

高等学校教学用书

工程材料

(第二版)

单丽云 倪宏昕 傅仁利 编



**GONGCHENG
CAILIAO**

中国矿业大学出版社

责任编辑 朱守昌
封面设计 肖新生

ISBN 7-81070-020-0



ISBN 7-81070-020-0 / TG-1

定价：13.80 元

648

713.3

S27

高等学校教学用书

工 程 材 料

单丽云 倪宏昕 傅仁利 编



A1033366

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书共分七章,主要内容包括金属学基础、合金相图、钢的热处理基本原理和工艺方法、在机械设计和制造中常用的结构钢及其选用、除结构钢外的其它金属材料,鉴于非金属材料应用日益增多,对非金属材料的性能及应用也加以适当地介绍。在每章后均有思考题和习题。书后附9个有实用意义的资料附表,并备有与本书配套使用的实验指导书。

本书注意到新材料、新工艺的发展方向。内容简明扼要,理论联系实际,增强了有关实用知识部分,着重培养学生解决实际问题的能力,可作为高等院校机械类各专业和相近专业的教材,也可供有关工程技术人员和工人参考。

责任编辑 朱守昌

责任校对 崔永春

图书在版编目(CIP)数据

工程材料/单丽云,倪宏昕,傅仁利编. —徐州:中国矿业大学出版社,2000.8
ISBN 7-81070-020-0

I. 工… I. ①单… ②倪… ③傅… II. 工程材料 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 32034 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

中国矿业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 11.75 插页 1 字数 289 千字

2000 年 8 月第 2 版 2000 年 8 月第 1 次印刷

印数 1~3000 册 定价 13.80 元

前 言

本教材是为机械类各专业和相近专业编写的,根据教学计划,学时数为 50~60。

在机械设计、制造和维修工作中,都离不开工程材料,为了能够正确合理地使用各种工程材料,必须对其性能、用途以及改变它们性能的工艺方法有所了解,这就是学习本课程的主要目的。

本书在编写过程中力求内容简练、重点突出、理论联系实际,同时又注意到新材料、新工艺的发展方向。本书可作为大专院校、职工大学、业余大学、函授大学机械类各专业和相近专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

全书共分七章,第一章金属学基础,简单叙述金属的晶体结构、结晶过程、塑性变形与再结晶;第二章介绍二元合金相图、铁碳相图;第三章钢的热处理,主要讨论钢的组织转变规律以及如何利用这些规律使其性能向我们所需要的方向转变;第四、第五章分别介绍机械设计和机械制造中常用的结构钢及结构钢的选用,这也是本教材重点讨论的部分;第六章介绍碳素结构钢及合金结构钢以外的其它金属材料。鉴于非金属材料在机械设计和机械制造中应用愈来愈多,本书在第七章中加以介绍。书后附 9 个有实用意义的附表,以供参考。

本教材在原《金属材料及热处理》教材的基础上,加强了工程材料方面的内容,进一步提高了内容的科学性和严密性,但由于编者学识所限,难免出现错误和缺点,敬请广大读者批评指正。

参加本书编写工作的有:中国矿业大学单丽云(第四、五、六章及附表)、傅仁利(第七章)以及彭城大学倪宏昕(第一、二、三章)。全书由中国矿业大学倪振尧教授主审。

在编写过程中得到中国矿业大学材料工程系全体教师及其他兄弟院校的大力支持和帮助,在此深致谢意。

编 者
1999 年 3 月

目 录

第一章 金属学基础	(1)
第一节 金属的晶体结构.....	(1)
第二节 金属的结晶.....	(6)
第三节 金属的塑性变形与再结晶	(10)
思考题与习题	(15)
第二章 合金相图	(17)
第一节 合金的相结构	(17)
第二节 二元合金相图	(18)
第三节 铁碳合金相图	(23)
思考题与习题	(30)
第三章 钢的热处理	(32)
第一节 概述	(32)
第二节 钢的加热转变	(32)
第三节 钢在冷却时的转变	(35)
第四节 钢的退火与正火	(45)
第五节 钢的淬火	(49)
第六节 钢的回火	(59)
第七节 钢的表面淬火	(62)
第八节 钢的化学热处理	(65)
思考题与习题	(70)
第四章 结构钢	(73)
第一节 概述	(73)
第二节 碳及杂质对钢力学性能的影响	(74)
第三节 合金元素对钢的影响	(75)
第四节 结构钢	(80)
思考题与习题	(95)
第五章 结构钢选用	(97)
第一节 力学性能与钢材选用	(97)
第二节 淬透性与钢材选用.....	(102)
第三节 工艺性能与钢材选用.....	(105)
第四节 钢材选用的经济性和灵活性.....	(106)
第五节 典型零件的钢材选择及热处理.....	(107)
思考题与习题.....	(111)
第六章 其它金属材料	(113)
第一节 工具钢.....	(113)
第二节 硬质合金.....	(118)

第三节 特殊性能的钢及合金.....	(120)
第四节 铸铁.....	(124)
第五节 常用有色金属.....	(128)
思考题与习题.....	(136)
第七章 非金属材料.....	(138)
第一节 高分子工程材料.....	(138)
第二节 陶瓷材料.....	(151)
第三节 复合材料.....	(158)
思考题与习题.....	(163)
附录 1 硬度的换算与对照	(165)
附录 2 钢材回火温度与硬度对照表	(167)
附录 3 常用钢材不同截面淬火后的硬度值(HRC)	(168)
附录 4 常用结构钢截面尺寸对力学性能影响	(169)
附录 5 热处理方法代号及在蓝图上的表示方法	(174)
附录 6 根据零件截面大小和对强度 σ_s 的要求选用钢材参考表	(175)
附录 7 钳工及木工工具热处理	(177)
附录 8 我国与其他国家常用钢号对照表	(178)
附录 9 金属材料相对比价表	(182)
参考文献.....	(183)

第一章 金属学基础

第一节 金属的晶体结构

在化学元素周期表中约有四分之三的元素是金属,其余是非金属。工业上使用的金属材料大多数都是固体状态。所有固态金属都是晶体。

一、晶体与非晶体

晶体与非晶体的区别在于内部原子排列方式不同。晶体是指其原子呈规则排列的物质,而在非晶体内部,原子无规则散乱地分布着。

自然界绝大多数固态的无机物都是晶体,例如我们熟悉的雪花、食盐、单晶硅等。只有玻璃、松香、沥青、橡胶、炼钢炉渣等少数物质是非晶体。

由于晶体与非晶体内部结构不同,其性能也不相同。

晶体具有一定的熔点,如纯铁熔点为 1538°C ,冰的熔点为 0°C ,而非晶体则没有固定的熔化温度,是在一个温度范围内熔化。同时,金属晶体具有“各向异性”特性,即晶体内各个方向上具有不同的物理、化学或力学性能。这种现象又叫晶体的“有向性”。如铁单晶体的弹性模量 E ,在某个方向上是 290000 MPa ,而在另一个方向上只有 135000 MPa 。非晶体则是各向同性的。

二、常见金属的晶体结构

各种晶体物质的内部原子按一定规律在空间有规则地紧密堆积在一起,如图 1-1(a)所示。为了便于分析各种晶体中原子排列的规律,用假想的几何线条将各原子的中心连接起来,使之构成一个空间格子。这种用以描述原子在晶体中排列形式的空间格子叫做“晶格”,如图 1-1(b)所示。同种物质由于排列方式的不同,即晶格不同,其性能有很大差异。例如十分坚硬的金刚石和很软的石墨,都是由碳原子组成的,仅仅是晶体结构不同。

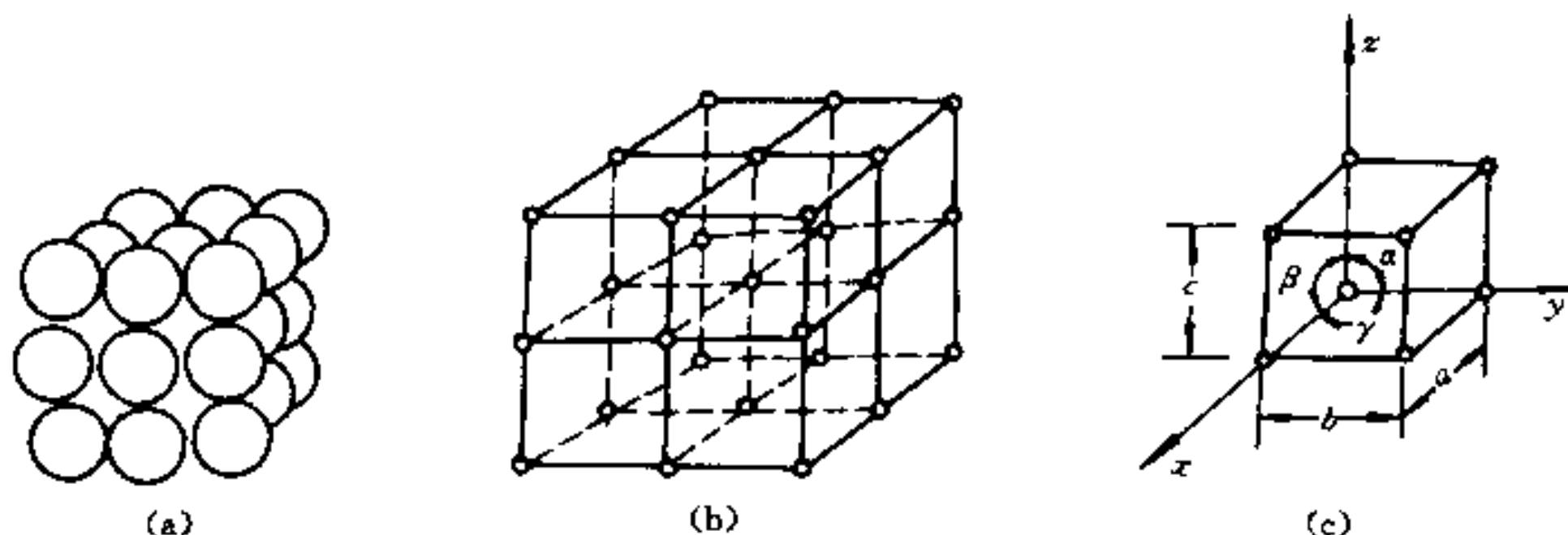


图 1-1 晶体及晶格示意图

(a) 晶体中原子排列;(b) 晶格;(c) 晶胞

用晶格来描述晶体结构是很不方便的。为了简便起见,通常是取晶格中一个能完全代表晶格的最基本单元即“晶胞”来描述晶体结构,如图 1-1(c)所示。晶胞的各边尺寸(a 、 b 、 c)称为“晶格常数”。其大小以埃(\AA)来度量($1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$)。

金属的晶体结构类型很多,其中最常见的晶体结构类型有体心立方晶格、面心立方晶格及密排六方晶格。

1. 体心立方晶格

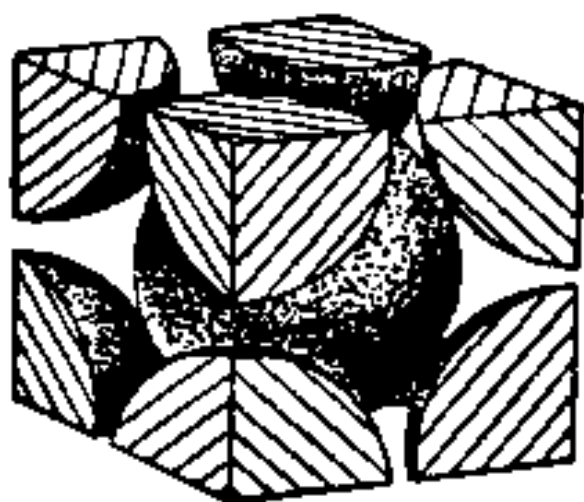
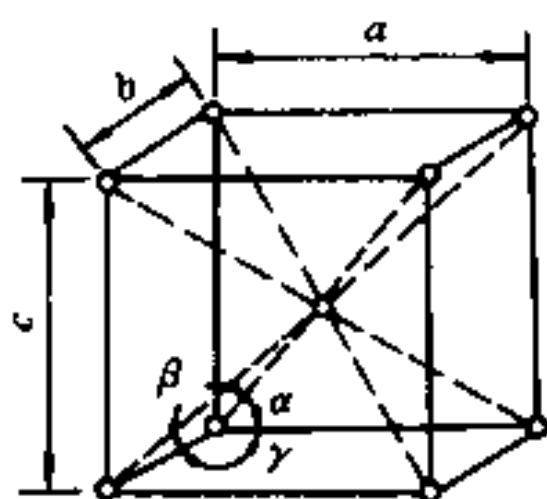


图 1-2 体心立方晶胞

体心立方晶格的晶胞(见图 1-2)是一个立方体,因其晶格常数 $a=b=c$,故通常只用一个常数 a 来表示。其晶胞棱边的夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。在立方体的每个顶角上都有一个原子,共有八个原子。但在顶角上的原子为相邻的八个晶胞所共有,故每个晶胞只占 $1/8$,只有立方体中心的那个原子才完全属于该晶胞所独有,所以实际上每个体心立方晶胞所包含的原子数为: $8\times$

$\frac{1}{8}+1=2$ 个。具有体心立方晶格的金属有 912°C 以下的纯铁($\alpha\text{-Fe}$)、 1394°C 以上的纯铁($\delta\text{-Fe}$)、铬(Cr)、钨(W)、钼(Mo)、钒(V)等。

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞也是一个立方体,如图 1-3 所示。在面心立方晶格的晶胞中,八个顶角上各有一个原子,这个原子同时属于相邻的八个晶胞,在立方体每个面的中心还各有一个原子,这个原子也同时属于与该面相邻的两个晶胞,因此在面心立方晶格的晶胞中包含的原子数为: $8\times\frac{1}{8}+6\times\frac{1}{2}=4$ 个。

具有面心立方晶格的金属有 $912^\circ\text{C}\sim 1394^\circ\text{C}$ 之间的纯铁($\gamma\text{-Fe}$)、铜(Cu)、铝(Al)、银(Ag)、镍(Ni)、铅(Pb)等。

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞形状如图 1-4 所示。用 a 、 c 两个晶格常数表示。 a 是六方底面的边长, c 是两底面间的高度。只有当 $c/a=1.633$ 时,晶格内的原子才是真正密集地排列。通常的密排六方晶格的金属 c/a 之值在 $1.57\sim 1.64$ 之间,个别金属如锌、镉等稍大。

在密排六方晶格的一个晶胞中,每个顶角上的原子同时属于相邻的六个晶胞,上下两个六方面中心的原子同时属于相邻的两个晶胞,面在两个六方面之间的三个原子为该晶胞所独有。因此,在一个密排六方晶格的晶胞中所含的原子数为: $6\times\frac{1}{6}\times 2+2\times\frac{1}{2}+3=6$ 个。具有密排六方晶格的金属

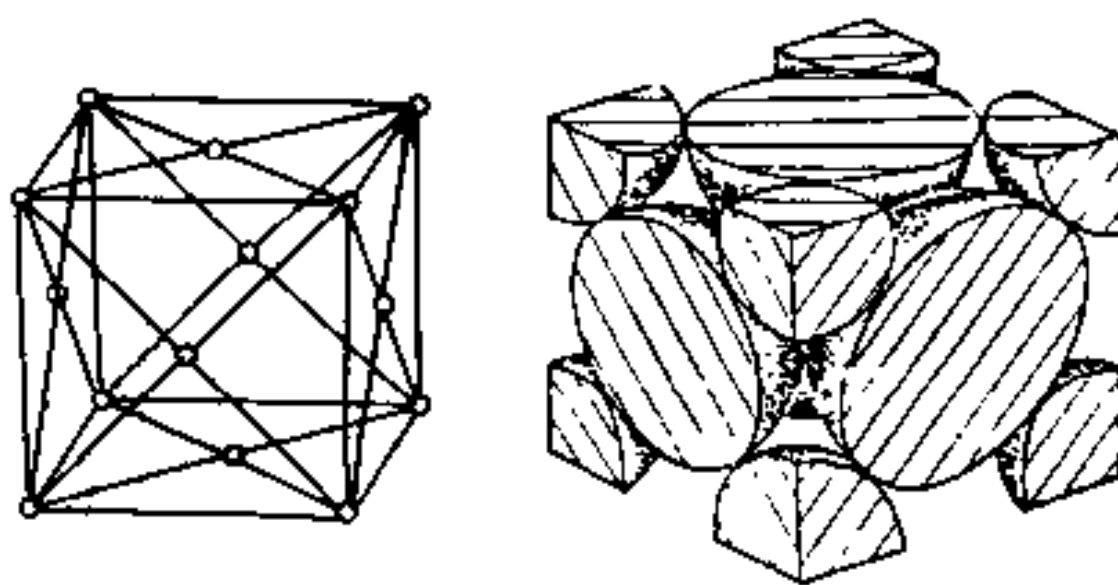


图 1-3 面心立方晶胞

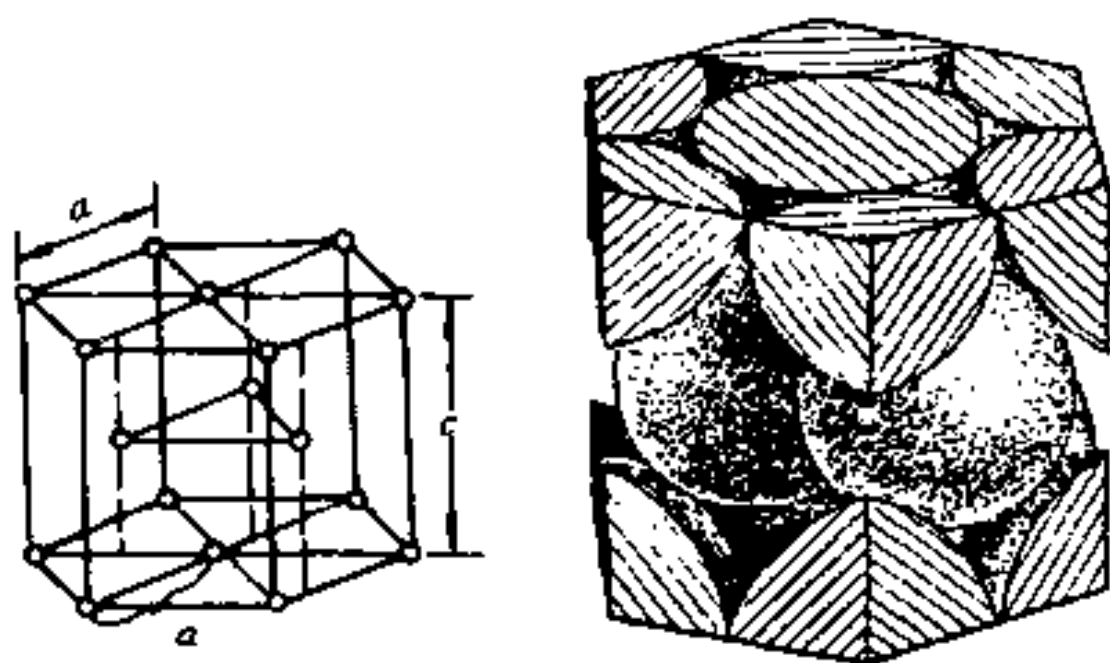


图 1-4 密排六方晶胞

有：镁(Mg)、锌(Zn)、铍(Be)、镉(Cd)及室温下的钛(Ti)等。

三、金属的同素异构转变

固态下的某些金属，如铁(Fe)、钴(Co)、钛(Ti)、锰(Mn)、锡(Sn)等在不同温度(或压力)时，具有不同的晶体结构。金属的这种性质，称为同素异构现象。当外界条件变化时，金属从一种晶体结构转变为另一种晶体结构的过程，称为同素异构转变。由同素异构转变所得到的不同晶格类型的晶体，

称为同素异构体。

纯铁在固态下发生两次同素异构转变，形成三种同素异构体。纯铁的冷却曲线及晶体结构变化如图 1-5 所示。温度在 912℃以下时，具有体心立方晶格，称为 α -Fe；在 912℃至 1394℃之间时，具有面心立方晶格，称为 γ -Fe；1394℃以上时，又转变为体心立方晶格，称为 δ -Fe。发生同素异构转变的温度(铁在 912℃、1394℃)叫做临界点。

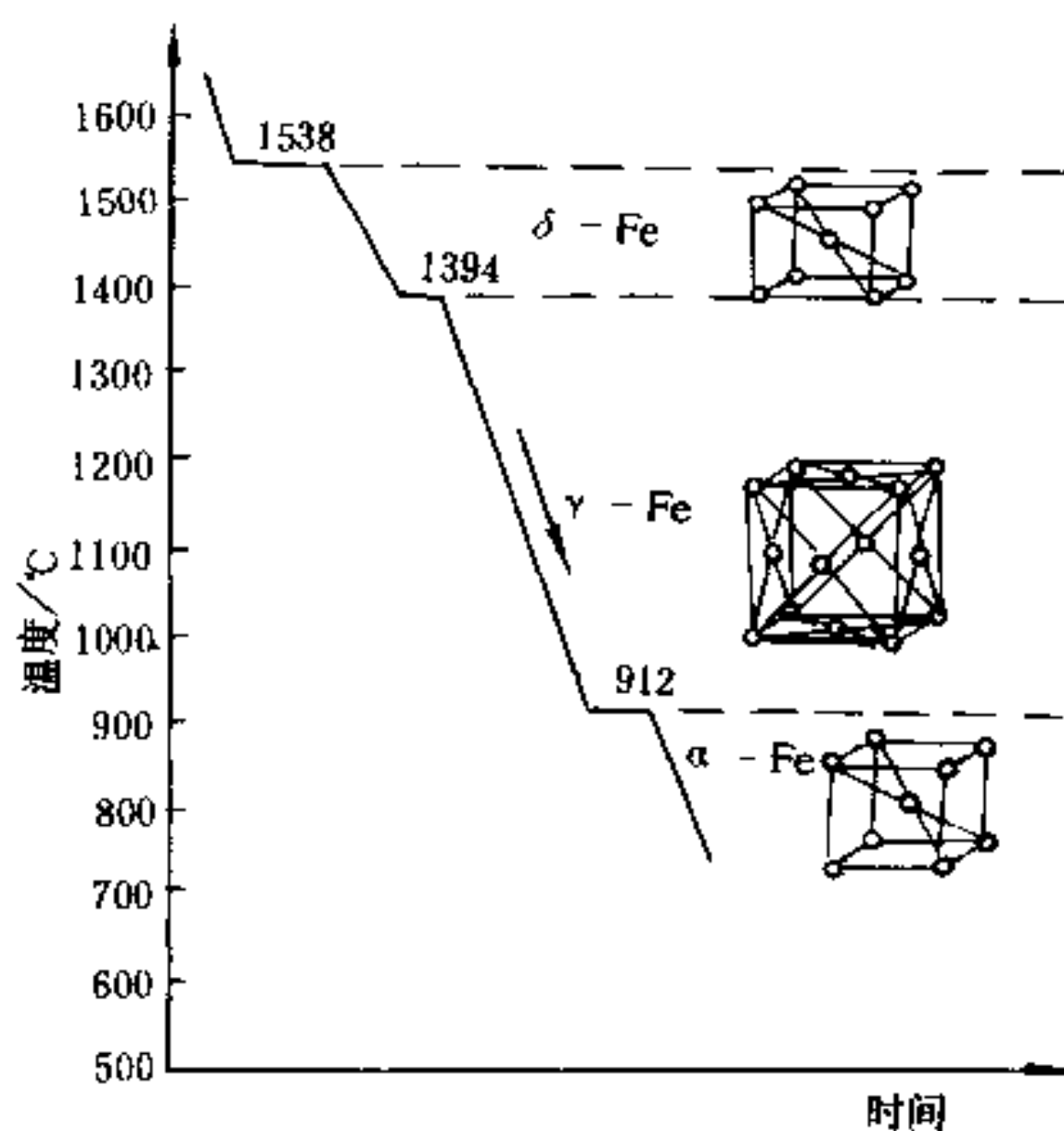


图 1-5 纯铁的冷却曲线及晶体结构

钢的成分中绝大多数是铁，含碳很少，所以钢也存在同素异构转变，这种转变极为重要，它是钢能进行热处理的基础。

四、实际金属的晶体结构

1. 单晶体与多晶体

晶体中原子排列规律相同、晶格位向一致的晶体称为单晶体。单晶体金属很少作为结构材料，工程上使用的金属材料几乎都是多晶体。

将一块纯铁制成金相试样放在显微镜下观察，可以看到如图 1-6 所示的结构，即纯铁是

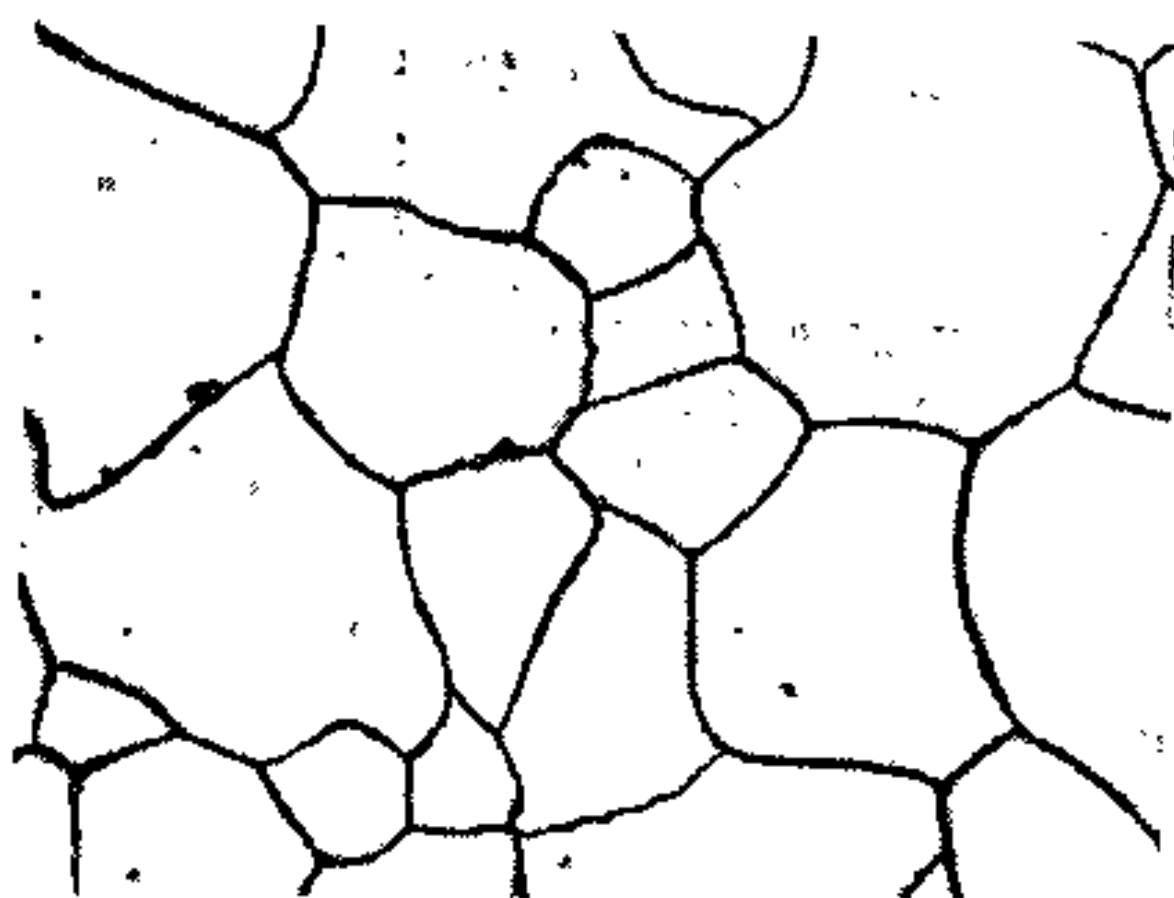


图 1-6 纯 Fe 内部结构示意图

由许多外形不规则的小晶体组成的,这些小晶体称为晶粒。在晶粒内部,晶格位向基本一致,相邻晶粒的位向存在一定的差异,晶粒与晶粒之间的界面称为晶界,它是不同位向晶粒之间的过渡区。实际金属就是由许多位向不同的晶粒所组成的,故称为多晶体。

2. 实际金属中的晶体缺陷

在晶体中,晶格的每一个结点上都有一个原子,其它间隙处都没有原子,原子排列规则整齐,这种晶体称为理想晶体。然而,在实际晶体中,由于原子热振动、杂质原子的渗入以及其它外界因素

的影响,原子排列并非那样完整无缺,而是存在着各种各样的偏离规则排列的不完整区域,通常称这些不完整区域为晶体缺陷。晶体缺陷对金属的性能会产生很大的影响。

按照晶体缺陷的几何特征,可把它们分为三类,即点缺陷、线缺陷和面缺陷。

(1) 点缺陷

常见的点缺陷的形式有:晶格空位、间隙原子和异类原子,如图 1-7 所示。

A. 晶格空位及间隙原子

这种缺陷是由于原子的热运动引起的,在晶体中原子以平衡位置(即结点)为中心,以高的频率振动着,温度越高,原子的平均振动能量越高。其中一些原子的动能高于平均值,而另一些原子的动能则低于平均值,这种现象叫能量起伏。因此,在某一瞬间,当某一原子具有足够大的能量时其振幅增大,它就能克服周围原子对它的牵制作用,脱离平衡位置,这就使结构中出现了空结点,即空位。离位原子大都跑到晶体表面和其它晶体缺陷处,在特殊情况下少数离位原子也可能跑到晶格的间隙位置形成“间隙原子”。

形成空位后,其周围的原子便靠拢,而处于间隙原子周围的晶格便会发生撑开现象。这种使正常晶格发生扭曲的现象称为晶格畸变。晶格畸变会改变金属的物理、化学和力学性能。

B. 异类原子

异类原子是指杂质原子或合金元素的原子。异类原子占据晶格结点时称为置换原子。当异类原子直径很小时,常存在于晶格间隙中,这也称为间隙原子。与前面所说的间隙原子比较,前者是同类原子、性质相同、尺寸相当,它使间隙周围的晶格发生严重畸变,它的产生和扩散均较困难。而后者是异类原子、性质不同、尺寸相差悬殊,只使晶格局部产生畸变,容易产生也容易扩散。置换原子由于其直径与原来金属的原子不可能完全相同,其周围也发生晶格畸变。

在晶体中,空位和间隙原子不断地运动换位。如果间隙原子与空位相遇就会使这对点缺陷消失。这些缺陷的运动,在金属的扩散等过程中起着极为重要的作用。

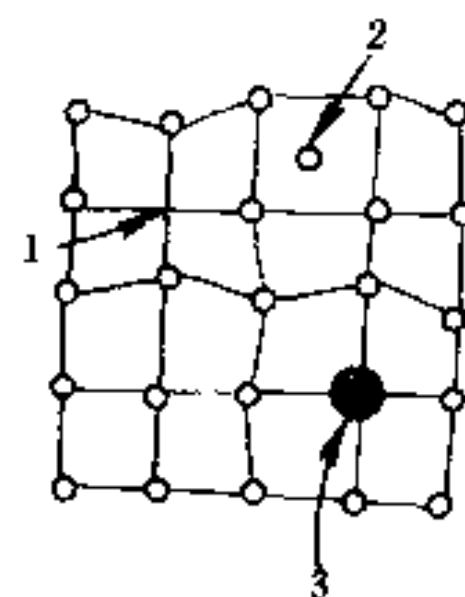


图 1-7 点缺陷示意图

1——晶格空位;2——间隙原子;
3——异类原子

(2) 线缺陷

线缺陷是指某一方向尺寸较大,另外两个方向尺寸很小的晶体缺陷,其具体形式就是位错。所谓位错,是指晶体中某处有一列或若干列原子发生了有规律错排的现象。

位错分两种基本类型:刃型位错和螺型位错,如图 1-8 所示。

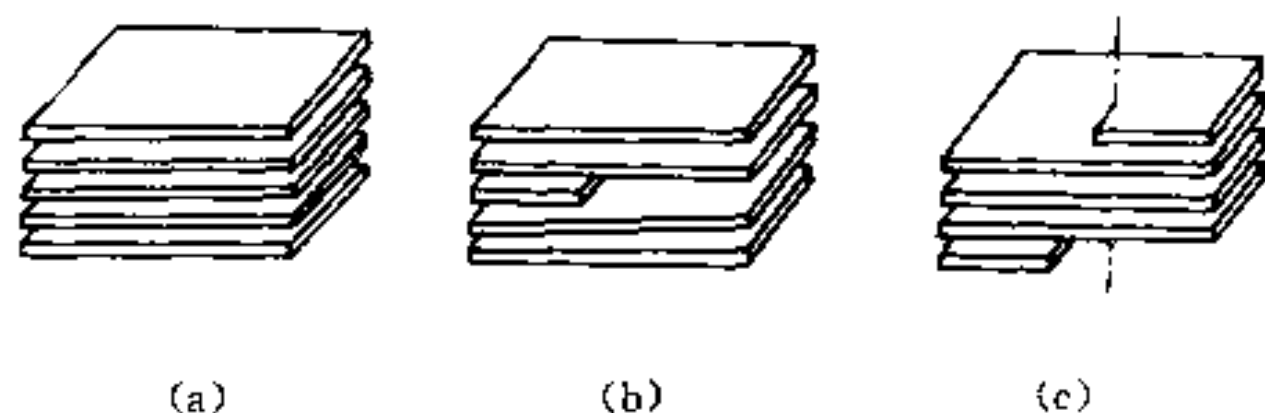


图 1-8 晶体中的位错示意图

(a) 完整晶体;(b) 含有刃型位错的晶体;(c) 含有螺型位错的晶体

A. 刃型位错

如图 1-9 所示,可想像为晶体的上半部发生了局部滑动,右边原子向左移动了一个原子间距。在已滑动区与未滑动区之间出现了一个多余的半原子面,像一片刀切入晶体,终止在内部。沿着半原子面的刃边,晶格发生了很大畸变,这就是一根刃型位错。刃型位错周围存在着弹性畸变。在多余的半原子面一边,原子受压;而在缺少半原子面的一边,原子受拉。离位错线越远,畸变越小。

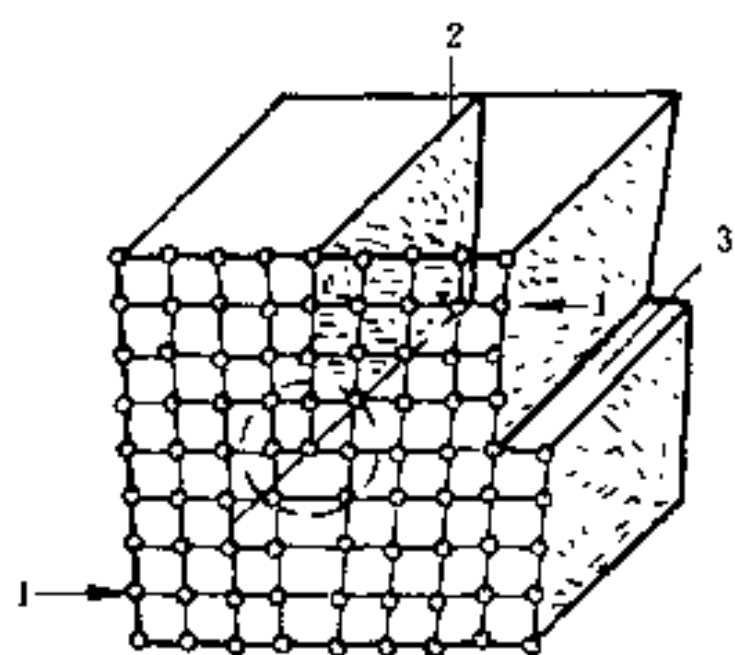


图 1-9 刃型位错示意图

1——力;2——多余半原子面;3——滑动面

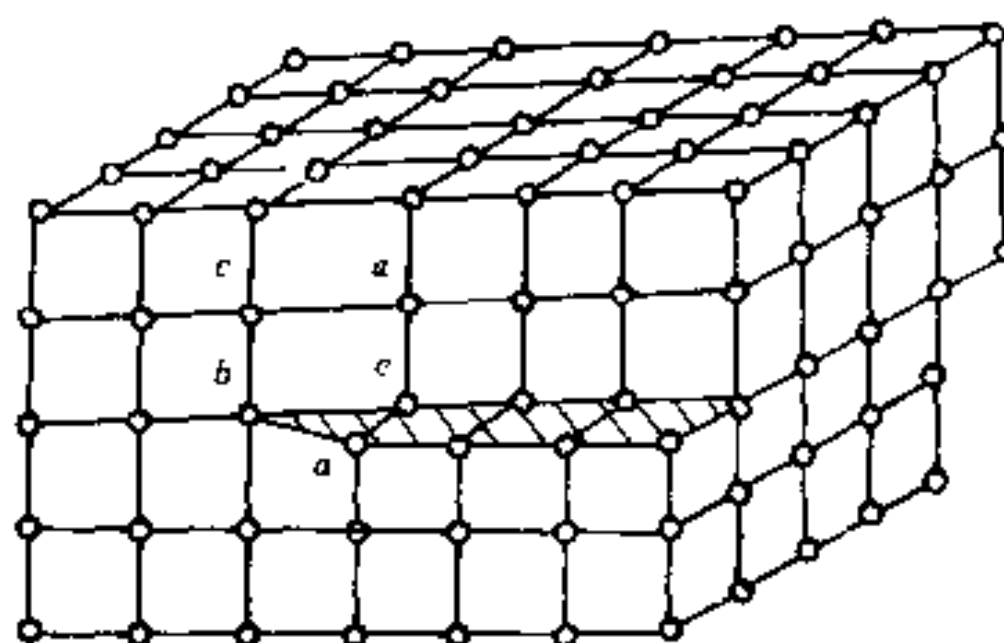


图 1-10 螺型位错示意图

B. 螺型位错

如图 1-8(c)所示,螺型位错中并没有原子面中断在晶体内部,而是原子面沿着一根轴线(近似地和原子面垂直)螺旋上升,每绕轴线一周,原子面上升一个晶面间距。又如图 1-10 所示,可想像为晶体的上半部分发生了局部滑移,右边是已滑移区,原子向后移动了一个原子间距,左边是未滑移区。在已滑移区与未滑移区之间有一个很窄的过渡区,在这里晶格发生畸变,使原子平面变成一串螺旋面[见图 1-8(c)],在螺旋面的轴心部分晶格畸变最大,这里就是一根螺型位错。

晶体中位错的数量用位错密度来表示,即单位面积中位错线的根数。在退火金属中,位错密度一般是 $10^4 \sim 10^6$ 根/ cm^2 ,在淬火或冷变形加工的金属中,位错密度增大,可达 10^{12} 根/ cm^2 ,这是金属强化的一个重要因素。

位错是对金属性能影响很大的一种晶体缺陷,在金属的塑性变形、液态金属的结晶、固态金属的相变及扩散过程中均起着极其重要的作用。

(3) 面缺陷

面缺陷是指在两个方向上尺寸较大,在第三个方向上尺寸很小,呈面状分布的晶体缺

陷。面缺陷主要包括晶界和亚晶界。

A. 晶界

多晶体金属是由很多晶粒组成的,晶界则是不同位向晶粒之间的过渡区。晶界上的原子受相邻晶粒的影响处于折衷位置,原子排列不规则,如图 1-11 所示。

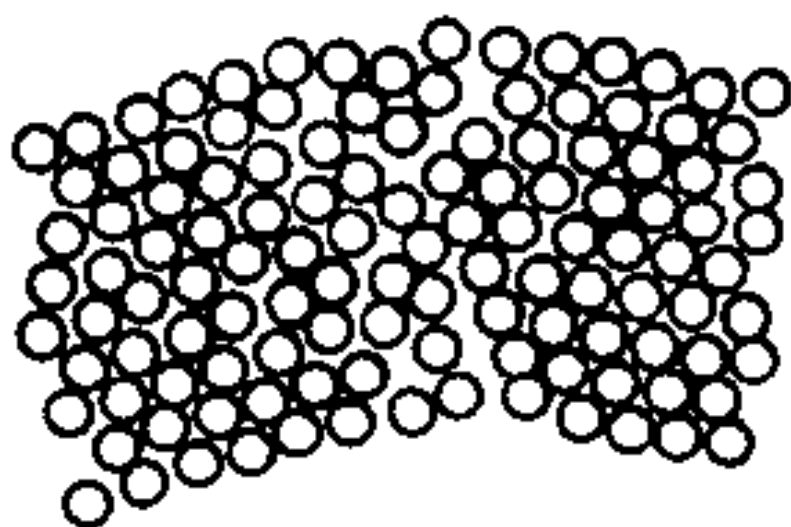


图 1-11 晶界结构示意图



图 1-12 金-镍合金中的亚晶

晶界是晶体中一种重要的缺陷。由于晶界上的原子排列不规则,脱离平衡位置,所以晶界具有很高的能量,因而也就具有一系列不同于晶粒内部的特性。例如,晶界比晶粒容易被腐蚀;熔点较低;原子沿晶界扩散速度快;在常温下晶界对金属的塑性变形起阻碍作用。因此,金属材料晶粒越细,则晶界越多,其室温强度越高。

B. 亚晶界

除晶界外,在高倍显微镜下观察晶粒时,可以发现晶粒是由一些小晶块所组成的,这些小晶块称为“亚晶”,如图 1-12 所示。它们的尺寸一般为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ cm,亚晶之间的界面称为“亚晶界”。亚晶界实际上由一系列的位错所组成。亚晶界上原子排列也不规则,具有较高的能量,与晶界有相似的特性,故细化亚晶亦可显著提高金属的强度。

第二节 金属的结晶

物质由液态转变为固态的过程称为凝固。如果凝固后的固态物质是晶体,这种凝固过程称为结晶。

金属材料一般都要经过冶炼和铸造过程,也就是说要经过由液态转变为固态的结晶过程。液态金属结晶后的组织称为铸态组织。铸态组织对金属的工艺性能和使用性能都有很大的影响,而铸态组织的好坏又与结晶过程有密切的关系。因此,研究金属结晶的规律和影响结晶的因素,对改善金属组织,提高金属性能具有十分重要的意义。

一、金属结晶的基本规律

把金属置于坩埚内加热成均匀液体,而后使其缓慢冷却。在冷却过程中,每隔一定时间测定一次温度直至结晶完毕,冷却到室温。将温度随时间变化的关系绘制成曲线,称为冷却曲线,如图 1-13 所示。

1. 过冷现象

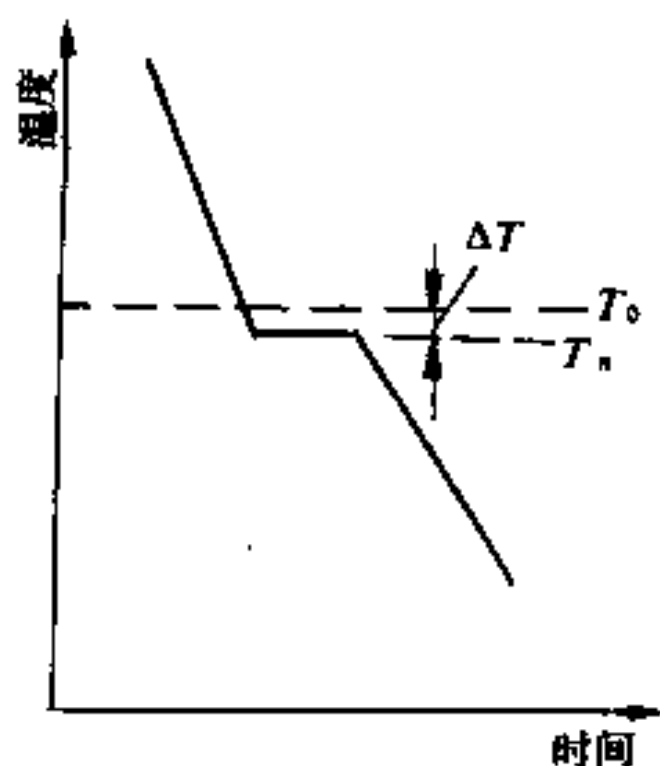


图 1-13 纯金属的冷却曲线

从理论上讲,金属的熔化和结晶应在同一温度下进行,这个温度叫平衡结晶温度(T_0)。在此温度下,液体中原子结晶到晶体上的速度与晶体上的原子熔入液体中的速度相等,此时既不结晶也不熔化,晶体与液体处于平衡状态。只有冷却到平衡结晶温度以下某一温度 T_n 时才能有效地进行结晶。实际结晶温度低于理论结晶温度的现象称为过冷,二者之差称为过冷度,用 ΔT 表示。

实际金属总是在过冷条件下结晶的,过冷是金属结晶的必要条件。

2. 结晶的一般过程

大量的实验证明,结晶时,首先在液体金属中形成具有一定尺寸的原子集团,即小晶体。以这些小晶体为结晶核心,吸收液体中的金属原子而逐渐长大。与此同时,在液体中又不断地产生新的结晶核心,并逐渐长大。如此不断发展,直到各晶体相互接触,液体完全消失,结晶过程也就完成。这些作为结晶核心的小晶体,简称晶核。一个个晶核长大为一个个晶粒。因此,结晶过程就是形核与长大的过程。由于晶核位向不同,所以各晶粒的位向也不相同,这样就结晶成一块多晶体金属。图 1-14 为纯金属结晶过程示意图。



图 1-14 纯金属结晶过程示意图

二、晶核的形成与长大

实践证明,结晶过程中晶核的形成与长大是一个普遍规律,一切结晶过程都不例外。

1. 晶核的形成

晶核的形成有两种方式,即自发成核与非自发成核。晶核的形成是在一个微小体积中原子由不规则排列转变为规则排列并稳定下来的过程。

(1) 自发成核(均质成核)

液态金属的原子基本上也是围绕平衡位置振动,只是在液态金属中原子热运动很激烈,原子频繁地从一个平衡位置转移到另一个平衡位置。因此,液态金属中原子的规则排列只限于许多微小的体积内,即存在许多大小不等、呈规则排列的原子小集团,此称“近程有序”结构。在理论结晶温度以上,原子小集团极不稳定,不能成为结晶核心。而在过冷条件下,某些大于一定尺寸的原子小集团,可以稳定下来成为结晶的核心,称为自发成核,也称均质成核。

(2) 非自发成核(非均质成核)

研究表明,在金属液体中不可避免地会含有一些难熔杂质的细小质点,液态金属结晶时,晶核往往优先依附于这些杂质的表面而形成,这种形核方式即为非自发成核,也称非均质成核。

实际生产中,常在液态金属中有意地加入一些能够促进非均质形核的固态物质,使晶核数目增多,得到细晶粒组织,从而提高金属材料的力学性能。这种人为地利用非自发成核细化晶粒的方法叫做变质处理或孕育处理,所加入的物质称为变质剂或孕育剂。

2. 晶核的长大

晶核形成后即开始长大。晶核长大实质上是液体中的金属原子向晶核表面迁移的过程。

晶体的长大,主要决定于过冷度。当冷却速度很小时,则过冷度也很小,此时晶粒在长大过程中保持规则外形。当晶粒长大到相互接触时,规则的外形才破坏。当冷却速度大时,则过冷度也大,晶体就可能呈树枝状长大。因为当过冷度较大时,晶体的长大主要受结晶前沿液态金属的热分布条件所控制。晶核在长大初期虽然可以有规则外形,但在此规则外形的棱角处具有最好的散热条件,使结晶潜热能迅速逸去;同时由于棱角处缺陷多,杂质少,杂质的阻碍作用小,所以得到了最有利的生长条件而优先长大,形成伸向液体中的结晶轴,即形成好像树枝的树干。接着在树干晶轴的棱角处,再生出并长大成新的树枝状结晶,也就是二次晶轴形成,依次在二次晶轴上生出三次晶轴,在三次晶轴上生出四次晶轴等等。这样连续不断地成长,便形成了一个树枝状晶体骨架,简称枝晶,如图 1-15 所示。另一方面每个枝晶都在不断长大变粗并长出新的枝晶,以充满各枝晶之间的体积,直到把树枝状骨架变成一个完整的无空隙的晶粒。

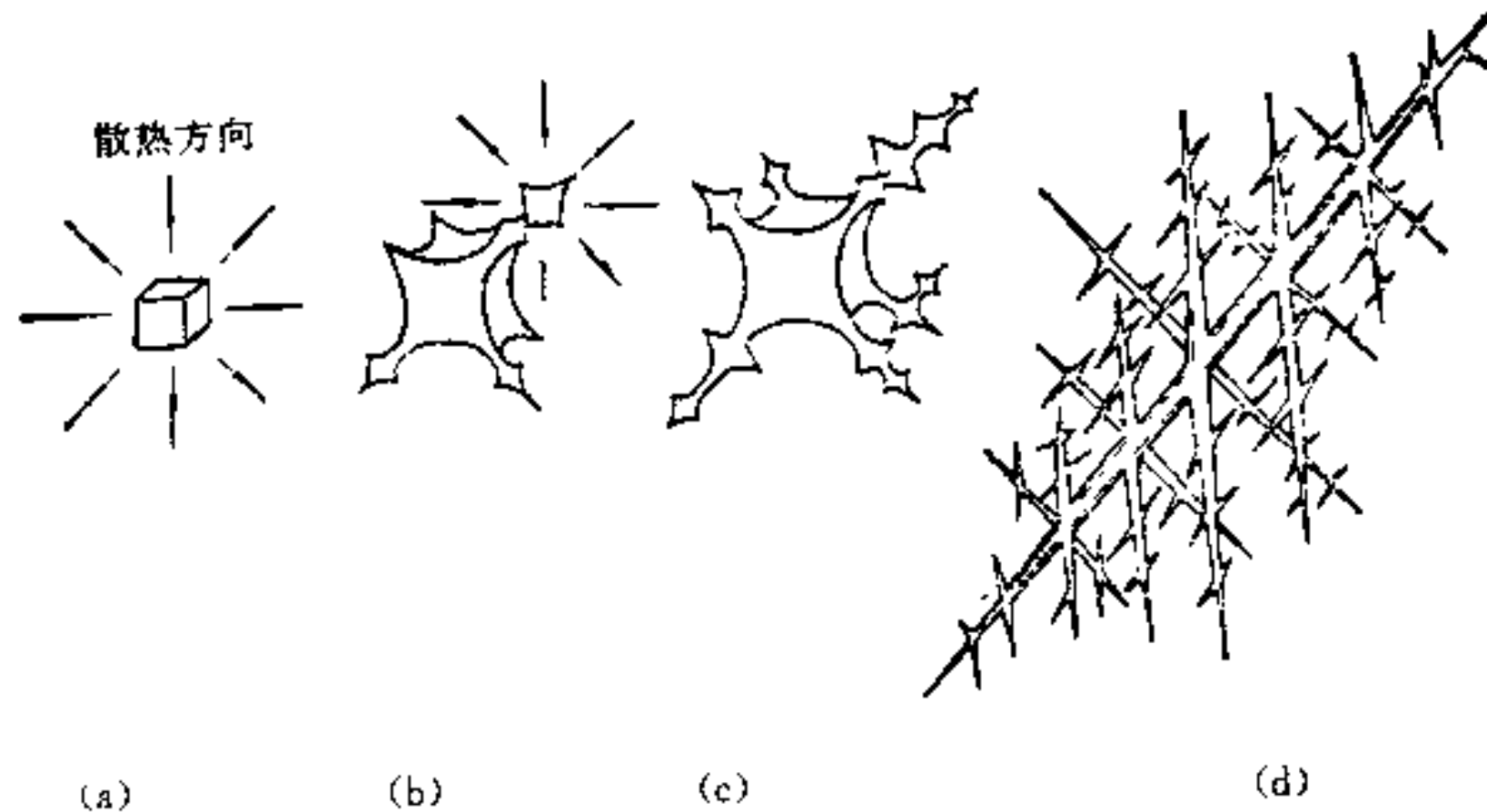


图 1-15 枝晶生长示意图

在工业生产中,金属的结晶大都是以树枝状方式长大,在铸锭和厚大铸件的缩孔中经常可以看见未完全填满的树枝状晶,这是由于结晶时液态金属体积收缩后没有足够的液体金属来补充,使树枝状晶之间的体积不能被晶体所填满而留下了空隙,从而保留了树枝状晶的形态。

三、金属结晶后晶粒的大小

因为细晶粒金属晶界多,在晶界处晶格扭曲畸变,提高了抵抗塑性变形的能力,使强度、硬度提高。同时,由于细晶粒金属晶粒数目多,变形可均匀分布在许多晶粒上,因此细晶粒金属不仅强度、硬度高,而且塑性和韧性也好。通常都希望金属材料的晶粒越细越好。

每个晶粒都是在结晶时由晶核长成的,晶粒的大小决定于成核速率 N (成核数目/厘米³·秒)和生长速率 G (厘米/秒)。

如图 1-16 所示,成核速率 N 越大,生长速率 G 越小,则晶粒越细。在过冷度不大的情况下,成核速率 N 与生长速率 G 都随着过冷度的增加而增加。但是两者增长速度不同,成核率

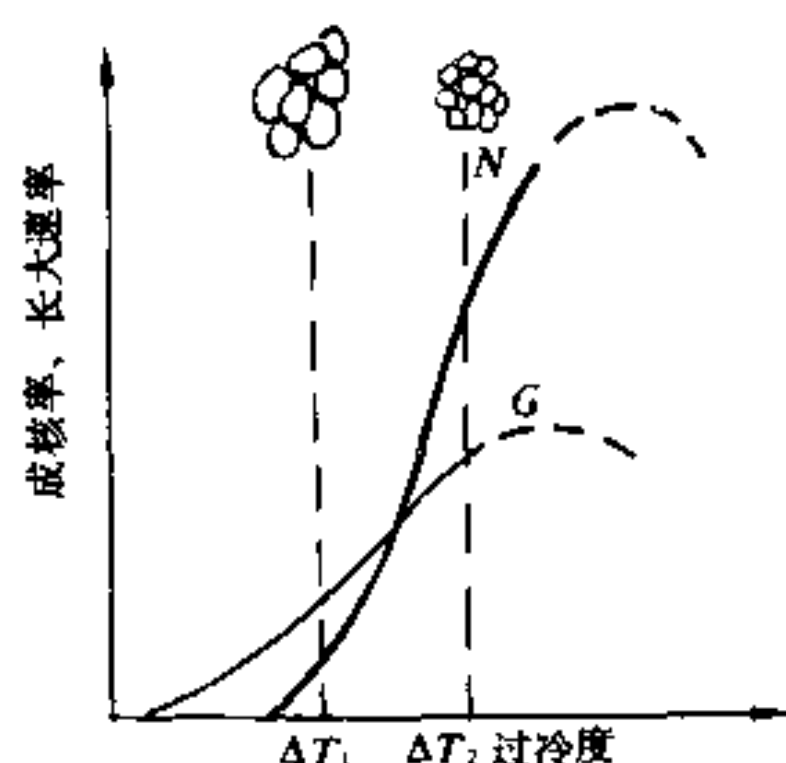


图 1-16 成核率 N 及长大速率 G 与过冷度的关系

增长要快些,所以随着冷却速度的增加,过冷度增加,会使铸态金属的晶粒变细。当过冷度特别大时,成核速率与生长速率反而会下降,这是因为温度太低时原子扩散能力降低,从而限制了结晶速度。对于金属及合金来说,达不到那样大的过冷度,只有某些盐类结晶过程中才有这样的规律。但是,对于后面要讲的金属及合金的固态相变来说,这一规律是完全适用的。

凡能促进形核、抑制长大的因素都能细化晶粒。工业生产中细化晶粒的方法很多,其中如前面所讲的变质处理就是一种广泛采用的有效方法。

此外,在金属结晶时给予机械振动或通以超声波,或在结晶时液体金属与晶体作相对运动(如离心铸造)

也能促使晶核形成而细化晶粒。

四、铸锭组织

金属在铸造状态下的组织直接影响到铸件的使用性能。对于铸锭来说,铸态组织将影响到随后的压力加工性能,也影响到经过压力加工后的成品组织和性能。

如果将一个金属铸锭沿纵向及横向剖开并加以浸蚀后,可观察到如图 1-17 所示的形貌。在铸锭剖面上存在着具有不同特征的三层。

1. 表面细晶粒层

表面细晶粒层是由于液体金属刚刚注入锭模时,模壁温度较低,表面层的金属液体遭到了剧烈冷却,在较大过冷度下结晶,得到了等轴细晶粒组织。

2. 中间柱状晶粒层

中间柱状晶粒层是在表面细晶粒层形成后,把液体金属与锭模分开,这时锭模温度已经升高,散热减慢,而且散热出现了方向性,在垂直模壁的方向散热最快,并且此方向上存在内高外低的温度梯度。已凝固层沿此方向生长,形成了柱状晶粒层。

