比为重量百分比)

润 滑 剂 成 分	使用方法	锻件材料
石墨水悬浮液	A, B	钢、钛
石墨 + 机油 50%	A, B	钢
MoS ₂ 粉剂 15% + 铝粉 5% ~ 10% + 胶体石墨 20% ~ 30% + 炮油余量	A	碳钢、不锈钢、耐热钢
石墨 3% + 食盐 10% + 水 87%	A	钢
银色石墨 34% + 亚硫酸盐纸浆溶液 34% + 水	A	钢
碳酸锂 28% + 甲酸锂 14% + 胶体石墨 25% + 水 28% + 次生烷基硫酸盐 5%	A	耐热钢
ZnSO ₄ 49.5% 与 KCl 50.5% 共熔物 + K ₂ CrO ₄ 2.3%	A	钛及钛合金
氧化硼	A	钛及钛合金
C-9 玻璃 ① 57% + 苏州粘土 3% ~ 5% + 水 40% 外加水玻璃 5%	C (另用 MoS ₂ 润滑剂喷涂模膛)	碳钢、不锈钢、耐热钢
豆油磷脂 + 滑石粉 + 38 号汽缸油 + 石墨粉微量	B	铜和青铜
机油 95% + 石墨粉 5%	B	铜和青铜
机油 + 松香 + 石墨 30% ~ 40%	A, B	铝、镁及其合金

注: A—喷涂于模具上; B—喷涂于热坯料上; C—加热前喷涂于坯料上。

① C-9 玻璃成分: SiO₂ 43.2%、Al₂O₃ 0.9%、BaO 43.8%、CaO 3.9%、ZnO 5.1%、MoO₃ 3.1%。

表10-5 温锻润滑剂和表面处理

温度范围	预 处 理 膜 层	润 滑 剂	润滑剂喷涂处
200~400°C	磷酸盐①	二硫化钼或石墨	坯 料
400~700°C	磷酸盐① (可用, 但加热要迅速)	石墨或水剂石墨	坯料②、模膛
700~850°C	无	石墨或水剂石墨	坯料②、模膛

① 磷酸盐适用于碳素钢。不锈钢是采用草酸盐或镀铜处理;

② 对于锻粗和变形不大的反挤压, 只需把润滑剂喷涂在模具上。

7)对人体无毒害作用。

8)应具有化学稳定性,便于存放,并便于机械化喷涂。

9)经济,并且容易获得。

温锻和热锻时通常用二硫化铝、石墨和玻璃粉等配制的润滑剂,生产中,可参考表10-4和10-5选用。另外还可参考《锻压成形理论与工艺》一书及其它有关资料。

第八节 精密模锻实例

一、直齿圆锥齿轮的精密模锻

直齿圆锥齿轮的精密模锻获得了广泛的应用。精锻齿轮有连续的金属流线(沿齿廓合理分布)和致密的组织,齿轮的强度、齿面的耐磨能力、热处理变形量和啮合噪声等都比切削加工的齿轮优越。与切削加工比较,精锻齿轮的强度和抗弯疲劳寿命提高20%,热处理变形量比切削齿轮减少30%,生产成本降低20%以上。一般认为,生产批量在300~500件以上,经济上就是合理的。下面介绍东-20行星齿轮的精密模锻。

东-20行星齿轮的零件如图10-16所示,材料为18CrMnTi。

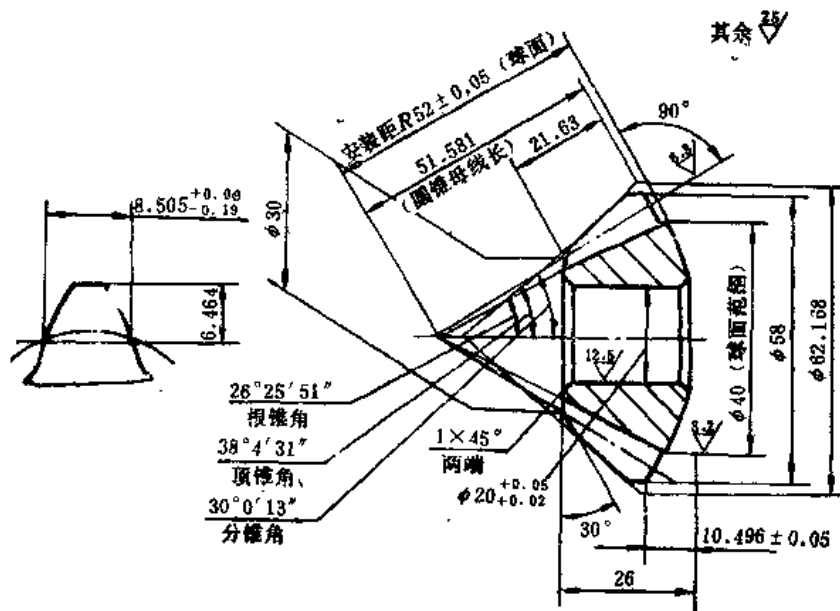


图10-16 东-20行星齿轮零件图

1. 工艺过程

精锻齿轮生产流程是:下料—车削外圆,除去表面缺陷层(切削余量为1~1.5mm)—加热—精密模锻—冷切边—酸洗(喷砂)—加热—精压—冷切边—酸洗(或喷砂)—镗孔、车背锥球面—热处理—喷丸—磨内孔、磨背锥球面。

精锻时,在燃油环形转底式快速少无氧化加热炉中加热坯料。精压时,把锻件加热到800~900℃,用高精度模具进行热体积精压。采用精压工序有利于保证零件精度和提高模具寿命。

2. 锻件图

图10-17所示为行星齿轮精锻件。制定锻件图时主要考虑如下几方面:

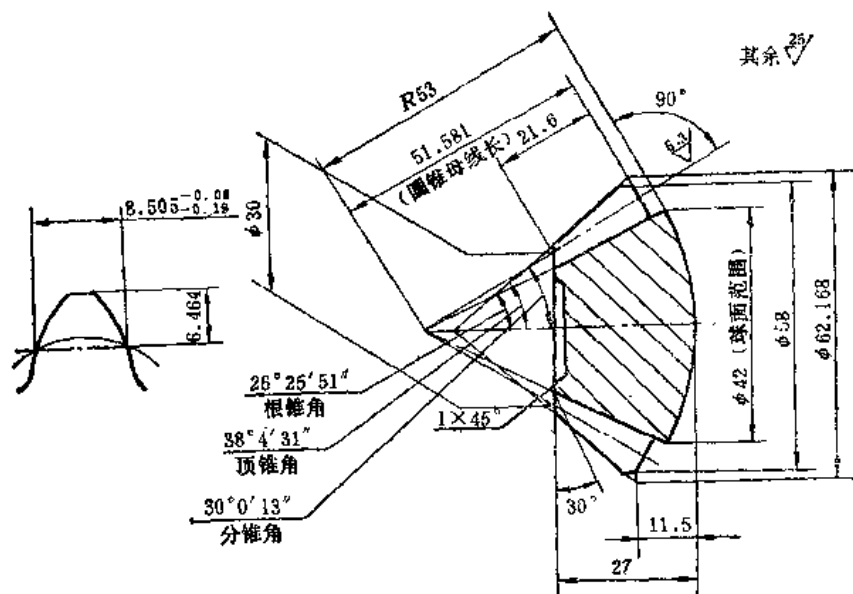


图10-17 行星齿轮锻件图

(1)分模面位置 把分模面设计在锻件最大直径处,这样能锻出全部齿形及顺利脱模;

(2)加工余量 齿形和小端不留加工余量,即不需机械加工。背锥面是安装基准面,精锻时不能达到精度要求,预留1mm加工余量;

(3)冲孔连皮 当锻件中孔的直径小于25mm时,一般不锻出;当孔的直径大于25mm时,应锻出有斜度和连皮的孔,锻出孔对齿形的充满有利。

3. 坯料形状和尺寸

根据计算并经试锻,确定采用 $\phi 28^{+0.1}_{-0} \text{mm} \times 68^{+0.6}_{-0} \text{mm}$ 的圆柱形坯料,其重量约311g。

4. 精锻模具

图10-18所示为行星齿轮精锻模。图10-19、图10-20为其凹模和上模图。

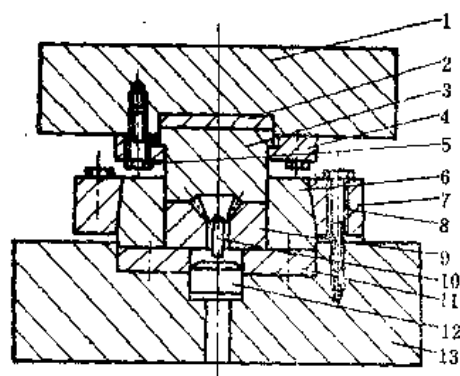


图10-18 行星齿轮精锻模

1—上模板 2—上模垫板 3—上模 4—压板 5、8—螺栓 6—预应力圈 7—凹模压圈 9—凹模 10—顶杆 11—凹模垫板 12—垫板 13—下模板

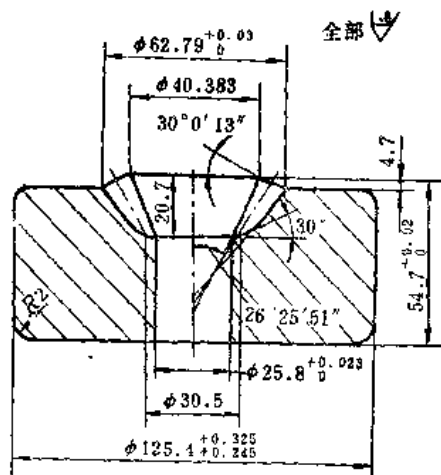


图10-19 行星齿轮凹模

凹模采用预应力组合结构,模膛采用电脉冲方法加工,加工模膛用的电极根据齿轮零件

图设计, 并考虑下述因素: 锻件冷却时的收缩, 锻模工作时的弹性变形和模具的磨损, 电火花放电间隙, 电加工时的电极损耗等。

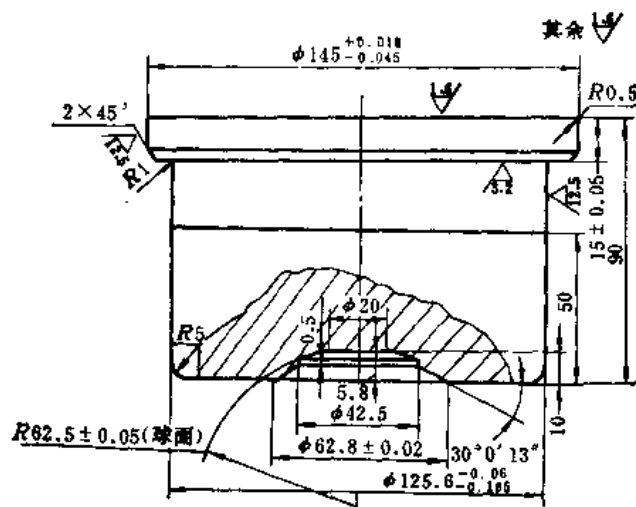


图10-20 行星齿轮上模

凹模和凸模材料采用3Cr2W8V钢, 热处理硬度为48~52HRC。

该件在3000kN摩擦压力机上精锻, 润滑剂采用70%机油+30%石墨。精锻齿轮的尺寸精度和内部组织完全达到了设计要求。

东-20行星齿轮由切削加工改为精密成形后, 材料利用率由41.6%提高到83%, 提高工效2倍。

二、十字轴闭塞式锻造

十字轴是汽车万向器上的主要零件, 其规格品种多, 需要量大。常用的十字轴形状如图10-21所示。

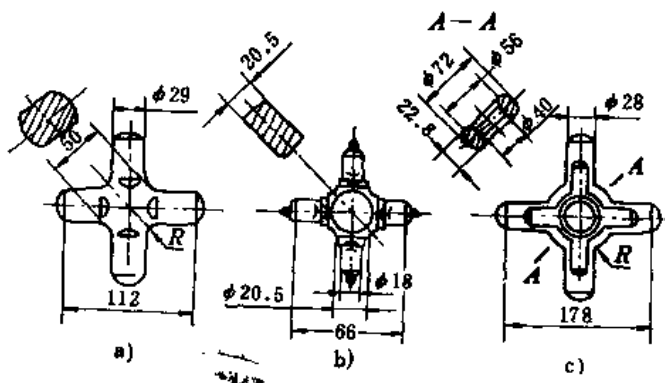


图10-21 常用十字轴的形状

十字轴属于典型的枝芽类锻件, 目前, 国内仍普遍采用开式模锻和胎模锻工艺生产。这两种工艺过程都存在飞边金属损耗大、锻件机械加工余量大和公差大的缺点, 因而材料利用率低。此外, 锻件的质量也不易保证。该件采用闭塞式锻造方法生产是最佳的成形方案。图10-22是用该法生产十字轴的一种模具结构。该模具主要有底座、模具、压模、导向和液压缸五部分组成, 在通用单动压力机上使用。其工作过程是: 首先由液压缸12将上、下模2、

4 压靠, 再由液压缸10推动斜楔 6 将上、下模锁紧, 然后由压力机的滑块带动凸模16下行, 使坯料变形。

以某厂生产的 EQ240 十字轴为例, 采用开式模锻生产时, 锻件重 1.70 kg, 坯料重 2.36 kg; 改为闭塞式锻造后, 锻件重 1.60 kg, 坯料重 1.70 kg, 且锻件表面质量有显著提高, 十字轴的正交性好, 机械加工成品率高, 扭转疲劳寿命指标平均提高 2 ~ 3 倍。

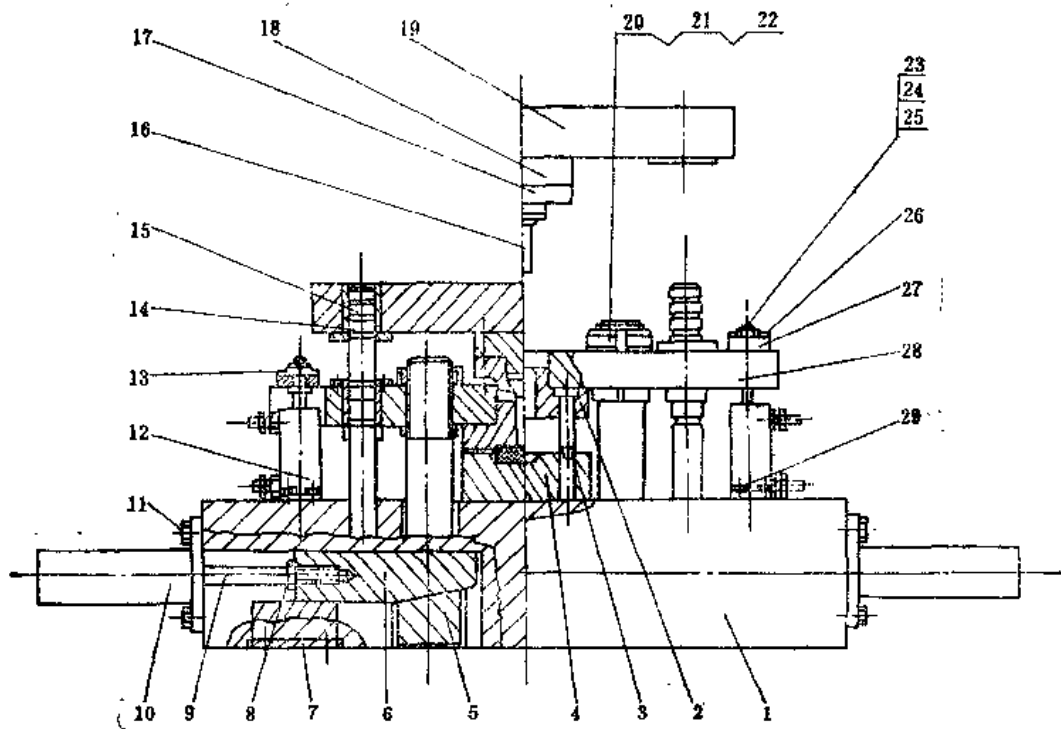


图10-22 十字轴闭塞式锻造模具结构

1—下模座 2—上模 3—小导柱 4—下模 5—横梁 6—斜楔 7—导向块 8—拼紧螺母 9—活塞杆 10—水平液压缸 11—螺栓 12—上、下液压缸 13、14—铜套 15—导柱 16—凸模 17—压模套 18—凸模底座 19—凸模底板 20—拉杆 21—拼紧螺母 22—调节螺母 23—螺母 24—小螺母 25—上、下活塞杆 26、29—螺栓 27—支撑块 28—压模板

