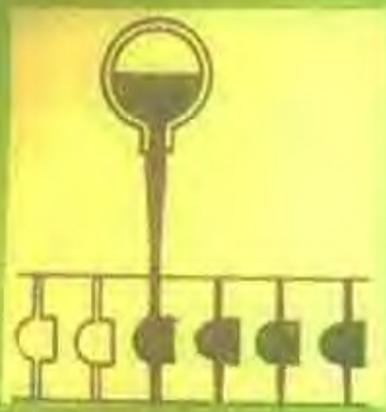


高等学校试用教材



冲压工艺学

哈尔滨工业大学李硕本 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

冲压工艺学

哈尔滨工业大学李硕本 主编



机械工业出版社

冲 压 工 艺 学

哈尔滨工业大学李硕本 主编

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

南宁地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 15·字数 362 千字

1982年1月广西第一版·1982年1月广西第一次印刷

印数 00,001—19,000·定价 1.60 元

*

统一书号, 15033·5093

604/09/25

前 言

冷冲压在锻压生产中占有很重要的地位，在各种工业部门中的应用十分广泛，它也是锻压专业教学的基本内容。

冷冲压生产技术是多方面的，但其中最为主要的基础内容是，在充分地了解和掌握各种冲压变形规律的基础上解决冲压加工中出现的各种实际问题，确定最佳工艺参数，以最简便的方式在消耗最低的条件下实现冲压加工过程，获得高质量的冲压产品。因此，确定本教材的内容重点是，以分析讨论各种冲压加工中板料毛坯的受力与变形特点、各种冲压变形的共同规律和每种冲压变形本身的规律为主，并在此基础上进一步研究冲压变形的控制、冲压成形极限的确定与提高、冲模设计的基本原理等各种实际问题的解决原则与方法。

为了便于从变形的规律出发分析和研究各种实际问题，把生产中出现的种类繁多的各种冲压加工方法，按其变形特点、变形性质和变形规律等各方面的特点进行分类，把变形性质和变形规律相同的加工方法归纳在一起，做为本书的理论体系和划分章节的根据。例如，把生产中所谓的拉深件的加工问题，按冲压变形的本质可以分为三个部分，即以分析和解决在一向拉应力和一向压应力作用下使毛坯的外缘部分产生拉深变形为主的直壁旋转体零件的拉深成形部分；以分析和解决冲压毛坯外缘部分的拉深变形和毛坯中间部分的胀形变形之间的相互作用关系为主的曲面零件成形部分；以分析和解决沿毛坯周边产生的不均匀拉深变形为主的非旋转体零件成形部分。这样做，不仅可以在一章之内集中地深入分析讨论某一种冲压成形所特有的问题和规律，而且还可以做到由浅入深地从简单的冲压变形分析开始，逐步地扩展到较为复杂的非旋转体曲面零件的成形问题。这样的课程体系，既便于从变形特点的角度分清各种冲压变形之间的差别，又可以清楚地从变形性质上看到它们之间存在的联系。

在冲压生产当中经常用到的冲压加工方法当中，有一部分冲压加工方法占有一定的比重，可是在当前的冲压书籍里却缺少关于其变形分析方面的资料。根据这种情况，在本书里对曲面翻边、校形、胀形等的变形分析方面的内容做了一定程度的补充与加强。

由于全国各兄弟院校的专业方向、教学计划和教学重点等都不相同，对冷冲压课程的内容、重点、时数等方面的要求也有很大的差别，所以在本书编写时只能根据一般的要求，对冷冲压课程的基本内容做了必要的保证，而各兄弟院校在使用过程中完全可以根据本校教学上的要求，在内容上做必要的取舍或补充，而在讲授顺序上也可适当地调整。如果教学时数较少时，可以把讲课重点放在基本成形方法的分析部分，而删去复杂形状零件成形的特殊问题。本书第二章冲压变形基础中部分内容概括性较强，涉及到各种冲压变形的共同性规律，所以这部分内容的讲授方法应根据具体条件灵活处理，例如，可以在前边先建立基本的概念，而在以后讲解各种变形的基本分析时逐步地加深理解；也可以在讲课结束时再做全面的总结与概括；也可以供学生在总结课程内容时做为参考。

本书是根据1978年4月在天津召开的《高等学校一机部对口专业座谈会》精神和同年12月在重庆召开的《高等学校一机部对口锻压专业教材编审计划会议》所拟定的大纲编写的。全书由哈尔滨工业大学李硕本副教授（第一、二、六、七、八、九、十、十一、十三、

十四章)、于连仲(第四、十二章)、杨玉英(第五、七章)、武汉工学院姜奎华副教授(第三章)等编写。主编李硕本副教授,主审西安交通大学庄礼庭副教授,责任编辑一机部教编室周衍康。参加编写工作的还有哈尔滨工业大学李春峰和王典钧。另外,在本书定稿时,曾请西安交通大学储家佑、张娴如副教授、上海交通大学阮雪榆教授、西北工业大学吴诗悖副教授、清华大学郑可煌副教授、华南工学院刘良沐、重庆大学王孝培、华中工学院肖祥芝等审阅并提出了许多有益的意见,在此深表感谢!

目 录

前言		
第一章 概述	1	
第二章 冲压变形基础	5	
2-1 冲压变形中的应力与变形特点	5	
2-2 硬化与硬化曲线	7	
2-3 各种冲压成形方法的力学特点与分类	10	
2-4 冲压成形中的变形趋向性及其控制	16	
2-5 板料的冲压性能及试验方法	21	
第三章 冲裁	28	
3-1 冲裁过程的分析	29	
3-2 冲裁模间隙	31	
3-3 凸模与凹模刃口尺寸的确定	35	
3-4 冲裁力和功	36	
3-5 精密冲裁	38	
3-6 整修	43	
3-7 聚氨酯橡胶冲裁	45	
第四章 冲裁模	47	
4-1 概述	47	
4-2 冲裁模的基本型式与构造	47	
4-3 冲裁模主要部件与零件的构造	53	
4-4 冲裁模设计要点	63	
第五章 弯曲	67	
5-1 概述	67	
5-2 弯曲时的应力分析与弯矩的计算	70	
5-3 弯曲时的弹复	74	
5-4 提高弯曲件精度的方法	79	
5-5 最小弯曲半径	84	
5-6 弯曲毛坯长度的确定	86	
5-7 弯曲力的计算	89	
5-8 弯曲模	90	
第六章 胀形	95	
6-1 胀形的特点	95	
6-2 平板毛坯的局部胀形	98	
6-3 圆柱形空心毛坯的胀形	100	
第七章 直壁形状零件的拉深	103	
7-1 拉深工艺的特点	103	
7-2 圆筒形零件拉深时的变形特点	105	
7-3 圆筒形零件的拉深系数与拉深次数的确定	110	
7-4 圆筒形件拉深时的起皱及其防止措施	113	
7-5 圆筒形零件用拉深模工作部分尺寸的确定	117	
7-6 拉深件毛坯尺寸的确定	120	
7-7 反拉深	121	
7-8 带法兰边零件的拉深方法	122	
7-9 阶梯形零件的拉深方法	126	
7-10 盒形零件的拉深方法	127	
7-11 其它非旋转体直壁零件的拉深方法	135	
第八章 复杂曲面形状零件的拉深	138	
8-1 曲面形状零件拉深的特点	138	
8-2 球面形状零件的拉深方法	142	
8-3 锥形零件的拉深方法	145	
8-4 非旋转体曲面形状零件的拉深特点	149	
第九章 翻边	153	
9-1 伸长类翻边	153	
9-2 压缩类翻边	162	
第十章 校形工艺	164	
10-1 平板零件的校平	164	
10-2 空间形状零件的校形	166	
第十一章 其它冲压方法	169	
11-1 软模成形	169	
11-2 差温拉深法	171	
11-3 加径向压力的拉深法	171	
11-4 爆炸成形		
11-5 电水成形		
11-6 电磁成形		
11-7 带料连续冲压		

11-8 变薄拉深	183	13-1 冲压件的工艺性	209
11-9 旋压	184	13-2 确定冲压加工方案、工序数 目与顺序的几项原则	211
第十二章 冷挤压	186	13-3 冲压工序间半成品的形状与 尺寸的确定原则	219
12-1 概述	186	13-4 冲压设备的选择	220
12-2 冷挤压力的计算	189	第十四章 冲压生产的发展方向	224
12-3 冷挤压模具	201	附录 工艺计算举例	228
12-4 冷挤压工艺过程设计的几个 问题	205		
第十三章 冲压工艺过程设计	209		

第一章 概 述

冷冲压是塑性加工的基本方法之一，它主要用于加工板料零件，所以有时也叫板料冲压。冲压加工的应用范围十分广泛，不仅可以加工金属板料，而且也可以加工非金属材料。冲压加工时，板料在模具的作用下，于其内部产生使之变形的内力。当内力的作用达到一定的数值时，板料毛坯或毛坯的某个部分便会产生与内力的作用性质相对应的变形，从而获得一定形状、尺寸和性能的零件。

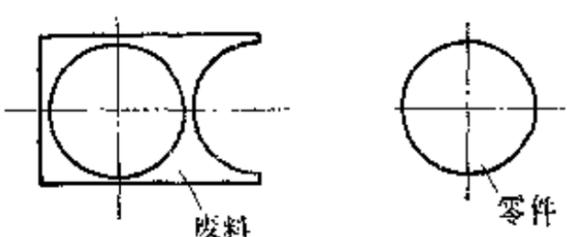
冷冲压生产靠模具与设备完成加工过程，所以它的生产率高，而且由于操作简便，也便于实现机械化与自动化。一般的冲压加工，每分钟一台冲压设备可生产零件的数目是几件到几十件；但是，目前已有相当数量高速冲床的生产率已达每分钟数百件或千件以上。

冷冲压产品的尺寸精度是由模具保证的，所以质量稳定，一般不需再经机械加工即可使用。

冲压加工不需要加热，也不像切削加工那样在把金属切成大量碎屑时要消耗很大的能量，所以它是一种省能的加工方法；冲压制品的表面质量较好，用的原材料是冶金厂大量生产的廉价的轧制钢板或钢带，在冲压过程中材料表面不受破坏，能够把表面质量好、重量轻和成本低等各种优点集中在一起，这是任何其它加工方法所不能与之竞争的。因此，冷冲压在现代汽车、拖拉机、电机、电器、仪表以及日常生活用品的生产方面占据十分重要的地位。另一方面，在国防工业生产中冷冲压也是一个重要的加工方法，如在飞机、导弹、各种枪弹与炮弹的生产中冷冲压加工量的比例也是相当大的。冲压生产的发展是我们实现四个现代化和提高人民生活水平过程中必须十分注意的问题。现代各先进的工业国家冲压生产都是非常发达的。

由于冷冲压加工的零件形状、尺寸、精度要求、批量大小、原材料性能等的不同，当前在生产中所采用的冷冲压工艺方法也是多种多样的。但是，概括起来可以分为分离工序与成形工序两大类。分离工序的目的是在冲压过程中使冲压件与板料沿一定的轮廓线相互分离，同时，冲压件分离断面的质量，也要满足一定的要求。成形工序的目的，是使冲压毛坯在不破坏的条件下发生塑性变形，并转化成所要求的成品形状，同时也应满足尺寸精度方面的要求。常用的各种冷冲压加工方法，可见表 1-1 与表 1-2。

表1-1 分离工序

工序名称	图	特点及应用范围
落料		用冲模沿封闭轮廓曲线冲切，冲下部分是零件。用于制造各种形状的平板零件

(续)

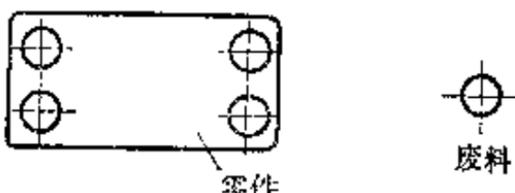
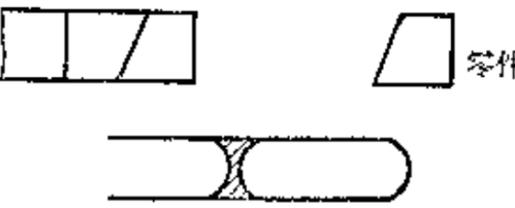
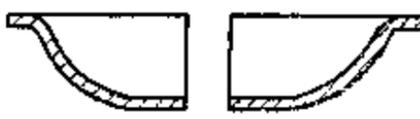
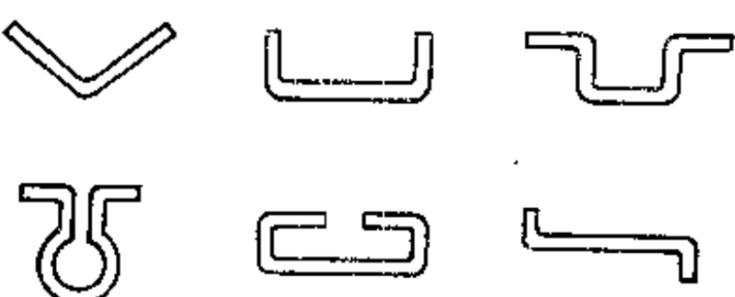
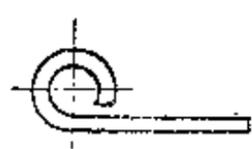
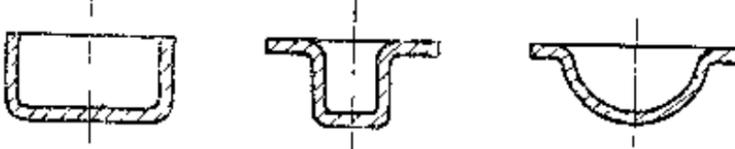
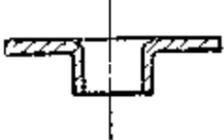
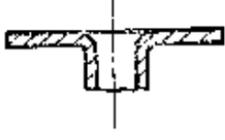
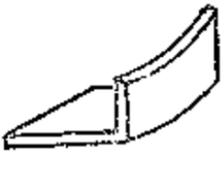
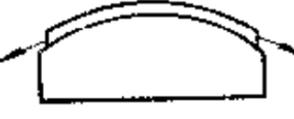
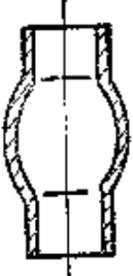
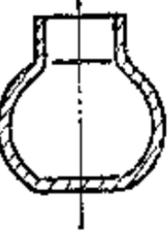
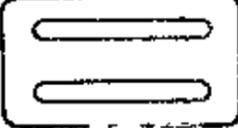
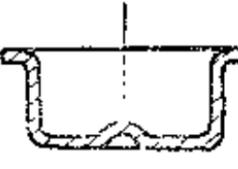
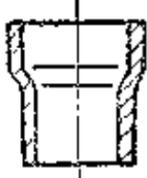
工序名称	简图	特点及应用范围
冲孔		用冲模按封闭轮廓曲线冲切，冲下部分是废料
切断		用剪刀或冲模沿不封闭曲线切断，多用于加工形状简单的平板零件
切边		将成形零件的边缘修切整齐或切成一定形状
剖切		把冲压加工成的半成品切开成为二个或数个零件，多用于不对称零件的成双或成组冲压成形之后

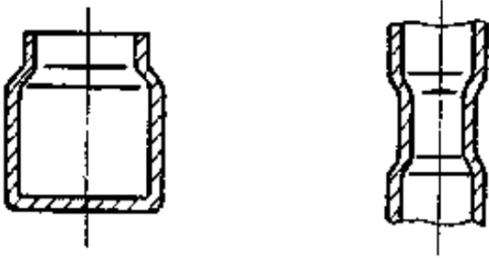
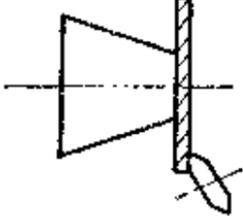
表1-2 成形工序

工序名称	简图	特点及应用范围
弯曲		把板料沿直线弯成各种形状，可以加工形状极为复杂的零件
卷圆		把板料端部卷成接近封闭的圆头，用以加工类似铰链的零件
扭曲		把冲裁后的半成品扭转成一定角度
拉深		把板料毛坯成形制成各种空心的零件

(续)

工序名称	简	图	特点及应用范围
变薄拉深			把拉深加工后的空心半成品进一步加工成为底部厚度大于侧壁厚度的零件
翻孔			在预先冲孔的板料半成品上或未经冲孔的板料冲制成竖立的边缘
翻边			把板料半成品的边缘按曲线或圆弧成形成竖立的边缘
拉弯			在拉力与弯矩共同作用下实现弯曲变形，可得精度较好的零件
胀形			在双向拉应力作用下实现的变形，可以成形各种空间曲面形状的零件
起伏			在板料毛坯或零件的表面上用局部成型的方法制成各种形状的突起与凹陷
扩口			在空心毛坯或管状毛坯的某个部位上使其径向尺寸扩大的变形方法

(续)

工序名称	筒 图	特 点 及 应 用 范 围
缩 口	 <p>The drawing shows two cross-sectional views of a hollow cylindrical part. The left view shows a uniform cylindrical shape. The right view shows the same part with a section where the diameter has been reduced, illustrating the necking process.</p>	<p>在空心毛坯或管状毛坯的某个部位上使其径向尺寸减小的变形方法</p>
旋 压	 <p>The drawing illustrates the spin forming process. It shows a conical part being formed by a rotating workpiece against a rotating wheel. The wheel is shown in contact with the workpiece, and the resulting shape is a smooth, tapered cone.</p>	<p>在旋转状态下用辊轮使毛坯逐步成型的方法</p>
校 形	 <p>The drawing shows two views of a part. The left view shows a slightly curved or bent cylindrical part. The right view shows the same part after being straightened, with a flat, uniform surface, illustrating the straightening process.</p>	<p>为了提高已成形零件的尺寸精度或获得小的圆角半径而采用的成形方法</p>

第二章 冲压变形基础

2-1 冲压变形中的应力与变形特点

在各种冲压过程中板料毛坯的塑性变形，都是模具对毛坯施加的外力所引起的内力或由内力直接作用的结果。一定的力的作用方式和力的大小都对应着一定的变形。因此，为了研究和分析金属的塑性变形过程，首先必须了解毛坯内的作用力与塑性变形之间的关系。

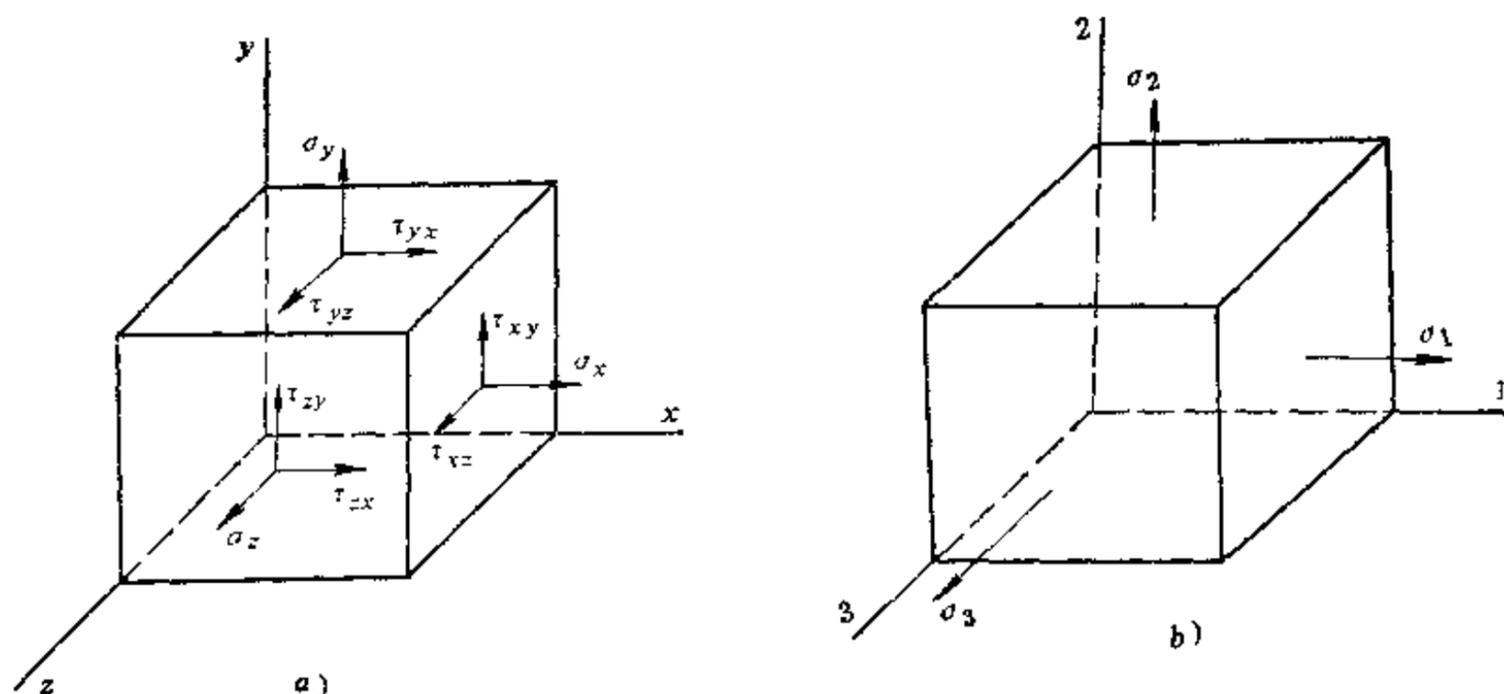


图2-1 点的应力状态

a—任意座标系统 b—主轴座标系统

在一般的情况下，变形毛坯内各点的变形和受力情况都是不同的。毛坯内每一点上的受力情况，通常称为点的应力状态，要有九个应力分量，即三个正应力和六个剪应力来确定(图2-1 a)。但是，由于其中三对剪应力是相等的($\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$)，实际上只需要六个应力分量，即三个正应力和三个剪应力，就可以确定该点的应力状态。由塑性力学的分析可知，一点的应力状态也可以用三个主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 表示(图2-1 b)。只要三个主应力是已知的，就可以计算出任意平面作用的正应力与剪应力，所以也就可以认为该点的应力状态是已知的。

通常，称主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 的作用方向为主轴。主轴的方向仅仅决定于该点的受力情况，而与座标轴的选取无关。利用主应力来研究冲压过程中毛坯内应力的作用特点及其分布规律有很多方便。例如在图

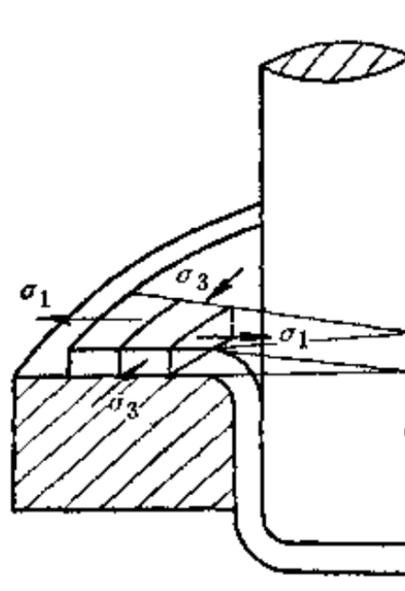


图2-2 拉深时毛坯变形区内主应力方向

2-2 中所示的拉深过程的应力分析时, 在忽略数值较小的表面摩擦力之后, 可以近似的取图中所示的三个主轴方向。这样做的结果可以使拉深毛坯变形区的应力分析及对拉深变形中许多问题的研究都得到很大程度的简化。

绝大多数冲压成形过程中毛坯的塑性变形区都不是处于单向受压或单向受拉的应力状态, 而相反地是受到二向或三向的应力作用。在单向受拉或单向受压时的应力与应变关系可以用硬化曲线或用硬化曲线的数学表达式来表示。但是, 在受到二向以上的应力作用时的复杂应力状态下, 处于塑性变形状态的毛坯变形区内应力与应变关系是相当复杂的。目前常用的有全应变理论和增量理论两种应力与应变关系。

全应变理论的应力与应变关系表达式为

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \text{常数} \quad (2-1)$$

上式也可以改写成另一形式

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数} \quad (2-2)$$

式中 $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ 是平均应力, 其数值表示应力状态中三向均匀受拉或三向均匀受压成分的大小。

增量理论的应力与应变关系表达式为

$$\frac{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \text{常数} \quad (2-3)$$

上式也可以改写成

$$\frac{d\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{d\varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{d\varepsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数} \quad (2-4)$$

全应变理论仅仅表示塑性变形終了时的主应变与主应力之间的关系, 它不能反映出变形过程中应力与应变的变化过程所产生的影响。增量理论表示在塑性变形的某一个瞬间应变增量与主应力之间的关系, 经过积分便可以把变形过程的特点反映出来, 所以它更接近于实际的情况。假如塑性变形过程中的主应力方向不变, 而且各应力间的比例也保持不变, 全应变理论和增量理论的计算结果是一致的, 所以在这种情况下完全可以应用全应变理论。此外, 在单调的塑性变形过程中也可以应用全应变理论。增量理论在计算上引起的困难很大, 尤其在冷变形硬化时, 计算就更复杂了。

应力与应变关系的表达式 (2-1)、(2-2)、(2-3) 和 (2-4) 是对压力加工中各种工艺参数进行计算的基础; 另一方面, 也可以在不进行详细的理论分析与计算的条件下, 利用它们对某些冲压成形过程中毛坯的变形和应力的性质作出大致的分析和判断。例如从对式 (2-2) 的分析中可以得知:

1. 当 $\sigma_2 - \sigma_m = 0$ 时, 必定有 $\varepsilon_2 = 0$ 。利用体积不变条件 $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$ 可得 $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$, 即在主应力与平均应力相等的方向上不产生塑性变形, 而另外两个方向上的塑性变形在数量上相等, 在方向上相反。通常称这种变形为平面变形。由此可得出一个在实践中常常用到的重要结论: 在平面变形时必定有 $\sigma_2 = \sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ (此式的另一种形式是 $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$)。宽板弯曲时, 在宽度方向的变形为零, 即属于这种情况。

2. 当 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_m$ 时, 由式 (2-2) 得 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$, 也就是说, 当三个主应力相等时, 毛坯受三向等拉或三向等压的应力状态作用。此时毛坯不产生任何塑性变形, 仅有弹性变形存在。

3. 当 $\sigma_1 > 0$ 而且 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 时, 毛坯受到单向拉应力作用。因为 $\sigma_1 - \sigma_m = \sigma_1 - \frac{\sigma_1}{3} > 0$, 故 $\varepsilon_1 > 0$, 而由式 (2-2) 又可得 $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2 = -2\varepsilon_3$; 也就是说, 在单向受拉时, 在拉应力作用方向上为伸长变形。在其余二个方向上产生数量相同的压缩变形, 而且伸长变形为每一个压缩变形的二倍; 当 $\sigma_3 < 0$ 而且 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ 时, 毛坯受到单向压应力的作用。因为 $\sigma_3 - \sigma_m = \sigma_3 - \frac{\sigma_3}{3} < 0$, 故 $\varepsilon_3 < 0$, 利用式 (2-2) 又可得 $-\varepsilon_3 = 2\varepsilon_2 = 2\varepsilon_1$, 即毛坯在单向压应力作用时, 在压应力作用方向上为压缩变形, 其值为另二个方向上伸长变形的二倍。翻边、缩口等冲压过程中毛坯边缘的变形就分别属于上述两种情况。

4. 当 $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$ 而且 $\sigma_3 = 0$ 时, 由式 (2-2) 得 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\frac{1}{2}\varepsilon_3$, 也就是说, 当毛坯受二向等拉时, 在拉应力作用方向上为伸长变形, 而在另一个没有主应力作用的方向上为压缩变形, 其值为每个伸长变形的二倍。平板毛坯胀形时的中心部位就属于这种变形情况。

5. 当 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ 时, 由式 (2-2) 的分析可知, 在最大拉应力 σ_1 方向上的变形一定是伸长变形, 而在最小拉应力 σ_3 方向上的变形一定是压缩变形。利用这个分析结果, 可以判断在两向受拉应力作用的胀形变形时, 在拉应力作用方向上的变形是伸长变形, 而在没有主应力作用的厚度方向上的变形是压缩变形, 引起毛坯厚度的变薄。

6. 当 $0 > \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 时, 由式 (2-2) 的分析可知, 在最小压应力 σ_3 (绝对值最大) 方向上的变形一定是压缩变形, 而在最大压应力 σ_1 (绝对值最小) 方向上的变形一定是伸长变形。

上述这几个由应力应变关系公式得出的推论, 可以帮助我们对冲压变形中毛坯上某些特定的有代表性的位置上金属的变形性质和应力状态做出定性的分析, 这在实际上是很有用的。

2-2 硬化与硬化曲线

在冲压生产中, 毛坯形状的变化与零件的形状形成过程——即材料的塑性变形过程都是在常温下进行的。对于常用的金属材料, 在常温下的塑性变形过程当中, 由于冷变形的硬化效应引起的材料机械性能的变化, 结果使其强度指标 (屈服极限 σ_s 与强度极限 σ_b) 随变形程度的加大而增加, 并且同时使其塑性指标 (延伸率 δ 与断面收缩率 ψ) 降低。因此, 在进行变形毛坯内各部分的应力分析和各种工艺参数的确定时, 必须考虑到材料在冷变形硬化中的屈服强度 (或称变形抗力) 的变化。另外, 板料的冷变形硬化性能对许多冲压工艺都有较大的影响: 有时是有利的, 有时是不利的。例如在伸长类的冲压成形工艺中, 板材的硬化能够减少过大的局部变形 (减小厚度的局部变薄量), 使变形趋向均匀, 增大成形的极限; 又如在翻边变形前孔边缘部分材料的硬化容易引起开裂, 降低了极限翻边系数。由此可见, 在处理冲压生产上许多实际问题时, 必须掌握和研究材料的硬化和硬化规律及它们对冲压工艺的影响。

在冷变形中材料的变形抗力随变形程度的变化, 用硬化曲线来表示。图 2-3 即为几种材

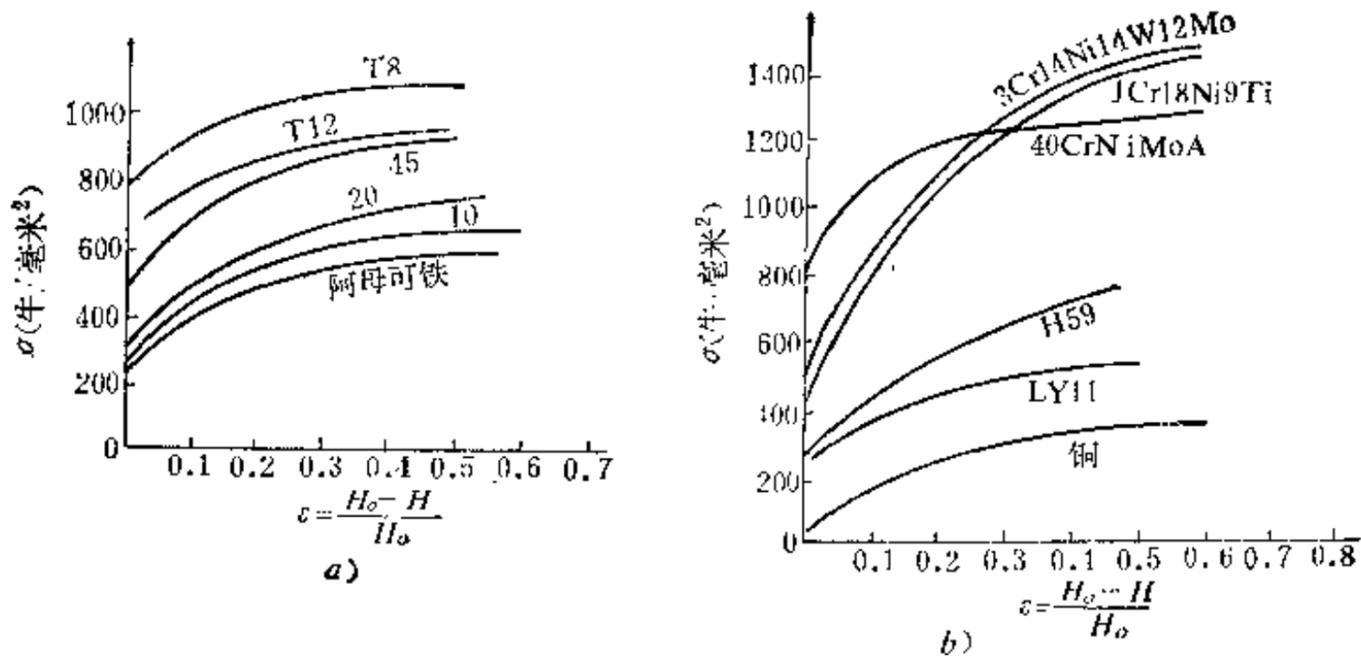


图2-3 各种材料的硬化曲线举例

料的硬化曲线举例。材料的硬化曲线可在普通的拉伸变形时用实验方法求得，但是，当超越材料的稳定变形区，产生集中的局部变形——细颈之后，应力状态也随着发生变化，这是拉伸实验的缺点。做材料的镦粗实验，也能得到硬化曲线。虽然镦粗时没有拉伸时产生局部细颈的问题，可是当变形程度较大时，试件断面形状发生的畸变也会引起实验上的误差。实验证明，拉伸实验和镦粗实验得到的硬化曲线基本上是一致的。对于板料，有时也用平板毛坯的液压胀形实验，经过一些换算后求得硬化曲线。这时毛坯中心点受双向等拉应力的作用，变形稳定性比单向拉伸时大得多，这是本方法的一个主要优点。图2-3是用镦粗方法得到的硬化曲线，变形程度用试件高度的相对变化表示。

由图2-3可见，几乎所有的硬化曲线都具有一个共同的特点，就是随变形程度的增大，材料的硬化强度 $\frac{d\sigma}{d\epsilon}$ （或称硬化模数）逐渐降低，也就是材料的硬化曲线的梯度变小。

为了实用上的需要，必须把硬化曲线用数学式表示出来。但是，由于各种材料的硬化曲线都具有不同的特点，那么用同一个数学式精确地把它表示出来也是不可能的。实际上，常用的几种硬化曲线的数学表达式都是近似的，由于材料种类和性能的不同，其误差大小也不尽然相同。现在常用的有两种硬化曲线的表达式：用直线表示硬化曲线或用指数曲线表示硬化曲线。

用直线代替硬化曲线时有

$$\sigma = \sigma_0 + F\epsilon \quad (2-5)$$

上式中 σ_0 是近似的屈服极限，也是硬化直线在纵坐标轴上的截距。 F 是硬化直线的斜率，称为硬化模数，它表示材料硬化强度的大小。由图2-4可见，用直线代替硬化曲线是非常近似的，而且仅在切点上它们的

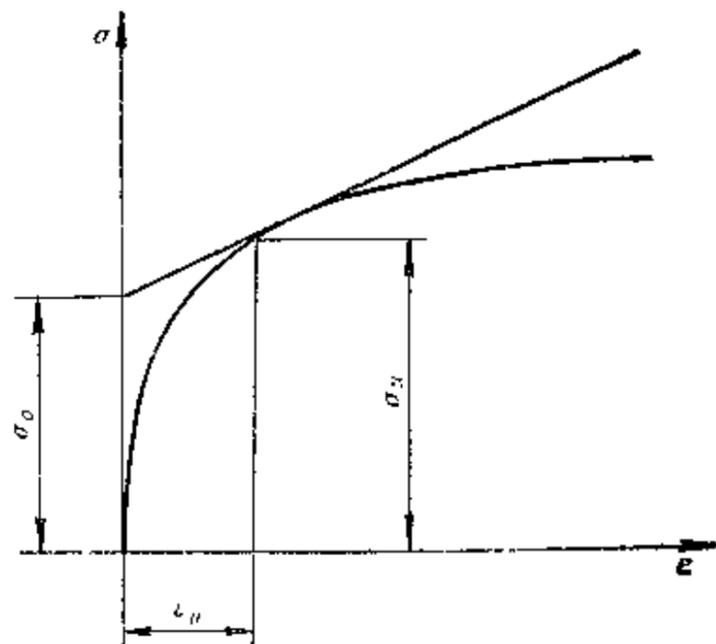


图2-4 硬化直线

数值是一致的,在其他各点两者都有差别,尤其在变形程度很小或很大时,差别是很显著的。

式(2-5)中的变形程度 ε 的表示方法不同,硬化直线的表达式也不一样。当用拉伸实验中的延伸率时,式(2-5)具有如下形式

$$\sigma = \sigma_b(1 + \delta) \quad (2-6)$$

式中 σ_b ——材料的强度极限;

δ ——延伸率。

当用断面收缩率表示拉伸实验的变形程度时,式(2-5)具有下边的形式

$$\sigma = \sigma_0 + F\psi \quad (2-7)$$

上式中

$$\sigma_0 = \sigma_b \frac{1 - 2\psi_0}{(1 - \psi_0)^2}$$

$$F = \frac{\sigma_b}{(1 - \psi_0)^2}$$

其中 ψ_0 是在拉伸试验中开始产生局部变形时的断面收缩率。

由于实际上的硬化曲线和硬化直线之间有很大的差别,所以在冲压生产中经常用指数曲线表示硬化曲线

$$\sigma = c\varepsilon^n \quad (2-8)$$

上式中 c 为系数,而 n 称为硬化指数, c 与 n 之值均决定于材料的种类和性能,其值列于表2-1中。

指数曲线 $\sigma = c\varepsilon^n$ 和材料的实际硬化曲线比较接近。系数 c 与硬化指数 n 都可以用拉伸实验方法得到。硬化指数 n 是表明材料冷变形硬化性能的重要参数,也叫 n 值,对板材在各种冲压成形中的冲压性能以及冲压件的质量都有较为重要的影响。图2-5是不同 n 值材料的硬化曲线的对比。硬化指数 n 大时,表示在冷变形过程中材料的变形抗力随变形的进展而迅速地增大。因此, n 值大时,材料的塑性变形稳定性较好,不易出现局部的集中变形和破坏,有利于增大伸长类变形的成形极限。

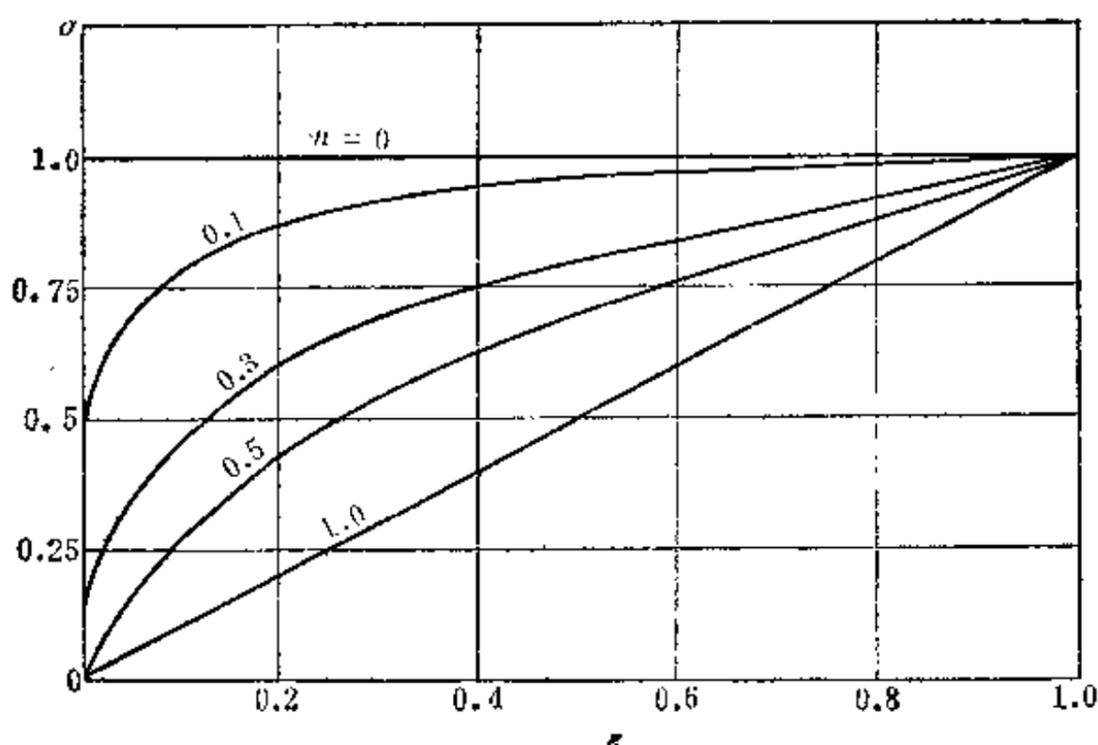


图2-5 n 值不同时的硬化曲线

表2-1 各种材料的c与n值

材	料	c 牛顿/毫米 ²	n
软	钢	710~750	0.19~0.22
黄	铜(60/40)	990	0.46
黄	铜(65/35)	760~820	0.39~0.44
磷	青铜	1100	0.22
磷	青铜(低温退火)	890	0.52
银		470	0.31
铜		420~460	0.27~0.34
硬	铝	320~380	0.12~0.13
铝		160~210	0.25~0.27

* 表中数据是指退火材料在室温和低变形速度下试验求得的。

2-3 各种冲压成形方法的力学特点与分类

正确的板料冲压成形工艺的分类方法，应该能够明确地反映出每一种类型成形工艺的共性，并在此基础上提供可能用共同的观点和方法分析、研究和解决每一类成形工艺中的各种实际问题的条件。在各种冲压成形工艺中毛坯变形区的应力状态和变形特点是制订工艺过程、设计模具和确定极限变形参数的主要依据，所以只有能够充分地反映出变形毛坯的受力与变形特点的分类方法，才可能真正具有实用的意义。

在冲压成形时，可以把变形毛坯分成变形区和不变形区。不变形区可能是已经经历过变形的已变形区或是尚未参与变形的待变形区，也可能是在全部冲压过程中都不参与变形的不变形区。当不变形区受力的作用时，叫作传力区。表2-2中列出拉深、翻孔与缩口时毛坯的变形区与不变形区的分布情况（图2-6）。

表2-2 冲压变形毛坯各区的划分

冲 压 方 法	变 形 区	不 变 形 区		
		已 变 形 区	待 变 形 区	传 力 区
拉 深	A	B	无	B
翻 孔	A	B	无	B
缩 口	A	B	C	C

从本质上看各种冲压成形过程就是毛坯变形区在力的作用下产生变形的过程，所以毛坯变形区的受力情况和变形特点是决定各种冲压变形根本性质的主要依据。

绝大多数冲压变形都是平面应力状态。一般在板料表面上不受力或受数值不大的力，所以可以认为在板厚方向上的应力数值为零。使毛坯变形区产生塑性变形的应力是在板料平面内相互垂直的两个主应力。除弯曲变形外，在大多数情况下都可以认为这两个主应力在厚度方向上的数值是不变的。因此，可以把所有冲压变形方式按毛坯变形区的受力情况（应力状态）和变形特点从变形力学理论的角度归纳为以下四种情况，并分别研究它们的变形特点。

1. 冲压毛坯变形区受两向拉应力的作用

在轴对称变形时，可以分为以下两种情况：

$$\sigma_r > \sigma_\theta > 0, \text{ 且 } \sigma_z = 0$$

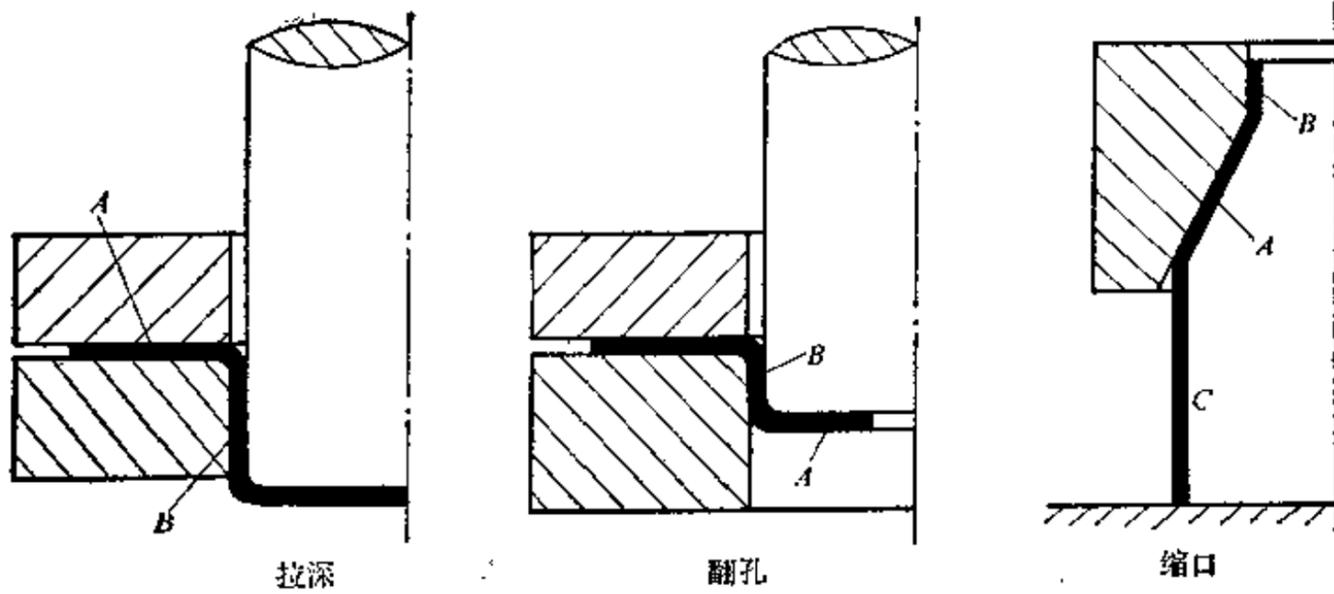


图2-6 冲压变形毛坯各区划分举例

$$\sigma_\theta > \sigma_r > 0, \text{ 且 } \sigma_t = 0$$

这两种情况在冲压应力图(图2-7)中处于GOH和AOH范围内,而且在冲压变形图(图2-8)中则处于AON及AOC范围内,与此相对应的变形是平板毛坯的局部胀形、内孔翻边、空心毛坯的胀形等。

2. 冲压毛坯变形区受两向压应力的作用

在轴对称变形时,可以分为下边两种情况:

$$\sigma_r < \sigma_\theta < 0, \text{ 且 } \sigma_t = 0$$

$$\sigma_\theta < \sigma_r < 0, \text{ 且 } \sigma_t = 0$$

这两种情况在冲压应力图中处于COD及DOE范围内,而在冲压变形图中则处于GOE

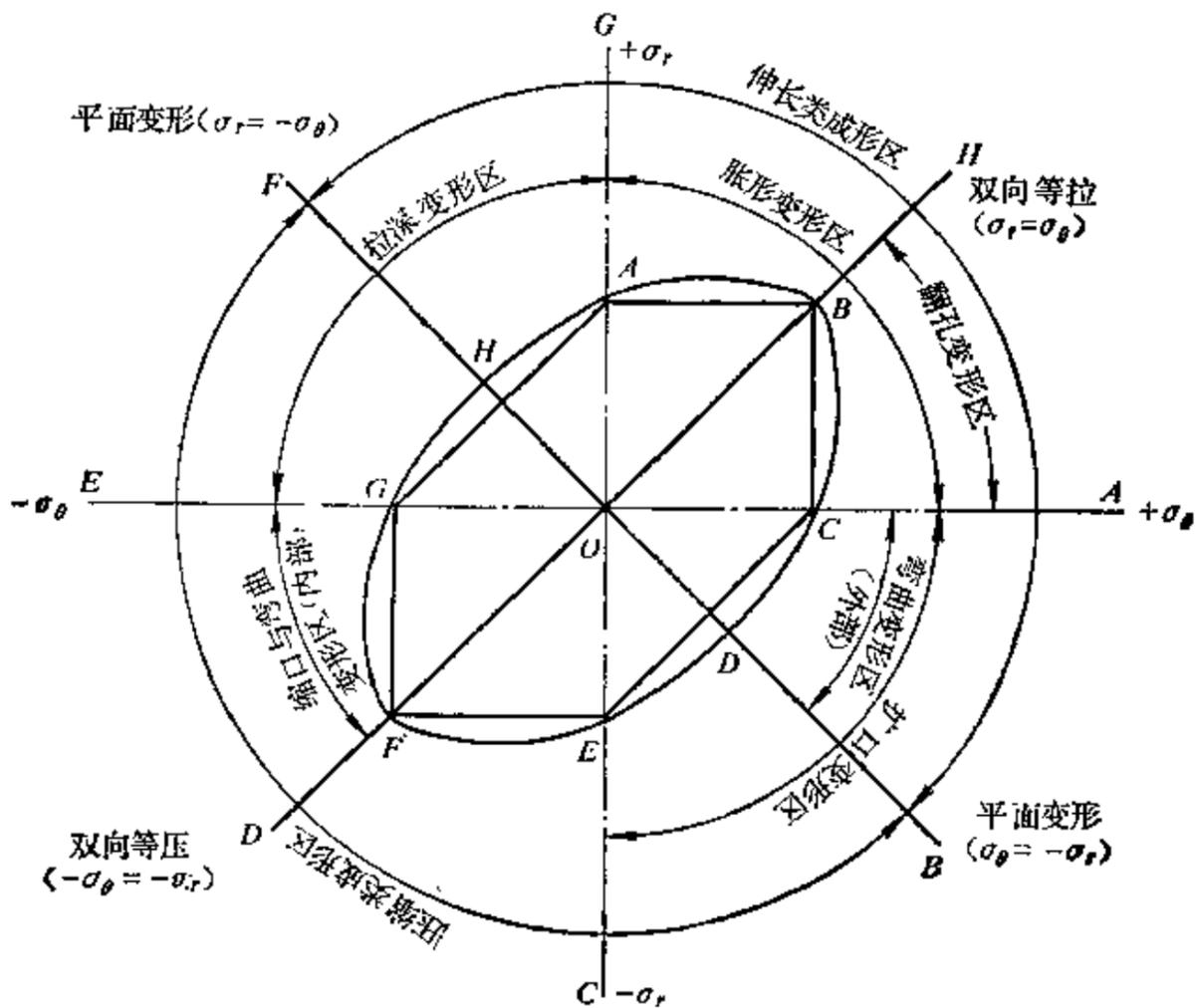


图2-7 冲压应力图

方向上的变形一定是压缩变形，称这种冲压变形为压缩类变形。压缩类变形包括冲压变形图中的 *MOL*、*LOH*、*HOG*、*GOE* 及 *EOD* 等五个区。*MOD* 是伸长类成形和压缩类成形在冲压变形图上的分界线。在冲压应力图上（图 2-7）*FOB* 是伸长类成形和压缩类成形的分界线。

由于伸长类成形和压缩类成形在变形力学上的本质差别，它们在冲压过程中出现的问题和解决的方法也是完全不同的。但是，对同一类变形中的各种冲压方法，却可以用相同的观点和方法去分析和解决冲压中的各种问题。以下举例说明。

关于极限变形参数的确定、影响因素和提高的措施等，对这两类成形方法都是不同的。

伸长类成形的极限变形参数主要决定于材料的塑性，并且可以用板材的塑性指标（简单拉伸试验中的延伸率或断面收缩率等）直接地或间接地表示。例如多数实验结果证实：平板毛坯的局部胀形深度、圆柱体空心毛坯的胀形系数、圆孔翻边系数、最小弯曲半径等都与延伸率之间具有比较明显的正比关系。

压缩类成形的极限变形参数（如拉深系数等），通常都是受毛坯传力区的承载能力的限制，有时则受变形区或传力区的失稳起皱的限制。这一点是确定压缩类成形工艺极限变形参数的主要依据。

由于两类成形方法的极限变形参数的确定基础不同，所以影响极限变形参数的因素和提高极限变形参数的途径和方法也不一样。

提高伸长类成形的极限变形参数的措施有：

1. 提高材料的塑性。如变形前的退火，分段成形时的中间退火等，都是为了消除前道成形工序中形成的硬化或冲裁时形成的表面硬化层以达到提高材料塑性并进而提高变形程度的目的。

2. 减小变形不均匀的程度。使变形趋向均匀，减小局部的集中变形，可以使总的均匀变形程度加大。如在用刚体冲模进行圆柱体空心毛坯的胀形时，均匀而有效的润滑可使变形均匀，提高总体的变形程度。另外，材料硬化性能的提高（指提高材料的硬化指数）也能防止产生过分集中的局部变形，并使胀形、翻边、扩口等伸长类成形的极限变形参数得到提高。

3. 消除毛坯变形区的局部硬化层或其他易于引起由应力集中而可能导致破坏的各种因素。如用整修或切削方法去除冲裁表面的毛刺，或者将带毛刺的毛坯表面置于弯曲模中朝向冲头的方向等方法，都可减少伸长类成形中的开裂现象。

提高压缩类成形的极限变形参数的措施：

1. 提高传力区的承载能力和降低变形区的变形抗力、摩擦阻力等。如通过建立不同的温度条件而改变传力区和变形区的强度性能的拉深方法：局部加热拉深、局部深冷拉深等都是基于这个道理。又如在拉深时采用不均匀局部润滑、用液体或橡胶代替刚体凹模的拉深方法都是从提高传力区的承载能力出发以提高拉深时变形程度的措施。

2. 采取各种有效的措施，防止毛坯变形区的失稳起皱。如有效的压边方法、足够大的压边力，有利于防止起皱的模具工作部分的形状和尺寸、合理的具有较高抗失稳能力的中间毛坯的形状等，都是在冲压生产中提高压缩类成形的极限变形程度所常采取的有效措施。

3. 以降低变形区的变形抗力为主要目的的退火。如多次拉深时的中间退火，这时的退火与伸长类成形时以恢复材料的塑性为主要目的的退火之间有很大的差别，进行退火的意义和方法也不相同。例如以极限拉深系数进行一次拉深工序之后，如不退火，仍然可以继续进

行下一次变形程度较小的拉深工序；但以极限胀形系数进行一次胀形加工之后，如不经恢复塑性的退火，再继续进行胀形是不可能的，即使采用较小的变形程度也是这样。

伸长类成形与压缩类成形的对比，可参见表 2-3。

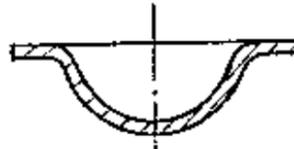
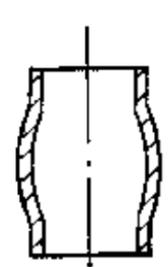
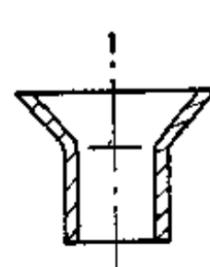
表2-3 伸长类成形与压缩类成形对比

项 目	伸 长 类 成 形	压 缩 类 成 形
变形区质量问题的表现形式	变形区因受拉过度而破坏	变形区受压引起的失稳起皱
成形极限的含义	主要受板料塑性的限制，与板厚的关系不大	一般不受板料塑性的影响，板厚的影响较大
变形区厚度变化	变薄	增厚
提高成形极限的方法	一般不用多次成形方法，只能用提高板料塑性和使变形均化等方法	常用多次成形的方法

在分析毛坯变形区变形性质的基础上，可以进一步从变形力学的角度把各种冲压成形方法划分成表 2-4 中的几种类型。具有单一变形区的冲压成形方法的变形性质与变形区的变形性质是一致的，完全可以用前述的观点和分析方法去研究它们的各种问题。

具有多数变形区的冲压成形方法的性质，可以分成三种情况来研究。第一种是以伸长变形为主的，如平板弯曲、锥形件拉深等。毛坯的变形区中伸长类变形区出现的问题是主要的，可以从伸长类变形的规律出发研究和解决成形的问题。第二种是以压缩类成形为主的，毛坯变形区中压缩类变形区出现的问题是主要的（如管材弯曲等），可以从压缩类变形的规律出发

表2-4 冲压变形分类

冲 压 成 形 方 法		简 图	ϵ_{θ}	ϵ_r
单 一 变 形 区 的 冲 压 成 形 方 法	伸 长 类 成 形	平板毛坯的局部胀形 	+	+
		空间毛坯的胀形 	+	+
	扩 口		+	-



(续)

冲压成形方法		简 图		ϵ_g	ϵ_r
单 一 变 形 区 的 冲 压 成 形 方 法	伸 长 类 翻 边	内孔翻边		+	-
		伸长类平面翻边		+	-
		伸长类曲面翻边		+	-
	拉 形	拉弯		+	-
		拉形		+	-
	压 缩 类 成 形	直壁零件的拉深		-	+
		压缩类平面翻边		-	+
		缩口		-	+
压缩类曲面翻边					

工艺方法所进行的变形趋向性及其控制的研究,可以作为确定该种成形方式的各种工艺参数,制定工艺过程、设计冲模和分析冲压过程中出现的某些产品质量问题的依据,所以它是个十分重要的问题。

一般情况下,总是可以把毛坯划分成为变形区和传力区。冲压设备给出的变形力,通过冲头和凹模,并且进一步通过传力区而施加于毛坯的变形区,使其发生塑性变形。例如,图2-9中所示的缩口加工中的毛坯A的部分是变形区,而B部分则是传力区。

① 在成形过程中,变形区和传力区并不是固定不变的,相反,它们的尺寸在不断地变化,而且也是在互相转化的。在图2-9b所示的缩口过程开始时,随着凹模的下降变形区在不断地扩大,传力区不断地在减小,金属则由传力区转移到变形区去。而在拉深过程中,情况恰好相反,变形区的尺寸不断地在减小,而金属则不断地由变形区转移到传力区去,形成为零件的侧壁。

② 当缩口发展到图2-9a所示的阶段时,变形区的尺寸大小不再发生变化,由传力区进入变形区的金属体积和由变形区转移出去的金属体积相等。

通常称这种状态为稳定变形过程。在稳定变形过程中,传力区B在不断地减小,已变形区C不断地增大(指缩口时),而变形区的尺寸大小和变形区内应力的数值与分布规律都不变,所以每一个瞬间的情况都可以代表全部的变形过程。

变形区发生塑性变形所必需的力,是由模具通过传力区获得的。而同一个毛坯的变形区和传力区都是相毗联的,所以在变形区与传力区的分界面上作用的内力的性质与大小一定是完全相同的。在这样同一个内力的作用下,变形区和传力区都有可能产生塑性变形,但是,由于它们可能产生的塑性变形的方式不同,而且也由于变形区和传力区之间的尺寸关系不同,通常总是有一个区需要比较小的塑性变形力,并首先进入塑性状态,产生塑性变形。因此,可以认为这个区是个相对的弱区。为了保证冲压过程的顺利进行,必须保证在该道冲压工序中应该变形的部分——变形区成为弱区,以便在把塑性变形局限于变形区的同时,排除传力区产生任何不必要的塑性变形的可能。根据上述的道理,可以得出一个十分重要的结论:在

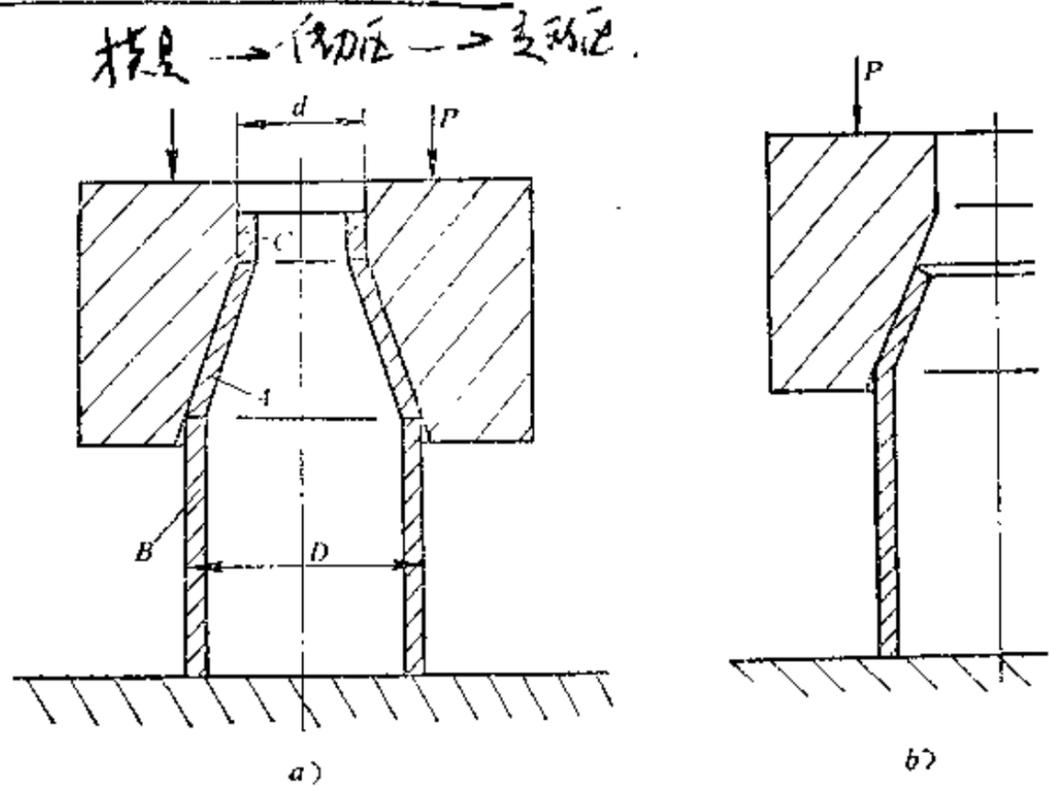


图2-9 缩口变形毛坯各区的划分
A—变形区 B—传力区 C—已变形区

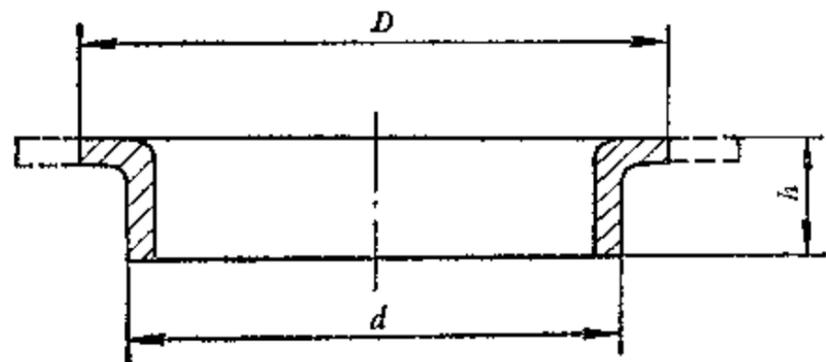


图2-10 变形趋向性对冲压工艺的影响

冲压过程中，需要最小变形力的区是个相对的弱区，而且弱区必先变形，因此变形区应为弱区。

“弱区必先变形，变形区应为弱区”的结论，在冲压生产中具有很重要的实用意义，例如有些冲压工艺的极限变形参数（拉深系数、缩口系数等）的确定，复杂形状零件的冲压工艺过程设计等等，都是以这个道理做为分析和计算的依据。

下面我们举一个简单的实例来说明这个道理。在图 2-9 所示的缩口过程中，于变形区 A 和传力区 B 的交界面上作用有数值相等的压应力 σ ，传力区产生塑性变形的方式是墩粗，其变形所需要的压应力为 σ_s ，所以传力区不致产生墩粗变形的条件是

$$\sigma < \sigma_s \quad (2-9)$$

变形区产生的塑性变形方式为切向收缩的缩口，所需要的轴向压应力为 σ_k ，所以变形区产生缩口变形的条件是

$$\sigma \geq \sigma_k \quad (2-10)$$

由式 (2-9) 和式 (2-10) 可以得出在保证传力区不致产生塑性变形的条件下能够进行缩口加工的条件

$$\sigma_k < \sigma_s \quad (2-11)$$

因为 σ_k 的数值决定于缩口系数 $\frac{d}{D}$ ，所以式 (2-11) 就成为确定极限缩口系数的依据。

极限拉深系数的确定方法，也与此相类似。这就是利用“弱区必先变形，变形区应为弱区”的道理为基础，确定极限变形参数的情况。

在设计工艺过程、选定工艺方案、确定工序和工序间尺寸时，也必须遵循“弱区必先变形，变形区应为弱区”的道理。如图 2-10 所示的零件，当 $D - d$ 较大， h 较小时，可用带孔的环形毛坯用翻边方法加工；但是，当 $D - d$ 较小， h 较大时，如用翻边方法加工，则不能保证毛坯外环是需要变形力较大的强区，以及翻边部分是变形力较小的弱区的条件。所以在翻边时，毛坯的外径必然收缩，使翻边加工成为不可能实现的工艺方法。在这种情况下，就必须改变原工艺过程为拉深后切底和切外缘的工艺方法，或者采用加大外径的环形毛坯，经翻边成形后再冲切外圆的工艺过程（如虚线所示）。

当变形区或传力区有两种以上的变形方式时，则首先实现的变形方式所需要的变形力最小。因此，在工艺过程设计和模具设计时，除要保证变形区为弱区外，同时还要保证变形区必须实现的变形方式要求最小的变形力。例如，在缩口时，变形区 A 可能产生的塑性变形是切向收缩的缩口变形和变形区在切向压应力作用下的失稳起皱；传力区 B 可能产生的塑性变形是直筒部分的墩粗和失稳。这时，为了使缩口成形工艺能够正常地进行，就要求在传力区不产生上述两种之一的任何变形的同时，变形区也不要发生失稳起皱，而仅仅产生所要求的切向收缩的缩口变形。在这四种变形趋向中，只能实现缩口变形的必要条件是：与其他所有变形方式相比，缩口变形所需的变形力最小。

又如在冲裁时，在冲头力的作用下，板料具有产生剪切和弯曲变形两种变形的趋向。如果采用较小的冲裁间隙，建立对弯曲变形不利（因为弯曲变形所需的力增大了），而对剪切有利的条件，便可以在发生很小的弯曲变形的情况下实现剪切，提高了零件的尺寸精度。

在冲压生产当中，对毛坯变形趋向性的控制，是保证冲压过程顺利进行和获得高质量冲压件的根本保证。毛坯的变形区和传力区并不是固定不变，而是在一定的条件下可以互相转

化的。因此，改变这些条件，就可以实现对变形趋向性的控制。

在实际生产当中，用来控制毛坯的变形趋向性的措施，有下列几个方面。

1. 变形毛坯各部分的相对尺寸关系，是决定变形趋向性的最为重要的因素，所以在设计工艺过程时，一定要合理地确定初始毛坯的尺寸和中间毛坯的尺寸，保证变形的趋向符合于工艺的要求。

图 2-11 a 所示的毛坯，由于其尺寸 D_0 与 d_p 的相对关系不同，具有三种可能的变形趋向：拉深、翻边与胀形。这三种变形的结果形成三种形状完全不同的零件。因此，在生产中必须根据冲压件的形状合理地确定毛坯的尺寸，用以控制变形的趋向，并得到所要求的零件形状和尺寸精度。

改变毛坯的尺寸，可以得到上述三种变形中的一种形式。当 $\frac{D_0}{d_p}$ 与 $\frac{d_0}{d_p}$ 都较小时，宽度

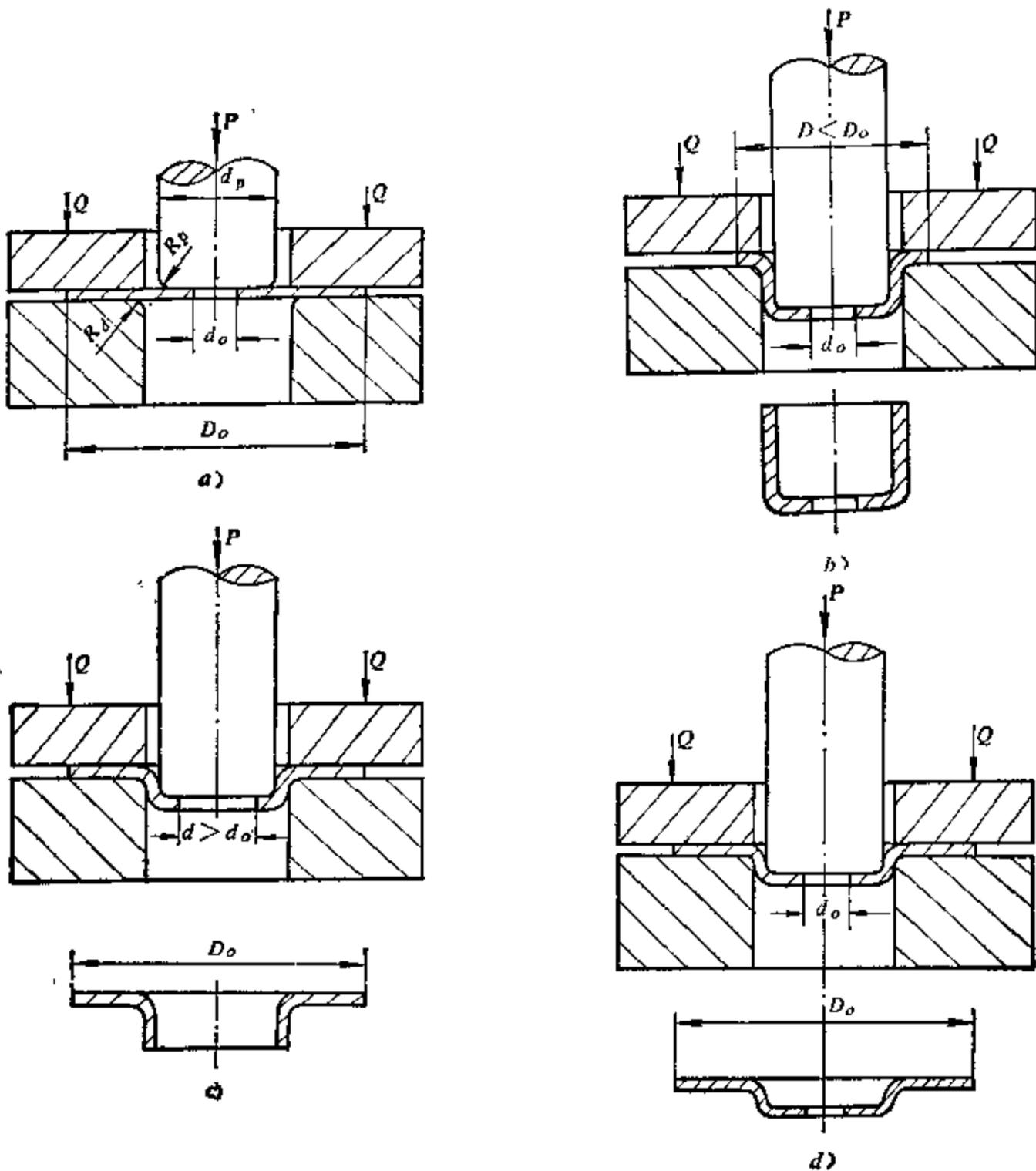


图2-11 环形毛坯的变形趋向

a—变形前的工具与毛坯 b—拉深 c—翻边 d—胀形

为 $D_o - d_p$ 的环形部分成为弱区, 于是得到毛坯的外径收缩的拉深变形 (图 2-11 b); 当 $\frac{D_o}{d_p}$ 与 $\frac{d_o}{d_p}$ 都比较大时, 宽度为 $d_p - d_o$ 的环形部分成为弱区, 于是得到毛坯内孔扩大的翻边变形 (图 2-11 c); 当 $\frac{D_o}{d_p}$ 很大, 而 $\frac{d_o}{d_p}$ 很小或等于零时 (不带内孔的毛坯), 虽然毛坯外环的拉深变形与内部的翻边变形的变形阻力都增大了, 但是毛坯的内部仍是相对的弱区, 产生的变形是内部的胀形 (图 2-11 d)。胀形时, 毛坯的外径和内孔的尺寸都不发生变化, 或者变化很小, 成形仅靠毛坯厚度的变薄实现。图 2-11 中所示毛坯的相对尺寸与变形趋向之间的关系, 列于表 2-5。

表 2-5 平板环形毛坯的变形趋向

尺寸关系	成形方式 (变形趋向)	备注
$\frac{D_o}{d_p} < 1.5 \sim 2, \frac{d_o}{d_p} < 0.15$	拉 深	
$\frac{D_o}{d_p} > 2.5, \frac{d_o}{d_p} > 0.2 \sim 0.3$	翻 边	要得到图 2-11 c 所示的零件, $\frac{d_o}{d_p}$ 的值必须加大, 否则内孔会开裂
$\frac{D_o}{d_p} > 2.5, \frac{d_o}{d_p} < 0.15$	胀 形	当 $\frac{d_o}{d_p} = 0$ 时, 是完全胀形

以毛坯的尺寸关系对变形趋向性的控制作用为基础, 进行冲压工艺过程设计的实例很多, 这里仅以钢球活座套的冲压加工为例, 做如下说明。图 2-12 是钢球活座套的冲压工艺过程, 共包括有冲裁下料 (a)、拉深 (b)、冲孔 (c)、翻边 (d) 等四道冲压工序。在第二道工序——拉深时, 毛坯的外环是弱区, 所以塑性变形发生在毛坯的外环部位, 并使其外径由 $\phi 59$ 减到 $\phi 52$, 但是, 当冲成 $\phi 24$ 的内孔以后, 使毛坯的中间部分由强区变为弱区, 并使原来是弱区的外缘部分转变成为相对的强区, 其结果使变形区由毛坯的外部转移到毛坯的中间部分, 从而保证了第四道工序——内孔扩大的翻边变形的进行。

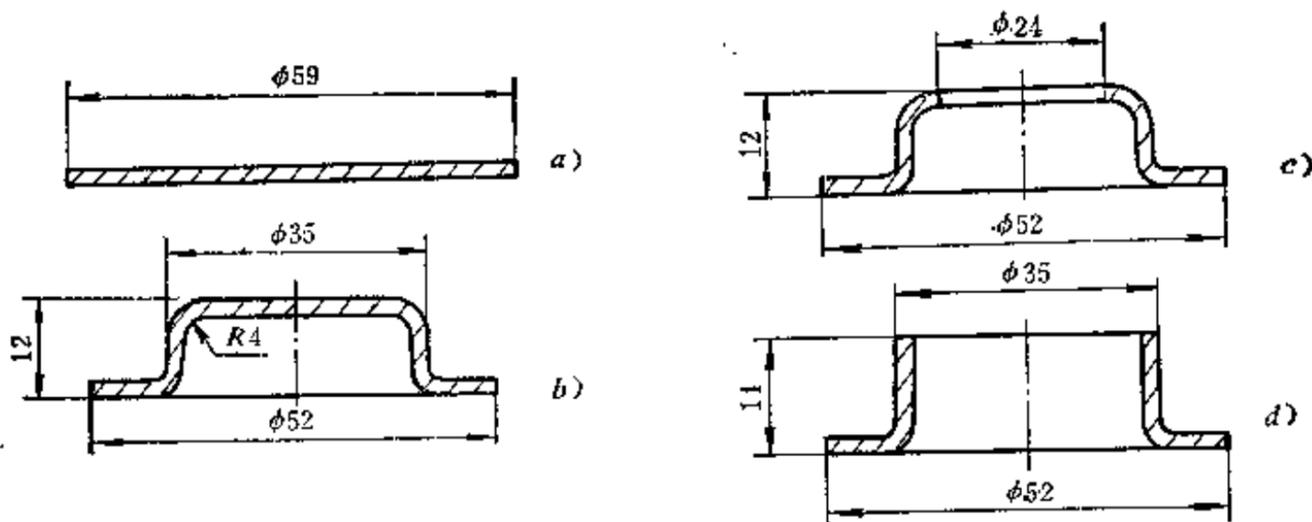


图 2-12 钢球活座套的冲压工艺过程中的变形趋向性的控制

a—冲裁下料 b—拉深 c—冲孔 d—翻边

2. 改变模具工作部分的几何形状和尺寸也能对毛坯的变形趋向性起控制作用。例如增大冲头的圆角半径 R_p , 减小凹模的圆角半径 R_d (图 2-11 a), 可以使拉深变形的阻力增大,

并使翻边的阻力减小，所以有利于翻边变形的实现。反之，假如增大凹模圆角半径 R_d 和减小冲头的圆角半径 R_p ，则有利于实现拉深变形，而不利于实现翻边变形。利用模具工作部分的圆角半径控制毛坯变形趋向的情况，在生产中是常常见到的，在新模具试冲调整时，时常要经过多次反复地修磨圆角才能冲成合格的零件。

3. 改变毛坯与模具接触表面之间的摩擦阻力，借以控制毛坯变形的趋向，这也是生产中时常采用的一个方法。例如，加大图 2-11 中所示的压边力 Q 的作用使毛坯和压边圈及凹模端面之间的摩擦阻力加大，结果不利于拉深变形，而有利于翻边和胀形变形的实现。反之，增加毛坯与冲头表面的摩擦阻力，减小毛坯与凹模表面的摩擦阻力，都有利于拉深变形。所以，对变形毛坯的润滑以及对润滑部位的选择，也都是对毛坯变形趋向起相当重要作用的因素。如拉深毛坯的单面润滑就是这个道理。

4. 采用局部加热或局部深冷的办法，降低变形区的变形抗力或提高传力区的强度，都能达到控制变形趋向性的目的，可使一次成形的极限变形程度加大，提高生产效率。例如，在拉深和缩口时采用局部加热变形区的工艺方法，就是基于这个道理。又如在不锈零件拉深时所采用的局部深冷传力区以达到增大变形程度目的的工艺方法，也是这个道理。另外，在材料的屈服比 $\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$ 较小的温度区间，对镁合金、钛合金或碳钢进行的拉深加工，也可以提高极限变形程度。这也是对变形趋向性控制的实例。

2-5 板料的冲压性能及试验方法

板料的冲压性能是指板料对各种冲压加工方法的适应能力，包括：便于加工，容易得到高质量和高精度的冲压件，生产率高（一次冲压工序的极限变形程度和总的极限变形程度大），模具消耗低，不易出废品等。

对板材的冲压性能及其试验方法的研究，在生产中的实际意义在于：

1. 用简便的方法，迅速而准确地确定板材对某种工艺的冲压性能，其结果做为板材生产部门和使用部门之间的付货与验收标准，以利于生产的正常进行。
2. 分析和判断生产中出现的与板材性能有关的质量问题，找出原因和解决的办法。
3. 根据冲压件的形状特点及其成形工艺对板材冲压性能的要求，进行原材料的种类与牌号的选取。
4. 为研究与生产具有较高冲压性能的新材料提供方向和鉴定方法。

当然，用实际的具体的零件所进行的试冲，可以非常直接地确定板材对该种冲压工艺的冲压性能，但是，所得到的结果不具有普遍的意义，而且由于没有数量上的概念，也不能做为统一的标准在生产中应用。所以必须建立在工业生产中能够通用的统一的试验方法和数据标准，用来确定和表示冲压性能。

各种不同的冲压工艺，其应力状态、变形特点以及变形区和传力区之间的关系等都不相同，所以对板材的冲压性能的要求也不一样。但是，从实际应用出发，完全可以把各种冲压方法按变形区的力学特点分为两类，伸长类成形与压缩类成形，并分别研究这两类成形方法对板材冲压性能的要求。

现在有很多种板材冲压性能的试验方法，但概括起来，可以分为直接试验和间接试验两

类。直接试验中板材的应力状态和变形情况与真实冲压时基本相同,所得的结果也比较准确;而间接试验时,板材的受力情况与变形特点都与实际冲压时有一定的差别,所以所得的结果也只能间接地反映板材的冲压性能,有时还要借助于一定的分析方法才能做到这一点。

间接试验方法有拉伸试验、剪切试验、硬度检查、金相检查等,其中拉伸试验具有简单易行,不需专用的板材试验设备等优点,而且所得的结果能从不同角度反映板材的冲压性能,所以它是一种很重要的试验方法。

板料的拉伸试验,用图2-13所示形状的标准试样(从待试验的板材上裁取),在万能材料试验机上进行。根据试验结果或利用自动记录装置,可以得到图2-14所示的应力与延伸率之间的关系曲线,即拉伸曲线。

拉伸试验所得到的表示板材机械性能的指标与冲压性能有很紧密的联系,现将其中较为重要的几项分述于下。

1. δ_u 与 δ

δ_u 叫做均匀延伸率, δ_u 是在拉伸试验中开始产生局部集中变形(细颈时)的延伸率。 δ 叫做总延伸率,或简称延伸率,它是在拉伸试验中试样破坏时的延伸率。 δ 与试样的相对长度有关,所以对所用试样的尺寸应有明确的规定。一般情况下,冲压成形都在板材的均匀变形范围内进行,所以 δ_u 对冲压性能有较为直接的意义。

δ_u 表示板材产生均匀的或称稳定的塑性变形的能力,它直接决定板材在伸长类变形中的冲压性能。可以用 δ_u 间接地表示伸长类变形的极限变形程度,如翻边系数、扩口系数、最小弯曲半径、胀形系数等等。实验结果也证实,大多数材料的翻边变形程度都与 δ_u 成正比例关系。

另外,板材的爱利克辛试验值也与 δ_u 成正比例关系,所以具有很大胀形成分的复杂曲面拉深件用的钢板,要求具有很高的 δ_u 值。

2. $\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$

$\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$ 称为屈服比,是材料的屈服极限与强度极限的比值。较小的屈服比几乎对所有的冲压成形都是有利的。

小的屈服比,对于压缩类成形工艺是有利的。在拉深时,如果板材的屈服点 σ_s 低,则变形区的切向压应力较小,材料起皱的趋势也小,所以防止起皱所必需的压边力和摩擦损失

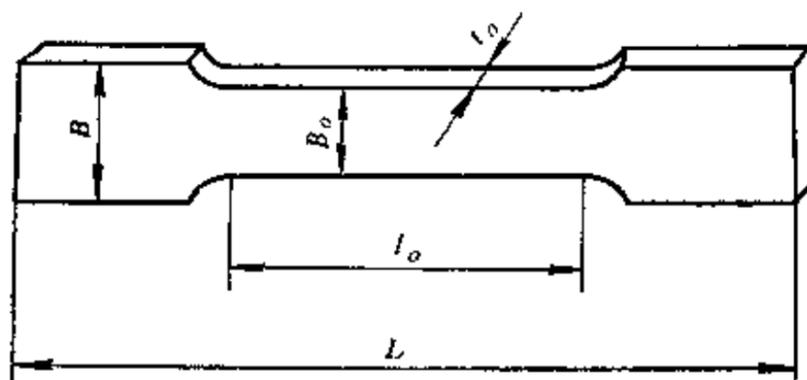


图2-13 拉伸试验用的试样

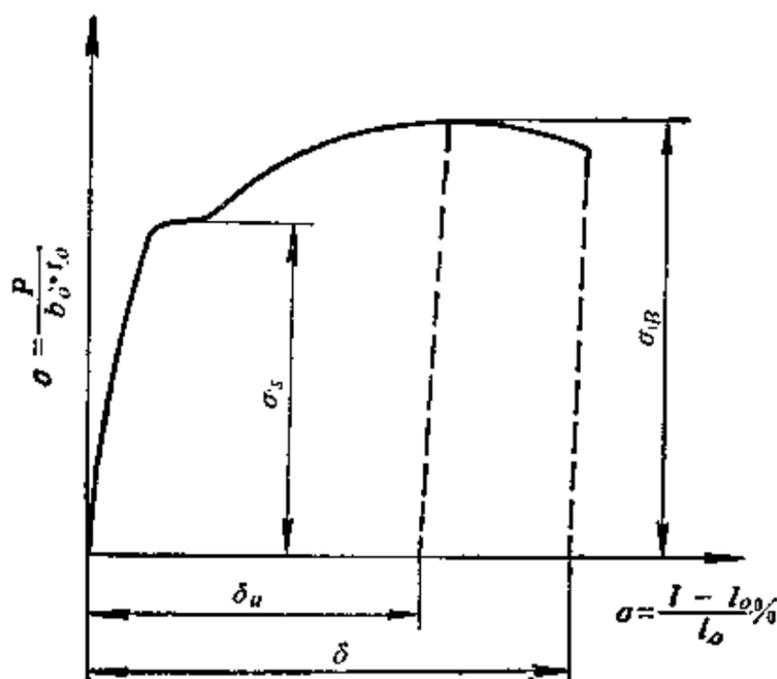


图2-14 拉伸曲线

都要相应地降低,结果对提高极限变形程度有利。例如,当低碳钢的 $\frac{\sigma_s}{\sigma_b} \approx 0.57$ 时,其极限拉深系数为 $m = 0.48 \sim 0.5$;而65Mn的 $\frac{\sigma_s}{\sigma_b} \approx 0.63$,其极限拉深系数则为 $m = 0.68 \sim 0.7$ 。

在伸长类的成形工艺中,如胀形、拉型、拉弯、曲面形状零件的成形等,当 σ_s 低时,为消除零件的松弛等弊病和为使零件的形状和尺寸得到固定(指卸载过程中尺寸的变化小)所必需的拉力也小。这时由于成形所必须的拉力与毛坯破坏时的拉断力之差较大,所以成形工艺的稳定性高,不容易出废品。

弯曲件所用板材的 σ_s 低时,卸载时的回弹变形也小,有利于提高弯曲零件的精度。

当材料的种类相同,而且延伸率相近时,较小的屈强比表明其硬化指数 n 大,所以有时也可以简便地用 $\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$ 代替 n 值,表示材料在伸长类成形工艺中的冲压性能。

由此可见,屈强比对板材的冲压性能的影响是多方面的,而且也是很重要的。所以在很多标准中都对冲压用板料的屈强比有一定的要求。例如我国冶金标准规定:用于具有相当大胀形成分的复杂形状零件的深拉深用ZF级钢板的屈强比不大于0.66。

3. 硬化指数 n

硬化指数 n ,也称 n 值,它表示在塑性变形中材料硬化的强度。 n 值大的材料,在同样的变形程度下,真实应力增加的要多。 n 值大时,在伸长类变形过程中可以使变形均匀化,具有扩展变形区,减少毛坯的局部变薄和增大极限变形参数等作用。尤其对于复杂形状的曲面零件的深拉深成形工艺,当毛坯中间部分的胀形成分较大时 n 值的上述作用对冲压性能的影响更为显著。具有不同 n 值材料的爱利克辛试验结果,也表明 n 值与爱利克辛试验值之间存在有正比例关系。

硬化指数 n 的数值,可以根据拉伸试验结果所得的硬化曲线,利用式(2-8)在对数座标系统里求得。也可以利用具有不同宽度的阶梯形拉伸试样所做的拉伸试验结果,经过一定的计算求得(计算方法从略)。

4. 板厚方向性系数

板厚方向性系数 r ,也叫做 r 值,它是板料试样拉伸试验中宽度应变 ε_b 与厚度应变 ε_t 之比,即

$$r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_t} = \frac{\ln \frac{B}{B_0}}{\ln \frac{t}{t_0}}$$

上式中 B_0 、 B 、 t_0 与 t ,分别是变形前后试样的宽度与厚度。

r 值的大小,表明板材在受单向拉应力作用时,板平面方向和厚度方向上的变形难易程度的比较,也就是表明在相同的受力条件下板材厚度方向上的变形性能和板平面方向上的差别,所以叫做板厚方向性系数,有时也叫塑性应变比。当 $r > 1$ 时,板材厚度方向上的变形比宽度方向上的变形困难。所以 r 值大的材料,在复杂形状的曲面零件拉深成形时,毛坯的中间部分在拉应力作用下,厚度方向上变形比较困难,即变薄量小,而在板料平面内与拉应力相垂直的方向上的压缩变形比较容易,结果使毛坯中间部分起皱的趋向性降低,有利于冲压加工的进行和产品质量的提高。

同样道理， r 值大时，也使筒形件的拉深极限变形程度增大，用软钢、不锈钢、铝、铜、黄铜等所做的实验也证明了拉深程度与 r 值之间的关系（表 2-6）。

表2-6 拉深程度与 r 值间关系

r 值	0.5	1	1.5	2
拉深程度 $K = \frac{D}{d}$	2.12	2.18	2.25	2.5

板料的 r 值可以用拉伸实验的方法测定。 r 值的大小，除决定于材料的性质外，也随拉伸实验中的延伸率的增大而变化（稍有降低）。因此，一般资料中都规定 r 值应取相对延伸率为 20% 时测量的结果。

冲压生产所用的板材都是经过轧制的，其纵向和横向的性能不同，在不同方向上的 r 值也不一样。为了统一实验方法，便于应用，常用下式计算板厚方向性系数的平均值，并做为代表板材冲压性能的一项重要指标。

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (2-12)$$

式中 r_0 、 r_{90} 与 r_{45} 分别是板材的纵向（轧制方向）、横向和 45° 方向上的板厚方向性系数。

5. 板平面方向性

当在板料平面内不同方向上裁取拉伸试样时，拉伸试验中所测得的各种机械性能、物理性能等也不一样，这说明在板材平面内的机械性能与方向有关，所以称为板平面方向性。在圆筒形零件拉深时，板平面方向性明显地表现在零件口部形成的突耳现象（图 2-15）。板平面方向性越大，突耳的高度也越大，这时必须增大切边余量，增加材料消耗。

另一方面，板平面方向性大时，在拉深、翻边、胀形等冲压过程中，能够引起毛坯变形的不均匀分布，其结果不但可能因为局部变形程度的加大，而使总体的极限变形程度减小，而且还可能形成冲压件的不等壁厚，降低冲压件的质量。

板平面方向性主要表现为机械性能在板平面内不同方向上的差别，但在表示板材机械性

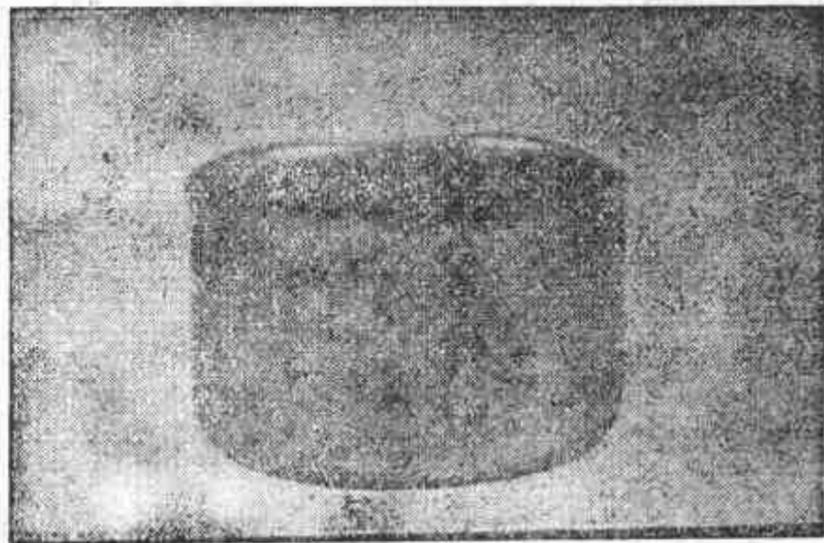


图2-15 拉深时的突耳现象

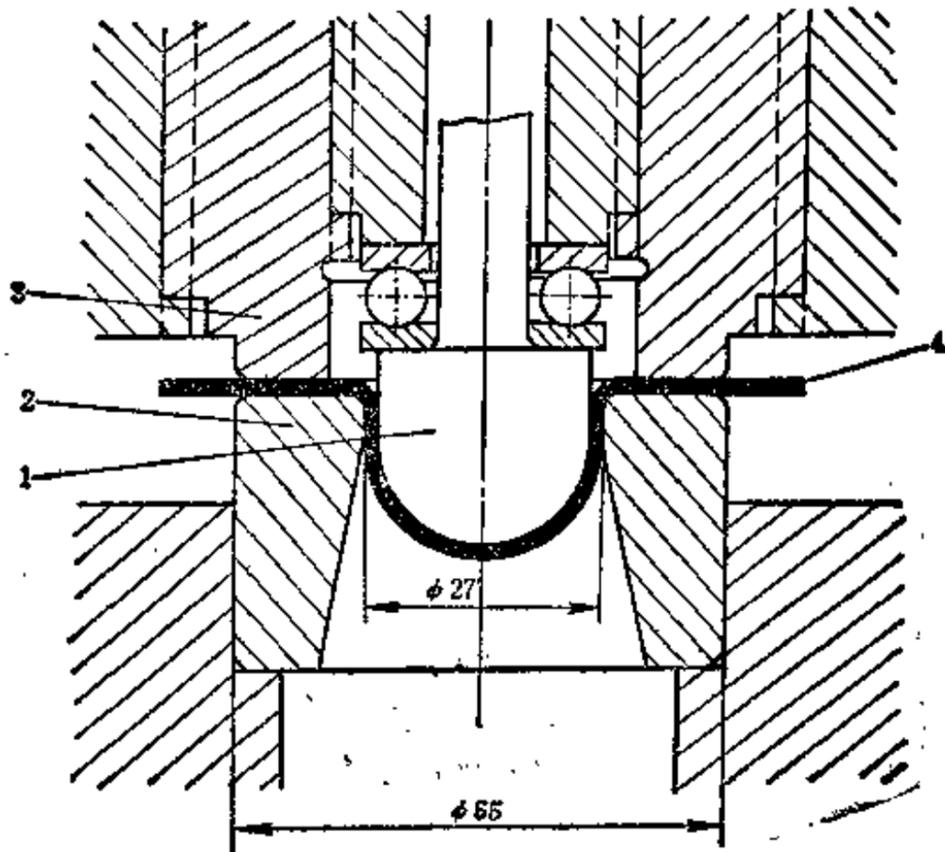


图2-16 爱利克辛试验装置的主要形状与尺寸

1—冲头 2—凹模 3—压边圈 4—试样

极限拉深程度)表示,即

$$LDR = \frac{D_{0max}}{d_p}$$

由于这种试验方法的原理和拉深时的变形条件是完全相同的,所以所得的结果,可以综合地反映出在拉深变形区和传力区不同受力条件下板材的冲压性能。但是,为了进行试验并取得最终的结果,需用较多数量的试件,而且还要经过多次的反复试验——这是它的主要缺点之一。另外,用此方法所得试验的结果,也因为受到操作上的各种因素(如压边力、润滑等)的影响而产生波动,所以试验结果的可靠性也不十分高。

b. 拉深力对比试验法

拉深力对比试验法也叫 TZP 法,其原理是用在一定拉深变形程度(通常取拉深试验件毛坯直径 D_0 与冲头直径 d_p 的比值为 $\frac{D_0}{d_p} = \frac{52}{30}$) 下的最大拉深力与在试验中已经成形的试样侧壁的拉断力之间的关系作为判断拉深性能的依据。当然,这两个力之间的差别越大,板材的拉深性能也越好。试验方法的原理如图 2-19 所示。采用可以一次拉深成功、不致发生破坏的拉深试样直径,按一般方法进行拉深试验。当拉深力达到最大值 P_{max} 以后,随即加大压边力使试样的外法兰边固定,消除其以后继续变形和被拉入凹模的可能。然后再增加冲头力直到使试样于侧壁部位被拉断,并测得拉断力 P 。试验过程如图 2-18 所示,而拉深试验中力的变化,如图 2-19 所示。根据测得的最大拉深力 P_{max} 与试样侧壁拉断力 P 的数值用下式来表示板材的冲压性能。

$$T = \frac{P - P_{max}}{P} \times 100\%$$

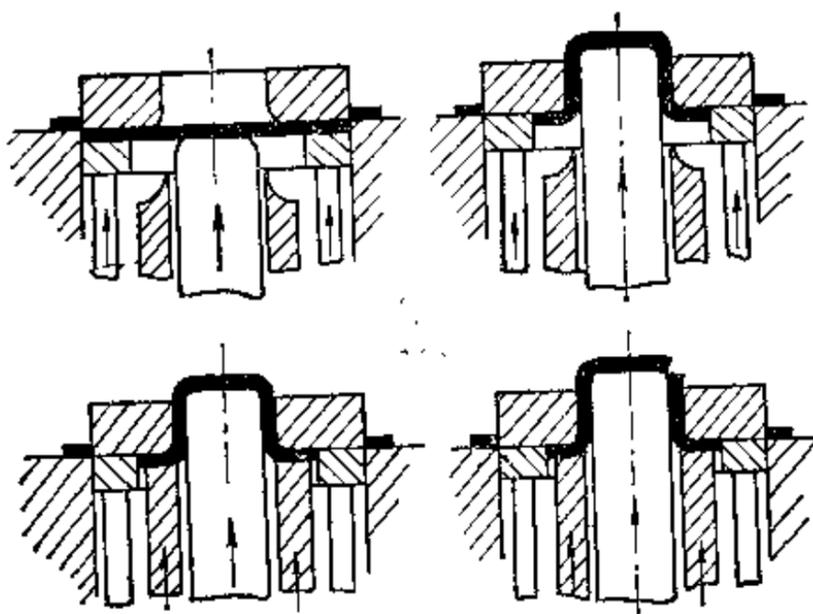


图2-18 TZP 试验法

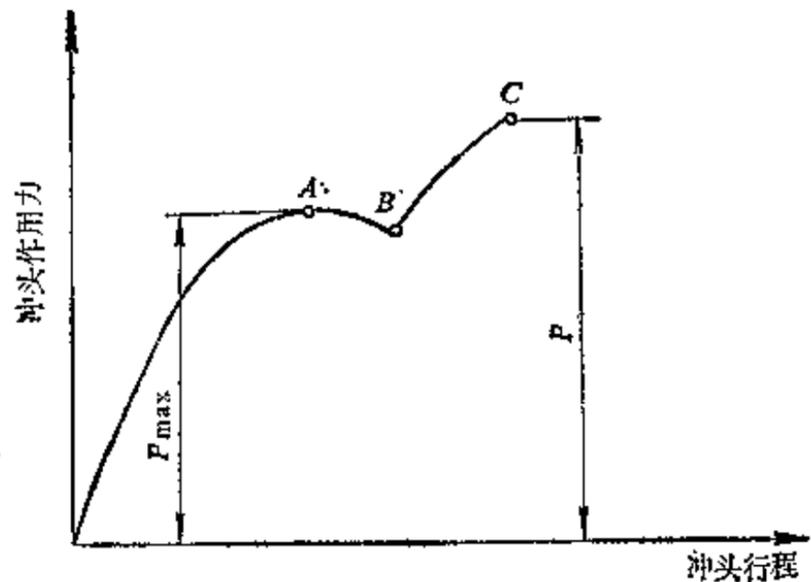


图2-19 拉深性能 T 值的确定过程
A—最大拉深力 B—外边缘固定 C—拉断

c. 锥形件拉深试验法

实际上锥形件拉深试验法是同时确定板材的拉深性能和胀形性能的综合试验方法,其实试验结果可以做为评定板材冲压性能的一项重要指标。试验所用装置如图 2-20 所示。用球形冲头和 60° 角的锥形凹模,在不用压边的条件下做圆形毛坯的拉深试验。一般取凸模直径 d_p 与试样毛坯直径 D_0 的比值为 $\frac{d_p}{D_0} = 0.35$ 。试验中测量锥形件于底部发生破坏时的上口直径,称之为 CCV 值并用以表示板材的冲压性能。由于材料方向性的影响,锥形件上口的直

径在不同方向上也有差别 (图 2-21), 所以通常采用其平均值, 即取 CCV 为

$$D = \frac{D_{\max} + D_{\min}}{2} \quad (2-14)$$

或

$$D = \frac{D_0 + D_{90} + 2D_{45}}{4} \quad (2-15)$$

式中 D_{\max} 与 D_{\min} 分别是锥形拉深试样破坏时上口的最大直径和最小直径;

D_0 、 D_{90} 与 D_{45} 分别是板材纵向、横向和 45° 方向上锥形拉深试样上口的直径。

锥形拉深件底部发生破坏时的上口直径越小, 即 CCV 值越小, 说明用这个试验方法可能产生的变形越大, 也就是板材的冲压性能越好。锥形拉深件试验法不用压边装置, 可以排除压边条件对试验结果的影响, 而且用一个试样即可简便地完成试验等都是它的特点。

除上述各种冲压性能的试验方法外, 还有确定弯曲性能的冷弯试验法、确定翻边性能的扩孔试验法、确定拉深性能的楔形拉伸试验法等, 其原理均比较简单, 而且试验中试样的受力情况和变形性质均与实际冲压变形非常接近, 在这里就不再做详尽的介绍了。

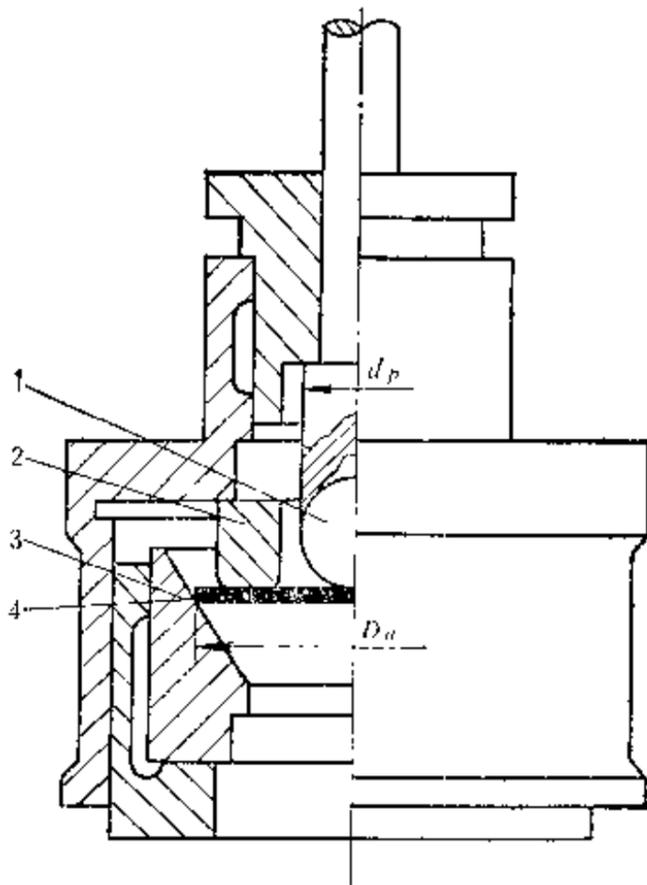


图2-20 锥形件拉深试验法

1—球形冲头 2—支撑圈 3—凹模 4—试样

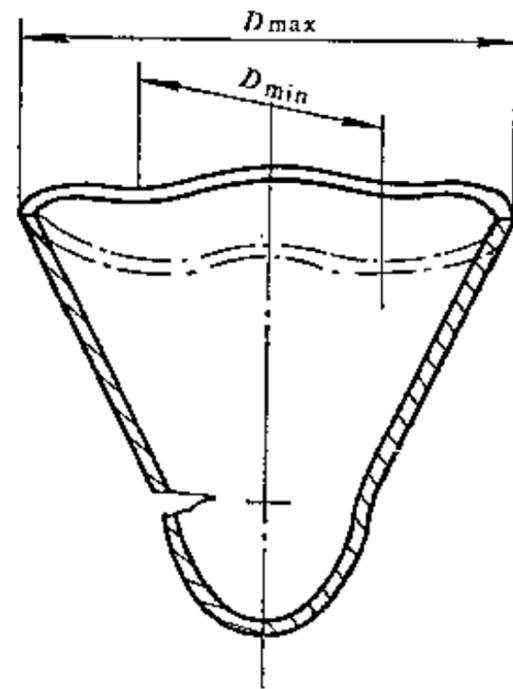


图2-21 底部破坏后的锥形拉深件

第三章 冲 裁

冲裁是利用冲模使材料分离的一种冲压工序。冲裁，从广义上说，是分离工序的总称，它包括切断、落料、冲孔、修边、切口等多种工序。但一般来说，冲裁工艺主要是指落料和冲孔工序。冲裁的用途极广，它既可直接冲出成品零件，又可为其他成形工序制备毛坯。

冲裁以后，板料分成两个部分，即落料部分和带孔部分。若冲裁的目的是为了制取一定外形的冲落部分，则这种冲裁工序称为落料；若为了制取内孔，则称为冲孔。例如图 3-1 所示的垫圈，制取外形 $\phi 22$ 的冲裁工序称为落料，而制取内孔 $\phi 10.5$ 的工序称为冲孔。

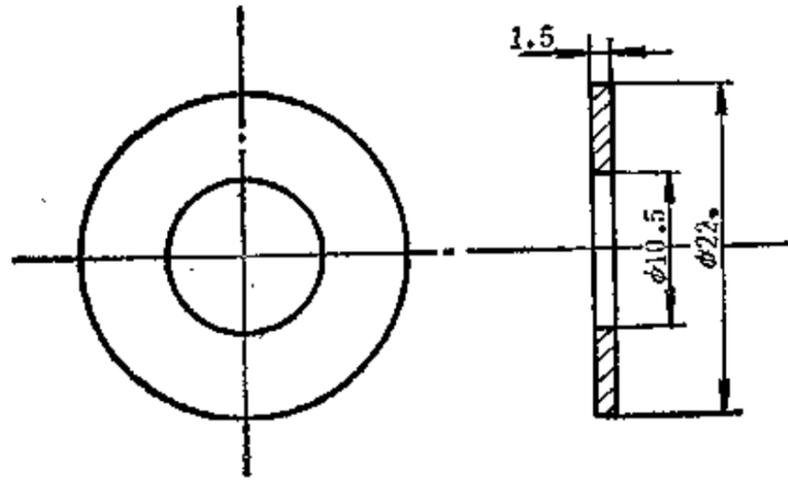


图3-1 落料与冲孔

根据变形机理的不同，冲裁可以分为普通冲裁和精密冲裁两类。其不同特点见表 3-1。

表3-1 普通冲裁与精密冲裁的比较

特 点	普 通 冲 裁	精 密 冲 裁
分离机理	冲模上、下刃口挤入材料一定深度后，刃口附近的材料产生剪裂纹而破坏，并使材料分离。上、下刃口尚未重迭，材料分离已经完成。	冲模上、下刃口挤入材料后并不产生剪裂纹破坏，而是以金属塑性变形的形式使材料被挤出而实现分离。上、下刃口重迭时才完成分离过程。
断面质量	断面由光亮带和剪裂带等构成，光亮带光洁度高，其断面与板平面垂直，剪裂带表面粗糙并有一定斜度。	断面全部是光亮带，断面光洁度高，并与板平面垂直。
毛 刺	材料破坏的初期，在尚未完成分离之前，已出现毛刺，以后随模具运动，毛刺在通过已被分离的剪裂带时产生了变形。毛刺大小并不和间隙成正比关系。	毛刺在材料分离结束时出现，毛刺形成后已不与被分离的断面接触，故不再变形，基本保持原状。毛刺高度和厚度与间隙有某种近似的正比关系。
塌 角	有塌角	由于有齿圈及反压力，塌角比普通冲裁小。
表面平直度	板平面略有弯曲	比普通冲裁时好。
间隙的数值	冲模间隙的功用在于建立剪切破坏时的应力状态。间隙数值与材料及其厚度有关，一般可分为大间隙和小间隙等冲裁。	所取的冲模间隙数值，要有利于建立三向压应力状态，抑制断裂破坏的产生，因此间隙数值取得很小，但又要使所取间隙能顺利实现分离并不致啃坏模具。材料及厚度对间隙数值影响很小。

(续)

特 点 \ 类 别	普 通 冲 裁	精 密 冲 裁
冲 模 刃 口	冲模刃口要尽量锋利，以便形成明显的不均匀变形和应力集中，促使材料产生剪裂纹而破坏	冲模刃口不一定要锋利，甚至反而要做出倒角或小圆弧，目的是为了形成三向压应力状态，增强静水压效应以抑制材料的断裂破坏
被 冲 压 的 材 料	没有特殊的要求。不过一般倾向于加工较硬的材料，以防止塌角和毛刺的产生，材料硬度以不影响模具重磨寿命为好	材料应具有良好的塑性，对于低塑性材料，时常在精冲前采用软化处理以提高其塑性

3-1 冲裁过程的分析

为了深入掌握冲裁工艺，控制冲裁件的质量，认真分析冲裁时板料分离的实际过程是非常必要的。

图 3-2 是常用金属材料的冲裁过程。当模具间隙正常时，这个过程大致可以分成三个阶段。

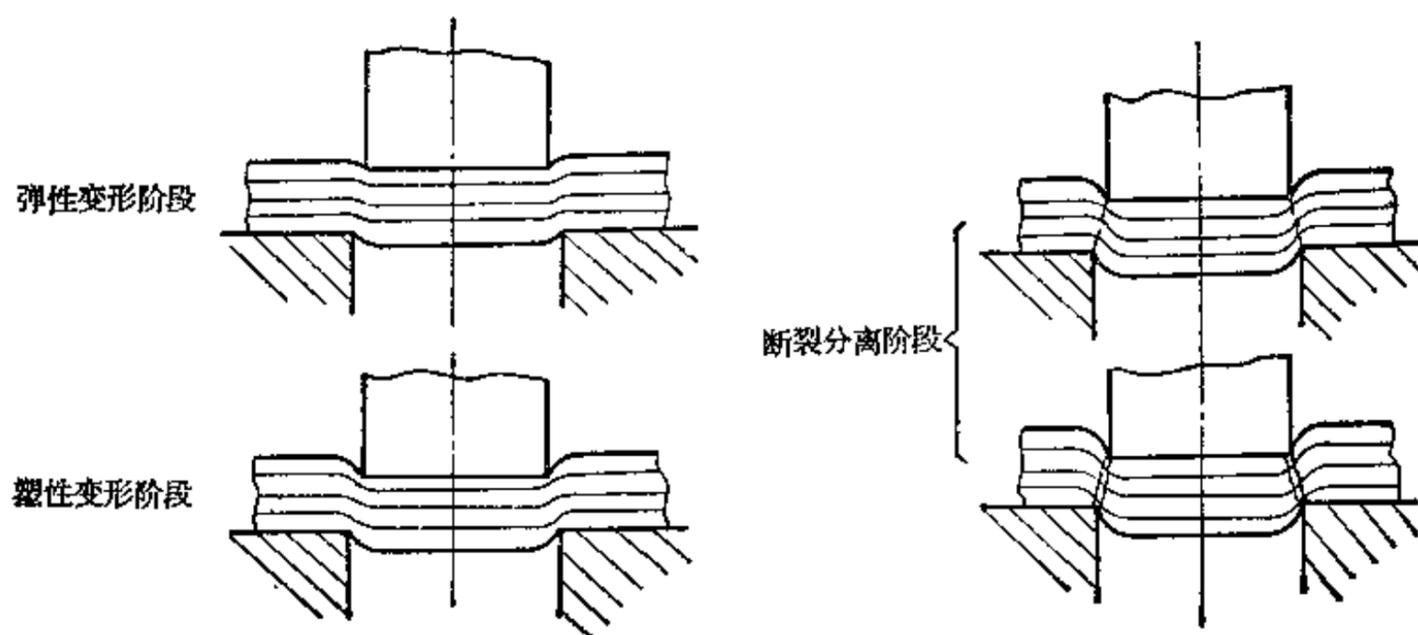


图3-2 冲裁过程

1. 弹性变形阶段

冲头接触板料后，开始压缩材料，并使材料产生弹性压缩、拉伸与弯曲等变形。这时冲头略挤入材料，材料的另一侧也略挤入凹模洞口。随着冲头继续压入，材料内的应力达到弹性极限。此时，凸模下的材料略有弯曲，凹模上的材料则向上翘。间隙越大，弯曲和上翘越严重。

2. 塑性变形阶段

当冲头继续压入，压力增加，材料内的应力达屈服极限时便开始进入第二阶段，即塑性变形阶段。这时冲头挤入材料的深度逐渐增大，即塑性变形程度逐渐增大，材料内部的拉应力和弯矩都增大，变形区材料硬化加剧，冲裁变形力不断增大，直到刃口附近的材料由于拉应力的作用出现微裂纹时，冲裁变形力达到最大值。材料出现微裂纹，说明材料开始破坏，

锋利程度、模具结构和冲裁速度等冲裁条件有关。

如间隙较大时，材料中的拉应力将增大，容易产生剪裂纹，塑性变形阶段较早结束，因此光亮带要小一些，而剪裂带、塌角和毛刺都比较大，冲裁件的翘曲现象也较显著。反之，间隙较小时，材料中拉应力成分减小，静水压效果增强，裂纹的产生受到抑制，所以光亮带变大，而塌角、斜度、翘曲等现象均减小。

间隙过大或过小均将导致上、下两方的剪裂纹不能相交重合于一线（图 3-4）。间隙太小时，凸模刃口附近的裂纹比正常间隙时向外错开一段距离。这样，上、下两裂纹中间的材料随着冲裁过程的进行将被第二次剪切，并在断面上形成第二个光亮带（图 3-5），这时毛刺也增大。间隙过大时，凸模刃口附近的剪裂纹较正常间隙时向里错开一段距离，材料受到很大的拉伸，光亮带小，毛刺、塌角、斜度也都增大（图 3-5 c）。此外，间隙过大或过小时均使冲裁件尺寸与冲模刃口尺寸的偏差增大。

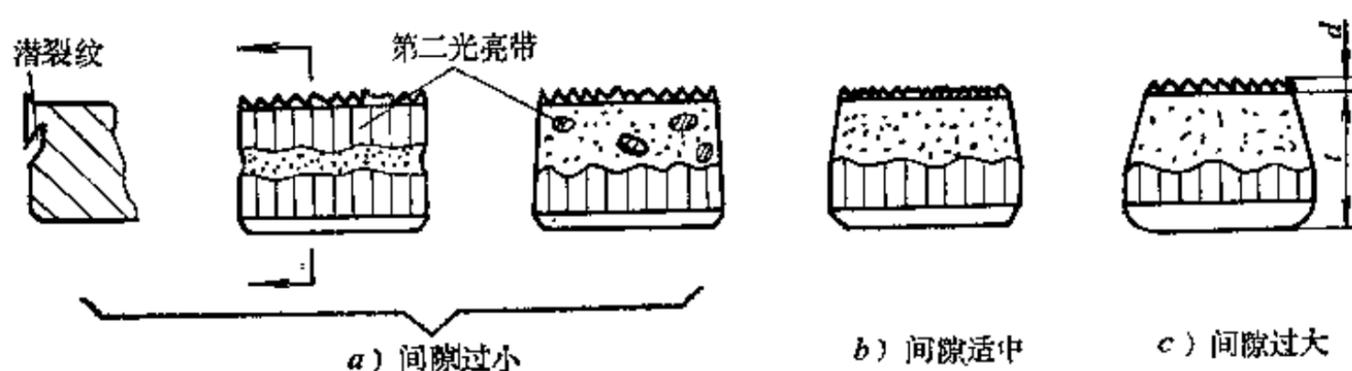


图3-5 间隙对冲裁断面的影响

间隙合适，即在合理间隙范围内时，上、下剪裂纹基本重合于一线，这时光亮带约占板厚的 $1/3$ 左右，塌角、毛刺和斜度也均不大，可以满足一般冲裁的要求。

从上面的分析中可以看出，冲裁件的质量主要是通过断面光亮带大小、塌角、毛刺以及冲裁件的翘曲等来判断的。增大光亮带的关键在于推迟剪裂纹的产生，所以要尽量减小材料内的拉应力和弯曲力矩，其主要途径是减小间隙，压紧凹模上的材料，对凸模下的材料施加反压力，并注意润滑等。减小塌角、毛刺和翘曲的措施，除了尽可能采用合理间隙的下限值外，还要注意保持刃口的锋利，采用压板和在凸模下面加反压力等。

普通冲裁断面的光洁度和允许的毛刺高度见表 3-2、3-3，其经济精度不高于 GB 6 级。若冲裁件要求更高的质量，则应采用精密冲裁工艺。

表3-2 冲裁件断面光洁度

料厚(毫米)	~1	1~4	4~5
光洁度	∇5	∇4~∇2	∇1

表3-3 冲裁毛刺的允许高度(毫米)

料厚(毫米)	生产时	试模时
~0.3	≤0.05	≤0.015
0.5~0.1	≤0.10	≤0.03
1.5~2.0	≤0.15	≤0.05

3-2 冲裁模间隙

从上述的冲裁过程分析中可知，冲裁凸模和凹模间的间隙，对冲裁件断面质量有极重要的影响。此外，冲裁间隙还影响模具寿命、卸料力、推件力、冲裁力和冲裁件的尺寸精度。

因此，冲裁间隙是一个非常重要的工艺参数。

冲裁模的合理间隙数值应使冲裁时材料中的上、下两剪裂纹重合，正好相交于一条连线上（图3-6）。根据图上的几何关系可得：

$$c = (t - b) \operatorname{tg} \beta = t \left(1 - \frac{b}{t} \right) \operatorname{tg} \beta$$

式中 c —— 单边间隙；
 t —— 材料厚度；
 b —— 光亮带宽度，或产生裂纹时凸模挤入的深度；
 $\frac{b}{t}$ —— 产生裂纹时凸模挤入材料的相对深度；
 β —— 剪裂纹与垂线间的夹角。

由上式可以看出，合理间隙值取决于 t 、 $1 - \frac{b}{t}$ 、 $\operatorname{tg} \beta$ 等三个因素。由于角度 β 值的变化不大（表3-4），所以间隙数值主要决定于前两个因素的影响。

材料厚度增大，间隙数值应成正比地增大，反之亦然。

比值 b/t 是产生剪裂纹时的相对挤入深度，它与材料有关。材料塑性好，光亮带 b 大，间隙数值就小。塑性低的硬脆材料，间隙数值就大一些。另外， b/t 还与材料的厚度有关，对同一种材料来说， b/t 不是一个常数。 b/t 的数值见表3-4。例如，薄料冲裁时，光亮带 b 的宽度增大， b/t 的比值也大。因此，薄料冲裁的合理间隙要小一些，而厚料的 b/t 数值小，合理间隙则应取得大一些。

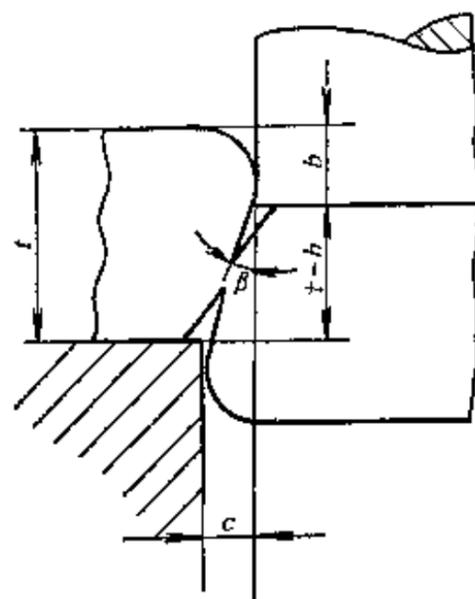


图3-6 冲裁模间隙

表3-4 b/t 与 β 值（厚度 t ，毫米）

材 料	$b/t \times 100\%$				β
	$t < 1$	$t = 1 \sim 2$	$t = 2 \sim 4$	$t > 4$	
软 钢	75~70	70~65	65~55	50~40	$5^\circ \sim 6^\circ$
中 硬 钢	65~60	60~55	55~48	45~35	$4^\circ \sim 5^\circ$
硬 钢	50~47	47~45	44~38	35~25	4°

综合上述两个因素的影响，可以看出，材料厚度对间隙的综合影响并不是简单的正比关系。所以，按材料厚度的百分比来确定合理间隙时，这个百分比应根据材料厚度本身来选取。

上述确定间隙的方法可以用来说明材料性能、厚度等几个因素对间隙数值的一些影响，但在实际工作中都采用比较简便的，由实验方法制定的表格来确定合理间隙的数值。

此外，也可采用下述经验公式计算合理间隙 c 的数值。

$$c = mt$$

式中 t —— 材料厚度，毫米；
 m —— 系数，与材料性能及厚度有关。

在实用上，当材料较薄时，可以选用下列数值：

软钢、纯铁 $m = 6 \sim 9\%$

铜、铝合金	$m = 6 \sim 10\%$
硬钢	$m = 8 \sim 12\%$

当材料厚度 $t > 3$ 毫米时，由于冲裁力较大，可以适当放大系数 m ，当断面质量没有特殊要求时，一般可以放大到1.5倍。

从间隙对冲裁件断面质量的影响曲线（图3-7）可以明显看出间隙对光亮带和剪裂带的高度、断面的斜度以及毛刺等的影响。间隙过小时，毛刺增大，断面有夹层，并出现第二光亮带。间隙逐渐加大，上述缺陷也逐渐消除，但间隙过大后，对薄料则形成拉长的毛刺，对厚料则形成很大的塌角。

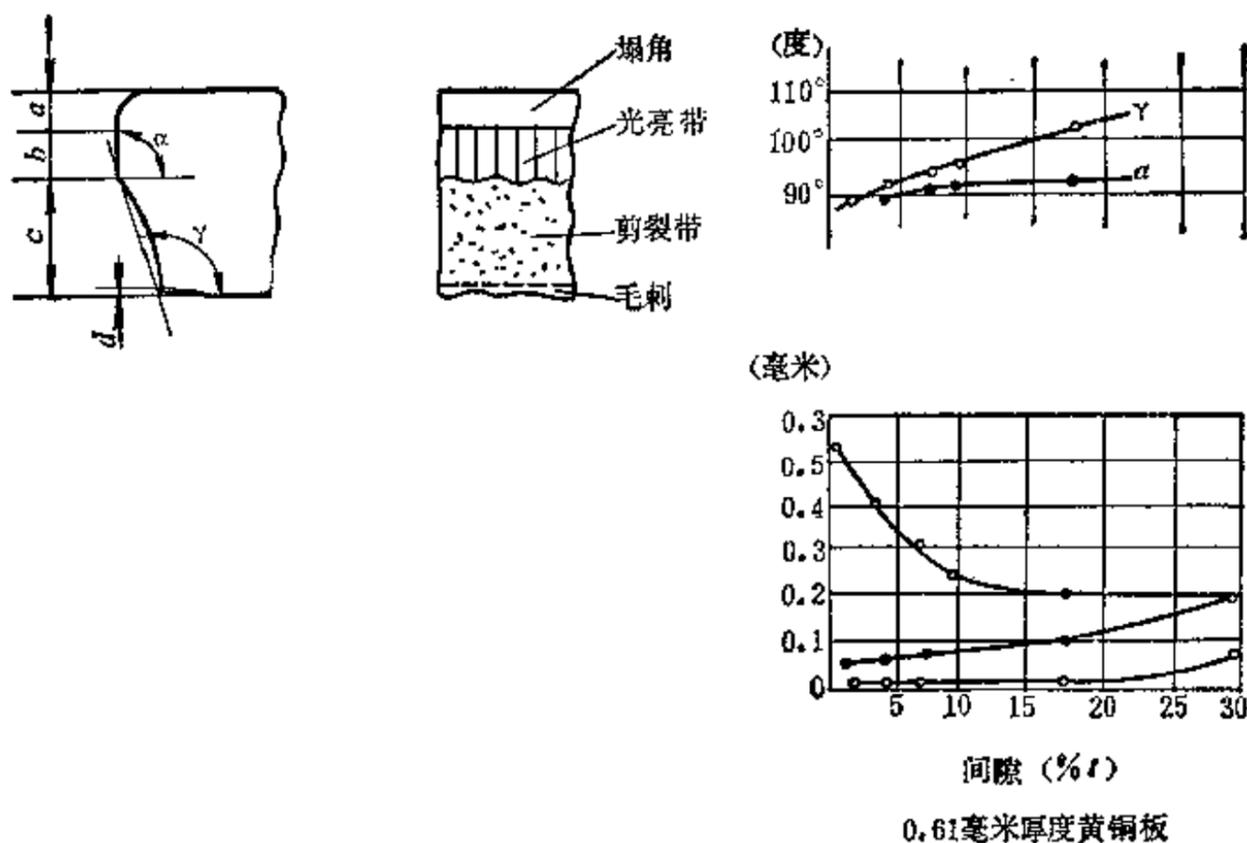


图3-7 间隙对冲裁断面的影响

a—塌角 b—光亮带 c—剪裂带 d—毛刺 α —光亮带斜角 γ —剪裂带斜角

实践证明，间隙对模具寿命有极大的影响，间隙是影响模具寿命诸因素中最主要的一个因素。冲裁过程中，凸模与被冲的孔之间，凹模与落料件之间均有摩擦，而且间隙越小，摩擦越严重。此外，在实际现场生产中模具受到制造误差和装配精度的限制，凸模不可能绝对垂直于凹模平面，而且间隙也不会是均匀分布的，所以过小的间隙对模具寿命极为不利，而较大的间隙可使凸模与凹模侧面及材料间的摩擦减小，并减缓间隙不均匀的不利影响，从而提高模具的寿命。

虽然冲裁力随间隙的增大有一定程度的减低，但是，当单边间隙介于材料厚度的5~20%范围内时，冲裁力的降低并不显著（不超过5~10%）。因此，在正常情况下，间隙对冲裁力的影响不甚严重。

间隙对卸料力、推件力的影响比较显著。间隙增大后，从凸模上卸料或从凹模孔口中推出零件都将省力。一般当单边间隙增大到材料厚度的15~25%左右时，卸料力几乎减到零。

间隙对冲裁件尺寸精度的影响可见图3-8。间隙对于冲孔和落料精度的影响规律是不同的，并且与材料轧制的纤维方向有关。

通过上面的分析可以看出，冲裁间隙对断面质量、模具寿命、卸料力、推件力、冲裁力

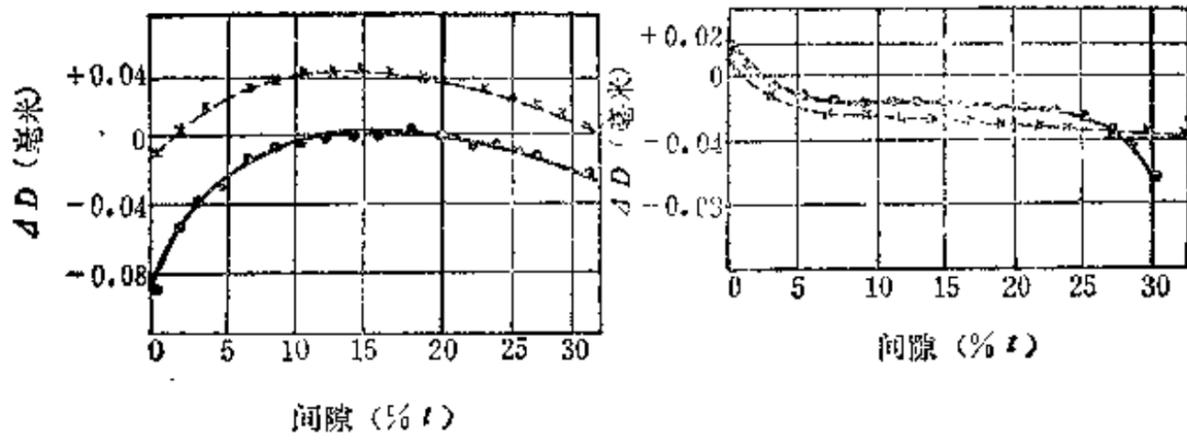


图3-8 间隙对冲裁件尺寸精度的影响

材料：带钢 冲裁直径： $\phi 18$ 料厚：1.6毫米
 ΔD = 冲裁前孔径 - 凸模外径(冲孔) ——纤维方向
 ΔD = 落料件外径 - 凹模直径(落料) ----垂直于纤维方向