3. 中心等轴晶粒层

结晶进行到接近铸锭中心时,液体内部内外温差小,锭模已成为一个高温外壳,加上结晶潜热放出,使液体散热减慢,内部温度趋于均匀,同时进入过冷状态,使铸锭中心部分形成了等轴的粗晶粒层。

表面细晶粒层比较致密,力学性能好,但这一层往往很薄,只对某些薄壁铸件的性能起一定作用。柱状晶粒区,在两排相对生长的柱状晶粒相遇的结合面上存在着脆弱区。在此区常有低熔点杂质和非金属夹杂物聚集,锻压轧制时容易沿结合面裂开。

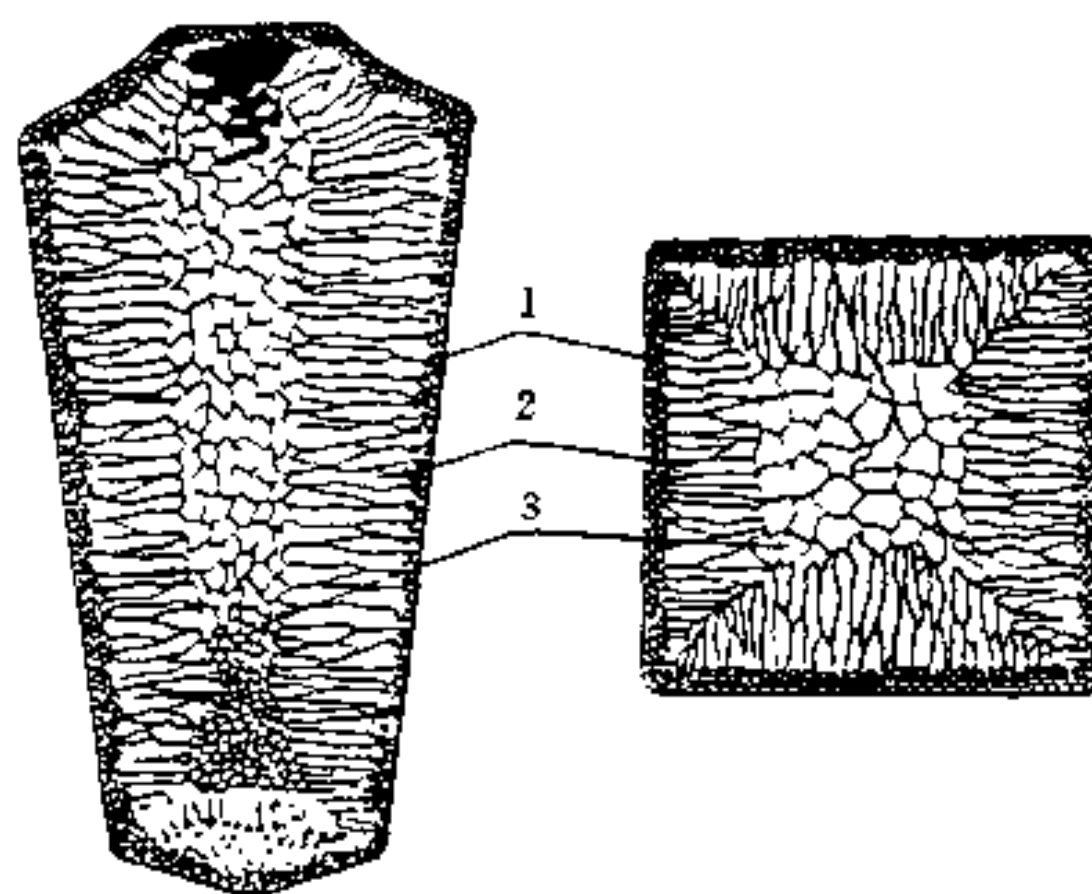


图 1-17 铸锭组织示意图

1——表面细晶粒层;2——柱状晶粒层;3——等轴晶粒层

第三节 金属的塑性变形与再结晶

由于铸态金属中往往会存在各种缺陷,如晶粒粗大、成分不均匀、组织不致密、杂质偏析等,使力学性能降低,不能充分发挥金属材料的潜力,因此在工业上,大多数金属材料需经轧制、锻造、拉拔、挤压、冲压等各种压力加工后使用。压力加工最基本的特点就是使金属材料在外力作用下发生了不可逆的变形,即塑性变形。

借助于塑性变形不仅可以使金属材料获得一定的形状和尺寸,还可以提高金属材料的强度和硬度,是强化金属材料的手段之一。例如,16 Mn 钢制作的自行车链板,原带料厚为 3.5 mm、硬度 150 HBS、抗拉强度约 520 MPa,经过五次冷轧,钢板厚度压缩至 1.2 mm,变形程度达 65%,其硬度可提高到 275 HBS、抗拉强度接近 1000 MPa,这样可使链板的承载能力提高近一倍。这种由于塑性变形而使金属材料强度和硬度升高的现象称为加工硬化或形变强化。加工硬化现象对工业生产有利有弊,消除这种现象的方法采用回复再结晶。本节将分别加以介绍。

一、金属的塑性变形

如前所述,金属材料都是由多晶粒组成的。对于一个晶粒来说,晶格中有些原子面上的原子排列得很紧密或较紧密,面与面之间的距离较大,结合力较弱,在外力作用下可以沿着这些面发生滑移,见图 1-18 中 I—I 晶面。所谓滑移即晶体的一部分相对于另一部分沿一定晶面(称为滑移面)发生了相对滑动。通常每一种晶格都有几个滑移面(见图 1-19),面每一个滑移面又可能有几个滑移方向,一个滑移面与一滑移方向构成了一个滑移系,三种常见金属晶格的主要滑移系列入表 1-1。

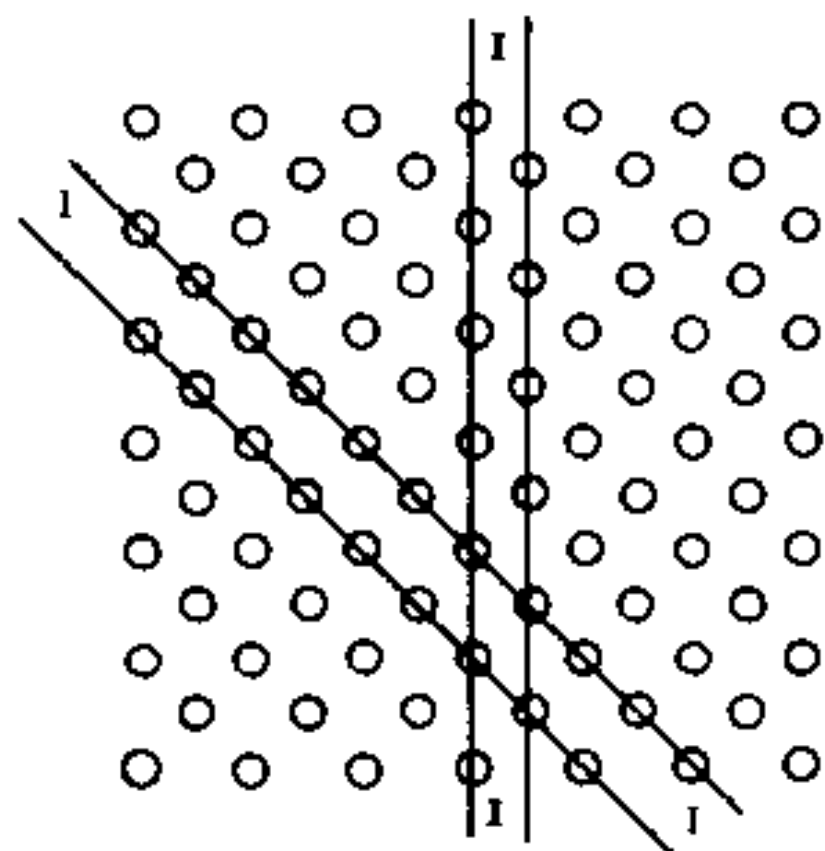


图 1-18 滑移面示意图

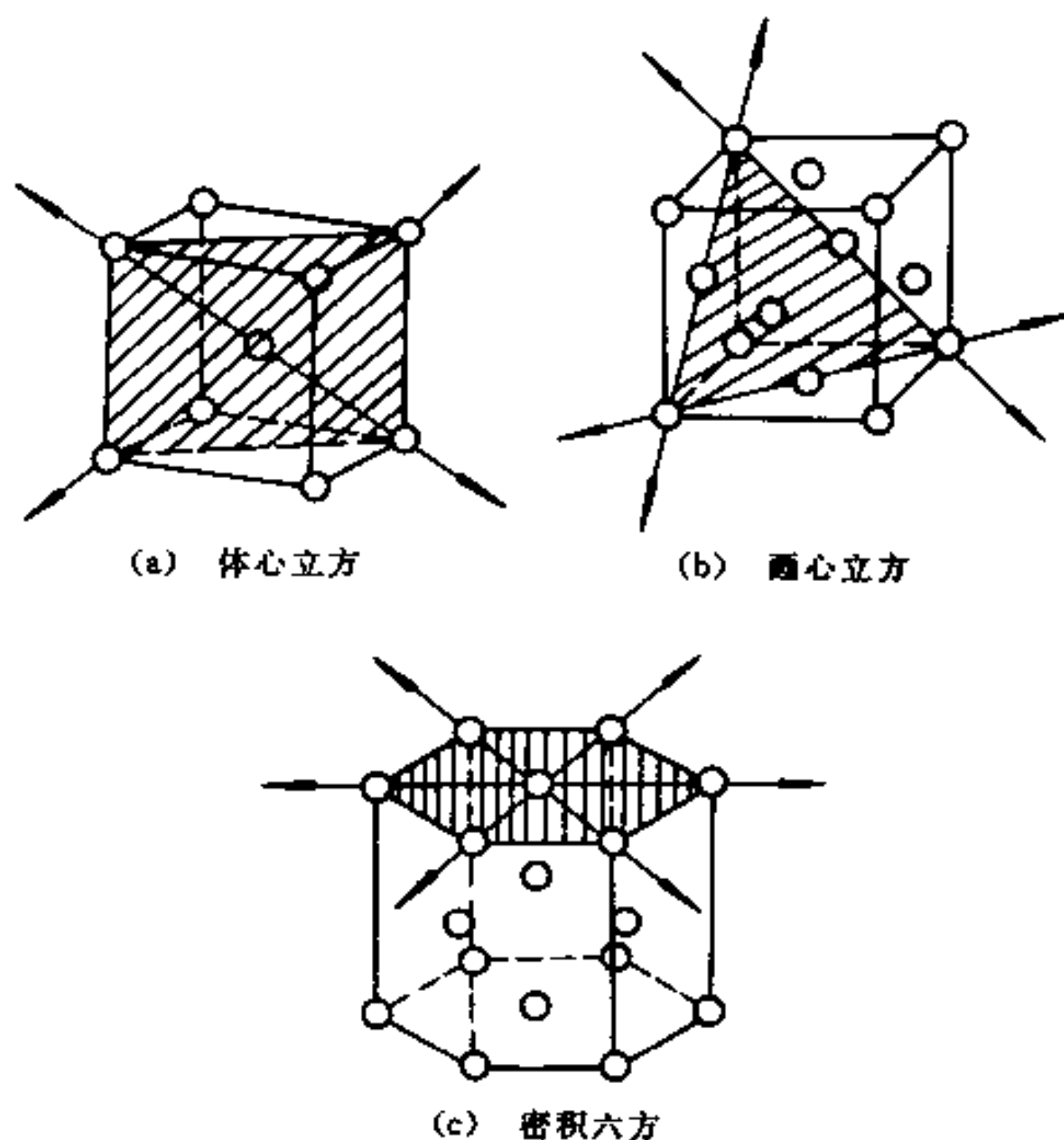


图 1-19 常见三种金属晶格的滑移面及滑移方向示意图

表 1-1 三种典型金属晶格的滑移面、滑移方向和滑移系

晶格类型	体心立方	面心立方	密排六方
滑移面	6	4	1
滑移方向	2	3	3
滑移系	$6 \times 2 = 12$	$4 \times 3 = 12$	$1 \times 3 = 3$

金属晶体中滑移系越多塑性越好,而滑移方向对塑性变形的作用更大一些,故面心立方晶格的金属塑性最好、体心立方次之、密排六方最差。这也是钢在锻造时为什么要加热到高温的原因之一。

大量实验研究表明,滑移不是原子面之间的刚性移动,而是滑移面上的位错沿切应力方向运动的过程(图 1-20)。

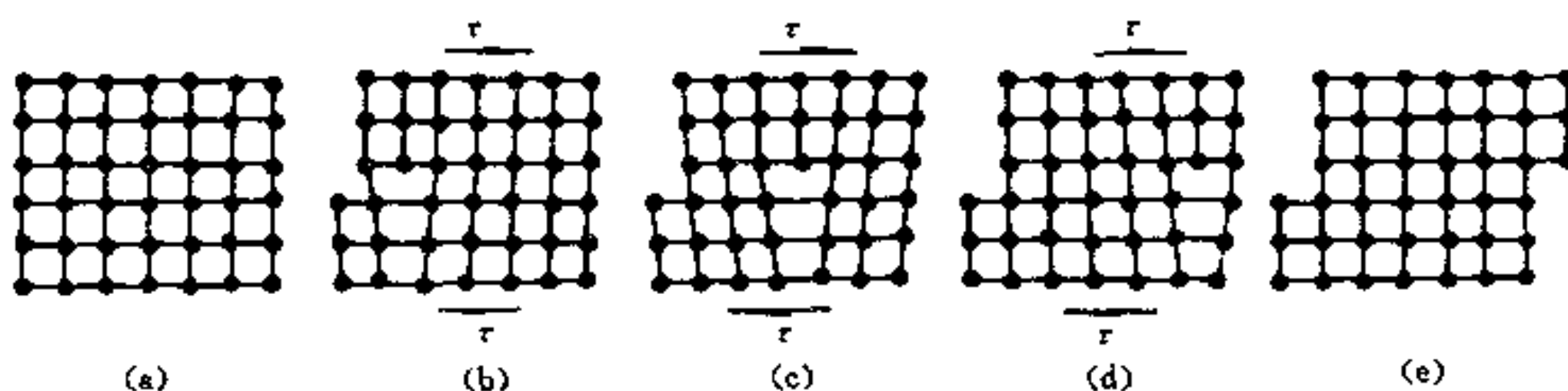


图 1-20 晶体中通过位错运动而造成滑移的示意图

当对单晶体试样进行拉伸时,外力 F 将在晶内一定的晶面上分解为两种应力,一种是平行于该晶面的切应力(τ),另一种是垂直于该晶面的正应力(σ),正应力只能引起晶格的弹性伸长,或进一步把晶体拉断;而切应力则可使晶格在发生弹性扭曲之后,进一步造成滑移,

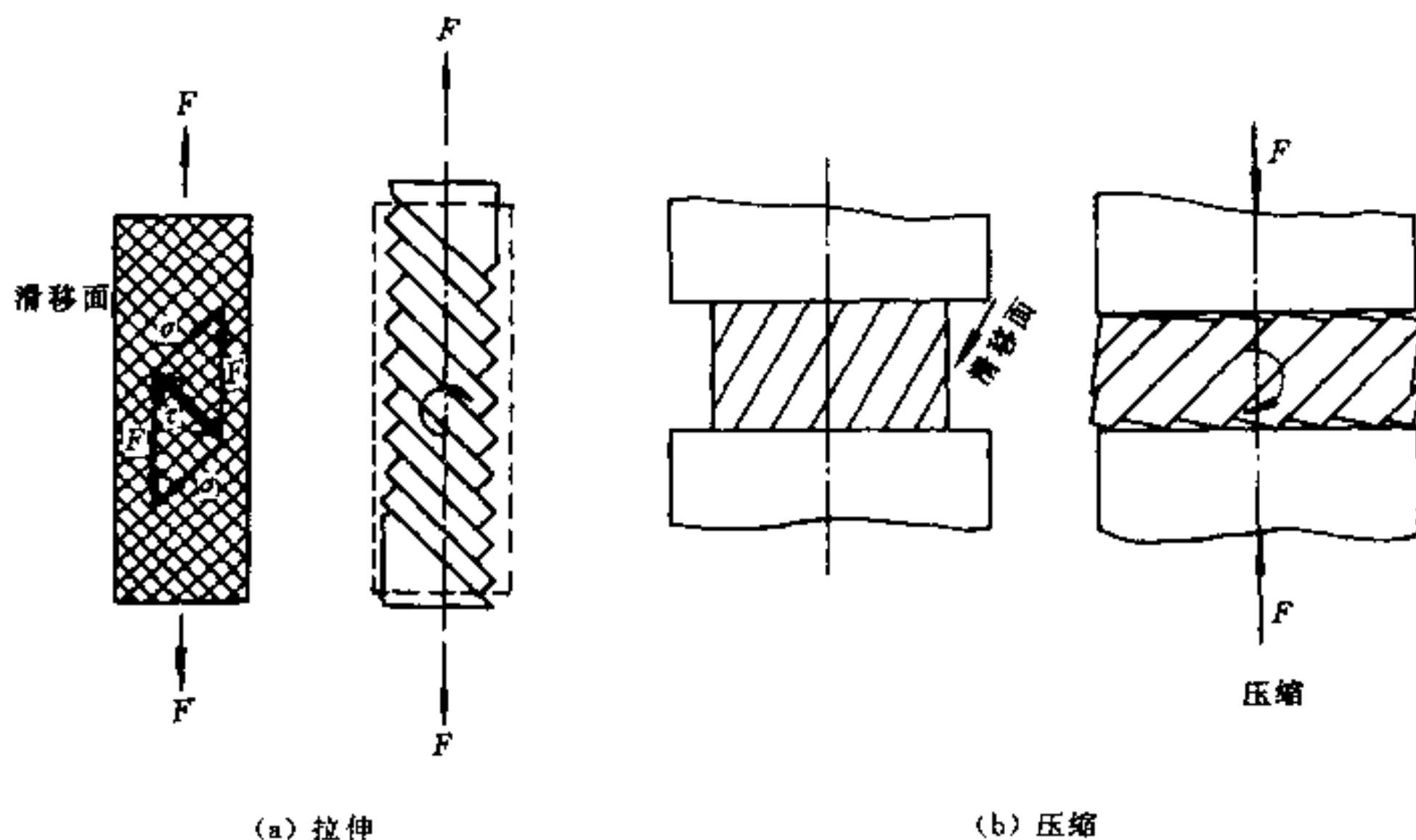


图 1-21 单晶体滑移时的转动示意图

通过大量晶面的滑移,最终使试样被拉长变细,同时晶粒内滑移面发生转动和扭曲(图 1-21),使得滑移面上的原子由规则排列变为局部不规则排列。要继续滑移则需要更大的外力,这就是加工硬化的原因。

在多晶体金属中,由于每个晶粒所处的位向不同,金属的塑性变形将会在不同的晶粒中逐批发生,是一个不均匀的塑性变形过程。图 1-22 中,用 A、B、C 示意地表示出了不同位向晶粒的分批滑移次序。

二、塑性变形对金属组织和性能的影响

经过塑性变形的金属,不但外形尺寸发生了变化,其内部的晶粒形状也会发生相应的改变,即随着金属外形的压扁或拉长,其内部晶粒的形状也会被压扁或拉长,一般大致与金属外形的改变成比例,如图 1-23 所示。当形变量很大时,各晶粒将会被拉长成细条状或纤维状,同时,金属中的夹杂物也被拉长或沿拉长的晶界分布,晶界变得模糊不清,如图 1-23(c)所示。此时,金属的性能也将会具有明显的方向性,如纵向的强度和塑性远大于横向的强度和塑性等。这种组织叫做“纤维组织”。

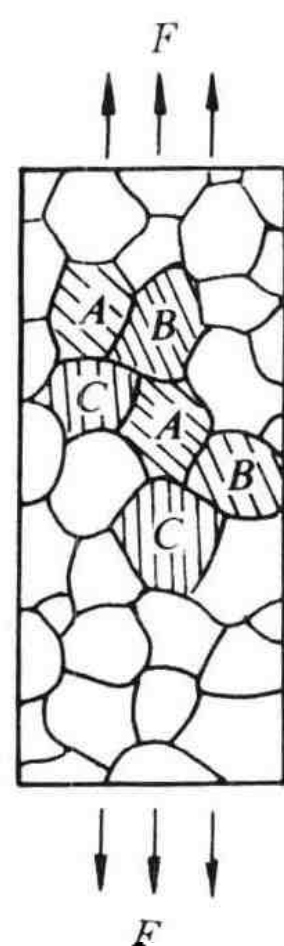


图 1-22 多晶体金属不均匀塑性变形示意图

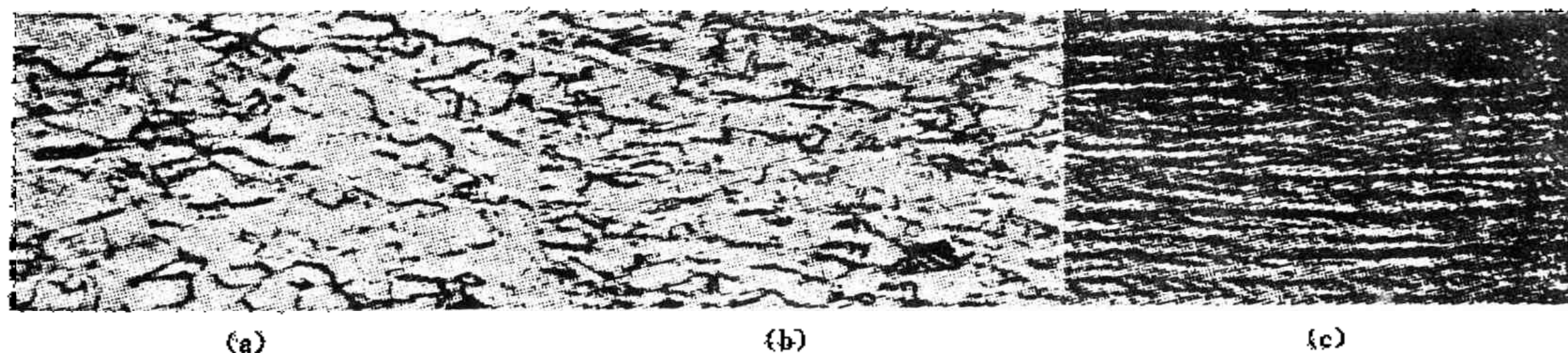


图 1-23 纯铜经不同程度冷轧变形后的显微组织 300X

(a) 30% 压下量; (b) 50% 压下量; (c) 99% 压下量

加工硬化使金属强度、硬度增加而塑性、韧性降低,如图 1-24 所示。由于冷塑性变形后晶粒扭曲、细化,显微裂纹增多,从而给继续塑性变形造成困难。

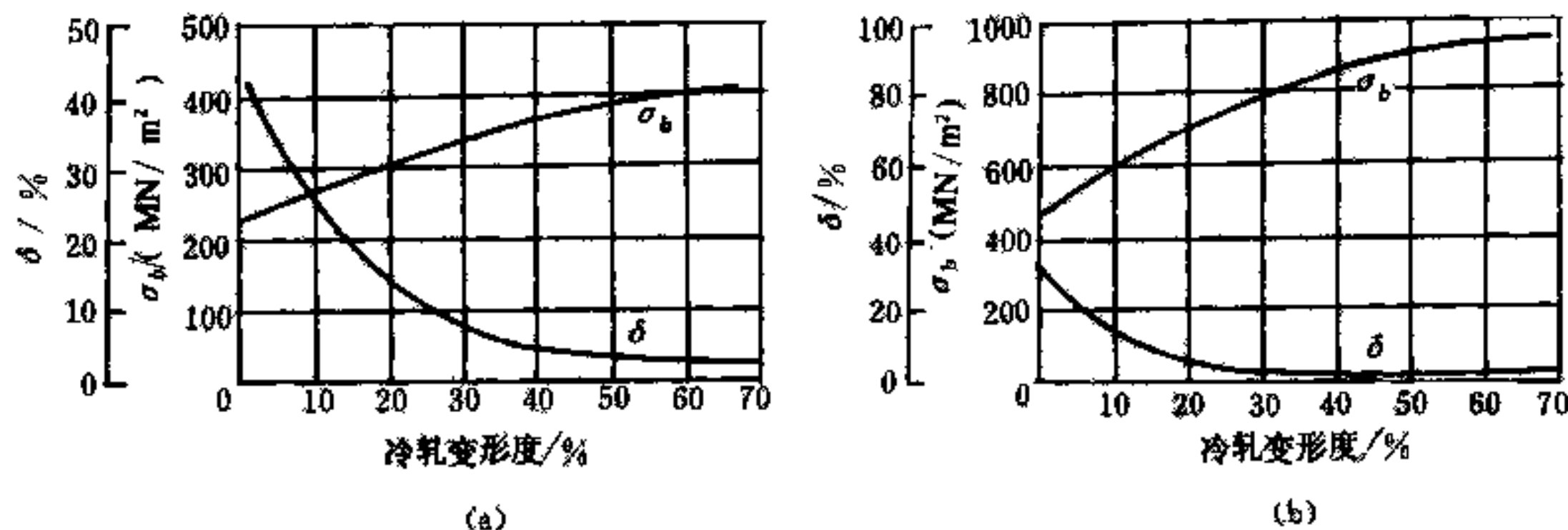


图 1-24 金属的加工硬化现象

(a) 纯铜; (b) 低碳钢

加工硬化不仅影响力学性能,而且对物理、化学性能也有影响,如钢冷塑性变形后的电阻增大及耐腐蚀性下降等。

三、加工硬化的意义

加工硬化在生产中具有十分重要的意义。

1. 加工硬化可使金属零件具有一定抗偶然过载的能力,保证机械零件的安全。机械零件在使用过程中,某些薄弱部位因偶然过载可能会产生局部塑性变形,由于金属有加工硬化的能力,会阻止塑性变形继续发展,确保机械零件安全服役。

2. 加工硬化是冷变形工件成型的重要因素。由于金属有加工硬化性能,哪里有塑性变形它就在哪里阻止变形继续发展,并将变形转移到尚未变形的部位,这样变形与硬化交替重复进行,就构成了均匀塑性变形,从而获得合格的冷变形加工的金属制品,如冷拔钢丝、冷冲压件等。

3. 加工硬化是强化金属的重要工艺手段之一。这种方法可以单独使用,也可以和其它强化方法联合使用。对于有些不能用热处理方法强化的金属材料,这种方法尤为重要。如镍铬不锈钢(18-8型)变形前屈服强度为196 MPa、抗拉强度588 MPa,经过40%轧制后屈服强度上升到784~980 MPa、抗拉强度1174 MPa,屈服强度提高3~4倍,抗拉强度提高一倍;高锰耐磨钢受冲击塑性变形后,硬度可由原来的200 HBS升高到550 HBS,大大地提高了耐磨性。

但另一方面,加工硬化程度有一定的限制,它会给进一步的冷变形加工带来一定的困难。如钢丝冷拔过程中将产生加工硬化现象,继续冷拔时不仅要增加外力,而且达到一定程度后会发生断裂。如果在冷拔后把它加热到一定温度,就会使其塑性得到恢复,这一过程叫回复再结晶。

四、回复与再结晶

经过塑性变形的金属晶格扭曲、晶粒破碎、内部储存有较高的能量,因为外力作用的变形功有相当一部分储存在金属内部,这时金属处于不稳定状态,故有一种向冷变形前稳定状态转化的自发趋势。随加热温度的升高,使金属中原子有足够的动能,则其内部会自发地出现下面一系列变化:回复、再结晶和晶粒长大(图1-25)。

1. 回复

冷塑性变形的金属在较低温度下加热,可逐渐消除其大部分内应力与晶格扭曲现象,但晶粒形状未变,这叫做回复阶段。这时它的物理、化学性能基本上恢复了;而力学性能还要受晶粒大小和形状的影响,故力学性能只恢复一小部分。

2. 再结晶

冷塑性变形的金属加热到一定温度,便在晶界与晶粒内部变形最强烈的地方出现新的结晶核心,然后新核心逐渐长大,最后,拉长的旧晶粒全部被新

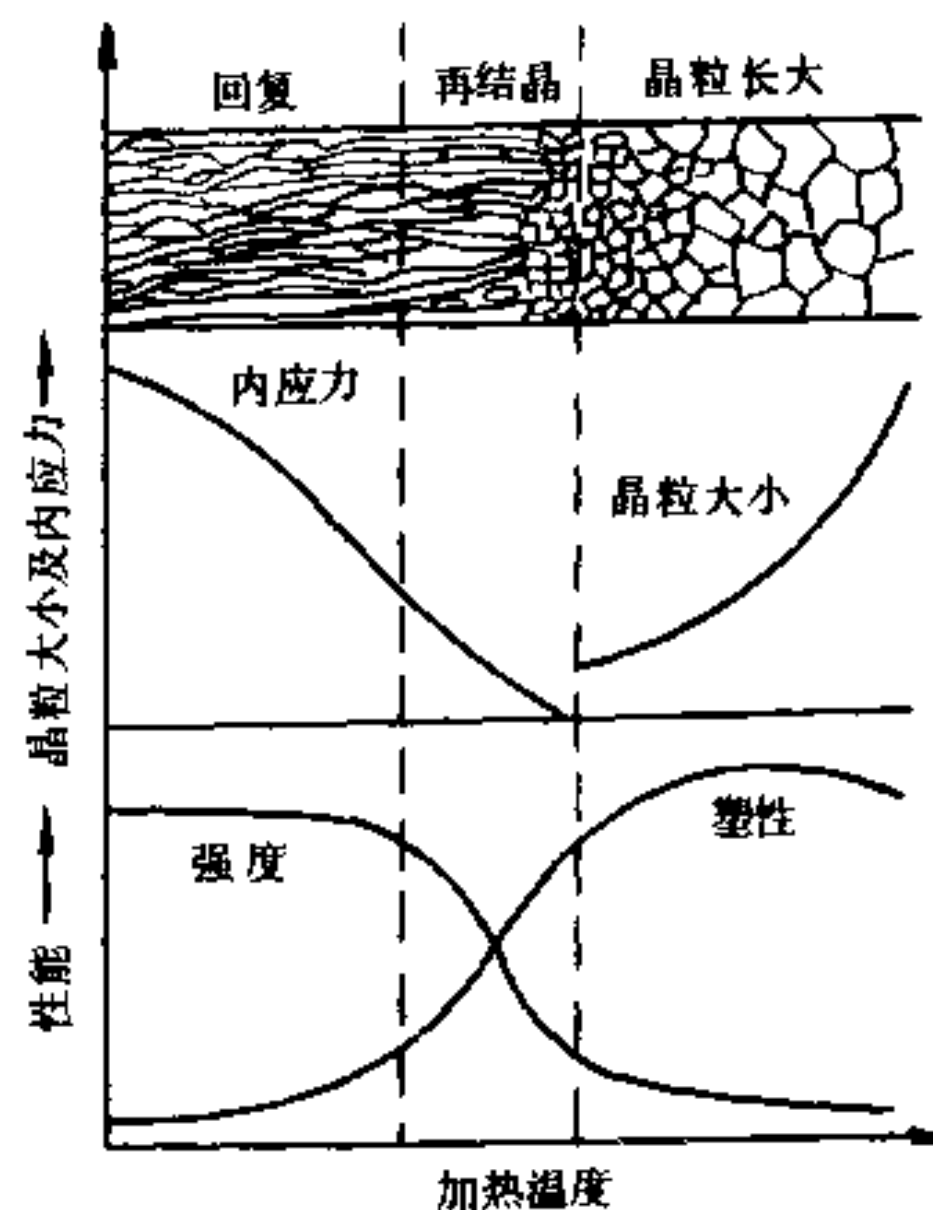


图 1-25 变形金属在不同加热温度时晶粒大小和性能变化示意图

的等轴晶粒所取代,这种现象称为再结晶。再结晶后金属的力学性能恢复到了冷塑性变形前的状态,即塑性、韧性提高,而强度、硬度则降低。

实验表明,纯金属的最低再结晶温度与其熔点有近似比例关系: $T_{\text{再结晶(最低)}} \approx 0.4 T_{\text{熔点}}$,式中 T 为绝对温度。

常用金属的最低再结晶温度为:纯铁 450°C 、铜 270°C 、铝 100°C 、锡和铅低于室温。

合金的最低再结晶温度与其熔点的关系大致为: $T_{\text{再结晶(最低)}} \approx 0.5 \sim 0.7 T_{\text{熔点}}$,式中 T 为绝对温度。

为了加速再结晶过程,工业上使用的再结晶退火温度比理论再结晶温度(即上述最低再结晶温度)要高出 $100^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 。

3. 晶粒长大

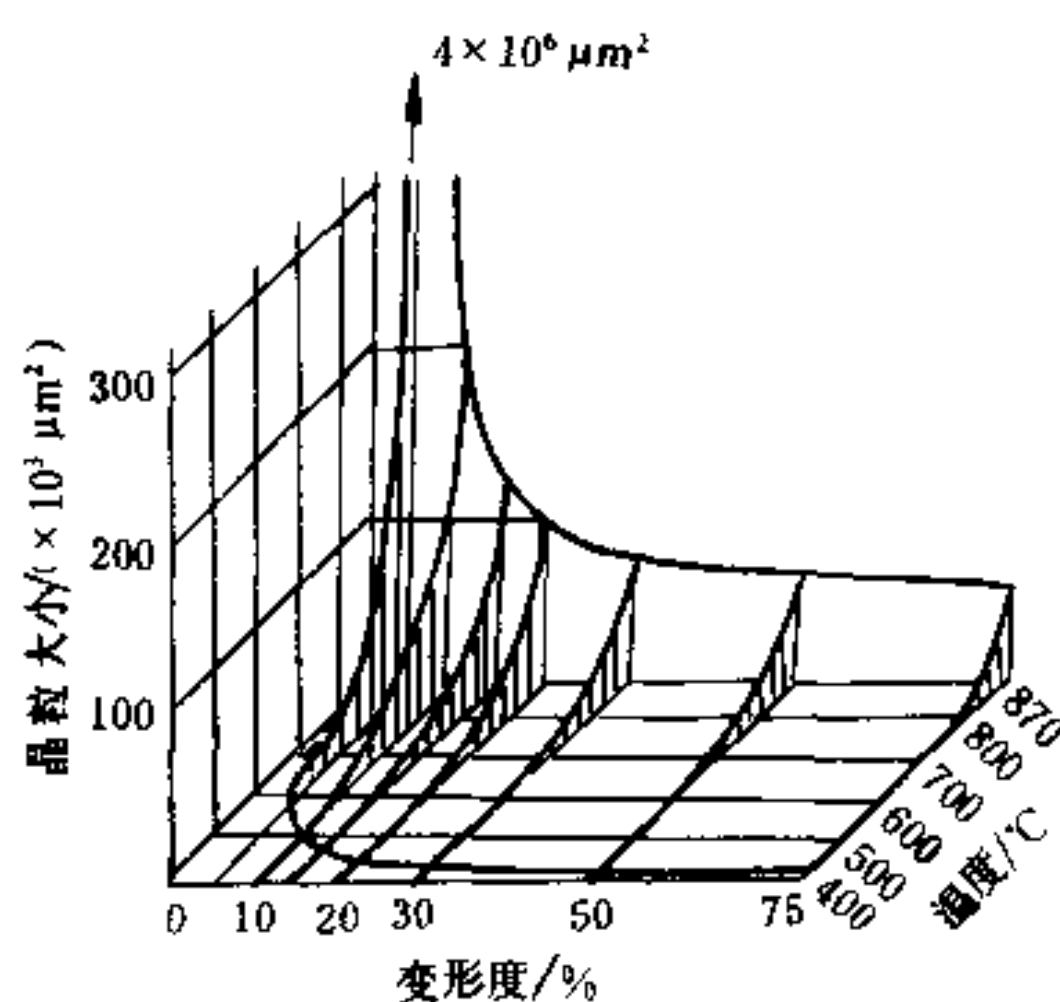


图 1-26 纯铁的再结晶全图

再结晶后如继续升温,则晶粒之间会相互兼并而长大,并使其力学性能降低。

金属在某一变形程度下,特别容易在再结晶退火时形成异常粗大的晶粒,这种变形程度一般为 $2\% \sim 10\%$ 左右,称为临界变形度。这是因为当金属变形度大时可得到细小而均匀分布的、数目较多的再结晶核心,因而可获得均匀、细小的晶粒;当处在临界变形度时,将形成分布不均匀的少数核心,从而形成了异常粗大的晶粒。因此,工业上轧制薄钢板时一般采用 $30\% \sim 60\%$ 的变形度,以避免在临界变形度左右加工。图 1-26 是纯铁的再结晶全图,表明了变形度和加热温度与再结晶后晶粒大小的关系。

五、金属的热加工

1. 热加工与冷加工

通常把在再结晶温度以上的变形叫热加工;在再结晶温度以下的变形叫冷加工。铅、锡等低熔点金属的再结晶温度在室温以下,因此在室温下的变形也属于热加工。钢的再结晶温度为 450°C ,所以要在 $600 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 以上变形才算热加工。

金属在热加工时也要发生塑性变形和加工硬化,但同时发生再结晶软化,故塑性较好。此外,金属加热到高温时,强度降低,变形抗力较小。所以热加工可进行大变形量的变形,且消耗动力较少。

冷加工一般在室温下变形,制件光洁度及尺寸精度较好。但因有加工硬化效应,每道工序的变形量受到限制。一般来说,冷加工适用于薄板材、线材的加工成型。

2. 热加工对材料组织和性能的影响

金属材料经热加工后可明显地改善其铸造组织。如铸造钢锭在凝固过程中,产生了气孔、缩孔、疏松、化学成分不均匀和非金属夹杂等缺陷。经过热变形(锻造),可使气体逸散,气孔、疏松焊合,化学成分扩散均匀。由于塑性变形和再结晶改变了粗大的铸造结晶组织,获得了细化结构,因而使钢材结构致密,提高了力学性能,尤其是塑性和韧性可提高 $1 \sim 2$ 倍(见

表 1-2)。

表 1-2 0.3%C 钢铸造和锻造后的力学性能比较

状 态	σ_b/MPa	σ_s/MPa	$\delta/\%$	$\psi/\%$	$a_k/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$
锻 造	519	304	20	45	0.69
铸 造	490	274	15	27	0.34

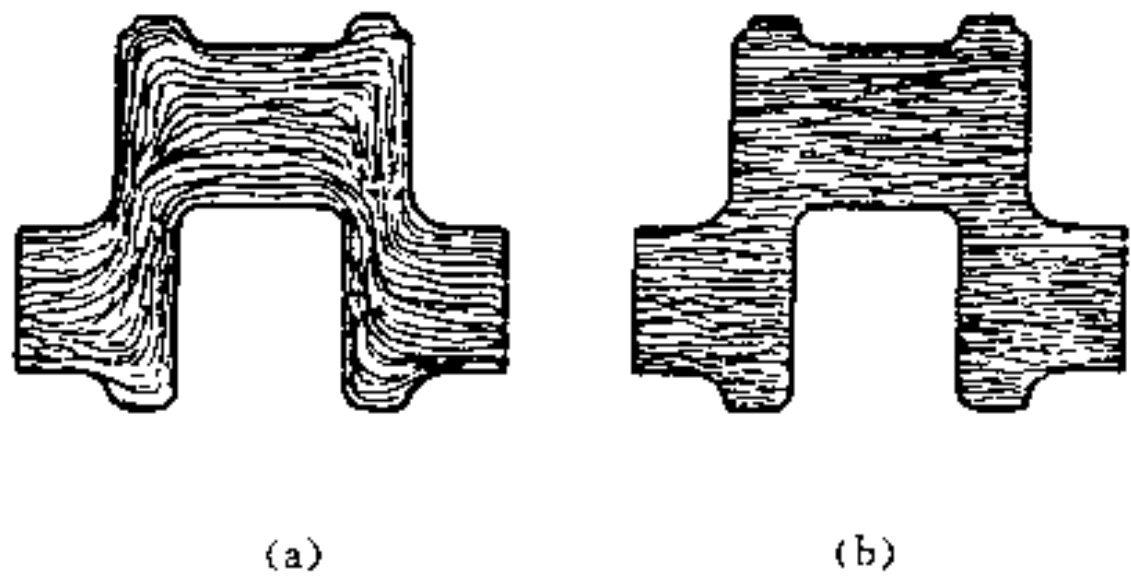
钢中的夹杂物多分布在晶界上,在热加工过程中随着晶粒变形夹杂物也沿着变形方向被拉长或碎化。而再结晶时,金属晶粒改变成等轴状,但夹杂物没有再结晶能力,依然呈带条状保留下来,形成细条状流线,称为纤维组织。图 1-27 为锻件纤维组织照片。纤维组织使材料有方向性,顺纤维方向比垂直于纤维方向具有较高的力学性能。表 1-3 为 45 钢在轧制正火状态下不同方向的力学性能。由于热加工后零件毛坯具有方向性,因此对重要受力零件,应使纤维方向与承受较大应力的方向一致,并在图纸上注明。图 1-28 是用轧材切削和锻造的曲轴纤维组织比较图。显然图 1-28(a)状态较好。

表 1-3 45 钢不同方向的力学性能

纤维方向	σ_b/MPa	σ_s/MPa	$\delta/\%$	$\psi/\%$	$a_k/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$
顺 纤维	700	460	17.5	62.8	0.61
横 纤维	658	431	10.0	31.0	0.29



图 1-27 锻件的纤维组织



(a) (b)

图 1-28 曲轴中的流线分布

(a) 流线分布合理;(b) 流线分布不合理

思考题与习题

1. 解释下列名词:
晶体、晶格、晶胞、晶粒、晶格常数。
单晶体、多晶体、晶界、亚晶界。

空位、间隙原子、位错、刃型位错、螺型位错。

结晶、晶核、过冷度、自发形核、非自发形核。

滑移、加工硬化、回复、再结晶。

2. 常见的金属晶格类型有哪几种？它们的原子排列有什么区别？Cu、Ni、Al、Cr、Mo、V、Mg、Zn 各属何种晶格？

3. 为什么单晶体呈各向异性？而多晶体一般呈各向同性？

4. 实际金属中常存有哪些缺陷？这些缺陷对金属的力学性能有何影响？

5. 液态金属结晶的必要条件是什么？用哪些方法可获得细晶粒组织？其依据是什么？

6. 铸锭组织有何特点？其形成原因是什么？对金属性能有何影响？

7. 金属经冷塑性变形后，它的组织、结构和性能发生了哪些变化？

8. 何谓加工硬化？试述加工硬化产生的原因。

9. 加工硬化现象在生产和工程实际中有何利弊？怎样消除加工硬化？

10. 为什么常温下金属的晶粒越细，不仅强度和硬度高，而且塑性和韧性也好？

11. 何谓临界变形度？为什么冷变形时要避开临界变形度？再结晶退火后晶粒大小受哪些因素控制？

12. 金属铸件往往晶粒粗大，能否直接通过再结晶退火来细化晶粒？为什么？

13. 钨在 1000℃ 变形加工，锡在室温下变形加工，请说明它们是热加工还是冷加工？为什么？（钨熔点 3410℃、锡熔点 232℃）。

14. 热加工对金属组织和性能有何影响？钢材热变形（如锻造）时为什么可以反复进行？

15. 用下列三种方法制造齿轮，哪一种比较理想？为什么？

(1) 用厚钢板切出圆饼，再加工成齿轮。

(2) 用粗钢棒切下圆饼，再加工成齿轮。

(3) 将圆棒钢材加热，锻打成圆饼，再加工成齿轮。

16. 用一冷拔钢丝绳吊装一大型工件入炉，并随工件一起加热到 1000℃ 保温，保温后再次吊装工件时，钢丝绳发生断裂，试分析原因。

第二章 合金相图

合金是由两种或两种以上的金属元素(或金属与非金属元素)所形成的物质。组成合金最基本的独立物质叫组元。如工业上广泛使用的钢和铸铁,就是由铁和碳两种组元组成的合金。因为纯金属力学性能较低,所以除了要求导电性高的电器材料外,工业上很少使用纯金属。合金不但具有比较高的力学性能,而且常常可以得到纯金属所不具备的特殊性能。合金的优良性能是由其内部组织及合金的相结构、性能和各相的组合情况决定的。为了研究合金的性能,首先必须了解合金中的相结构。

第一节 合金的相结构

合金中的相是指合金中具有同一化学成分、同一聚集状态、且以界面互相分开的各个均匀的组成部分。如室温下的纯铁由单相的 α -Fe组成。

根据合金元素之间相互作用的不同,合金中相结构大致可分为固溶体和化合物两大基本类型。在合金中还经常存在两种或两种以上晶体的混合物叫机械混合物。

一、固溶体

化学上说的物质互相溶解,是指它们的原子(或分子)均匀地混合在一起。如盐溶于水,就是盐和水分子互相均匀地混合。

熔化的铁(液态)能溶解碳,凝固后(固态)的铁仍能溶解一定量的碳。这种在固态下互相溶解所形成的物质叫“固溶体”。在这里铁是溶剂,碳是溶质。溶质原子溶入溶剂晶格以后,溶剂晶格类型不变。

工业上所用的合金大多数是单一固溶体或以固溶体为主的机械混合物。根据溶质原子在溶剂晶格中存在的位置。可将固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。

1. 置换固溶体

置换固溶体就是溶质原子占据了溶剂晶格的一些结点,在这些结点上溶剂原子被溶质原子置换了。合金钢中的锰、铬、镍、硅、铝等多种元素都能与铁形成置换固溶体。

图 2-1 表示形成置换固溶体后,产生的晶格畸变,这种畸变使合金的强度及电阻升高。当固溶体中溶质原子浓度增加时,固溶体的强度、硬度也随之提高。这是因为第二种元素浓度增高,晶格畸变加大,使变形时位错移动困难,因而提高了合金的强度和硬度。这种溶质元素使固溶体硬度和强度升高的现象称为固溶强化。固溶强化是提高材料力学性能的重要途径之一。例如我国普通低合金钢就是利用锰(Mn)、硅(Si)等元素使钢材力学性能提高的。

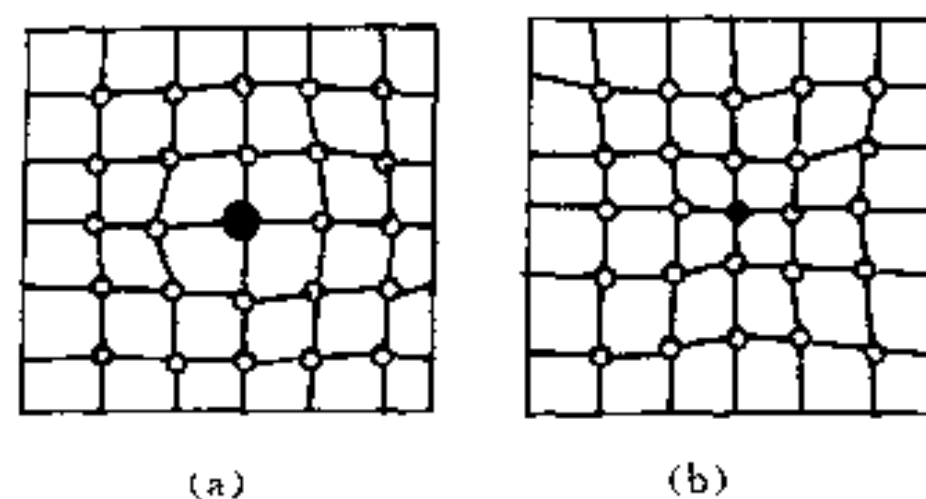


图 2-1 固溶体中的晶格畸变

- (a) 溶质原子半径大于溶剂原子半径;
(b) 溶质原子半径小于溶剂原子半径

根据组元之间的溶解能力,可形成无限固溶体,也可形成有限固溶体。当组元之间原子无限地相互代替时才能形成无限固溶体。因此形成无限固溶体主要决定条件如下:晶格类型相同、原子大小相近、周期表中位置相邻近。如铜和镍都是面心立方晶格,铜原子半径 1.28 Å,镍原子半径 1.24 Å,它们的原子半径差 3.2%,是同一周期,并且相邻,所以无限固溶。

2. 间隙固溶体

溶质原子进入溶剂晶格的间隙面形成的固溶体叫间隙固溶体。过渡族金属元素(如铁、钴、镍、锰、铬、钼)和氢、硼、碳、氮等原子半径较小的非金属元素结合在一起,能形成间隙固溶体。形成间隙固溶体时,溶剂与溶质原子直径一般为 $d_{\text{溶质}}/d_{\text{溶剂}} \leq 0.59$ 。由于溶剂晶格中间隙的位置是有限的,因此上述元素在过渡族金属中只能有限地溶解。

间隙原子同样导致合金晶格畸变,因此,随着间隙原子数量的增加,固溶体的硬度、强度和电阻也随之升高。

二、化合物

两元素形成化合物的倾向,决定于它们在元素周期表中的位置,相距越远、电化学性能相差越大,则越容易形成化合物。化合物的性质与其组元的性质完全不同。金属化合物在合金组织中是一个有效的强化相。因此,合金中化合物的种类、数量及分布等对合金性能产生很大的影响。合金组织中的化合物一般都具有较高的硬度和较大的脆性,它使合金的硬度、强度提高,同时导致合金的塑性和韧性下降。例如钢中的 Fe_3C 可使钢的强度、硬度提高而塑性和韧性降低。

三、机械混合物

在液态下组元互溶的合金凝固后,可能形成单相固溶体或单相金属化合物;还可能形成两种固溶体或固溶体加金属化合物的混合物,此称机械混合物。

两种固溶体或固溶体与化合物的混合物组成的合金,其性质决定于两种固溶体或固溶体与化合物的性质以及各自的形状、大小、数量和分布。例如碳钢退火状态下的组织就是碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的间隙固溶体(铁素体)与化合物(Fe_3C)的混合物。铁素体软而韧,渗碳体(Fe_3C)硬而脆。不同含碳量的钢,渗碳体的数量不同,钢的性能也有很大的差别。

混合物的力学性能可根据两相的相对数量,大致用算术平均值估算,但其形状、大小、分布状态对性能也有很大影响。

第二节 二元合金相图

合金相图是用图解的方法表示不同温度及成分下合金系中各相的平衡关系,所以又称平衡图或状态图。

利用相图可以知道不同成分的合金,在不同温度下有哪些相,它们的相对含量和成分。掌握了这些变化规律就可以知道合金的组织状态、并能预测合金的性能,也可以按要求研制新合金。在生产实践中,相图可作为制定合金铸造、锻造及热处理工艺的重要依据。

现以二元合金相图为例,分析一下合金的组织与性能的关系,为学习本课程打下一定的理论基础。

一、相图的建立

为了绘制相图,需通过实验测定一系列不同成分的合金状态变化的温度(监界点),然后

依此数据绘出相图中所有的线条。合金状态变化的临界点可用热分析法、X射线晶体结构分析法、显微分析法、膨胀法、电阻法等方法测定。

热分析法是最基本最常用的方法。这种方法是将不同成分的合金极缓慢地加热或冷却。每经过相等的时间间隔测量一次合金的温度，根据这些温度数据绘出合金的加热或冷却曲线，如图 2-2(a) 所示。由于合金从一种状态转变成另一种状态时会发生吸热或放热现象，而使加热(或冷却)曲线发生明显的转折或呈水平。

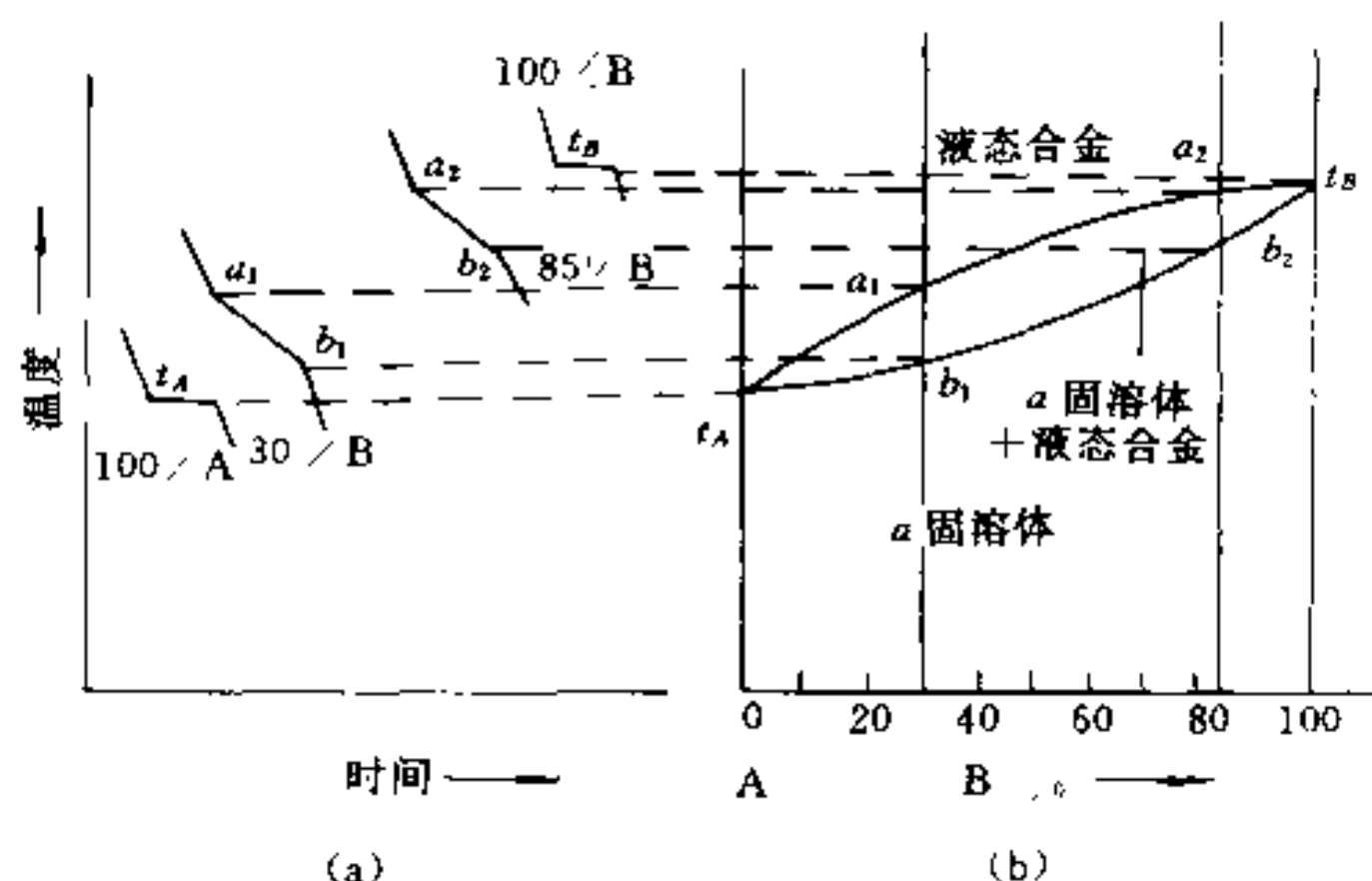


图 2-2 二元合金相图的建立(示意图)

(a) 冷却曲线; (b) 状态图

或呈水平。用加热或冷却曲线确定合金的临界点，再将各临界点表示到温度—成分坐标系中相应的位置上，把各相同意义的临界点连接起来，就得到了如图 2-2(b) 所示的合金相图。

二、匀晶相图

两组元组成的合金系在液态下无限互溶，在固态下也无限互溶，所形成的相图就是匀晶相图。例如 Cu—Ni、Au—Ag、W—Mo、Cr—Fe 等合金都形成这类相图，它是基本相图中最简单的一种，仅由两条线(液相线和固相线)所分隔开的两个单相区和一个两相区(液相和固相并存区)组成。

1. 铜镍合金相图相区分析

铜镍合金相图如图 2-3 所示。图中 $t_A=1083^\circ\text{C}$ 为纯铜的熔点; $t_B=1451^\circ\text{C}$ 为纯镍的熔点。 $t_Aa_2aa_1t_B$ 为液相线, $t_Ab_2cb_1t_B$ 为固相线。液相线与固相线把整个相图分为三个区域。在液相线以上是单相液相区, 在固相线以下是单相固溶体区。在液相线和固相线之间是固、液两相并存区。