第十一章 高合金钢和有色金属的锻造特点

第一节 高合金钢的分类和锻造特点

高合金钢的合金元素含量多，组织较复杂，再结晶温度高，变形抗力大，塑性较低，因而锻件的质量难以控制。

一、高合金钢的分类

高合金钢可以从不同角度分类，为了便于说明各类钢的锻造特点，习惯地将高合金钢按基体组织分为五类，见表11-1。

表11-1 高合金钢按基体组织分类

序 号	基体组织类别	常用高合金钢钢号举例
1	铁 素 体	Cr17、Cr28、Cr25A15、0Cr13、Cr25SiAl
2	珠 光 体	45Mn2、60Si2、GCr15、GCr9
3	马 氏 体	Cr17Ni2、2Cr13、3Cr13、4Cr13
4	奥 氏 体	40Mn18Cr3、50Mn18Cr4、4Cr14Ni14W2Mo、1Cr18Ni9Ti
5	莱氏体（具有一次共晶碳化物）	W18Cr4V、W9Cr4V2、Cr12MoV、Cr12

二、高合金钢的锻造特点

1. 高合金钢的相组成和再结晶特点

(1) 组织的多相性 在不同的温度下所遇到的相有下列几种：

- 1) 具有较高塑性的均匀相，例如奥氏体固溶体。
- 2) 能使材料强化且使塑性下降不多的相，例如弥散的碳化物、金属间化合物等。
- 3) 能使材料塑性剧烈下降的脆性相、非金属夹杂物及粗大的析出相，如奥氏体钢中的 α 相及铁素体钢中的 γ 相。
- 4) 在晶界上呈封闭骨架状、块状和粗针状引起脆性状态的相，如高速钢中的共晶碳化物。

5) 低熔点的相，如硫化铁和铁的共晶体。

对于同一种高合金钢，并不是以上几种相同时存在，而是前三种相比较常见。

(2) 再结晶温度高，再结晶速度低 合金元素的加入，特别是复杂相的形成，对基体金属原子的扩散起阻碍作用，因而提高了再结晶温度，减慢了再结晶速度。

2. 高合金钢的加热特点和锻造温度范围

与碳钢相比，高合金钢的加热和锻造温度范围有以下特点：

(1) 导热系数低，需采用预热 高合金钢内含有大量的元素，它们破坏了钢内部原子排列的规则性，使热传导困难，所以高合金钢的导热系数较碳钢低得多。图11-1为45钢和4Cr-14Ni14W2Mo钢热传导能力对比情况。由图可见，在室温时，两者相差2.5倍，当温度升高时，两者的差距逐渐减小。因低温下导热系数低，而且塑性也较低，加热速度高时，因温度

应力大易引起开裂（特别是大尺寸的钢锭），所以加热高合金钢时需进行预热。冷锭装炉时，炉温应较低，且升温不能太快。对于钢坯，由于塑性较钢锭高，则升温可以快一些。

（2）锻造温度范围窄 高温时，在高合金钢晶界处易出现低熔点物质，且对某些奥氏体钢在高温下会形成 α 相，对有些铁素体钢晶粒则有过分长大的危险。因此，高合金钢的始锻温度一般比碳钢低，但终锻温度却比碳钢高，这是因为高合金钢的再结晶温度比碳钢高，变形抗力高，且塑性低，不允许终锻温度过低。所以，高合金钢锻造温度范围较碳钢的窄，一般碳钢的锻造温度范围为350~400℃，而有些高合金钢只有100~200℃。

3. 高合金钢的锻造性能

（1）变形抗力大，硬化倾向性大 高合金钢在锻造温度下的变形抗力比普通合金钢高好几倍，对于高温合金来说竟高达5~8倍，而且随着变形程度的增加，变形抗力显著增大，即所谓硬化倾向性大。另外，高速变形比低速变形时的变形抗力要高得多。

（2）塑性低 碳素结构钢在锻造温度范围内，塑性相当高，锻粗所允许的变形程度仅由设备能力限制，而对于某些高合金钢，变形量过大就会产生裂纹，例如某些耐热钢，允许的锻粗变形量为60%，而有些高温合金，仅允许40%。

4. 高合金钢锻造时的常见问题

对于不同牌号的高合金钢，由于其成分和使用要求不同，在锻造时（除了都要求不产生裂纹外）要重点解决的问题也不同。例如，对于高速钢，锻造时要重点解决碳化物不均匀性问题以提高刀具的寿命。对于Cr12MoV等高铬模具钢，除了与高速钢有类似的要求外，有时还要求一定的纤维方向。对于护环钢主要是通过变形强化解决提高强度（在残余应力不超过许可值的条件下）的问题。对于奥氏体不锈钢和耐热钢，特别是高温合金，则要求避免出现粗大晶粒。对于铁素体钢，除了有类似的要求外，还要避免在清理表面缺陷时产生裂纹。

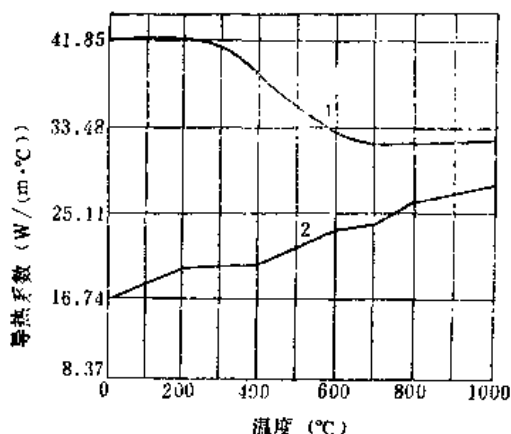


图11-1 碳钢和奥氏体耐热钢的导热系数
1—45钢 2—4Cr14Ni14W2Mo

第二节 高速钢的锻造

一、对高速钢使用性能的要求

高速钢主要用于制造切削刀具。这类刀具除了要求高硬度、高耐磨性外，还要求在500~600℃时具有红硬性及足够的韧性。这类钢在适当淬火、回火热处理后的硬度一般高于63HRC，高的可达68~70HRC，并且在600℃左右仍然保持63~65HRC的高硬度。高速钢之所以具有这种优越性能，是由于钢中加入了大量的碳和多种合金元素，如钨、铬、钒、钼等。

我国常用的高速钢有W18Cr4V、W12Cr4V4Mo、W9Cr4V2、W9Cr4V、W6Mo5Cr4V2、W6Mo5V5Cr4SiNb等。

二、高速钢的碳化物偏析及其对性能的影响

1. 碳化物在高速钢中的作用

高速钢中含有大量的合金元素，如钨、钼、钒、钽等，这些元素能和碳形成稳定的碳化物。部分碳化物在淬火加热时溶解于奥氏体中，淬火后被固定在马氏体组织内，提高了钢的软化温度，使钢有更高的热稳定性。在随后的回火过程中，这部分碳化物还使高速钢的硬度进一步提高。部分未溶解到奥氏体中的碳化物，使金属难于发生塑性变形，从而保证高速钢刀具在繁重的工作条件下能保持精确的几何形状和尺寸。

2. 高速钢的碳化物偏析

高速钢的铸态组织，是由鱼骨状的共晶莱氏体（合金碳化物与细条状奥氏体的混合物）和奥氏体的转变产物（托氏体和马氏体）组成。在钢锭里，越往锭心，晶粒外层莱氏体组织越厚，碳化物数量越多，晶粒越粗大。由此可见，高速钢钢锭的组织 and 化学成分是不均匀的，这种碳化物的不均匀性通常叫做碳化物偏析。钢锭越大，碳化物偏析越严重。由于块状和网状碳化物的存在，给锻造和热处理带来困难，并大大缩短了刀具的使用寿命，因此高速钢钢锭必须经过轧制或锻造，破碎碳化物，并使其均匀分布。但由于锻造时变形程度不同，钢中碳化物的破碎程度不同，其分布状况亦有所不同，碳化物可能呈细小颗粒、带状或网状分布。

3. 碳化物偏析对高速钢性能的影响

严重的碳化物偏析对高速钢的加工性能、力学性能和刀具的使用寿命都有不利的影响。

由于成分不均匀，热处理时易造成过热现象；淬火时组织应力增加，易产生开裂及变形。钢中呈网状或带状分布的碳化物，不仅破坏了金属基体的连续性，而且使得淬火后晶粒大小不均匀，降低了钢的强度和韧性。碳化物分布不均匀使高速钢的红硬性和耐磨性降低，缩短了刀具的使用寿命。如果刀具刃口部分分布有网状或块状碳化物，使用时容易发生崩刃或断裂。

4. 高速钢改锻的作用

要充分发挥碳和合金元素在高速钢中的积极作用，必须将粗大的碳化物细化，并使其均匀分布。热处理方法不能改善碳化物偏析，只能通过热轧或锻造的方法才能使粗大的碳化物破碎。高速钢钢锭经开坯和热轧成钢材后，钢中碳化物偏析虽有一定程度的改善，但往往还存在不同程度的带状碳化物。碳化物偏析还与钢材的断面尺寸有关，钢材直径越大，轧制时变形程度就越小，偏析便越严重。显然，对碳化物的均匀性要求较高的工具，轧材是不能满足其使用要求的。一般来说，碳化物偏析 1~3 级者，可以直接制造刀具；超过 3 级者，都需要改锻。经反复锻粗和拔长，使碳化物进一步细化并均匀分布，以达到所要求的偏析等级。

三、高速钢锻造前的加热

1. 锻造温度范围

据有关资料报导^{〔25〕〔75〕}，W18Cr4V 钢在 900~1200℃ 温度范围内，具有较好的塑性和较小的变形抗力，尤其在 1100℃ 塑性和韧性最好。温度高于 1200℃ 后，塑性显著下降，特别是坯料中心部分碳化物偏析较严重，杂质多，熔点低，锻造时易于开裂，所以 W18Cr4V 钢的始锻温度不应高于 1200℃，实际生产中通常采用 1150~1180℃。温度低于 900℃ 后，强度增高，而塑性和韧性都大为降低，锻打时加工硬化严重，变形抗力增大，容易出现裂纹和龟裂，因此终锻温度不应低于 900℃。但终锻温度也不应高于 1000℃，否则由于晶粒长大，使冲击韧性降低，形成很脆的秦状断口。终锻温度也不宜过低，否则，将因钢的变形抗力增大

而难于锻造。所以W18Cr4V钢的终锻温度以取900~950℃为宜。最后平装修光时不应低于850℃。

部分国产高速钢的锻造温度范围见表11-2。

表11-2 部分国产高速钢的锻造温度范围

钢 号	锻 造 温 度 范 围 (°C)			
	钢 锭		环 料	
	始 锻	终 锻	始 锻	终 锻
W18Cr4V	1150~1180	975~1000	1100~1150	900~950
W12Cr4V4Mo	1170~1190	900	1050~1100	900~950
W6Mo5Cr4V2	1100~1150	900~950	1080~1130	900~950
W6Mo5Cr4V2A1	1150~1170		1130~1150	920~950
W9Cr4V2	1170~1190	900	1130~1150	900
W2Mo9Cr4V2	1150~1170		1130~1150	900
W9Cr4V	1170~1190	900	1130~1150	900

注：W18Cr4V、W12Cr4V4Mo、W6Mo5Cr4V2预热温度为800~900℃。

2. 加热规范

高速钢中碳及合金元素含量高，碳化物偏析严重，金属组织不均匀，塑性差，加热时将会产生很大的组织应力。高速钢低温时的导热性比碳钢低得多，随着温度的上升，导热性逐渐升高，因此加热时低温阶段的温度应力特别大。由于组织应力和温度应力大以及塑性特点，一般较多地采用分段加热的方法，使钢内组织转变平稳，内应力尽可能小。加热规范是：冷锭装炉温度通常为600℃。大尺寸坯料的装炉温度为650℃，小尺寸坯料的装炉温度为750~800℃。

钢锭在锻造温度下的保温时间，可按钢锭的直径或边长计算：每10mm直径（或边长）需0.5~1h；坯料的加热时间，可按以下方法确定：预热段预热温度为800~900℃，预热时间一般按1mm/min计算；加热段加热温度为1130~1180℃，加热时间一般按1mm/0.5min左右计算。对于不需要反复锻拔的锻件，加热速度可以快一些；直径小于80mm的坯料可不预热，加热总时间按直径1mm需0.6~1.0min计算。

3. 加热操作要点

1) 坯料在预热炉中预热不得短于规定的时间；小坯料（直径小于 $\phi 60\text{mm}$ 的坯料）可在炉门口预热，但由于炉门口温度不均匀，必须经常调头。

2) 预热好的坯料应从炉门口逐渐向高温区推进，使之逐步升温。第一火以后各火次的加热也应采取逐步深入的方法。坯料应尽量避免火焰的直接喷射。

3) 在保证加热质量的前提下，缩短坯料在高温停留时间，以减少脱碳和氧化，为了减少脱碳和氧化，最好在中性炉气气氛中加热。并且应规定适当的装炉量，坯料应逐个送进和逐个取出。炉内坯料要经常翻动，保证加热均匀。坯料表面达到始锻温度以后要进行保温，使内外温度一致。

4) 由于不同钢厂生产的高速钢存在着成分和组织的差异，直接影响到锻造温度，因此，必须根据不同情况适当修正加热温度。如在锻造时出现的裂纹，其表面粗糙得象开花馒头，则表明温度太高，应适当降低；如裂纹表面光洁，犹如劈开的木材纹路，则表明加热温度不够，应予以适当调高。

5) 高速钢钢锭或坯料加热前一般都要经过退火处理, 消除残余应力, 减少热裂的可能性。经过中间完全冷却的锻件, 重新回炉加热时, 最好也预先进行退火处理, 但对厚度不大的锻件, 可采取延长预热时间的办法来代替。

四、高速钢的锻造方法

钢锭在加热前需消除重皮、发纹、斑疤等表面缺陷, 以免锻造时发展成裂纹。且必须进行退火处理, 以改善铸态组织, 细化晶粒, 消除内应力。轧材的主要缺陷是碳化物不均匀和中心疏松等。

1. 钢锭的开坯

开坯是为了改善钢锭的铸态组织, 使网状碳化物和晶粒得到初步破碎。开坯时的锻比一般为 $K_L = 7 \sim 8$ 。开坯时第一次必须轻打, 打碎钢锭表层的铸态组织, 改善其塑性, 然后加大锤击力量, 才不致产生裂纹。

开坯时常用一般拔长法锻造, 也可采用“走扁方”法进行锻造, 后者破碎碳化物的效果较好。“走扁方”次数最好在二次以上, 打扁时应重锤锻打, 且送进量应小一点, 一般为砧宽的 $\frac{1}{3}$ 左右, 每走一次扁方要转 90° 。开坯时, 常易产生裂纹, 尤其是角裂。出现裂纹后要及时清除, 以免扩大。

2. 钢材的改锻

改锻是为了获得所需形状和尺寸的坯料或锻件, 更重要的是破碎钢材中呈带状或网状的残余碳化物, 并使之均匀分布, 从而提高刀具的内部质量和力学性能。

(1) 变形程度 变形程度的大小直接影响着锻件内碳化物的细化程度和分布情况。实践证明, 拔长比锻粗对改善碳化物分布的效果显著。因此, 对锻坯反复锻拔时, 建议只计算拔长的锻造比。反复锻拔时的总锻造比等于各次拔长时的锻造比之和。