以及冲裁件尺寸精度的影响规律均不相同。因此，并不存在一个绝对的合理间隙数值，能同时满足断面质量最佳，尺寸精度最高，冲模寿命最长，冲裁力、卸料力最小等各个方面的要求。在冲压的实际生产中，间隙的选用应主要考虑冲裁件断面质量和模具寿命这两个主要的因素。许多研究结果和实际生产经验都已证明，能够保证良好冲裁断面质量的间隙数值和可以获得较高冲模寿命的间隙数值也不是一致的。一般说来，当对冲裁件断面质量要求较高时，应选取较小的间隙值，而当冲裁件的质量要求不高时，则应尽可能地加大间隙值以利于提高冲模的寿命。

表 3-5 是以图 3-5 中 b 所示断面为依据而确定的合理间隙数值。

表3-5 冲裁模合理间隙值 (双边)

材 料 种 类	材 料 厚 度 (毫米)				
	0.1~0.4	0.4~1.2	1.2~2.5	2.5~4	4~6
软钢、黄铜	0.01~0.02毫米	7~10% t	9~12% t	12~14% t	15~18% t
硬钢	0.01~0.05毫米	10~17% t	18~25% t	25~27% t	27~29% t
磷青铜	0.01~0.04毫米	8~12% t	11~14% t	11~17% t	18~20% t
铝及铝合金(软)	0.01~0.03毫米	8~12% t	11~12% t	11~12% t	11~12% t
铝及铝合金(硬)	0.01~0.03毫米	10~14% t	13~14% t	13~14% t	13~14% t

在使用表 3-5 时，当对冲裁件断面质量要求高时，可将表中的间隙数值减小 1/3；当凹模孔口型式为圆柱形时，取表中偏大的数值，而凹模孔口型式为锥形（包括电火花加工锥度）时，则取表中偏小的数值。

冲较小的孔时，为防止废料反跳到凹模表面，间隙数值可按下述关系选取：

- 当 $t < 1$ 时， $c = 5\% t$
- $t = 1 \sim 2$ 时， $c = 7\% t$
- $t = 2 \sim 4$ 时， $c = 10\% t$

冲裁绝缘纤维板和树脂板时，间隙数值可取 2% t（一般需加热）。

此外，要获得同样的冲裁件质量，冲孔的间隙应比落料的间隙略大一些，尤其当冲小孔或窄槽时更要注意。

3-3 凸模与凹模刃口尺寸的确定

冲裁件的尺寸和冲模间隙都决定于凸模和凹模刃口的尺寸。因此，正确地确定冲裁模刃口尺寸及其公差是冲模设计中很重要的一项工作。

冲裁时，冲孔直径和落料件外形尺寸均取决于光亮带的尺寸，即落料件的尺寸接近于凹模刃口的尺寸，冲孔的尺寸接近于凸模刃口的尺寸。所以，

落料时取凹模作为设计的基准件，冲孔时则取凸模为基准件。设计冲模时，首先确定基准件刃口的尺寸，然后再根据间隙确定另一件刃口的尺寸。例如，落料时先按落料件确定凹模刃口尺寸，然后按照选定的间隙确定凸模刃口尺寸，而冲孔时正好相反，先确定凸模刃口的尺寸，然后按间隙确定凹模刃口尺寸。

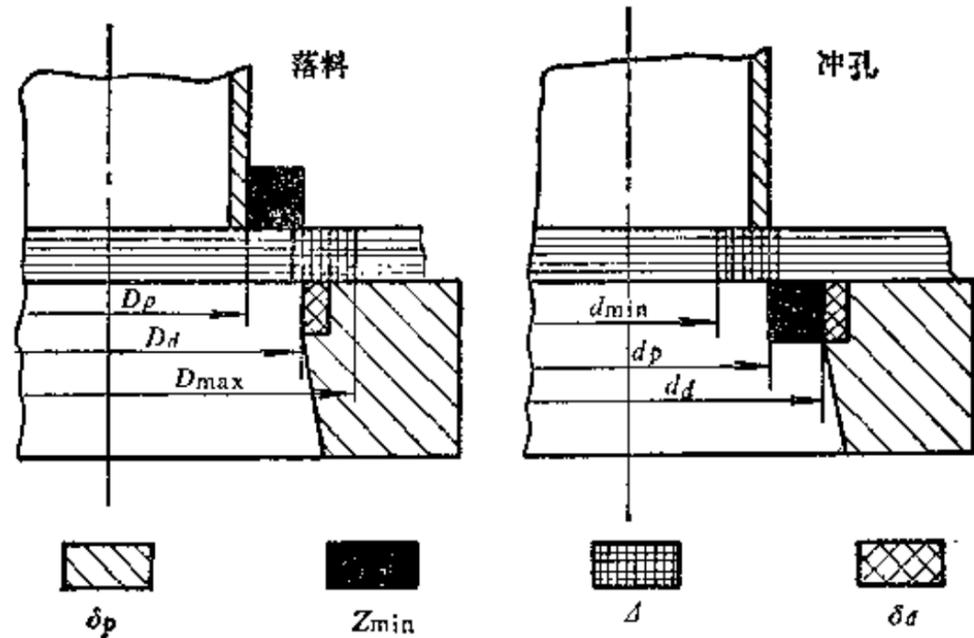


图3-9 冲模刃口尺寸的确定

冲模在使用过程中有磨损，落料件的尺寸会随凹模刃口的磨损而增大，而冲孔的尺寸则随凸模的磨损而减小。为了保证零件的尺寸要求，并提高模具的使用寿命，因此落料时所取凹模刃口的尺寸应靠近落料件公差范围内的最小尺寸，而冲孔时，所取凸模刃口的尺寸应靠近孔的公差范围内的最大尺寸。不管落料和冲孔，冲模间隙均应采用合理间隙范围内的最小值。落料与冲孔时冲模刃口与零件尺寸及其公差的关系如图3-9所示。图中的符号为：

D_d ——落料凹模刃口的名义尺寸；

D_p ——落料凸模刃口的名义尺寸；

d_p ——冲孔凸模刃口的名义尺寸；

d_d ——冲孔凹模刃口的名义尺寸；

D_{max} ——落料件的最大极限尺寸；

d_{min} ——冲孔的最小极限尺寸；

Δ ——冲裁件公差；

Z_{min} ——最小双边合理间隙；

α ——系数，为了避免多数冲裁件尺寸都偏向极限尺寸（落料时偏向最小尺寸，冲孔时偏向最大尺寸），可取系数值 $\alpha = 0.75 \sim 0.5$ ；

δ_d 、 δ_p ——分别为凹模与凸模的制造公差，一般取零件公差 Δ 的 $1/3 \sim 1/4$ ；对圆形件，由于制造简单，精度容易保证，制造公差可按2~3级精度选取。

冲模刃口各尺寸的关系为：

落料

$$D_d = (D_{max} - \alpha \Delta)^{+\delta_d}$$

$$D_p = (D_d - Z_{min})_{-\delta_p}$$

冲孔

$$d_p = (d_{\min} + x\Delta)_{-\delta_d}$$

$$d_d = (d_p + Z_{\min})_{+ \delta_p}$$

对于圆形及矩形等规则形状刃口的凸模和凹模，可以采用按图纸分别加工的方法。此时应保证下述关系：

$$\delta_p + \delta_d \leq Z_{\max} - Z_{\min}$$

实际上，目前工厂广泛地流行着采用“配作法”来加工冲模，尤其是对于 Z_{\max} 与 Z_{\min} 差值很小的冲模，或曲线形状刃口的冲模更是采用配作法。配作法就是先按设计尺寸制出一个基准件，然后根据基准件的实际尺寸再按间隙配制另一件。显然，落料时应先按计算尺寸制出凹模，然后根据凹模的实际尺寸，按最小合理间隙配制凸模。冲孔时则先按计算尺寸制出凸模，然后配制凹模。这种加工方法的特点是模具的间隙由配制保证，工艺比较简单，不必校核 $\delta_p + \delta_d \leq Z_{\max} - Z_{\min}$ 条件，并且在加工基准件时可以适当放宽公差，使加工较易进行。此时，冲模尺寸的标注也可简化，只需给出基准件的尺寸与公差以及必须保证的配制间隙。

3-4 冲裁力和功

冲裁力是选择冲压设备吨位和检验模具强度的一个重要依据。在生产中，往往碰到这样的情况，需要冲裁某种零件，但可供选用的设备仅为车间内现有的一些冲压设备，当零件的冲裁力接近车间现有冲压设备的名义吨位时，准确地计算冲裁力就显得非常突出。若计算准确，就可以采用车间现有设备进行冲压，以充分发挥设备的潜力，若计算不准确，就有可能使设备超载而损坏，引起严重的事故。

平刃冲模的冲裁力可按下式计算：

$$P = kLt\tau$$

式中 P ——冲裁力（牛顿）；
 L ——冲裁周边长度（毫米）；
 t ——材料厚度（毫米）；
 τ ——材料抗剪强度（牛顿/毫米²）；
 k ——系数。

系数 k 是考虑到实际生产中的各种因素而给出的一个修正系数。生产中的各种实际因素很多，如模具间隙的波动和不均匀，刃口的钝化，板料机械性能和厚度的波动等。根据经验，一般可取 $k = 1.3$ 。

抗剪强度 τ 的数值，取决于材料的种类和状态。可在手册或资料中查取。为了便于估算，可取抗剪强度 τ 等于该材料强度极限 σ_b 的 80%，即取 $\tau = 0.8\sigma_b$ 。

为了简便，也可按下式估算冲裁力：

$$P \approx Lt\sigma_b$$

机械压力机的工作能力除了受压力曲线的限制外，还规定了每次行程功不要超过额定的数值，以保证电机不过载，飞轮转速不致下降过多。如 J-11-100 型压力机规定每次行程功为：

连续行程	3000 牛顿·米
单次行程	4000 牛顿·米

平刃口冲裁时，其冲裁功可按下式计算：

$$A = mPt/1000$$

式中 A ——冲裁功 牛顿·米；
 t ——材料厚度 毫米；
 P ——冲裁力 牛顿；
 m ——系数，与材料有关，一般取 $m = 0.63$ 。

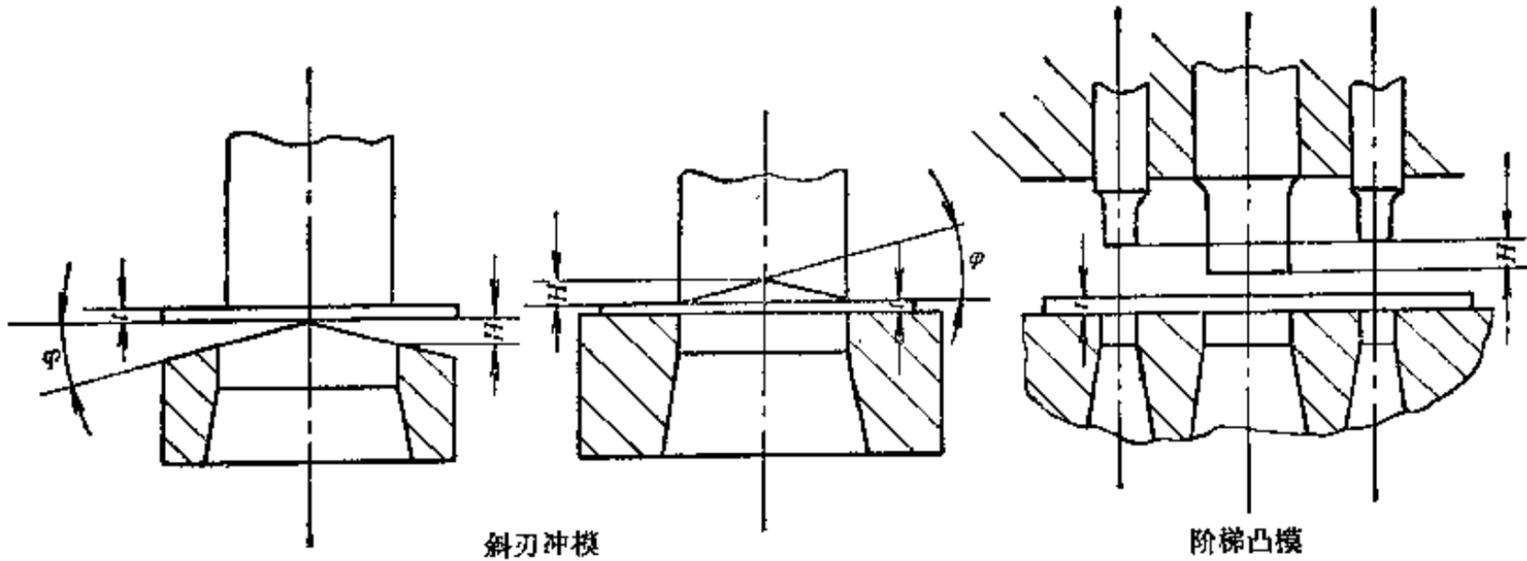


图3-10 斜刃冲模与阶梯凸模

薄料冲裁时，冲裁功不大，可以不进行冲裁功的验算，但在厚料冲裁时，验算冲裁功往往是必要的。

用平刃模具冲裁时所需的冲裁力大，在大型零件冲裁时，往往会超出现有设备的吨位。为了减小冲裁力，减小冲击、振动和噪音，可以采用斜刃冲模。在多冲头的冲模中也可采用冲头的阶梯布置法，俗称阶梯凸模，如图3-10所示。

斜刃冲模冲裁时其情况如斜刃剪板机一样，材料是沿长度逐渐分离的。为了制取平整的零件，落料时凸模应做成平刃，凹模做成斜刃。冲孔时正好相反，即凹模做成平刃，而凸模做成斜刃。斜刃一般做成波浪形，应力求对称以避免水平方向的侧向力。

斜刃冲模多用于大型零件，一般把斜刃布置成多个波峰的形式。斜刃冲模的减力程度由斜刃波峰高度 H 和角度 φ 而定(图3-10)。斜刃冲裁力 P_s 可按下式计算：

$$P_s = kP$$

式中 P ——用平刃冲模冲裁时所需的力；
 k ——斜刃冲裁的减力系数(表3-6)。

φ 角可以参考下列数值选取：

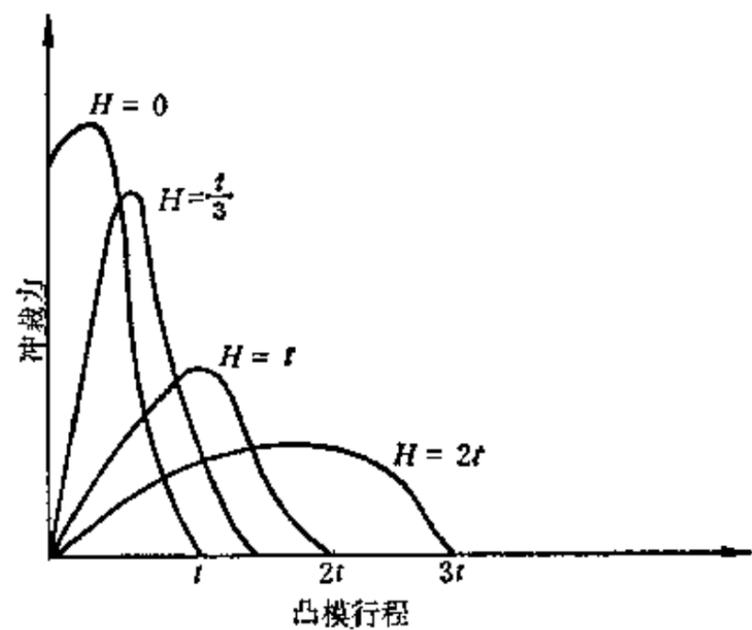


图3-11 斜刃冲模的冲裁功

$$t < 3 \text{ 毫米}, H = 2t, \varphi < 5^\circ$$

$$t = 3 \sim 10 \text{ 毫米}, H = t, \varphi < 8^\circ$$

一般情况下, φ 角 $> 12^\circ$ 。

表3-6 斜刃减力系数 k 值

H 毫米	$H = t$	$H = 2t$	$H = 3t$
k	0.4~0.6	0.2~0.4	0.1~0.25

采用阶梯凸模方法减力时应使阶梯高度差 H (图 3-10) 稍大于断面光亮带 b 。此外, 采用阶梯凸模时, 应考虑以下几点:

1. 各阶梯凸模的分布要注意对称, 以减小压力中心的偏离。
2. 首先开始工作的凸模应该是端部带有导正销的凸模。一般先冲大孔, 后冲小孔, 这样可使小直径凸模尽量做得短些, 以提高其寿命。

采用斜刃冲模或阶梯凸模时, 所需的冲裁功并不减小, 这时, 只是因为延长了冲裁行程而使冲裁力降低 (图 3-11)。

除了以上的减力措施外, 将材料加热后冲裁也是减小冲裁力的有效方法, 但加热后零件表面质量和冲裁件的尺寸精度都有所降低。

3-5 精密冲裁

普通冲裁所能得到的冲裁件尺寸精度在 5~6 级以下, 光洁度低于 $\nabla 4$ 级, 断面微带斜度, 而且光亮带在断面上的宽度不大, 虽能满足一般产品的要求, 但当对冲压件的尺寸精度、断面光洁度和垂直度等有较高的要求时, 就无法满足了。此时应采用精密冲裁, 半精冲或整修等工艺方法。

采用带 V 形环强力压边的精冲工艺 (图 3-12) 可以获得高光洁度和高精度的冲裁件, 这是目前提高冲裁件质量的一个有效方法。

前面已经讲过, 冲裁件断面上的光亮带、剪裂带、塌角和毛刺四个区域所占的比例随冲裁的条件变化而改变。精冲是使材料在冲裁过程中, 处于三向压应力状态, 增强变形区的静水压, 抑制材料的断裂, 使其在不出现剪裂纹的冲裁条件下以塑性变形的方式实现材料的分离。

精冲条件的形成主要是依靠 V 形压边环, 极小的冲裁间隙, 凹模 (凸模) 刃口略带小圆角和反压力顶件等。

精冲件的断面垂直, 表面平整, 零件精度可达 GB4~2 级, 光洁度达 $\nabla 7 \sim \nabla 8$ 级。

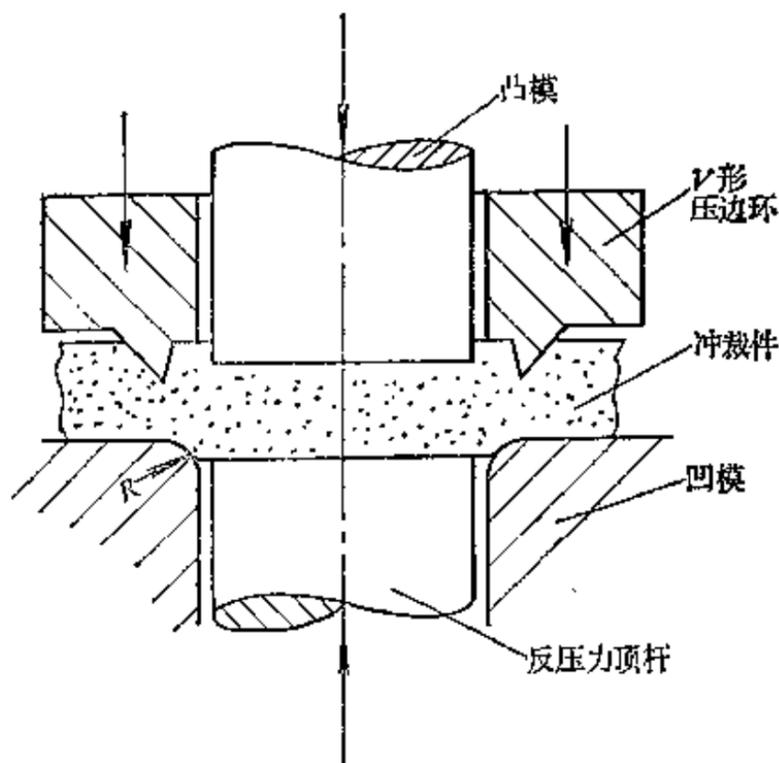


图3-12 强力压边的精密冲裁

V形压边环的作用在于限制冲裁时冲裁区外围的材料随凸模下降而产生的向外扩展，以形成三向压应力状态，从而避免剪裂纹的产生。精冲小孔时，由于冲头刃口外围的材料对冲裁区有较大的约束作用，因此可以不用V形环。当冲孔直径达30~40毫米以上时，在顶杆上也应考虑加制V形环。当材料厚度 $t > 4$ 毫米时，应在压边圈和凹模两方均制作V形环。

V形环的压边效果好，但加工困难，如果压边力足够大，则也可采用锥形或凸台形压料板进行压边（图3-13）。

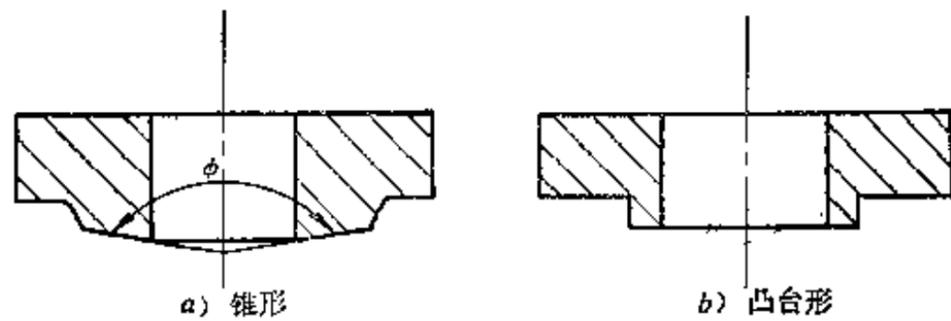


图3-13 精冲时锥形与凸台形压料板

为了减小冲裁区的拉应力，增强静水压效果，一般单边间隙可取材料厚度的0.5%。

精冲凹模的刃口一般均需稍微倒圆，以加强静水压作用。圆角的大小取决于材料的性能和厚度，一般介于0.01~0.03毫米之间。试冲时最好先采用较小的圆角，当断面上出现剪裂纹而增大压边力又不能解决时，才逐步增大刃口的圆角半径。

反压力对构成三向压应力，增强材料塑性的作用是极为明显的，这里不再详述。

精冲工艺目前在国内外均已有很大的发展，已经有相当多的专用设备投入生产。当采用专用模具时，也可在普通压力机上实现精冲，图3-14即为在普通压力机上使用的带有液压装置的专用精冲模。

精冲时各种工艺力的计算如下：

$$\text{冲裁力} \quad P_1 = 0.9\sigma_b L t \quad (\text{牛顿})$$

式中 σ_b ——材料的抗拉强度（牛顿/毫米²）；

L ——内外冲裁周边长度的总和（毫米）；

t ——材料厚度（毫米）。

$$\text{压边力} \quad P_2 = (0.3 \sim 0.6) P_1 \quad (\text{牛顿})$$

$$\text{顶件反压力} \quad P_3 = F \cdot p \quad (\text{牛顿})$$

式中 F ——精冲件面积（毫米²）；

p ——单位反压力，一般取 $p = 20 \sim 70$ 牛顿/毫米²。

$$\text{卸料力} \quad P_4 = (0.1 \sim 0.15) P_1 \quad (\text{牛顿})$$

$$\text{推件力} \quad P_5 = (0.1 \sim 0.15) P_1 \quad (\text{牛顿})$$

压边力和顶件反力均需经试冲确定。在满足精冲要求的条件下应选用最小值。

精冲工艺对材料的塑性有一定的要求，材料的塑性好则效果显著。如铝、黄铜、低碳钢和某些不锈钢等。含锌量大于37%的黄铜、铅黄铜等塑性较差的材料目前还难于精冲。

金属的组织对材料的塑性影响很大，如钢中渗碳体的形状与分布很重要，精冲材料以球化后的细粒均布为佳。因此精冲前必须根据零件形状的复杂程度和材料的性质进行软化处理。

为了提高冲裁件的断面质量，除了精冲工艺外，在生产中还经常采用半精冲工艺。半精冲工艺虽然仍然采用产生剪裂纹而分离的普通冲裁的机理，但由于加强了冲裁区的静水压效果，因此所获得的断面质量明显地高于普通冲裁所能达到的质量，光亮带在整个断面上的比例有较大的增加。半精冲工艺的冲裁质量介于精冲与普通冲裁之间，但工艺装备或设备却比精冲简单得多。

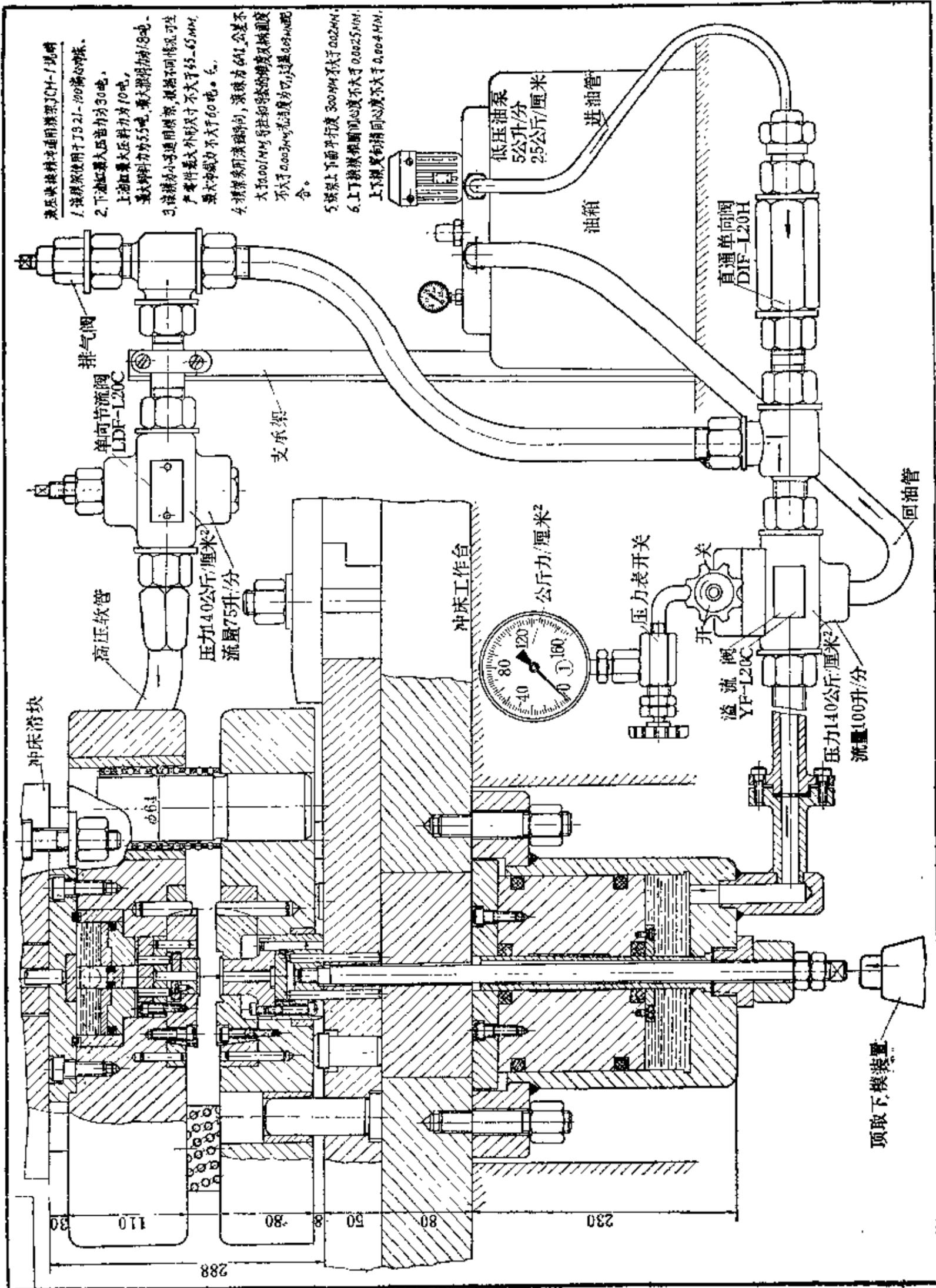


图3-14 通用压力机上用的精冲模架

目前常见的半精冲工艺有小间隙圆角刃口冲裁、负间隙冲裁、上下冲裁、对向凹模冲裁等。

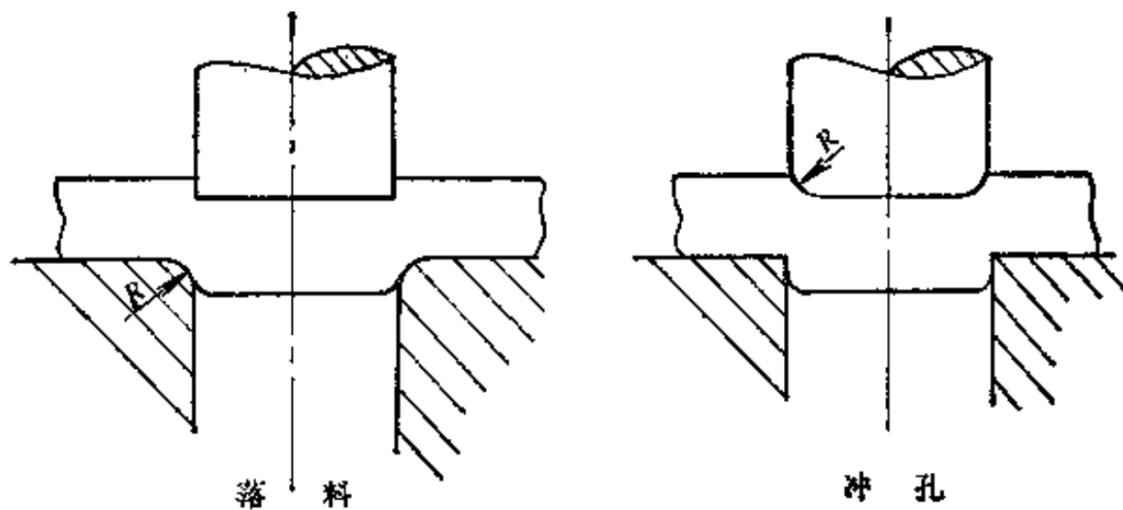


图3-15 小间隙圆角刃口冲裁

1. 小间隙圆角刃口冲裁

小间隙圆角刃口冲裁也称光洁冲裁（图 3-15）。它与普通冲裁相比，差别仅仅在于加强了冲裁区的静水压，起到了抑制裂纹的作用。这是因为采用了小圆角刃口和很小的冲模间隙的缘故。

落料时，凹模带有小圆角刃口，而冲孔时凸模带有小圆角刃口。小圆角的数值一般可采用材料厚度的 10% 或见表 3-7。冲模间隙可取 0.01~0.02 毫米。

本方法适用于塑性较好的材料，如软铝、紫铜、黄铜、05F 和 08F 等，加工精度为 6~4 级，光洁度可达 $\nabla 6 \sim \nabla 8$ 。零件从凹模孔口出来后，其尺寸会回弹增大 0.02~0.05 毫米。在模具设计时要预先加以考虑。

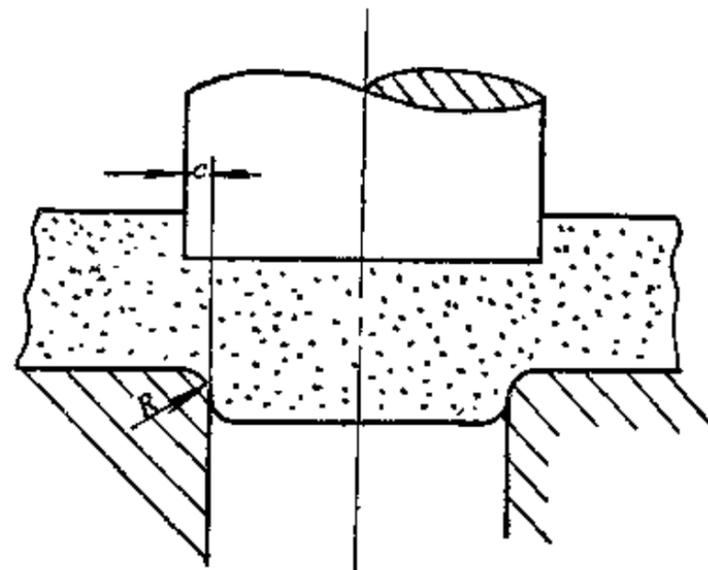


图3-16 负间隙冲裁

表3-7 凹模圆角半径（毫米）

材料	料厚(毫米)	1	2	3	5
铝		0.25	—	0.25	0.50
铜(T2)		0.25	—	0.50	(1.00)
软钢		0.25	0.05	(1.00)	—
黄铜(H170)		(0.25)*	—	(1.00)	—
不锈钢(0Cr18Ni9)		(0.25)	(0.05)	(1.00)	—

* () 内为参考值。

小圆角刃口冲裁力约比普通冲裁大 50% 左右。本方法比精冲简单，不需要特殊的设备。有时采用带倒角的锥形刃口，同样也能收到满意的效果。

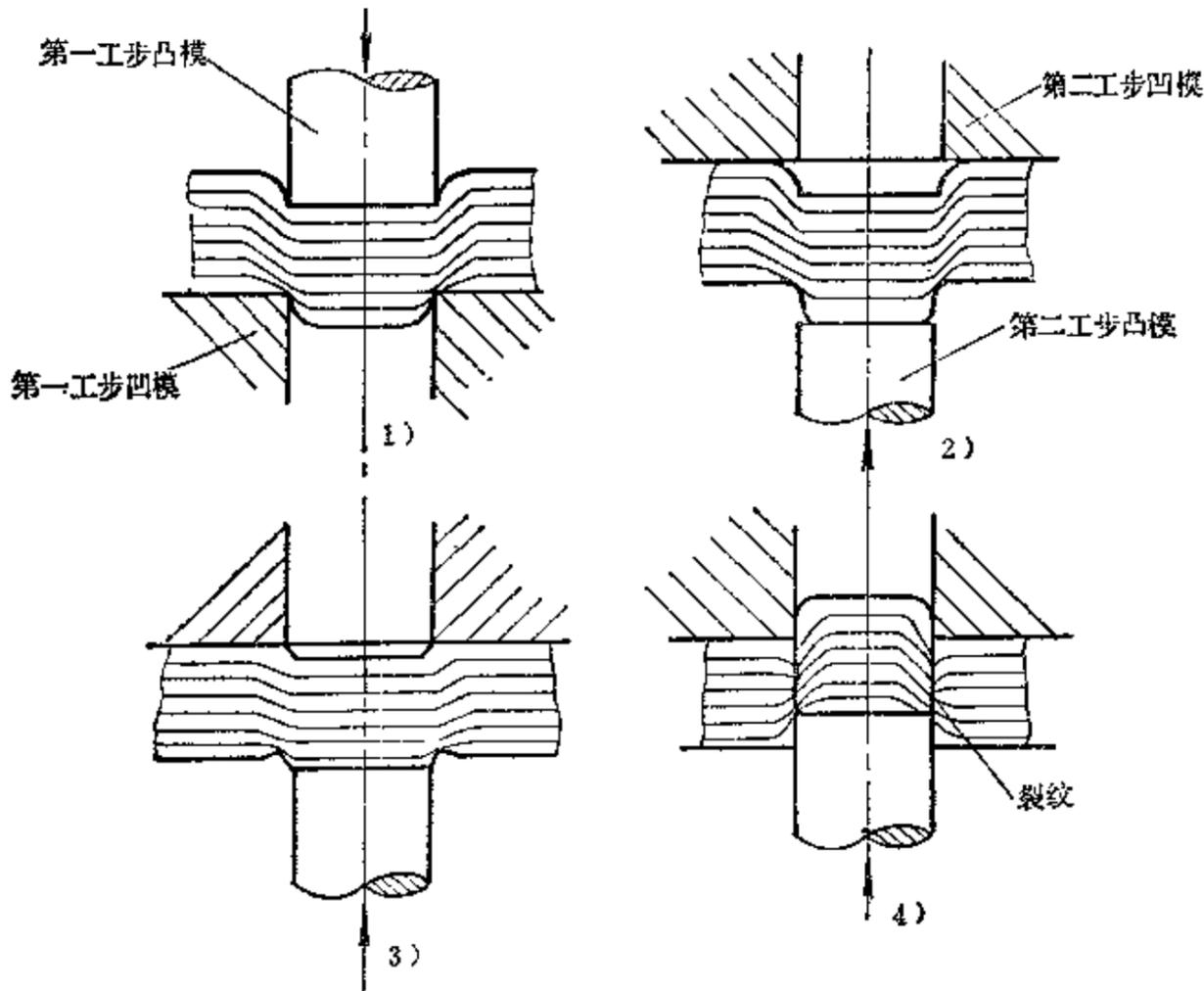


图3-17 上、下冲裁的过程与材料变形的情况

2. 负间隙冲裁 (图 3-16)

负间隙冲裁的机理实质上与小间隙圆角刃口冲裁相同。负间隙冲裁时，凹模刃口圆角半径一般可取材料厚度的 5~10%，而凸模刃口则越锋利越好。

负间隙是指凸模直径大于凹模直径，一般约大 (0.05~0.3) t。负间隙冲裁时，开始是在凸模和凹模刃口附近产生剪裂纹，然后，落料件从带小圆角的凹模洞口中挤出。因此，负间隙冲裁力要比普通冲裁力大得多，凹模承受的压力较大，容易引起开裂。采用良好的润滑，可以防止材料粘模，延长模具的寿命。



图3-18 上、下冲裁时的断面

对于复杂形状的零件，负间隙值沿周边的分布是不均匀的，在突出的夹角处，其数值可比平直部分加倍，而在凹入的尖角部分，其值比平直部分减半。

由于负间隙冲裁所得到的落料件带有挤压的特征，因此冲裁断面的光洁度高。但本方法只适用于塑性好的软材料，如软铝、铜、软钢等。负间隙冲裁的精度为 6~4 级，光洁度为 ∇7~∇8 级。负间隙冲裁力 P_f 可用下式估算：

$$P_f = cP$$

式中 P ——普通冲裁力；

c ——系数，其值为：

铝 $c = 1.3 \sim 1.6$

黄铜及软钢 $c = 2.25 \sim 2.8$

负间隙冲裁也不需要特殊的设备。

3. 上、下冲裁 (图 3-17)

上、下冲裁的原理是：首先向某一方向冲裁，当凸模挤入深度达 $(0.15 \sim 0.3) t$ 时中止，然后再向另一个相反的方向冲裁而获得零件。这种冲裁方法的机理类似于普通冲裁，仍然是产生剪裂纹，存在断裂带。但由于经过上、下两次冲裁，可以获得上、下两个光亮带，从而增大了光亮带在整个断面上的比例，并可消除毛刺，从而使冲裁件的断面质量有较大的提高。

上、下冲裁时，零件上有上、下两个塌角，其断面情况如图 3-18 所示。

4. 对向凹模冲裁 (图 3-19)

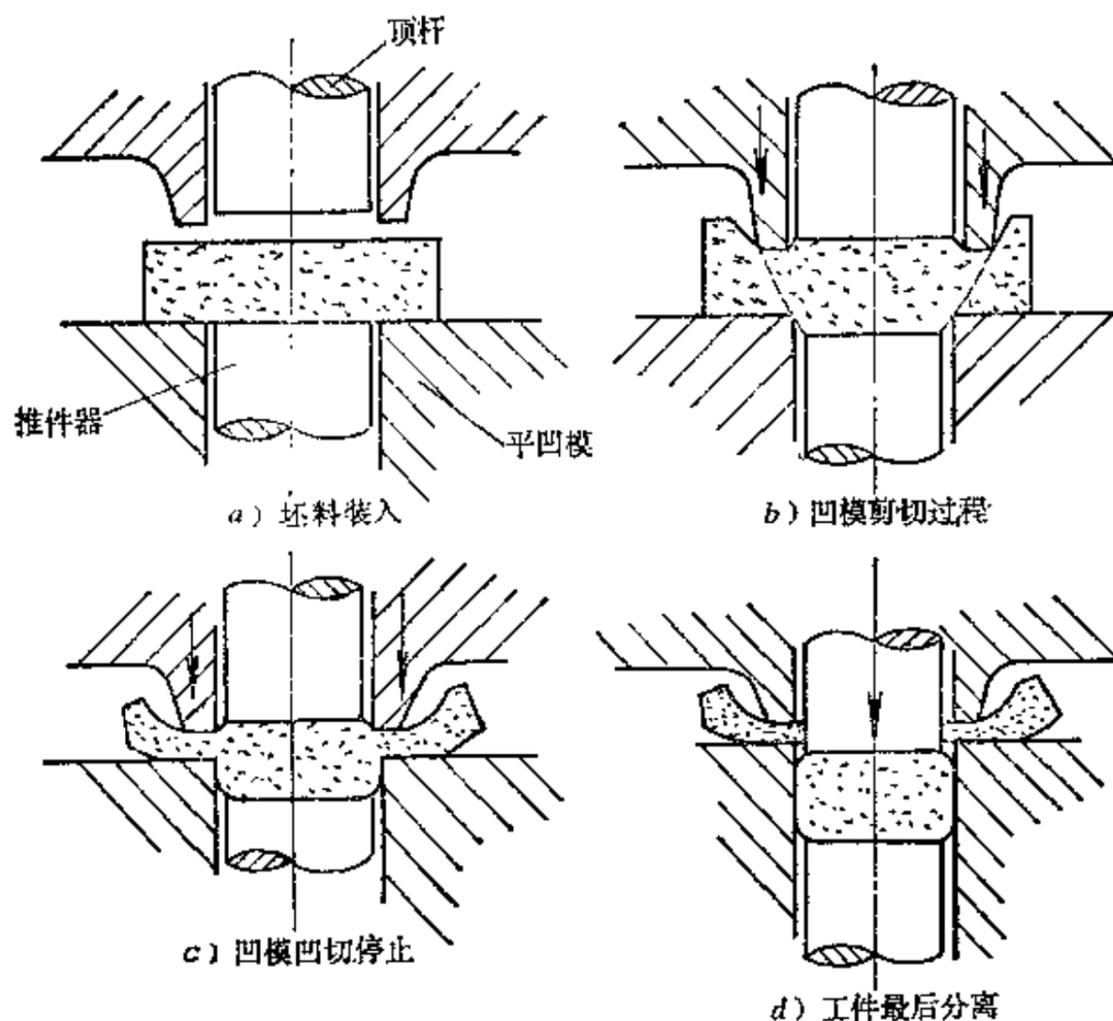


图3-19 对向凹模冲裁过程

本方法采用一个平凹模和一个带小凸台的凹模进行冲裁。带小凸台的凹模除凸台外刃与下面平凹模刃口之间起剪切作用外，还起了向下挤压落料件的作用，因此，当顶杆最后推出零件时残留在断面上的剪裂带已不大了，整个断面比较光亮。凹模上小凸台的宽度可取材料厚度的 30~40%。

3-6 整 修

整修工艺如图 3-20 所示。整修是利用整修模沿冲裁件外缘或内孔刮削去一层薄薄的切屑，以除去普通冲裁时在断面上留下的塌角、毛刺和剪裂带等，从而提高了冲裁件的加工精度和表面光洁度。

整修冲裁件的外形称为外缘整修，整修冲裁件孔的内形称为内缘整修。

显然，整修的机理与冲裁完全不同，整修与切削加工相似。整修时应合理确定整修余量，整修余量决定于整修次数。

总的整修量和材料、厚度、外形等有关，也和整修前加工情况有关。如整修前采用大间隙落料，则为了切去断面上带有锥度的粗糙剪裂带，整修余量就要大一些，其单边数值往往大于材料厚度的10%；而采用小间隙落料时，为了切去二次剪切所形成的中间粗糙区以及潜在的裂纹(图3-5)，并不需要很大的整修量，其单边数值约在材料厚度的8%以下。此外，材料厚度大于3毫米时，一般均需采用多次整修，因为这时斜面和剪裂带的数值也相应增大。内孔整修时，当整修前为钻孔，则其整修量可比冲孔情况小一些。如果整修孔的同时，孔距的精度也有要求，那么整修量应加大。外形带有直角或锐角的零件，一般要采用多次整修。

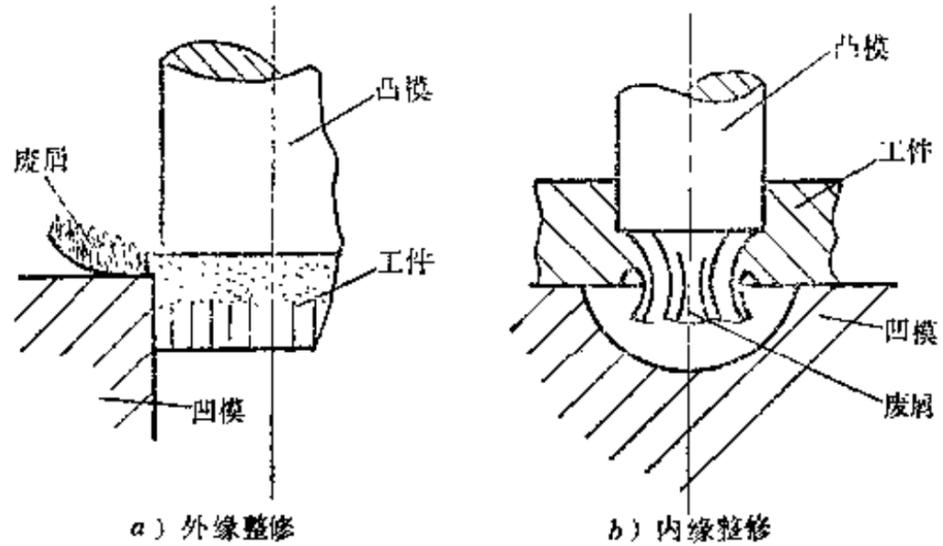


图3-20 整修工艺

整修的次数希望越少越好，可能时应尽量采用一次整修。但是一次整修量不可能太大，整修量过大，会出现类似于冲裁的剪裂情况。一次可能切除的单边整修量，一般小于材料厚度的10%。

外缘整修模的凸、凹模间隙，单边约取0.006~0.01毫米，也可以采用负间隙整修，即凸模大于凹模的整修工艺。负间隙整修的优点在于简化凸模的加工，尤其对形状复杂的零件，这个优点更为显著。小孔整修时，凹模可以不带刃口，而简化成图3-20所示的形状。

整修时要考虑零件在通过模具时的弹性变形量，外缘整修时，零件略有增大，但刃口锋利的模具，增大数值很小，一般小于0.005毫米。内孔整修时，孔径也有回弹，铝约为0.005~0.01毫米，软钢约为0.008~0.015毫米。

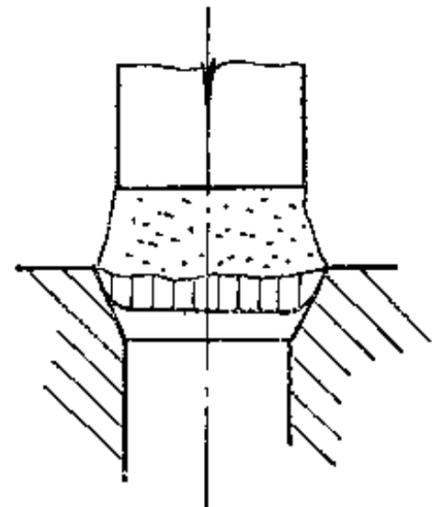


图3-21 挤光整修

整修工艺的精度和光洁度较高，精度一般能达到2~3级，光洁度达 $\nabla 7 \sim \nabla 8$ 级。

整修时对零件的定位要求较高。整修工艺的效率不高，但不需要专用设备。

整修力 P 可按下式计算：

$$P \approx \delta L \tau \text{ (牛顿)}$$

式中 δ —— 单边整修量 (毫米)；

L —— 整修轮廓周长 (毫米)；

τ —— 材料抗剪强度 (牛顿/毫米²)。

除了上述采用切削原理的整修外，在生产中还采用挤光原理的整修(图3-21)，即对冲裁件的断面采用表面塑性变形的办法来提高零件的精度和光洁度。此时凹模采用锥形孔口的形式，挤光余量单边小于0.04~0.06毫米。这种工艺一般只适用于软材料，其质量低于精冲和切削整修工艺。

3-7 聚氨酯橡胶冲裁

聚氨酯橡胶冲裁（图 3-22）是普通橡皮冲裁的一个发展，它是采用聚氨酯橡胶来代替钢质冲模中的一个凸模、凹模或凸凹模。这种工艺适用于薄料冲压，对 $\sigma_b < 250$ 牛顿/毫米² 的铝合金、紫铜、黄铜等材料，冲裁厚度可达 3 毫米，对于 $\sigma_b = 250 \sim 500$ 牛顿/毫米² 的材料，厚度达 1.5~2 毫米。

聚氨酯是一种介于橡胶和塑料之间的弹性材料，可用于冲孔、落料、弯曲、拉深、成形以及复合工艺等各种冲压工艺。这种工艺在小批和试制生产中应用比较广泛。

聚氨酯橡胶比普通橡胶或丁腈橡胶有更好的综合机械性能，它具有强度高（为丁腈橡胶的 1~4 倍）、弹性好、抗撕裂性好、耐磨（为天然橡胶的 5~10 倍）、耐油、耐老化等性能，并且具有良好的机械加工性能。当聚氨酯橡胶表面磨损后，可磨去损坏的部分继续使用。

聚氨酯橡胶冲裁也有一些缺点，主要是材料的搭边宽度大（约为 3~5 毫米），生产率不

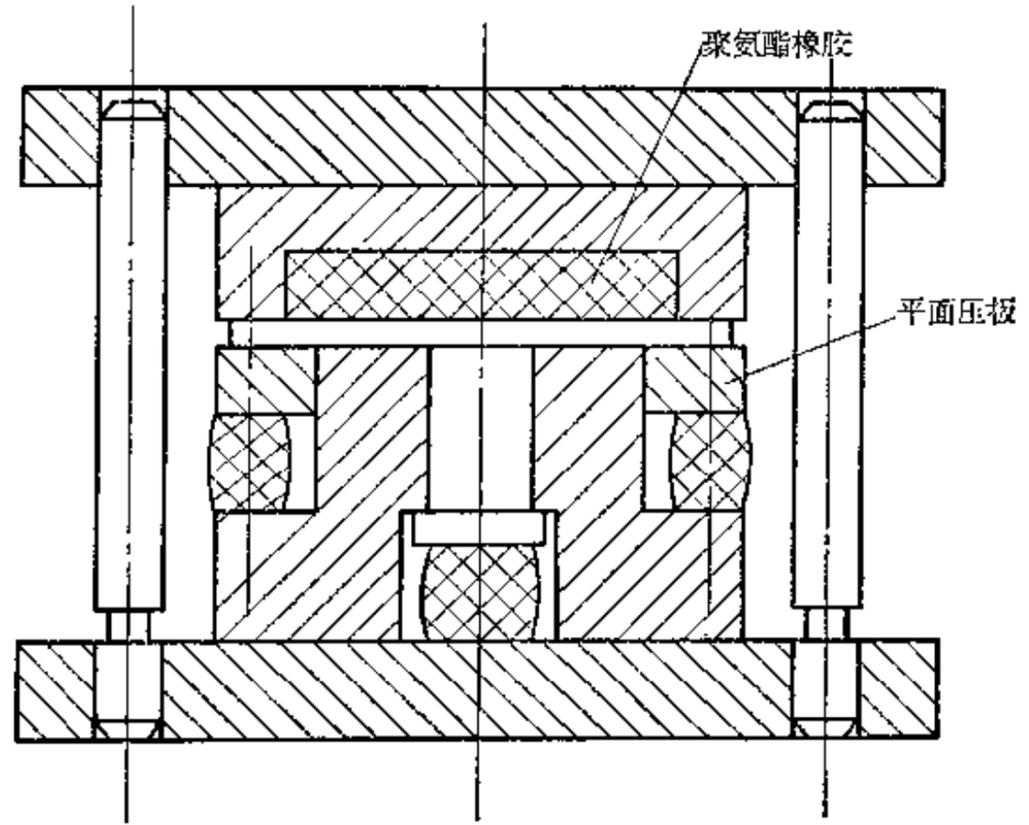


图3-22 聚氨酯橡胶冲裁模

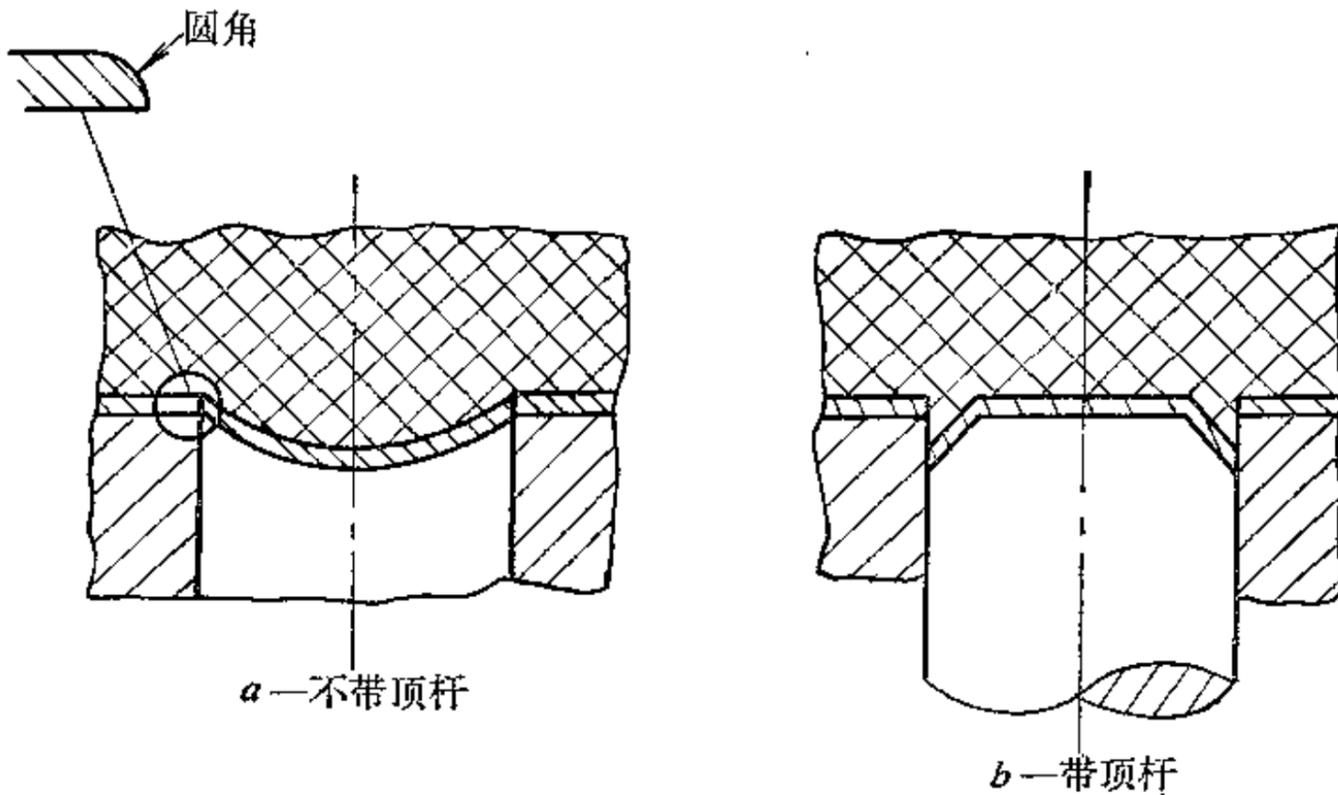


图3-23 聚氨酯冲裁过程

高，冲裁材料的表面要擦拭干净，不能冲裁小孔等。

聚氨酯冲裁过程（图 3-23）与钢模冲裁过程不同，聚氨酯冲裁时，板料在聚氨酯作用下，在刃口处产生拉伸、弯曲等复杂应力和应变，直到材料断裂。因此，聚氨酯冲裁件的断面上有较大的拉入圆角（图 3-23），并且材料越厚，圆角越大。

聚氨酯橡胶与普通橡胶一样，它的单位压力与其压缩量有关。压缩量越大，单位压力越高。因此，聚氨酯冲裁时的压入深度只要刚好使材料冲裁下来即可，一般不要超过 1~2 毫米，压入太多时，反压力很大，容易损坏容框或使设备超载。

聚氨酯橡胶给出的单位压力与压板凸台和容框间的间隙 c （图 3-24）有关，一般采用 $c = 0.1 \sim 0.2$ 毫米。这样，聚氨酯被密闭在容框中，可以给出高的单位压力，若间隙太大，冲裁时聚氨酯溢出，单位压力降低，直接影响冲裁质量并降低聚氨酯的使用寿命。

压板分为平板式（图 3-22）和凸台式（图 3-24），凸台式压板的密封性能较好，凸台宽度可取 2~3 毫米。平面压板一般只用于冲裁件形状简单、材料较薄和较软的情况。

冲孔时，特别是冲大孔时，为了加强聚氨酯冲裁的静水压效果以提高冲孔的质量，一般采用顶杆结构（图 3-23）。

采用聚氨酯冲孔时，可能冲出的最小孔径 d_{\min} 为：

$$d_{\min} = \frac{4\tau t}{p} \quad (\text{毫米})$$

式中 τ ——材料剪切抗力（牛顿/毫米²）；

t ——材料厚度（毫米）；

p ——聚氨酯橡胶的单位压力（牛顿/毫米²）。

显然，若已知孔径，则可利用上式求出所需聚氨酯的单位压力 p 。

聚氨酯冲裁时的橡胶厚度可以采用 20~30 毫米。

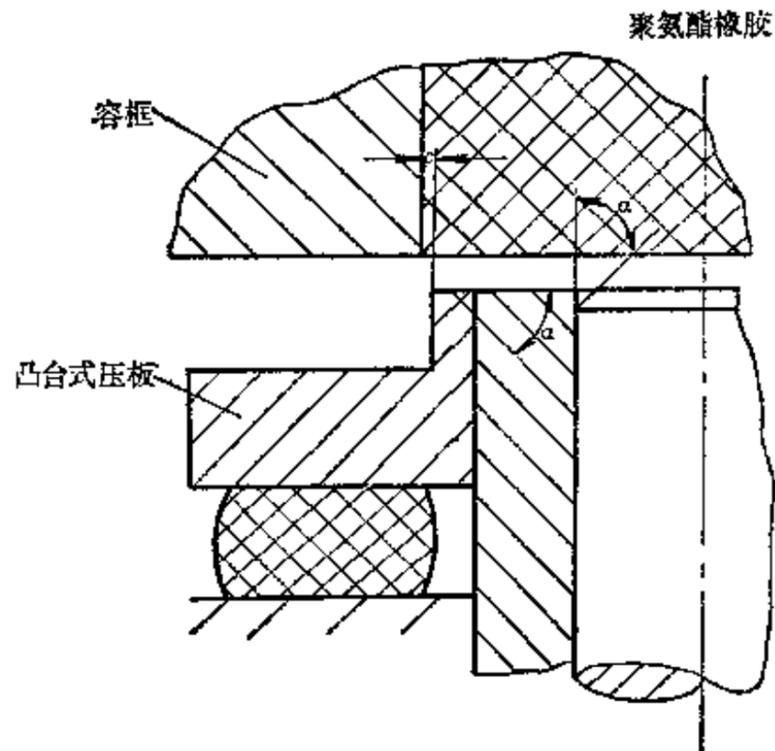


图3-24 带凸台压板的聚氨酯冲裁

第四章 冲 裁 模

4-1 概 述

冷冲压生产是利用装在压力机上的专用工具，使金属板料产生预定的变形，制取零件或毛坯的过程。通常把所使用的各种专用工具，称为冲压模具或冲模。

由于冷冲压主要是利用模具完成各种形式的加工，从而才决定这种加工方法所具有的一切特点，如生产率高、零件尺寸精度稳定、操作简单、成本低廉等。因此，研究和提高模具技术性能对发展冷冲压生产，具有十分重要的意义。

随着冷冲压技术的发展和新型模具材料的出现，模具的结构也发生了一定的变化，对模具的制造、装配和调整等都有很大影响。冲压生产机械化、自动化和高速冲压的出现，不仅推动了模具结构的发展，而且也促使与模具配套的送料装置、出件装置、快换模装置、各种检测装置及各种机械手等技术装备也达到了更高的水平。

冲压生产中冲裁工序所使用的模具——冲裁模的型式繁多，为了研究和工作上的方便，对冲裁模可按不同的特征进行分类：

按工序的种类可分为落料模、冲孔模、切断模、切口模、切边模、剖切模等。

按工序的复合程度可分为单一工序的简单模、多工序的连续模和复合模。

按有无导向装置和导向方法可分为无导向的开式模，有导向的导板模、导柱模、导筒模。

按节制进料的方法可分为定位销式、挡料销式、侧刀式、挡板式等。

按卸料方法可分为刚性卸料模、弹性卸料模等。

按送料、出件及排除废料的方法可分为手动模、半自动模、自动模。

4-2 冲裁模的基本型式与构造

一、简单模

压机一次冲程中只能完成一个冲裁工序的模具，称为单工序模或简单模。

1. 无导向简单冲裁模

图4-1为无导向简单冲裁模。模具的上部分由模柄1、凸模2组成，通过模柄安装在压机滑块上，可称为活动部分。下部分由卸料板3、导尺4、凹模5、下模板6、定位板7组成，通过下模板安装在压机工作台上，可称为固定部分。模具的上、下两部分之间没有直接导向关系。

无导向简单模的特点是结构简单，重量较轻，尺寸较小，模具制造简单，成本低廉；模具依靠压机导滑导向，使用时安装调整麻烦，模具寿命低，冲裁件精度差；操作也不安全。

无导向简单模适用于精度要求不高、形状简单、批量小或试制的冲裁件。

2. 导板式简单冲裁模

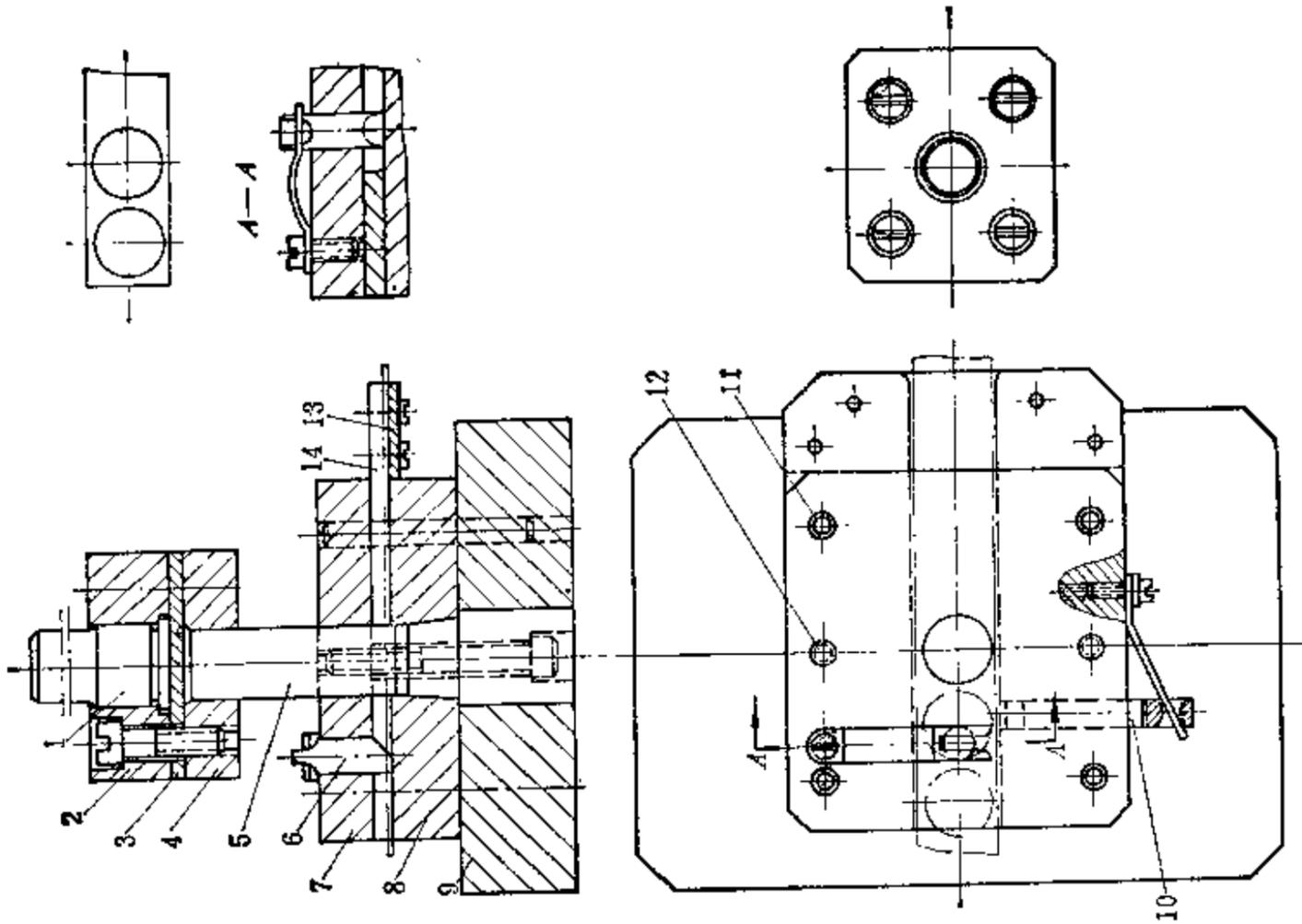


图4-2 导板式简单冲裁模

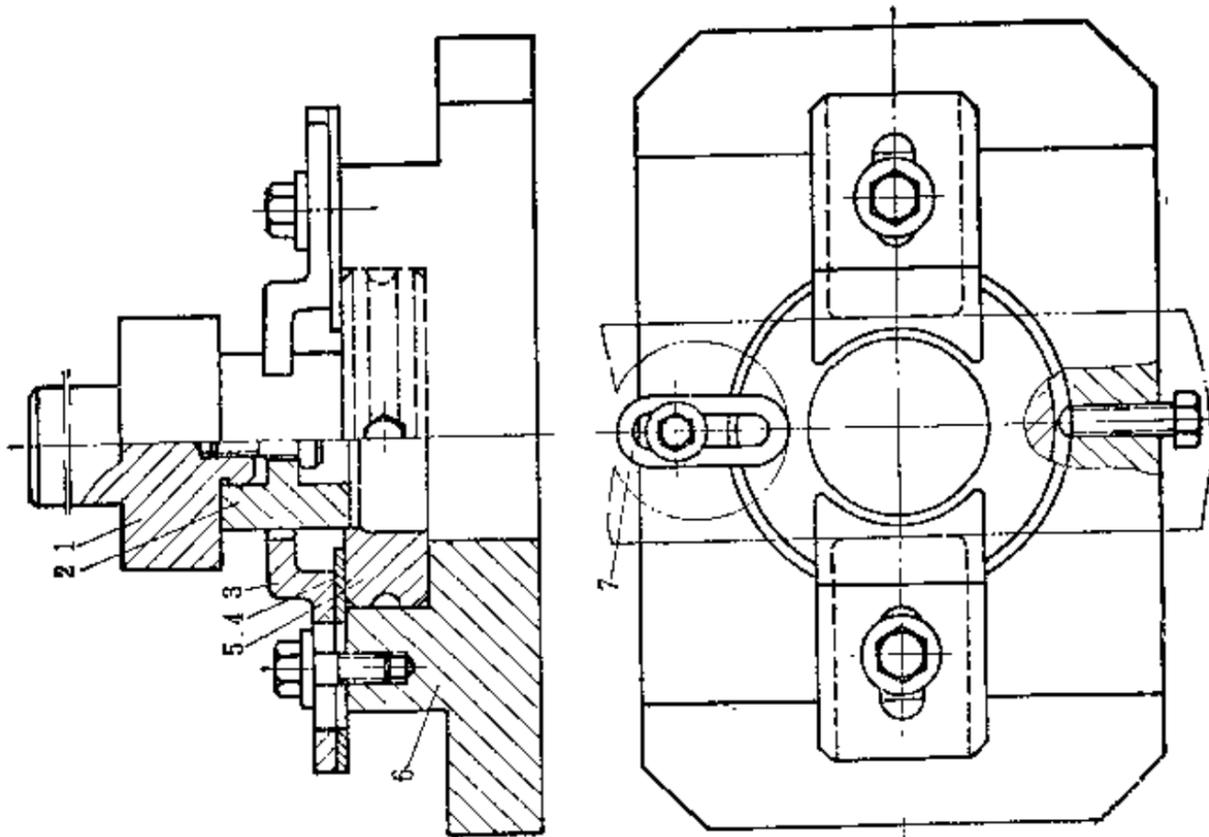


图4-1 无导向简单冲裁模

图4-2为导板式简单冲裁模，结构与无导向简单冲裁模基本相似。上部分主要由模柄1、上模板2、垫板3、凸模固定板4、凸模5组成。下部分主要由下模板9、凹模8、导尺14、导板7、活动挡料销6、托料板13组成。这种模具的特点是模具上、下两部分依靠凸模与导板的动配合导向。导板兼作卸料板。工作时凸模始终不脱离导板，以保证模具导向精度，一般凸模刃磨时也不应该脱离开导板。所以为便于拆卸安装，固定导板的螺钉12之间与销钉11之间的位置（见俯视图），应该大于上模板轮廓尺寸；凸模无需销钉定位固定，要求使用的设备行程不大于导板厚度（可用行程较小而可以调整的偏心式冲床）。

这种模具的动作是条料沿托料板、导尺从右向左送进，搭边越过活动挡料销后，再反向向后拉拽条料，使挡料销后端面抵住条料搭边定位。凸模下行实现冲裁。由于挡料销对第一次冲裁起不到定位作用，为此采用了临时挡料销10。在冲第一件前用手压入临时挡料销限定条料位置，在以后的各次冲裁工作中，临时挡料销被弹簧弹出，不再起挡料作用。

导板模比无导向模具的精度高、寿命长、使用安装容易、操作安全，但制造比较复杂。一般适用于形状较简单尺寸不大的冲裁件。

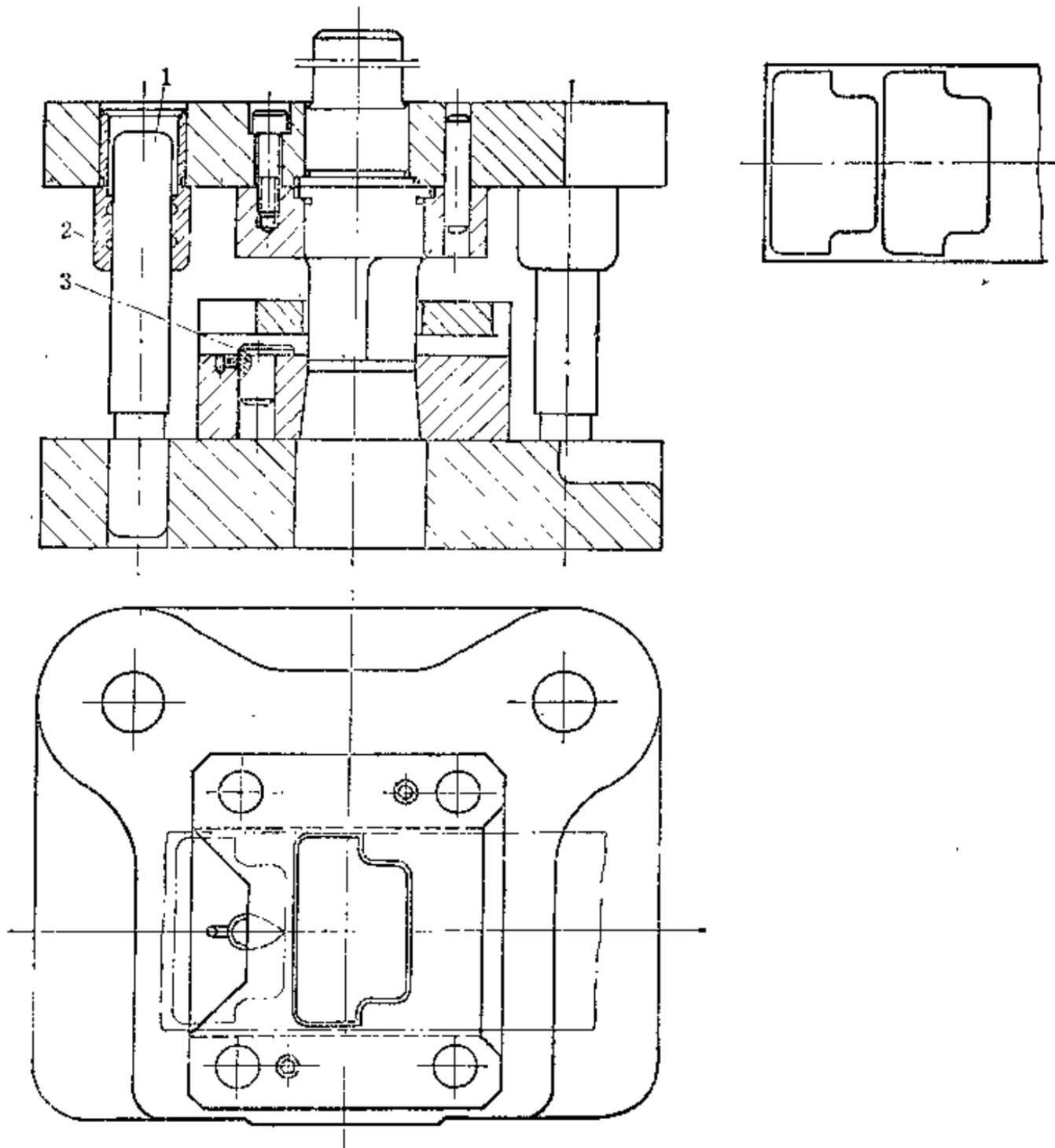


图4-3 导柱式简单冲裁模

3. 导柱式简单冲裁模

用导板导向并不十分可靠，尤其是对于形状复杂的零件，按凸模配作形状复杂的导板孔形困难很大，而且由于受到热处理变形的限制，导板常是不经淬火处理的，影响其使用寿命和导向效果。所以在大量和成批生产中广泛采用导柱式冲裁模。

图4-3为导柱式简单冲裁模，模具的上、下两部分利用导柱1、导套2的滑动配合导向。虽然导柱会加大模具轮廓尺寸、使模具笨重、制造工艺复杂、增加模具成本，但是用导柱导向比导板可靠、精度高、寿命长、使用安装方便，所以在大量和成批生产中广泛采用导柱式冲裁模。

二、连续模

压机一次冲程中，在模具的不同部位上同时完成数道冲裁工序的模具，称为连续模。连续模所完成的冲压工序均分布在坯料的送进方向上。

用简单模冲制环形垫圈，需要落料、冲孔两套模具。如果改用连续模就可以把两道工序合并，用一套模具完成。所以使用连续模可以减少模具和设备数量，提高生产效率，而且容易实现生产自动化。但是，比简单模制造麻烦、成本也高。

用连续模冲制零件，必须解决条料的准确定位问题，才有可能保证制件的质量。根据定

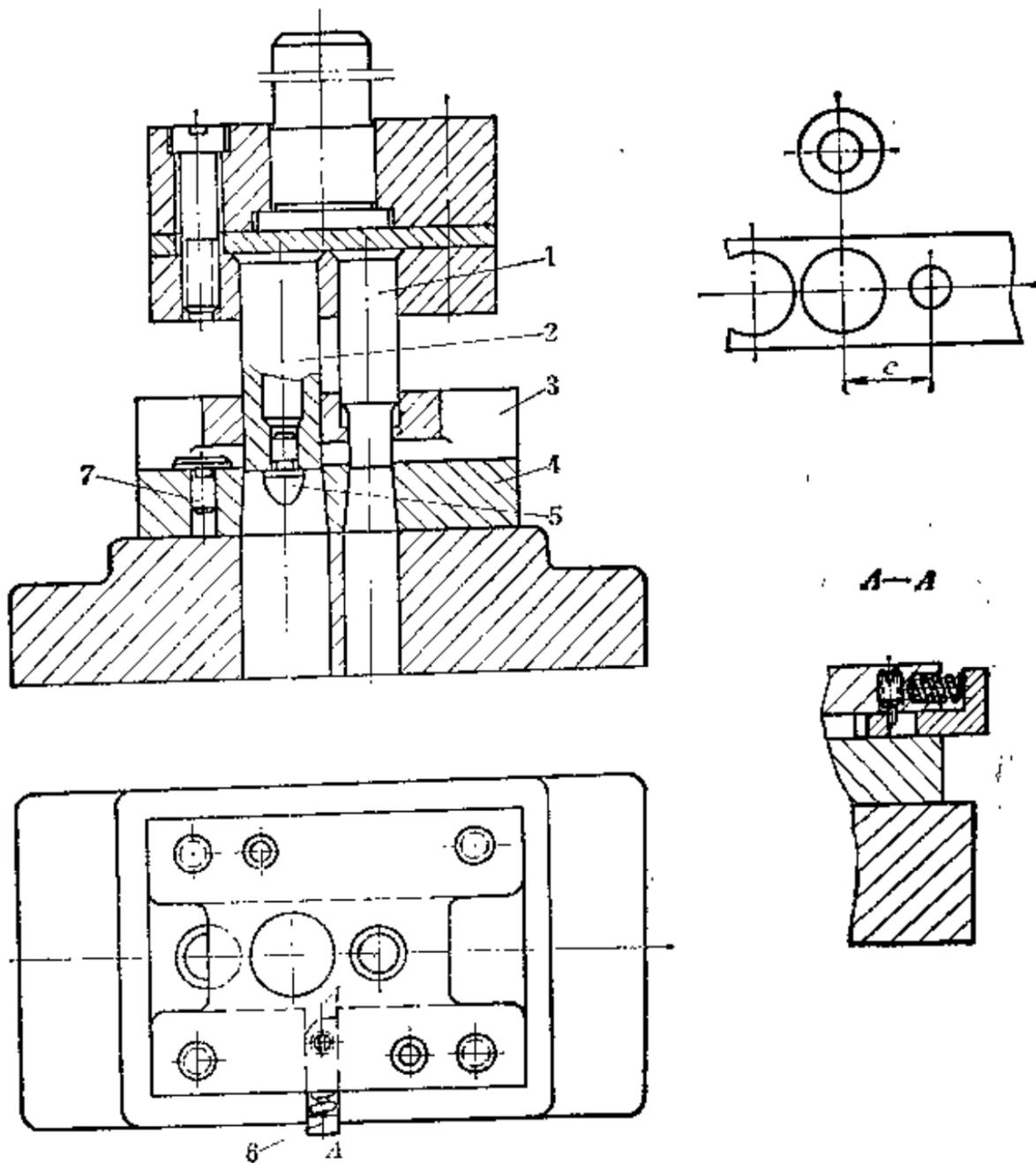


图4-4 连续冲裁模

位零件的特征，常见的典型连续模结构有下边几种型式。

1. 有固定挡料销及导正销的连续模

图4-4为冲制垫圈的连续模。工作零件包括冲孔凸模1、落料凸模2、凹模4、固定挡料销7、导正销5、临时挡料销6，模具上、下两部分靠凸模与导板3配合导向。工作时用手按入临时挡料销限定条料的初始位置，进行冲孔。临时挡料销在弹簧的作用下可自动复位。然后将条料再送进一个步距，先用固定挡料销初步定位，在落料时用装于落料凸模端面上的导正销保证条料的正确定位。模具的导板兼作卸料板用。

当零件形状不适合用导正销导正定位时，可在条料上的废料部分冲出工艺孔，利用装在凸模固定板上的导正销进行导正。为使导正销可靠的工作，避免折损，导正销直径应大于2~5毫米。如果条料厚度小于0.3毫米，孔的边缘可能被导正销压弯因而起不到正确导正和定位的作用。另外，对于窄长形零件（步距小于6~8毫米左右）或落料凸模尺寸不大时，为避免凸模强度过度减弱，一般都不用导正销。在上述两种情况下可采用侧刀的定位方法。

2. 有侧刀的连续模

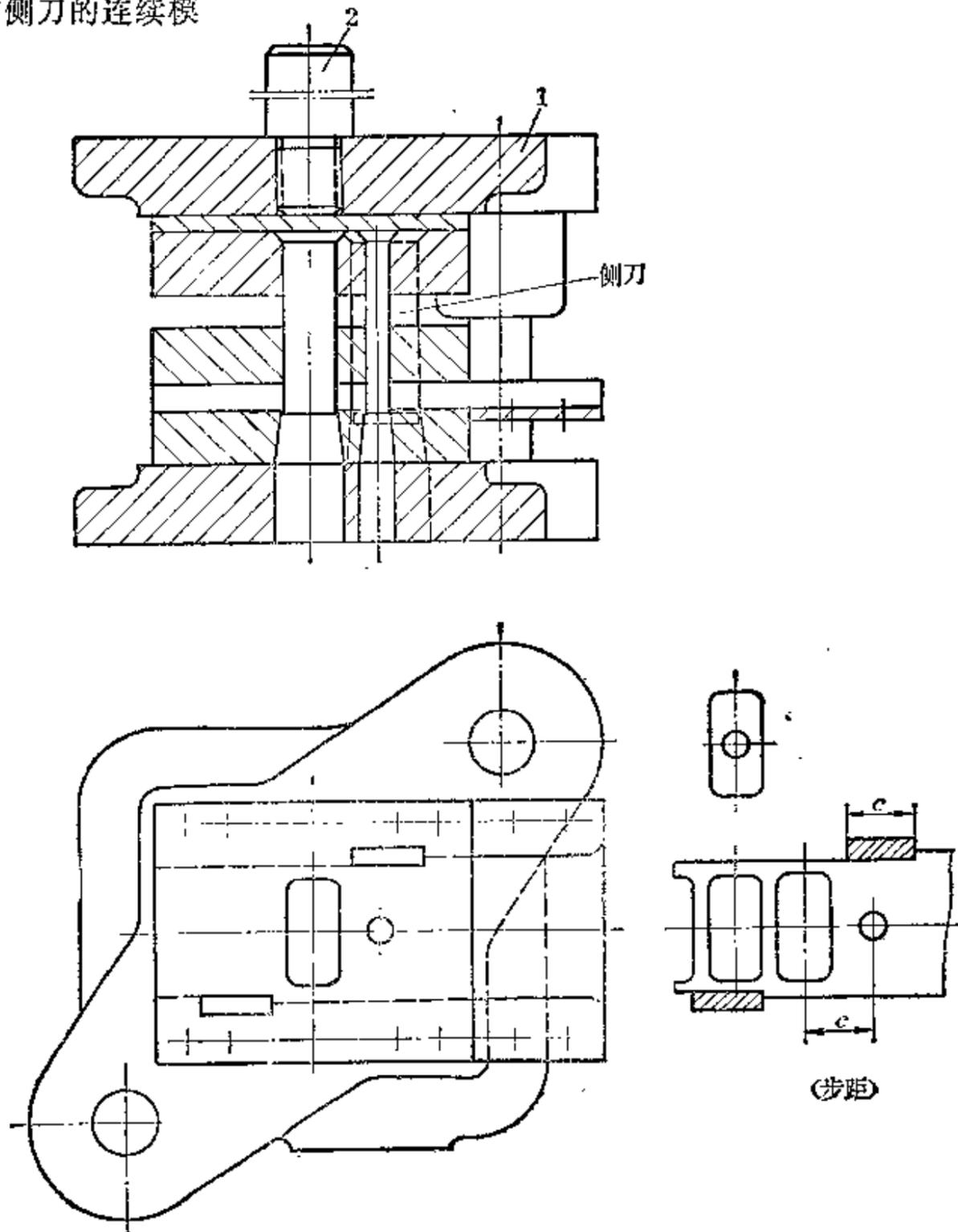


图4-5 有侧刀的连续模

图 4-5 为有侧刀的连续模，其特点是装有节制条料送进距离的侧刀（侧刀断面的长度等于步距）。侧刀前后导尺宽度不等，所以只有用侧刀切去长度等于步距的料边后，条料才可能向前送进一个步距。

有侧刀的连续模定位准确、生产效率高、操作方便，但材料的消耗增加、冲裁力增大。

3. 有自动挡料的连续模

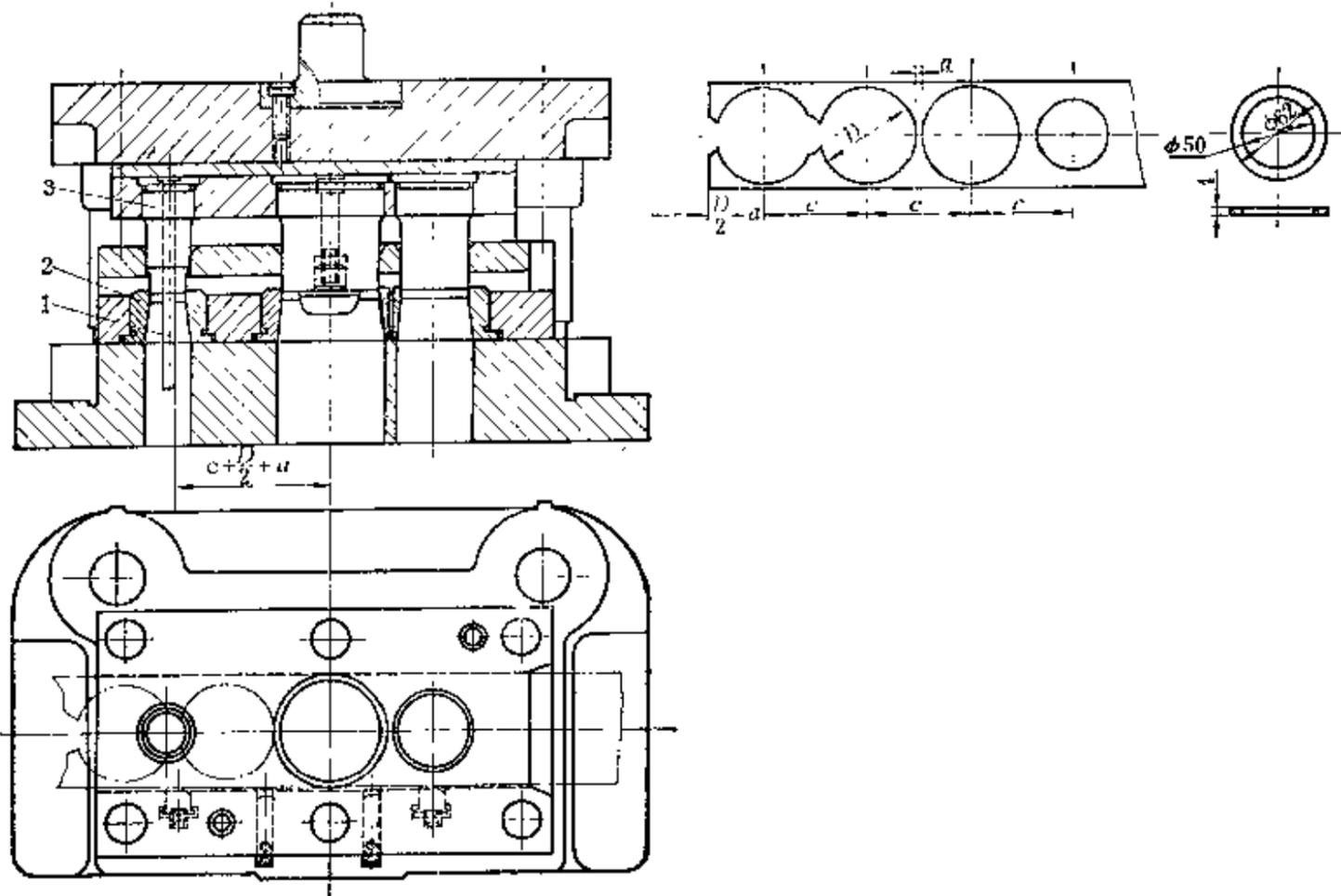


图4-6 有自动挡料的连续模

图 4-6 为有自动挡料的连续模，自动挡料装置由挡料杆 1 及冲搭边的凸模 3 和凹模 2 构成。工作时挡料杆始终不离开凹模的刃口平面，所以条料从右方送进时即被挡料杆挡住搭边。在冲裁的同时凸模 3 将搭边冲出一缺口，使条料又可以继续送进一个步距 c ，从而起到自动挡料的作用。开始的两次冲程分别由临时挡料销定位，从第三次冲程开始用自动挡料装置定位。

三、复合模

压机一次冲程中，在模具的同一部位上同时完成数道冲裁工序的模具，称为复合冲裁模。连续模和复合模都属于多工序模。

图 4-7 为冲制垫圈的复合模。上部分主要由凸模 1、凹模 2、上模固定板 3、垫板 4、上模板 5、模柄 6 组成，下部分主要由凸凹模 14、下模固定板 15、垫板 16、下模板 17、卸料板 13 组成，上、下两部分通过导柱、导套滑动配合导向。复合模结构上的特点是具有既是落料凸模又是冲孔凹模的所谓凸凹模。利用复合模能够在模具的同一部位上同时完成制件的落料和冲孔工序，从而保证冲裁件的内孔与外缘的相对位置精度和平正性、生产效率；而且条料的定位精度的要求比连续模低，模具轮廓尺寸也比连续模小。但是，模具结构复杂，不易制造，成本高，适合于大批量生产。

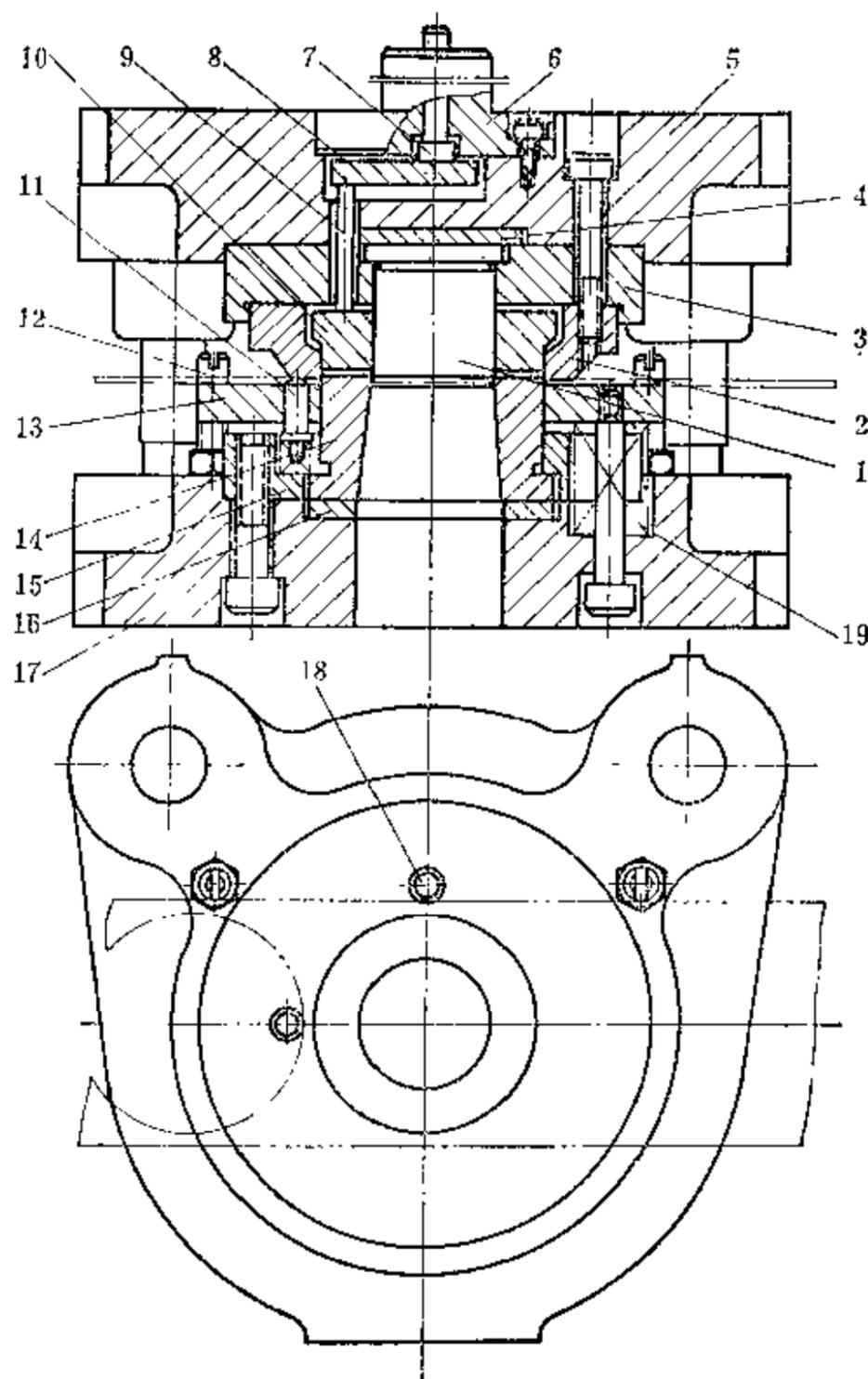


图4-7 复合模

上模采用刚性推件装置，通过推杆7、推块8、推销9推动顶件块10，顶出制件。

这套模具利用二个固定导料销12和一个活动导料销18导向，控制条料的送进方向。利用活动挡料销11挡料定位，控制条料送进距离。

4-3 冲裁模主要部件与零件的构造

组成模具的全部零件，根据其功用可以分成两大类：

1. 工艺结构零件

这类零件直接参与完成工艺过程并和坯料直接发生作用。包括：工作零件（直接对毛坯进行加工的零件），定位零件（用以确定加工中毛坯正确位置的零件），压料、卸料及出件零件。

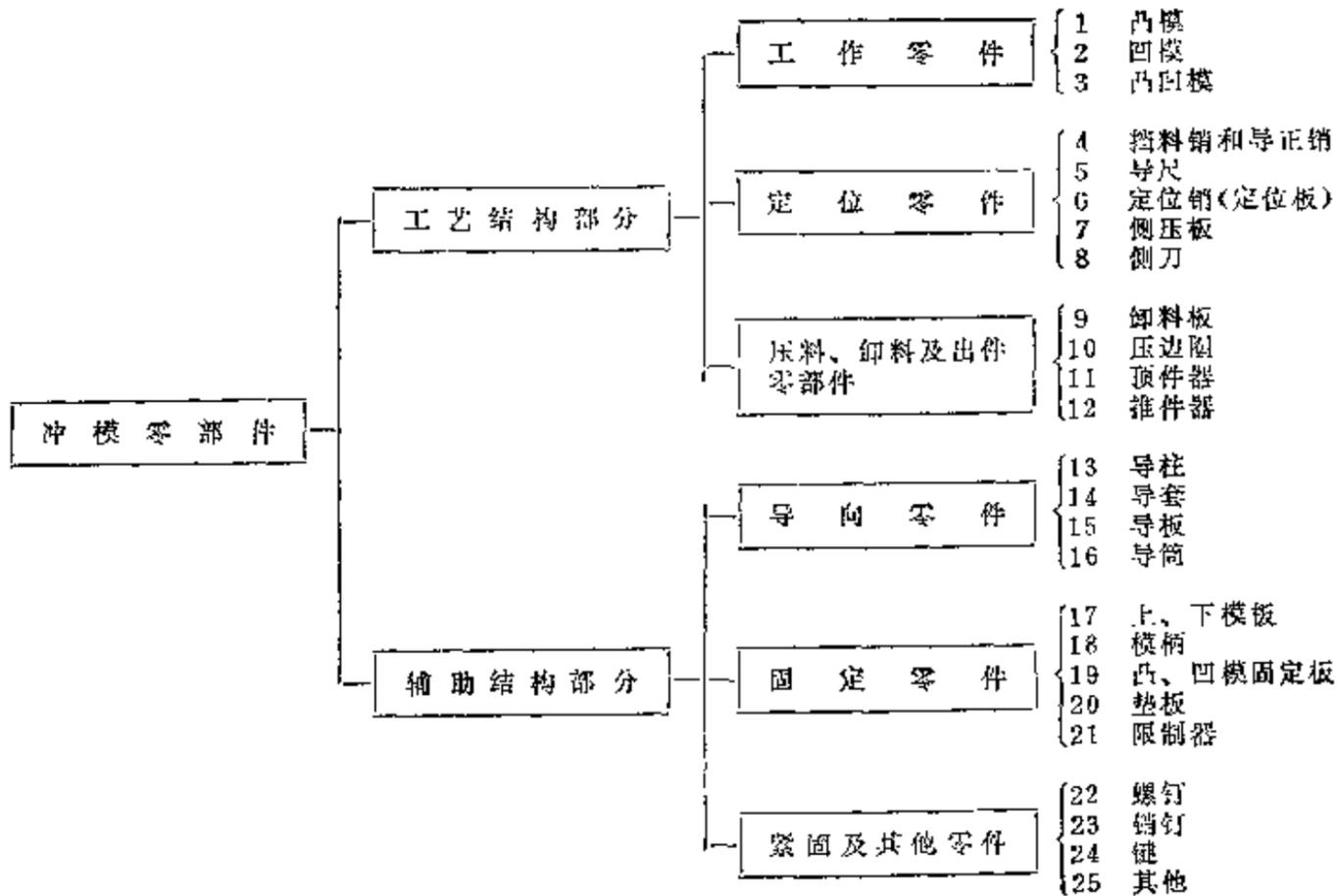
2. 辅助结构零件

这类零件不直接参与完成工艺过程，也不和坯料直接发生作用，只对模具完成工艺过程

起保证作用或对模具的功能起完善的作用。它包括：导向零件（保证模具上、下部分正确的相对位置），固定零件（用以承装模具零件或将模具安装固定到压机上），紧固及其他零件（连接紧固工艺零件与辅助零件）。

冲模零件的分类详见表 4-1。

表 4-1



一、工作零件

1. 凸模

常见的凸模结构型式如图 4-8 所示。a 是圆形断面标准凸模，为避免应力集中和保证强度与刚度方面的要求，做成圆滑过渡的阶梯形，适用于直径 $\phi 1 \sim \phi 28$ 毫米。b 是冲制直径 $\phi 8 \sim \phi 30$ 毫米的凸模结构型式，为了改善凸模强度，可在中部增加过渡阶段（图 c）。d 是冲制孔径与料厚相近的小孔所用凸模的一种型式，采用护套结构既可以提高抗纵向弯曲的能力，又能节省模具钢而达到经济效果。e 是冲裁大件常用的结构型式。

凸模长度 L 应根据模具的结构确定。采用固定卸料板和导尺时（图 4-9），凸模长度应

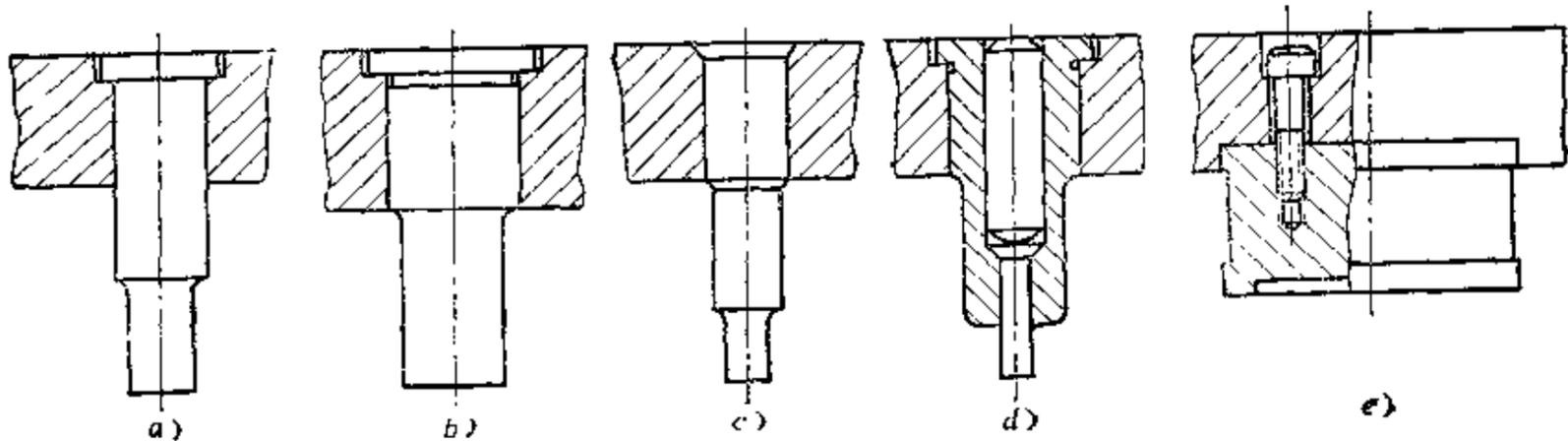


图4-8 凸模的结构形式

式中 E ——凸模材料的弹性模数；
 J ——凸模最小横断面的轴惯性矩；
 l ——凸模长度。

圆形断面凸模的断面轴惯性矩 $J = \frac{\pi d^4}{64} \approx 0.05d^4$ ，故有

$$P \approx \frac{Ed^4}{l^2}$$

如取安全系数为 n 时，凸模不发生失稳弯曲的条件应为

$$nP \leq \frac{Ed^4}{l^2}$$

故圆形断面凸模不失稳弯曲的极限长度 l 为

$$l \leq \sqrt{\frac{Ed^4}{nP}} \quad (4-3)$$

将冲裁力之值 $P = \pi dt\tau$ 代入上式，可得

$$l \leq 0.55 \sqrt{\frac{Ed^3}{nt\tau}} \quad (4-4)$$

式中 P ——冲裁力(牛顿)；
 d ——凸模直径(毫米)；
 E ——凸模材料的弹性模数，一般模具钢为 2.2×10^5 牛顿/毫米²；
 n ——安全系数，淬火钢 $n = 2 \sim 3$ ；
 t ——毛坯厚度(毫米)；
 τ ——毛坯材料抗剪强度(牛顿/毫米²)。

将 E 、 n 值代入式(4-3)可得直径为 d 有导板导向的圆断面凸模的极限长度为

$$l \leq 270 \frac{d^2}{\sqrt{P}} \quad (4-5)$$

对于无导板导向的凸模，其受力情况近似于一端固定另一端自由的压杆。同样可得

$$l \leq 0.35 \sqrt{\frac{Ed^4}{nP}} \quad (4-3a)$$

或者

$$l \leq 0.20 \sqrt{\frac{Ed^3}{nt\tau}} \quad (4-4a)$$

$$l \leq 95 \frac{d^2}{\sqrt{P}} \quad (4-5a)$$

同理，可得一般形状凸模不发生失稳弯曲的极限长度为：
 有导板导向的凸模

$$l \leq 1200 \sqrt{\frac{J}{P}} \quad (4-6)$$

无导板导向的凸模

$$l \leq 425 \sqrt{\frac{J}{P}} \quad (4-6 a)$$

由式(4-4)、(4-4 a)可知,圆形断面凸模不致发生失稳弯曲的极限长度与凸模断面尺寸、毛坯厚度及其机械性能有直接关系。凸模工作时,除承受冲裁力引起的压应力之外,还要承受卸料时引起的拉应力。由于凸模承受很强烈的压缩与拉伸交变的冲击载荷,而且凸模刃口处又不可避免存在较大的应力集中现象,所以凸模也经常出现疲劳破坏。在小孔厚料或者较硬材料的高速冲裁时,凸模发生疲劳破坏的现象更加突出。因此,应该注意凸模材料及其热处理规范的选用,必须同时兼顾硬度与韧性两方面的综合要求。

2. 凹模

图4-10为几种常见的凹模孔口型式:

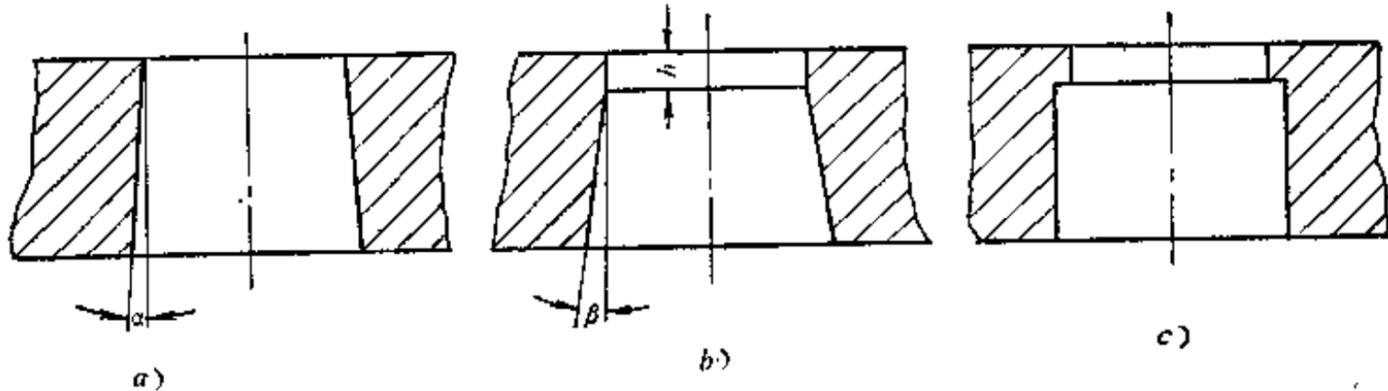


图4-10 凹模孔口型式

a——锥形凹模,冲裁件容易通过,凹模磨损后的修磨量较小,但刃口强度较低,孔口尺寸在修磨后略有增大。凹模刃口角度:一般在电加工时,取 $\alpha = 4' \sim 20'$ (落料模 $< 10'$,复合模 $5'$ 左右);机械加工经钳工精修时,取 $\alpha = 15' \sim 30'$ 。一般用于形状简单,精度要求不高零件的冲裁。

b——柱孔口锥形凹模,刃口强度较高,修磨后孔口尺寸不变,但是在孔口内可能积存冲裁件,增加冲裁力和孔壁的磨损。磨损后每次的修磨量较大,所以模具的总寿命较低。另外,磨损后可能形成孔口的倒锥形状,使冲成的零件从孔口反跳到凹模表面上造成操作上的困难。柱形部分的高度 h 与板料厚度有关。为便于冲裁件通过,斜角常取为 $\beta = 2^\circ \sim 3^\circ$ (电火花加工时, $\beta = 30' \sim 50'$,使用带斜度装置的线切割机时 $\beta = 1^\circ \sim 1.5^\circ$)。适用于形状复杂或精度要求较高的冲裁。

c——柱形或锥形孔口的筒形凹模,可以在凹模背面预先铣削出一定的形状的槽,然后再电加工出柱形或锥形孔口,以提高加工效率。

冲裁时凹模承受冲裁力和侧向力的作用。由于凹模的结构型式不一,受力状态又比较复杂,目前还不可能用理论计算方法确定凹模尺寸。

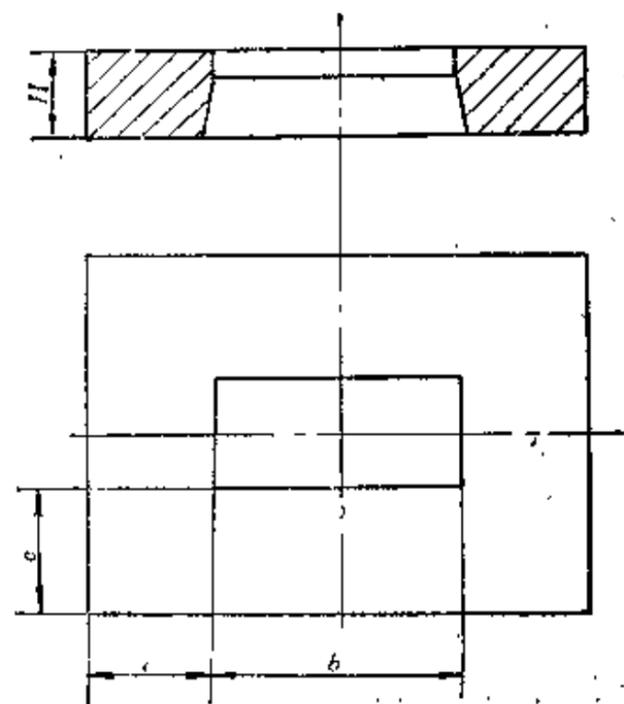


图4-11 凹模尺寸的确定

6), 用 4~6 个螺钉与模板固定连接, 适用于尺寸较大的冲模;

b. 压入式模柄(图 4-2 之件 1), 通过压配合和附加的销钉与模板固定连接, 适用于模板较厚的各种冲模;

c. 旋入式模柄(图 4-5 之件 2), 通过螺纹与模板 1 固定连接, 适用于有导柱的冲模;

d. 浮动式模柄(图 4-12), 模柄 1 的压力通过球形垫 2 传递给上模板, 可以避免压机导滑误差对模具导向精度的影响。适用于有硬质合金凸、凹模的多工序冲裁模。

3. 凸模固定板与垫板

用凸模固定板将凸模联接固定在模板的正确位置上。凸模固定板有圆形与矩形两种, 其平面尺寸除保证能安装凸模外, 还应该能够正确的安放定位销钉和紧固螺钉。其厚度一般取等于凹模厚度的 60~80%。

固定板与凸模采用过渡配合, 压装后将凸模尾部与固定板一起磨平。

垫板的作用是分散凸模传来的压力, 防止模板被压挤损伤。凸模端面对模板的单位压力为

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad (4-9)$$

式中 P ——冲裁力;

F ——凸模支承端面积。

如果凸模端面上的单位压力大于模板材料的许用挤压应力时, 就需要在凸模支承面上加一淬硬磨平的垫板(图 4-2、4-4); 如果凸模端面上的单位压力不大于模板材料的许用挤压应力时, 可以不加垫板(图 4-3)。垫板厚度一般取 3~8 毫米。

三、导向零件

常用的导向装置有导板式(图 4-2)和导柱式(图 4-3), 导筒式很少采用。

导板的导向孔按凸模断面形状加工, 采用二级精度动配合。模具工作时凸模始终不脱离导板, 从而起到导向作用。为了得到可靠的导向作用, 导板必须具有足够的厚度, 一般取等于或稍小于凹模厚度。导板的平面尺寸取与凹模相同。

冲压加工零件的形状复杂时, 导板加工困难, 为了避免热处理时的变形, 时常不进行热处理, 所以其耐磨性能差, 实际上很难达到和保持可靠与稳定的导向精度。生产中经常采用导柱、导套方式导向。大型模具多用阶梯形导柱, 其大端直径取等于导套的外径, 从而使上、下模板安装导柱、导套的孔径相等, 可以在一般的设备上同时加工保证同心度。中、小型模具多用圆柱形导柱, 使导柱加工容易。为了导向的可靠性, 增加导向部分长度, 取导套长度比模板的厚度大。要求导柱和导套具有耐磨性与足够的韧性, 一般用低碳钢制造, 经表面渗碳、淬火, 导套的硬度应低于导柱。当冲模工作速度较高或对冲模精度要求较高时, 可

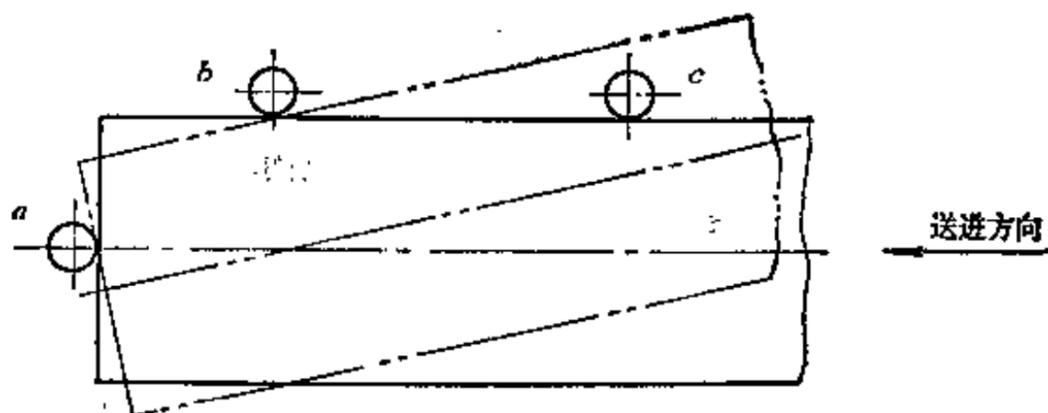


图 4-13 坯料的定位

以采用滚动式的导柱、导套装置导向。

四、定位零件

为了保证模具正常工作并冲出合格的制件，要求在送进的平面内，坯料(块料、条料)相对于模具的工作零件处于正确的位置。坯料在模具中的定位有两个内容：一是在送料方向上的定位，用来控制送料的进距，通常称为挡料(图 4-13 中的销 *a*)；二是在与送料方向垂直方向上的定位，通常称为送进导向(图 4-13 中的销 *b*、*c*)。

1. 送进导向方式与零件

常见的送进导向方式有导销式与导尺式。图 4-7 为导销式送进导向复合模，在条料的同一侧装设两个固定导料销 12，为了保证条料在首次或末次冲裁的正确送进方向，设有一活动导料销 18。只要保持条料沿导料销一侧送进，即可保证条料正确的送进方向。导销也可以压装在凹模上。导销送进导向结构简单，制造容易，多用于简单模或复合模。

图 4-2 为导尺送进导向简单模，条料沿导尺 14 送进保证送进方向。为了条料的顺利通过，导尺间距离应该等于条料的最大宽度加上一间隙值。如果条料宽度尺寸公差较大，为节省板材和保证冲压件的质量，应该在进料方向的一侧装侧压装置，迫使条料始终紧靠另一侧导尺送进。导尺与导板(卸料板)可以分开制造(图 4-1、4-2)，也可以制成整体的(图 4-3、4-4)。有导板(卸料板)的简单模或连续模，经常采用导尺作送进导向。

2. 挡料方式与零件

常见的限定条料送进距离的方式有：用销钉抵挡搭边或制件轮廓，限定条料送进距离的挡料销定距；用侧刀在条料侧边冲切各种形状缺口，限定条料送进距离的侧刀定距。

a. 挡料销定距

根据结构特征挡料销分为固定式和活动式两种。

图 4-3、4-4 为采用固定式挡料销控制条料送进距离的模具。图 4-4 零件 7 为圆形挡料销，用于中、小型冲裁件定距。图 4-3 零件 3 为钩式挡料销。钩式挡料销尾柄远离凹模刃口有利于凹模强度，适用于较大型的冲裁件定距。为防止钩头转动需有定向销，从而增加制造加工量。固定式挡料销，适用于手工送料的简单模或连续模。

图 4-2、4-7 为采用活动式挡料销控制条料送进距离的模具。图 4-2 零件 6 挡料销在送进方向带有斜面，送料时当搭边碰撞斜而使挡料销跳越搭边，然后将条料后拉，挡料销便抵住搭边而定位。每次送料都要先送后拉，作方向相反的两个动作。

为了提高材料利用率，可使用临时挡料销。在条料第一次冲裁送进前，预先用手将临时挡料销(图 4-2 之零件 10 或图 4-4 之零件 6)按入，使其端部突出导尺，挡住条料而限定送进距离。第一次冲裁后，弹簧将临时挡料销退出，在以后的各次冲裁中不再使用。

b. 侧刀定距

图 4-5 所示为侧刀定距的连续模。根据断面形状常用的侧刀可分成三种(图 4-14)。

长方形侧刀(图 4-14 *a*)制造和使用都很简单，但当刃口尖角磨损后，在条料侧边形成的毛刺(图 4-14 *d*)会影响定位和送进。为了解决这个问题，在生产中常采用图 4-14 *b* 所示的侧刀形状。这时由于侧刀尖角磨损而形成的毛刺不会影响条料的送进，但必须增大切边的宽度，因而造成原材料过多的消耗。尖角形侧刀(图 4-14 *c*)需与弹簧挡销配合使用，先在条料边缘冲切尖角缺口，条料送进当缺口滑过弹簧挡销后，反向后拉条料至挡销卡住缺口而定距。尖角形侧刀废料少，但操作麻烦，生产效率低。

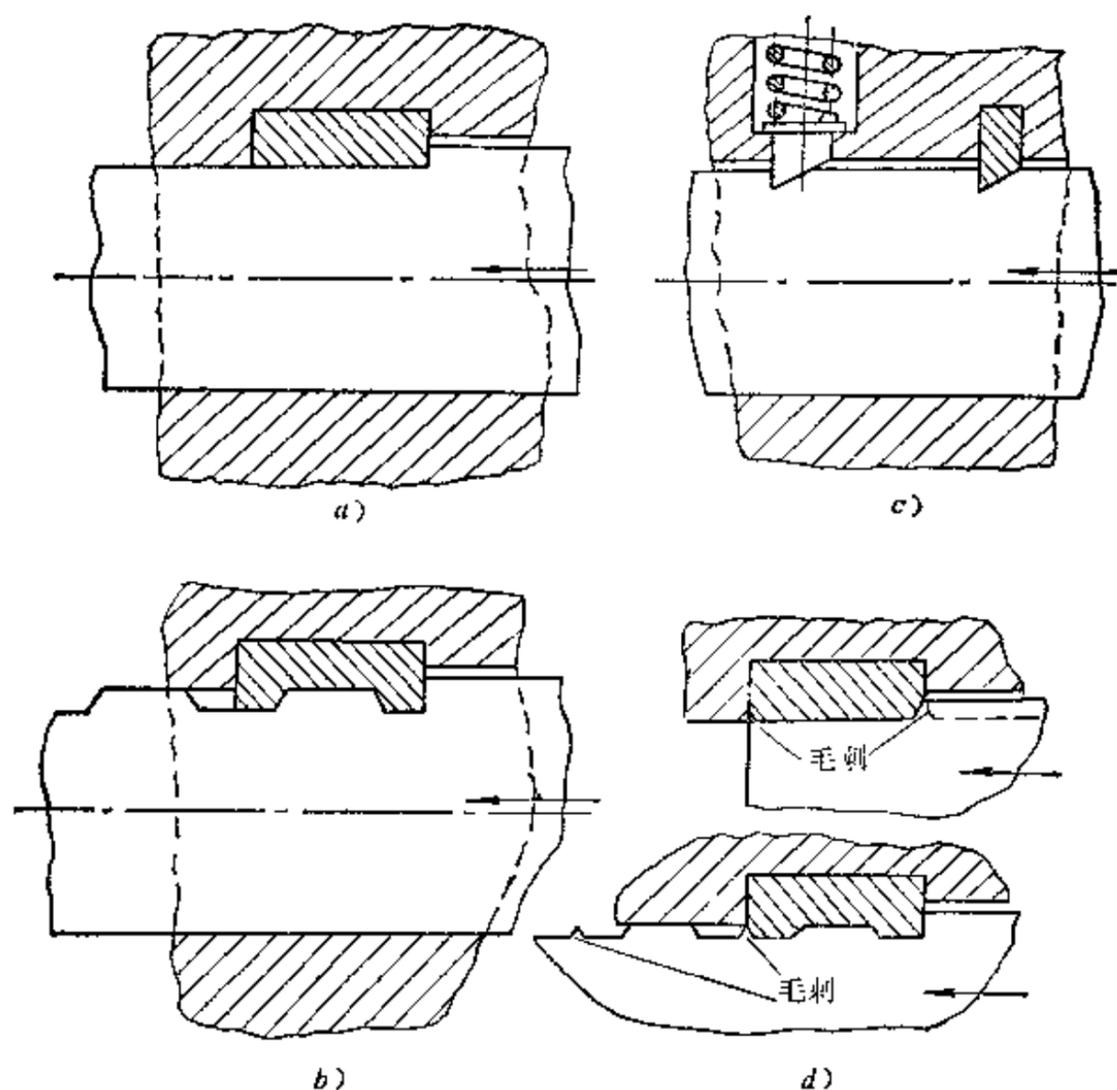


图4-14 侧刀的形式

a—长方形侧刀 b—成形侧刀 c—尖角形侧刀 d—侧刀磨损形成的毛刺

侧刀定距准确可靠，生产效率高，但增大总冲裁力和增加材料消耗。一般用于连续模冲制窄长形零件(步距小于6~8毫米)或薄料(0.5毫米以下)冲裁。

侧刀的数量可以是一个，或者是两个。两个侧刀可以并列布置，也可按对角布置，对角布置能够保证料尾的充分利用。

c. 导正销

为了保证连续模冲裁件内孔与外缘的相对位置精度，可采用如图4-4所示的导正销5。导正销安装在落料凸模工作端面上，落料前导正销先插入已冲好的孔中，确定内孔与外形的相对位置，消除送料和导向造成的误差。

设计有导正销的连续模时，挡料销的位置，应该保证导正销导正条料过程中条料活动的可能。挡料销位置 e (图4-15)为

$$e = c - \frac{D}{2} + \frac{d}{2} + 0.1 \text{ 毫米}$$

(4-10)

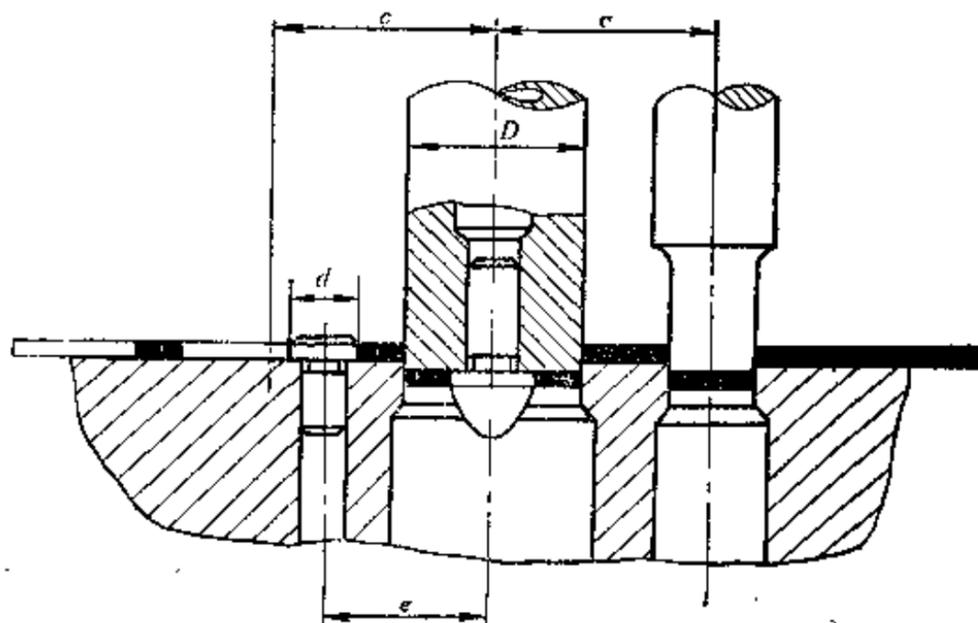


图4-15 挡料销位置的确定

式中 c ——步距;
 D ——落料凸模直径;
 d ——挡料销头部直径。

五、弹簧选用原则

作为冲裁模卸料或推件用的弹簧，已经形成标准。标准中给出弹簧的有关数据和弹簧的特性线，模具设计时只需按标准选用。一般选用弹簧的原则，应该是在满足模具结构要求的前提下，保证所选用的弹簧能够给出要求的作用力和行程。

为了保证冲模的正常工作，在冲模不工作时，弹簧也应该在预紧力 P_0 的作用下产生一定的预压紧量 F_0 ，这时预紧力应为

$$P_0 > \frac{P}{n} \quad (4-11)$$

为保证冲模正常工作所必需的弹簧最大压紧量 $[F]$ 为：

$$[F] \geq F_0 + F + F' \quad (4-12)$$

式中 P_0 ——弹簧预紧力;
 P ——工艺力(卸料力、推件力等);
 n ——弹簧根数;
 $[F]$ ——弹簧最大许用压缩量;
 F_0 ——弹簧预紧量;
 F ——工艺行程(卸料板、顶件块行程)，一般取 $F = t + 1$ 毫米;
 F' ——余量，主要考虑模具的刃磨量及调整量，一般取 5 ~ 10 毫米。

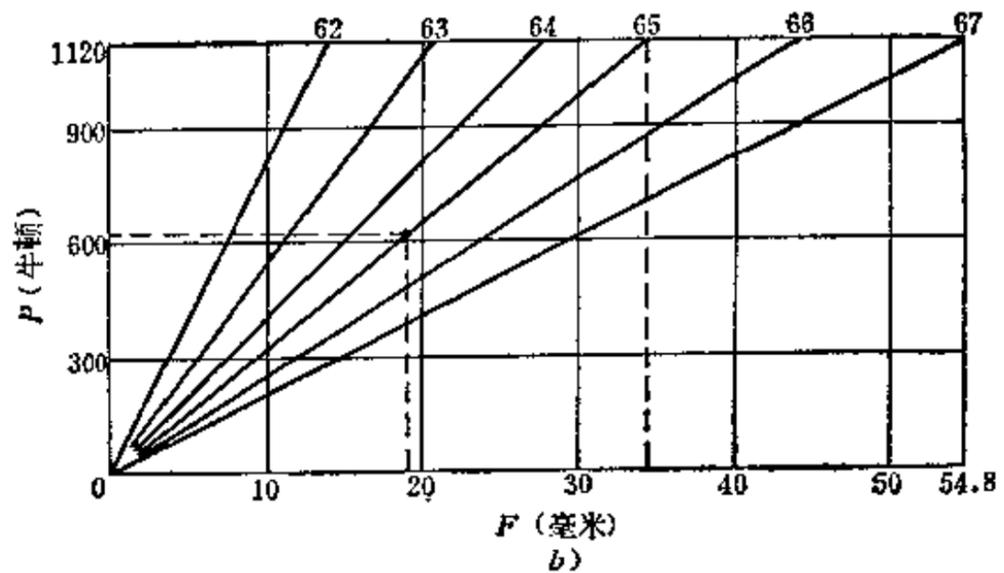
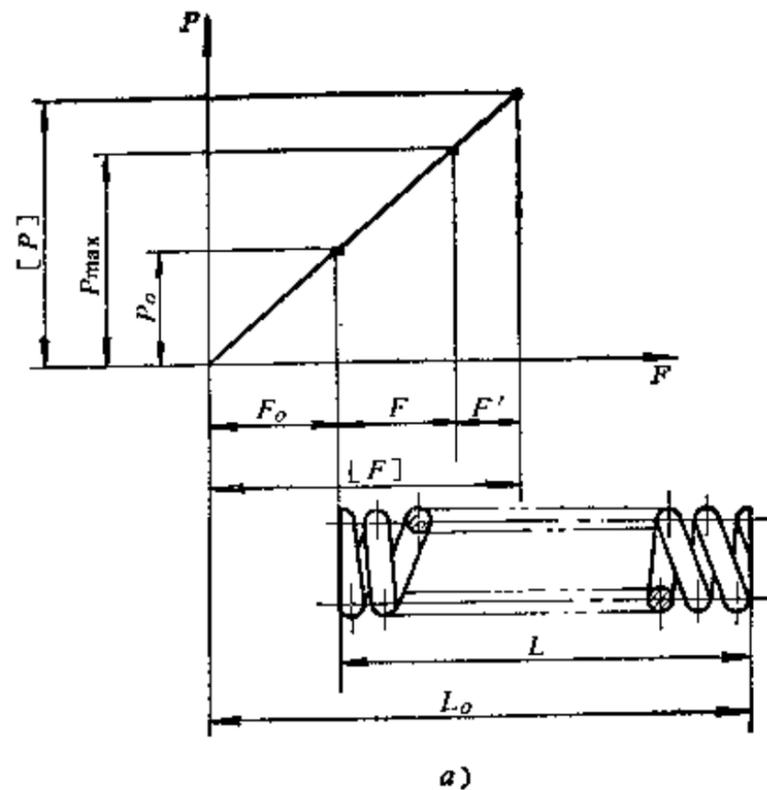


图4-16 弹簧的特性线

圆柱形螺旋弹簧的选用，应该以弹簧的特性线(图 4-16)为根据，按下述步骤进行。

1. 根据模具结构和工艺力(卸料力、推件力)初定弹簧根数 n ，并求出分配在每根弹簧上的工艺力 P/n 。

2. 根据所需的预紧力 P_0 和必须的弹簧总压紧量 $F + F'$ ，预选弹簧的直径 D 、弹簧丝的直径 d 及弹簧的圈数(即自由高度)，然后利用图 4-16 所示的弹簧特性线，校验所选弹簧的性能，使之满足式(4-11)及(4-12)的要求。

冲裁模具中，广泛地应用圆柱形螺旋弹簧。当所需工作行程较小，而作用力很大时，可

以考虑选用盘形弹簧。

六、弹簧选用举例

用图 4-7 所示之复合模冲制料厚 $t = 1$ 毫米的低碳钢垫圈，外径 $\phi 80$ 毫米，内孔 $\phi 50$ 毫米，凸凹模的总刃磨量 6 毫米。如果卸料力为 3600 牛顿时，则卸料板 13 所用圆柱形弹簧 19 的具体选用过程如下：

1. 根据模具结构和卸料力大小，初定弹簧根数 $n = 6$ ，则每根弹簧上的卸料力为

$$\frac{P}{n} = \frac{3600}{6} = 600 \text{ 牛顿}$$

2. 根据所需的预紧力 $P_0 > 600$ 牛顿和必须的弹簧总压缩量 $F + F' = 1 + 1 + 10 = 12$ 毫米，参照弹簧的特性线（图 4-16 b）和弹簧的规格 JB425-62，预选弹簧的直径 $D = 40$ 毫米，弹簧丝的直径 $d = 6$ 毫米，弹簧自由长度 $L_0 = 110$ 毫米，弹簧的序号 65。

然后校验所选弹簧的性能。由弹簧的特性线（图 4-16 b）可见，对于序号 65 的弹簧当预紧力取 $P_0 = 620$ 牛顿时，预紧量 $F_0 = 19$ 毫米，而最大许用压缩量 $[F] = 34.5$ 毫米，实际所需工艺行程 $F = 2$ 毫米，取余量 $F' = 10$ 毫米，则 $F_0 + F + F' = 31$ 毫米，即有

$$P_0 > \frac{P}{n}$$

$$[F] > F_0 + F + F'$$

故所选弹簧满足要求。

4-4 冲裁模设计要点

一、模具总体结构型式的确定

模具总体结构型式的确定是设计时必须首先解决的问题，也是冲模设计的关键，它直接影响冲压件的质量、成本和冲压生产的水平，所以必须予以十分的重视。模具型式的选定，应以合理的冲压工艺过程为基础，根据冲压件的形状、尺寸、精度要求、材料性能、生产批量、冲压设备、模具加工条件等多方面的因素，做综合的分析研究和比较其综合的经济效果，以期在满足冲压件质量要求的前提下，达到最大限度地降低冲压件的生产成本的基本要求。确定模具的结构型式时，必须解决以下几方面的问题：

1. 模具类型的确定：简单模，连续模，复合模等；
2. 操作方式的确定：手工操作，自动化操作，半自动化操作；
3. 进出料方式的确定：根据原材料的型式确定进料方法，取出和整理零件的方法，原材料的定位方法；
4. 压料与卸料方式的确定：压料或不压料，弹性或刚性卸料等；
5. 模具精度的确定：根据冲压件的特点确定合理的模具加工精度，选取合理的导向方式或模具固定方法等。

表 4-4 给出模具的型式与生产批量之间的关系，表 4-5 是复合模与连续模在各方面的对比关系，其中内容可供选定模具类型时参考。

除生产批量、生产成本、冲压件的质量要求外，在设计冲模时还必须对其维修性能、操作方便、安全性等方面予以充分的注意。以下举例说明。

表4-4 冲压生产批量与合理模具型式

项目	批 量	单 件	小 批	中 批	大 批	大 量
大 件	<1	1~2	2~20	20~300	>300	
中 件	<1	1~5	5~50	50~1000	>1000	
小 件	<1	1~10	10~100	100~5000	>5000	
模具型式	简易模 组合模 简单模	简单模 组合模 简易模	连续模、复合模 简单模 半自动模	连续模、复合模 简单模 自动模	连续模、复合模	
设备型式	通用压机	通用压机	高速压机 自动和半自动 通用压机	机械化高速压机 自动机	专用压机与自动机	

注：表内数字为每年班产量的概略数值（千件），供参考。

表4-5 复合模与连续模的比较

比 较 项 目	复 合 模	连 续 模
冲压精度	高级和中级精度(3~5级)	中级和低级精度(5~8级)
制件形状特点	零件的几何形状与尺寸受到模具结构与强度方面的限制	可以加工形状复杂或特殊形状的零件，如宽度很小的异形件等
制件质量	由于压料冲裁同时得到校平，制件平正（不弯曲）且有较好的剪切断面	中、小件不平正（弯曲），高质量件需校平
生产效率	制件被顶到模具工作面上必须用手工或机械排除，生产效率稍低	工序间自动送料，可以自动排除制件，生产效率高
使用高速自动压机	操作时出件困难，可能损坏弹簧缓冲机构，不作推荐	可能在行程次数为每分钟400次或更多的高速压机上工作
工作安全性	手需伸入模具工作区，不安全，需采用技术安全措施	手不需伸入模具工作区，较比安全
多排冲压法的应用	很少采用	广泛采用于尺寸较小的制件
模具制造工作量和本	冲裁复杂形状零件比连续模低	冲裁简单形状零件比复合模低

1. 模具结构应保证磨损后修磨方便；尽量做到不拆卸即可修磨工作零件；影响修磨而必须去掉的零件（如模柄等），可做成易拆卸的结构等。

2. 冲模的工作零件较多，而且使用寿命相差较大时，应将易损坏及易磨损的工作零件做成快换结构的形式，而且应尽量做到可以分别调整和补偿易磨损件的高度尺寸。

3. 需要经常修磨和调整的部分尽量放在模具的下部。

4. 重量较大的模具应有方便的起运孔或钩环等。

5. 模具的结构应保证操作者的手不必进入危险区，而且各活动零件（如卸料板等）的结构尺寸，在其运动范围内不致压伤操作者的手指等。

二、冲模的压力中心

冲裁力合力的作用点称为模具的压力中心。如果压力中心不在模柄轴线上，滑块就会承受偏心载荷，导致滑块导轨和模具不正常的磨损，降低模具寿命甚至损坏模具。通常利用求平行力系合力作用点的方法：解析法或图解法，确定模具的压力中心。

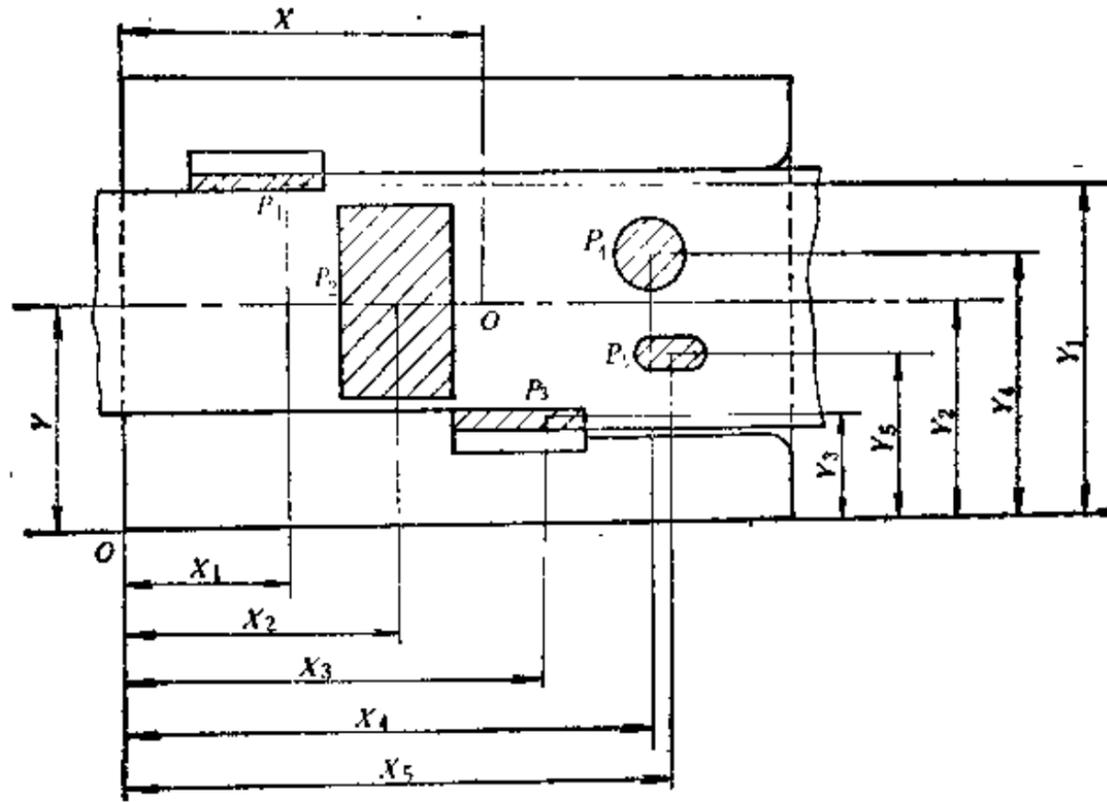


图4-17 冲裁模压力中心的确定

如图4-17所示之连续模压力中心为O点，其坐标为X、Y，连续模上作用的冲裁力 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 是垂直于图面方向的平行力系。根据力学定理，诸分力对某轴力矩之和等于其合力对同轴之距，则有

$$X = \frac{P_1 X_1 + P_2 X_2 + \dots + P_n X_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i X_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (4-13)$$

$$Y = \frac{P_1 Y_1 + P_2 Y_2 + \dots + P_n Y_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i Y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (4-14)$$

这里 $P_1 = L_1 t \tau$;

$P_2 = L_2 t \tau$;

.....