2. 合金的结晶过程

我们以含镍 60% 的 Cu—Ni 合金为例分析其结晶过程。如图 2-3 所示, 当温度降到 a_1 点

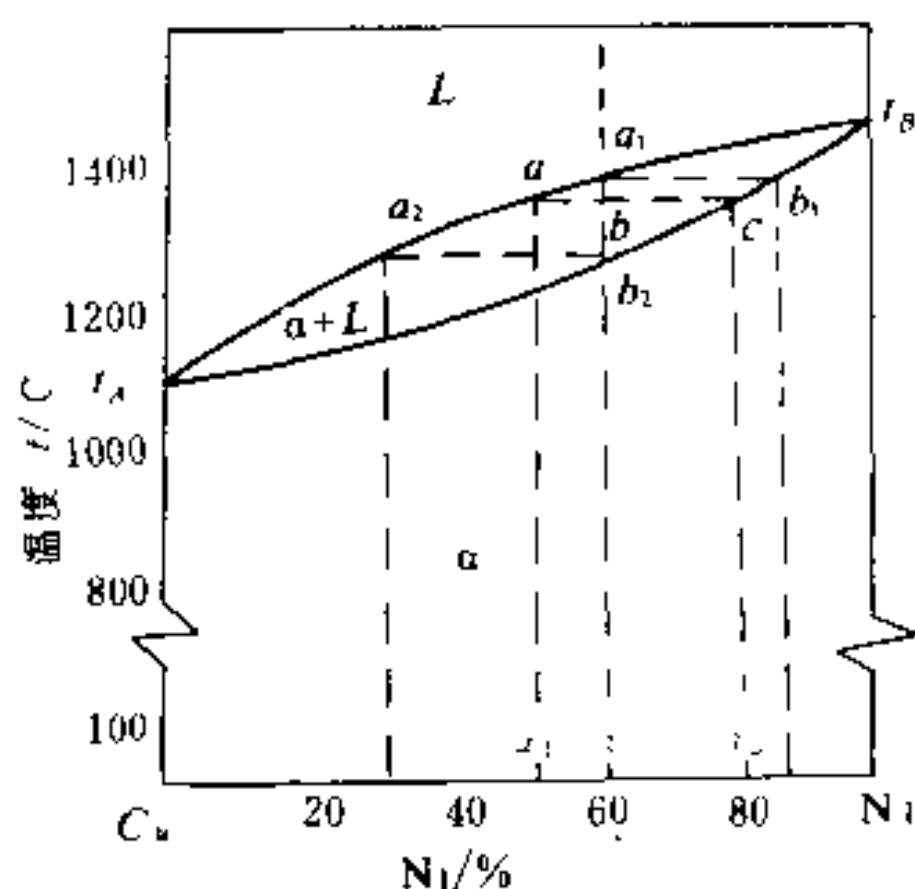


图 2-3 铜镍合金相图

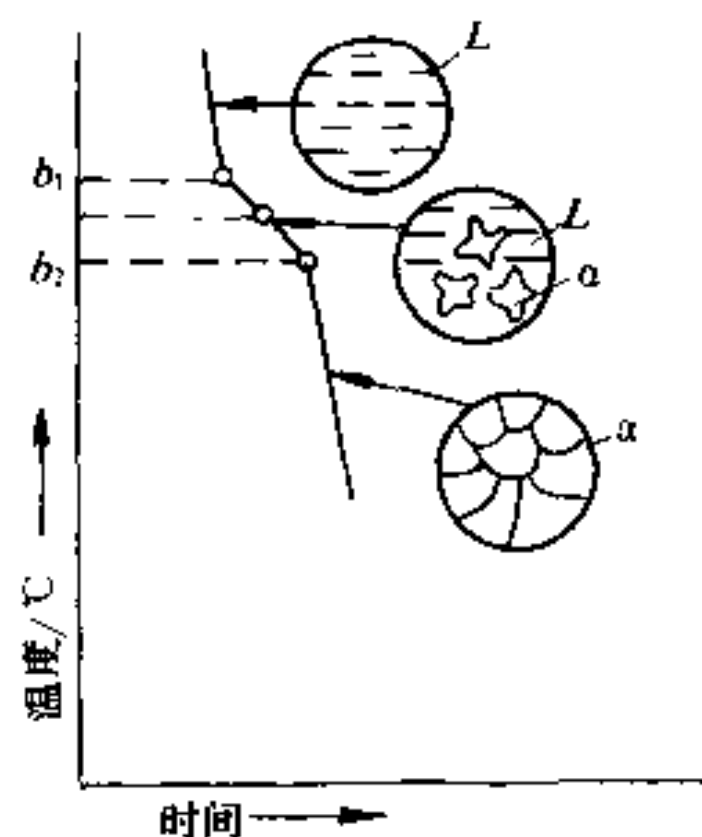


图 2-4 铜镍合金结晶过程示意图

时,由液相中开始析出 α 固溶体,这时结晶出的 α 固溶体的成分相当于 b_1 点的成分(约含85%的镍)。当温度下降时,液相中继续析出 α 固溶体。 α 固溶体的成分不断沿固相线变化,而液相的成分不断沿液相线变化。当温度下降到 b_2 时,合金全部变成固溶体 α ,其成分为 b_2 ,即此合金的成分(60%Ni)。其结晶过程示意如图2-4。由以上叙述可得到如下重要规律:固溶体合金,在平衡结晶过程中,固相成分沿固相线变化,液相成分沿液相线变化。当然在结晶过程中,液相量逐渐减少,固相量逐渐增加,直至结晶完毕得到单相固溶体。再继续冷却到室温,不再发生相和成分的变化,得到颗粒状晶粒组织。

3. 杠杆定律及其应用

当合金在某一温度下处于相图中的两相区时,应用“杠杆定律”不仅可以知道两平衡相的成分,还可求出两平衡相的重量比。现仍以图2-3为例说明。若含Ni量为 x 的合金,处于 b 点所代表的温度时,液相 L 的成分以 a 表示,含Ni量为 x_1 。 α 固溶体的成分以 c 表示,含Ni量为 x_2 ,设液、固两相重量分别为 Q_L 和 Q_α ,合金总重量为1,则可得如下方程:

$$\begin{cases} Q_L + Q_\alpha = 1 \\ Q_L \cdot x_1 + Q_\alpha \cdot x_2 = x \end{cases}$$

$$Q_L = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} = \frac{bc}{ac}$$

$$Q_\alpha = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{ab}{ac}$$

如果把 abc 看作一根杠杆,从图2-5可以看出, Q_L/Q_α 恰好与它们的杠杆臂成反比关系。此关系符合力学中的杠杆定律,故也称为杠杆定律。

必须指出,杠杆定律只适用于两相区。

4. 合金的不平衡结晶与树枝状偏析

在实际生产中,由于冷却速度较快,合金在结晶过程中,无论固相或液相中的原子都来不及进行充分扩散,这种结晶过程称为不平衡结晶。例如图2-3所示的Cu-Ni合金,如果从液态快速冷却,则开始结晶出来的固溶体晶体成分为 b_1 (含高熔点组元镍较多),随着温度下降,在它外面又形成一层层镍含量大于 b_2 而小于 b_1 的固溶体晶体。由于各层之间的原子来不及充分扩散,这种成分不均匀现象可保持到结晶完毕,直至室温。这种现象叫枝晶偏析或树枝状偏析。由于一个枝晶形成一个晶粒,因而也叫晶内偏析。

具有枝晶偏析的合金,其塑性、韧性显著下降。为了改善其力学性能,生产上常在高温下(低于固相线温度)长时间加热,使原子充分扩散,以消除枝晶偏析。这种热处理工艺叫做扩散退火或均匀化退火。经热处理后的合金组织与图2-3的平衡组织相同。

三、共晶相图

共晶相图如图2-6所示。这类相图的特点是:组元在液态完全互溶为成分均匀的单相熔体(溶体),但在固态下,组元完全不溶(严格地说是溶解度极其微小)或有限互溶,形成两种

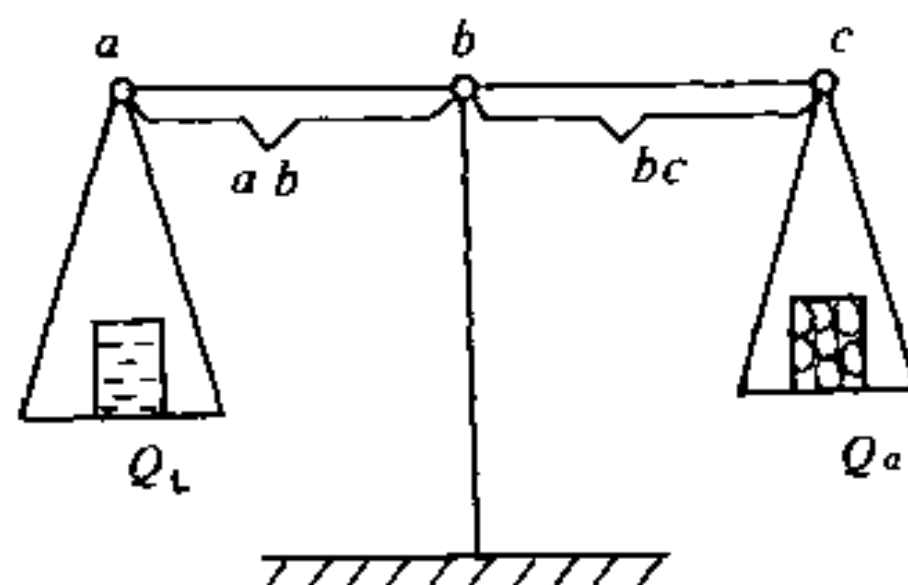


图2-5 杠杆定律的力学比喻

(二元合金系)或两种以上(多元合金系)晶体的混合组织。这两种或多种晶体是共同(同时)生成的,故称共晶组织。

形成二元共晶相图的常见合金有:Pb—Sn、Ag—Cu、Al—Si 等。

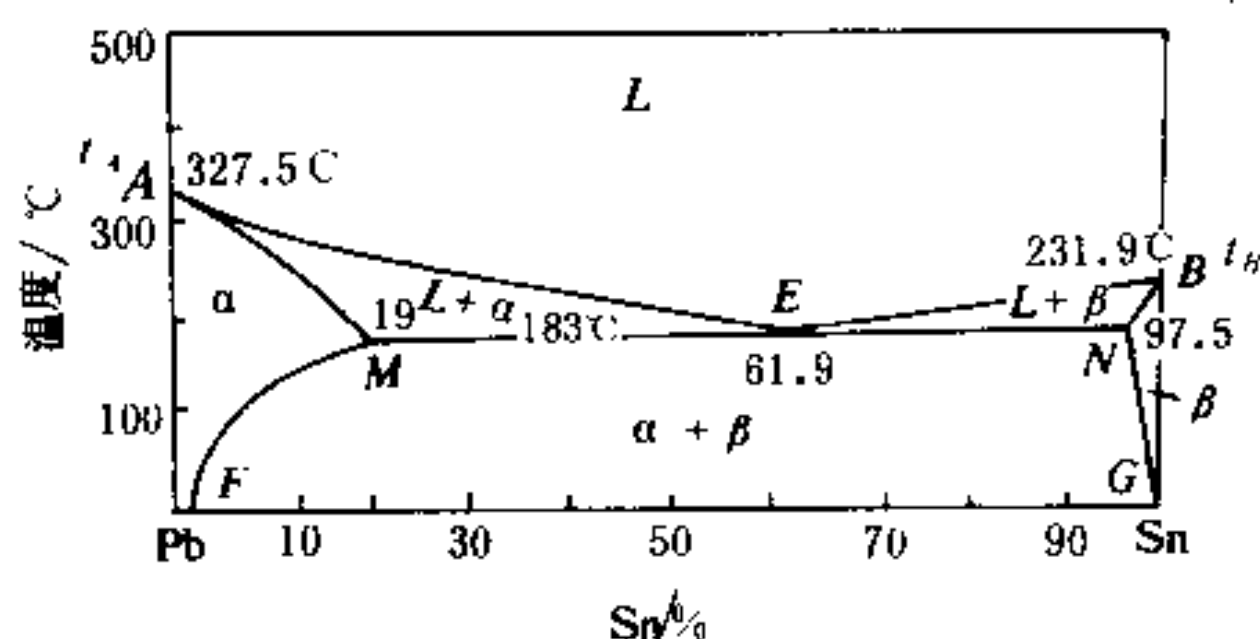


图 2-6 Pb—Sn 相图

1. Pb—Sn 合金相图分析

图 2-6 左、右端点分别代表纯 Pb 和纯 Sn 的位置。纯 Pb 的熔点为 327.5°C,以 A 点表示;纯 Sn 的熔点为 231.9°C,以 B 点表示。AEB 为液相线,处于此线以上的所有合金均为液态。AMENB 为固相线,在此线以下所有合金均为固态。

固态下,铅能溶解一定量的锡;锡也能溶解一定量的铅。也就是说这种

合金能形成以铅为母体(溶剂)和以锡为母体(溶剂)的两种有限固溶体,其溶解度都随温度的下降而减少。

如果合金以 Pb 为主,合金中含 Sn 量低于固态下 Sn 能在 Pb 中溶解的最大限度时,当其冷却成固体后,将结晶为成分均匀的单相固溶体,即 Sn 溶于 Pb 的固溶体(用 α 表示)。与此相似,如果合金以 Sn 为主,合金中含 Pb 量低于固态下 Pb 能在 Sn 中溶解的最大限度时,则结晶后也将成为成分均匀的单相固溶体,但它是 Pb 溶于 Sn 的固溶体(用 β 表示)。

Sn 在 Pb 中的最大溶解度是 19.2%(183°C),Pb 在 Sn 中的最大溶解度是 2.5%(183°C)。所以含 Sn 在 19.2%以下和 Pb 在 2.5%以下的合金凝固后均形成固溶体(分别称为 α 和 β),其结晶过程和前述匀晶相图的合金基本相同,冷至液相线开始结晶,至固相线结晶完毕。

Sn 在 Pb 中的溶解度随温度的不同而改变,温度越低其溶解度越小;同样 Pb 在 Sn 中的溶解度也随温度的降低而减小。图 2-6 中 MF 和 NG 分别表示 Sn 在 Pb 和 Pb 在 Sn 中的溶解度线。

2. 典型合金的结晶过程(图 2-7)

(1) 合金 I (含 Sn 低于 19.2%)

0→1:液体金属降温,冷至点“1”后开始结晶。

1→2:液体 L 结晶为 α 固溶体的过程。从点“1”开始至点“2”结晶完毕,在 1 到 2 之间为 L、 α 两相共存,其组织如图 2-8(a)所示。

2→3:固溶体 α 的降温过程。其组织如图 2-8(b)所示。

3→4:从 α 中析出 β 的过程。MF 是 Sn 在 Pb 中的溶解度线,即各种温度下 Pb 能溶解 Sn 的最大限度。从纵坐标得知,点

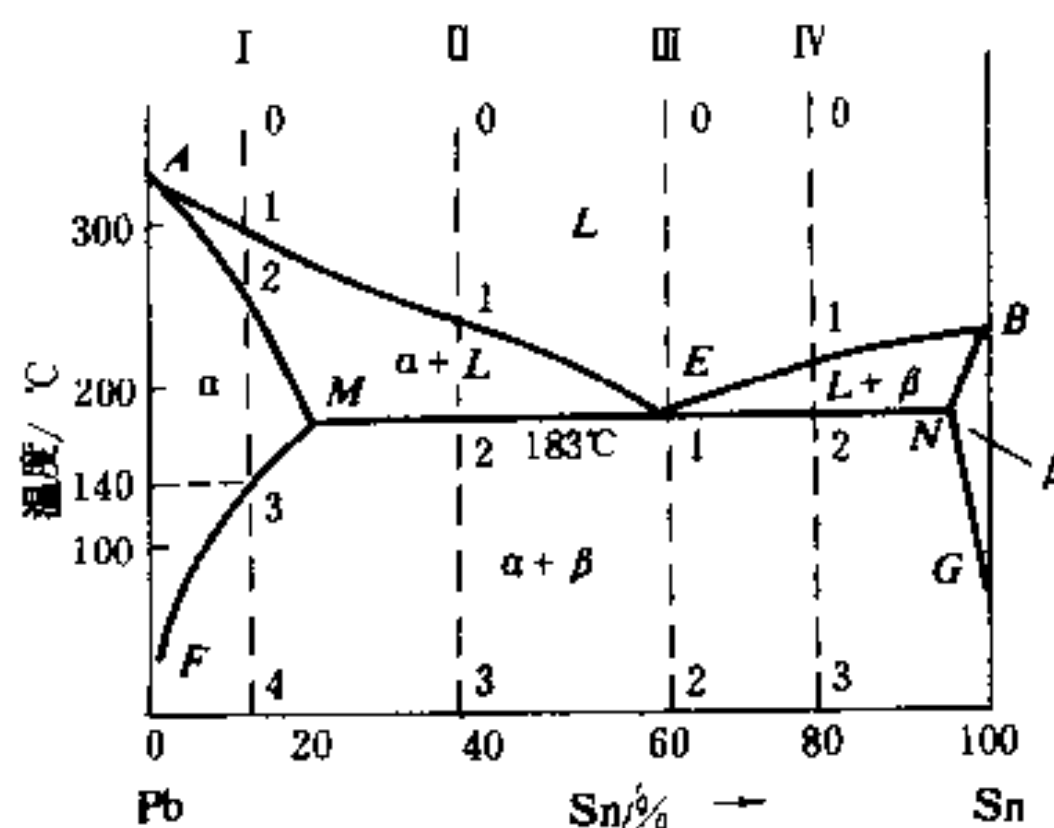


图 2-7 Pb—Sn 相图

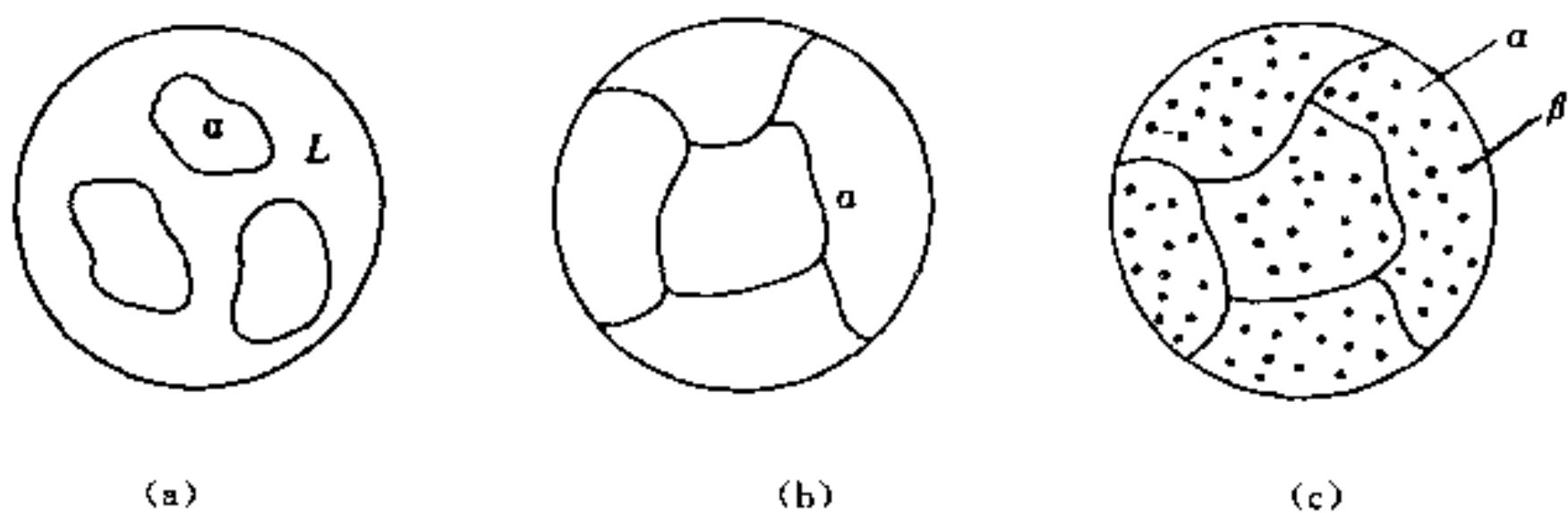


图 2-8 合金 I (含 Sn 低于 19.2%) 结晶过程组织示意图

“3”为 140°C , 从横坐标看出 140°C 时 α 溶解 Sn 的最大限度为 13%, 也就是说合金 I 在 140°C 时, α 固溶体处于饱和状态。低于 140°C , α 含 Sn 过饱和, 所以从“3”到“4”的降温过程中, α 将不断析出 β , 其组织如图 2-8(c) 所示。

(2) 合金 II (共晶合金、含 Sn 量 61.9%)

0→1: 液态金属降温, 至点“1”开始结晶, 并在恒温下 (183°C) 完成结晶过程。从液体中同时结晶出 α 和 β 固溶体, 其组织叫共晶体。共晶体在显微镜下有多种形态, 最常见的是层片状。Pb—Sn 合金的共晶体呈层片状。

1→2: 从 α 固溶体中不断析出 β 相, 从 β 固溶体中不断析出 α 相。

从图 2-6 中得知, 在 183°C 时 α 固溶体中溶解 Sn 的量为 19.2%, β 固溶体中溶解 Pb 量为 2.5%, 随着温度的降低, α 和 β 固溶体的溶解度下降。也就是说温度降低时 α 固溶体将把不能溶解的 Sn 沉淀出来, β 也将把不能溶解的 Pb 沉淀出来, 但沉淀出来的不是纯 Sn 或纯 Pb, 而是以 Sn 为主体的 β 和以 Pb 为主体的 α 。

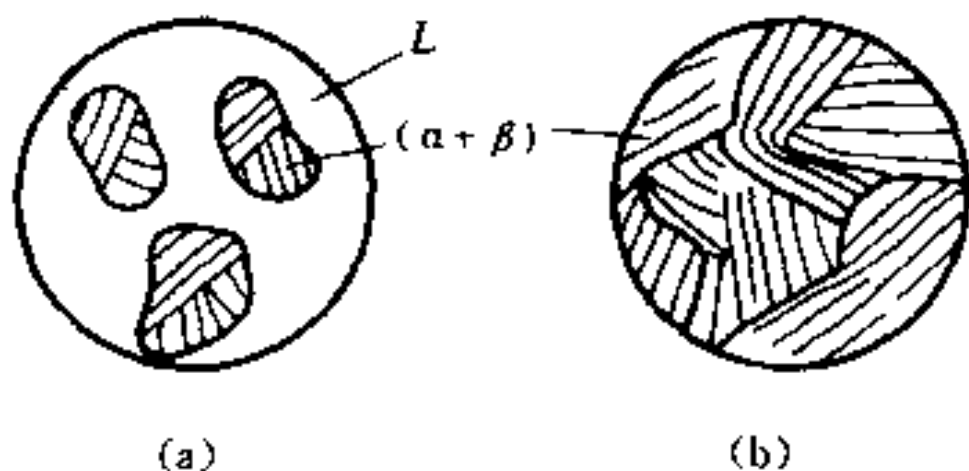


图 2-9 合金 II (含 61.9% Sn) 结晶过程示意图

图 2-9(b) 是合金 II 在室温下的显微组织示意图。因共晶体中的 α 和 β 呈薄片状相间分布, 降温时从 α 中沉淀出来的 β 和原来的共晶体中的 β 混为一体, 同样, 从 β 中沉淀出来的 α 也和原来共晶体中的 α 混为一体。所以显微组织图中不能分辨降温过程中由于溶解度变化而分解出来的 α 和 β 。

(3) 合金 I (亚共晶合金, 含 Sn 量小于 61.9%)

0→1: 液体金属降温, 至点“1”开始结晶。

1→2: 液体 L 结晶出 α 的过程。温度越低结晶出的 α 越多。冷却时, α 的成分沿固相线 AM 变化, 液体 L 的成分沿液相线 AE 变化, 因而当温度降至点“2”时 (183°C), α 的成分为 M 点所代表, L 的成分为 E 点所代表, 即共晶成分 (含 61.9% Sn)。根据杠杆定律可知, 这时液体 L 的相对量为 $M2/ME \times 100\%$, 这一部分共晶成分的液体如同合金 II 一样, 将在固定不变的温度下 (183°C) 转变为共晶组织。图 2-10(a) 是 1→2 之间液、固两相共存的组织示意图。图 2-10(b) 是合金在点“2” (183°C) 的组织示意图。

2→3: 在点“2”时 (183°C) α 中含 Sn 量为 19.2%, 处于饱和状态, 温度低于 183°C , α 过饱和析出 β , 沉淀在先共晶析出 (183°C 以上) 的 α 晶内。而共晶组织中从 α 析出的 β 和从 β 中

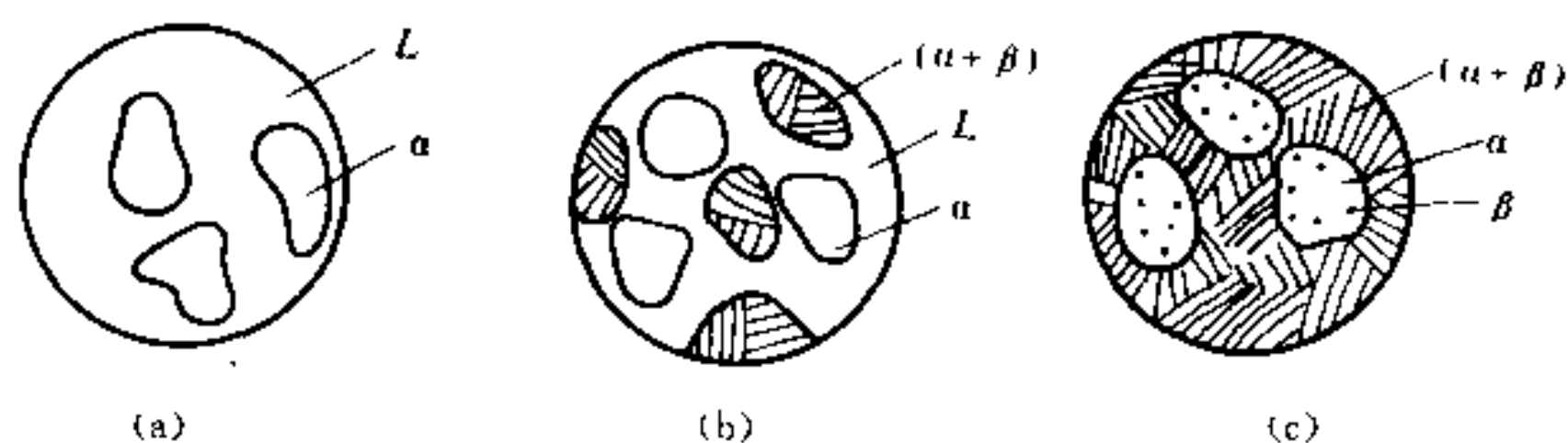


图 2-10 合金 II 结晶过程组织示意图

析出的 α 从组织上仍然不能分辨,其显微组织示意图如图 2-10(c)所示。

(4) 合金 IV (过共晶合金,含 Sn 大于 61.9%)

其结晶过程与合金 II 相似,不过先共晶析出的是 β 而非 α ,这里不再赘述,由同学写出结晶过程并画出组织示意图。

第三节 铁碳合金相图

铁和碳两种元素组成的合金叫做铁碳合金。碳钢和铸铁含其它元素不多,都可以看作是铁碳合金。铁碳合金相图如图 2-11 所示。从相图上可以了解各种含碳量的钢铁在不同温度下所存在的状态(即组织),因此铁碳相图是研究钢铁成分、组织和性能之间关系的理论基础,也是制定各种热加工工艺的依据。

为了便于分析,我们先讨论 Fe—Fe₃C 相图上相的种类,然后再分析典型合金的结晶过程。

一、相的种类

1. 铁素体

碳在 α -Fe 中的固溶体称为铁素体,用“F”表示。 α -Fe 是溶剂,碳是溶质,铁素体仍然保持体心立方晶格,直径小的碳原子填塞于体心立方晶格的间隙处。碳在 α -Fe 中溶解度极小,最多只有 0.02%(727℃),这是因为 α -Fe 中容纳碳原子的间隙半径很小,碳原子不能进入,碳在 α -Fe 中实际上只存在于晶格缺陷处。所以铁素体含碳很低,其性能和纯铁基本相同,强度极限只有 250 MPa,硬度只有 80 HBS,但塑性(延伸率 $\delta=50\%$)和冲击韧性好。

2. 奥氏体

奥氏体是碳在 γ -Fe 中的固溶体,用“A”表示,它保持着面心立方晶格。碳填塞在面心立方晶格的间隙中,其容纳碳原子的最大间隙是在晶胞中心,各棱上也有同样的空位,如图 2-12 所示。碳在 γ -Fe 中的溶解度较大,最大可达 2.11%(1148℃)。因为 γ -Fe 只存在于 912℃以上的高温范围,因此,加热到高温时可以得到单一的奥氏体组织。由于奥氏体是容易产生滑移的面心立方晶格,故塑性较好,所以钢在锻造时须加热到高温,使之呈奥氏体状态,以易于进行塑性变形。

3. 渗碳体

渗碳体是铁和碳的化合物,用 Fe₃C 表示,其含碳量为 6.67%。由于碳在 α -Fe 中溶解度很小,所以在常温下钢中的碳大都以渗碳体形态存在。

渗碳体的结构较复杂,最常见的表示方法如图 2-13 所示。它是由碳原子构成一个斜方

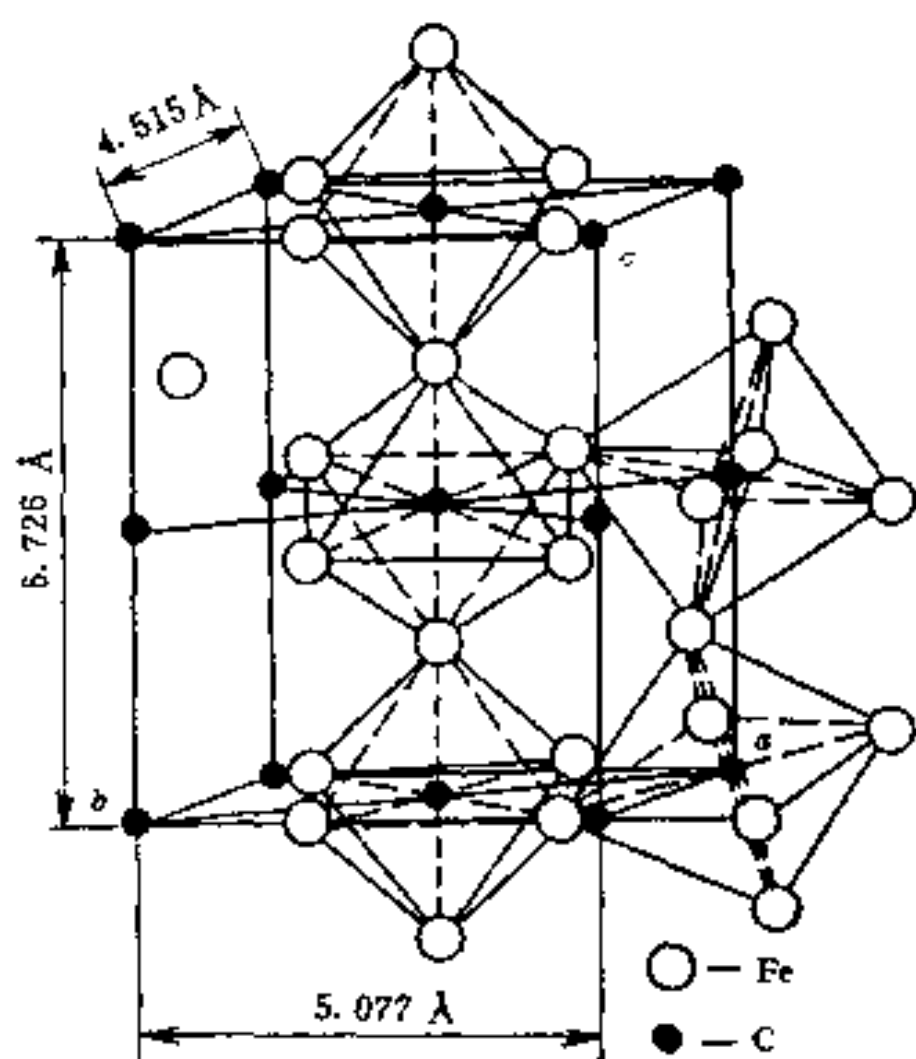


图 2-13 渗碳体晶体结构

$\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}(\text{石墨})$, 这对铸铁有重要意义。

二、相图分析

简化了的相图如图 2-14 所示, 它略去了 1394℃ 以上的高温组织变化。

图中的各条线是由一系列不同成分的铁碳合金状态变化的温度(即临界点)连接而成的。许多线条所分割的部分代表状态相同的区域。例如 ACD 线以上为液体, 就表示各种含碳量的铁碳合金, 只要加热到这条线以上就呈完全熔化状态。 $AESG$ 区域为奥氏体区, 表示各种含碳量的钢只要加热到这个区域都要变成奥氏体。

下面就 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图中的主要特性点和特性线加以分析。

1. 特性点

$\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图中各特性点的符号、温度、含

碳量及物理意义列于表 2-1。

2. 特性线

(1) ACD 线, 即液相线, 在此线以上是液相区。液相用符号“L”表示。合金冷却到此线开始结晶。

(2) $AECF$ 线, 即固相线, 所有合金在此线以下均是固体状态。

(3) GS 线(称 A_3 线), 表示含碳低于 0.77% 的钢加热时, 铁素体转变为奥氏体的终了温度。反之则表示缓慢冷却时由奥氏体中开始析出铁素体的温度。

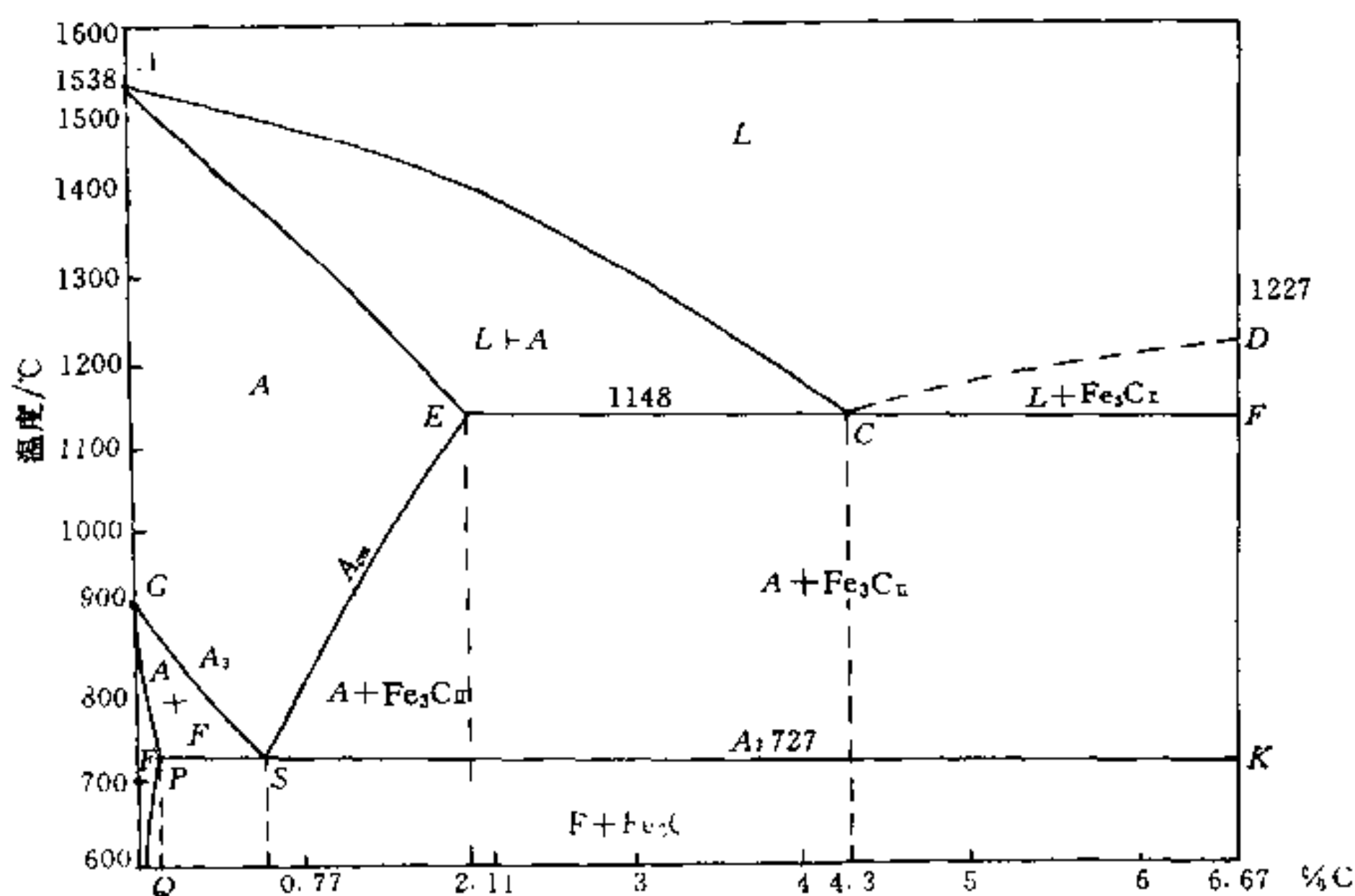


图 2-14 简化的 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 合金相图

A——奥氏体; F——铁素体; L——液相; P——珠光体

表 2-1

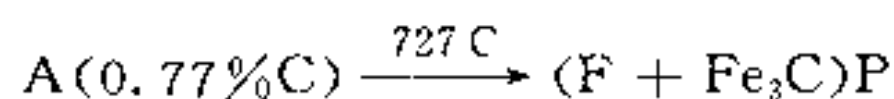
简化的 Fe—Fe₃C 相图各主要点的物理意义

点的符号	温度 /℃	含碳量 /%	物理意义
A	1538	0	纯铁熔点
C	1148	4.30	共晶点, $L_c \rightleftharpoons A_2 + Fe_3C$
D	1227	6.67	渗碳体熔点(计算值)
E	1148	2.11	碳在 γ -Fe 中的最大溶解度
F	1148	6.67	渗碳体
G	912	0	α -Fe \rightleftharpoons γ -Fe 同素异构转变点
K	727	6.67	渗碳体
P	727	0.02	碳在 α -Fe 中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点, $A_1 \rightleftharpoons F_p + Fe_3C$
Q	室温	0.0008	碳在 α -Fe 中的溶解度

注:因试验条件和方法的不同以及杂质的影响,常使相图中各主要点的温度和含碳量数据略有出入。

(4) ES 线(称 A_{cm} 线),表示碳在奥氏体中溶解度曲线。在 1148℃ 时,碳在奥氏体的溶解度最大(2.11%)。随温度下降,含碳量逐渐减少,温度下降到 727℃ 时,降到 0.77%。含碳量大于 0.77% 的钢冷却到 ES 线所代表的温度时,开始把溶解不了的碳析出,形成渗碳体。它常常在奥氏体的晶界上呈网状分布,称为网状渗碳体。

GS 线与 ES 线的交点 S 称为共析点。它表示含碳量为 0.77% 的钢冷却至 727℃ 时奥氏体同时析出铁素体与渗碳体的机械混合物。这种转变叫共析转变,因抛光试样浸蚀后发珠宝光,故称珠光体,用符号“P”表示。



通常把含碳量为 0.77% 的钢称为共析钢。

珠光体在显微镜下观察时,它是一片铁素体和一片渗碳体相间地排列着。其硬度为 190~230 HBS(片状),抗拉强度 $\sigma_b = 850$ MPa,延伸率 $\delta = 20\% \sim 30\%$,强度比铁素体高,脆性比渗碳体低,是钢的基本组织之一。如图 2-17 和图 2-22(b)所示。

(5) 水平线 PSK(称 A_1 线)相当于 727℃,它表示所有碳钢在缓慢加热时开始转变为奥氏体的温度,或者缓慢冷却时,奥氏体完全转变为常温组织的温度。因为在这条线上发生共析转变,即: $A(0.77\%C) \xrightarrow{727^\circ C} (F + Fe_3C)P$,所以又叫共析线。

(6) 水平线 ECF 相当于 1148℃,称共晶线。在此线上发生共晶反应: $L(4.3\%C) \xrightarrow{1148^\circ C} A(2.11\%C) + Fe_3C$,即从含碳 4.3% 的液体中同时结晶出含碳 2.11% 的奥氏体与含碳 6.67% 的渗碳体。共晶反应的产物叫莱氏体(见图 2-23)。

三、典型铁-碳合金结晶过程

根据铁-碳合金中的含碳量,可把铁-碳合金分为钢和铸铁。含碳量小于 2.11% 的铁-碳合金称为钢;含碳量大于 2.11% 的铁碳合金称为铸铁。根据组织特点又把钢分成三类:含碳量为 0.77% 的钢称为共析钢;含碳量小于 0.77% 的钢称为亚共析钢;含碳量大于 0.77% 的钢称为过共析钢。

铸铁也可分为三类：含碳量等于 4.3% 的铸铁称为共晶铸铁；含碳量小于 4.3% 的铸铁称为亚共晶铸铁；含碳量大于 4.3% 的铸铁称为过共晶铸铁。铸铁实际含碳量最高不超过 5%，否则，性能很脆，没有实用价值。

1. 共析钢

含碳为 0.77%，图 2-15 中合金①的转变过程。温度高于点“1”时合金①处于液态，当冷却到和液相线 AC 相交时（点 1），液体 L 开始结晶，析出奥氏体（A），此时的奥氏体相对量

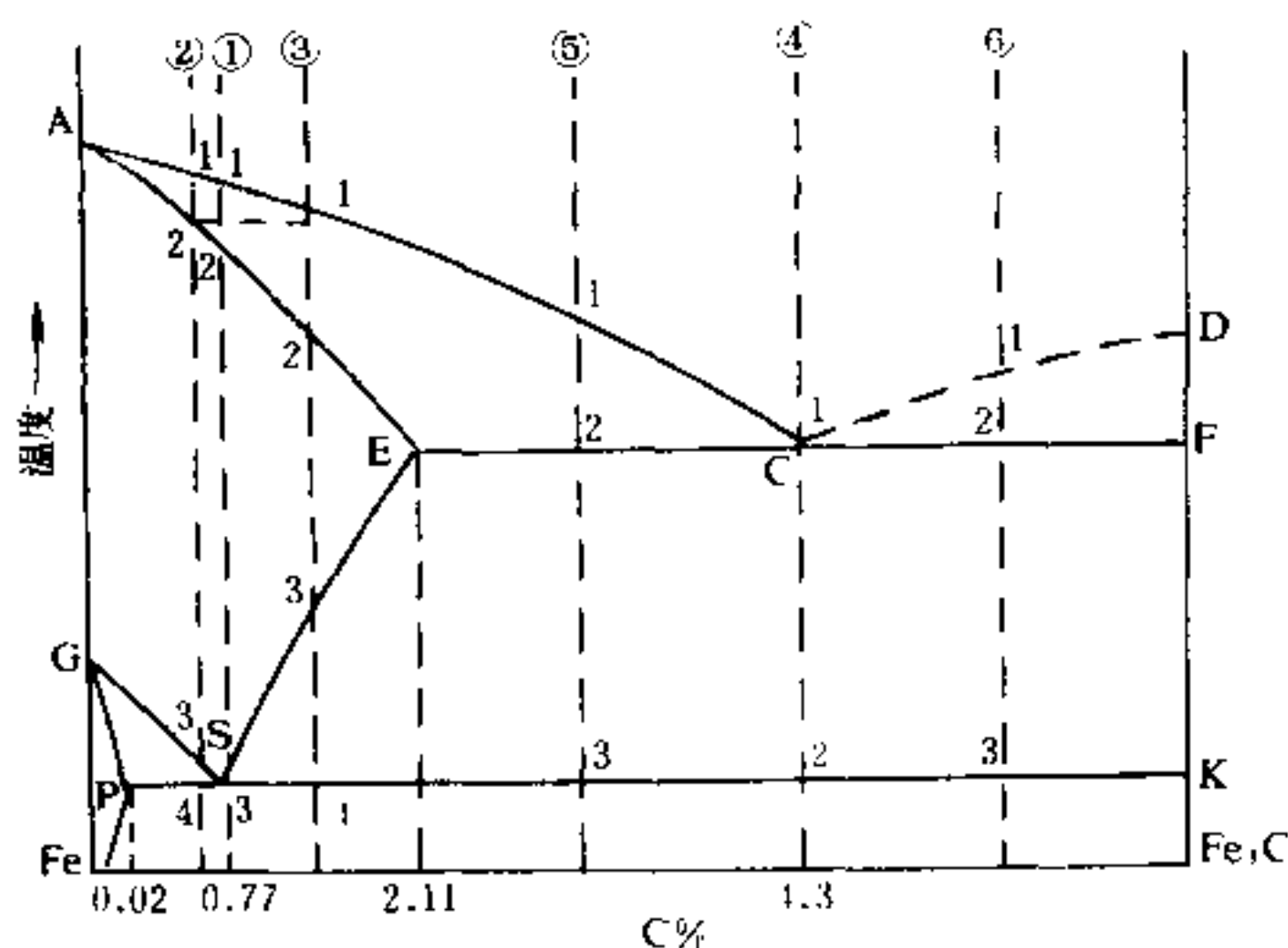


图 2-15 六种典型的铁-碳合金冷却结晶过程分析

少，奥氏体中含碳量低（具体数值可用杠杆定律求出）。随着温度下降，液体中不断析出奥氏体晶体，奥氏体的成分不断沿固相线变化，而液相的成分不断沿液相线变化。当温度下降到点“2”时，液体结晶为奥氏体的过程结束，其组织全部由均匀的奥氏体晶粒构成。继续冷却到点“3”即 S 点，发生共析反应： $A \xrightarrow{727^\circ\text{C}} (F + \text{Fe}_3\text{C})P$ 得到珠光体。温度继续下降到室温仍为珠光体。合金①在冷却过程中的组织变化如图 2-16 所示。金相显微组织如图 2-17 所示，图 2-22(b) 为组织示意图。

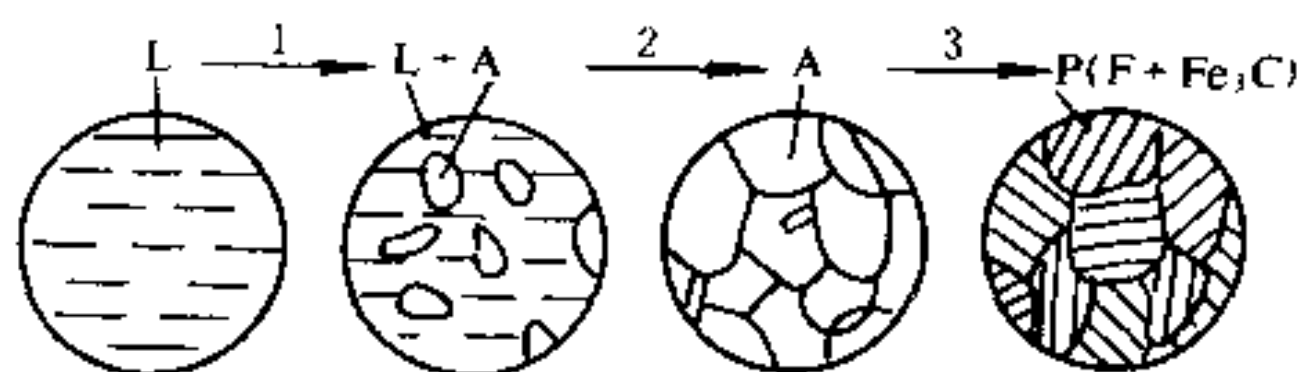


图 2-16 共析钢冷却结晶示意图

2. 亚共析钢

以含碳为 0.6% 的合金为例，如图 2-15 中的合金②。点“3”以上与前述的合金①类似，通过“1”、“2”点结晶为奥氏体，在 2-3 阶段处于均匀的奥氏体状态。当冷却到点“3”时，开始析出少量的铁素体。随着温度下降，铁素体越来越多，其成分沿 GP 线不断变化，奥氏体成分沿 GS 线变化。由于铁素体内几乎不能溶碳，则在铁素体不断增多的同时，剩下的越来越少

的奥氏体中含碳量将不断增多。当温度下降到点“4”时,组织中除铁素体外,还有未转变的奥氏体,此时,奥氏体的含碳量已增加到了 0.77%,这部分奥氏体将转变成珠光体。故在 3-4 阶段,合金由 A + F 构成,在略低于点“4”温度时,合金由 F + P 构成。再往下冷却, F 中要析出渗碳体,但因其数量很少,一般情况下作用很小,常被忽略。故亚共析钢的室温组织为 F + P,其结晶过程与组织变化如图 2-18 所示;金相显微组织如图 2-19 所示;图 2-22(a)为组织示意图。



图 2-17 含 0.77% C 钢的显微组织

3. 过共析钢

以含碳量为 1.2% 的合金为例,如图 2-15 中的合金③。这种合金通过“1”、“2”点结晶为奥氏体,在 2-3 阶段合金处于均匀奥氏

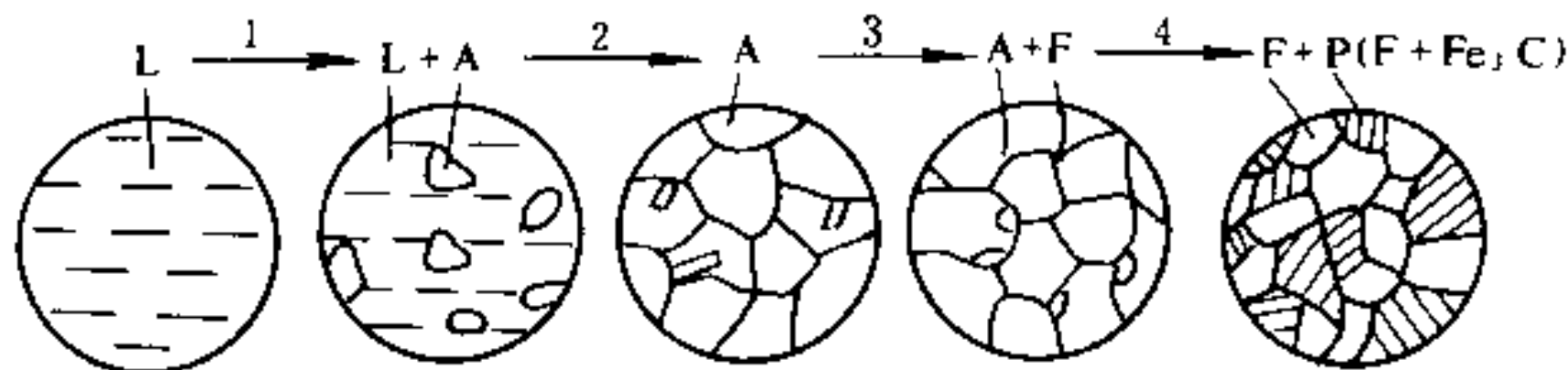


图 2-18 亚共析钢结晶过程示意图

体状态,冷却到点“3”,从奥氏体中析出渗碳体。析出的渗碳体沿奥氏体晶界呈网状分布,叫做二次渗碳体,用 Fe_3C_1 表示。在继续冷却过程中, Fe_3C_1 的数量不断增多,由于 Fe_3C_1 含碳量高(6.67%),所以剩下的奥氏体中的含碳量将逐渐减少。当温度下降到点“4”(727℃)

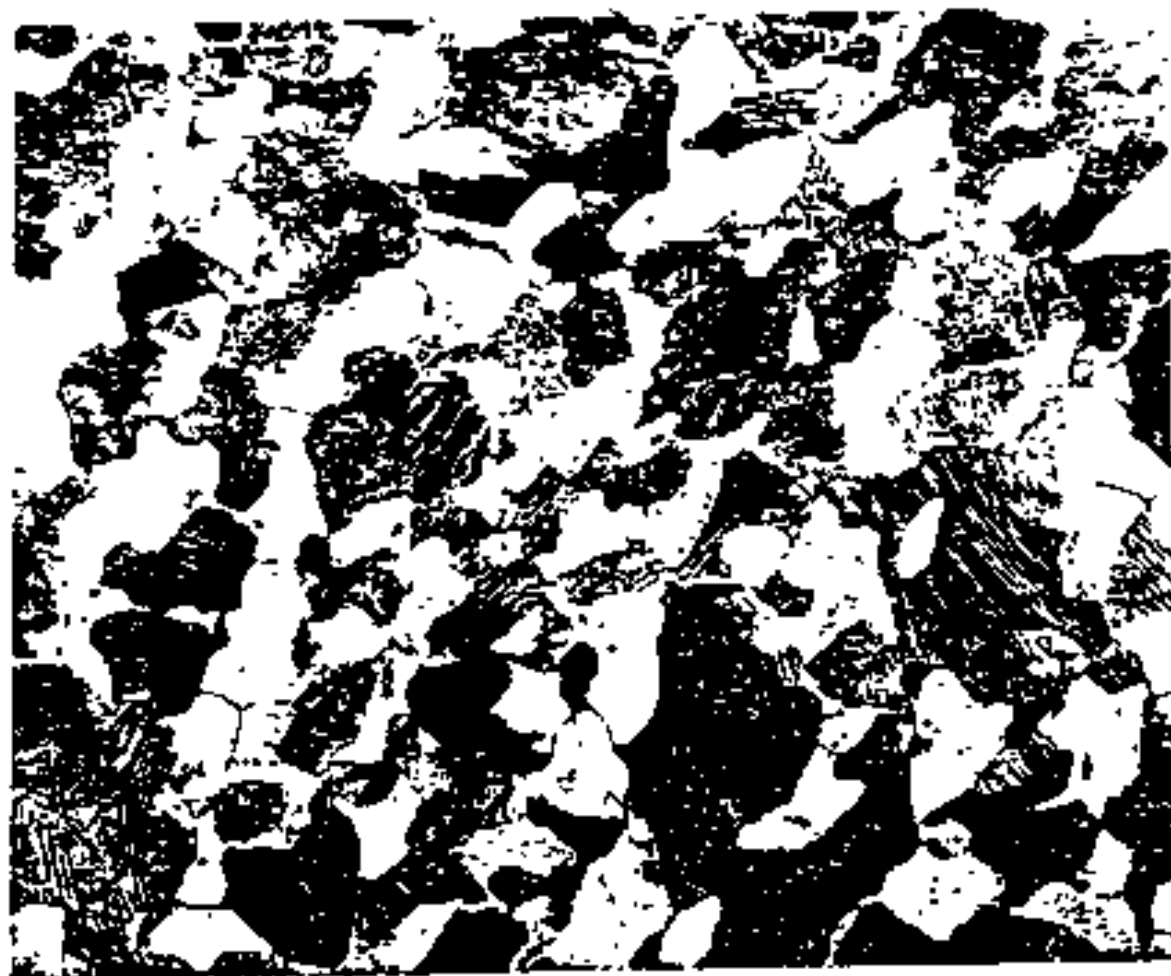
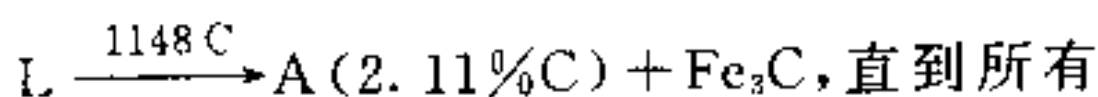


图 2-19 含 0.45% C 钢的显微组织

时,奥氏体的含碳量降至 0.77% 转变为珠光体。故在 3-4 阶段,合金由 A + Fe_3C_1 组成;在略低于点“4”直到室温,其组织为 P + Fe_3C_1 。这类合金在冷却过程中的组织变化如图 2-20 所示。其金相显微组织如图 2-21 所示。图 2-22(c)为示意图。 Fe_3C_1 一般仍写为 Fe_3C 。

4. 共晶铸铁

含碳 4.3%,如图 2-15 中合金④,在点“1”以上的温度时处于液态,冷却到 C 点(点“1”)就要发生共晶转变,即从 L 中同时结晶出奥氏体和渗碳体,称为莱氏体:



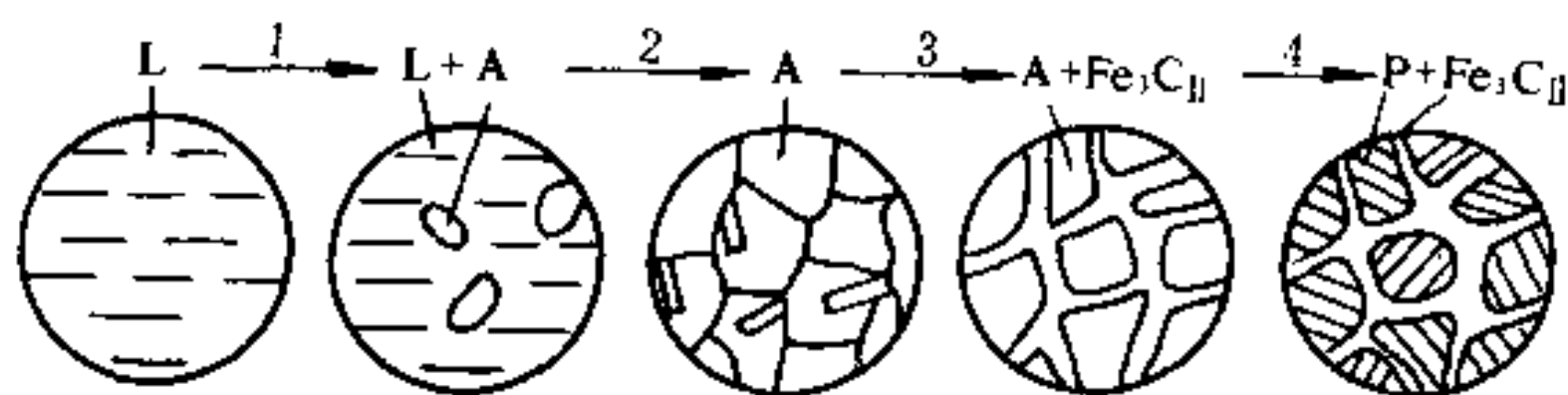


图 2-20 过共析钢的结晶过程

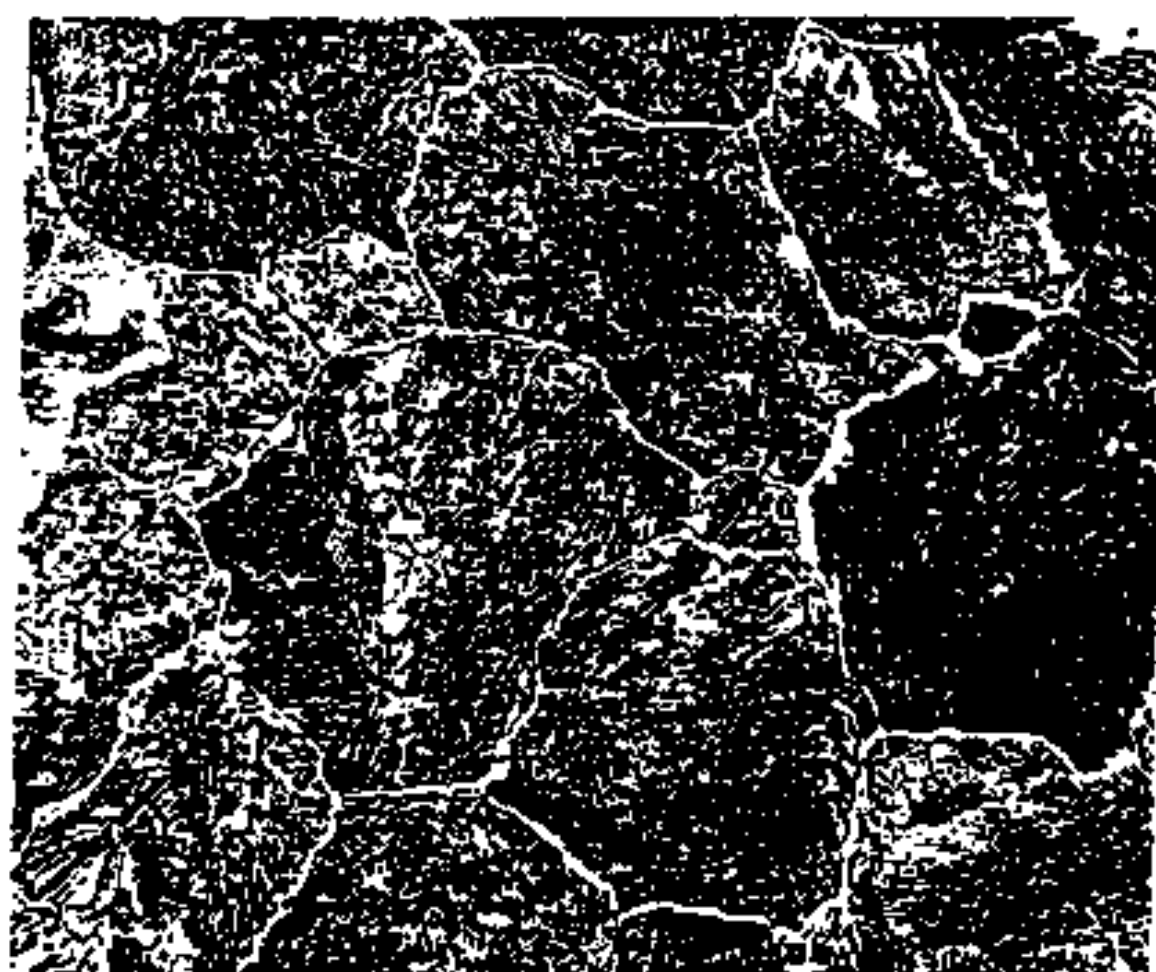


图 2-21 含 1.2% C 钢的显微组织

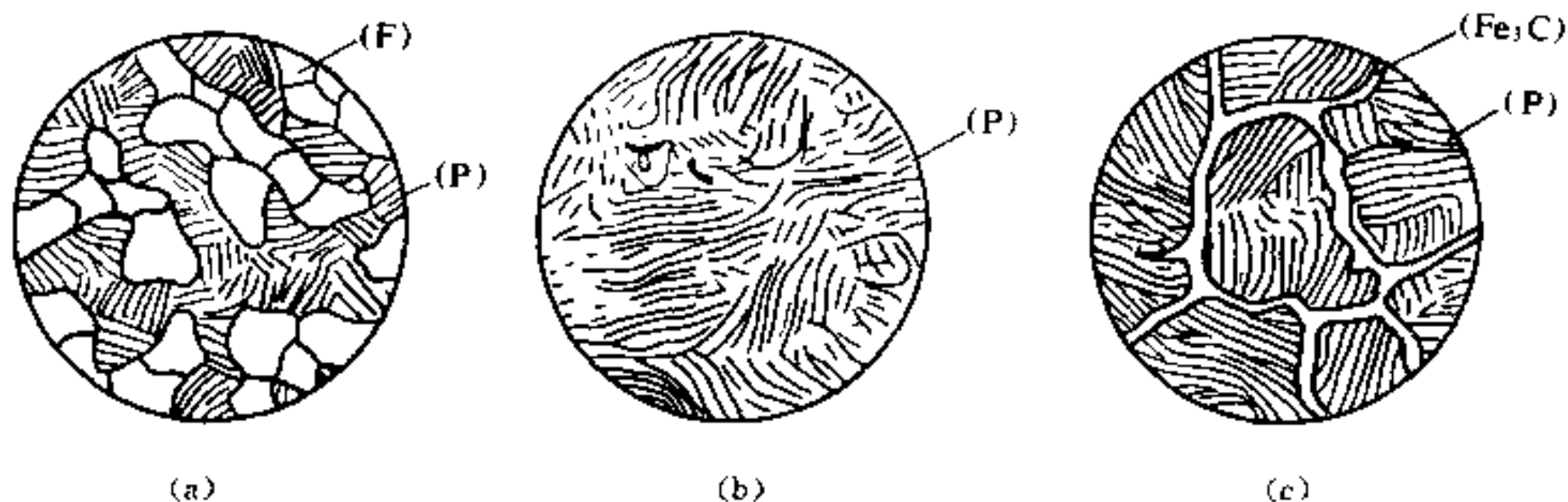


图 2-22 共析、亚共析、过共析钢的显微组织

(a) 亚共析钢; (b) 共析钢; (c) 过共析钢

的液体全部转变为莱氏体,温度保持不变。随温度的继续下降,莱氏体要发生一系列变化,即在 1-2 阶段要从莱氏体中的奥氏体内析出 $\text{Fe}_3\text{C}_\text{I}$ (与莱氏体中的渗碳体混在一起),继续冷却到点“2”(727°C)时,剩余的奥氏体(含碳达 0.77%)发生共析转变,转变为珠光体。合金④在室温时的组织为变态莱氏体($\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}$),其显微组织如图 2-23 所示。合金④在冷却过程中的组织变化如图 2-24 所示。

用同样的方法可以分析亚共晶铸铁⑤及过共晶铸铁⑥的结晶过程。

从铁碳相图可以看出,在常温下各种不同含碳量的钢铁组织,尽管千变万化,但其基本相是铁素体及渗碳体。所不同的是两相相对量的多少,而钢铁的性能决定于其组织。含碳量



图 2-23 共晶白口莱氏体组织

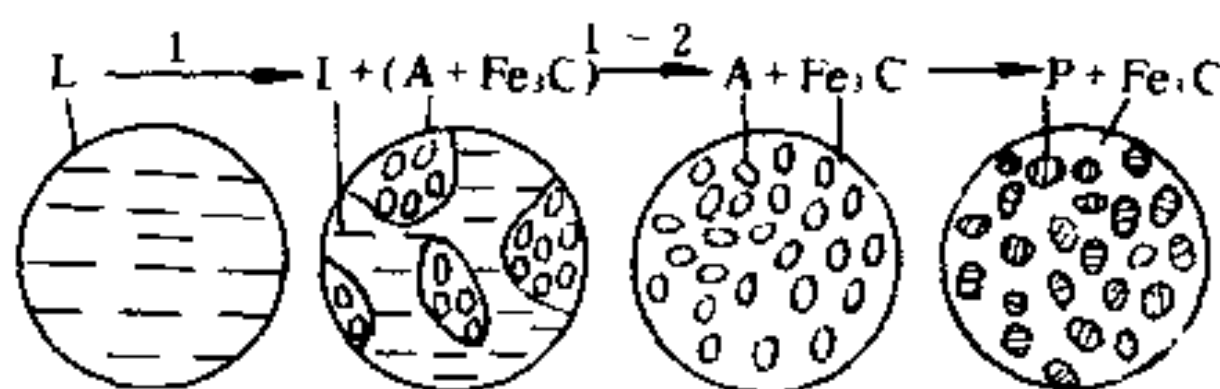


图 2-24 共晶铸铁结晶过程及组织转变示意图

高的钢,其组织中的渗碳体多,铁素体少,故又硬又脆。含碳量低的钢,其组织中渗碳体少,铁素体多,其性能则是强度低,塑性好。

思考题与习题

1. 解释下列名词

固溶体、化合物、机械混合物、相、相图、匀晶、共晶。

2. 什么是固溶强化? 形成置换固溶体及间隙固溶体的条件各是什么? 试举例说明。

3. 固溶体、化合物及混合物三者在结构和性能上有何区别?

4. 图 2-25 为 Pb—Sn 相图:

(1) 标出各区组织;

(2) 指出组织中共晶体最多和最少的合金成分?

(3) 分析亚共晶合金的平衡结晶过程,指出其室温组织及组成相,并求出组成相的相对重量。

5. 解释下列名词并说明其性能和显微组织特征。

铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体、莱氏体。

6. 何谓共析反应? 与共晶反应的区别何在?

7. 默画出 Fe—Fe₃C 合金相图,填出各相区的组织,说明图中的主要点、线的意义。

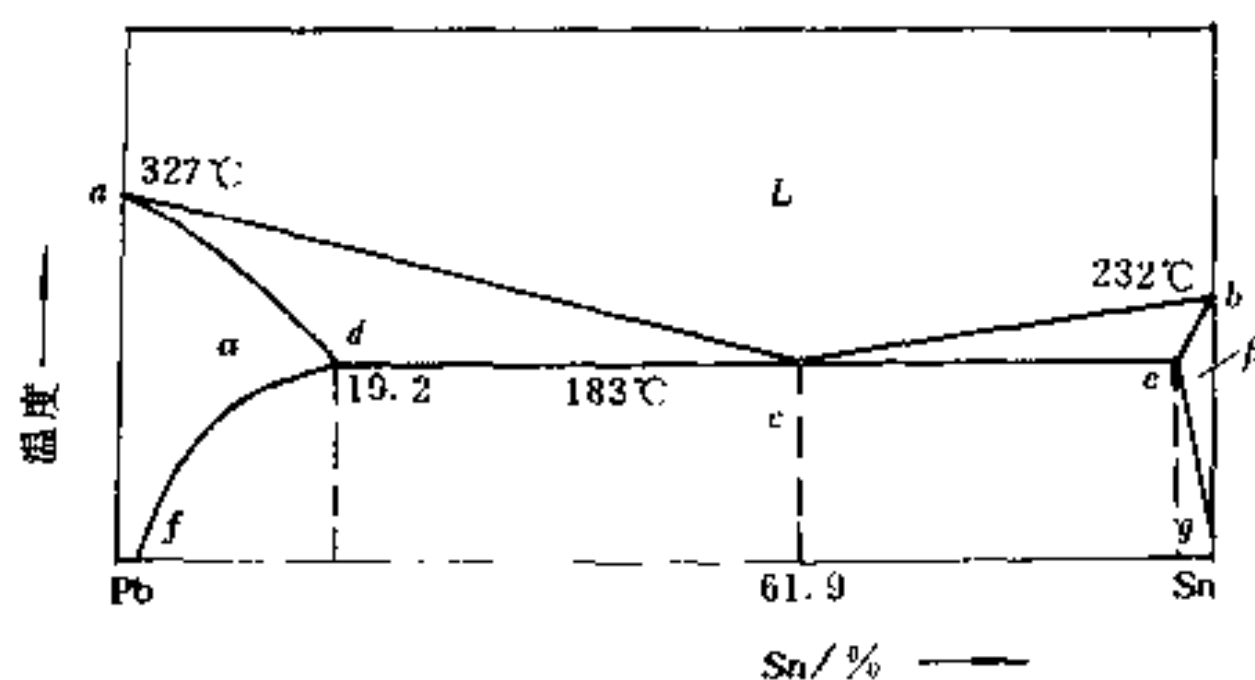


图 2-25 (习题 4 图) Pb-Sn 相图

8. 分析含碳量为 0.45%、1.2%、3.0%、5.0% 的铁碳合金从液态缓冷至室温的平衡相变过程和室温下的平衡组织, 写出转变表达式并画出显微组织示意图。
9. 铁碳合金相图在生产中有何意义? 其应用有何局限性?
10. 某退火态的碳钢, 经金相组织分析, 其组织为铁素体+珠光体; 铁素体约占 20%, 问此钢材含碳量大约是多少?
11. 计算 P 中 F 和 Fe₃C 各占多少?

第三章 钢的热处理

第一节 概 述

随着科学技术和生产的发展,对钢铁材料的性能也提出了越来越高的要求,改善钢材的性能,有两个主要途径:一个是加入合金元素,调整钢的化学成分,即合金化的方法;另一个是通过钢的热处理,调整钢材内部组织的方法。有关“合金化”的问题将在其它章节中详细介绍。所谓钢的热处理,就是通过加热、保温和冷却,使钢材内部的组织结构发生变化,从而获得所需性能的一种工艺方法。

在工业生产中,热处理的主要目的有两个:① 消除上道工序带来的缺陷,改善金属的加工工艺性,确保后续加工的顺利进行,例如降低钢材硬度的软化处理(退火);② 提高零件或工具的使用性能,例如提高各类切削工具硬度的硬化处理(淬火)和提高零件综合力学性能的“调质”处理等。

在对金属材料从毛坯到零件的整个加工工艺过程中,铸造、锻压、焊接及切削加工的过程,主要是为了赋予零件一定的外形和尺寸,而热处理是在不改变形状和尺寸的前提下,充分发挥钢材的性能潜力,保证零件的内在质量,提高零件的使用性能和延长零件的使用寿命,因此热处理是一种强化金属材料的重要工艺手段,是产品质量的保证,在机械制造业中占有十分重要的地位,许多机器零件,尤其是重要的零件都需经过热处理后才能使用。

并不是所有的金属材料都能进行热处理,在固态下能够发生组织转变,这是热处理的一个必要条件。由铁碳状态图可知,钢铁材料具备这个条件,因此可以通过热处理来改变钢铁的性能。铸铁和钢其组织转变的基本规律是相同的,钢的各种热处理方法,大多都能用于铸铁,但因铸铁中的石墨对其性能起着决定性作用,而热处理并不能改变石墨的性能,所以对普通灰口铸铁,一般情况下不进行热处理。钢的热处理可大致分类如下:

热处理—	{	普通热处理—退火、正火、淬火、回火	
		表面热处理—	表面淬火:火焰加热、感应加热等
			化学热处理:渗碳、渗氮、渗硼、渗金属等

钢的热处理方法虽然很多,但都需要经过加热与冷却的过程,为了掌握各种热处理方法的特点和作用,就必须研究钢在加热和冷却过程中组织和性能的变化规律。

第二节 钢的加热转变

加热是热处理中必不可少的一道工序。加热质量将直接影响到随后冷却时所获得的组织与性能。因此,首先要对钢在加热时组织转变情况加以了解。

一、加热时钢的组织转变

由铁碳状态图可知,碳素钢在极其缓慢的加热和冷却过程中,其固态组织转变的临界温度可由图中 A_1 线(PSK 线)、 A_3 (GS 线)和 A_{cm} 线(ES 线)来确定。在实际热处理过程中,无论是加热或者冷却,都是在较快的速度下进行的,因此实际发生转变的温度与状态图中所示的临界温度之间有所偏离,加热时移向高温,而冷却时移向低温,这种现象称为“滞后”,并且滞后的量随着加热或冷却速度的增大而增大。通常我们把实际加热时发生相变的临界温度用 A_{c1} 、 A_{c3} 、 A_{cm} 表示,而冷却时的临界温度用 A_{r1} 、 A_{r3} 和 A_{rcm} 表示。

先以共析钢为例,说明加热时组织转变情况。在实际加热条件下,当温度达到 A_{c1} 或 A_{c1} 以上时,珠光体将转变为奥氏体。奥氏体的形成是通过形核与晶核长大来实现的,其基本过程可分为四步,如图 3-1 所示。

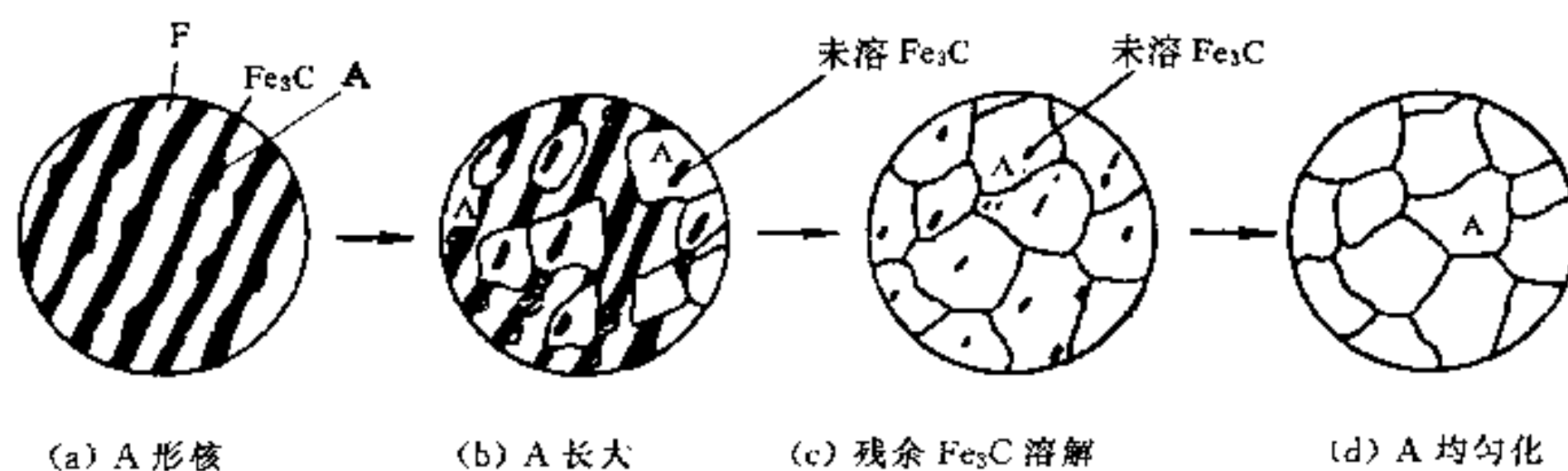


图 3-1 共析钢的奥氏体化过程示意图

1. 奥氏体形核

奥氏体晶核首先在铁素体和渗碳体相界面处形成。

2. 奥氏体长大

形成的奥氏体晶核依靠铁、碳原子的扩散,同时向铁素体和渗碳体两个方向长大,直至铁素体消失。

3. 残余渗碳体溶解

在奥氏体形成过程中,铁素体首先消失,残余的渗碳体随着加热和保温时间的延长,不断溶入奥氏体,直到全部消失。

4. 奥氏体成分的均匀化

刚形成的奥氏体,其中的碳浓度是不均匀的,在原渗碳体处含碳量较高,而原铁素体处含碳量较低,只有在继续加热保温过程中,通过碳原子的扩散,才能使奥氏体中的含碳量趋于均匀,形成成分较为均匀的奥氏体。

从上述分析可以看出,零件加热后进行适当的保温是很有必要的,其目的是:①能使零件在保温过程中彻底完成相变;②为了得到成分较为均匀的奥氏体组织。

亚共析钢和过共析钢的奥氏体化过程与共析钢相似,不同的是,在室温下它们的平衡组织中除珠光体外,还有先共析相存在,当它们被加热到 A_{c1} 以上时,首先是其中的珠光体转变为奥氏体(这一过程与共析钢相同),而此时还有先共析相(铁素体或渗碳体)存在,要得到单一的奥氏体,必须提高加热温度,对亚共析钢来说,加热温度超过 A_{c3} 后,先共析铁素体才逐渐转变为奥氏体;对过共析钢来说,加热温度超过 A_{cm} 后,先共析渗碳体才会全部溶解到奥氏体中去。因此,亚共析钢和过共析钢在上、下临界点之间加热时,其组织应该是奥氏体和先

共析相组成的两相组织,这种加热方法称为两相区加热或“不完全奥氏体化”,它常在过共析钢的加热中使用。

二、奥氏体晶粒及晶粒长大

钢的奥氏体晶粒大小直接影响冷却后所得到的组织和性能。奥氏体晶粒越细,冷却后的组织也越细,而且其强度、塑性和韧性较好。因此,如何获得细的奥氏体晶粒,对工件最后的性能和质量具有重要意义。

一般结构钢的奥氏体晶粒度按标准分为8级。1~4级为粗晶粒度;5~8级为细晶粒度;超过8级为超细晶粒度。

奥氏体有三种不同概念的晶粒度:

(1) 起始晶粒度

指珠光体刚转变为奥氏体时的晶粒度。

(2) 实际晶粒度

指某一具体热处理或热加工条件下所获得的奥氏体晶粒大小,它直接影响钢的性能。

(3) 本质晶粒度

据冶金部标准规定,钢加热到 $930 \pm 10^\circ\text{C}$ 、保温8小时冷却后测得的晶粒度,为本质晶粒度。本质晶粒度表示钢在规定条件下奥氏体的长大倾向,并不表示晶粒大小的实际度量。

加热时,对不同成分的钢来说,奥氏体晶粒长大的倾向是不同的,在一定温度范围内(930°C 以下),有些钢的奥氏体晶粒随温度的升高很容易长大,人们称它们为“本质粗晶粒钢”,有些钢在这个温度范围内加热时,晶粒长大不明显,人们称它们为“本质细晶粒钢”。但要注意,钢的本质晶粒度的评判是有条件的,加热温度超过 930°C 以后,本质细晶粒钢的奥氏体晶粒长大倾向明显增加,甚至超过本质粗晶粒钢,这时得到的奥氏体实际晶粒度比本质粗晶粒钢还要粗大,如图3-2所示。

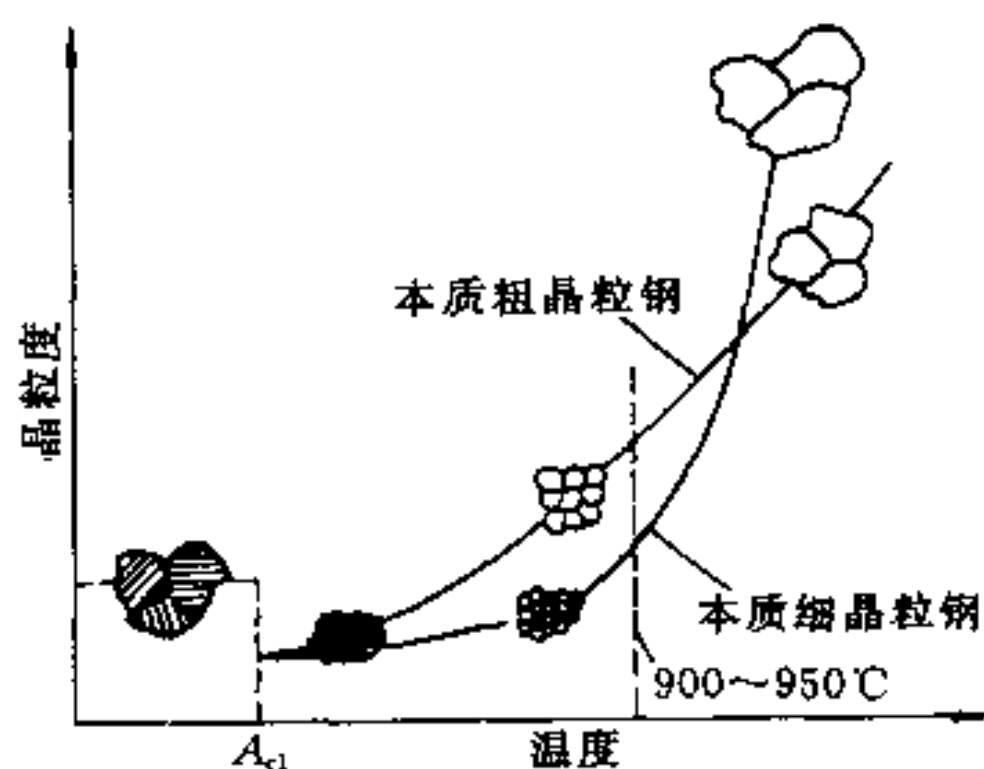


图3-2 加热温度与奥氏体晶粒长大的关系

钢的本质晶粒度的粗细,主要取决于钢的化学成分和冶炼方法,工业生产中,一般经铝脱氧的钢,大多是本质细晶粒钢,仅用硅、锰脱氧的钢为本质粗晶粒钢。若钢中含有某些可形成难溶于奥氏体的细小化合物的合金元素时,也可使奥氏体晶粒细化,难溶化合物分布在奥氏体晶界上,阻止奥氏体的长大,有关内容将在结构钢一章中讨论。

因为在一般情况下各种热处理的加热温度都在 930°C 以下,故钢的本质晶粒度在热处理生产中有着重要的意义。为保证加热时获得均匀细小的奥氏体晶粒,需要经过热处理的工件一般都采用本质细晶粒钢。在对本质粗晶粒钢热处理时,需要更加严格地控制加热温度。

三、加热时常见的缺陷

加热过程中,由于加热不当,常见的缺陷有:过热、过烧、氧化和脱碳。

1. 过热和过烧

过热是钢在加热时,由于加热温度过高或加热时间过长,引起奥氏体晶粒粗大的现象。

过热使钢的力学性能降低,严重影响钢的冲击韧性,而且还易引起淬火变形和开裂。

过烧是钢在加热时,由于加热温度过高,造成晶界氧化或局部熔化的现象。

过热可以通过重新退火或正火来补救,而过烧是无法挽救的缺陷。防止过热或过烧的主要措施是严格控制加热温度和时间,特别是加热温度。

2. 氧化和脱碳

氧化是由于铁和空气中的氧等化合形成氧化皮,从而使工件表面粗糙不平,影响零件的精度。脱碳就是钢件表面层的碳被烧掉,因而使其含碳量降低,这不仅影响热处理后钢件表面的硬度,并将显著降低零件的疲劳强度,因而切削工具和一些重要的零件是不允许热处理时发生严重脱碳的。

防止氧化和脱碳,加热时就应使工件尽可能不和氧化性介质(如 O_2 、 CO_2 、 H_2O 等)接触,这在以空气为介质的普通加热炉中是难以做到的,要减轻氧化和脱碳程度,可把工件埋入装有木炭或铸铁屑的铁箱中,亦可在工件表面涂上防氧化、脱碳的涂料后进行加热。盐浴炉加热,即在熔化状态的盐类物质(如 $NaCl$ 、 $BaCl_2$)中加热,能够防止工件在加热时和空气中的氧接触,可明显减轻氧化和脱碳程度,所以一些工具和重要零件常用盐浴炉进行热处理。

在大批生产时,多采用向加热炉中通入保护气氛的办法,常用的气氛有经过处理的天然气、煤气、氨分解气、石油液化气等,并通过一定手段对炉气成分加以控制,所以又称可控气氛加热。通过对炉气成分的有效控制,不仅可使钢件表面不氧化、不脱碳,还可根据需要对钢件表面进行渗碳、碳氮共渗等化学热处理,并且对渗层浓度、渗层深度进行控制,近年来,我国在可控气氛热处理方面有了很大的发展,在大批量生产中,它是提高热处理质量的先进工艺。

防止氧化和脱碳,除了采用向炉内通入可控气氛的办法外,还有向炉内通入惰性气体或通入中性气体的办法,以及真空热处理技术。真空热处理是一种无氧化加热方法,处理后的零件表面光亮如新,但由于设备昂贵,热处理费用较高,仅在少数质量要求很高的重要零件和部分工模具的热处理时应用。

第三节 钢在冷却时的转变

钢件奥氏体化的目的是为随后的冷却转变作准备。同一种钢,同样的奥氏体化条件,但冷却速度不同,所获得的组织结构就大不相同,当然力学性能差别也很大,如表 3-1 所示。

表 3-1 不同冷却速度对 45 钢力学性能的影响

冷却方法	力 学 性 能				硬度/HRC
	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%	
随炉冷却	519	272	32.5	49	15~18
空气冷却	657~706	333	15~18	45~50	18~24
油冷却	882	608	18~20	48	40~50
水冷却	1078	706	7~8	12~14	52~60

生产中常用的冷却方式有两种,一种是等温冷却,即把奥氏体化后的钢件迅速冷到临界

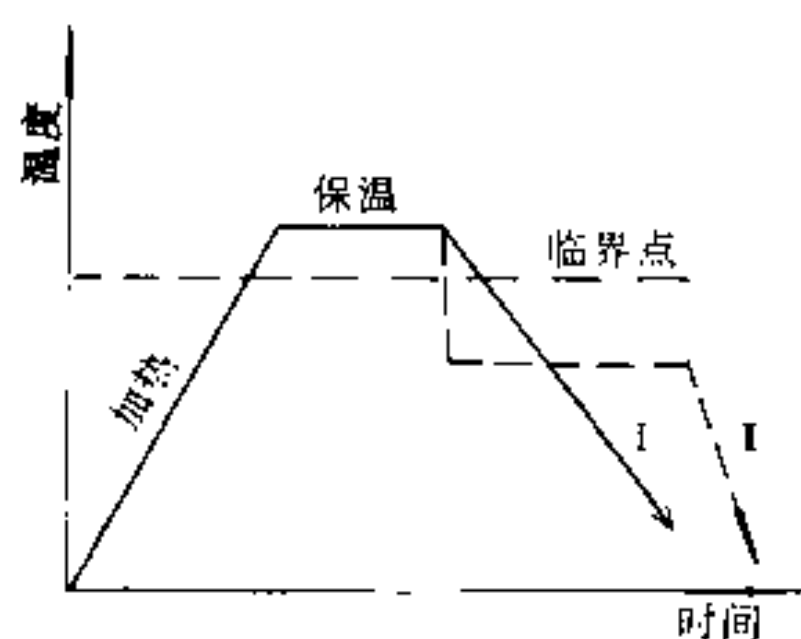


图 3-3 不同冷却方式示意图

I —— 连续冷却; II —— 等温冷却

点以下某个温度并在此温度保温,在保温过程中完成组织转变。另一种是连续冷却转变,即将奥氏体化后的钢件以某种冷却速度连续地冷却,一直冷到室温,在连续冷却的过程中完成组织转变。两种冷却方式的示意图如图 3-3 所示。

研究奥氏体在冷却时的组织转变,也按两种冷却方式来进行。在等温冷却条件下研究奥氏体的转变过程,绘出等温冷却转变曲线图;在连续冷却条件下研究奥氏体的转变过程,绘出连续冷却转变曲线图,它们都是选择和制定热处理工艺的重要依据。

一、过冷奥氏体等温转变曲线(C 曲线或 TTT 曲线)

奥氏体在临界温度以上时,是一种稳定的相,能够长期存在而不发生组织转变,如果从高温缓慢冷却下来,它将在 727°C 以下转变为珠光体,这就意味着在 727°C 以下,奥氏体是不稳定的相,必将会转变成其它的组织。但如果冷速较快,使之来不及转变,它也可以在低于 727°C 的温度下暂时存在,经过一段时间后才转变为新的组织,这种处于临界温度之下暂时存在的奥氏体,我们称之为“过冷奥氏体”。

1. 共析碳钢 C 曲线的建立

将奥氏体化后的试样,迅速冷却到临界点之下某一温度进行保温,使奥氏体在等温条件下发生相变。过冷奥氏体在等温转变的过程中,必将会引起金属内部的一系列变化,如相变潜热的释放,比容、磁性及组织结构的改变等,人们可以通过热分析、膨胀分析、磁性分析和金相分析等方法,测出在不同温度下过冷奥氏体发生相变的开始时刻和终了时刻,并把它们标在温度—时间坐标上,然后将所有转变开始点和转变终了点分别连接起来,便得到了该钢种的过冷奥氏体等温转变曲线。图 3-4 是共析碳钢的等温转变曲线测定的示意图,由于曲线的形状很像英文字母“C”,故称 C 曲线,又称 TTT 曲线(是英文时间、温度、转变三词缩写)。过冷奥氏体在不同温度下等温转变经历的时间相差很大,故 C 曲线的横坐标采用对数坐标来表示时间。

2. 共析碳钢 C 曲线分析

图 3-5 是共析碳钢的 C 曲线,由图可以看出:

(1) A_1 线是奥氏体向珠光体转变的临界温度;左边一条“C”形曲线为过冷奥氏体转变开始线;右边一条“C”形曲线为过冷奥氏体转变终了线。 M_s 和 M_f 线分别是过冷奥氏体向马氏体转变的开始线和终了线,马氏体转变不是等温转变,只有在连续冷却条件下才可能获得马氏体。

(2) A_1 线以上是奥氏体稳定区; A_1 线以下, M_s 线以上,过冷奥氏体转变开始线以左,是过冷奥氏体区;过冷奥氏体转变开始线和终了线之间是过冷奥氏体和转变产物的共存区;过冷奥氏体转变终了线以右,是转变产物区; M_s 线以下,是马氏体区(或者叫马氏体与残余奥氏体共存区)。

(3) 过冷奥氏体在各个温度等温转变时,都要经历一段孕育期,用从纵坐标到转变开始线之间的距离来表示。孕育期的长短反映了过冷奥氏体稳定性的不同,在不同的等温温度下,孕育期的长短是不同的,在 A_1 线以下,随着过冷度的增大,孕育期逐渐变短。对共析碳钢

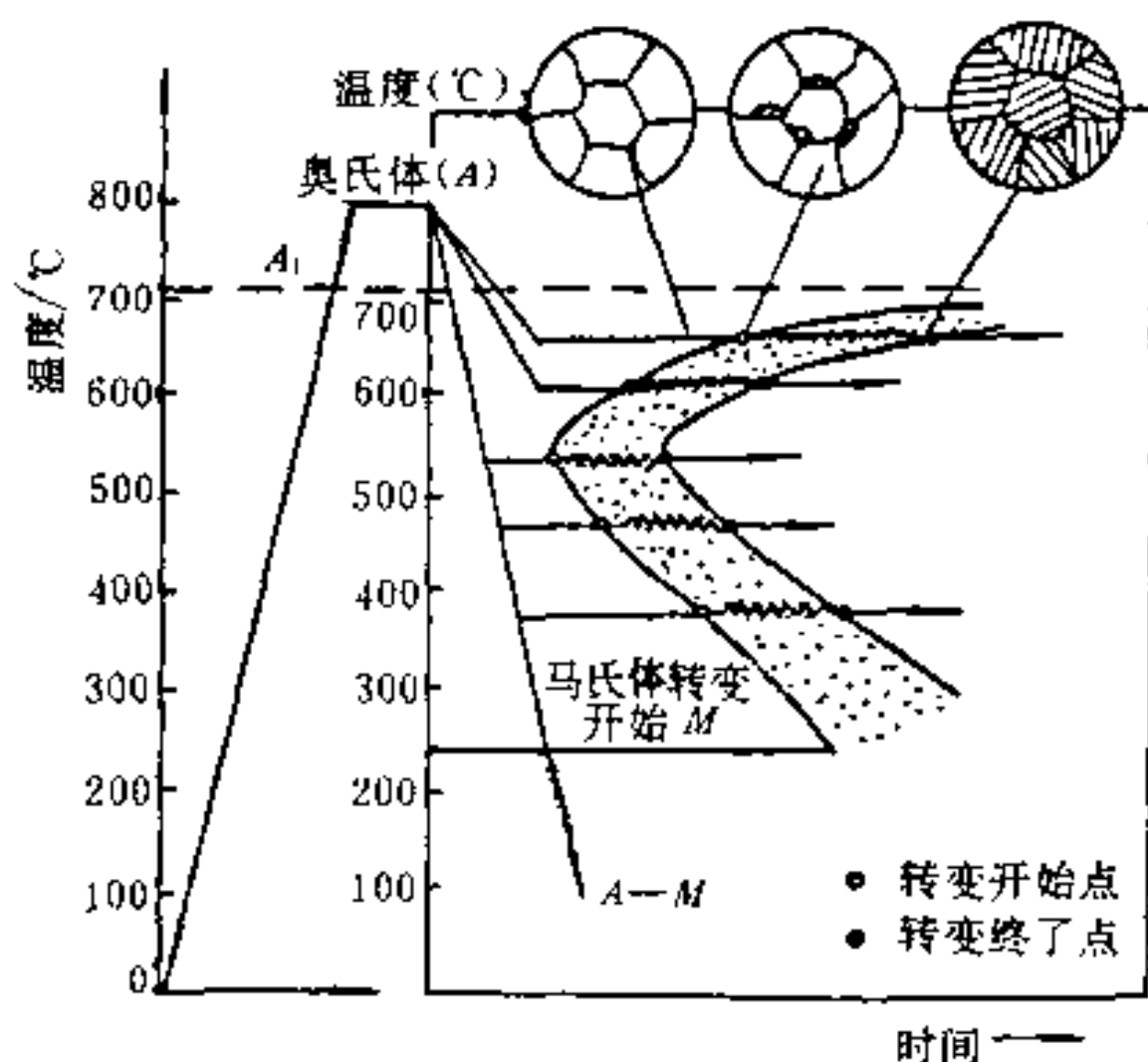


图 3-4 C 曲线的测定示意图

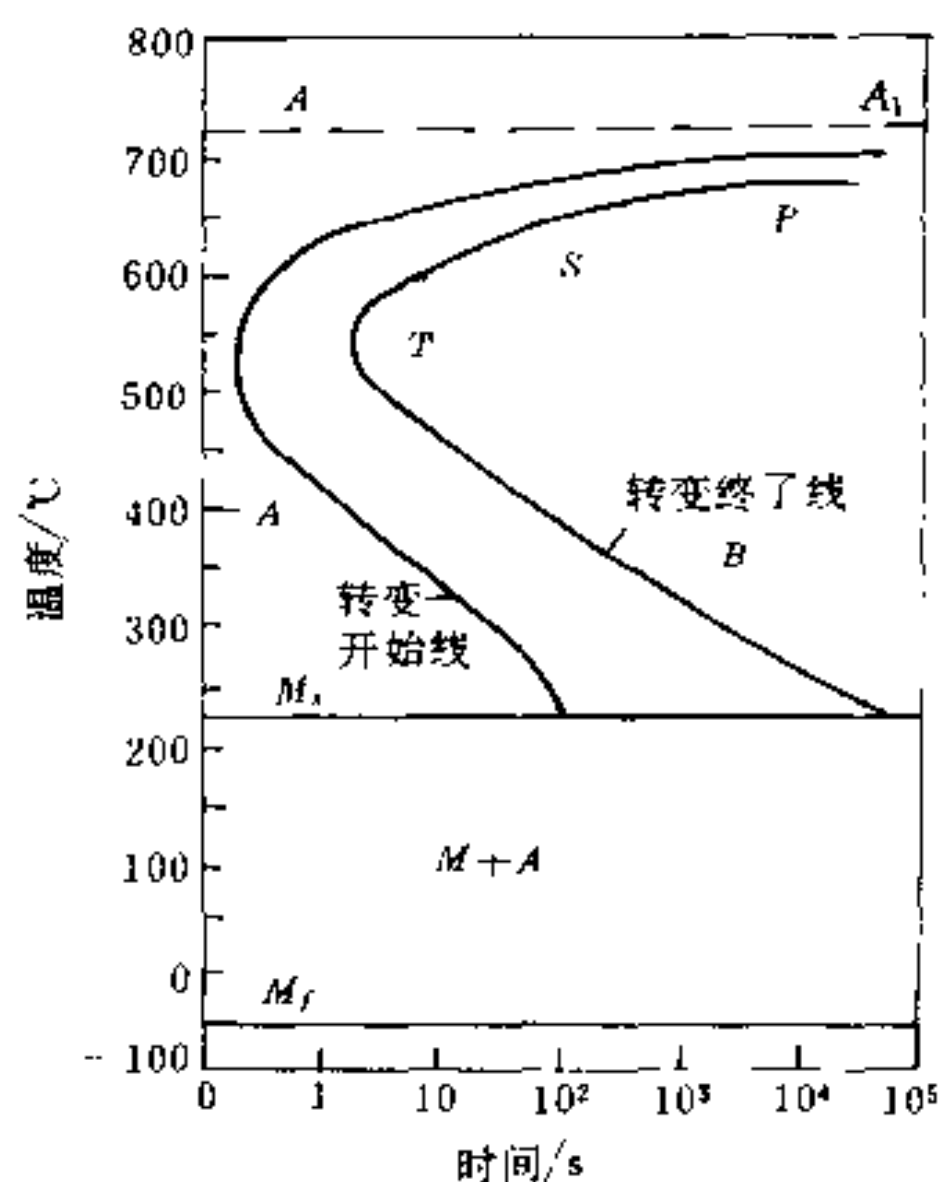


图 3-5 共析碳钢 C 曲线图

来说,大约在 550℃时,孕育期最短,说明在这个温度下等温,奥氏体最不稳定,最易发生珠光体转变,此处被称为“C”曲线的“鼻子”。在此温度以下,随着等温温度的降低,孕育期又逐渐增大,即过冷奥氏体的稳定性又逐渐增大,等温转变速度变慢。

(4) 共析碳钢的过冷奥氏体在三个不同的温度区间,可以发生三种不同的转变:在 A_1 点至 C 曲线鼻尖区间的高温转变,其转变产物是珠光体(P),故又称为珠光体型转变(包括珠光体 P、索氏体 S 和屈氏体 T);在 C 曲线鼻尖至 M_s 线区间的中温转变,其转变产物是贝氏体(B),故又称为贝氏体型转变(包括上贝氏体 B_U 和下贝氏体 B_F);在 M_s 至 M_f 线之间的转变,称低温转变,其转变产物是马氏体(M),故又称为马氏体型转变。

二、连续冷却与 C 曲线的关系

在实际生产中,过冷奥氏体的转变大部分是在连续冷却中完成的,因此,研究过冷奥氏体连续冷却转变曲线是十分必要的,许多钢种的等温转变曲线及部分钢种的连续冷却转变曲线都已测定出来,可在有关的手册中查出。通过比较可知,两种曲线在进行定量分析时,有所差别,但在进行定性分析时,等温转变曲线所标示出的规律,基本上在连续冷却时也适用。下面用共析钢的等温转变曲线定性分析在连续冷却条件下的组织转变情况。

C 曲线的坐标是温度和时间,而冷却速度也是温度和时间关系(即单位时间里温度下降的程度),所以任意一种冷却速度均可以在图中表示出来,如图 3-6 所示。

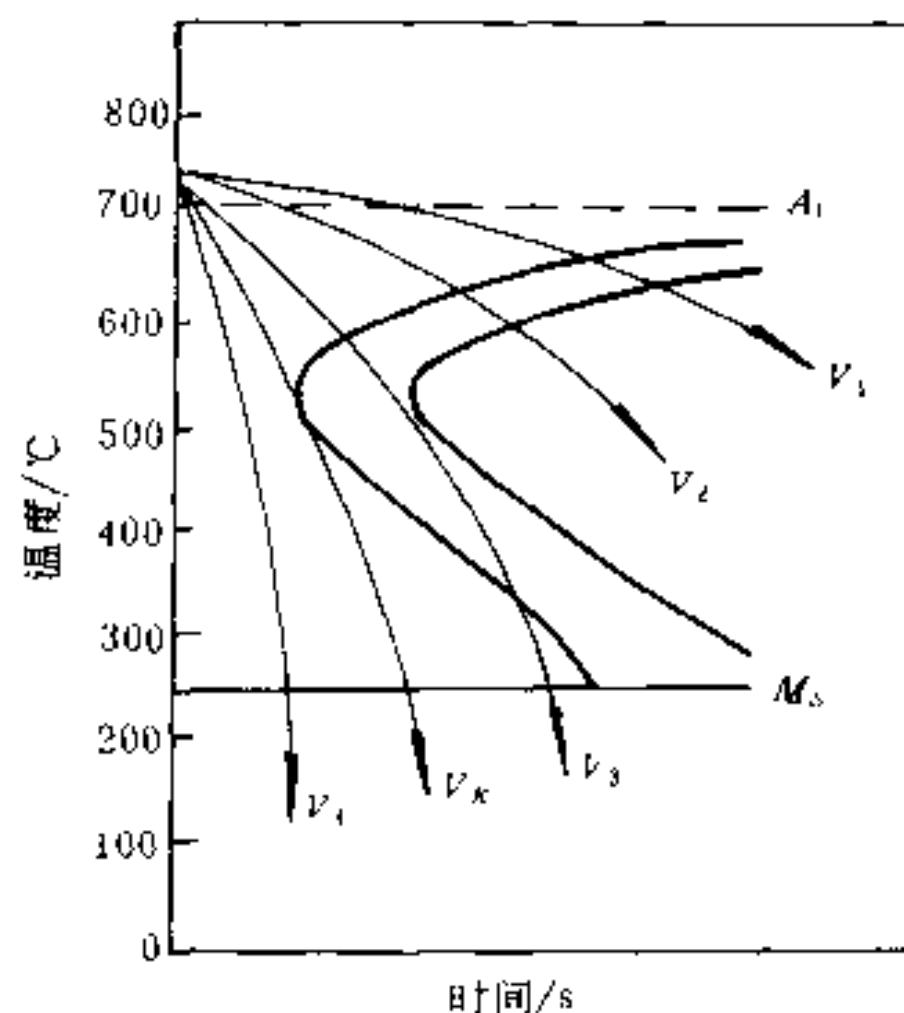


图 3-6 连续冷却与 C 曲线

当以较慢的冷速 V_1 连续冷却时,大约相当于热处理时的随炉冷却(即退火处理),它与

C 曲线的转变开始线及终了线相交于上部,可以判断转变产物为珠光体(P)。冷速 V_2 相当于空气中冷却(即正火处理)与 C 曲线相交于稍低的温度,从图中判断转变产物是索氏体(S)。冷速 V_3 相当于油中冷却(即油中淬火处理),它与转变开始线相交,但并未与转变终了线相交,可以判断有一部分奥氏体来不及转变就被过冷到 M_s 线以下并转变为马氏体,由此可见,以 V_3 速度冷却后可得到屈氏体(T)和马氏体(M)的混合组织。(虽然 V_3 也穿过了贝氏体区,但在共析钢连续冷却转变曲线中没有贝氏体区,所以共析钢在连续冷却时不会得到贝氏体)。冷速 V_4 相当于水中冷却(即水中淬火处理),它不与 C 曲线相交,表明在此冷速下,过冷奥氏体来不及发生分解,便被过冷到 M_s 线之下,转变为马氏体。关于马氏体转变的特点,将在后面介绍。

V_K 恰好与 C 曲线的转变开始线相切,是奥氏体不发生分解而全部过冷到 M_s 以下向马氏体转变的最小冷却速度,称为临界冷却速度。显然,只要冷速大于 V_K 就能得到马氏体组织,保证钢的组织中没有珠光体。影响临界冷却速度的主要因素是钢的化学成分,碳钢的 V_K 大,而合金钢的 V_K 小,这一特性对钢的热处理具有非常重要的意义,在后面章节中还要进行讨论。

三、冷却转变后的组织及性能

通过对 C 曲线的分析,我们已知在不同的冷却条件下会获得不同的组织,下面讨论各种组织的转变特点及不同组织对钢材性能的影响。

1. 珠光体转变

珠光体是铁素体和渗碳体组成的混合物。

(1) 珠光体的形成

从 A_1 至鼻温(共析碳钢约为 550°C)区域为珠光体相变区,珠光体转变是由奥氏体分解为成分相差悬殊、晶格截然不同的铁素体和渗碳体两相混合组织的过程。因此转变时必须进行碳的重新分配与铁的晶格改组,这两个过程只有通过碳原子和铁原子的扩散才能完成,所以,珠光体转变是一种扩散型相变。

珠光体转变是以形核与晶核长大方式进行的,首先在奥氏体晶界处形成一个小的片状 Fe_3C 晶核,因为 Fe_3C 的含碳量高于奥氏体的含碳量,它的形成和长大,必然要从周围奥氏体中吸收碳原子而造成周围奥氏体局部贫碳,而铁素体含碳量低于奥氏体的含碳量,这将促使铁素体晶核在 Fe_3C 两侧形成,即形成珠光体晶核,并逐渐向奥氏体晶粒内部长大。铁素体片的长大又向周围奥氏体中排出碳原子,造成周围的奥氏体富碳,又促使渗碳体在其两侧形核与长大。如此不断地形核→长大,直到转变全部结束,如图 3-7 所示。

(2) 珠光体的组织形态及力学性能

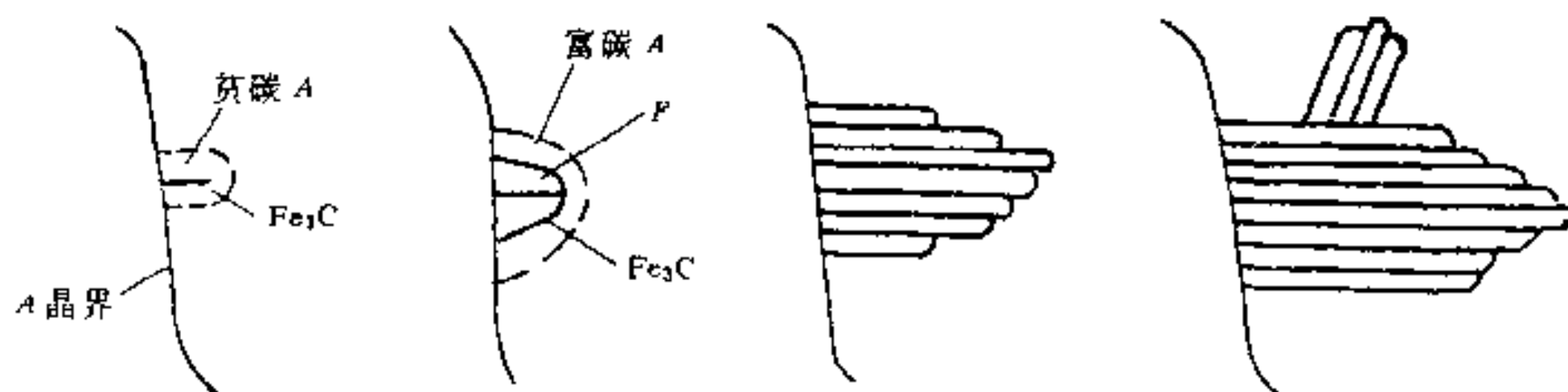


图 3-7 片状珠光体形成过程示意图

对共析钢来说,过冷奥氏体在 $A_1 \sim 550^\circ\text{C}$ 温度范围内,将转变为珠光体类型的组织,其组织特征为层片状,并且随着转变温度的降低,珠光体中的铁素体和渗碳体的层片就越薄。一般我们把 $A_1 \sim 650^\circ\text{C}$ 温度范围形成的层片组织称为珠光体, $650 \sim 600^\circ\text{C}$ 温度范围形成的层片组织称为索氏体(放大千倍才能分辨出层片状), $600 \sim 550^\circ\text{C}$ 温度范围形成的层片组织称为屈氏体(只有在电子显微镜下才能分辨出层片状)。它们的组织形态见图 3-8、图 3-9 和图 3-10。



图 3-8 珠光体组织的电子显微照片(8000 \times)



图 3-9 索氏体组织的电子显微照片(15000 \times)

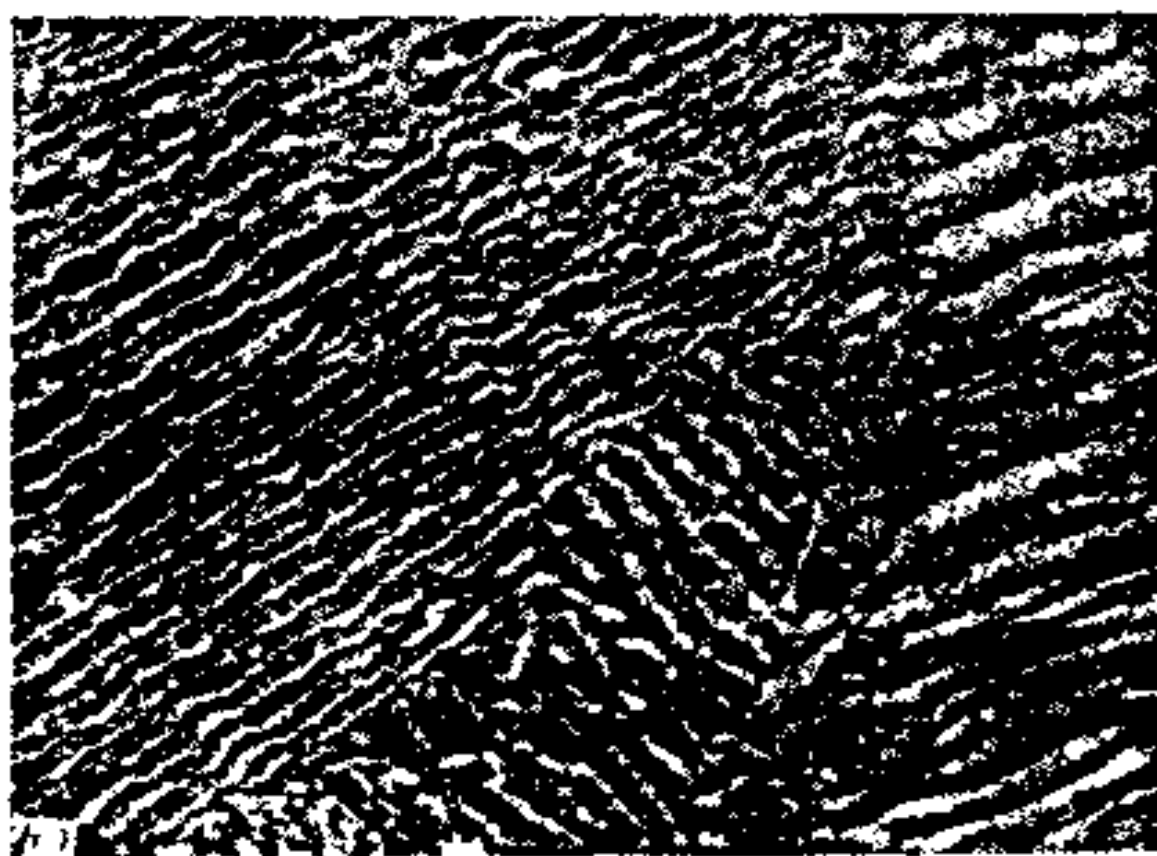


图 3-10 屈氏体组织的电子显微照片(15000 \times)