图11-2为碳化物偏析级别与锻比的关系。由图可见, 在锻比小于15时, 随着锻比的增加, 碳化物偏析级别迅速降低; 当锻比为15~25时, 随着锻比的增加, 进一步降低碳化物偏析级别的效果较差; 当锻比大于25时再增大锻比, 效果就很小了。这是因为, 当锻比达到15~25时, 钢中的碳化物已得到相当程度的破碎, 要在已细化的碳化物基础上再次破碎, 自然就比较困难。

生产实践表明, 对需要反复锻拔的锻件, 一般取 $K_{L总} = 5 \sim 14$ 。

(2) 锻造方法

1) 单向锻粗: 对薄饼形的简单零件, 当原材料碳化物偏析程度基本符合产品要求, 或者这种产品对碳化物并无特殊要求时, 可以采用这种方法。它的优点是操作简单, 但对碳化物的破碎作用不大。

2) 单向拔长: 对于长度与直径之比较大的工件, 如原材料碳化物偏析程度基本符合产品要求时, 多采用单向拔长。由于拔长时轴向变形较大, 碳化物沿径向的均匀分布较困难, 因而中心部分改善不大。因此, 锻比过大, 将导致力学性能的异向性, 并易造成碳化物呈带状

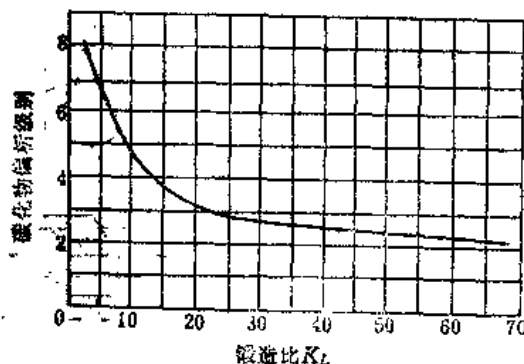


图11-2 碳化物偏析级别与锻比的关系

分布。故单向拔长时锻比取 $2 \sim 4$ 较为合理。

3) 轴向反复锻拔 (图11-3)：即始终沿着坯料的纤维方向进行反复锻拔。它的优点是坯料中心部分的金属不易流到外层来，能保证表层金属的碳化物分布比较细小均匀；锻造时不需改变方向，操作较易掌握。缺点是：中心部分的碳化物偏析改善不大，故坯料边缘与中心部分的碳化物不均匀性相差很大；由于两端面长时间与上下砧面接触，冷却快，拔长时端面易产生裂纹。

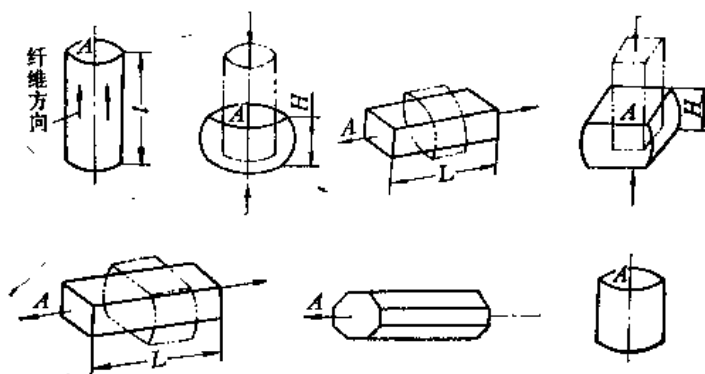


图11-3 轴向反复锻拔二次变形过程示意图

H —锻粗后高度 A —原材料纤维方向的标志, l —坯料长度 L —锻件长度

对于刃口分布在圆周并作圆周运动的刀具，采用这种锻造方法最适宜，它能保证刀具在切削部分具有良好的金属组织和力学性能。

实践证明，反复锻拔 $4 \sim 6$ 次即可达到上述效果。

4) 轴向-径向（十字、双十字）反复锻拔 (图11-4)：它是将原材料锻粗后沿断面中两个相互垂直的方向反复锻拔，最后再沿轴向或横向锻成锻件。如重复一次这一过程就称做双十字锻拔，重复多次，即为多次十字锻拔。图11-4中6a表示十字锻拔后沿纤维方向拔出的锻件，而6b表示十字锻拔后沿纤维方向横向拔出的锻件。这种方法的优点在于坯料与锤头的接触面经常改变，温度不会降低太多，因而端部裂纹不易产生，坯料中心部分相对流动量较大，中

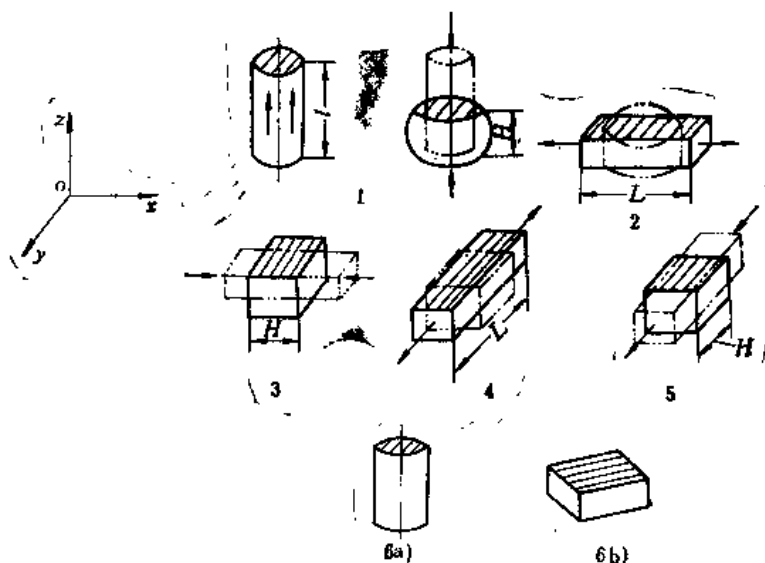


图11-4 轴向-径向十字锻造变形过程示意图

H —锻粗后高度 l —毛坯高度 L —锻件长度

心部分不均匀程度改善较显著。缺点是：同一截面上各部位受打击的机会不一样，使得圆周表面上碳化物级别有差异。另外，要求操作技术较熟练。故此，刃口分布在圆周表层的刀具，不宜采用这种方法。它适用于制造工作部位在中心的工具。

(3) 锻拔次数和锻拔变形量的确定

锻拔次数主要根据锻件对碳化物偏析级别的要求和原材料碳化物偏析等级的差别大小来确定。一般说来，两者级差愈大，要求的锻拔次数愈多。

锻拔次数可参考表11-3确定。

表11-3 锻粗-拔长次数

原材料碳化物 偏析级别	锻件碳化物偏析级别的要求			
	8	4	5	6
	锻粗-拔长次数			
4	4~3			
5	6~5	4~3		
6		6~5	3~2	
7		7~6	5~4	2~2

生产实践表明，锻造对改善钢中碳化物偏析的作用，不仅取决于锻拔次数，而且还取决于锻拔时的工序尺寸，即拔长后的长度 L 和锻粗后的高度 H 。对改善碳化物分布来说，拔长比锻粗作用大，但过大的拔长使得随后的锻粗中易使中心偏移，碳化物不均匀性有所增加；锻粗有助于消除网状和带状组织，但有使碳化物聚集的作用。所以锻粗与拔长的工序尺寸必须选择适当，拔长后长度 L 取边宽的2.5~3倍，锻粗后的高度 H 取锻粗前高度的 $\frac{1}{2}$ 。

3. 锻造操作要点

1) 严格控制锻造温度范围，使变形在规定的温度范围内进行，当温度下降时，应立即返炉；因热效应使温度上升时，应减轻锤击力量或稍停一会，待坯料降至正常温度后再锻打。

2) 严格执行“轻-重-轻”的操作方法，即在1050℃以上轻击，1050~950℃时适当重击，950℃以下轻击，这是因为在过高温下，金属易于过热，强度降低；在过低温度下，钢的塑性下降，重击容易引起锻裂。

3) 操作中应注意温度均匀、变形均匀；锻粗时应勤调头；避免锻歪，以免中心外移，防止产生严重鼓形，否则表面易开裂，为此先将端部“镦粗”后再锻粗；拔长时要四面顺序勤翻转。

4) 拔长时送进量要合适，一般控制在锻件锤击方向高度的0.6~0.8倍。送进量过大就导致十字裂纹的产生，过小则变形不够深透。

5) 倒角时两角要对齐在一条直线上。要轻打，避免重击、连击，否则会使心部拉裂。

6) 锻粗时如发生弯曲应立即校直，校直后不得留有印痕；锻斜或拔歪时应立即对角校正，校正时两角要对齐。

7) 当发现裂纹时，应及时凿去，凿痕要圆滑。

8) 严格控制最后一火的终锻温度，并保证最后一火有足够的变形量。

9) 砧面应平整光洁, 砧面边缘的圆角半径应做得比锻造普通钢材时大些, 以免折迭、裂纹的产生。锻前应将砧块预热到 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ 。

五、锻后冷却和热处理

1. 锻后冷却

由于高速钢导热性差, 冷却过快时, 将使内、外温差很大, 产生很大的温度应力和组织应力, 加上锻造变形时的残余应力等综合作用的结果, 容易产生裂纹。所以必须采取适当的冷却方法, 严格控制冷却速度, 尽力减小冷却时的应力值。其方法如下:

1) 锻件直径或厚度 $\leq 80\text{mm}$ 者, 一般在热灰中冷却, 冷至 100°C 以下方可取出。

2) 锻件直径或厚度 $> 80\text{mm}$ 者, 应随炉冷却; 将锻件放在 $720\sim 750^{\circ}\text{C}$ 的保温炉中随炉缓慢冷却至 650°C , 然后再放在热灰中冷至 100°C 以下取出。

2. 锻后热处理

高速钢锻后应及时进行退火。其目的是: 消除锻后内应力, 降低硬度, 为淬火作好组织上的准备。

一般高速钢的退火温度均选在 $860\sim 880^{\circ}\text{C}$ 范围。钨系高速钢取上限, 钨钼系取下限。退火保温时间一般为 $2\sim 4\text{h}$; 当装炉量较多时, 可延长至 $5\sim 6\text{h}$ 。

高速钢等温退火规范是将锻件加热到 $860\sim 900^{\circ}\text{C}$, 适当保温后冷却到等温温度 $700\sim 750^{\circ}\text{C}$, 在此温度下保温 $1.5\sim 2.0\text{h}$, 然后空气冷却或随炉冷却。高速钢退火时必须装箱, 以防氧化和脱碳。退火后硬度为 $207\sim 255\text{HBS}$, 其组织为索氏体加碳化物。

第三节 不锈钢的锻造

不锈钢在石油、化工、动力机械及航空工业中得到了广泛的应用。它与一般碳钢相比有许多不同特点: 导热系数低, 锻造温度范围窄, 过热敏感性强, 高温下变形抗力大, 塑性低等。

一、不锈钢的分类

根据正火后的组织, 不锈钢分为铁素体型、奥氏体型和马氏体型三类, 在某些文献资料中将不锈钢分为五类 (增加了奥氏体复相不锈钢和沉淀硬化型不锈钢)。

(1) 铁素体不锈钢 含有 $16\%\sim 30\%$ 的铬和微量的碳, 基体组织为铁素体。属于这一类的钢有Cr17、Cr25、Cr25Ti、Cr28等。这类钢的基体在加热和冷却时始终保持 $\alpha\text{-Fe}$ 结构。

(2) 奥氏体不锈钢 含有 $12\%\sim 30\%$ 的铬、 $6\%\sim 12\%$ 的镍及锰, 含碳量小于 0.2% , 基体组织为奥氏体。目前应用最广的是18-8型镍铬奥氏体不锈钢, 0Cr18Ni9、1Cr18Ni9、2Cr18Ni9和1Cr18Ni9Ti。这类钢的基体始终保持 $\gamma\text{-Fe}$ 结构。

(3) 马氏体不锈钢 含有 $12\%\sim 18\%$ 的铬及 $0.1\%\sim 0.4\%$ 的碳 (个别钢种达 1%), 可淬火成马氏体。属于这类钢的有1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13、9Cr18等。它的退火组织是在 $\alpha\text{-Fe}$ 的基体上分布着碳化物, 加热到高温时变成奥氏体组织, 其组织的淬透性大, 自淬火温度空冷至室温可获得马氏体组织。

不锈钢中的主要合金元素有铬、镍、钛、铌、锰等。常用不锈钢化学成分和各种合金元素在不锈钢中的作用参考有关技术资料[52][75]。

二、不锈钢的可锻性

不锈钢可以在不同的锻压设备上,用各种锻造方法使之成形。锻造不锈钢比锻造合金结构钢困难。这是因为不锈钢在高温下的可锻性比合金结构钢差;其次,某些不锈钢,如奥氏体-铁素体型双相不锈钢,加热到锻造温度时,晶界上仍有第二相(α 铁素体)存在,由于它与基体 γ 相的力学性能和再结晶条件不同,使不锈钢的工艺塑性大为下降。这是因为在热锻奥氏体-铁素体双相不锈钢时,变形主要集中于变形抗力较小的铁素体相, α 相和 γ 相界面附近的变形分布极不均匀,由此产生了较大的附加应力,当此应力超过了两相间结合力时,便沿两相界面产生裂纹。图11-5表明,当 α 相含量在20%~40%范围时,铬镍奥氏体不锈钢的高温塑性最差。为了保证具有适当的塑性,必须对原材料 α 相的含量加以限制。生产上一般将奥氏体不锈钢原材料 α 相含量限制在5%~12%以下。

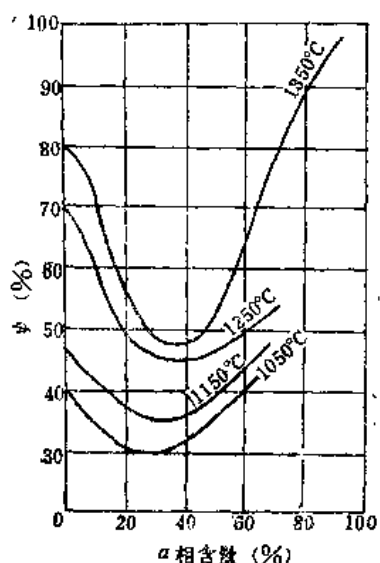


图11-5 铬镍奥氏体不锈钢的高温塑性与其 α 相含量的关系

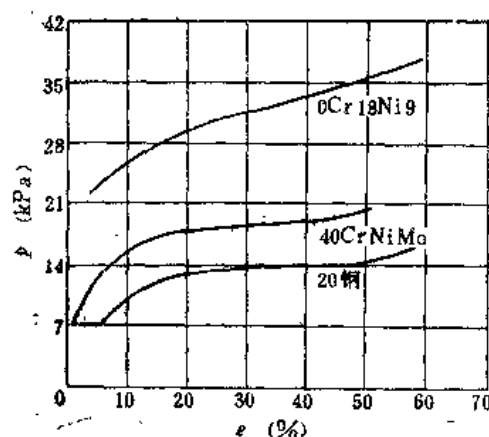


图11-6 三种钢在1000°C时单位流动压力与锻粗变形程度的关系

图11-6示出20钢、40CrNiMo合金结构钢和0Cr18Ni9不锈钢在1000°C时的单位流动压力与锻粗变形程度的关系。由图可以看出,在1000°C和大于6%的任何变形量下,锻造0Cr18Ni9不锈钢所需的压力,至少是20钢所需压力的两倍,比锻造40CrNiMo合金钢所需的压力约大60%。由于不锈钢的高温变形抗力比较大,因此,所需设备吨位较锻造普通钢材时约大 $\frac{1}{3}$;

在同一台锤上锻造尺寸,形状相同的锻件,锻造不锈钢所需的锤击次数是锻造碳钢的 $\frac{4}{3}$ ~ $\frac{3}{2}$ 倍。必须指出,不同类型不锈钢的可锻性是不同的,铬镍奥氏体不锈钢,如1Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni11Nb等可锻性较差,1Cr13、2Cr13、3Cr13、Cr17Ni12、Cr17等可锻性较好,0Cr18Ni9、1Cr18Ni9等奥氏体不锈钢的可锻性,在上两者之间。