$P_n = L_n t \tau$ 。

式中 P_1 、 P_2 、 \dots 、 P_n ——各图形的冲裁力；

X_1 、 X_2 、 \dots 、 X_n ——各图形冲裁力的X轴坐标；

Y_1 、 Y_2 、 \dots 、 Y_n ——各图形冲裁力的Y轴坐标；

L_1 、 L_2 、 \dots 、 L_n ——各图形冲裁周边长度；

t ——毛坯厚度；

τ ——材料抗剪强度。

将各图形冲裁力 P_1 、 $P_2 \dots P_n$ 之值代入式(4-13)、(4-14)可得冲模压力中心的座标 X 与 Y 之值为

$$X = \frac{L_1 X_1 + L_2 X_2 + \dots + L_n X_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i X_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (4-13 a)$$

$$Y = \frac{L_1 Y_1 + L_2 Y_2 + \dots + L_n Y_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i Y_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (4-14 a)$$

除上述的解析法外, 在生产中也常用作图法求压力中心。虽然作图法的精度稍差, 但却可省掉许多计算。在实际生产中, 可能出现冲模压力中心在加工过程中发生变化的情况, 或者由于零件的形状特殊, 从模具结构考虑不宜于使压力中心与模柄中心线相重合的情况, 这时应注意使压力中心的偏离不致超出所选用压力机所允许的范围。

三、冲模的封闭高度

冲裁模总体结构尺寸必须与所用设备相适应, 即模具总体结构平面尺寸应该适应于设备工作台面尺寸, 而模具总体封闭高度必须与设备的封闭高度相适应, 否则就不能保证正常的安装与工作。冲裁模的封闭高度系指模具在最低工作位置时, 上、下模板底面间的距离。

模具的封闭高度 H 应该介于压力机的最大封闭高度 H_{max} 及最小封闭高度 H_{min} 之间 (图 4-18), 一般取

$$H_{max} - 5 \text{ 毫米} \geq H \geq H_{min} + 10 \text{ 毫米}$$

如果模具封闭高度小于设备的最小封闭高度时, 可以采用附加垫板。

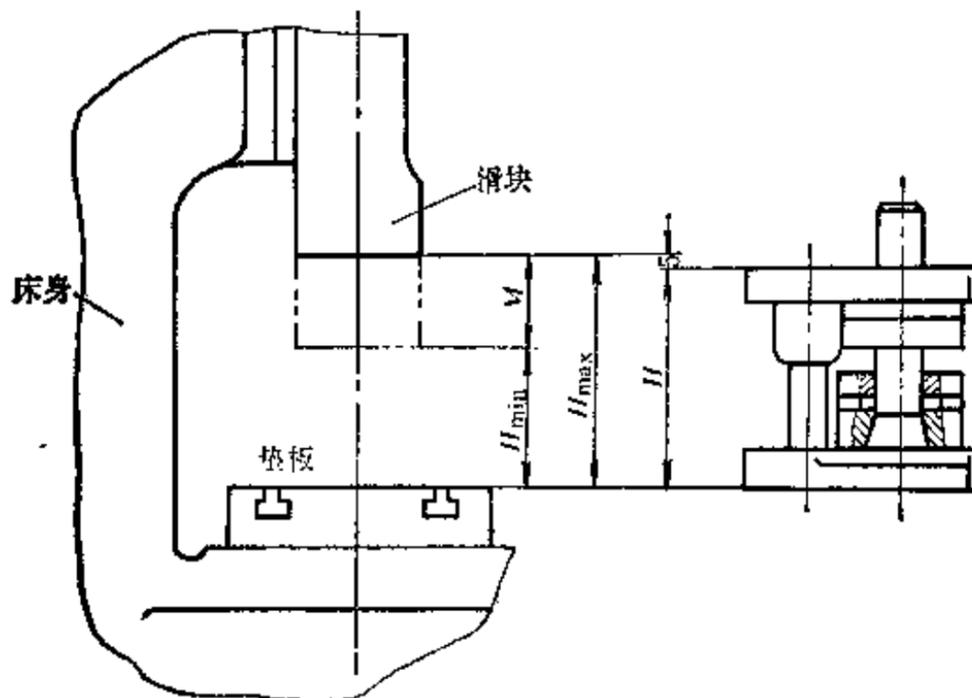


图4-18 模具的封闭高度

第五章 弯 曲

5-1 概 述

把平板毛坯、型材或管材等弯成一定的曲率、一定的角度形成一定形状零件的冲压工序称为弯曲。弯曲成型的应用相当广泛，用弯曲方法加工零件的种类非常多，图 5-1 是常见的典型弯曲件举例。在生产中弯曲成型所用的工具及设备不同，形成各种不同的弯曲方法。如在普通压床上使用弯曲模的压弯，折弯机上的折弯，滚弯机上的滚弯以及在拉弯设备上的拉弯等等。各种弯曲方法尽管所用设备及工具不同，但其变形过程及特点也有一些共同的规律。

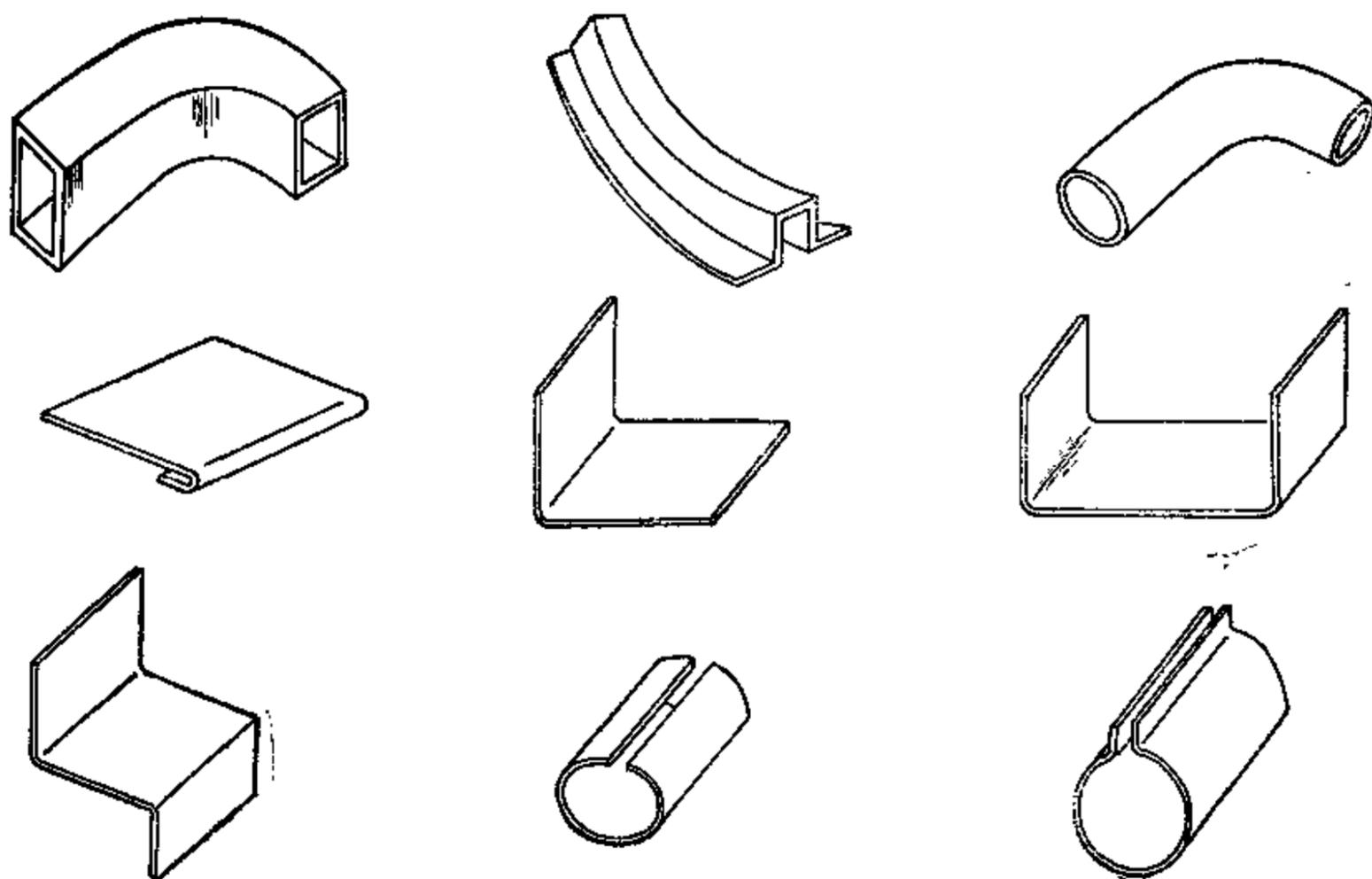


图5-1 各种典型弯曲件举例

弯曲时毛坯上曲率发生变化的部分是变形区（图 5-2 中 $ABCD$ 部分）。弯曲变形的主要工艺参数都和变形区的应力与应变的性质和数值有关。

毛坯上作用有外弯曲力矩 M 时，毛坯的曲率发生变化。毛坯变形区内靠近曲率中心的一侧（以后称内层）的金属在切向压应力的作用下产生压缩变形；远离曲率中心一侧（以后称外层）的金属在切向拉应力的作用下产生伸长变形。毛坯变形区内的切向应力分布如图 5-2 所示。

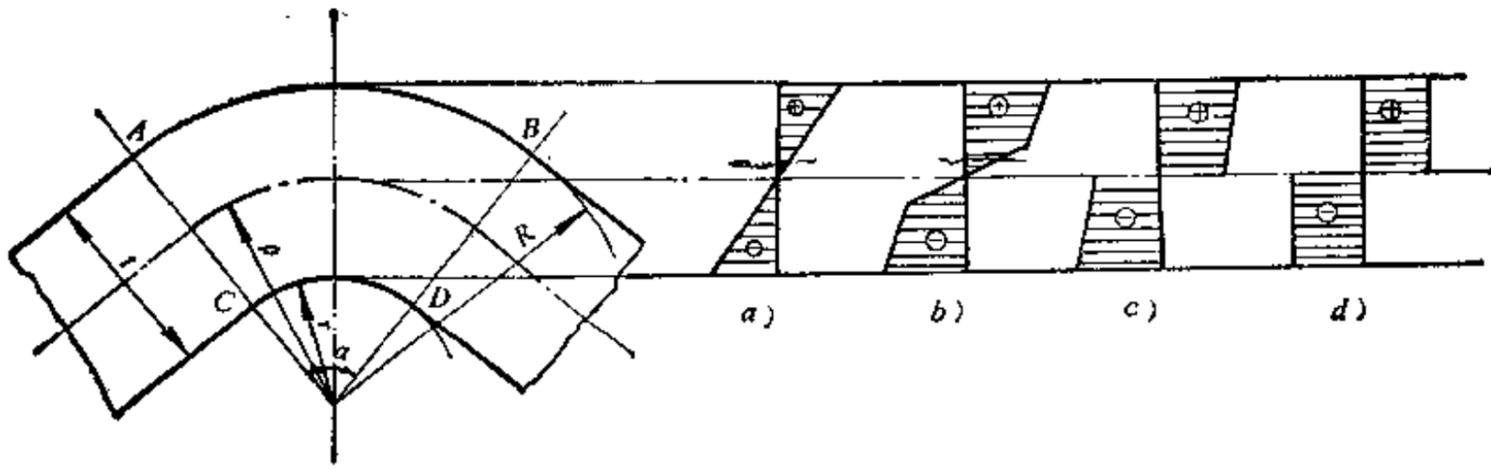


图5-2 弯曲毛坯变形区内切向应力的分布

a—弹性弯曲 b—弹-塑性弯曲 c—纯塑性弯曲 d—无硬化纯塑性弯曲

在毛坯弯曲过程的初始阶段里，外弯曲力矩的数值不大，在毛坯变形区的内、外二表面上引起的应力数值小于材料的屈服极限 σ_s ，仅在毛坯内部引起弹性变形。这一阶段称弹性弯曲阶段，变形区内的切向应力分布如图5-2 a所示。当外弯曲力矩的数值继续增大时，毛坯的曲率半径随着变小，毛坯变形区的内、外表面首先由弹性变形状态过渡到塑性变形状态，以后塑性变形由内、外表面向中心逐步地扩展。变形由弹性弯曲过渡为弹-塑性弯曲和纯塑性弯曲，切向应力的变化如图5-2所示。

由图5-2可见，毛坯断面上的应力由外层的拉应力过渡到内层的压应力，中间必定有一层金属，其切向应力为零，称为应力中性层，其曲率半径用 ρ_s 表示。同样，应变的分布也是由外层的拉应变过渡到内层的压应变，其间必定有一层金属的应变为零，弯曲变形时其长度不变，称之为应变中性层，其曲率半径用 ρ_e 表示。在弹性弯曲或弯曲变形程度较小时，应力中性层和应变中性层相重合，位于板厚的中央，其曲率半径相同都可用 ρ 表示，即 $\rho_s = \rho_e = \rho = r + \frac{t}{2}$ 。当弯曲变形程度较大时，应力中性层和应变中性层都从板厚的中央向内层移动，而且应力中性层的位移大于应变中性层的位移，即 $\rho_s > \rho_e$ 。

板材在塑性弯曲时，变形区内的应力状态和应变状态决定于弯曲毛坯的相对宽度 $\frac{b}{t}$ （ b 是毛坯的宽度， t 是毛坯的厚度）和弯曲变形程度。相对宽度 $\frac{b}{t} > 3$ ，称宽板；相对宽度 $\frac{b}{t} < 3$ ，称窄板。窄板弯曲时毛坯断面内的切向应力如图5-2所示。切向应变在变形区内层为压应变，外层为拉应变。由于窄板的横向变形（宽度方向上的变形）不受约束，因此横向应力为零。又因变形区内的金属各层之间的相互挤压的作用，从而引起变形区内的径向压应力。弯曲时变形区内的切向应力为绝对值最大的主应力。所以内层为压缩类变形，外层为伸长类变形。切向变形（内层为压缩变形，外层为伸长变形）也是绝对值最大的主应变，因而在其他两个方向上的变形分别与切向变形符号相反，即内层在横向与径向为伸长变形，外层横向与径向为压缩变形。其结果引起弯曲毛坯断面的畸变，如图5-3 a。根据上边的分析，一般认为窄板弯曲时是平面应力状态，立体应变状态。宽板弯曲时，切向与径向的应力与应变的性质和窄板弯曲时相同。但是由于毛坯变形区在宽度方向上的变形受到毛坯断面形状的阻碍，于是产生了外层为拉，内层为压的横向应力。因此，宽板弯曲时是立体应力状态和平面应变状态。

$$\varepsilon_{\theta \max} = \frac{1}{2 \frac{r}{t} + 1} \quad (5-3)$$

式中 r ——弯曲毛坯内表面的圆角半径；
 t ——毛坯的厚度。

由上式可知，弯曲毛坯外表面上的变形程度和相对弯曲半径 $\frac{r}{t}$ 大致成反比关系。因此，在生产中常用相对弯曲半径来表示弯曲变形的大小。

由于弯曲变形程度大小不同（相对弯曲半径 $\frac{r}{t}$ 不同），毛坯变形区内的应力状态和应力的分布都有性质上的差别。因此，在分析和解决弯曲变形中的各种实际问题时，必须根据变形程度的大小而分别处理。当相对弯曲半径 $\frac{r}{t} < 200$ 时，毛坯变形区内弹性变形部分金属的厚度比较小，在实用计算时可以近似地认为是纯塑性弯曲，毛坯断面内切向应力的分布如图 5-2 c 所示。当相对弯曲半径较大 $\left(\frac{r}{t} > 200\right)$ 时，变形区内弹性变形部分的厚度较大，切向应力的分布如图 5-2 b 所示。这时弹性变形部分的影响已经不能忽视，应按弹-塑性弯曲进行计算。

5-2 弯曲时的应力分析与弯矩的计算

虽然实际上弯曲时毛坯不是单向应力状态，但从简化计算出发，可以把弯曲变形近似地看成是只有切向应力作用的线性应力状态。以下按弯曲变形程度大小不同，分别研究线性纯塑性弯曲和线性弹-塑性弯曲时切向应力的分布、弯矩的计算等问题。

为了便于计算引入以下几个假设：

1. 弯曲过程中毛坯变形区内任意位置上的横截面始终保持为平面；
2. 弯曲过程中毛坯变形区内的横断面形状和尺寸不发生变化；
3. 变形区内受拉部分和受压部分金属的硬化规律相同，即应力与应变的关系相同。

一、线性弹-塑性弯曲 $\left(\frac{r}{t} > 200\right)$

弯曲毛坯变形区内切向应变在厚度方向上的分布，可用式 (5-1) 表示，即

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{y}{\rho}$$

在弯曲过程中的任意一个时刻，可以认为中性层的曲率半径 ρ 是一个常量。所以，由上式可知，变形区内各点的切向应变和该点到中性层的距离成正比例。因此，弯曲时塑性变形区内切向应力与应变之间的函数关系

$$f_1(\varepsilon_{\theta}) = f_1\left(\frac{y}{\rho}\right)$$

和切向应力与距离 y 之间的函数关系

$$\sigma_{\theta} = f_2(y)$$

的性质完全相同。由此可以得出结论：弯曲毛坯变形区内切向应力在厚度方向上的分布规律

(图 5-2 b) 和硬化曲线完全相同, 也就是说, 毛坯断面上切向应力的分布曲线是用另一个比例尺寸表示的硬化曲线 (图 5-5)。

线性弹-塑性弯曲时, 变形区内弹性变形部分和塑性变形部分的应力分布规律不同, 所以在弯矩计算时应分别处理。为简化计算, 采用硬化直线来表示塑性变形部分的应力与应变的关系, 毛坯断面内的切向应力的分布如图 5-5 所示的折线。

弹性变形范围内 (OA 部分) 切向应力值为

$$\sigma_{\theta} = \varepsilon_{\theta} E \quad (5-4)$$

塑性变形范围内 (AB 部分) 切向应力值为

$$\sigma_{\theta} = \sigma_s + F(\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_s) \quad (5-5)$$

式中 E ——弹性模数;

σ_s ——屈服极限;

F ——硬化模数;

ε_s ——与屈服极限相对应的切向应变。

切向应力形成的力矩为

$$M = 2 \int_0^{\frac{t}{2}} \sigma_{\theta} y dA \quad (5-6)$$

式中 dA 是微元面积, 其值为

$$dA = b dy$$

因为 $\varepsilon_{\theta} = \frac{y}{\rho}$, $y = \rho \varepsilon_{\theta}$ 及 $dy = \rho d\varepsilon_{\theta}$, 所以

$$dA = b \rho d\varepsilon_{\theta}$$

将 y 及 dA 之值代入式 (5-6) 得

$$M = 2b\rho^2 \int_0^{\frac{t}{2}} \sigma_{\theta} \varepsilon_{\theta} d\varepsilon_{\theta}$$

利用式 (5-4) 及式 (5-5), 把切向应力之值代入上式可得

$$M = 2b\rho^2 \left\{ \int_0^{\varepsilon_s} E \varepsilon_{\theta}^2 d\varepsilon_{\theta} + \int_{\varepsilon_s}^{\varepsilon_0} \sigma_s \varepsilon_{\theta} d\varepsilon_{\theta} + \int_{\varepsilon_s}^{\varepsilon_0} F(\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_s) \varepsilon_{\theta} d\varepsilon_{\theta} \right\} \quad (5-7)$$

式中 b ——毛坯的宽度;

ρ ——中性层的曲率半径;

ε_s ——弹性变形区与塑性变形区分界点上的切向应变;

ε_0 ——毛坯内表面和外表面的切向应变。

分析式 (5-7) 可知, 线性弹-塑性弯曲时的弯矩由三部分组成: 第一项表示弹性变形部分切向应力形成的弯矩; 第二项表示不计硬化时塑性变形部分切向应力形成的弯矩; 第三项表示硬化现象使塑性变形部分弯矩增大的数值。

积分式 (5-7) 可得

$$M = b\rho^2 \left\{ (E - F) \varepsilon_s \left(\varepsilon_0^2 - \frac{\varepsilon_s^2}{3} \right) + \frac{2}{3} F \varepsilon_0^3 \right\} \quad (5-8)$$

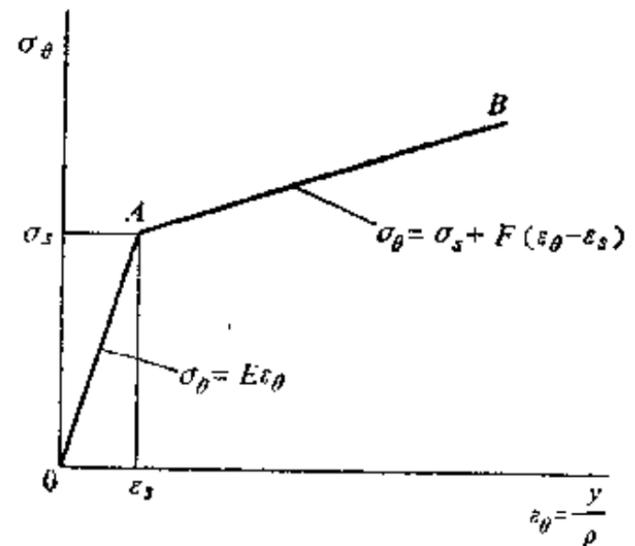


图5-5 应力-应变关系曲线

毛坯内表面和外表面的切向应变 ε_0 之值, 决定于弯曲的曲率半径 ρ , 可以利用式 (5-1) 以 $\nu = \frac{t}{2}$ 代入后求得

$$\varepsilon_0 = \frac{t}{2\rho}$$

与屈服极限对应的切向应变 ε_s 之值, 可用下式表示

$$\varepsilon_s = \frac{t}{2\rho_s}$$

式中 ρ_s 是弯曲过程中毛坯的内表面和外表面开始屈服时中性层的曲率半径。因为

$$\sigma_s = \varepsilon_s E = \frac{tE}{2\rho_s}$$

所以有

$$\rho_s = \frac{tE}{2\sigma_s} \quad (5-9)$$

将 ε_0 及 ε_s 之值代入式 (5-8) 并整理后可得

$$M = \left[\frac{3}{2} - \frac{3F}{2E} - \frac{2\rho^2\sigma_s^2}{E^2t^2} + \frac{2\rho^2F\sigma_s^2}{E^3t^2} + \frac{tF}{2\rho\sigma_s} \right] W\sigma_s = mW\sigma_s \quad (5-10)$$

式中 $W = \frac{bt^2}{6}$ 是弯曲毛坯的断面系数;

m 是相对弯矩, 它表示塑性弯矩和弹性弯矩的比值, 在弹-塑性弯曲时, 其值为

$$m = \frac{3}{2} - \frac{3F}{2E} - \frac{2\rho^2\sigma_s^2}{E^2t^2} + \frac{2\rho^2F\sigma_s^2}{E^3t^2} + \frac{tF}{2\rho\sigma_s}$$

二、线性纯塑性弯曲

线性纯塑性弯曲时, 毛坯断面内切向应力的分布如图 5-2 c 所示。

随着弯曲过程的进展, 毛坯的相对弯曲半径 $\frac{r}{t}$ 逐渐减小, 靠近中性层的弹性变形部分的高度也跟着减小。当相对弯曲半径 $\frac{r}{t} < 200$ 时, 弹性变形部分切向应力形成的力矩在全部弯矩中所占的比例已经很小, 以致可以忽略不计, 并把毛坯的断面都看作已经进入塑性状态。这种弯曲过程叫作纯塑性弯曲。由于这种情况下毛坯的变形程度较大, 材料硬化引起的弯矩增大值在全部弯矩中所占的比例也相应地增大。

线性纯塑性弯曲时的弯矩, 仍可利用式 (5-7) 进行计算, 但其中第一项的数值为零, 而且第二项与第三项积分式的下限也应为零, 即 $\varepsilon_s = 0$, 于是式 (5-7) 变成为如下的形式

$$M = 2b\rho^2 \int_0^{\varepsilon_0} (\sigma_s + F\varepsilon_0) \varepsilon_0 d\varepsilon_0 = \frac{\sigma_s bt^2}{4} + \frac{Fbt^3}{12\rho} = \left[\frac{S}{W} + \frac{tF}{2\rho\sigma_s} \right] W\sigma_s = mW\sigma_s \quad (5-11)$$

式中 S —— 弯曲毛坯的断面静矩, 矩形断面或板料时 $S = \frac{bt^2}{4}$;

W —— 弯曲毛坯的断面系数, 矩形断面或板料时 $W = \frac{bt^2}{6}$;

m —— 相对弯矩, 其值为

$$m = \frac{S}{W} + \frac{tF}{2\rho\sigma_s} = k_1 + k_0 \frac{t}{2\rho}$$

上式中 $k_1 = \frac{S}{W}$ 是反映弯曲毛坯断面形状特点的系数，而 $k_0 = \frac{F}{\sigma_s}$ 是反映弯曲毛坯材料性能特点的系数。

相对弯矩 m 、系数 k_1 与 k_0 的数值可由表 5-1、5-2 及 5-3 查到。

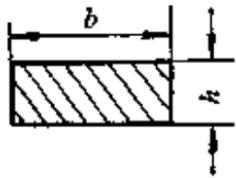
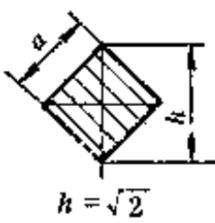
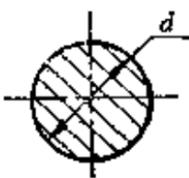
表5-1 系数 m 值 (矩形断面或板料)

材 料	r/t				
	100	50	25	10	5
10~15号钢 1~2号钢	~1.6	~1.75	1.7	2	2.45
20~25号钢 3~4号钢	~1.6	~1.75	1.75	2.1	2.6
30~35号钢 5号钢	~1.6	~1.75	1.8	2.2	2.8
40~45号钢 6号钢 15Cr, 20Cr	~1.6	~1.8	1.85	2.35	3.5

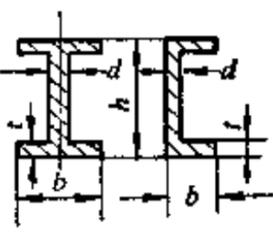
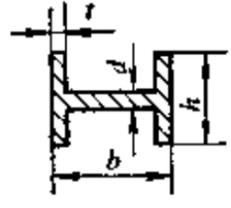
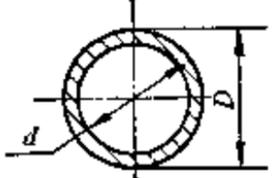
表5-2 系数 k_0 之值

材 料	σ_s (牛/毫米 ²)	k_0
10~15号钢, 1~2号钢	210	10
20~25号钢, 3~4号钢	260	11.6
30~35号钢, 5号钢	300	14
40~45号钢, 15Cr, 20Cr	340	17.6
50~60号钢, 20CrNi, 30Cr	420	17.6
40Cr, 50Cr, 5CrNi	570	17.6

表5-3 系数 k_1 之值

弯曲断面种类和弯曲方式	断 面 形 式	计 算 公 式	k_1 的 数 值
矩形断面			$k_1 = 1.5$
正方形断面沿对角线弯曲			$k_1 = 2.0$
圆形断面			$k_1 = 1.7$

(续)

弯曲断面种类和弯曲方式	断面形式	计算公式	k_1 的数值
工字形和槽形断面立弯		$k_1 = \frac{1.5h[bh^2 - (b-d)(h-2t)^2]}{bh^2 - (b-d)(h-2t)^2}$	标准断面时 $k_1 = 1.2$
工字形断面平弯		$k_1 = 1.5h \frac{2th^2 + (b-2t)d^2}{2th^2 + (b-2t)d^2}$	标准断面时 $k_1 = 1.8$
管材		$k_1 = 1.7 \frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^3}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}$	当 $\frac{d}{D} = 0.4 \sim 0.59$ $k_1 = 1.6$ 当 $\frac{d}{D} = 0.6 \sim 0.74$ $k_1 = 1.5$ 当 $\frac{d}{D} = 0.75 \sim 0.89$ $k_1 = 1.4$ 当 $\frac{d}{D} = 0.9 \sim 1.0$ $k_1 = 1.3$

三、无硬化线性纯塑性弯曲

无硬化线性纯塑性弯曲相当于相对弯曲半径 $\frac{r}{t}$ 较小时的热弯曲。这时没有硬化现象，所以毛坯断面内切向应力是个不变的定值，如图 5-2d 所示。这种情况下的弯矩仍可利用式 (5-11) 计算，但应令 $F = 0$ ，于是得

$$M = \frac{bt^2}{4} \sigma_s = s\sigma_s \quad (5-12)$$

5-3 弯曲时的弹复

塑性弯曲和任何一种塑性变形一样，在外载荷作用下毛坯产生的变形由塑性变形和弹性变形两部分组成。当外载荷去除后，毛坯的塑性变形保留下来，而弹性变形会完全消失，使其形状和尺寸都发生与加载时变形方向相反的变化，这种现象称为弹复（又称回弹）。在加载过程中弯曲变形区的内层和外层的应力与应变的性质相反。卸载时这两部分弹复变形的方向也是相反的，所以它们引起弯曲件的形状和尺寸的变化十分显著，使弯曲件的几何精度受到损害，时常成为弯曲件生产中不易解决的一个特殊性的问题。

弹复现象产生在卸载过程，所以为了研究和掌握弹复的各种规律必须首先分析弯曲毛坯

变形区在卸载过程中应力的变化规律。弯曲毛坯在塑性弯矩 M 的作用下,即在弯曲冲模的作用下,毛坯断面上的切向应力分布如图5-6 a所示。假设在塑性弯矩的相反方向上加上一个假想的弹性弯矩 M' ,其大小与塑性弯矩相等,即 $|M|=|M'|$ 。这时毛坯所受的外力矩之和为 $M-M'=0$,这相当于卸载后毛坯不承受任何外力的自由状态,也就是弯曲后毛坯从冲模中取出后的状态。假想的弹性弯矩在断面内引起的切向应力的分布如图5-6 b所示。塑性弯矩和假想弹性弯矩在断面内的合成应力,便是卸载后弯曲件处在自由状态下断面内的残余应力。它在断面内由内层到外层是按拉、压、拉、压的顺序变化的(图5-6 c)。同理还可得出弹-塑性弯曲卸载时毛坯断面内切向应力的变化(图5-7)。

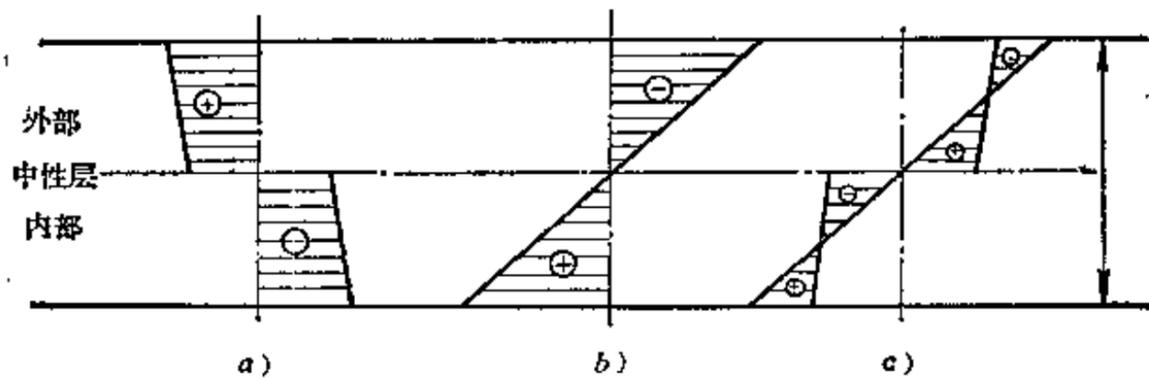


图5-6 纯塑性弯曲卸载过程中毛坯断面内切向应力的变化

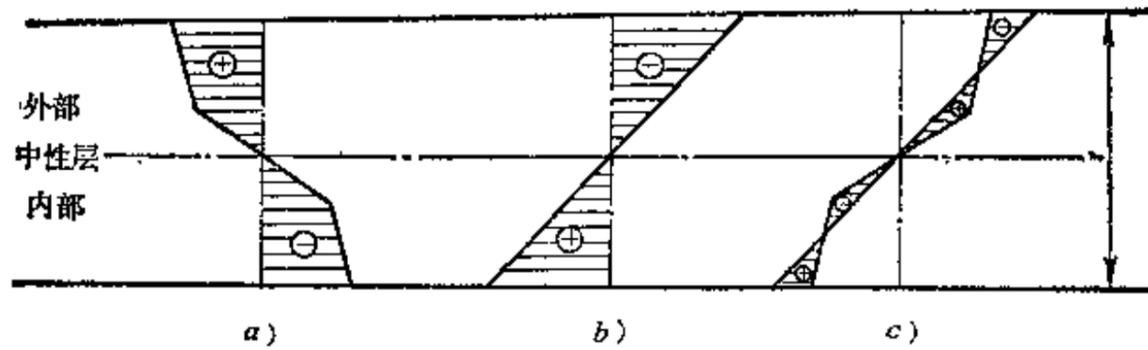


图5-7 弹-塑性弯曲卸载过程中毛坯断面内切向应力的变化

弯曲后卸载过程中的弹复现象,表现为弯曲件的曲率及角度的变化。如图5-8所示,用 ρ 、 α 、 r 分别表示弹复前中性层的曲率半径、弯曲角和弯曲毛坯内表面的圆角半径;用 ρ' 、 α' 、 r' 分别表示弹复后中性层的曲率半径、弯曲角和弯曲毛坯内表面的圆角半径。

在弯曲加载和卸载过程中,毛坯变形区外表面金属所受的应力和产生的变形按图5-9所示的曲线变化。折线 OAB 表示加载过程,线段 BC 表示卸载过程。在卸载过程结束时,毛坯外表面金属因弹复产生的弹性应变 $\epsilon_{s,p}$ 值,可由图5-9中曲线的卸载部分所表示的应变之间的关系得到,其值为

$$\epsilon_{s,p} = \epsilon_{s,e} - \epsilon_{r,e} \quad (5-13)$$

式中 $\epsilon_{s,e} = \frac{t}{2\rho}$ 是卸载前的总应变值;

$\epsilon_{s,p} = \frac{Mt}{2EI}$ 是卸载过程中产生的弹性应变值;

$\epsilon_{r,e} = \frac{t}{2\rho'}$ 是卸载后的残余应变值。

将 $\epsilon_{s,p}$ 、 $\epsilon_{s,e}$ 及 $\epsilon_{r,e}$ 之值代入式(5-13),经整理后可得

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'} = \frac{M}{EI} \quad (5-14)$$

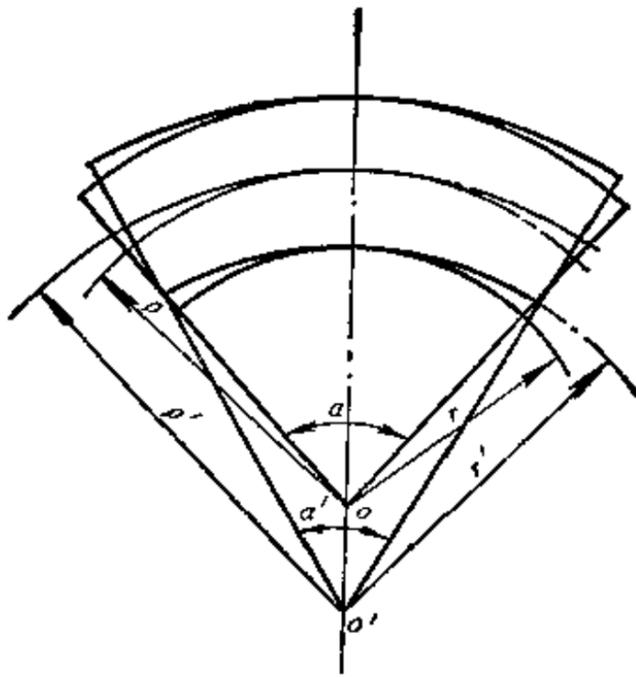


图5-8 弯曲变形的弹复

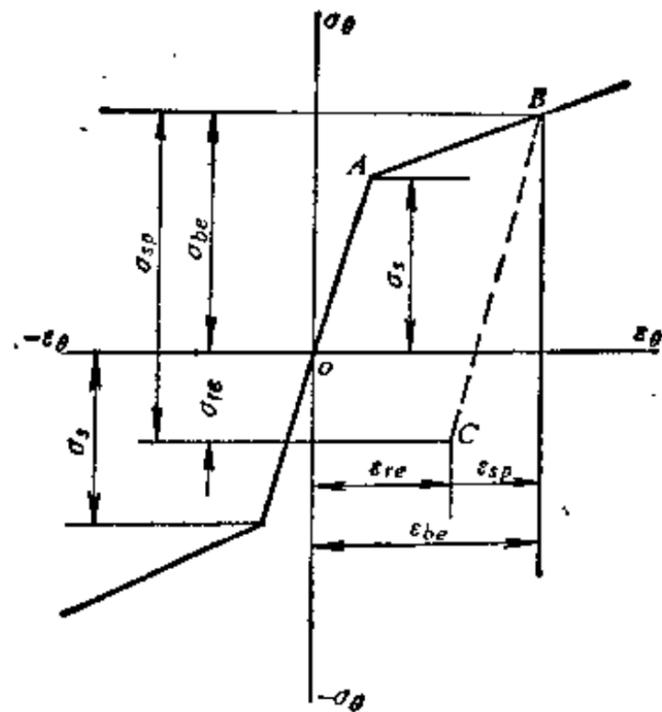


图5-9 弹复时的应力与应变

上式为卸载前后弯曲件中性层曲率半径之间的关系。由式 (5-14) 可得如下的实用形式

$$\rho' = \frac{\rho EI}{EI - M\rho} \quad (5-15)$$

及

$$\rho = \frac{\rho' EI}{EI + M\rho'} \quad (5-16)$$

式中 E ——弹性模数；

I ——弯曲毛坯断面惯性矩；

M ——卸载弯矩，其值等于加载时的弯矩。

用 $I = \frac{bt^3}{12}$ 、 $M = W\sigma_{sp} = \sigma_{sp} \frac{bt^2}{6}$ 及 $\rho = r + \frac{t}{2}$ 、 $\rho' = r' + \frac{t}{2}$ 代入式 (5-15) 及式 (5-16)，

经整理后可得卸载前后弯曲件内表面的圆角半径之间的关系为

$$r = \frac{2r't(E - \sigma_{sp}) - t^2\sigma_{sp}}{2Et + 2\sigma_{sp}(2r' + t)} \quad (5-17)$$

$$r' = \frac{2rt(E + \sigma_{sp}) + t^2\sigma_{sp}}{2Et - 2\sigma_{sp}(2r + t)} \quad (5-18)$$

式中 σ_{sp} 是卸载弯矩引起的卸载应力，它表示卸载过程中弯曲毛坯外层金属纤维所受切向应力的变化量 (图 5-9)。其值由 $M = W\sigma_{sp}$ 与式 (5-11) 比较可得下面的计算式

$$\sigma_{sp} = m\sigma_s \quad (5-19)$$

式中 m 是相对弯矩，根据弯曲变形程度可查表 (5-1)。

当弯曲半径较大，材料的相对厚度较小时，为简化计算可使 (5-15) 及 (5-16) 式中 $\rho = r$ 、 $\rho' = r'$ ，并将 $I = \frac{bt^3}{12}$ 、 $M = \frac{bt^2}{6}\sigma_{sp}$ 代入式 (5-15) 及式 (5-16)，经整理后可以得下列比较简单的公式

$$r' = \frac{Etr}{Et - 2\sigma_{sp}r} \quad (5-20)$$

$$r = \frac{Etr'}{Et + 2\sigma_{sp}r'} \quad (5-21)$$

利用上述公式可计算纯弯曲时曲率弹复的数值。并且根据弹复值的计算结果对模具工作部分的曲率半径做相应的修正。

如果在弯曲零件变形区的两端还有两个直边部分存在，为保证两个直边部分所构成的角度符合精度要求，除曲率弹复值外，还要进行角度弹复值的计算。

用 $\Delta\alpha$ 表示卸载过程中毛坯两直边之间夹角的变化（图 5-8），即弹复角

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha' \quad (5-22)$$

根据卸载前后弯曲毛坯中性层的长度不变的条件

$$\rho\alpha = \rho'\alpha'$$

可以把式 (5-22) 改写成如下形式

$$\Delta\alpha = \rho\alpha\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'}\right)$$

将式 (5-13) 中 $\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'} = \frac{M}{EI}$ 之值代入上式得

$$\Delta\alpha = \frac{M\rho}{EI} \alpha = \frac{M\rho'}{EI} \alpha' \quad (5-23)$$

将 $M = W\sigma_{sp} = \frac{bt^3}{6}\sigma_{sp}$ 、 $I = \frac{bt^3}{12}$ 、 $\rho' = r' + \frac{t}{2}$ 及 $\rho = r + \frac{t}{2}$ 之值代入式 (5-23)，经整理后可得弹复角的计算式

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha\sigma_{sp}}{E} \left(2\frac{r}{t} + 1\right) = \frac{\alpha'\sigma_{sp}}{E} \left(2\frac{r'}{t} + 1\right) \quad (5-24)$$

因为 $\sigma_{sp} = \sigma_s + F\varepsilon_s$ ，所以下式是式 (5-24) 的另一个形式

$$\Delta\alpha = \left[\frac{\sigma_s}{E} \left(2\frac{r}{t} + 1\right) + \frac{F}{E}\right] \alpha = \left[\frac{\sigma_s}{E} \left(2\frac{r'}{t} + 1\right) + \frac{F}{E}\right] \alpha' \quad (5-25)$$

虽然可以利用式 (5-23)、(5-24) 及 (5-25) 计算弯曲毛坯变形区两端断面角度在卸载过程中的变化量（弹复角），但在一般用冲模压弯的实际条件下，由于毛坯的非变形区在模具的作用下也产生一定的变形和弹复，影响卸载后弯曲件直边部分的夹角，所以不能直接用上述公式计算的结果作为修正模具工作部分角度的根据。因此，在实际生产中解决弯曲零件的角度回弹问题时，应根据上述公式所反映出的规律，针对不同弯曲方式的具体情况，对弯曲毛坯的变形区和非变形区的影响进行综合的研究。为了进一步掌握弹复的规律，对弯曲零件弹复值的各种实际影响因素及其影响规律做如下的简要分析。

1. 材料的机械性能 材料的屈服极限 σ_s 越高，弹性模数 E 越小，加工硬化越激烈（ F 值和 n 值大），弯曲变形的弹复也越大。例如图 5-10 a 所示的两种材料的屈服极限基本相同，但弹性模数不同（ $E_1 > E_2$ ）。当弯曲件的相对弯曲半径 $\frac{r}{t}$ 相同时，其外表面的切向变形的数值相等，均为 ε 。由图 5-10 a 可见，在卸载时这两种材料的弹复变形却不一样，弹性模数较大的退火软钢的弹复变形小于软锰黄铜，即 $\varepsilon'_1 < \varepsilon'_2$ 。又如图 5-10 b 所示的两种材料，其弹性模数基本相同，而屈服极限不同。在弯曲变形程度相同的条件下，卸载时的弹复变形不同，经冷变形硬化而屈服极限较高的软钢的弹复变形大于屈服极限较低的退火软钢，即 $\varepsilon'_4 > \varepsilon'_3$ 。

2. 相对弯曲半径 $\frac{r}{t}$ 当相对弯曲半径 $\frac{r}{t}$ 减小时，弯曲毛坯外表面上的总切向变形程度增大，其中塑性变形和弹性变形成分也都同时增大，但在总变形中弹性变形所占的比例则相

应地变小。由图 5-11 可知, 当总的弯曲变形程度由 ε_1 增大到 ε_2 时, 塑性变形数值由 $\varepsilon_1 - \varepsilon'_1$ 增大到 $\varepsilon_2 - \varepsilon'_2$, 而弹性变形数值由 ε'_1 增大到 ε'_2 。由图中的几何关系可得:

$$\varepsilon'_1 E = \varepsilon_1 \operatorname{tg} Q_1$$

及

$$\varepsilon'_2 E = \varepsilon_2 \operatorname{tg} Q_2$$

由上列二式对比可得:

$$\frac{\varepsilon'_1 \operatorname{tg} Q_2}{\varepsilon'_2 \operatorname{tg} Q_1} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

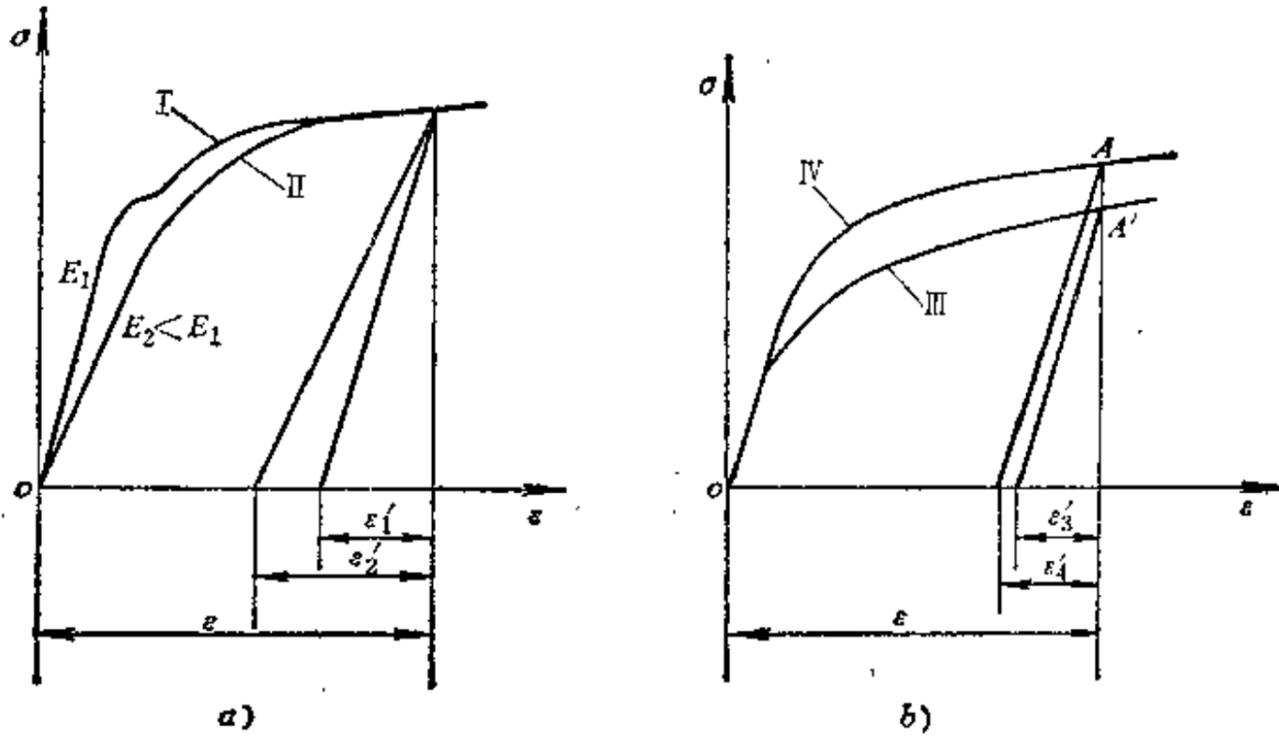


图5-10 材料的机械性能对弹复值的影响

I、II—退火软钢 II—软锰黄铜 IV—退火后再经冷变形硬化的软钢

因为 $\frac{\operatorname{tg} Q_2}{\operatorname{tg} Q_1} < 1$, 所以 $\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon_1} > \frac{\varepsilon'_2}{\varepsilon_2}$ 。由此可以得出如下的结论: 当弯曲变形程度增大时, 虽然弹性变形的数值也随着增大 ($\varepsilon'_2 > \varepsilon'_1$), 但是, 弹性变形在总的变形当中所占的比例却相反地减小, 所以弹复角和弯曲角的比值 $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ 和曲率弹复值和曲率半径的比值 $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ 都随弯曲半径的减小而变小。与此相反, 当相对弯曲半径较大时, 由于弹性变形在总变形中所占的比例增大, 比值 $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ 与 $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ 的数值也大, 这就是曲率半径很大的零件不易弯曲成形的道理。

3. 弯曲角 弯曲角 α 越大, 表示变形区的长度越大 (图 5-8), 弹复角也越大。但对曲率半径的弹复没有影响。

4. 毛坯非变形区的变形与弹复 一般情况下, 弯曲件都由变形区和非变形区组成。如 V 形件和 U 形件的圆角部分是变形区, 而直线部分是非变形区。在实际冲压条件下, 为使变形区产生弯曲变形以形成零件的形状, 在模具的作用下, 不可避免地也使非变形区产生一定的变形。卸载后, 非变形区也同样会产生与加载时变形方向相反的弹复变形, 造成弯曲件形状的变化。因此, 弯曲件的精度取决于变形区

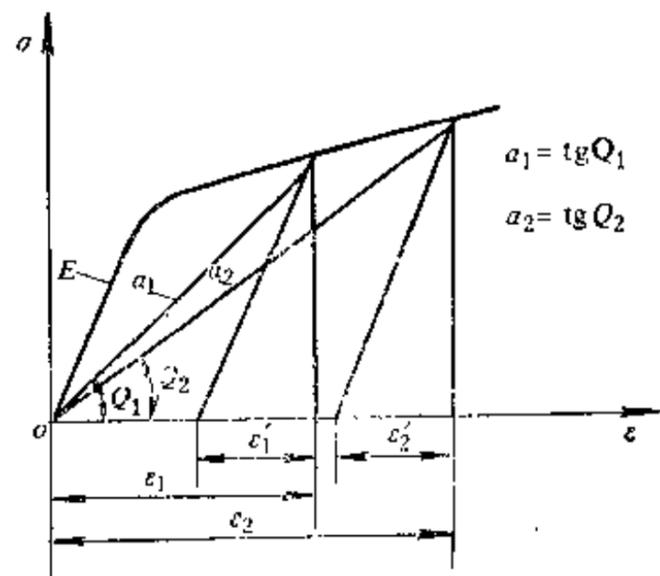


图5-11 相对弯曲半径对弹复值的影响

和非变形区两部分弹复变形的综合影响。对非变形区的变形和弹复起主要影响的是弯曲方式和模具的结构尺寸。要提高弯曲件的精度，除应研究变形区的弹复外，还必须分析非变形区的弹复及各种因素的影响。在下一节我们还要具体地分析这方面的问题。

5. 弯曲力 在实际冲压生产中，多采用带一定校正成分的弯曲方法，设备给出的力也在一定程度上超过弯曲变形所需的力。这时弯曲变形区的应力状态和应变的性质都和纯弯曲有一定的差别，而且设备施加的力越大，这个差别也越显著。当校正力很大时，可能完全改变毛坯变形区应力状态的性质，并使非变形区也转化成为变形区。由于弯曲方法的不同和模具工作部分的结构形状不同，校正力大小对弯曲件精度的影响规律也不一样，如单角弯曲和双角弯曲时校正力的影响规律完全不同，所以掌握这个规律是保证弯曲件精度的重要条件。

6. 摩擦 弯曲毛坯表面和模具表面之间的摩擦，也影响弯曲件的精度。摩擦可以改变弯曲毛坯各部分的应力状态，尤其在一次弯成多个部位的曲率时，摩擦的影响更加显著。一般可以认为，摩擦在大多数情况下可以增大弯曲变形区的拉应力，可使零件形状接近于模具的形状。但是，在拉弯时摩擦的影响常是不利的。

7. 材料性能的波动、板厚的偏差，都能造成弯曲件精度的波动，所以为保证弯曲件的精度，应对材料性能、板厚公差等提出严格的要求。

5-4 提高弯曲件精度的方法

如前所述，弯曲件的精度决定于变形区和非变形区的变形和弹复，而这两方面都和弯曲方式、弯曲模的结构、工作部分的形状与尺寸、弯曲件的形状特点等有直接的关系。因此，为了解决受多方面因素影响的弯曲件精度问题，必须分别研究各种不同弯曲方式的特点，找出解决问题的方法。以下对生产中最常见的单角弯曲和双角弯曲零件的精度问题进行具体的分析。

一、单角弯曲（V形弯曲）

从形式上看，V形弯曲件的外形十分简单，但在用图5-12 a所示的V形模压弯时，其变形过程却十分复杂。在弯曲过程中毛坯的受力点的位置在不断地变化。有时受力点的数目也

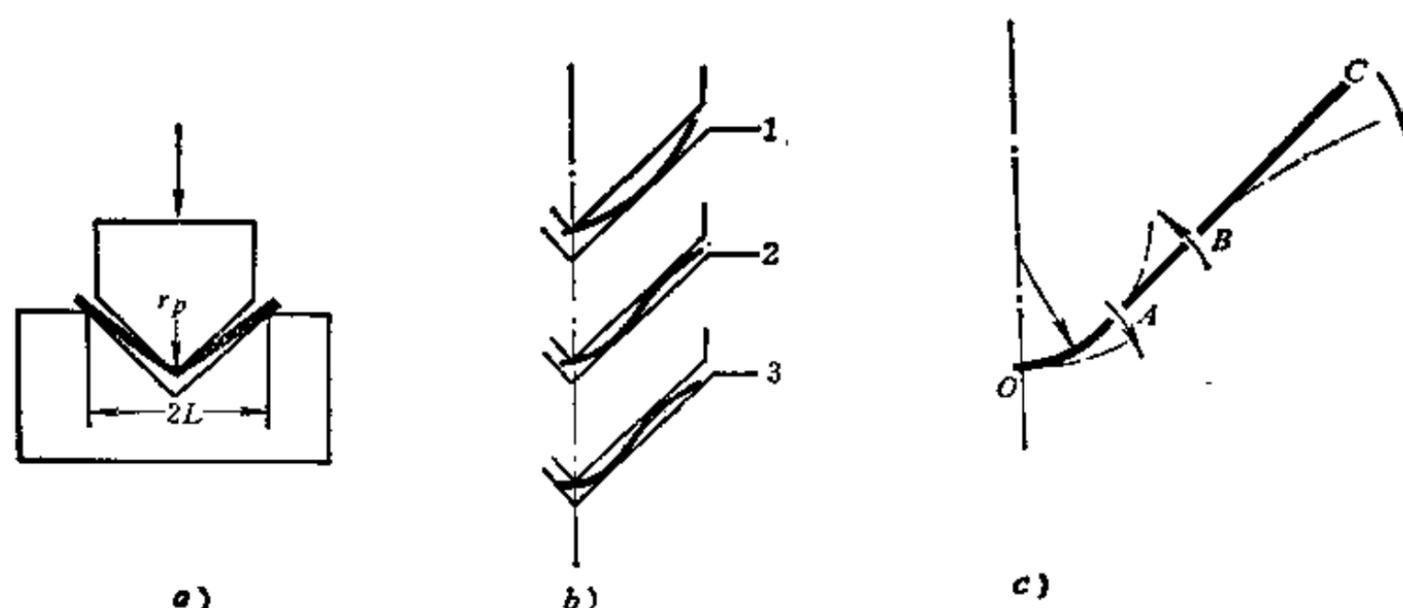


图5-12 V形弯曲过程及其弹复

发生变化，使毛坯的圆角部分和直边部分都参与变形，使变形过程和卸载过程变得十分复杂。用V形模压弯时的变形过程和毛坯受力点的变化决定于弯曲件的角度、凸模的圆角半径、凹模的开口宽度等因素。

用V形模弯曲过程如图5-12 b所示。支撑在凹模肩部的毛坯，随着凸模的下降，支点从凹模的肩部移向凹模的V形斜面。以后毛坯的端部翘离凹模，在与凸模斜面接触时被反向弯曲，随后再次与凹模斜面接触。如果这时把工件从模具中取出（卸载）时，工件的各部分分别产生与加载变形方向相反的弹复变形，如图5-12 c所示。靠近凸模端部的弯曲毛坯变形区OA的弹复方向是使零件的两臂向外张开。非变形区AB与BC两部分的弹复方向分别使两臂向内闭合和向外张开。工件最终的形状取决于这三部分弹复值的大小。如果OA和BC两部分弹复值的和大于AB部分的弹复值，所得工件的角度大于模具的角度；如果OA与BC两部分弹复值的和小于AB部分的弹复值，所得工件的角度小于模具的角度；如果上述两个方向相反的弹复变形相等，工件角度与模具角度相同。当 $\frac{r}{t}$ 比较大时，变形区OA的弹复值变大，因而往往使工件角度大于模具角度；反之，当 $\frac{r}{t}$ 比较小时，变形区OA的弹复值变小，往往使工件角度小于模具角度。

综上所述，V形弯曲时，除材料的机械性能、相对弯曲半径、弯曲角等对弹复的影响规律与纯弯曲时基本相似外，凹模肩部的开口宽度 $2L$ 、弯曲角以及凸模的圆角半径、弯曲力等又从另一方面对弯曲件的精度产生影响（图5-13、5-14、5-15）。图中的弹复角 $\Delta\alpha$ 为正值时， $\Delta\alpha$ 是工件角度大于模具角度值；弹复角 $\Delta\alpha$ 为负值时， $\Delta\alpha$ 是工件角度小于模具角度值。在生产中时常根据这个规律，利用选取适宜的凹模开口宽度 $2L$ 、凸模圆角半

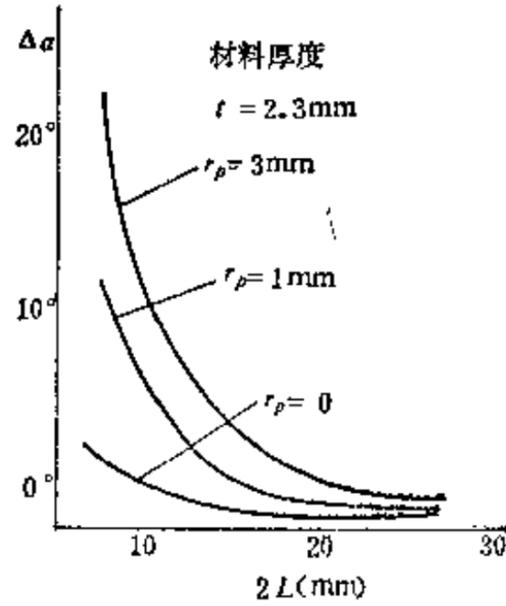


图5-13 凹模开口宽度对弹复的影响

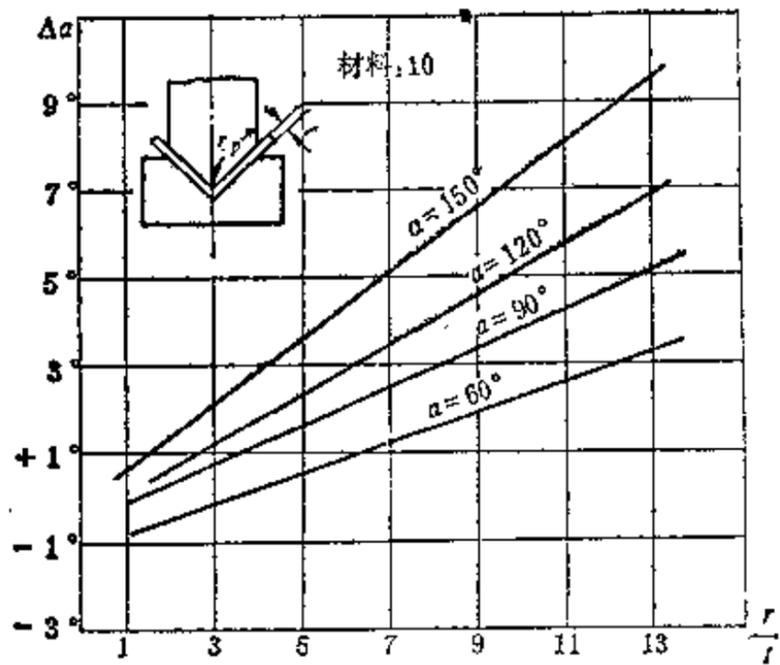


图5-14 相对弯曲半径和弯曲角 α 对弹复的影响

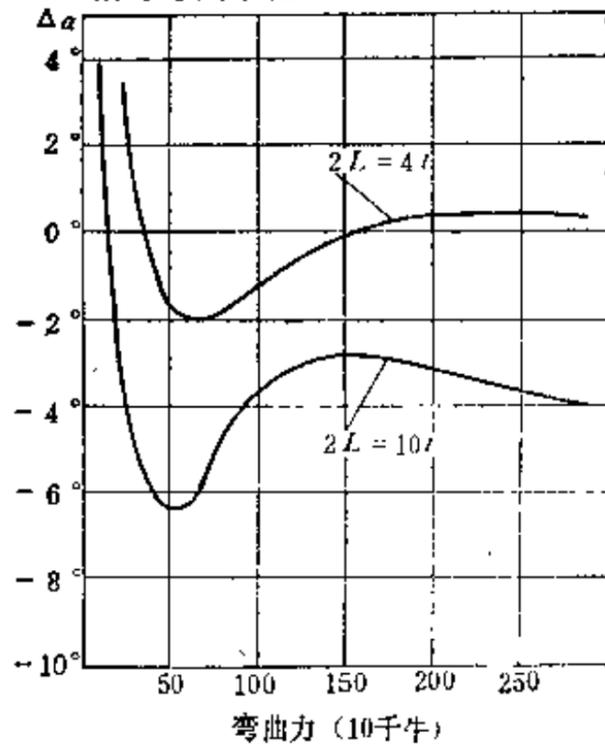


图5-15 弯曲力对弹复的影响
材料：不锈钢

径 r 及弯曲力的方法,来控制弯曲件两臂向内闭合和向外张开的弹复变形,使二者相互补偿以保证冲压件的精度。

二、U形件的双角弯曲

在U形件弯曲时,模具内是否设有顶板以及顶板背压(与凸模作用方向相反的压力)的大小都对弹复变形产生影响。不采用顶板时,毛坯的弯曲变形过程如图5-16所示。弯曲的初始阶段,在凸模的作用下毛坯的中间非变形区 OA 部分首先产生弯曲变形,使毛坯的两端翘起,并以凸模圆角为中心向中间翻转。当毛坯的两端进入凹模时,毛坯的 D 点与凸模的侧面接触,并被反向弯曲。在弯曲的最后阶段,毛坯的 OA 部分在凸模与凹模之间被反向压平,其实质是 OA 部分又被反向弯曲。

虽然双角弯曲时的变形区主要是在毛坯上受凸模圆角直接作用的两个圆角区,但是实际上在弯曲过程中非变形区 OA 、 BC 两部分也都不同程度地产生了弯曲变形。因此,卸载时无论变形区还是非变形区都各自产生与加载时变形方向相反的弹复变形。各部分的弹复情况如图5-16b所示。由图中变形的分析可知,毛坯变形区与非变形区的弹复方向恰好相反。显然这三部分弹复量的大小决定了弯曲件的最终形状:两臂向外张开,还是向内闭合,或者张开与闭合的弹复恰好相互补偿。

凹模底部设有顶板,而且顶板的背压又足够大时,在弯曲的初始阶段, OA 部分被顶板紧压在凸模的端面上,消除了弯曲初期的弯曲变形和弯曲后期的反向弯曲变形。因此,在卸载时 OA 部分不会再产生引起使零件两臂向里闭合的弹复,所得零件的角度因毛坯圆角部分的弹复而稍大于凸模的角度。适当地调整顶板的背压和凸模的下死点位置,控制 OA 部分的弯曲变形和反向弯曲变形,使卸载时 OA 部分的弹复引起零件两臂向里闭合的弹复角,恰好等于圆角部分的弹复引起的向外张开的弹复角,就可以得到与凸模角度完全吻合的零件。在生产中把这种方法称为背压法。背压数值与所得零件角度的关系,示于图5-17。当相对弯曲半径 $\frac{r}{t}$ 较小时,背压法比较有效,但是当相对弯曲半径较大时,因毛坯中间部分的弹复已

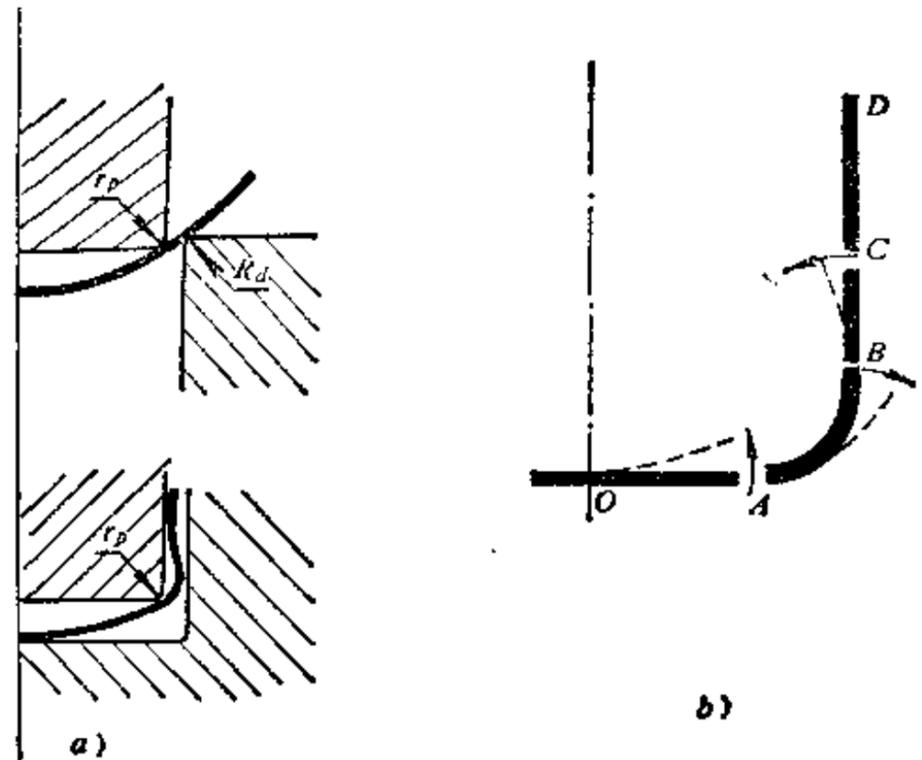


图5-16 U形弯曲过程及各部分的弹复

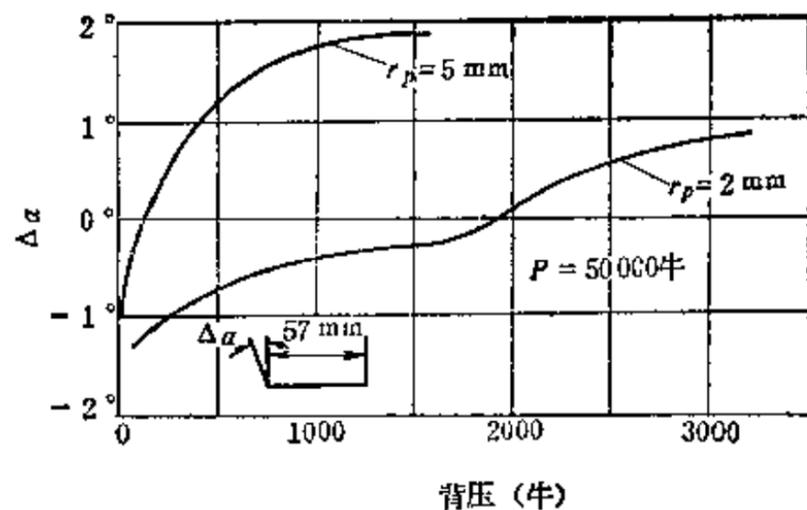


图5-17 背压对弹复值的影响

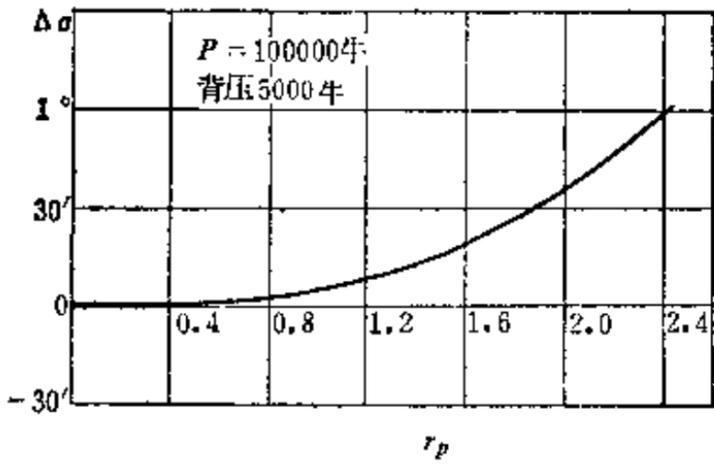


图5-18 凸模圆角半径对弹复的影响

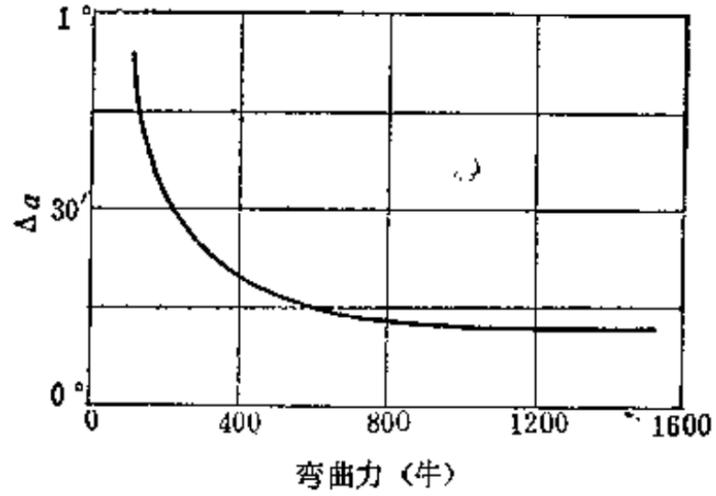


图5-19 弯曲力对弹复的影响

材料：冷轧钢板； $t = 2.2\text{mm}$ ； $r_p = 10\text{mm}$ ； $r_a = 5\text{mm}$

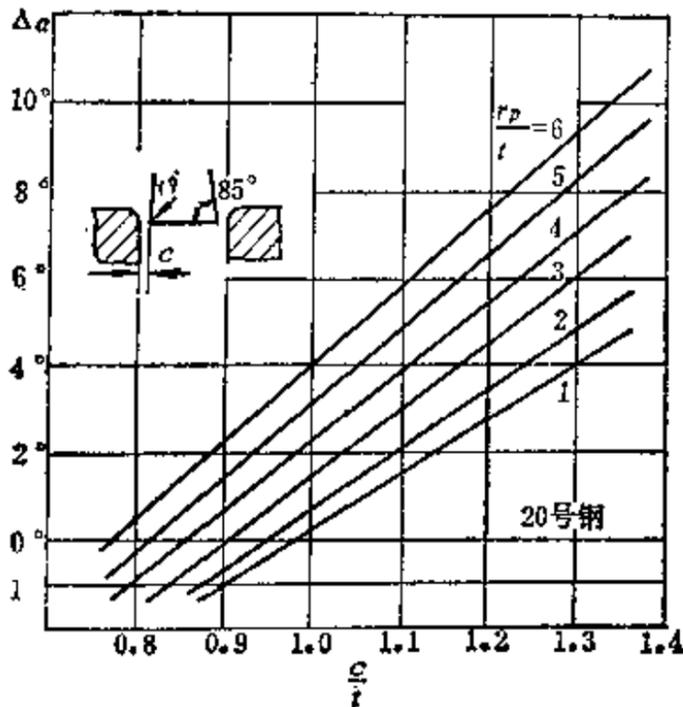


图5-20 间隙对弹复的影响

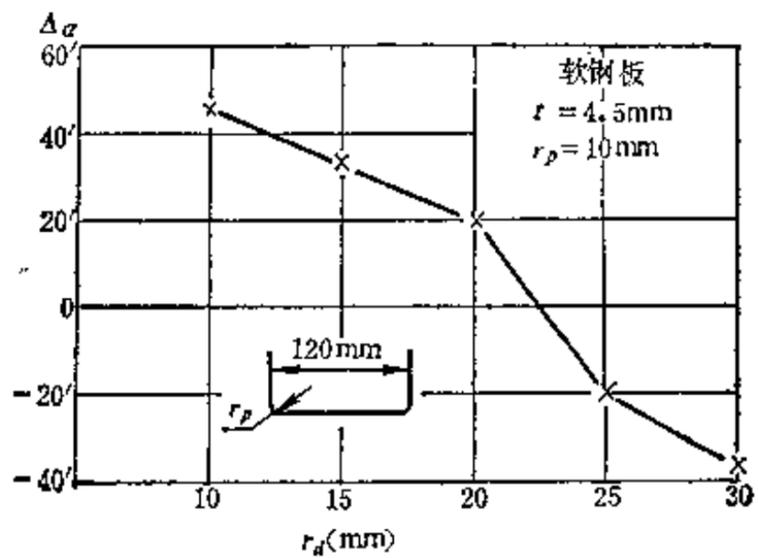


图5-21 凹模圆角半径对弹复的影响

不能补偿圆角部分的弹复值，背压法也失去作用。

双角弯曲时的弹复值，除背压外，还决定于弯曲力（校正力）、凸模与凹模的圆角半径以及凸模与凹模之间的间隙等因素。它们对弹复的影响分别示于图5-18、5-19、5-20及5-21。

根据毛坯变形区在卸载过程中的弹复规律和不同弯曲方式下毛坯各部分所产生的变形和

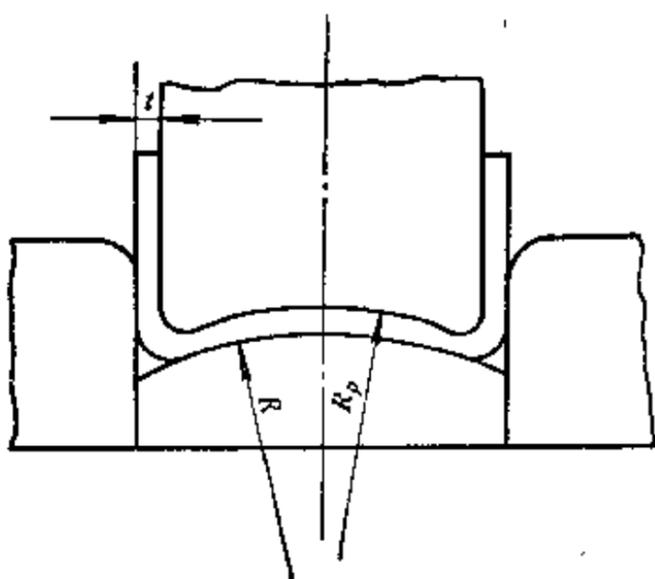


图5-22 弧形凸模的修正作用

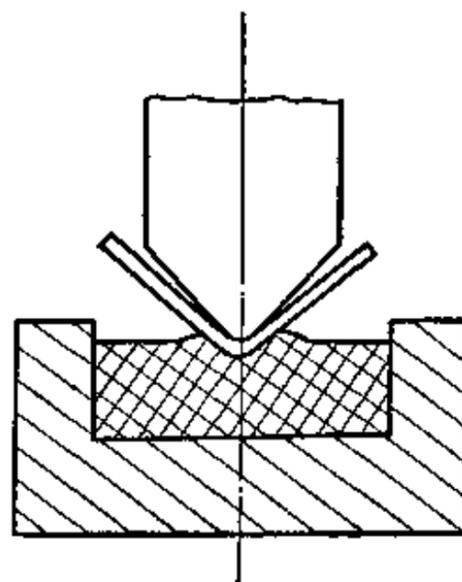


图5-23 弹性凹模的单角弯曲

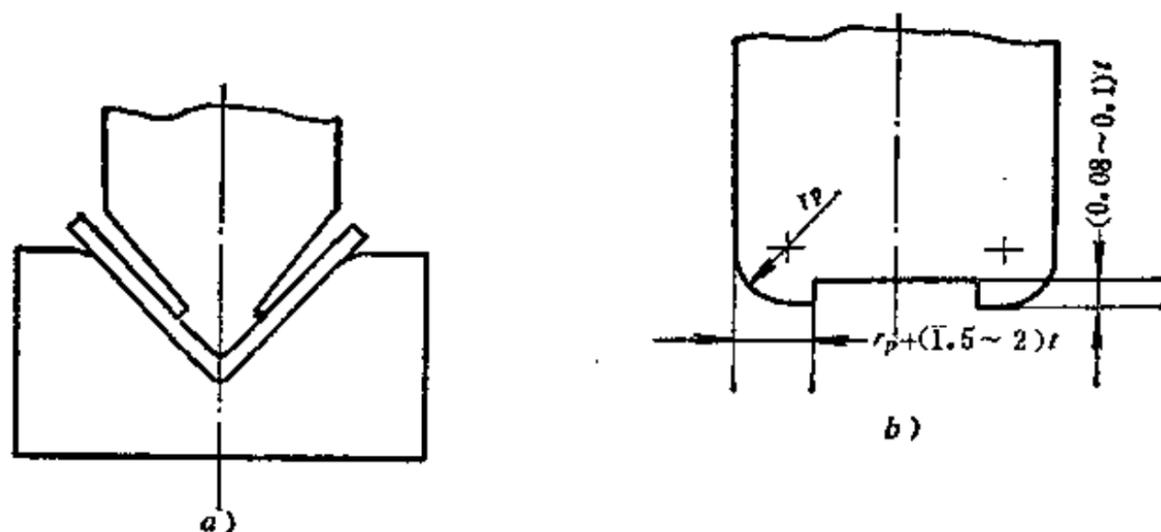


图5-24 改变应力状态的弯曲方法

弹复之间的相互关系，归纳起来，可以提出下面几项提高弯曲件精度的措施。

1. 利用弹复规律

1) 在接近纯弯曲（只受弯矩作用）的条件下，可以根据弹复值计算公式的计算结果，对弯曲模工作部分的形状作必要的修正。

2) 利用弯曲毛坯不同部位弹复变形方向相反的特点，适当地调整各种影响因素（模具的圆角半径、间隙、开口宽度、顶板的背压、校正力等），使相反方向的弹复变形相互补偿。图5-22是在这个基础上演变出的一种提高双角弯曲精度的方法。把凸模端面和顶板表面作成一定曲率的弧形，卸载时被弯曲的零件底部产生的弹复变形可以补偿两个圆角部分的弹复变形。

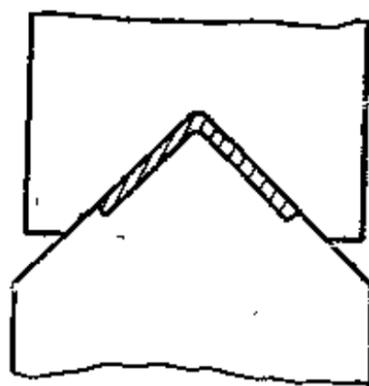


图5-25 加纵向压力的单角弯曲

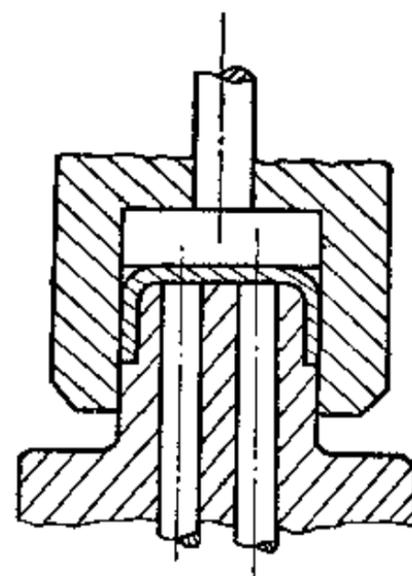


图5-26 加纵向压力的双角弯曲

3) 利用橡胶或聚胺脂软凹模代替金属的刚性凹模进行弯曲（图5-23），可以排除弯曲过程中毛坯不变形区的变形与弹复，并用调节凸模压入软凹模的深度的方法控制弯曲角度，使卸载弹复后所得零件的角度符合精度要求。

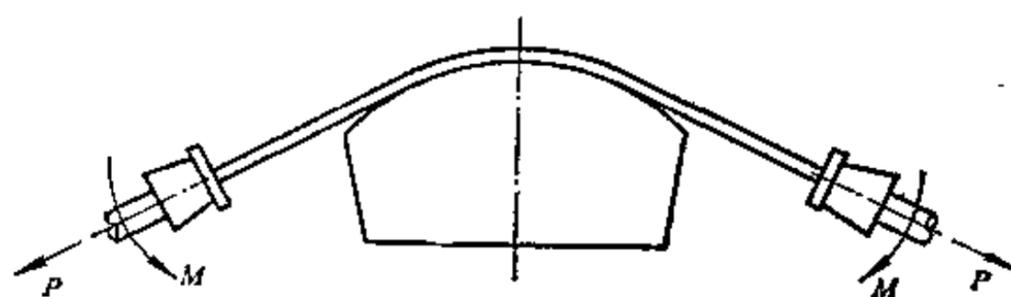


图5-27 拉弯

2. 改变应力状态

1) 把弯曲凸模做成局部

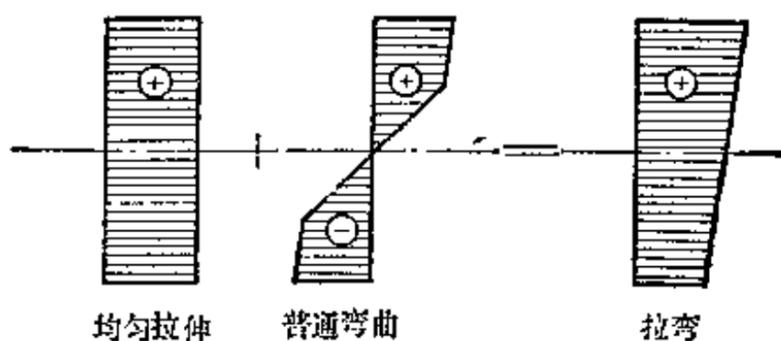


图5-28 拉弯时断面内切向应力的分布

突起的形状 (图 5-24), 使凸模力集中地作用在引起弹复变形的弯曲变形区。改变弯曲变形区外侧受拉和另内侧受压的应力状态, 变为三向受压的应力状态。从根本上改变了弹复变形的性质, 达到提高弯曲件精度的目的。

2) 用图 5-25 与图 5-26 所示的方法, 在弯曲过程已经完成之后, 用模具的突肩在弯曲毛坯的纵向加压, 使弯曲变形区内毛坯断面上的应力都成为压应力。在卸载时, 弹复的性质也发生变化, 毛坯的内层与外层都产生伸长变形, 所以弹复可大为降低。

3) 如图 5-27 所示的拉弯方法, 主要用于长度和曲率半径都比较大的零件。这类零件用普通的方法弯曲时, 由于其弹复变形大而很难成形。常用的拉弯方法是在弯曲之前先加一个轴向的拉力, 其数值使毛坯断面内的应力稍大于材料的屈服极限。然后在拉力作用的同时进行弯曲。有时为了提高精度, 最后再加大拉力进行所谓的补拉。拉弯时毛坯断面内的切向应力的分布如图 5-28 所示。因为从毛坯的内表面到外表面都处于拉应力的作用下, 所以在卸载时它们弹复变形的方向一致, 其结果使零件的形状只发生很小的变化。

5-5 最小弯曲半径

弯曲时毛坯变形区外表面的金属在切向拉应力的作用下, 产生的切向伸长变形 ε_s 决定于弯曲半径和材料的厚度, 并用下式表示

$$\varepsilon_s = \frac{t}{2\rho} = \frac{1}{2\frac{r}{t} + 1} \quad (5-26)$$

式中 r ——弯曲零件内表面的圆角半径;
 t ——板材的厚度。

由上式可知, 相对弯曲半径 $\frac{r}{t}$ 越小, 弯曲时的切向变形程度越大。当相对弯曲半径减小到一定程度之后, 可能使毛坯外层纤维的伸长变形超过材料性能所允许的界限而发生破坏。在保证毛坯外层纤维不发生破坏的条件下, 所能弯成零件内表面的最小圆角半径, 称最小弯曲半径 r_{\min} 。生产中用它来表示弯曲时的成形极限。

影响最小弯曲半径的因素:

1. 材料的机械性能 从式 (5-26) 的分析可知最小弯曲半径和弯曲毛坯变形区外表面的伸长变形有近似的反比关系, 所以材料的塑性越好, 塑性变形的稳定性越强 (即均匀延伸率越大), 可以采用的最小弯曲半径越小。在冲压生产中, 当因零件的结构需要弯曲成很小的圆角, 因而可能引起毛坯的破坏时, 常采用热处理的方法以恢复冷变形硬化材料的塑性或采用加热弯曲方法以提高低塑性材料 (如镁合金等) 的塑性变形能力。

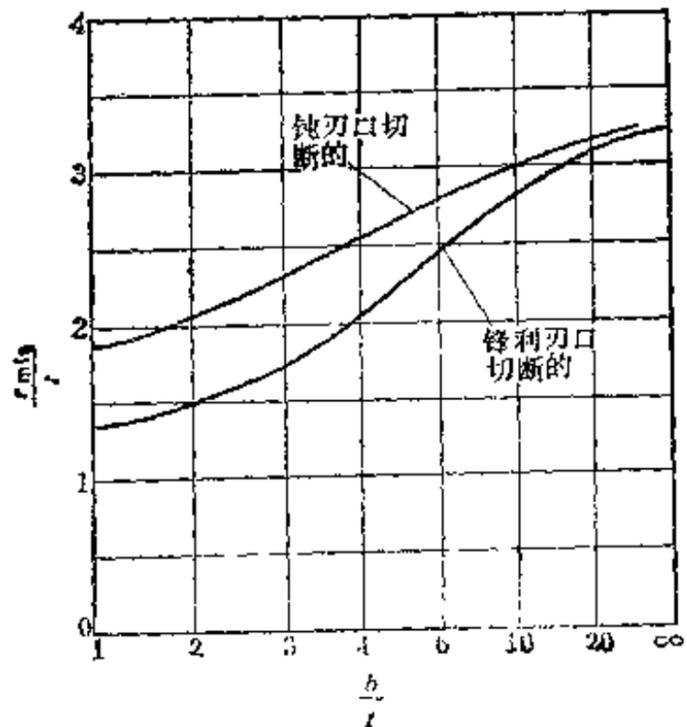


图5-29 坯料侧面质量和相对宽度对最小弯曲半径的影响

2. 板材的方向性 冷冲压所用的板材，多为冷轧板材。由于经过多次轧制，因而在板材平面内不同方向上的机械性能有较大的差别。板材纵向（轧制方向）上的塑性指标大于横向（垂直于轧制方向），所以当弯曲时切向变形的方向与板材的纵向相重合时（弯曲线与板材的纵向垂直时），可以得到较小的弯曲半径。当弯曲件有两个互相垂直的弯曲线，而且弯曲半径又比较小时，为避免弯曲线与轧制方向重合，应在排样时设法使两个弯曲线都处于与板材轧制方向成 45° 角的位置。

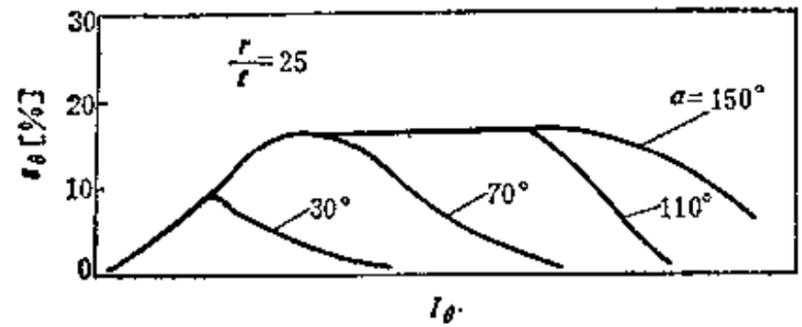


图5-30 弯曲角对切向变形分布的影响

3. 弯曲件的宽度 弯曲件的宽度与厚度的比值 $\frac{b}{t}$ 不同，变形区的应力状态也不一样，而且在相对弯曲半径相同的条件下，相对宽度 $\frac{b}{t}$ 大时，其应变强度也大于 $\frac{b}{t}$ 较小的情况。弯曲件宽度对最小弯曲半径的影响示于图5-29。当弯曲件的相对宽度 $\frac{b}{t}$ 较小时，它的影响比较明显，但当 $\frac{b}{t} > 10$ 时，其影响变小。

4. 板材的表面质量和剪切断面质量 板材的表面质量和毛坯的侧面（剪切断面）的质量差时，容易造成应力集中和降低塑性变形稳定性，使材料过早地破坏，所以在这种情况下应采用较大的弯曲半径（图5-29）。在冲压生产中，常采用清除冲裁毛刺、把有毛刺的表面朝向弯曲凸模、切掉剪切表面的硬化层等方法以提高弯曲变形的成形极限。

5. 弯曲角 弯曲角 α 较小时，由于不变形区也可能产生一定的切向伸长变形而使变形区的变形得到一定程度的减轻（图5-30），所以最小弯曲半径可以小些。弯曲角对最小弯曲半径的影响示于图5-31。当 $\alpha < 70^\circ$ 时，弯曲角的影响比较显著，当 $\alpha > 70^\circ$ 时，其影响减弱。

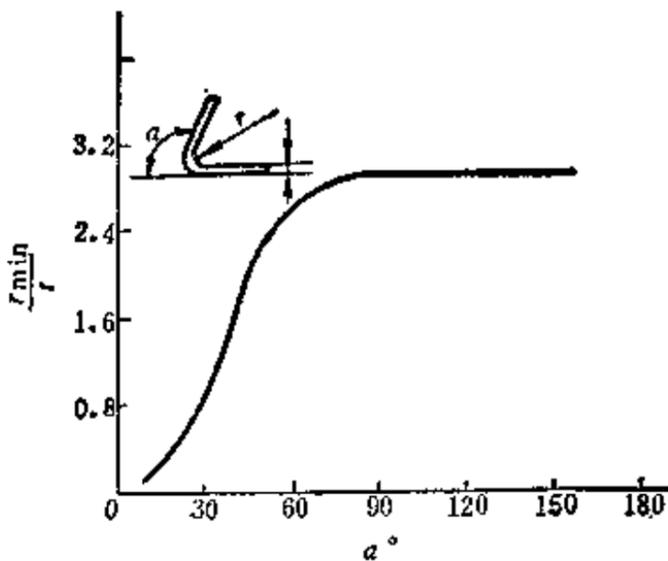


图5-31 弯曲角对最小弯曲半径的影响

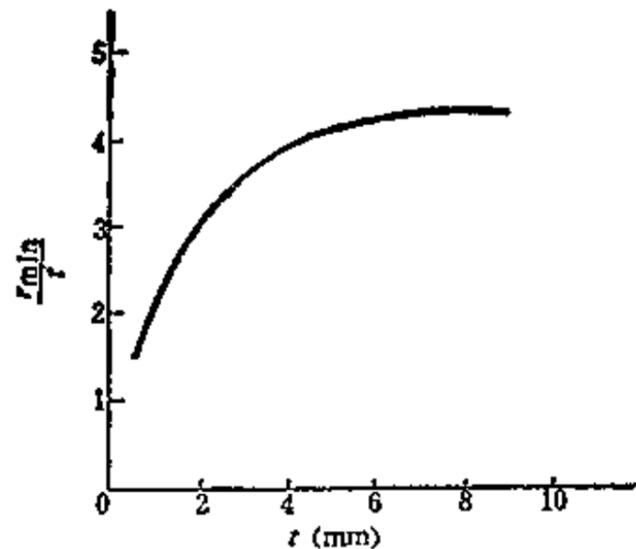


图5-32 材料厚度对最小弯曲半径的影响

6. 板材的厚度 变形区内切向应变在厚度方向上按线性规律变化，在外表面上最大，在中性层上为零。当板材的厚度较小时，切向应变变化的梯度大，很快地由最大值衰减为零。与切向变形最大的外表面相邻的金属，可以起到阻止外表面金属产生局部的不稳定塑性变形的作用。所以在这种情况下可能得到较大的变形和较小的最小弯曲半径。板料厚度对最小弯曲半径的影响示于图5-32。

虽然目前有许多研究结果和资料都给出了按板材延伸率计算最小弯曲半径的方法和公式。但是,由于上述各种因素的综合影响十分复杂,所以在生产中主要参考经验数据来确定。表 5-4 给出了各种金属材料在不同状态下的最小弯曲半径的数值。

表5-4 最小弯曲半径 r_{\min}/t

材 料	正 火 或 退 火 的		硬 化 的	
	弯 曲 线 方 向			
	与 轧 纹 垂 直	与 轧 纹 平 行	与 轧 纹 垂 直	与 轧 纹 平 行
铝			0.3	0.8
退火紫铜			1.0	2.0
黄铜H68	0	0.3	0.4	0.8
05, 08F			0.2	0.5
08~10, A1, A2	0	0.4	0.4	0.8
15~20, A3	0.1	0.5	0.5	1.0
25~30, A4	0.2	0.6	0.6	1.2
35~40, A5	0.3	0.8	0.8	1.5
45~50, A6	0.5	1.0	1.0	1.7
55~60, A7	0.7	1.3	1.3	2.0
硬铝(软)	1.0	1.5	1.5	2.5
硬铝(硬)	2.0	3.0	3.0	4.0
镁合金	300°C热弯		冷弯	
MA1-M	2.0	3.0	6.0	8.0
MA8-M	1.5	2.0	5.0	6.0
钛合金	300~400°C热弯		冷弯	
BT1	1.5	2.0	3.0	4.0
BT5	3.0	4.0	5.0	6.0
铝合金	400~500°C热弯		冷弯	
BM1, BM2 ($t \leq 2$ 毫米)	2.0	3.0	4.0	5.0

注:本表用于板厚小于10毫米,弯曲角大于90°,剪切断面良好的情况。

5-6 弯曲毛坯长度的确定

可以根据应变中性层在弯曲前后长度不变的特点,确定毛坯的长度。

中性层的曲率半径和弯曲变形程度有关。当变形程度较小时($\frac{r}{t}$ 较大),应变中性层与弯曲毛坯断面中心的轨迹相重合,即 $P_c = r + \frac{t}{2}$ 。变形程度比较大($\frac{r}{t}$ 较小)时,变形区内应力一应变状态变为立体的。这时应变中性层不通过毛坯断面的中心,并向内侧移动。另外,也

由于弯曲时板厚的变薄, 致使应变中性层的曲率半径小于 $r + 0.5t$ 。在这种情况下, 应变中性层的位置, 可以根据体积不变条件确定 (图 5-33)。

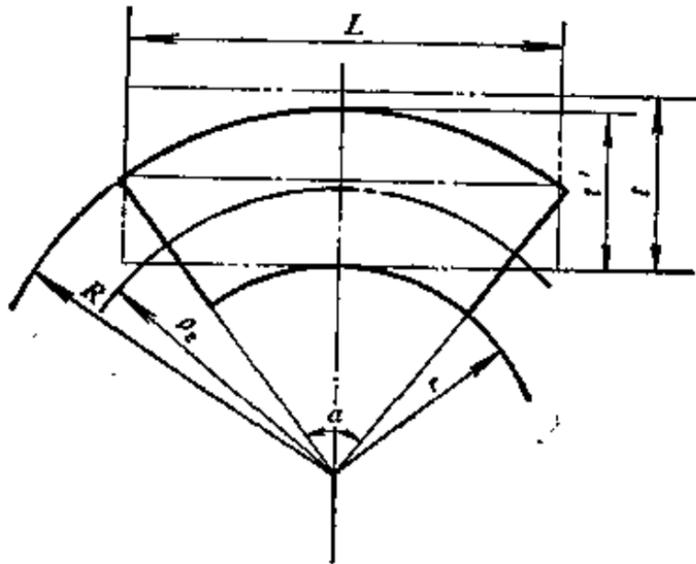


图5-33 中性层位置的确定

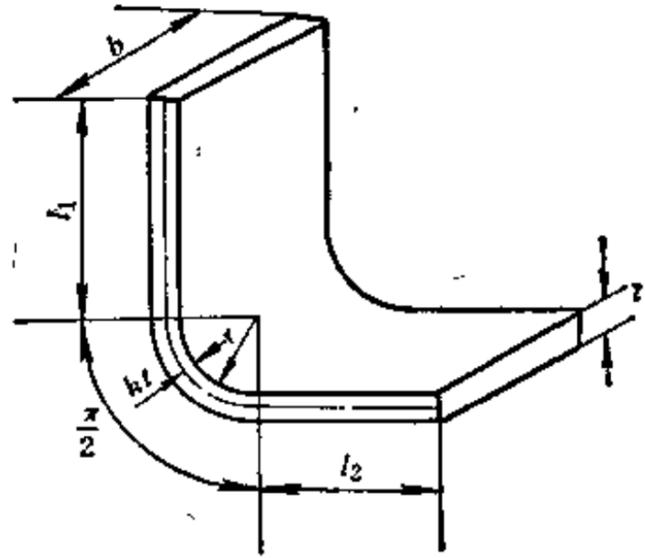


图 5-34

弯曲前变形区的体积是:

$$V_0 = Lbt = \rho_e \alpha bt$$

弯曲后变形区的体积是:

$$V = \pi (R^2 - r^2) \frac{\alpha}{2\pi} b'$$

因为

$$V_0 = V$$

所以

$$\rho_e = \frac{R^2 - r^2}{2t} \cdot \frac{b'}{b}$$

将 $R = r + t'$ 之值代入上式并整理后得

$$\rho_e = \left(\frac{r}{t} + \frac{\eta}{2} \right) \eta \beta t \quad (5-27)$$

式中 $\eta = \frac{t'}{t} < 1$ 是变薄系数, 其值可由表 5-5 中查得,

$\beta = \frac{b'}{b}$ 是展宽系数, 当 $\frac{b}{t} > 3$ 时, $\beta = 1$;

b, b' ——分别为弯曲前和弯曲后毛坯平均宽度;

t, t' ——分别为弯曲前和弯曲后毛坯厚度。

在冲压生产中也常采用下面的经验公式确定中性层的曲率半径。

$$\rho_e = r + Kt \quad (5-28)$$

式中 K ——与变形程度有关的系数, 其值可参照表 5-6 选取。

表5-5 变薄系数 η 值

r/t	0.1	0.5	1	2	5	>10
η	0.8	0.93	0.97	0.99	0.998	1

表5-6 系数 K 之值

r/t	0~0.5	0.5~0.8	0.8~2	2~3	3~4	4~5
K	0.16~0.25	0.25~0.30	0.30~0.35	0.35~0.40	0.40~0.45	0.45~0.50

弯曲件毛坯长度的确定方法, 可分如下几种情况。

一、有圆角半径的弯曲 (图5-34、5-35)

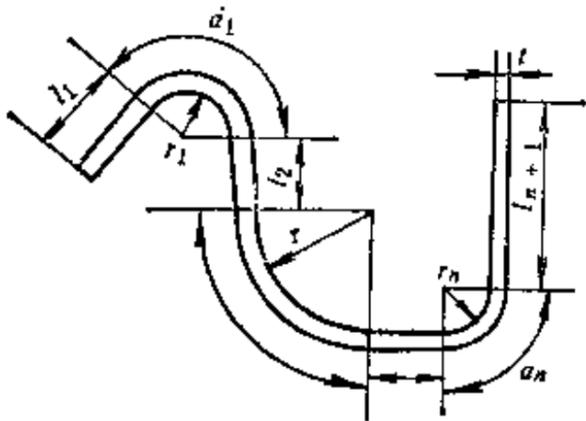


图 5-35

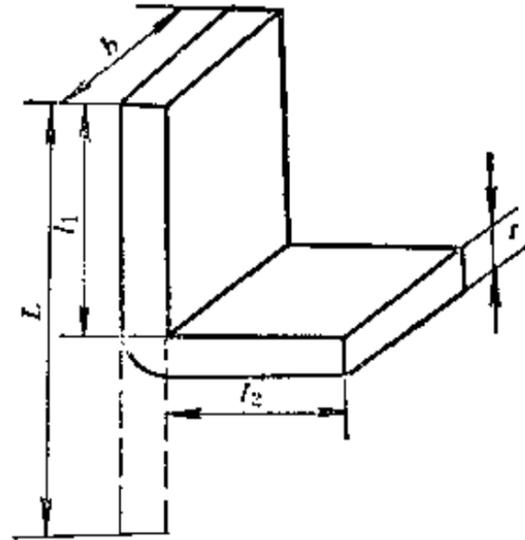


图 5-36

弯曲件有一个弯角 (图 5-34) 时, 毛坯长度用下式计算:

$$L = l_1 + l_2 + l_0 = l_1 + l_2 + \frac{\pi}{2}(r + kt) \quad (5-29)$$

弯曲件有几个弯角 (图 5-35), 且每个弯角是逐个地分别弯曲时, 毛坯长度用下式计算:

$$L = l_1 + l_2 + \dots + l_n + l_{n+1} + \frac{\pi \alpha_1}{180^\circ}(r_1 + k_1 t) + \dots + \frac{\pi \alpha_n}{180^\circ}(r_n + k_n t) \quad (5-30)$$

二、圆角半径很小 ($\frac{r}{t} < 0.3$) 时的弯曲 (图5-36)

弯曲件的毛坯长度用等体积法计算。

弯曲前的体积是:

$$V_0 = Lbt$$

弯曲后的体积是:

$$V = (l_1 + l_2)bt + \frac{\pi t^2}{4} b$$

由 $V_0 = V$ 可得

$$L = l_1 + l_2 + 0.785t$$

由于弯曲变形时, 不仅在毛坯的圆角变形区产生变薄, 而且与其相邻的直边部分 (非变形区) 也产生变薄, 所以利用上式求得的结果往往偏大, 还必须作如下的修正。

$$L = l_1 + l_2 + x' t \quad (5-31)$$

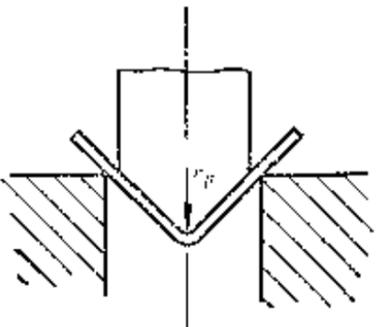
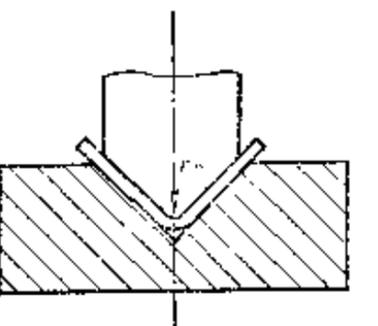
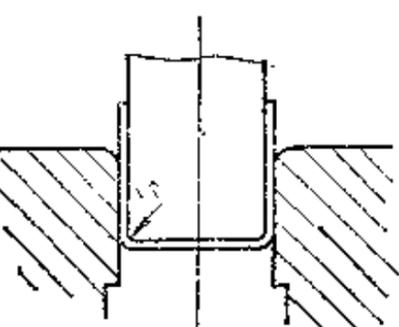
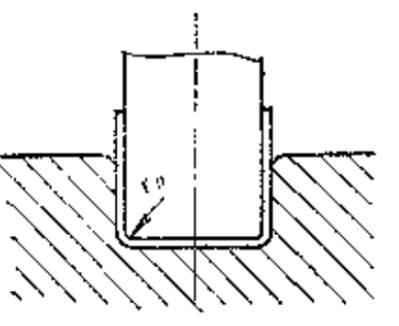
式中 x' ——系数, 一般可取 $x' = 0.4 \sim 0.6$ 。

用上述各公式计算时, 很多因素 (如材料性能、模具情况及弯曲方式等) 没有考虑, 因而可能产生较大的误差, 所以只能用于形状简单、弯角个数少和精度要求不高的弯曲件。对于形状复杂、多角及精度要求高的弯曲件, 应先用上述公式进行初步的计算, 而准确的毛坯长度则应根据试冲结果最后确定。

5-7 弯曲力的计算

弯曲力是设计冲压工艺过程和选择设备时的重要依据之一。但由于弯曲力受材料性能、零件形状、弯曲方法、模具结构等多种因素的影响，因此很难用理论分析的方法进行准确的计算。所以，在生产中经常采用表 5-7 中的经验公式进行弯曲力的概略计算。

表5-7 求弯曲力的经验公式

弯曲方式	简图	经验公式	备注
V形自由弯曲		$P = \frac{c b t^2 \sigma_b}{2L} = K b t \sigma_b$	P —弯曲力; c —系数; b —弯曲件宽度; t —料厚; σ_b —抗拉强度; K —系数, $K \approx \left(1 + \frac{2t}{L}\right) \frac{t}{2L}$; $2L$ —支点间距离
V形接触弯曲		$P = 0.6 \frac{c b t^2 \sigma_b}{r_p + t}$	c —系数, 取 $c = 1 \sim 1.3$; r_p —凸模圆角半径(弯曲半径); (余同上)
U形自由弯曲		$P = K b t \sigma_b$	K —系数, 取 $K = 0.3 \sim 0.6$; (余同上)
U形接触弯曲		$P = 0.7 \frac{c b t^2 \sigma_b}{r_p + t}$	c —系数, 取 $c = 1 \sim 1.3$; (余同上)
校形弯曲的校形力		$P_c = F \cdot q$	F —校形部分投影面积; q —校形所需单位压力; 见表5-8

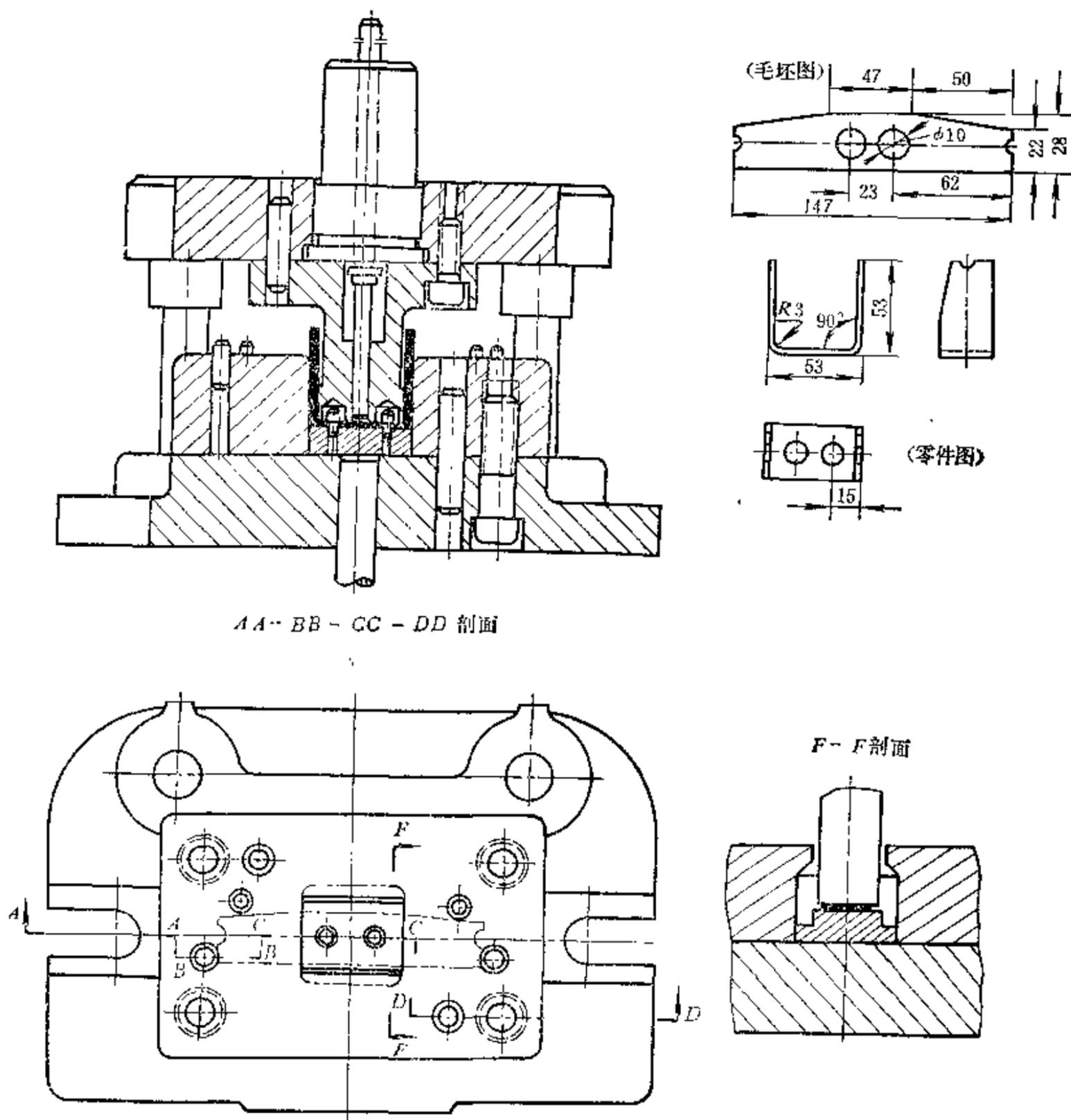


图5-38 U形弯曲模

二、保证弯曲件质量的措施

1. 模具结构应能保证毛坯在弯曲时不产生偏移和窜动。为此应尽量利用零件上的孔，用销钉定位（图 5-44），导正销也可以放在压料板上，但应注意勿使凹模与压料板之间产生窜动（图 5-45）。如果采用图 5-46 的结构，弯曲后零件的两直臂 A 与 B 的尺寸不易保证。如果零件上没有可利用的定位孔时，应考虑增设工艺孔定位。

V 形弯曲模弯曲时，采用孔定位比较困难，一般利用定位尖（图 5-47 a）、顶杆（图 5-47 b）或压料板（图 5-47 c），防止材料在弯曲时发生偏移。

在考虑零件的冲压工艺时，也要尽量使毛坯两侧面所受外力能够平衡，以防止弯曲时材料产生偏移。为此希望零件具有对称的形状和尺寸。对非对称的零件可考虑成双弯曲法，弯曲后再切开成为单件。