片状珠光体的性能主要取决于层片间距离。层片间距离越小,则珠光体的塑性变形抗力越大,强度和硬度越高,同时塑性和韧性也有所改善。图 3-11 为共析钢珠光体型转变产物的力学性能与层片间距和转变温度的关系。

需要说明,在一般情况下,过冷奥氏体分解成珠光体类组织,其渗碳体呈片状,但当片状组织在 A_1 附近的温度范围内保温足够长的时间时,可使片状的渗碳体球化,这时转变产物为球状珠光体,如图 3-12 所示。对于相同成分的钢,球状珠光体比片状珠光体具有较少的界面,因而其硬度、强度较低,但塑性、韧性较高。球状珠光体常常是高碳钢切削加工前所要求的组织状态。

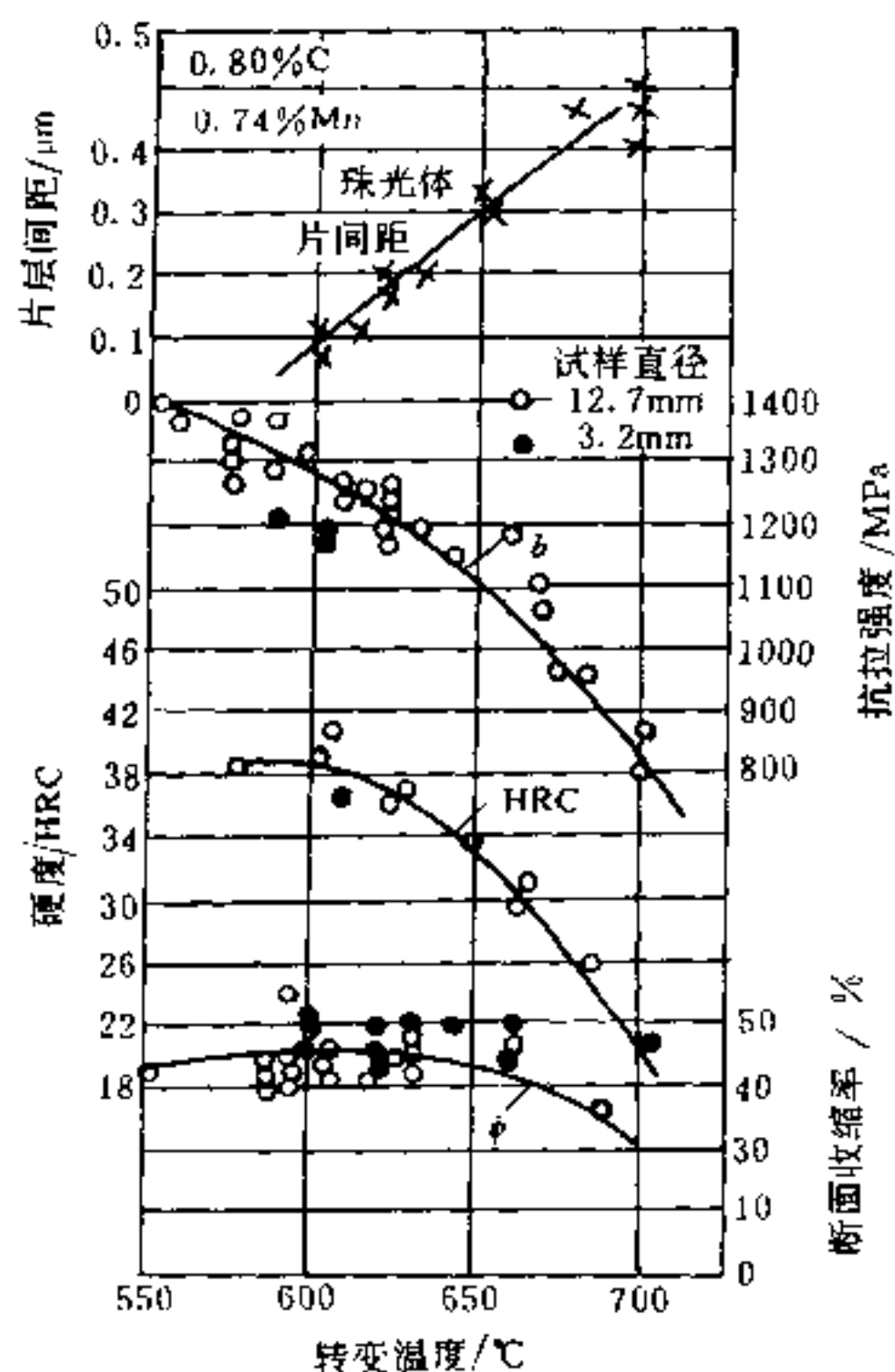


图 3-11 共析碳钢珠光体型转变产物的力学性能与层片间距、转变温度的关系

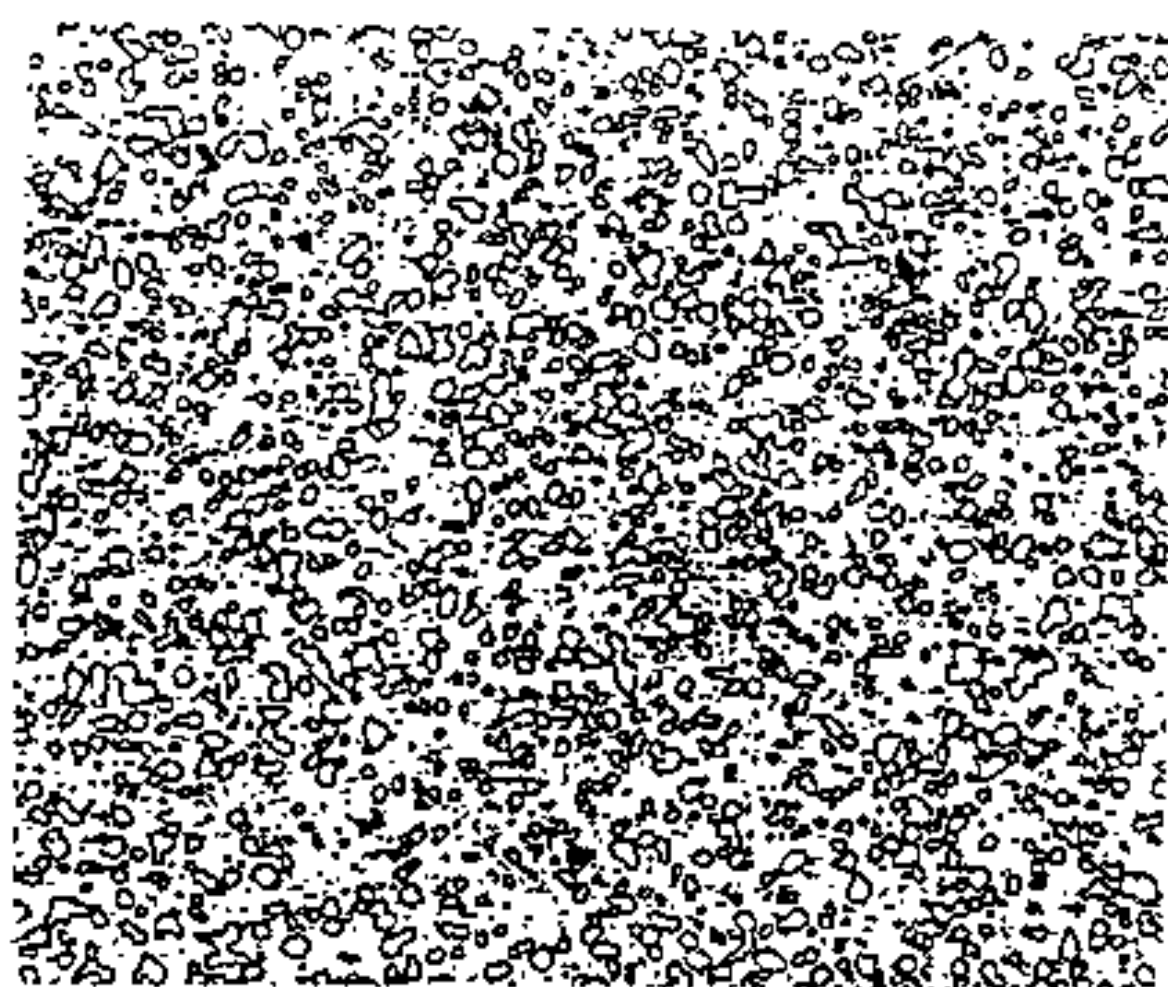


图 3-12 球状珠光体显微组织(500X)

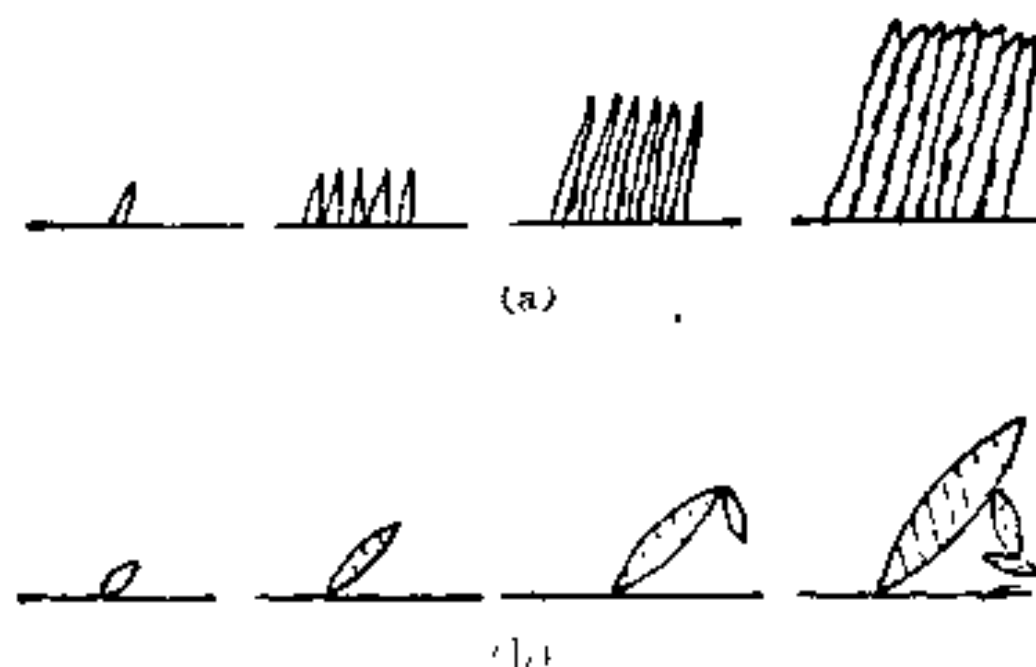


图 3-13 贝氏体形成示意图

(a) 上贝氏体; (b) 下贝氏体

2. 贝氏体转变

钢中的贝氏体是过冷奥氏体在中温区域分解后所得的产物,一般来说,它是由过饱和铁素体和碳化物所组成的非层片状组织。

(1) 贝氏体的形成

鼻温 $\sim M_s$ 点之间区域为贝氏体转变区,贝氏体形成与珠光体一样也是形核与长大的过程,但二者有本质的区别。由于转变温度低,原子的活动能力差,贝氏体转变时,只有碳原子的扩散,而铁原子不发生扩散,只能作很小的位移,由面心立方晶格转变为体心立方晶格。贝氏体的转变特点是:当转变温度稍高时,先形成过饱和的铁素体,铁素体呈密集而平行排列的条状生长,随后铁素体中的部分碳原子通过扩散迁移到条间的奥氏体中,最后成为不连续的短杆状的碳化物,这种组织称为上贝氏体(符号 B_L 表示)。当转变温度较低时,先形成过饱和铁素体,呈针片状。由于转变温度低,碳原子扩散很困难,只能在过饱和的铁素体内作短程迁移、聚集,结果形成与铁素体片长轴呈 $55\sim 65^\circ$ 的夹角的碳化物小片,这种组织称下贝氏体(符号 B_T 表示)。它们的形成过程见图 3-13。

(2) 贝氏体的组织形态及力学性能

如上所述,典型的贝氏体组织主要有上贝氏体和下贝氏体两种。

共析钢上贝氏体约在 $550\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围形成。在光学显微镜下可明显见到成束的自晶界向晶粒内部生成的铁素体条,它的分布具有羽毛状特征,如图 3-14(a)所示。在电子显微镜下,常可以看到上贝氏体中存在铁素体和渗碳体两个相,铁素体呈暗黑色,而渗碳体呈白亮色,以不连续、短杆状形式分布于许多平行而密集的铁素体条之间,如图 3-15(a)所示。

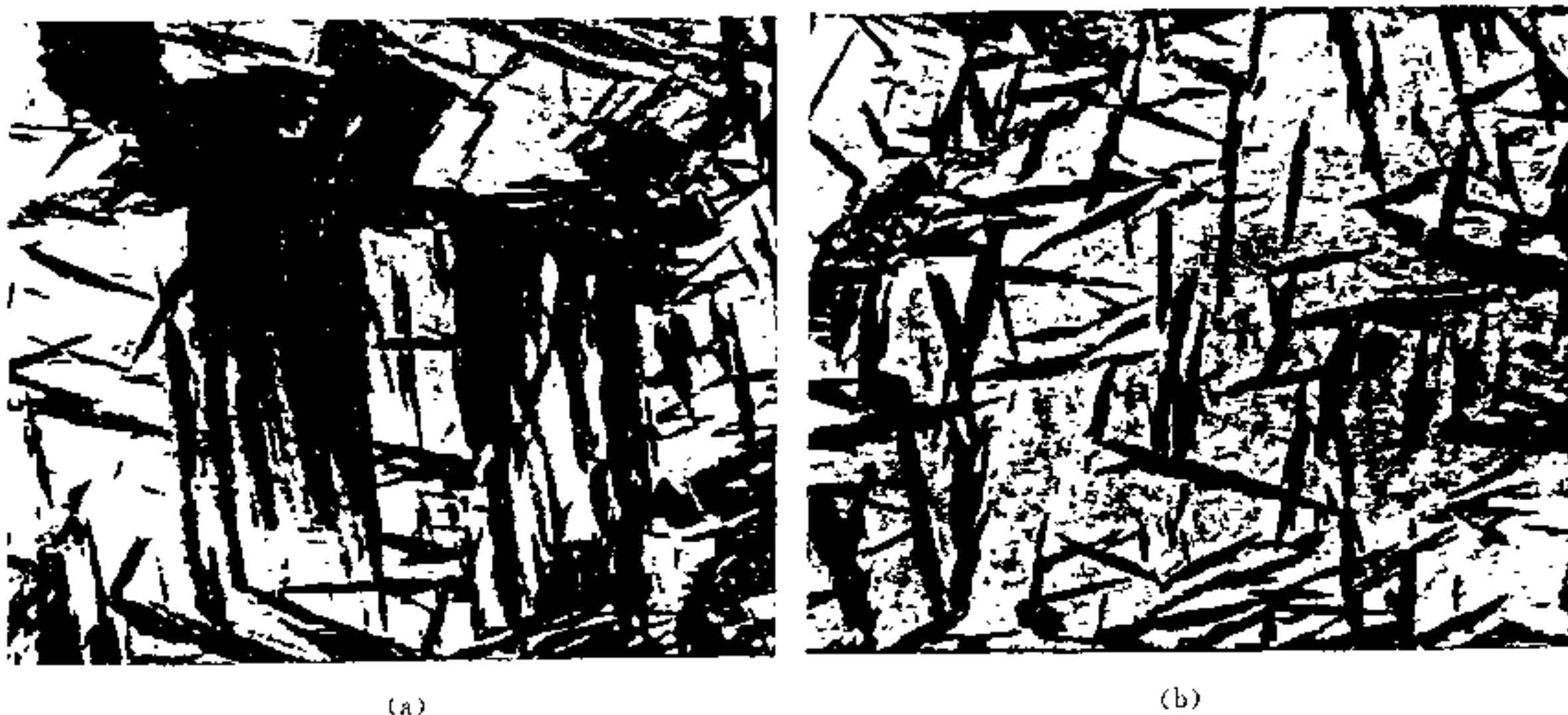


图 3-14 上贝氏体与下贝氏体的光学金相照片

(a) 上贝氏体(840 \times);(b) 下贝氏体(850 \times)

共析钢下贝氏体约在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\sim M_s$ 温度范围形成,由于下贝氏体易受浸蚀,在光学显微镜下,呈黑色针状特征,如图 3-14(b)所示。下贝氏体中的碳化物只有在电子显微镜下才能分辨清楚,如图 3-15(b)所示。

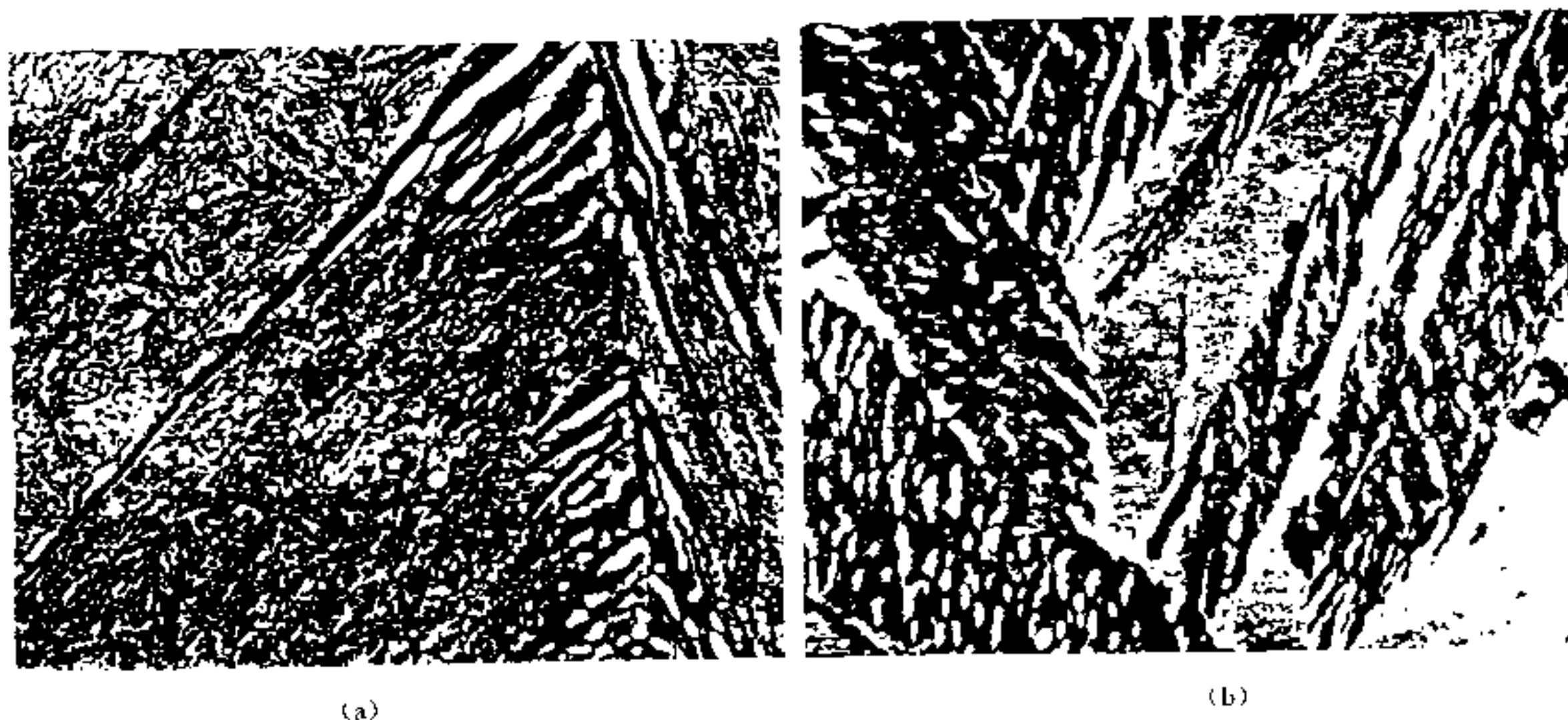


图 3-15 上贝氏体与下贝氏体的电子显微镜照片

(a) 上贝氏体(5000 \times);(b) 下贝氏体(10000 \times)

贝氏体的力学性能主要取决于贝氏体的组织形态。下贝氏体的性能与上贝氏体比较,它不仅具有较高的硬度和耐磨性,而且强度、韧性和塑性均高于上贝氏体。图 3-16 是共析碳钢

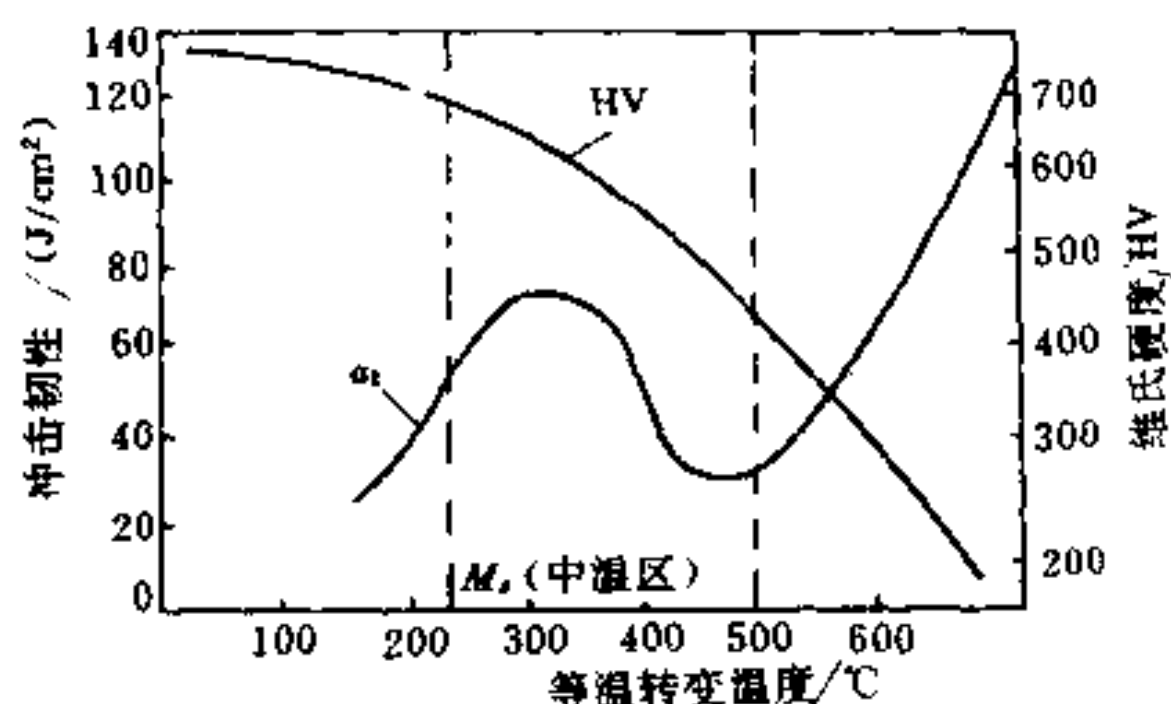


图 3-16 共析钢的力学性能与等温转变温度的关系

转变温度低,铁原子和碳原子都不能扩散,奥氏体向马氏体转变时只发生 $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ 的晶格改组,所以这种转变称为非扩散型转变。马氏体中的含碳量就是转变前奥氏体中的含碳量。由铁碳状态图可知, $\alpha\text{-Fe}$ 最大溶碳能力只有 0.0218% (在 727°C 时),因此,马氏体实质上是碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的过饱和固溶体。

马氏体转变时,体积会发生膨胀,钢中含碳量越高,马氏体中过饱和的碳也越多,奥氏体转变为马氏体时的体积膨胀也越大,这就是高碳钢淬火时容易变形和开裂的原因之一。

马氏体转变也是一个形核与长大的过程,但有许多不同于珠光体转变的特点,了解这些特点和转变规律对指导生产实践具有重要意义,它除了具有非扩散性特点外,主要还有以下几点:

(a) 降温形成 马氏体转变是在 $M_s \sim M_f$ 温度范围内,不断降温的过程中进行的,冷却中断,转变也就随即停止,只有继续降温,马氏体转变才能继续进行。

(b) 高速形核和长大 当奥氏体过冷至 M_s 点温度以下时,不需要孕育期,马氏体晶核瞬间形成,并以极快的速度迅速长大。例如高碳(片状)马氏体的长大速度约为 $1 \sim 1.5 \times 10^5 \text{ cm/s}$ 。每个马氏体片形成的时间很短,因此通常情况下看不到马氏体片的长大过程。在不断降温过程中,马氏体数量的增加是靠一批批新的马氏体片不断产生,而不是靠已形成的马氏体片的长大,如图 3-17 所示。

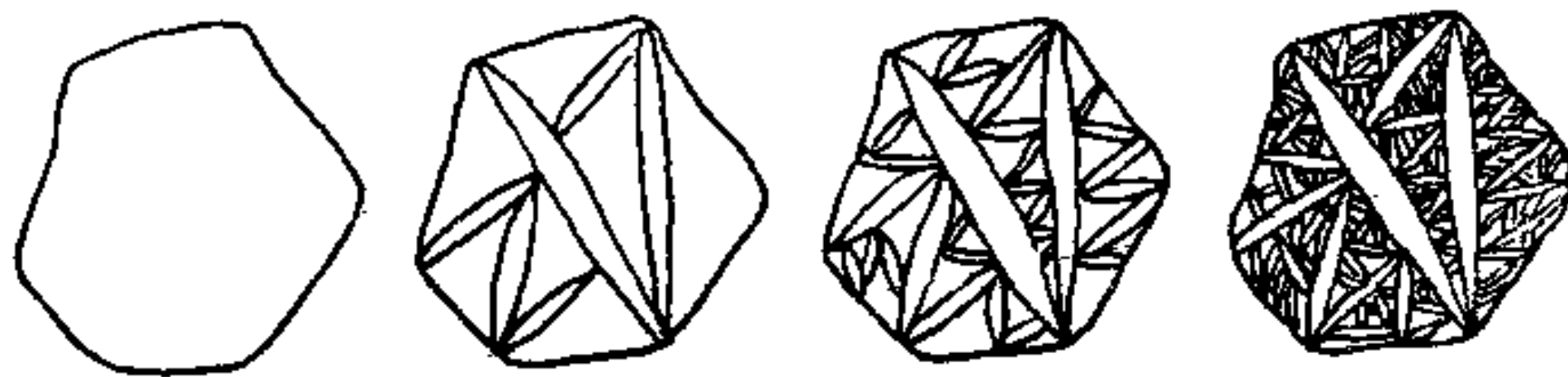


图 3-17 片状马氏体的形成过程示意图

(c) 马氏体转变的不完全性 马氏体转变不能进行到底,或多或少总有一部分未转变的奥氏体残留下来,这部分奥氏体称为残余奥氏体,用符号 A_R 表示。

残余奥氏体的数量主要取决于钢的 M_s 点和 M_f 点的位置,而 M_s 和 M_f 点主要由奥氏体的成分来决定,基本上不受冷却速度及其它因素的影响。凡是使 M_s 和 M_f 点位置降低的

的力学性能与等温转变温度的关系。由图可见(中温区),上贝氏体硬度越低,其韧性也越低,而下贝氏体则相反。所以工业生产中,常采用等温淬火来获得下贝氏体,而防止产生上贝氏体。

3. 马氏体转变

马氏体是碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的过饱和固溶体。

(1) 马氏体的形成及马氏体转变特点

过冷奥氏体冷至 M_s 线以下便发生马氏体转变(共析钢的 M_s 约为 230°C)。由于

合金元素都会使残余奥氏体数量增多。图 3-18 和图 3-19 分别是奥氏体中含碳量对马氏体转变温度的影响及奥氏体含碳量对残余奥氏体量的影响曲线。有关合金元素的影响将在第四章中介绍。

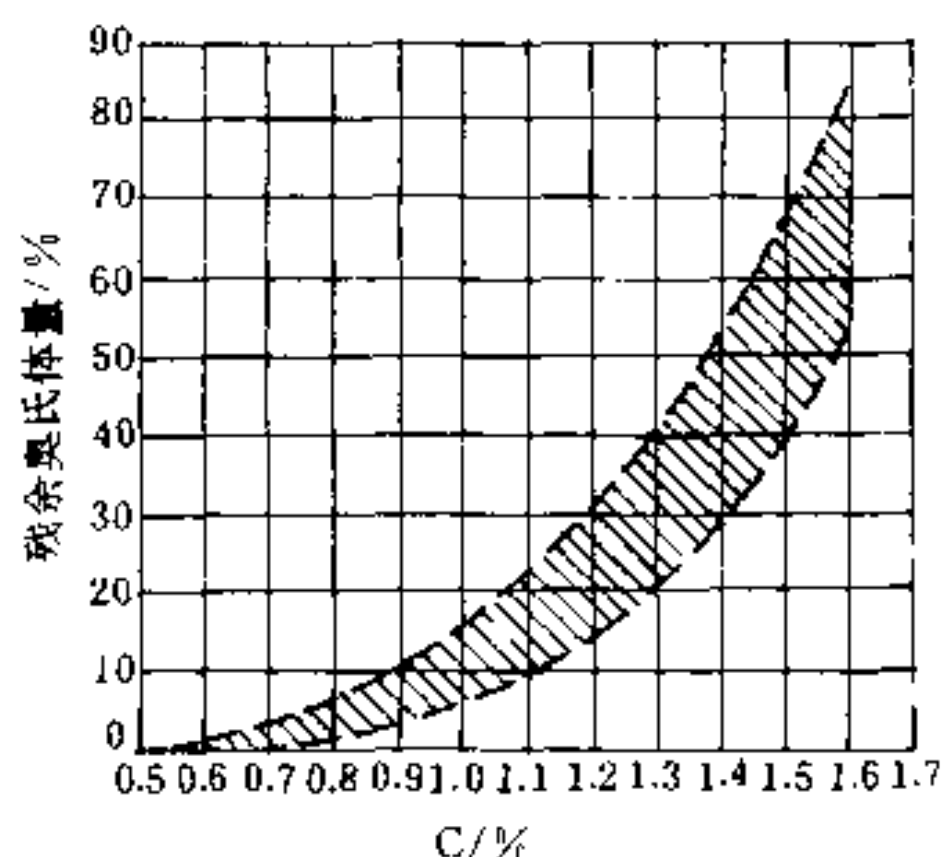
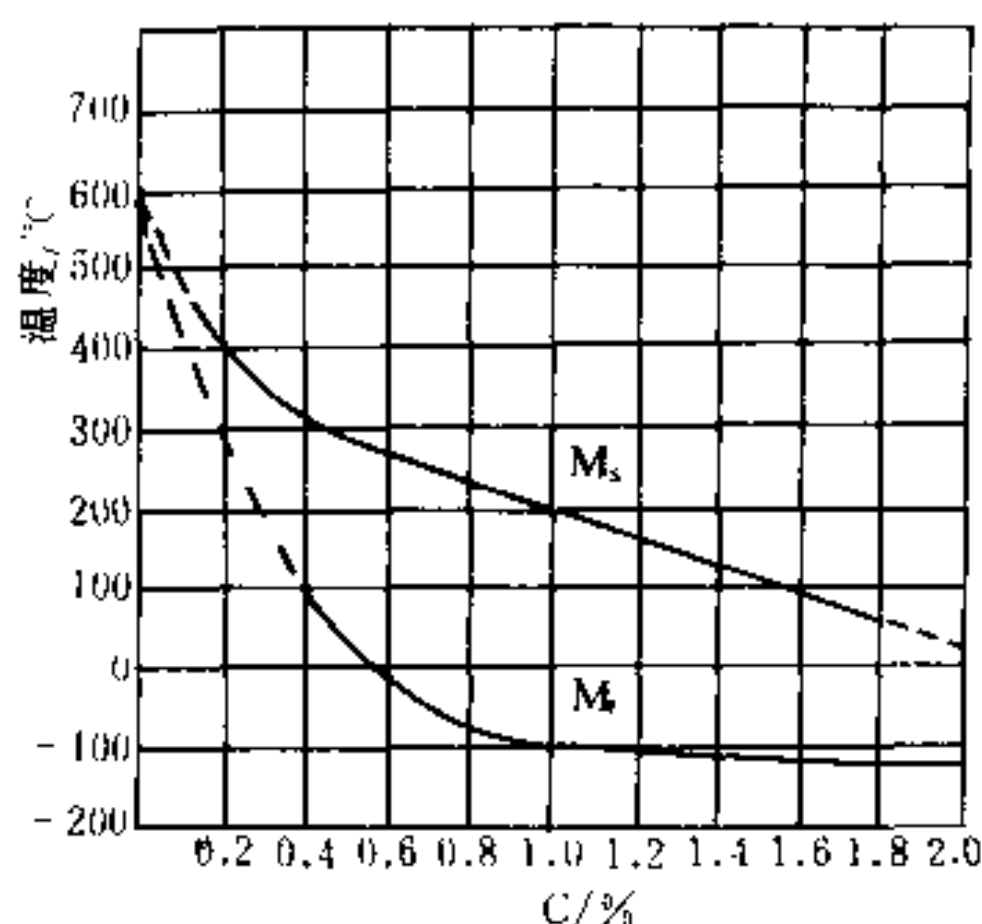


图 3-18 奥氏体含碳量对马氏体转变温度的影响

图 3-19 奥氏体含碳量对残余奥氏体量的影响

钢中含碳量越高， M_s 与 M_f 点就越低，含碳量超过 0.6% 的钢，其 M_f 点就低于 0°C（如图 3-18 所示）。因此一般高碳钢淬火后，组织中都会有一些残余奥氏体。钢中含碳量愈多，残余奥氏体也愈多（如图 3-19 所示）。

残余奥氏体不仅降低了淬火钢的硬度和耐磨性，而且在工件的长期使用过程中，由于残余奥氏体会继续转变为马氏体，使工件尺寸发生微量胀大，从而降低了工件的尺寸精度。因此生产中对一些高精度的工件（如精密量具、精密丝杠、精密轴承等），为了保证它们在使用期间的精度，可将淬火工件冷却到室温后，随即放到零度以下温度的冷却介质中冷却（如干冰），以最大限度地消除残余奥氏体，达到增加硬度、耐磨性与稳定尺寸的目的，这种处理方法称为“冷处理”。

(2) 马氏体的组织形态及力学性能

马氏体的形态主要有两种基本类型，一种是片状马氏体，另一种是板条状马氏体。钢中奥氏体含碳量越高，淬火组织中片状马氏体就越多，板条马氏体就越少。试验表明，奥氏体中碳含量大于 1%，淬火后得到的全部是片状马氏体，故片状马氏体又称高碳马氏体。奥氏体中含碳量小于 0.2%，淬火后得到的是板条马氏体，故板条马氏体又称低碳马氏体。当奥氏体含碳量介于两者之间时，则得到两种马氏体的混合组织。

片状马氏体立体形态呈双凸透镜状，而在显微镜下所看到的则是马氏体的截面形状，呈针片状，图 3-20 为粗大的片状马氏体形态，这是一种“过热”组织，在正常加热温度下，马氏体组织很细小，在光学显微镜下，看不清马氏体的形态，所以称为“隐晶马氏体。”

板条马氏体的立体形态呈椭圆形截面的细长条状，它是由一束束长条状晶体所组成的马氏体束，在一个奥氏体晶粒中，可形成几束不同位向的板条状马氏体，如图 3-21 所示。

马氏体的力学性能取决于马氏体中的含碳量，如图 3-22 所示，随着马氏体含碳量的提高，其强度和硬度也随之提高，尤其是含碳量较低时更为明显，但含碳量超过 0.6% 以后，就趋于平缓。



图 3-20 片状马氏体



图 3-21 板条状马氏体

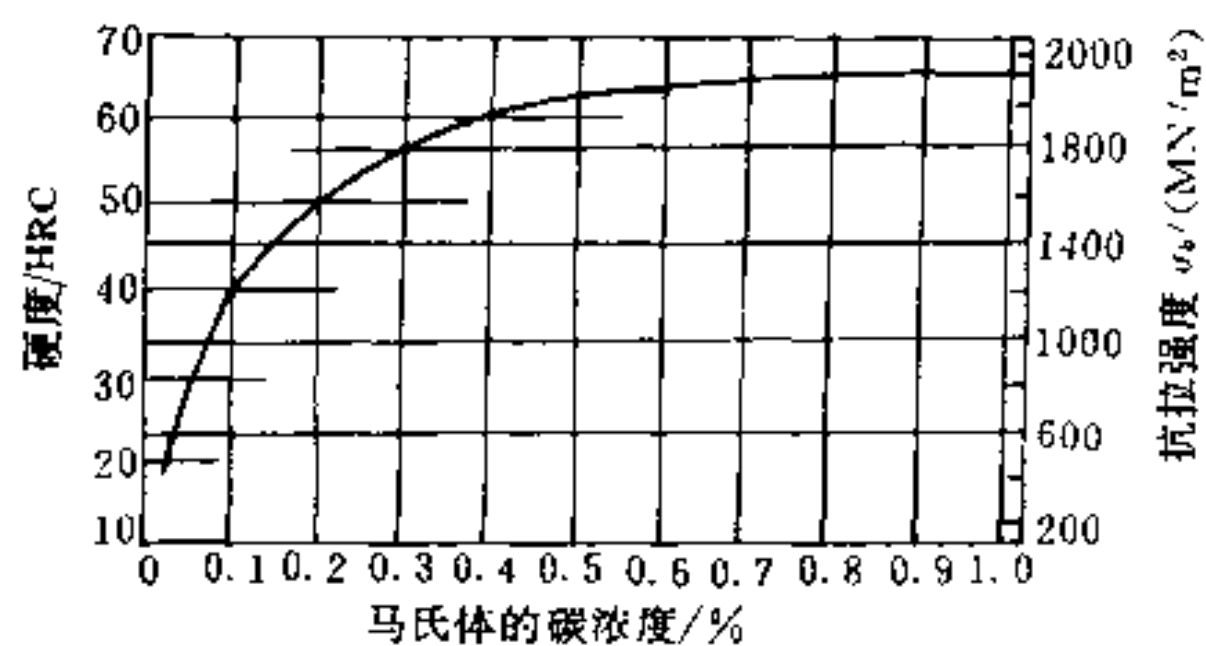


图 3-22 马氏体的强度和硬度与其含碳量的关系

造成马氏体强度、硬度提高的主要原因，一是碳原子的固溶强化作用，二是相变后，在马氏体晶体中存在着大量的微细孪晶和位错结构，它们提高了塑性变形抗力，从而产生了相变

强化。一般高碳片状马氏体内部的微细结构以孪晶为主,并且因含碳量高,晶格畸变严重,淬火内应力大等原因,其塑性和韧性都很差。而以位错微细结构为主的低碳板条马氏体,它具有较好的塑性和韧性。两者性能比较见表 3-2。

由此可见,片状马氏体的性能特点是硬度高而脆性大,而板条状马氏体不仅具有较高的强度和硬度,而且还具有较好的塑性和韧性,即具有高的强韧性。所以,低碳马氏体组织在结构零件中得到越来越多的应用,并且使用范围还会逐步扩大。例如矿用巷道 U 型钢支架,用低碳钢淬火获得低碳马氏体组织,取代原来的空冷(正火)处理后,强度大大提高,减少了钢材的使用量。

表 3-2 板条马氏体与片状马氏体的性能比较

淬火钢中含碳量/%	马氏体形态	$\sigma_s/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-2})$	$\sigma_t/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-2})$	硬度/HRC	$\delta/\%$	$\psi/\%$	$\alpha_k/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$
0.1~0.25	板条状	1020~1530	820~1330	30~50	9~17	40~65	60~180
0.77	片状	2350	2040	66	≈ 1	30	10

第四节 钢的退火与正火

退火和正火是生产中常用的热处理工艺,二者的主要差别在于冷却速度不同,退火采用缓慢冷却(如随炉冷却),而正火采用空气中冷却。退火和正火都是获得珠光体型组织(亚共析钢为 F+P,共析钢为 P,过共析钢为 $\text{Fe}_3\text{C}+\text{P}$),但由于正火冷速稍快,获得的组织细密,珠光体层片也较薄,因此硬度也比退火稍高。例如中碳钢退火后硬度约为 160~180 HBS,而正火后约为 190~230 HBS。

一、退火和正火的目的

生产中退火和正火经常作为预先热处理工序,安排在铸造和锻造(包括焊接)生产之后、切削加工之前。这样做一方面可以消除毛坯加工中带来的晶粒粗大和残余应力等内部缺陷;此外还可以调整钢材硬度,使工件易于切削加工。如果工件最终还需进行淬火、回火等热处理工序来调整性能,那么通过预先退火或正火处理,使晶粒细化、应力消除、组织均匀,可减轻淬火时变形与开裂的倾向,并易于获得良好的淬火组织。退火和正火除作为预先热处理工序外,在一些普通铸件、焊接件及某些不重要的锻件上,还可作为最终热处理工序,即经机加工后不再用其它热处理方法调整性能了。

综上所述,退火和正火的主要目的可大致归纳如下:① 降低(或调整)钢件硬度,以便进行切削加工;② 消除残余应力;③ 细化晶粒,改善组织以提高钢的力学性能;④ 为最终热处理作好组织上的准备。

工件在切削加工前为何要调整硬度呢? 因为硬度在 170~210 HBS 之间时钢件具有较好的切削加工性,太硬切削困难;太软切削时有“粘刀”现象,切屑不易排除,工件表面光洁度也差。为满足切削加工性的要求,低碳钢用正火处理,中碳钢用退火也可用正火,而高碳工具钢则必须用退火处理。

图 3-23 为各种碳钢经不同方法热处理后的硬度,并表示出(图中影线部分)适于切削加工的硬度范围。由图看出,含碳超过 0.77% 的过共析钢,退火后仍具有较高的硬度,为了改

善其切削加工性,可采用球化退火(具体操作见后)。这样处理后得到的珠光体组织不再是层片状,而是球状渗碳体分布在铁素体基体中(如图 3-12),我们把这种组织叫做球状珠光体,其硬度较片状珠光体低。

为什么退火和正火能够细化晶粒呢?这是因为退火和正火都需要把钢加热至临界温度以上,使之变为奥氏体。奥氏体形成时首先要产生结晶核心,然后再逐渐长大。产生的核心愈多,形成的晶粒就愈多愈小。结晶核心一般是在晶界处形成。虽然原来钢的晶粒粗大,但加热至临界温度发生组织转变重新结晶时,各个晶粒的界面上到处都可以产生晶核,因而形成许多细小的奥氏体晶粒。这些细的奥氏体晶粒冷至室温后,就可以得到细晶粒的常温组织。晶粒细化过程如图 3-24 所示。

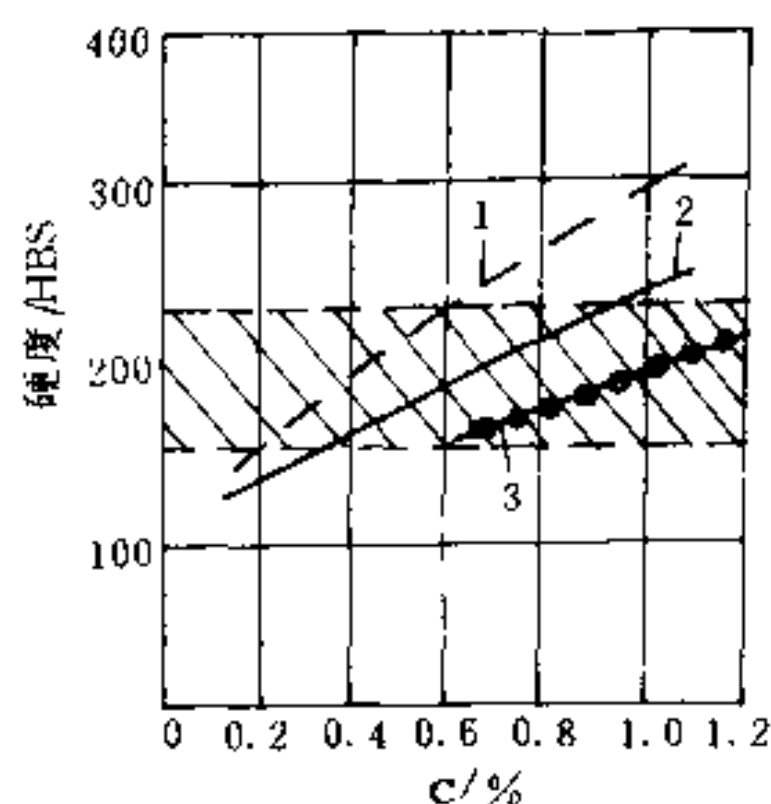


图 3-23 碳钢退火和正火后的大致硬度值

- 1——正火(片状珠光体类组织);
- 2——退火(片状珠光体类组织);
- 3——球化退火(球状珠光体)

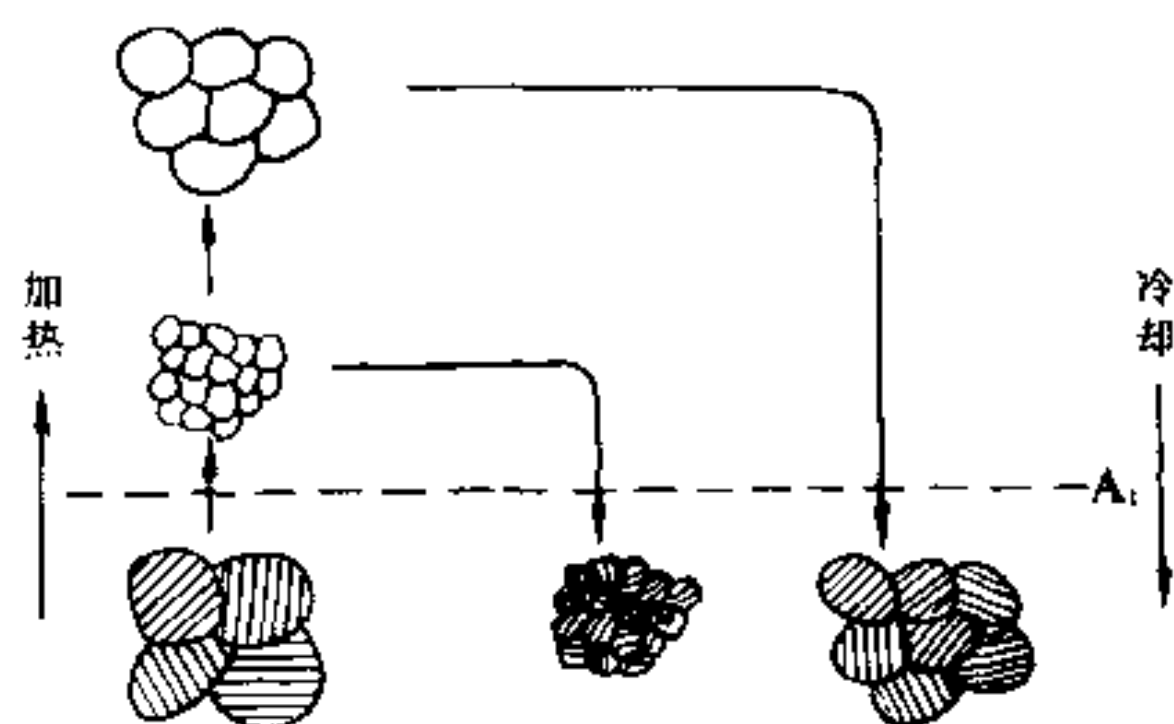


图 3-24 热处理改变晶粒度示意图

图 3-25 是 35 钢经退火晶粒细化前后的显微组织图,其中(a)为退火前,(b)为退火后。

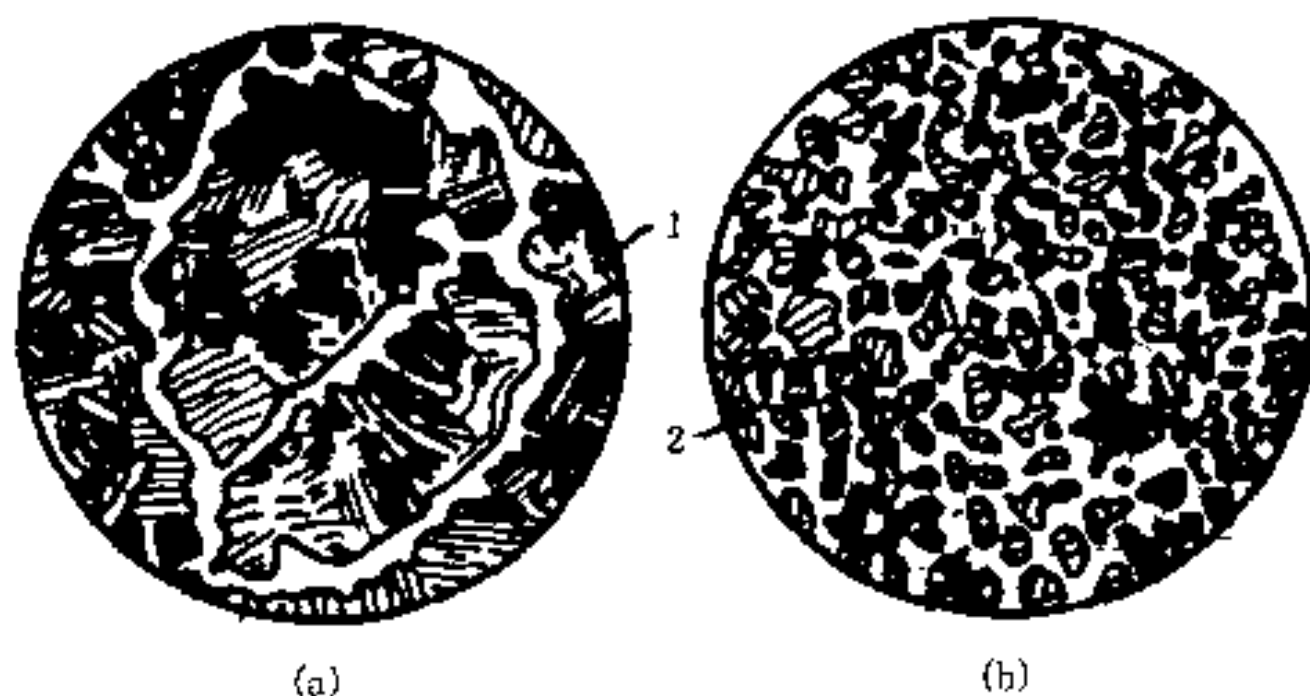


图 3 25 35 钢退火前后的组织

- 1——珠光体;2——铁素体

二、退火和正火工艺及应用

1. 退火

根据钢的成分及退火目的不同,退火工艺可分为完全退火、球化退火、等温退火、扩散退

火、去应力退火和再结晶退火等,其中常用的是完全退火、球化退火和去应力退火。

(1) 完全退火

完全退火又称重结晶退火,一般简称退火。这种退火主要用于亚共析成分的各种碳钢和合金钢的铸、锻件及热轧型材,有时也用于焊接结构。其目的主要是细化晶粒、消除应力、均匀组织、改善性能。一般常作为一些不重要工件的最终热处理,或作为某些重要零件的预先热处理。

完全退火操作是将亚共析钢工件加热至 A_{c3} 以上 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温一定时间后,随炉缓慢冷却(或埋在砂中、石灰中冷却)至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,取出在空气中冷却。

(2) 球化退火

球化退火主要用于过共析钢,其主要目的在于降低硬度、改善切削加工性,并为后面淬火作好组织准备。

一般球化退火的操作是,将过共析钢加热到 A_{c1} 以上 $20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,经过一段时间保温后,随炉缓慢冷至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下出炉空冷,便可得到球状珠光体组织。

需注意,过共析钢不能采用完全退火,因为加热温度超过 A_{cm} 后,过共析钢的组织为单一的奥氏体,如果随后再缓慢地冷却,最后得到的组织将是层片状珠光体+网状渗碳体,出现网状渗碳体将使钢的韧性大为降低。如球化退火前钢中存在严重的网状渗碳体,应先进行正火将其消除,以保证球化退火的质量。

(3) 去应力退火

去应力退火又称低温退火,主要用来消除铸件、锻件、焊接件、热轧件、冷拉件等的残余应力。如果这些应力不予消除,将可能引起钢件在一定时间后或随后的切削加工过程中产生变形,如果应力过大还可能造成开裂。

去应力退火操作一般是将钢件随炉缓慢加热($100\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C/h}$)至 $500\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($< A_1$),经一段时间保温后,随炉缓慢冷却($50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C/h}$)至 $300\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下出炉。

从去应力退火温度($< A_1$)可知,钢在去应力退火过程中并无组织变化,残余应力主要是通过钢在 $500\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温后消除的。

2. 正火

正火就是将钢件加热至 A_{c3} (亚共析钢)或 A_{cm} (过共析钢)以上 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温后从炉中取出,在空气中冷却的一种操作。

对亚共析钢来说,正火和退火可采用相同的加热温度,而过共析钢正火加热温度必须高于 A_{cm} 。因为过共析钢正火的目的是为了消除网状渗碳体,只有加热温度超过了 A_{cm} 以后,网状渗碳体才能全部溶于奥氏体中,从而获得单一的奥氏体组织,在随后的空冷过程中,由于冷速较快,渗碳体来不及在奥氏体晶粒边界上大量析出,因而就不能形成脆性很大的网状渗碳体。

由于正火的冷却速度稍快于退火,由 C 曲线可知,二者的组织是不一样的,正火后的组织比退火细,如图 3-26 和图 3-27 所示,因此正火后的力学性能也比退火要好(见表 3-3)。

正火的主要应用是:

(1) 因正火后的力学性能较退火高,且处理工艺时间短,可用于不重要结构零件的最终热处理;

(2) 用于低、中碳结构钢,作为预先热处理,可获得合适的硬度,便于切削加工;

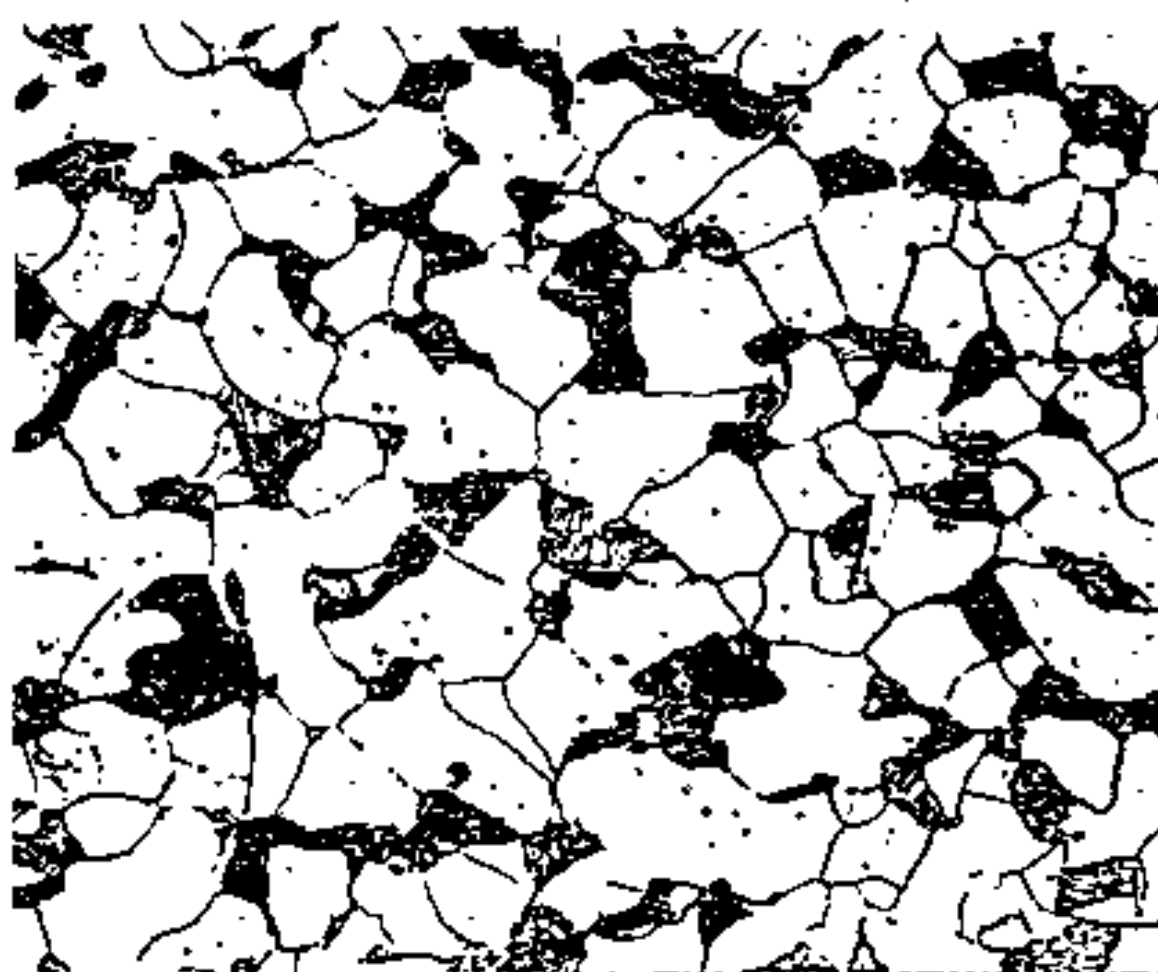


图 3-26 40 钢的退火组织(400×)