三、各类不锈钢的锻造特点

1. 铁素体不锈钢的锻造特点

锻造加热时,铁素体不锈钢的晶粒特别容易长大(图11-7)。由于这类钢在加热和冷却过程中无同素异构转变,不能通过热处理来细化晶粒。因此,这类钢的加热温度不宜过高,一

般均应低于1150℃。为了防止晶粒粗大使钢变脆,其终锻温度及变形量也要严格控制,终锻温度一般不应高于800℃,但也不应低于700℃,一般取750℃,变形量应不低于12%~20%。该类钢在450℃左右保持的时间过长,会出现所谓的475℃脆性。因此,锻后必须快冷(空冷或水冷),以便很快地经过475℃脆性温度范围。

2. 马氏体不锈钢的锻造特点

马氏体不锈钢加热温度过高时,有 δ 铁素体形成,锻造时容易开裂。 δ 铁素体一般是在

1100~1250℃范围内形成。加热时要注意不超过这个温度,通常加热温度 $\leq 1150^\circ\text{C}$ 。表面脱碳会促使铁素体形成,因此,加热时要注意使表面脱碳减至最小。马氏体不锈钢的终锻温度受其同素异构转变温度(这一转变大约从810℃开始)的限制。但是生产上终锻温度多取900℃或920℃。因为终锻温度低了,不仅变形困难,而且内应力也要增大。

马氏体不锈钢对冷却速度特别敏感。锻后空冷出现马氏体,内应力较大,容易产生裂纹。这类钢锻后应缓冷至600℃左右,然后空冷,在模锻过程中,要防止冷却模具的介质(如水)喷到锻件上引起开裂。

马氏体不锈钢锻件锻后要及时进行退火,消除内应力。以免在以后酸洗或存放过程中产生开裂。退火温度一般为750~800℃,保温1~3h,缓冷至600℃后空冷。

马氏体不锈钢对表面缺陷也很敏感,坯料表面上存在的划痕等缺陷,都会在锻造过程中扩展成严重裂缝。

3. 奥氏体不锈钢的锻造特点

奥氏体不锈钢比马氏体不锈钢难锻,但对冷却速度和表面缺陷不敏感。该类钢在加热过程中无同素异构转变,加热温度过高,晶粒剧烈长大;此外,双相不锈钢中的 α 相也要增多。对1Cr18Ni9Ti钢进行的试验表明,加热温度超过1200℃以后, α 相的数量增加较快。因此,奥氏体不锈钢的始锻温度一般都不超过1200℃。

奥氏体不锈钢的终锻温度不宜过低,否则变形抗力增大,而且在900~700℃区间缓冷时有 σ 相析出,使钢的塑性降低,锻造容易开裂。另外,该类钢在800~550℃缓冷时有铬的碳化物沿晶界析出,使晶界区贫铬,降低合金的抗晶间的腐蚀能力,所以奥氏体不锈钢的终锻温度一般取900℃。锻后应快冷,迅速通过 σ 相和碳化物析出的温度范围。

奥氏体不锈钢无同素异构转变,因此锻造加热温度和变形程度对锻件晶粒度有很大影响,为了获得细小而均匀的晶粒组织,最后一火次应有足够的变形量。

奥氏体不锈钢应在微氧化气氛和中性气氛中加热,若在还原性气氛中加热,要发生渗碳现象,并引起形成铬的碳化物,使晶界区贫铬,降低了抗晶间腐蚀能力。

为了提高抗晶间腐蚀能力,使锻件在变形和冷却过程中析出的碳化物溶解到奥氏体中,锻后应进行固溶处理。

表11-4列出了常用不锈钢的锻造温度范围及其加热和冷却方法。

四、锻造不锈钢的注意事项

1. 下料

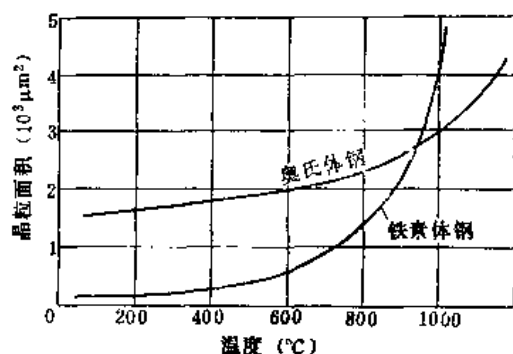


图11-7 加热温度对不锈钢晶粒大小的影响

表11-4 不锈钢锻造温度范围及加热、冷却方法

组织类别	钢 号	锻造温度 (°C)		加 热	冷 却
		始 锻	终 锻		
铁素体钢	Cr17	1050~1100	750~800	缓慢加热至850°C迅速加热至始锻温度	空 冷
	Cr28	950~1000	720~800		空 冷
铁素体-	Cr13	1150	850~900		成堆空冷
马氏体钢	Cr17Ni2	1100~1150	950		灰(砂)冷
马氏体钢	2Cr13	1150	925		成堆空冷
	3Cr13	1150	925		灰冷或炉冷
	4Cr13	1100	925		
奥氏体钢	0Cr18Ni9	1100~1150	900		空 冷
	1Cr18Ni9Ti	1100~1150	900		
	1Cr18Ni9Nb	1100~1150	900		
	1Cr18Ni9	1150~1200	900		
	2Cr18Ni9	1150~1200	900		
	Cr23Ni18	1100~1150	900		

大于 $\phi 40\text{mm}$ 的棒材多用圆盘锯切割, 较小直径的棒料可用砂轮切割机切割。剪切最经济, 但剪切时切口有缺陷。当要求精度较高、表面粗糙度较低时, 可用车床下料。

2. 加热

锻前加热可用电炉, 也可用火焰炉, 生产中多用火焰炉。对于 $\phi 100\text{mm}$ 以上的坯料, 均采用两段加热制度; 在预热段, 保持 $800\sim 850^\circ\text{C}$ 的炉温, 以减慢加热速度; 在加热和均热阶段, 保持较高炉温(始锻温度上限), 以迅速加热到始锻温度。常用不锈钢钢材的加热规范见表11-5。表中的加热时间下限为坯料所需的最短加热时间, 其上限为坯料在规定炉温下允许的最长加热时间。

表11-5 不锈钢钢材的加热规范

钢 号	直 径 (mm)	预热温度 (°C)	预热时间 (min/mm)	加热温度 (°C)	加热时间 (min/mm)
1Cr13, 2Cr13	<100	—	—	1150~1180	0.35~9
3Cr13, 4Cr13	≥ 100	800~850	0.25	1150~1180	0.2~0.8
Cr17Ni2, 1Cr18Ni9Ti	<100	—	—	1150~1200	0.5~1.5
1Cr11Ni2W2MoVA	≥ 100	800~850	0.35	1150~1200	0.2~1.2

注: 本表适用于室式火焰加热炉; 炉温不超过加热(预热)温度上限; 坯料在炉内排列相距为1/2坯料直径。

对于精密锻件或小余量的重要锻件, 加热前应在坯料表面上涂一层玻璃润滑剂, 然后再加热。

玻璃润滑剂的配制, 一般按重量百分比计算, 即57%的玻璃成分, 3%的粘土和40%的水。

3. 模锻

模锻前, 模具应预热至 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。不锈钢粘性大, 易粘模。每次锻击之前, 模具必须润滑。

模锻形状复杂的锻件或带肋的锻件时, 应采用多次锻击, 使之成形比较容易。

4. 切边

各类不锈钢最好都采用热切边。热切边一般应在不低于 800°C 的温度下进行。对于很薄的叶片锻件, 特别是马氏体不锈钢薄锻件, 允许在退火之后冷切边。

第四节 铝合金的锻造

铝合金具有比强度高, 导电性和导热性好、抗腐蚀等优点, 因而在现代工业中, 特别是在航空工业中得到了广泛的应用。

常用变形铝合金有防锈铝合金(如LF21等)、锻铝合金(如LD5、LD10等)、硬铝合金(如LY12等)、超硬铝合金(如LC4等)。变形铝合金的主要合金元素有铜、镁、硅、锰、镍、锌、钛、锆等。铜、镁和锌可与铝形成化合物(强化相), 有使铝合金强化的作用; 锰可以提高铝合金的抗腐蚀能力; 硅和铁是常存在的有害杂质, 它们使合金的塑性和抗蚀性降低。常用的变形铝合金的加工产品分组、代号及化学成分参见有关技术资料[52][78]。

一、铝合金的可锻性

几乎所有变形用的铝合金都有较好的塑性。低碳钢可以锻出的各种形状锻件, 用铝合金都可以锻出来。铝合金可以自由锻、模锻和扩孔等。但是, 一般说来, 由于铝合金的流动性差, 在金属流动量相同的情况下, 比低碳钢需多消耗约30%的能量。

铝合金的塑性受合金成分和变形温度的影响较大, 某些高强度铝合金的塑性还明显地与变形速度有关。图11-8是三种铝合金的塑性图。由图可见, 合金化程度低的变形铝合金如LF21防锈铝, 在 $300\sim 500^{\circ}\text{C}$ 温度范围内都具有很高的塑性, 由静变形改为动变形时其塑性变化不大。因此, 这类合金无论在压力机上或锤上锻造, 其变形程度均可达到80%以上。合金化程度较高的锻铝如LD5, 在 $350\sim 500^{\circ}\text{C}$ 范围内具有较高的塑性, 在锤上锻造变形程度可达50%~65%, 压力机上锻造可达80%以上, 而合金化程度高的超硬铝LC4, 在锤上锻造时的温度范围为 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$, 允许变形程度为30%~60%, 在压力机上锻造时温度范围为 $350\sim 450^{\circ}\text{C}$, 允许变形程度为65%~85%。

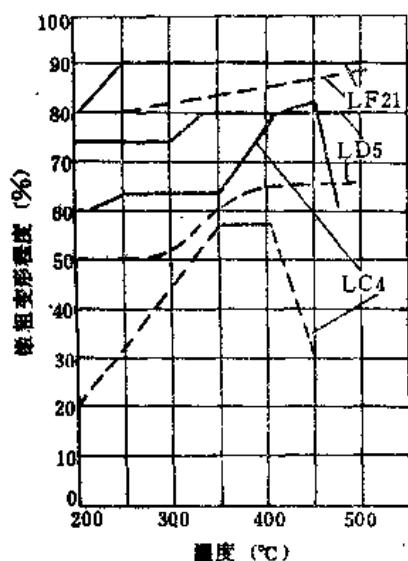


图11-8 三种铝合金的塑性图

——静变形 - - - -动变形

图11-9为LF21、LD5和LC4三种铝合金的单位流动压力曲线。曲线表明, LF21和LD5在 300°C 终锻时, 随变形程度增大, 合金的流动压力曲线保持水平, 这说明加工硬化和再结晶软化相互抵消, 因此这两种合金按塑性图选定的终锻温度, 可保证合金处于完全热变形状

态。超硬铝 LC4 有所不同, 在 350℃ 单位压力曲线随变形程度增大而略有升高, 这说明该合金在 350℃ 终锻时有加工硬化存在, 即不能保证完全热变形; 在 400℃ 时, 当变形程度超过 30% 后, 单位压力随变形程度增加而有所下降。这是因为热效应升温引起了局部软化。由此可见, 在高温下结束锻造时有较大的变形。

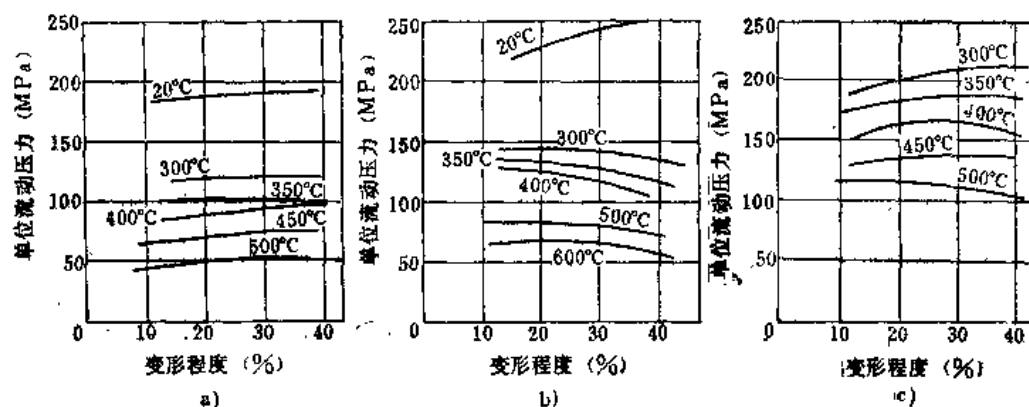


图11-9 三种铝合金的单位流动压力曲线
a)LF21 b)LD5 c)LC4

二、锻造温度范围

铝合金的锻造温度间隔比较窄, 一般在 150℃ 左右。某些高强度铝合金锻造温度区间甚至比 100℃ 还窄。例如 LC4 超硬铝, 其主要强化相是 $MgZn_2$ 和 Al_2CuMg 化合物, Al 与 $MgZn$ 形成共晶, 其熔化温度是 470℃。因此, 其始锻温度一般为 430℃。另外, LC4 合金有较高的再结晶温度, 终锻温度一般为 350℃。这样, LC4 合金的锻造温度范围就只有 80℃ 了。

表 11-6 列出常用变形铝合金的锻造温度范围。

表 11-6 变形铝合金的锻造温度范围

合金牌号	温度范围(°C)	合金牌号	温度范围(°C)
L1、L2、L3	470~380	LD5 铸造状态	450~350
LF2	510~380	LD5 变形状态	500~350
LF21	510~380	LD6	480~350
LF3	475~380	LD10 铸造状态	450~350
LY2	450~350	LD10 变形状态	450~350
LY11	500~380	LC4 铸造状态	430~350
LY12	460~380	LC4 变形状态	430~350
LD2	500~380	LC5 铸造状态	425~350
LD7	475~380	LC5 变形状态	425~350

尽管铝合金的锻造温度范围较窄, 但是, 模锻过程的时间却无需加以限制。因为对于铝合金的锻造温度来说, 模具的预热温度是比较高的。而且, 由于铝合金的变形热效应较大, 合金在锻造时的温度还有所增加。

三、锻模设计特点

铝锻件锻模的设计原则与钢锻件的相同,但由于铝合金锻造工艺性能的特点,与后者也有一些差别。由于铝合金锻造温度范围较窄,流动性较差,故多采用单模膛锻模,形状复杂的锻件多用自由锻制坯。终锻模膛加放的收缩率,当锻模工作温度低于250℃时,取1%;锻模工作温度超过300℃的取0.8%。铝锻件锻模的飞边槽桥部高度和圆角半径,应比钢锻件的大30%左右。模膛应具有很低的表面粗糙度,一般应抛光到 $R_a 0.2 \sim 0.1 \mu m$ 。锻模材料常用5CrMnMo或5CrNiMo,热处理至硬度36~40HRC,比模锻钢件锻模的热处理硬度41~45HRC稍低。

四、锻造工艺过程

1. 下料

铝合金锻件用坯料有铸锭和挤压棒材或型材。铸锭用于制造自由锻件和各向异性较小的模锻件。大型模锻件都采用铸锭经锻造后的锻坯。用于锻造的铸锭必须作均匀化处理,以改善塑性。

对于挤压棒材,模锻前必须清除表层粗晶环、成层等缺陷。铝合金主要用锯床、车床和铣床下料。

2. 加热

铝合金坯料多采用电阻炉加热,也可用煤气炉或油炉,但是油的含硫量要严加控制,以免硫渗入晶界引起裂纹。铝合金有良好的导热性,坯料不需要预热,可直接在高温下装炉。为了保证强化相的充分溶解,其加热时间比钢的加热时间长。直径小于50mm的坯料,加热时间按1mm/1.5min计算;直径大于100mm的坯料,按1mm/2min计算,直径在50~100mm范围内的坯料,按下式计算:

$$\tau = 1.5 + 0.01(d - 50)$$

式中 τ ——每毫米直径或厚度的加热时间(min),

d ——坯料直径或厚度(mm)。

3. 模锻

铝合金既可在锤上锻造也可在压力机上锻造。但是为了增大允许的变形程度,降低变形抗力和改善合金的流动性,提高锻件的质量,选用压力机锻造铝合金比锤更好些,对于大型铝合金锻件尤为如此。为了避免在再结晶时形成粗晶,终锻温度下的变形程度应控制在小于或大于12%~15%。此外,变形程度过大和变形剧烈不均,锻造次数过多,也易产生粗晶。在锤上模锻时,开始锤击要轻,随后逐渐加重。在压力机上模锻时,通常都要采用预锻和终锻两道工序。因为,当压力机一次行程的变形程度大于40%时,大量金属挤入飞边槽,使模膛不能充满。两道工序可以用一套模具,也可以用两套不相同的模具。在两道工序之间要进行中间切除飞边,酸洗并清除表面缺陷。模锻铝合金时模具应预热到250~400℃。通常采用水与胶状石墨的混合物作润滑剂,也有采用机油加石墨作润滑剂的。