2. 模具结构不应妨碍和阻止毛坯在合模过程中产生的转动和移动，以致影响零件的形

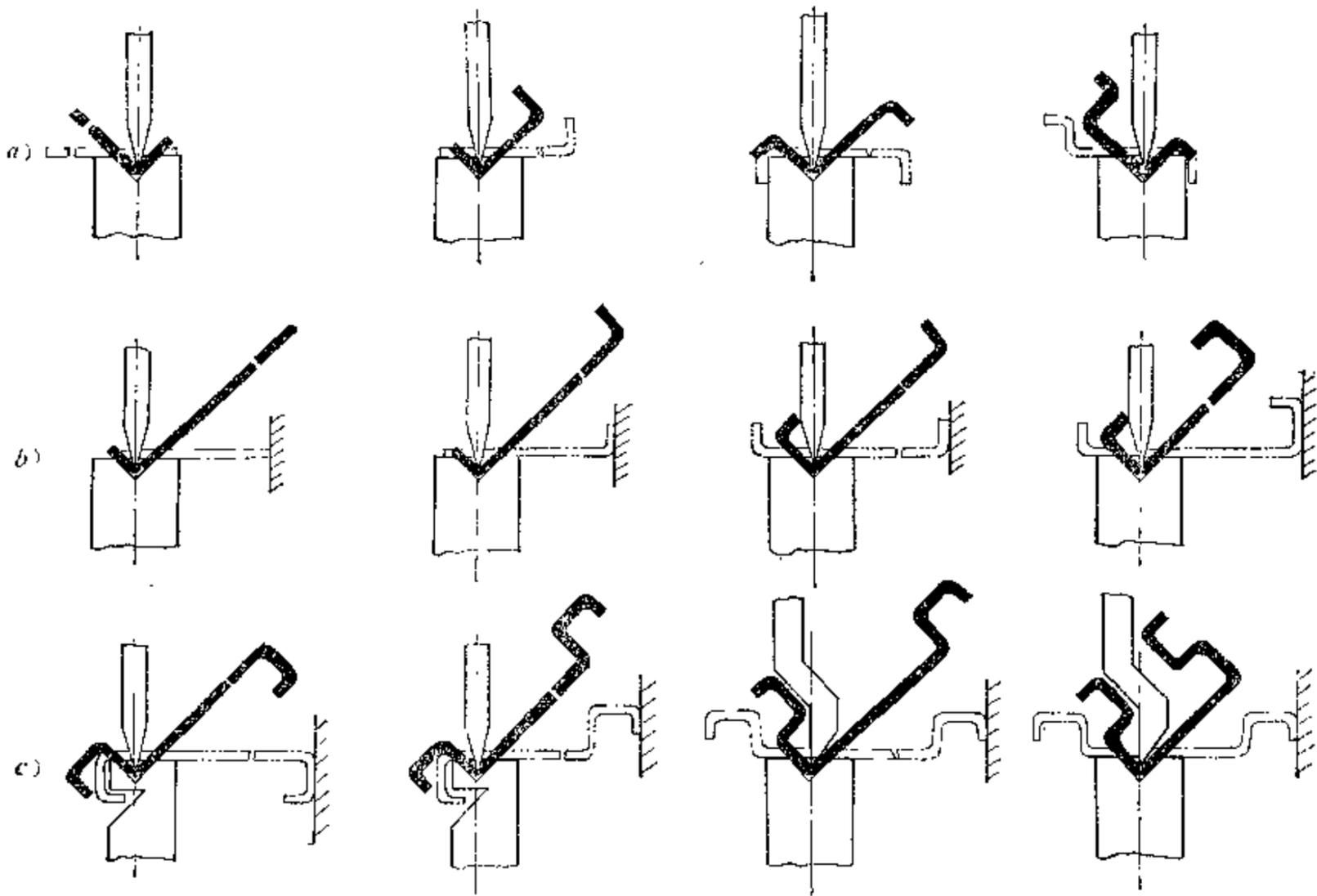


图5-39 多次V形弯曲制造复杂零件举例

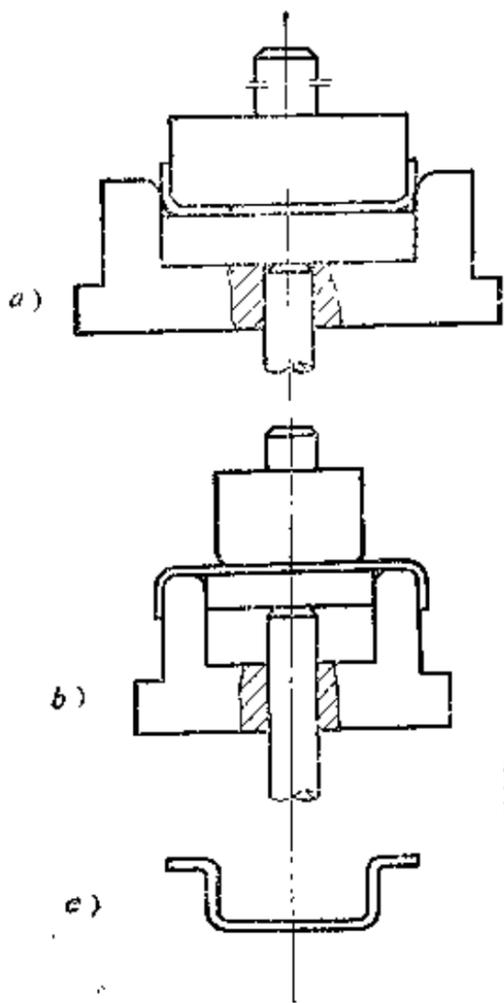


图5-40 两次U形弯曲制造四角形零件举例

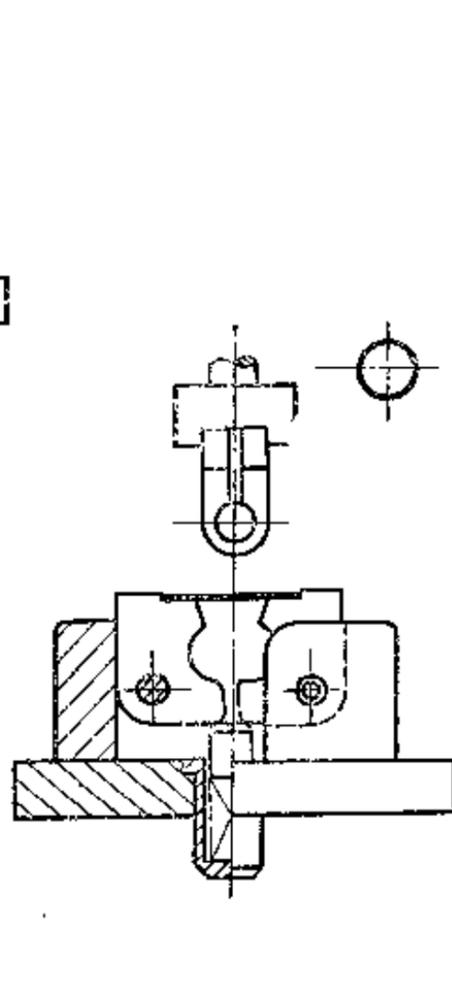


图5-41 一次成形圆形零件复合模

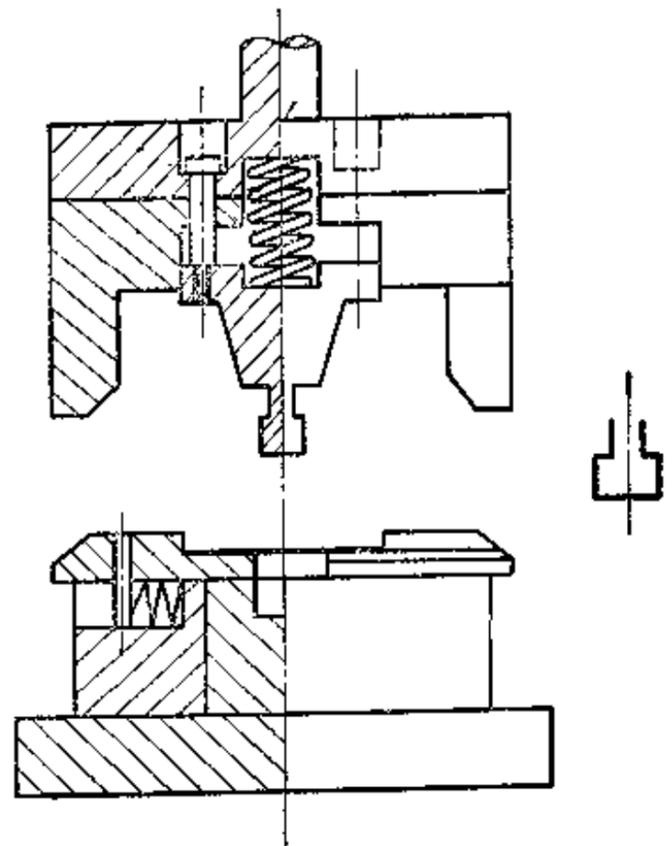


图5-42 斜楔式弯曲模

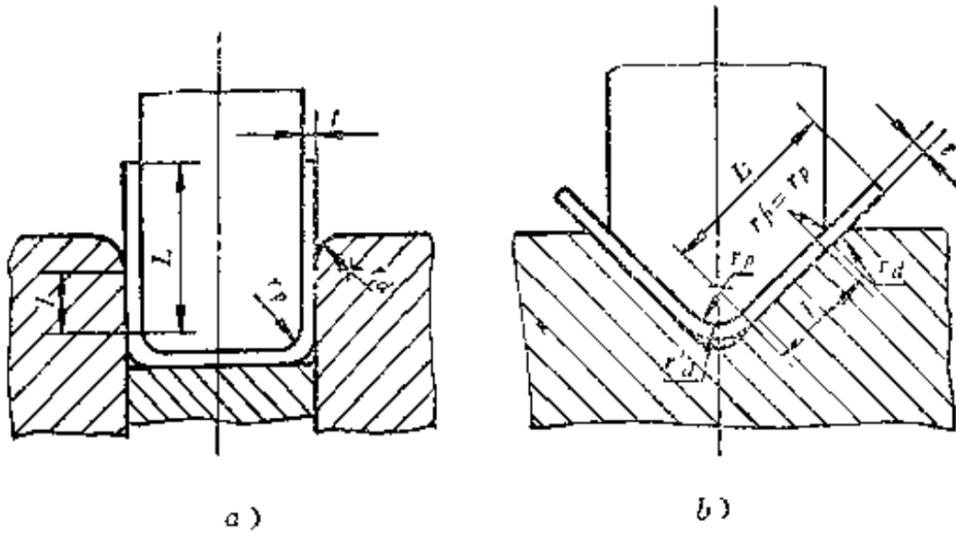


图5-43 弯曲模工作部分
a—U形弯曲 b—V形弯曲

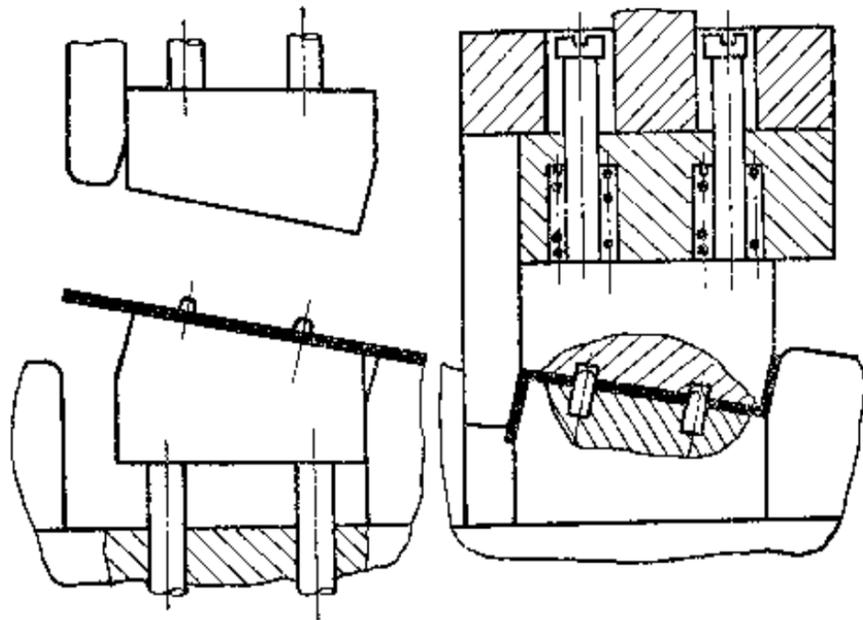
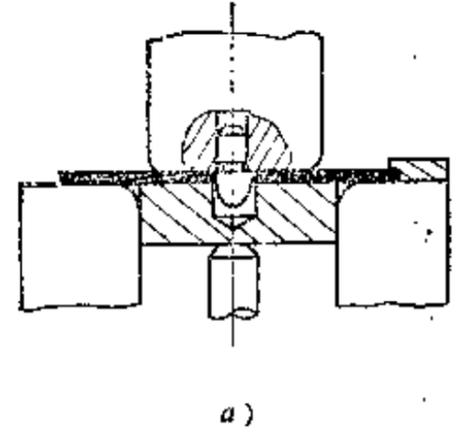


图5-45 弯曲件的定位

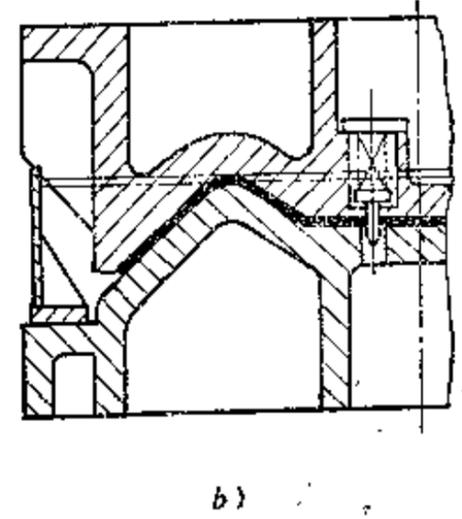


图5-44 弯曲件的定位

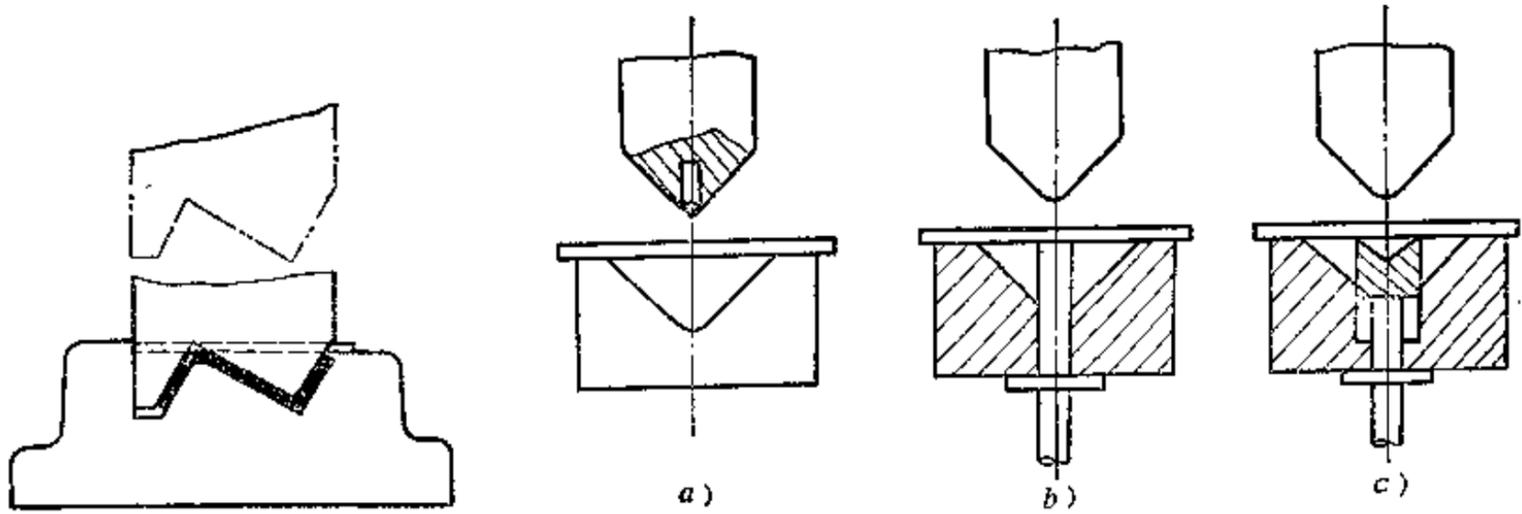


图5-46 不良的定位方法

图5-47 防止毛坯偏移的措施

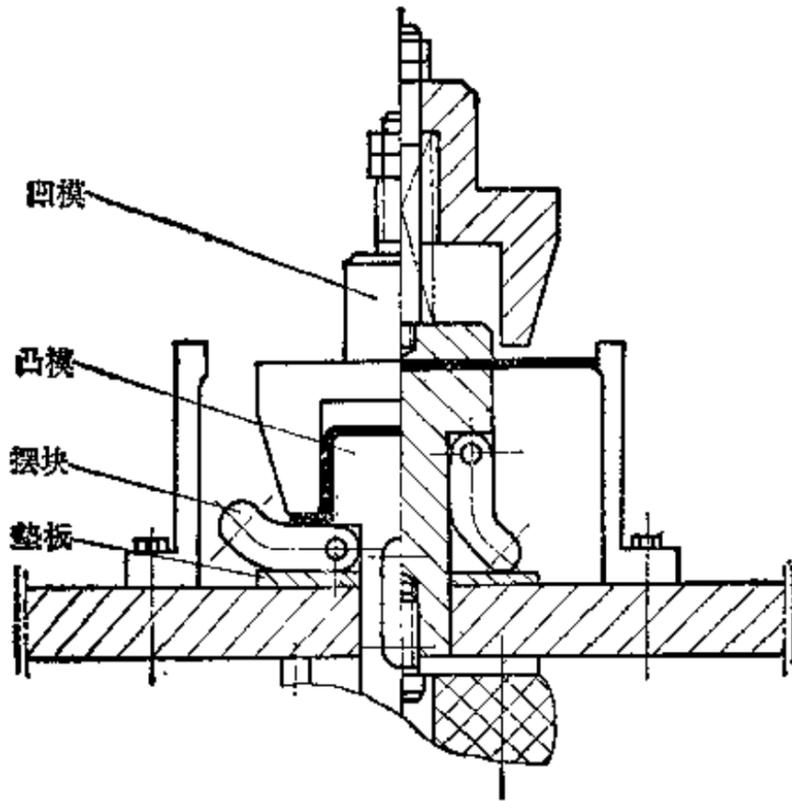


图5-48 四角弯曲模

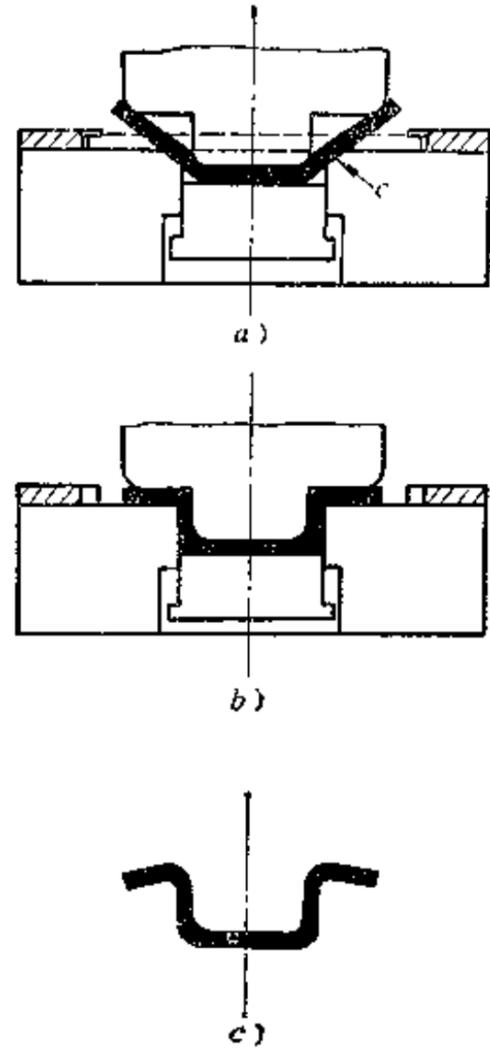


图5-49 不合理的四角弯曲

状与尺寸。这一点对于复杂形状的多角弯曲尤为重要。模具结构也应保证在合模过程中，只在零件确定的弯曲线位置上进行弯曲。采用图 5-48 结构或者采用图 5-40 的弯曲方式，可以保证内、外角弯曲线位置在弯曲过程中不发生变化，因而能够满足零件形状和尺寸的要求。但如果采用图 5-49 的结构进行弯曲时，外角 c 处的弯曲线的位置在弯曲过程中是变化的，所以会使零件的外角形状不准和直臂部分变薄（图 5-49 c ）。

表5-9 弯曲模工作部分尺寸及系数 c

L (mm)	板 厚 t (mm)											
	<0.5			0.5~2			2~4			4~7		
	l	r_d	c	l	r_d	c	l	r_d	c	l	r_d	c
10	6	3	0.1	10	3	0.1	10	4	0.08	—	—	—
20	8	3	0.1	12	4	0.1	15	5	0.08	20	8	0.06
35	12	4	0.15	15	5	0.1	20	6	0.08	25	8	0.06
50	15	5	0.2	20	6	0.15	25	8	0.1	30	10	0.08
75	20	6	0.2	25	8	0.15	30	10	0.1	35	12	0.1
100	—	—	—	30	10	0.15	35	12	0.1	40	15	0.1
150	—	—	—	35	12	0.2	40	15	0.15	50	20	0.1
200	—	—	—	45	15	0.2	50	20	0.15	65	25	0.15

第六章 胀形

6-1 胀形的特点

胀形主要用于平板毛坯的局部胀形（如压制突起、凹坑、加强筋、花纹图案及标记等）、圆柱形空心毛坯的胀形、管类毛坯的胀形（如波纹管等）、平板毛坯的拉形等。曲面形状零件拉深时，在毛坯的中间部分也产生胀形变形。因此，胀形是冲压变形的一种基本形式，也常和其他变形方式结合出现于复杂形状零件的冲压过程。

胀形时毛坯的塑性变形局限于一个固定的变形区范围之内，板料不向变形区外转移，也不从外部进入变形区内。图6-1中涂黑部分表示平板毛坯胀形时的变形区。在变形过程中变形局限于直径为 d 的圆周以内的金属，圆周外的环形部分不参与变形，毛坯的外径 D_0 在胀形中不发生变化。胀形变形区内金属处于两向受拉的应力状态，变形区内板料形状的变化主要是由其表面积的局部增大实现的，所以胀形时毛坯厚度的变薄是不可避免的。

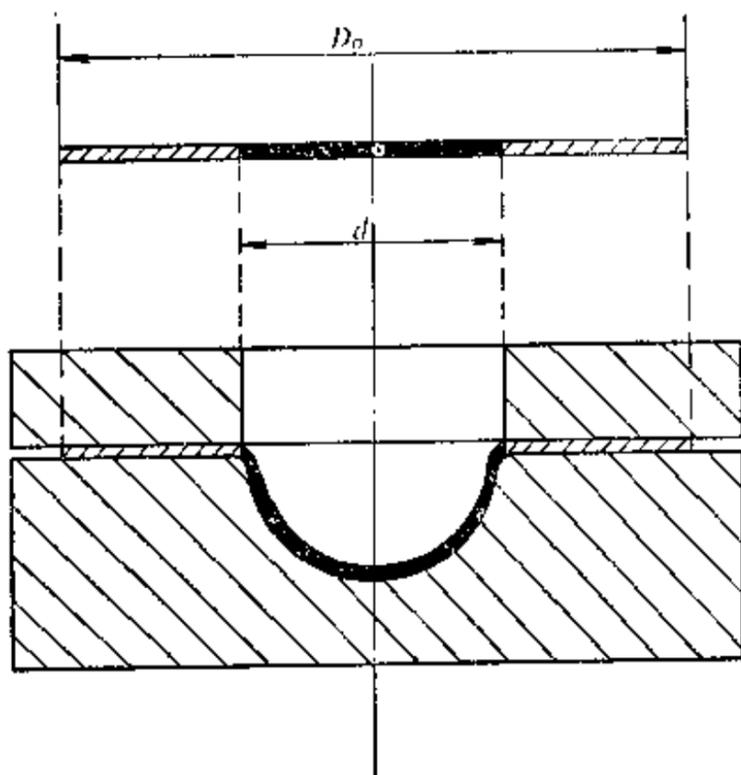


图6-1 胀形变形区

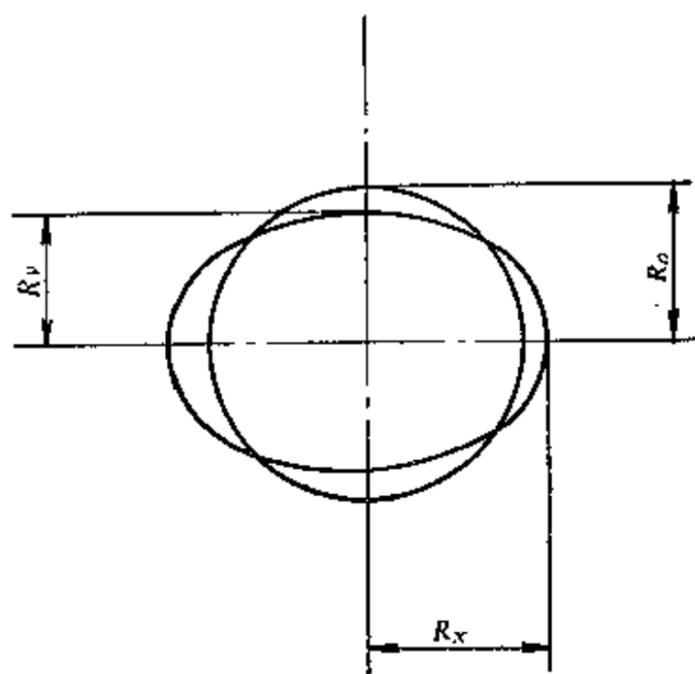


图6-2 应变值的计算

由于胀形时板料处于双向受拉的应力状态，在一般情况下，变形区的毛坯不会产生失稳起皱现象，冲成零件的表面光滑，质量好。所以有时也用胀形代替其它成形方法加工某些相对厚度很小的零件。胀形时在变形区板料毛坯的截面上只有拉应力的作用，而且在厚度方向上其分布比较均匀（即靠近于毛坯内表面和外表面部位上的拉应力之差较小），所以在受力状态下毛坯的几何形状易于固定，卸载时的弹复很小，容易得到尺寸精度较高的零件。在某些曲率不大，比较平坦的曲面零件冲压生产中，时常采用胀形方法或带有很大胀形成分的拉深方法（如具有很强作用的拉深筋等）。有时也在冲压成形之后，采用胀形的方法对冲压零件校

形，以提高其尺寸精度。

胀形有刚模胀形和借助液体、气体或橡胶压力成形的软模胀形。软模胀形法可以加工形状极为复杂的零件，如波纹管等。

在生产中常采用的胀形变形工艺方法，其形式和叫法是很多的，而且又由于胀形加工零件的几何形状不同，胀形变形的极限有许多不同的表示方法，如胀形系数、胀形深度等。这些胀形极限参数的表示方法都是从变形毛坯在胀形过程中所发生的总体尺寸变化结果来确定和进行计算的。实际上几乎在所有的胀形变形工艺中，变形在毛坯胀形区内的分布都是不均匀的，而且变形分布的不均匀程度又决定于模具工作部分的几何形状、零件的几何形状特点、润滑条件、材料的性能等，所以仅用毛坯的总体尺寸变化结果去衡量胀形变形程度的大小和确定成形的极限方法，只能是非常近似的，不能确切地反映出危险部位上的实际变形情况。另外，在复杂形状零件胀形时，采用这样的方法也是不可

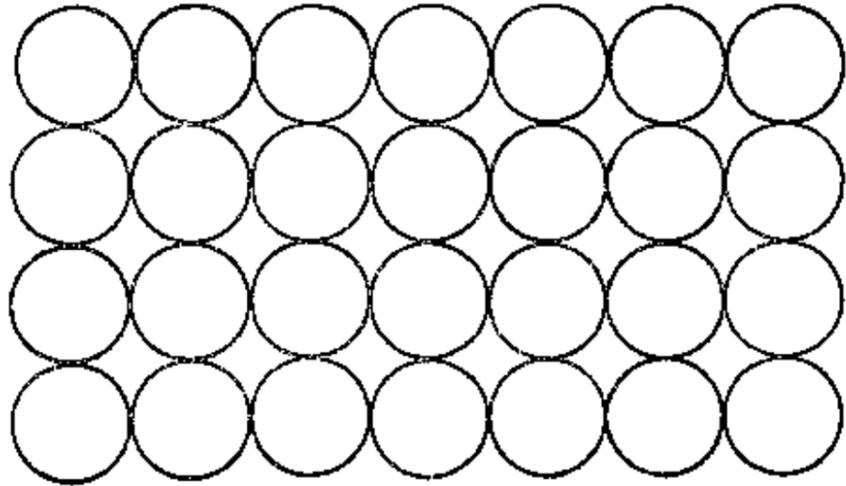


图6-3 圆网目的形式

能的。在这种条件下，可以采用网目法来研究胀形变形区内变形的分布和确定危险部位上变形的大小，并进一步用它和胀形成形的变形极限相比较得出的结果，做为工艺和模具设计的基础。这个方法可以应用于所有的胀形方法，并能得出确实反映实际变形情况的结果。

胀形是伸长类成形方法，所以它的成形极限一定和板材的塑性有直接的关系。但是，由于在各种胀形工艺中，胀形变形区内各个部位上金属所受的两向拉应力的比值可能在 $0 \sim 1$ 之间变化（即 $\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 0 \sim 1$ ），其应力状态和简单拉伸试验时有很大的差别，所以胀形变形的极限和在单向拉伸试验中所得的塑性指标（如延伸率、断面收缩等）之间并不存在一个简单的对应关系，当然也不能用延伸率去确定胀形的成形极限。因此，胀形时必须利用图6-4所示的双向拉应力作用下的成形极限图确定各种胀形的成形极限。图中两个坐标 ϵ_x 与 ϵ_y 分别是胀形时板料平面内相互垂直的两个方向上的应变值。胀形时的应变值 ϵ_x 与 ϵ_y ，可用测量在板料表面上网目尺寸在胀形过程中变化的方法得到（图6-2），其值为

$$\epsilon_x = \ln \frac{R_x}{R_0}$$

$$\epsilon_y = \ln \frac{R_y}{R_0}$$

式中 R_0 ——变形前网目圆的半径；

R_x 与 R_y ——分别为变形后由网口圆变成椭圆的长轴方向与短轴方向上的半径。

常用网目的形式有方格网目和圆网目两种。圆网目在变形后变成椭圆，其长轴方向和短轴方向与应力主轴方向重合，计算上比较方便，应用也较为普遍。常用的圆网目形式如图6-3所示。圆网目的直径越小，越能细致地反映出在板平面上变形的变化。但是由于制造和测量时产生的误差随网目圆直径的减小而相对地增大，所以在大型冲压件的变形分析时应采用较大尺寸的网目。常用的网目圆直径介于 $5 \sim 20$ 毫米之间。可用刻画、电解腐蚀等方法在

板料表面制成网目，并用工具显微镜测量变形前后尺寸的变化。

图 6-4 所示的低碳钢两向拉应力作用下的成形极限分为破坏极限和表面粗糙极限。当胀形变形程度达到破坏极限时板材发生断裂；当胀形变形程度达到表面粗糙极限时，材料出现拉应力作用下的塑性变形失稳现象，产生局部变形，板料的光滑表面开始变得粗糙。一般情况下，应把胀形变形程度限制在表面粗糙极限线以内。由图 6-4 可见，不同的两向拉应力状态（即拉应力的比值 $\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$ 不同），板料的成形极限也不一样，在 OA 线上板平面内两个垂直方向上的变形程度相等 $\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = 1$ ，这时金属受两向等拉应力状态的作用，即 $\sigma_x = \sigma_y > 0$ ；在 OB 线上 $\epsilon_y = -\frac{\epsilon_x}{2}$ ，在板平面上一个方向上的变形是压缩变形，而且是另一个方向上伸长变形的一半，这时金属处于单向受拉应力状态（ $\sigma_x > 0, \sigma_y = 0$ ）。如果板料的厚度方向系数 $r > 1$ 时，表示单向拉应力时的 OB 线变成为 OB' ，线上的变形是 $\epsilon_y = -\frac{r}{1+r}\epsilon_x$ 。在坐标轴 $0\epsilon_x$ 上 $\epsilon_y = 0$ ，应变值 ϵ_x 的绝对值和厚度方向的应变相等，而方向相反，所以是平面变形。由图 6-2 中可以明显地看出应力状态对胀形变形极限的影响。在单向拉应力作用下，伸长应变的极限值 ϵ_x 约为 0.6，而厚度方向上的最大变薄变形约为 -0.3。在双向等拉应力状态下，板平面内两个方向上的伸长应变的极限值 ϵ_x 与 ϵ_y 均可达 0.5 左右，而厚度方向上的最大变薄变形可达 -1，约为单向拉伸时的 3~4 倍。

一般情况下，在冲压毛坯的胀形变形区内不同位置上的金属所受的应力状态不同，引起

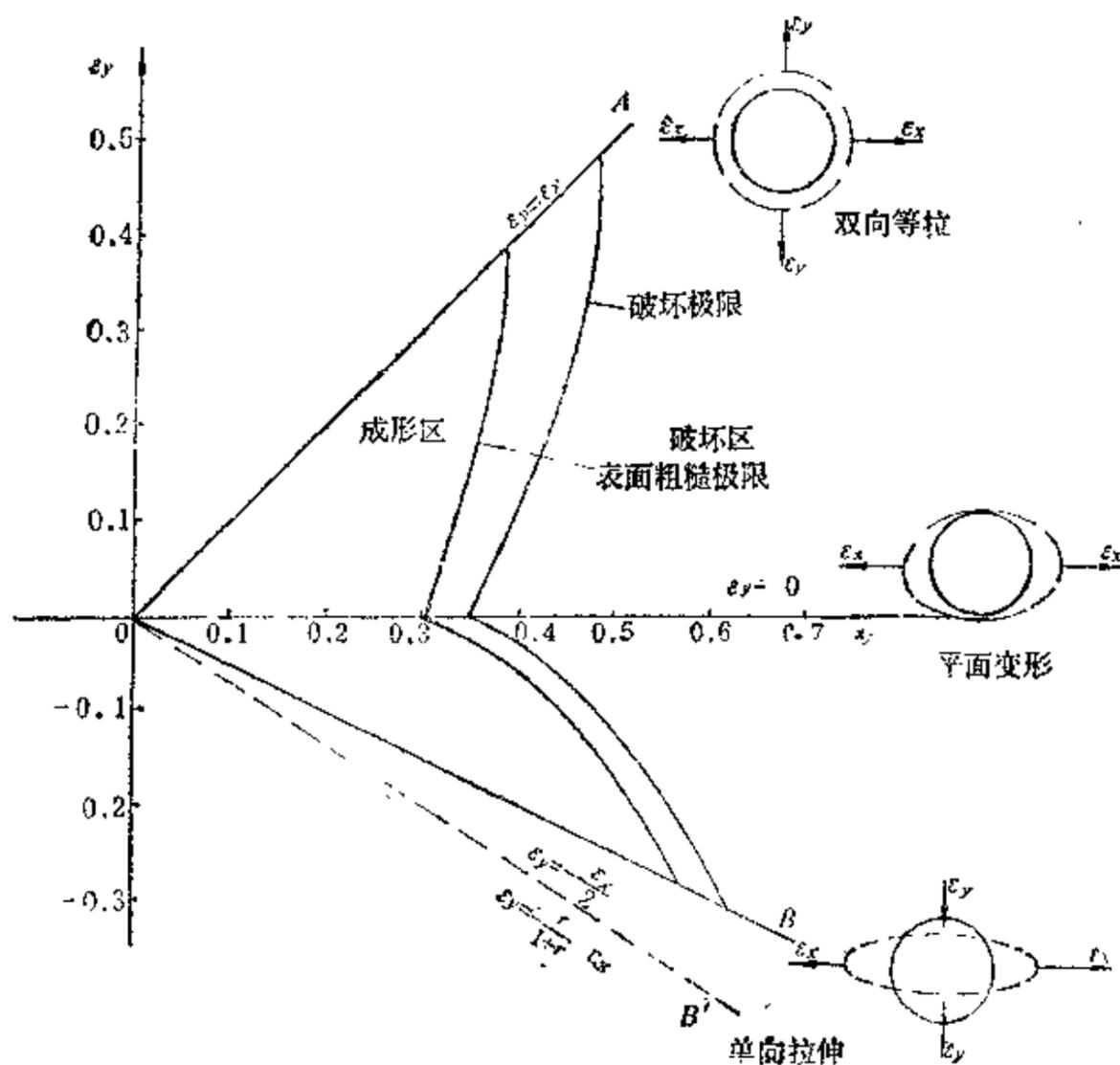


图6-4 低碳钢的两向拉应力作用下的成形极限

的板平面内两个垂直方向上的应变也不一样。这时应该根据变形值最大的危险部位的应变值 ϵ_x 与 ϵ_y ，参照图 6-4 的胀形成形极限确定变形的极限，确定合理的冲压工艺方法、冲模结构、毛坯和冲压件的最佳形状等等。在不规则形状零件的胀形和具有很大胀形成分的复杂曲面零件成形工艺分析时，这种方法得到越来越多的应用，而且实际上也证明它是非常有效的。

在应用图 6-4 的胀形成形极限时，应注意变形区内各部位的应变值在变形过程中的变化。图中的成形极限线仅适用于胀形时各个方向上的应变值随同一个变量按同一个函数关系增长的单调变形过程。

不同材料的胀形成形极限图并不相同，一般说来，材料的塑性好、硬化指数 n 值大时，胀形成形的极限值也高，当然胀形变形引起的毛坯总体尺寸的变化（如胀形深度等）也越大。

对胀形毛坯总体尺寸变化的影响因素还有润滑、毛坯的几何形状、模具的结构等。凡是可以使胀形变形区内的变形均匀、降低危险部位应变值的各种因素，均能提高胀形的深度。

6-2 平板毛坯的局部胀形

平板毛坯的局部胀形如图 6-5、6-6 所示。当毛坯的外径较大，而且超过凹模孔直径 d 的三倍以上时，由于毛坯外环发生切向收缩所必需的切向拉应力的数值增大，并且成为相对的强区，而在冲头端面直接作用下的直径为 d 的圆面积以内的金属，则成为弱区，所以毛坯的塑性变形也就局限于这个范围之内。这时在毛坯的中间部位形成的凹坑，主要是靠中间部分的材料在双向拉应力作用下的变薄实现，并不从变形区外补充金属。利用这种方法可以在平板毛坯或空心零件上压制各种形状的凹坑、突起和加强筋等（图 6-7）。图 6-8 是油箱口盖的顶部进行局部胀形的实例。

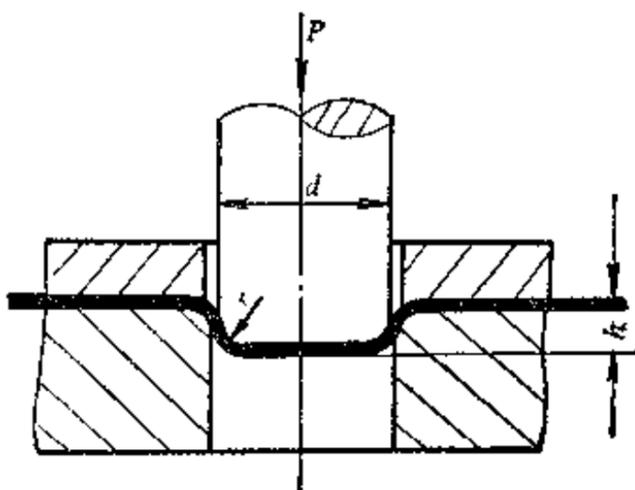


图6-5 刚体冲头的局部胀形

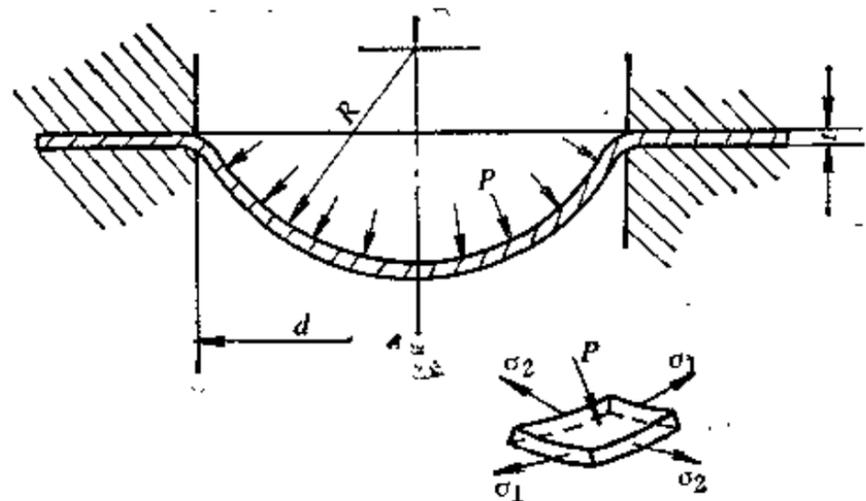


图6-6 平板毛坯的软模胀形

在平板毛坯上进行的局部胀形深度受到材料塑性的限制，其数值不能过大。图 6-5 所示的压坑深度决定于板料的塑性、冲头的几何形状和润滑等因素。当冲头的圆角半径 r 很小时，变形的分布很不均匀，并且局部地集中在冲头的圆角附近，所以总的胀形深度也很小。当冲头的圆角半径 r 较大，而且板料的硬化指数 n 较大和模具表面摩擦较小时，板材的变形趋向均匀，所以总的胀形深度也能有一定的提高。用球形冲头 $\left(r = \frac{d}{2}\right)$ 对低碳钢、软铝等进行局部

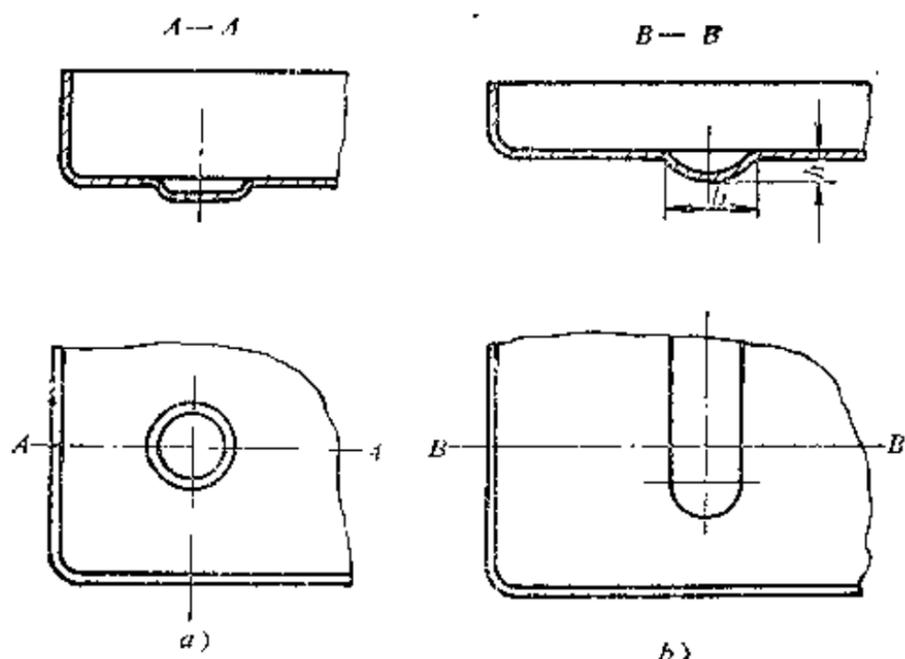


图6-7 平板毛坯局部胀形的形式

a—压凹坑 b—压加强筋

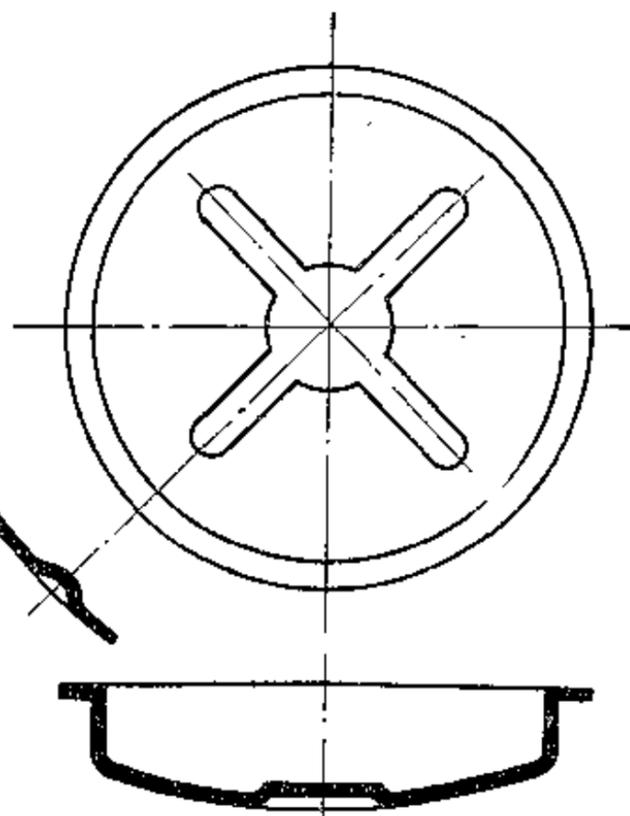


图6-8 油箱盖的局部胀形实例

胀形时，可能达到的极限深度约为 $h \approx \frac{d}{3}$ 。用平端面冲头胀形时可能达到的深度决定于冲头的圆角半径，其大致数值见表 6-1。

表6-1 平板毛坯胀形深度

软 钢	$h \leq (0.15 \sim 0.20) d$
铝	$h \leq (0.1 \sim 0.15) d$
黄 铜	$h \leq (0.15 \sim 0.22) d$

假如零件要求的局部胀形深度超过极限值时，可以采用图 6-9 所示的方法，第一道工序用大直径的球形冲头胀形，达到在较大的范围内聚料和均化变形的目的，用第二道工序最后成形得到所要求的尺寸。

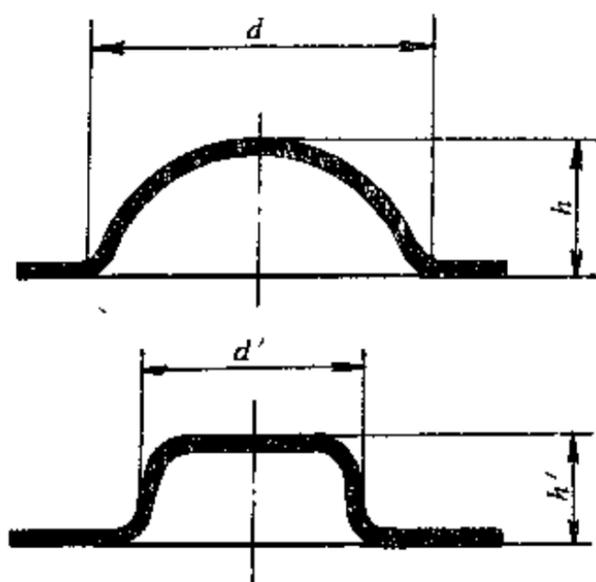


图6-9 深度较大的局部胀形法

在平板上可能压制的加强筋的深度决定于材料的塑性和加强筋的几何形状。对于软钢板，而且加强筋具有圆滑的过渡形状时，可能达到的压筋深度 h 为其宽度 b 的 30% 左右，即 $h \leq 0.3b$ 。

用刚体凸模时，平板毛坯胀形力可按下式估算：

$$P = KLt\sigma_b$$

式中 L ——胀形区周边的长度；

t ——板料的厚度；

σ_b ——板料的强度；

K ——考虑胀形程度大小的系数，一般取 $K = 0.7 \sim 1$ 。

假如用液体、橡胶、聚氨脂或气体的压力代替刚性冲头的作用，就会实现如图 6-6 所示

的软模胀形。软模胀形时所需的单位压力 p 可从胀形区内板料的平衡条件求得。在图 6-6 所示的球面形状零件胀形过程中所必需的压力 p 之值，可按下式做近似的计算（不考虑材料的硬化和厚度的变薄等因素）：

$$p = \frac{2t}{R} \sigma_s$$

式中 σ_s ——板料的屈服点，其余尺寸见图 6-6。

在长度很大的条形筋成形时（图 6-7 b），局部胀形所需的单位压力可按下式计算：

$$p = \frac{t}{R} \sigma_s$$

6-3 圆柱形空心毛坯的胀形

圆柱形空心毛坯的胀形如图 6-10 所示。由于蕊子 2 锥面的作用，在冲床滑块向下压分瓣

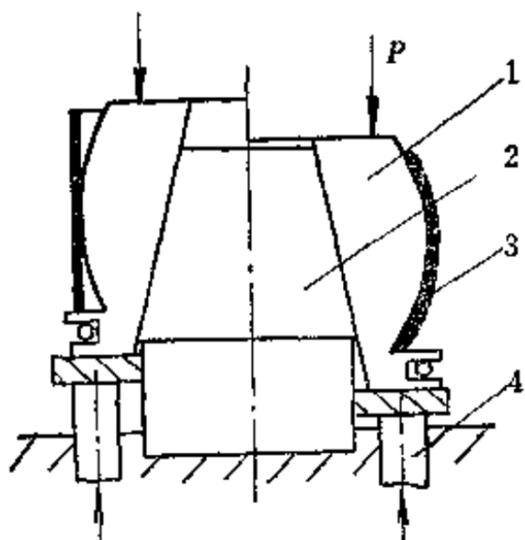


图6-10 刚体凸模的胀形方法

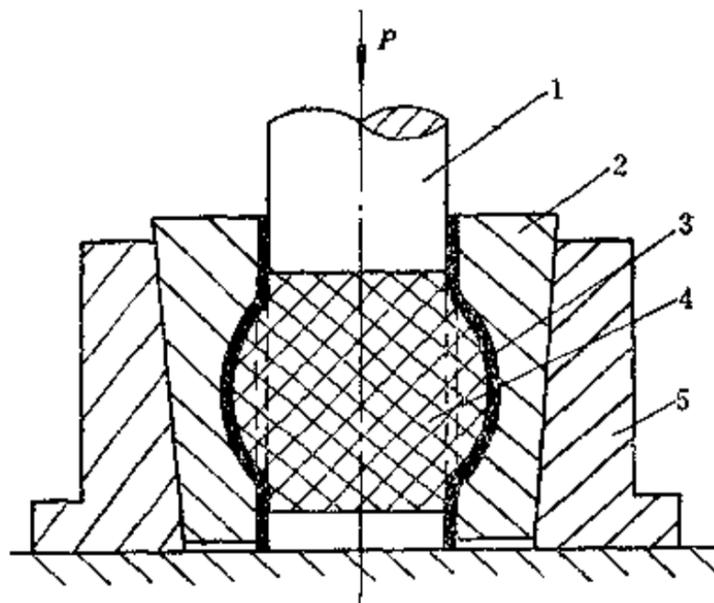


图6-11 软体凸模的胀形方法

1—凸模 2—凹模 3—毛坯 4—橡胶 5—外套

凸模 1 时使后者向外扩张，并使毛坯 3 产生直径增大的胀形变形。胀形结束后，分瓣凸模 1 在冲床气垫顶杆 4 的作用下回复到初始位置，以便取出成品零件。用图示的刚性模具胀形时，分瓣凸模的数目越多，所得零件的精度越好，但是用这种胀形方法很难保证得到精度较高的正确的旋转体。另外，模具结构复杂，胀形均匀程度较差，以及不便于加工形状复杂的零件等都是这种胀形方法的缺点。

如果用液体、气体或橡胶压力代替刚性的分瓣凸模的作用，则得到软模胀形，图 6-11 即为用橡胶压力进行的软模胀

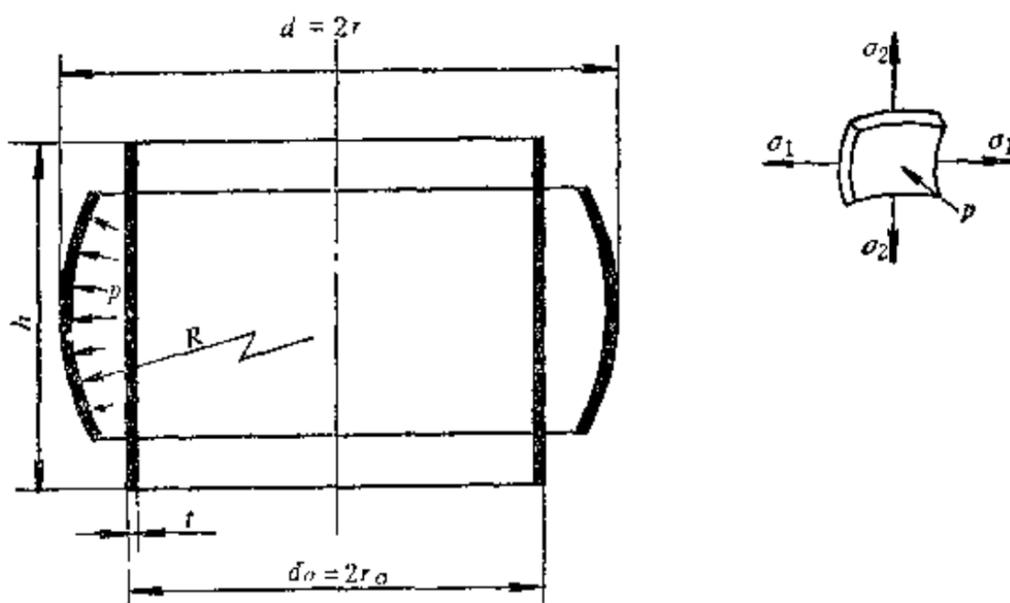


图6-12 胀形时的应力

形原理。软模胀形时毛坯的变形比较均匀，容易保证零件的正确几何形状，也便于加工形状复杂的空心零件，所以在生产中应用也比较广泛。例如波纹管、高压气瓶、某些火箭发动机的异形零件等都常用液体胀形或气体胀形（用高压气体或爆炸冲击波压力）方法。

软模胀形所需的单位压力，可由变形区内单元微体（图 6-12）的平衡条件求出。

当胀形毛坯两端固定，而且不产生轴向收缩时：

$$p = \left(\frac{t}{r} + \frac{t}{R} \right) \sigma_s$$

当胀形毛坯两端不固定，允许轴向自由收缩时，可近似地取为：

$$p = \frac{t}{r} \sigma_s$$

式中 p —— 胀形所需的单位压力；
 σ_s —— 材料的屈服点，胀形的变形程度较大时，其数值应按材料的硬化曲线确定；
 t —— 材料的厚度；
 r 与 R —— 胀形毛坯的曲率半径。

在图 6-11 所示的胀形加工时，极限变形程度可以近似地用胀形系数 K 衡量，而且应保证伸长变形最大部位上的胀形系数之值符合下列关系：

$$K = \frac{r - r_0}{r_0} \leq 0.8\delta$$

上式中的 δ 是材料的延伸率。当对胀形零件表面要求较高，不允许产生由于过大的塑性变形引起的粗糙表面时，上式中的 δ 应取为板材拉伸试验中均匀变形阶段的延伸率。

拉形工艺（图 6-13）是胀形的另一种形式，它主要用于板料的厚度小而成形的曲率半径

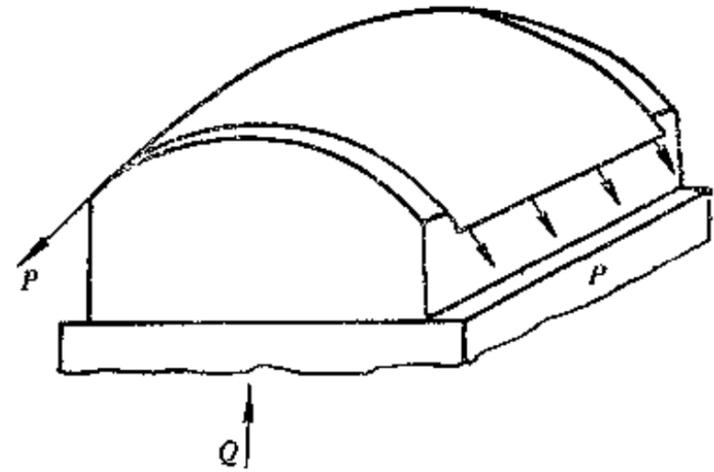


图6-13 拉形工艺

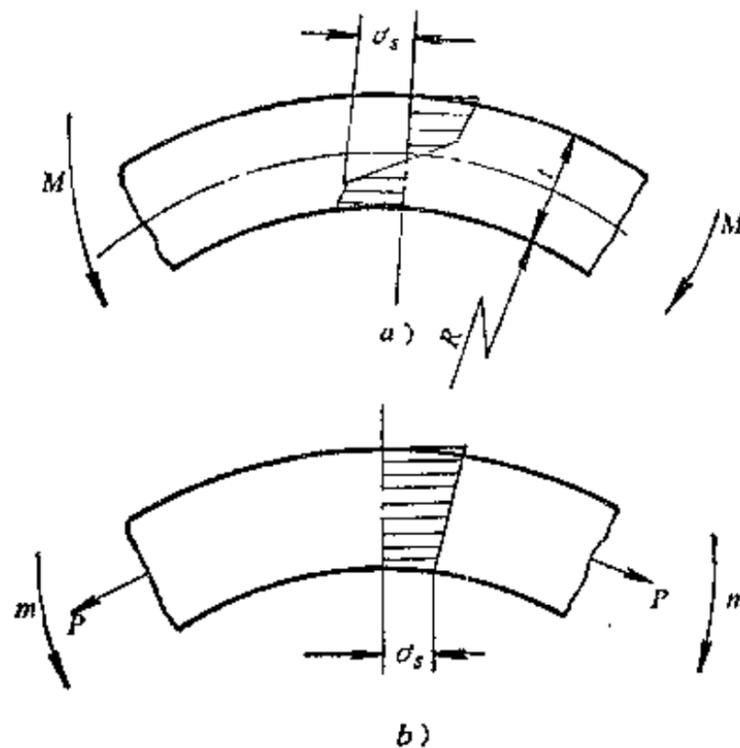


图6-14 拉形时的应力分布

很大的曲面形状零件，如飞机的蒙皮等。拉形所用的模具非常简单，但要求设备能给出足以使成形毛坯内的拉应力超过材料的屈服极限 σ_s （图6-14）的拉力。在一般弯曲或靠模具的压力成形时，毛坯断面内的应力分布如图6-14 a所示。这时中性层以外部分受拉，而中性层以内部分受压，当模具的外力去除后，使毛坯成形的弯曲力矩 M 也随着消失，成形毛坯的外表面和内表面的金属产生方向相反的回弹变形，所以零件的形状不易固定。假如在毛坯的侧面施加足够的拉力 P ，毛坯断面内的应力分布就如图6-14 b所示，这时毛坯内应力的弯矩 m 较小，即 $m < M$ 。当外力去掉后成形毛坯外表面和内表面的金属产生方向相同的回弹变形。由于弯矩 m 引起的回弹变形较小，所以毛坯在受力状态下的形状容易固定，成形的精度也好。在许多厚度小而尺寸大的曲面形状零件拉深时，时常用增加胀形成分的方法以提高零件尺寸精度和消除松弛的缺陷，其基本道理也是一样的。

第七章 直壁形状零件的拉深

7-1 拉深工艺的特点

拉深也称拉延，是利用模具使冲裁后得到的平面毛坯变成开口空心零件的冲压工艺方法。

拉深过程如图 7-1 所示，其凸模与凹模和冲裁时不同，它们的工作部分都没有锋利的刃口，而是做成为一定的圆角半径，并且其间的间隙也稍大于板料的厚度。在凸模的作用下，原始直径为 D_0 的毛坯，在凹模端面和压边圈之间的缝隙中变形，并被拉进凸模与凹模之间的间隙里形成空心零件的直壁。零件上高度为 H 的直壁部分是由毛坯的环形部分（外径为 D_0 ，内径为 d ）转化而成的，所以拉深时毛坯的外部环形部分是变形区，而底部通常是不参加变形的不变形区。

用拉深工艺可以制成筒形、阶梯形、锥形、球形、方盒形和其它不规则形状的薄壁零件；如果与其它冲压成形工艺配合，还可能制造形状极为复杂的零件。拉深件的可加工尺寸范围相当广泛，从几毫米的小零件直到轮廓尺寸达 2~3 米，厚度达 200~300 毫米的大型零件，都可以用拉深方法制成。因此，在汽车、飞机、拖拉机、电器、仪表、电子等工业部门以及日常生活用品的冲压生产当中，拉深工艺占据相当重要的地位。

在冲压生产中拉深件的种类很多，由于其几何形状的特点不同，虽然它们的冲压过程都叫做拉深，但是变形区的位置、变形的性质、变形的分布、毛坯各部位的应力状态和分布规律等都有相当大的，甚至是本质上的差别，所以确定工艺参数、工序数目与顺序，以及设计模具的原则和方法都不一样。各种拉深件按变形力学的特点可以分为：圆筒形零件（指直壁旋转体）、曲面形状零件（指曲面旋转体）、盒形件（直壁非旋转体）和非旋转体曲面形状零件等四种类型。以后将分别地分析其工艺过程设计与冲模设计问题。

按变形特点对拉深件进行的分类，可以参照表 7-1。从表中对各类拉深件变形特点的分析可以明显地看出，每种零件都有自己在变形上的特点，因而可以用相同的观点和方法去研

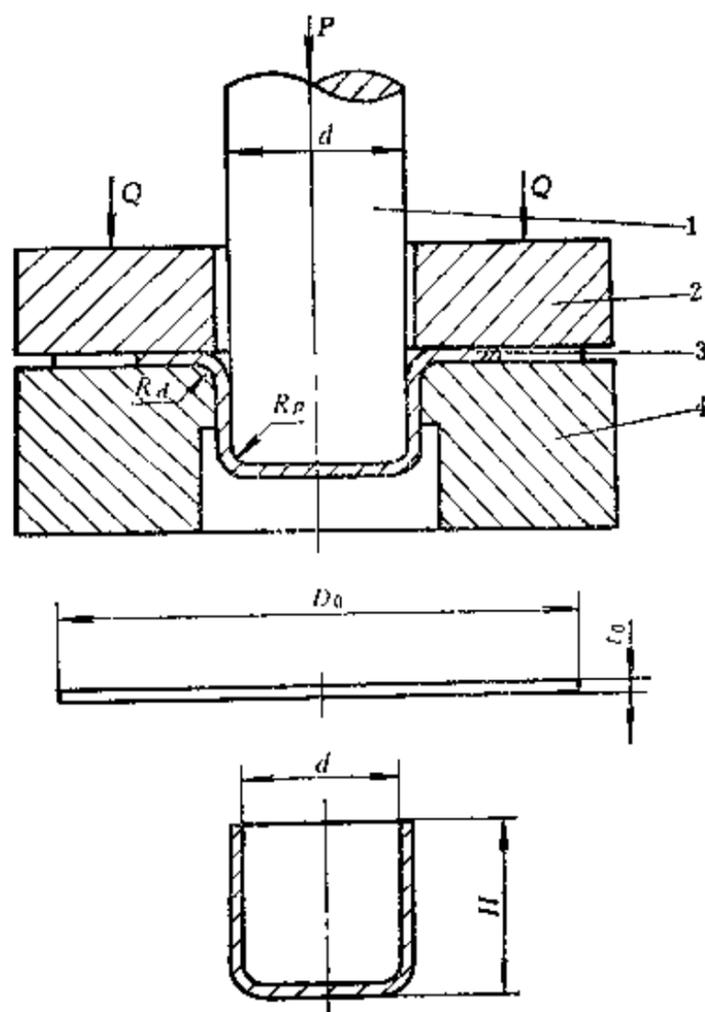
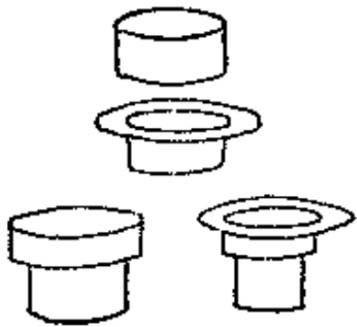
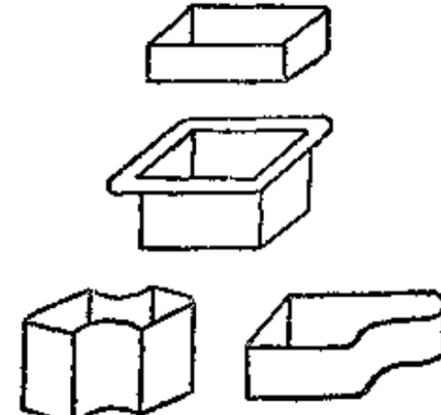
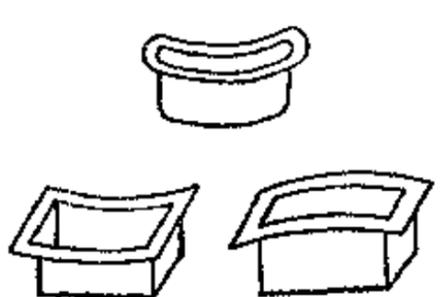
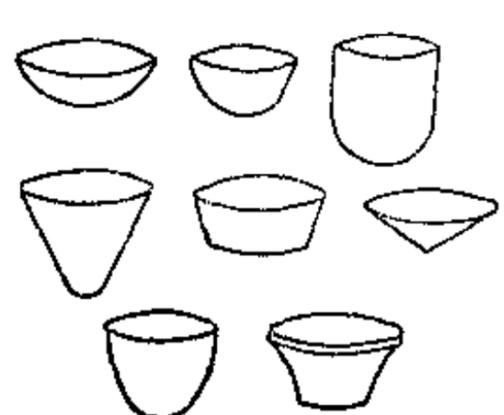
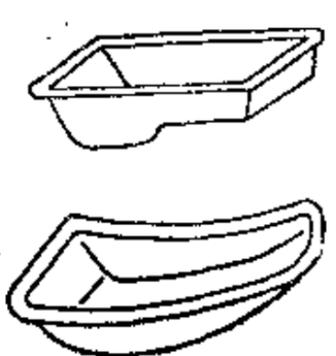


图7-1 拉深过程

1—凸模 2—压边圈 3—毛坯 4—凹模

表7-1 拉深零件的分类 (按变形特点)

拉深件名称		拉深件简图	变形特点
直 壁 类 拉 深 件	轴对称零件	<p>圆筒形件</p> <p>带法兰边圆筒形件</p> <p>阶梯形件</p> 	<p>1.拉深过程中变形区是毛坯的法兰边部分,其他部分是传力区,不参与主要变形;</p> <p>2.毛坯变形区在切向压应力和径向拉应力的作用下,产生切向压缩与径向伸长的一向受拉一向受压的变形;</p> <p>3.极限变形参数主要受到毛坯传力区的承载能力的限制</p>
	非轴对称零件	<p>盒形件</p> <p>带法兰边的盒形件</p> <p>其他形状的零件</p> 	<p>1.变形性质与前项相同,差别仅在于一向受拉一向受压的变形在毛坯的周边上分布不均匀,圆角部分变形大,直边部分变形小;</p> <p>2.在毛坯的周边上,变形程度大与变形程度小的部分之间存在着相互影响与作用</p>
	轴对称零件	<p>曲面法兰边的零件</p> 	<p>除具有与前项相同的变形性质外,还有下边几个特点:</p> <p>(1)因为零件各部分的高度不同,在拉深开始时有严重的不均匀变形;</p> <p>(2)拉深过程中毛坯变形区内还要发生剪切变形</p>
曲 面 类 拉 深 件	轴对称零件	<p>球面类零件</p> <p>锥形件</p> <p>其他曲面零件</p> 	<p>拉深时毛坯的变形区由两部分组成:</p> <p>(1)毛坯的外周是一向受拉一向受压的拉深变形区;</p> <p>(2)毛坯的中间部分是受两向拉应力作用的胀形变形区</p>
	非轴对称零件	<p>平面法兰边零件</p> <p>曲面法兰边零件</p> 	<p>1.拉深毛坯的变形区也是由外部的拉深变形区与内部的胀形变形区所组成,但这两种变形在毛坯周边上的分布是不均匀的;</p> <p>2.曲面法兰边零件拉深时,在毛坯外周变形区内还有剪切变形</p>

究同一类型拉深件的冲压成形问题。对不同类型的拉深零件，虽然它们的成形过程在生产中都习惯地叫做拉深，但是，它们在变形上有根本性的差别，所以出现的质量问题的形式和解决的方法，以及工艺参数的含义和确定的原则等也不一样，必须分别处理。

7-2 圆筒形零件拉深时的变形特点

在拉深过程中，毛坯各部分的受力情况与变形情况都是不同的，而且随着拉深过程的进展也在变化。为了说明这个问题，假想地取出拉深前平板毛坯上的一个扇形部分（图 7-2 a），并研究这部分毛坯在拉深过程中的变形特点。

在冲头力的作用下，平板毛坯逐渐地被压入凹模，并形成圆筒的形状。此时直径为 d ，并与冲头端面相接触的部分毛坯，即扇形毛坯的 OC_0D_0 部分，在全部拉深过程中始终保持其平面形状，而且这部分毛坯基本上不产生塑性变形或者只产生不大的塑性变形，所以有人近似地称这部分是弹性变形区。在筒形件拉深时，这部分毛坯起力的传递作用，由它把接受到的冲头作用力传给毛坯的圆筒形的侧壁，使其中产生轴向的拉应力，而本身的受力情况相当于周边受均匀拉力的圆板，是双向受拉的应力状态（图 7-3）。

在拉深时形成的圆筒形的侧壁部分 $C'D'E'F'$ （图 7-2 b），是已经经历过而且结束了自己的塑性变形阶段的已变形区，它是由平板毛坯的 $C_0D_0E_0F_0$ 部分转化而成的。在以后的拉深过程中，这个已成形部分也是起力的传递作用，把冲头的作用力传到平面法兰部分 $A'B'E'F'$ ，并使其内部产生足以引起拉深变形的径向拉应力 σ_r （图 7-3）。平面法兰部分 $A'B'E'F'$ 是拉深时的变形区，在径向拉应力的作用下产生塑性变形并向中心移动，逐渐地进入凸模与凹模形成的间隙里，最终形成零件的圆筒形侧壁，即图 7-2 c 中的 $ABCD$ 部分。

拉深变形区在向冲模中心移动时，其圆周方向上的尺寸也随着减小，这时它受到相邻部分金属的作用，其作用与在两个斜面间受拉力作用而变形的金属相似，因而在圆周方向上产生切向的压应力 σ_θ （图 7-4）。

从上面的分析可知，拉深变形区处于径向受拉和切向受压的应力状态。又从图 7-2 可以看出，在拉深后毛坯在圆周方向上（即切向）产生压缩变形，其外边缘由初始长度 $R_0\alpha$ 缩

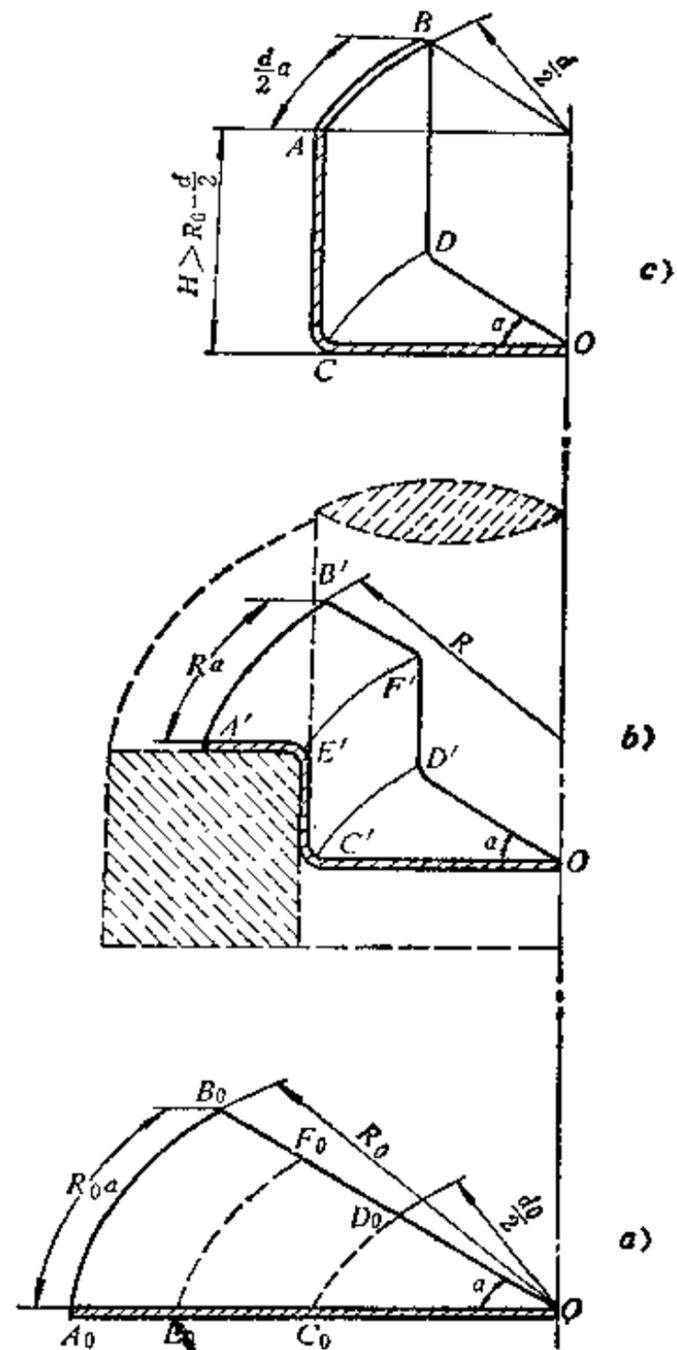


图7-2 拉深时毛坯的变形特点

a—从平板毛坯中分割出的扇形部分 b—扇形毛坯在拉深中的变形 c—拉深结束后扇形毛坯已转变为成品零件的一部分

小成为 $\frac{d}{2} \alpha$ ；而在径向则产生伸长变形，由毛坯的初始尺寸 $R_0 - \frac{d_0}{2}$ 变成为成品零件的高度

$$H > R_0 - \frac{d_0}{2}$$

在拉深时，板料的厚度也发生变化，由应力与应变关系式 (2-1) 或 (2-2) 可见，厚度方向上的变形决定于径向拉应力 σ_1 与切向压应力 σ_3 之间的比例关系。在拉深变形区内各点上 σ_1 与 σ_3 之间的比例是变化的，而且 σ_1 与 σ_3 又受许多因素，如变形程度、材料性能、模具的几何形状、润滑等的影响，所以对厚度方向变形的分析是相当复杂的，不过在一般情况下拉深零件厚度变化的大致规律，可以从图 7-5 中看出。在圆形件的侧壁上部厚度增加的最多，约为 18%，而在靠近底部圆角部位上板料厚度最小，厚度减小了将近 9%，所以这里是拉深时最容易被拉断的危险部位。

在拉深过程中毛坯内各部分之间的受力关系，如图 7-6 所示。由凸模作用力 P 引起的毛坯侧壁内的拉应力 p 沿圆周均匀分布，其数值大小应能引起拉深变形区——毛坯的法兰部分产生变形。拉应力 p 的数值，除应克服变形区的变形阻力 σ_1 、变形区上下两个表面上的摩擦力 μQ 引起的摩擦阻力 σ_w 外，还必须考虑到毛坯在凹模圆角表面上滑动所形成的摩擦损失和弯曲变形所形成的附加阻力。为克服上述各种阻力所必须的拉应力 p 的数值为：

$$p = -\frac{p}{\pi d_p t} = (\sigma_1 + \sigma_w) e^{\frac{\mu \pi}{2}} + \sigma_w \quad (7-1)$$

式中 σ_1 ——是为使拉深变形区产生塑性变形所必需的径向拉应力，其值决定于板材的机械性能和拉深时的变形程度；

σ_w ——是为克服由于压边力 Q 所引起的毛坯与压边圈和凹模表面之间的摩擦阻力必须增加的拉应力部分，其值为 $\sigma_w = \frac{2\mu Q}{\pi d_p t}$ ；

σ_w ——是为克服毛坯沿凹模圆角运动所引起的弯曲阻力而必须增加的拉应力部分，其值可近似

$$\text{地取为 } \frac{\sigma_b}{2 \frac{R_d}{t} + 1}；$$

$e^{\frac{\mu \pi}{2}}$ ——是考虑毛坯沿凹模圆角滑动时产生的摩擦阻力系数；

μ ——是摩擦系数。

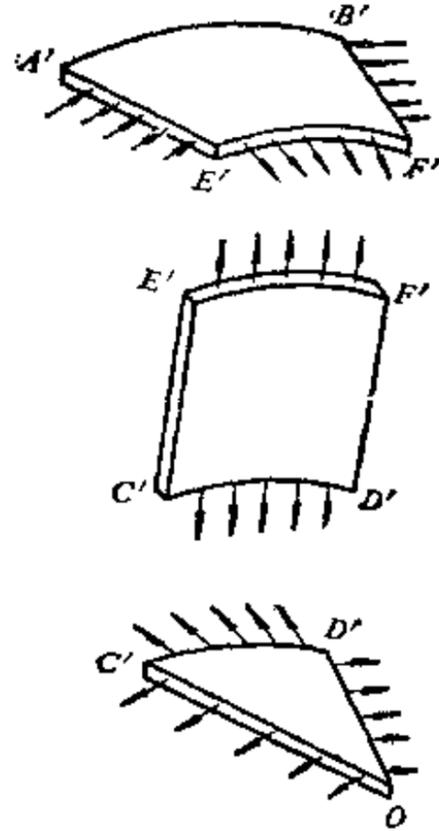


图7-3 拉深时毛坯内各部分的内应力

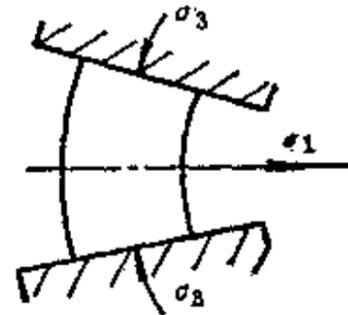


图7-4 切向压应力的产生

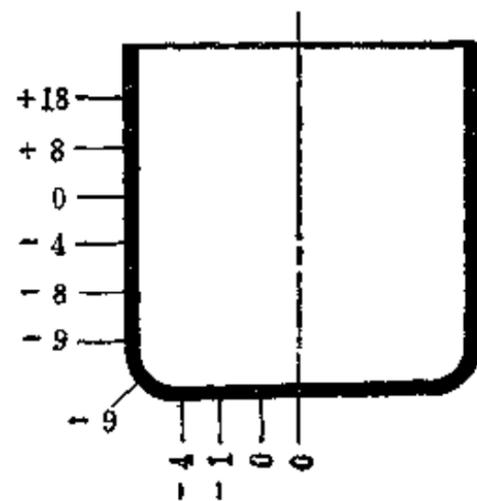


图7-5 圆筒形拉深件壁厚变化的变化 (%)

因为 $e^{\frac{\mu\pi}{2}} \approx 1 + \frac{\mu\pi}{2} \approx 1 + 1.6\mu$

所以 (7-1) 式可写成如下形式:

$$p = (\sigma_1 + \sigma_m)(1 + 1.6\mu) + \sigma_w \quad (7-2)$$

在变形区内宽度为 dR , 所含角度为 φ 的弧形条状金属的平衡条件是:

$$\sigma_1 R \varphi t + d(\sigma_1 R \varphi t) - \sigma_1 \varphi R t + 2\sigma_3 t \sin \frac{\varphi}{2} dR = 0$$

因为所取的角度 φ 很小, 所以有:

$$\sin \frac{\varphi}{2} \approx \frac{\varphi}{2}$$

代入上式并整理可得:

$$R d\sigma_1 + (\sigma_1 + \sigma_3) dR = 0 \quad (7-3)$$

根据塑性条件有:

$$\sigma_1 + \sigma_3 = \beta \sigma_s \quad (7-4)$$

考虑中间主应力影响的系数 β 之值, 这里可以近似地取为 $\beta = 1.1$ 。将 (7-4) 中的 $\sigma_1 + \sigma_3$ 之值代入 (7-3) 式得:

$$R d\sigma_1 + 1.1\sigma_s dR = 0 \quad (7-5)$$

及 $d\sigma_1 = -1.1\sigma_s \frac{dR}{R} \quad (7-6)$

积分上式得:

$$\sigma_1 = -1.1 \int \sigma_s \frac{dR}{R} \quad (7-7)$$

上式中 σ_s 是毛坯变形区内不同部位金属的变形抗力。由于变形区内不同部位上金属所经历的变形程度不同, 所以由于冷变形硬化的作用, 使变形区各点上金属的 σ_s 也不相同。但是, 为了计算方便, 可以近似地取 $\sigma_s = \sigma_{sm}$ 为一常量。 σ_{sm} 是不同部位上金属变形抗力的平均值。于是可得式 (7-7) 的另一形式:

$$\sigma_1 = -1.1\sigma_{sm} \int \frac{dR}{R} \quad (7-8)$$

积分上式得

$$\sigma_1 = -1.1\sigma_{sm} \ln R + c \quad (7-9)$$

当 $R = R'$ 时, 在毛坯变形区外边缘自由表面上径向拉应力的数值为零, 即 $\sigma_1 = 0$, 代入式 (7-9) 得出积分常数 c 值为:

$$c = 1.1\sigma_{sm} \ln R' \quad (7-10)$$

将 c 值代入式 (7-9), 即可得出径向拉应力 σ_1 的数值为:

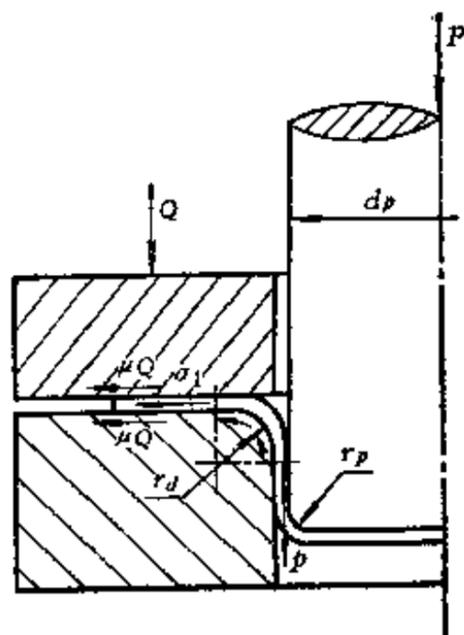


图7-6 拉深毛坯内各部分的受力关系

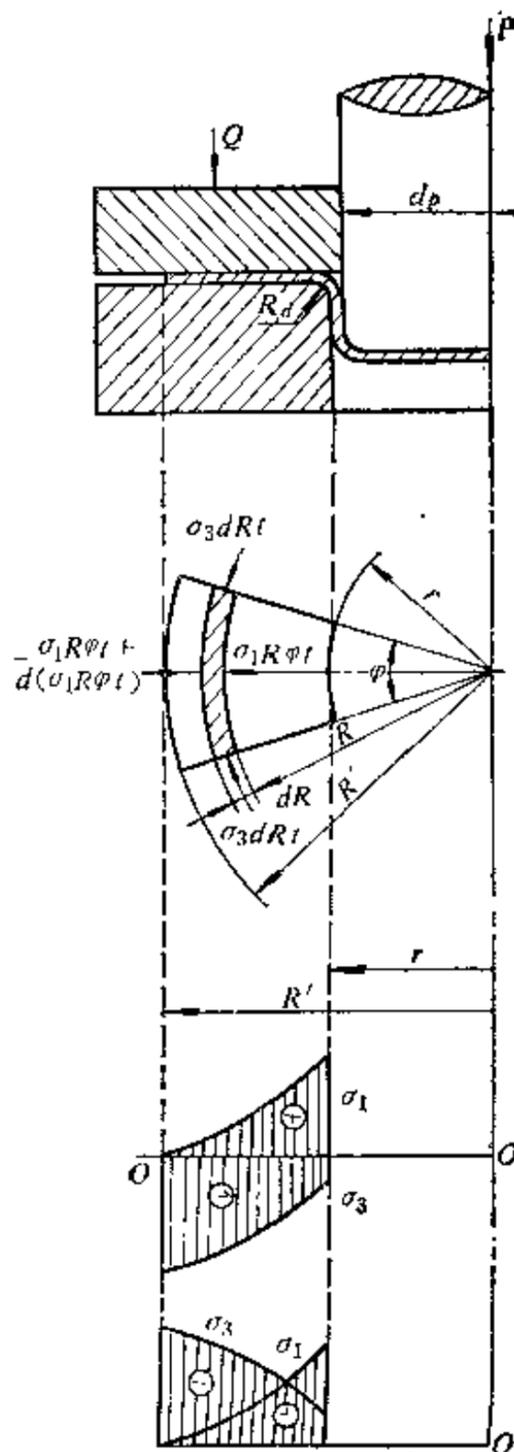


图7-7 圆筒形件拉深时的应力分析

$$\sigma_1 = 1.1\sigma_{sm} \ln \frac{R'}{R} \quad (7-11)$$

利用 (7-4)、(7-11) 二式, 并认为 $\sigma_s = \sigma_{sm}$ 时, 可以得出切向压应力 σ_3 的数值为:

$$\sigma_3 = 1.1\sigma_{sm} \left(1 - \ln \frac{R'}{R} \right) \quad (7-12)$$

由式 (7-11) 及 (7-12) 可以得出圆筒形零件拉深时毛坯变形区内径向拉应力 σ_1 与切向压应力 σ_3 的分布曲线 (图 7-7)。由图可见, 在变形区内几乎在全部宽度上切向压应力的绝对值都大于径向拉应力, 所以圆筒形零件的拉深是压缩类成形。在变形区外边缘上切向压应力 σ_3 最大, 而在变形区内边缘上径向拉应力 σ_{1r} 最大, 其值为:

$$\sigma_{1r} = 1.1\sigma_{sm} \ln \frac{R'}{r} \quad (7-13)$$

利用式 (7-13) 可以求出拉深过程中任意瞬间 (不同的外径 R') 作用在变形区内边缘上的径向拉应力 σ_{1r} 的数值, 在拉深开始时其值应为:

$$\sigma_{1r_0} = 1.1\sigma_{sm} \ln \frac{D_0}{d_p} \quad (7-14)$$

式中 D_0 ——变形前毛坯的初始直径;

d_p ——凸模的直径。

一般称 $m = \frac{d_p}{D_0}$ 为拉深系数, 即为拉深零件的直径与毛坯的初始直径的比值, 它是一个很重要的工艺参数, 也是设计模具和工艺计算的根据。将 $m = \frac{d_p}{D_0}$ 之值代入式 (7-14) 得:

$$\sigma_{1r_0} = 1.1\sigma_{sm} \ln \frac{1}{m} \quad (7-15)$$

分析上式可知, 毛坯变形区内边缘上的径向拉应力 σ_1 的数值决定于材料的机械性能 (变形抗力 σ_s 及硬化性能 n 等) 和拉深系数的数值, 而且拉深系数 m 越小, 径向拉应力的数值越大。

将 σ_1 、 σ_s 与 σ_w 之值代入式 (7-2) 可得拉深时所必需的拉应力 P :

$$P = \left(1.1\sigma_{sm} \ln \frac{R'}{r} + \frac{2\mu Q}{\pi d_p t} \right) (1 + 1.6\mu) + \frac{\sigma_b}{2 \frac{R_d}{t} + 1} \quad (7-16)$$

从上式可得出拉深时所需力 P 的公式:

$$P = \pi d_p t p \quad (7-17)$$

分析式 (7-16) 及 (7-17) 可知, 拉深力决定于拉深系数、材料的机械性能、零件的尺寸、凹模的圆角半径、润滑等等。上述的计算拉深力的理论公式, 在实用上并不方便, 所以在生产中常用经验公式计算。虽然在经验公式里许多因素被忽略, 因而是不是十分准确的, 可是在生产中的应用却很广泛。计算拉深力的经验公式很多, 这里介绍一种常用的形式:

第一次拉深力:

$$P_1 = \pi d_1 t \sigma_b K_1 \quad (7-18)$$

第二次及以后各次拉深力:

$$P_2 = \pi d_2 t \sigma_b K_2 \quad (7-19)$$

式中 d_1 与 d_2 ——分别为拉深后零件的直径；

σ_s ——材料的强度；

K_1 与 K_2 ——系数，其值可查表 7-2 及 7-3（适用于低碳钢）。

表7-2 系数 K_1 之值

毛坯的相对厚度 $\frac{t}{D_0} \times 100$	拉 深 系 数									
	0.45	0.48	0.50	0.52	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
5	0.95	0.85	0.75	0.65	0.60	0.50	0.43	0.35	0.28	0.20
2	1.1	1.0	0.90	0.80	0.75	0.60	0.50	0.42	0.35	0.25
1.2		1.1	1.0	0.90	0.80	0.68	0.56	0.47	0.37	0.30
0.8			1.1	1.0	0.90	0.75	0.60	0.50	0.40	0.33
0.5				1.1	1.0	0.82	0.67	0.55	0.45	0.36
0.2					1.1	0.90	0.75	0.60	0.50	0.40
0.1						1.1	0.9	0.75	0.60	0.50

表7-3 系数 K_2 之值

毛坯的相对厚度 $\frac{t}{D_0} \times 100$	拉 深 系 数									
	0.70	0.72	0.75	0.78	0.80	0.82	0.85	0.88	0.90	0.92
5	0.85	0.70	0.60	0.50	0.42	0.32	0.28	0.20	0.15	0.12
2	1.1	0.90	0.75	0.60	0.52	0.42	0.32	0.25	0.20	0.14
1.2		1.1	0.90	0.75	0.62	0.52	0.42	0.30	0.25	0.16
0.8			1.0	0.82	0.70	0.57	0.46	0.35	0.27	0.18
0.5			1.1	0.90	0.76	0.63	0.50	0.40	0.30	0.20
0.2				1.0	0.85	0.70	0.56	0.44	0.33	0.23
0.1				1.1	1.0	0.82	0.68	0.55	0.40	0.30

在前边已经对拉深时毛坯的主要变形区做了初步的分析。但是，拉深毛坯在凹模与凸模圆角区的变形也是不能忽略的，它对拉深过程的进行以及对拉深零件质量的影响是十分显著的。拉深毛坯在进入凹模圆角区以前具有平面形状。毛坯进入凹模圆角区时，在径向拉应力 σ_r 的作用下（相当于拉弯变形）于纵向剖面内产生弯曲变形，被弯曲成曲率半径 r_d （图 7-8）。

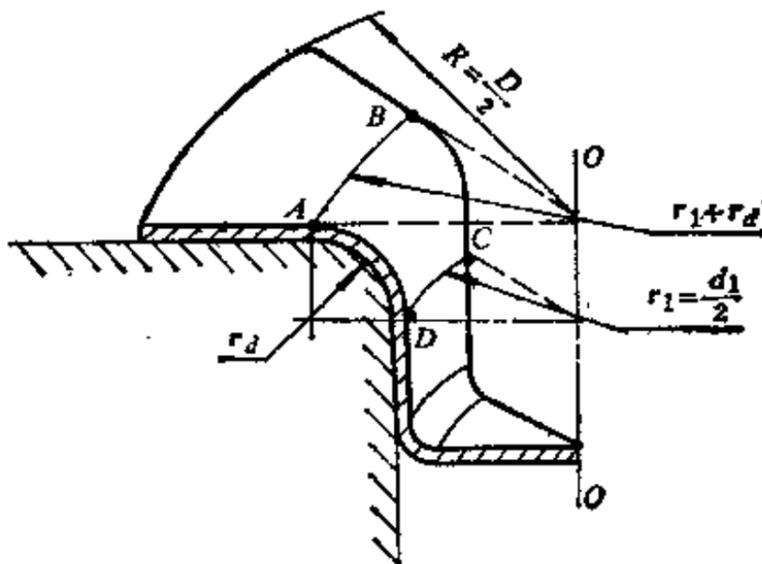


图7-8 凹模圆角区内毛坯的变形

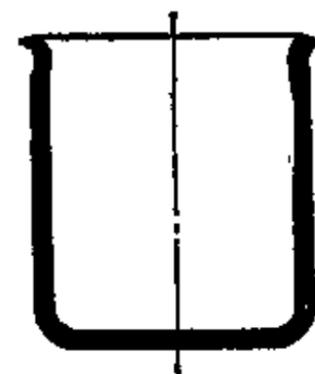


图7-9 弯曲变形引起的拉深件形状畸变

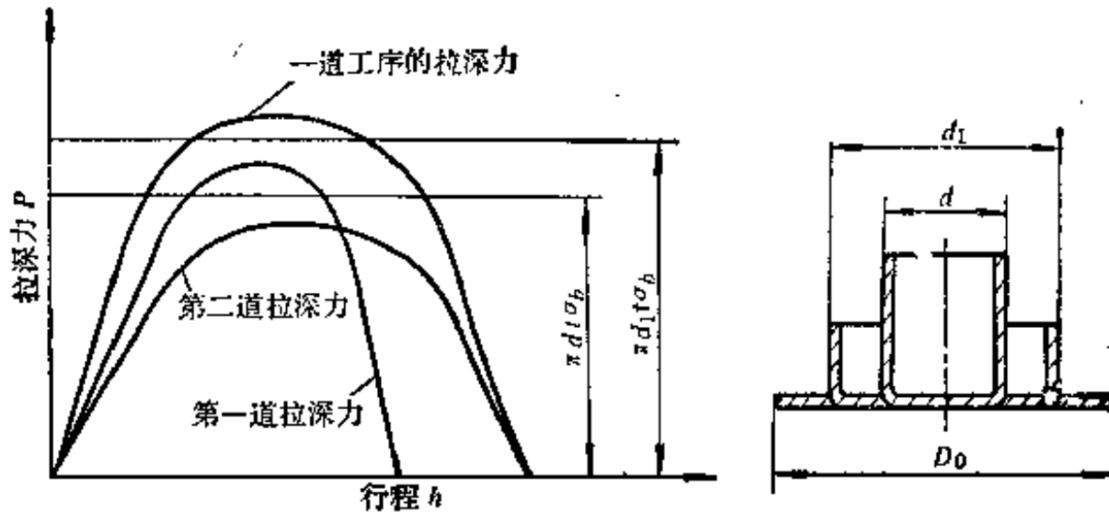


图7-13 多道工序拉深时力的关系

一般说来，板材的塑性好、组织均匀、晶粒大小适当、屈强比小、板平面方向性小而板厚方向性系数 r 值大时，板料的拉深性能好，可以采用较小的极限拉深系数。当毛坯的相对厚度小时，容易起皱，而且防皱压板力引起的摩擦阻力相对地增大，因此极限拉深系数也大。冲头的圆角半径过小时，在毛坯的圆筒形部分与底部的过渡区的弯曲变形加大，使危险断面的强度受到进一步的削弱，故对极限拉深系数有不利的影响。凹模的圆角半径过小时，毛坯沿凹模圆角滑动的阻力增加，因而毛坯侧壁内的拉应力也必须相应地加大，其结果也是提高了极限拉深系数的数值。

把前边所讲的各种因素对极限拉深系数的影响归纳起来，可以得出这样的结论：凡是能增加毛坯筒形侧壁内拉应力及减小危险断面强度的因素均使极限拉深系数增大；与此相反，凡是可以降低为使变形区处于塑性状态而必须的作用于毛坯侧壁内的拉应力及增加危险断面强度的因素，都有助于使变形区成为相对的弱区，所以能够降低极限拉深系数。例如在生产中时常采用的拉深毛坯的单面润滑法，即只在毛坯与凹模接触表面上涂抹润滑剂的方法，就是基于这个道理。

表 7-4 是用实验方法求得的适用于低碳钢板的极限拉深系数。表中的 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 及 m_5 分别是第一道、……第五道拉深工序的极限拉深系数。应当说明，表中所列的数值适用于一般的情况，而对某些特殊情况，表中数值要经过修正。例如当毛坯的相对厚度 $\frac{t}{D_0}$ 较大，由于毛坯不易起皱，而允许采用不带压边圈的锥形凹模时，极限拉深系数 m_1 之值可以大幅度的降低，有时甚至可能低于 0.4。

表7-4 极限拉深系数值

拉深系数	毛坯的相对厚度 $\frac{t}{D_0} \times 100$					
	0.08~0.15	0.15~0.30	0.30~0.60	0.60~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
m_1	0.63	0.60	0.58	0.55	0.53	0.50
m_2	0.82	0.80	0.79	0.78	0.76	0.75
m_3	0.84	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78
m_4	0.86	0.85	0.83	0.82	0.81	0.80
m_5	0.88	0.87	0.80	0.85	0.84	0.82

在进行冲压工艺过程设计时，知道极限拉深系数后，就可以根据圆筒形零件的尺寸和平板毛坯的尺寸，从第一道拉深工序开始逐步地而后推算，结果即可求出所需的拉深工序数和

时，允许用相对厚度较小的毛坯而不致起皱。用锥形凹模拉深时，毛坯的过渡形状如图 7-15 所示。与平面环形的毛坯变形区相比（指用普通平端面凹模拉深），这种曲面形状的毛坯变形区具有更大一些的抗失稳能力，结果是减小了起皱的趋向。

另外，用锥形凹模拉深时，由于建立了对拉深变形极为有利的条件：如凹模圆角半径造成的摩擦阻力和弯曲变形的阻力都减到很低的程度；凹模锥面对毛坯变形区的作用力也有助于使它产生切向压缩变形等等，拉深所需的冲头作用力比平端面凹模时要小的多，因此，可以采用很小的拉深系数。

从不容易起皱的要求来看，锥形凹模的角度应取 $30^\circ \sim 60^\circ$ ，而从减小拉深力出发，凹模的角度应为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。为了兼顾这两方面的要求，在生产中通常采用 30° 的锥角。

在设计工艺过程时，必须判断某一零件在拉深过程中是否会发生起皱现象。如果该零件拉深时，毛坯不致起皱，则应当采用结构简单的不带压边装置的冲模，这时也可以考虑用较小的拉深系数。准确地判断拉深时毛坯是否起皱，是个相当复杂的问题，在生产中可以利用下边的公式做概略的估计。

用锥形凹模拉深时，毛坯不致起皱的条件是：

$$\frac{t}{D_0} \geq 0.03(1 - m) \quad (7-23)$$

或者 $\frac{t}{d} \geq 0.03(K - 1) \quad (7-24)$

用普通的平端面凹模拉深时，毛坯不致起皱的条件是：

$$\frac{t}{D_0} \geq (0.09 \sim 0.17)(1 - m) \quad (7-25)$$

或者 $\frac{t}{d} \geq (0.09 \sim 0.17)(K - 1) \quad (7-26)$

式中 t —— 板料的厚度；
 d —— 拉深件的直径；
 D_0 —— 毛坯的直径；

$$m = \frac{d}{D_0} \text{ —— 拉深系数；}$$

$$K = \frac{1}{m} = \frac{D_0}{d} \text{ —— 拉深程度，也叫拉深比。}$$

假如拉深零件的尺寸和拉深系数的数值关系不符合上边的条件时，则在拉深过程中毛坯的变形区就会起皱。在这种情况下，必须用防皱压板（或称压边圈）把毛坯的起皱部分紧紧

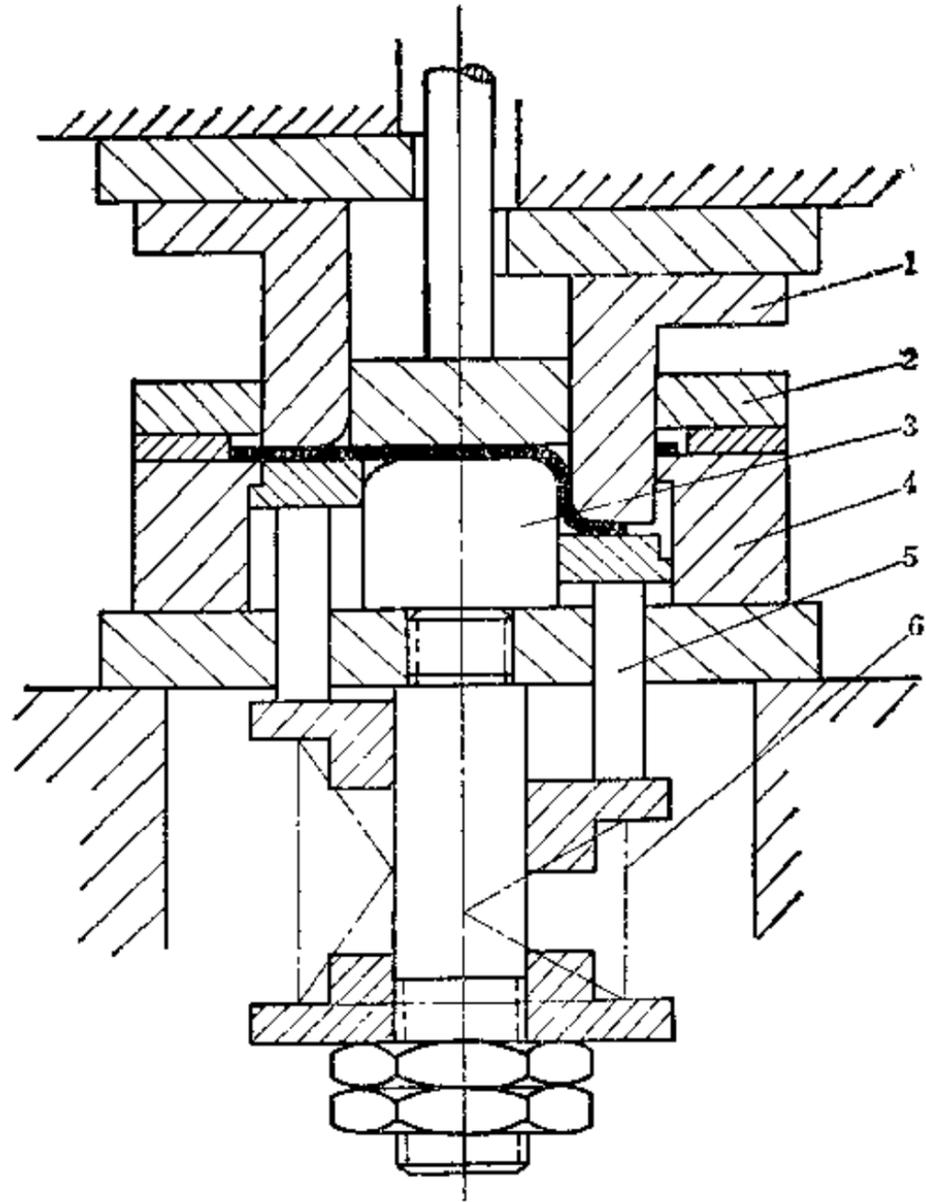


图7-16 单动冲床用拉深模弹性压边原理

1—冲裁凸模兼拉深凹模 2—卸料板 3—拉深凸模 4—冲裁凹模 5—顶杆 6—弹簧

地压在凹模平面上，并使毛坯在压边圈与凹模平面之间的缝隙中通过，用这种办法制止毛坯的起皱现象。

防皱压边圈的结构形式很多，但总括起来可以分为用于双动冲床的刚性压边圈和用于单动冲床的弹性压边圈，后者包括有以弹簧的作用防止起皱的弹簧垫、借助于压缩空气的作用或空气液压联动作用的气垫。上述两种防皱装置的工作原理，如图7-16及7-17所示。

防皱压边圈的作用力，应在保证毛坯的法兰部分不致起皱的前提下，选取尽量小的数值。防皱压力能够引起毛坯法兰部分与凹模平面和压边圈表面之间的摩擦阻力，而如果这项摩擦阻力过大，就可能引起毛坯的破裂。为了使防皱装置能可靠地工作，通常取防皱压力 Q 之值稍大于防皱作用所需的最低值，并可用下式求得：

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - d^2) q \quad (7-27)$$

式中 Q ——防皱压边圈的作用力；

D_0 ——毛坯的直径（毫米）；

d ——拉深零件的直径（毫米）；

q ——防皱单位压力（牛/毫米²），其值决定于板料的机械性能（ σ_s 与 σ_s ）、拉深系数、板料的相对厚度和润滑等。一般

说来，当板料的强度高、相对厚度小、拉深系数小时，必需的最小防皱单位压力 q 较大，反之， q 值较小。在生产中可以参考表7-5选取单位压力 q 之值（适用于圆筒形拉深件）。

安装在双动冲床上的刚性压边圈的工作原理，如图7-17所示。拉深冲头固定在冲床内

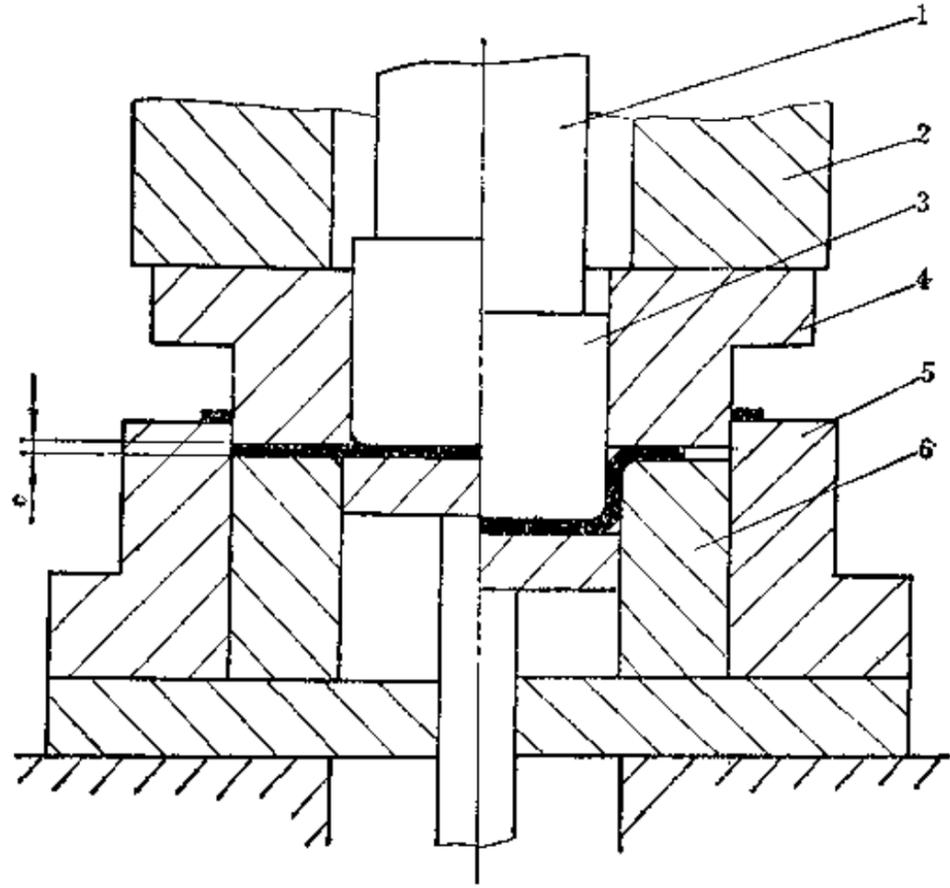


图7-17 双动冲床用拉深模刚性压边原理

1—内滑块 2—外滑块 3—拉深凸模 4—落料凸模兼压边圈 5—落料凹模 6—拉深凹模

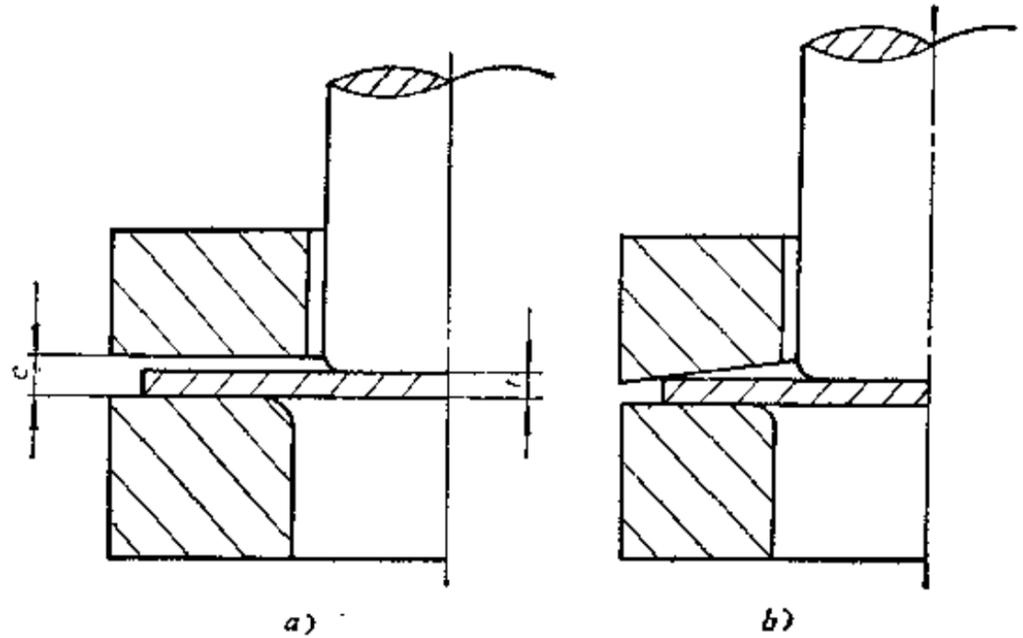


图7-18 刚性压边圈的结构形状

a—普通结构形状 b—锥面结构形状

表7-5 圆筒形零件拉深时的防皱单位压力 q 之值

材	料	牛/毫米 ²
铝		0.8~1.2
铜		1.2~1.8
黄铜		1.5~2.0
深拉深用钢：厚度大于0.5毫米		2.0~2.5
厚度小于0.5毫米		2.5~3.0
不锈钢		3.0~4.5

滑块上，而压边圈固定在外滑块上。在每次冲压行程开始时，外滑块带动压边圈下降，压在毛坯的外边缘上，并在此位置上停止不动，随后内滑块也带动冲头下降，并开始进行拉深变形。当冲压过程结束后，紧跟着内滑块的回升，外滑块也带动压边圈回复到最上位置。这时冲床工作台下部的顶出装置将零件由模具里推出。有时也利用外滑块完成拉深前的落料工作。

刚性压边圈的适当作用，并不是靠直接调整压力保证的，而是通过调整压边圈与凹模平面之间的间隙 c 获得的。考虑到毛坯的法兰边在拉深过程中产生的厚度增大现象，所以调整模具时，都要使这个间隙 c 略大于材料的厚度（图7-18a）。但是，由于冶金部门供应的板材厚度都有一定的公差，当用较薄的板料时，毛坯的边缘仍有可能产生轻微的起皱。为了克服这个弊病，可以把压边圈的工作面做成具有一定角度的锥面（图7-18b），而角度的大小应符合于拉深时板料增厚的规律。用锥形压边圈时，也能使冲模的调整工作得到一定程度的简化。但是，锥形压边圈的加工比较困难，所以应用的还不广泛。

图7-19是另一种形式的锥面刚性压边圈。在双动冲床的外滑块带动下，压边圈先使毛坯的法兰边部分变成锥形，并压紧在凹模的锥面上。随后凸模下降，并完成拉深工作。由于锥形压边圈使毛坯产生的变形，在某种程度上相当于完成了一道拉深工序，毛坯的外径已经有一定量的收缩，用这种结构时的极限拉深系数可能降低到很小的数值，甚至达到0.35。当然，锥形压边圈的有利作用，决定于角度 α 的大小，而且角度 α 越大，其作用越显著。但是，当毛坯的相对厚度较小时，用过大的角度 α ，在压边圈使毛坯外缘成形过程中，可能引起起皱现象。所以在厚度很薄的零件成形时，锥形压边圈的作用并不十分明显。表7-6中给出了角度 α 的数值和可能达到的极限拉深系数。在实际生产中应用时，要采取稍大于表中数值的极限拉深系数。

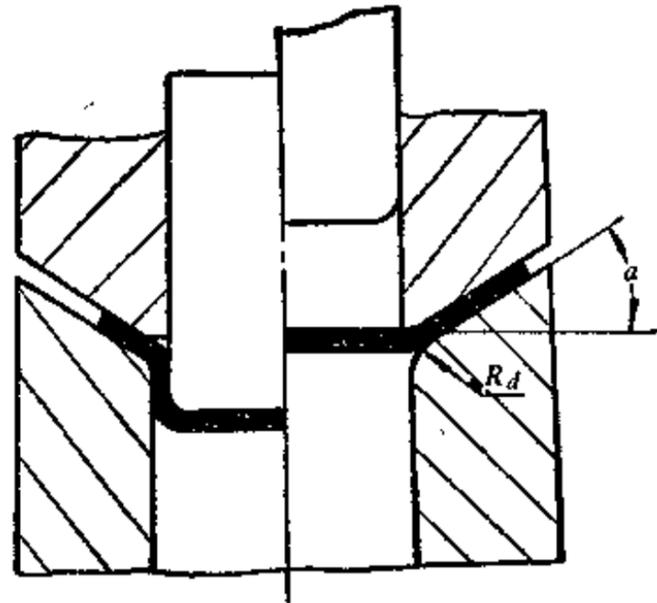


图7-19 刚性锥形压边圈的工作原理

表7-6 锥形刚性压边圈的角度和极限拉深系数

$\frac{t}{D_s}$	0.02	0.015	0.01	0.008	0.005	0.003	0.0015
m	0.35	0.36	0.38	0.40	0.43	0.50	0.60
α°	60	45	30	23	17	13	10

安装在单动冲床上的弹性压边装置如图 6-14 所示，弹簧的作用力通过顶杆传到压边圈上，并把毛坯的法兰边压紧，起防皱作用。用弹簧作动力时，压边力随冲头的下降而增大，所以它只适用于拉深高度不大的零件。用由压缩空气推动的气缸代替弹簧的作用，就成为供单动冲床上用的拉深气垫装置。用气垫时，压边力基本上不随冲头的行程而变化（压边力的变化可控制在 10~15% 以内），而且调整方便，所以它的应用也很广泛。

7-5 圆筒形零件用拉深模工作部分尺寸的确定

拉深模工作部分（凸模、凹模和压边圈）的结构形状和尺寸，不仅对拉深时毛坯的变形过程具有重要的影响，而且也是影响拉深件质量的重要因素。当拉深的方法，变形程度，零件的形状、尺寸与精度要求不同时，也要求拉深模工作部分具有不同的结构形状和尺寸。

当毛坯的相对厚度大，不用压边圈也可以拉深时，可以采用图 7-15 所示的锥形凹模或类似锥形的曲面凹模。

当毛坯的相对厚度较小，必须采用防皱压边圈时，应该采用图 7-20 所示的模具结构。图 7-20 a 所示的结构形式用于尺寸较小的圆筒形零件；而图 7-20 b 所示的结构形式，主要用于大型零件（直径大于 100 毫米）。

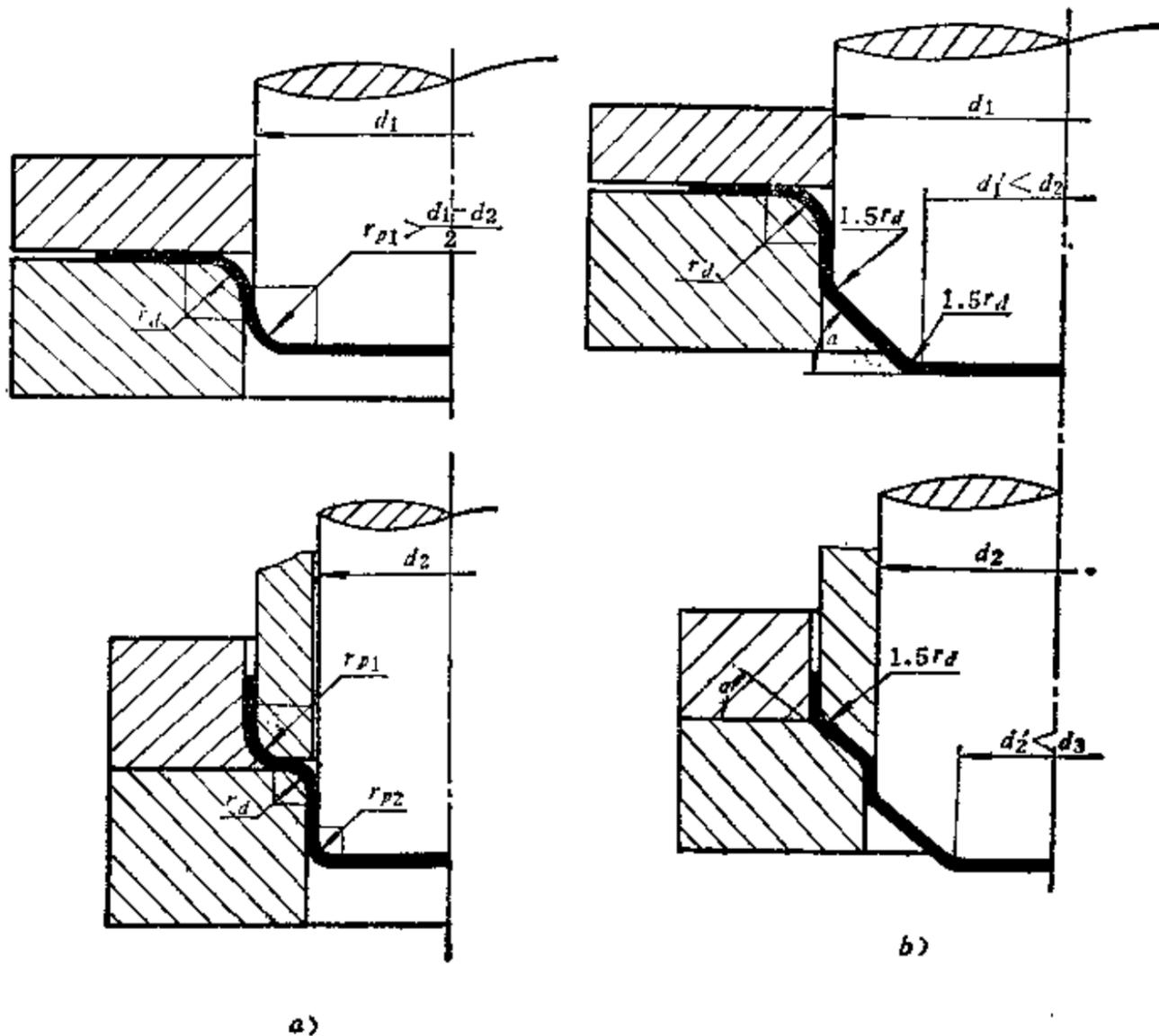


图 7-20 拉深模工作部分的结构形状与尺寸

a—圆角的结构形状 b—斜角的结构形状

采用图 7-20 b 的斜角形状的结构时，除具有一般的锥形凹模的特点外，还可能减轻毛坯

的反复弯曲变形，提高冲压件侧壁的质量。用这种结构时要使相邻的前后两道工序冲模的形状和尺寸具有正确的尺寸关系，要尽量做到前道工序制成的中间毛坯的形状有利于后继工序中的成形。压边圈与毛坯内表面接触的部分是工作部分，其形状和尺寸应与前道工序的凸模的相应部分相同。凹模锥面的角度 α 也要与前道工序的凸模的斜角相等。另外，为了减轻毛坯在拉深时的反复弯曲变形，提高零件的质量，应尽量地取前道工序凸模锥顶的直径小于后继工序凹模的直径，即 $d'_1 < d_2$ 。假如取 $d'_1 = d_2$ ，则在毛坯的A部可能产生不必要的反复弯曲(图7-21 a)，而当取 $d'_1 < d_2$ 时，这种不良现象就不再发生(图7-21 b)。但是，在最后一道拉深工序里，为了保证制成的零件底部平整，要按图7-22所示的尺寸关系进行设计。

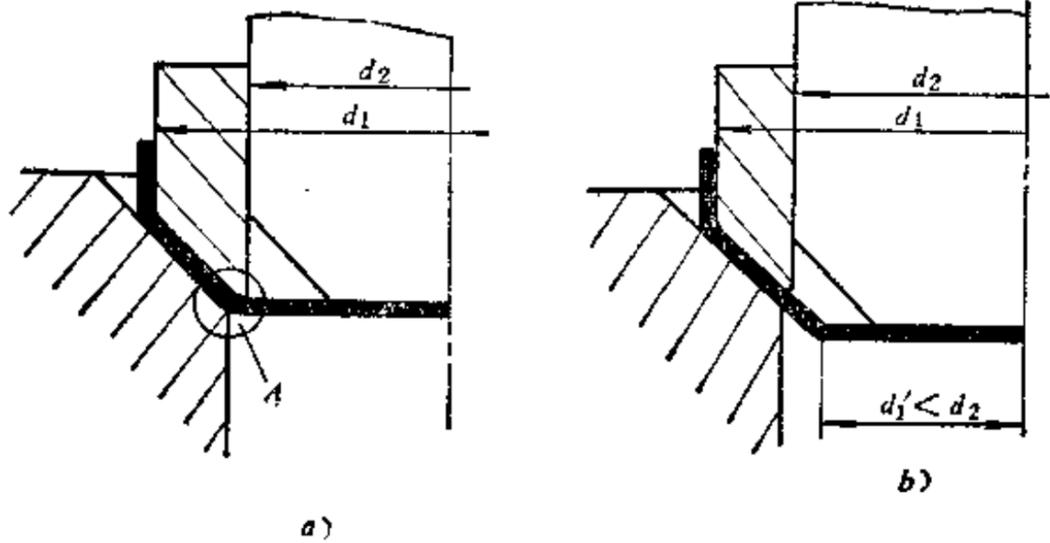


图7-21 斜角尺寸的确定

凸模与凹模的锥角 α 越大，对拉深变形越有利，但是，当毛坯的相对厚度比较小时，过大的 α 角可能引起毛坯的起皱。表7-7中的角度 α 的数值可以作为参考。

表 7-7

材料厚度 (毫米)	角 度 α°
0.5~1	30~40
1~2	40~50

凹模的圆角半径 r_n 对拉深过程有非常大的影响。在拉深过程中，板材在凹模圆角部位滑动时产生较大的弯曲变形。当由凹模圆角半径区进入直壁部分时，又被重新拉直，或者在通过凸模与凹模之间的间隙时受到校直作用。假如凹模的圆角半径过小，则板料在经过凹模圆角部位时的变形阻力与摩擦阻力以及在模具间隙里通过的阻力都要增大，结果势必引起总拉深力的增大和模具寿命的降低。例如，厚度为1毫米的软钢零件的拉深试验结果表明，当凹模圆角半径由6毫米减到2毫米时，拉深力增加将近一倍。因此，当凹模圆角半径过小时，必须采用较大的极限拉深系数。在生产中一般应尽量避免采用过小的凹模圆角半径。

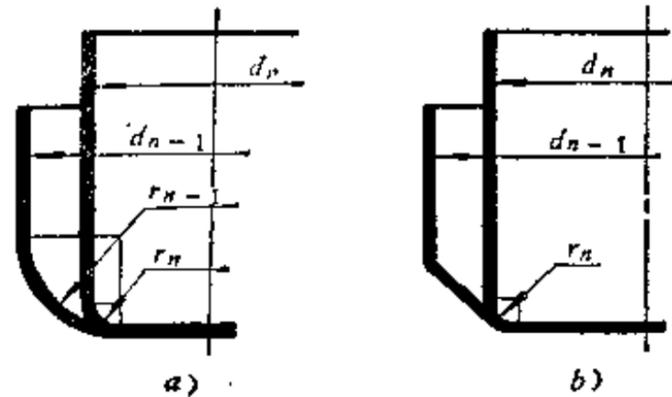


图7-22 最后拉深工序中毛坯底部尺寸的变化

凸模的圆角半径 r_p 过小时，毛坯在这个部位上受到过大的弯曲变形，结果降低了毛坯危险断面——底与直壁交接部分的强度，使极限拉深系数增大。另外，即使毛坯在危险断面不被拉裂，过小的凸模圆角半径也会引起危险断面附近毛坯厚度的局部严重变薄，而且这个局部变薄和弯曲的痕迹，在后来的拉深工序中，会在成品零件的侧壁上遗留下来，影响零件的质量。在多工序拉深时，后继工序的压边圈的圆角半径等于前道工序的凸模的圆角半径，所以当凸模的圆角半径过小时，在后继的拉深工序里毛坯沿压边圈的滑动阻力也要增大，这对拉深过程的进行也是不利的。所以过小的凹模与凸模的圆角半径都是不适宜的。

假如凸模与凹模的圆角半径过大，虽然可以降低拉深所需的力和增加毛坯危险断面的强度，为拉深变形提供更为有利的条件，但是，由于在拉深初始阶段处于压边圈作用之外，而且不与模具表面接触的毛坯宽度 ($r_d + r_p$) 加大，因而这部分毛坯很容易起皱。在拉深后期，过大的凹模圆角半径也会使毛坯外边缘过早地脱离压边圈的作用而起皱，尤其当毛坯的相对厚度小时，这个现象十分突出。因此，在设计模具时，应该根据具体条件选取适当的圆角半径。

凹模的圆角半径决定于拉深毛坯的厚度、成品零件的形状与尺寸、拉深方法等等，在一般情况下可按表 7-8 选取。在生产中，实际的情况是千变万化的，所以时常要根据具体条件对表中给出的数据做必要的修正。当毛坯相对厚度大而不用压边圈时，凹模的圆角半径还可以加大。当拉深时变形程度不大，即拉深系数较大时，可以适当地减小凹模的圆角半径。在实际设计工作中也可以先选取比表中略小一些的数值，然后在试模调整时，再逐渐地加大，直到冲成合格的零件。

表7-8 第一次拉深凹模的圆角半径*

拉 深 方 式	毛坯的相对厚度 $\frac{t}{D_0} \times 100$		
	2~1	1~0.3	0.3~0.1
不带法兰零件	(6~8) t	(8~10) t	(10~15) t
带法兰零件	(10~15) t	(15~20) t	(20~30) t

* 第二次拉深用凹模的圆角半径应取比表中值小20~40%，以后各次的减小量要小一些，取为10~30%。减小量的大小，视零件的尺寸而定，尺寸小的零件，减小量不能过大。

一般情况下，可以取凸模的圆角半径等于凹模的圆角半径。但是，凸模的圆角半径也应该保证冲成的中间毛坯的形状符合于后继工序的要求（图 7-20）。最后一道拉深用凸模的圆角半径应等于成品零件相应部位的内圆角半径。

拉深凹模与凸模直径之差的一半叫做间隙，即 $c = \frac{d_d - d_p}{2}$ 。如前所述，拉深模的间隙对由凹模圆角区出来的毛坯具有校直作用，所以它对拉深件的质量有较大的影响。当间隙过大时，对毛坯的校直作用小，冲成的零件侧壁不直，容易形成弯曲的形状，或者形成口大底小的锥形。当间隙过小时，虽然可能得到侧壁平直而光滑的高质量零件，但是，由于毛坯在通过间隙时产生的校直与变薄变形都需要较大的拉力，所以必须采用稍大一些的拉深系数，这当然是不利的；另一方面，间隙过小时，毛坯与模具表面之间的接触压力加大，也会增加模具的磨损。

拉深模的间隙数值，主要决定于拉深零件的形状、尺寸精度的要求、拉深方法等等。由于拉深过程中板材不可避免的有增厚现象（图 7-5），所以间隙的数值通常必须取得大于毛坯的原始厚度。除最后一道拉深工序外，都可以取较大的间隙，以利于拉深过程的进行。在

表7-9 拉深模间隙

材 料	间 隙		
	第 一 次 拉 深	中 间 各 次 拉 深	最 后 拉 深
软钢	(1.3~1.5) t	(1.2~1.3) t	1.1 t
黄铜、铝	(1.3~1.4) t	(1.15~1.2) t	1.1 t

一般情况下的圆筒形件拉深时，间隙值可按表 7-9 选取。当对冲压件的精度要求很低时，可取表中较大的数值；当对零件的质量要求很高时，也可以把表中的最后拉深工序的间隙取为 $1.05t$ ，这时的拉深力比一般情况可能增大 20%，所以必须加大拉深系数。

7-6 拉深件毛坯尺寸的确定

虽然在拉深过程中毛坯的厚度发生一些变化，但在设计工艺过程时，可以不计毛坯厚度的变化，概略地按拉深前后毛坯的面积相等的原则进行毛坯尺寸的计算。在这一节里主要讲解旋转体直壁拉深件的毛坯计算方法，至于其它复杂形状零件的毛坯计算方法，将分别在以后相应的章节中介绍。

旋转体零件的毛坯形状应该是圆形的，其直径按面积相等的原则计算。在进行计算时，首先应将拉深零件划分成若干个便于计算的组成部分，分别求出各部分的面积并相加后，即可得到零件的总面积 ΣF 。然后根据旋转体零件的总面积 ΣF 按下式计算出圆形毛坯的直径(图 7-23)：

$$D_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \Sigma F} \quad (7-28)$$

例如图 7-23 所示的圆筒零件，按便于计算的原则可以划分为三部分，每部分的面积分别为：

$$F_1 = \pi d(H - R)$$

$$F_2 = \frac{\pi}{4} [2\pi R(d - 2R) + 8R^2]$$

$$F_3 = \frac{\pi}{4} (d - 2R)^2$$

将三部分面积相加求得 $\Sigma F = F_1 + F_2 + F_3$ ，代入式 (7-28)，可得毛坯尺寸为：

$$D_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \left\{ \pi d(H - R) + \frac{\pi}{4} [2\pi R(d - 2R) + 8R^2] + \frac{\pi}{4} (d - 2R)^2 \right\}}$$