表 3-3

45 钢退火、正火状态的力学性能

状态	$\sigma_b / (\text{MN} \cdot \text{m}^{-2})$	$\delta_s / \%$	$a_k / (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$	硬度/HBS
退火	650~700	15~20	0.40~0.60	~180
正火	700~800	15~20	0.50~0.80	~220

(3) 用于过共析钢,可抑制或消除网状二次渗碳体的形成,以便在进一步球化退火中得到良好的球状珠光体组织。

各种退火和正火加热温度范围示意地绘于图 3-28 中。

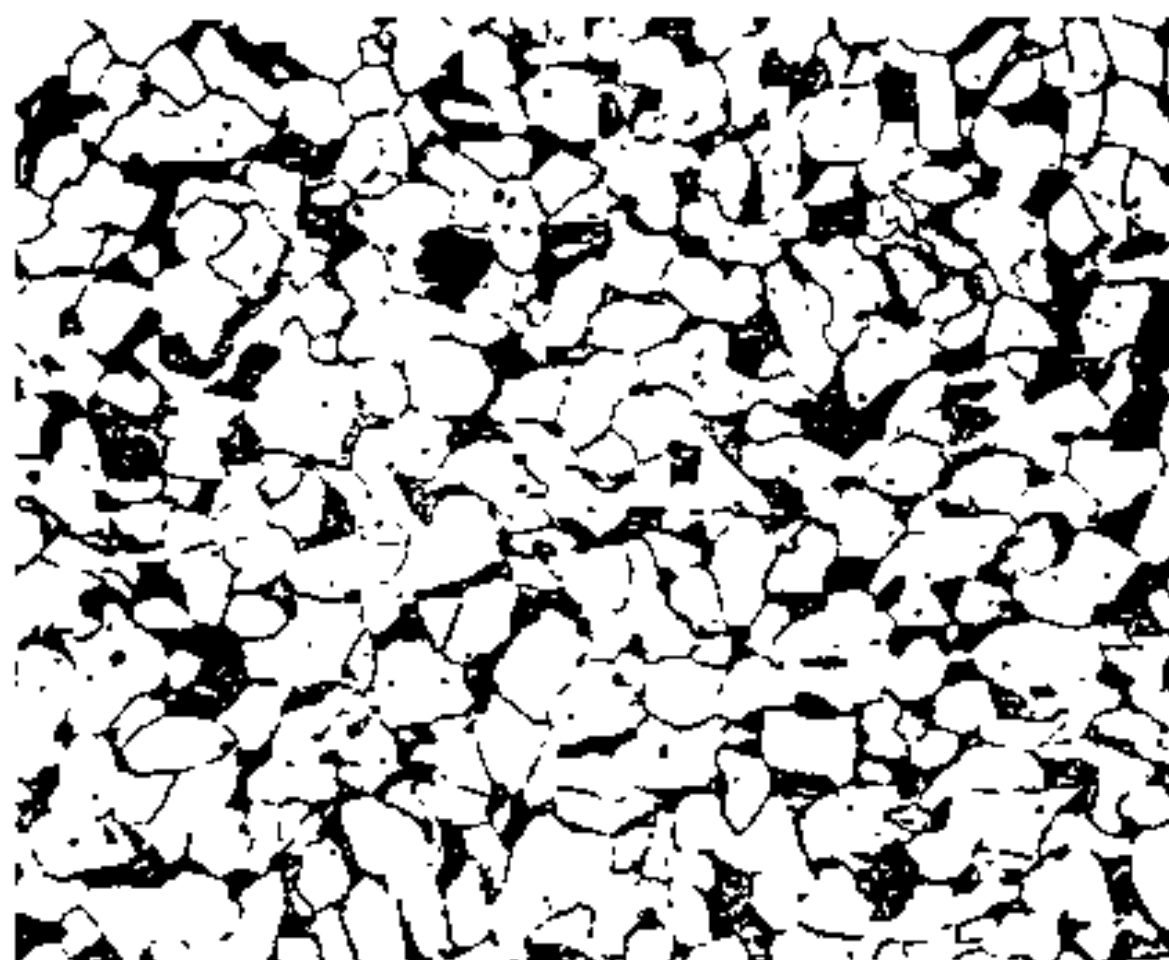


图 3-27 40 钢的正火组织(400×)

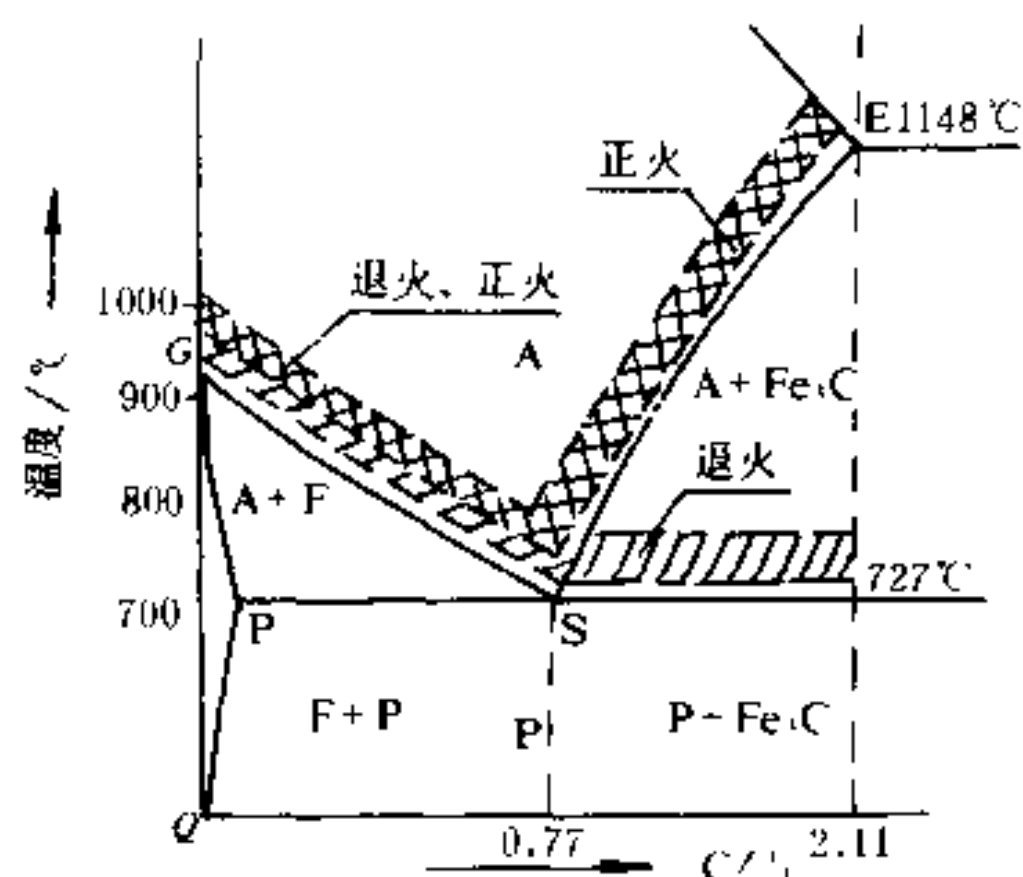


图 3-28 各种退火和正火加热温度范围

第五节 钢的淬火

淬火是将钢件加热到 A_{c3} 或 A_{c1} 点以上某一温度,保持一定时间,然后以适当速度冷却,获得马氏体或贝氏体组织的热处理工艺。目的是为了提高钢的硬度和耐磨性,它是强化钢材的最重要的热处理方法,大量重要的机器零件及各类刃、模、量具等都离不开淬火处理,就是日常用品如刀剪之类,也要淬火后才能使用。

需要指出,淬火得到马氏体,还不是热处理所要求的最后组织。淬火马氏体只有配以适当的回火后,才能使用(回火在下一节中介绍),因此也可以说,淬火是为回火做组织准备的。

一、钢的淬火工艺

1. 淬火温度的选择

在一般情况下,亚共析钢淬火加热温度为 A_{c3} 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$,共析钢和过共析钢淬火加热温度为 A_{c1} 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$,见图 3-29 所示的温度选择区。

亚共析钢的淬火温度必须超过临界温度 A_{c3} 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 左右,这样才能使钢全部转变成奥氏体,淬火后才有可能全部获得马氏体组织。如果加热温度仅在 A_{c1} 至 A_{c3} 之间,钢的组织除奥氏体外,还有不能变为马氏体的铁素体,使淬火后的组织除马氏体外还将含有很软的铁素体,钢的硬度就比较低。当然加热温度也不能超过 A_{c3} 太多,否则将使奥氏体晶粒长大,淬火后成为粗大的马氏体组织,使钢件力学性能降低。

与亚共析钢不同,过共析钢的淬火温度在 A_{c1} 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 左右,不能超过 A_{cm} 。这样淬火的组织是马氏体及少量的渗碳体。由于高硬度渗碳体的存在,可以增加钢的耐磨性,提高工具(过共析钢一般用作工具)的使用寿命。如若加热温度超过 A_{cm} ,除了造成奥氏体晶粒粗大外,还会使渗碳体全部溶解而变为单一的奥氏体组织,它的含碳量将比加热在 A_{c1} 至 A_{cm} 之间的奥氏体(这时钢中还有渗碳体)含碳量多。如第三节所述,含碳多的奥氏体淬火后钢中残余奥氏体较多,使其硬度较低,这就是为什么过共析钢的淬火温度不能超过 A_{cm} 的原因。

2. 加热时间的确定

加热时间包括升温 and 保温两个阶段,即零件各部分温度一致并完成组织转变的总时间,可由经验公式或实验加以确定,计算加热时间通常要考虑钢材成分、加热炉类型、装炉方式及装炉量等因素。生产中可通过实验确定合理的加热和保温时间,以保证工件的质量(具体时间计算参见有关手册)。

3. 淬火冷却介质

淬火操作难度比较大,主要因为淬火时要求得到马氏体,冷却速度必须大于钢的临界冷却速度(V_c),而快冷总是不可避免地要造成很大的内应力,往往会引起钢件的变形与开裂。

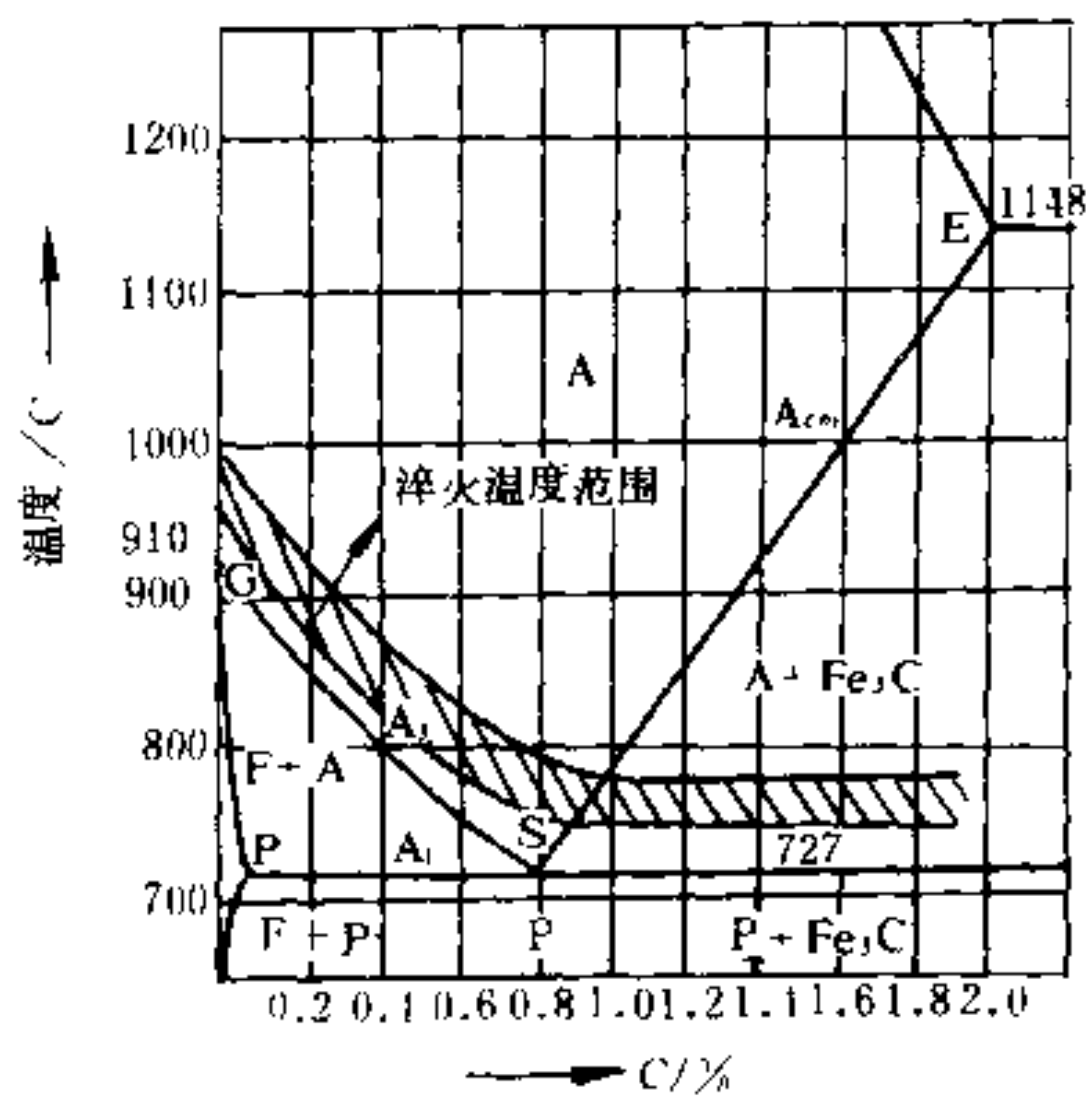


图 3-29 钢的淬火温度范围

怎样才能既得到马氏体又最大限度地减小变形与避免开裂呢?主要可以从两方面着手,其一是寻找一种比较理想的淬火介质;其二是改进淬火冷却方法。

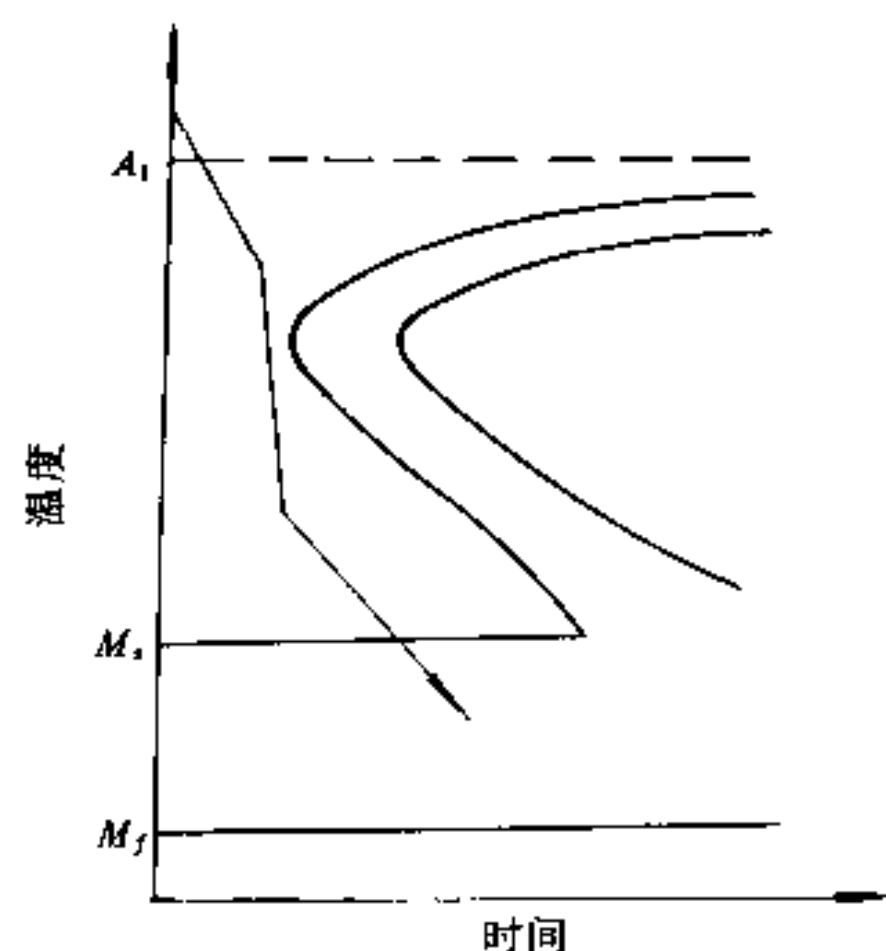


图 3-30 理想淬火冷却速度

从共析钢等温转变曲线可以看出,欲获得完全的马氏体组织,并不需要整个冷却过程中都进行快冷,关键是在C曲线鼻端附近温度范围内(约 550°C 左右)必须快速冷却,使冷却速度大于临界冷却速度,以防止奥氏体中途分解成非马氏体产物。在其它温度下都不需要快冷,特别是在 M_s 点($300\sim 200^{\circ}\text{C}$)以下,尤其不应快冷。这样做的好处是可以减小工件表面和心部的温差,从而使热应力(热胀冷缩造成)和组织转变应力(马氏体转变比容增大造成)减小。因此钢的理想淬火冷却速度,如图3-30所示。但是目前尚无一种淬火介质的冷却特性能完全满足这一要求。

下面将最常用的淬火介质,水和油的特点作一些介绍:

水 水是最经济的淬火介质,其冷却能力较强,主要用于碳钢淬火。水在 $650\sim 600^{\circ}\text{C}$ 范围内冷却能力较大,而在 $300\sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围冷却能力也并不低,因此水淬很容易造成工件变形和开裂。此外,水淬火易使工件产生局部硬度不足的所谓“软点”。这是由于冷却过程中,水受热蒸发所形成的气泡附着在工件表面造成的。因为气泡导热慢,致使零件附着气泡的地方冷速不足,造成软点。对切削工具来说,软点是不允许的,所以碳钢工具多用盐水(10% NaCl 水溶液)淬火。用盐水淬火时,盐的微粒就会附着在工件表面,因受热爆裂,从而破坏气膜,防止软点的产生。此外盐水的冷却能力虽然比水几乎大一倍,但淬裂的危险性和零件变形比水淬要小。这是因为盐水淬火时零件各处冷却速度比较均匀的缘故。

此外,水温对水的冷却能力影响很大。例如当水温由 18°C 升至 50°C 时,它在 $550\sim 600^{\circ}\text{C}$ 的冷却能力将显著下降。

油 各种矿物油作为淬火介质的优点是,在 $300\sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围冷却能力低,故淬火变形开裂的倾向较水淬小得多;缺点是在 $650\sim 600^{\circ}\text{C}$ 范围冷却能力低,不利于钢的淬硬。所以它只能用于临界淬火速度小(C曲线右移)的合金钢或尺寸特别小(截面 $4\sim 5\text{ mm}$ 以下)的碳钢零件。

二、淬火方法

生产中常用的淬火方法有:

1. 单液淬火(图 3-31a)

单液淬火就是将加热后的钢件,在一种冷却介质中进行淬火的操作方法。通常碳钢用水淬,合金钢用油淬。截面很小($4\sim 5\text{ mm}$

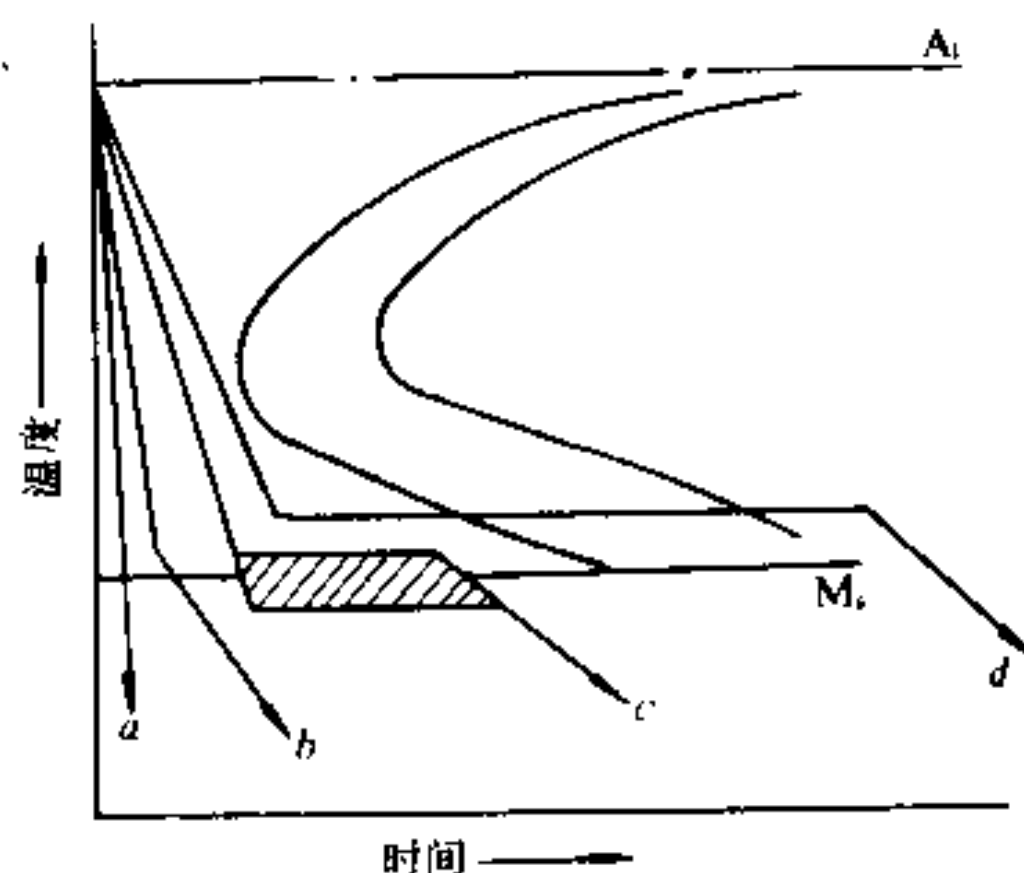


图 3-31 各种淬火方法示意图

a — 单液淬火; b — 双液淬火;
c — 分级淬火; d — 等温淬火

以下)的碳钢也可用油淬。单液淬火应用最普遍,碳钢及合金钢机器零件在绝大多数的情况下均用此法。它操作简单,易于实现机械化和自动化。但水和油对钢的冷却特性都不够理想,某些钢件(如外形复杂的中、高碳钢工件)水淬易变形、开裂,油淬易造成硬度不足。

2. 双液淬火(图 3-31b)

碳钢必须用水淬火,但水使钢件在形成马氏体的温度(300~200℃)以下冷速过大,容易产生淬火裂纹,油淬时,虽然 300~200℃以下冷速很慢,但油的冷却能力小(650~550℃),不能使碳钢淬硬。在生产中易淬裂的高碳工具钢,常采用双液淬火法,即先用水淬(或盐水淬),使钢在 C 曲线鼻部的温度快冷,然后再转入油中,使之在形成马氏体的时候慢冷。此法的缺点是需要正确控制钢件在水中的冷却时间,时间过短,越不过鼻部,淬不硬;过长,还可能产生裂纹。一般是根据工件截面的大小(通常每 3~5 mm 应在水中停留 1 秒钟左右)来决定在水中的停留时间。

3. 分级淬火(图 3-31c)

分级淬火就是把加热成奥氏体的工件,放入温度为 200℃左右(M_s 点附近)的热介质(熔化的盐类物质或热油)中冷却,并在该介质中作短时间停留,然后取出空冷至室温。

零件在 M_s 点附近停留,使其心部和表面、壁厚处和壁薄处的温度逐渐一致,而马氏体转变又是在空冷条件下进行的,因此分级淬火是避免和减小零件开裂和变形的有效措施。

但分级淬火除需等温槽外,热介质的冷却能力不足,是大尺寸工件淬不硬的主要原因,故此法一般只能用于截面在 10~15 mm 以下的碳钢及尺寸大一些的合金钢工具和零件。

过去,对分级淬火所下的定义是“在 M_s 点以上分级停留后空气冷却。”实践证明,在稍低于 M_s 点以下的温度分级停留是完全可行的,而且更为有利。当钢冷至 M_s 点以下不多时,只能有少量的马氏体产生,这些马氏体产生的组织应力并不大,不致引起零件过多的变形和开裂的危险。但这却可以降低热介质的温度,提高它的冷却能力,使尺寸较大的零件仍可进行分级淬火,从而扩大了这种方法的应用范围。

4. 等温淬火(图 3-31d)

把奥氏体化的钢,放入稍高于 M_s 温度的盐浴中,停留一段时间,使奥氏体转变为贝氏体的工艺操作叫等温淬火。它和一般淬火的目不同,是为了获得下贝氏体组织,故又称贝氏体淬火。

等温淬火不仅具有分级淬火的优点,而且所获得的下贝氏体组织综合力学性能较好(如表 3-4 所示)。但此法不能用于大截面零件(因热介质冷却能力小),例如碳钢零件其截面在 <10 mm 以下才能淬硬。此外,在稍高于 M_s 点的温度,转变为贝氏体所需的时间很长(一般碳钢和低合金钢需 45 分钟到 2 小时,高合金钢需要的时间更长),所以等温淬火法应用并不十分广泛。

表 3-4 0.74%C 钢等温淬火与淬火回火性能的比较					
热处理方法	硬度/HRC	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	a_k /(MJ·m ⁻²)
等温淬火	50.4	2010	1.9	34.5	0.491
淬火回火	50.2	1750	0.3	0.7	0.041

5. 局部淬火

有些工件按其工作条件,如果只是局部要求高硬度时,为了避免工件淬火过程中其它部

分产生变形和开裂,可以采用局部加热淬火的方法。图 3-32 为直径 60 mm 以上的较大卡规局部加热示意图。

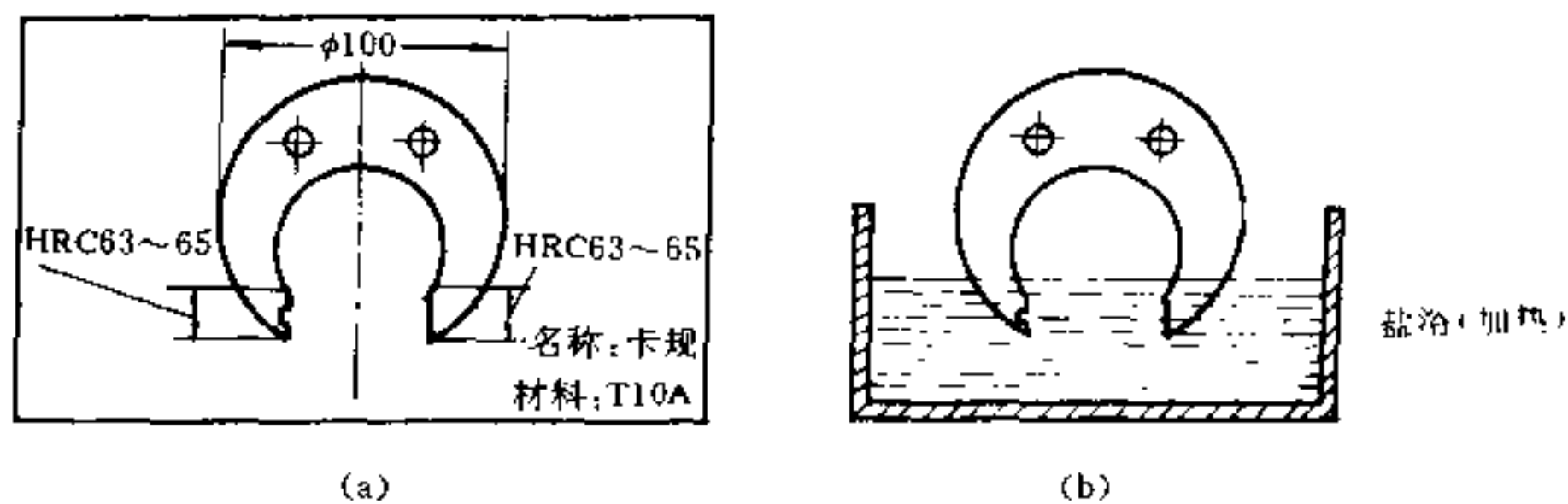


图 3-32 卡规及其局部淬火法
(a) 卡规零件图;(b) 卡规局部加热示意图

三、钢的淬透性

1. 淬透性与淬硬性

钢的淬透性是指在规定的条件下,决定钢材淬硬层深度和硬度分布的特性。也就是钢在淬火时能够获得马氏体的能力。它是钢材本身固有的一个属性。主要与钢的过冷奥氏体稳定性或钢的临界淬火冷却速度有关。

淬火冷却时,在工件截面上各处的冷却速度是不同的。表面的冷却速度最快,越靠心部冷却速度越慢,如果工件表面和心部冷却速度都大于钢的临界冷却速度,则工件的整个截面都能获得马氏体组织,整个工件就被淬透了。如果心部冷却速度低于临界冷却速度,如图 3-33(a)所示,则钢的表层获得马氏体,心部则是马氏体与珠光体类的混合组织,这时钢未淬

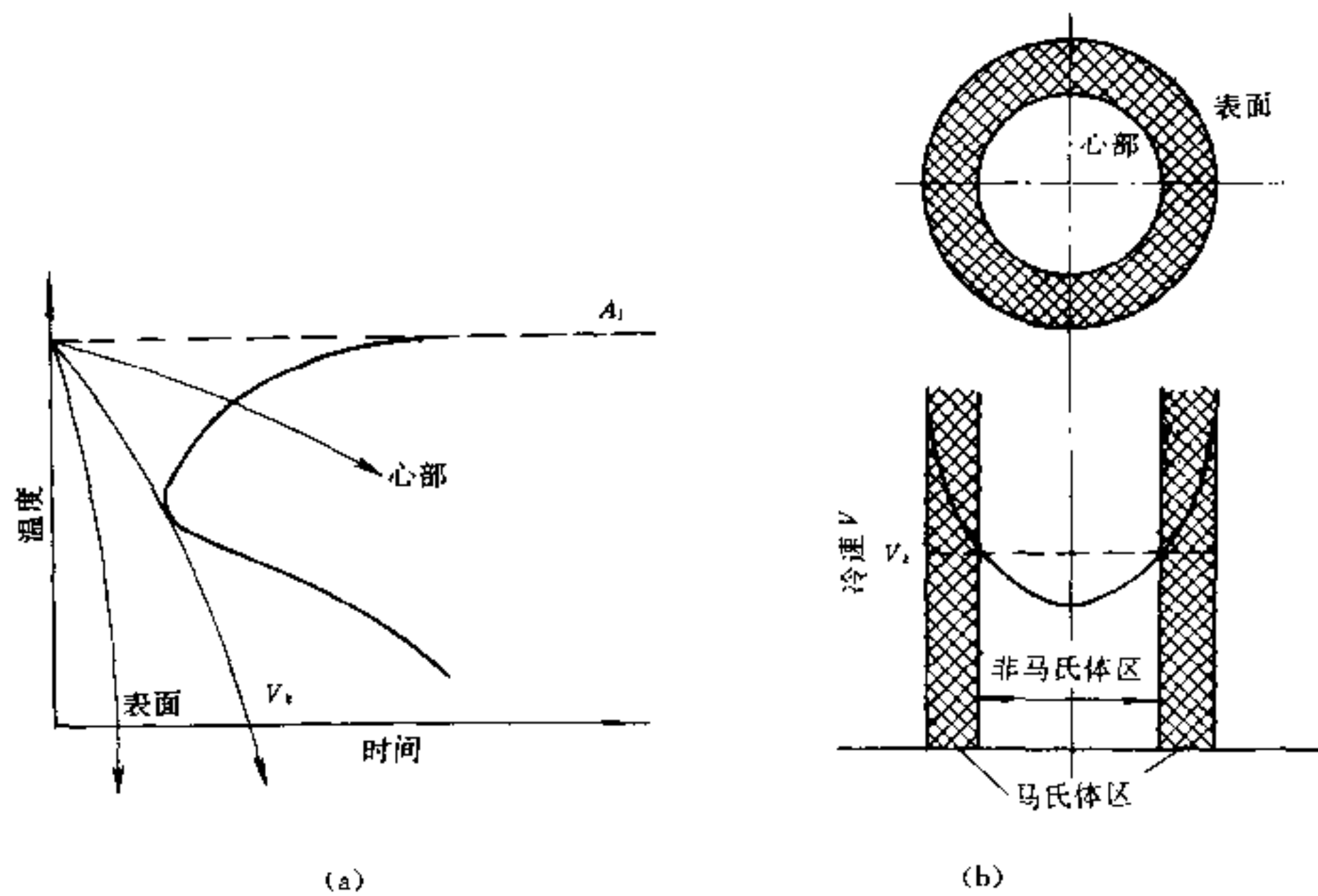


图 3-33 工件淬透层深度与截面上冷却速度的关系示意图
(a) 零件截面的不同冷却速度;(b) 未淬透区的示意图

透。对不同种类的钢来说,用同一尺寸的试样,在相同的加热和冷却条件下,有的能淬透,有的不能淬透。能淬透者,说明该钢种能获得马氏体的能力强,即淬透性好;不能淬透者,说明该钢种能获得马氏体的能力弱,即淬透性不好。通常评定是否淬透是以能不能达到50%马氏体加50%非马氏体组织(半马氏体)应具有硬度为标准。半马氏体组织的硬度主要取决于碳含量(见图3-34)。一般认为,如果工件的中心在淬火后获得了50%以上的马氏体,则它可被视为已淬透。钢的淬透性主要决定于该钢种的淬火临界冷却速度。临界冷却速度越小,过冷奥氏体越稳定,钢的淬透性也越好。

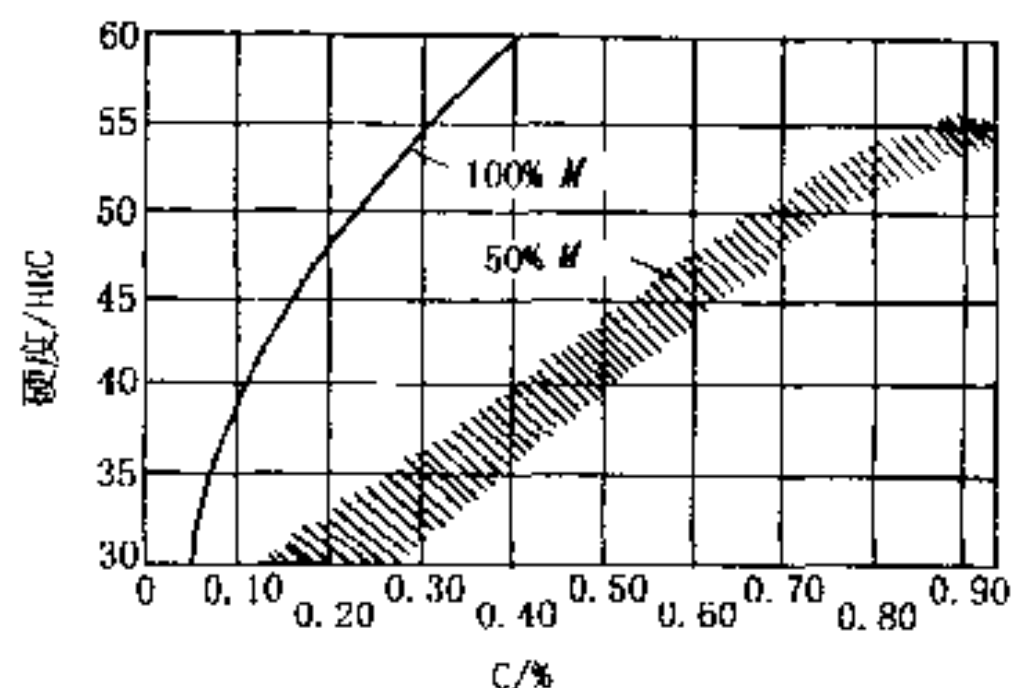


图 3-34 含碳量与半马氏体硬度的关系

淬硬性是钢在理想条件下进行淬火硬化所能达到的最高硬度的能力。

需要指出,钢的淬透性和钢的淬硬性是两个完全不同的概念。淬硬性也叫可硬性,是指钢在淬火后能达到的最高硬度,它主要取决于马氏体的含碳量。淬透性好的钢,其淬硬性不一定高。如低碳合金钢淬透性很好,但淬硬性却不高;而碳素工具钢的淬透性较差,但它的淬硬性却很高。

2. 淬透性的测定

淬透性测定方法有多种,对于碳素结构钢和一般低、中合金结构钢,通常采用国家标准 GB225-63 规定的末端淬火法测定其淬透性。

末端淬火法的要点是:将 $\phi 25 \times 100$ mm 的标准试样置于炉中加热奥氏体化后,放在末端淬火试验机上,由下端喷水冷却,水柱自由高度为 65 mm,水温 30℃,如图 3-35(a)所示。由于末端喷水,冷速最大,沿试样纵向冷却速度逐渐减小,因而硬度也相应地逐渐下降,测量淬火试样纵向的硬度值,并将硬度与距水冷端距离的对应关系绘成曲线,如图 3-35(b)所示。

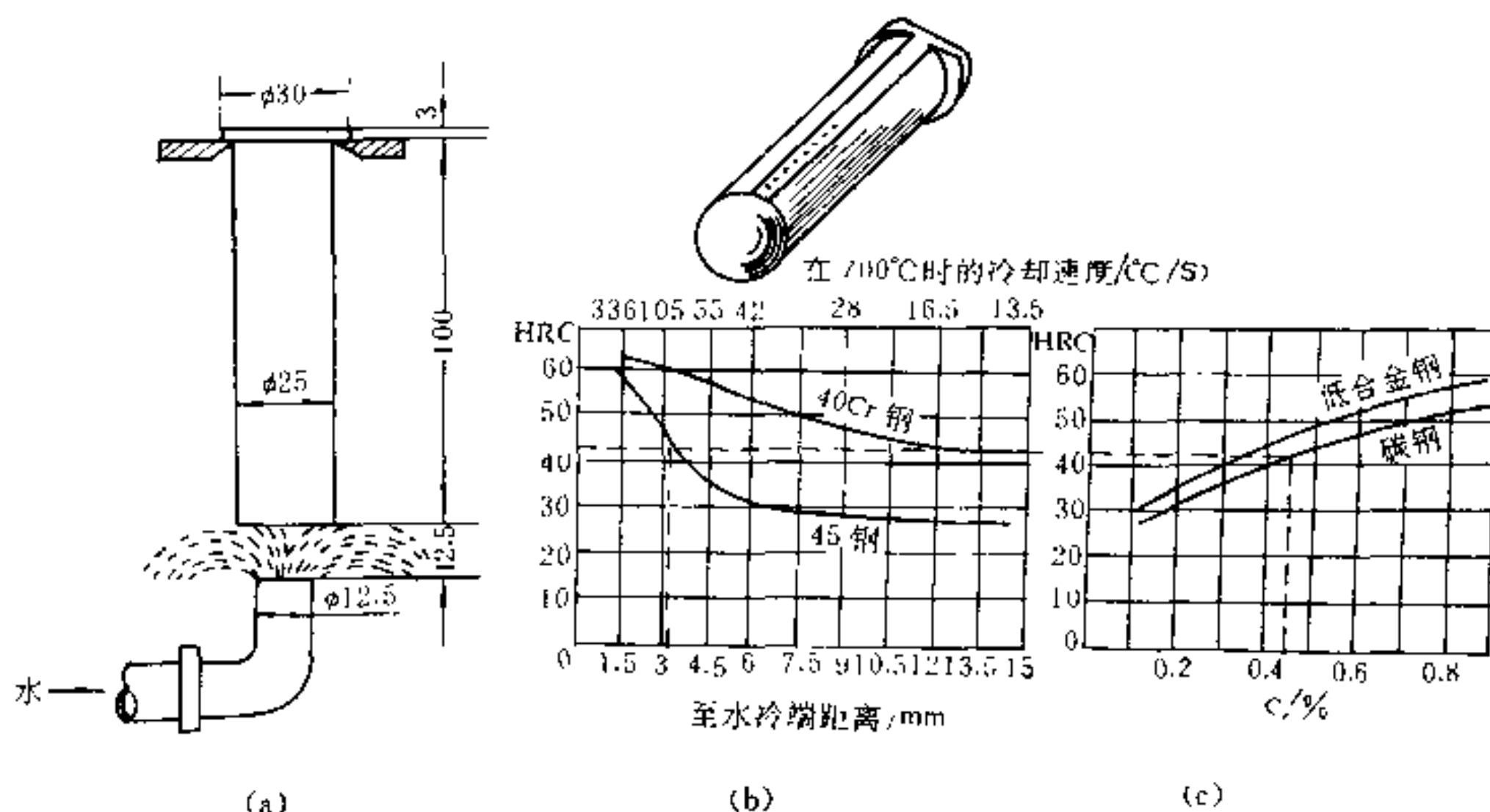


图 3-35 末端淬火法

(a) 喷水; (b) 淬透性曲线举例; (c) 钢的半马氏体区(50%M)硬度与钢含碳量的关系

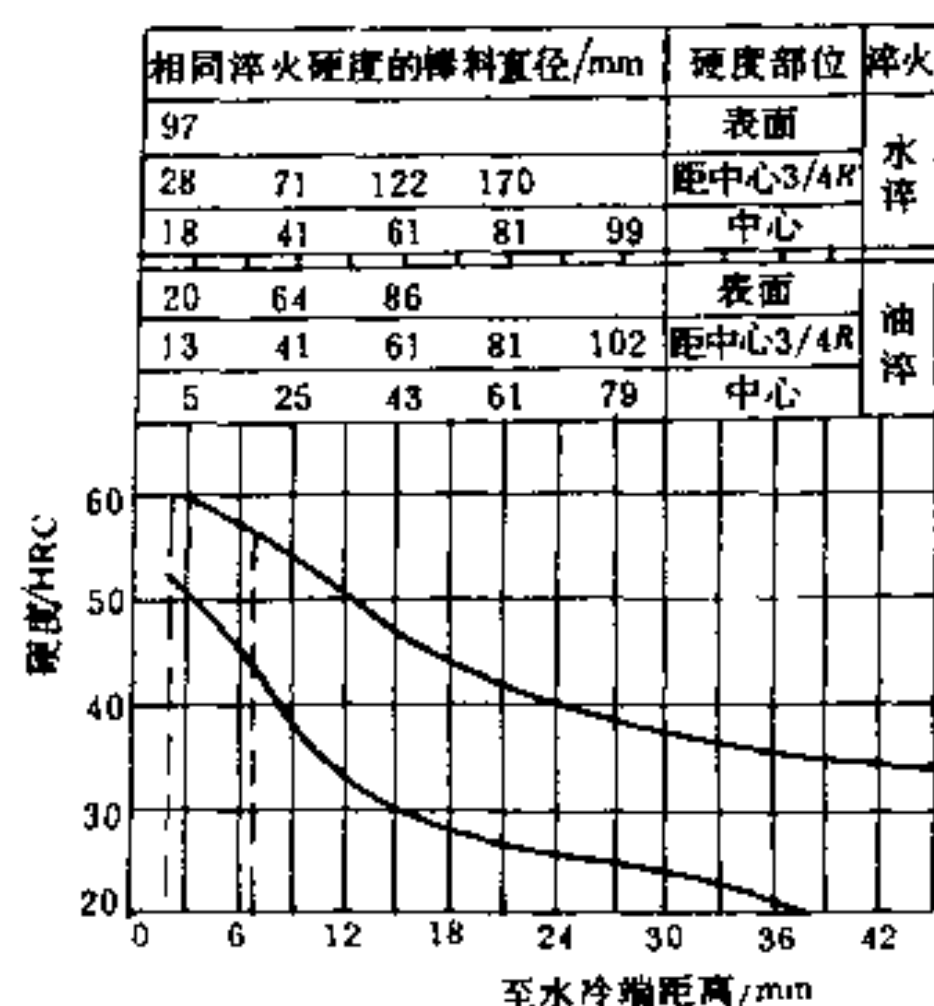


图 3-36 40Cr 钢的淬透性带

示,称之为淬透性曲线。由图可见,45 钢的淬透性曲线比 40 Cr 钢的曲线硬度下降要快得多,显然 40 Cr 钢比 45 钢的淬透性要好。图 3-35(c)示出钢的半马氏体区硬度与钢的含碳量关系。由于钢材化学成分的波动等原因,同种钢材测出的淬透性曲线往往不是一根线,而是一个范围,称为淬透性带,图 3-36 为 40Cr 钢的淬透性带。

生产中也常用所谓“临界直径”来表示钢的淬透性。临界直径(D_c)是指钢在淬火冷却介质中冷却后,其心部得到全部马氏体或 50%马氏体组织时的最大直径。显然在相同的冷却条件下, D_c 越大,钢的淬透性也越大。表 3-5 列出了一些钢材在水和油中淬火时的临界直径值。

需要指出,钢的淬透性是钢材本身的一种属性。在相同的加热条件下,同一钢种的淬透性是相同的。但同一钢种的工件在不同的冷却介质中淬火或外形尺寸不同时,可得到不同的淬硬层深度。如同一种钢在相同的奥氏体化条件下,水淬比油淬的淬硬层深,小件比大件的淬硬层深。决不能因此就说成,同一钢种水淬比油淬的淬透性好,小件比大件的淬透性好。所以只有在其它条件都相同的情况下,才可以根据淬硬层深度来判定钢的淬透性高低。

表 3-5 常用钢的临界淬透直径(D_c)

钢 号	D_c 水/mm	D_c 油/mm	心部组织
45	10~18	6~8	50%M
60	20~25	9~15	50%M
40 Mn	18~38	10~18	50%M
40 Cr	20~36	12~24	50%M
20 CrMnTi	32~50	12~20	50%M
T8~T12	15~18	5~7	95%M
GCr15		30~35	95%M
9SiCr		40~50	95%M
CrWMn		40~50	95%M
Cr12		200	90%M

四、淬火零件的变形与开裂

零件变形、开裂是淬火时常遇到的两大缺陷,它们都是因为急冷时在工件中产生内应力所造成的。开裂将使零件报废,变形则使零件的形状和尺寸发生变化,降低其尺寸精度,变形严重也会使零件报废。各种工艺方法和技术措施,只能减小而不能完全消除零件的淬火变形,所以保证尺寸精度的磨削工序只能安排在热处理以后进行。

1. 淬火变形

一般说,变形是因为淬火产生的内应力超过了钢的屈服极限,使钢件发生了塑性变形。内应力的产生有两个原因,一是由于从高温冷至低温(或低温加热至高温)的过程中,零件各部位冷却速度(或加热速度)不同,从而使各部位热胀冷缩的情况也不相同所造成的,这种应力称为“热应力”;另一种是由于热处理过程中,组织转变而引起体积改变所造成的,这种应力称为组织应力。例如含碳1%的钢,全部淬火成马氏体后,其体积将增加大约1%。含碳愈多的钢,淬火后体积增长的愈多。在我们讲过的组织中,奥氏体最致密(同样重的钢体积最小)珠光体次之,马氏体最不致密。

在淬火过程中,热应力与组织应力引起的变形往往是相反的。因冷却的时候,先冷先收缩,而组织转变(奥氏体变为马氏体)则是先冷(先转变)先膨胀。

钢的成分、淬火温度、淬火介质、淬火操作方法以及零件形状尺寸等等都影响热应力及组织应力的大小,因而淬火变形规律就比较复杂。下面仅讨论一般情况下或简化的情况下淬火变形规律,使之在今后工作中对变形问题有所了解。

组织应力引起的变形是使零件沿最后冷却的方向,即最大尺寸方向(如立方体的对角线)增长,因而棱角处向外翘起,如图3-37(c)所示。对圆盘零件来说,其直径胀大,厚度减小,而圆柱零件则长度增加,直径缩小。有人曾做过试验, $\Phi 25 \times 125$ mm的中碳钢试样经50次850℃水中淬火后,其长度增加达10.6 mm。

为什么组织应力有这种影响呢?这是由于淬火冷却较快的表面部位,首先转变为马氏体而骤然膨胀,使冷却较慢的内部受到来自表面膨胀的拉应力,此时温度较高的心部塑性较大,因而被表面的膨胀作用而拉长变细,使工件沿最后的冷却方向(即最大尺寸方向)伸长,而直径缩小。

热应力的作用正好与此相反,故变形结果也相反,沿最后冷却的方向(即最大尺寸方向)缩短,使零件趋于球形,如图3-37(b)所示。

以上讨论了内应力的性质对零件变形的影响。下面让我们再讨论一下几种简单的典型零件(杆状零件、带孔零件及板状零件)的变形规律。

(1) 杆状零件

杆状零件淬火时主要产生弯曲变形。如果对零件硬度和精度要求不是太高,淬火弯曲变形可用压力机进行校直。如果是高硬度、高精度零件,必须预先留有磨削余量,淬火后再磨到所需的尺寸。留出的磨削余量要恰当,太多,磨削太费工时;太少则变形不能完全去除。因而当我们设计和制造高硬度的杆状零件时,应根据零件的具体情况,查阅制造工艺手册并求得热处理工人师傅及技术人员的帮助,留出合适的磨削余量。

弯曲变形是由于零件相对的两面冷速不均匀而造成的。如果截面不对称,如图3-38所

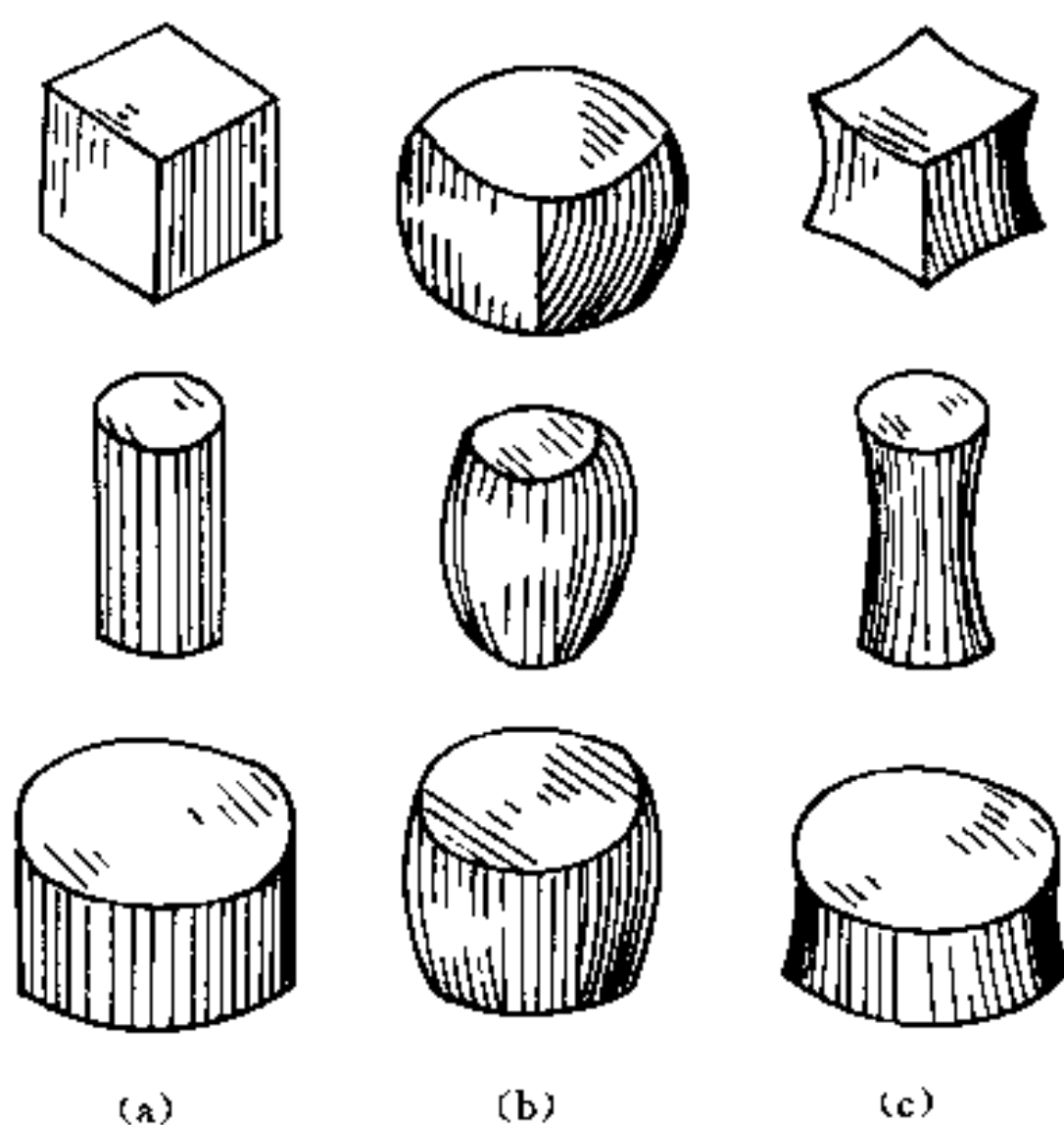


图3-37 不同应力(多次作用下)引起的变形

(a) 原来形状;(b) 热应力引起的变形;

(c) 组织应力引起的变形

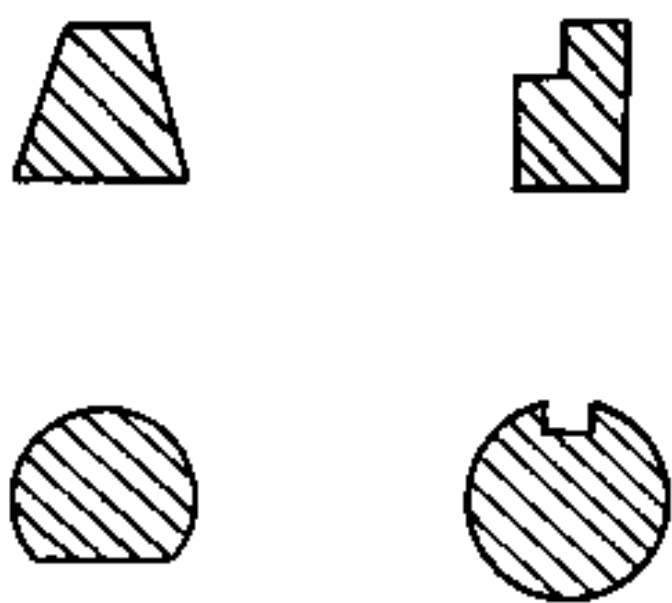


图 3-38 零件截面不对称举例

示,则两侧面的冷速不均匀程度就较大,弯曲变形也就比较严重。在设计时,应力求零件截面对称。例如一面带有键槽或油槽的轴类零件,因带键槽、油槽的一面冷速较快,淬火后弯曲变形就较严重。如果设计上允许的话,把两面做出对称的键槽或油槽,淬火后弯曲变形就会小得多。