4. 切边

除超硬铝外,铝锻件都在冷态下切边,对于大型模锻件,则用带锯切除飞边,连皮用冲头冲切或用机械加工切除。

5. 冷却

锻后的锻件,一般在空气中冷却,但为了及时切除飞边,也可在水中冷却。

6. 清理

在模锻工序之间,终锻以后以及在检验之前,铝合金模锻件都要进行酸洗,酸洗可以清除残余的润滑剂和氧化薄膜,使缺陷清晰地显示出来。其腐蚀程序参见有关技术资料[49][52]。

7. 修伤

由于铝合金在高温下很软,粘性大,容易产生各种表面缺陷。模锻之前坯料表面上的缺陷都必须清除干净。否则缺陷进一步扩大,会引起锻件报废。

8. 退火

铝合金锻件主要采用高温退火(又称再结晶退火)和完全退火。目前逐步采用快速退火新工艺代替老的高温退火工艺。对于热处理强化的锻件,应采用完全退火工艺。

第五节 铜合金的锻造

铜合金具有良好的塑性和强度、耐磨性和导电导热性,特别是在空气和海水中耐腐蚀性好。它在电力、仪表、船舶等工业部门中得到了广泛的应用。

铜合金按所含合金元素不同分为黄铜、青铜和白铜。以锌作为主要添加元素的铜合金称为黄铜;以锡或铝、硅、铍等作为主要添加元素的铜合金称为青铜;铜镍合金称为白铜。铜合金的组别、牌号及其主要化学成分参见有关技术资料。

一、铜合金的可锻性

多数铜合金在室温和高温下具有良好的塑性,可以顺利地进行锻造,即使在具有拉应力存在条件下变形,仍具有足够的塑性。但是,有少数铜合金,例如,含锡较高的锡磷青铜(如QSn7-0.2)和含铅较高的铅黄铜(如HPb59-1、HPb64-2)塑性较低,对拉应力较敏感。在静拉伸应力状态下变形时,QSn7-0.2在室温呈单相 α 固溶体,具有很高的塑性,可以进行冷变形,但在高温下塑性很低(见图11-10),其原因是在高温下有低熔点的($\alpha + \delta + \text{Cu}_3\text{P}$)共晶体存在,需在三向压应力状态下变形。

多数铜合金对变形速度并不敏感,可在压力机或锤上进行锻造,但以在压力机上锻造为宜。但含铅量较高的铅黄铜对变形速度很敏感,当进行动拉伸变形时,塑性明显下降。该类合金应在压力机上锻造。

锡磷青铜和锰青铜锻造时,热效应现象较显著,若变形速度过快,则由于热效应的作用,容易产生过热,甚至过烧,在实际生产中应予以注意。

二、锻造温度范围

如前所述,多数铜合金在高温和室温下均具有很好的塑性,但是加热温度过高时,晶粒急剧长大,使塑性降低,故其加热温度均不超过900℃。当变形温度低于650℃时,可能进入中温脆性区(见图11-11、图11-12),并且变形抗力迅速增大。因此,所有铜合金的锻造温度范围都不超过100~200℃,其中铅黄铜HPb59-1、铝黄铜HA177-2、HA160-1-1、HA159-3-2及锡青铜QSn7-0.2、QSn6.5-0.4等合金的锻造温度范围尚不足100℃。

表11-7列出常用铜合金的锻造温度范围。

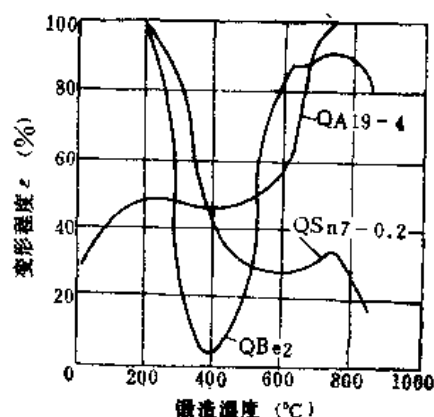


图11-10 青铜的塑性图

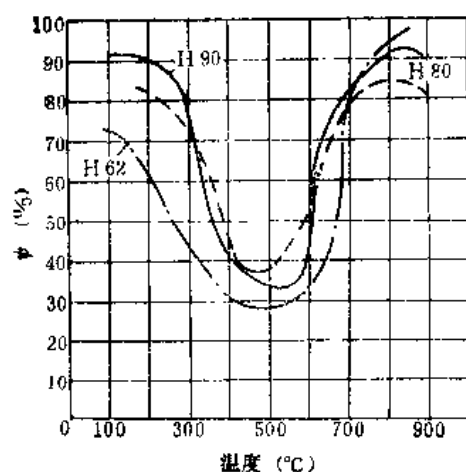


图11-11 几种普通黄铜的塑性图

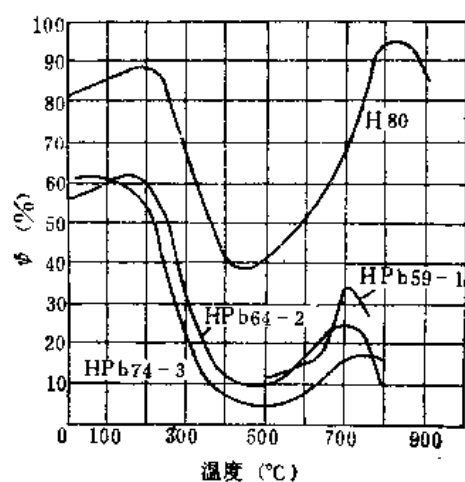


图11-12 几种铅黄铜的塑性图

表11-7 铜及铜合金的锻造温度范围

合 金 牌 号	锻造温度范围(℃)	合 金 牌 号	锻造温度范围(℃)
T1、T2、T3、T4	900~650	HSi65-1.5-3	780~650
H90	900~700	HNi65-5	840~650
H80	830~700	QA15	830~700
H70	832~700	QA17	840~700
H68	820~650	QA19-2	900~700
H62	820~650	QA19-4	900~700
H59	820~650	QA110-3-1.5	850~700
HPb60-1	800~650	QA110-4-4	900~750
HPb59-1	730~650	QSi1-3	880~700
HSn60-1	820~650	QSi3-1	800~630
HSn62-1	820~650	QSn7-0.2	780~700
HMn58-2	800~650	QSn6.5-0.4	740~650
HFe59-1-1	800~650	QSn6.5-0.1	790~660
HA177-2	760~670	QMn3-1	800~630
HA160-1-1	750~650	QCd1	850~650
HA159-3-2	730~650	QCr0.5	870~870
HSi80-3	800~700	QBe2	800~600

由图11-11、图11-12可以看到，铜合金在250~650℃之间存在一个中温脆性区，合金的塑性显著降低，很容易锻裂。其原因是合金中有铅、铋等杂质存在，它们在 α 固溶体中的溶解度极小，与铜形成Cu-Pb、Cu-Bi低熔点的共晶体，呈网状分布于 α 固溶体的晶界上，从而削弱了 α 晶粒之间的联系，当加热到500℃以上时，发生 $\alpha \rightarrow \alpha + \beta$ 转变，铅和铋溶于 β 固溶体中，于是塑性提高。由于中温脆性区的存在，很多铜合金的 $\alpha + \beta$ 双相区的塑性比 α 单相区的塑性高。因此，锻造变形主要在 $\alpha + \beta$ 双相区的温度范围内进行。

铜合金的终锻温度也不宜过高，否则锻后晶粒会长大，而且，铜合金晶粒长大后不能像碳钢那样通过热处理方法来细化，因此，选用锻造温度时应根据变形工作量的大小和具体的

变形条件来确定,例如QA19-4铝青铜胎模锻时较自由锻时散热快,所以胎模锻时取900℃始锻,而自由锻取850℃始锻。

三、锻造工艺过程

1. 下料

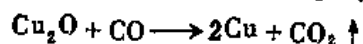
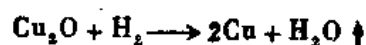
铜合金锻造用原材料有铸锭和挤压棒材。锻造前,对铜锭要进行均匀化退火,对挤压棒材要进行退火,以改善塑性。对铜锭表面的裂纹、气泡等缺陷应打磨干净或表面扒皮(车削)。

铜合金棒材常用锯切和车床切割下料。

2. 加热

铜合金最好用电阻炉加热,也可用火焰炉加热。在电加热时用热电偶控制温度是较准确的,而在火焰炉内加热时,炉温测量误差较大。

铜合金的始锻温度比钢低,而用火焰炉加热因需调整喷嘴在很小的燃烧功率下进行低温燃烧,较难保证做到燃烧稳定,故最好采用低温烧嘴燃烧,火焰加热炉的炉气成分最好呈中性,但在普通火焰炉中很难获得中性气氛,往往呈微氧化或微还原性气氛,对于在高温下极易氧化并且氧化膜不致密的铜合金,如无氧铜、低锌黄铜、铝青铜、锡青铜和白铜等,采用氧化性气氛加热是不合适的,它们应在还原性气氛中加热,含氧量较高的铜合金,不适宜在还原性气氛中加热。因为在含有 H_2 、 CO 、 CH_4 等气体的还原性气氛中加热到700℃以上温度时,这些气体会向金属内部扩散,与 Cu_2O 反应生成不溶于铜的水蒸气或 CO_2 ,其反应式如下:



生成的气体具有一定的压力,力图从金属内部逸出,结果在金属内部形成微裂纹,使合金变脆。这种现象叫做“氢气病”。紫铜在还原性气氛中加热,很容易得“氢气病”;但若在氧化性气氛中加热,又会形成较厚的氧化皮。故加热紫铜最好采用微氧化性气氛,使氧化很少又不产生“氢气病”。高锌黄铜如H62、H68等不宜采用还原性气氛加热。因为这类合金在还原性气氛中加热时,表面很难生成 ZnO 保护膜, Zn 元素将发生升华,甚至造成严重脱锌。故应采用微氧化性气氛,这样,既可以防止严重氧化,又可以防止严重脱锌。

当用加热铜料的炉子来加热钢料时,可能引起铜材热脆,这种脆性称为铜脆。其原因是:加热铜合金时,残留在炉底上的铜屑和氧化亚铜会粘到铜料表面上,当加热温度超过铜的熔化温度1083℃时,二者都要变成液态铜,并以很高的速度沿着钢的奥氏体晶界扩散,而使晶间联系减弱,导致锻造时产生龟裂或裂纹。为了避免铜脆,对加热过铜的炉子,在加热钢坯前,应将炉底彻底清理,除去残留在炉底上的铜屑和氧化亚铜,也可向炉底上撒食盐烧一下,以清除铜屑和氧化亚铜。或者加热铜合金前炉底上垫以薄铁板,以免铜屑粘在炉底上。

铜合金具有良好的导热性,而且其导热性随温度的升高而增大。在加热过程中,尽管不少铜合金会发生相变,但相变过程比铝合金中的强化相的溶解过程快得多。所以,铜合金坯料所需的加热时间较短。另一方面,一些铜合金的过热倾向性大,加热时间过长,容易引起晶粒过分长大。因此,铜合金坯料可直接在高温下装炉。对于火焰炉,炉温可比铜合金的加热温度高出100℃,对于电阻炉可以高出50℃。根据生产实践,坯料的加热时间确定如下:

直径或厚度小于50mm的坯料,按1mm/0.75min计算;直径或厚度大于100mm的坯料,按1mm/1min计算;对于直径或厚度在50~100mm范围的坯料,可按下式计算:

$$\tau = 0.75 + 0.006(d - 50) \quad (11-2)$$

式中 τ ——每毫米直径或厚度的加热时间(min);

d ——坯料的直径或厚度(mm)。

3. 自由锻

铜合金的锻造温度范围窄,导热性好,因此锻造时工模具都要预热到200~300℃,自由锻时锤击应轻快,坯料在砧面上要经常翻转,以免某一方面因接触下砧过久而带走热量,致使温度迅速降低,铜合金冲孔前,冲头必须预热到足够的温度。如果用冷冲头冲孔,容易在孔的内缘产生裂纹,用冲头扩孔时,每次扩孔量不宜过大。

铜合金对内应力很敏感,若不消除,铜合金零件在潮湿的空气中会自行破裂,所以锻造时应使锻件各处的变形程度和变形温度尽可能均匀些。

为了避免临界变形引起的粗晶,铜合金锻造时每次变形量应大于10%~15%。

由于铜合金较软,拔长时压出的坯料台阶棱角比钢料拔长时尖锐,若压下量过大,在下次锤击时容易在台阶处形成折迭。所以拔长时送进量与压下量之比应比钢料拔长时稍大,锤砧的边缘应倒大圆角。

4. 模锻

铜合金模锻件及锻模设计原则上与钢锻件相同,只是铜合金的收缩率一般取1.3%~1.5%;由于铜合金的摩擦系数较小,故模锻斜度一般为3°;模膛表面粗糙度一般为 $R_{a}0.8 \sim 0.2\mu\text{m}$;模具应预热至150~300℃;由于铜合金锻造温度范围窄,导热性好,故一般不宜采用多模膛模锻。形状复杂的锻件,可以用自由锻制坯再模锻成型或者在压力机上直接挤压成形。铜合金的高温强度小,流动性好,所以非常适宜挤压成形。

铜合金锻造时易形成折迭,所以模锻前的制坯工序在转角处的圆角半径应制得比钢坯大一点。

5. 冷却和切边

铜合金锻件通常在空气中冷却。

铜合金锻件一般在室温下切边,只有遇到下列情况,才需要热切边:

1) 室温下塑性很低的铜合金锻件,如含铝量较高的QA19、QA110-4-4等铝青铜,它们在冷切边时会在切边处撕裂锻件。生产实践证明,即使是小尺寸的铝青铜锻件,也不能在冷态下切边。

2) 大尺寸的大锻件,热切边温度通常为420℃左右。

锻模润滑剂参见有关技术资料^[25]。

6. 清理及热处理

铜合金锻件锻后清理方法主要是酸洗,小型锻件有时也采用吹砂清理。

黄铜锻件的热处理方法有低温去应力退火和再结晶退火两种。低温去应力退火主要用于冷变形制品。低温退火的方法是在260~300℃的温度下,保温1~2h,然后空冷。再结晶退火则是黄铜锻件热处理的主要方式,黄铜的再结晶温度均在300~400℃之间,常用的退火温度为600~700℃。退火温度不能过高,否则易引起晶粒长大,使工件力学性能降低。

对于 α 黄铜,因退火过程不发生相变,所以退火的冷却方式对合金的性能影响不大,可

以在空气或水中冷却。

对于 $(\alpha + \beta)$ 黄铜，因退火加热时发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变，冷却时又发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变。冷却愈快，析出的 α 相愈细，合金的硬度有所提高。若要求改善合金的切削加工性能，可用较快的冷却速度；若要求合金有较好的塑性，则应缓慢冷却。

青铜的锻后热处理方式也是退火，但对于能热处理强化（淬火、时效）的铍青铜及硅镍青铜等合金，一般不进行退火处理。

第六节 钛合金的锻造

钛合金同其它金属结构材料比较，具有三个显著特点：比强度高，中温性能好，耐腐蚀。在室温下，钛合金的比抗拉强度为高强钢的1.26倍，为高强铝合金的1.38倍。在400~550℃温度范围内，钛合金的比持久强度、比蠕变强度和比疲劳强度都明显地优于耐热不锈钢。因此，钛合金在宇航、化工和造船等工业部门得到广泛的应用。