经整理后得：

$$D_0 = \sqrt{(d - 2R)^2 + 2\pi R(d - 2R) + 8R^2 + 4d(H - R)}$$

由于材料的性能和模具的几何形状等因素在不同的方向上存在着一定的差别，拉深后零件的边缘是不平齐的，尤其是经多次拉深工序所得的高度大的零件的边缘质量就更差，所以在大多数情况下必须加大零件的高度，拉深后经切边工序以保证零件的质量。切边余量 Δh 决定于板材的性能、拉深件的几何形状、拉深的次数等等。对于圆筒形零件，可参考表 7-10 选取。当拉深次数多（即 $\frac{H}{d}$ 大时）或板材的方向性大时，取表中较大的 Δh ，反之，取较小的 Δh 。

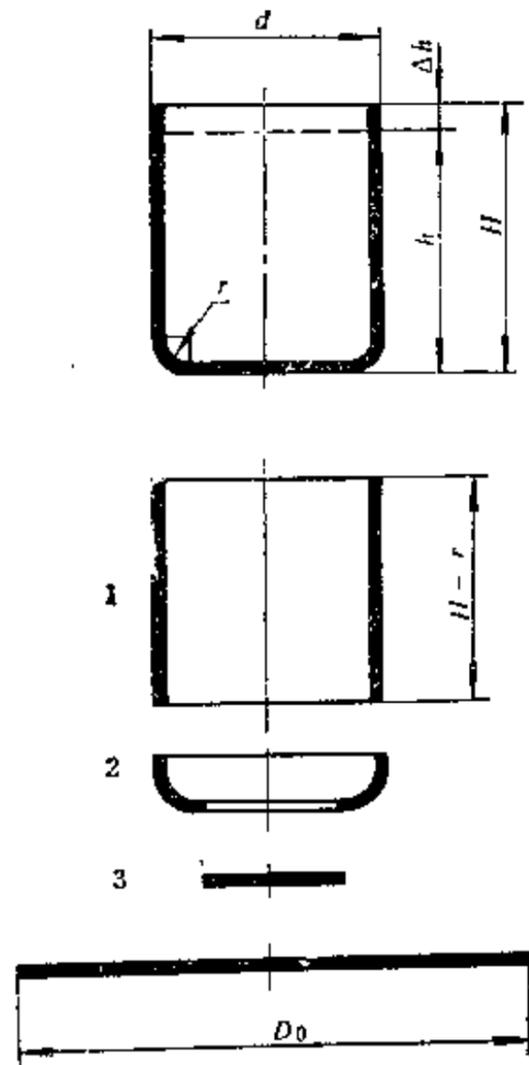


图 7-23 直壁旋转体拉深件毛坯尺寸计算

表7-10 圆筒形拉深件的切边余量 Δh

零件高度 H (毫米)	切边余量 Δh (毫米)
10~50	1~4
50~100	2~6
100~200	3~10
200~300	5~12

当零件的相对高度 $\frac{H}{d}$ 很小时,也可以不用切边工序,当然也不必再加切边余量。

应当说明,前述的毛坯计算方法是近似的,所以在实际应用时,还必须根据具体情况做必要的修正。事实上,拉深时毛坯的面积并不是不变的,相反,它是受材料的机械性能(如 σ_s 、 σ_b 、 δ 、 r 值等)、模具的几何形状(如凹模圆角半径 r_d 、拉深筋等)、润滑、零件的几何形状、拉深系数等多种因素的影响而产生相当大的变化。例如在球形零件或其它曲面零件拉深时,毛坯的面积可能增大3~8%,当然这时就应适当地减小毛坯的尺寸。

7-7 反拉深

由第二道拉深工序开始,便有可能用反拉深方法进行冲压。图7-24是反拉深的原理。从图中可以看出,反拉深与正拉深的差别,在于凸模对毛坯的作用方向正好相反。反拉深时,冲头从毛坯的底部反向压下,并使毛坯表面翻转,内表面成为外表面。因毛坯的相对厚度不同,反拉深时也有用压边和不用压边两种形式。

有一些形状特殊的零件,如用普通的正拉深法加工,时常是很困难的,甚至是不可能的,这时如果采用反拉深法,则可能使加工难度大为降低。图7-25所示的零件,其形状很适合于反拉深法,和正拉深

方法相比,不仅可能减少工序数目,而且还能提高零件的质量。具有双重侧壁的零件,也只能用反拉深法加工,例如冲压的三角皮带轮的中间毛坯就是用图7-26所示的反拉深方法加工的。另外,在曲面零件的冲压时,反拉深也是常用的方法之一。

从毛坯的应力状态和变形的特点看,反拉深与正拉深没有本质上的差别。反拉深时,毛坯侧壁反复弯曲的次数少,引起材料硬化的程度比正拉深时低一些。但是,反拉深时凹模的圆角半径受到零件尺寸的限制,不能过大,其最大值不能超过 $\frac{d_1-d_2}{2 \times 2}$,所以反拉深法不适用

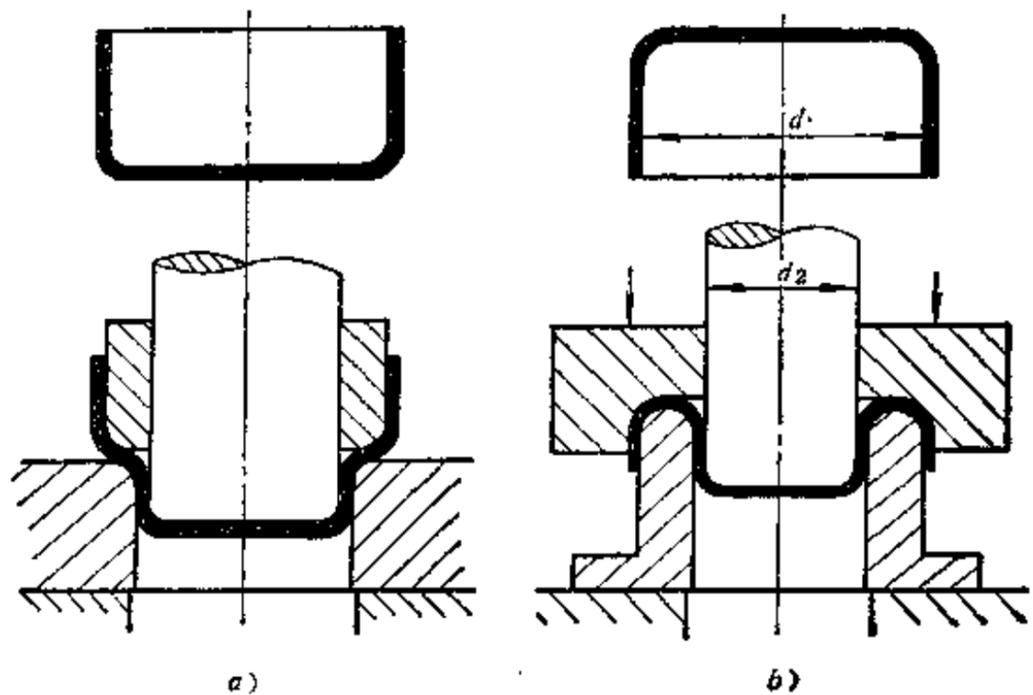


图7-24 反拉深与正拉深的比较

a—正拉深 b—反拉深

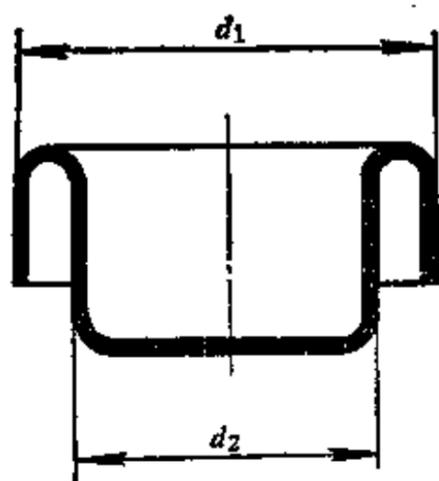


图7-25 适于反拉深的零件形状举例

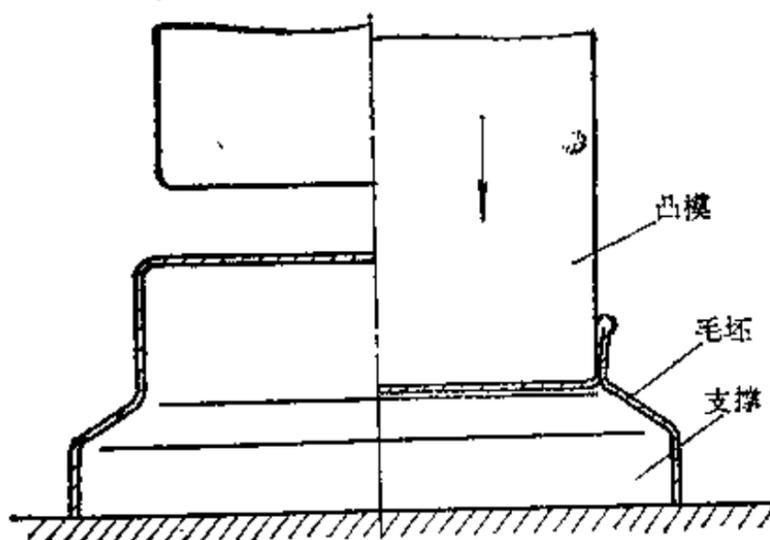


图7-26 无凹模的反拉深法

于直径小而厚度大的零件。正拉深时的拉深系数 $m = \frac{d_2}{d_1}$ 越大，拉深越容易，但在反拉深时的过大的拉深系数 $m = \frac{d_2}{d_1}$ 会使凹模的壁厚降低，这在强度上是不允许的。但是，图7-26所示的零件是个例外。虽然 $m = \frac{d_2}{d_1}$ 很大，并且达到了极限值，可是由于采用无凹模的反拉深法，以毛坯的外壁代替拉深凹模的功用，拉深变形也可以顺利完成。这种方法仅适用于毛坯的相对厚度小，而且板材的塑性较高的条件。

反拉深所需的力，比正拉深法要大10~20%。在一般情况下，可取拉深系数为0.75，基本上与正拉深时相同。

7-8 带法兰边零件的拉深方法

在冲压生产中带法兰边的拉深件是经常遇到的，它有时是成品零件，也有时是形状复杂的冲压件的一个过渡形状。虽然从变形区的应力状态和变形特点看，带法兰边零件与一般圆筒形件是相同的，但其在冲压加工中的成形过程和计算方法却有一定的差别。

带法兰边零件的拉深系数 m_f 用下式表示

$$m_f = \frac{d}{D_0} \quad (7-29)$$

式中 d ——零件筒形部分的直径 (图7-27)；
 D_0 ——毛坯直径，当零件的底部圆角半径与法兰根部圆角半径相等，而且均为 R 时，其值为：

$$D_0 = \sqrt{d_f^2 + 4dh} - 3.44dR \quad (7-30)$$

代入前式得：

$$m_f = \frac{d}{D_0} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{d_f}{d}\right)^2 + 4\frac{h}{d} - 3.44\frac{R}{d}}} \quad (7-31)$$

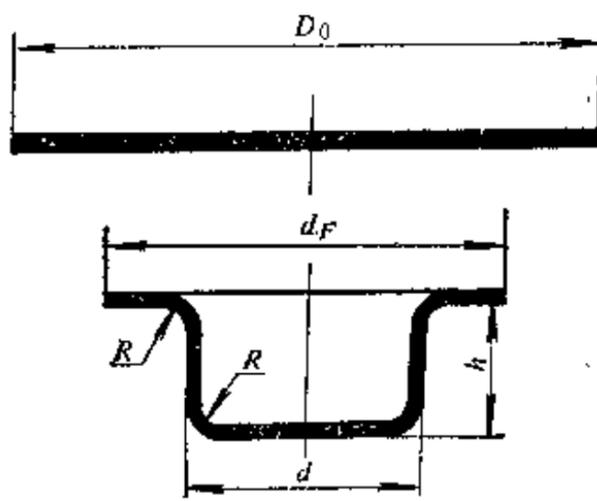


图7-27 带法兰边的拉深件与毛坯

由上式可见，带法兰边的圆筒形零件的拉深系数决定于三个尺寸因素：法兰边的相对直径 $\frac{d_f}{d}$ 、零件的相对高度 $\frac{h}{d}$ 和相对圆角半径 $\frac{R}{d}$ ，其中 $\frac{d_f}{d}$ 的影响最大，而 $\frac{R}{d}$ 的影响最小。法兰边的相对直径 $\frac{d_f}{d}$ 及相对高度 $\frac{h}{d}$ 越大，表示拉深时毛坯变形区的宽度越大，拉深的难度也越高。当 $\frac{d_f}{d}$ 与 $\frac{h}{d}$ 之值超过一定的界限时，便需要进行多次拉深工序。第一次拉深可能达到的 $\frac{d_f}{d}$ 和 $\frac{h}{d}$ 之值，可由图 7-28 左半部的曲线查到。如果由法兰边零件的 $\frac{h}{d}$ 与 $\frac{d_f}{d}$ 所决定的点位于曲线的下侧，则可以用一道工序拉深成形；如果坐标 $\frac{h}{d}$ 、 $\frac{d_f}{d}$ 所决定的点位于曲线的上侧，则必须采用多道拉深工序成形。图 7-28 中的曲线，是按法兰边零件的圆角半径为零的条件绘制的，所以当零件的圆角半径较大时，图中曲线所表示的成形极限还可以适当地提高。

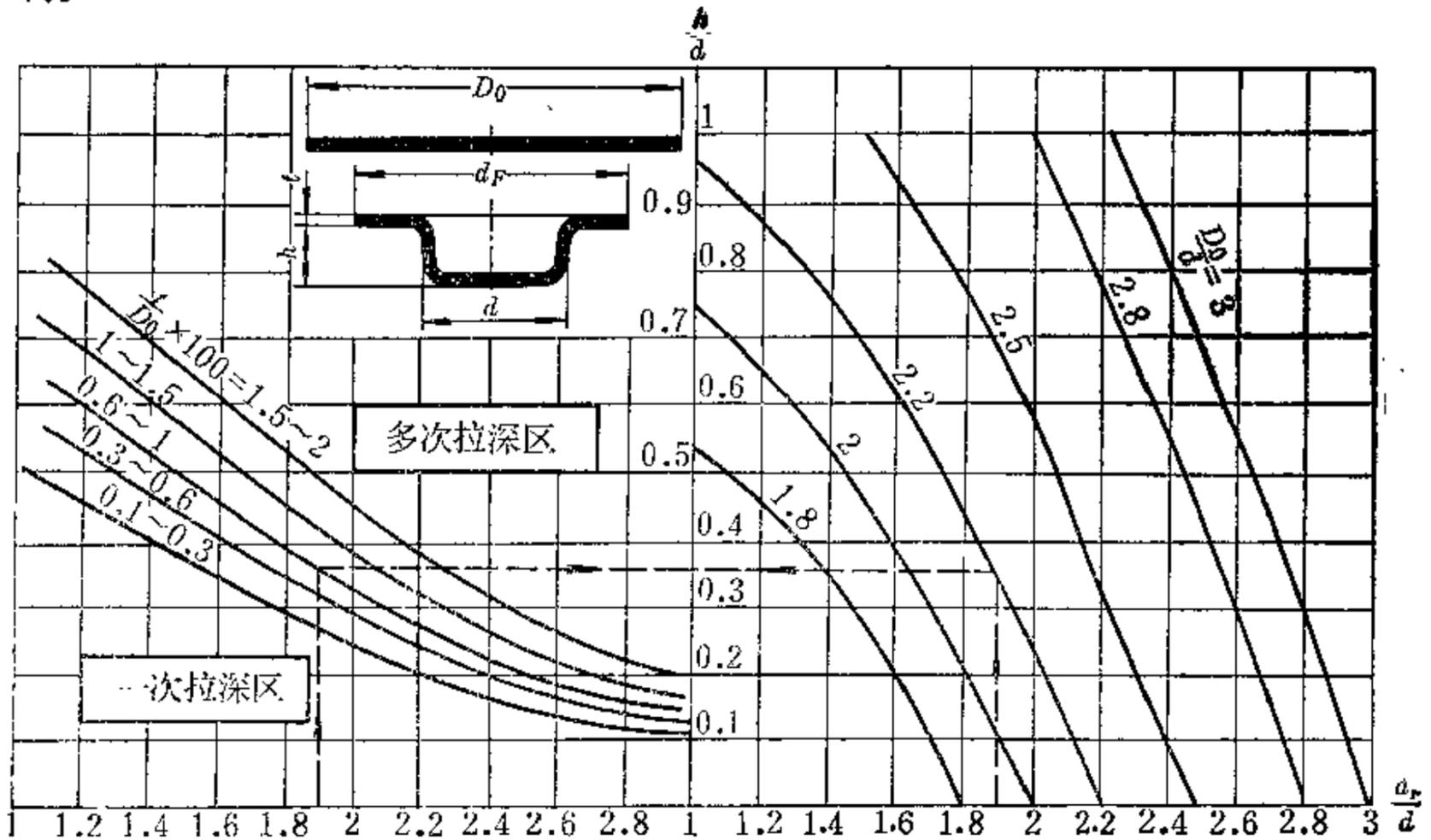


图7-28 带法兰边零件拉深用计算曲线

带法兰边零件能否一次拉深成功，也可以用极限拉深系数判断，但这时的极限拉深系数与一般的圆筒形件有很大的差别，因为带法兰边零件拉深时并不要求象直筒形件那样把全部毛坯拉入凹模，而是相当于直筒形件拉深过程中的一个中间状态，即当拉深过程进行到毛坯外径等于法兰边直径 d_f 时，拉深过程即可结束。

带法兰边零件的拉深过程，如图 7-29 所示。在拉深过程中法兰边的外径不断地缩小，而高度则不断地增大。在拉深力与行程关系曲线上各不同点 O 、 A 、 B 、 C 、 D 所对应的毛坯形状与尺寸都不相同。

假如在毛坯外径收缩到等于法兰边直径 d_f 时，拉深力已经达到其最大值，则带法兰边零件的极限拉深系数与圆筒形件完全相同；假如毛坯直径达到 d_f 时，拉深力尚未达到其最大

度(图7-30)。这时必须保持第一次拉深时已经形成的法兰边的外径,在以后的拉深工序中不再收缩。即使法兰边部分产生很小的变形,也能够引起中间圆筒部分(传力区)的过大拉力,使其不能承受而破坏。为了确实地做到这一点,在模具设计时,通常把第一次拉入凹模的毛坯面积加大3~5% (即适当加大图7-31 a 中的 h_1),并在第二道和第三道工序中减少这个额外多拉入凹模的面积数量为1~3%,这样做一方面可以补偿计算上的误差和板材在拉深时的变厚等等,另一方面也便于试模时的调整工作。

带法兰边的圆筒形零件需要数道拉深工序时,第一道拉深工序后所得的半成品的尺寸应当保证得到尽可能小的圆筒部分的直径,同时又能尽量多地将板料拉入凹模。能保证这个条件的最适宜的第一次拉深后得到的圆筒部分的直径可用图7-28中的曲线求得。具体的做法是,首先假定一个圆筒部分的直径 d ,然后根据已知的尺寸 d_F 、 D_0 、 t 从两侧曲线分别求出相对高度

$\frac{h}{d}$ 之值,如果从两侧求得的相对高度 $\frac{h}{d}$ 相等,即可选取已定的直径 d 作为第一次拉深后的中间毛坯尺寸,而直筒部分的高度,则可以根据面积相等的原则进行计算。

以后各次拉深后的圆筒形部分的直径可以按一般圆筒形件多次拉深的方法进行计算,如第 n 次拉深时(图7-30):

$$d_n = m_n d_{n-1} \quad (7-33)$$

式中 m_n ——拉深系数,其值可由表7-4中查到。

带宽法兰边零件的拉深方法,可以分为两种类型。一种方法是在第一次拉深后得到根部与底部的圆角半径很大的中间毛坯,在以后各道拉深工序中毛坯的高度基本上保持不变,仅仅缩小毛坯直筒部分的直径和圆角半径(图7-31 b)。用这种方法制成的零件表面光滑

平整,而且厚度均匀,不存在中间拉深工序中圆角部分的弯曲与局部变薄的痕迹。但是,这种方法只能用于毛坯的相对厚度较大,在第一次拉深成大圆角的曲面形状时不致起皱的情况。当毛坯的相对厚度小,而且第一次拉深成曲面形状具有起皱危险时,应采用图7-31 a 所示的另一种方法,其特点是用多次拉深方法逐步地缩小中间圆筒部分的直径和增大其高度。用这种方法制成的零件的表面质量较差,容易在直壁部分和法兰边上残留有中间工序中形成的圆角部分弯曲和厚度的局部变化的痕迹,所以最后要加一道需力较大的校形工序。当零件的底部与根部的圆角半径较小,或者当对法兰边有不平度要求时,上述两种方法都需要一道最终的校形工序。

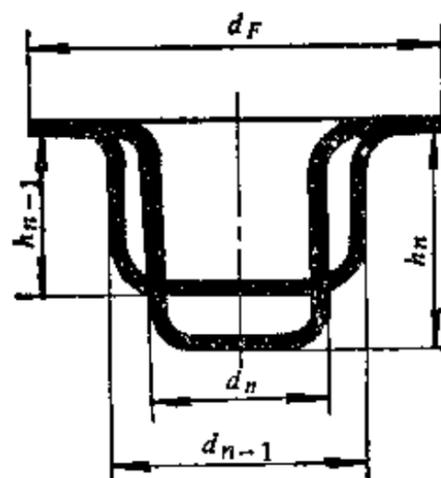


图7-30 带法兰边零件的多次拉深

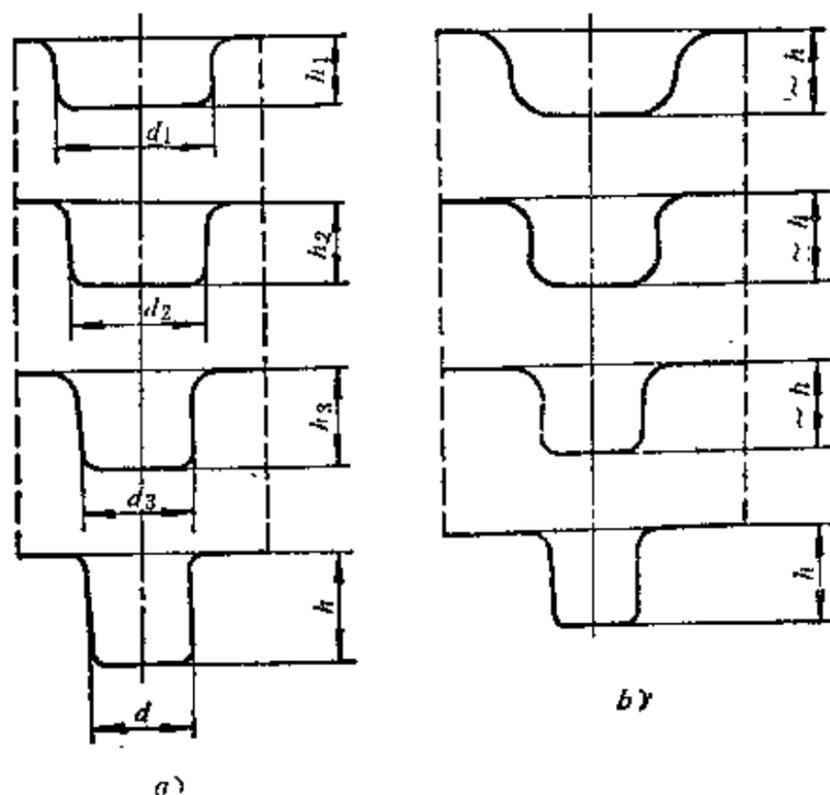


图7-31 带宽法兰边零件的多次拉深

7-9 阶梯形零件的拉深方法

旋转体阶梯形零件拉深时，毛坯变形区的应力状态和变形特点都和圆筒形件相同，而冲压工艺过程、工序次数的确定、工序顺序的安排等却和圆筒零件有较大的差别。

当阶梯形零件的相对厚度较大 $\frac{t}{D_0} > 0.01$ ，而阶梯之间直径之差和零件的高度较小时，可以用一道冲压工序成形。一次可能冲压成功的条件，可以粗略地用下式表示：

$$\frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{d_n} \leq \frac{h}{d_n}$$

式中 h_1, h_2, \dots, h_n ——分别为每个阶梯的高度（图 7-32）；

d_n ——最小阶梯的直径；

h ——直径为 d_n 的圆筒件拉深时可能得到的最大高度。

假如上述条件得不到保证，则需要采用多工序拉深的工艺方法。当每相邻阶梯的直径比 $\frac{d_2}{d_1}, \frac{d_3}{d_2}, \dots, \frac{d_n}{d_{n-1}}$ 均大于相应的圆筒形零件的极限拉深系数时，则可以在每道拉深工序里形成一个阶梯。这时，拉深工序数目等于零件阶梯的数目（最大阶梯直径形成前所需的工序除外）。当某相邻的两个阶梯直径的比值小于相应圆筒形零件的极限拉深系数时，在这个阶梯成形时应采用带法兰边零件拉深的方法。当最小的阶梯直径 d_n 过小，也就是比值 $\frac{d_n}{d_{n-1}}$ 过小时，

如果最小阶梯的高度 h_n （图 7-32）不大，则最小阶梯可以用胀形法得到（方法见第六章）。阶梯形零件多工序拉深的顺序，一般是首先成形直径大的阶梯 d_1 ，其次成形 d_2, \dots ，最后成形 d_n 。

假如阶梯形零件的相对厚度较大 $\frac{t}{D_0} > 0.01$ ，而且每个阶梯的高度不大，相邻阶梯直径之差又比较有利时，可以采用图 7-33 及图 7-34 所示的方法：首先拉深成带大圆角半径带法兰边的圆筒零件，然后用校形工序得到零件

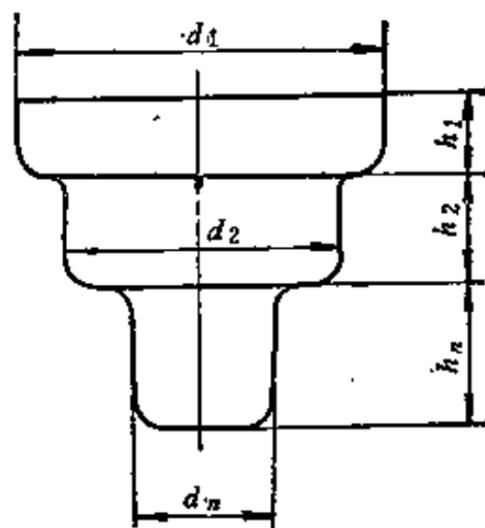


图7-32 阶梯形零件

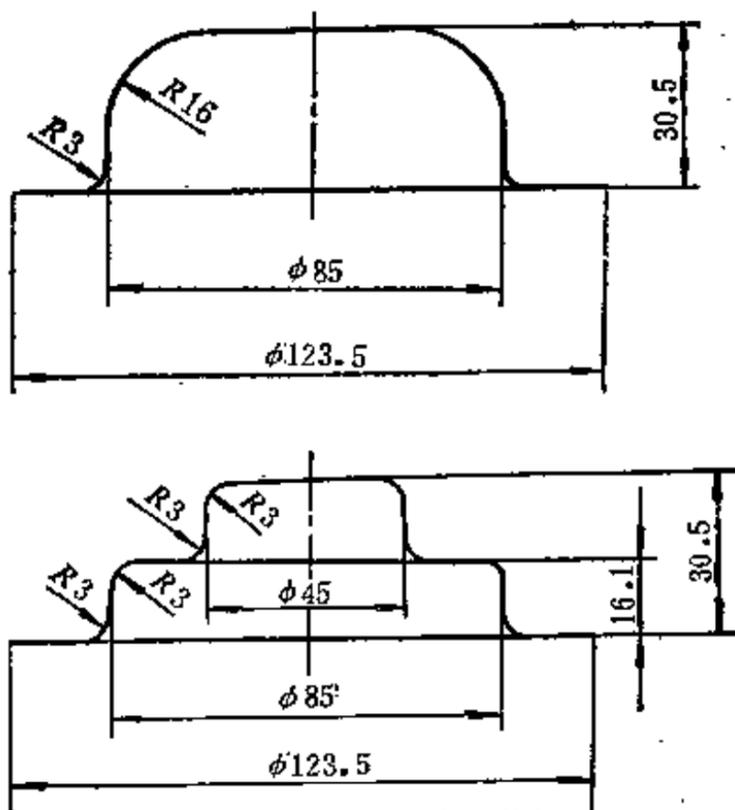


图7-33 电喇叭底座的拉深

材料：低碳钢；厚度：1.5毫米

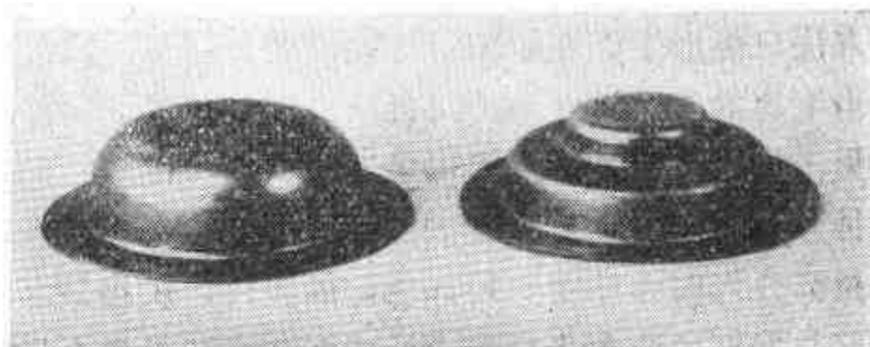


图7-34 电喇叭底座的拉深过程

的形状和尺寸。这时应该注意的问题是，在胀形变形较大而材料又不易得到邻近部位的补充时，可能在圆角及其附近产生过度的厚度变薄现象，影响零件的质量。

7-10 盒形零件的拉深方法

盒形零件的拉深，在变形性质上与圆筒形零件相同，毛坯变形区(法兰边上)也是受一拉一压应力状态的作用。但是，与圆筒形零件的拉深相比，其间最大的差别是拉深件周边上的变形是不均匀的。因此，在冲压工艺过程设计和模具设计当中，需要解决的问题和解决问题的方法也不完全相同。

一、盒形件拉深变形的特点

从盒形件的几何形状特点出发，可以把它划分为四个长度分别为 $A-2r$ 和 $B-2r$ 的直边部分和四个半径为 r 的圆角部分(图 7-35)。圆角部分是四分之一圆柱表面。假设盒形件的直边部分和圆角部分之间没有联系，则可以把零件的成形假想为由直边部分的弯曲和圆角部分的拉深变形所组成。但是，由于直边部分和圆角部分是联系在一起的整体，在拉深过程中必然要有相互的作用和影响，致使这两部分都不是简单的弯曲变形和四分之一圆柱表面的拉深变形。事实上，从变形的性质角度看，在这两部分之间并不存在明确的界限。

盒形件拉深时，直边部分和圆角部分的变形情况如图 7-35 所示。在拉深变形前，在毛坯表面上在圆角部分划成径向放射线与同心圆弧所组成的网格，而在直边部分划成由相互垂直的等距离平行线组成的网格。如果盒形件的直边部分仅产生弯曲变形，则拉深变形

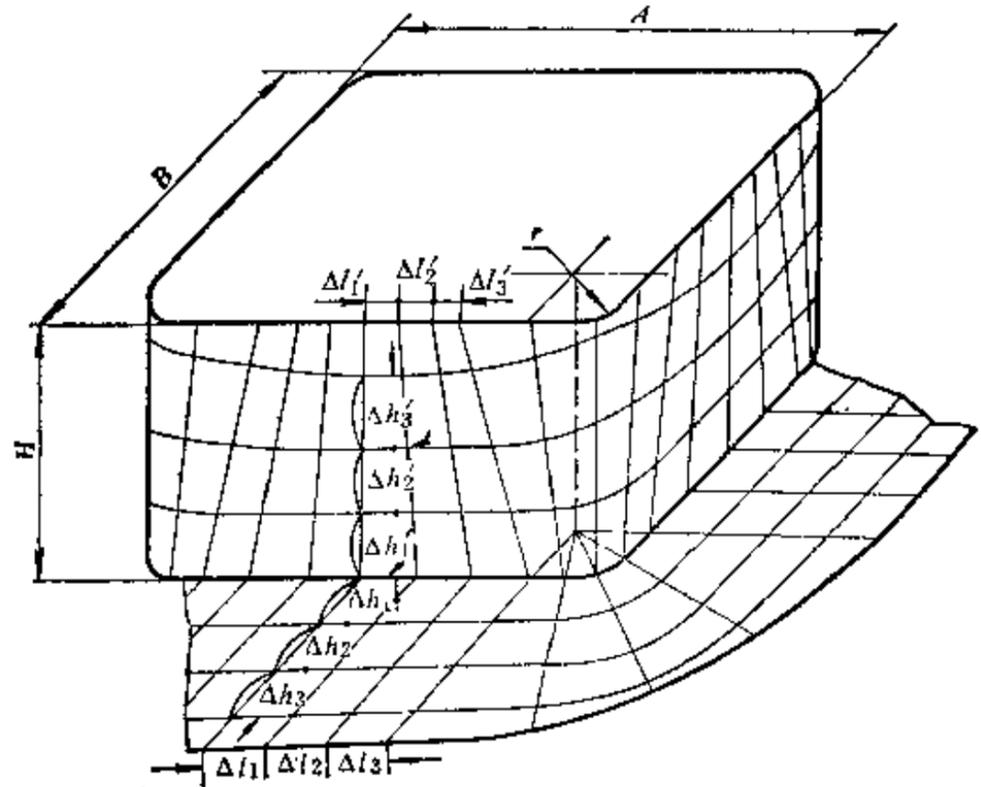


图7-35 盒形件拉深变形特点

后在盒形件侧表面上的网格线应该和变形前完全相同。但是，实际上在拉深变形后盒形件侧壁上的网格尺寸发生了横向压缩和纵向伸长的变化。变形前横向尺寸为 $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_3$ ，而变形后成为 $\Delta l'_3 < \Delta l'_2 < \Delta l'_1 < \Delta l_1$ 的关系。变形前纵向尺寸为 $\Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h_3$ ，而变形后成为 $\Delta h'_3 > \Delta h'_2 > \Delta h'_1 > \Delta h_1$ 的关系。从这个尺寸变化可以看出，横向压缩和纵向伸长的拉深变形，在盒形零件直边部分的侧壁上的分布是不均匀的。在直边部分的中间部位上拉深变形最小，而靠近圆角部分的拉深变形最大。变形在高度方向上的分布也是不均匀的，在靠近底部位置上最小，在靠近上口的部位上最大。圆角部分的变形与圆筒形零件的拉深变形相似，但是其变形程度小于半径与高度相同的圆筒形零件。因此，在平板毛坯上的径向放射线，在拉深变形后不是成为与底平面垂直的等距离平行线，而是成为上部距离大下部距离小的斜线。上述各种现象表明，由于直边部分的横向压缩变形的存在，使圆角部分的拉深变形程度和由变形

引起的硬化程度都有降低，低于直径为 $2r$ 高度为 H 的圆筒形零件。因此，圆角部分变形区产生拉深变形所必需的径向拉应力也低于尺寸相同的圆筒形零件。直边部分对圆角部分的影响，决定于盒形件的圆角半径 r 与宽度 B 的比值 $\frac{r}{B}$ ，或称为相对圆角半径。比值 $\frac{r}{B}$ 越小，直边部分对圆角部分的变形影响越显著，也就是说，圆角部分的变形和圆筒形件的差别越大。当 $\frac{r}{B} = 0.5$ 时，盒形件成为圆筒形零件，上述的变形差别也不复存在。

另一方面，由于直边部分的纵向伸长变形小于圆角部分，虽然在毛坯底部直边部分与圆角部分的运动速度相同，但是在变形区内（毛坯的法兰部分）直边部分的位移速度要大于圆角部分，这样的位移速度的差别引起了在变形区内直边部分对圆角部分的带动作用，结果使圆角部分侧壁的底部，即危险断面内的拉应力数值有所降低。前述两个因素综合作用的结果都有利于提高盒形件拉深时的极限变形程度，所以第一次拉深可能得到零件的最大相对高度 $\frac{H}{r}$ 时常可以超过圆筒形零件很多。

二、盒形件毛坯形状和尺寸的确定

在盒形件拉深时，正确地确定毛坯的形状和尺寸，不仅能够节省板材和得到口部平齐的零件，而且也有利于毛坯的变形和保证零件的质量。当毛坯的尺寸过大时，能够引起危险断面上拉应力无谓地增大，对提高变形程度和减少工序不利；当毛坯局部尺寸过大时，在拉深过程中这部分会从变形区突出出去，不但突出部分本身的变形减小，而且也使其邻近部分的板料变形比较困难。毛坯尺寸过大部分的变形程度减小必然使拉深变形较多地集中到其余部位上去，于是增加了沿毛坯周边变形分布不均的程度。这样冲成的零件壁厚不均，而且也容易引起变形过分集中部位的局部起皱，降低零件的质量。

盒形件拉深时确定毛坯的原则也是要保证毛坯的面积等于零件的面积，但是毛坯的形状

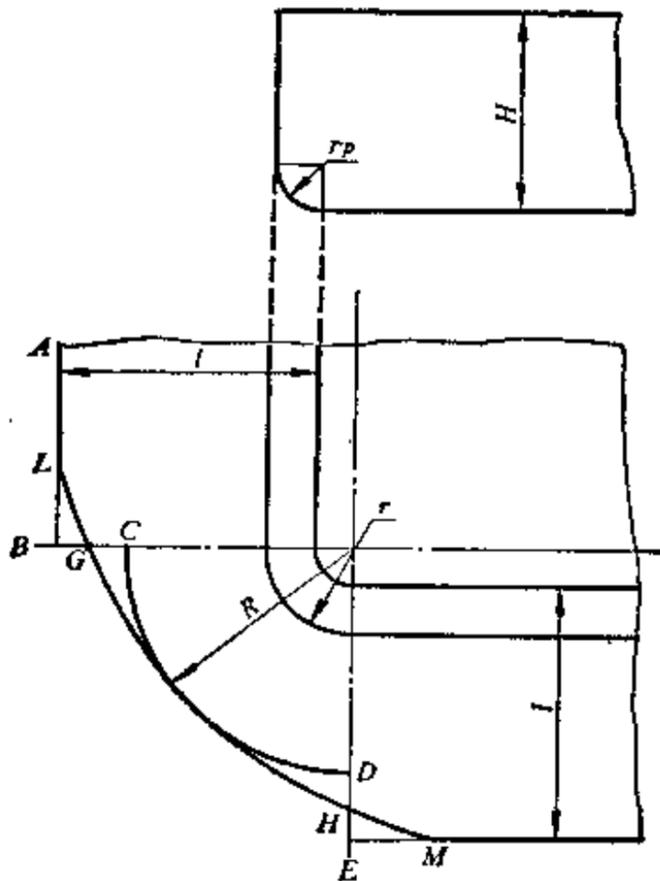


图7-36 盒形件拉深用毛坯的概略计算

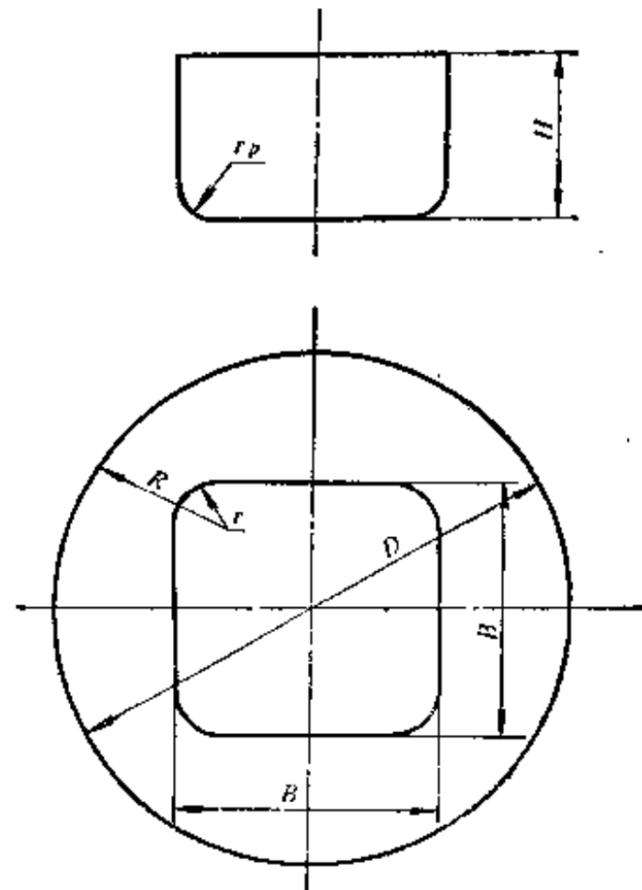


图7-37 高方形盒的毛坯形状与尺寸

必须保证材料在整个周边上的分布恰好符合于在零件周边每个点上形成等高的侧壁的需要。由于在零件周边上各个点金属的切向压缩变形和纵向伸长变形的数值都不相同，所以应该根据盒形件成形时的不均匀变形特点，考虑材料在变形过程中的转移对毛坯的形状和尺寸做一定的修正。

从图 7-35 中毛坯的变形可以看出，平板毛坯的圆角部分的材料，在拉深后有一部分被挤到直边部分去，而且 $\frac{r}{B}$ 越小，这个现象越严重，所以在决定毛坯的形状和尺寸时必须考虑材料的转移。但是，由于盒形件拉深时变形的不均匀以及各种因素——包括零件的尺寸 $\left(\frac{r}{B}, H\right)$ 、材料性能、模具结构、工序数目与工序间毛坯的过渡形状和尺寸等对变形的影响都是非常复杂的，所以现在还不可能比较精确地用计算的方法事先确定出正确的毛坯的形状和尺寸。实际上在生产中采用的方法是，根据零件的几何形状和尺寸所决定的变形特点，利用一些简单的计算方法事先初步地和大致地确定一个供试验用的毛坯形状和尺寸，并在毛坯上做出标记，然后按试冲结果修正毛坯的形状和尺寸直到得出上口合乎要求的零件。当盒形件的高度小而且对上口要求不高时，可以不采用拉深后的切边工序而直接冲出成品零件。在其它情况下，都必须在拉深后对零件进行切边加工，因为在拉深后事实上不可能得到上口十分平齐的零件。

用一道拉深工序可能冲压成功的较低的盒形件所用的毛坯的形状和尺寸，可以用下述方法进行初步的概略性的计算。首先，将盒形件的直边按弯曲变形，而圆角部分按四分之一圆筒拉深变形在盒形件底部的平面上展开得图 7-36 中的毛坯外形 $ABCDEF$ ，这样的毛坯不具有圆滑过渡的轮廓，而且也没有考虑到材料由圆角部分向直边部分的转移，所以还要进行如下的修正。由 BC 和 DE 的中点 G 和 H 做圆弧 R 的切线，并用圆弧将切线和直边展开线联接起来便得到修正后的毛坯外形 $ALGHMF$ 。

按弯曲变形展开的直边部分的长度 l 为

$$l = H + 0.57r_p$$

上式中 H 是盒形件的冲压高度(应包括切边余量 Δh)，其值等于盒形件高度 h 与 Δh 之和； r_p 是盒形件底部的圆角半径。修边余量 Δh 之值可按表 7-12 选取。

表 7-12 盒形件的修边余量 Δh

所需拉深工序数 n	1	2	3	4
修边余量 Δh	$(0.03 \sim 0.05) h$	$(0.04 \sim 0.06) h$	$(0.05 \sim 0.08) h$	$(0.06 \sim 0.1) h$

圆角部分按四分之一圆筒展开得半径 R ，其值用下式计算：

$$R = \sqrt{r^2 + 2rH - 0.86r_p(r + 0.16r_p)}$$

假如方盒形件高度比较大，需进行多工序拉深时，可以采用圆形的毛坯(图 7-37)，其

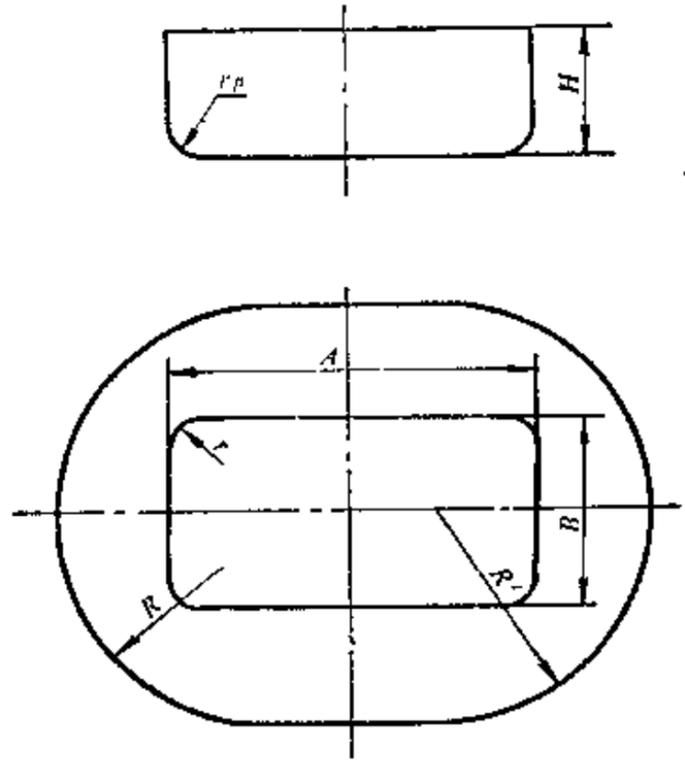


图 7-38 高矩形盒的毛坯形状与尺寸

直径可按式计算

$$D = 1.13\sqrt{B^2 + 4B(H - 0.43r_p) - 1.72r(H + 0.5r) - 4r_p(0.11r_p - 0.18r)}$$

对于高度和角部圆角半径都比较大的矩形盒,可以采用如图 7-38 所示的长圆形毛坯或椭圆形毛坯,毛坯窄边的曲率半径按半个方盒计算,即取 $R' = \frac{D}{2}$ 。当矩形盒的高度较大,需要进行多工序拉深时,有时也采用圆形毛坯,其道理与计算方法在后边还要讨论。例如图 7-41 所示的零件,虽然其长与宽之比为 $\frac{28.6}{12.5} \approx 2.3$,但是由于其高度大,也可以采用 $\phi 60$ 毫米的圆形毛坯,经多道拉深工序后,仍能得到高度合格的零件。

三、盒形件初次拉深的成形极限

在盒形件的初次拉深时,圆角部分侧壁内的拉应力大于直边部分。因此,盒形件初次拉深的极限变形程度受到圆角部分侧壁-传力区强度的限制,这一点和圆筒形件拉深的情况是十分相似的。但是,由于直边部分对圆角部分拉深变形的减轻作用和带动作用,都可以使圆角部分危险断面的拉应力有不同程度的降低。因此,盒形件初次拉深可能成形的极限高度大于圆筒形零件。

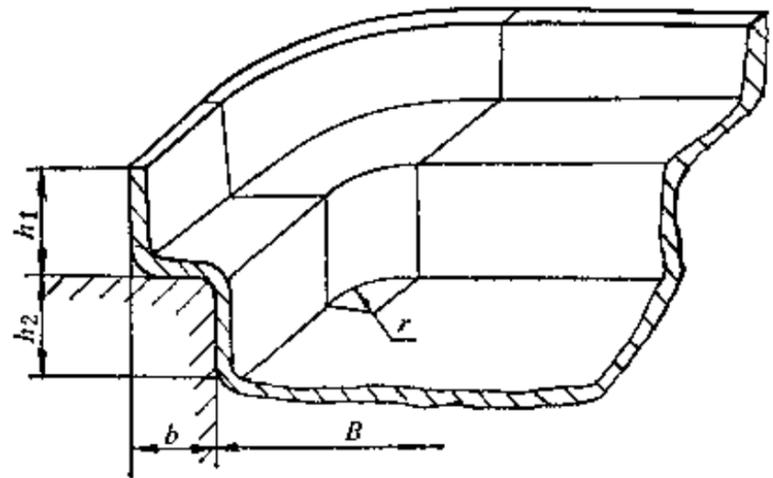


图 7-39 盒形件再次拉深时的变形分析

盒形件的相对圆角半径 $\frac{r}{B}$ 越小(图 7-35),直边部分对圆角部分的影响越强,极限变

形程度的提高越显著;反之, $\frac{r}{B}$ 越大,直边部分对圆角部分的影响越小,而且当 $\frac{r}{B} = 0.5$ 时,盒形件变成圆筒形件,其极限变形程度也必然等于圆筒形件。

盒形件初次拉深的极限变形程度,可以用盒形件的相对高度 $\frac{H}{r}$ 来表示。由平板毛坯一次拉深工序可能冲成的盒形件的最大相对高度决定于盒形件的尺寸 $\frac{r}{B}$ 、 $\frac{t}{B}$ 和板材的性能,其值可查表 7-13。当盒形件的相对厚度较小 $\frac{t}{B} < 0.01$, 而且 $\frac{A}{B} \approx 1$ 时,取表中较小的数值;当盒形件的相对厚度较大, $\frac{t}{B} > 0.015$, 而且 $\frac{A}{B} \geq 2$ 时,取表中较大的数值。表 7-13 中数据适用于深拉深用软钢板。

表 7-13 盒形件初次拉深的最大相对高度

相对角部圆角半径 $\frac{r}{B}$	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05
相对高度 $\frac{H}{r}$	2~3	2.8~4	4~6	8~12	10~15

假如盒形件的相对高度 $\frac{H}{r}$ 不超过表 7-13 中所列的极限值,则盒形件可以用一道拉深工序冲压成功,否则必须采用多道工序拉深的方法进行加工。

四、盒形件的多工序拉深方法

盒形件的多工序拉深时的变形特点，不但不同于圆筒形零件的多次拉深，而且也同盒形件的初次拉深中的变形有很大差别，所以在确定其变形参数以及处理工序数目、工序顺序和模具设计等问题时都必须以非旋转体零件多次拉深变形的特点做为依据。

在盒形件的再次拉深时所用的中间毛坯是已经形成直立侧壁的空间体，其变形情况如图7-39所示。毛坯的底部和已经进入凹模高度为 h_2 的侧壁是不应产生塑性变形的传力区；与凹模的端面接触，宽度为 b 的环形法兰边是变形区；高度为 h_1 的直立侧壁是不变形区。在拉深过程中随着冲头的向下运动，高度 h_2 不断的增大，而高度 h_1 则逐渐减小，直到全部板料都进入凹模并形成零件的侧壁。假如毛坯变形区内圆角部分和直边部分的拉深变形（指切向压缩和径向伸长变形）大小不同，必然引起变形区各部分在宽度 b 的方向上产生不同的伸长变形。由于这种沿毛坯周边在宽度方向上发生的不均匀伸长变形受到高度为 h_1 的不变形区-侧壁的阻碍，在伸长变形较大的部位上要产生附加压应力，而在伸长变形较小的部位上要产生附加拉应力。附加应力的作用可能引起对拉深过程的进行和对拉深件质量都很不利的结果：在伸长变形较大并受附加压应力作用的部位上产生材料的堆聚或横向起皱；在伸长变形较小并受附加拉应力作用的部位上发生板材的破裂或厚度的过分变薄等（图7-42）。因此，保证拉深变形区内各部分的伸长变形均匀一致，而且不要产生材料的局部堆聚和其它部位的过大的拉应力等条件，应该成为盒形件的多工序拉深过程中每道拉深工序所用半成品的形状和尺寸确定的基础，而且也是模具设计、确定工序顺序、冲压方法和其它变形工艺参数的主要依据。此外，当然也应保证沿盒形件周边上各点的拉深变形程度也不要超过其侧壁强度所允许的极限值。

毛坯全部周边上各点在变形区宽度方向上的伸长变形引起的纵向尺寸变化（相当于圆筒形件变形区内径向尺寸伸长）相同，不产生附加应力，因而不致发生材料的局部堆聚和局部过度拉伸或破裂的条件是：

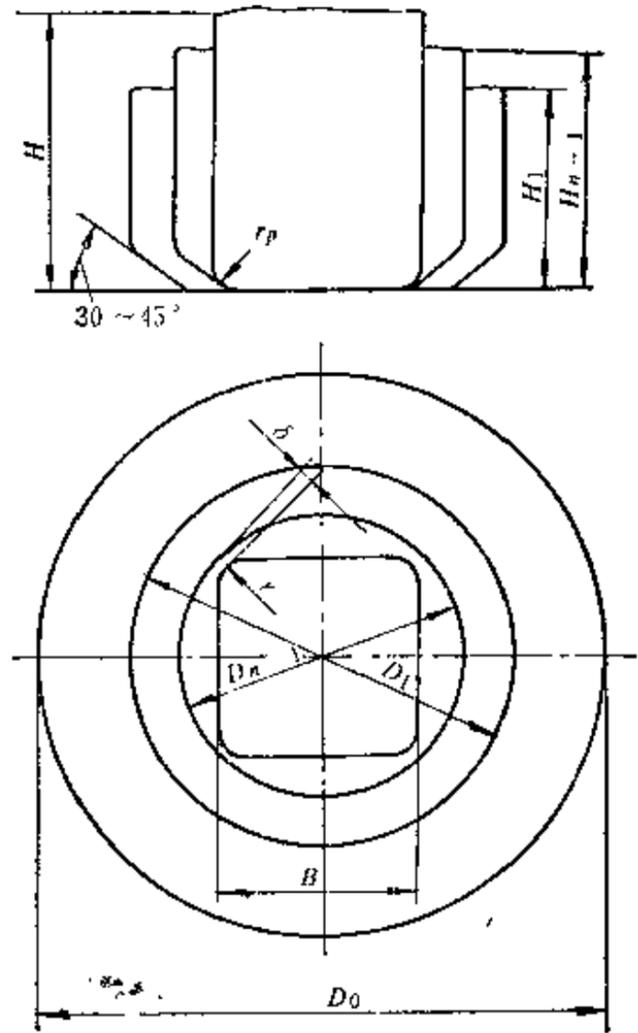


图7-40 方盒形件多工序拉深的半成品的形状与尺寸

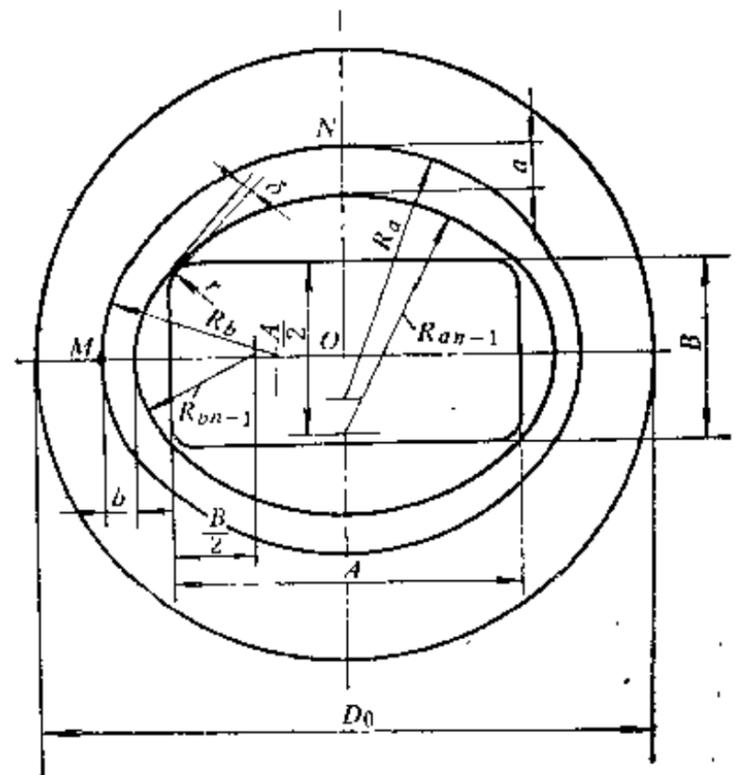


图7-41 矩形盒多工序拉深时半成品的形状与尺寸

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \cdots \cdots = \varepsilon_n \quad (7-34)$$

式中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \cdots, \varepsilon_n$ 分别是毛坯变形区周边各个部位上板料在其本身宽度方向上相对伸长变形的平均值。假如上一条件得到保证,则在单位时间内,毛坯周边上各个点上的变形区侧壁高度 h_1 的减少量相同,而且已成形的侧壁高度 h_2 的增大量也必然相同。也就是说,当毛坯的底部和已成形的侧壁在凸模的作用下做等速的均匀下降运动时,毛坯不变形区的侧壁也做等速的均匀下降。能够保证上述条件的确定多工序拉深盒形件时半成品形状和尺寸的方法,如图 7-40 和 7-41 所示。

图 7-40 是方盒形件多工序拉深时各中间工序的半成品形状和尺寸的确定方法。采用直径为 D_0 的圆形毛坯,每道中间拉深工序都冲压成圆筒形的半成品,最后一道工序得成品零件的形状和尺寸。计算由倒数第二道工序,即 $n-1$ 道工序开始。 $n-1$ 道工序所得半成品的直径用下式计算:

$$D_{n-1} = 1.41B - 0.82r + 2\delta \quad (7-35)$$

式中 D_{n-1} —— $n-1$ 次拉深工序后所得圆筒形半成品的内径;

B ——方盒形件的宽度(按内表面计算);

r ——方盒形件角部的内圆角半径;

δ ——由 $n-1$ 道拉深后得到半成品的圆角部分内表面到盒形件内表面之间距离,也可简称角部的壁间距离。

角部壁间距离 δ 直接影响毛坯变形区拉深变形程度的大小和分布的均匀程度。当采用图 7-40 所示的成形过程时,可以保证沿毛坯变形区周边产生适度面均匀变形的壁间距离 δ 之值为:

$$\delta = (0.2 \sim 0.25)r \quad (7-36)$$

其它各道工序的计算,可以参照圆筒形零件的拉深方法,相当于由直径 D_0 的平板毛坯拉深成直径为 D_{n-1} 高度为 H_{n-1} 的圆筒形零件。

图 7-41 是矩形盒多工序拉深时各中间工序半成品形状和尺寸的确定方法,其道理和作图方法和方盒形件基本相似。计算工作由倒数第二道拉深工序,即由 $n-1$ 道工序开始。 $n-1$ 道拉深工序得椭圆形半成品,其半径用下式计算:

$$R_{an-1} = 0.705A - 0.41r + \delta \quad (7-37)$$

$$R_{bn-1} = 0.705B - 0.41r + \delta \quad (7-38)$$

式中 R_{an-1} 与 R_{bn-1} ——分别为 $n-1$ 道拉深工序所得椭圆形半成品在长轴和短轴方向上的曲率半径;

A 与 B ——分别为矩形盒的长度和宽度;

δ ——第 n 道拉深工序中的角部壁间距离,其值可取为 $\delta = (0.2 \sim 0.25)r$;

r ——矩形盒的圆角半径。

圆弧 R_{an-1} 和圆弧 R_{bn-1} 的圆心,可按图 7-41 所示的尺寸关系确定。得出 $n-1$ 道工序后的半成品的形状和尺寸后,应该用前边讲过的盒形件初次拉深的计算方法检查是否可能用平板毛坯一次冲压成为 $n-1$ 道工序的半成品。如果不可能,便要进行 $n-2$ 道工序的计算。 $n-2$ 道拉深工序由椭圆形的毛坯冲压成为椭圆形,这时应保证

$$\frac{R_{an-1}}{R_{an-1} + a} = \frac{R_{bn-1}}{R_{bn-1} + b} = 0.75 \sim 0.85 \quad (7-39)$$

式中 a 与 b ——分别为椭圆形半成品之间，在短轴和长轴上的壁间距离（图 7-41）。

利用上式计算得到椭圆形半成品之间的壁间距离 a 与 b 之后，可以在对称轴线上找到 M 与 N 两点。然后选定半径 R_n 与 R_b ，使其圆弧通过 M 与 N 两点，又能圆滑相接。并且使 R_n 与 R_b 的圆心都比 R_{n-1} 与 R_{b-1} 的圆心更靠近盒形件的中心点 O 。得出 $n-2$ 道拉深工序后的半成品形状和尺寸后，应重新检查是否可能由平板毛坯冲压成功。如果不能，应该继续进行前一道工序的计算，其方法与此相同。

由于盒形件拉深时沿毛坯周边的变形十分复杂，当前还不可能用数学的方法做出十分精确的计算结果，所以前述的确定各中间拉深工序的半成品形状和尺寸的方法是相当近似的。假如在试模调整过程中发现如图 7-42 所示的缺陷时，即当在圆角部分出现材料的堆聚时，应当适当地减小圆角部分的壁间距离 δ 。

图 7-43 是方盒形件多工序拉深计算的实例。

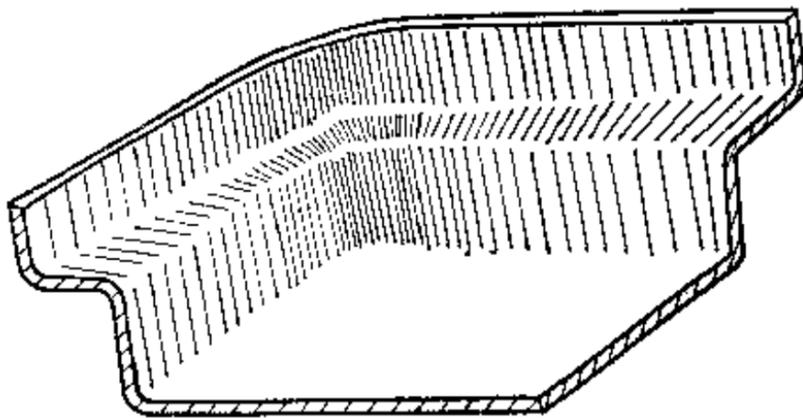


图 7-42 盒形件再次拉深时出现的缺陷

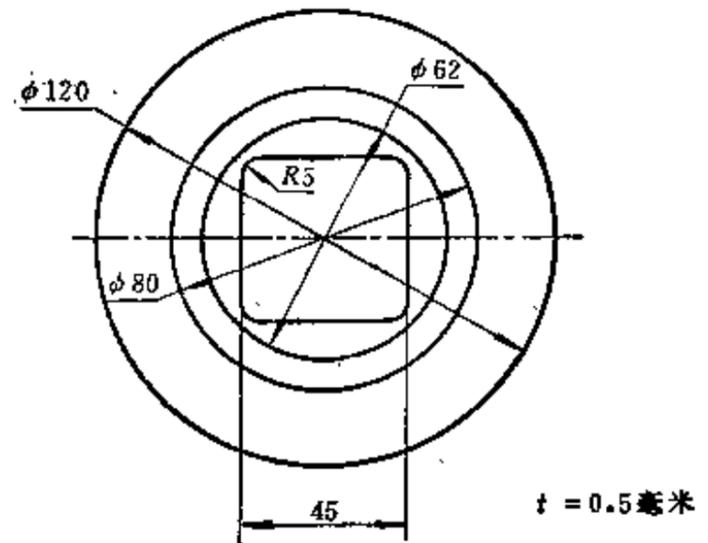


图 7-43 方盒形件多次拉深实例

五、盒形件拉深模工作部分形状和尺寸的确定

假如盒形件可以一次拉深成功，凸模工作部分的形状和尺寸均应取为等于成品零件内表面的尺寸。而凹模的工作部分的形状和尺寸的选取原则和道理基本上和圆筒形零件相似。但是，在盒形件的初次拉深时毛坯传力区的危险断面是圆角部分的侧壁，所以当毛坯的相对厚度较大，而且拉深高度接近于初次拉深的极限高度时，常取圆角部分的凹模圆角半径稍大于直边部分，借以减轻危险断面的负载。不过，如果毛坯的相对厚度较小，加大圆角部分的凹模圆角半径可能使毛坯边缘过早地脱离压边圈的作用而发生起皱时，则应该选取尽量小的凹模圆角半径。在拉深高度较小的盒形件时，由于毛坯侧壁内拉应力的数值不大，毛坯不易紧密地贴靠在凸模表面，在底部圆角和侧壁部位都容易形成不与凸模表面吻合的不规则表面，这时应取尽可能小而不致啃伤毛坯表面的凹模圆角半径（尤其是在直边部分）。在一般情况下，可以根据毛坯的厚度，参照上述的各种条件取凹模的圆角半径 R_d 为

$$R_d = (4 \sim 10)t$$

一般在冲模设计时取较小数值 R_d ，然后在冲模试冲调整时根据实际情况适当的修磨加大。

盒形拉深模的间隙，应该根据拉深过程中毛坯各部分壁厚变化的情况确定。圆角部分的间隙，可以根据对零件尺寸精度的要求选取：当盒形件的尺寸精度要求较高时取间隙为 $c = (0.9 \sim 1.05)t$ ；当盒形件的尺寸精度要求不高时取间隙 $c = (1.1 \sim 1.3)t$ 。直边部分壁厚增大量较圆角部分小。在整个周边上壁厚的变化是均匀的，所以一次拉深成功的模具间隙也最

好做成均匀地过渡，在圆角部分最大，在直边部分最小。当盒形件的相对圆角半径 $\frac{r}{B}$ 较小 ($\frac{r}{B} < 0.15$) 时，直边部分的中点附近的间隙可按弯曲模选取。当盒形件的高度大，因而需要多道拉深工序时，前几道工序用拉深模的间隙可按圆筒形件的方法选取。如果工序间半成品的形状和尺寸确定的合理，最后一道拉深模的间隙也可以沿周边取均布的间隙或做差别不大的修正。

当盒形件需要进行多工序拉深成形时，最初的几道拉深工序用模具工作部分的形状与尺寸均可按圆筒形零件多工序拉深的条件确定。但是，在 $n - 1$ 道拉深工序后所得半成品的形状最好具有图 7-44 所示的底部形状。半成品的底面和盒形件的底平面尺寸相同，并用 $30^\circ \sim 45^\circ$ 的斜面过渡到半成品的侧壁。这时， $n - 1$ 道工序的拉深凸模也要做成与此相同的形状和尺寸，而最后拉深工序的凹模和压边圈的工作部分也要做成与半成品尺寸相适应的斜面。这样做，不仅有利于最后拉深工序中毛坯的变形，能够提高零件侧壁的表面质量，而且也使冲模加工得到很大的简化。

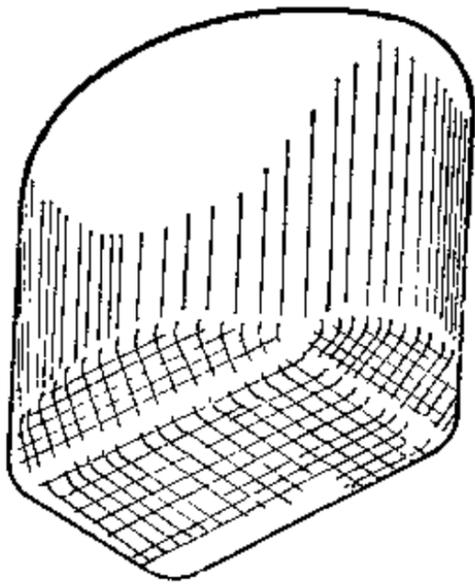


图7-44 盒形件最后一道拉深工序的半成品形状

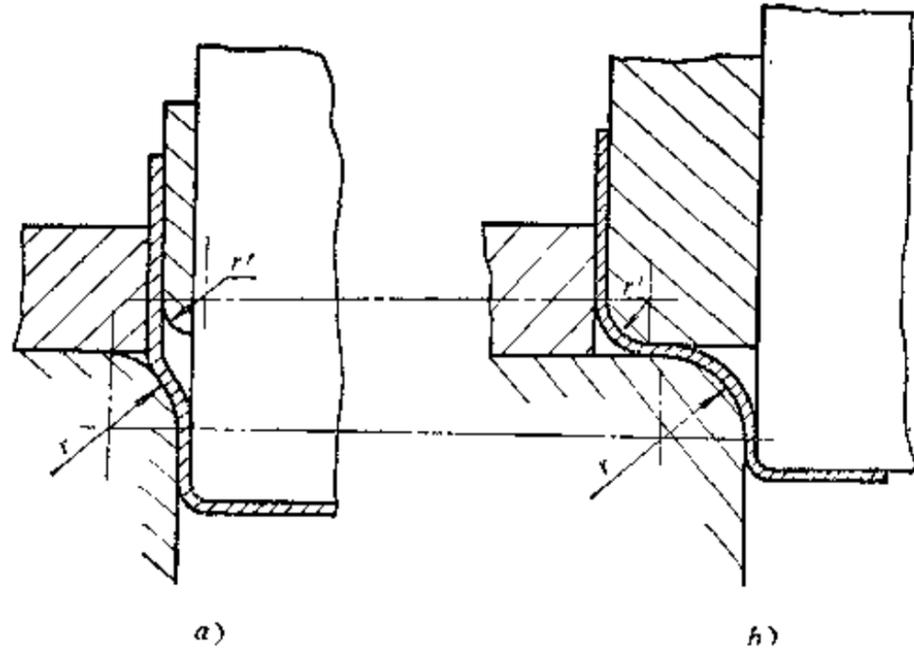


图7-45 过大的凹模圆角半径
a—零件的圆角部分 b—零件的直边部分

当盒形件的尺寸较小，或者由于其他原因而不将最后一道拉深工序用的半成品做成斜面过渡的底部时，最后一道拉深工序用的凹模的工作部分和压边圈的工作部分也不做成斜角过渡的形式，而是做成圆角的形式。这时，由于在直边部分半成品与零件的壁间距离大，而圆角部分的壁间距离小，所以不能沿拉深凹模和压边圈的周边取为均匀的圆角半径。因为在零件的圆角部分壁间距离小，如果所取的圆角半径大，则压边圈和凹模工作部分之间的空隙可能增大到根本不起压料作用的程度（图 7-45）。因此这时应取尽可能小的凹模和压边圈的圆角半径，尤其是在零件的圆角部分。

六、盒形件拉深力的计算

当盒形件可以一次拉深成功时，拉深力 P 可近似地按下式计算：

$$P = (2\pi r K_1 + L K_2) t \sigma_s$$

式中 r ——盒形件圆角部分的圆角半径；
 L ——盒形件直边部分长度的总和；
 σ_s ——材料的强度极限；

t ——材料的厚度；

K_1 ——系数，浅盒形件取 $K_1 = 0.5$ ，高盒形件 $\frac{H}{r} \geq 5 \sim 6$ 时取 $K_1 = 1 \sim 1.2$ ；

K_2 ——系数，间隙足够大，而且不压边时取 $K_2 = 0.2$ ，压边力较大 $Q \geq 0.3P$ 时取 $K_2 = 0.3$ ，强力压边时取 $K_2 = 1$ 。

盒形件多次拉深时，各次拉深所需的力可根据变形程度的大小，参照圆筒形零件的计算公式与数据确定。可以这样做的根据是：在多工序拉深时，如果各道半成品工序中的形状和尺寸确定得比较合理，则可以基本上做到使毛坯变形区的拉深变形沿整个周边是接近均匀的，所以作用于毛坯侧壁内的拉应力也应该是均匀分布的，而其数值则可以参照圆筒形零件拉深力的计算方法，根据拉深变形程度的大小来确定。相当于圆筒形零件的再次拉深系数之值，可以近似的取为 $m = \frac{r}{r + \delta}$ 。

7-11 其它非旋转体直壁零件的拉深方法

除上述方盒形件和矩形盒零件外，在生产中也能遇到带法兰边的盒形件、阶梯形的盒形件和其它外形不规则的直壁零件等。在这种类型零件拉深时，由于沿毛坯周边不均匀变形的存在，常使冲压过程变得比较困难和复杂。

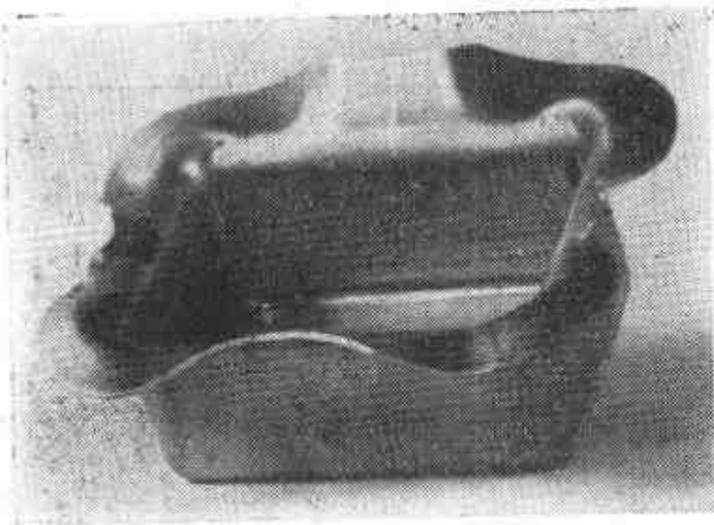


图 7-16

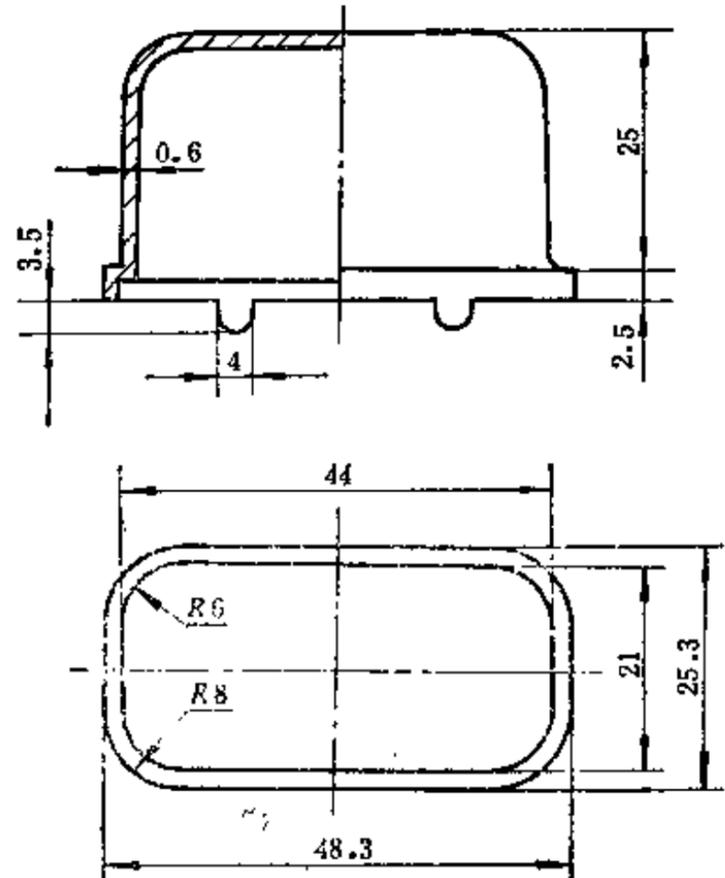


图7-47 继电器罩材料：冷轧低碳钢板，厚度：0.6毫米

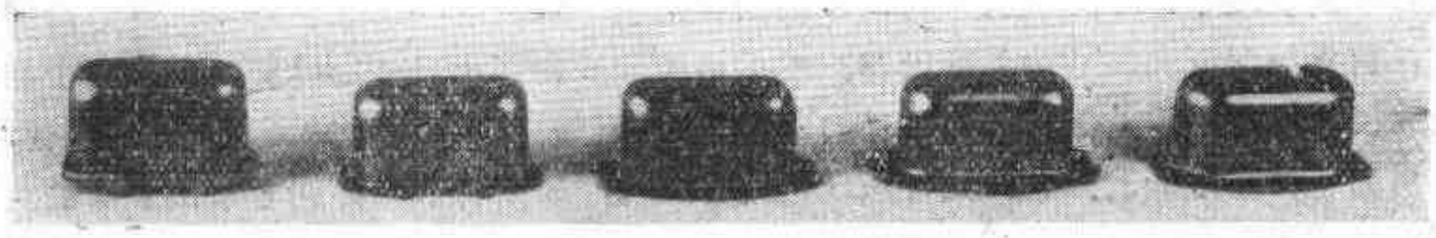


图7-48 继电器罩的冲压工艺过程

可能一次拉深成功的带法兰边浅盒形件的冲压成形并不困难，可按前述的方法进行加工。当盒形件的法兰边宽度较大，因而需要采用多道工序拉深时，必须正确地确定各中间工序后

的半成品的形状和尺寸，以便保证在毛坯变形区内各部位的伸长变形均匀一致，不要发生材料的局部堆聚现象。在不带法兰边的盒形件多次拉深时，如果发生变形区内材料的轻微堆聚，对零件的质量并没有多大的不良影响，因为轻微的堆聚部分可以在通过模具间隙时被挤平。但是，在带法兰边零件多次拉深时，一旦发生材料的堆聚，便会在法兰边根部的侧壁附近形成鼓包或皱折（图 7-46），对零件表面质量有不良影响。

带阶梯形盒形件的拉深方法，和圆筒形件相比有根本性的差别。由于阶梯形零件的相邻两个阶梯部分的轮廓尺寸是固定的，不可能同时也满足沿毛坯周边各个部位上产生均匀伸长的条件，所以不能象圆筒形阶梯零件那样从大直径逐步的拉深到小直径的阶梯部分，而是时常要首先拉深成带法兰边的盒形件，得到中间的小阶梯部分，然后再拉深成形得到外部的大尺寸的阶梯部分。图 7-47 及 7-48 即为阶梯形盒形件和它的冲压过程；第一次拉深、第二次拉深、校法兰根部、切边、外阶梯部分拉深等共五道冲压成形工序。

其它类型的非旋转体阶梯形零件，如外方内圆的阶梯形零件（图 7-49）、不同心的圆筒形阶梯形零件等，通常也采用前述的冲压方法。图 7-49 所示的外方内圆的阶梯形零件的冲压工艺过程是：先拉深成形直径为 $\phi 135$ 毫米、高度为 25 毫米的内部圆形阶梯，然后经修边后拉深外部方形的阶梯部分。

椭圆形的阶梯形零件拉深时，可能采用两种工艺方案。一种工艺方案和圆筒形阶梯形零件相似，首先拉深成大尺寸的外部阶梯，然后再拉深成内部小尺寸的阶梯。但是两个相邻阶梯的轮廓尺寸应能基本上保证公式 7-39 的比例关系。假如这个尺寸比例关系得不到保证，则应考虑采用另一种冲压工艺方案；先冲压成形内部尺寸小的阶梯部分，同时留出平面法兰边，待内部已经成形后再使法兰边部分拉深成形得到大尺寸的外部阶梯。一般说来，在需要多次拉深成形的阶梯形非旋转体零件的冲压工艺过程设计时，由于受到零件本身尺寸的限制，采用先拉深成形外部大尺寸阶梯的工艺方法很难保证沿周边得到均匀的伸长变形，所以差不多都要采用这种工艺方法。

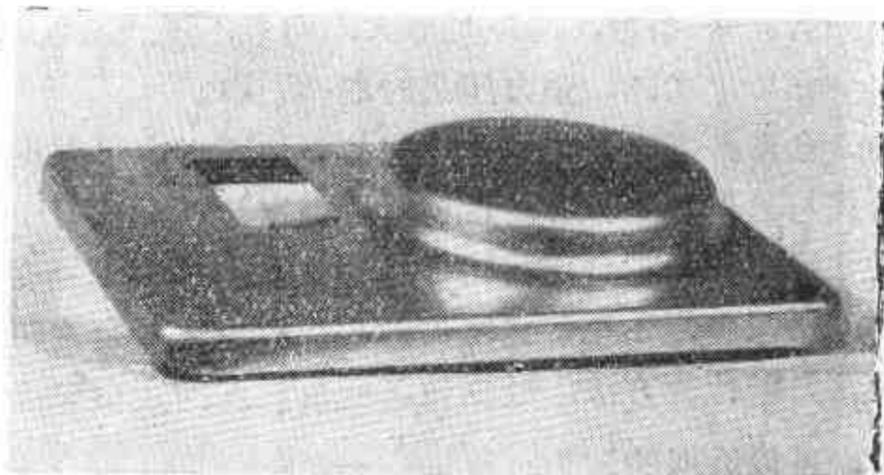


图7-49 外方内圆的阶梯形零件-电度表后盖

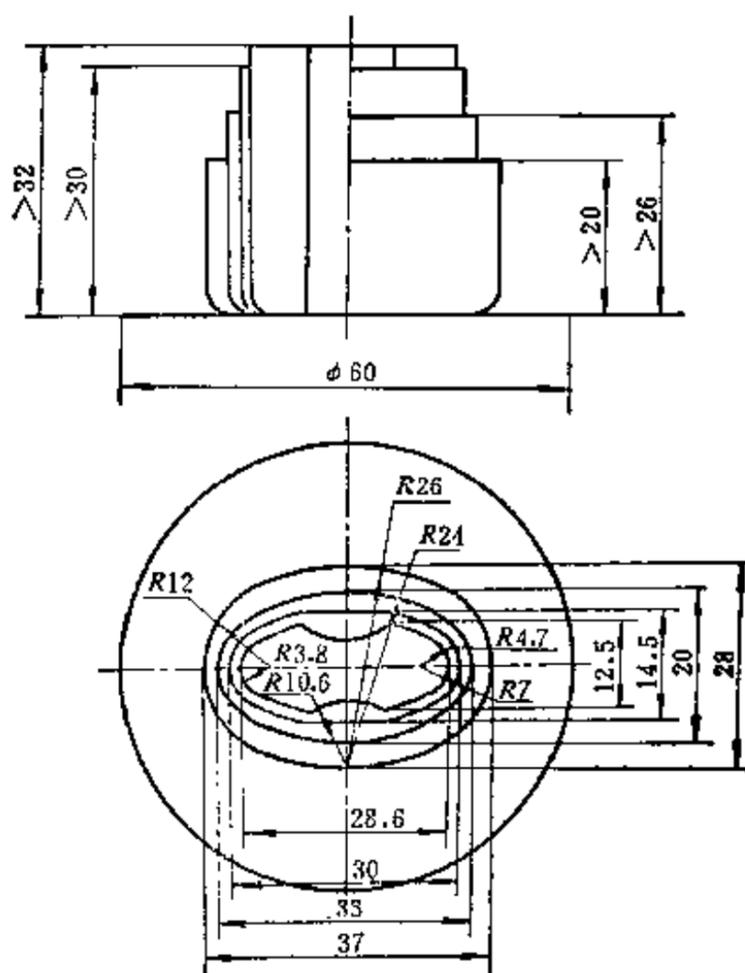


图7-50 不规则形状零件的拉深方法

材料：马口铁，厚度：0.3毫米

图 7-50 是高度较大的不规则形状零件的多工序拉深方法的实例。这种冲压工艺的特点是首先拉深成形状较为简单的而且和成品零件形状相近的椭圆形半成品，然后在逐步增加半成品高度的同时，也使半成品的形状逐渐地逼近于成品零件的形状。此零件共用四道拉深工序，最后切边得成品尺寸，其过程如图 7-51 所示。

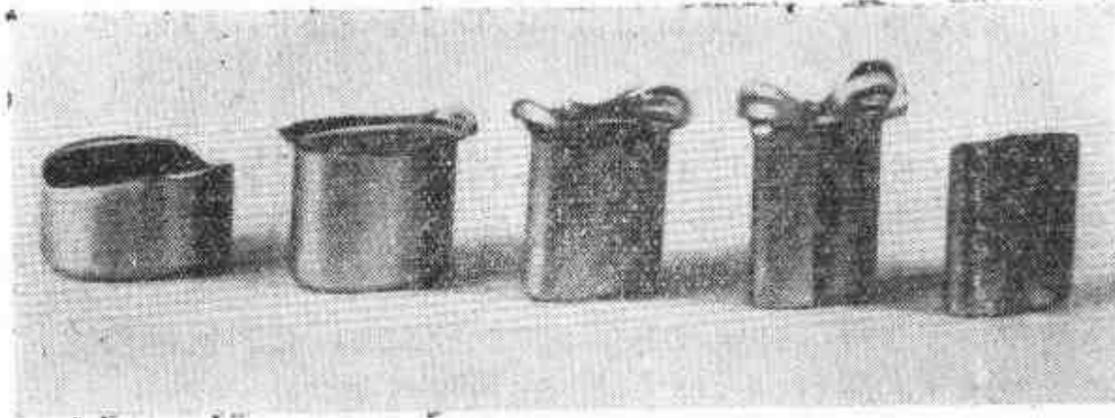


图7-51 高度大的不规则空心件的冲压方法举例

第八章 复杂曲面形状零件的拉深

8-1 曲面形状零件拉深的特点

曲面形状的拉深件包括有：球形零件、锥形零件、抛物面形状零件和其他复杂形状的曲面零件，如汽车的覆盖件等等。在这种类型零件的拉深时，变形区的位置、受力情况、变形特点、成形的机理等等都与圆筒形零件不同，所以在拉深中出现的各种问题和解决这些问题的方法，都与圆筒形零件有很大的差别。例如，对于这类零件就不能象圆筒形零件那样简单地用拉深系数去衡量和判断成形的难易程度，也不能用来作为模具设计和工艺过程设计的根据。为了便于说明曲面零件拉深的各种问题，下边我们先对球形零件的拉深变形进行分析。当然，通过这样分析得到的认识，也适用于其他类型曲面零件的拉深。

在圆筒形零件拉深时，毛坯的变形区仅仅局限于压边圈下的环形部分，即宽度为 AB 的环形部分（图 8-1），而在球形零件的成形时，为使平面形状的毛坯变成为成品零件的球面形状，不仅要求毛坯的环形部分产生与圆筒形零件拉深时相同的变形，而且还要求毛坯的中间部分，即半径为 OB 的圆形部分也应成为变形区，由平面变成曲面。所以在曲面形状零件拉深时，毛坯的法兰部分与中间部分都是变形区，而且在很多情况下中间部分反而是主要变形区。

毛坯法兰边部分的应力状态和变形特点和圆筒形拉深件相同，而中间部分的受力情况和变形情况却比较复杂。在冲头力的作用下，位于冲头顶点 O 附近的金属处于双向受拉的应力状态（图 8-1），纬向拉应力的数值，随与顶点 O 的距离加大而减小，而在超过一定界限以后，变成为压应力。

在变形前的平板毛坯上某点 D ，在成形后应与冲头的表面贴合并占据 D_1 点位置。假如毛坯的厚度不发生变化，由于成形前后毛坯的面积相等， D 点应该于 D_1 点贴模。因为 $d_1 < d_0$ ，所以这时 D 点的金属必须产生一定的纬向压缩变形。这种变形的性质与圆筒形零件拉深时变形区的一向受拉和另一向受压的变形特点是完全相同的，我们把它叫做曲面零件第一种成形机理（拉深变形）。但是，由于在成形的初始阶段里曲面冲头与毛坯的接触面积很小，在毛坯内为实现第一种成形

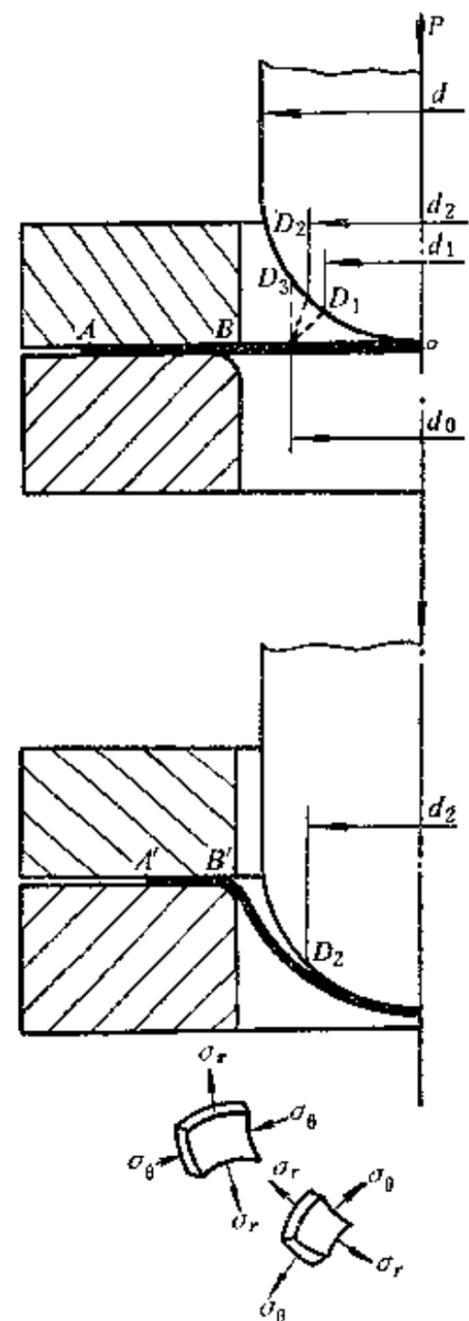


图8-1 曲面零件拉深时的应力与变形

防止曲面零件拉深时毛坯的中间部分起皱的方法，从原理上和圆筒形零件拉深时有很大的差别。加大毛坯的直径、加大压边力和采用拉深筋形式的模具都能防止毛坯中间部分的起皱现象。图 8-4 a 是用普通方法拉深时毛坯内经向应力和纬向应力的分布。图中没有表示出分界圆内纬向拉应力的变化，在分界圆周上（F 点）纬向应力为零，在毛坯中心点 O 上纬向拉应力与经向拉应力相同，而且都应为 $\beta\sigma'$ （实际上的 σ' 是因各点上变形大小而异的变值）。

加大毛坯的直径，由 D 增加到 D' ，毛坯内部应力的分布发生了变化（图 8-4 b），分界圆直径由 $D_{\text{分界}}$ 增大到 $D'_{\text{分界}}$ ，也就是增大了胀形区，使毛坯中间部分受纬向压应力作用的宽度减小了，同时也降低了纬向压应力的数值，从而起到了防止起皱的作用。增大压边力 Q （图 8-4 c）和采用带拉深筋的凹模（图 8-4 d）都使毛坯中间部分的内应力发生类似的变化，也能起到防止起皱的作用。

用加大毛坯的直径来防止其中间部分起皱的方法，能引起材料的额外消耗，所以时常在拉深的曲面零件本来就具有较宽的法兰边或者有一段直边时，把它当做一个顺便的条件予以应用，这时模具的形状简单（图 8-4），制造和修磨都很方便。图 8-5 所示的灯罩和图 8-2 b 所示的零件，就是这种情况。

靠适当地调整和增大压边力以防止毛坯的中间部分起皱的方法，在生产中时常采用。但是，由于双动冲床的外滑块给出的压边力受到板料厚度的波动和操作因素的影响较大，而且压边力的防皱作用也受到其他因素（如润滑条件等等）的影响而变化，所以当零件的形状比较复杂，其正常成形所需的变形力接近于毛坯被拉断的破坏力时，可能形成很低的工艺稳定性，而且对前述各种因素很敏感，容易造成大量的废品。采用弹性的压边装置，上述缺点能得到一定程度的克服，但是，当所需的压边力较大时，也受到弹簧垫或气垫结构尺寸上的限制。

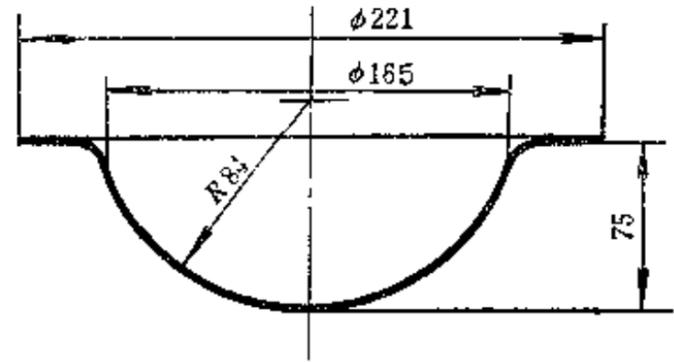


图8-5 带法兰边的曲面零件（灯罩）

材料：08号钢；厚度：0.8毫米；毛坯直径：φ268毫米

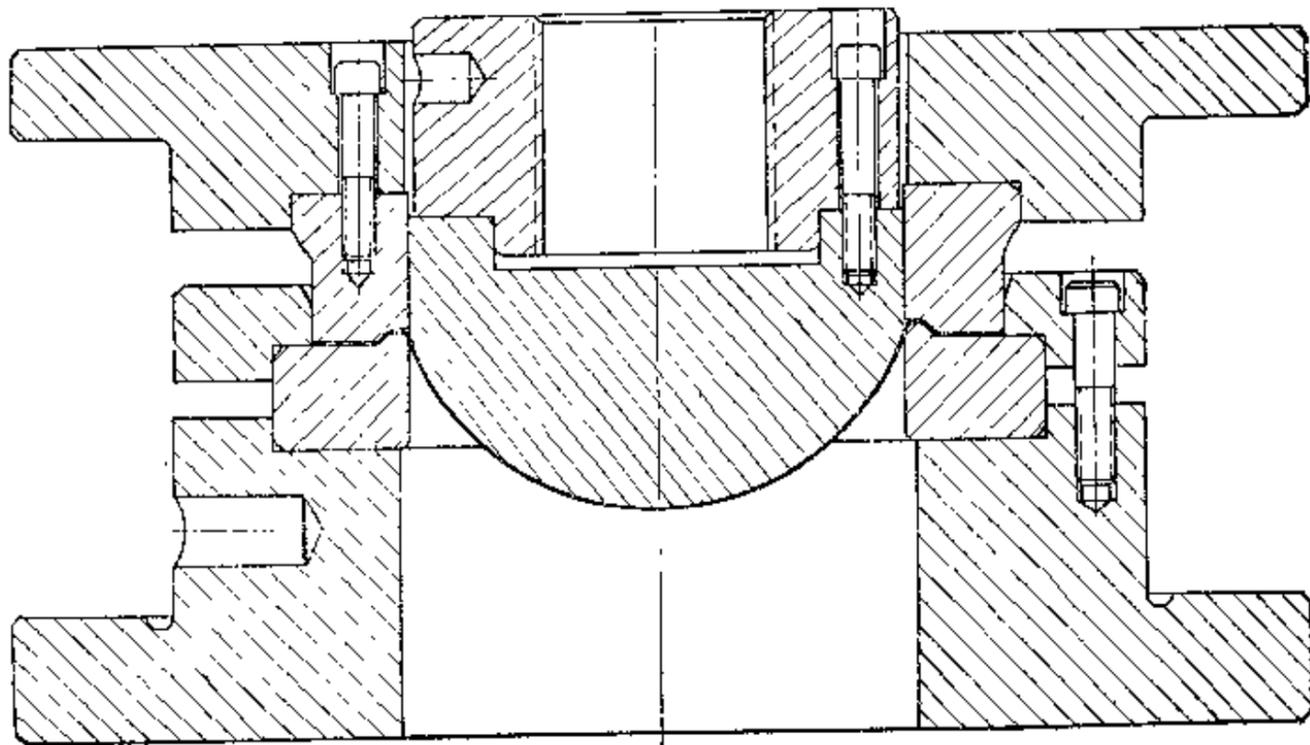


图8-6 带拉深筋的拉深模

采用带拉深筋的拉深模(图8-6),可以避免上述那些缺点。拉深筋对经向拉应力的影响,主要是靠板料在拉深筋上弯曲和滑动时产生的阻力的作用而实现的,所以改变拉深筋的高度 h 、拉深筋的圆角半径 R (图8-7)或者改变拉深筋的数目都可以达到调整阻力和控制经向拉应力和纬向压应力的目的。这时冲床外滑块的位置对拉深过程的影响,与普通的压边圈相比受到很大程度的减弱,因而降低了模具安装调整工作的难度也提高了工艺稳定性。因此,现在在复杂形状零件的拉深时,拉深筋的应用是很广泛的。

上述三种防止毛坯中间部分起皱方法的共同特点,都是用增大毛坯法兰边的变形阻力和摩擦阻力的方法,提高了经向拉应力的数值,而且增大了毛坯中间部分的胀形成分。但是,过分地增大毛坯法兰边的阻力,可能使毛坯的中间部分成为“弱区”,变形将集中在毛坯的内部,而法兰边将不再发生切向收缩的变形,并使变形转变成单纯的胀形。这时毛坯的成形深度受到材料塑性的限制而不能过大,并且还要产生很大的厚度变薄现象。这种情况下,如果使胀形变形过程继续发展下去,就会引起毛坯中间部分的破坏。所以,在实际生产当中,如何根据曲面零件拉深时具体的变形特点,正确地确定和仔细地调整压边力与拉深筋的尺寸,是个十分重要的问题,也是保证得到高质量拉深件的重要关键之一。

由于零件的形状和尺寸的不同,生产中所用拉深筋的形式较多,图8-7为曲面零件成形时常用的拉深筋形式中的一种。当成形零件的厚度为0.5~1.5毫米时,其尺寸可参考表8-1选取。在设计时,一般都取较小的拉深筋圆角半径 R ,以便在试模调整时根据实际情况逐渐修磨加大。

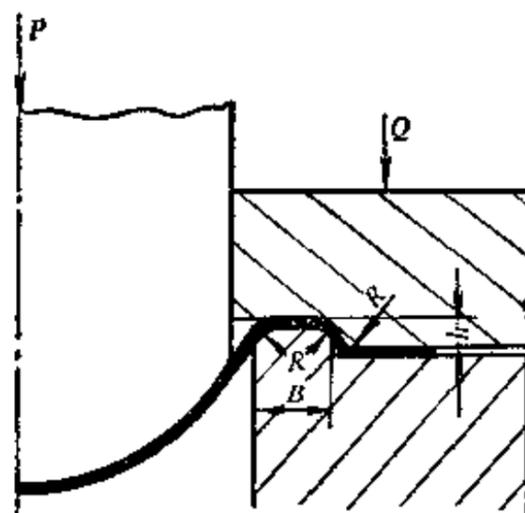


图8-7 拉深筋的结构

表8-1 拉深筋参考尺寸(毫米)

h	B	R
8	10~15	2~5

8-2 球面形状零件的拉深方法

球面形状有许多种类型(图8-8),其拉深方法和所用的模具结构也不相同。

图8-8a是半球形零件,其拉深系数是个与零件直径大小无关的常数($m=0.71$),而且大于圆筒形件的极限拉深系数,所以,在这种情况下不能用拉深系数做为设计工艺过程的根据。由于球面形状零件拉深时的主要困难在于毛坯中间部分的起皱,所以毛坯的相对厚度 $\frac{t}{D_0} \times 100$ 就成为决定成形难易和选定拉深方法的主要依据。

当毛坯的相对厚度较大 $\frac{t}{D_0} \times 100 > 3$ 时,可以用不带压边装置的简单模具一次拉深成功(图8-9)。这时需要采用带球形底的凹模,并且要在冲床行程终了时进行一定程度的精压

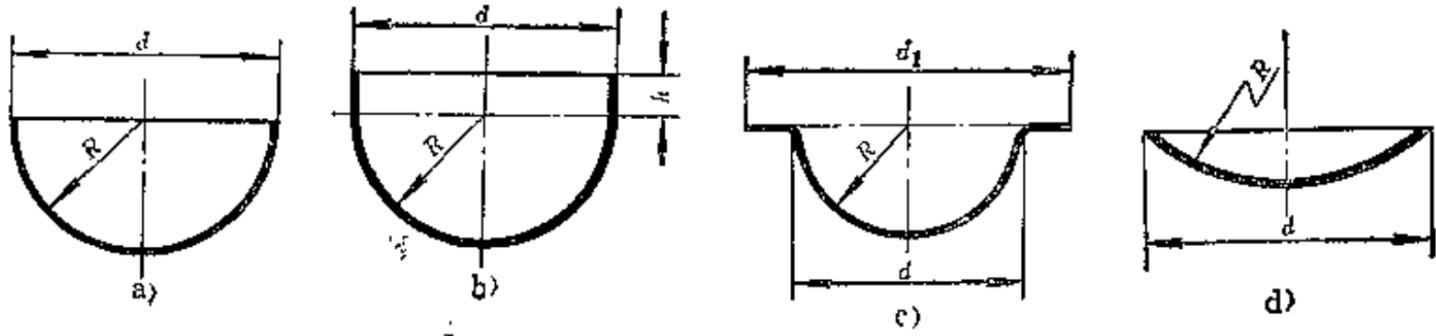


图8-8 各种球面形状零件

校形。在一般情况下，用这种方法制成零件的表面质量不高，而且也因为毛坯贴模不好而使几何形状和尺寸精度受到影响。

当毛坯的相对厚度较小 $\frac{t}{D_0} \times 100 < 3$ 时，必须用带压边装置的模具进行拉深。这时压边装置的功用，除了防止位于压边圈下的毛坯法兰边部分起皱外，同时也靠压边力造成的摩擦阻力引起径向拉应力和胀形成分的增大，借以达到消除毛坯中间部分起皱和使它紧密地贴模的目的。压边装置可以是平面压边圈和带拉深筋的压边圈。在单动冲床上多用带平面压边圈的拉深模，其结构如图 8-10 所示。这时压边力由气垫或弹簧垫提供。气垫的作用力在拉深过程中随冲床滑块的向下运动可能升高 5~10%，而弹簧垫作用力的升高较大，升高值决定于弹簧的刚度、弹簧的尺寸和预紧力等有关，时常可能超过 30~50% 以上。这种作用力随冲床滑块的行程升高的现象，对球面形状零件的拉深常常是有利的，因为当毛坯法兰边直径在拉深后期的减小引起变形区所需的拉应力下降时，弹簧垫作用力的增大能起一定的补偿作用，对拉深后期毛坯的成形和贴模是有利的。

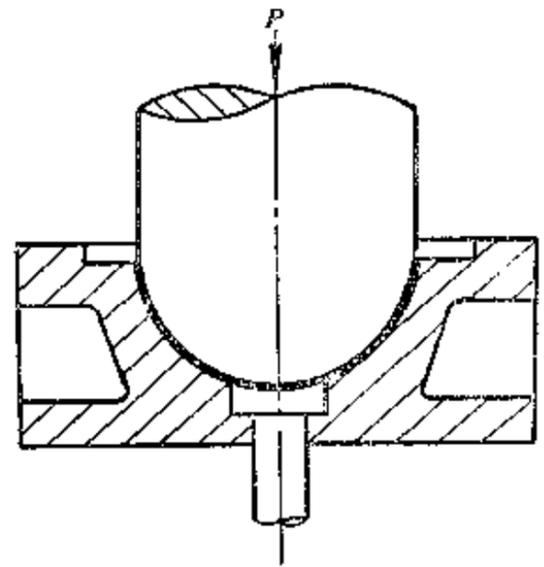


图8-9 不带压边装置的球形件拉深模

在双动冲床上拉深时，前述的两种压边圈都可采用。这时，压边力由冲床的外滑块提供，所以也叫刚性压边圈。带拉深筋的压边装置(图 8-6)对板料厚度的波动以及对冲床调整和操作因素波动影响的敏感性低，所以其工艺稳定性较高，在生产中采用较多。刚性平面压边装置的工艺稳定性差，但制造简单，所以当对工艺稳定性要求不高时(如相对厚度较大或深度较浅又带有较宽的法兰边时)，也可以采用。尤其当零件带有平法兰边时，也只能采用平面压边圈的拉深模。

当球面形状零件带有高度为 $(0.1 \sim 0.2)d$ 的直边(图 8-8 b)或带有每边宽度为 $(0.1 \sim 0.15)d$ 的法兰边时(图 8-8 c)，虽然拉深系数有一定的降低，但对零件的成形却有相当的好处。所以当对不带直边和带法兰边的半球形零件的表面质量和尺寸精度要求较高时，都要加工艺余料以形成法兰边，并在零件成形后切除。

当用平面压边圈时，压边力的大小不仅要使毛坯的法兰边部分不能起皱，而且也要保证毛坯中间的曲面部分也不起皱。曲面零件成形时，按后一条件所要求的压边力 Q 可按下式计算。

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - d^2) q \quad (\text{牛})$$

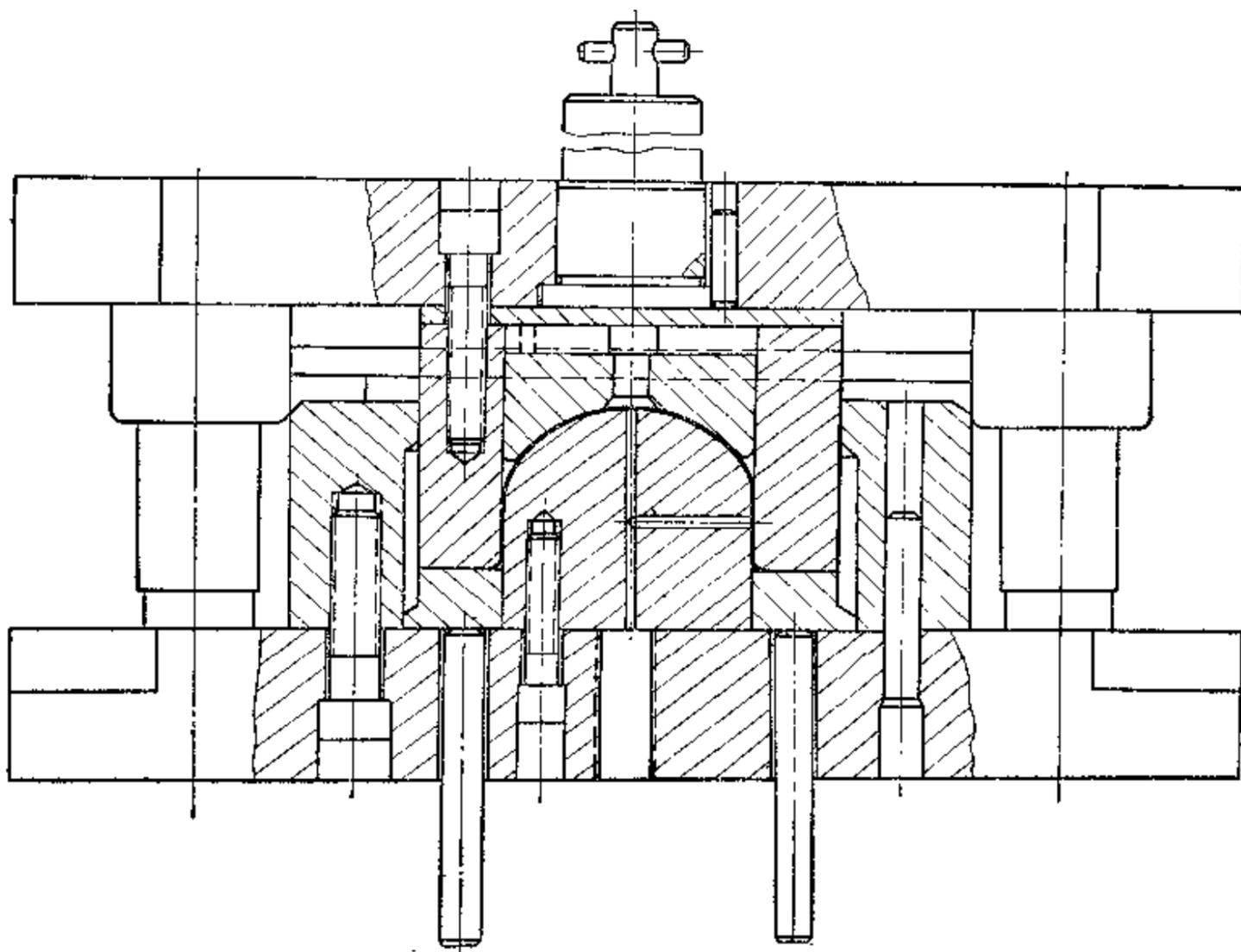


图8-10 单动冲床上用的落料拉深复合模

式中 D_0 ——毛坯的初始直径(毫米);
 d ——毛坯球面部分的直径(毫米);
 q ——法兰边上单位面积上的压力 (牛/毫米²), 其值决定于板料的性能、毛坯的初始直径和成形结束时毛坯的外径和毛坯的相对厚度等。表 8-2 中列出了必要的单位压力 q 的数值, 它适用于厚度为 0.5~2 毫米的低碳冷轧钢板, 冲压成半球形的情况。

表8-2 防止毛坯内部起皱的必要的初始压力 q (牛/毫米²)

$\frac{D_0}{d}$	毛 坯 相 对 厚 度 t/D_0	
	0.006~0.013	0.003~0.006
1.5	3~3.5	5~6
1.6	1.7~2.2	3.5~4.5
1.7	1.0~1.5	1.5~3
1.8	1.0~1.2	0.7~1.5

注: 本表中的数据是按在压边部分不用润滑的条件下得到的实验结果; 如果用润滑时, 表中数据应提高50~100%。

当毛坯直径 $D_0 \leq 9\sqrt{Rt}$ 时, 可以用带底模具压成。这时, 毛坯不致起皱, 但在成形时毛坯容易窜动, 而且可能产生一定的回弹, 所以成形的精度不高。假如球面半径 R 较大, 而零件的深度和厚度较小时, 必须按回弹量修正模具。

当毛坯直径 $D_0 > 9\sqrt{Rt}$ 时, 由于毛坯的起皱问题而不可能用前述方法加工。这时应该

附加一定宽度的法兰边(工艺余料),并用强力压边装置或用带拉深筋的模具,增大成形中的胀形成分。工艺余料在成形后切掉。这样冲成的零件回弹小,具有较高的尺寸精度,表面质量也好。

抛物面形状零件的拉深方法与所用模具结构,与球形零件基本相似。但是,当抛物面形状零件的高度较大、顶端的圆角半径较小时,其成形的难度有所提高。这时,为了使毛坯中间部分紧密贴模而又不起皱,必须加大成形中的胀形成分和径向拉应力。图8-11所示的模具即为带两个环形拉深筋的用于较深抛物面形状零件(灯罩)的拉深模,冲制的零件尺寸与变形情况,见图8-2。

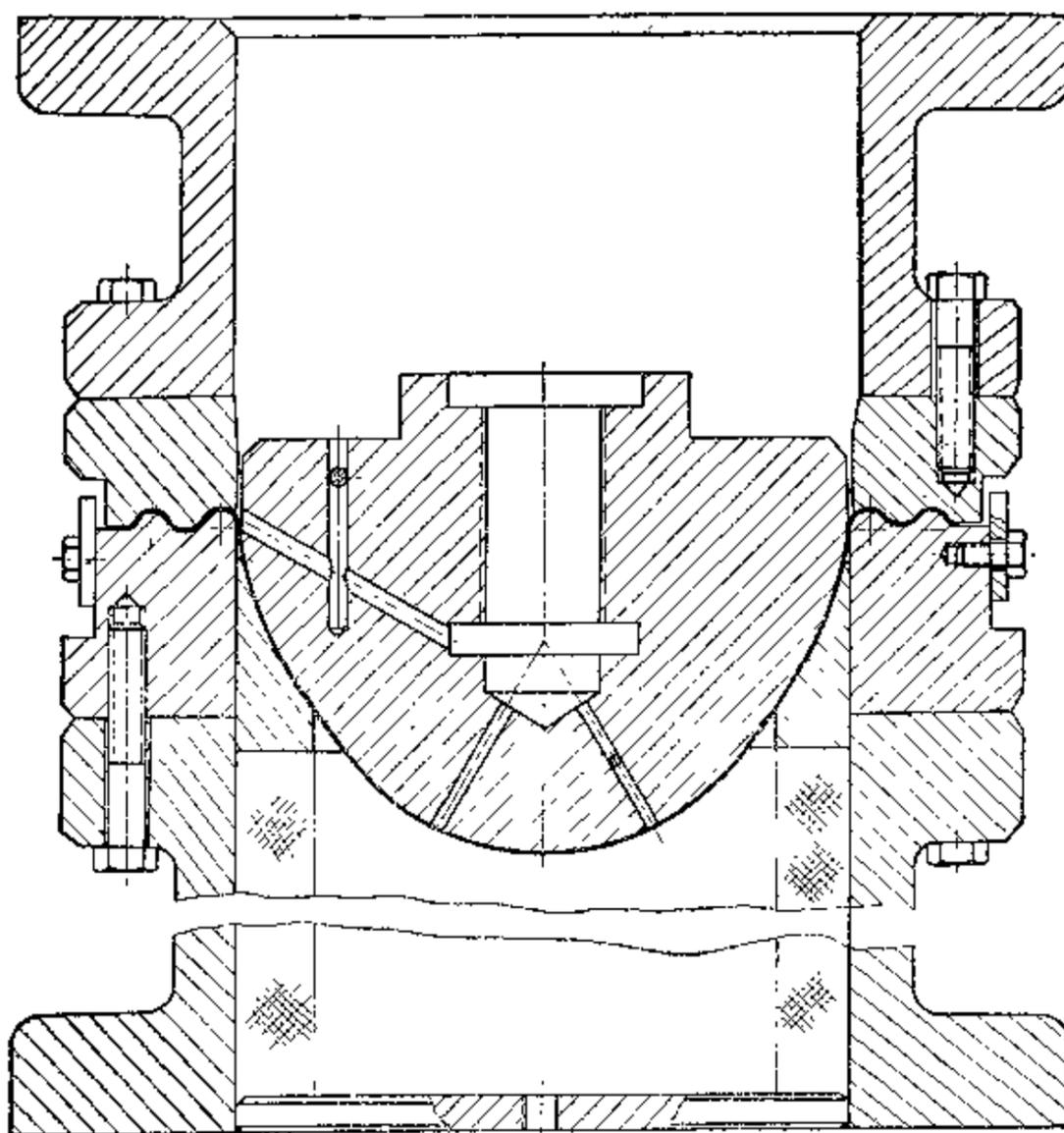


图8-11 深度较大的抛物面形零件(灯罩)拉深模

当曲面形状零件的深度大而顶端的圆角半径又小时,增大成形中的胀形成分和提高径向拉应力的措施受到毛坯尖顶部分承载能力的限制,所以在这种情况下应该采用多工序逐渐成形的办法。多工序逐渐成型的主要特点是采用正拉深或反拉深的方法,在逐渐地增加深度的同时减小顶部的圆角半径。为了保证成形零件的尺寸精度和表面质量,在最后一道工序里应保证一定的胀形成分,为此应使最后工序所用的中间毛坯的表面积稍小于成品零件的表面。

8-3 锥形零件的拉深方法

由于锥形零件各部分的尺寸比例关系的不同,其冲压成形难易的程度和所应采用的成形

原理与方法也有很大的差别。因此，在确定锥形件的成形方法和设计其冲压工艺过程与所用模具时，都应以下列几个参数做为依据。

一、锥形件的相对高度 $\frac{h}{d_2}$ (图 8-12) 由图 8-13 中不同的 $\frac{h}{d_2}$ 两种情况的对比可以看出：

假如其他条件相同，当锥形件的高度 h_2 较大时，如不产生胀形变形，则距中心相同距离上的 B 点贴模所要求的径向收缩量 Δ_2 要大于高度 h_1 较小时的径向收缩量 Δ_1 ，所以这时毛坯中间悬空部分起皱的可能性也大。虽然用增大胀形成分的办法可以减小径向收缩量 Δ_2 ，但是在高度 h_2 过大时，胀形成分的增大受到板材塑性的限制，也是不可能的。另一方面，锥形件的高度大时，毛坯的直径也要相应地增大，也就是增加了位于压边圈下毛坯变形区的宽度，结果使其产生拉深变形所需的径向拉应力也要增大，这又是毛坯中间部分的承载能力不能允许的。所以当 $\frac{h}{d_2}$ 较大时，成形的难度大，需用

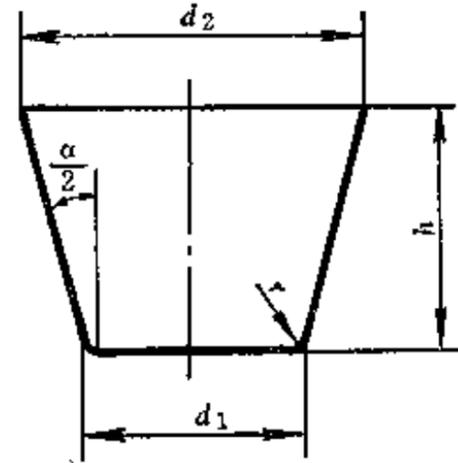


图8-12 锥形件各部分尺寸

多工序冲压加工；而当 $\frac{h}{d_2}$ 较小时，可能一次冲压成功。

二、相对锥顶直径 $\frac{d_1}{d_2}$ 当 $\frac{d_1}{d_2}$ 较小时，在成形过程中毛坯中间部分的承载能力差，易于破裂，而且毛坯的悬空部分的宽度大，容易起皱，所以冲压成形比较困难；当 $\frac{d_1}{d_2}$ 较大时，

情况好转，接近于圆筒形零件的拉深过程，冲压成形比较容易。

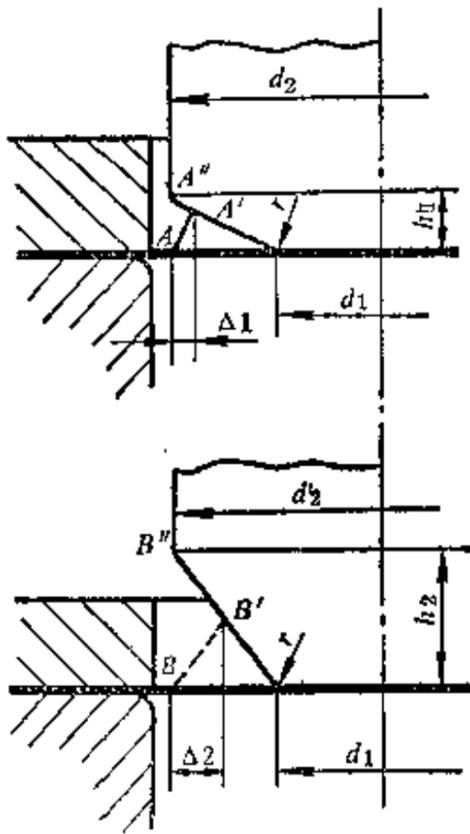


图8-13 高度不同的锥形件变形对比

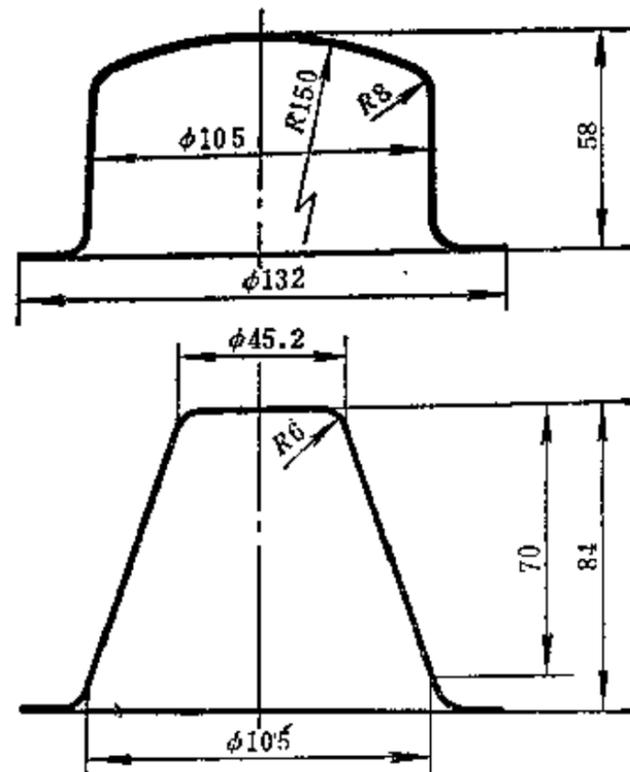


图8-14 高度大的锥形件的成形方法

材料：08钢；厚度：1.2毫米

三、相对厚度 $\frac{t}{d_2}$ 毛坯的相对厚度小时，中间部分容易起皱，所以成形的难度大，常需增加工序数目。

在生产中需要冲压加工的锥形零件的形状与尺寸是千变万化的，为了研究方便，分成下

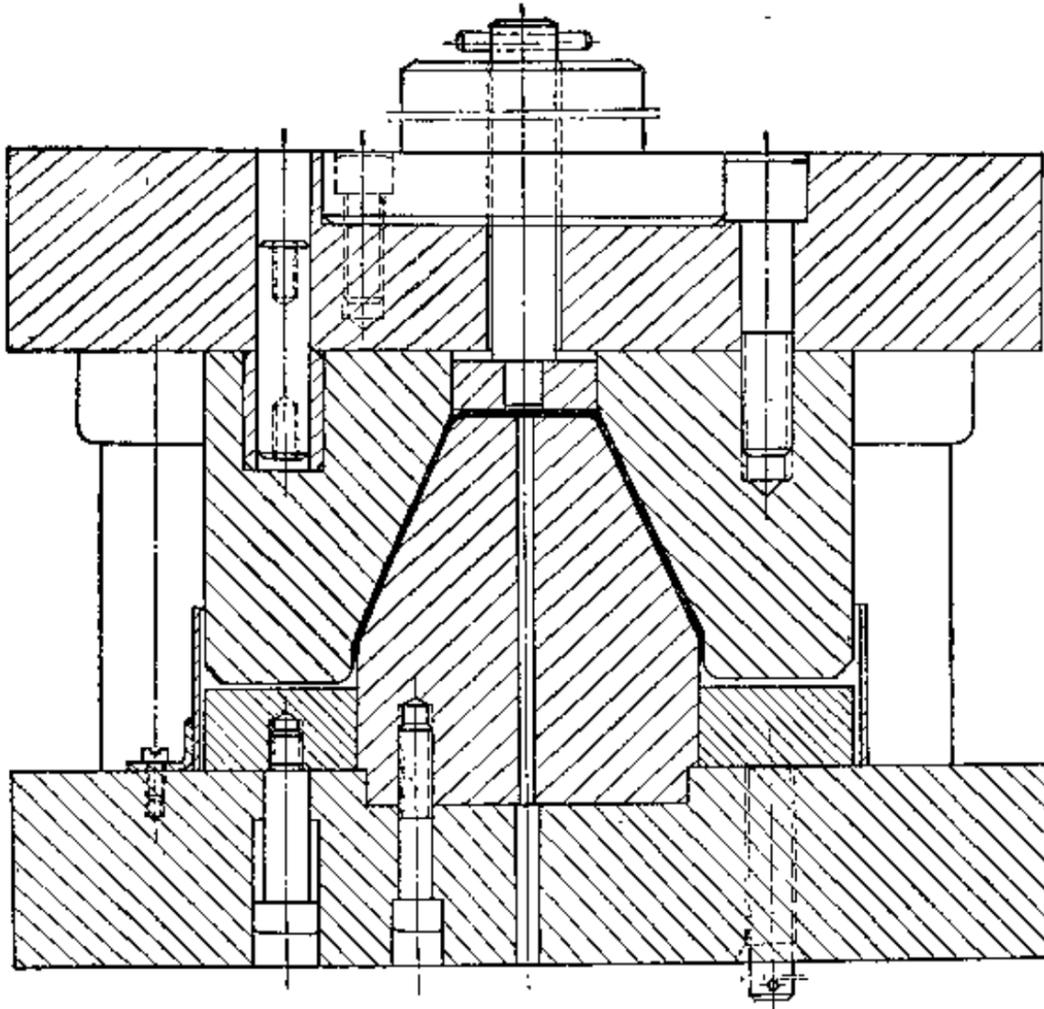


图8-15 图8-14所示锥形件成形用冲模

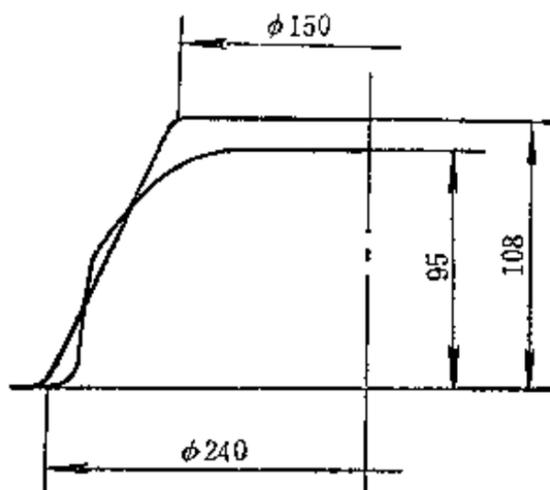
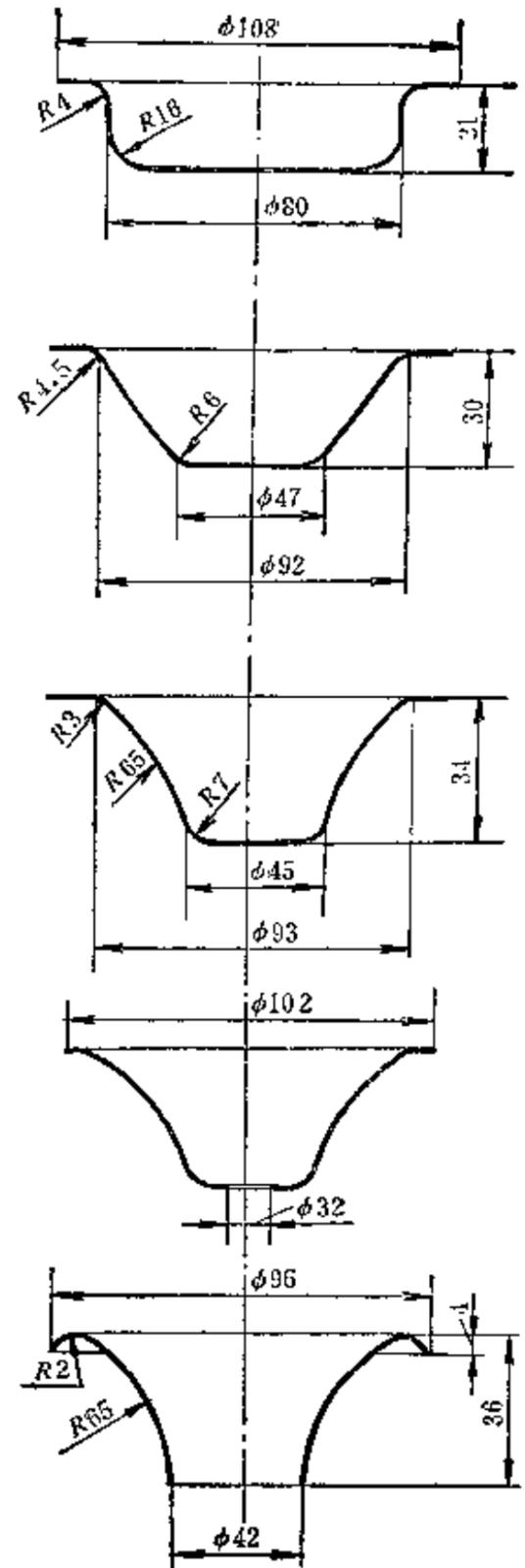