为了便于理解杆状零件弯曲变形规律,我们进行下述试验,看一看单纯热应力对杆状零件发生弯曲变形的影响。

将钢棒加热至 700°C 附近(不超过临界温度),然后将下面一半浸入水中[如图 3-39(a)所示]。因下部冷速快,急剧收缩,将使温度较高的上部产生压应力。此时上部温度高,塑性好,所以受压而缩短。当上部最后冷至室温时,它的尺寸将比原来的短些,因而试样就要变成图 3-39(b)的形状。这就是说热应力使零件朝着冷速快的一面凸起。

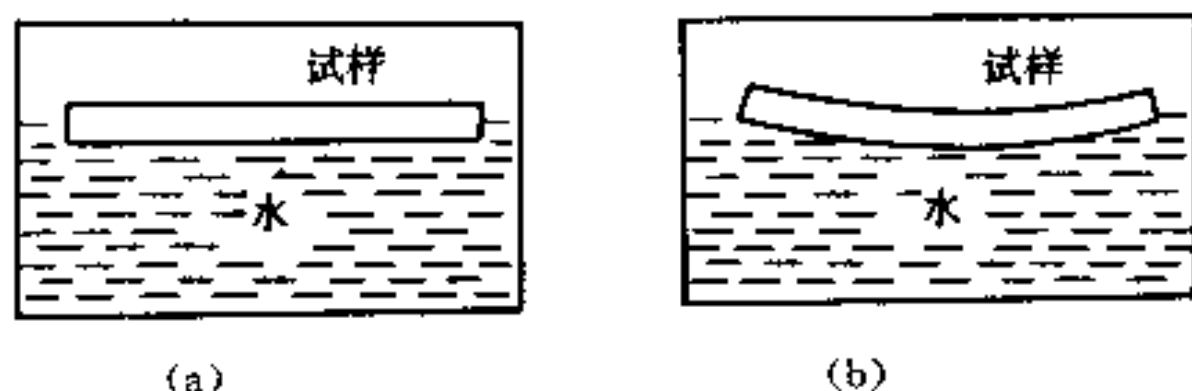


图 3-39 热应力引起的变形

(a) 试样下面水冷;(b) 最后的变形

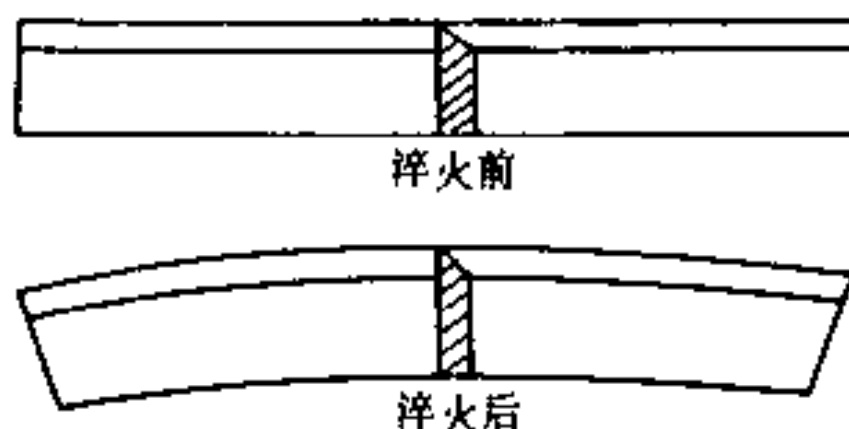


图 3-40 刀片淬火变形

上面讲的是在单纯热应力作用下杆状零件变形规律。但在实际淬火过程中,既有热应力又有组织应力,两者对变形的影响具有相反的作用,因而具体零件究竟怎么变形,就要看那一种应力起主导作用了。对于用水淬火的碳钢来说,热应力常常是主要的,弯曲表现为向冷得快的一面凸起。例如用中碳钢(40,45 钢)制造的一面带有键槽的轴及图 3-40 所示的刀片,因带键槽及有刀口的一面冷速较快,故淬火后都向这一面凸起(此外刀片的大平面还要翘曲,但这较刀口凸起易校直)。

在减小轴类淬火弯曲变形方面,近年我国有许多发明创造,如水平淬火法及滚动淬火法等。以前都认为长轴零件垂直浸入淬火液中变形小,但通过科学实验和生产使用情况说明,只要正确掌握淬火操作(淬入冷却液不宜太深,工件进入冷却液后上下运动要快),水平淬火变形比垂直淬火变形还要小些,表 3-6 是某厂试验的结果。

滚动淬火法,就是在淬火槽中斜放两根角铁,把工件放在角铁上,使之滚入槽中冷却。某机床厂生产的平衡轴零件,选用 45 钢,尺寸是 $\Phi 32 \times 270 \text{ mm}$,要求硬度 50 HRC 以上,弯曲小于 0.15 mm,原先垂直淬火时变形为 0.3~0.5 mm,现改用滚动淬火,80%~90%的零件均小于 0.1 mm。

(2) 带孔零件

齿轮、套筒等类零件都带有内孔,淬火时,内孔胀大或缩小的情况都可能发生。如果内孔

表 3-6

长轴淬火变形

钢 号	尺寸/mm	淬火温度/℃	弯曲变形值/mm	
			水平入水	垂直入水
35	$\Phi 20 \times 400$	860	1.90	5.40
	$\Phi 20 \times 472$	860	1.65	2.34
	$\Phi 25 \times 342$	860	0.33	4.87
45	$\Phi 30 \times 450$	840	1.43	3.80

缩小,还可以进行磨削加工,使之达到要求的尺寸;如果胀大,超过公差要求,就往往使零件报废。

热应力使内孔缩小,组织应力则使内孔胀大。

中碳钢水淬及合金钢油淬时,往往是组织应力起主导作用,结果是内孔胀大。如果零件壁厚过大(内孔小),零件淬硬层很薄时,则可能热应力起主导作用使内孔缩小。

轴类零件淬火有时弯曲能达几毫米,甚至更大,但零件淬火胀大或缩小,一般在几十微米到几百微米之间,例如中碳钢(40、45 钢)套筒水淬后,内孔胀大约 0.3%~0.8%,即内孔为 $\Phi 100$ mm 时可能胀大 0.3~0.8 mm 左右。

环形零件淬火后尺寸变化情况,见表 3-7 所示。

若套筒零件内有键槽,则键槽的变形决定于套筒的胀缩,套筒内孔胀大时,键槽亦胀大,内孔缩小,键槽也缩小,其变形值见表 3-8 所示。

表 3-7

45 钢圆环 810℃盐水淬火后变形值

试样尺寸/mm	变形量/mm		
	外径	内径	高度
$\Phi 78 \times \Phi 60 \times 15$	0.49(0.63%)	0.46(0.76%)	0.04(0.27%)
$\Phi 78 \times \Phi 45 \times 15$	0.29(0.37%)	0.21(0.46%)	0.02(0.17%)
$\Phi 78 \times \Phi 30 \times 15$	0.28(0.36%)	0.14(0.46%)	0.02(0.17%)
$\Phi 78 \times \Phi 15 \times 15$	0.27(0.34%)	0.06(0.40%)	0.01(0.07%)

注:1. 表中括号内为变形量与尺寸的相对百分比;

2. 此表变形均为胀大值。

表 3-8

45 钢带键槽钢套淬火后变形值

尺寸/mm	热处理规范	变形量/mm	
		钢套内径	键槽宽
$\Phi 78 \times \Phi 55 \times 25$	810℃淬盐水	+0.27	+0.06
$\Phi 78 \times \Phi 40 \times 25$	810℃淬盐水	+0.21	+0.06
$\Phi 78 \times \Phi 25 \times 25$	810℃淬盐水	+0.16	+0.05
$\Phi 78 \times \Phi 15 \times 25$	810℃淬盐水	+0.08	+0.02
$\Phi 78 \times \Phi 5 \times 25$	830℃淬油	-0.05	-0.02

这里需要说明,以上所讨论的套筒淬火变形规律指的是中碳钢普通淬火法的情况。对于低碳钢、高碳钢套筒及中碳钢齿轮表面高频淬火后内孔一般不是胀大而是缩小。

上面讲过组织应力使零件内孔胀大,热应力则使内孔缩小,那么我们能否把内孔大于要求的报废零件(如机加工废品,或热处理后内孔胀大的废品),利用热应力的作用使其内孔缩小到要求的尺寸公差以内呢?如果尺寸相差不是太多,零件外形尺寸要求又不是太严格的话,是可以办到的。方法是用泥砂将零件内孔堵起来置于炉中,加热至临界温度附近($600\sim 700^{\circ}\text{C}$),然后放入水中急冷即可。如果一次处理收缩量不够,还可反复进行两次。零件壁厚愈大(孔径愈小)时,缩小效果越好。一般情况经一次收缩处理,可使内孔缩小 0.2 mm 左右。

这样处理使内孔缩小的原因,在于急冷时外层首先收缩,因而给内孔部位以压力,使之发生塑性变形而缩小。

(3) 板状零件

用作离合器的摩擦片和圆盘锯片等均属此类零件。板状零件淬火时发生翘曲变形是不可避免的,尺寸大、厚度小的更为严重。

为了减少和防止变形,这类零件常采用在压力下进行淬火的操作方法(用淬火压床或淬火夹具)。淬火后将许多零件一起用夹板夹紧进行回火,可以使翘曲变形得到进一步校正。

在回火过程中对变形零件进行矫正的作用特别大。例如薄片零件淬火翘曲达数毫米,甚至更大时,则可在 400°C 左右回火校正过来。之所以这时容易矫正,主要是回火过程中,组织变化所引起的所谓“相变弱化”(相变塑性)现象所造成的。“相变弱化”就是金属发生组织转变时,其强度将出现大幅度下降的现象。不管加热或冷却,只要金属组织发生转变这种现象都会出现。有人曾做过如下的实验,把一根淬火,一根未淬火的两根钢棒,将其两端支架起来,中间挂一重物,然后放在同一炉中加热,这时可发现未淬火的钢棒不下垂或下垂的挠度不大。而淬过火的钢棒,虽然其强度和硬度高得多,但下垂弯曲的却很厉害。这一实验充分说明了“相变弱化”在回火矫正零件变形过程中所起的作用。

2. 淬火裂纹

淬火裂纹一般是当钢冷至 M_s 点以下发生的。它是由于零件各部位马氏体转变不同时所引起的组织应力造成的。形成马氏体时,其体积要发生膨胀,而后形成的马氏体(冷却较慢的地方,如零件心部)将使先形成马氏体的部位(冷却较快的地方,如零件表面)产生拉应力,这种应力超过钢的抗拉强度时,零件就要产生裂纹。

含碳愈高的钢,淬火后硬度和脆性愈大,体积膨胀的也愈多,产生的内应力也愈大,因此愈容易出现淬火裂纹。制造机器零件用的结构钢,含碳量一般都不超过 0.5% ,否则就容易出现淬火裂纹。

因为合金元素能降低钢的导热性,淬火时将增大零件内部和外表的温度差,从而引起较大的内应力,易使钢件产生淬火裂纹。所以合金钢,尤其高合金钢(合金含量较高)都用冷却能力较小的油作为淬火介质。

淬火温度过高;淬火后未及时回火;重复淬火(因第一次未淬好或其它原因)前未进行退火处理等,均易使钢产生淬火裂纹。淬火工艺不正确是工件淬裂的主要原因。

零件的形状对产生裂纹的影响是很大的,机械设计中应尽量使零件形状简单、对称、没有尖角、各部分相接处壁厚差别小些等。不合理的设计常常给热处理工作造成极大的麻烦或使零件淬火时产生裂纹而报废。图 3-41 为几种同样零件的两种设计方案,请分析一下哪种

设计较好,哪种设计不好。

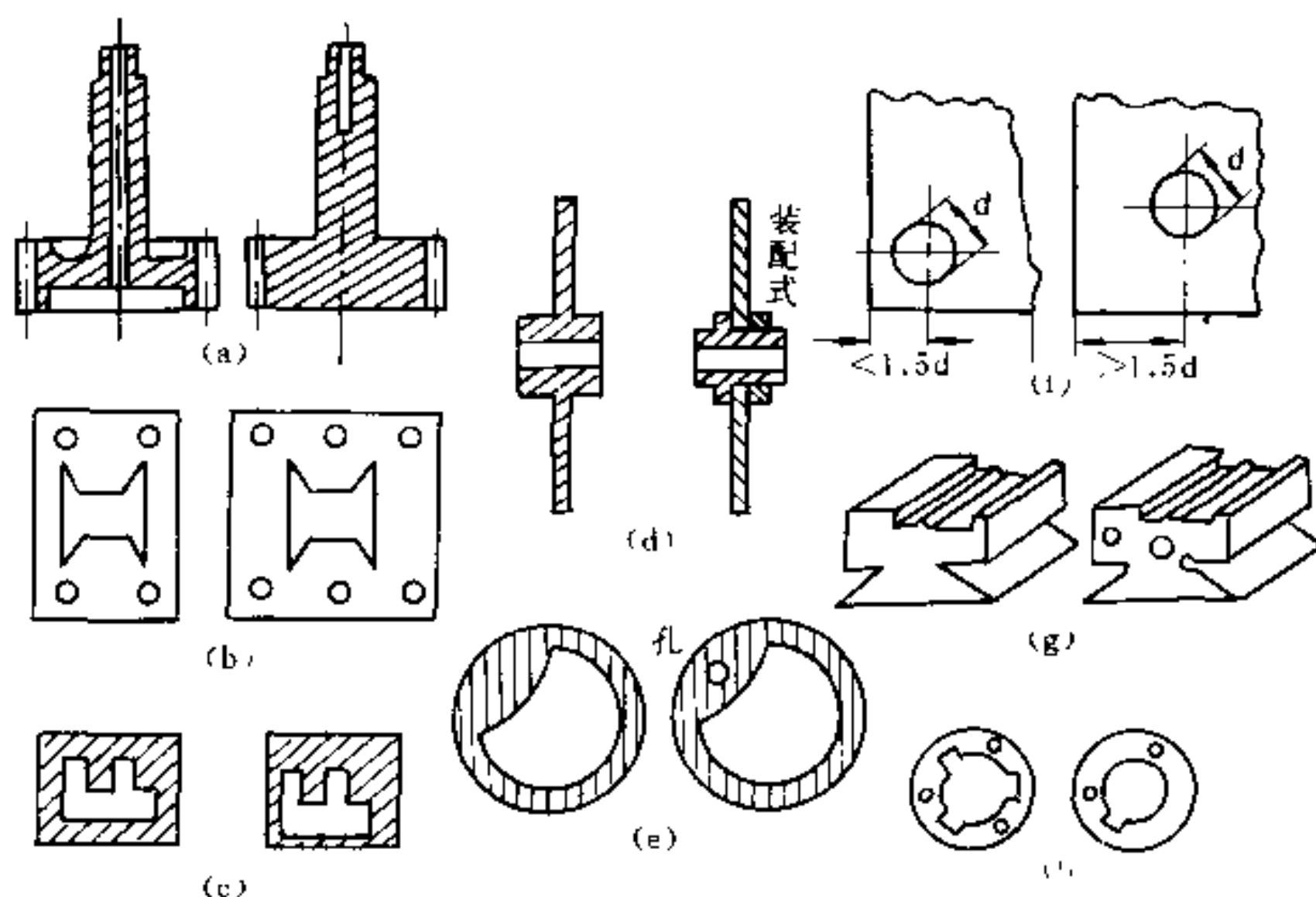


图 3-41 合理与不合理的设计示意图

因为油比水的冷却能力小得多,所以零件淬火变形及淬裂的危险性小。有时一些形状复杂的零件,虽然碳钢就可以满足力学性能的要求,但为了容易淬火,不致淬出裂纹和减小变形,也常采用以油淬火的合金钢制造。

第六节 钢的回火

淬火后的钢在临界温度以下加热的热处理操作叫回火。回火有两个显著特点,一是加热温度必须在临界温度以下(上述淬火、退火、正火是在临界温度以上);二是回火在淬火后进行,也就是说回火是一个从属于淬火的操作,有了淬火才有回火。淬火后的钢一般必须进行回火。

一、回火目的

钢件淬火后,在硬度、强度提高的同时,其韧性却大为降低,并且还存在很大的内应力(残余应力),使用中很容易破断损坏。为了提高钢的韧性,消除或减小钢的残余内应力,必须进行回火。此外淬火组织处于亚稳定(即不够稳定)状态,它有向较稳定组织进行转变的自发趋势,这将影响着零件的尺寸精度及性能稳定,因此淬火后要进行适当的回火处理,以稳定组织,进而稳定零件尺寸。回火工艺看起来很简单,是热处理的最后工序,但它决定着钢的使用性能,所以是一个很重要的热处理工序。

二、回火对钢性能的影响

图 3-42、3-43、3-44 为各种不同温度回火后钢的性能变化。

从图 3-42 可以看出,回火温度低于 200℃ 时,淬火钢的硬度降低不多。但从 200℃ 开始,随着回火温度的升高,硬度将有明显的下降。

钢的韧性,随回火温度的升高而提高。尤其 400℃ 以后韧性升高速度大为增加,650℃ 左右达最大值。见图 3-43。

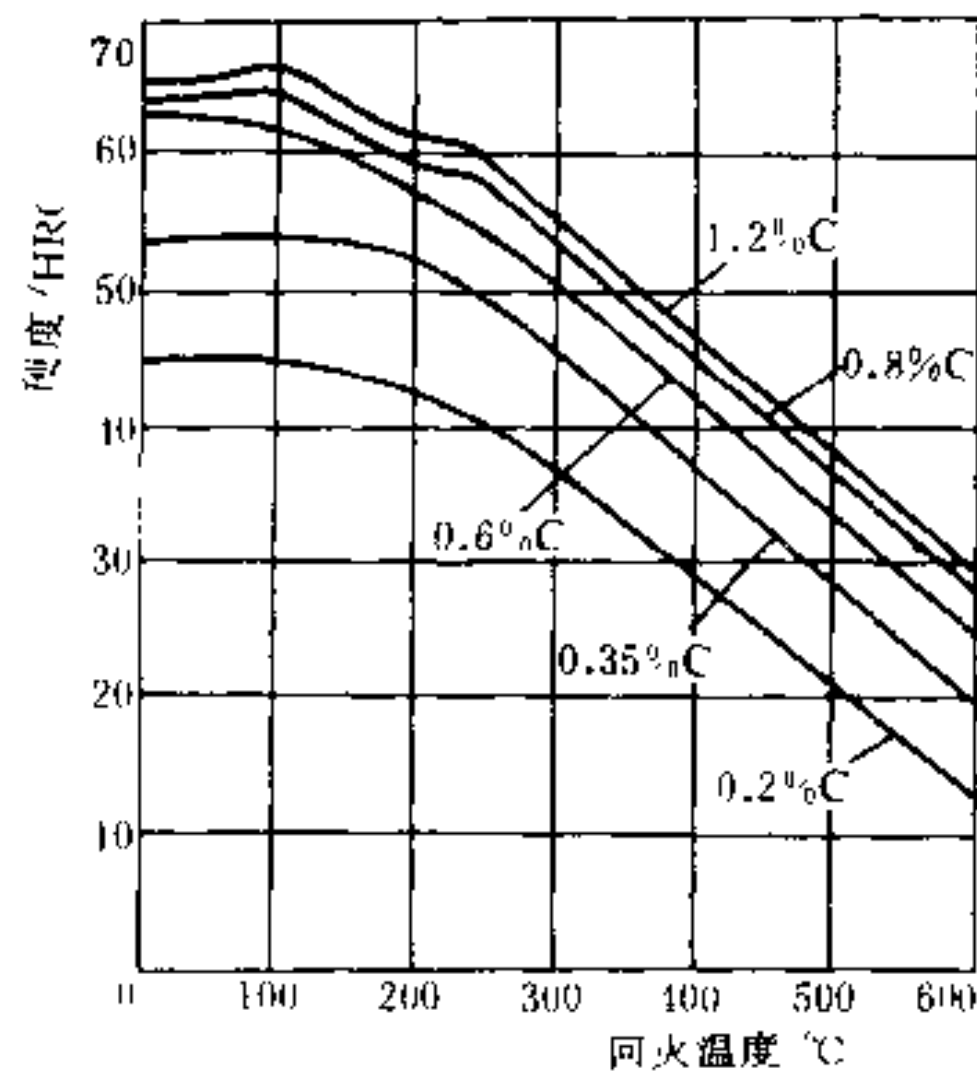


图 3-42 碳钢的硬度与回火温度的关系

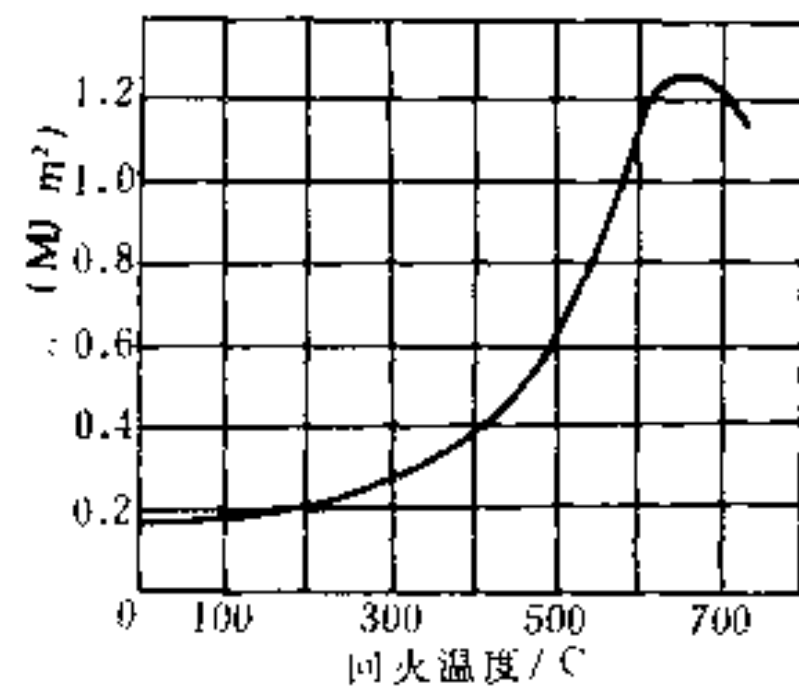


图 3-43 0.4% C 碳钢的冲击韧性随回火温度的关系

图 3-44 是退火、淬火及淬火+回火后,40 钢性能的对比。由图可见,40 钢在淬火后,硬度高,强度高,但其塑性(δ, ψ)很低。退火后具有较高的塑性,但强度较低。而淬火+回火后的性能,则随回火温度的升高,其强度、硬度降低,而塑性升高。

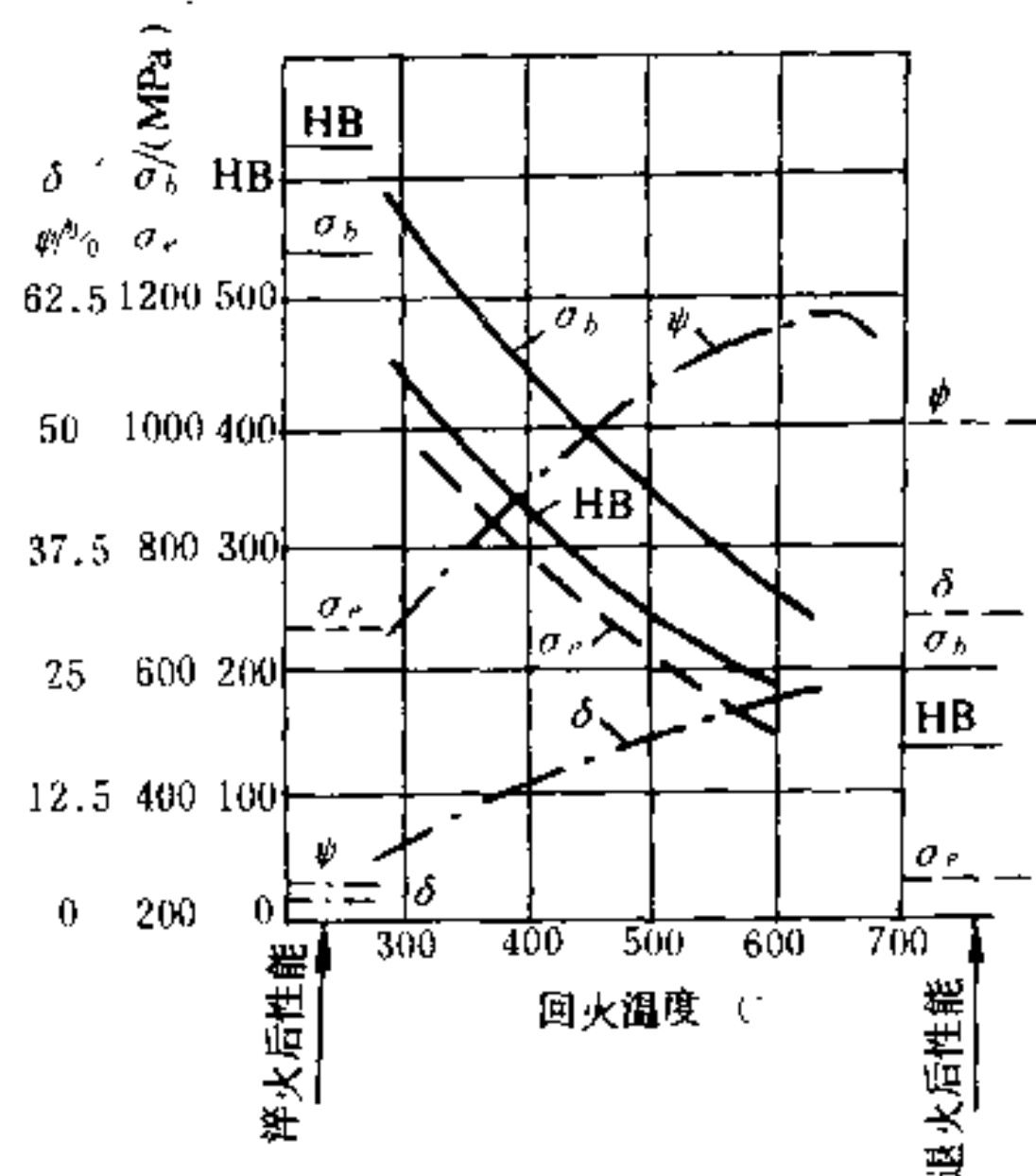


图 3-44 淬火、退火及淬火回火后 40 钢的性能对比

三、回火时钢的组织变化

淬火钢在回火时力学性能的变化,是因其内部组织发生了变化的结果。

淬火组织主要是马氏体,而马氏体是碳在 α -Fe中的过饱和固溶体。因碳呈过饱和状态,所以就始终存在着从其中分解析出的趋势。这就是回火发生组织变化的内因和根据。在常温下,虽然过饱和的碳有分解出来的趋势,但因温度低,原子活动能力小,分解析出过程就无法进行。可是,一旦淬火钢重新加热(回火),原子活动能力增加,碳原子分解出来的趋势就可变成现实(不过实际上从马氏体中分解出来的不是纯碳,而是含碳6.67%的渗碳体),所以回火时的加热是外因,是造成组织转变的条件,它是通过淬火钢的组织本来就不够稳定的内因才起作用的。

在过饱和的 α -Fe(马氏体)把渗碳体分解出来的过程中,马氏体的含碳量要随着回火温度升高而逐渐减小,最后(高于350℃) α -Fe含碳量不再过饱和而成为一般的铁素体。所以说马氏体加热后,最终又变为铁素体和渗碳体的混合物,如图3-45所示。

当渗碳体从马氏体中析出时,钢的硬度降低而韧性增加。回火温度进一步升高,已析出的极微小的渗碳体将逐渐聚集成较大的颗粒。加热温度愈高,这种聚集作用愈大,钢的硬度也就降低得愈多,韧性增加的也愈多。如果回火温度过高,渗碳体颗粒聚集的太大时,不仅硬度和强度降低而且韧性也下降,所以一般回火不超过650℃。

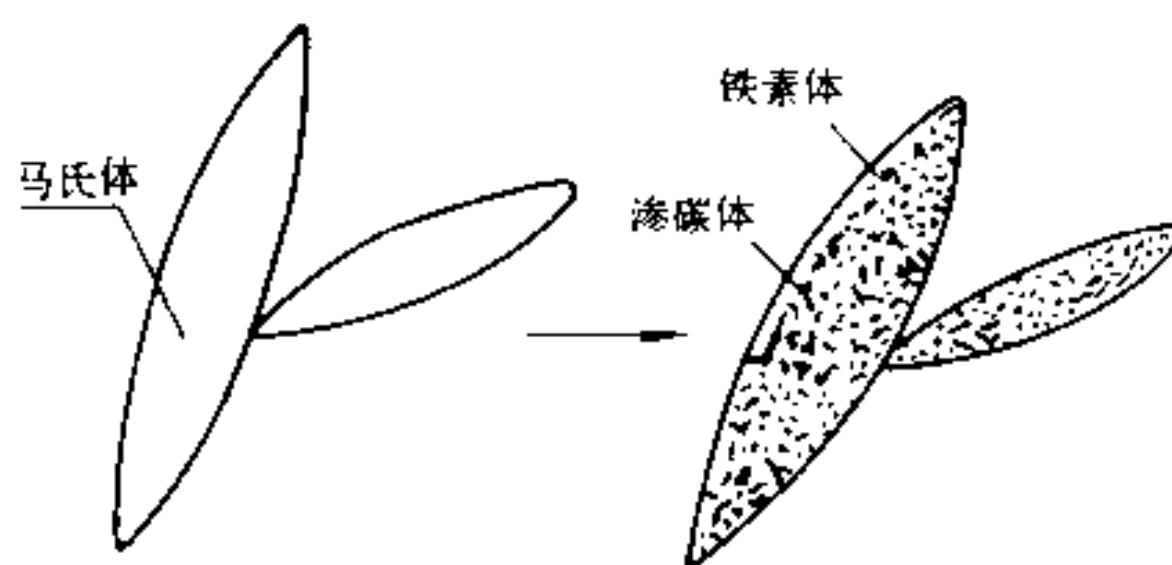


图3-45 回火时马氏体分解示意图

马氏体回火时,总的组织变化是碳化物的析出和聚集长大,但回火温度不同,析出和聚集的程度也不同。我们把低温回火(150~250℃)所得到的组织称为回火马氏体,其特征是在马氏体中分布着极细小的碳化物微粒,这时 α -Fe中的碳仍处于过饱和状态。中温回火(350~500℃)所得到的组织称为回火屈氏体,其特征是在铁素体基体上(α -Fe不再过饱和)弥散分布着极细小的颗粒状渗碳体。高温回火(500~650℃)所得到的组织称为回火索氏体,其特征是在铁素体基体上均匀分布着细粒状渗碳体(比回火屈氏体颗粒粗)。由于回火屈氏体、索氏体的组织形态与从奥氏体直接转变而得到的屈氏体、索氏体(层片状组织)完全不同,因此其力学性能也有差异。在硬度相同的情况下,回火屈氏体和回火索氏体的塑性和韧性要优于一般的屈氏体和索氏体。

四、回火温度

回火温度不能超过临界温度(727℃)。如果超过此温度,钢就转变为奥氏体,再继之以快冷,就是淬火;慢冷就是退火。这就不是回火处理了。

回火温度不仅不能超过临界温度,而且也不应超过650℃。从图3-43和图3-44中可清楚地看到,回火温度如果超过650℃,不但钢的硬度和强度继续下降,而且韧性和塑性也要下降。

回火温度要根据零件使用条件和对性能的要求来决定。因为回火时,硬度(包括强度)和韧性(包括塑性)的变化是互相矛盾的。回火温度低,钢的硬度高,但韧性低;回火温度高,钢的韧性高,但硬度低。当然如果能使零件或工具同时具有高硬度和高韧性最好,但这是无法达到的。所以我们只能根据零件(或工具)使用中的主要矛盾来选择合适的回火温度。例如:对切削工具来说,主要矛盾是硬度,如果硬度低,就根本无法切削其它材料,因而只能采用较低的回火温度,使其具备较高的硬度;而许多受冲击载荷的零件,为了使它具备较高的韧性,

就只能牺牲一些强度而采用较高的温度回火。

常用的钢材,经淬火及各种温度回火后的硬度可从附录 2 中查到。

为了使工件烧透,并保证组织充分转变和消除内应力,需要一定的回火时间。可根据工件大小、装炉量多少以及回火温度高低不同,来决定回火时间长短,一般为 1~3 小时。

在生产中,由于对钢件性能的要求不同,回火可分为下列三类:

1. 低温回火

低温回火一般为 150~200℃,有时可达 250℃,钢的组织为回火马氏体。这种回火可以使钢件淬火残余内应力得到部分消除,能使韧性提高一些,并仍保持很高的硬度。低温回火用于要求高硬度和高耐磨性的工具和工件,像各种刀具和量具等(例如锯条、铰刀等)。高碳钢工具低温回火后,硬度一般在 HRC58~65 范围内。

2. 中温回火

回火温度为 350~500℃,钢的组织为回火屈氏体。中温回火能使钢件具有较高的弹性极限,并且有一定的韧性,适用于各种弹簧、发条以及热锻模的热处理。弹簧和热锻模经中温回火后的硬度约在 HRC35~45 范围内。

从图 3-44 可以看出,与退火比较,淬火后弹性极限有很大提高,但其塑性(以及韧性)较低。经中温回火后,塑性升高的同时,弹性极限也提高了。这就是弹簧必须淬火并中温回火的原因。

3. 高温回火

回火温度为 500~650℃,钢的组织为回火索氏体。高温回火可以大大提高钢的韧性,其强度比低温及中温回火要相对的降低,但比没有经过淬火+高温回火的钢要高。这就是说,高温回火可以获得高韧性与较高强度的优良综合力学性能,故一般都将淬火与高温回火相结合的热处理叫“调质处理”。调质后(中碳钢)硬度为 HRC25~35。

调质处理广泛用于各种重要的结构零件,如轴、连杆等。

与正火相比,正火组织是层片状的(片状铁素体与渗碳体交错形成),而调质后组织是粒状的,即细小的渗碳体颗粒均匀分布在铁素体上,这种粒状的组织使调质处理后的钢具有较高的综合力学性能。

因为正火是一个比调质要省事得多的热处理方法,所以性能要求不高的一些碳钢零件,有时可用正火代替调质,但重要的零件尤其是合金钢零件必须经过调质处理,才能使钢材的优良性能表现出来。

第七节 钢的表面淬火

在机械制造业中,有许多零件,如齿轮、凸轮、曲轴及销子等,是在动力负荷(受冲击)及摩擦的条件下工作的,因而要求这些零件韧性高,又耐磨。我们知道零件硬度高,耐磨性也高;但硬度高,韧性就要降低。为使工件能在高韧性的情况下而又耐磨,就必须使零件表面硬度高,而心部韧性高,为此,则有两种办法:一是化学热处理(改变钢的表面成分,达到表面耐磨的目的);二是表面淬火。

所谓表面淬火,顾名思义就是说仅把零件需耐磨的表层淬硬,而中心仍保持未淬火的高韧性状态。表面淬火必须用高速加热法使零件表面层很快地达到淬火温度,而不等其热量传

至内部,立即迅速冷却使表面层淬硬。

表面淬火零件所用的钢材一般是中碳(0.35%C)以上的钢,常用40、45钢或中碳合金钢40Cr等。

根据加热方法不同,目前常用的方法有火焰加热表面淬火及感应加热表面淬火两种,其中感应加热表面淬火应用最为广泛。另外,能量高度集中的激光和电子束加热,用于局部选择性表面淬火可大大提高耐磨性。

一、火焰加热表面淬火

用高温的氧—乙炔火焰或氧与其它可燃气体(煤气、天然气等)的火焰,将零件表面迅速加热到淬火温度,然后立即喷水冷却。

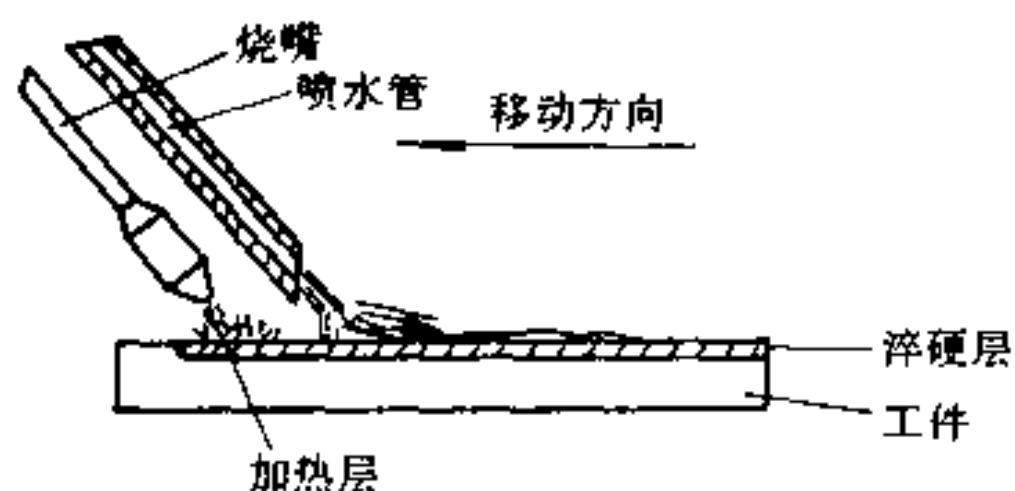


图 3-46 火焰加热表面淬火示意图

火焰淬火如图 3-46 所示。淬火喷嘴以一定速度沿工件表面移动,并将表面层加热到淬火温度,一个喷水设备紧跟火焰喷嘴后面,将被加热的表面迅速冷却淬硬。

此法的优点是淬火方法简单,不需特殊设备,故适用于单件或小批量零件的淬火。但由于其加热温度不易控制、工件表面易过热、淬火质量不够稳定等因素,限制了它在机械制造业中的

广泛应用。

二、感应加热表面淬火

这是利用感应电流,使钢表面迅速加热而后淬火的一种方法。因此法具有效率高、工艺易于操作和控制等优点,所以目前在机床、机车、拖拉机以及矿山机器等机械制造业中得到了广泛的应用。常用的有高频感应加热和中频感应加热两种方式。

1. 感应加热原理

若金属置于通有交流电的线圈里,则该金属内将被感应而产生电流。感应电流的方向在任何时候都与感应线圈中原电流的方向相反,因此金属中感应电流的频率与线圈中原电流的频率相等。

当直流电通入导体时,电流是均匀分布在导体的整个截面上;若是交流电,则电流主要是沿导体表面层通过,频率越高,电流分布就越集中在表面。这种现象称为电流的“表面效应”或“集肤效应”。

感应加热就是利用电流的表而效应来实现的。把淬火的零件放在特制的感应圈内(如图 3-47),和感应圈紧邻的表面部分被感应产生电流,电流在工件内通过就会产生热量

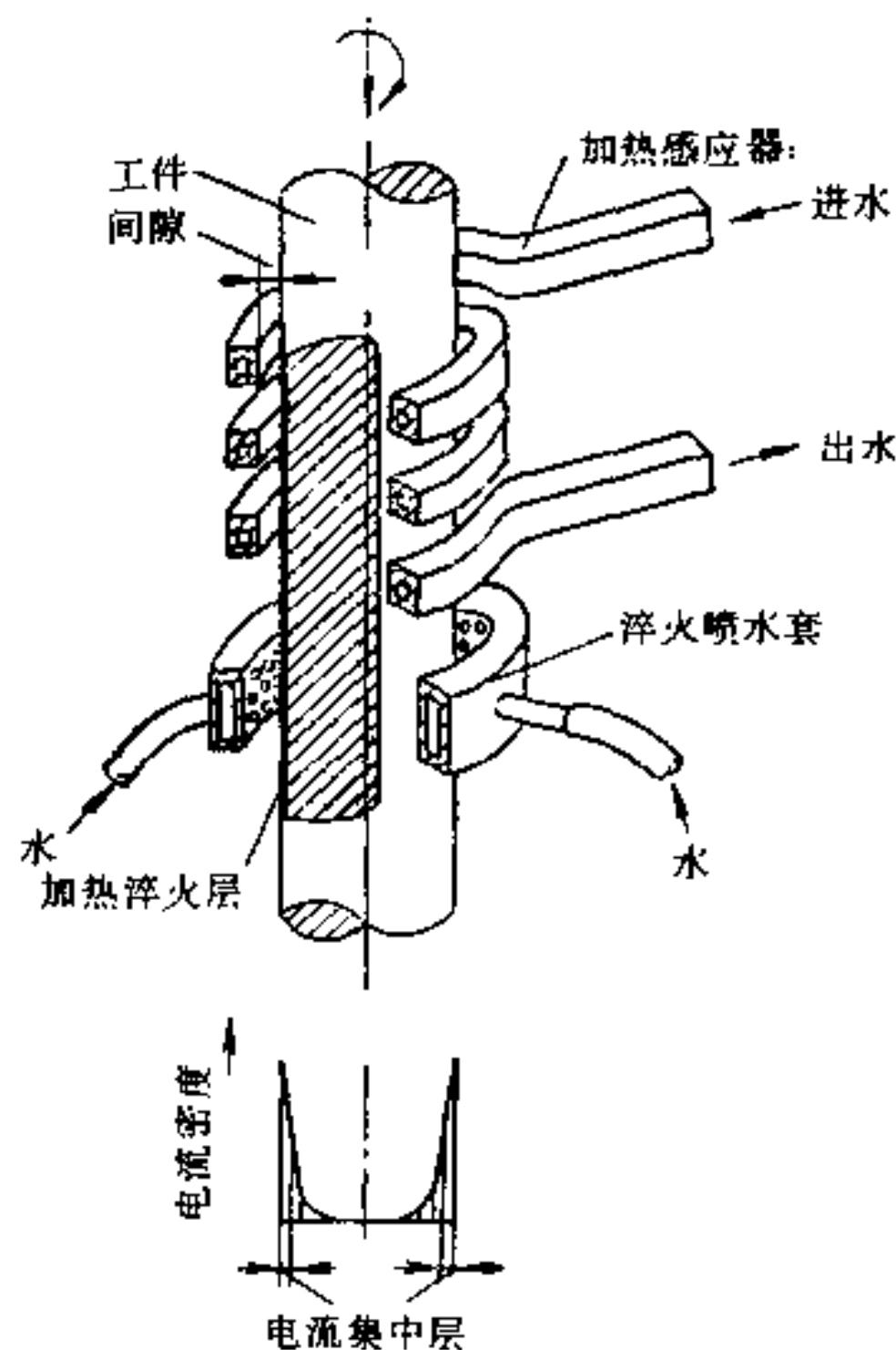


图 3-47 感应加热表面淬火示意图

(电阻热)而把零件表面迅速加热至高温。

感应电流透入工件表面越深,加热淬火层就越厚。电流透入的深度除了与工件材料的电磁性能(电阻系数与透磁率)有关外,主要决定于电流频率。频率愈高,电流透入深度愈浅,加热淬火层也就愈薄。

目前国产的高频加热设备一般采用的频率为 250 kHz,功率为 8 kW、30 kW、60 kW、100 kW 等,其淬硬层深度约为 0.5~2 mm。如果要求淬硬层深度大于 2 mm 时,可采用超音频(30000 Hz)附加设备,或采用中频加热设备(2500~8000 Hz)加热工件。处理要求 10~15 mm 以上淬硬层的工件可以采用频率为 50 Hz 的工频加热设备加热。

2. 高频淬火工艺

状态图中的组织转变温度均是在零件极其缓慢冷却或加热的条件下得来的。钢在缓慢加热中,珠光体应在 727℃变为奥氏体。但高频淬火快速加热时,组织转变的温度就会升高。加热速度越快,转变温度升高的也越多。因而高频淬火比普通淬火加热温度要高一些。通常的情况约需高 80℃左右。

高频淬火大都用喷水冷却,因喷油有燃烧的危险,故不易采用。对于水淬易形成裂纹的合金钢零件,用浓度为 0.05%~0.17%的聚乙烯醇水溶液冷却效果较好。当零件冷至马氏体形成温度容易产生裂纹的时候,这种淬火剂可以在工件上形成一层塑料薄膜,大大降低其冷却速度,从而防止了裂纹的产生。当然,这种淬火剂也有冷却不稳定,易使零件产生软点和生锈等缺点,有待进一步研究和改进。高频淬火后,也必须进行回火处理,提高其韧性,降低淬火残余应力,通常都采用 160~200℃的低温回火。

高频淬火还可采用自身回火方法进行回火。淬火过程中,当工件表面层已冷至马氏体转变温度以下而中心仍有较高温度时,停止冷却。利用工件内部的残余热量,迅速使表面温度回升,达到回火的目的。

3. 高频淬火后的性能

同样成分的钢,经高频淬火后其硬度比普通淬火要高 2~3 HRC。其原因尚不清楚,有人认为是高频淬火后马氏体组织特别细小的缘故;有人认为是淬火层存在着很大的残余压应力所致。

表面淬火后,可使工件表面层产生残余压应力。表面拉应力使零件疲劳强度降低,表面压应力则使疲劳强度提高。所以表面淬火在增加零件耐磨性的同时,可使其疲劳强度增加。但应注意,零件进行局部高频淬火时,淬火与未淬火的交界处存在着很大的残余拉应力,而使该处疲劳强度大大降低。因而应避免交界处成为零件受力最大的地方。如某厂经高频淬火处理的手扶拖拉机花键轴,在使用中常常在淬火与未淬火的交界处折断。若在交界处喷丸或滚压,则可减小该处的表面拉应力,使疲劳强度得到改善。

4. 高频淬火的优缺点

高频淬火主要有下列优点:① 加热速度快,生产率高(小零件几秒钟一个);② 因加热快,工件几乎不发生氧化和脱碳;③ 因仅表面加热,所以淬火变形小;④ 淬火后的力学性能(硬度、疲劳强度等)较高;⑤ 操作易于自动化,便于放在机械加工流水线上等等。由于这些优点,高频淬火在生产上得到愈来愈广的应用。

但高频淬火还有下列缺点:① 不同的零件需要使用不同的感应圈,因而不适于单件生产和修配厂使用;② 形状复杂的工件淬火工艺较难实施,所以高频淬火仅限于用在形状较

简单的工件上。

三、高能密束表面淬火

利用激光束、电子束等高能密束对工件进行表面淬火是最近发展起来的新技术,它是将激光束或电子束照射到工件表面,产生的功率密度比常规方法高 3~4 个数量级,这些高能密束轰击工件表面、把大部分能量转换成热量而使工件表面迅速加热至钢的临界点以上。由于加热时间很短,热来不及传递到工件内部,切断射束后,工件表面自冷淬火。淬硬层可达 0.2~2.5 mm,一般认为 0.75~1.0 mm 范围较好。

高能密束表面淬火比常规淬火、感应加热表面淬火具有更高的硬度和耐磨性,淬火后变形小、工件表面清洁,无环境污染,并具有较高的灵活性和重复性。但其设备价格昂贵,工业性生产经验还较少。

高能密束表面热处理主要用于常规表面淬火方法难以处理、形状复杂以及要求变形很小的零件的局部淬火,如拐角、沟槽、盲孔底部、深孔内壁等。

采用激光束、电子束等高能密束还可以对零件表面进行局部合金化。进行表面合金化需要比表面淬火更高的功率密度,用足够功能的高能密束可使工件表面温度超过熔点,获得很薄的熔化层,使事先涂覆在工件表面上的合金元素与工件表层金属熔合,实现合金化,以提高零件表面的耐磨性及抗擦伤、抗咬合、耐热、耐腐蚀等方面的性能。

第八节 钢的化学热处理

钢的化学热处理是将金属或合金工件置于一定温度的活性介质中保温,使一种或几种元素渗入它的表层,以改变其化学成分、组织和性能的热处理工艺。

化学热处理的方法很多,已用于生产的有渗碳、渗氮、碳氮共渗(提高零件的表面硬度、增加耐磨性和疲劳强度等)以及渗金属等,如渗铝(耐热、抗氧化性)、渗铬(耐蚀、耐磨)、渗钒(抗磨、抗咬合擦伤)、渗硅(耐蚀)、渗硼(高耐磨性)、渗硫(减摩性)、磷化(减摩、防锈)、发兰(防锈)等等,但当前工业中应用较为普遍而重要的化学热处理是渗碳、渗氮和碳氮共渗三种。其中渗碳无论大小工厂都广为应用,所以我们着重讨论渗碳,并对渗氮、碳氮共渗和渗硼作适当的介绍。

一、钢的渗碳

渗碳是把低碳钢的零件放在可以供给碳原子的物质中加热,使其表面变成高碳钢,心部仍是低碳钢、再经淬火后,可以达到表面高硬度、高耐磨性而心部又具有高韧性的目的。渗碳多用于动负荷(受冲击)条件下表面受摩擦的零件,如轴、齿轮等。

1. 渗碳方法

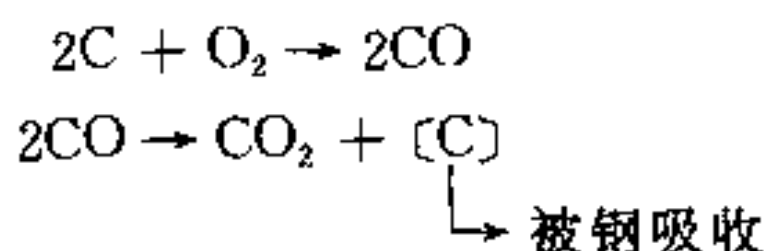
渗碳方法按渗碳介质不同可分为固体、液体和气体渗碳三种,常用的是固体渗碳法和气体渗碳法。

(1) 固体渗碳

固体渗碳就是把工件埋在用铁箱封闭起来的渗碳剂中,然后加热到高温(900~950℃)保持一定时间,使碳渗入钢件表层。

固体渗碳剂一般是由可产生碳原子的物质(木炭)和催渗剂(Na_2CO_3 、 BaCO_3 等)组成,其中催渗剂占 10%~15%左右。

在高温下,渗碳箱中的木炭由于空气不足与氧形成一氧化碳,所产生的一氧化碳与零件接触时就分解出活性碳原子而渗入钢中,其反应为



渗碳剂中的碳酸盐,可以使CO浓度增加,加速渗碳的进行。

渗碳温度一般为900~950℃。渗碳时间按照零件对渗碳层的厚度要求(一般在0.5~2 mm之间)来确定,大致可按每小时得到0.1 mm的渗碳层计算。渗碳时间到达后,把渗碳箱从炉中取出,放在空气中冷却。渗碳后零件最表面含碳约为1.0%~1.2%,内层碳量逐渐降低。

固体渗碳是最早采用的化学热处理方法,因它具有设备简单,操作容易等优点,目前不少中、小型工厂仍在使用。

(2) 气体渗碳

因固体渗碳有许多缺点,如渗碳时间较长、生产率低、劳动条件差以及碳浓度(渗碳层含碳量)不易控制等,所以它愈来愈多的被先进的气体渗碳所代替。尤其在大型工厂,固体渗碳几乎已被淘汰。我国的煤矿机械制造厂目前也多用气体渗碳。

气体渗碳是把工件装入密封的高温炉中,并通入渗碳气体来进行的。如图3-48所示。

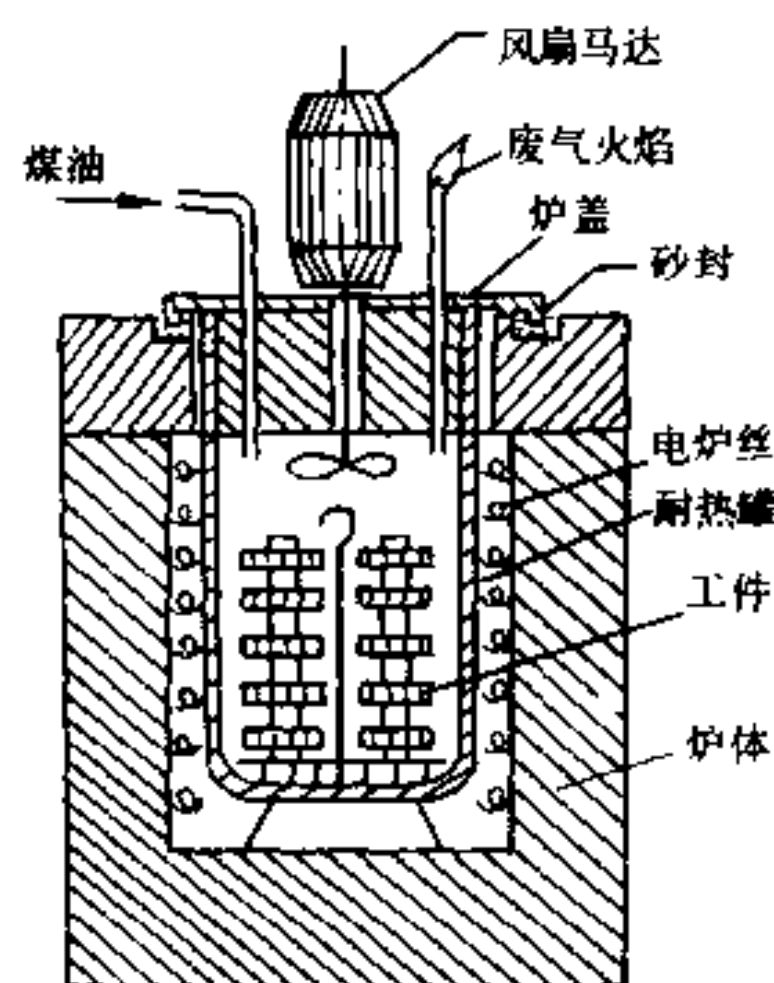


图 3-48 气体渗碳示意图

气体渗碳有两种方法,一种是直接往炉中通入可以渗碳的气体,如经过裂解处理的天然气和液化石油气(丙、丁烷);另一种是往炉中滴入煤油(或苯等),在高温的作用下使之分解成可渗碳的CO气体及甲烷等碳氢化合物。后一种直接往渗碳炉中加煤油等液体物质的方法比较简单,所以在一般中小工厂应用较多。

气体渗碳的温度一般是900~930℃。渗碳时间随渗碳层的深度要求而定。用煤油作渗碳剂时,每小时约可渗0.2 mm左右。

渗碳层的碳浓度对零件使用性能有很大影响,一般情况,其含碳量在0.8%~1.0%左右较好。过去,对零件渗碳层的碳浓度不够重视,图纸上也仅规定对渗碳层深度的要求。近年来,我国许多工厂对控制渗碳层碳浓度作了大量的工作,这对保证产品质量是很重要的,它已逐步

在生产上应用和推广。

气体渗碳除了可以控制渗碳层含碳量,提高零件渗碳质量外,还有以下的主要优点:渗碳速度快、工艺过程易于实现机械化和自动化、生产率高、劳动条件好、渗碳后可直接淬火(固体渗碳一般必须重新加热淬火)省去重复加热的工序,从而可减小零件变形。因此气体渗碳应用愈来愈广。

气体渗碳与固体渗碳相比,它需要添置专用的渗碳设备。

2. 渗碳层深度

增加渗碳层深度,可提高钢的抗弯强度、耐磨性以及疲劳强度。但事物都有个“度”,超过

了就会走向反面。渗碳也是一样,过深的渗碳层,不仅使渗碳时间长和热处理费用增加,而且又使其性能降低。因而设计零件时要选定合理的渗碳深度。

渗碳层深度通常根据零件的工作条件及尺寸来决定,一般机器零件渗碳层深度大都在0.5~2.0 mm之间,例如:

小齿轮及小轴等渗碳层深度为0.5~0.8 mm;

大齿轮及大轴等渗碳层深度为1.2~1.8 mm;

汽缸、活塞销等渗碳层深度为0.9~1.3 mm;

凸轮轴及球关节等渗碳层深度为1.5~2.0 mm。

3. 渗碳钢的含碳量

人们一直认为用于渗碳的钢材含碳量不应超过0.2%,否则零件的韧性就不能保证。但在二次世界大战中发现有的国家坦克零件的渗碳齿轮,心部含碳量超过这种限制,而达到0.3%。经过试验看出,适当的提高渗碳钢心部的含碳量不仅可以减小渗碳层的厚度,缩短渗碳时间,而且还可以提高其抗弯强度。在零件的渗碳层不是太厚时,基本上也不降低其冲击韧性(α_k)。所以从提高零件力学性能出发,把渗碳钢含碳量提高到0.2%~0.3%更好些。例如采煤机上的大模数渗碳齿轮,因其受力较大,也可用含碳量为0.24%~0.32%的铬锰钛渗碳钢制造。