我国变形钛合金的表示方法为：TA系列代表 α 型钛合金，TB系列代表 β 型钛合金，TC系列代表 $(\alpha + \beta)$ 型钛合金。具体的牌号和化学成分参见有关技术资料〔45〕〔52〕。

一、钛合金的可锻性

钛合金有两种同素异构体，在885℃以下钛具有密排六方晶格组织—— α 相；当温度超过885℃以后， α 相转变为具有体心立方晶格组织的 β 相。在低温下，六方晶格组织的滑移面数目有限，所以塑性变形困难，当温度升高时，六方晶格中的滑移面增多，所以钛合金的塑性随温度的升高而大大地提高。当温度超过相变点进入 β 相区时，金属的组织由六方晶格转变为体心立方晶格，这时钛合金的塑性明显提高，因此，钛合金一般在热态下进行压力加工。图11-13为一些钛合金的塑性图。

实践表明，用钢和铝能够锻出来的各种形状的锻件，用钛合金也可以锻出来。但钛合金的变形抗力大，而且钛合金的变形抗力随温度降低急剧长大，因此，在变形程度相同的情况下，锻造钛合金比锻造低合金钢需要更大吨位的设备。一般说来，锻造钛合金比锻造不锈钢困难，但比镍基高温合金好锻。

应变速率对钛合金的工艺塑性有很大影响，在速度为9m/s的落锤和0.003m/s的液压机上对铸态TA3合金作锻粗试验的结果表明，在相同温度下，锤上锻粗允许的变形程度不大于45%，而液压机上锻粗允许的变形程度则可达60%。

表11-8列出各种钛合金的临界变形程度和最佳变形程度以及允许变形程度。

二、锻造温度范围

1. $(\alpha + \beta)$ 钛合金的锻造温度

如果锻造温度超过合金的 β 转变温度，锻件晶粒粗大，将出现所谓的 β 脆性。为了避免 β 脆性，使锻件具有良好的组织和性能， $(\alpha + \beta)$ 钛合金通常应在 $\alpha + \beta/\beta$ 相变线以下温度锻造。但是，在 $(\alpha + \beta)$ 相区锻造时，因锻造温度低，锻造所需的变形力约为 β 相区锻造的1.5~2倍，所以在 $(\alpha + \beta)$ 两相区模锻，难以锻出形状复杂，小余量的模锻件。因此，出现了加热到 β 相区锻造的方法，即所谓的 β 锻造。在 β 区锻造，晶粒显著粗化，锻件的室温塑性较低。为了获得一定的室温塑性，应增大变形程度来细化晶粒。但是，当变形程度超过85%后，某些钛合金，如TC6、TC8、TC9等的晶粒反而粗化，因此，采用 β 锻造时，变形量的增

表11-8 钛合金的允许变形程度和临界变形程度

合 金 牌 号	锻粗时的最佳变形程度(%)		模锻时的允许变形程度(%)			模锻时的临界变形程度(%)	
	压力机平锻机	模 锻 锤	模锻锤压力机	高速锤	压力机上挤压成型	模 锻 锤压力机	高 速 锤
TA2、TA3、TA4、TA5	40~50	40~50	80~85	90	90~95	2~12和大于85	1~15和大于90
TA6、TA7、TC1、TC3、TC4	40~70	40~70	80~85	90	90~95	2~12和大于85	1~15和大于90
TC6、TC8、TC4、TC10	40~60	40~60	80~85	90	90~95	2~12和大于85	1~15和大于90
TB1	40~70	30~50					

大必须适当,一般认为取70%左右为宜。

2. α 钛合金的锻造温度

锻造温度对 α 钛合金室温性能和晶粒大小影响与 $(\alpha + \beta)$ 钛合金相似,所以,对于 α 钛合金,为了避免 β 脆性,也应在 β 转变线以下温度锻造。

3. β 钛合金的锻造温度

工业上的 β 钛合金都是介稳定的 β 钛合金,它们在加热时都有同素异构转变。加热温度超过其 β 转变温度,也有发生 β 脆性的倾向。但是,由于这类合金的合金化程度高,加热到 β 转变线以上温度, β 晶粒长大倾向不如 α 和 $(\alpha + \beta)$ 合金的大;另外,如果限制在 β 转变温度以下锻造,则因变形抗力过大将使锻造过程更加困难。基于上述情况, β 钛合金的锻造加热温度总在其 β 转变温度以上。

表11-9列出国产钛合金的锻造温度范围。

三、锻模设计特点

钛合金锻件和模具设计原则与钢锻件相同,但由于钛合金的变形抗力大、粘性大、流动性差和热膨胀系数小等特点,在设计时应注意以下问题:

钛合金的收缩率比钢小,约为0.5%~0.7%;钛合金充填模腔能力比钢差,因此,其圆角半径要设计得大些,形状复杂的锻件应设计预锻模,如生产数量不大,也可以用终锻模来进行预锻;钛合金尽量不采用拔长和滚压变形工序;钛合金的粘模现象严重,模腔表面的粗糙度要低,一般为 $R_a 0.2 \sim 0.1 \mu m$ 。由于钛合金的变形抗力大,模具寿命低,锻造复杂形状的锻件或精密锻件时,锻模最好设计成镶块结构,以便于更换。当采用整体模时,为使锻模返修后仍有足够厚度,选用的模块应比钢锻件所用锻模加厚50%。

四、锻造工艺过程

1. 下料

直径大于40mm的棒料多用圆盘锯切割,小直径棒料则用砂轮切割,如用剪床切割,坯料需加热到750~900℃,因而较少采用。当切割质量要求较高时可用车床下料。原材料表面若有缺陷,需要车床剥皮或用无心磨磨去一层,棒料剥皮厚度一般为2~5mm。

2. 加热

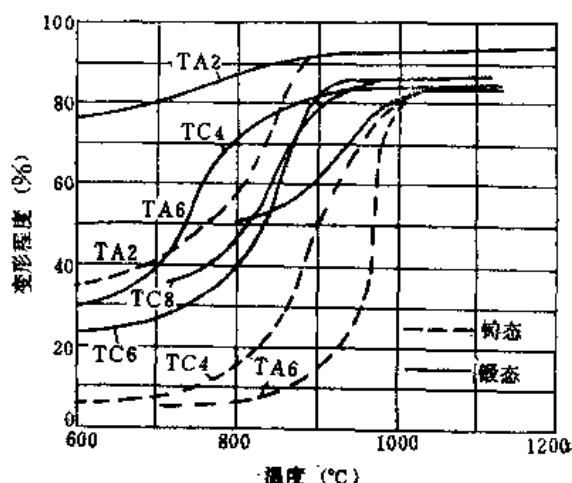


图11-13 钛合金的塑性图

表11-9 钛合金锻造温度

合金种类	合金牌号	β 转变温度 (°C)	预先经过变形的坯料		钛 铸 锭	
			始锻温度 (°C)	终锻温度 (°C)	始锻温度 (°C)	终锻温度 (°C)
α 钛合金	TA2、TA3		900(870)	700(650)	980	750
	TA4		980(980)	800(800)	1050	850
	TA5		980(980)	800(800)	1050	850
	TA6、TA7	1025~1050	1020(990)	900(850)	1150	900
	TA8	950~990	950(940)	850(800)	1150	900
β 钛合金	TB1	750~800	930(920)	800(700)		
$\alpha + \beta$ 钛合金	TC1	910~930	910(900)	750(700)	980	750
	TC3	920~960	920(900)	800(750)	1050	850
	TC4	960~1000	960(940)	800(750)	1150	850
	TC5、TC6	950~980	950(950)	800(800)	1150	750
	TC8	970~1000	970(960)	850(800)	1150	900
	TC9、TC11	970~1000	970(960)	850(800)	1150	900
	TC10	950~960	930(910)	850(800)	1150	900

注：表中括号内数据为压力机和平锻机选用的温度，无括号数据为锻锤选用的温度。

钛合金在高温下与炉内的氧、氮、氢等气体发生强烈作用，除了形成氧化皮外，还会在坯料表层形成又硬又脆的 α 脆化层，当坯料内部的氢含量超过一定数值(0.015%)后，便产生所谓氢脆。超过该数值氢含量的钛合金制件，塑性指标尤其是冲击韧性剧烈下降，对应力集中敏感，在较少的应力作用下便发生脆性断裂。

α 脆化层在 α 、 β 和($\alpha + \beta$)三种钛合金中都可能出现， α 钛合金对形成 α 脆化层特别敏感， β 钛合金当加热到980℃以上时，也会形成 α 脆化层。

在还原性气氛的油炉中加热时，钛合金吸氢特别强烈；如果炉中变成氧化性气氛，吸氢量便显著减少；当在电炉中加热时，吸氢则更少。所以，钛合金应采用电阻炉加热，当不得不采用火焰炉加热时，应使炉内呈微氧化性气氛。不论在何种炉子中加热，为了防止钛合金与耐火材料发生作用，炉底上均应垫以不锈钢板。对于精锻件，坯料最好在保护气氛(氢气)中进行，或者加热前在坯料表面上涂一层玻璃防护涂料，然后在普通加热炉内加热。防护层能保护合金免遭气体污染，同时它也是模锻时的润滑剂。

钛合金在低温时的导热性比碳钢低得多，如果将其在1000℃以上的炉温中直接加热，则坯料断面上的温差较大，对断面尺寸大的坯料，将引起大的热应力，甚至产生破裂；此外，在高温(850℃以上温度)下加热时间过长，会引起晶粒长大和增加吸气量。所以，直径大于100mm的坯料，加热制度要分成两阶段：预热段，炉温保持800~850℃，以控制较慢升温速度；在加热和均热阶段，保持较高炉温，以快速升温随后均热。直径小于100mm的坯料，可直接装入高温炉内加热。当把坯料投入炉温为始锻温度的炉子中加热时，从入炉算起，坯料的加热时间按2mm/min计算，直径或厚度大于100mm的坯料，在预热段的加热时间按2mm/min计算，移入高温炉后的加热时间，按3mm/min计算。

钛合金坯料在加热温度下的保温时间一般按 $0.7 \sim 0.8 \text{ min/mm}$ 计算。

3. 模锻

形状简单的模锻件，多在锤上采用单槽模模锻。一般经过2~5次锤击便可成形。开始锤击要轻，随后逐渐加重。形状较复杂的模锻件用棒料直接成形比较困难，因为在2~3次锤击之后，流入模腔内的金属就变冷了，需要重新加热。钛合金不宜采用多模膛，因为在每道变形工序之后，表面上都可能出现缺陷，需要打磨清理。较好的方法是采用自由锻制坯，然后在锤上模锻成形。

钛合金对变形速度比较敏感，在压力机上模锻可以提高塑性，降低变形抗力。因此，广泛用来生产形状简单、不需复杂制坯工步的中小型锻件。形状复杂的低塑性钛合金适宜在压力机上模锻。在压力机上模锻时，应分成预锻和终锻两道工序。两道工序可以用一套模具，也可以用两套不同的模具。在两道工序之间，需进行中间切边、酸洗并清除表面缺陷。

模锻钛合金的模具都要预热，预热温度主要与所用设备类型有关。当在锤上或压力机上模锻时，由于变形速度较快，模具可预热到 $200 \sim 250^\circ\text{C}$ ，在水压机上模锻时，由于变形速度较慢，模具应预热到 $350 \sim 400^\circ\text{C}$ 。

模锻钛合金时，型腔常用的润滑剂有水基或油基石墨、水基或油基石墨和二硫化钼的混合物。对于重要的钛合金锻件或精密锻件，坯料上还应涂一层硼硅酸盐的玻璃涂层。

4. 切边

批量小、尺寸大的锻件，通常是在室温下用带锯或机械加工切除毛边；对于批量大、尺寸小的锻件，则用切边模热切。切边温度为 $600 \sim 800^\circ\text{C}$ ，如果切边后马上进行校正，切边温度为 800°C 。

5. 校正

钛合金一般采用热校正，校正工序通常都是在模锻所用设备上，在 $700 \sim 900^\circ\text{C}$ 温度下完成。

6. 清理

钛合金锻件上的氧化皮，可用喷砂或化学腐蚀法去除。最好是先用喷砂去掉氧化皮和玻璃润滑剂后再进行酸洗（用硝酸与氢氟酸的比例至少保持15:1）。若钛合金锻件在加热、酸洗过程中吸氢过多，使合金的氢含量超过了允许的界限，则需用真空退火（加热温度 $800 \sim 900^\circ\text{C}$ ，真空度为 10^{-4} mmHg ⊖）予以消除。

7. 热处理

钛合金零件的热处理，主要有不完全退火、完全退火、等温退火、双重退火和淬火、时效。至于用何种方法进行热处理，主要根据合金的类型以及零件所需的强度指标和塑性指标。详细内容参见有关技术资料〔74〕〔77〕。

⊖ $1 \text{ mmHg} = 133.322 \text{ Pa}$ 。

第十二章 锻造工艺方案的技术经济分析

技术经济分析研究的对象是技术，使用的方法是经济分析，它的目的在于探寻最佳的技术方案，所追求的是最大经济效益。任何生产工艺不但要制定工艺过程，确定工艺参数以及设计工艺装备，而且还要讨论经济效果问题，即进行技术经济分析。

生产活动须消耗劳动，并创造使用价值。对这种消耗与成果的比较和评价就叫做经济效果问题。劳动消耗，包括生产过程中所消耗的活劳动和物化劳动。活劳动是指与生产有关的全部人员所耗费的劳动量。物化劳动是指设备、工具、材料、燃料、动力等物质消耗。工艺的最高原则应该是以最少的劳动消耗，创造出最多的物质财富。对于锻造工艺来说，可具体化为：锻件形状精、性能好（这是指创造财富方面），原材料消耗少、设备投资小、工具简单、能耗低且公害小（这是消耗社会劳动方面）。锻造工艺学不仅要研究锻件成形原理与方法提供科学依据，而且应对锻造工艺如何获得最佳经济效果指出努力方向。

考虑技术方案的经济效果时，不单要计算方案本身的劳动消耗，还要考虑由于占用劳动力和资源而引起社会劳动消耗量的增加以及由于消耗劳动力和资源引起的社会劳动量的增加。即把一个车间、一个企业、一种技术方案或一个投资项目的经济效果纳入整个国民经济效益之中去考虑，全面地评价其经济上的得失。

第一节 工艺方案技术经济分析的一般程序

技术经济分析的基本方式是方案的对比选优。技术经济分析必须遵循系统、全面、定量分析的原则以及切合实际的原则。工艺方案的技术经济分析还必须要有发展的观点，只有用发展的观点才能不停滞在现有经验上，随着技术的发展，时间的推移，客观条件的变化，许多原有的定论需要重新鉴别。