图8-16 相对厚度较小的锥形件成形方法

图8-17 电振动喇叭筒口的成形方法
材料：冷轧低碳钢板；厚度：0.6毫米

边几种情况分析其冲压加工方法的特点。

当锥形零件的相对高度较小 $\frac{h}{d_2} < 0.2$ 时， $\frac{d_1}{d_2}$ 的影响并不十分重要，可以根据相对厚度 $\frac{t}{d_2}$ 之值确定成形方法。当 $\frac{t}{d_2} > 0.02$ 时，可以不用压边装置，用带底冲模一次冲压成功。但是，这时的回弹现象比较严重，为了保证冲压件的尺寸精度，常需修正模具，所以冲成零件的精度受到影响。当对零件的尺寸精度要求较高，或者当零件的相对厚度较小时，应该采用带平面压边圈或带拉深筋的模具，用以增大成形过程中的径向拉应力和胀形成分。假如锥形件不带法兰边，这时，为了冲压成形的需要，应该增大毛坯尺寸，使在成形结束时还有一定宽度的法兰边(工艺余料)存在。一般说来，锥形件的胀形条件比球面零件差，变形的不均匀程度较大，变形主要集中在零件底部向锥面过渡的圆角 r 附近(图 8-13)。尤其在圆

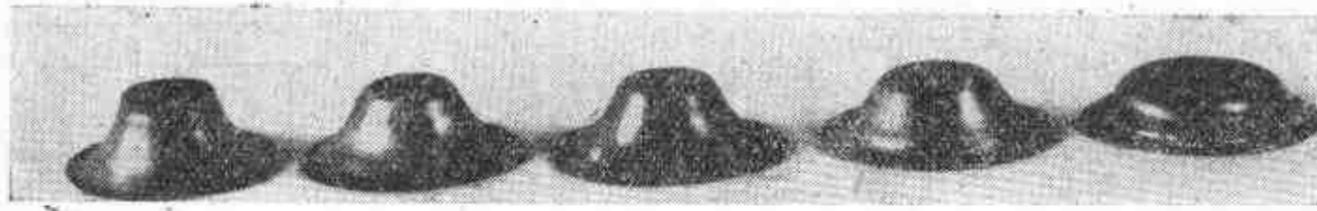


图8-18 电振动喇叭筒口的成形过程

角半径 r 较小时, 这个现象更为严重, 以致使胀形深度大为降低(与球面冲头相比)。

对于相对厚度较大($\frac{t}{d_2} > 0.02$)的锥形件, 如果其 $\frac{d_1}{d_2} > 0.5$, 而且 $\frac{h}{d_2} < 0.43$, 可以用锥形带底凹模一次拉深成功。这时应在冲床行程终了时对零件进行一定程度的校形。假

如 $\frac{d_1}{d_2}$ 的比值增大, 一次拉深可能成功的高

度 $\frac{h}{d_2}$ 也可以相应地加大: 如 $\frac{d_1}{d_2} = 0.6 \sim$

0.7 时, $\frac{h}{d_2}$ 可能达到 0.5 左右; 而当 $\frac{d_1}{d_2}$

$= 0.8 \sim 0.9$ 时, $\frac{h}{d_2}$ 之值可能达到 $0.5 \sim 0.6$

或更大。

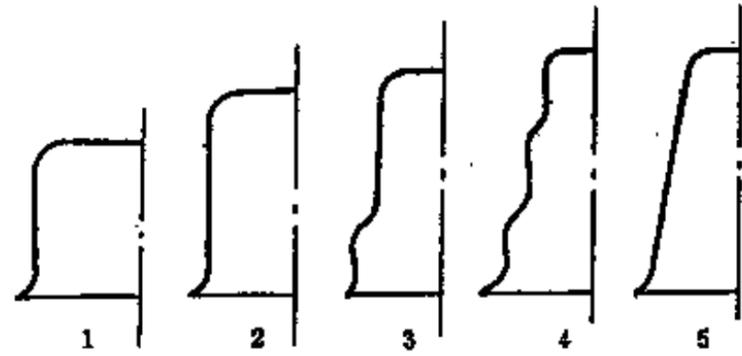


图8-19 高锥形件的阶梯形过渡的拉深方法

当锥形件的相对厚度较大, 而且其高度超过前述范围或同时又带有较宽的法兰边时, 可以采用图 8-14 所示的冲压工艺方法: 首先冲成圆筒形件或带法兰边的筒形件, 然后用锥形凹模拉深成所要求的锥形尺寸, 并在冲床行程终了时进行校形。在拉深过渡的圆筒形件时, 应使其具有便于在后继工序中对成形的有利形状。图 8-15 为锥而成形所用的冲模。

当锥形件的相对厚度较小 $\frac{t}{d_2} < 1.5 \sim 2\%$, 而且其 $\frac{d_1}{d_2} \geq 0.5$ 及相对高度 $\frac{h}{d_2} = 0.3 \sim 0.5$ 时, 通常采用两道冲压工序加工: 在第一道工序里用 8-2 节中的方法拉深成具有较大圆角半径的筒形件或近于球面形状的半成品, 然后用带有一定胀形成分的校形工序最后冲压成为要求的形状(图 8-16)。在确定第一道工序后的半成品尺寸时, 应保证在胀形时各部分的直径增大量不要超过 $5 \sim 8\%$, 而且第一道工序中拉入凹模的毛坯面积要稍小于第二道工序所需的面积。图 8-17 与 8-18 是一个不带底的锥形件——电振动喇叭的冲压成形过程。由于零件的相对厚度较小, 在第一、二道工序里便采用了上述的成形方法。假如锥形件的高度不大 $\frac{h}{d_2} = 0.3 \sim 0.4$, 而 $\frac{d_1}{d_2}$ 与 r (图 8-12) 都比较大时(或零件底部具有便于胀形加工的圆滑过渡形状时), 也可以采用球面形状零件的成形方法, 用较强的压边装置增大径向拉应力和胀形成分, 以一道工序冲压成形。

当锥形件的相对高度较大 $\frac{h}{d_2} > 0.5$, 尤其是 $\frac{d_1}{d_2}$ 较小时, 必须采用多工序的冲压方法使零件逐渐成形。图 8-19 是先冲压成具有大

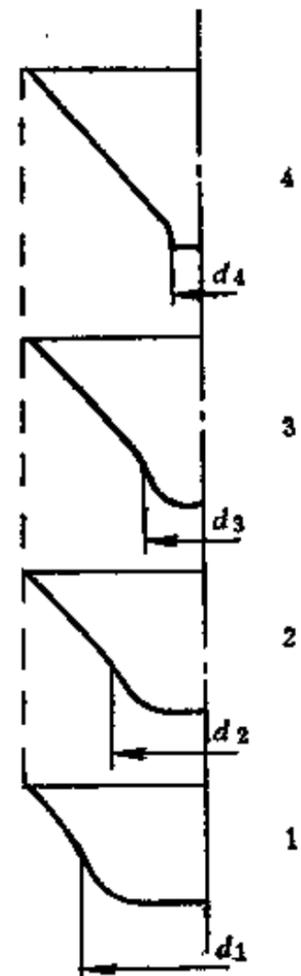


图8-20 高锥形件的逐步成形法

圆角半径过渡的阶梯形的中间毛坯，然后校形成锥形零件的方法。由于在校形后不可避免地要在成品零件表面上残留有阶梯形中间毛坯的痕迹，所以这种方法应用不多。图 8-20 是另一种逐步地冲压成锥形件的工艺方法。每道工序里毛坯底部直径的变化，可按圆筒形零件多工序拉深时的极限拉深系数选定。

8-4 非旋转体曲面形状零件的拉深特点

形状不规则的曲面零件的种类很多，但其共同的变形特点可以归纳为既有曲面形状零件的内部胀形和外周拉深的复合变形特点，而且也有变形沿零件的周边分布不均匀的特点。因此，对曲面形状零件和盒形件拉深成形的分析方法，得出的结论和解决各种问题的措施等，都基本上可以用于非旋转体曲面形状零件的成形，但是必须综合地考虑这几方面因素的相互关系和影响，并根据零件几何形状的特点予以灵活地运用。此外，这种类型零件的成形过程中也还存在着另外一些特殊性的问题，需要采取另外一些措施。以下通过图 8-21 所示的不规则形状曲面零件的成形问题对几项主要的原则做个简要的说明。

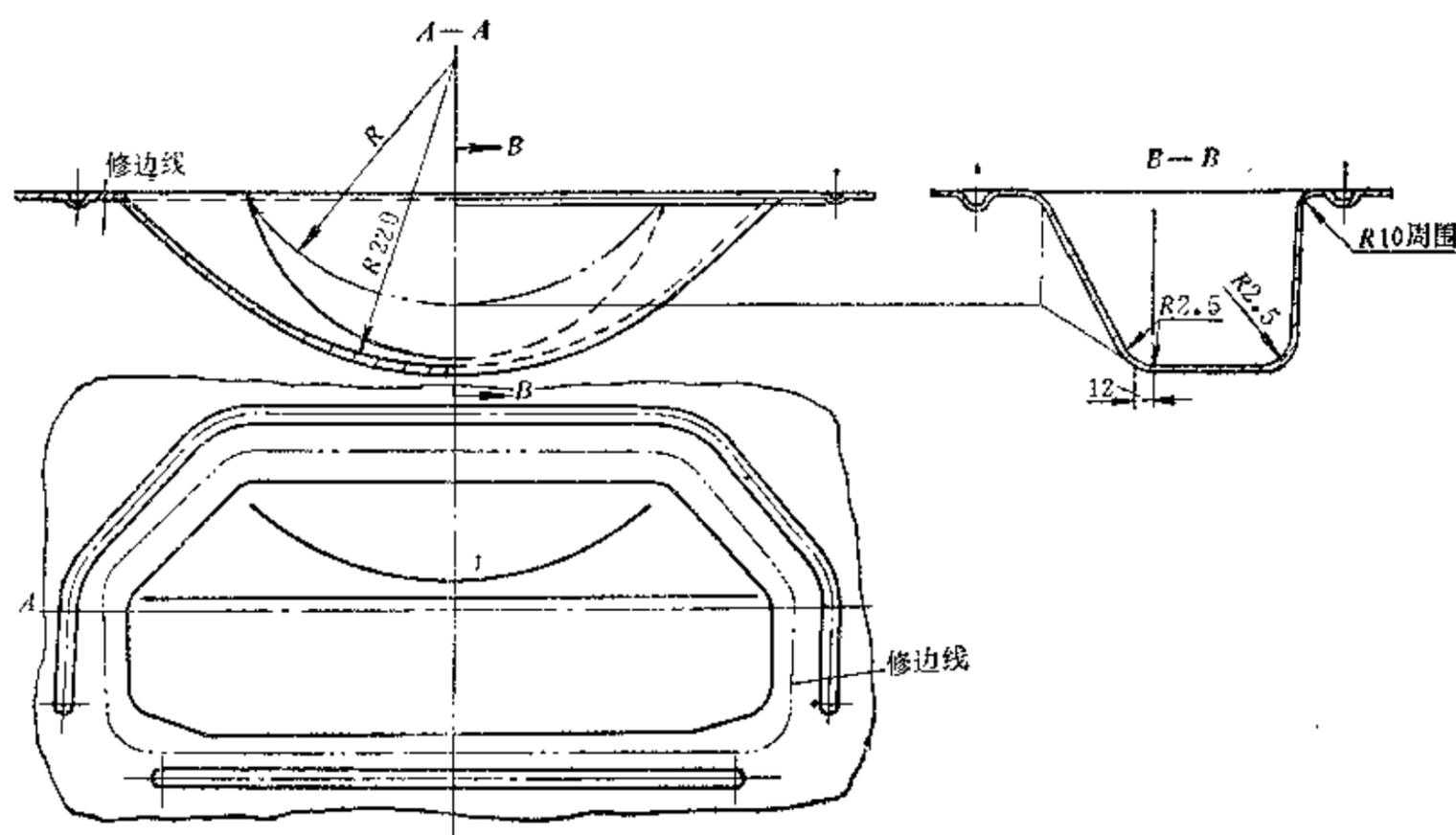


图8-21 非旋转体曲面形状零件举例

图 8-21 所示的非旋转体曲面形状零件的深度较大，需要同时进行毛坯中间部分的胀形和四周法兰边向里收缩的拉深变形才可能冲压成功。对于这类零件最常用的拉深方法，是用图 8-22 所示的带拉深筋的冲模。因为沿毛坯周边产生的拉深变形大小不同，直边部分的拉深变形小，所需的径向拉应力也小，而圆弧部分(或曲线部分)的拉深变形较大，所需的径向拉应力也大，所以在整个周边上毛坯侧壁内的拉应力大小不同，其差别可能达到相当大的数值。假如零件具有由小圆角半径过渡的垂直侧壁与平底的结构形状，这样的径向拉应力的差别所造成的困难和问题并不大。但是，在曲面零件成形时要求毛坯中间部分必需要产生一定量的胀形成分，才可能保证冲压过程的顺利进行。为使毛坯的中间部分产生胀形的必要条件是

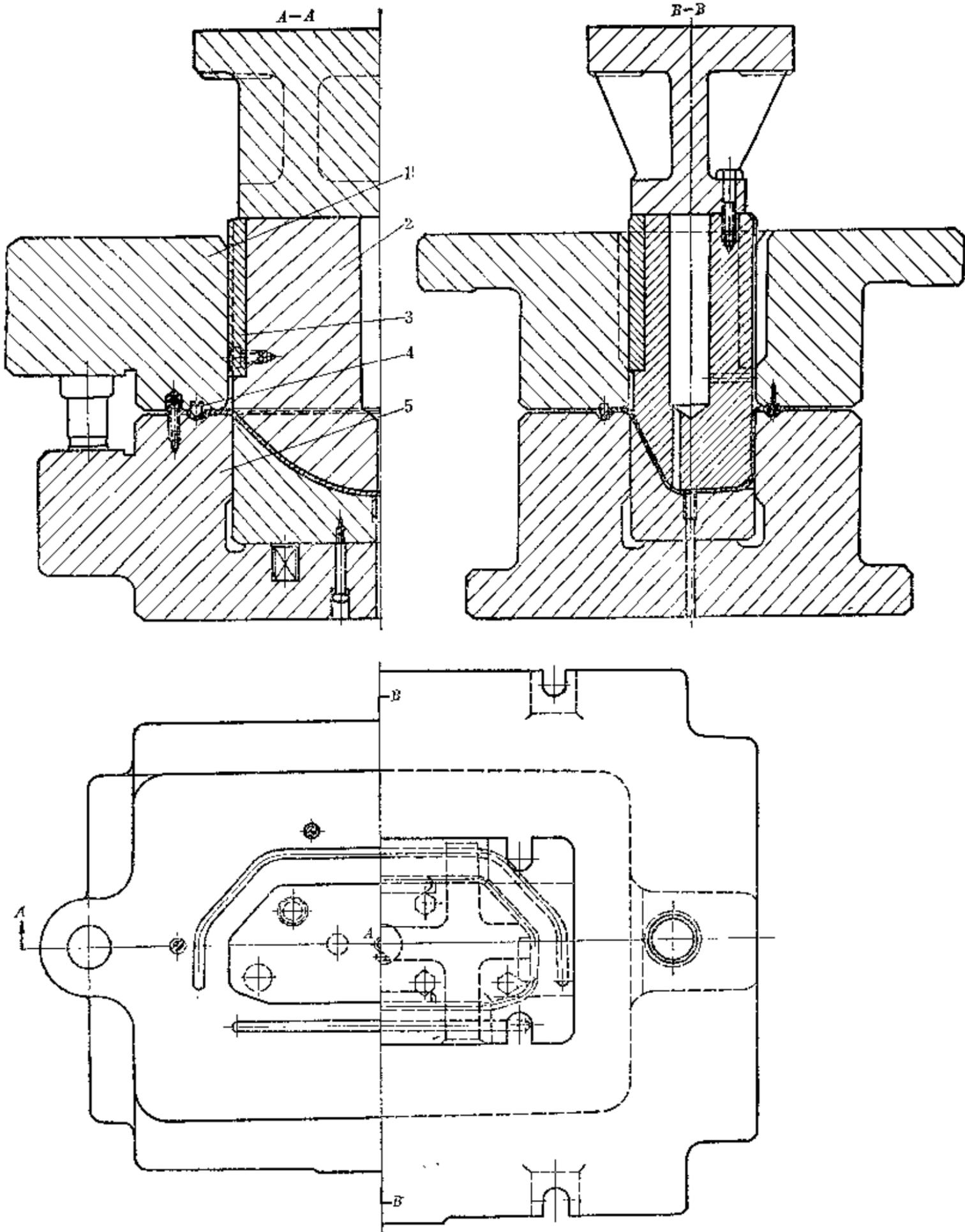


图8-22 带拉深筋的拉深模

1—压边圈 2—凸模 3—导板 4—拉深筋 5—凹模

作用于毛坯断面内数量足够大的径向拉应力。由于径向拉应力沿毛坯周边的分布是不均匀的，在拉深变形小，因而径向拉应力也小的直边部分，径向拉应力的数值不足以引起毛坯的中间部分产生足够的胀形变形，所以在切向压应力的作用下就可能起皱，破坏了进行正常成形的条件。因此，在这种类型零件拉深时，必须采取有效的措施，使沿毛坯全部周边都产生接近均匀而数量又足以引起毛坯的中间部分在各个方向上都产生比较均匀的、足够大的胀形所需要的

径向拉应力。靠调整毛坯的尺寸或使压边力沿毛坯周边的分布不均以达到产生均匀的径向拉应力目的的方法，是难以实现的，或者是不经济的。在这种情况下，能够保证得到比较均匀的或符合需要的径向拉应力的有效措施，是采用如图 8-22 所示的带拉深筋的冲模。

在拉深开始之前，在冲床外滑块的作用下毛坯的周边首先被拉深筋压弯成形。随后，在冲床内滑块的作用下，毛坯的周边产生拉深变形并向凹模里收缩时，板料不断地沿拉深筋表面滑动过程中产生的摩擦阻力和弯曲变形阻力，都使毛坯断面内的径向拉应力的数值加大。改变拉深筋的数目、高度和圆角半径，都可以达到调整径向拉应力的目的。这种调整径向拉应力的方法是十分方便的，而且调整的范围也比较大，所以在生产中应用十分广泛。

拉深筋的结构形状和尺寸见图 8-23，其中尺寸是设计时给定的，而且也是冲模制造的依据。但是，在新冲模制成后，必须根据试冲的结果对拉深筋的高度和圆角半径进行修磨，借以调整沿零件周边各个部位上径向拉应力的数值，使其符合于毛坯中间部分成形的需要。

拉深筋在零件周边上的布置，应该根据零件的几何形状和变形的特点决定（图 8-21）。在拉深变形程度大，因而径向拉应力也较大的圆弧曲线部位上，可以不设或少设拉深筋；在拉深变形小，因而径向拉应力也小的直线部位上或曲率较小的曲线部位上要设或要多设拉深筋。假如在拉深零件的周边各位置上径向拉应力的差别很大，在径向拉应力小的部位上应设置两排或三排拉深筋（图 8-24）。

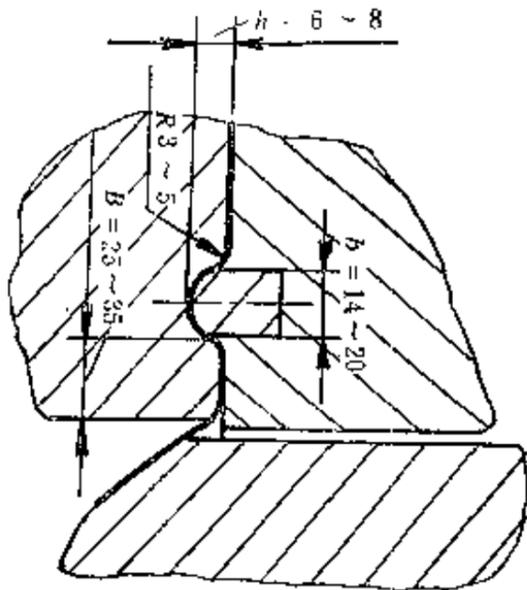


图8-23 拉深筋的结构形状

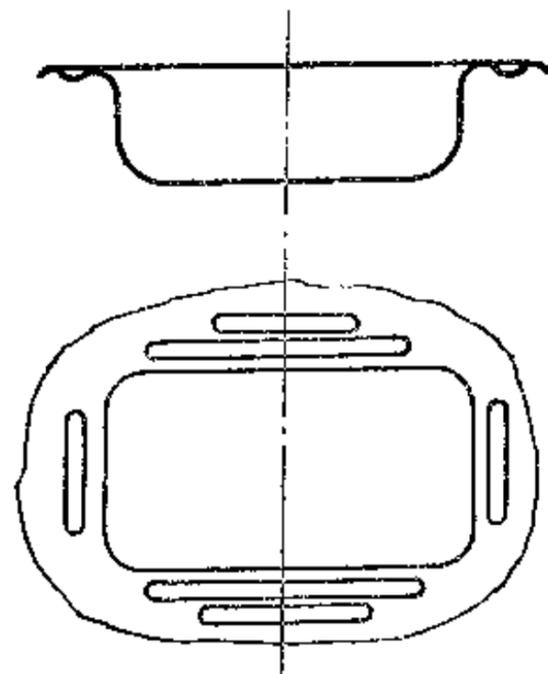


图8-24 拉深筋的布置方法

在布置拉深筋时，也还要注意到不对称零件的平衡问题。当零件的变形不对称时，径向拉应力的分布也是不对称的。所以在拉深过程中变形大因而需要较大径向拉应力的部分毛坯可能不产生变形，也不向凹模内移动，而变形小因而需要较小径向拉应力的部分毛坯，则比较容易地被拉入凹模。这样就会形成不均匀单向进料的拉偏现象，破坏成形的正常进行。这时，可以在容易拉入凹模的部位上设置拉深筋，使沿零件周边作用的径向拉应力达到平衡。

采用带拉深筋的冲模时，必须增大毛坯法兰边的宽度，使修边线处于拉深筋的里侧，以保证零件法兰边的平整（图 8-21）。当零件没有法兰边时，也必须作为压边增加工艺余料。假如零件的上口不处于一个平面范围之内，而是处于一个复杂曲面内的曲线时，也应该增加工艺余料使压边圈和凹模表面成为一个平面或形状简单的曲面，并且要保证当压边圈压料时使板料毛坯产生的变形尽量简单，不致出现皱折或过度的伸长变形等毛病。

某些深度较小，而且曲率也小的比较平坦的零件，其拉深变形所需的径向拉应力的数值

不大，零件在模具内的形状在出模后不能保持下来，即回弹变形大，或者根本不能紧密地贴模。这时应该加强拉深筋的作用，基本上不使毛坯的周边产生拉深变形，而主要靠毛坯的中间部分的胀形机理使毛坯成形。其成形的机理和拉形相同，毛坯受力状态下的形状在出模卸载后仍可保留，所以成形精度高。具有很强作用的拉深筋也叫做拉深槛（图 8-25）。

必须说明，在非旋转体曲面形状零件拉深时，采用带拉深筋冲模的成形方法，并不是唯一的措施。在实际生产中必须根据零件几何形状和精度要求等方面的情况，灵活地采取各种不同的方法解决其成形问题。例如，当零件的变形对称，或者变形接近均匀，或者不需要很大的胀形成分等情况下，也可以不用带拉深筋的冲模，而采用平面压边装置的冲模，也可能冲出合格的零件；又如当零件的相对厚度大时，也可以采用不带压边装置的冲模进行冲压加工等等。

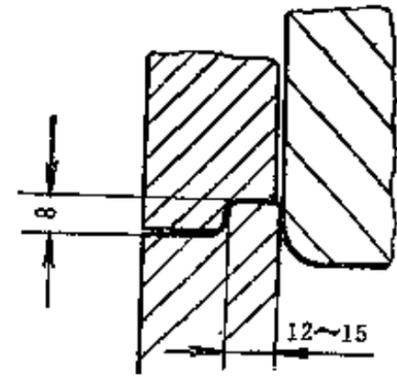


图8-25 拉深槛的形状

第九章 翻 边

翻边是在成形毛坯的平面部分或曲面部分上使板料沿一定的曲线翻成竖立边缘的冲压方法。用翻边方法可能加工形状较为复杂,而且具有良好刚度和合理空间形状的立体零件,所以在冲压生产当中应用较广,尤其在汽车、拖拉机、车辆等工业部门的应用更为普遍。

按变形的性质,翻边可以分为伸长类翻边和压缩类翻边。伸长类翻边时,由模具的直接作用而引起的变形是切向的伸长变形(图 9-6 与 9-10);而压缩类翻边时,由模具的直接作用引起的变形是切向的压缩变形(图 9-17 与 9-18)。

当翻边是在平面毛坯上或毛坯的平面部分上进行时,叫做平面翻边(图 9-6 与 9-17);当翻边是在曲面毛坯上进行时,叫做曲面翻边(图 9-10 与 9-18)。平面翻边与曲面翻边在变形上的差别是很大的。

当翻边的沿线是一条直线时,翻边变形就转变为弯曲,所以也可以说弯曲是翻边的一个特殊形式。但是,翻边时毛坯的变形不同于弯曲变形,比弯曲复杂的多,因为弯曲时毛坯的变形仅局限于弯曲线的圆角部分,而直边部分不产生塑性变形,只是由于圆角部分的变形而使直边部分产生一定的转动,而翻边时毛坯的圆角部分和直边部分都是变形区。

9-1 伸 长 类 翻 边

伸长类翻边包括:孔的翻边(图 9-1)、沿不封闭的内凹曲线进行的平面翻边(图 9-6)和在曲面毛坯上进行的伸长类翻边(图 9-10)等。它们的共同特点是毛坯变形区在切向拉应力的作用下产生切向的伸长变形,其变形特点属于伸长类成形。

一、圆孔翻边

孔的翻边是伸长类平面翻边的一个形式,在生产中应用较广,可以加工成各种复杂形状的零件(图 9-2)。在孔翻边时毛坯变形区的受力情况与变形特点如图 9-1 所示。在翻边前毛坯孔的直径是 d_0 ,翻边变形区是内径为 d_0 而外径为 d_1 的环形部分。在翻边过程中,变形区在冲头的作用下其内径 d 不断地增大。直到翻边结束时,变形区内径的尺寸等于冲头的直径 d_p ,这时也最终形成了竖直的边缘(图 9-2)。

在圆孔翻边时,毛坯变形区内的应力与应变的分布如图 9-3 所示。切向变形在变形区内孔边缘位置上具有最大值 $\epsilon_0 = \ln \frac{d}{d_0}$,而且随变形过程的进展而不断地增大,于翻边结束时,其值为 $\epsilon_{0max} = \ln \frac{d_1}{d_0}$ 。毛

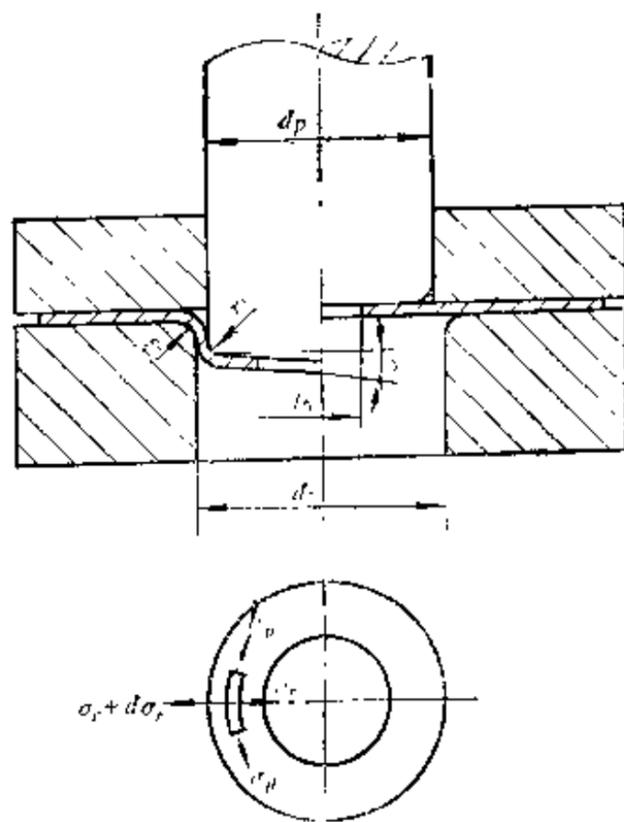


图9-1 孔翻边时变形区的应力与变形

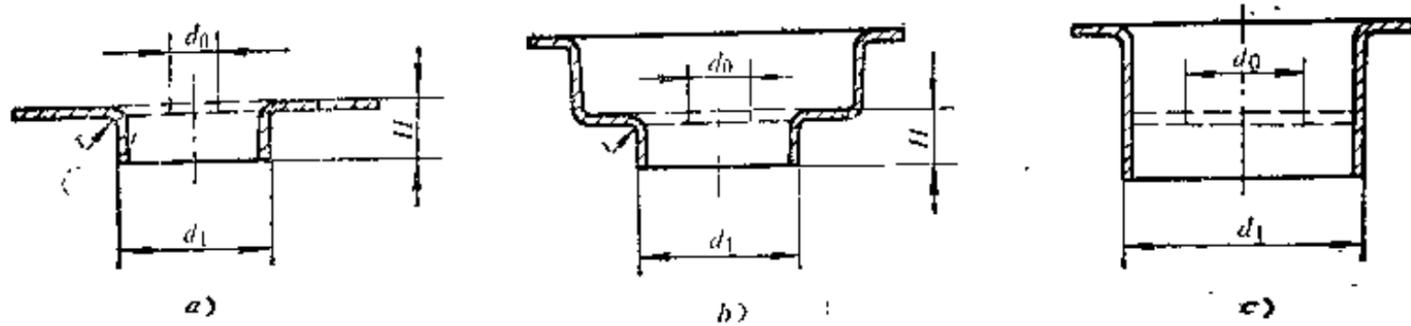


图9-2 孔翻边加工零件举例

坯变形区受两向拉应力——切向拉应力 σ_θ 和径向拉应力 σ_r 的作用，其中切向拉应力是最大主应力。最小主应力为零。径向拉应力 σ_r 是中间主应力，其值远小于切向拉应力 σ_θ 之值。在翻边变形区内边缘上毛坯处于单向受拉的应力状态，这里只有切向拉应力的作用，而径向拉应力的数值为零。在翻边过程中毛坯变形区的厚度在不断地变薄。在翻边后所得到的竖边在边缘部位上厚度最小，其值可按单向受拉时变形值的计算方法用下式估算：

$$t = t_0 \sqrt{\frac{d_0}{d_1}}$$

式中 t ——翻边后竖边边缘部位上板料的厚度；

t_0 ——板料毛坯的原始厚度；

d_0 ——翻边前孔的直径；

d_1 ——翻边后竖边的直径。

冲头与凹模的作用，除了使毛坯产生上述的翻边伸长变形外，也具有使毛坯的环形

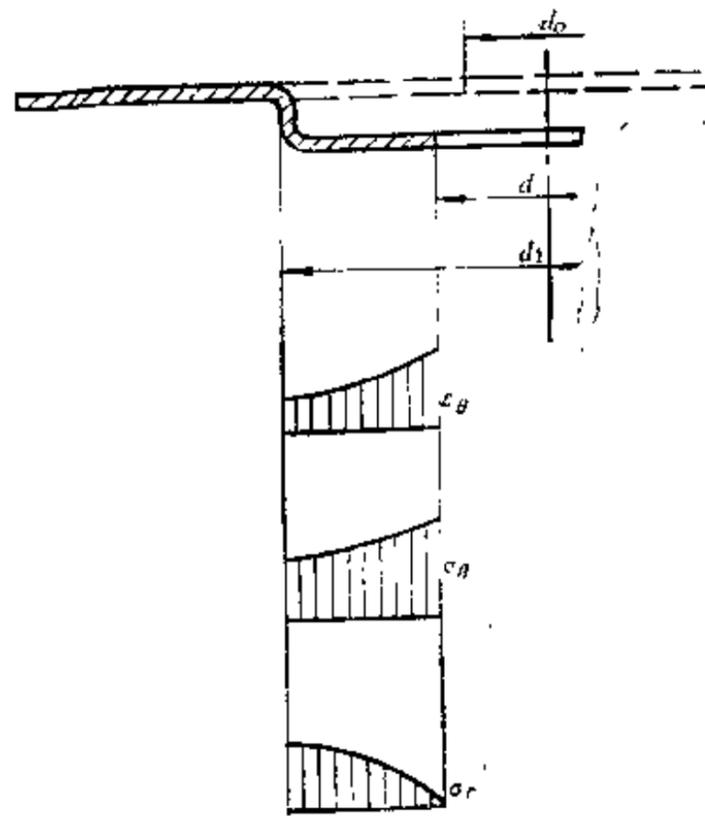


图9-3 圆孔翻边时变形区内应力与应变的分布

变形区脱离冲头端面翘起并转向凹模侧壁的趋势。但是，由于切向拉应力 σ_θ 的作用，妨碍了宽度为 $\frac{d_1 - d_0}{2}$ 的毛坯边缘沿凹模圆角的转动，相反地却使毛坯在进入冲头圆角区时沿冲

头的圆角部分产生弯曲变形。而在脱离冲头圆角区时，已被弯曲的毛坯边缘在径向拉应力的作用下被反向拉直或被冲头与凹模的间隙作用而挤成直壁。但在变形区内边缘附近作用的径向拉应力 σ_r 的数值很小，而且又由于这个部位上板料厚度的变薄量较大，间隙对零件的校直作用也因而减弱，所以翻边后所得零件的直壁形状也会发生畸变(图9-4)。为了克服这样的弊病，提高翻边零件的质量，在生产中时常采用较小的翻边模间隙使侧壁变薄的翻边方法。

当翻边沿线的曲率半径 $(R = \frac{d_1}{2})$ 较大时，或者在翻边过程的后期，毛坯变形区沿凹模圆角转动的阻力变小，所以容易使毛坯脱离冲头端面而翘起。这时，位于冲头圆角部位

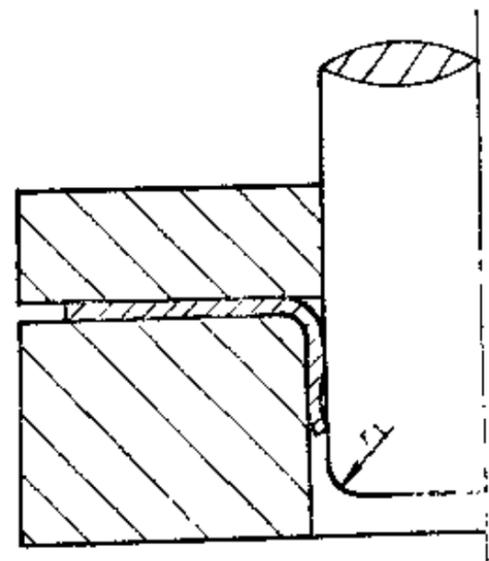


图9-4 冲模间隙过大和冲头圆角半径过小时零件直壁的形状畸变

的板料并不与冲头圆角贴合。当翻边沿线的曲率半径增大到 $R = \infty$ 时，翻边沿线成为直线，切向拉应力已不再存在，所以毛坯变形区沿凹模圆角转动的阻力也随着消失。这时的翻边变形也转化成为一般的弯曲。

孔翻边时的极限变形程度可用翻边系数计算，其值为

$$K = \frac{d_0}{d_1}$$

式中 K ——翻边系数；

d_0 ——翻边前孔的直径；

d_1 ——翻边后所得竖边的直径。

由于孔翻边时变形区内金属在切向拉应力的作用下产生切向的伸长变形，所以极限翻边系数主要决定于毛坯金属材料的塑性。孔翻边时毛坯变形区内在半径方向上各点的切向伸长变形的数值是不同的，最大的伸长变形发生在毛坯孔的边缘，所以在翻边时应保证毛坯孔边缘部位上金属的伸长变形小于材料塑性所允许的极限值。

圆孔翻边时变形区内边缘上产生的最大伸长变形为：

$$\varepsilon = \frac{d_1 - d_0}{d_0} = \frac{1}{K} - 1 \leq \delta$$

由上式可见，圆孔翻边时的极限翻边系数与材料的延伸率 δ 成反比例关系。但实际上，上式中所用的延伸率 δ 的数值，通常要大于在简单拉伸试验中所得到的均匀延伸率，其原因在于翻边变形区内直径方向上各点的伸长变形大小不同：在边缘上的伸长变形最大，而其余各点上的伸长变形随其与边缘距离的增大而迅速地减小。由于伸长变形较小的邻区对具有最大伸长变形的边缘的影响，使后者塑性变形的稳定性得到加强，抑制了翻孔边缘部位上金属产生局部集中变形的趋势，因而翻边时毛坯边缘部分可能得到比简单拉伸试验大得多的伸长变形。但是，只有在翻边的孔径比较小，切向应变 ε_0 的变化梯度较大（图 9-3）的情况下这样的影响才是显著的。当翻边的孔径很大时，由于切向应变 ε_0 的变化梯度较小，以致使这样的影响可能降到实际上不起作用的程度。表 9-1 列出了低碳钢圆孔翻边时的极限翻边系数的数值。分析表 9-1 中的数值，完全可以看出上述尺寸效应对翻边变形极限的影响。

表9-1 低碳钢极限圆孔翻边系数

冲头形式	孔的加工方法	比值 $\frac{d_0}{t}$										
		100	50	35	20	15	10	8	6.5	5	3	1
球形冲头	钻孔并清理	0.7	0.6	0.52	0.45	0.4	0.36	0.33	0.31	0.3	0.25	0.2
	冲孔	0.75	0.65	0.57	0.52	0.48	0.45	0.44	0.43	0.42	0.42	—
圆柱形冲头	钻孔并清理	0.8	0.7	0.6	0.5	0.45	0.42	0.4	0.37	0.35	0.3	0.25
	冲孔	0.85	0.75	0.65	0.6	0.55	0.52	0.5	0.5	0.48	0.47	—

用钻孔的方法代替冲孔，或者在冲孔后采用整修方法切掉冲孔时形成的表面硬化层和可能引起应力集中和变形集中的表面缺陷与毛刺，或者在冲孔后采用退火热处理等措施，都能提高伸长类翻边的极限变形程度。另外，采用球形冲头或使翻边的方向与冲孔时相反（即使冲孔后毛坯的光亮带朝向翻边凹模，而带有毛刺的剪裂带朝向翻边凸模）以降低容易开裂部

分的伸长变形，也都能起到提高翻边变形程度的目的。上述几种措施都是生产中时常采用的行之有效的办法。

圆孔翻边时毛坯的孔径(图 9-2)可按弯曲变形长度展开的方法做近似的计算，计算公式为：

$$d_0 = d_1 - 2(H - 0.43r - 0.22t)$$

实际上，由于在翻边时毛坯变形区内的切向拉应力引起的变形使翻边高度减小，而径向拉应力的作用又使翻边的高度加大，所以翻边时的变形程度(翻边系数)、模具的几何形状和间隙、板材的性能等都是可能引起翻边高度变化的因素。一般的情况下，切向拉应力的作用比较显著，实际所得的翻边高度都略微地小于按弯曲变形展开计算所得的翻边高度值。当对翻边高度尺寸的要求比较严格时，翻边前毛坯孔的尺寸都要根据翻边模的试冲结果确定。

圆孔翻边力可按下式估算(用圆柱形冲头时)：

$$P = 1.1\pi t(d_1 - d_0)\sigma_s \quad (\text{牛})$$

- 式中 σ_s ——材料的强度(牛/毫米²)；
 d_1 ——翻边直径(毫米)；
 d_0 ——毛坯孔直径(毫米)；
 t ——板材厚度(毫米)。

翻边凸模的圆角半径 r_p 对翻边变形、零件质量和所需的翻边力都有较大的影响。增大凸模圆角半径 r_p 时，可以大幅度地降低翻边力。当采用球形凸模时，翻边力可比用小圆角半径凸模时降低 50% 左右(图 9-5)。用球形凸模时的翻边力可按下式计算

$$P = 1.2\pi d_1 t m \sigma_s$$

- 式中 σ_s ——材料的强度极限；
 m ——系数，其值可由表 9-2 中查到。

表9-2 系数 m 之值

翻边系数 $K = \frac{d_0}{d_1}$	m
0.5	0.2~0.25
0.6	0.14~0.18
0.7	0.08~0.12
0.8	0.05~0.07

二、伸长类平面翻边

圆孔翻边的变形是轴对称的，变形区内的应力与应变沿翻边线的分布相同，所以它是伸长类平面翻边的一种特殊形式。非圆孔翻边和沿不封闭的内凹曲线(图 9-6)进行的翻边是伸长类平面翻边的一般形式，其应力状态及变形特点都和圆孔翻边相同，而区别仅仅在于变

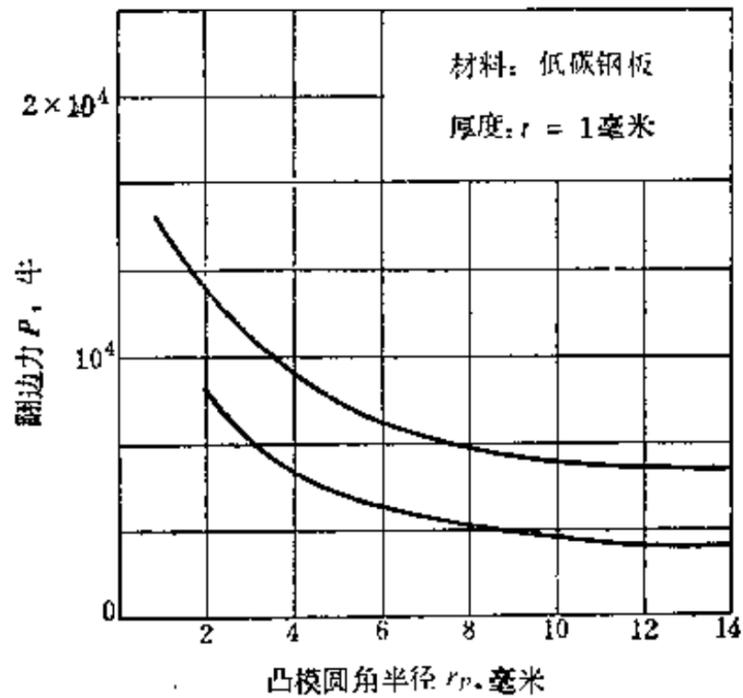


图9-5 凸模圆角半径对翻边力的影响

形区内沿翻边线应力与变形的分布是不均匀的，而且随其曲率半径的变化而变化。假如翻边的高度相同，则曲率半径较小的部位上切向拉应力和切向的伸长变形都大，相反地在曲率半径大的部位上的切向拉应力和切向伸长变形都小，而在直线部分上则仅在凹模圆角附近产生弯曲变形，在竖边上的切向伸长变形为零（图 9-7）。由于曲线部分和直线部分是联接在一起的一个整体，不可避免地会使曲线部分上的翻边变形在一定程度上扩展到直边部分，使直边部分也产生一定的切向伸长变形。反过来，曲线部分的切向伸长变形也因此而得到一定程度的减轻，所以这时可以采用较圆孔翻边时更小一些的极限翻边系数。极限翻边系数降低的多少，决定于直线部分和曲线部分之间的比例，在实用时可以近似地按下式计算：

$$K' = \frac{K\alpha}{180^\circ}$$

- 式中 K' ——非圆孔翻边时的极限翻边系数；
- K ——按表 9-1 求得的圆孔极限翻边系数；
- α ——曲线部分的中心角（图 9-7）（度）。

上式适用于 $\alpha \leq 180^\circ$ ，当 $\alpha > 180^\circ$ 时，由于直边部分的影响已很不明显，以致必须按圆孔翻边确定极限翻边系数。当直边部分很短或者不存在直边部分时，极限翻边系数的数值也应按圆孔翻边计算。

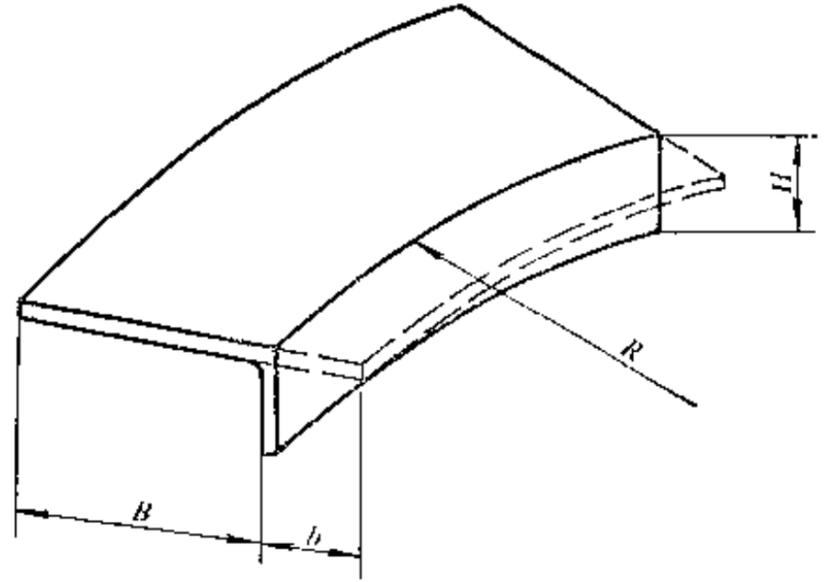


图9-6 伸长类平面翻边

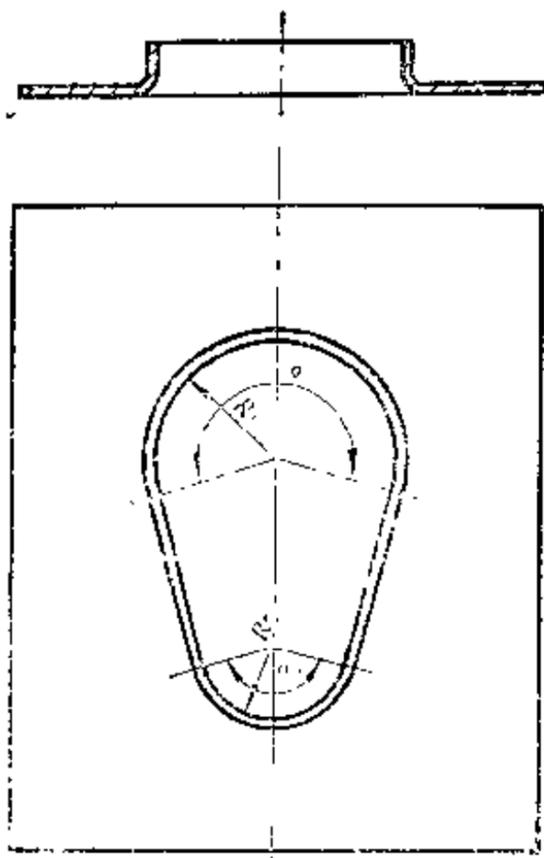


图9-7 非圆孔翻边

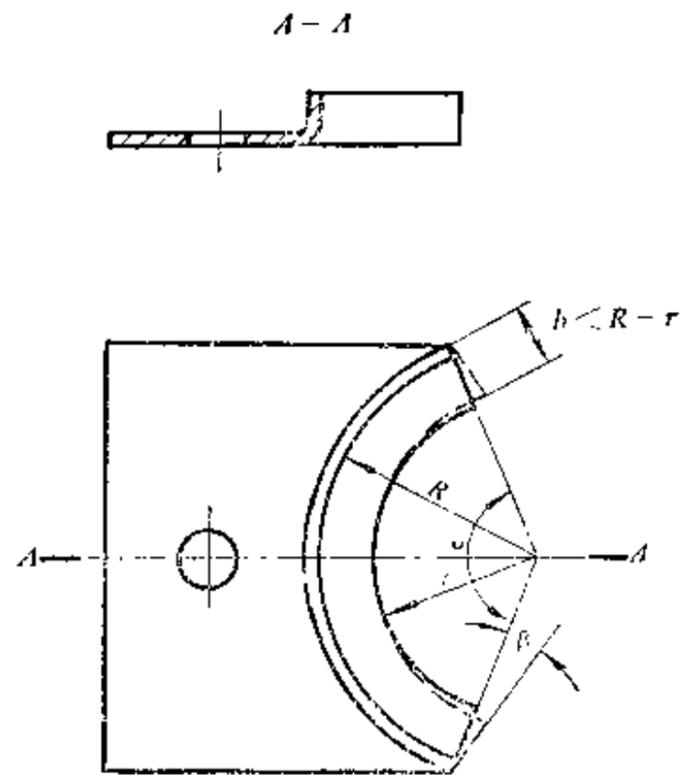


图9-8 非圆孔翻边时毛坯的形状

伸长类平面翻边系数 K' 用下式表示

$$K' = \frac{R - b}{R}$$

式中 R 和 b 分别是翻边线的曲率半径和毛坯上需要翻边成形部分的宽度 (图 9-6)。

非圆孔的平面翻边时, 毛坯变形区内切向拉应力和切向的伸长变形沿全部翻边线的分布是不均匀的, 在远离边缘或

直线部分而且曲率半径最小的部位上最大, 而在边缘的自由表面上的切向拉应力和切向伸长变形都为零。切向伸长变形对毛坯在高度方向上变形的影响大小沿全部翻边线的分布也是不均匀的。假如这时采用宽度 b 一致的毛坯形状 (图 9-8 中的实线, 即半径为 r 的弧线), 翻边后零件的高度就不是平齐的, 而是两端高度大中间高度小的竖边。另外, 竖边的端线也不垂直, 而是向内倾斜成一定的角度。为了得到平齐一致的翻边高度, 应在毛坯的两端对毛坯的轮廓线做必要

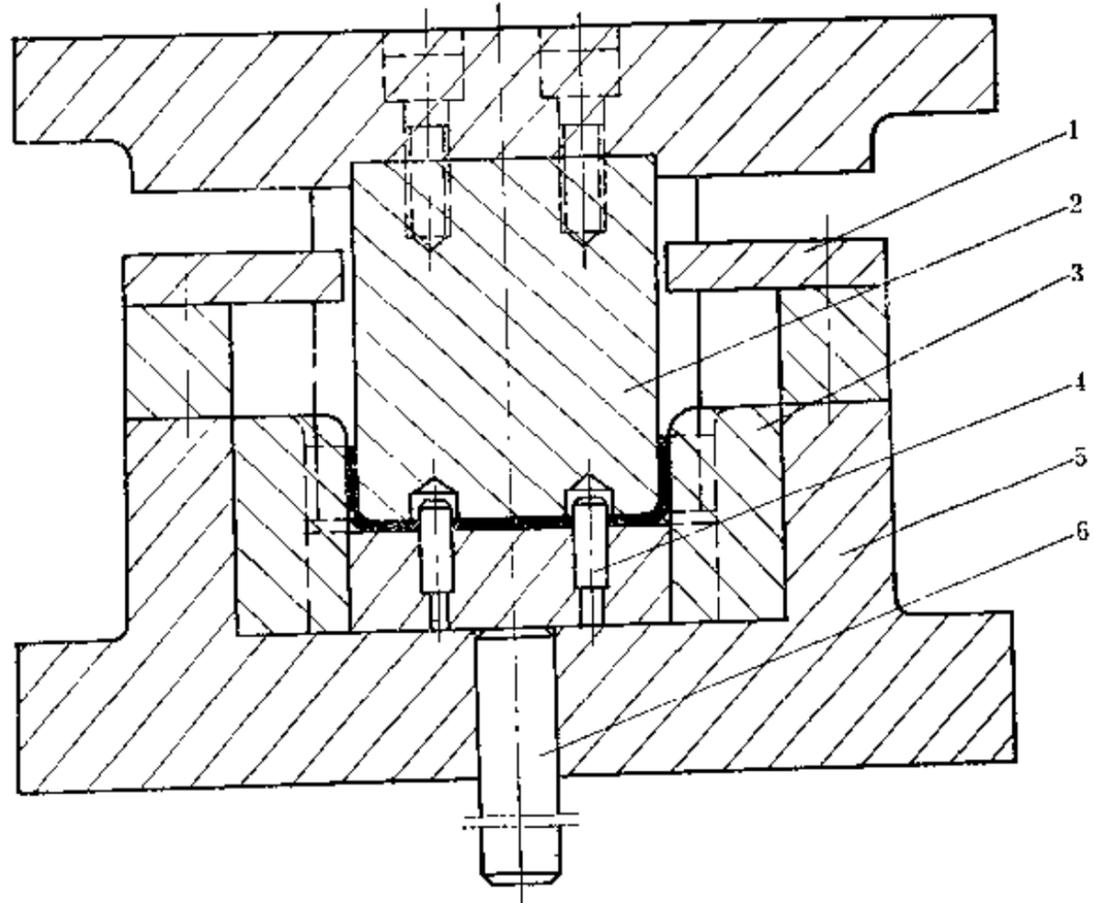


图9-9 伸长类平面翻边模结构

1—卸料板 2—凸模 3—凹模 4—定位销 5—底座 6—气垫顶杆

的修正, 采用如图 9-8 中虚线所示的形状。翻边系数 $\frac{r}{R}$ 和角度 α 越小, 修正值 $(R - r) -$

b 越大。毛坯端线修正角 β 之值, 视 $\frac{r}{R}$ 及 α 之大小而不同, 通常可取为 $25^\circ \sim 40^\circ$ 之间。假如翻边的高度不大, 而且翻边沿线的曲率半径很大时, 也可以不做修正, 按部分圆孔翻边的情况确定毛坯的形状。

图 9-9 是伸长类平面翻边模的一种结构形式, 用它加工的零件形状如图 9-8 所示。为了克服由于不对称变形引起的翻边过程中毛坯的窜动, 这里采用了成双冲压的方法, 一次翻边加工两个零件, 解决了水平方向上力的平衡问题。在生产中有时也用定位销和气垫压力压紧毛坯达到防止窜动的目的。因为翻边零件的形状和尺寸大小的不同, 或者为了和冲孔或落料工序复合, 翻边模的结构, 可能还有其他各种形式, 但是要注意保证在翻边时应压紧零件不变形的平面部分, 并使翻边变形区不被压紧而可以自由地翘起和转动。这后一特点也是伸长类平面翻边模和压缩类平面翻边模的主要区别之一。因为在压缩类翻边过程中为了防止毛坯的起皱, 常常需要压紧毛坯的变形区。

三、伸长类曲面翻边

伸长类曲面翻边, 如图 9-10 所示。在翻边过程中产生变形的是宽度为 b 的条形部分 (图 9-10 中虚线所示), 在翻边后成为高度为 H 的竖边。伸长类曲面翻边模的工作原理, 如图 9-11

所示。

伸长类曲面翻边的变形特点可以从图 10-12 a 看出。当翻边变形已经进行到图示的中间状态时，已进入凸模与凹模之间的间隙里高度为 $H - R$ 的竖边是传力区，而位于凹模曲面上宽度为 b 的条状部分是不变形区，因为当凸模向下运动时其长度不变，仅仅宽度 b 随着减少。这时变形区是处于凹模圆角区的金属。变形区内长度为 l_1 和 l_2 的两个直边部分，在凹模的作用下应向翻边线的法线方向翻折展开，其结果势必引起中心角为 α 的圆弧部分在切向拉应力作用下产生切向的伸长变形。但是，由于上述两个部分的两种变形趋向都受到宽度为 b 的不变形区的限制，结果使中间圆弧部分的切向伸长变形得到减轻，并使两端的直线部分产生拉向毛坯中心的剪切变形。伸长类曲面翻边模结构中应采用较强的压料装置(图 9-11 中的压料板 4) 以防止毛坯底部在中间部位上出现起皱现象。另一方面，不变形区对变形区的牵制作用使曲面翻边的变形变得十分困难，因而有时也可能出现因翻边力过大，超过传力区的强度所能承受的数值而使后者被拉断的问题。事实上，宽度为 b 的不变形区，在翻边接近结束时在变形区的作用下也要产生一定的伸长变形。

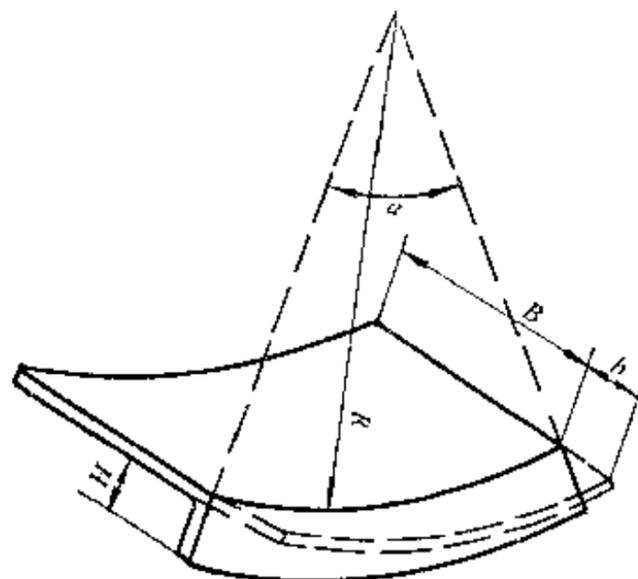


图9-10 伸长类曲面翻边

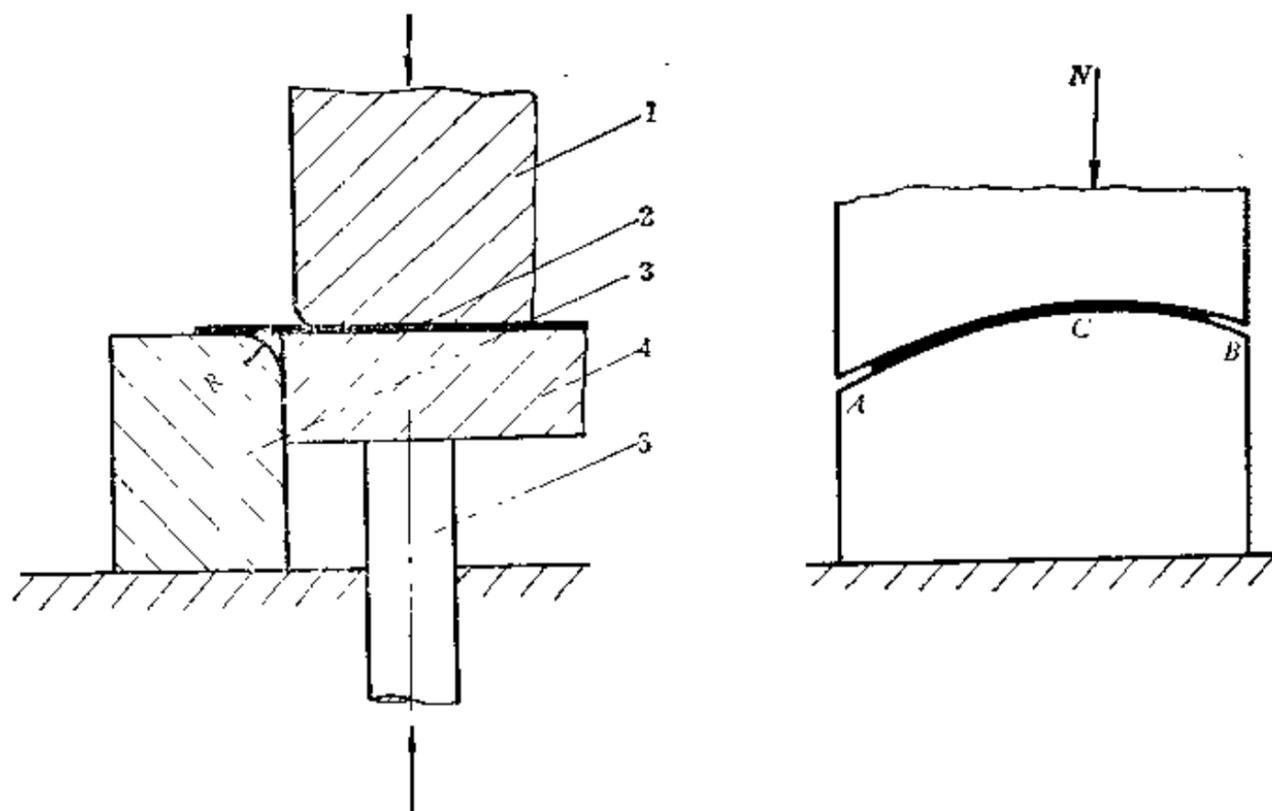


图9-11 伸长类曲面翻边模工作原理

1—凸模 2—毛坯 3—凹模 4—压料板 5—气垫顶杆

曲面翻边时，所得零件的形状和尺寸决定于凸模的形状，所以必须使凸模和压料板的几何形状和曲面毛坯的形状相同(图 9-11)。翻边凹模的形状并不决定所得零件的形状和尺寸，但是却对翻边变形有极大的影响，所以在模具设计时必须从翻边变形的规律和要求出发正确地确定凹模工作部分的几何形状和尺寸。

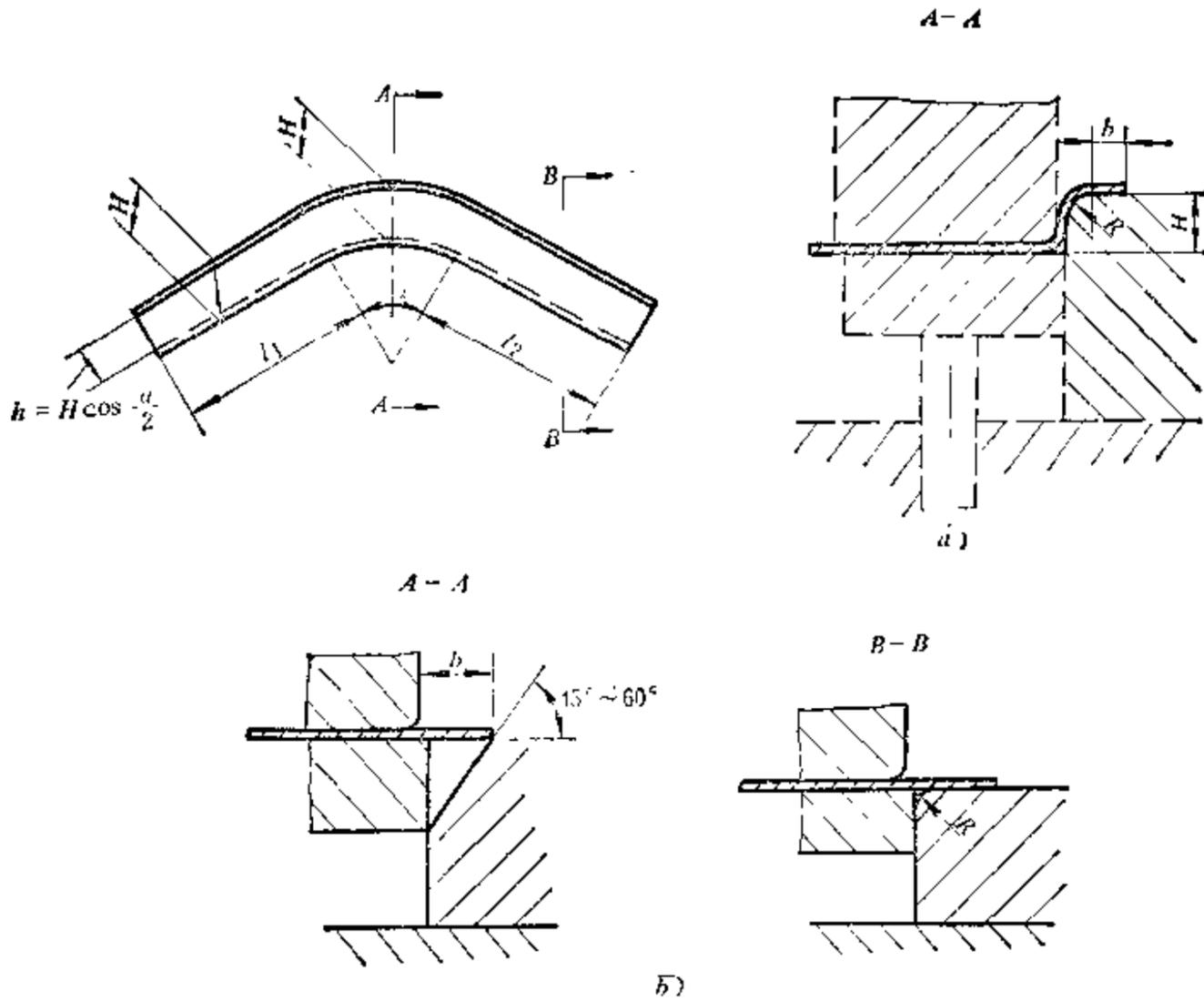


图9-12 伸长类曲面翻边的变形分析
 a—翻边变形的中间状态 b—凹模工作部分的修正

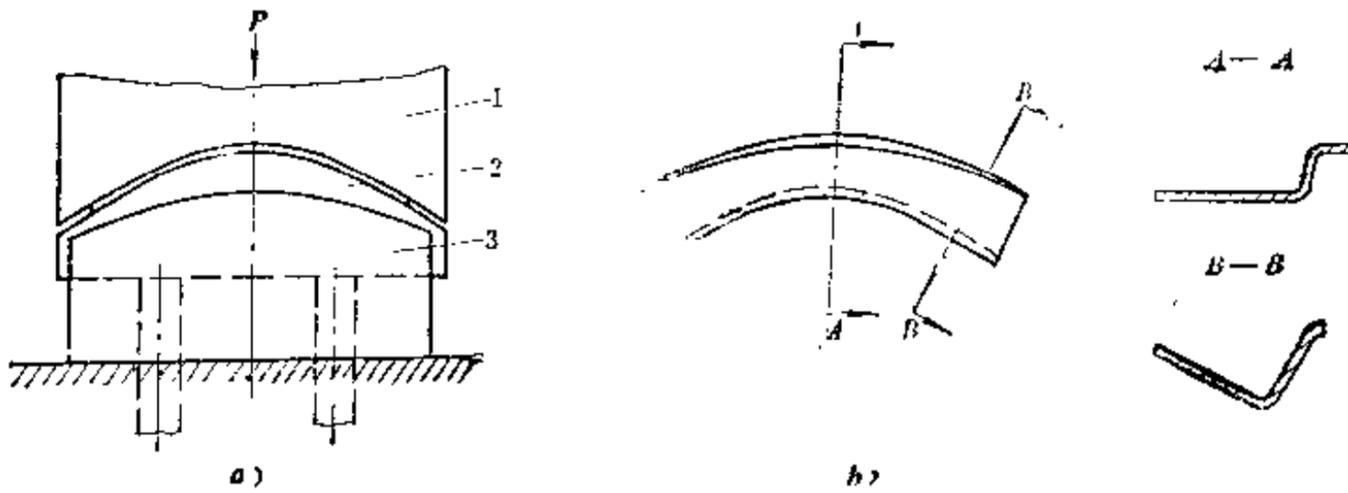


图9-13 伸长类曲面翻边凹模形状对变形的影响
 a—翻边凹模形状的修正 b—变形的变化
 1—凸模 2—压料板 3—凹模

假如把凹模的形状做成和凸模的形状完全一致（图 9-11），则在翻边过程中当冲模相对于毛坯的运动距离为 H 时，无论是毛坯的中心点（ $A-A$ 断面）或两端斜边上冲模上各点的垂直位移都应是 H （图 9-12）。但是，这时毛坯各点上的翻边高度并不相同，在毛坯中心点上已经完成的翻边高度是 H ，而在两端斜边上已经完成的翻边高度较小，其值仅为 $h = H \cos \frac{\alpha}{2}$ 。在毛坯中心点附近为形成较高的翻边高度而必须多补充的材料，虽然可以从宽度为 b 的不变形区得到，但是当不变形区的宽度 b 较大时，也可能使 $A-A$ 断面附近已翻成的

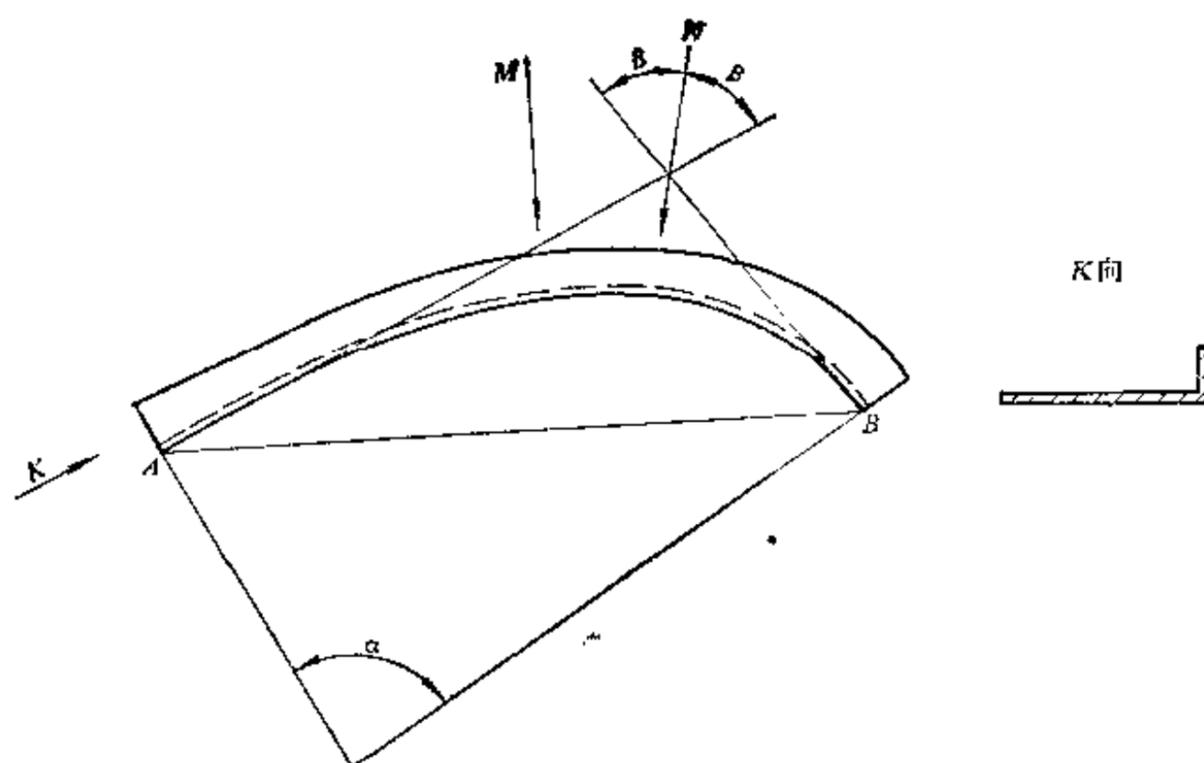


图9-14 曲面翻边时冲压方向的选择

竖边上产生过大的径向伸长变形（在A—A方向上），甚至可能在这个方向上被拉裂。另一方面，因为在翻边高度较小的两端上不变形区的宽度大，而在毛坯中心点上不变形区的宽度较小，所以切向伸长变形容易集中于毛坯的中间部分，引起这部分在切向方向上的开裂。为了避免产生这种不利的情况和创造有利于翻边变形的条件，在生产中时常对凹模工作部分的形状做一定的修正。假如把凹模的形状修正成为图9-12 b

或9-13 a所示的形状，就会使翻边变形变得比较有利，改变上述那种在毛坯的中间部位上过早地进行翻边变形的不利局面，而使翻边变形首先从毛坯的两端开始（图9-13 b），以后逐渐地扩展到毛坯的中间部分。这样的翻边方法，对于防止毛坯中间部分的开裂和提高极限翻边高度都是有利的。

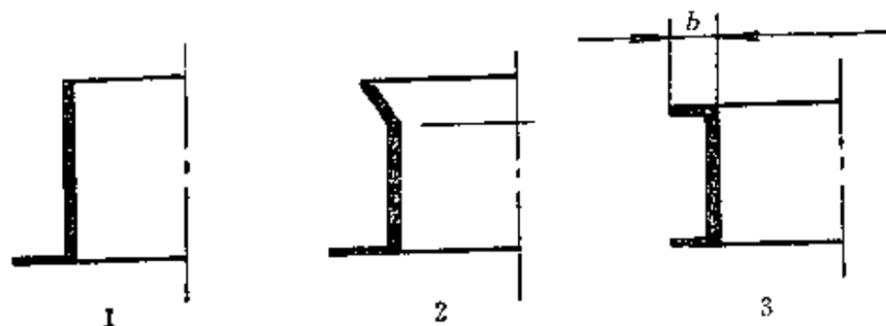


图9-15 中心角过大时的翻边方法

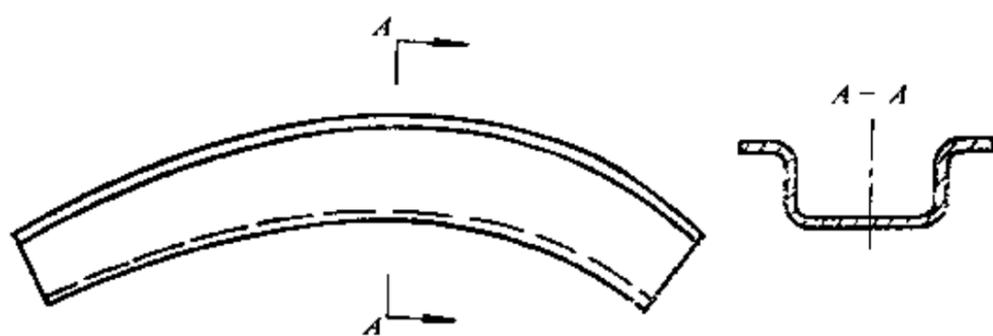


图9-16 曲面翻边零件的其他形式

冲压方向的选择，也就是毛坯在翻边模内位置的确定，是伸长类翻边模设计中的另一个重要问题。正确的冲压方向应对翻边变形提供尽可能有利的条件，另外也应保证翻边作用力在水平方向上的平衡。翻边曲线的法线与冲压方向所构成的角度越大，翻边变形也越困难。因此，通常应取冲压方向与毛坯两端切线构成的角度相同（如图9-14中N方向）而不取毛坯两端点联线AB的垂直方向（图9-14中的M方向）。

假如翻边零件的曲面具有接近或超过 180° 以上的中心角，就不能再用上述的翻边方

法。这时常用两道翻边工序冲压完成（图 9-15）。可能得到的最大翻边宽度，由下式求得：

$$K = \frac{d}{d+2b} \quad \text{或} \quad b = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{K} - d \right)$$

式中 K ——极限翻边系数，其值可由表 10-1 中查到。

图 9-16 是伸长类曲面翻边零件的另一种形式。它是未完成的曲面翻边的一个中间状态。在这种情况下凹模工作部分的形状和尺寸已经不可能从有利于翻边变形的角度去确定，而是应该和翻边件相应部分的形状相同。因此，在这种零件设计时必须充分注意使零件翻边高度的变化不致引起翻边时毛坯变形的困难。例如要尽量避免翻边高度的急剧变化；不要使中间部分的高度超过两端过多等。

9-2 压缩类翻边

压缩类翻边可以分为压缩类平面翻边（图 9-17）和压缩类曲面翻边（图 9-18）。

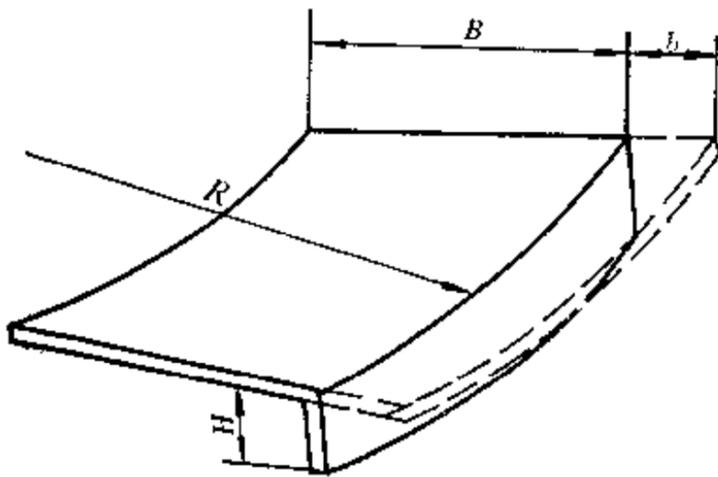


图9-17 压缩类平面翻边

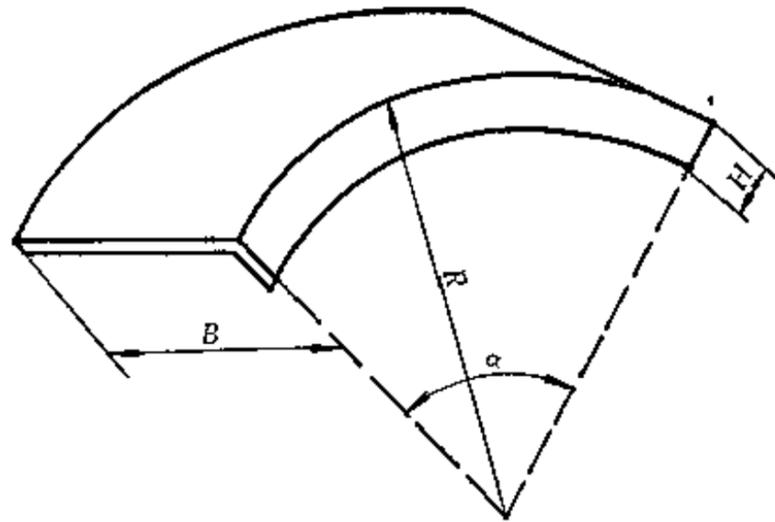


图9-18 压缩类曲面翻边

压缩类平面翻边如图 9-17 所示。在毛坯变形区内除靠近竖边根部圆角半径附近的金属产生弯曲变形外，其余主要部分都处于切向压应力和径向拉应力的作用下，产生切向压缩变形和径向伸长变形（这里切向压应力和切向压缩变形是主要的）。实质上压缩类平面翻边的应力状态和变形特点和拉深是完全相同的，区别仅在于前者是沿不封闭的曲线边缘进行的局部非轴对称的拉深变形。这时的极限变形程度主要受毛坯变形区失稳起皱的限制。不用压边装置可能达到的翻边高度不大，所以当翻边高度较大时，模具上也要带有防止起皱的压边装置。压缩类平面翻边时，不用压边也不致起皱的条件，可以参照第七章的数据确定。压缩类平面翻边系数 K ，实质上就是拉深系数，并用下式计算。

$$K = \frac{r}{R}$$

式中 r ——翻边线的曲率半径；

R ——毛坯边缘的曲率半径（图 9-19）。

沿不封闭的曲线进行压缩类平面翻边时，翻边线上切向压应力和径向拉应力的分布是不均匀的，在曲率半径小的部位上或是在中间圆弧部分的对角线的位置上（图 9-19）最大，而在两端最小。假如采用由半径为 R 构成的圆弧线为毛坯轮廓（图 9-19 中的实线），由于毛

坯边缘的宽度相等而宽度方向上的变形不同，在翻边后势必形成中间高两端低的竖边，并且两端的边缘线也不与零件平面垂直而向外倾斜。为了得到翻边后竖边的高度平齐而两端线垂直的零件，必须对毛坯的形状做必要的修正。修正的方向恰好和伸长类平面翻边相反。修正后得到毛坯的形状，如图 9-19 虚线所示。

压缩类曲面翻边时，毛坯变形区在切向压应力作用下产生的失稳起皱是限制变形程度的主要因素。因此，当板料的相对厚度不大时，可能翻边的高度是不大的。压缩类翻边时，凹模工作部分的几何形状与尺寸对翻边变形和极限变形程度都有较大的影响。例如把凹模的形状做成图 9-20 所示的形状时，可以使中间部分的切向压缩变形向两侧扩展，使局部的集中变形趋向均匀，从而可能减小起皱的可能性。另外，凹模形状修正以后，对毛坯两侧在偏斜方向上进行冲压的情况也有一定的改善。

在压缩类曲面翻边模设计时，冲压方向的选择原则基本上和伸长类曲面翻边时相同。

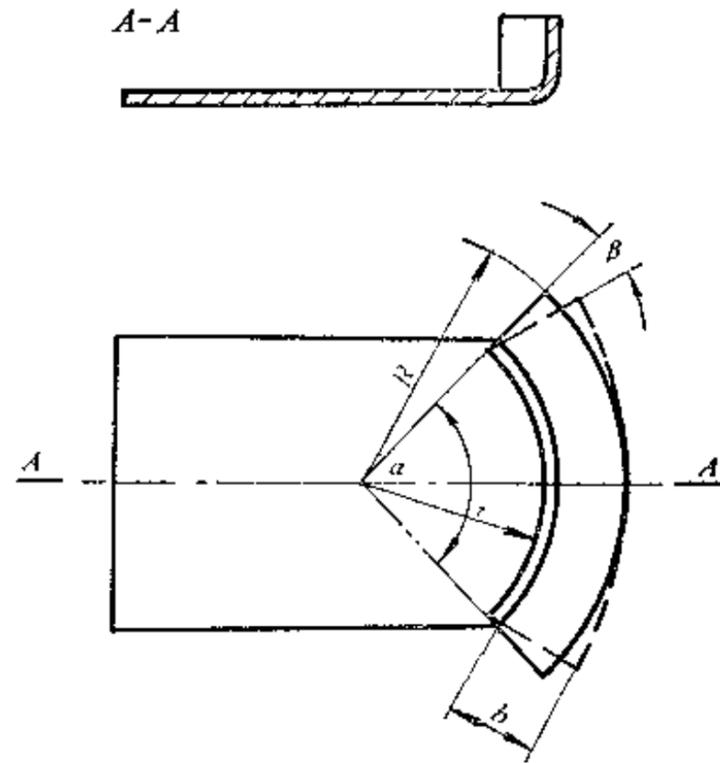


图9-19 压缩类平面翻边毛坯形状的修正

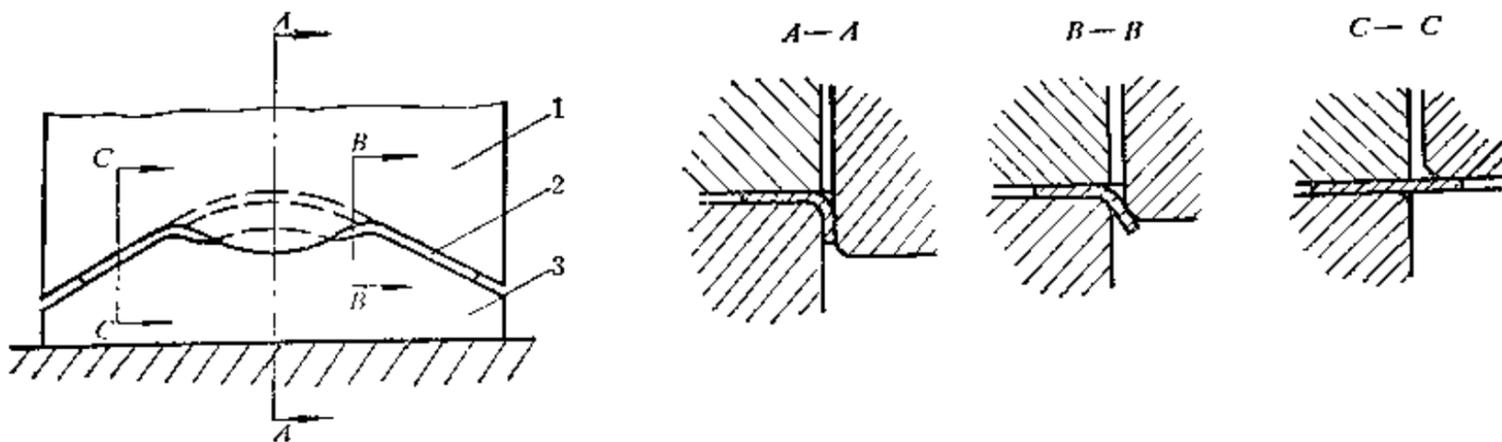


图9-20 压缩类曲面翻边凹模形状的修正

1—凹模 2—毛坯 3—凸模

第十章 校形工艺

校形是指冲压零件在经过各种冲压加工之后，当其形状和尺寸精度还不能满足使用上的要求时，在形状和尺寸已经相当接近成品零件的条件下，使其产生不大的塑性变形，从而提高零件的形状和尺寸精度的冲压方法。为了达到这样的目的，在大多数的校形工艺中所采用的应力状态和变形的性质都不同于半成品的成形过程。校形时的应力状态应有利于减小卸载过程中毛坯的弹性变形引起的形状和尺寸的变化。在各种不同校形工艺中，由于冲压件的形状和精度要求不同，毛坯所应处的应力状态和产生的变形都不一样，而且也比成形过程要复杂的多。

时常，冲压件的形状和尺寸精度主要靠最后的校形工艺保证，所以它在冲压生产中具有相当重要的意义，而且应用也比较广泛。但是日前对校形工艺中各种规律的研究和认识还远远不够，这一点常常成为不能得到高质量和高精度冲压件的障碍。

虽然冲压件的精度主要是靠校形保证，但是在校形之前所进行的各种冲压加工（包括冲裁、拉深、成形等）和零件本身的结构形状也是保证进行有效的校形工艺的重要条件。

10-1 平板零件的校平

冲裁后得到的零件，由于所用板料的不平度或者由于冲裁过程里受模具的作用结果，都能使冲裁件具有不平整的缺陷，尤其是在用不带弹性压料装置的连续模冲裁时，这个现象更为严重。当对零件的不平度有要求时，必须在冲裁后加校平工序。平板零件的校平模有平面校平模和尖齿校平模两种形式。

用平面校平模（图 10-1）对平板零件进行校平时，主要依靠上下两块平模板使不平整

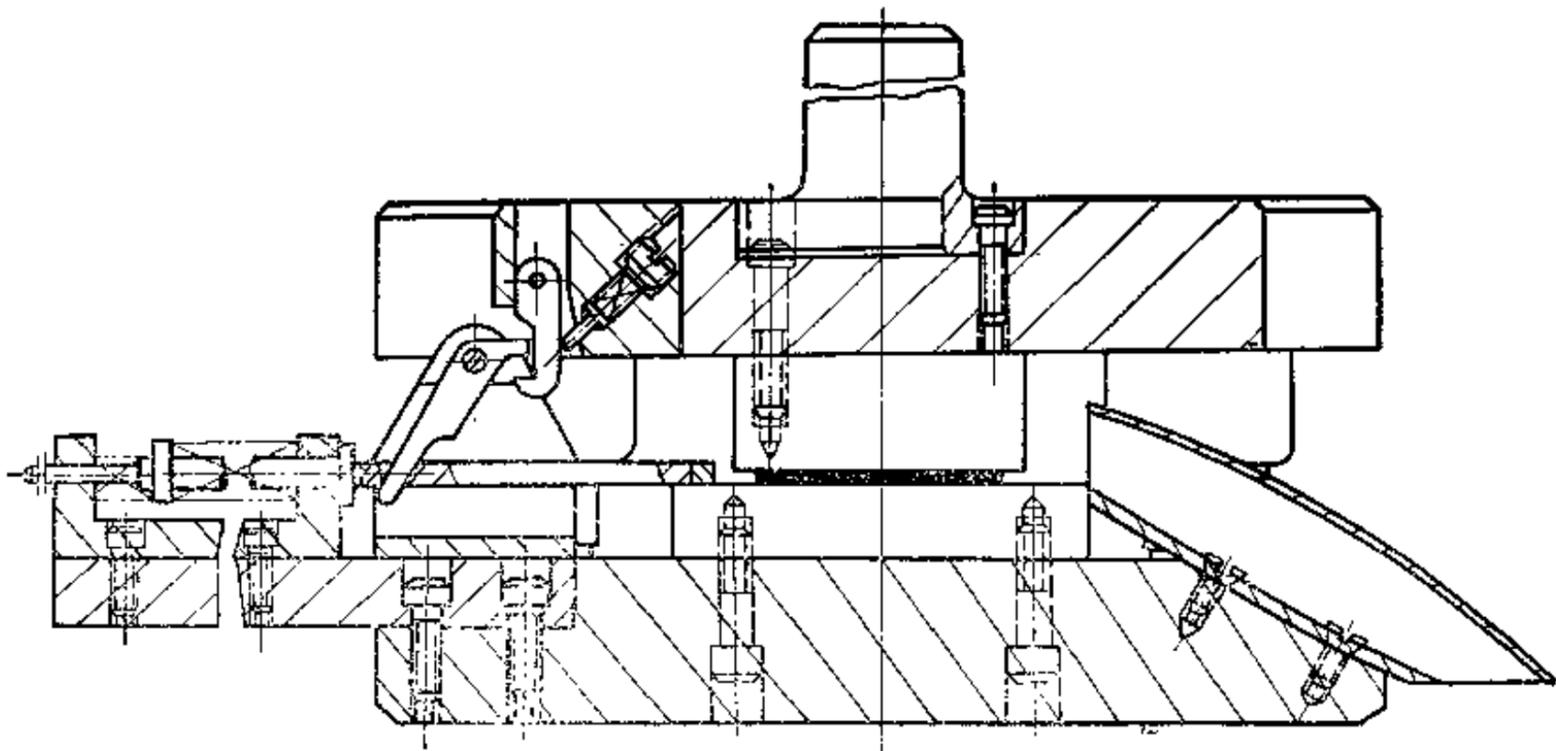


图10-1 带有自动弹出器的通用校平模

的零件产生反向的弯曲变形以达到提高零件平直度的目的。平模板对毛坯的压力也能在一定程度上改变其应力状态，使被校平的毛坯在反向弯曲引起的单向应力状态的基础上也受三向受压的应力状态的作用，所以有利于使毛坯在模板作用下的平直状态得以保留下来。但是平模板的单位压力较小，对改变毛坯内应力状态的作用不大，在校平模板的作用力去除之后，毛坯仍有相当大的回弹。所以这种校平方法的效果并不好，主要用于平直度要求不高，由软金属（如铝、软钢、软黄铜等）制成的小型零件。

当对平板零件的平直度要求较高时，可以采用尖齿校平模（图 10-2）。在校平时，模具的尖齿挤压进入毛坯表面层内一定的深度，并且使毛坯因压平的反向弯曲引起的单向应力状态遭到比较彻底的破坏，所以毛坯在模具压力作用下的平直状态可以保持到卸载以后。尖齿校平模的效果好，可能达到很高的平面度要求，主要用于平直度要求较高或强度极限高的较硬材料。用尖齿校平模时，在校平零件的表面上留有较深的压痕，而且毛坯也容易粘在模具上不易脱模，所以在生产中多用平齿校平模，即将尖齿校平模的齿尖做成为具有一定宽度 $b = (0.2 \sim 0.5)t$ 的齿顶。当零件的表面不允许有压痕时，可以采用一面是平板，而另一面是带齿模板的校平方法。

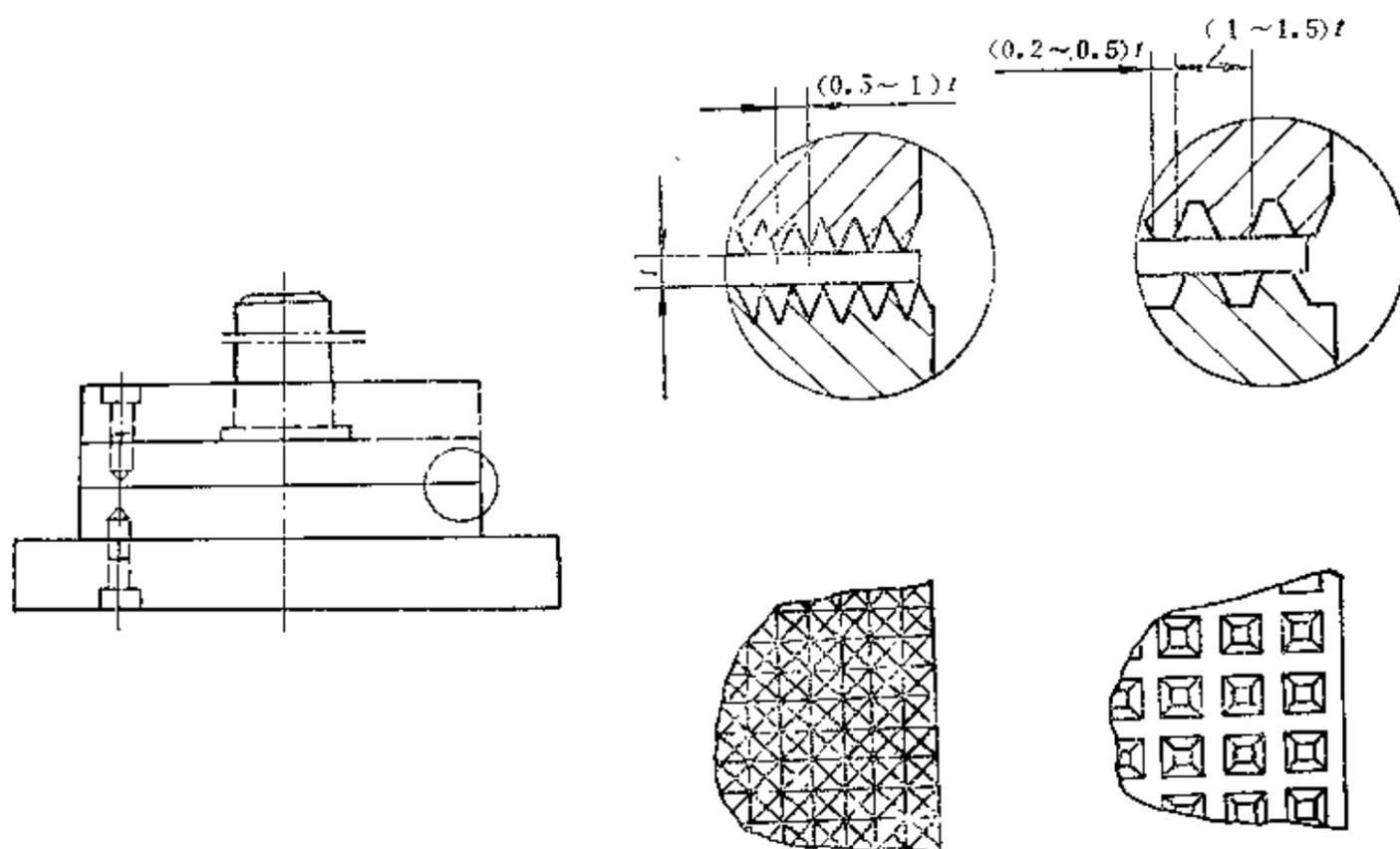


图10-2 尖齿校平模与平齿校平模

假如零件的两个表面都不允许有压痕，或者零件的尺寸较大，而又要求具有较高的平直度时，也可以采用压力下的加热校平方法。将需要校平的零件迭成一定的高度，用加压夹具压紧成平直状态，然后放进加热炉里加热。由于在温度升高以后材料的屈服极限的降低，毛坯在压平时因反弯变形引起的内应力数值也相应地下降，所以使回弹变形减小，达到校平的目的。加热的温度决定于校平零件的材料，一般可取铝为 $300 \sim 320^{\circ}\text{C}$ ；黄铜 H62 为 $400 \sim 450^{\circ}\text{C}$ 。

用模具校平时的校平力 P 决定于材料的机械性能、厚度等因素，可以用下列公式做概略的计算：

$$P = p \cdot F \text{ (牛)}$$

式中 F ——校平零件的面积 (毫米²);

p ——校平单位压力 (牛/毫米²); 用平面校平模时, 可取 $p = 80 \sim 100$ 牛/毫米²; 用尖齿或平齿校平模时, 可参考表 10-1 选取。

表 10-1

校平材料	校平单位压力 p (牛/毫米 ²)
软钢	250~400
软铝	20~50
硬铝	300~400
软黄铜	100~150
硬黄铜	500~600

10-2 空间形状零件的校形

空间形状零件的校形是指弯曲后或拉深后的冲压件的校形。在校形前零件已经具有相当接近于成品零件的形状和尺寸, 所以在校形时零件的尺寸变化不大, 主要的目的是为了提提高冲压件的精度。在空间零件校形时, 根据零件的几何形状特点和精度要求而正确地选定产生塑性变形的部位、变形的大小和恰当的应力状态是十分重要的。由于零件的形状和精度要求各不相同, 在冲压生产中所用的校形方法也有多种形式。

一、弯曲件的校形

弯曲件的校形方法主要有压校和镦校两种形式。压校方法 (图 10-3) 主要用于用折弯方法加工的弯曲件。在折弯时毛坯不易窜动, 所得零件的各部分长度方向的尺寸精度高, 而且弯曲线不易偏斜。但是, 在折弯后零件的角度精度不高, 需要增加校形工序。

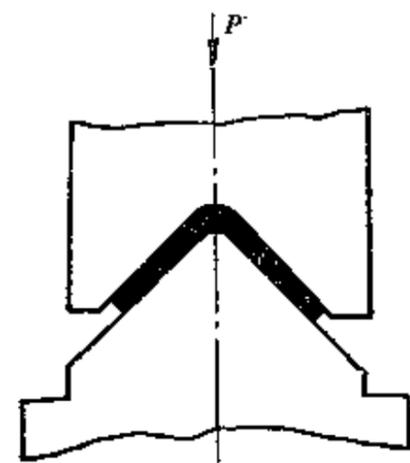


图10-3 弯曲件的压校方法

在压校时, 对弯曲件两臂的平面也有校平作用。假如弯曲件两个臂的面积不等时, 应注意选定弯曲件在校形模中的正确位置, 尽量使两侧向的水平分力接近平衡, 同时也应使校平单位压力的分布接近均匀。当弯曲件的两臂长度相等, 即校平的面积相同时, 零件在模具里的位置应是对称的。U形零件的压校时, 通常都采用两道校形工序, 分两次压两个圆角。压

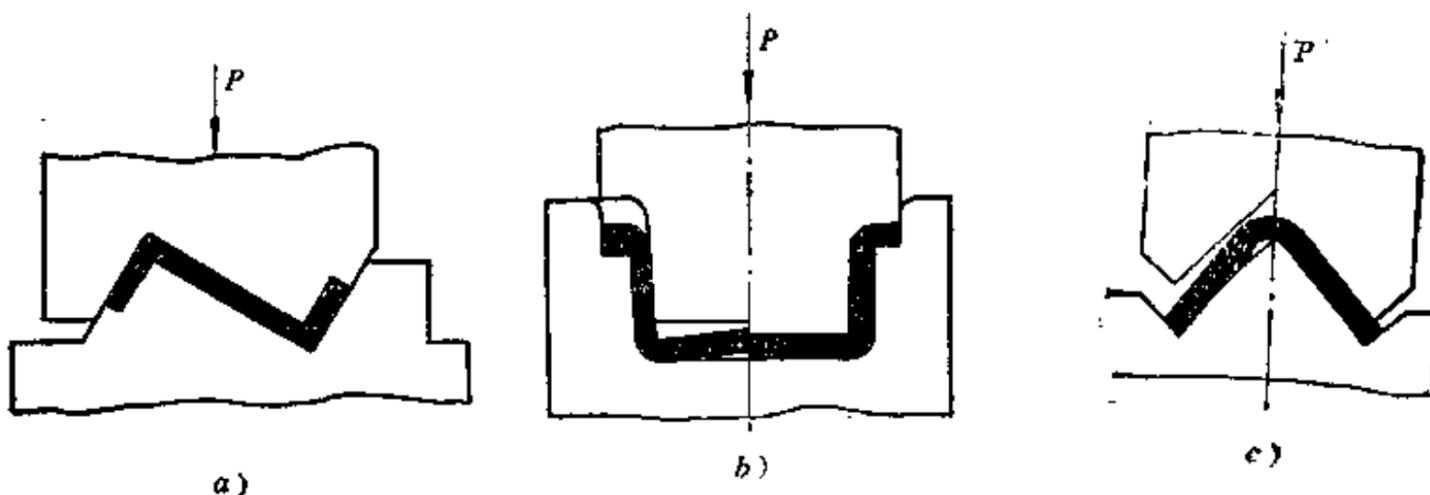


图10-4 弯曲件的镦校方法

校时，零件内部应力状态的性质变化不大，所以效果也不显著。

在弯曲件的镦校时，要取半成品的长度稍大于成品零件。在校形模具的作用下(图 10-4)，不仅在与零件表面垂直的方向上毛坯受压应力的作用，而且在长度方向上也受压应力的作用，产生不大的压缩变形。这样就从本质上改变了毛坯断面内各点的应力状态，使其成为三向受压的应力状态。压应力在厚度方向上的分布比较均匀，有利于减小回弹，而且使受模具作用下零件所具有的准确形状得到保证。因此，镦校时得到弯曲件的尺寸精度较高。但是，镦校方法的应用也常受零件的形狀的限制，例如带大孔的零件或宽度不等的弯曲件都不能用镦校的方法。

二、拉深件的校形

由于拉深件的形状不同，精度要求的内容和程度不同，在生产中所采用的校形方法也不一样。

对于不带法兰边的直壁拉深件，通常都是采用变薄拉深的校形方法提高零件侧壁的精度。可以把校形工序和最后一道拉深工序结合在一起，以一道工序完成。这时应取稍大些的拉深系数，而拉深模的间隙可取为 $(0.9 \sim 0.95)t$ 。

当拉深件带法兰边时，校形的目的时常包括：校平法兰边平面，校小根部与底部的圆角半径，校直侧壁和校平底部等(图 10-5)。

在拉深后所得零件法兰边根部的圆角半径等于拉深凹模的圆角半径，所以当要求根部的圆角半径很小时，必须在校形的同时也校小圆角半径，得到成品零件的尺寸。零件法兰边根部的圆角半径由大到小的变化，要求从外部向圆角部分补充材料。如果校形工序所用半成品的高度等于成品零件的高度，便不可能从侧壁向圆角部分补充材料(图 10-6 a)，这时只能从法兰边部分转移，并使法兰边直径 d_f 由大变

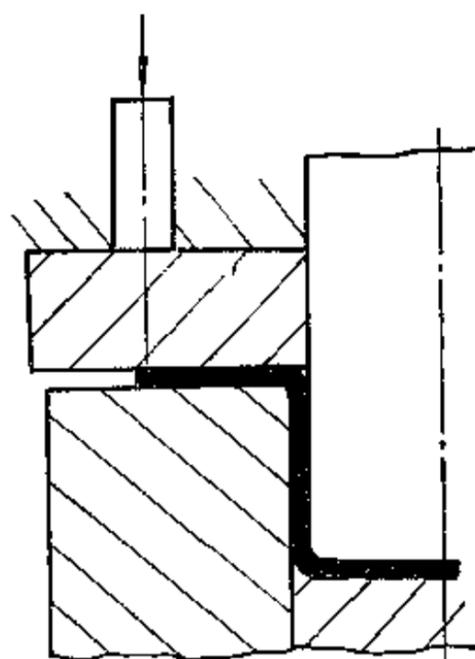


图10-5 拉深件的校形

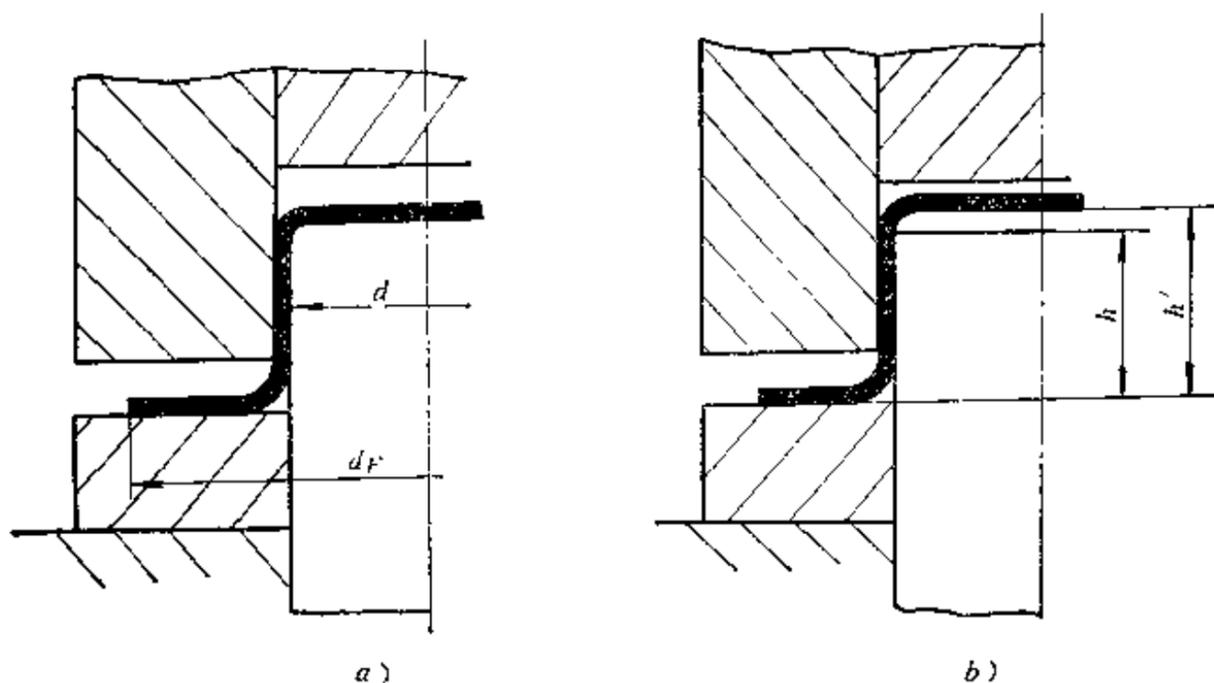


图10-6 拉深件校形时的尺寸变化

a—高度不变的校形方法 b—高度减小的校形方法

小，但是，如果法兰边的直径 d_f 较大，而且超过 $d_f \geq (2 \sim 2.5) d$ 时，法兰边的外径也不可能产生收缩变化，而法兰边根部圆角半径的减小所必需的材料只能靠校形零件的侧壁和法兰边内口附近板材的变薄实现。在这种情况下，在校形零件各个部分都作用有相当大的拉应力，从变形特点看，相当于变形不大的胀形，所以模具作用下零件的形状易于保持下来，校形精度也好。但是，胀形变形不宜过大，否则在校形时也可能使零件破裂。在生产中常取校形时零件变形部位的伸长变形为 $2 \sim 5\%$ 左右。

假如在校形时零件法兰边的根部和底部圆角半径变化过大，也可以取校形前半成品的高度稍微大于成品零件，即取 $h' > h$ ；以防止校形时因胀形变形过大而造成零件的破裂。但是，所取的半成品高度 h' 不能过大，因为当 h' 过大以致使半成品的面积等于或大于成品零件所需的面积时，在校形过程中就不会产生胀形变形。这时，校形零件要受到压应力的作用，并且可能因失稳和材料的过剩而使零件表面形成不平的波纹，降低零件的质量(图 10-6 b)。

对拉深件的法兰边平面校平时，除了依靠上模与下模平面对法兰边的压平作用外，还必须考虑零件侧壁和底部对法兰边平面的影响。因为平面形状的法兰边的刚度很差，只要侧壁的高度稍有差别或者因内应力的作用稍有变形，就会反映为法兰边平面的翘曲或歪扭。在这种情况下，采用仅仅对零件的法兰边进行压平的方法，时常得不到什么效果。因此必须综合地考虑校平时零件的侧壁和法兰边根部圆角变形的影响。尤其是在非旋转体零件的法兰边校平时，即使沿零件周边的根部圆角半径由大到小的变化相同，而需要由外界补充材料的多少和补充的难易等都因其周边的形状和曲率的大小而异。因此，在冲压生产中也常采用改变根部圆角大小，使其沿周边分布不均的方法，以求达到可以校平法兰边平面的目的。

第十一章 其它冲压方法

11-1 软模成形

软模成形是指用液体、橡胶或气体的压力代替刚性的凸模或凹模对板料进行冲压加工的方法。用软模成形方法可以进行的冲压工序很多，如弯曲、拉深、翻边、平板毛坯的胀形、空间形状毛坯的胀形等，有时也用来进行剪切加工。

一、软凸模拉深和胀形

用软凸模拉深的原理，如图 11-1 所示。在液体压力的作用下，平板毛坯的中间部分首先在两向拉应力的作用下产生胀形变形，其形状由平面变成为接近球面的曲面。当液体的压力继续增大，而且毛坯法兰边内口的径向拉应力 σ_1 达到足以使毛坯外周产生拉深变形时，毛坯周边便开始逐渐地进入凹模，并形成零件的侧壁。

毛坯周边产生拉深变形所需的液体压力，可由下列平衡条件得到：

$$p \frac{\pi d^2}{4} = \pi d t \sigma_1$$

整理后可得：

$$p = \frac{4t}{d} \sigma_1$$

式中 p ——所需液体压力 (牛/毫米²)；

d ——零件的直径 (毫米)；

t ——板料厚度 (毫米)；

σ_1 ——为使毛坯周边产生拉深变形所需的径向拉应力 (牛/毫米²)，包括摩擦损失，其值可按第七章的公式计算。

在拉深后期，如需成形得到零件底部较小的圆角半径时，必需的液体压力为：

$$p = \frac{t}{r} \sigma_1$$

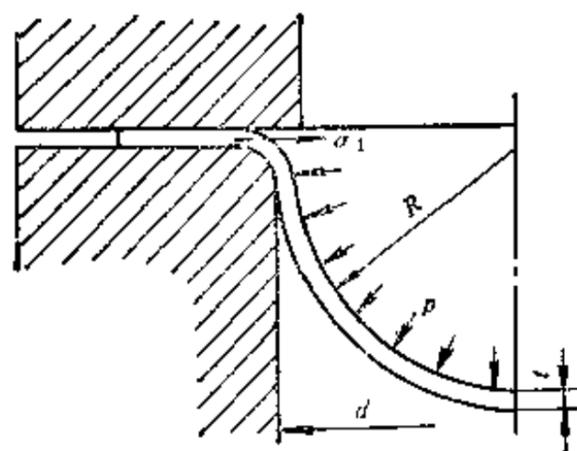


图11-1 软凸模拉深

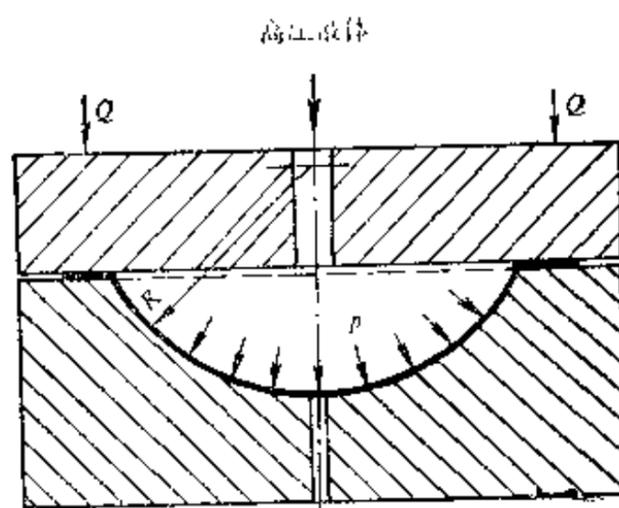


图11-2 软凸模胀形

式中 r ——零件底部的圆角半径;

σ_s ——板料的屈服强度。

用软凸模进行拉深时,毛坯的稳定性不好,容易偏斜,而且中间部分的胀形和变薄是不可避免的。所以这种方法的应用受到一定的限制。但是,由于所用模具简单,有时不用冲压设备也能进行冲压成形,所以软凸模拉深法时常用于大尺寸的或形状极为复杂的零件。

图 11-2 是用软凸模对平板毛坯进行局部胀形的原理。胀形时毛坯的外边缘不产生拉深变形,零件形状的变化主要是依靠在两向拉应力作用下板料面积增大和厚度变薄的胀形机理。因此,毛坯不会起皱,对于薄材料的曲面形状零件的冲压加工十分有利。

图 11-2 所示的平板毛坯胀形所需的单位压力为:

$$p = \frac{2t}{R} \sigma_s$$

用液体、橡胶或气体进行空间零件的胀形或校形,可以简化模具结构,加工形状极为复杂的零件,如波纹管、火箭发动机的各种零件等。低温成形时,多用液体或橡胶;高温成形时则用气体,如高压储气瓶的气胀成形,就是在高温下进行的(用 2000~3000 牛/厘米² 压力的压缩空气)。近年来,也开始研究和使用对某些超塑性的板制零件进行气体成形的工艺方法。

二、软凹模拉深

用液体或橡胶的压力代替刚体凹模的作用,也可以进行拉深工序(图 11-3)。在进行拉深变形时,高压液体将毛坯紧紧地压在凸模的侧表面上,增大了毛坯的传力区——侧壁与凸模表面的摩擦力,也减轻了毛坯侧壁内的拉应力,使传力区的承载能力得到很大程度的提高。另一方面,在软凹模拉深时,也使毛坯与凹模的摩擦损失有相当程度的降低,因此,极限拉深系数比普通拉深时小很多,时常可达 0.4~0.45。

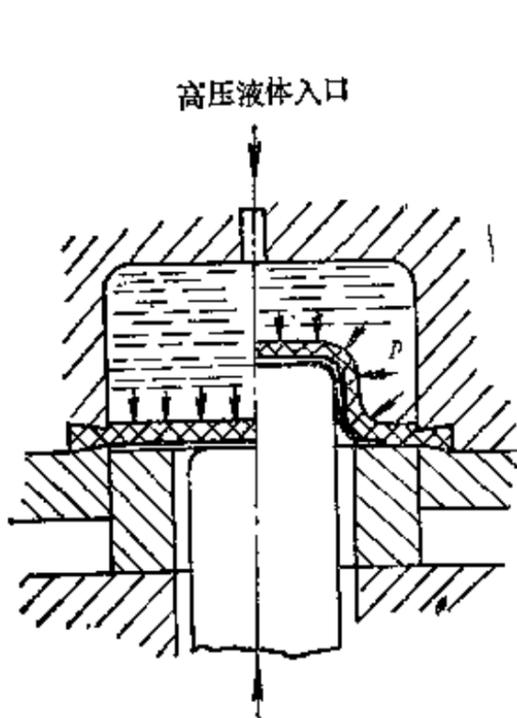


图11-3 软凹模拉深

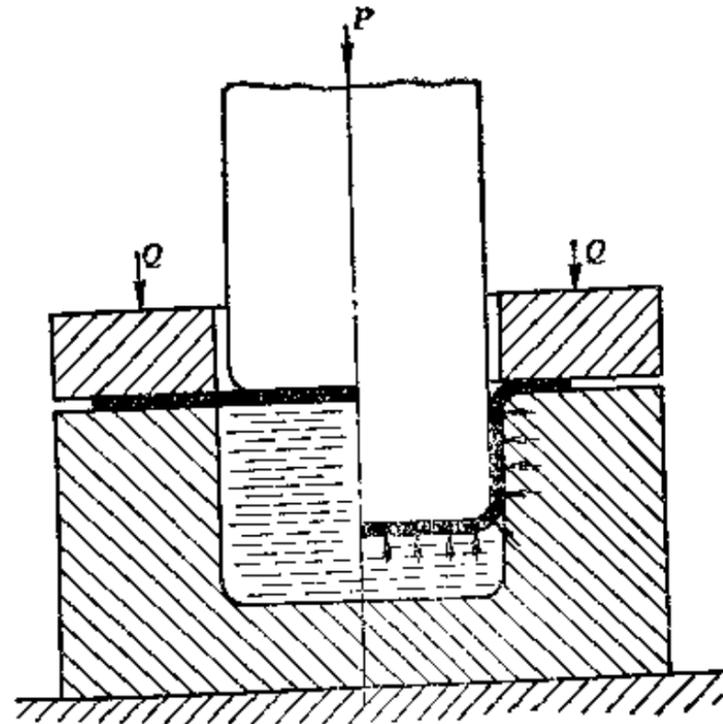


图11-4 充水拉深

软凹模拉深时,液体的压力数值应该足以防止毛坯的起皱和提供足够的表面摩擦力,其数值可以参考表 11-1 选取。

充水拉深是软凹模拉深的另一个特殊形式(图 11-4)。拉深前,于凹模内充满水或润滑

表11-1 液体凹模拉深所需压力 牛顿/厘米² (加工板厚 $t = 1$ 毫米)

材 料	拉 深 系 数				$m = \frac{d}{D_0}$	
	0.7	0.6	0.5	0.45	0.43	0.42
硬 铝	0~2250	0~3150	0~3400	0~3450	0~3500	0~3500
低碳钢	0~5000	0~5500	0~6000	0~6000	0~6500	—
不锈钢	0~6000	0~6000	0~7000	0~7500	0~7500	0~9000

油。在拉深时，凸模下降并压入凹模时，在凹模腔内形成高压。高压液体将毛坯紧紧地压在凸模表面上，造成对拉深变形有利的摩擦。同时液体通过毛坯外表面与凹模之间的空隙排除，使毛坯与凹模表面脱离接触，创造了一个极好的压力下实现强制润滑的条件，从而降低了毛坯与凹模之间的有害摩擦。这样综合作用的结果，可以降低极限拉深系数之值，时常可达0.35~0.4左右。

11-2 差温拉深法

在拉深时，毛坯可能产生的最大变形受到传力区——侧壁强度的限制。假如毛坯的变形程度过大，即变形区的宽度 $\frac{D_0 - d}{2}$ 过大，则变形区产生拉深变形所需的径向拉应力 σ_r 的数值可能达到或超过材料的强度极限。这时毛坯应产生拉深变形的法兰边部分已经成为不可能再变形的强区，变形区将转移到毛坯的侧壁，使其产生伸长变形或破坏。因此如能设法在降低变形的强区，变形区将转移到毛坯的侧壁，使其产生伸长变形或破坏。因此如能设法在降低毛坯法兰边变形抗力的同时提高毛坯侧壁的强度，就能提高拉深时的极限变形程度。差温拉深法就是在拉深过程中使毛坯的变形区和传力区处于不同的温度，而其温度变化的影响恰好有利于提高拉深时的极限变形程度。差温拉深可以分为局部加热拉深和局部冷却拉深两种方法。

局部加热拉深法，如图11-5所示。在拉深过程进行当中使压边圈和凹模之间的毛坯变形区加热到一定的温度，降低其变形抗力。同时在凹模圆角部分和凸模内通水冷却，保持毛坯传力区的强度不要降低。用这种方法可以使极限拉深系数降低到0.3~0.35左右，即用一道工序可以代替普通拉深方法的2~3道工序。在各种高盒形零件的拉深时，局部加热法的效

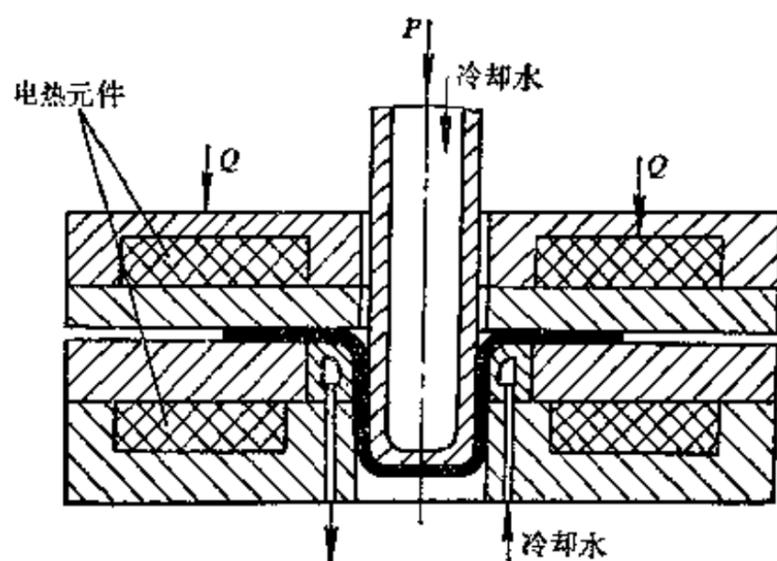


图11-5 局部加热拉深

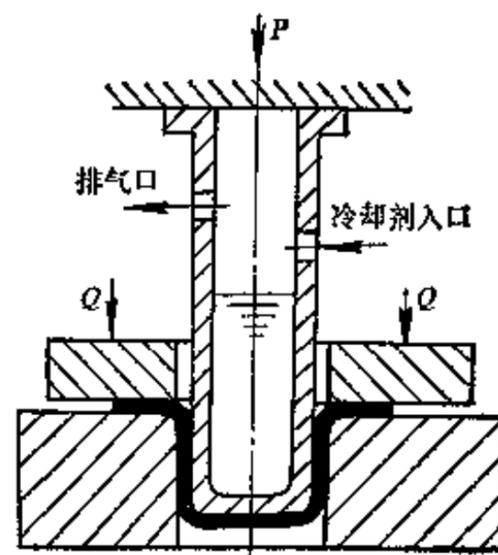


图11-6 局部冷却拉深

果更为显著。由于加热温度受到模具钢耐热能力的限制，所以，目前这个方法主要用于铝、镁、钛等轻合金零件的冲压加工，对钢板应用的不多。

在局部加热拉深时，毛坯的加热温度决定于材料的种类，对于铝合金可以取 $310\sim 340^{\circ}\text{C}$ ；对黄铜（H62）可取 $480\sim 500^{\circ}\text{C}$ ；对于镁合金可取 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ 。

局部冷却拉深法，如图 11-6 所示。在拉深过程进行时，毛坯的传力区和处于低温的凸模接触，并且被冷却到 $-160\sim -170^{\circ}\text{C}$ 。在这样低的温度下低碳钢的强度可能提高到二倍，而 18-8 型不锈钢的强度能提高到 2.3 倍。由于毛坯的底部与侧壁的冷却和强度的提高，使传力区的承载能力得到很大的加强，所以极限拉深系数可以显著地降低，并达到 0.35 左右。

常采用的深冷方法，是在空心凸模内添加液态氮或液态空气，其气化温度是 $-183\sim -195^{\circ}\text{C}$ 。目前，局部冷却拉深法的应用受到生产率不高和冷却方法麻烦等缺点的限制，在生产中的应用还很不普遍，主要用于不锈钢、耐热钢等特种金属或形状复杂而高度大的盆形零件。

11-3 加径向压力的拉深法

加径向压力的拉深方法，如图 11-7 所示。在拉深凸模对毛坯作用的同时，由高压液体在毛坯变形区的四周施加径向压力的结果，使变形区的应力状态发生变化，并使径向拉应力的数值减小。在变形区的外边缘则是三向受压的应力状态。由于径向压力的作用，毛坯变形区产生变形所需的径向拉应力下降，减轻了毛坯传力区的负担，所以极限变形程度可以提高。另外，高压液体由毛坯与模具接触面之间的泄漏也形成了良好的强制润滑作用，其结果也有利于拉深过程的进行。用这种方法进行拉深时，极限拉深系数可能降低到 0.35 以下。高压液体可以由高压容器供给或由模具内由压力机的作用形成。后一种方法可能得到几千大气压的径向压力。

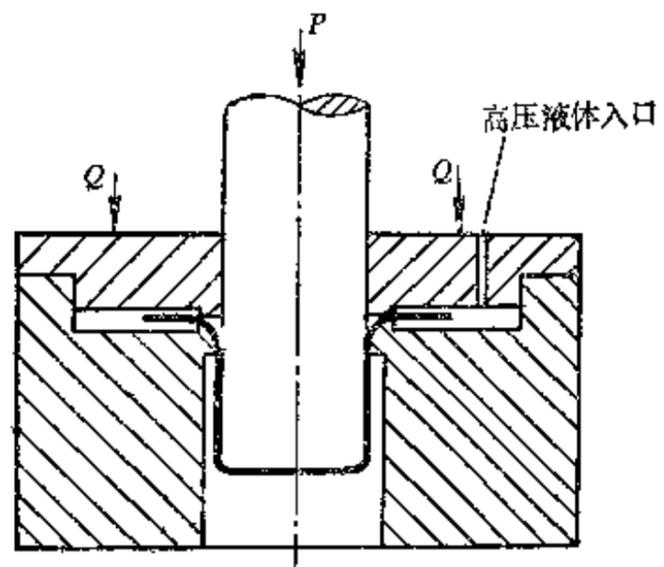


图11-7 加径向压力的拉深法

因为所用模具和设备比较复杂，所以这种拉深法的应用受到限制，目前的应用还很不广泛。但是，对于低强度和低塑性的材料（如某些非金属材料），由于所需径向压力较小，而三向压应力状态对塑性的有利影响又有比较重要的实际意义，这种拉深方法还可能有一定的发展。

11-4 爆炸成形

爆炸成形是高速成形的一种形式。高速成形可以分为爆炸成形、电水成形和电磁成形等三种方法。

在金属加工领域里，随着各种产品结构的发展，出现了各种尺寸的、形状复杂的、强度和精度都要求很高的板料零件。为了解决这种类型零件的加工问题，近 20 多年来开始在冲

压生产中比较广泛地研究和采用高速成形工艺。

在普通的冲压加工时，毛坯产生塑性变形所需的能量都是通过冲压设备得到的。在全部冲压过程中，冲压设备把某一种形式的能量（如电能、液体或气体的压力等）在一个比较长（相对地）的时间里连续不断地传给毛坯，并转化为后者塑性变形所消耗的功。在高速成形时，爆炸物质的化学能或另一种形式的电能，在极短的时间里转化为周围介质（空气或水）中的高压冲击波，并以脉冲波的形式作用于毛坯，使它产生塑性变形。冲击波对毛坯作用的时间非常短促，仅数微秒到数十微秒，只占毛坯全部变形时间的一小部分。这种异乎寻常的高速变形条件，使某些难加工的金属板料的塑性加工性能发生一些有利的变化。

爆炸成形属于软模成形的性质，不需要成对的刚性凸模和凹模同时对毛坯施加外力，而是用传压介质：空气或水代替刚性凸模的作用。这样，不仅可以简化模具结构，而且更适合于加工某些形状特殊、用刚性模不易加工的空心零件，而其尺寸精度比一般冲压方法要高。