锻造工艺方案技术经济分析的一般程序可用下列框图来表述：（见下页）

现分项简要说明如下：

一、确定分析目标

确定目标之前，先要了解有关背景材料，明确主客观的要求，弄清楚分析的对象是什么，需解决哪些问题，最后应得出什么样的结论等等。

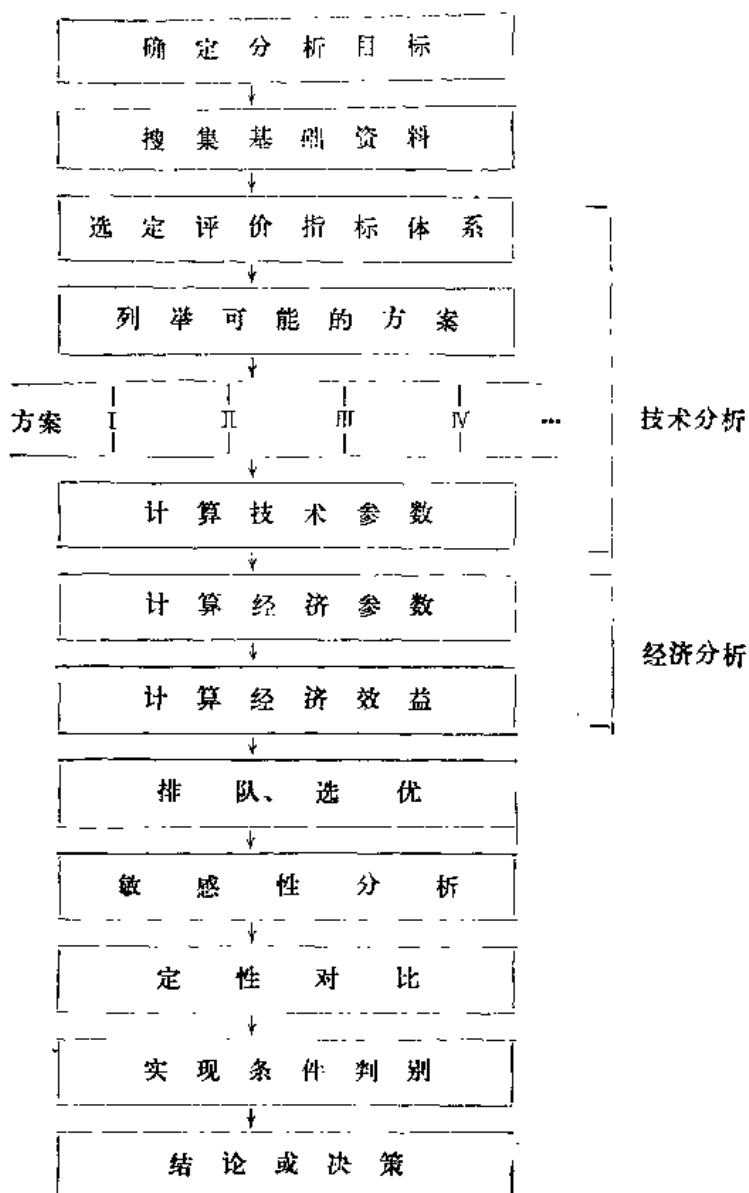
二、搜集基础资料

根据确定的目标决定搜集资料的范围和深度。

基础资料按搜集的方向可分为现状资料和情报资料两类；按资料的功能可分为技术资料和经济资料两种。

现状资料包括：原有产品的质量、产量、售价、成本、生产工艺、设备、工模具、生产率、各种原材料的消耗量、各项有关技术经济指标、厂房、场地、可供发展的条件等。现状资料是为进行技术分析和经济分析所必须的。

情报资料是指与分析对象有关的国内外情况，如国内外同种或同类型产品的质量水准、



工艺方法、设备供应等技术或经济信息，以此作为分析对比的参照体系和参照数据。也可以用来拓宽思路，在拟定各种可能的工艺方案时作为参考。

从功能上看，所有搜集到的资料可分为技术性的和经济性的。有关产品的零件图、锻件图、现场工艺、国内外生产工艺、设备、模具、生产工时定额、材料消耗量等供进行技术分析的属技术性资料。各种消耗物料的价格、现场生产的成本组成和数据、各类生产人员的工资级别、固定资产和流动资金数、生产和经营过程中的各种费用和税率等属经济性资料。

搜集资料的广度和深度以及资料数据的详实可靠是下一步分析工作的基础。

三、选定评价的技术经济指标

技术经济指标是评价锻造生产经济效益及其技术先进性的主要依据。

评价锻造工艺方案优劣的技术经济指标有很多。有的问题可以用一个指标来评价。如投资的效果比较用投资利润率即可概括。有的问题要用几个指标分别从不同角度反映其特点。

以曲轴、前轴锻造工艺方案为例，分析所用的指标列举如下：

指 标 名 称	指 标 反 映 的 特 性
锻件重	锻件精化程度
坯料重	材料消耗量, 锻造工艺水平
废品率	生产稳定性, 生产管理水平
投资	一次性资金需求
成本	生产的经济性
投资回收期	简单的效益概念, 评价投资效果
内部收益率	动态的投资经济效益, 投资的获利率
盈亏平衡点	敏感性分析, 投资风险

四、列举可能的方案

为了使所分析的结论正确可靠, 要用穷举法列举所有可能的工艺方案或可供选择的工艺方案。

例如在曲轴、前轴锻造工艺方案分析中, 根据现场经验和国内外情报, 可有下列对比方案:

I —— 10t模锻锤锻曲轴, 5t模锻锤分段锻前轴;

II —— 16t模锻锤;

III —— 40t-m对击锤;

IV —— 120MN锻压机;

V —— 液压锤;

VI —— 成形辊锻前轴。

五、计算技术参数

技术参数主要包括: 材料利用率、变形力或变形功、主要设备的型号规格、配套设备、生产率、模具尺寸和消耗量、动力和燃料消耗量、各种辅助材料的消耗量、生产工人、生产面积、废品率等。

六、计算经济参数

经济参数包括: 利润率、投资回收期、内部收益率、国民净增值、劳动生产率以及出口创汇能力等。具体计算方法参看有关专著。

七、排队、选优

各方案按某一选定的评价指标数值大小排队。

评价指标较多时, 可设定综合方法排队。将指标体系中的各个项目按相对数值或规定分数等级评分, 按各指标在选优过程中的重要程度设定加权值, 然后用加权评分法积分, 最后按总积分的多少排队。

八、敏感性分析

分析过程中有许多数据是估计的, 有一定局限性, 从而使一些参数的计算值带有不确定性。为了避免这些因素的影响, 减少分析结论失真的程度, 使方案选优的结论不致背离实际, 要进行敏感性分析。

敏感性分析是用改变敏感因素的设定值, 计算技术经济评价指标参数, 说明该因素发生变化时, 评价结论相应发生多大变化。

锻造技术经济分析的敏感因素有: 生产批量、材料消耗量、材料价格、生产率、模具规

格、模具寿命和设备价格等。

九、定性分析对比

并不是所有的因素或特征都可以量化的。有许多不能量化的定性因素往往对决策、判断和论证过程有很大影响。如：对环境的影响，对社会发展的影响，对产品质量的影响，对地区发展经济的贡献，能源、设备供应的可能性，资金筹措的可能性，技术的可靠性等等。通过对这些定性因素的分析，得到更为全面的认识，把定性和定量分析结合起来，综合评价，避免产生片面性。

十、可能性分析

通过方案的选优，得出一个理想的或最优的方案。由于种种条件的限制，最优方案虽好，但在现有条件下不一定能实现。例如：资金短缺，投资过大的方案行不通，又如：电力短缺，用电的方案虽然经济，但不得不改用其它燃料。

十一、结论或决策

经过上述技术经济分析的全过程，得到一个比较科学、比较全面和比较切实可行的工艺方案。

一般而言，成本最低的方案，其经济效果自然较好。成本最低包括两方面的含义，即锻件成本最低和零件成本最低。通常在进行锻件工艺分析、设备选择、能源选用、生产经济批量的确定等工作时，计算锻件成本，比较成本高低即可鉴别方案的优劣。在评价精密锻造、冷锻、温锻等工艺方案时，不但要比较锻件成本，更需要比较零件生产的总成本。因此，在评价锻造工艺的优劣时，必须和其它环节（主要是后续的机械加工）联系起来分析比较。如图12-1所示，大量生产时，车轴的总成本最低的生产方法是采用了最昂贵的锻轧坯料。在专用轧机上斜轧车轴坯料，虽然坯料成本最高，但由于精化了坯料，减少了后续的机械加工劳动量，提高了材料利用率，零件的生产成本反而降低了。

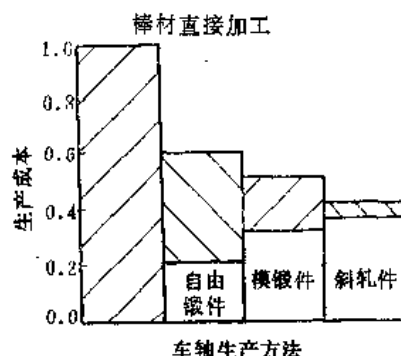


图12-1 大量生产时，车轴生产方法对生产成本的影响

通常，先进的工艺和高效设备常常与巨额的投资相伴随。纵使成本低，利润高，由于投资过大，决策过程难下决心。这时就要分析比较各工艺方案的投资效果，比较投资回收期，投资在项目寿命期内实际收益的大小和比率。按投资的效益高低评价技术方案的优劣。

第二节 工艺方案确定的原则

为了寻求最佳工艺方案，首先应对具体零件的锻造工艺进行分析，探寻多种加工方法，为技术经济分析和选择最佳工艺方案准备条件。

最佳工艺即技术先进和经济合理的加工方法。最佳工艺方案的产生，应是技术经济分析的自然结果。

工艺方案分析的任务可归结为：根据零件的功能特征、材质、形状、尺寸精度、品质要求和生产批量，在已有的或可以获致的设备、装置、工具、能源、检验手段、管理水平和人员素质的条件下，提出可供采用的各种加工方法。

在进行工艺方案分析时，必须考虑并回答下述问题：

能否满足零件的功能

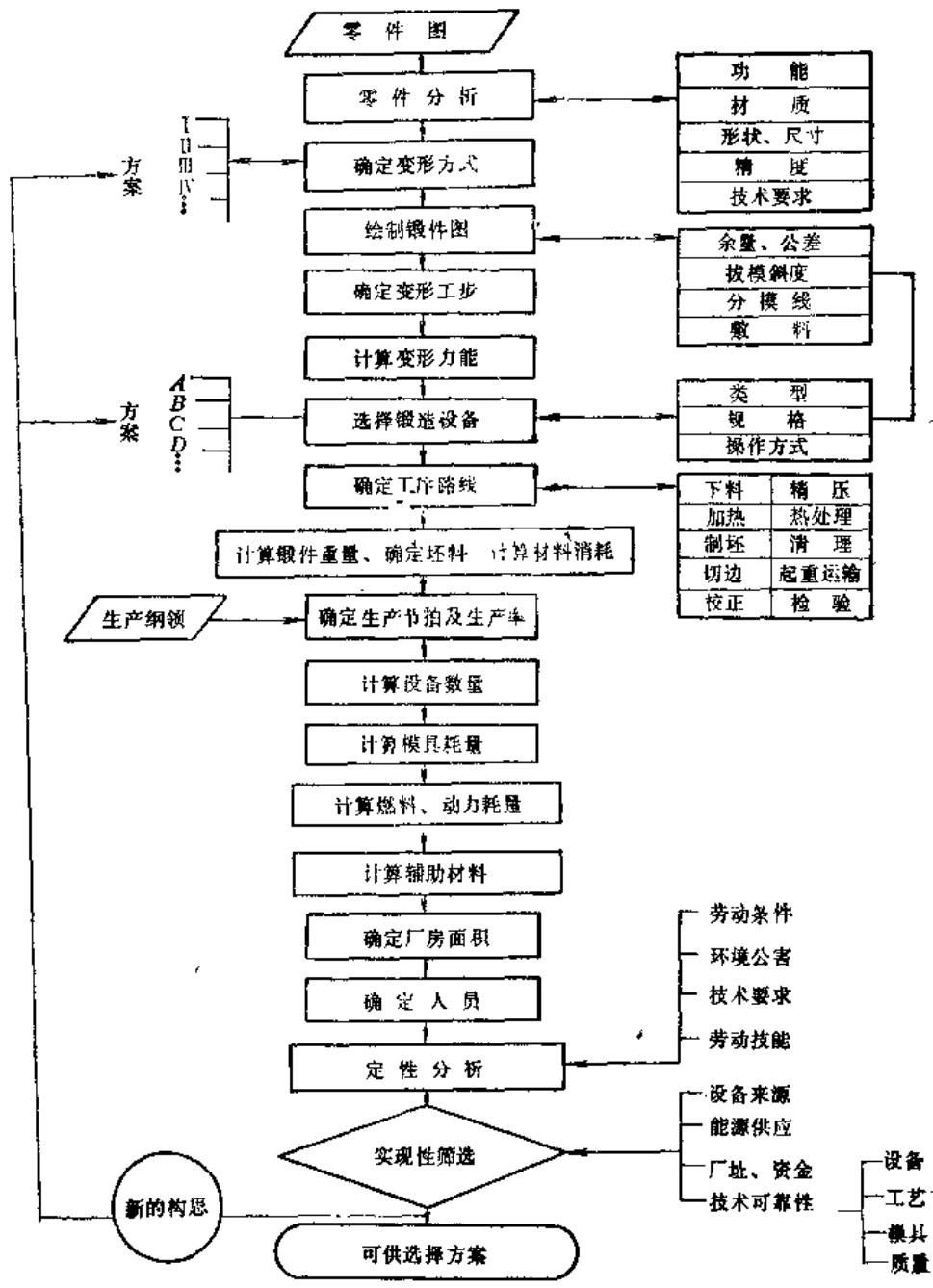


图12-2 工艺方案分析步骤

- 能否满足图样技术条件和质量标准
- 锻件结构是否合理
- 加工余量是否可以减少
- 有无多余的敷料
- 变形力或变形功能不能降低
- 金属流线是否符合要求
- 保证质量的工序有无遗漏
- 工序和工步是否已经最少

材料利用是否充分, 有无可能与其它零件联合锻造, 一模多件或一坯多件

有没有考虑冷锻、精锻、摆辗、轧制、局部模锻、分段模锻、联合模锻、锻焊等先进工艺

工艺方案分析的步骤, 如图12-2所示。

按图示步骤分析的结果, 得到若干个可供选择的工艺方案。同时各个方案的优缺点在分析过程中都一一显示出来, 为进一步进行技术经济分析打下坚实的基础。

工艺方案分析是一个系统工程问题。迄今仍然是在经验基础上的类比和推断, 是以工艺师个人脑力劳动为特征的方法, 但如果按上述程序, 自觉地按系统规律一步一步进行, 必能收到优质高效的效果。同时要求从事这项工作的人员要熟悉已有的生产方式, 掌握各种工艺方法的特点、适用范围和限制条件, 能正确计算各项技术参数, 了解国内外锻造生产现状、动向、发展趋势, 并能根据现实条件进行推断和预测。

第三节 锻造工艺方案的比较

当某一锻件可用不同的锻造工艺生产时, 应在满足零件质量(形状、尺寸及性能)要求的前题下, 选用生产成本最低、交货周期最短的锻造工艺。即工艺方案选择的原则是: 工艺上可行和经济上合理。在大多数情况下, 工艺上可行不成问题, 重点是经济合理。在个别情况下, 工艺能否满足锻件质量、数量要求成为主要矛盾, 经济合理退居其次。这里主要分析经济合理性问题。

一、锻件成本估算

成本计算是对工艺方案进行经济效果评价或对诸工艺方案进行优选的基础环节, 是经济分析的核心。

影响锻件成本的因素很多, 锻件的类型和尺寸、原材料种类、使用设备类型和工艺的类型以及管理水平等的不同, 其各因素对锻件成本的构成比例亦有很大不同。表12-1中给出了成本概略构成比范围及平均值, 供技术经济分析时参考。

表12-1 锻件成本概略构成比

序 号	项 目	成本构成比(%)		说 明
		大致范围	平均	
1	原材料费	60~75	65	决定于钢种, 碳素钢低, 合金钢高
2	燃料动力费	9~15	10	动力费以蒸-空锤为主, 其它设备可低
3	生产工人工资	2~4	3	国外此比例约8%左右
4	模具费	4~20	10	随批量不同变化较大, 模具结构也有较大影响
5	固定费用	—	12	统计数据以老式设备为主, 采用新型设备会有所提高(折旧费), 但批量大、产量大折旧费会相对减少
	合 计		100	

从表中看出, 成本构成比中最大的是原材料费用, 它占锻件成本的60%以上, 是技术经济分析中最受重视的数据。往往工艺方案的取舍很大程度上决定于原材料的消耗量。因此在分析时对锻件的质量和原材料的消耗量要作详细计算。原材料成本降低10%, 锻件成本将降低6%~7%。除原材料外, 燃料、动力费和模具费影响较大。燃料动力费的主要影响因素是