爆炸成形所用模具简单，而且不需要冲压设备，可能加工零件的尺寸不受现有冲压设备能力的限制。在小批量或试制特大型的冲压件时，这是一个很突出的特点。

用爆炸成形方法可以对板料进行的冲压加工有：剪切、拉深、冲孔、翻边、胀形、校形、弯曲、扩口、压花纹等。此外，还可以进行爆炸焊接、表面强化、管件结构的装配、粉末压制等。近年来一些生产部门又成功地用爆炸方法实现了对奥氏体钢大型汽轮发电机护环的强化工艺。

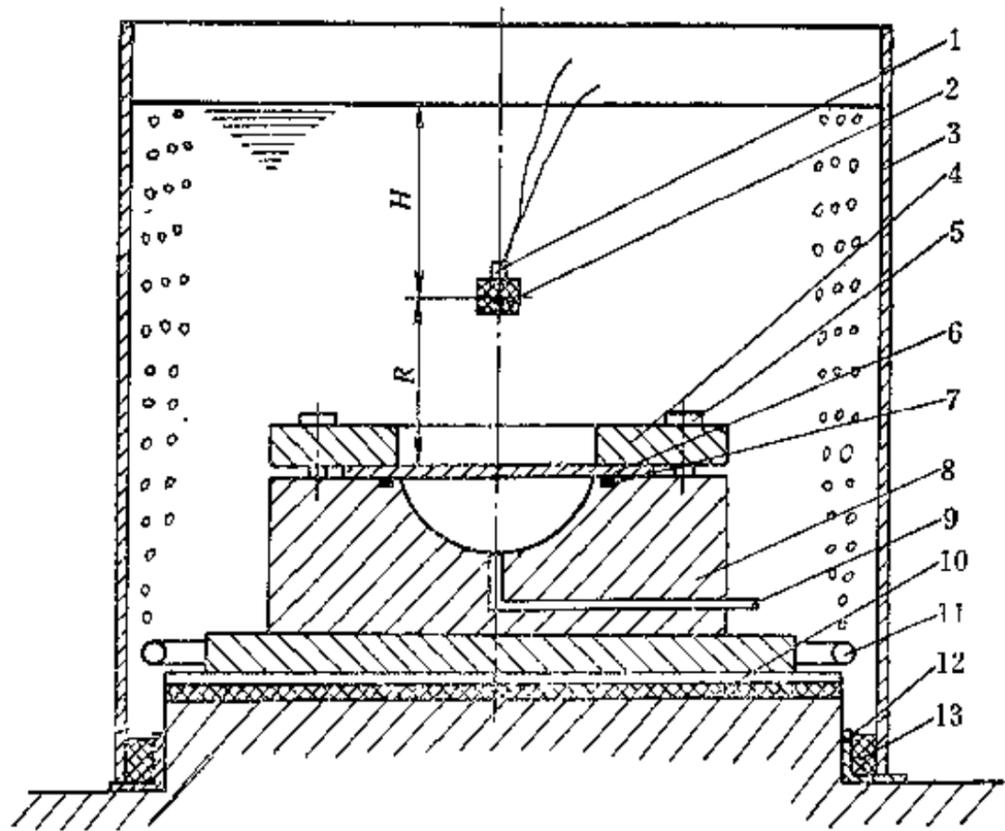


图11-8 爆炸成形装置

1—电雷管 2—炸药 3—水高 4—压边圈 5—螺栓
6—毛坯 7—密封 8—凹模 9—真空管道 10—缓冲装置 11—压缩空气管路 12—垫环 13—密封

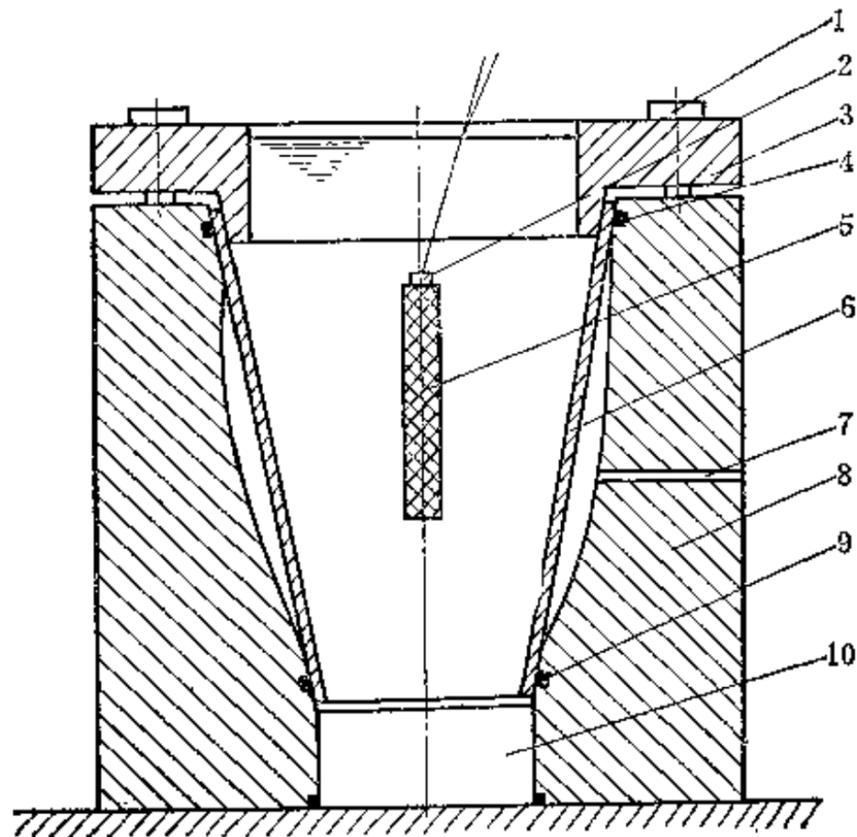


图11-9 爆炸胀形装置

1—螺栓 2—起爆雷管 3—压边圈 4—密封 5—炸药
6—毛坯 7—抽真空孔 8—凹模 9—密封 10—堵

装药形状是保证爆炸成形是否成功的重要因素之一，应该根据成形零件变形过程所要求的冲击波阵面形状来决定。例如，一般拉深件可用球形或短柱形装药；大型拉深件或大尺寸球面的校形可用环形装药；长度大的圆柱体零件或管子类零件的胀形或校形，可用长度与之相适应的长柱形装药或导爆索；大中型平面零件的校形或成形，可用平板形、网格形或环形装药，如此等等。

炸药与毛坯之间的相对位置也是爆炸成形的重要参数之一，它与药形的正确配合，是获得所需冲击波阵面形状的保证。对于轴对称类的零件，装药的形状也是轴对称的，其中心点应与零件的对称轴线重合。对于球面类型的零件（图 11-8），过低的装药能引起中心部分的局部变形和厚度的变薄，而过高的装药，必然导致药量的加大，对模具和装置均有不良影响。这时可以概略地取药高等于毛坯的半径。对于其它形状的装药，药高应根据成形零件的形状对冲击波阵面形状的要求决定。这时，过大的药距会降低异形装药的作用。在爆炸焊接、剪切、表面强化、压花纹等工作中，也用接触爆炸法，即将炸药直接放到毛坯表面上或在炸药与毛坯之间加厚度不大的传压垫片。

目前，爆炸成形所需装药量的理论计算方法还很不完善，通常都是根据经验对比的方法对药量做初步的估计，然后用逐步加大药量的试验方法最后决定合适的药量，对于简单的球形装药也可以用下述方法进行估算。

水中球形集中装药爆炸时产生的冲击波最大压力 P_{max} 、单位冲量 I 、单位能量 E 可按下式计算：

$$P_{max} = 5350 \left(\frac{W}{R} \right)^{1.18} \quad (\text{牛/厘米}^2)$$

$$I = 58.7 \times 10^{-2} W^{\frac{1}{3}} \left(\frac{W}{R} \right)^{0.89} \quad (\text{牛} \cdot \text{秒/厘米}^2)$$

$$E = 8.43 W^{\frac{1}{3}} \left(\frac{W}{R} \right)^{2.05} \quad (\text{牛} \cdot \text{米/厘米}^2)$$

上式中 W 是装药量，以公斤表示； R 是距离，以米表示。根据毛坯的塑性变形功计算出所需要的单位冲量或单位能量，并进一步计算装药量是比较合理的方法。但是，目前塑性力学的发展水平还不能提供计算各种成形工艺所需功的计算方法，所以在实用上遇到困难。因此，当前常用比较冲击波最大压力和成形所需静压力的间接方法做极为粗略的计算。由于冲击波对毛坯作用时间很短，仅占毛坯变形时间的一小部分，所以冲击波最大压力 P_{max} 必须超过毛坯成形所需的压力 P ，故有

$$P_{max} > KP$$

上式中 K 是增大系数，其值决定于毛坯的变形量，也就是决定于塑性变形功的大小。对变形量很小的校形，取 $K \approx 3$ ；对于变形量不大的胀形，可取 $K \approx 5$ ；对于变形量较大的拉深工艺取 $K \approx 10$ 或更大。

爆炸成形装置如图 11-8、11-9、11-11 所示。图 11-8 中 3 是水筒，通常用 10~30 毫米厚钢板制成，而其直径决定于成形零件的尺寸。水筒高度为药距 R 与装药至水面高度 H 之和， H 过小，影响爆炸效率，但当 H 超过某一极限值后爆炸效果基本不变。一般取 $H \approx R$ 。

水筒可以安放在地面上，也可以放到地下，四周用钢筋混凝土充实，并使筒口与地面平

齐,这时称为爆炸井。为防止筒底部的混凝土基础受到爆炸作用的冲击与破坏,在模具与筒底之间应加充气胶管或用其他缓冲措施。筒壁部分也可用充气胶管保护,也可用图 11-8 中所示的气幕保护,用气幕保护时,压缩空气位于筒底的周边,当每单位长度(米)的空气消耗量为 0.25 米³/分钟时,爆炸时筒壁的拉应力可以减至无保护措施时的 15~20%。

在大型或厚度大的零件成形时,或在成形形状不规则的零件,不易解决模具的密封问题时,也可以采用一次使用的临时水筒(图 11-11)。成形零件的尺寸较小时,可用硬纸板支持和维持形状,而尺寸较大时,必须用强度较高的材料,如纤维板等。为了平衡水的压力,纤维板的外围须用绳子箍紧。这时多用塑料薄膜袋子盛水,保持密封。一次使用水筒的水平方向上的尺寸决定于模具的大小,而高度则决定于

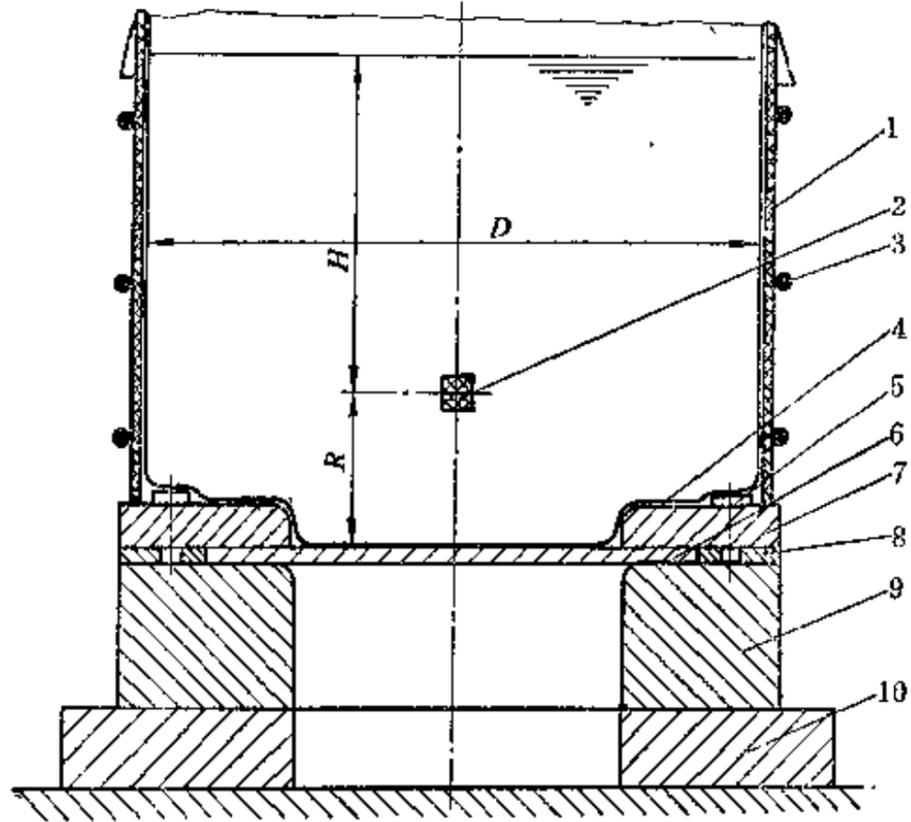


图11-11 一次使用水筒的爆炸成形装置

- 1—简易水筒 2—炸药 3—绳 4—塑料袋 5—螺栓
- 6—毛坯 7—压边圈 8—垫圈 9—凹模 10—底座

水筒的横向尺寸,过大或过小的高度均能降低爆炸的效果,通常应取 $H = \frac{D}{2}$ (图11-11)。

在设计爆炸成形模具时,除应遵循一般的冲模设计方法外,还应考虑几个特殊性的问题:如毛坯高速贴模时的排气问题,模具的密封问题,在爆炸作用下的模具动力强度问题等。

爆炸成形模具有抽真空的和自然排气的两种形式,其选用视模腔内需要排出的空气量大小及排气的可能性而定。如图 11-8、11-9 所示的模具结构,模腔里的空气不易排出,其结果不仅能起阻止毛坯顺利贴模的不良作用,而且会因模腔内气体的高度压缩而烧伤轻金属零件的表面。在这种情况下,应在成形前将模腔内的空气抽出,保持一定的真空度。真空度的大小决定于模腔容积和成形零件的尺寸精度要求,一般介于 5~10 毫米水银柱即可。模腔密封如图 11-8、11-9 所示,小批量生产时,可用简易的密封方法,如用粘土与油脂的混合物等,批量较大时,宜用密封圈结构,大多数的情况均可采用 O 型密封。同时,也必须注意不能使水进入模腔的密封问题,否则可能引起零件成形时的反向鼓起的现象。

在下列情况下可用自然排气:变形量很小的校形工艺;用无底模具的自由成形;形状不规则的零件成形,因不易解决密封和抽气问题而采用多次成形方法时等等。排气孔和抽气孔均应设在毛坯最后

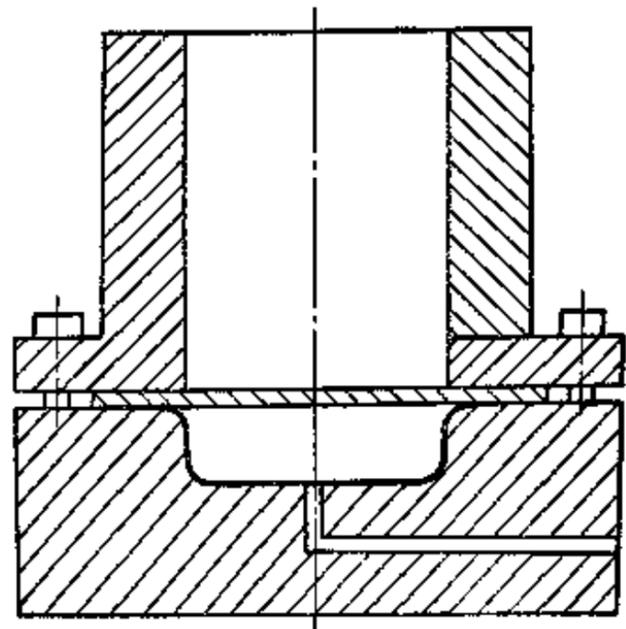


图11-12 质量分布对模具强度的影响

贴模的部位。模腔容积大时,排气孔可以多设。不连通的模腔,应分别设置抽气孔或排气孔。

开式与闭式胀形类模具设计时,应考虑强度问题,在精度要求高时,还必须考虑模具的刚度问题,尤其是分块拼合结构的胀形模的结合刚度更为重要。模具的质量对强度和刚度均有影响,所以除从一般的冲模强度设计观点出发外,还应考虑到模具各部分的质量分布对强度的影响。例如,在长宽比较大的长形零件的开式成形时,模具也必定具有较大的长度。这时应使沿长度方向上模具的质量分布尽量与爆炸时冲击波的冲量分布相适应,即冲量大的部位,模具也应具有较大的质量。例如,当用小药距的球形集中装药时,尽量降低模具两端部分的质量,并增加中间部分的质量,可以减轻模具内的应力,提高其强度。假如增大图 11-8 所示成形模压边圈的厚度,或将压边圈改成为图 11-12 左半边的结构形式,结果均使压边圈的质量增大。在爆炸冲量作用于凹模并使其向下加速运动时,压边圈的质量力全部由其固定螺栓承受并被拉断。如将模具改成图 11-12 右半部的形式,则螺栓的受力情况会有改善。又如在模具上垂直于爆炸作用方向上安装的起重吊环,有时被剪断也是质量力作用的结果。这时改变起重环的结构,减少其头部质量,可能改善其强度。

爆炸成形模具所用的材料,决定于成形零件的几何形状和尺寸大小、精度要求、材料的厚度、材料的机械强度、装药量的大小、生产批量等因素。由于在实际生产中上述各种因素的变化很大,因此,所用的模具材料也是多种多样,由高强度的合金钢,到非金属材料的水泥,甚至在某些特定条件下——例如大型零件的小批量生产——也用砂子作为模具使用。常用的模具材料及其应用条件可见表 11-2。

表 11-2 常用爆炸成形模具材料的选用

模 具 材 料	特 点	适 用 范 围
锻造合金钢	抗冲击负荷,尺寸稳定,成形零件精度高,表面质量好,寿命长,但加工困难,制造周期长,成本高	适用于形状非常复杂、尺寸精度要求高、厚度大强度高,而尺寸不大的零件的成形与胀形,大批量生产
铸钢	成本同上项,但抗冲击能力稍差,成本也稍低于锻钢	适用于形状复杂,尺寸精度有一定要求的黑色金属或高强度的有色金属的成形与胀形,生产批量较大
球化铸铁	成本低,易于制造,能保证一定的成形尺寸精度,但抗冲击负荷能力差	适用于一定批量的黑色金属与有色金属零件的成形模
锌合金	可以反复熔铸,加工方便,制造周期短,成本低,但强度低,受冲击后尺寸容易变化,寿命不长	中小型零件,小装药量冲击负荷不大精度要求不严格的成形模,小批量、单件试制
水泥本体、玻璃钢或环氧树脂衬里	成本低,容易制造,不需要模具加工设备,但抗冲击能力差,寿命很低	适用于大型低强度厚度小的零件成形,小批量、单件试制

11-5 电 水 成 形

电水成形可分为电极间放电成形与电爆成形。电水成形的基本原理,如图 11-13 所示。来自网路的交流电,由升压变压器将电压提高到 20~40 千伏,经整流后变为高压直流,并向电容器充电。当充电电压达到一定数值时辅助间隙被击穿,高电压瞬时地加到两放电电极所形成的主放电间隙上,并使主间隙击穿,于其间产生高压放电。在放电回路中形成非常强

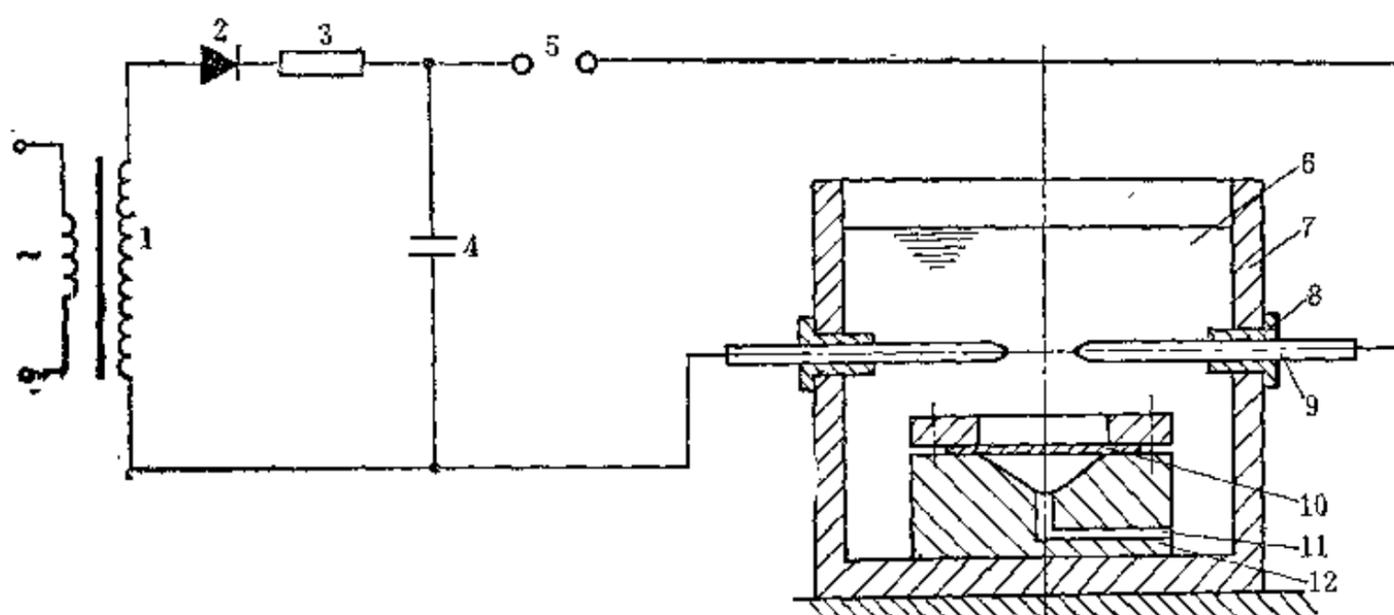


图11-13 电水成形原理

1—升压变压器 2—整流器 3—充电电阻 4—电容器 5—辅助间隙 6—水
7—水箱 8—绝缘 9—电极 10—毛坯 11—抽气孔 12—凹模

大——可达三万安培——的冲击电流，结果在电极周围的介质中形成冲击波及液流冲击使金属毛坯成形。

用电水成形法可以对板料及管子进行的冲压加工有：拉深、胀形、校形、冲孔等等。

电水成形时毛坯的塑性变形特点与爆炸成形时相似，成形中毛坯的最大位移速度也接近于爆炸成形，大致介于30~100米/秒之间。

电水成形的加工能力决定于电容器可能储存的最大能量 E （焦耳），其值决定于电容器的电容量 C （法拉）和充电电压 V （伏），并可用下式计算：

$$E = \frac{1}{2}CV^2$$

电水成形时常用的充电电压为20千伏。目前在生产中使用的最大电水成形装置的容量为150000焦耳，大致相当于30克梯恩梯爆炸时释放的能量。

与爆炸成形相比，电水成形时能量的调整与控制简单，成形过程稳定，而且操作方便，容易实现机械化与自动化，生产率高，组织生产也比较容易。但是，电水成形的加工能力受到设备容量限制，而且也不能象爆炸成形那样灵活地改变药形以适应各种形状零件的成形要求，所以目前电水成形的应用还仅限于形状较为简单的小型零件（ ϕ 400毫米以下）的中小批生产。

电水成形也可分为开式成形（图11-13）与闭式成形（图11-14、11-15）。闭式成形可提高能量的利用率，一般情况下，开式成形时的能量利用率仅为10~20%，而闭式成形可达30%。

电水成形所用的电极有多种形式，常用的有对向式（图11-13、11-14）、同轴式（图11-15）及平行式等。生产中对向式与同轴式应用较多。平行式的电极具有易于调整与毛坯之间距离的优点，但在放电时受介质压力及电磁力的横向作用，必须注意结构上的强度问题。电极材料可用铜、黄铜、钢、不锈钢等，而电极的结构应保证强度及调整上的要求。电极间距离称为放电间隙 λ ，对成形效果有较大影响，用自来水为介质时，其值可按下列式计算：

$$\lambda = 4 + 0.9V \text{ 毫米}$$

式中 V ——充电电压，用千伏表示。

假如将图 11-13 和 11-14 中电极间用细金属丝联结起来，在电容器放电时，强大的脉冲电流会使金属丝迅速熔化并蒸发成为高压气体，并在介质中形成冲击波使板件成形——这就是电爆成形。电爆成形时的成形效果比电极间放电时要大些。电极间的金属丝必须是良好的导体，生产中常用钢丝、铜丝、铝丝等。如用铝、镁等金属粉末代替细金属丝还能增大电爆成形的作用。

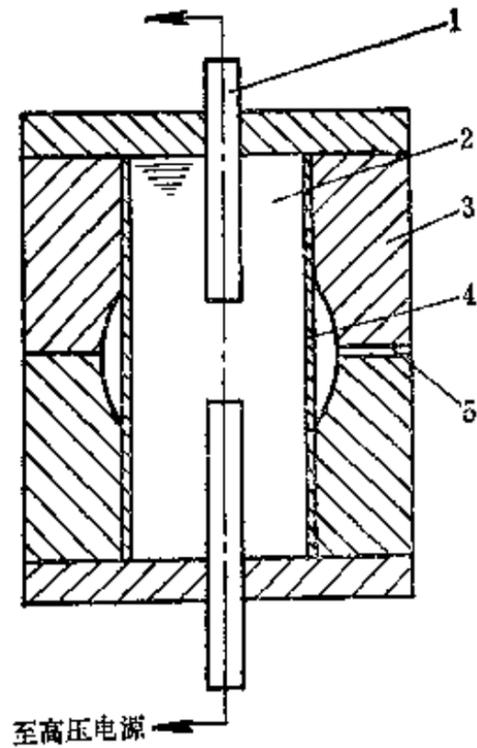


图11-14 电水成形法加工零件(胀形)
1—电极 2—水 3—凹模 4—毛坯 5—抽气孔

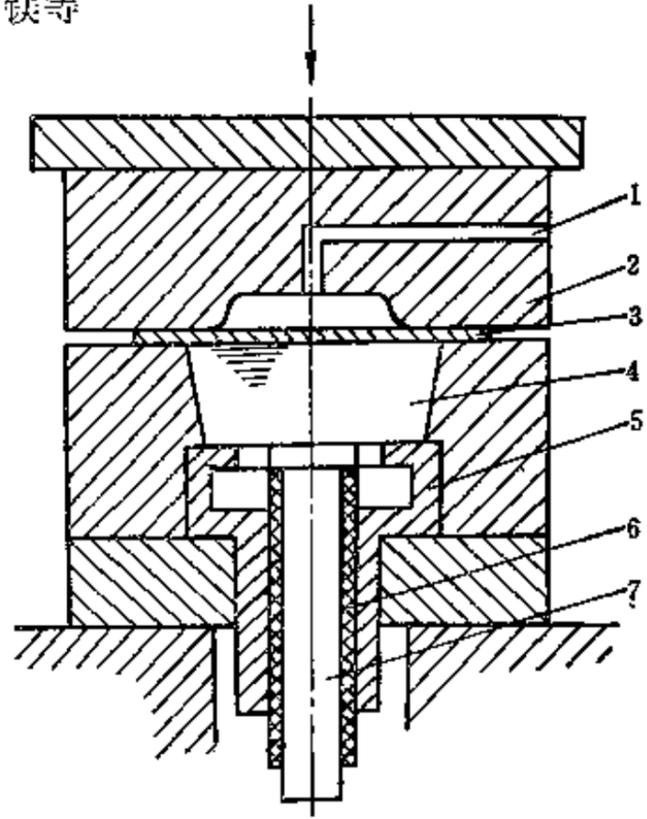


图11-15 用同轴电极的闭式电水成形装置
1—抽气孔 2—凹模 3—毛坯 4—水
5—外电极 6—绝缘 7—内电极

11-6 电磁成形

电磁成形原理如图 11-16 所示。由升压变压器及整流器组成的高压直流电源向电容器充电。当放电回路中开关 5 闭合时，电容器所储存的电荷在放电回路中形成很强的脉冲电流。由于放电回路的阻抗很低，所以在成形线圈 6 中的脉冲电流，在极短的时间内（例如 10~20 微秒）迅速地增长和衰减，并在其周围的空间形成一个强大的变化磁场。毛坯 7 位于成形线圈的内部。在此变化磁场作用下，于毛坯内产生感应电流，毛坯内感应电流形成的磁场和成形线圈磁场相互作用的结果，使毛坯在磁力的作用下产生塑性变形并以很大的速度运动贴模。毛坯的运动速度决定于充电能量及毛坯的尺寸和机械性能与电气性能，一般介于 50~200 米/秒之间。

图 11-16 是管子缩颈的电磁成形原理，也可以用这个方法进行管件之间的联结。假如把成形线圈置于管子内部，则可以完成胀形工艺；假如用平面螺线的成形线圈，也可以完成平板毛坯的拉深工艺。

电磁成形的加工能力决定于充电电压与电容器的电容量。电磁成形时常用的充电电压为 5~10 千伏，而充电能量介于 5~20 千焦耳之间。

为了提高电磁成形时的效果，应尽量降低放电回路的阻抗，并使毛坯尽可能地靠近成形线圈。放电回路中的脉冲电流可能达到数万安培，故为了便于操作和控制，于放电回路中多

离。用这种方法可以加工形状极为复杂的零件，可以按工位进行冲孔、弯曲、拉深、翻边、胀形、校形、落料等各种冲压加工。在带料连续冲压时，可以把多数冲压工序合并成为一道工序，而且也省掉了每道工序里进料和出料的麻烦，便于操作，也便于自动化，所以近年来在冲压生产中的发展是相当快的。

平板零件的连续冲压，在第四章冲裁模结构部分已有叙述。其他需要进行弯曲、冲孔、翻边、拉深等多种冲压成形加工的零件也很多。图 11-18 是在带料上进行连续拉深的零件加工实例。该零件共经过三道拉深工序后，又用底部冲孔、底部翻边、落料等三道工序，最后与带料分离并得到成品零件。

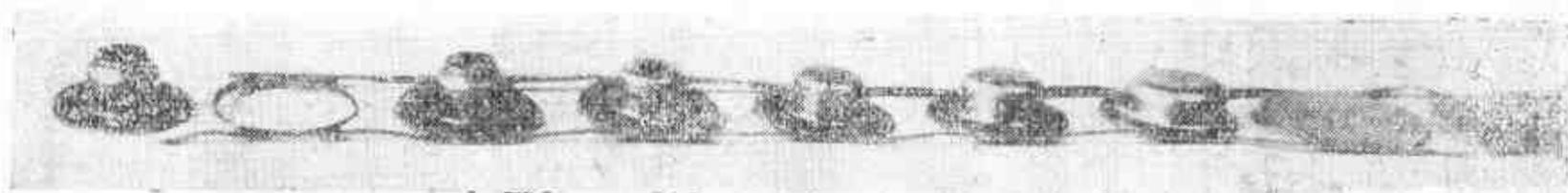


图11-18 带料连续拉深加工过程实例

在带料上进行连续拉深加工时，通常都要在第一道拉深工序之前加一道或两道冲切工艺切口工序，使带料上形成一定形状而又不与带料完全分离的单个平板毛坯。为了保证冲压加工的顺利进行，工艺切口的形式应不妨碍每个毛坯在拉深过程中直径的变化，尽量减小或防止冲压过程中步距和带料宽度的变化，同时又能保证毛坯与带料之间的可靠联结，便于进行工序间的进出料与定位。工艺切口形式很多，这里举几个常用的例子（图 11-19）。

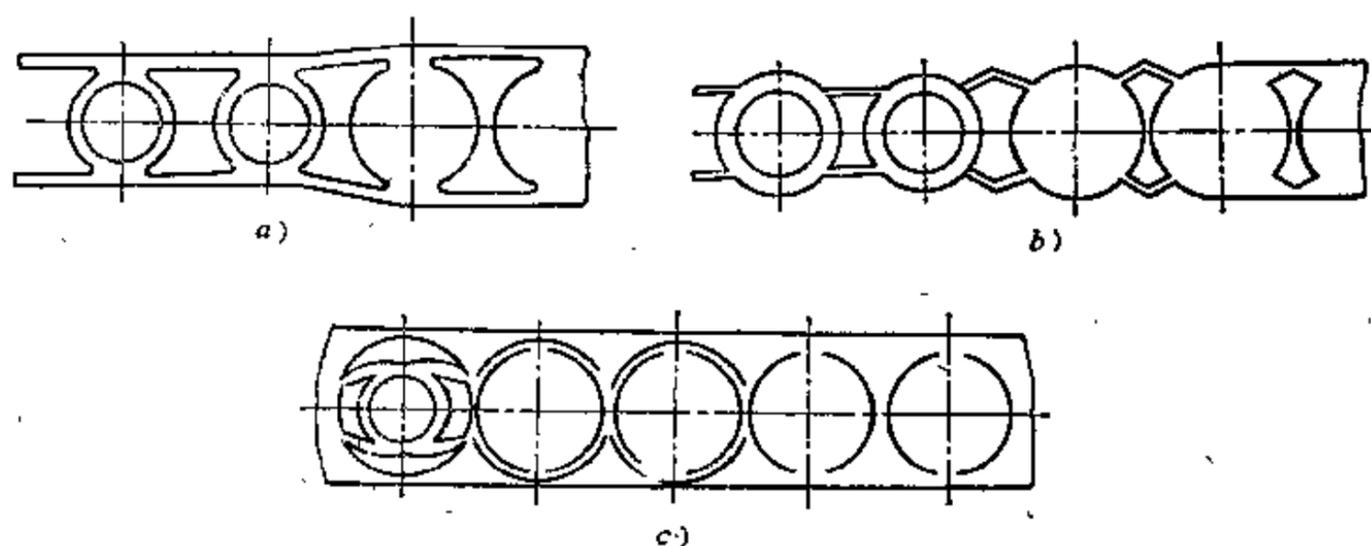


图11-19 带料连续拉深常用的工艺切口形式

图 11-19 a 所示的切口形式简单，但在第一次拉深过程中带料两侧的搭边有由平行到倾斜又到平行的变化，结果引起步距的改变，对拉深时毛坯外缘的变形有一定的牵制作用。图中另外两种切口形式对毛坯的拉深变形没有影响，但其形式比较复杂，有时还要多增大一些材料消耗（图 11-19 c）。

对于弯曲件或其他形状的零件，也可以采用带料连续冲压加工，图 13-12 就是一个弯曲件连续冲压的实例。

图 11-20 是带料连续拉深模。在此模具上共进行冲工艺切口、第一道拉深、第二道拉深、冲底孔、底孔翻边、落料等共六道冲压工序。第一道拉深时用盘形弹簧 3 压料防止起皱。冲底孔时，用外套 1 定位，保证孔的同心度。底孔翻边时，用件 6 定位和防止推出器压

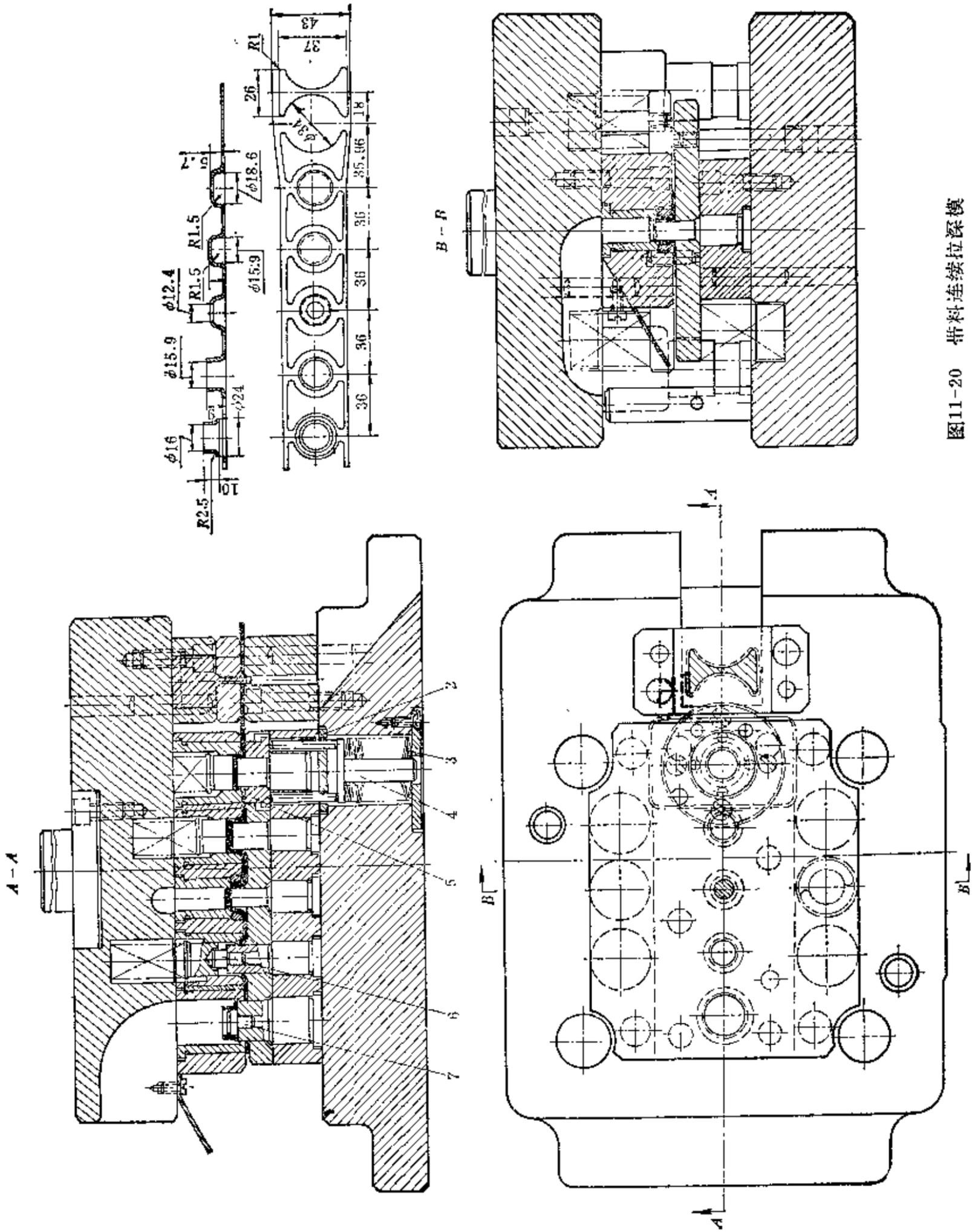


图11-20 带料连续拉深模

料。冲孔的废料和冲成的零件，均经上模内的孔道逐个地推出。

11-8 变薄拉深

变薄拉深（图 11-21）时，毛坯的直径变化很小，主要的变形反映在厚度的变化，所以它是冲压变形的一种特殊形式。变薄拉深适合于加工高度大、壁薄而底厚的空心件。目前，变薄拉深在弹壳的冲压生产当中的应用比较多。

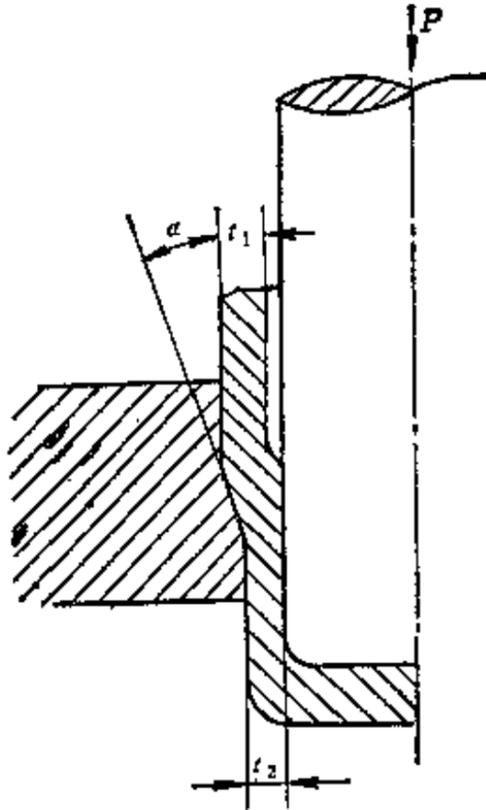


图11-21 变薄拉深

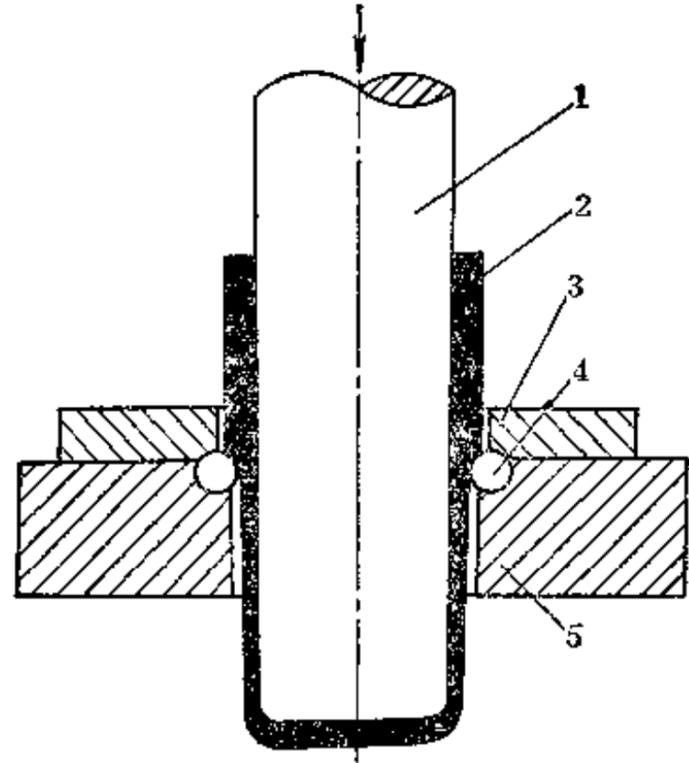


图11-22 旋转变薄拉深

1—凸模 2—毛坯 3—压盖 4—滚珠 5—转盘

变薄拉深时，毛坯的变形区是处于凹模孔内锥形部分范围的金属，而传力区是已从凹模内被拉出厚度为 t_2 的侧壁部分和底部。变形区内的金属处于轴向受拉和另两向受压的三向应力状态。变薄拉深时的最大变形程度受到传力区强度的限制，不能过大。通常用拉深系数表示变形程度。变薄拉深系数 m ，可用下式计算

$$m = \frac{t_2}{t_1}$$

式中 t_1 与 t_2 ——分别为变形前后毛坯侧壁的厚度。

对于大多数的金属，可取极限变薄拉深系数之值为 0.65~0.7。

变薄拉深时，凹模的角度 α 对变形过程有非常重要的影响，一般可取 $\alpha = 12^\circ \sim 25^\circ$ 范围内。

旋转变薄拉深（图 11-22）是近年来在变薄拉深方面发展的一种新工艺方法。装有滚珠 4 的转盘 5 以 1000 转/分钟左右的速度旋转。毛坯 2 在凸模 1 的带动下以一定的速度（通常介于 50~150 毫米/分钟）做轴向进给。由于毛坯变形区尺寸（即毛坯与凹模的接触面积）的减少，可以显著地降低变形力，因此一道拉深工序所能完成的壁厚变薄量也得到相应的增大，通常可达 $\frac{t_2}{t_1} = 0.3 \sim 0.5$ 。

11-9 旋 压

旋压加工的原理如图 11-23 所示。利用旋压机使毛坯和模具以一定的速度共同旋转，并在滚轮的作用下使毛坯在与滚轮接触的部位上产生局部的塑性变形。由于滚轮的进给运动和毛坯的旋转运动，结果使局部的塑性变形逐步地扩展到毛坯的全部表面，并完成零件的旋压加工。用旋压法只能加工轴对称形状的零件，可以是圆筒形、锥形、抛物面形或其他各种曲线构成的旋转体（图 11-24）。旋压加工所用的模具十分简单，而且由于加工时变形区的尺寸很小，所需的旋压力比一般冲压方法小很多，所以可以用功率和吨位都非常小的旋压机加工大型的冲压件。但是，旋压加工的生产率较低，而且在加工中要求操作人员有熟练的技术水平。因此，旋压多用于批量较小，产品形状复杂，而且产品的材料、尺寸多变化的工业部门，如航空工业、导弹工业等。

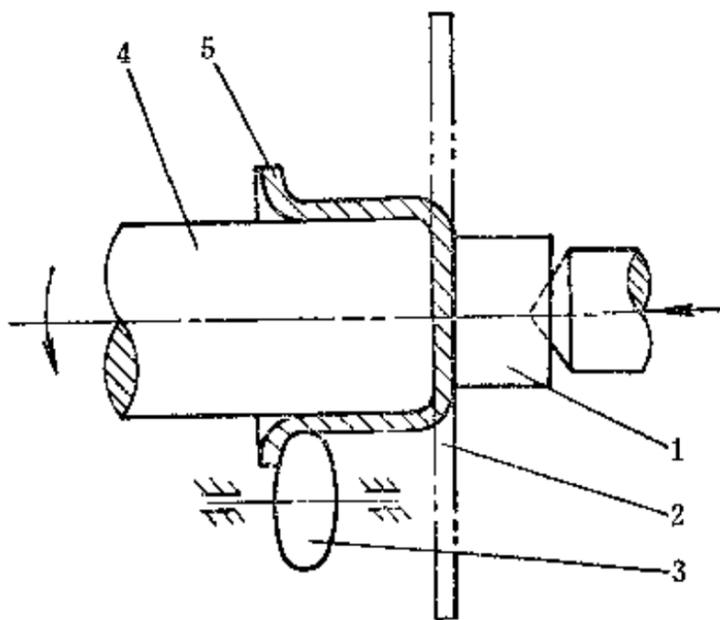


图11-23 旋压原理图

1—顶板 2—毛坯 3—滚轮 4—模具 5—加工中的毛坯

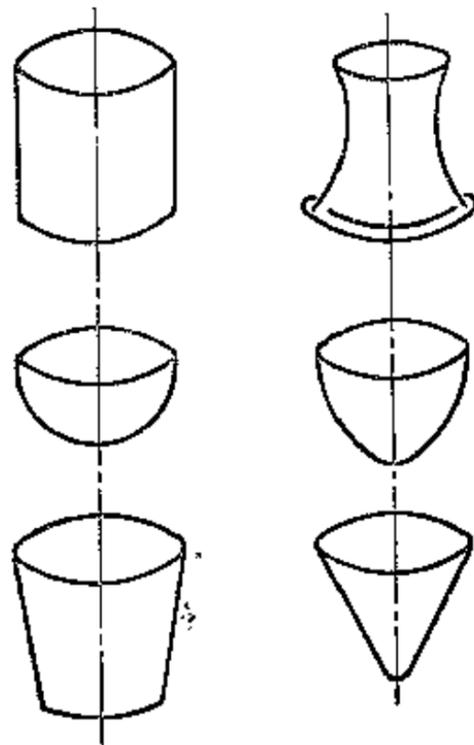


图11-24 旋压件举例

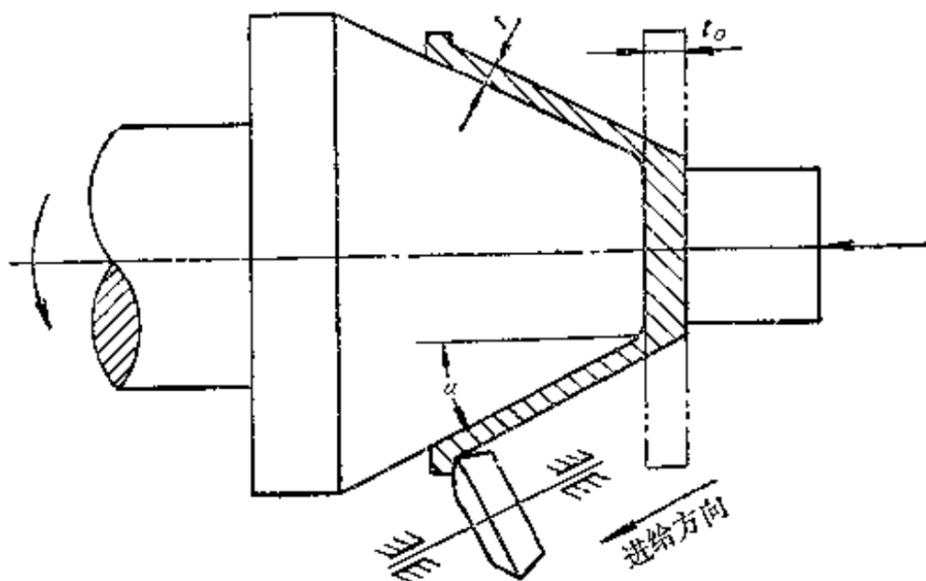


图11-25 变薄旋压原理图

旋压时毛坯的旋转速度决定于加工零件的尺寸、材料的厚度、材料的机械性能等，通常介于 250~1000 转/分钟之间。旋压用模具可以用钢，也可以用成本低的软金属或非金属材料

(如硬质木材等)制造。

图 11-25 所示的变薄旋压是旋压加工的另一形式。在旋压滚轮的作用下,原始厚度为 t_0 的原始毛坯变形成为厚度为 t 的锥形零件。旋压后零件的厚度决定于毛坯的厚度和锥角 α , 其值为

$$t = t_0 \sin \alpha$$

变薄旋压时毛坯的转速决定于材料的种类和尺寸,一般可取线速度为 100~500 米/分钟之间,而滚轮的进给量可取为 30~120 毫米/分钟。为了改善滚轮施力机构的受力条件,一般多采用两个或两个以上的滚轮,并使其作用力相互平衡。

变薄旋压多用于加工薄壁锥形件或薄壁的长管形零件,所得零件的尺寸精度和表面光洁度都比较好,在航空工业、导弹工业等方面的应用较多。

第十二章 冷 挤 压

12-1 概 述

一、冷挤压的分类

冷挤压是在室温下用模具的压力使模腔内的金属毛坯产生塑性变形，并经由模孔或模具的缝隙挤出，从而得到预定的形状、尺寸制件的加工方法。根据金属被挤出的方向与凸模运动方向的关系，冷挤压一般可分成以下三种基本方式：

正挤压——金属的挤出方向与凸模运动方向相同（图 12-1 a）；

反挤压——金属的挤出方向与凸模运动方向相反（图 12-1 b）；

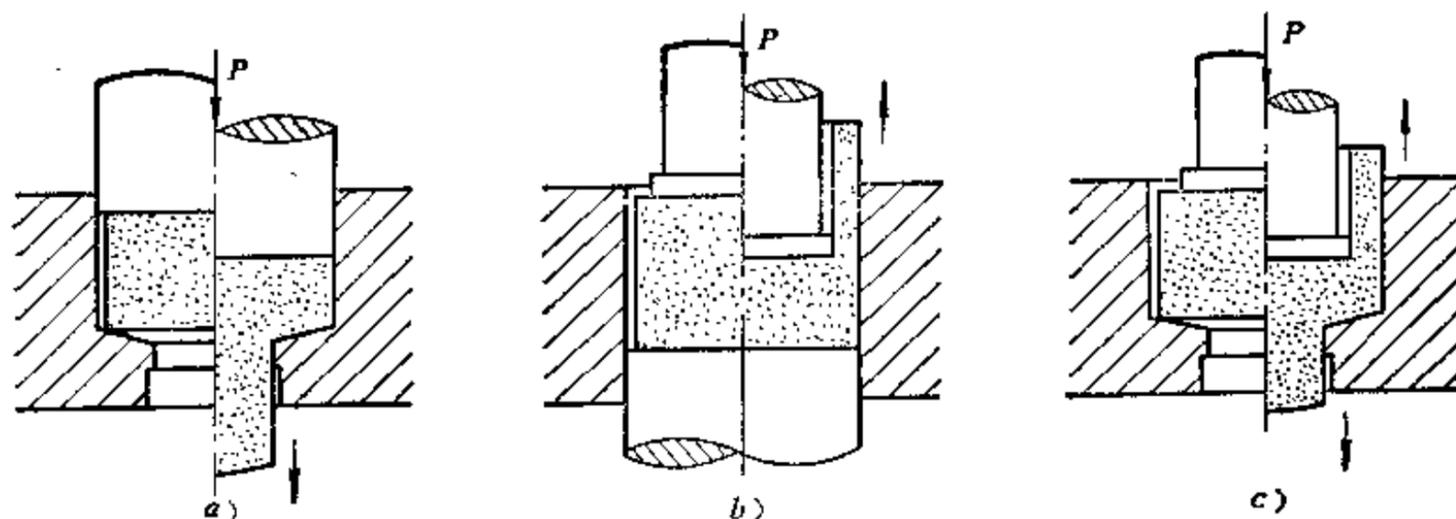


图12-1 冷挤压方式

复合挤压——金属的挤出方向相对于凸模运动方向，一部分相同，另一部分相反（图 12-1 c）。

显然，改变凹模孔口或凸、凹模之间缝隙的轮廓形状，就可以挤出形状和尺寸不同的各种空心件和实心件。

二、冷挤压的特点

冷挤压毛坯处于立体应力应变状态下，三向压应力的平均应力的绝对值很大，即静水压的作用很强。所以冷挤压毛坯变形所需之单位挤压力很大，可能达到毛坯材料强度极限的 4~6 倍或更高，时常接近甚至超过现有模具材料的抗压强度极限 $2500\sim 3000\text{牛/毫米}^2$ ，其结果使冷挤压技术上出现下述几方面特殊问题：

在模具方面必须采取有效措施解决模具强度、刚度及寿命问题。由于冷挤压模具在承受很大的挤压变形力作用的同时，在与挤压金属接触表面上也受到激烈的磨损，所以在一般精况下，冷挤压模具的寿命很低（一般不超过 2~3 万件），即使对模具采用表面处理（镀铬、软氮化、渗硼、渗合金碳化物、原子合金化等）提高寿命，也只能达 20~30 万件，比拉深模百万件的寿命低的多。为了提高冷挤压模具的强度，应该采用多层预应力组合模具或分割式

3 的组合模具。分割式的模具可以消除应力集中，提高模具的强度与寿命。另外，还必须注意采用适合冷挤压用的耐疲劳、耐磨损的高强度模具材料。

润滑对冷挤压的影响是十分重要的。毛坯与模具接触面上的摩擦不仅影响金属的变形和挤压件的质量，而且也直接影响挤压单位力的大小、模具的强度和寿命等，所以挤压时的润滑时常可能成为挤压成败的关键。为尽量减小摩擦的不利影响，除要求模具工作表面应具有足够的光洁度外，还要求采用良好可靠的润滑方法。常用的润滑剂有液体润滑剂（动物油、植物油、矿物油）和固体润滑剂（硬脂酸锌、硬脂酸钠、二硫化钼、石墨等）。它们可以单独使用或混合使用。有时为了确保挤压过程中的润滑层不被过大的单位接触压力所破坏，毛坯要经过表面化学处理。例如碳钢的磷酸盐处理（磷化），奥氏体不锈钢的草酸盐处理，铝合金的氧化、磷化、氟硅化处理，黄铜的钝化处理等。经化学处理后的毛坯表面覆盖层是很薄的多孔状结晶膜，它能随毛坯一起变形而不剥离脱落，在孔内吸附的润滑剂可以保持挤压过程中润滑层的连续性和有效的润滑效果。

冷挤压时毛坯处于很强的静水压作用下，材料允许的变形程度一般已不再受材料塑性的限制，而是受模具材料强度和模具寿命的限制。因此提高一次挤压允许变形程度的有效方法往往是通过降低毛坯的变形抗力，而使单位挤压力控制在模具强度允许的范围之内。生产中常采用挤压前的热处理使毛坯材料软化和提高塑性。为了保证制件质量和模具的正常受力状态，对挤压毛坯的表面光洁度、几何形状和尺寸均有一定要求。常见的下料方法有冲裁、剪切和切削等，选择下料方法主要根据技术、经济指标确定。

在现有技术条件下，远不是对所有金属材料都能实现冷挤压加工。冷挤压要求材料具有低的屈服极限、小的加工硬化指数和足够的塑性。目前可以挤压加工的金属材料主要是：有色金属及其合金、低碳钢、中碳钢、低合金钢。当挤压件的形状、变形程度适宜时，适当采取措施后，对部分不锈钢、轴承钢、高速钢和钛合金等也能实现冷挤压。

上述几方面特点往往是决定冷挤压工艺成败的关键。因此在工艺过程设计时必须充分注意合理地选择挤压方式和变形工序次数，正确地安排挤压前和工序间的热处理及润滑等。

目前，冷挤压件尺寸精度可达 GB 3 级，表面光洁度达 $\nabla 6 \sim \nabla 9$ 或更高，一般无需或辅以少量切削加工即可使用。所以冷挤压加工的优点是材料利用率高，生产效率高，成本低廉，可以提高制件的机械性能（强度、硬度、疲劳极限等），延长使用寿命，可能用一般低强度材料代替贵重的高强度材料，或者在满足强度要求的前提下缩小断面尺寸和减轻重量。例如冷挤压加工汽车活塞销（20Cr）与原切削加工比较，材料利用率由 40% 提高到 80%，生产效率提高二倍，成本降低 37%，机械性能提高 20~100%，疲劳寿命是原来的 3.5 倍。又如汽车发动机火花塞壳体采用冷挤压代替切削加工后，可以改用成本低的 10 号钢，材料利用率由 24% 提高到 90% 以上。

目前，最大的冷挤压件的重量可达 30 公斤，制件形状多种多样，并出现了冷挤压生产自动线，冷挤压车间和专业厂，更有利于发挥冷挤压加工优越的技术经济效果。伴随理论与生产实践的进展，近期相继出现了许多新的挤压方法：温热挤压、静液挤压、振动挤压等，为继续扩大冷挤压加工应用范围创造出有利的条件。

冷挤压和局部镦粗、镦头、模锻等工艺方法结合，更加扩大其应用范围，并使轴向不对称复杂形状零件的挤压成为可能。对于结合后的复合工艺，可称为冷模锻或冷锻。

三、变形程度

冷挤压时毛坯塑性变形量的大小称为变形程度，常用以下几种形式表示：

$$\text{断面变化率} \quad \psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100\% \quad (12-1)$$

$$\text{挤压比} \quad R = \frac{F_0}{F} \quad (12-2)$$

$$\text{对数挤压比} \quad \varphi = \ln \frac{F_0}{F} \quad (12-3)$$

式中 F_0 ——毛坯横断面积；

F ——制件横断面积。

冷挤压时，一次挤压加工可能达到的最大变形程度称为极限变形程度或成形极限。冷挤压时毛坯处于很强的三向压应力状态，即静水压作用很强，如果不是受到模具强度的限制，金属毛坯可能达到的变形程度是不受限制的，所以在挤压低强度的有色金属时，变形程度可达99%或更高。但是，当挤压变形程度过大时，由于单位挤压力过大，会显著地降低模具的使用寿命或者超过模具材料强度所允许的数值，致使挤压加工无法正常进行。所以冷挤压极限变形程度实际是受模具强度与使用寿命的限制。然而影响模具强度与使用寿命的因素很多，如挤压方式、毛坯材料性能、变形程度、毛坯软化及润滑效果等，目前还不能把各种材料一次挤压加工的极限变形程度及其影响因素，简单而准确的表达出来。

生产中经常用表格法或图线法等形式给出常用材料一次挤压可能达到的极限变形程度，可以作为参考。表12-1是当模具钢经热处理后抗压强度达2500~3000牛/毫米²时，用强度理论推算出的部分常用材料正、反挤压的最大极限变形程度数值。表12-2是正挤压35钢时变形程度对模具寿命的影响。由于挤压变形程度对模具寿命的影响十分显著，所以在确定挤压变形程度时，还必须考虑保证模具的经济合理的寿命问题。

表12-1 几种材料的挤压极限变形程度

材 料	抗 拉 强 度 (σ_b 牛/毫米 ²)	极 限 变 形 程 度 (%)	
		正 挤	反 挤
铝	100	99.9	99.9
铜、硬铝	200~250	95~98	93.3~95
钢	380~400	80~90	67~80
	480~500	67~75	37~50

表12-2 钢件正挤压变形程度对模具寿命的影响

断 面 变 化 率 (%)	单 位 挤 压 力 (p 牛/毫米 ²)	模 具 寿 命 (万件)
60	1250	20
80	2000	5~8
90	3000	0.5~0.8

12-2 冷挤压压力的计算

冷挤压力是设计模具和选用设备的根据。由于冷挤压时的单位压力与变形力通常都是很大的，对模具和设备的使用、安全等方面的意义很大，所以它是一个十分重要的问题。在挤压过程中挤压力和单位挤压力都是变化的。

图 12-2 是冷挤压的挤压力 P 与行程 S 关系曲线，一般可分成四个阶段：

I——凸模开始挤压毛坯使其墩粗并充满模具空间，这时挤压力急骤上升，称为挤压的初始墩粗与充满阶段。

II——凸模继续挤压毛坯使其挤出凹模孔口或凸模与凹模周围的空间；在这个阶段里毛坯的挤压变形条件不变，挤压力基本不变或稍许下降，称为稳定挤压阶段。

III——凸模继续移动，变形区高度继续减小；由于变形热效应的影响而使挤压力下降，称为终了挤压阶段。

IV——毛坯底部的厚度接近某一数值（纯铝不小于 0.2~0.3 毫米左右，黑色金属不小于 1.5 毫米左右时），摩擦影响使金属变形异常困难，挤压力急骤上升，可以称为刚端挤压阶段。

III、IV 阶段又可称为不稳定挤压阶段。

曲线 a 和 b 对应于毛坯原始高度较大的情况。其中曲线 a 表示正挤压的挤压力曲线，随着挤压的进行，由于变形热效应和毛坯侧壁摩擦阻力的减小，使稳定挤压阶段的挤压力逐渐减小。曲线 b 表示反挤压的挤压力曲线。

曲线 c 对应于毛坯的原始高度较小的情况。这时挤压力曲线的几个阶段很不明显，由初始墩粗与充满阶段很快转入末期的刚端挤压阶段。

显然，冷挤压工艺应该在刚端挤压阶段之前完成，而且一般所谓的挤压力都是指与稳定挤压阶段对应的挤压力。

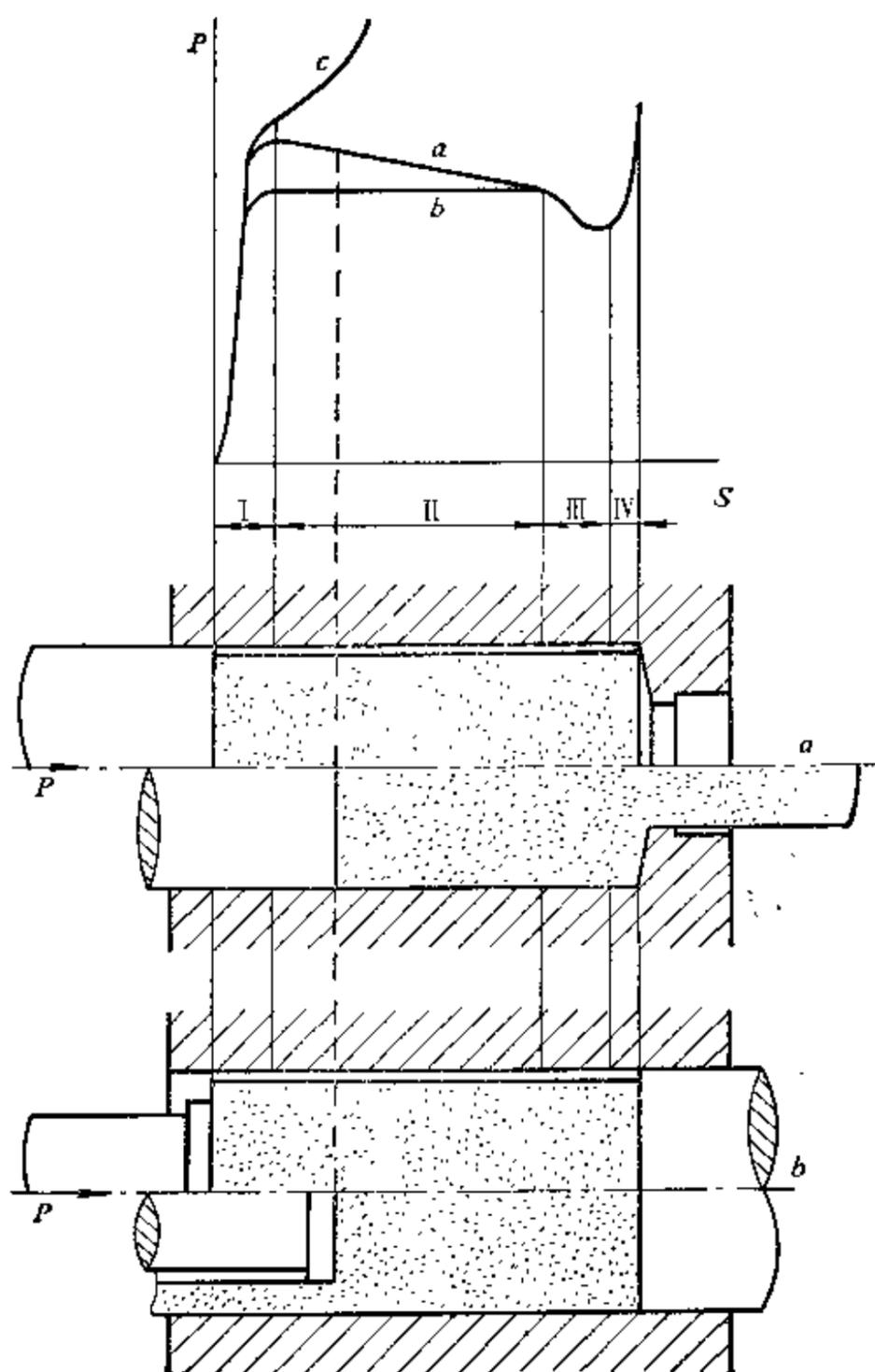


图12-2 挤压力曲线

挤压力与凸模同挤压毛坯相接触的表面在凸模运动方向上的投影面积之比，称为单位挤压力，即

$$p = \frac{P}{F} \quad (12-4)$$

式中 P ——挤压力；

F ——凸模与挤压毛坯的接触表面在凸模运动方向上的投影面积。

影响单位挤压力的因素有：毛坯材料机械性能、变形程度、模具工作部分的几何形状、润滑状态、毛坯与制件的尺寸形状等。以下分别讨论各种因素的影响。

1. 毛坯材料机械性能

材料的化学成分和组织不同，其强度指标 (σ_b 、 σ_s 、硬度) 和冷变形硬化特征也不相同。强度指标和硬化指数越大，材料的变形抗力也越大。因此，在高强度金属挤压时，为了降低变形抗力和单位挤压力，在冷挤压前均应对毛坯进行热处理软化。

2. 变形程度

图 12-3 为单位挤压力与变形程度的关系曲线。正挤压实心件与空心件所需单位挤压力比较相近，而且随变形程度的增加而增大 (图 12-3 a、b)。反挤压筒形件时，随变形程度的变化单位挤压力出现一低值区，对应的断面变化率约为 $\psi = 40\%$ (图 12-3 c)。

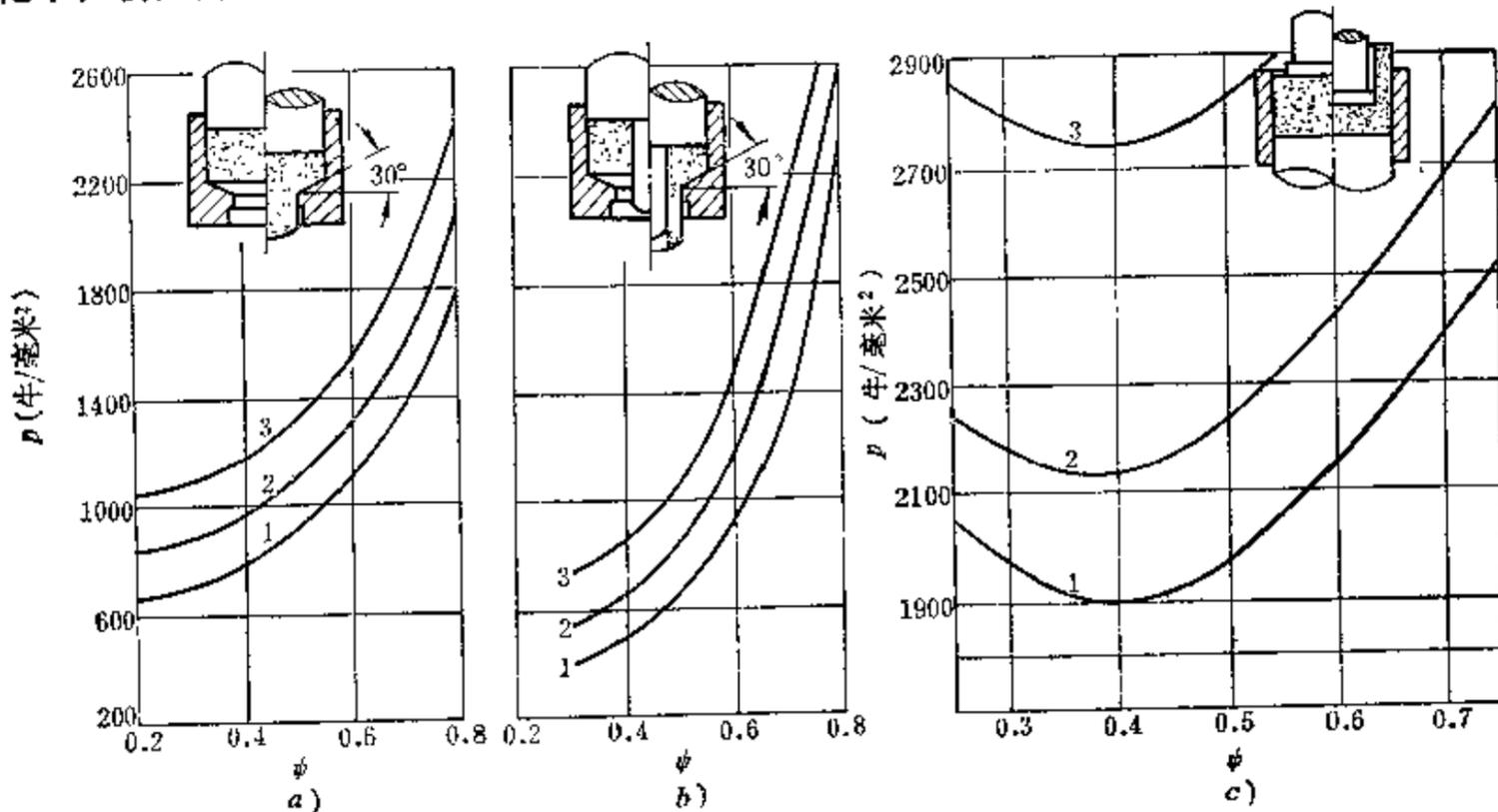


图12-3 变形程度的影响

1—10钢 2—20钢 3—45钢 a—正挤压实心件 b—正挤压空心件 c—反挤压筒形件

3. 毛坯相对高度

毛坯高度 H_0 与直径 D_0 之比称为毛坯的相对高度。冷挤压时毛坯的侧表面与模具表面间相对滑动产生很大的摩擦阻力，从而影响单位挤压力的变化。为了反映相对高度的影响引入单位挤压力修正系数 K ，其值为

$$K = \frac{p}{p_0} \quad (12-5)$$

$$p = K \cdot p_0 \quad (12-5a)$$

或

式中 p ——任意相对高度的单位挤压力；

p_0 ——相对高度为 1 时的单位挤压力。

图 12-4 为毛坯相对高度对单位挤压力修正系数影响的实验曲线。杆件正挤压时单位挤压力随毛坯相对高度增加而增大, 当 $H_0/D_0 = 8$ 时单位挤压力约为 $H_0/D_0 = 1$ 时的三倍 (图 12-4 a)。反挤压时单位挤压力亦随毛坯相对高度增加而增大, 但当 $H_0/D_0 > 1$ 后单位挤压力基本保持不变 (图 12-4 b)。

4. 挤压方式

挤压方式对单位挤压力的影响较大。由于挤压方式不同, 挤压时毛坯在模腔内摩擦条件、约束条件和直接受压面积等也不一样, 因此, 即使变形材料、变形程度、润滑等条件相同, 单位挤压力也有差别。另一方面, 摩擦阻力、约束条件和直接受压面积对单位挤压力的影响, 又因挤压制件和毛坯的几何形状、尺寸、变形程度不同而异, 所以其间并不存在着单纯的关系。甚至有时竟会出现完全相反的结果。

对于同一杆形件或筒形件, 采用不同的挤压方式挤压时, 由于摩擦阻力的差异其单位挤压力也不相等。如图 12-5 a、b 所示, 正挤压的摩擦阻力比较大, 所以单位挤压力比反挤压的大。

毛坯的相对高度 H_0/D_0 越大, 正、反挤压的单位挤压力之差别就越大, 而当 $H_0/D_0 \leq 1$ 时, 两者单位挤压力的差别不大。

在毛坯的相对高度不大的条件下, 如果变形程度相同, 一般正挤压杆形件的摩擦阻力、模具约束均比反挤压筒形件的小, 所以正挤压杆形件比反挤压筒形件的单位挤压力要小 (图 12-3)。

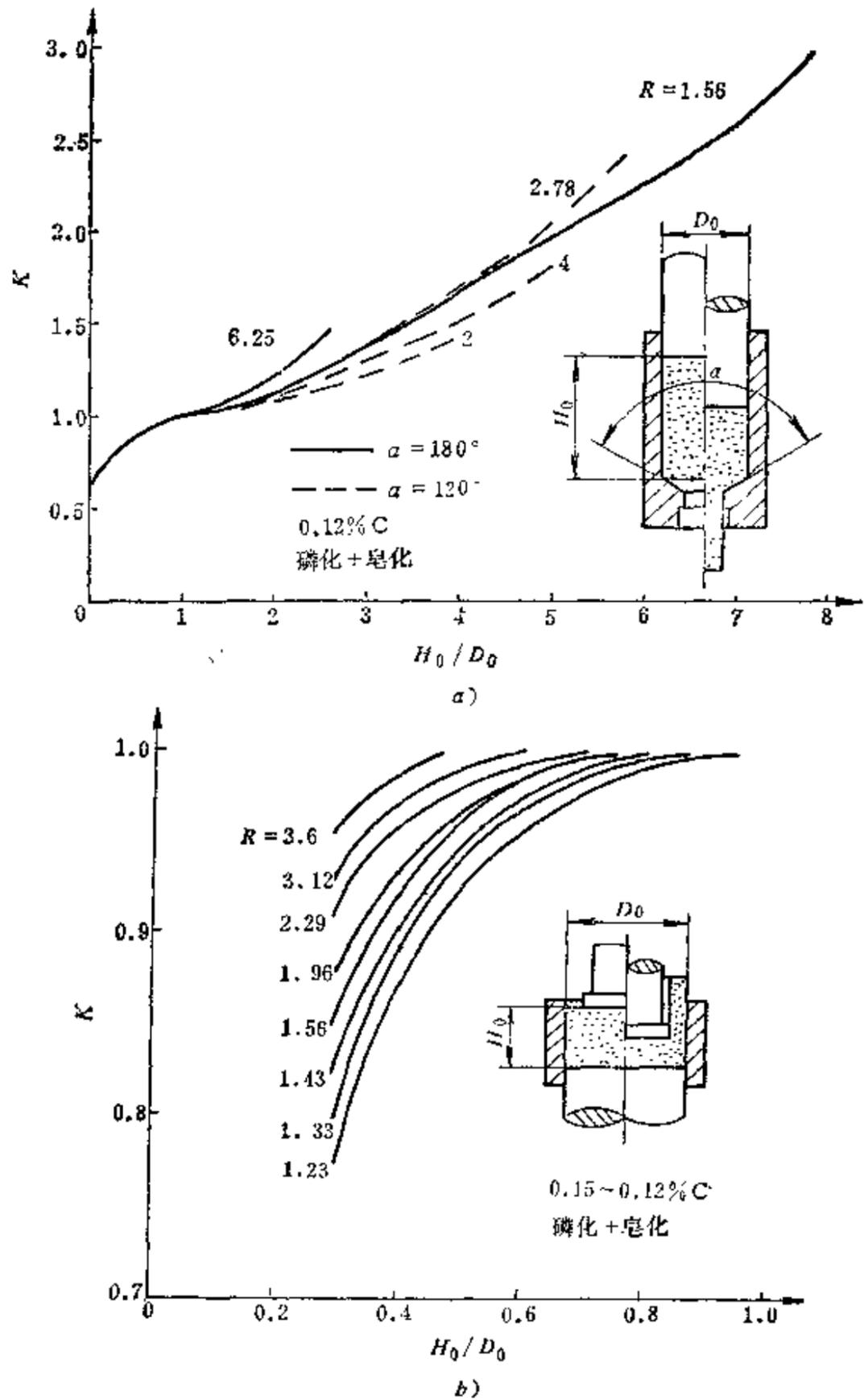


图12-4 毛坯相对高度的影响

a—正挤压 b—反挤压

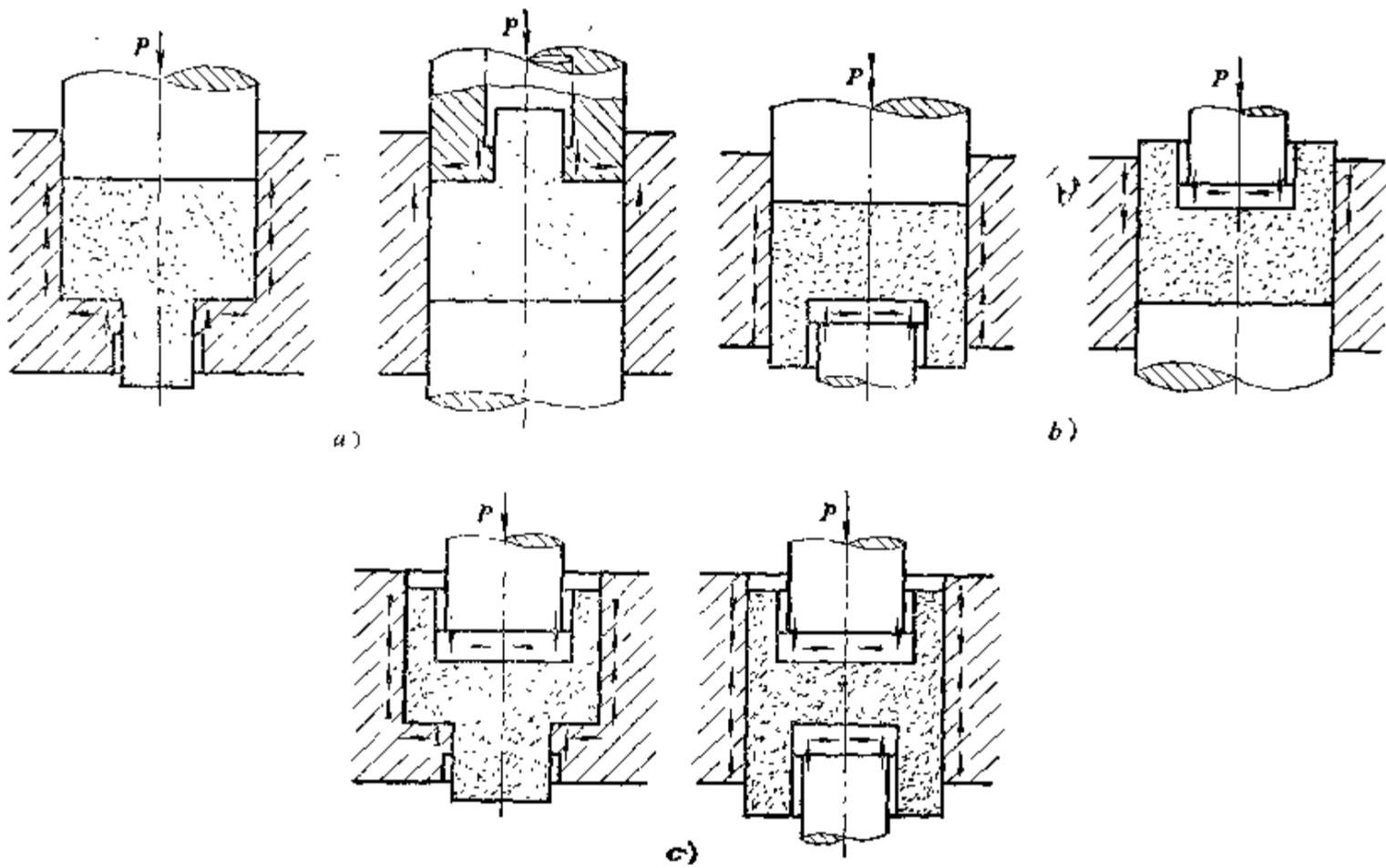


图12-5 挤压方式的影响

a—杆形件正、反挤压的比较 b—筒形件正、反挤压的比较 c—复合挤压

复合挤压时，摩擦阻力的作用与零件形状、变形程度等因素有关。图12-5c为复合挤压时摩擦的作用情况。虽然复合挤压的摩擦阻力比单一正挤压或单一反挤压的大，但是复合挤压时的变形金属在上、下两个方向挤出，模具约束（阻碍）金属塑性变形的条件减弱，所以复合挤压比只有单一正挤或反挤时的单位挤压力小或者接近于小者。复合挤压省力的多少与坯料原始厚度、零件形状等有关，当坯料相对高度 $H_0/D_0 \geq 1$ 时，省力并不明显（接近于单一挤压的小者）。

图12-6为复合挤压与只有单一正挤或反挤时单位挤压力的比较。图12-6a表示复合挤压的单位挤压力稍小于单一挤压的单位挤压力；图12-6b表示复合挤压的单位挤压力接近于单一挤压的小者。

5. 模具几何形状

正挤压凹模角度和反挤压凸模形状，对单位挤压力都有很大的影响。

图12-7为正挤压凹模角度对单位挤压力的影响关系曲线。随着凹模角度的变化单位挤压力有很大变化，当 $2\alpha = 120^\circ$ 左右时为单位挤压力的低值区。增大凹模角度时，金属变形和挤出的摩擦阻力增大；减小凹模角度时，为达到一定的变形程度势必要增加凹模锥角区的长度，结果也使摩擦阻力加大。一般经常采用的凹模角度是 $2\alpha = 90^\circ \sim 126^\circ$ 。

图12-8为反挤压凸模形状对单位挤压力的影响关系曲线。当 $\psi < 65\%$ 时，球形凸模的单位挤压力最小，平顶凸模的单位挤压力最大；当 $\psi > 65\%$ 时，球形凸模的单位挤压力急骤上升，而锥形凸模的单位挤压力最小。另外，锥形凸模角度不同也会影响单位挤压力变化。最合理的凸模锥角随挤压条件（变形程度、润滑等）的不同而变化，一般可取在 $120^\circ \sim 170^\circ$ 之间。

6. 润滑

润滑可以改善变形金属与模具表面间的摩擦状态，降低单位挤压力。实验证明，润滑效果可能使单位挤压力产生成倍的波动。

单位挤压力和挤压力的确定方法有很多种形式。由于挤压变形和上述各种实际因素的影响都是十分复杂的，所以目前还没有一个十分完善的方法，可以较为准确地确定冷挤压时的变形力和单位挤压力。在实用上冷挤压力可按式做近似计算

正挤压

$$P = c\sigma_b \left(\ln \frac{F_0}{F_1} + e^{\frac{2\mu h}{s}} \right) F_0 \quad (12-6)$$

反挤压

$$P = c' f \sigma_b \left(2 + \frac{0.5\mu d}{s} \right) F \quad (12-7)$$

式中 c 及 c' —— 毛坯材料加工硬化系数，分别见表 12-3 和 12-4；

σ_b —— 毛坯材料强度极限(牛/毫米²)；

F_0 及 F_1 —— 毛坯及挤出部分横截面积(毫米²)；

e —— 自然对数底数；

μ —— 摩擦系数，按表 12-5 取用；

h —— 凹模工作带宽度(毫米)；

s —— 挤出件壁厚，对于实心件则为挤出部分直径的一半(相当于内孔直径为 0)(毫米)；

f —— 凸、凹模工作部分几何形状系数，一般取 0.5~1，合适的凸、凹模工作部分形状取偏小值，否则取偏大值；

d —— 凸模工作部分直径(毫米)；

F —— 凸模与挤压毛坯的接触表面在凸模运动方向上的投影面积(毫米²)。

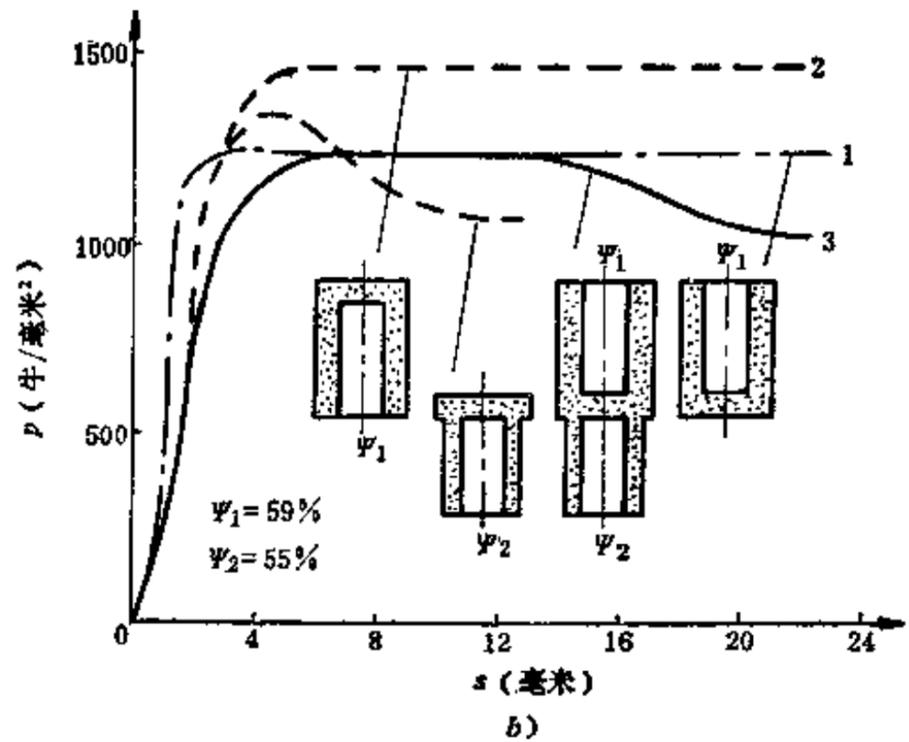
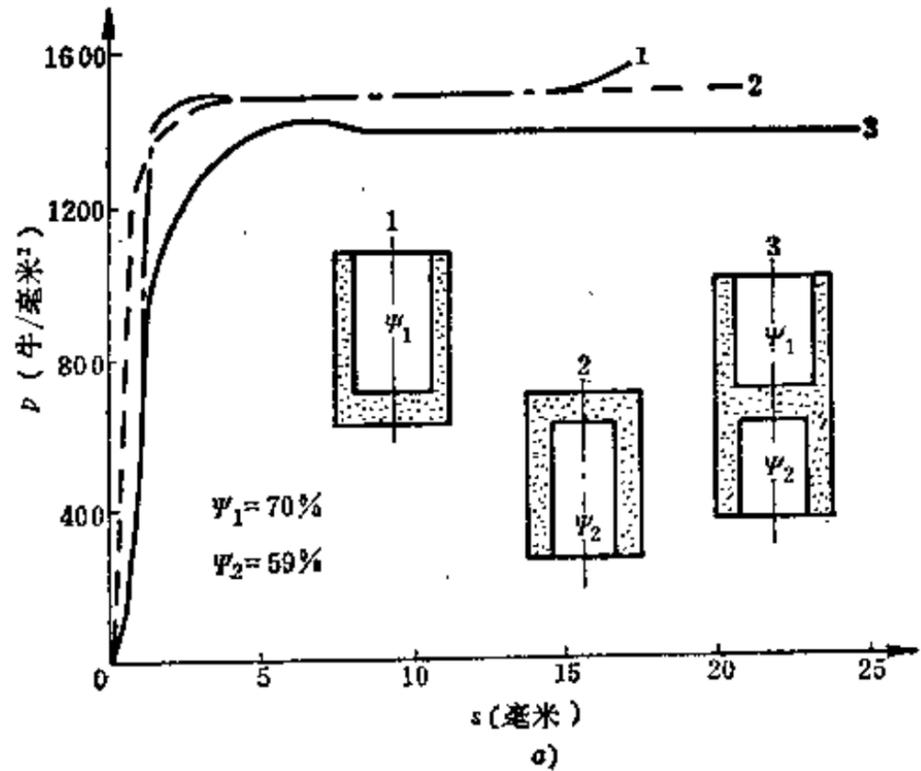


图12-6 复合挤压单位挤压力的比较
1—反挤 2—正挤 3—复合挤

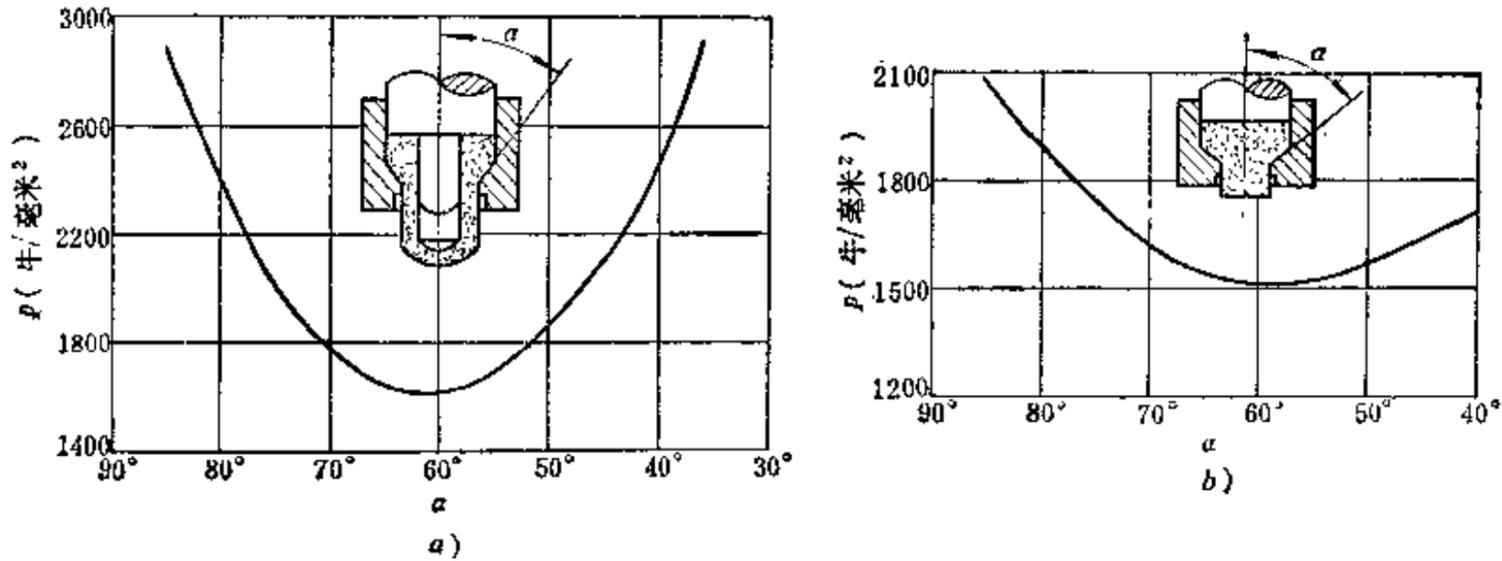


图12-7 凹模角度的影响 ($\psi = 75\%$, 0.12% C)
 a—正挤压空心件 b—正挤压实心件

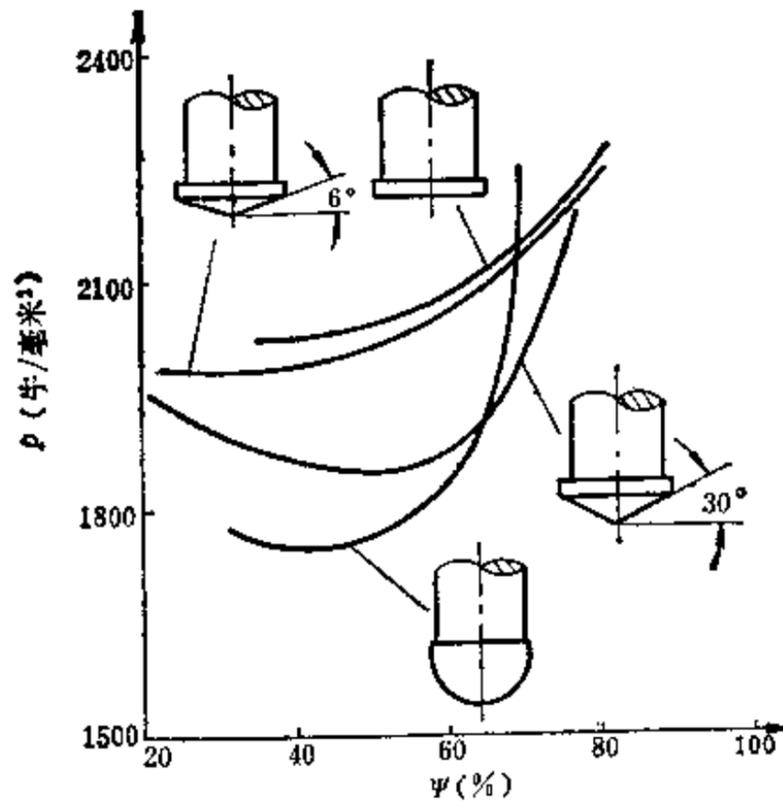


图12-8 凸模形状的影响

用锥形凹模时, 应将式 (12-6) 计算的结果乘以系数 0.85。

用图解确定单位挤压力或挤压力的方法比较简便, 可以省去复杂的数学运算。

图 12-9、12-10 及 12-11 分别是黑色金属正挤压 (实心件、空心件) 及反挤压时, 确定挤压力的一种图解。其中由 1、2、3、4 四个部分组成, 考虑到零件的尺寸形状、材料性能、变形程度、模具工作部分的几何形状、毛坯的相对高度等主要因素的影响, 具体的图解步骤即按这四个部分依次进行。

图 12-12、12-13 及 12-14 分别是有色金属正挤压 (实心件、空心件) 及反挤压时, 确定单位挤压力的一种图解, 具体图解步骤按箭头指示依次进行。

黑色金属的单位冷挤压力可以用图 12-15 确定。

确定出单位挤压力后, 利用式 (12-4) 即可求出挤压力。

复合挤压力可以按只有单一正挤压或反挤压时挤压力数值较小的一方计算。如果复合挤压的某一方挤出金属受到限制, 复合挤压力随即向另一方单一挤压时的挤压力数值过渡。

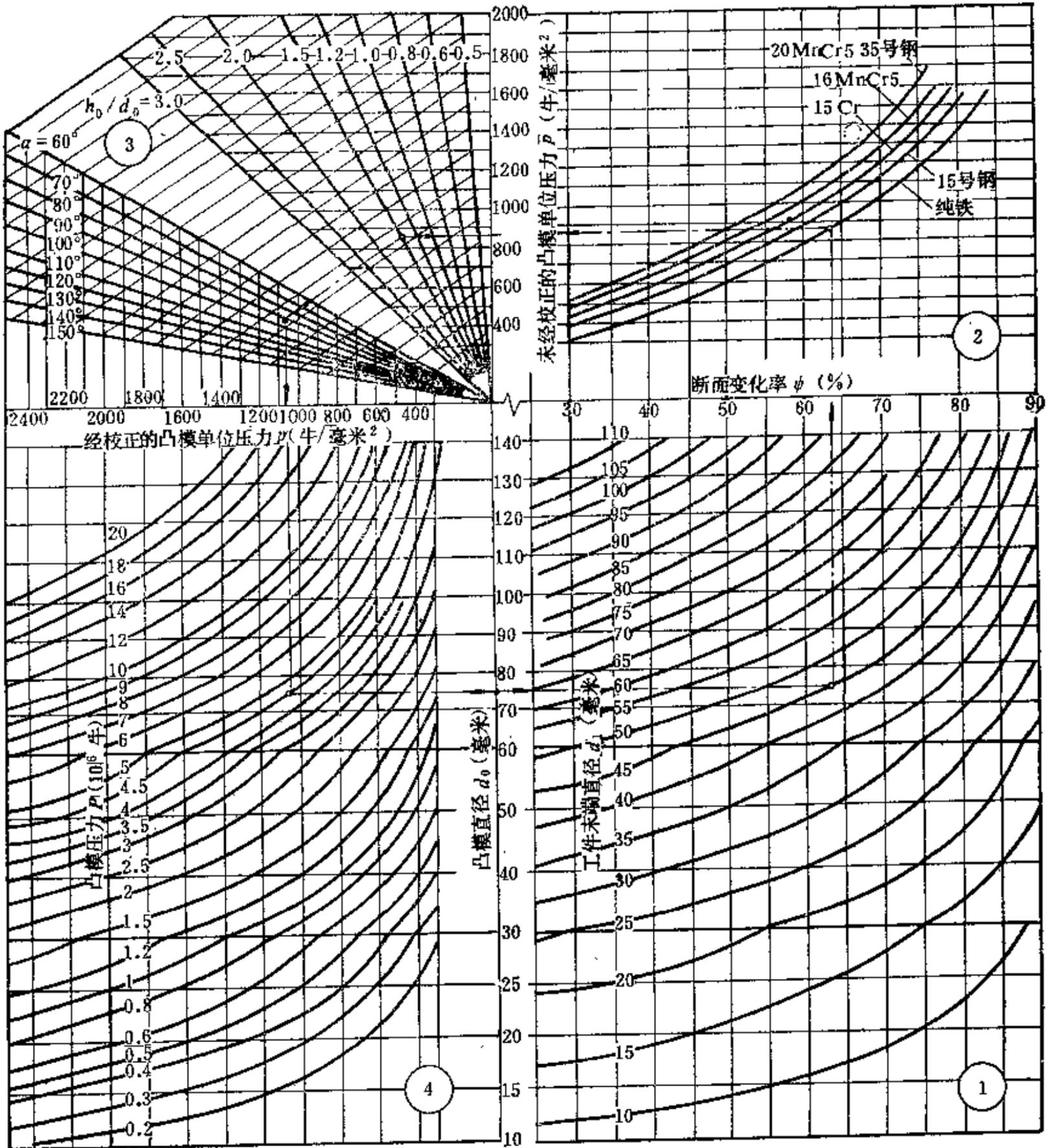


图12-9 黑色金属正挤压实心件挤压力计算图表

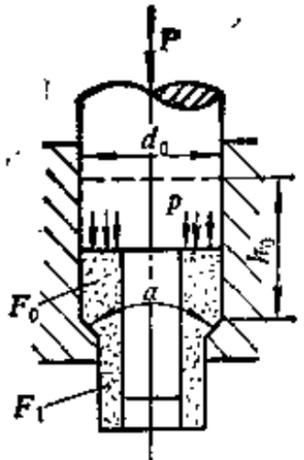
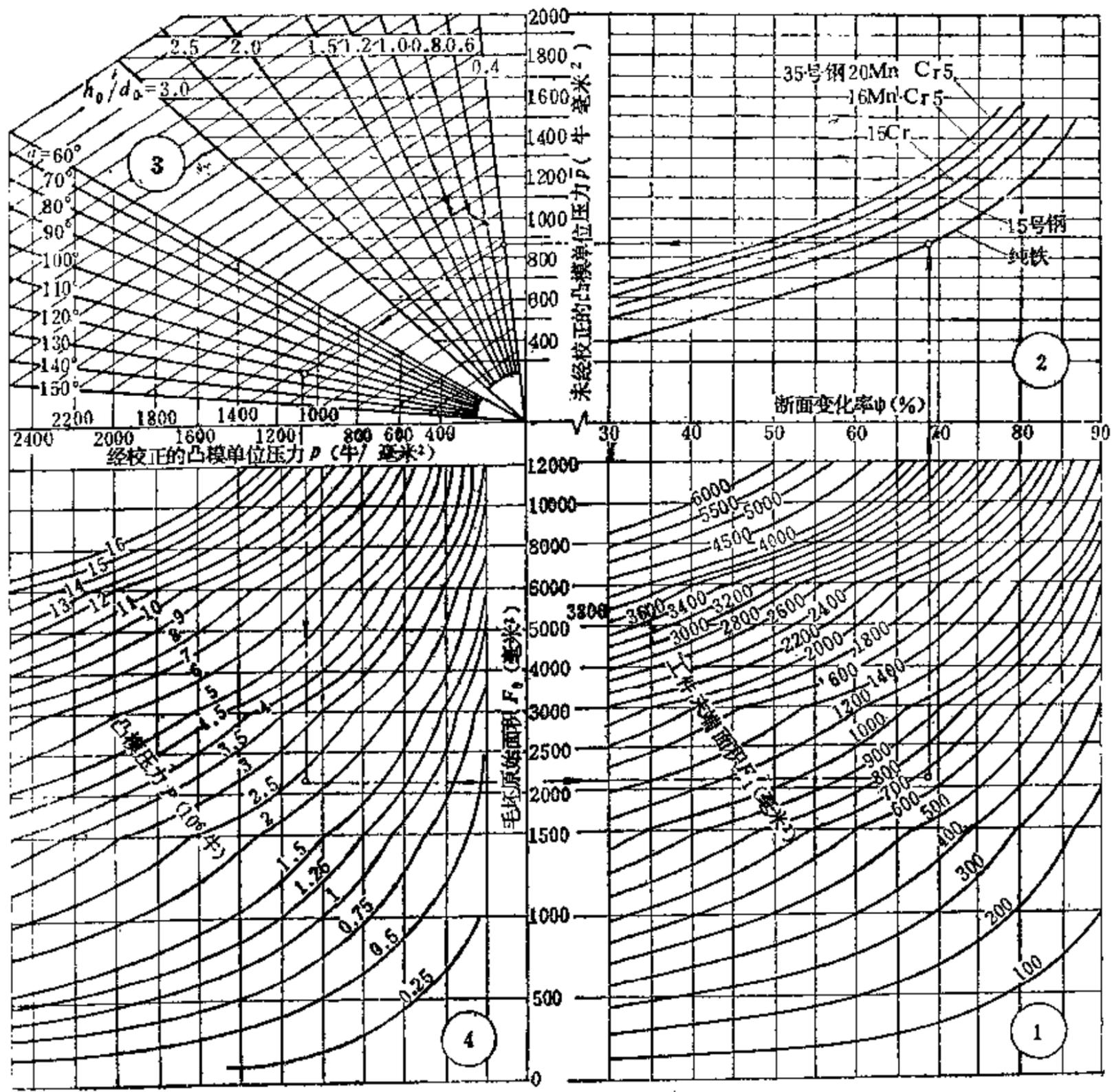


图12-10 黑色金属正挤压空心件挤压力计算图表

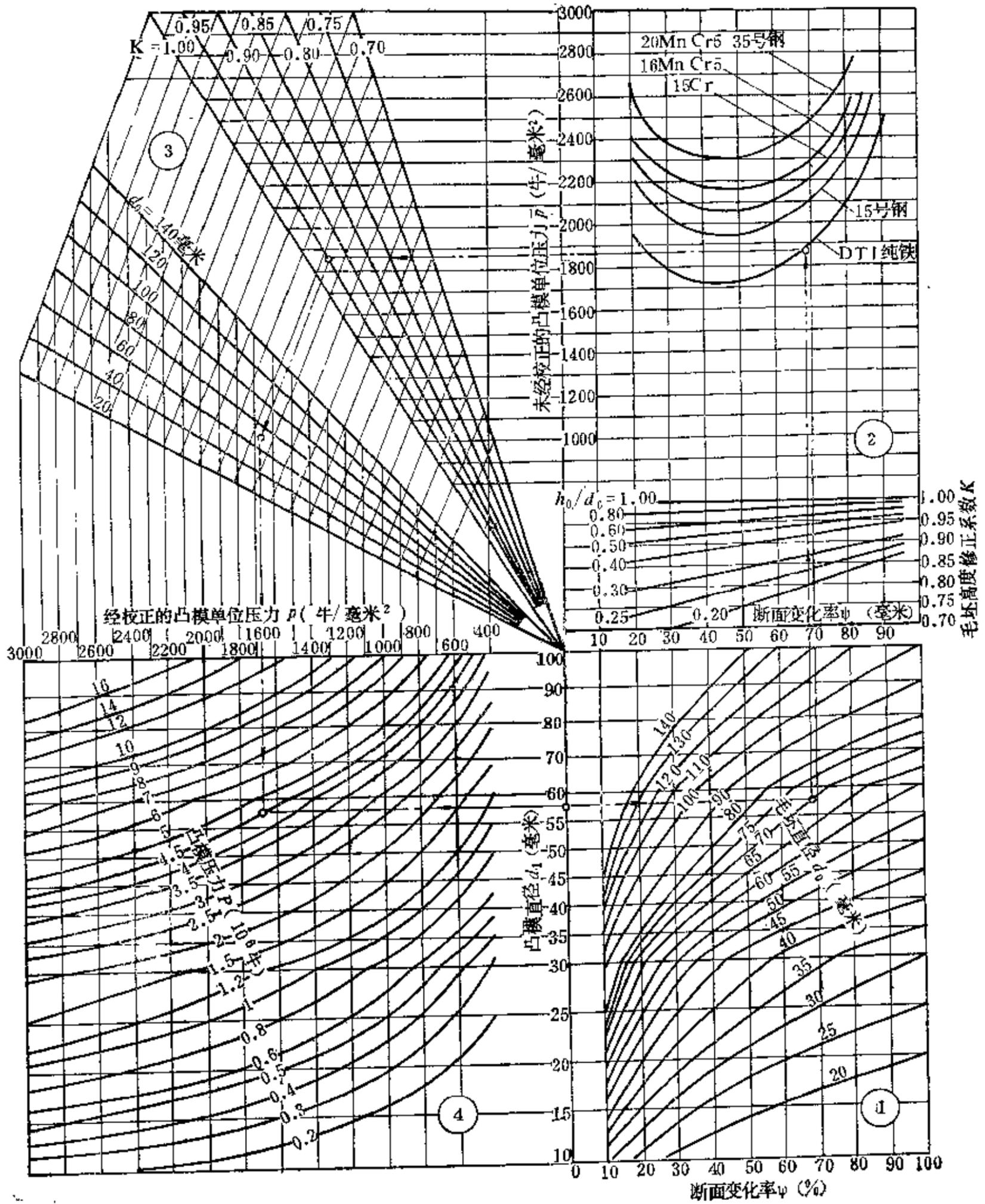


图12-11 黑色金属反挤压挤压力计算图表

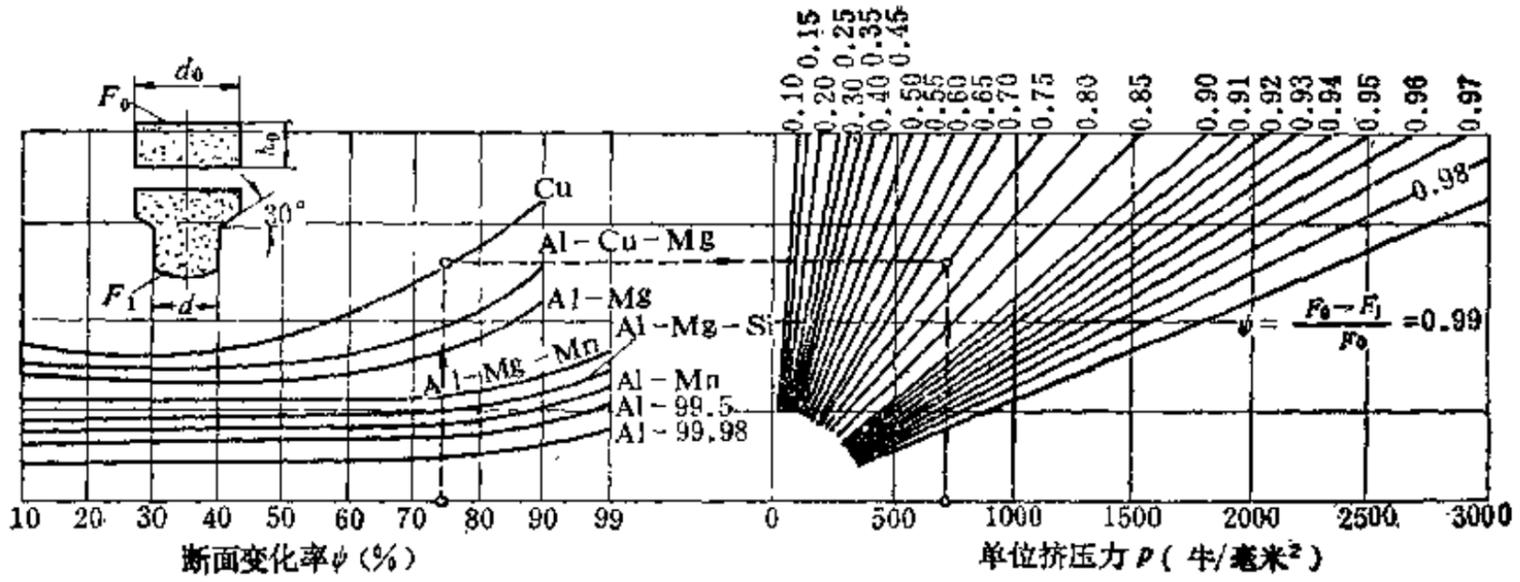


图12-12 有色金属正挤压实心件单位挤压力计算图表

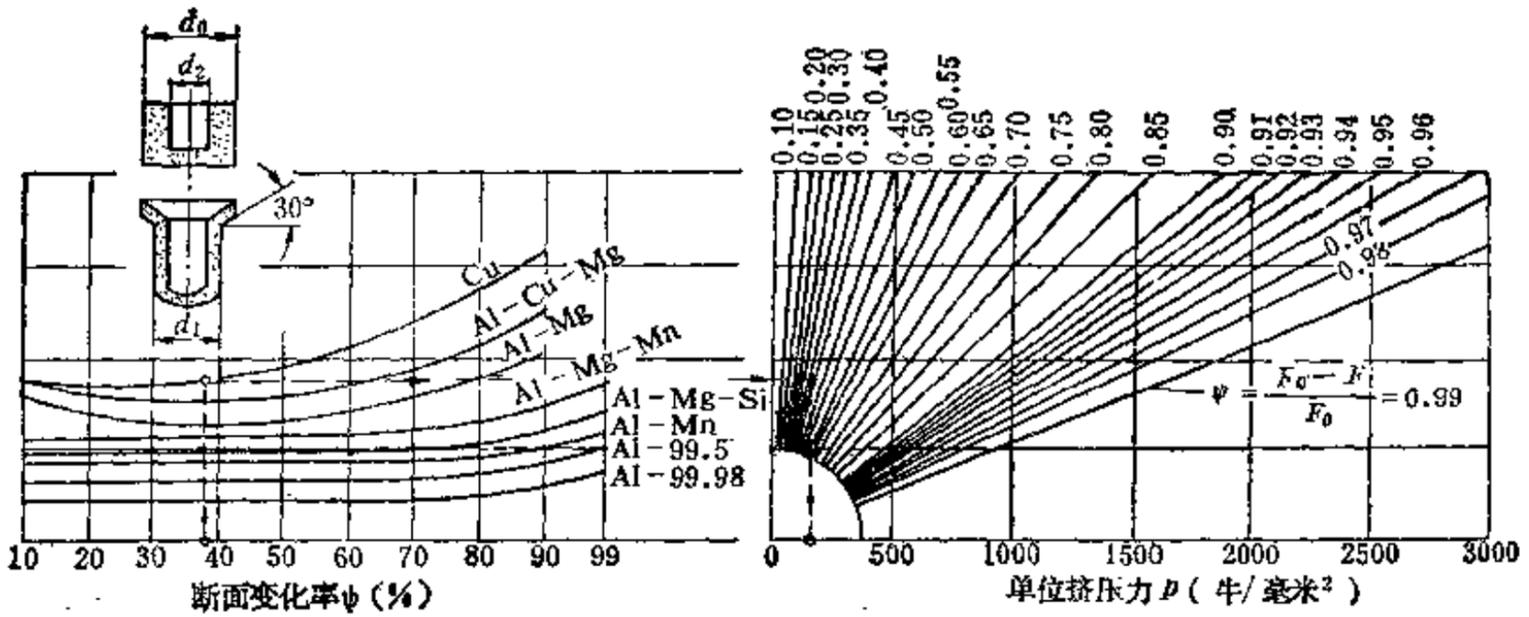


图12-13 有色金属正挤压空心件单位挤压力计算图表

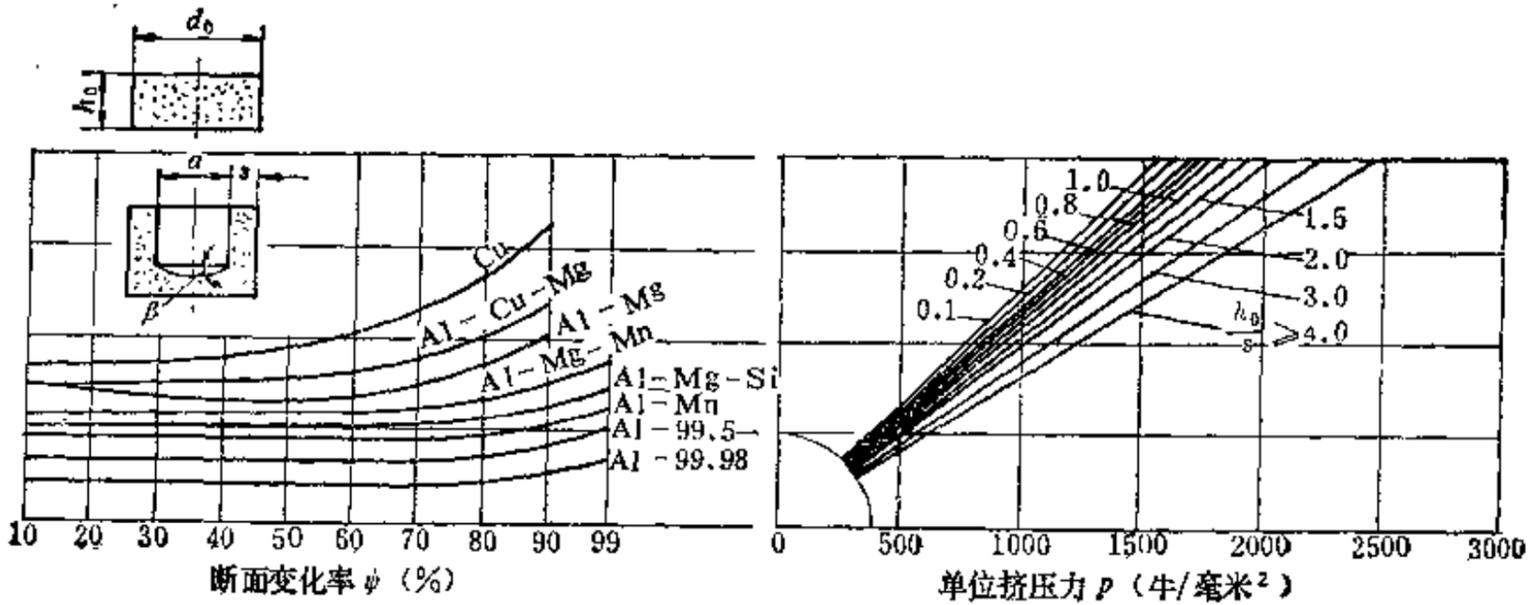


图12-14 有色金属反挤压单位挤压力计算图表

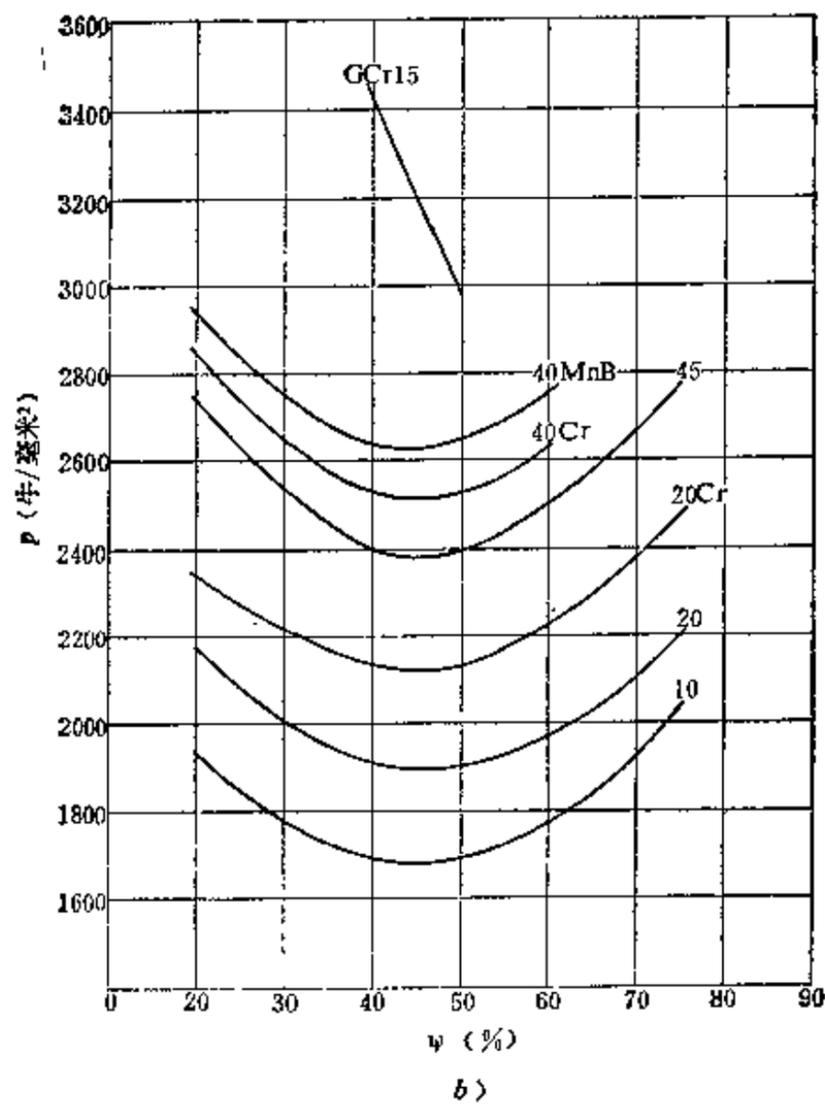
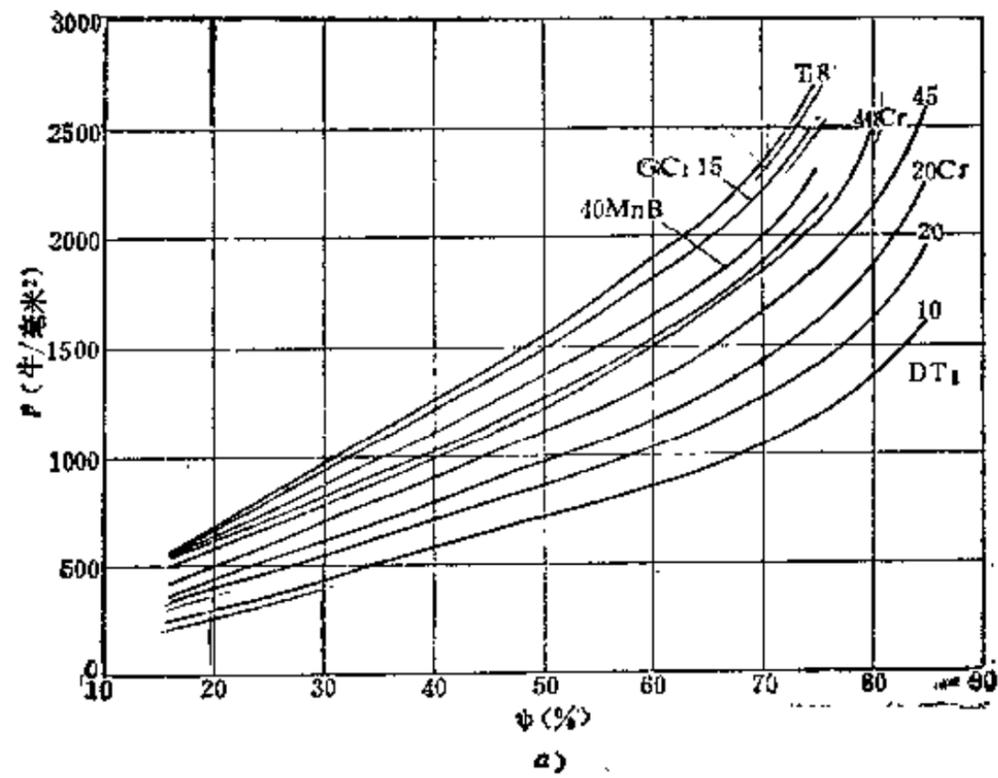


图12-15 黑色金属单位挤压力曲线
 a—正挤压单位挤压力曲线 b—反挤压单位挤压力曲线

表12-3 正挤压时材料硬化系数

材 料	强度极限 σ_b (牛/毫米 ²)	硬 化 系 数 c							
		空 心 件 ψ (%)				实 心 件 ψ (%)			
		40	60	80	95	40	60	80	95
紫铜	220	1.9	2.0	1.8	1.5	1.8	1.9	2.0	1.6
黄铜H62	330	1.6	1.9	2.0	—	1.6	2.0	2.1	—
纯铝L ₂	90	2.0	2.2	2.1	2.5	2.1	2.2	2.0	1.6
钢10	340	1.8	2.0	2.2	—	1.7	2.0	2.2	—
15	380	1.8	2.0	2.2	—	1.7	2.0	2.1	—
20	420	1.8	2.0	2.1	—	1.8	2.0	2.1	—
30	500	1.7	2.0	2.1	—	1.7	2.0	2.1	—
40	580	1.7	1.9	2.0	—	1.7	1.9	2.2	—
15Cr	450	1.5	1.7	1.8	—	1.5	1.7	1.9	—
18CrMnTi	720	1.5	1.7	1.9	—	1.5	1.7	1.9	—

表12-4 反挤压时材料硬化系数

材 料	强度极限 σ_b (牛/毫米 ²)	硬 化 系 数 c'			
		ψ (%)			
		40	60	80	95
紫铜	220	1.8	2.0	2.1	1.5
黄铜H62	330	1.7	2.0	2.2	—
纯铝L ₁	90	1.9	2.2	2.0	1.5
钢10	340	1.5	1.8	2.0	—
15	380	1.6	1.9	2.0	—
20	420	1.7	2.0	2.1	—
30	500	1.7	2.1	—	—
40	580	1.7	1.9	—	—
15Cr	450	1.4	1.7	1.9	—
18CrMnTi	720	1.5	1.7	—	—

表12-5 摩擦系数 μ 值

材 料	润 滑 剂	摩 擦 系 数
铝	动物油	0.15~0.20
铝合金	动物油	0.12~0.15
紫铜	石墨+机油	0.10~0.13
黄铜	石墨+机油	0.08~0.10
钢	磷化+MoS ₂	0.06~0.08

12-3 冷挤压模具

一、冷挤压模具特点与设计要求

冷挤压模具零件可以分为工艺结构零件与辅助结构零件。

图 12-16 是一种冷挤压模具的结构型式，用以挤压照像机镜筒。这种模具与一般冲压模具相比其特点是上、下模板较厚，所用材料较好。导柱直径尺寸大，模具刚度显著增强，不仅能保证挤压件的尺寸精度，而且也有利于延长模具的使用寿命。凸模采用组合式结构，可排除应力集中点，防止断裂。采用锥形尾部以扩大支承面积并设有厚度较大的淬硬垫板，减小模板上的单位压力。锥形尾部有利于安装定位。采用预应力组合凹模，防止凹模的开裂。这种模具的工作部分可以更换，具有通用性。

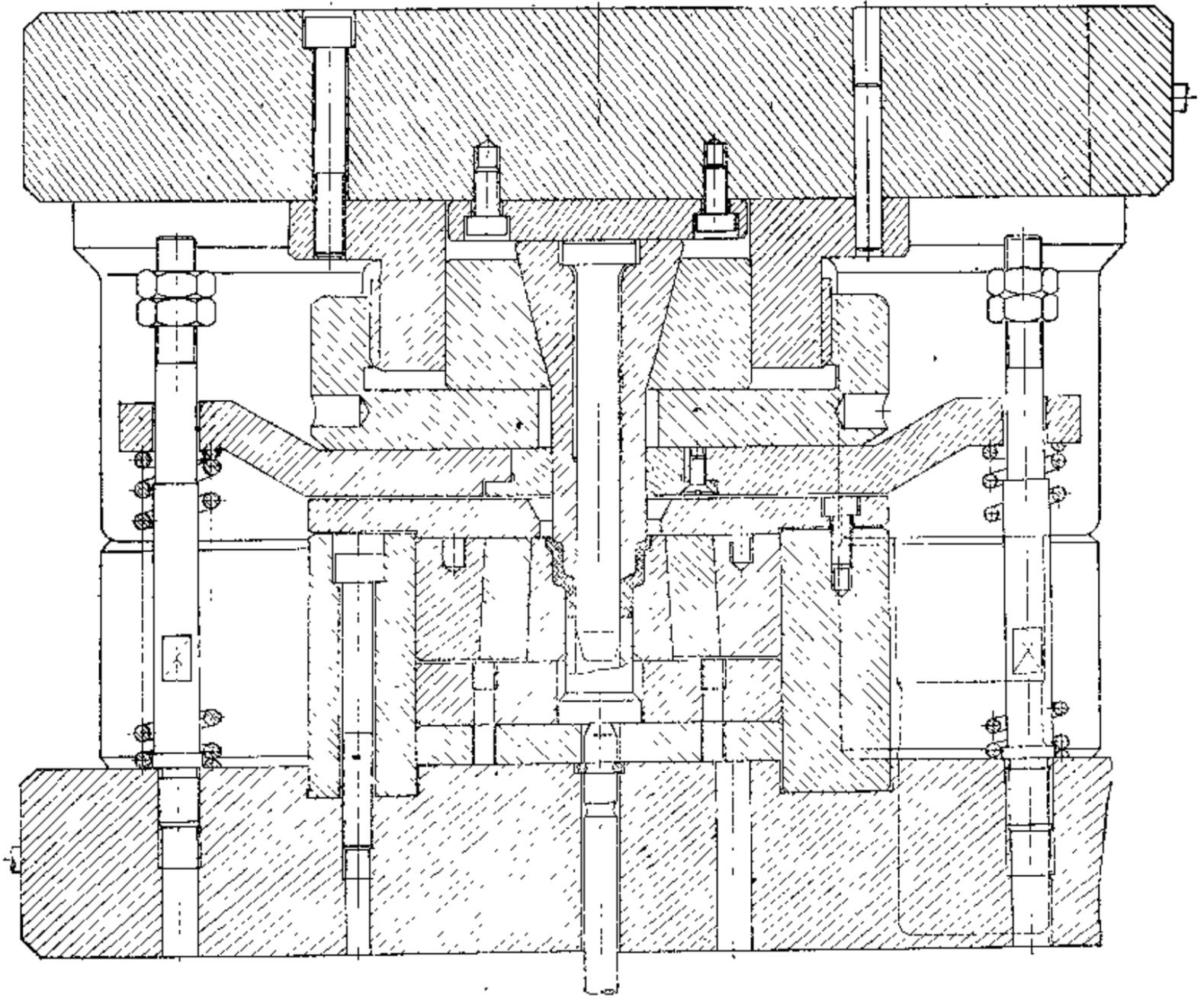


图12-16 冷挤压模具

冷挤压的单位挤压力很大，所以模具设计时应该特别注意合理解决模具强度、刚度和使用寿命问题。冷挤压模具设计的一般要求是：

1. 合理的模具结构，如组合式模具；
2. 模具工作部分的合理形状及尺寸，应该有利于毛坯金属塑性变形，降低单位挤压力；

3. 选用合适的模具材料、正确的加工方案和热处理规范;
4. 模具易损件更换、拆卸、安装方便;
5. 模具良好的导向, 保证挤压件尺寸精度和模具寿命;
6. 容易制造, 成本低廉;
7. 操作简单、安全。

二、预应力组合凹模工程设计

冷挤压过程中凹模内壁承受径向压力 p (图 12-17 a), 其受力状态与厚壁筒内部受压条件相似, 凹模内任意半径 r 处切向应力 σ_θ 与径向应力 σ_r 可用厚壁筒理论公式表示

$$\sigma_\theta = \frac{p}{a^2 - 1} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) \quad (12-8)$$

$$\sigma_r = \frac{p}{a^2 - 1} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right) \quad (12-9)$$

式中 p ——凹模内壁径向工作压力;

a ——凹模直径比, $a = \frac{d_2}{d_1} = \frac{r_2}{r_1}$;

d_1 与 r_1 ——凹模内孔直径与半径;

d_2 与 r_2 ——凹模外周直径与半径;

r ——凹模内任意半径。

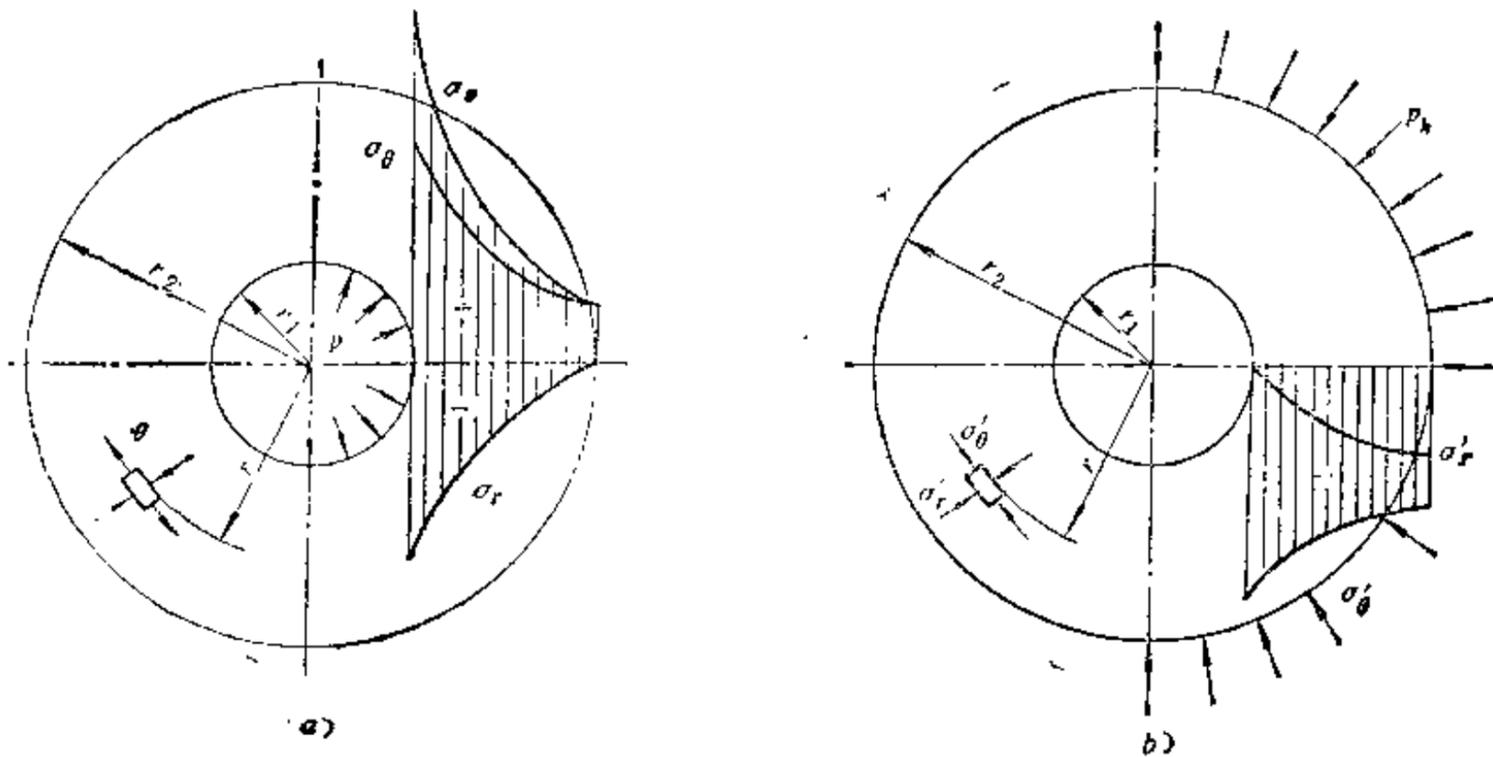


图12-17 凹模内部的应力

a—工作压力 p 引起的应力 b—接触压力 p_k 引起的应力

相当应力为

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_r^2 - \sigma_\theta \sigma_r} = \frac{p}{a^2 - 1} \sqrt{1 + 3 \left(\frac{r_2}{r} \right)^4} \quad (12-10)$$

凹模内应力分布曲线如图 12-17 a 所示, 最大应力发生在凹模内壁表面 ($r = r_1$)。由式 (12-10) 可得凹模内壁的相当应力为

$$\sigma_v = \frac{p}{a^2 - 1} \sqrt{1 + 3 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^4} = \frac{p}{a^2 - 1} \sqrt{1 + 3a^4} = \frac{\sqrt{3 + \left(\frac{1}{a} \right)^4}}{1 - \left(\frac{1}{a} \right)^2} p \quad (12-11)$$

图 12-18 为凹模直径比 σ 对凹模内表面相当应力的影响关系。当凹模的直径比 σ 增大时, 相当应力急骤下降, 但是当 $\sigma \geq 4$ 时, 相当应力 σ_v 的下降趋向饱和, 逐渐接近其极限值 $\sigma_v \rightarrow \sqrt{3} p$ 。所以, 凹模外径大于其内径的 4 倍以上时, 增加壁厚对凹模强度的改善已无意义。当凹模承受的内压力 $p > \frac{[\sigma]}{\sqrt{3}}$ ($[\sigma]$ 为凹模材料的许用应力) 时, 整体式凹模已无法保证强度上的要求, 这时必须采用预应力组合凹模 (图 12-19)。利用凹模与其外套圈间过盈配合的接触压力 p_k 使凹模内预先产生切向压应力。此时任意半径 r 处的切向与径向预应力分别为 (图 12-17 b)

$$\sigma'_\theta = -p_k \frac{a^2}{a^2 - 1} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) \quad (12-12)$$

$$\sigma'_r = -p_k \frac{a^2}{a^2 - 1} \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) \quad (12-13)$$

预应力组合凹模内应力分布曲线如图 12-20 所示。冷挤压时引起的切向拉应力和预应力

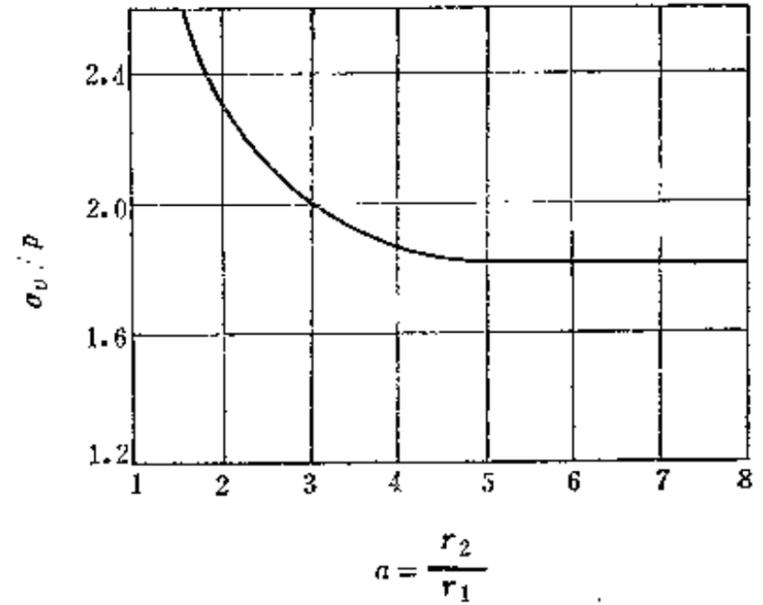


图 12-18 凹模直径比对应力的影响

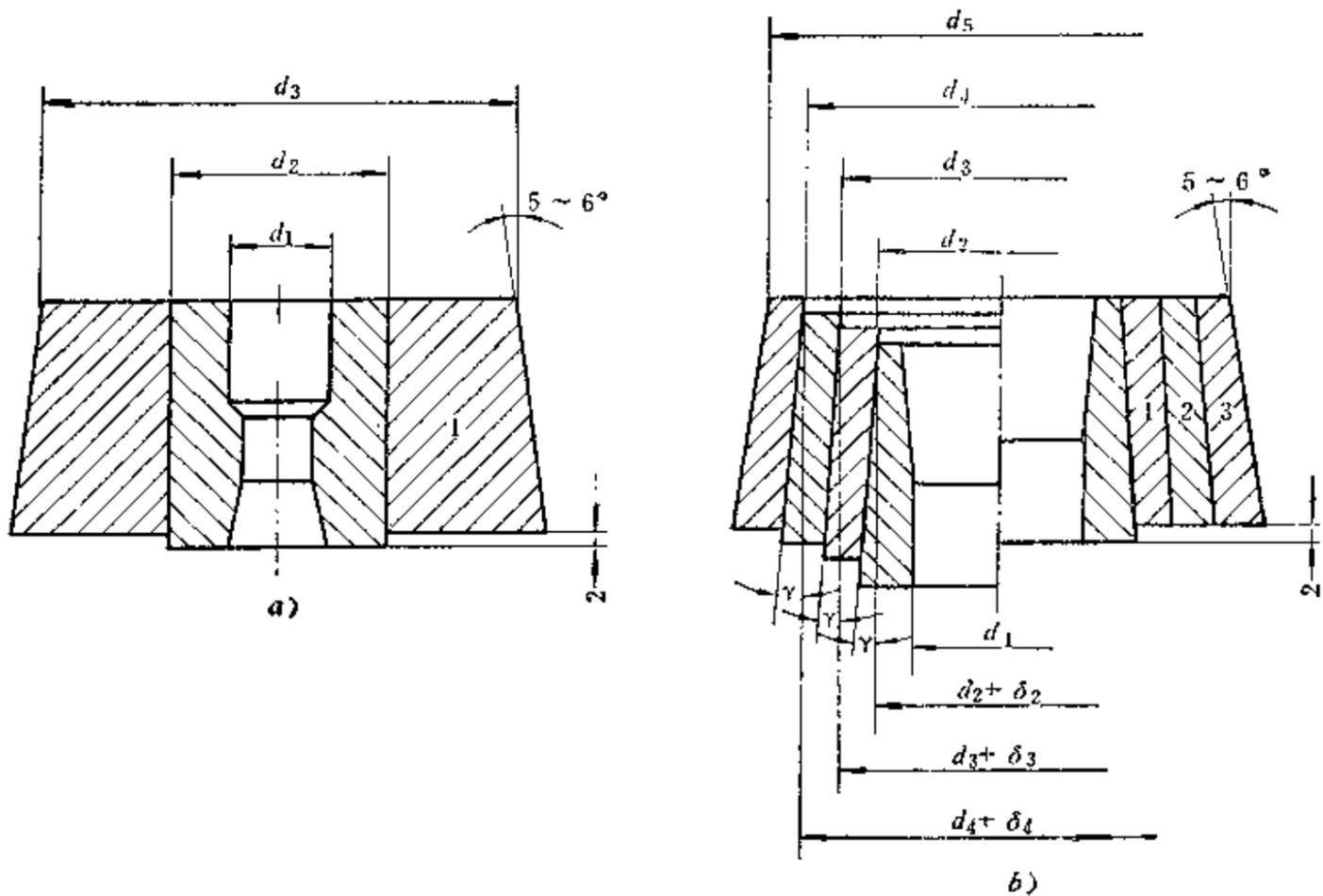


图 12-19 预应力组合凹模

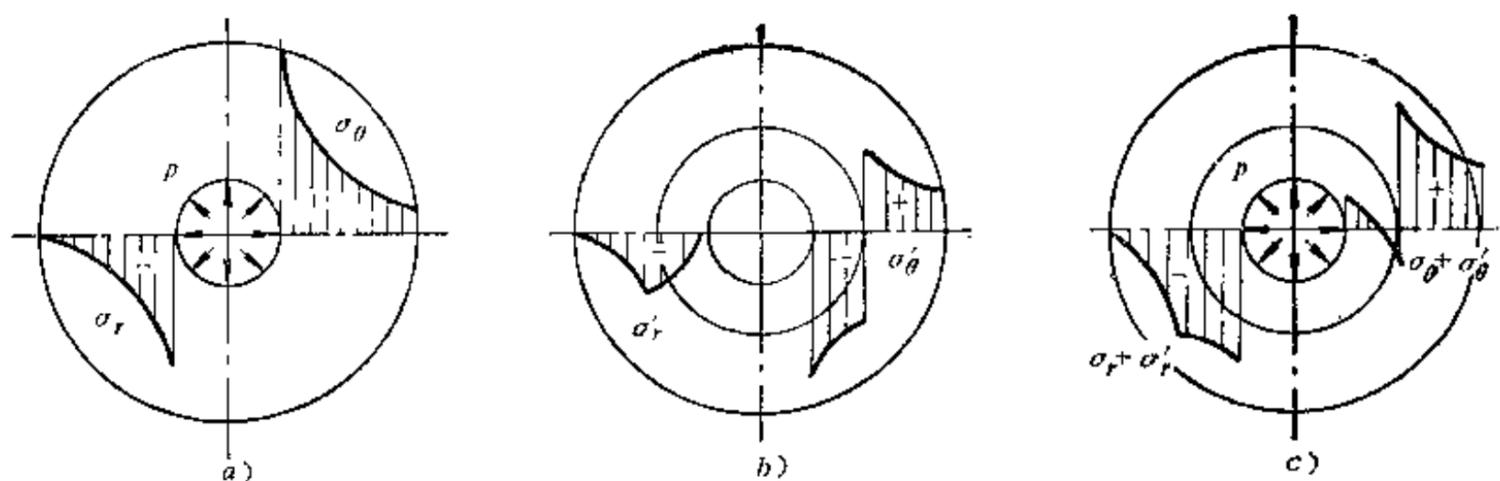


图12-20 预应力组合凹模应力分布

a—整体式凹模应力分布 b—预应力组合式凹模预应力的分布 c—预应力组合式凹模工作时的应力分布

的方向相反。由于预应力对挤压时产生的工作应力的抵销作用，降低了挤压时凹模内的切向拉应力，从而达到凹模补强的目的。根据理论分析可知，对于同一尺寸的凹模，一层预应力圈组合凹模的强度可达整体式凹模强度的1.3倍，二层预应力圈组合凹模的强度可达整体式凹模强度的1.8倍。

在预应力组合凹模设计时，预应力圈的层数，一般可以根据凹模内壁侧向压力的数值确定，而各层预应力圈的直径与过盈量（图12-19）可参照表12-6确定。

表12-6 组合凹模预应力圈的直径与过盈量

预应力圈层数	预 应 力 圈 直 径				过 盈 量		
	d_2	d_3	d_4	d_5	δ_2	δ_3	δ_4
1	$(2\sim 3)d_1$	$2d_2$			$0.008d_2$		
2	$1.6d_1$	$1.6d_2$	$1.6d_3$		$0.01d_1$	$0.006d_3$	
3	$1.2d_1$	$1.6d_1$	$2.2d_1$	$3d_1$	$0.025d_2$	$0.008d_3$	$0.004d_4$

预应力圈的材料必须具有足够的强度与韧性两方面的综合性能，不应该只单纯追求过高的强度指标。如用韧性差的钢材或淬火硬度过高时，都可能在工作状态甚至空载状态，发生预应力圈的开裂或爆裂。预应力圈材料可用：

中层 5CrNiMo、40Cr、35CrMoA、30CrMnSiA；

外层 5CrNiMo、0CrNiMo、35CrMoA、40Cr、45。

预应力圈淬火硬度，中层为HRC45~47，外层为HRC40~42。反复使用条件下的预应力圈，应进行200℃的低温回火以消除内应力。

预应力组合凹模的压合方法有加热压合（热装）与室温压合（冷装）两种。加热压合是将外层预应力圈预先加热到350~400℃，套装在内圈上，冷却后自行收缩包紧内圈。热装时各圈可不必加工出斜度（图12-19a），但模具寿命往往不如冷装。室温压合是将各圈配合面加工出斜角1°~1.5°（不宜超过3°），在液压机上压合（图12-19b）。为防止中圈碎裂，各圈的压合次序应该是先将外圈压合在中圈上，最后压入凹模。拆卸时次序应该相反，先压出凹模，再压出中圈。室温压合模具寿命较高。

压装预应力组合凹模时，由于弹性变形的影响，必然会改变下一组压合面的过盈量。因此对于多层预应力组合凹模每次压合后，一般均需对内孔进行修磨，用以保证下一组配合面

的过盈量或凹模型腔的形状、尺寸。为了简化预应力组合凹模制造加工的复杂程度，可以考虑在保证凹模内足够的预压应力的条件下，通过预先给定过盈量的方法来限定组合凹模压合时的弹性变形量，从而取消每次压合后的修磨或减少修磨量。

用钢丝缠绕凹模使其预先产生切向压应力，处于预紧状态，构成缠绕式预应力凹模，也可以有效的提高凹模的承载能力。

12-4 冷挤压工艺过程设计的几个问题

冷挤压件的工艺过程设计，是所有生产准备工作的基础。既定工艺过程的任何变动，经常会造成极大的浪费。因此工艺过程的设计必须十分慎重，要求设计出适合现有生产条件、技术和经济合理的工艺过程。

冷挤压件工艺过程设计主要包括：制件结构工艺性的分析、确定挤压方式、工序数目及其他辅助工序、选择设备、确定模具总体结构型式等。

影响冷挤压件工艺过程的因素很多，包括制件的材料性能、几何形状、尺寸与精度、设备条件等。对于同一挤压件经常可以有几种挤压方案可行，所以必须选择出技术和经济最合理的方案。但是目前还没有完整的冷挤压件工艺过程设计的原则与方法可循。对冷挤压件工艺过程设计的几个主要问题，仅做下边的简要分析。

一、冷挤压件结构工艺性

冷挤压件结构工艺性分析的目的，是研究给定的制件结构是否适应挤压加工。如果工艺性不好，必须对给定结构进行修改，使其既适于挤压加工，又能保证使用要求。

一般筒形件的适合于反挤压加工的极限尺寸关系为（图 12-21）

高度：低碳钢 $H \leq (2.5 \sim 3) d$

铝、铜 $H \leq (6 \sim 7) d$

壁厚：低碳钢 $s \geq \frac{D}{15}$ (最好不小于 1 毫米)

硬铝、黄铜 $s \geq \frac{D}{25}$ (最好不小于 0.8 毫米)

纯铝 $s \geq \frac{D}{200}$ (最好不小于 0.1 毫米)

底厚：一般 $b \geq s$

对于某些形状比较复杂的零件，也可以应用上述尺寸关系。如图 12-22 所示的低碳钢零件，一次挤压可能成形的尺寸关系为

反挤压（图 12-22 a）时：

$$\frac{D - d_1}{2} \geq \frac{D}{15}$$

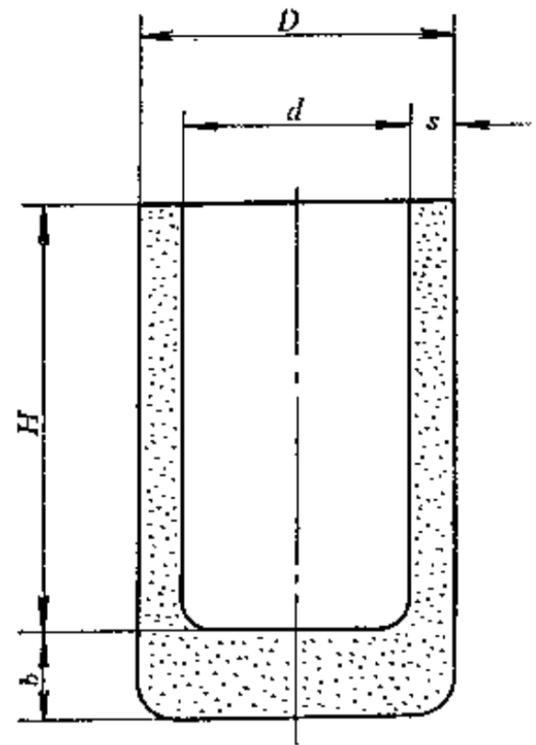


图12-21 反挤压件极限成形尺寸

如果小孔的深度比其直径小或者阶梯孔的孔径差较小,也可以一次挤压成形,此时直径变化的过渡锥角应该选择适当。

三、典型工艺过程

图 12-24 为几种典型形状制件的挤压工艺过程的举例。其中:

1. 制件在口部有一直径较大的法兰。这类制件的工艺过程是先反挤成筒形,再镦口获得最终制件的形状。镦口时应保证 $H/s \leq 1.8 \sim 2$, 否则可能产生皱折。如果 H/s 大于这个数值,可采用反挤压、正挤压、镦口或者反挤压后再经两道镦口的成形工序。

2. 制件具有阶梯内孔。如前所述,这类制件即使其反挤变形程度低于允许变形程度,当直径差较大和 $l > d$ 时,采用两道反挤经常是有利的。

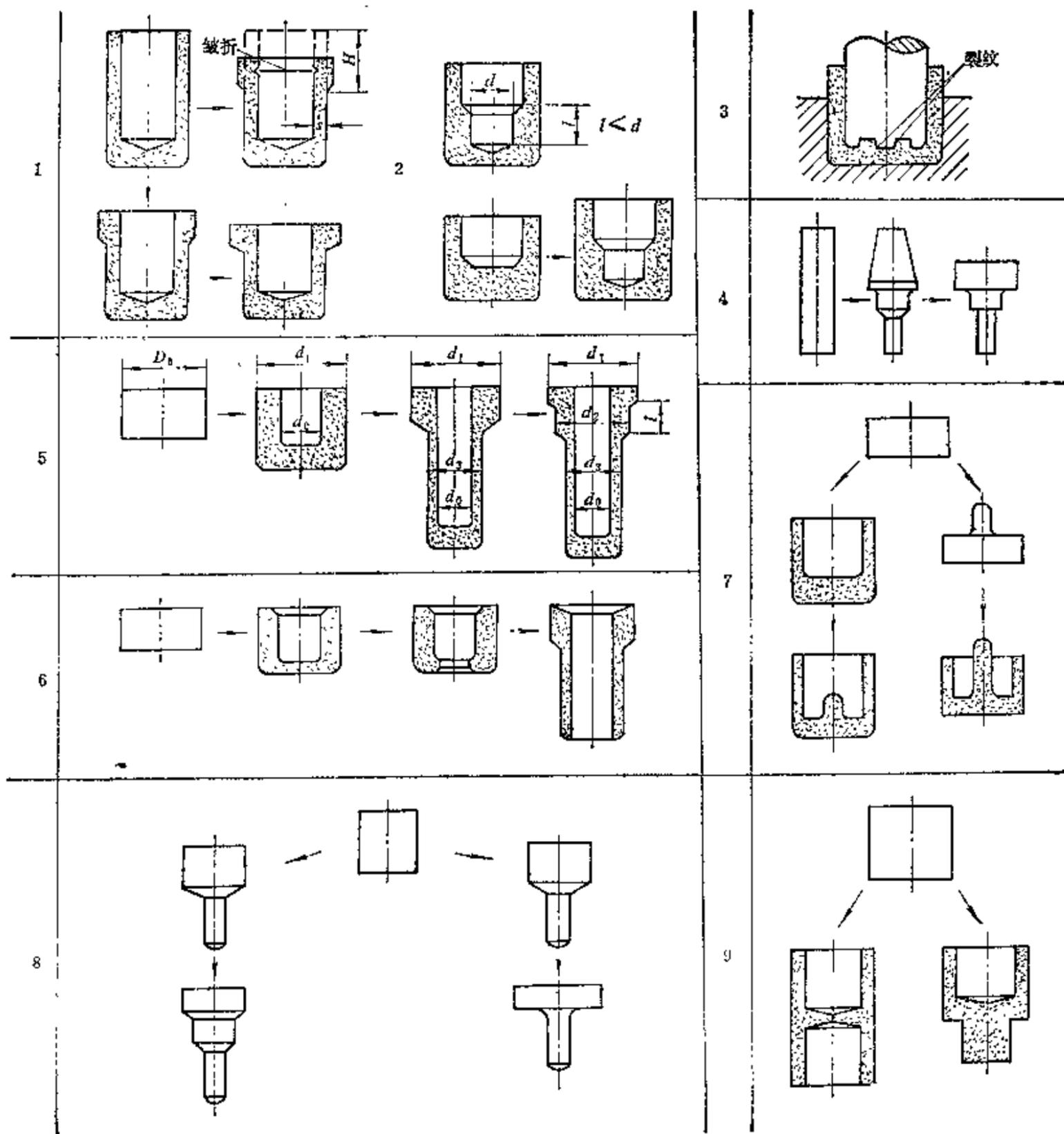


图12-24 典型件的工艺过程

3. 这类制件挤压和压印在同一道工序进行时, 压印处容易产生裂纹。可以采用反挤压后压印的工艺流程。

4. 镦头制件。如果镦粗比为 2.5~4.5 时一道镦成会发生纵向弯曲。可以先镦成中间过渡形状, 最后镦挤成形。

5. 带底外阶梯中空件。这类制件工艺流程是先反挤后再经两道正挤成最后形状。如果 d_1 与 d_2 尺寸相差很小, 阶梯长度 l 又不大时, 可以考虑用一道正挤压完成。

6. 无底外阶梯中空件。这类制件工艺流程与前述相似, 只是在反挤压后增加一道切底工序, 最后正挤压成形。

7. 这类制件可以先挤压任何一方, 然后再同时挤压成最终形状。

8. 阶梯形杆件。可以自小直径至大直径依次正挤压成形。由于在第二道正挤压过程中前边已挤压部分可能产生弯曲, 最终需要校形。如果制件精度要求高, 可以考虑一道挤压成形。

如果制件的头部和杆部的直径差很大, 可以采用正挤压后再镦粗头部的方案成形。

9. 轴向杯-杯、杯-杆类零件。这类制件采用复合挤压工艺成形, 比用多工序的单一挤压成形有利。

一般增加成形工序的次数时, 也应该考虑安排工序间的软化。

第十三章 冲压工艺过程设计

冲压件的生产过程包括有：原材料的准备、各种冲压工序和其他必要的辅助工序（如清理、酸洗、退火、表面处理等）。有些时候还要和切削加工、焊接、铆接等配合，才能最后完成一个冲压件的制造过程。在设计冲压工艺过程时，必须综合地考虑到各方面的因素，对这些工序做出合理的安排。

冲压工艺过程设计，应着重解决下列几方面的问题：

1. 冲压件工艺性的分析

根据产品图纸分析研究冲压件的形状特点，尺寸大小，精度要求，厚度大小，所用材料的机械性能、冲压性能和使用性能，变薄量要求，产生回弹、翘曲、歪扭、松弛等弊病的可能性等等以及它们对冲压加工难易程度的影响。如果发现冲压件的工艺性很差，则应该在不影响其使用性能的条件下对零件的形状和尺寸做必要的合理的修改。

2. 冲压件总体工艺方案的确定

在冲压件工艺性分析的基础上根据冲压件的几何形状、尺寸、精度要求和生产批量等，确定冲压加工的工艺方案及其他辅助工序（热处理、表面处理、清理、组装等等）。

3. 工序数目与顺序的确定

以极限变形参数及变形的趋向性的分析为依据，决定所需的冲压工序数目及其顺序安排，同时，也还需要计算中间毛坯的过渡性尺寸。

4. 模具类型与结构形式的选定

根据冲压件的形状特点、精度要求、生产批量、工厂模具加工的条件、操作上的习惯、现有的通用机械化自动化装置的特点等等确定模具的类型和结构形式。

5. 冲压设备的选择

根据需要完成的冲压工序的性质选定设备的类型，并进一步按照冲压加工所需要的变形力、变形功和零件尺寸，选定设备的吨位。

在制定冲压工艺过程、确定冲压加工方法、工序的数目与顺序、冲模的类型与构造以及选定冲压设备的型式时，必须根据生产批量和冲压件的特点，从产品的成本、质量要求和现有工厂里的生产条件等基本条件出发，对所选定的工艺过程做出经济成本和技术指标等方面的综合分析，以保证做到以最经济合理的方式完成冲压件的制造过程。

13-1 冲压件的工艺性

冲压件的工艺性是指该零件在冲压加工中的难易程度。良好的冲压工艺性应保证材料消耗少、工序数目少、模具结构简单而寿命高、产品质量稳定、操作简单等等。在一般情况下，对冲压件工艺性影响最大的是几何形状尺寸和精度要求。

1. 冲裁件的结构工艺性

a. 冲裁件的形状应该尽量简单，最好是规则的几何形状或由规则几何形状（圆弧与互

相垂直的直线) 所组成。应该避免冲裁件上的过长的悬臂与狭槽, 而且它们的宽度要大于料厚的 2 倍, 即 $b > 2t$ (图 13-1a)。

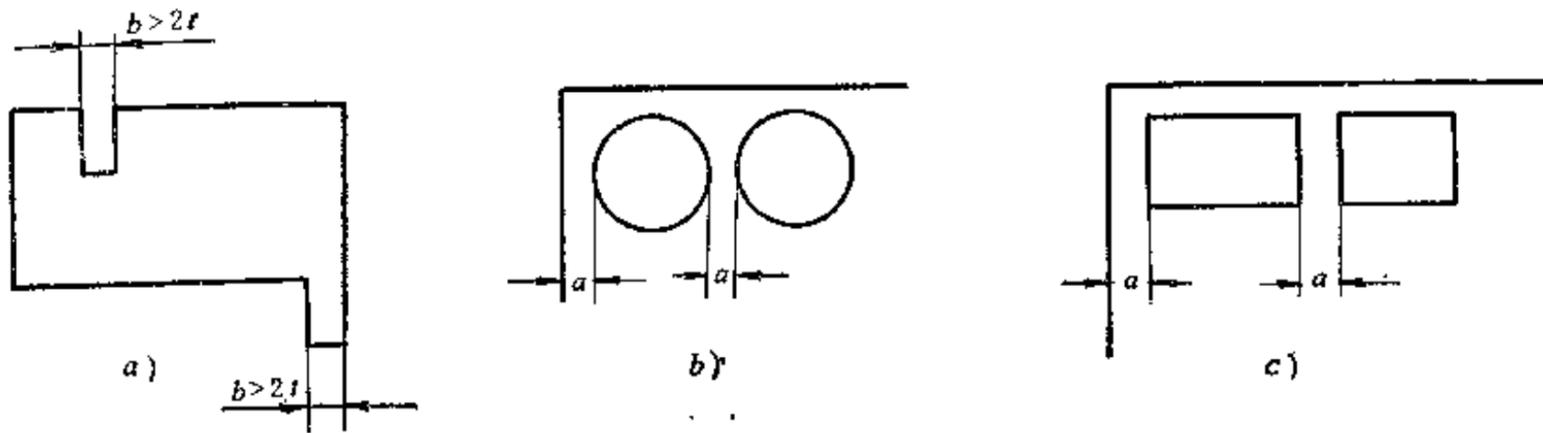


图13-1 冲裁件的结构工艺性

b. 虽然可以用分段冲切的方法制造不带圆角半径的冲裁件, 但在一般情况下, 都应该用 $R > 0.5t$ 以上的圆角半径代替冲裁件的尖角。圆角半径过小时, 冲模寿命会显著降低。

c. 因受到冲头强度的限制, 冲孔的尺寸不能过小。用一般冲模可能冲孔的最小尺寸, 可见表 13-1, 长方形孔的宽度也不要小于表中的数值。

表13 1 冲孔的最小尺寸

材 料	冲 孔 最 小 直 径 或 最 小 边 长	
	圆 孔	方 孔
硬钢	1.3 t	1 t
软钢及黄铜	1 t	0.7 t
铝	0.8 t	0.5 t
夹布胶木及夹纸胶木	0.4 t	0.35 t

d. 孔与孔之间的距离 a 或孔与零件边缘之间的距离 a (图 13-1 b、c), 受到模具强度和冲裁零件质量的限制, 其值不能过小, 一般应取 $a \geq 2t$, 但需要保证 $a > 3 \sim 4$ 毫米。如用连续模冲裁, 而且对零件精度要求不高时, a 可以适当减小, 但也不宜小于板厚。

2. 弯曲件的结构工艺性

a. 弯曲件的圆角半径不宜小于最小弯曲半径; 也不宜过大, 因为过大时, 受到回弹的影响, 弯曲角度与圆角半径的精度都不易保证。

b. 弯曲件的弯边长度不宜过小, 其值应为 $h > R + 2t$ (图 13-2a)。当 h 较小时, 弯边在模具上支持的长度过小, 不容易形成足够的弯矩, 很难得到形状准确的零件。

c. 对阶梯形毛坯进行局部弯曲

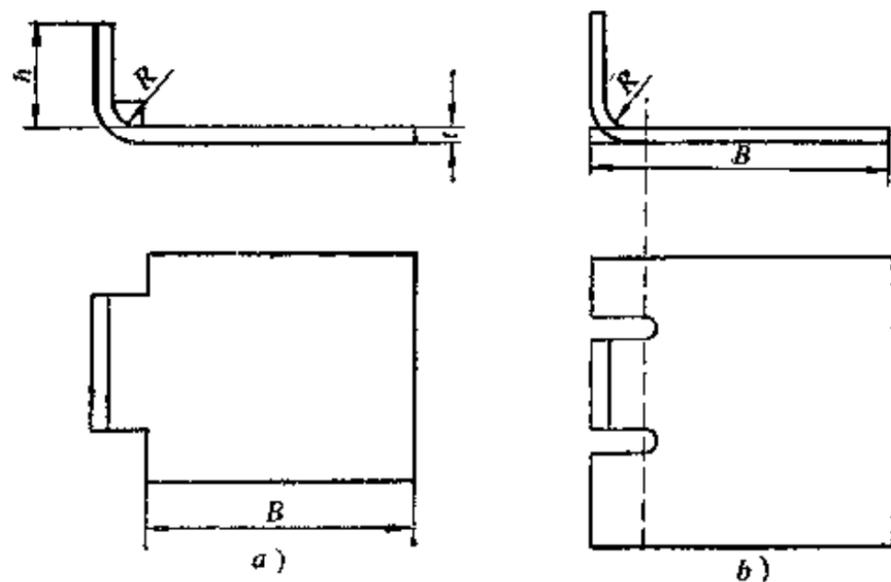


图13-2 弯曲件的结构工艺性

时，在弯曲根部容易撕裂。这时，应减小不弯曲部分的宽度 B ，使其退出弯曲线之外。假如零件的宽度不能减小，则应如图13-2b所示那样，在弯曲部分与不弯曲部分之间切槽，消除根部在弯曲时产生的伸长变形。

3. 其他空心零件的结构工艺性

这种类型零件繁多，形状也比较复杂，所用冲压工艺方法也是多种多样（拉深或拉深与其他方法结合起来），所以其工艺性也必须从这些特点出发，根据具体情况去研究。下边仅提出几个一般性的原则。

a. 轴对称零件在圆周方向上的变形是均匀的，而且模具加工也最方便，所以其工艺性最好。其他形状零件的工艺性较差。对于非轴对称零件，应尽量避免急剧的轮廓变化，并且内凹与外凸的轮廓变化，对工艺性也有不同的影响。

b. 过高或过深的空心零件需要多次冲压工序，所以应尽量减小其高度。

c. 在零件的平面部分、尤其是在距离边缘较远位置上的局部凹坑与突起的高度不宜过大。

d. 应尽量避免曲面空心零件的尖底形状，尤其高度大时，其工艺性更差。

常常在生产中有这种情况，根据冲压加工的特点，对冲压件的几何形状和尺寸做某些修改，使其使用上的性能不变，却可使冲压加工得到很大简化。例如图13-3所示的消声器后盖，结构形状经过修改后，其高度由27和43毫米分别减至8和10毫米，结果冲压加工由八道工序降为二道工序，而且材料消耗也减少50%。

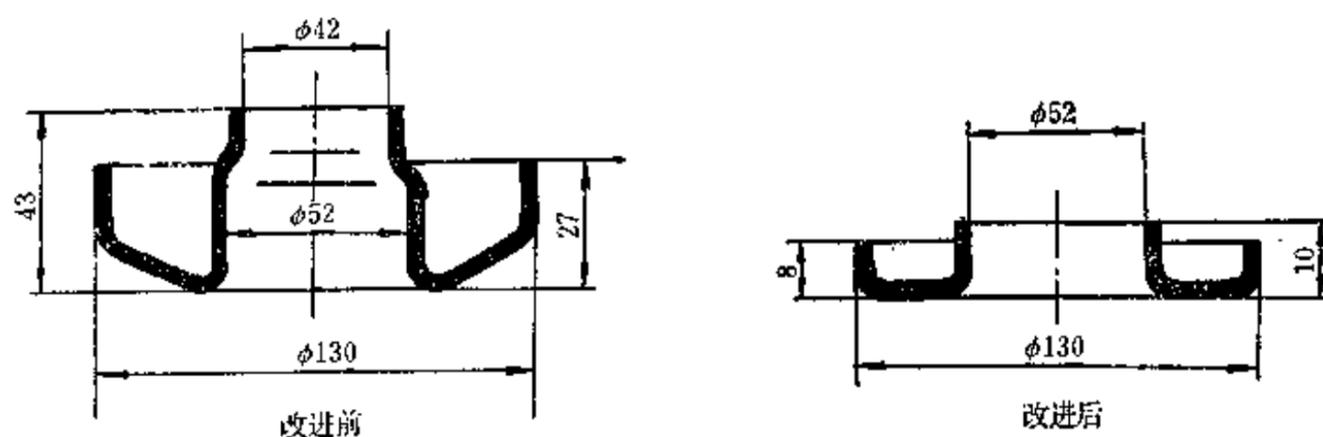


图13-3 消声器后盖的改进

13-2 确定冲压加工方案、工序数目与顺序的几项原则

在确定冲压加工方案、工序数目与顺序时，必须考虑的问题是多方面的，而且也要经过综合分析、比较，才能最后决定。在这些各种各样问题当中，除应根据冲压件的生产批量和对冲压件质量的要求，确定总体的加工方案外，还必须使所制定的工艺过程符合于冲压变形的基本规律，以保证冲压加工过程能够顺利地、而且所用的模具结构要简单，操作要方便等等。下面通过几个形状较为复杂，而且需经数道冲压工序加工的零件的工艺过程分析，来讨论这几方面的问题。

一、冲压变形的规律对冲压工艺过程的要求

在需经数道冲压工序成形的零件加工中，零件的形状是逐步地、分部分地形成的。每一

道冲压工序都使毛坯的某一部分变成为成品零件的一部分。这样逐步加工的结果，使毛坯逐步地接近成品零件。因此，为使每道工序都能顺利地完成任务，就必须使在该道工序中应该变形的部分是个“弱区”。

1. 有一些零件的几何形状是完全相同的，但是，由于某个部分或尺寸上的一些差别，为了保证“变形区应为弱区”，必须采用不同的冲压加工方案。图 13-4 就是这样的例子。图中 *a* 是油封内夹圈，冲压工艺过程是：落料冲孔、翻边，共二道工序。翻边系数为 0.8。翻边时的变形区是外径为 $\phi 92$ 毫米，内径为 $\phi 76$ 毫米的内环形部分。而外环部分是不应该变形的。图中 *b* 是油封外夹圈，其主要的尺寸差别是翻边高度大，为 13.5 毫米。如果采用相同的工艺过程，则由于在第一道工序中冲孔的直径较小，翻边系数降为 0.68。这样，因为翻边力的增大，已经不能保证“变形区应为弱区”的条件，翻边时，毛坯的外环部分也要发生切向收缩变形，这当然是不允许的。因此，在这种情况下，势必要采用图 13-4*b* 所示的工艺过程：落料、拉深、冲孔、翻边。这时翻边系数变为 $\frac{d_0}{d_1} = \frac{80}{90} \approx 0.9$ ，“变形区应为弱区”的条件得到了保证，所以这个工艺方案是可行的。

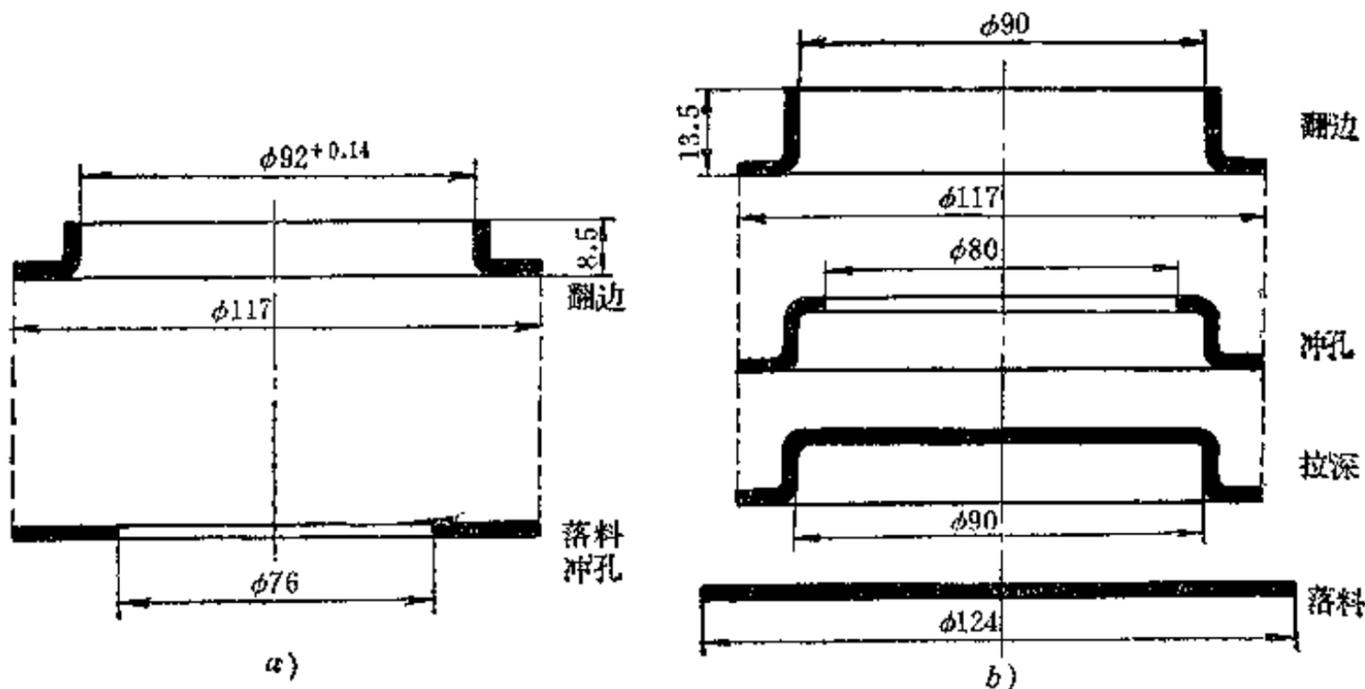


图13-4 油封内夹圈与油封外夹圈的冲压工艺过程

a—油封内夹圈 *b*—油封外夹圈；材料：08号钢，厚度0.8毫米

在做图 13-4 所示类型零件的工艺分析时，可以参考图 13-5 的曲线。根据翻边系数 $\frac{d_0}{d_1}$ 和板料毛坯与模具表面间的摩擦系数 μ ，便可以判断毛坯的外环部分是否收缩。从图中举例可见，当 $\frac{d_0}{d_1} = 0.76$ ，而摩擦系数 $\mu = 0.15$ 时，假如毛坯外径与冲头直径比为 1.3 时，毛坯外径不致变化。这就是图 13-4 中油封内夹圈的工艺过程设计的依据。

图 13-5 是用球面形状的冲头翻边（图 13-6）时所得的曲线。当用平端面冲头翻边时，应将零件外径与内径尺寸比 $\frac{D}{d_1}$ 的数值减小 10~20% 后，再利用图中的曲线确定翻边毛坯外径不变的条件。

另外，当在拉深件的底部翻边时，也应该用图 13-5 中的曲线进行校核。

2. 在某些情况下，为了保证“变形区应为弱区”的条件，要增加一些附加的工序。例如

图 13-4a 所示的油封内夹圈，假如其外径由 $\phi 117$ 减至 $\phi 100$ ，则在翻边时，外径也势必变形而收缩，“变形区应为弱区”的条件被破坏。这时的冲压工艺过程应改为：落料冲孔（毛坯外径为 $\phi 115$ ）、翻边、冲切外圆（得 $\phi 100$ ）。第三道冲切外圆的工序，就是为了保证翻边时的“变形区应为弱区”的条件所引起的附加工序。

又如图 13-7 所示的两个零件，其形状非常近似，但其冲压工艺过程却有很大的差别。图 a 所示的零件的冲压工艺过程是：落料、拉深、冲孔。假如图 b 所示的零件，也采用与此相同的工艺过程，则拉深前毛坯的直径应为 $\phi 81$ 毫米，其拉深

系数为 $\frac{33}{81} = 0.4$ ，略小于极

限拉深系数。同时，零件根部的圆角半径较小（ $R2$ ），形成了对拉深变形很不利的条件，所以在这个冲压工艺方案中用一道拉深工序使零件成形是不可能的。在实际生产中所采用的较为合理的冲压工艺过程是：落料冲孔、拉深、冲底孔与冲外圆、

冲 $\phi 6$ 孔六个等四道工序（图 13-7b）。由于在拉深工序前的毛坯上冲孔 $\phi 10.8$ 毫米，使拉深时毛坯的内部（小于 $\phi 33$ 毫米的部分）与外部（大于 $\phi 33$ 毫米的部分）都是可以产生一定变形量的弱区。内部金属向外扩展，而外部金属向内收缩，使拉深高度 9 毫米成为可能。所以冲孔 $\phi 10.8$ 毫米，是由变形规律引起的附加工序，这个孔并非零件上的一部分，因为 $\phi 23$ 毫米的孔是在拉深以后的第三道工序中形成的。

象 $\phi 10.8$ 毫米这种可以改变变形趋向的孔，生产中也叫做变形减轻孔，它具有使变形区转移的作用。譬如在图 13-7b 所示零件的原始毛坯上冲出 $\phi 10.8$ 毫米的内孔以后，使第一道拉深工序中的变形区由冲头圆角部分转化为直径小于 $\phi 33$ 毫米的内环部分，也可以说是减轻了冲头圆角部分毛坯的局部变形。也有另外一种情况，变形减轻孔不是在成形工序进行前冲出，而是在成形过程当中的一个恰当时刻冲成，例如汽车门板毛坯的变形减轻孔就属于这种情况。

在某些复杂形状零件成形时，变形减轻孔能使不易成形的部分或不可能成形的部分的变形成为可能，但是它的形状、尺寸和位置的确定，却是一个相当复杂的问题。

3. 在确定冲压工序的先后顺序时，也必须考虑满足“变形区应为弱区”的条件。这个道

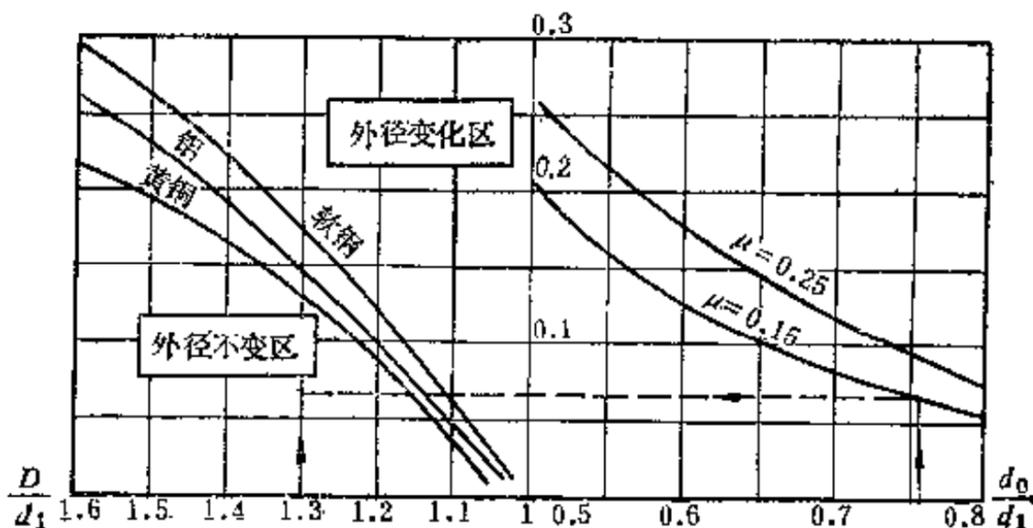


图13-5 球形冲头翻边时，毛坯外径不变的条件

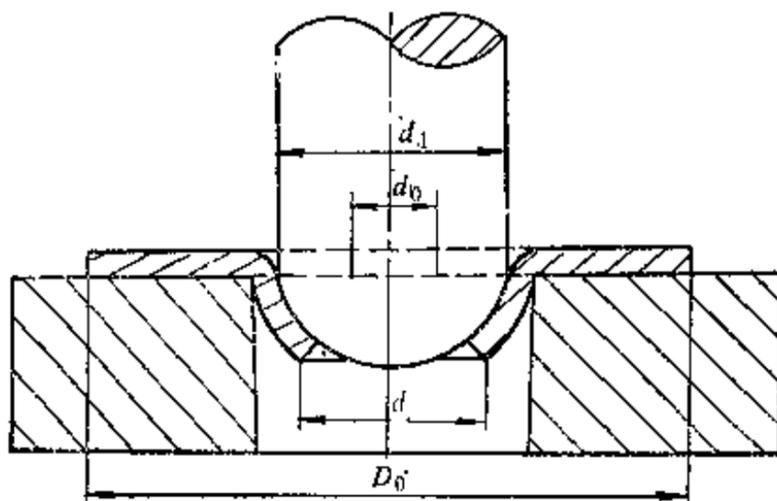


图13-6 球形冲头的翻边过程

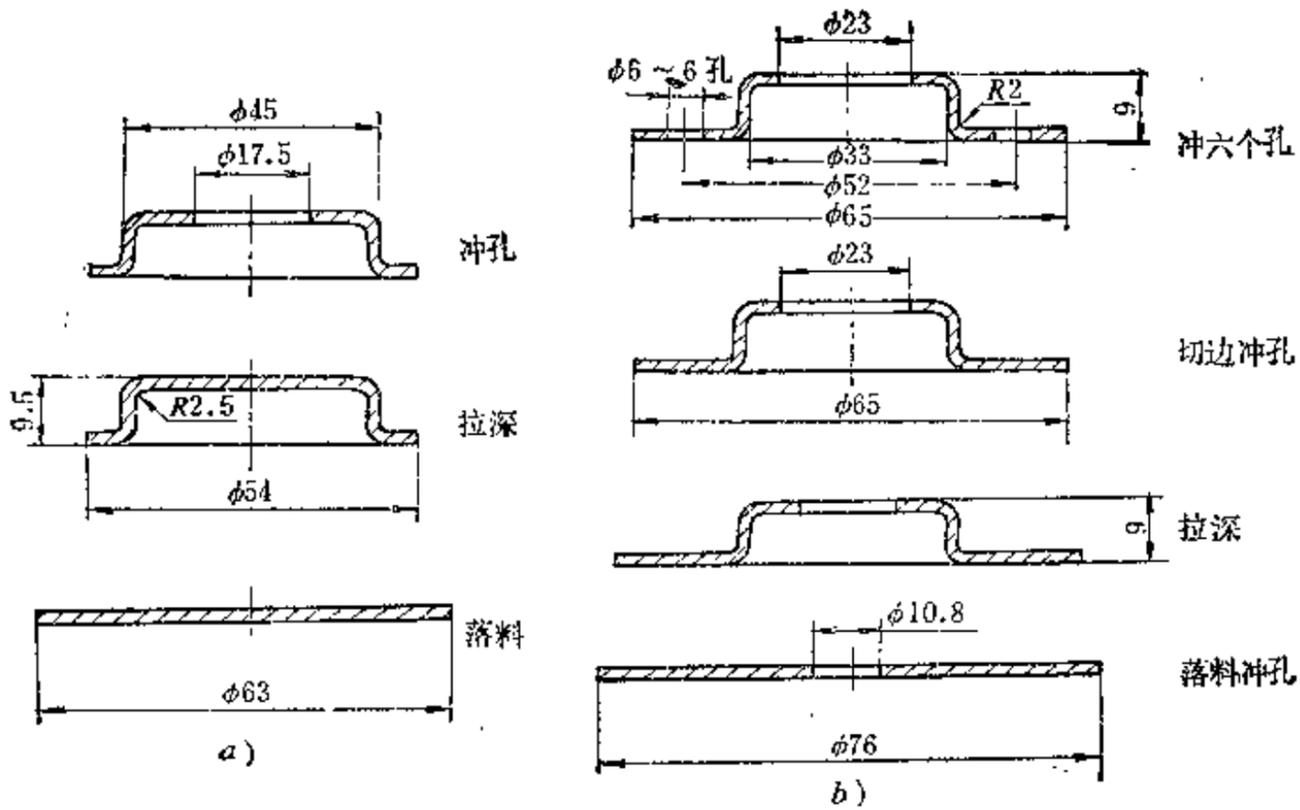


图13-7 挂车刹车阀的冲压工艺

材料：08号钢；厚度： 0.8 ± 0.08 毫米

理，对于成形类冲压件是十分明显的。在图 13-4 所示零件的冲压过程中，必须把冲孔工序安排在拉深工序之后进行。假如把冲孔工序安排在拉深工序之前，则拉深时的变形区（内径为 $\phi 90$ 毫米、外径为 $\phi 124$ 毫米的外环部分）会变成相对的强区，而内径为 $\phi 80$ 毫米、外径为 $\phi 90$ 毫米的内环部分成为相对的弱区。这时在第二道拉深工序里可能实现的变形只能是毛坯内孔的翻边，而不再是毛坯外环部分的拉深。这样的工艺过程，当然是行不通的。

有些冲裁类零件的冲压过程中，有时也要考虑到“变形区应为弱区”的要求。如图 13-8 中所示零件（螺母）的冲压过程中，如果先冲内孔 $\phi 66$ 毫米，则在外缘落料时，由于冲裁力的水平分力作用的结果，能使已冲成的内孔直径（ $\phi 66$ 毫米）胀大 2~3 毫米，造成尺寸超差的废品。在用一般的复合模冲裁时，也会出现这种现象。当把复合冲裁模的冲孔凸模高度减小 7~8 毫米时，相当于改变冲裁的顺序，使冲孔工序在落料之后进行，结果避免了内孔的胀大，得到了合格的零件。假如零件的内孔直径很小，因为其发生胀大变形的阻力加大，就不至于出现冲外缘时的内孔胀大现象。

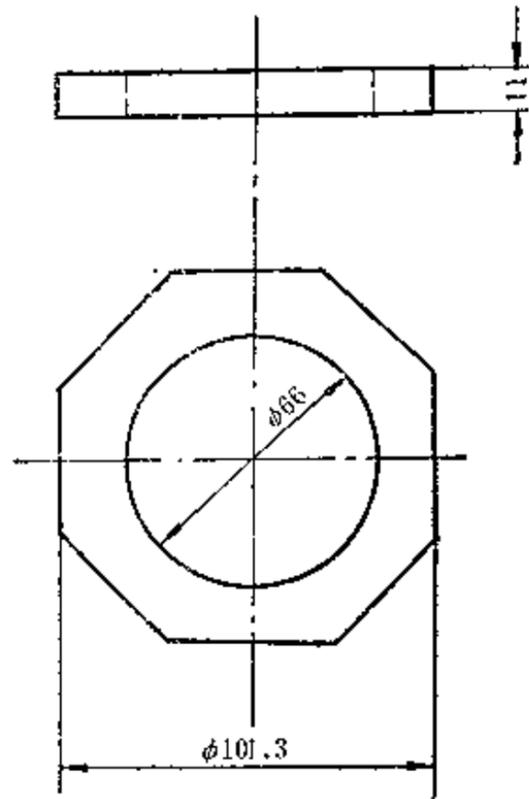


图13-8 冲裁顺序对尺寸精度的影响实例

4. 非轴对称的阶梯形零件的冲压工序顺序的安排原则，不同于轴对称的阶梯形零件。轴对称阶梯形零件的一般冲压方法，都是首先拉深成较大直径的阶梯，然后再逐个地拉深较小直径的阶梯部分。而非对称的阶梯形零件的拉深顺序与此相反，首先拉深成内部较小尺寸的阶梯部分，然后再拉深外部较大尺寸的阶梯部分。在这种情况下，如果先拉深成外部较大尺寸的阶梯部分，则已成形的直壁会限制内部小尺寸阶梯部分的拉深变形，使

以后的变形成为不可能。如图 7-49 中所示的非轴对称的阶梯形零件的拉深顺序，就是首先拉深内部的圆形部分，然后经修边后再拉深外部的方形部分。

5. 当零件需要经过数道工序冲压成形时，零件的总体形状是通过各个成形工序分部分地、逐步地形成的。当在最初的某个成形工序中，一旦形成了零件的某一个部分以后，在后来的成形工序里已成形部分的形状和尺寸就不再发生变化。中间毛坯已成形部分，把毛坯分为内外两个部分。在以后的冲压工序中，毛坯的变形只能分别地在内部或外部进行，也就是必须使内部或外部需要变形部分为弱区，而已成形部分一定是相对的不变形的强区。因此，在内部毛坯变形时，金属的分配与转移只能局限于内部的范围，而不能企图从外部补充金属到内部来；同样道理，在外部成形时，情况也是这样。只要上述这些条件得到保证，不管是先成形内部，或者是先成形外部，或者内部与外部同时成形，从变形的可能性来看都是可行的。这时，内部和外部成形的先后顺序主要是从操作、定位、模具结构等因素出发确定。

图 13-9 是调温器外壳冲压工艺过程。在第一道拉深工序中即已形成零件最终形状的一部分——直径为 $\phi 60$ 毫米的侧壁与锥形部分，而以后的变形就应该在被已成形部分划分为内、外两部分的本身范围内各自进行。翻边工序应在内部进行，其应该保证的条件是：外径为 $\phi 34$ 内径为 $\phi 20.6$ 的环形部分应为弱区，在弱区变形时，锥形部分及和它相连接的内径为 $\phi 34$ 的圆环部分应为强区，不应产生变形。这个条件可由图 13-5 中的曲线确定。徽根时，

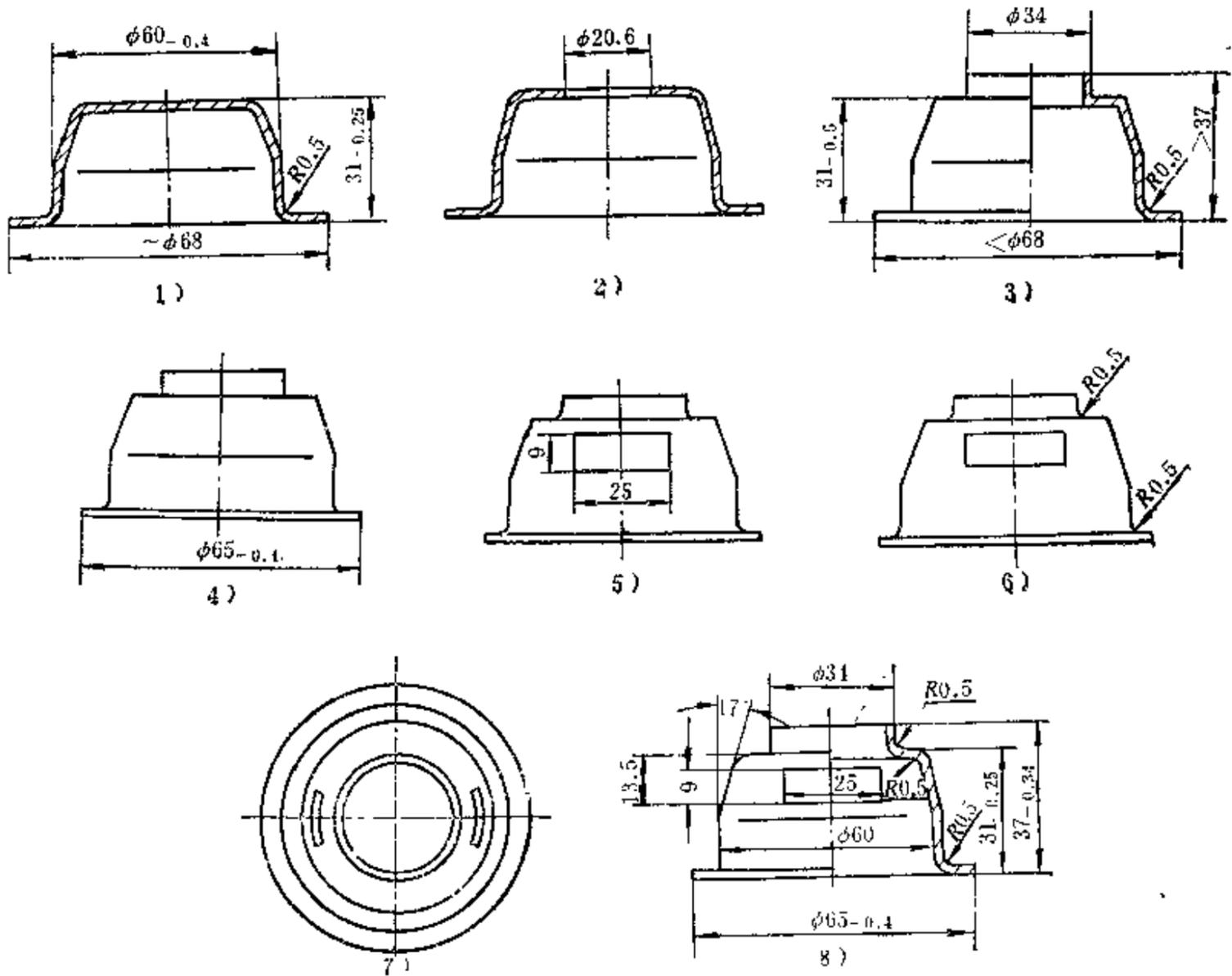


图13-9 调温器外壳冲压工艺过程

- 1—拉深 2—冲孔 3—翻边徽根 4—切边 5—冲侧孔
 - 6—整形 7—冲顶部两孔 8—零件图
- 材料：黄铜H62，厚度：0.8毫米

$\phi 68$ 的法兰边产生直径减小的收缩变形（实际上是变形量不大的拉深变形），这属于外部变形。镦根时应保证直径为 $\phi 60$ 毫米的直筒部分不发生变形。镦根与翻边可以分先后顺序完成，也可以同时完成。这里介绍的是某工厂所采用的同时进行翻边和镦根的工艺方案。

又如图 13-15 中所示零件的冲压工艺过程，在第二道拉深工序后的圆柱面 ($\phi 16.5$) 是已成形成部分，其直径与成品零件相同。在第二道工序以后的各道工序里金属的变形都在内部与外部各自的范围内进行。第三道工序是内部的单独成形；第六道工序是外部的单独成形；第五道工序则是内部与外部的同时成形。

二、冲压件尺寸精度对冲压工艺过程的要求

对冲压件尺寸精度的要求、允许的厚度变薄量等，也是确定工艺方案、工序数目和顺序的重要依据。

1. 当毛坯在冲压成形时的强区与弱区的对比不显明时，不可能得到冲压件所要求的稳定的准确尺寸，所以，在对零件上某部分尺寸有精度要求时，这一部分就必须在成形之后冲出。如图 13-10 所示的锁圈，其内孔尺寸 $\phi 22_{-0.1}$ 是配合尺寸，有精度要求，所以其冲压工艺过程是：落料、成形、冲孔。假如对内孔没有精度要求时，则可以考虑用较为简便而且效率较高的工艺过程：落料冲孔、成形等两道工序。

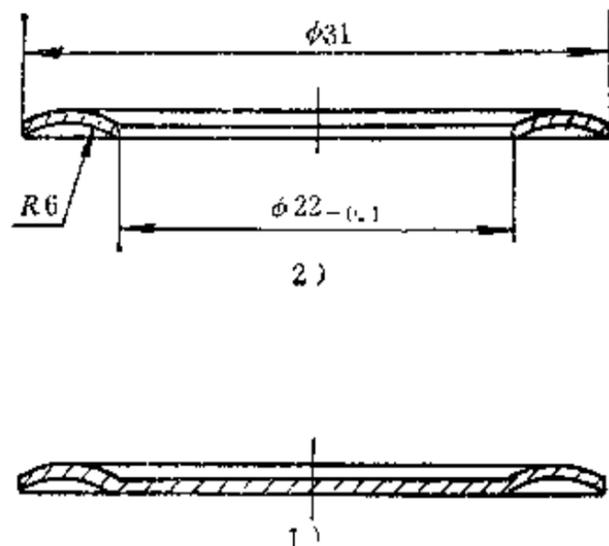


图13-10 锁圈的冲压工艺过程

材料：黄铜；厚度：0.3毫米

2. 当对孔的尺寸和位置的要求较高时，冲孔工序应该放在所有的成形工序之后进行；当这方面要求不高时，可以把冲孔工序适当提前，以求加工方便或提高生产率。当然，在冲压成形时还要变形的部位上的孔，不能先冲。

如图 13-11 所示的零件上的三个孔，都应该在拉深工序之后冲成。由于对 $\phi 16$ 毫米的孔的位置（中心高为 10 毫米）精度没有要求，所以，可以把冲孔 $\phi 16$ 毫米安排在冲切翻边工序之前，并且与 $\phi 5.5$ 毫米的两个孔的冲孔工序同时进行。假如对孔的中心高 10 毫米有精度要求时，则 $\phi 16$ 毫米孔的冲孔工序，应该安排在冲切翻边之后进行。

又如图 13-9 中的零件，在顶部有两个弧形的长孔，冲孔工序安排在整形工序之后，成为全部冲压工艺过程的最后一道工序。假如把冲孔工序安排在整形之前，则由于窄长孔的刚度特别差，在整形时不可避免地要发生孔形的畸变。

3. 拉深件的外边缘或扩孔件的内边缘，都不能得到规则的几何形状，尤其是板料具有较大的方向性时，制成零件的外缘与内孔形状的畸变更为显著。所以，在一般情况下，都需要在拉深、扩口、翻边等成形工序之后进行冲孔或切边工序。例如，图 13-7b、13-9 及 13-11 中的几个零件，都是属于这种情况。但是，假如拉深件或翻边零件的高度较小，而且又对周边没有精度要求时，也可省掉切边或冲孔工序，图 13-4、13-7a、13-10 中的几个冲压件，都是这样安排工艺过程的。

4. 当对冲压件的几何形状或尺寸有较高的精度要求时，必须加一道精整工序。精整的形式很多，常用的有：靠精压实现的精整、靠拉应力与拉伸变形实现的曲面零件的精整、靠壁厚变薄实现的拉深件的精整等等。图 13-9 所示的零件的底部与法兰边都有较高的不平度

五

要求，所以于最后安排一道整形工序达到精整目的。

5. 对冲压件壁厚变薄量的要求，时常对冲压工艺方案与工序顺序有很大影响。如图 13-4 及 13-9 所示的零件的翻边部分，当对壁厚的要求不允许产生变薄时，就不能采用前述的冲孔后翻边的方案，而只能采用拉深到所需的高度后再行切底的工艺方案，因为用一般的翻边方法时，毛坯变形部分厚度的变薄是不可避免的。

三、操作对冲压工艺过程的要求

在设计冲压工艺过程时，必须考虑到操作方便与安全，半成品的定位和工艺稳定性等实际问题。

1. 当冲压件需要数道冲压工序加工时，必须解决操作中的定位问题，这是保证冲压件尺寸精度的基本条件。

图 13-9 所示的零件，在第一道拉深工序中形成的 $\phi 60$ 圆柱面是以后各道工序中所采用的定位部分。又如图 13-11 所示的零件，在第三、四道工序中仅靠 $\phi 62$ 圆柱面定位是不够的，还必须进一步增加方向定位，防止毛坯的转动。这里是用 $\phi 5.5$ 毫米的孔解决冲侧孔和冲切翻边两道工序的方向定位。

为了提高零件的尺寸精度，消除多次定位的误差，应该尽量使全部工序中都用零件的同一个部分作为定位基准。上述两个零件都是这样处理的。

毛坯的定位基准，最好是利用成品零件的某个部分，例如毛坯的外形或孔等等。而且应该使所选定的毛坯定位部分，在冲压过程中不应产生变形或位移。当在冲压中间毛坯上找不到合适的定位部分时，也可以利用在以后的工序中需要切除的废料上冲孔作为定位基准。

2. 不便取拿操作的小零件或是形状特殊不易定位的零件，在安排工序时，不要先落料分离，应在冲压成形完成以后冲切分离。图 13-12 中的零件（电线接头）所采用的工艺方案就是在完成冲孔、冲外形、预弯和弯曲后再行落料分离。这样，不仅便于操作、有利于保证安全，而且也能提高生产率。用这种冲压方法也容易解决多工序中的定位问题，对提高形状特殊的小型零件的冲压加工精度是很有效的。这种类似的工艺方法也常用于小型的拉深件或形状更为复杂的零件（如带料连续拉深等）。

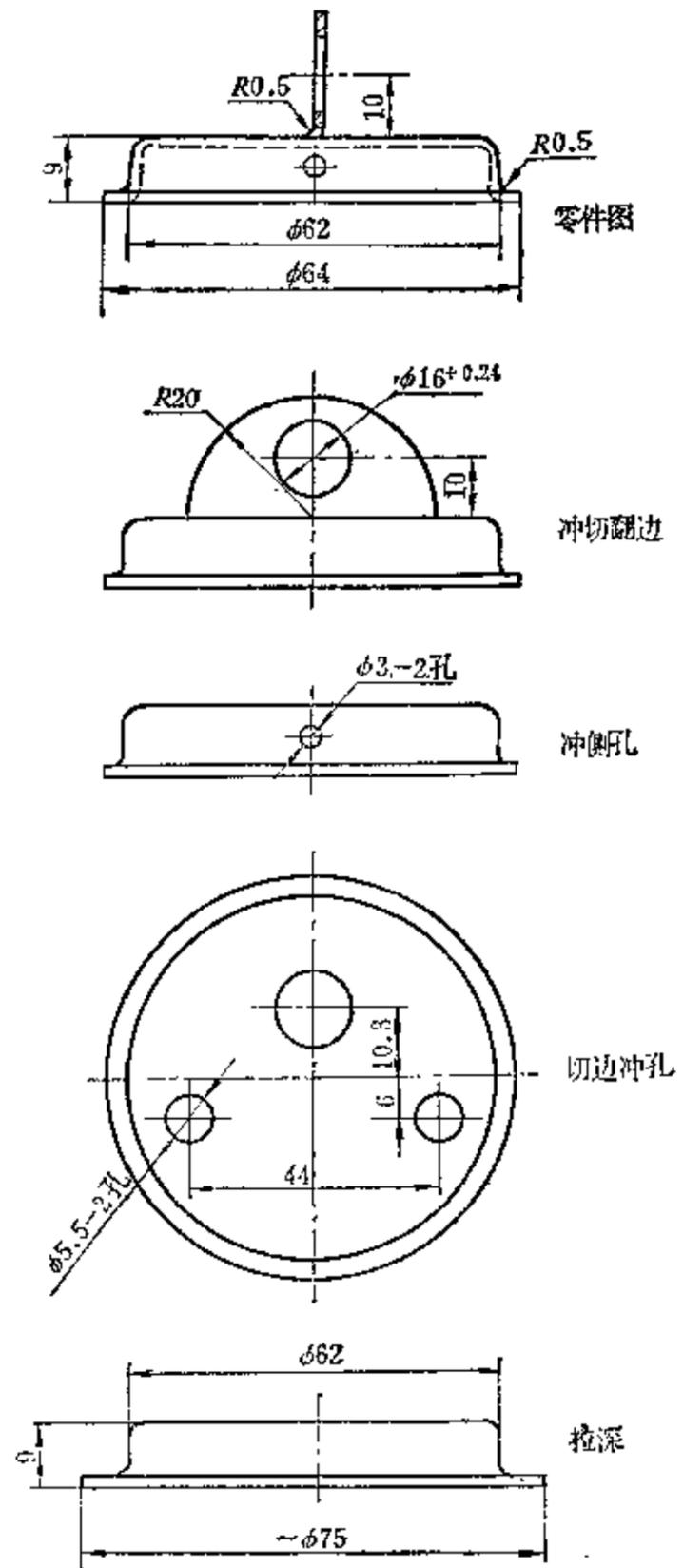


图13-11 底板的冲压工艺过程

材料：0.8号钢，厚度：0.8毫米

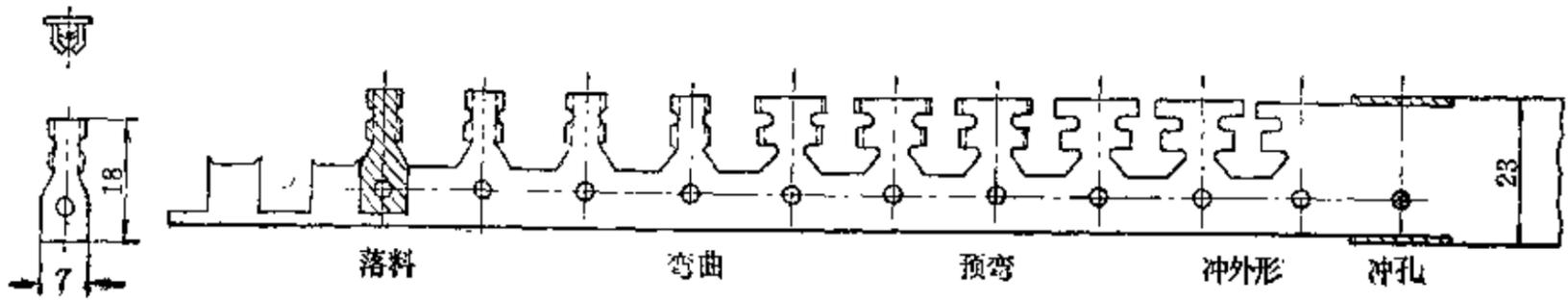


图13-12 电线接头的冲压工艺

材料：黄铜，厚度：0.4毫米

3. 工艺稳定性也是冲压工艺过程设计时不可忽略的问题。原材料机械性能的波动、厚度的波动、模具的制造误差、模具的调整、润滑的变化、设备的精度等等，都对冲压工艺的稳定性具有较大的影响。

工艺稳定性差时，冲压过程中的废品率会显著增高，而且对原材料、设备性能、模具精度、操作水平等的要求也是很苛的，有时是在实际生产条件下难以达到的。

提高冲压工艺稳定性的主要措施，是适当地降低冲压工序中的变形程度，避免在接近极限变形参数的情况下进行冲压加工。从图 13-13 可见，当拉深变形程度小时，允许压边力有较大范围的波动，而拉深工序仍能正常进行。但是当拉深程度增大到 $K = \frac{D_0}{d_p} = 2$ 时，压边力的不大波动都能引起毛坯的破坏和起皱。由此可见，适当地降低变形程度，可以使模具调整工作简化，并且也提高了工艺稳定性。在大量生产中的连续流水线所采用的冲压工艺过程，应该保证必要的工艺稳定性。

四、冲模的结构、强度等对冲压工艺过程的要求

在设计冲压工艺过程时，应该考虑到所定冲压工艺方案与模具结构之间的关系。模具型式的选定，主要决定于生产批量的大小。当生产批量较大时，应该尽量用可以一次完成几种冲压工序的连续模或复合模，把多工序合并成为一道冲压工序。例如图 13-11 所示的零件的生产批量大，所以采用了把切边与冲孔二个冲压工序合并为一道冲压工序的方案。同样道理，两个侧孔也是用结构较为复杂的侧楔式冲模一次冲成的。假如生产批量很小，则要考虑用简

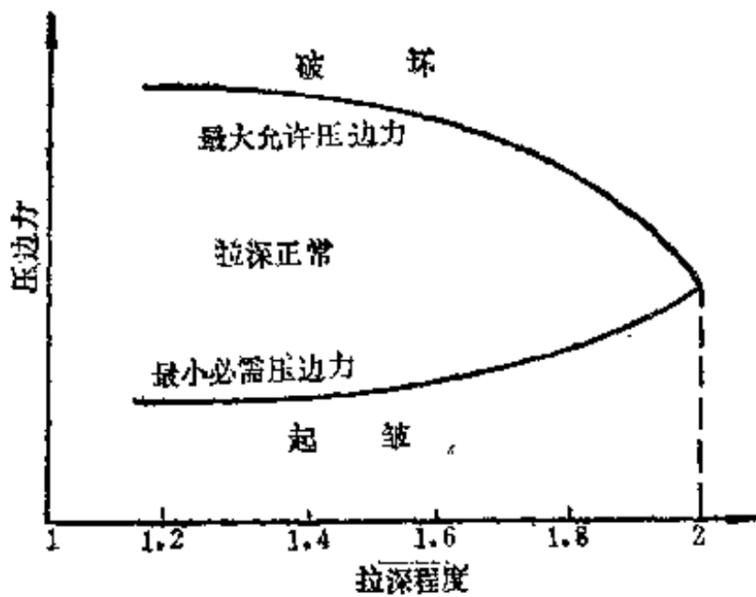


图13-13 拉深变形程度对工艺稳定性的影响

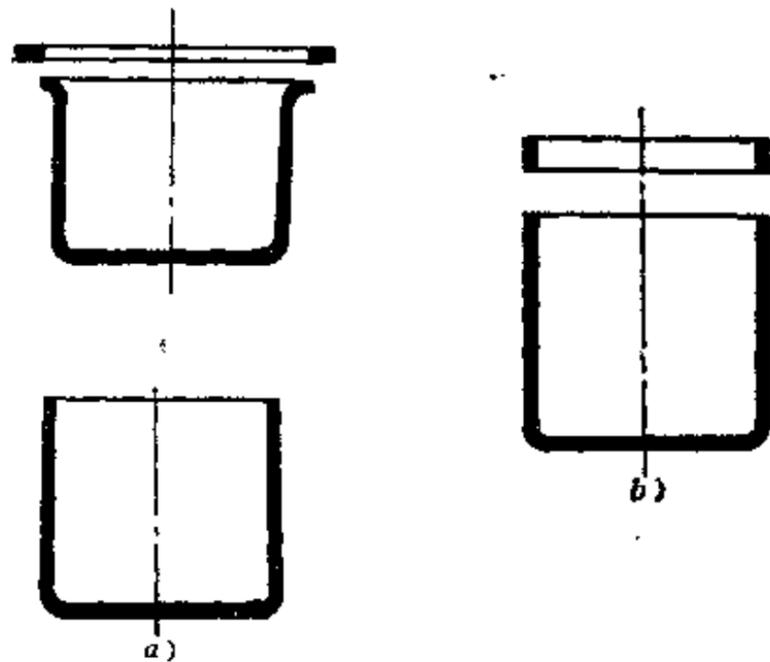


图13-14 切边方法对模具结构的影响

4. 有一些半成品的尺寸, 应该从模具的强度出发确定。例如, 在图 13-4 a 中零件的冲孔尺寸的确时, 就要考虑到模具的强度。取较大的冲孔直径有利于满足极限翻边系数和变形趋向性的要求, 而且厚度变薄量也小, 翻边后零件的口部平齐。但是冲孔直径过大时, 凸凹模的壁厚就要相应地减小, 对模具的强度不利。

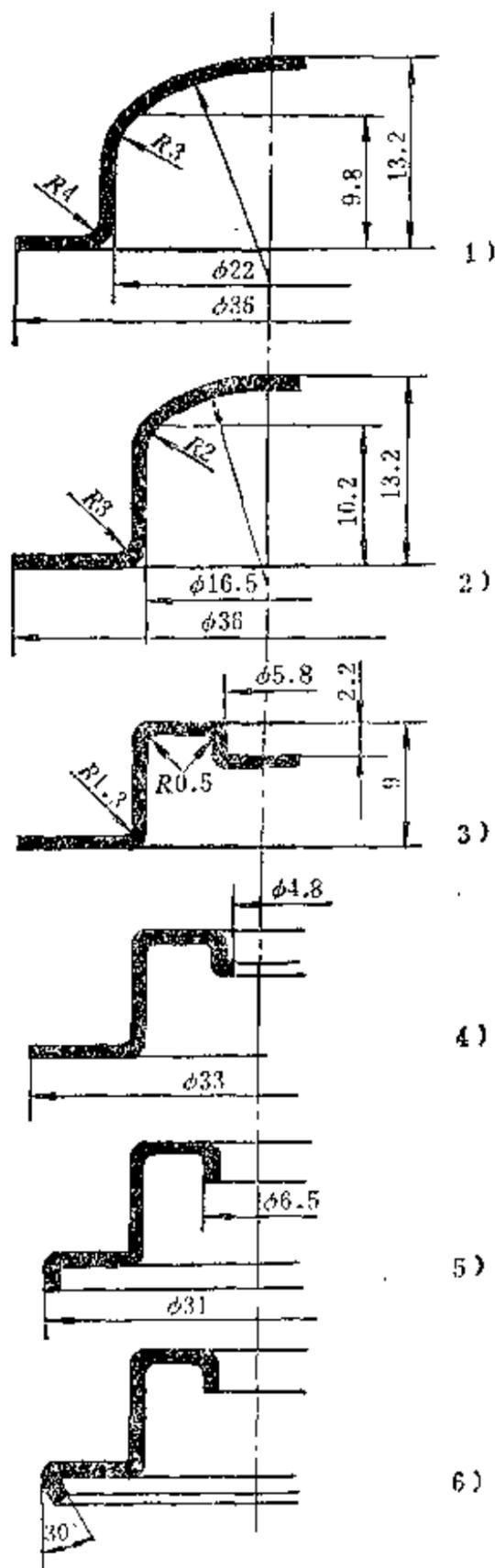


图13-15 出气阀罩盖的冲压过程

1—落料、拉深 2—拉深 3—成形 4—冲孔、修边 5—外缘翻边、锯内孔 6—折边
材料: 黄铜H62, 厚度: 0.3毫米

5. 在曲面形状零件拉深时, 时常把半成品做成具有较强抗失稳能力的形状, 用以防止下一道冲压成形工序中起皱现象的发生。图 13-16 中所示的第一道拉深后半成品的形状, 其底部不是一般的平底形状, 而是做成外凸的曲面。在第二道反拉深的过程中, 当半成品的曲面与凸模曲面逐渐贴靠时, 半成品的底部形成的曲面形状具有较高的抗失稳起皱的能力。这种做法, 对第二道拉深工序的进行, 是十分有利的。

6. 有时半成品的过渡尺寸, 直接影响成品零件的表面质量。如多道拉深工序中凸模的圆角半径或宽法兰边零件多次拉深时的凹模与凸模的圆角半径, 都不宜取的过小, 否则在制成零件的表面上能够残留有板料在圆角部位弯曲与变薄的痕迹, 降低零件的表面光滑程度。

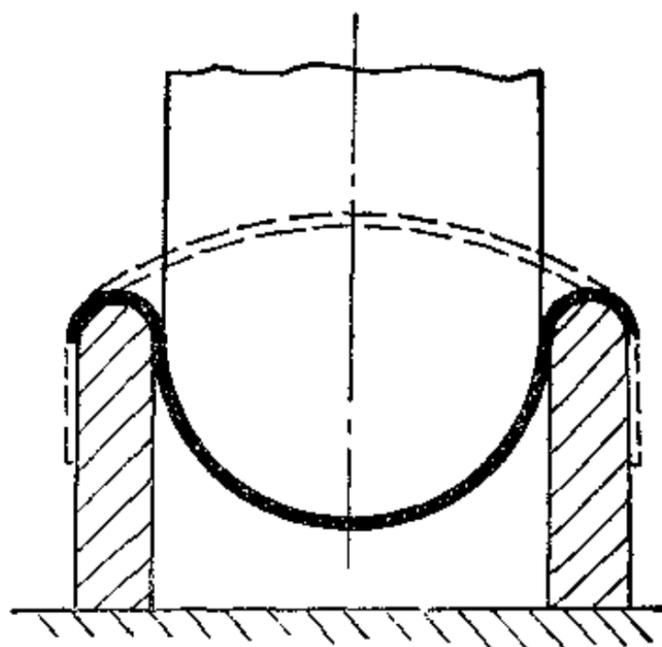


图13-16 曲面零件拉深时的半成品形状

13-4 冲压设备的选择

冲压设备的选择是工艺过程设计中的一项重要内容, 它直接关系到设备的安全和合理的使用, 同时也关系到冲压工艺过程能否顺利地完以及模具的寿命、产品的质量、生产的效

率、成本的高低等一系列重要问题。

首先，要根据所要完成的冲压工艺的性质、生产批量的大小、冲压件的几何尺寸和精度要求等来选定设备的类型。

在中小型的冲裁件、弯曲件或拉深件的生产中，主要应用开式单柱机械压力机。虽然单柱冲床的刚度差，在冲压变形力的作用下床身的变形能够破坏冲裁模的间隙分布，降低模具的寿命或冲裁件的表面质量，可是，由于它提供了极为方便的操作条件和非常容易安装机械化附属装置，以及因为行程小而大幅度地降低传动部分的结构尺寸所引起的成本低廉等特点，使它成为目前中小型冲压设备的主要形式。在这类冲压设备中，具有偏心的行程调节机构，而且在悬臂的轴头上安装连杆的压力机所具有的刚度最差，对冲裁模寿命有非常不利的影响。近来出现的新型开式压力机，在保留便于操作优点的同时，在传动、导向和床身结构方面都做了很大的改进，其精度和刚度有很大的提高和加强，在保证冲压件的质量、减少振动、提高冲模使用寿命等性能方面都有很大的提高。所以在选用中小型冲压设备时应予充分注意。

在大中型冲压件生产中，多用双柱结构形式的机械压力机，其中有一般用途的通用压力机，也有台面较小而刚度大的专用挤压压力机、精压机等等。在大型拉深件的生产中，应尽量选用双动压力机，因为所用模具结构简单，调整方便。双动压机在大量生产中应用相当广泛。

在大量生产或形状复杂零件的大批量生产当中，应尽量选用高速压力机或多工位自动压力机。

在小批量生产当中，尤其是大型厚板冲压件的生产当中，多采用液压机。液压机没有固定的行程，不会因为板材厚度变化而超载，而且在需要很大的施力行程加工时，与机械压力机相比具有明显的优点。但是，液压机的速度小，生产效率低，而且零件的尺寸精度有时因受到操作因素的影响而不十分稳定。

摩擦压力机具有结构简单、造价低廉、不易发生超负荷损坏等特点，所以在小批量生产当中常用来完成弯曲、成形等冲压工作。摩擦压力机的行程不是固定的，在冲压件的校平或校形时不会因为板材厚度的波动而引起设备或模具的超负荷损坏，而且校形精度比较稳定，不受板材厚度变化的影响。但是，摩擦压力机的行程次数较少，生产率低，而且操作也不太方便。

在选用冲压设备时，应充分注意到冲床的精度和刚度。机械压力机的刚度由床身刚度、传动刚度和导向刚度三部分组成。只有压力机的刚度足够时，其静态精度才能在受载荷作用的条件下保持下来。否则其静态精度（空载时测量所得）也就失去意义。当压力机的刚度较差时，不仅冲裁模间隙的均匀分布会遭受破坏，而且在冲裁终了时压力机各受力部件的突然卸载会使凸模以很高的速度冲入凹模刃口内较大的深度，同时模具的间隙也跟着迅速的变化。这些现象都能降低模具的寿命和冲裁件的质量。因此，在薄板零件冲裁时要尽量选用精度高而刚度大的冲床。

校正弯曲、校平和校形等类冲压工艺所用的机械压力机应该具有较大的刚度，以便获得较高的冲压件的尺寸精度。提高机械压力机的结构刚度和传动刚度，都可以降低板材性能的波动，操作因素和前一道工序的不稳定等因素引起的成品零件的尺寸偏差。但是，只有采用厚度公差较小的高精度板材时，才有可能使用精度高而刚度大的冲床，否则板材厚度的波动能够引起冲压变形力的急剧增大，这时过大的设备刚度反而容易造成模具或设备的超负荷损

坏。

在冲压设备类型选定之后，应该进一步根据冲压件的尺寸、模具尺寸和变形力确定设备的规格。

1. 压机的行程大小，应该能保证成形零件的取出与毛坯的放进，例如拉深所用压机的行程，至少应大于成品零件高度的两倍以上。

2. 压机工作台面的尺寸应大于冲模的平面尺寸，还要留有安装固定的余地，但过大的工作台上安装小尺寸的冲模时，工作台的受力条件也是不利的。

3. 所选定的冲床的封闭高度应与冲模的封闭高度相适应。冲模的封闭高度，系指冲压加工完成时冲模的高度，其数值应该介于冲床的最大封闭高度与最小封闭高度之间。按封闭高度选设备时，还要考虑因修磨引起的冲模封闭高度的减小值。

4. 当进行冲裁等冲压加工时，由于其施力行程较小，近于板材的厚度，所以可以按冲压过程中作用于冲床滑块上所有力的总和并按其最大值 P_{max} 选取设备。考虑到板材的机械性能、厚度以及操作等因素的波动可能引起的变形力的增大，通常取设备的名义吨位比 P_{max} 大 10~20%。在某些特殊情况下，例如由于设备的刚度不足而不能保证冲压件的尺寸精度或者使模具寿命降低很多时，也可以取设备的吨位为 $2P_{max}$ 。

P_{max} 是进行冲压加工时作用于滑块上力的总和，包括有冲压变形力、推件力、卸料力、弹簧压缩力、气垫压缩力等等。当进行拉深等冲压加工或者采用复合模成形时，施力行程较大，而且最大作用力发生的时间可能不与冲床滑块下死点位置相重合，这时便不能单纯地按最大作用力 P_{max} 与冲床吨位之间的关系选择设备，而应该以保证在冲床全部行程里为完成冲压加工所需的滑块作用力都不能超出冲床的允许压力与行程关系曲线的范围为条件进行选择。图 13-17 中的曲线 a 与 b 是曲轴压力机的典型许用压力—行程曲线。从图中可以看出：在不

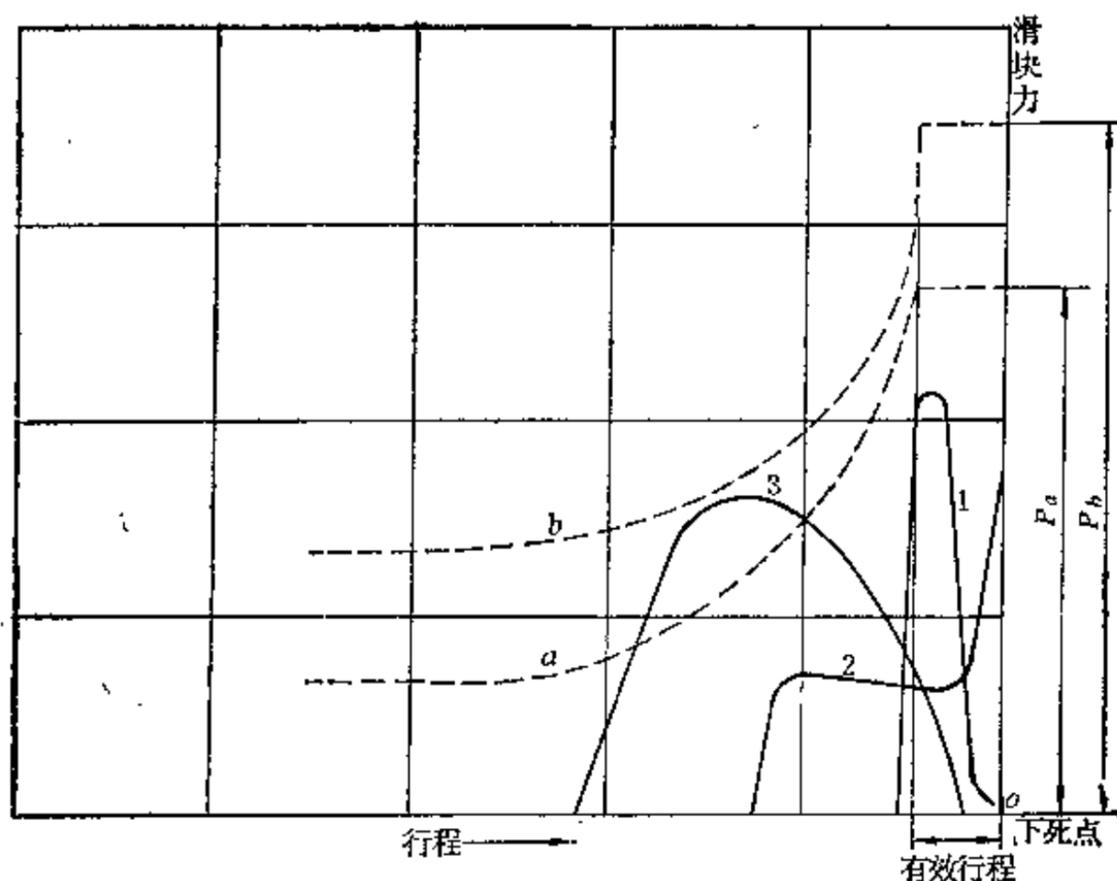


图13-17 曲轴压力机的许用压力—行程曲线

1—冲裁 2—弯曲 3—拉深

同的滑块行程位置上冲床所能给出的作用力是变化的，而且只有在下死点附近的位置上压力机才能给出名义吨位的压力。一般的通用曲轴压机的有效工作行程仅占滑块行程的5~8%左右。因此，在完成拉深、落料拉深复合工序、以及其他工作行程较大的冲压工作时，必须保证在全部冲压行程里滑块所应给出的力（包括变形力、冲裁力、卸料力、气垫或弹簧垫的作用力等）不要超过图中的压力—行程曲线。

图13-17中，曲线1、2与3分别代表典型的冲裁、弯曲和拉深变形力与行程的关系曲线。由图中的对比可以看出，在进行冲裁（曲线1）或弯曲（曲线2）时，选用名义吨位为 P_0 的压力机，完全可以保证在全部行程里的变形力都低于压力机的许用压力，所以是合理的。但是，名义吨位为 P_0 的压力机，虽然它的名义吨位远大于拉深变形（曲线3）所需的最大力，但在全部行程中，许用压力—行程曲线不能全部覆盖变形力—行程曲线。所以，在这种情况下必须选用名义吨位为 P_0 的压力机。

第十四章 冲压生产的发展方向

冲压加工的许多特有的优越性，决定它在现代各工业部门占据着十分重要的地位，而且在近期也可预见到它会取得较为迅速的进展。由于现代工业产品生产日趋复杂与多样化，而产品的性能和质量也在不断地提高，所以不同的工业部门对冲压技术的发展也提出了不同的要求。但是，从冲压生产技术发展的总体趋向出发，可以概括地提出以下几个方面，做为今后应该着重解决的技术发展方向。

一、冲压加工基本理论工作方面

加强冲压变形基本理论方面的研究工作是提高冲压技术水平的根本措施。但是，对什么是冲压变形的基本理论和如何有效地开展基本理论研究这两个根本问题，必须有正确的认识才能取得实际效果。冲压变形属于大变形性质，这时板料的力学性能不仅受变形大小、变形速度和变形温度的影响，而且还决定于变形的全部过程中这些因素的变化。目前对这样复杂的变形过程和其中各种因素之间的复杂关系，还不可能用数学的方法做出比较接近实际情况的分析；另外，由于在冲压过程中毛坯的形状、尺寸和厚度等都在随时变化，也由于现在对冲压过程中很多实际因素的作用和冲压变形时毛坯的真实受力条件与变形变化的实际情况的认识，还不够十分清楚和准确。在这种条件下就企图用所谓严密而精确的数学分析方法去解决冲压生产中的各种实际问题，至少就当前的理论发展水平（包括现在可能运用电子计算机克服运算中的一些困难）来看，可能在短时间内不会收到显著的实际效果。对当前进行的，目的仅仅是为了提高计算精度，而在原有的数学分析方法的基础上，更多地或更仔细地考虑某些影响因素或仅在数学分析方法上做一些局部改进的研究工作，已经引起了一些争论。忽视对冲压变形的真实情况的认识和研究，而只着眼于数学分析方法的改善，其结果反而可能在某种程度上损害了自己的实用价值。基于上述道理，在冲压变形的基础理论研究方面应该着重考虑开展以下几项工作：

1. 加强和改进变形力学理论分析方法的研究，应该根据冲压变形的实际情况，对其不适应的方面进行适当的改造，提供正确、实用、方便的计算方法，使它在解决实际问题方面更有效地发挥作用。解决实际问题的重点应该是确定主要的工艺参数和冲模工作部分的形状与尺寸，提高冲压件的质量等。由于冲压变形的规律性较强（与锻造相比），大部分变形可以简化为平面应力状态，认为垂直板面方向的应力与应变的分布都是不变的，所以上述的要求是完全可能做到的。

2. 用实验与分析相结合的方法研究各种冲压变形都遵循的共同规律和每一种冲压变形的规律，如毛坯的形状在变形中变化的规律、毛坯的真实受力情况及其在变形中变化的规律、毛坯与模具相互作用的规律、冲压成形极限及各种因素影响的规律等，为分析和解决冲压变形中出现的各种实际问题提供理论依据。有许多实例可以说明这项工作的实效，例如在掌握了双角弯曲时模具与毛坯之间相互作用的规律和毛坯各部分之间变形相互影响规律的基础上，提出了利用调节反向顶出压力以提高弯曲件几何尺寸精度（角度）的办法，在生产中已公认是很有实效的措施。又如在掌握了冲压过程中毛坯各部分之间的相互作用关系的规

律之后,就有可能提出确定冲压成形工序先后顺序的方法,否定了过去所谓“先内后外”或“先外后内”的说法,为冲压工艺过程的制定提供了理论上的依据。

3. 在前项工作的基础上进一步建立尽可能接近真实情况的数学模型,去除影响不大的次要因素,用适当的数学分析方法,做出近似的可以满足实用精度要求的计算。

4. 从冲压变形理论、板材的组织与性能、板材的冶炼和轧制等三个方面,进行综合性的材料冲压性能方面的理论研究工作。过去一段时间内,我国对这个问题的重视不够,不能向冲压生产工厂提供冲压性能良好的板材,造成了严重的浪费。另外,也由于这个原因,无法制成本来可以用冲压方法加工成形的零件。有时也常因材料的冲压性能差而需要增加冲压工序,引起不应有的浪费。目前先进的工业国家都非常重视板材冲压性能的研究工作,并在这个基础上出现了许多冲压性能优异的材料,如近期研制成的低屈服点钢板、添加少量钛的优质冲压钢板等都是提高冲压技术水平的有利条件。

二、冲压工艺方面

研究和推广可以提高劳动生产率、产品质量和降低成本的各种冲压新工艺方法,是提高冲压技术水平的重要措施。

精密冲裁是提高冲裁件质量的有效方法。精密冲裁的出现和发展使冲压加工的范围有了更大的扩展,有相当一部分过去用切削加工的零件都已改为用精密冲裁方法。现在,精密冲裁加工零件的厚度已达 25 毫米。为了适应用精密冲裁法加工大尺寸厚板精密零件的需要,现在生产中已在使用的 2500 吨 (2500×10^4 牛) 的精密冲裁压力机。在提高冲裁件表面质量与精度方面,除应继续加强用强力齿形压边的精密冲裁方法外,还有必要在研究冲裁分离基本理论的基础上开展其他精密冲裁方法的研究工作,寻求在所用设备和模具等都更为简便的新方法。

用气体、液体、橡胶、聚氨脂或软金属等进行的软模成形,在各种复杂零件成形时或在某些特定条件下,具有明显的经济效果。我国很多工厂都已开展了这方面的研究工作。为了更好地发挥这些方法的效果,应在变形机理、确定合理的工艺参数和提高成形效能等方面加强研究工作。

高速成形中的爆炸成形已开始逐渐向成熟的阶段过渡,以后应在控制成形过程和过渡到正常的室内生产方面加强工作。也应考虑在我国现有的千吨级爆炸压机和数十吨米的爆炸锤等设备的实验与使用的基础上,探索更大吨位爆炸成形设备的设计与使用问题。电液成形与电磁成形都是可能做到准确控制的高速成形方法,其发展也应予以重视。

超塑性成形可能是有非常美好前景的加工方法。由于它具有高塑性和低抗力的特点,在成形时不需要大功率的设备和坚固的模具,所以对复杂形状零件和大型零件的冲压成形,比一般冲压方法具有突出的优越性。目前已有多种金属(或合金)具有超塑性加工的可能性,其中包括锌铝合金、铝合金、钛合金、镁合金、铜合金和某些黑色金属。虽然目前超塑性成形方法还受到生产率低、变形过程的条件较为严格等不利因素的束缚,暂时还不能普遍的应用,但是随着技术的进步,将来这个新生的成形方法说不定也可能使冲压生产面貌发生惊人的变化。

三、冲模方面

冲模是实现冲压加工的基本条件,它直接反映冲压技术水平的高低。在这方面应加强适用于复杂形状零件的多工位连续冲模、适用于小批量生产的各种简易冲模、适用于单一品种零件大量生产的自动化专用冲模等的研究工作。应加强冲模在工作中真实受力情况的研究,从

变形规律出发进行毛坯与冲模之间相互作用的研究等，为正确地进行模具设计提供目前还十分缺乏的依据。为了提高模具的寿命，防止零件在冲压加工中的划伤，提高冲压件的表面质量，也必须加强冲压变形条件下的摩擦、润滑机理方面的研究工作以及模具材料、热处理和表面处理的研究工作。

在模具方面还应加强模具结构与零部件的标准化工作，降低模具设计与制造的复杂程度，减少劳动消耗与成本，缩短生产准备周期，使冲压加工的优越性得以充分地发挥。为了更有效地解决这个问题，应该积极地开展冲模的计算机辅助设计与计算机辅助制造方面的研究与推广工作。

为了提高在多品种小批量生产条件下采用冲压加工的经济效果，应加强各种成本低廉的简易冲模的研究工作，提高其工艺性能，简化制造过程，降低材料消耗是主要的工作方向。另外，采用成组加工方法也是提高多品种小批量冲压生产经济效果的有效方法。采用成组加工工艺时，首先应针对各个工厂里生产的冲压件的特点（几何形状、厚度、尺寸、加工方法等）对冲压件进行合理的分类。在把零件的冲压加工内容进行科学分解的基础上，把不同零件上相同的加工内容集中起来，等于加大了冲压生产的批量，所以可以采用成批生产的方式来生产品种多而批量不大的零件。

四、冲压生产自动化方面

冲压加工的自动化是提高劳动生产率和改善劳动条件的有效措施。由于冲压加工的操作简单，毛坯和半成品的形状比较规则，所以容易实现自动化。在这方面应加强适用于各种条件的自动化操作的通用装置、检测装置等的研究。其中包括带料与条料用的自动送料装置、送料位置检测装置、加工结果检测装置等。

此外，还应该加强由电子计算机控制的全自动冲压加工系统的研制与性能的改进工作。这种自动加工系统包括有：自动快换模机构、模具自动夹紧机构、材料自动选择与供给装置、送料长度自动调节装置、材料导向自动调节装置、成品容器自动更换装置、误送料检出装置、控制计算机等。计算机可以记忆2~3个冲压件的加工规程。当加工的冲压件的数目达到预定的数量时，压力机可以自动停车，自动更换与夹紧模具，自动更换条料，自动调整封闭高度、送料距离、导向宽度等。在调整工作完成后自动开动压力机进行加工。全部换模调整时间只需2~3分钟。

五、冲压设备方面

性能良好的设备是提高冲压生产技术的根本条件。我国现有冲压设备的数量很大，但其中主要是通用压力机，而且有相当一部分压力机的结构和工艺性能都比较差，影响冲压工艺水平的提高。更为重要的是，全国还有相当数量的工厂仍按老样子继续制造这样的冲压设备，用来武装冲压生产单位。每一台冲压设备的使用年限是很长的，所以由于设备的性能差而使冲模的寿命降低或使生产速度无法提高等所造成的损失，在几十年内积累的结果是非常可观的。因此，必须加强通用冲压设备对工艺要求适应问题的研究工作，改进冲压设备的结构，提高其工艺性能，保证合理而必要的结构刚度、传动刚度和导向刚度与精度，降低卸载冲击对冲压件质量、冲模寿命和设备本身造成的不良影响，向生产部门提供大量高质量和高效率的冲压设备。

发展高速压力机是提高冲压生产水平的一个重要方面。高速压力机的概念是相对的，没有严格固定的标准。由于设备的吨位和技术发展水平的不同，可称为高速压力机的标准也不

一样，并且也在不断地提高。当然每分钟内压力机的行程次数越多，生产率也越高，但是，也不能单纯地追求压力机的高速度，因为压力机速度的提高受到进出料、废料处理、模具寿命、噪音与振动等问题的限制。随着技术的进步，这些问题都不断地被克服，所以压力机的速度也在不断地提高。虽然现在已经有行程次数为 1600~2000 次/分或更高速可供实用的压力机，但从当前的技术水平出发和对各种因素综合考虑的结果，普遍地认为小型高速压力机的经济速度是 600~800 次/分。当前在我国冲压生产部门里，高速压力机的数量和所占的比例都非常小，和先进水平差距较大。为了解决这个问题，应该确定一定数量的专业工厂负责研制和生产这种设备。

多工位压力机可以同时完成多道工序，加工形状较为复杂的零件，它是一种高效率的自动化冲压设备，近年来颇受重视，发展较快。多工位压力机应向大型化、通用化和高速化发展。国外实用的大型多工位压力机已达到 2000~3000 吨的水平，加工带料宽度达到 1.5 米，主要用于加工大量生产的汽车零件，如油箱和曲轴箱等。为了适应中小型复杂零件加工的需要，工位的数目也在逐渐加多，现在已经有用十多个工位加工双重壁的风扇皮带轮（带叶片）等形状极为复杂零件的实例。近期在生产中已开始使用加工能力很强的三维多工位压力机。三维多工位压力机的自动送料机构的运动方向有三个，它是在原有的多工位压力机只在水平面内做夹紧与放松、前进与后退两个方向上运动的基础上又增加了在垂直方向上提升与放下毛坯的第三个方向上的运动，使加工复杂零件的能力又提高到一个新的高度。

降低冲压设备的振动与噪音是改善冲压生产的劳动条件、消除公害的根本措施。冲压设备工作时形成的振动与噪音较大，尤其是在冲裁结束时，由冲裁力引起的床身和传动系统的弹性变形势能，在板材发生破坏的瞬间，在极短的时间内突然地释放出来，使床身和与传动系统有关的各部件产生相当强烈的振动（可能达到 10~20 g 的程度），形成所谓卸载冲击。卸载冲击不仅能够造成设备的振动与噪音，而且能够引起上模在发生横向振动的同时以很高的加速度冲入下模，造成冲模的挤伤或过快的磨损。当前在降低冲压设备的振动与噪音方面采取的主要措施是：

1. 提高压力机床身、传动部分和导向部分的刚度，减少在加载时储存在上述各构件中的弹性变形势能。
2. 采用弹性防振基础，控制振动的外传。
3. 采用局部隔音屏，把产生噪音的部位屏蔽起来，或采用整体的隔音室把冲压设备全部隔离、防止噪音外传。

附录 工艺计算举例

〔例1〕 计算图1所示零件用冲裁凸模与凹模刃口的尺寸(计算单位为毫米)。图1所示的零件,其外形轮廓是落料,内孔是冲孔。按冲压手册选取间隙值为

$$Z_{\max} = 0.63$$

$$Z_{\min} = 0.45$$

冲模制成后,冲裁间隙的允许波动范围是

$$Z_{\max} - Z_{\min} = 0.63 - 0.45 = 0.18$$

本零件属于规则形状(圆形),所以凸模与凹模的制造公差可以取为

落料: $\delta_p = -0.02, \quad \delta_d = +0.03$

冲孔: $\delta_p = -0.02, \quad \delta_d = +0.02$

落料时可取 $x = 0.7$, 冲孔时可取 $x = 0.6$, 根据第三章有关公式得落料时的凹模刃口的尺寸 D_d 及凸模刃口的尺寸 D_p 为:

$$D_d = (40.2 - 0.7 \times 0.34)^{+0.03} = 39.96^{+0.03}$$

$$D_p = (39.96 - 0.45)_{-0.02} = 39.51_{-0.02}$$

利用第三章有关公式可得冲孔时凸模刃口的尺寸 d_p 与凹模刃口的尺寸 d_d 为

$$d_p = (13.9 + 0.6 \times 0.24)_{-0.02} = 14.04_{-0.02}$$

$$d_d = (14.04 + 0.45)^{+0.02} = 14.49^{+0.02}$$

检查模具制成后的间隙波动范围,其值为

落料时 $\delta_d + \delta_p = 0.03 + 0.02 = 0.05 < 0.18$

冲孔时 $\delta_p + \delta_d = 0.02 + 0.02 = 0.04 < 0.18$

计算结果表明,新冲模制成后,其间隙的波动范围处于允许范围之内,说明上述计算结果是可用的。

若采用独立法加工,则在凸模和凹模图纸上各自标上 D_p 、 d_p 和 D_d 、 d_d 等尺寸;若采用配作法,则只标基准件尺寸 D_d 、 d_p , 而另一个刃口则标明按最小间隙 $Z_{\min} = 0.45$ 配作。

图2所示冲裁件在凸模与凹模刃口尺寸的计算时,带半圆弧槽口的凹进部分应当作为冲孔计算,而其余外形尺寸则按落料确定刃口的尺寸。

〔例2〕 计算图3所示拉深件的工序尺寸(按料厚中心线计算,计算单位为毫米)。

计算步骤:

(1) 当 $d_r = 76$, $\frac{d_r}{d} = \frac{76}{26} = 2.9$ 时,取修边余量为 $\delta = 2$ 。

(2) 按公式 7-30 计算毛坯直径 D_0 。

$$D_0 = \sqrt{d_r^2 + 4dh - 3.44dR} = \sqrt{80^2 + 4 \times 26 \times 58 - 3.44 \times 26 \times 4}$$
$$= \sqrt{12074.2} \approx 110$$

(3) 确定一次拉深成功的可能性。

零件的尺寸关系为

零件的底面积为 $F_3 + F_4$;

底部四个圆角构成半球表面积为 F_5 。

$$F_1 = 4 \times [B - (2r + 1)] \times [h - (r + t)] \\ = 4 \times [45 - 7] \times [73.5 - 3.5] = 10640$$

$$F_2 = 2\pi(r + t)[h - (r + t)] = 2\pi \times 3.5 \times 70 = 1539.4$$

$$F_3 = [B - 2(r + t)] \times A = (45 - 7) \times 45 = 1710$$

$$F_4 = 2[B - 2(r + t)](r + t) = 2 \times 38 \times 3.5 = 266$$

$$F_5 = 2\pi(r + t)^2 = 2\pi \times 3.5^2 = 76.97$$

总面积为:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 = 14232.4$$

采用平板圆形毛坯, 其直径为:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 14232.4}{\pi}} = 134.6$$

(2) 检查能否一次拉深成形

由已知尺寸得 $\frac{A}{B} = 1$; $\frac{r}{B} = 0.07$; $\frac{t}{B} = 0.01$ 。根据表 7-13 选取 $\frac{H}{r} = 10$, 故得一次拉深的极限高度为 $H = 10 \times 3 = 30$ 。因为 $h > H$, 说明不能一次成形, 需进行多次拉深。

(3) 求 $n - 1$ 道半成品形状与尺寸

进行多次拉深的工艺计算时, 应由 $n - 1$ 道工序向回推算。确定本零件工艺方案为 $n - 1$ 道以前各拉深工序采用圆筒形工件的拉深工艺。即由平板圆形毛坯逐次拉深成不同直径的圆筒形, 最后一道工序是由直径为 d_{n-1} 的圆筒形半成品拉深成方盒形件。

选取 $\delta = 3 \times 0.2 = 0.6$

根据 (7-35) 式 $d_{n-1} = 1.41B - 0.82r + 2\delta$ 可得:

$$d_{n-1} = 1.41 \times 44 - 0.82 \times 3 + 2 \times 0.6 = 60.78$$

根据公式 $D_0 = \sqrt{d_1^2 + 2\pi r d_1 + 8r^2 + 4d_2 h}$ 计算半成品高度 h_{n-1}

式中各尺寸为:

$$r = 3.6; d_1 = 60.78 - 2 \times 3.6 = 53.68;$$

$$d_2 = 60.78; D_0 = 134.6。$$

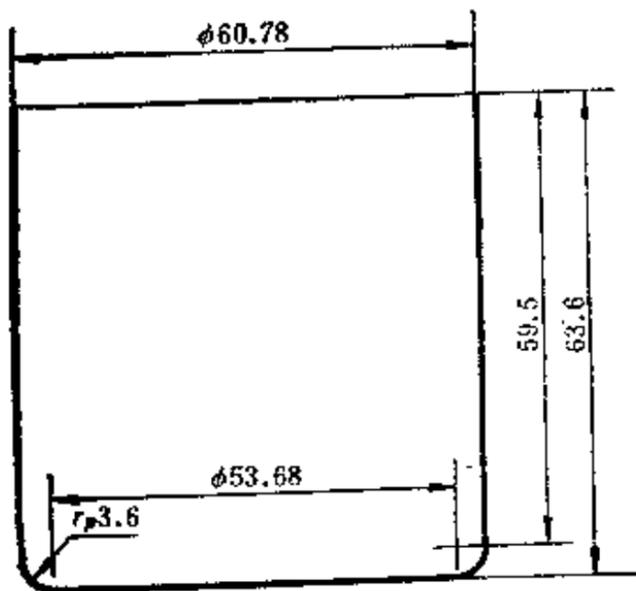


图5 $n - 1$ 道半成品形状与尺寸

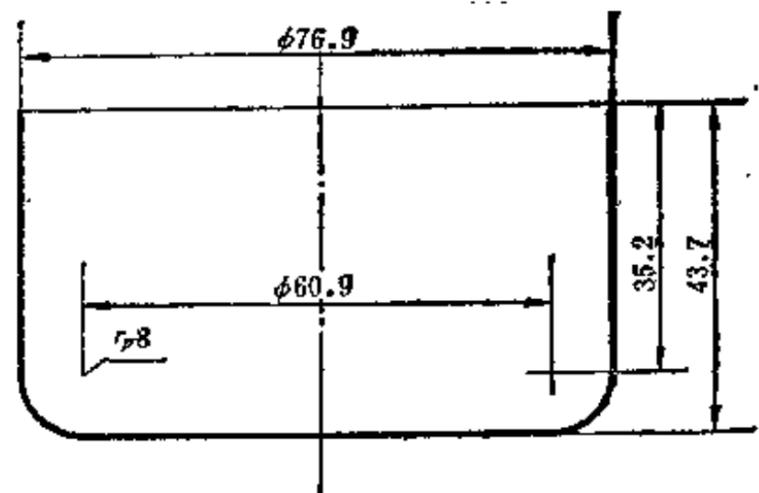


图6 $n - 2$ 道半成品形状与尺寸

代入上式得:

$$134.6^2 = 53.68^2 + 2\pi \times 3.6 \times 53.68 + 8 \times 3.6^2 + 4 \times 60.78h$$

则 $h = 59.5$

因此 $h_{n-1} = 59.5 + r + t = 59.5 + 3.6 + 0.5 = 63.6$

$n - 1$ 道半成品形状与尺寸示于图 5

(4) 检查能否由平板毛坯 D_0 直接拉深成直径为 d_{n-1} 的筒形件

选取筒形件第一次拉深的极限拉深系数 $m_1 = 0.56$, $m'_1 = \frac{d_{n-1}}{D_0} = \frac{60.78}{134.6} = 0.45 < m_1$, 所以

不能由直径为 D_0 的毛坯直接拉深成 d_{n-1} , 还需要进行 $n - 2$ 道半成品尺寸的计算。

(5) 计算 $n - 2$ 道半成品的尺寸

取拉深系数 $m = 0.79$, $d_{n-2} = \frac{d_{n-1}}{m} = \frac{60.78}{0.79} = 76.9$, 取底部圆角半径 $r = 8$ 。

根据公式 $D_0 = \sqrt{d_1^2 + 2\pi r d_1 + 8r^2 + 4d_1 h}$ 计算半成品的高度

上式中的各尺寸为

$$d_2 = d_{n-2} = 76.9; \quad d_1 = 76.9 - 2r = 76.9 - 16 = 60.9;$$

$$r = 8$$

代入前式得

$$134.6^2 = 60.9^2 + 2\pi \times 8 \times 60.9 + 8^2 + 4 \times 76.9h$$

则 $h = 35.2$

$$h_{n-2} = 35.2 + 8.5 = 43.7$$

$n - 2$ 道半成品形状与尺寸示于图 6

(6) 检查能否由平板毛坯 D_0 直接拉深成直径为 d_{n-2} 的筒形件

因为 $m'_1 = \frac{d_{n-2}}{D_0} = \frac{76.9}{134.6} = 0.57 > m_1$,

所以可以用直径为 D_0 的平板毛坯直接拉深成直径为 d_{n-2} 的筒形件。

(7) 根据上面的计算, 画出方盒形件各道拉深工序尺寸图 (图 7)

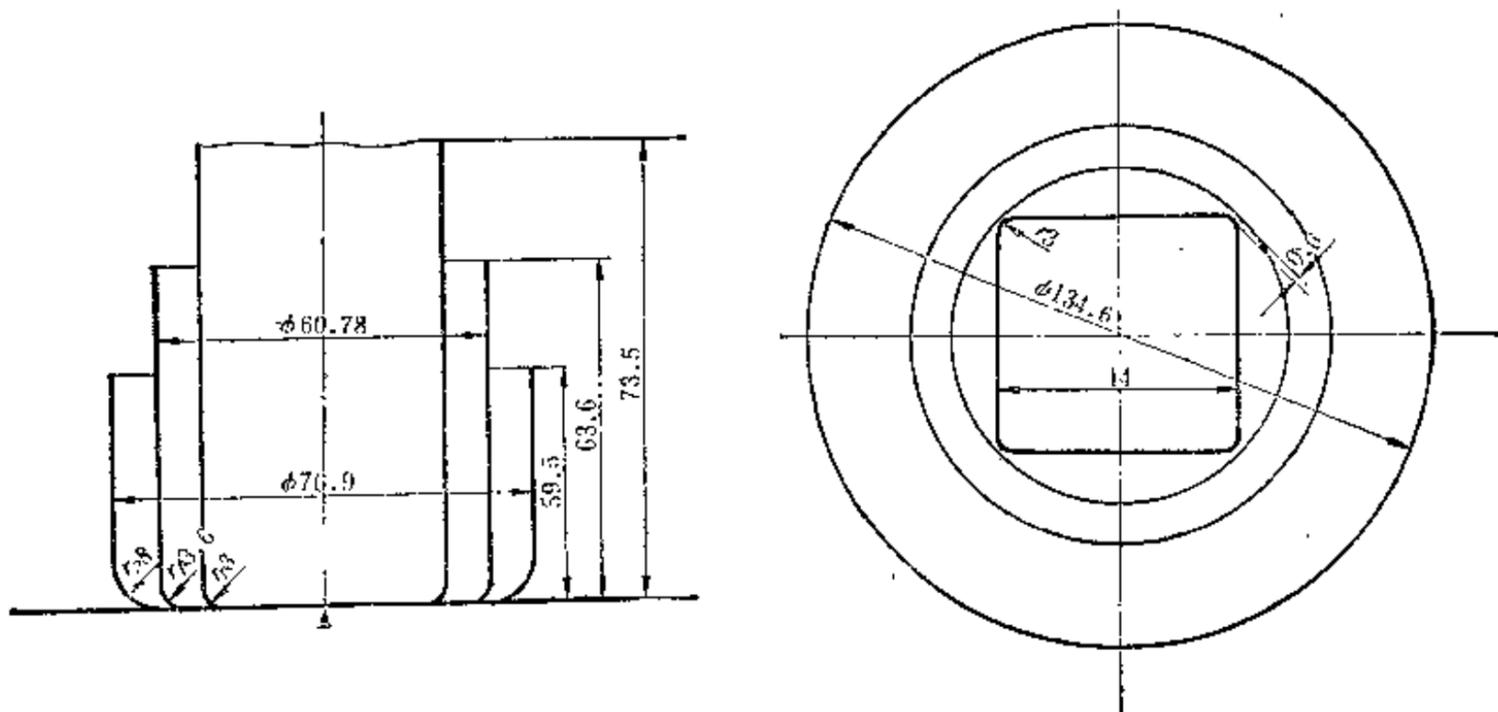


图 7 方盒形件三次拉深工序图

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 高等学校试用教材 冲压工艺学

作者 =

页数 = 232

SS号 = 10286402

出版日期 =

封面页	
书名页	
版权页	
前言页	
目录页	
第一章	概述
第二章	冲压变形基础
	2 - 1 冲压变形中的应力与变形特点
	2 - 2 硬化与硬化曲线
	2 - 3 各种冲压成形方法的力学特点与分类
	2 - 4 冲压成形中的变形趋向性及其控制
	2 - 5 板料的冲压性能及试验方法
第三章	冲裁
	3 - 1 冲裁过程的分析
	3 - 2 冲裁模间隙
	3 - 3 凸模与凹模刃口尺寸的确定
	3 - 4 冲裁力和功
	3 - 5 精密冲裁
	3 - 6 整修
	3 - 7 聚氨酯橡胶冲裁
第四章	冲裁模
	4 - 1 概述
	4 - 2 冲裁模的基本型式与构造
	4 - 3 冲裁模主要部件与零件的构造
	4 - 4 冲裁模设计要点
第五章	弯曲
	5 - 1 概述
	5 - 2 弯曲时的应力分析与弯矩的计算
	5 - 3 弯曲时出弹复
	5 - 4 提高弯曲件精度的方法
	5 - 5 最小弯曲半径
	5 - 6 弯曲毛坯长度的确定
	5 - 7 弯曲力的计算
	5 - 8 弯曲模
第六章	胀形
	6 - 1 胀形的特点
	6 - 2 平板毛坯的局部胀形
	6 - 3 圆柱形空心毛坯的胀形
第七章	直壁形状零件的拉深
	7 - 1 拉深工艺的特点
	7 - 2 圆筒形零件拉深时的变形特点
	7 - 3 圆筒形零件的拉深系数与拉深次数的确定
	7 - 4 圆筒形零件拉深时的起皱及其防止措施
	7 - 5 圆筒形零件用拉深模工作部分尺寸的确定
	7 - 6 拉深件毛坯尺寸的确定
	7 - 7 反拉深
	7 - 8 带法兰边零件的拉深方法
	7 - 9 阶梯形零件的拉深方法
	7 - 10 盒形零件的拉深方法
	7 - 11 其它非旋转体直壁零件的拉深方法
第八章	复杂曲面形状零件的拉深
	8 - 1 曲面形状零件拉深的特点
	8 - 2 球面形状零件的拉深方法
	8 - 3 锥形零件的拉深方法
	8 - 4 非旋转体曲面形状零件的拉深特点
第九章	翻边
	9 - 1 伸长类翻边
	9 - 2 压缩类翻边
第十章	校形工艺
	10 - 1 平板零件的校平
	10 - 2 空间形状零件的校形
第十一章	其它冲压方法

1 1 - 1	软模成形
1 1 - 2	差温拉深法
1 1 - 3	加径向压力的拉深法
1 1 - 8	变薄拉深
1 1 - 9	旋压
第十二章	冷挤压
1 2 - 1	概述
1 2 - 2	冷挤压力的计算
1 2 - 3	冷挤压模具
1 2 - 4	冷挤压工艺过程设计的几个问题
第十三章	冲压工艺过程设计
1 3 - 1	冲压件的工艺性
1 3 - 2	确定冲压加工方案、工序数目与顺序的几项原则
1 3 - 3	冲压工序间半成品的形状与尺寸的确定原则
1 3 - 4	冲压设备的选择
第十四章	冲压生产的发展方向
附录	工艺计算举例
附录页	