采用燃料的种类和设备的类型，一旦种类和类型确定之后其变化范围不很大。一般规律是锻件小耗量大，反之亦然。模具费用的影响，主要是生产批量，批量越小，分摊的模具费用越高。在锻件成本中，对中小批量而言，其构成比仅次于原材料价格，且变化范围很大。表 12-1 中所给的数据为大中批量时所占百分比，对于小批量生产，模具费用可高达锻件成本的40%左右。其次是设备类型，例如热模锻压力机模具的寿命高于锻锤用锻模寿命一倍左右。由于我国目前是低工资制，生产工人工资在成本构成中仅占3%左右。成本中的固定费用，包括车间经费和企业管理费等，其变化的范围很大，低者不到10%，高者达25%以上。所以，采用先进的技术和工艺，提高材料利用率，改进管理体制，提高管理水平和减少行政开支是降低锻件成本的重要措施之一。

目前，我国锻造行业总的材料利用率在50%以下，不但浪费了宝贵的金属材料，也造成了人力、物力和财力的极大浪费，所以，精化坯料是锻造生产最为根本和迫切的任务。

二、成本批量曲线及方案比较

锻造工艺方案比较应首先从分析锻件单件成本组成开始。锻件单件生产成本项目大体可划分为与生产批量无关的项目（如材料费、工资等）和与生产批量有关的项目（如摊销的模具费、车间企管费等）两部分，简写为下式：

$$C = A + \frac{B}{n}$$

式中 C ——锻件单件成本，

A ——与生产批量无关的成本项目和，

B ——与生产批量有关的项目和，

n ——生产批量。

上式为双曲线型曲线（见图12-3）。不同的锻造工艺成本构成不同，曲线形状特征也不同。

若锻件成本组成中， A 项远大于 B 项，则曲线平缓（如自由锻造）；若 B 项为主要部分，则曲线陡峭（如模锻）。

当有两种可行的工艺方案时，则可绘出两条曲线，见图12-4。

$$C_1 = A_1 + \frac{B_1}{n}$$

$$C_2 = A_2 + \frac{B_2}{n}$$

当 $C_1 = C_2$ 时，得出两条曲线的交点，称为临界生产批量 n_c 。

$$A_1 + \frac{B_1}{n} = A_2 + \frac{B_2}{n}; \quad n_c = \frac{B_1 - B_2}{A_2 - A_1}$$

若 $n > n_c$ ，方案1有利；若 $n < n_c$ ，方案2有利。

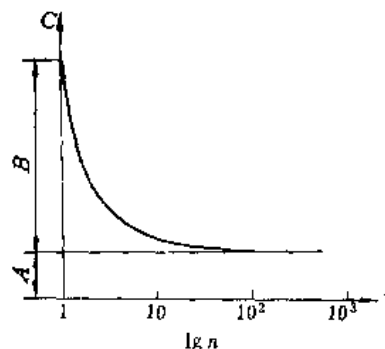


图12-3 锻件单件成本和生产批量关系图

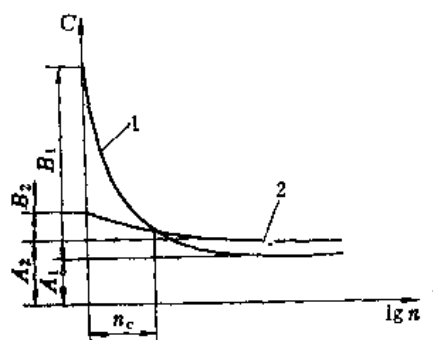


图12-4 不同工艺方案锻件单件成本与生产批量的关系

圆环形锻件单件成本与生产批量的关系，见图12-5。

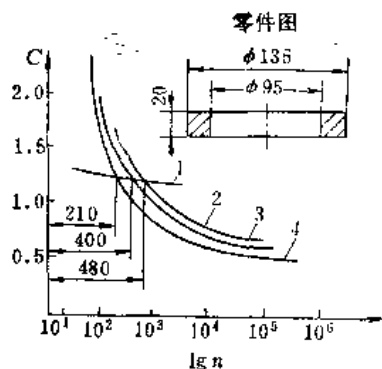


图12-5 圆环形锻件单件成本与生产批量的关系

1—自由锻造（两件合锻） 2—锤上开式模锻
3—曲柄压力机上开式模锻 4—平锻机上闭式模锻

由图12-5可知：当锻件生产批量小于210件时，应采用自由锻造工艺；大于210件时应采用平锻工艺；若无平锻机，也可采用曲柄压力机或锤上模锻工艺，此时临界生产批量分别为400件和480件。

锻件成本与生产批量的关系还可用锻件总成本表示：

$$\Sigma C = Cn = An + B$$

该式为一直线方程。因而，只需两点即可绘出，使计算大为简化。

如图12-6所示，方案1和方案2的临界批量为120件，方案3和方案1相比，由于与批量有关的费用 B_1 降为 B_3 ，而与批量无关的费用不变（直线斜率不变 $A_1 = A_3$ ），故方案3成本永远低于方案1。方案4与方案1相比，与批量有关的费用不变（即 $B_1 = B_4$ ），而与批量无关的费用降低（直线4斜率小于直线1， $A_4 < A_1$ ），故方案4成本永远低于方案1。直线5为锻件销售收入线，此直线与总成本直线的交点称盈亏转折点。若采用方案1进行生产，则当批量小于250件时，产生亏损，大于250件时，产生盈余。同时，盈亏转折点的位置高低也标示投资风险的大小。盈亏转折点位置在图的左下方，表示项目投资获利的机会多，亏损的风险小。反之，盈亏转折点的位置偏于图的右上方，则说明投资风险大。

三、锻件的合理生产批量

从上述分析不难看出，生产批量与锻件成本有直接关系，常成为工艺方案选择的主要依据。显然可见，当生产批量不大时，采用昂贵的专用设备和工装，必然导致生产成本的提高；当生产批量很大时，若仍采用简单通用的设备和工装，必然导致材料利用率和劳动生产率的降低，同样引起生产总成本的提高。工艺的先进与落后，视具体生产条件（特别是生产批量）而定，必须立足于经济效果来评价工艺方案。

除此，从锻造车间局部利益出发，为了增大投产批量，常希望将全年任务一次连续生产完毕。但从全局观点出发，这样做必然会增大中间仓库的面积，积压流动资金，导致全厂技术经济指标的恶化。所以在中、大批量生产条件下，特别是当模具寿命小于年产量时，常需将年产量合理划分为数批投产。一般可参照机械加工车间生产能力或锻造模具寿命分批投产。锤模锻车间常按一至二个工作班的产量作为投产批量。

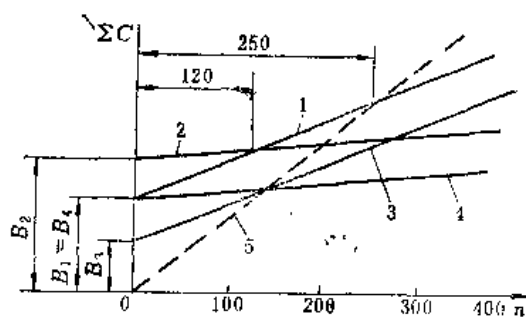


图12-6 锻件总成本与生产批量的关系

参 考 文 献

- 1 吕炎等编著,锻压成形理论与工艺,北京:机械工业出版社,1991
- 2 吕炎,锻压工艺学,哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1983
- 3 张志文主编,锻造工艺学,北京:机械工业出版社,1983
- 4 汪大年主编,金属塑性成形原理,北京:机械工业出版社,1982
- 5 斯德洛日夫М.В.波波夫Е.А.,金属压力加工原理,北京:机械工业出版社,1980
- 6 斯莱特R.A.C.,工程塑性成形理论及其在金属成形中的应用,北京:机械工业出版社,1983
- 7 Тарновский,И.Я.,Формоизменение при пластической обработке Металлов,Москва: Металлургия,1951
- 8 Тарновский,И.Я.,Теория обработки Металлов Давлением Москва, 1963
- 9 Губкин, С.И.,塑性变形,北京中国工业出版社,1965
- 10 Унисов, Е.П.,塑性的工程理论,北京:科学出版社,1963
- 11 哈尔滨工业大学锻压教研室,清华大学锻压教研组,锻压工艺基础,哈尔滨工业大学,1974
- 12 十九所高等院校锻造工艺编写组,锻造工艺,上海交通大学,1976
- 13 Охрименко,Я.М.,Технология кузнечно-штамповочного производства,Москва: машиностроение,1966
- 14 Сторожев,М.В.,Основы теории обработки металлов давлением,МАШГИЗ,1959
- 15 杨振恒,陈镜清,锻造工艺学,西安市:西北工业大学出版社,1986
- 16 陈金德,唐兆钰,张子公,于德宏,棒料轴向加压精密剪切的研究,第一届全国冷锻会议宣读论文,1980
- 17 塔依茨,Н.Ю.,钢加热的学,北京:冶金工业出版社,1959
- 18 ТАЙЦ Н.Ю.,ТЕХНОЛОГИЯ НАГРЕВА СТАЛИ 1962
- 19 张元建,按锻件材料合理确定始锻温度,锻压技术,1986,(6)
- 20 吴德荣,锻压少无氧化火焰加热技术概况,锻压技术,1979,(6)
- 21 索采夫С.С.,图曼诺夫А.Т.,金属加热用保护涂层,北京:机械工业出版社,1979
- 22 张菊水,钢的过热与过烧,上海:上海科学技术出版社,1984
- 23 吕炎,王尔德,钢的稳定过热和不稳定过热,大型铸锻件,1980,(2)
- 24 锻件质量分析编写组,锻件质量分析,北京:机械工业出版社,1983
- 25 吕炎等编著,锻件组织性能控制,北京:国防工业出版社,1988
- 26 吕炎,徐亦公,局部加载时沿加载方向应力分布规律的探讨,锻压技术,1985,(1)
- 27 吕炎,曲万贵,徐亦公,主作用力在变形体中的分布及其对金属变形和流动的影响,第一届全国热锻工艺学术讨论会论文,1982
- 28 吕炎,徐亦公,大型锻件非对称拔长工艺的有限元分析,金属科学与工艺,1985,(3)
- 29 吕炎等,Stress-Distribution Regularity along the Loading Direction in Locally Loading,第三届国际塑性加工学术会议,1990
- 30 吕炎,王真,徐亦公,平板压缩时金属流动方向的实验研究,金属科学与工艺,1985
- 31 吕炎,塑性变形时金属的流动方向,哈尔滨工业大学科学研究报告,1982,(218)
- 32 陶永发等,变分法解矩形坯压缩时自由变形的速度场,金属科学与工艺,1986,(3)
- 33 黄乃强等,金属塑性变形中平面应变问题的有限元分析,锻压技术,1981,(3)
- 34 吕炎,姜秋华,曲万贵,非对称拔长时大型锻件内部孔隙锻合原理的研究,第一届全国大锻件学术讨论会

论文, 1982

- 35 吕炎, 对圆柱体毛坯在平板间锻粗时塑性变形发生和发展过程的探讨, 中国机械工程学会第一届锻压年会论文, 1983
- 36 吕炎, 钱存济, 王真, 切变形对金属组织和性能的影响, 金属科学与工艺, 1986, (2)
- 37 吕炎, 姜秋华, 简杰, 剪切变形对冷挤压金属组织和性能的影响, 锻压技术, 1985, (6)
- 38 大型锻件的生产编写组, 大型锻件的生产, 北京: 机械工业出版社, 1978
- 39 陶永发, 杨煜生, 大型锻件中心压实法锻造, 重型机械, 1978, (4)
- 40 陶永发, 杨煜生等, 护环液压扩孔原理及在大型护环生产中的应用, 大型铸锻件, 1980, (2)
- 41 郭会光, 杨明鼎等, 大型汽轮机转子锻压技术的试验研究, 机械工程学报, 1993, (4)
- 42 Guo Huiguang et al Controlling Hot Forging and Colling for the Retaining Rings of Mn18Cr18N Steel, 4th ICTP, 1993, (9)
- 43 郭会光等, 发电机护环液压胀形技术的研究, 中苏锻压学术会议论文, 1990
- 44 任猛, 王祖唐, 刘庄, 有效压实锻造法, 中国专利 88106963.9
- 45 郭会光, 环状工件的液压胀形装置, 中国专利 881076120
- 46 杨煜生, 陶永发等, 护环液压胀形法的新发展及外补液胀形的生产应用, 大型铸锻件, 1982, (3)
- 47 谢云岫, 一重厂转子锻件锻造工艺的演变和发展, 第四届全国锻压学术会议论文, 1987
- 48 叶伟蓉, 王太甲, 用模块扩孔法生产大型汽轮发电机护环, 大型铸锻件, 1987, (2)
- 49 锻工手册编写组, 锻工手册, 北京: 机械工业出版社, 1975
- 50 锻模设计手册编写组, 锻模设计手册, 北京: 机械工业出版社, 1991
- 51 锻压技术手册编委会编, 锻压技术手册, 北京: 国防工业出版社, 1988
- 52 中国机械工程学会锻压学会编, 锻压手册, (第1卷) 锻造, 北京: 机械工业出版社, 1993
- 53 机械工程手册编写组, 机械工程手册, 北京: 机械工业出版社, 1978
- 54 Altan T等, 现代锻造, 北京: 国防工业出版社, 1982
- 55 刘永熙, 普通飞边槽与楔形飞边槽的阻力计算及选用, 合肥工业大学学报, 1983, (8)
- 56 包中阔, 何成宏, 用扩张性飞边槽代替常规飞边槽的试验研究, 锻压技术, 1981, (4)
- 57 靳辅安, 苏升贵, 高新, 李尚智, 十字头锻件挤压成形的研究, 金属科学与工艺, 1983, (8)
- 58 群力铸锻厂, 模锻带工字形断面锻件的制坯模膛介绍, 第一届全国热锻工艺学术讨论会论文, 1982
- 59 黎光启, 模锻型槽的积聚作用, 锻压技术, 1982, (8)
- 60 肖景容, 吴家贤, 三通管接头多向模锻工艺及装置的研究, 中国机械工程学会第四届锻压学术年会宣读论文, 1987
- 61 杨先权, 缸体多向模锻工艺研究, 中国机械工程学会第四届锻压学术年会宣读论文, 1987
- 62 高速锤锻造编写组, 高速锤锻造, 北京: 机械工业出版社, 1978
- 63 孙胜, 关廷栋等, 模锻毛坯尺寸选择的新方法——反向成形模拟, 金属科学与工艺, 1988
- 64 肖景容等, 精密模锻, 北京: 机械工业出版社, 1985
- 65 集训, 精压与精确模锻, 北京: 国防工业出版社, 1979
- 66 吴诗惇, 温挤技术, 北京: 国防工业出版社, 1979
- 67 王真, 吕炎等, H62同步齿圈精密成形方案和坯料尺寸的确定, 哈尔滨工业大学学报, 1986增刊
- 68 王真, 吕炎等, H62同步齿圈的精密成形, 模具技术, 1986, (2)
- 69 黎远琪等, 热精模锻温度场的测定, 第一届全国热锻工艺学术讨论会论文, 1982
- 70 吕炎等, The Study of the Precision Rolling Forming of Bearing Race, 第四届国际回转加工会议, 1989(10)
- 71 王祖唐, 锻造工艺学, 北京: 机械工业出版社, 1983
- 72 国家技术监督局, 钢质模锻件国家标准(GB12361~62-90), 北京: 中国标准出版社, 1990

- 73 李尚健主编.锻造工艺及模具设计资料.北京:机械工业出版社,1991
- 74 有色金属锻造编写组.有色金属锻造.北京:国防工业出版社,1979
- 75 陈诗荪主编.合金钢锻造.北京:国防工业出版社,1984(6)
- 76 技工学校机械类通用教材编审委员会编.锻工工艺学.北京:机械工业出版社,1980(8)
- 77 有色金属及其热处理编写组编著.有色金属及其热处理.北京:国防工业出版社,1981(8)
- 78 刘润广主编.锻造工艺学.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1992.4
- 79 辛宗仁,饶璐,王魁麟编著.锻造技术经济分析.北京:机械工业出版社,1992