渗碳钢含碳量增加,虽然对零件的力学性能提高有利,但同时给制造工艺带来了新的问题,例如淬火后机械加工就比较困难。因为零件经渗碳淬火后,变形是不可避免的,为了保证精度,零件某些部位,如齿轮上的键槽往往在渗碳淬火后再加工出来。如果是含碳较低的钢,淬火后还可以进行切削加工,但含碳量接近0.3%时,加工就较为困难了。

4. 渗碳后的热处理

渗碳仅能使零件表层变为高碳钢,如不进行热处理,其硬度和耐磨性还是很低的。因此渗碳后还必须进行淬火和150~200℃的低温回火,使其表面硬度达到HRC58~62。

渗碳后常用的热处理方法有下列两种:

(1) 直接淬火法

渗碳后直接淬入冷却液中,其工艺过程如图3-49所示。

这种方法的优点是缩短了零件的生产周期、降低成本、并因省去了重复加热的操作,零件变形较小。但渗碳过程中,因钢件在高温(900~950℃)长时间停留晶粒长大,会降低零件的韧性。不过对晶粒不易长大的“本质细晶粒钢”来说,采用直接淬火是合适的。一些合金钢零件气体渗碳时,常采用这种方法。

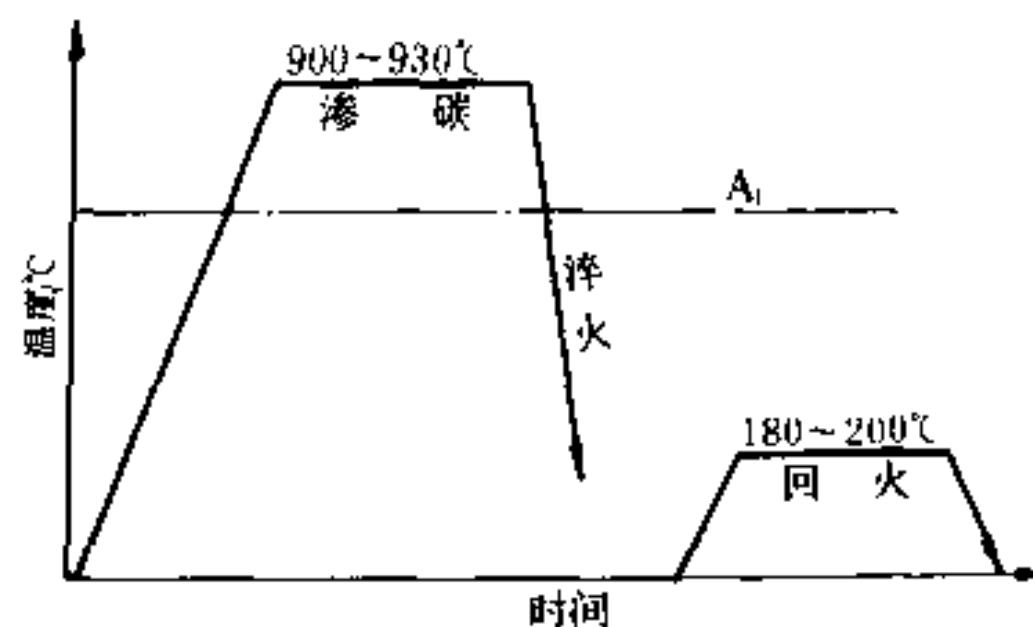


图 3-49 直接淬火工艺示意图

(2) 一次淬火法

渗碳后,空冷至室温,再重新加热淬火,如图3-50所示。

这种淬火方法可以使渗碳过程中长大的晶粒细化,提高零件的力学性能。比较重要的零件多用此法。目前,一次淬火是应用最普遍的方法。

此外还有二次淬火法,即渗碳后再淬火两次(加热温度不同)。虽然此法能使零件获得较

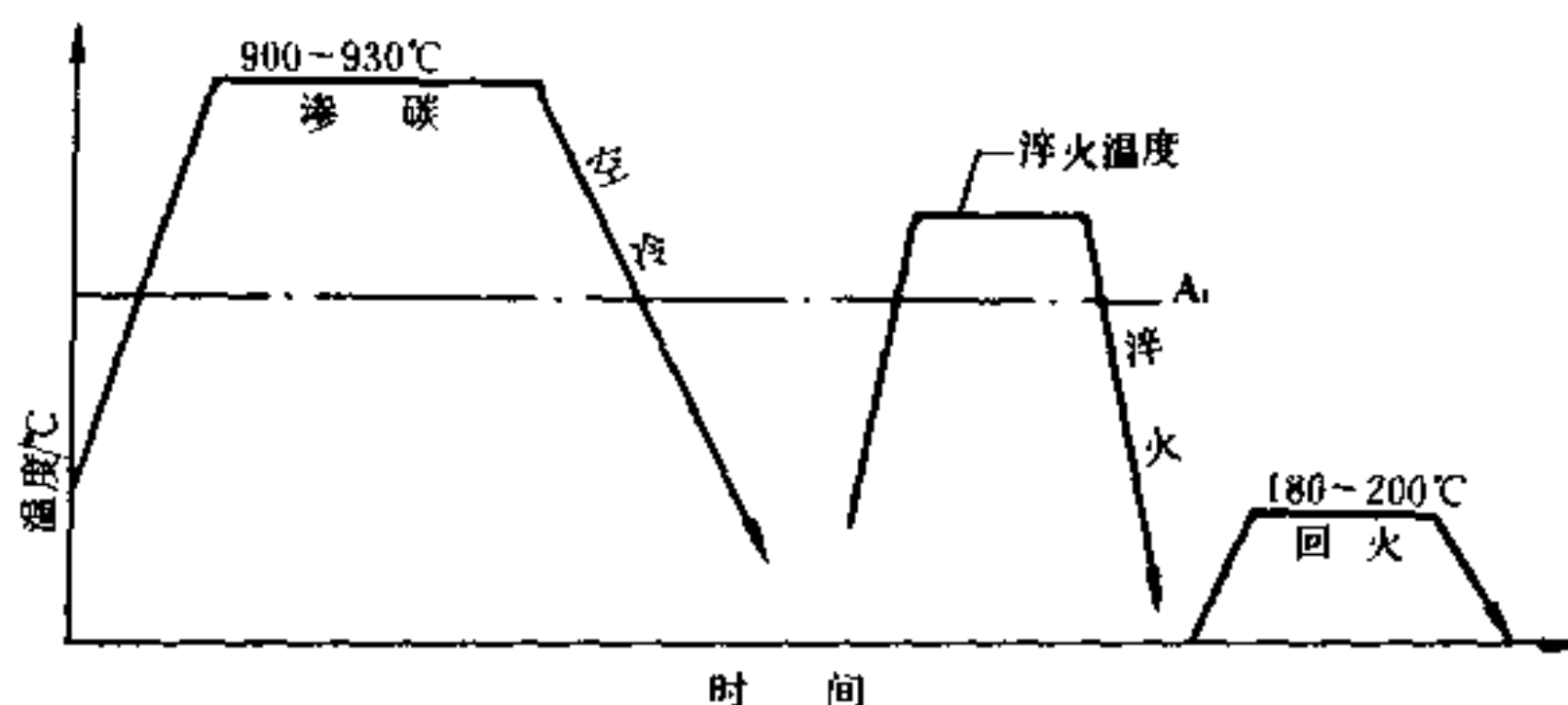


图 3-50 渗碳后一次淬火工艺示意图

好的力学性能,但它不仅延长了零件的生产周期,而且因多次加热和冷却,使零件变形较大,所以这种方法应用很少。

5. 渗碳与表面淬火的比较

渗碳和表面淬火均能使零件达到既耐磨同时韧性又高的目的。那么,在我们工作中,如何选用它们,就要根据其具体条件和对它们各自的优缺点加以比较来决定。

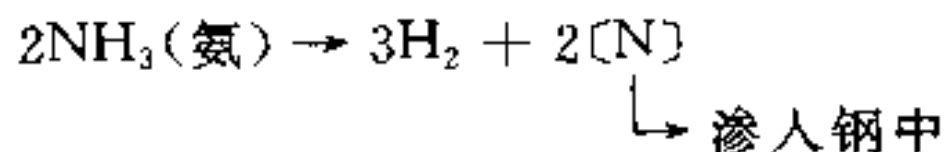
与表面淬火比较,渗碳处理除了力学性能较高(表面硬度较高,耐磨性较高,疲劳强度较高)以外,零件外形对渗碳工艺影响不大,形状非常复杂的零件仍可以照样进行渗碳处理。而表面淬火则不然,形状稍微复杂的零件就很难甚至无法进行处理。因而有些零件虽然用表面淬火法完全可达到使用要求,但因工艺上不易实现,还必须采用渗碳处理。渗碳最大的缺点是工艺过程较长,生产率低,成本高。

二、渗氮

把氮原子渗入钢件表面的过程叫渗氮。渗氮后可以显著的提高零件表面硬度和耐磨性,并能提高其疲劳强度和耐蚀性。

1. 气体渗氮

气体渗氮就是把零件放在通有氮气的密封罐中加热,使氮气分解出氮原子而被工件表面吸收



与渗碳不同,渗氮是在钢的临界温度以下进行的,加热温度通常是 550°C 左右。渗氮以后表面硬度最高可达 HRC65~70,所以耐磨性很高。但是它的硬度不是靠淬火得来的,而是在渗氮过程中,氮原子与钢中的合金元素形成了硬度极高而又极细微的氮化物,使其表层强化。渗氮需要专用的渗氮钢,最常用的钢种是 38CrMoAlA(含碳 0.38% 并含有 Cr、Mo 和 Al 的钢)。

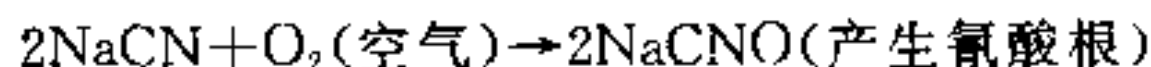
渗氮零件的优点除了硬度高、耐磨性好以外,因渗氮温度低且渗氮后不需再进行热处理,所以零件变形小。其缺点是,渗氮速度慢,工艺过程长(一般需 20~50 小时,50 小时渗氮层深也只有 0.5 mm 左右),需要专用渗氮钢和专用渗氮设备。由于这些缺点的存在,限制了它的使用范围,目前一般只用于要求高耐磨性、高精度的零件,如高精度镗床、磨床主轴等。

2. 软氮化(又称氮碳共渗,以渗氮为主)

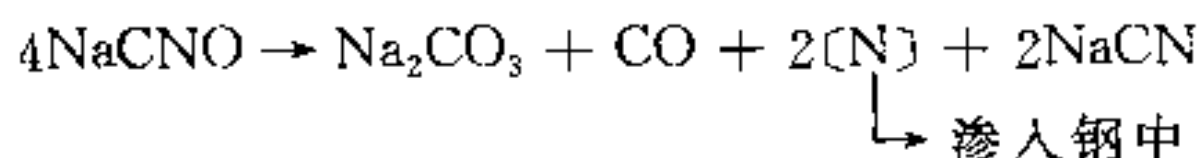
软氮化是在钢件表面渗入氮原子的同时还有少量的碳原子渗入。软氮化与上述一般气体渗氮相比,虽然硬度较低,但脆性较小且具有很好的耐磨性和耐蚀性,并可显著提高钢件的疲劳强度。例如 15 钢软氮化后疲劳强度可提高一倍左右。

另外,软氮化不需要专用的氮化用钢,而且氮化时间也大为缩短,通常只需 1~2 小时。

最初,软氮化是在氰化钾(KCN)与氰化钠(NaCN)混合熔化的盐槽中进行,温度为 520~580℃。氮化时将干燥空气通入盐槽,加速氰盐变为氰酸根。



氰酸根分解产生活性氮原子而被钢件吸收



因氰盐是剧毒物质,这就限制了直接用氰盐作原料的软氮化法的使用和推广。

尿素是价格便宜的原料,它与碳酸钾或碳酸钠一起加热时可产生能够进行氮化的无毒氰酸钾或氰酸钠。我国已研制成功以尿素为主要原料的无毒(严格讲是低毒)液体软氮化渗剂,在使用过程中,盐浴内的毒性氰根含量已达到甚至低于国外专利产品的标准(如世界有名的 Degussa 公司的 Tufftride 氮化盐)。

软氮化也可用气体法,所用原料为含有“氮”和“碳”的气体物质或液体物质(滴入氮化炉后变为气体)。常用的原料有氨气、甲酰胺、甲醇、乙醇、尿素溶液等。

3. 离子氮化

普通氮化周期长,效率低,为了加快氮化速度,近年来国内外都进行了不少研究工作,并取得了相当大的进展。其中“离子氮化”效果最好。离子氮化是根据含氮的气体(氨气或氮气)在直流电场作用下,产生辉光放电的作用,使氮原子离子化而渗入金属表面。它的优点是处理周期短,且表面无脆化层,变形小,表面干净,现已广泛用于齿轮、枪炮管、活塞销、气门、曲轴、汽缸套等零件。

离子化学热处理,是向真空罐中通入稀薄气体,在高压电场下,引起辉光放电,使气体电离产生正离子轰击工作表面,正离子具有高动能,将工件表面加热并进行扩散渗入。这种方法,生产周期短、节省能源和气源、无污染,是一项发展很快的化学热处理工艺。离子氮化是离子化学热处理的一种,除此之外,还有离子渗碳、离子氮碳共渗等。

三、碳氮共渗

碳氮共渗是碳、氮原子同时渗入工件表面的一种化学热处理工艺(以渗碳为主)。目前生产中应用较广的是气体碳氮共渗法,其主要目的是提高钢的疲劳强度和表面硬度与耐磨性。

气体碳氮共渗的介质实际上就是渗碳和渗氮用的混合气体。最常用的方法是向炉中同时滴煤油和通氨气。也有的工厂采用三乙醇胺、甲酰胺和甲醇+尿素等作为滴入剂进行碳氮共渗。共渗温度一般为 820~860℃。

与渗碳一样,共渗后需进行淬火及低温回火以提高表面硬度及耐磨性,但共渗温度低,晶粒不易长大,可进行直接淬火。由于氮原子的渗入,使共渗层淬透性提高,油冷即可淬硬,从而减少了工件的变形与开裂。共渗层比渗碳层具有较高的耐磨性、抗蚀性和疲劳强度,比渗氮层具有较高的抗压强度。目前生产中常用来处理低碳及中碳结构钢零件,如汽车和机床上的各类齿轮等。

四、渗硼

渗硼后的工件表面具有很高的硬度(1400~2000 HV)、耐磨性和良好的抗蚀性,日益受到人们的重视。

渗硼根据渗剂的不同,也可分为固体、液体和气体渗硼。

目前我国以固体渗硼应用较多,渗剂有粉末和粒状两种。常以硼铁、碳化硼为供硼剂,以氟硼酸钾、氟化物为活化剂,加入一定量的氧化铝、碳化硅做为填充剂,制成粉末或加粘结剂制成粒状。渗硼温度为 900~950℃,一般情况下,渗硼层深度为 0.05~0.15 mm 较好,过厚因脆性大,易剥落。

思考题与习题

1. 解释下列名词

(1) 过冷奥氏体、残余奥氏体、珠光体、索氏体、屈氏体、马氏体、回火马氏体、回火索氏体、回火屈氏体;

(2) 淬火临界冷却速度、淬透性、淬硬性;

(3) 再结晶、重结晶、调质处理、变质处理。

2. 何谓钢的热处理? 热处理在机械制造业中有何意义? 它可大致分为那些基本类型?

3. 何谓“滞后现象”,指出 A_1 , A_3 , A_{cm} , A_{c1} , A_{c3} , A_{cm} , A_{r1} , A_{r3} , A_{cm} 各临界点的意义。

4. 说明共析钢加热时奥氏体形成的几个阶段,并指出亚共析钢、过共析钢奥氏体形成的主要特点。

5. 本质细晶粒钢和本质粗晶粒钢的区别何在? 为什么需经热处理的工件多采用本质细晶粒钢? 奥氏体晶粒的大小对热处理后的组织和性能有何影响?

6. 以共析钢为例,说明将其奥氏体化后立即随炉冷却、空气中冷却、油中冷却和水中冷却,试问各会得到什么组织? 其力学性能有何差异?

7. 一组 T8 钢试样,奥氏体化后立即分别投入 690℃、650℃、450℃和 300℃的恒温槽中,长时间保温后冷却,会得到什么组织? 它们的组织形态及性能特点如何?

8. 马氏体转变有何特点? 含碳量不同时马氏体的组织形态和力学性能有哪些差别?

9. 有时为何要对钢件进行冷处理? 哪些工件需冷处理?

10. 什么叫退火? 主要目的是什么? 生产中常用的退火有哪几种?

11. 指出完全退火和球化退火的应用范围,为什么过共析钢必须采用球化退火而不能采用完全退火?

12. 确定下列钢件退火方法,并指出退火目的及退火后的组织:

(1) 经冷轧后的 15 钢钢板,要求降低硬度;

(2) ZG270—500 的铸造齿轮;

(3) 锻造过热的 60 钢锻坯;

(4) 具有片状渗碳体的 T12 钢坯。

13. 什么叫正火? 比较钢件正火和退火后组织和性能上有何差异?

14. 指出下列钢件进行正火的主要目的和正火后的组织:

(1) 20 钢齿轮;

(2) 综合力学性能要求不高的 45 钢小轴；

(3) T12 钢手工锉刀毛坯。

15. 什么叫淬火？其目的何在？淬火时加热温度如何选择，为什么？

16. 有两个 T12 钢试样，分别加热到 780℃ 和 880℃，并保温相同时间，使之达到平衡状态，然后以大于临界冷却速度的冷速冷至室温。试问：

(1) 哪种加热温度的马氏体晶粒较粗大？

(2) 哪种加热温度的马氏体含碳量较高？

(3) 哪种加热温度的残余奥氏体较多？

(4) 哪种加热温度的未溶渗碳体较少？

(5) 你认为哪种温度淬火最合适？为什么？

17. 理想淬火介质的冷却曲线应是怎样？水和油做为冷却介质各有何优缺点？

18. 常用的淬火方法有哪几种？试在 C 曲线上示意画出来。

19. 淬火应力是如何产生的，如何减小淬火时的变形？

20. 什么叫回火？其目的何在？淬火热回火时组织和性能如何变化？

21. T8 钢的 C 曲线如附图所示，若使该钢在 620℃ 等温不同的时间，按图示 1、2、3、4 线的冷却速度冷却至室温，试问各获得什么组织？然后再进行中温回火，又各获得什么组织？

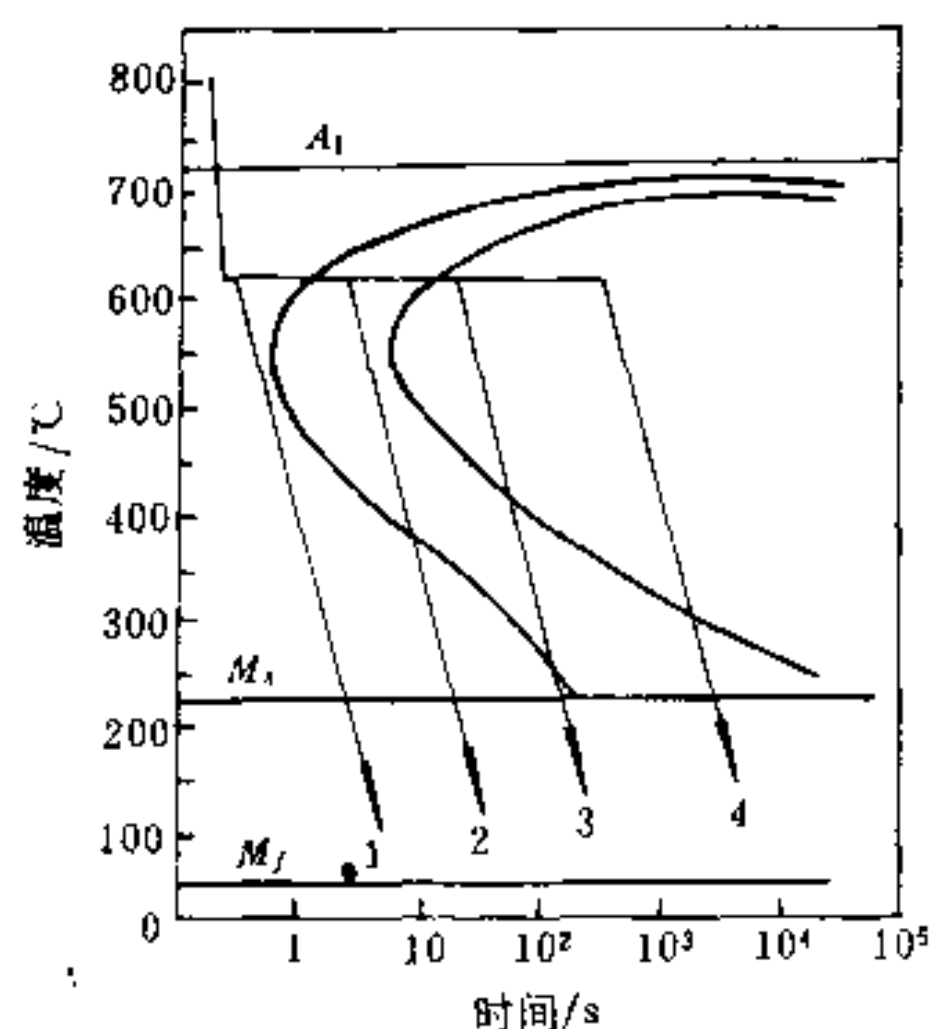


图 3-51 (题 21)

22. 45 钢经调质处理硬度为 240HBS，若再进行 200℃ 回火，是否可使其硬度提高？为什么？又 45 钢经淬火+低温回火后硬度为 HRC57，若再进行 560℃ 回火，是否可使其硬度降低？为什么？

23. 指出下列工件的淬火及回火温度，并说明最终组织和大致的硬度：

(1) 45 钢轴(要求较高的综合力学性能)；

(2) 60 钢弹簧；

(3) T12 钢锉刀。

24. 分析以下几种说法是否正确？为什么？

(1) 过冷奥氏体的冷却速度越快，钢冷却后的硬度越高。

- (2) 钢经淬火后处于硬脆状态;
 - (3) 钢中合金元素愈多,则淬火后的硬度就愈高;
 - (4) 本质细晶粒钢加热后的实际晶粒一定比本质粗晶粒钢细;
 - (5) 同一种钢材在相同的加热条件下,水淬比油淬的淬透性好,小尺寸零件比大尺寸零件的淬透性好。
25. 什么叫表面热处理? 表面热处理如何分类?
26. 常用的表面淬火、渗碳、渗氮、渗硼处理,其主要目的各是什么?
27. 现有低碳钢齿轮和中碳钢齿轮各一只,为了使齿轮表面具有高的硬度和耐磨性,问各应怎样热处理? 并比较热处理后它们在组织和性能上的差别?
28. 试确定下列零件的热处理方法,(均用锻件,且钢材淬透性足够)。
- (1) 某机器变速箱齿轮(模数 $m=4$)要求齿面耐磨,心部强度和韧性要求不高,材料选用 45 钢;
 - (2) 某发动机上的活塞销,心部要求良好的韧性,表面要求高的耐磨性,材料选用 20 钢;
 - (3) 某机床主轴,要求有良好的综合力学性能,轴颈部分要求耐磨(HRC50~55),材料选用 45 钢;
 - (4) 镗床镗杆,在重载下工作。精度要求极高,并在滑动轴承中运转,要求镗杆表面有极高的硬度,心部有较高的综合力学性能,材料选用 38CrMoAlA 钢。

第四章 结 构 钢

第一节 概 述

钢按其化学成分可分为碳素钢和合金钢两大类。碳钢具有较好的力学性能和工艺性能、价格便宜,是机械行业中应用较为广泛的金属材料。在碳钢中有意加入 Ni、Cr、W、Mo、V、Ti、B 等元素或者 Si、Mn 含量超过碳钢中含量标准的钢称为合金钢。合金钢的优越性必须通过热处理才能表现出来。

钢的种类很多,有多种分类方法。常用的分类方法如下。

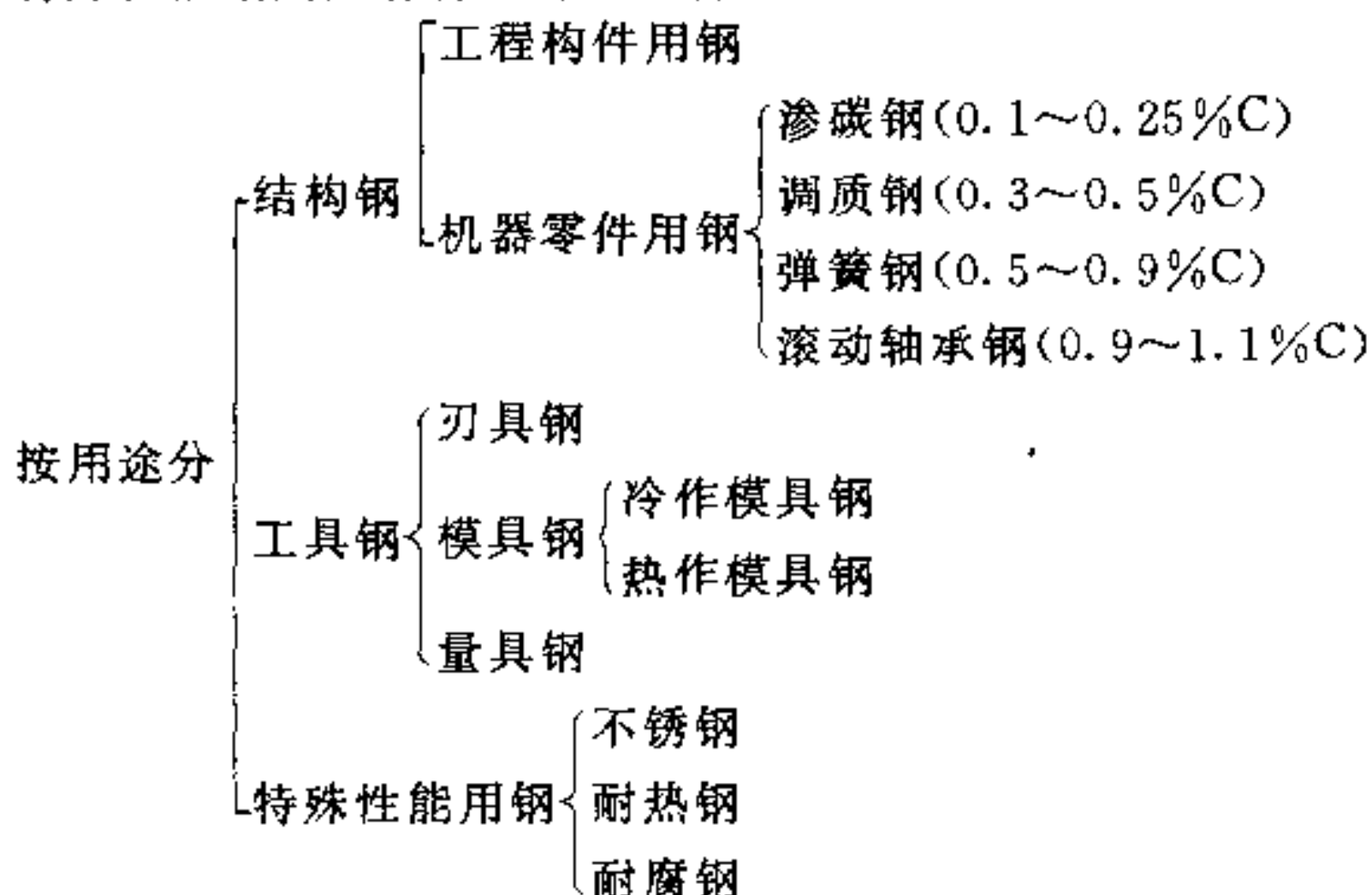
1. 按用途分类

按照钢的用途不同可分为结构钢、工具钢和特殊性能钢。

结构钢用于制造各种机器零件及工程构件,其主要作用是承受载荷,在性能上要求有较高的强度及塑性、韧性配合。结构钢多数为低、中碳钢。

工具钢用来制造各种刀具(如车刀、铣刀、拉刀等)、模具(热作模、冷作模等)及量具,这类钢一般要求有较高的硬度和耐磨性。因此工具钢一般都是高碳钢,且都是优质钢或高级优质钢。

特殊性能钢则具有各种特殊的物理、化学性能,如不锈钢、耐热钢、耐磨钢等。



2. 按含碳量分类

按钢中含碳量的多少可分为:低碳钢($C \leq 0.25\%$)、中碳钢($0.25\% \leq C \leq 0.6\%$)和高碳钢($C \geq 0.6\%$)三类。

3. 按合金元素含量分类

按钢中合金元素的含量分为:低合金钢(合金元素含量 $<5\%$)、中合金钢(合金元素含量

5%~10%)和高合金钢(合金元素含量 $\geq 10\%$)三类。

4. 按冶金质量分类

按钢中杂质 S、P 的含量分为:普通钢($S \leq 0.050\%$ $P \leq 0.045\%$)、优质钢($S \leq 0.035\%$ $P \leq 0.035\%$)和高级优质钢($S \leq 0.020\%$ $P \leq 0.030\%$)。

在机械工程中,结构钢的用途广,用量大,故本章重点介绍结构钢,关于工具钢和某些特殊性能钢将在第六章介绍。

钢的性能一是取决于钢的成分,二是取决于钢的热处理状态,为了便于了解结构钢的性能,首先介绍钢中碳、合金元素和杂质对钢的影响。

第二节 碳及杂质对钢力学性能的影响

碳钢中除铁外,碳是主要元素,虽然含量很少,只有百分之一、二或者百分之零点几,但它对钢铁性能却有很大的影响。此外,炼钢过程中存留的硅、锰、硫、磷等元素,称为钢中的常存杂质,它们的含量虽然不多,但对钢的性能影响也很大。

一、碳的影响

随着钢中含碳量的增加,钢的强度增加、塑性降低。碳为什么能产生这种作用呢?这是因为含碳量的变化,改变了钢的内部组织。钢中绝大部分碳是以 Fe_3C (含碳 6.67%) 的形态存在的,这种化合物硬度高达 800 HBS 左右,几乎没有塑性。因此,钢中含碳量越高,则组织中的 Fe_3C 就越多,钢的强度增高,而塑性降低。由图 4-1 可以看出,随着钢中含碳量的增加,其强度、硬度(σ_b 、HBS)上升,塑性(ψ 、 δ)和韧性(a_k)下降。

二、硫、磷的影响

硫、磷都是炼铁时矿石及燃料中带来的有害杂质,在炼钢时未能全部除掉而残存于钢中。

硫使钢在高温下产生脆性,称为热脆性。这是因为硫与铁形成化合物 FeS , FeS 与 Fe 形成易熔物质,当钢在 $1000 \sim 1200^\circ C$ 进行锻造、辗压时,容易引起破坏。如果钢中含锰量较多,锰与硫有较大的亲和力,形成高熔点($1620^\circ C$)的 MnS ,可以抵消一部分硫的有害作用,即可能消除一些热脆性。

硫还严重降低钢的拉伸强度极限、屈服极限及耐腐蚀性。可见硫的有害作用很大,故对钢中硫的含量要严格控制,普通钢不超过 0.050%,优质钢不超过 0.035%,高级优质钢不超

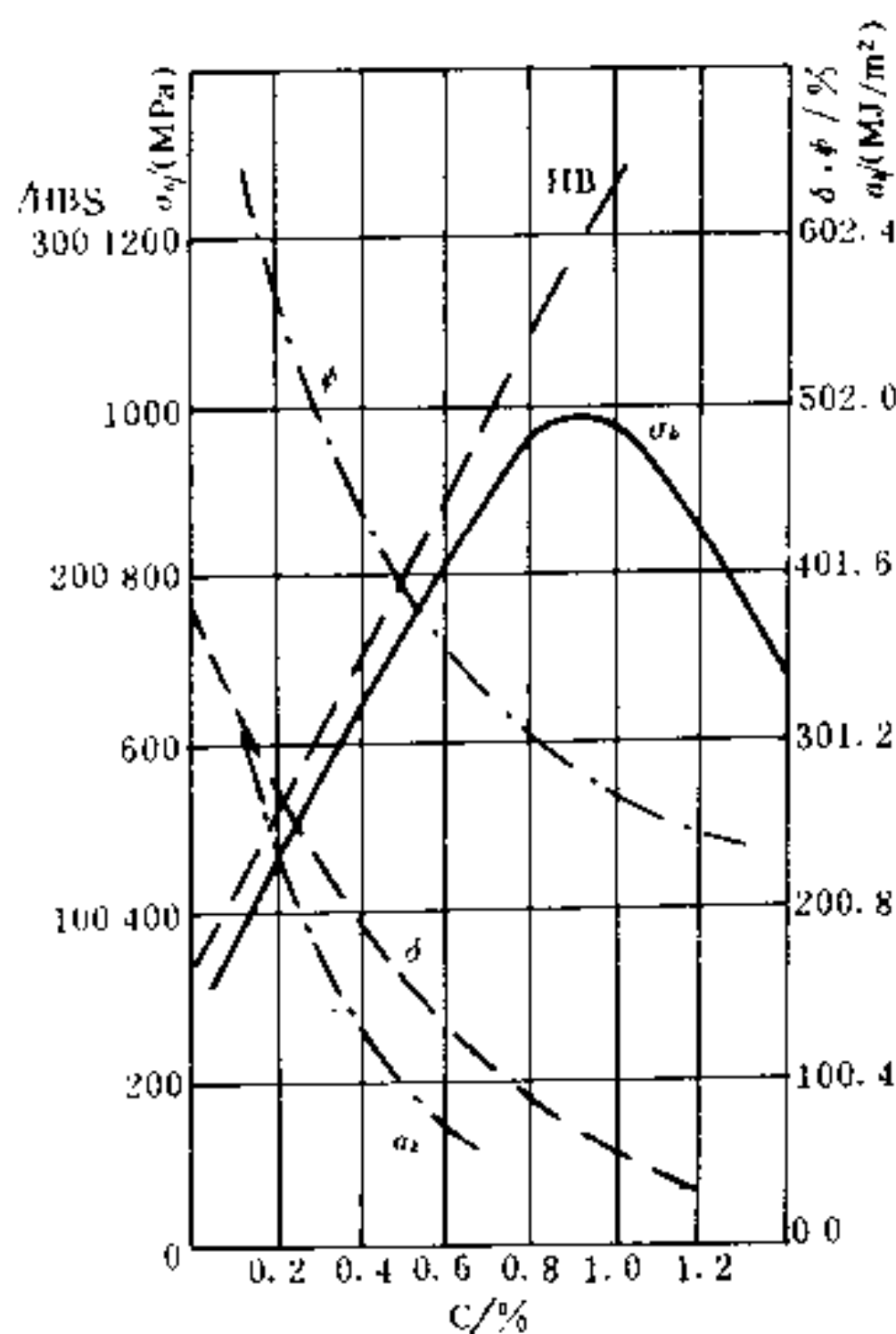


图 4-1 含碳量对钢力学性能的影响

过 0.020%。

磷能使钢硬度增加,塑性、韧性降低,特别是在低温时韧性急剧下降,称为冷脆性。含磷量过高,若达 0.3%时,钢材冲击韧性就接近于零,因而普通钢含磷量不大于 0.045%,优质钢不大于 0.035%,高级优质钢不大于 0.030%。

对硫、磷也要“一分为二”,它们使钢的脆性增加,但有利于切削加工,在自动机上制造螺栓、螺帽及受力较小的零件时,为了改善切削加工性,常常用含磷、硫较高的钢。这种钢就是易切削钢。

三、锰和硅的影响

锰和硅都是来自脱氧剂(炼钢时用来除去钢中残存 FeO 的锰铁、硅铁等)与生铁中。它们对钢的性能产生有益的影响,故称作有益杂质。锰和硅都能显著提高钢的强度。此外,锰还能减弱硫的有害影响。

第三节 合金元素对钢的影响

合金结构钢最大的优点是强度比碳钢高。但它的高强度必须通过热处理才能表现出来。即通过热处理来改变钢的组织,从而获得高强度。因此用合金结构钢制造的零件一般都要热处理后使用,合金元素对钢的影响实际上主要是对热处理的影响。

铁碳相图和 C 曲线是热处理的基础。为了研究合金元素对热处理的影响,应该首先了解合金元素对铁碳相图和 C 曲线的影响。

一、合金元素对铁碳相图的影响

合金元素影响铁碳相图中奥氏体相区的大小,改变了共析点(S)成分及共析温度(A_1)。

1. 对奥氏体相区的影响

能与 γ -Fe 形成无限固溶体,与 α -Fe 形成有限固溶体的合金元素如 Mn、Ni 等,它们使奥氏体相区扩大,使 $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 相变温度 A_3 降低、 $\gamma \rightleftharpoons \delta$ 相变温度升高,扩大了 γ 相稳定存在的范围。图 4-2 是锰对铁碳相图奥氏体相区的影响。当扩大 γ 相区的元素(如 Mn、Ni)含量足够高时,可使 γ 相区扩展到室温以下,得到特殊性能的奥氏体钢。如 1Cr18Ni9Ti 钢,由于 Ni 元素影响使其成为奥氏体不锈钢。

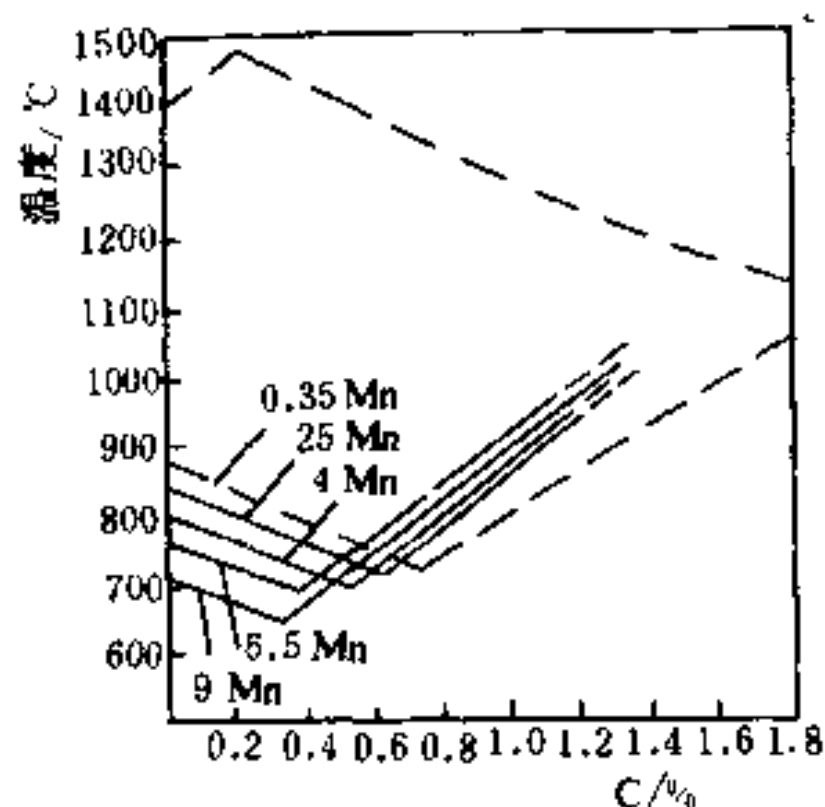


图 4-2 Mn 对 Fe—C 相图 γ 相区的影响

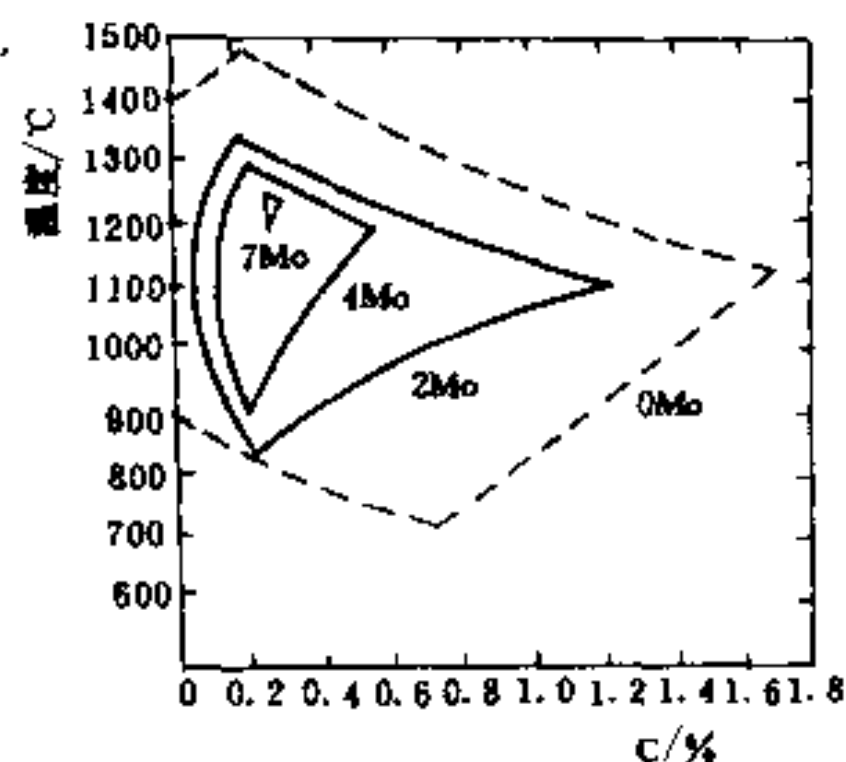


图 4-3 Mo 对 Fe—C 相图 γ 相区的影响

与 α -Fe 形成无限固溶体,与 γ -Fe 形成有限固溶体的合金元素如 Cr、Mo 等,使 $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 相变温度升高, $\gamma \rightleftharpoons \delta$ 相变温度降低,使 γ 相区缩小。如图 4-3 是 Mo 对 Fe—C 相图 γ 相区的影响。 γ 相区缩小,可得单一铁素体钢。如 0Cr13 钢,因 Cr 元素的含量高而成为铁素体型的不锈钢。

2. 对共析温度的影响

由于合金元素对奥氏体区域的大小有影响,因此使共析温度也发生相应的变化,扩大 γ 相区的元素使 A_1 降低,如 Mn、Ni、Co 等。缩小 γ 相区的元素使 A_1 升高,如 Cr、V、Mo、W 等。

3. 对共析点(S)位置的影响

扩大 γ 相区的元素使 A_1 、 A_3 线降低,S 点向左下方移动,而缩小 γ 相区的元素使 A_1 、 A_3 线上升,S 点向左上方移动。S 点的左移,表明了共析成分含碳量减小($<0.77\%$),例如,含碳 0.4% 的亚共析钢,加入 4%Mn 就变为共析钢;加入 12%Cr 即变为过共析钢。这使退火状态下合金结构钢组织中的珠光体较相同含碳量的碳钢多。如 40Cr 与 40 钢相比,退火、正火状态下,40Cr 组织中的珠光体多于 40 钢。

由于合金元素对相变临界温度 A_1 、 A_3 和 S 点的位置有影响,所以合金钢热处理温度规范与碳钢有所差别,甚至发生很大的变化。

二、合金元素对 C 曲线的影响

1. 改变 C 曲线位置

改变过冷奥氏体的稳定性是合金元素对钢最重要的影响。除 Co 外所有合金元素均使 C 曲线右移[如图 4-4(a)所示],增加了过冷奥氏体的稳定性。合金结构钢中一般均不含 Co,所以它的过冷奥氏体比较稳定。这是合金钢的重要优点。

2. 改变 C 曲线形状

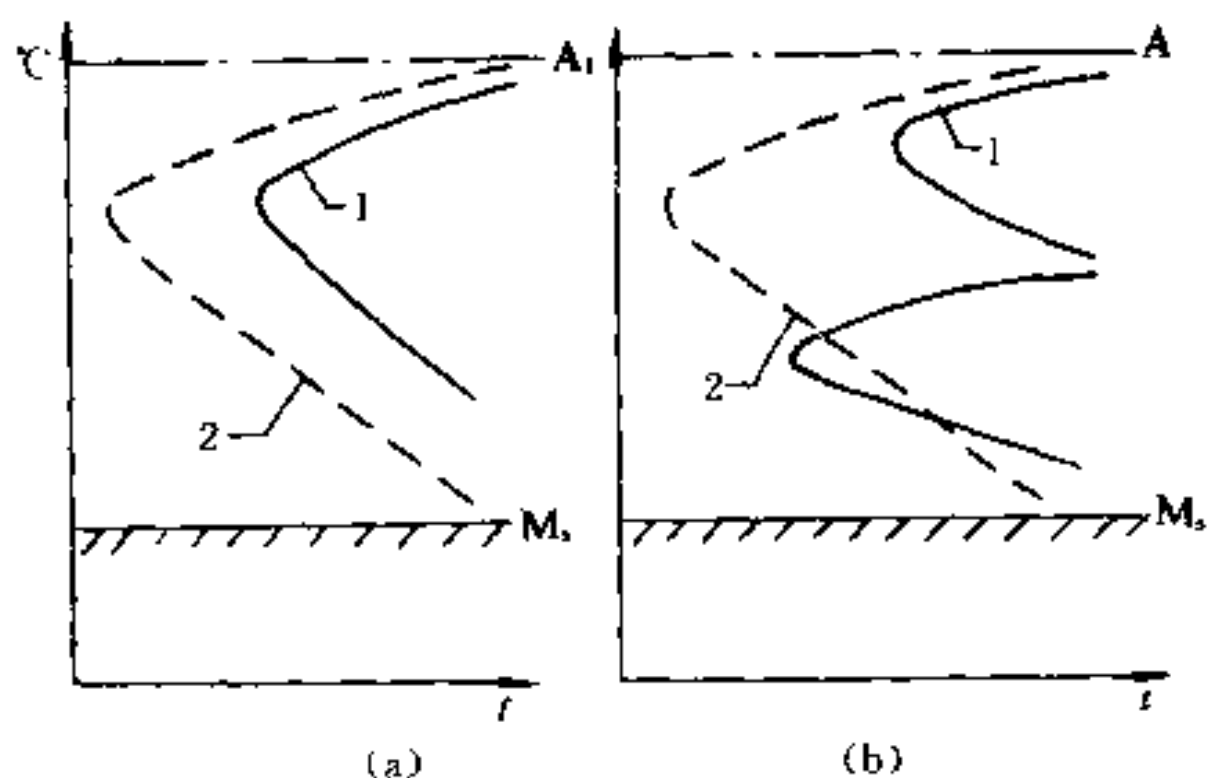


图 4-4 合金元素对 C 曲线影响示意图

(a) Ni、Mn、Si 钢;— 碳钢

(b) Cr、W、Mo、V 钢;— 碳钢

所有的合金元素都能不同程度的溶入奥氏体与其形成固溶体,使 C 曲线右移,其中 Cr、W、Mo、V、Ti、Mn 还可以形成碳化物,当其含量较高时会使 C 曲线分为上、下两个曲线[如图 4-4(b)所示],上面的曲线是珠光体转变区、下面的曲线是贝氏体转变区,在两个曲线之间是一个奥氏体稳定的区域。有些钢在这个温度长时间停留而不发生转变,如含 Cr、W、V 较多的高速钢,奥氏体化后在冷至双 C 曲线之间,可以几小时甚至更长时间不发生转变。

C 曲线右移的结果,提高了钢的淬透性,即合金钢与碳钢比较,最大的优点

就是它的淬透性高,这将对合金钢的淬火产生重要影响。

3. 减小临界淬火速度

从前面淬透性的概念一节中,我们了解到淬火时其冷却速度必须大于临界冷却速度才能使钢淬硬(达到该钢的最大硬度)。C 曲线右移的结果,将使钢的临界冷却速度减小。如图

4-5 所示($v_2 < v_1$)。临界冷却速度越小,钢的淬透性越大。对相同尺寸的零件,若用合金钢(如 40 Cr)制造,在水中、油中淬火,都可淬硬,而用碳钢(40 号钢)制造,只能在水中冷却才能淬硬,在油中冷却则淬不硬。

淬透性大的钢可以采用油淬,甚至采用空冷,从而减小变形和淬裂的危险。

4. 改变马氏体转变温度

合金元素除了对 C 曲线有影响外,还影响马氏体的转变温度 M_s 、 M_f 点。常用合金元素除铝(Al)、钴(Co)使之升高、硅(Si)不发生影响外,其它合金元素均使马氏体转变温度降低,其中锰(Mn)的作用最大,其次是铬(Cr)和镍(Ni),使淬火后合金钢中残余奥氏体增多,含碳越高影响越大,所以高碳高合金钢有时需采用冷处理或多次回火方法减少残余奥氏体。

三、合金元素对回火的影响

合金元素对钢回火后的硬度和韧性产生影响。

1. 对回火后钢的硬度的影响

能够形成碳化物的合金元素(如 Cr、W、Mo、V、Ti 等)均影响钢的回火硬度,含有这类元素的钢淬火后回火时硬度降低的程度比碳钢小,这对工具钢来说特别重要。结构钢中合金元素含量较少(一般合金元素含量为 1%~3%),对回火时硬度变化的影响不大,可以忽略不计。例如 30 号碳钢淬火并于 350℃ 回火后,硬度为 HRC40,而含碳 0.35% 的 35 Cr 钢淬火并 350℃ 回火后硬度也是 HRC40 左右。

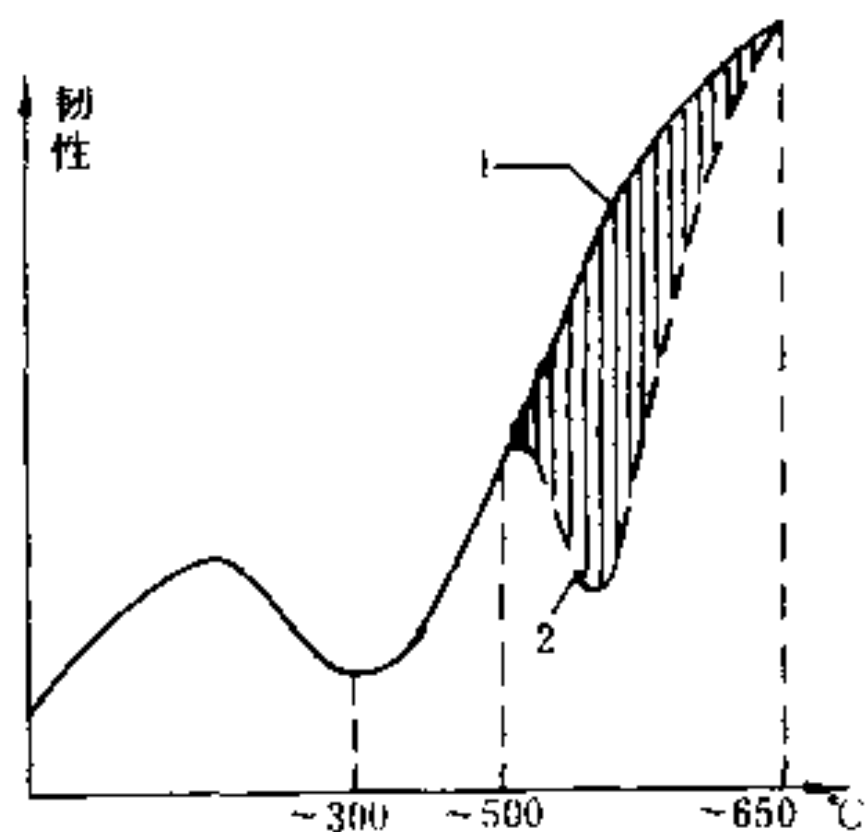


图 4-6 回火对某些合金钢韧性的影响示意图

1——快冷;2——慢冷

回火脆性(或称低温回火脆性)。而 500~650℃ 回火的韧性下降,称之为第二类回火脆性(或称高温回火脆性)。

第一类回火脆性是包括碳钢在内的所有钢材共有的现象。它不受回火后冷却速度的影响,只要在 300℃ 左右回火,不管快冷还是慢冷,钢的韧性都比较低,因此一般零件热处理后都不在 250~350℃ 区间回火。

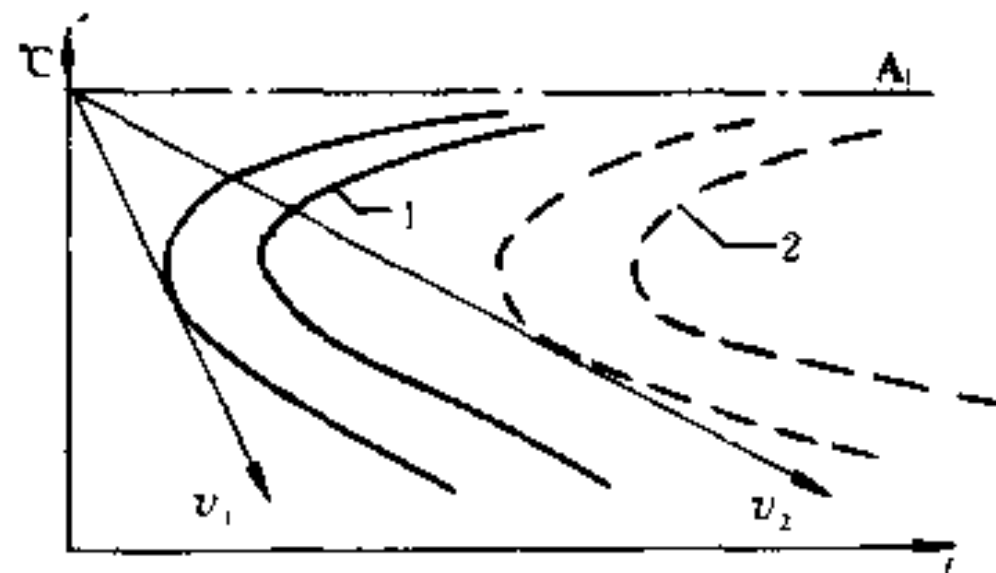


图 4-5 碳钢与合金钢临界冷却速度示意图

1——碳钢;2——合金钢

2. 对回火脆性的影响

在某些温度区间回火时,钢的韧性显著下降的现象称之为回火脆性。

如前所述,碳钢回火时随温度的升高,硬度不断降低,韧性不断升高。而回火后的冷却速度并不影响钢的力学性能。但具有回火脆的合金钢,如 Cr—Ni 钢、Cr—Mn 钢、Cr—Mn—Si 钢等,在 500~650℃ 高温回火(调质)后,如果以快速冷却(水冷)则韧性高,若缓慢冷却(随炉冷或空冷)则韧性显著下降,这类钢在回火时韧性的变化情况如图 4-6 所示。

从图中看出,在 300℃ 左右回火时,钢的韧性(A_k 值)出现显著下降的现象,称之为第一类

引起第二类回火脆性最强烈的元素是磷、锰、铬，铬钢中如无其它合金元素则回火脆性敏感性较小，但加入 Mn 或 Ni(纯镍钢无第二类回火脆性)则回火脆性敏感性将急剧增加。下列钢都具有高温回火脆性：

含 Mn 较高的 Mn 钢(10Mn2、30Mn2)；
 含 C 稍高的 Cr 钢(40Cr、45Cr……)；
 Cr—Si 钢(38CrSi、40CrSi……)；
 Cr—Mn 钢(40CrMn、15Cr2Mn2)；
 Cr—Ni 钢(40CrNi、30CrNi、20CrNi3……)；
 Cr—Mn—Si 钢(20CrMnSi、30CrMnSi……)；
 Si—Mn 钢(27SiMn、35SiMn……)。

克服高温回火脆性有两种方法：

(1) 高温回火后，把零件放入水中快速冷却。但这对大截面零件还不足以抑制回火脆性的产生，因其心部冷速还不够快。

(2) 钢中加入可降低回火脆性倾向的元素 Mo 或 W，例如 40CrNiMo、40CrMnMo 等。

四、合金元素对钢力学性能的影响

许多合金元素通过溶入铁素体或形成碳化物对钢的力学性能产生影响。

如 Si、Mn、Ti、Mo、V、W、Ni 等元素溶入铁素体，置换了铁原子，引起铁素体晶格畸变，使其强度、硬度升高，称为固溶强化。各种元素强化效果见图 4-7。一般说来，合金元素的原子半径与铁的原子半径相差愈大，两者间的晶体结构不相同，其强化效果愈明显。

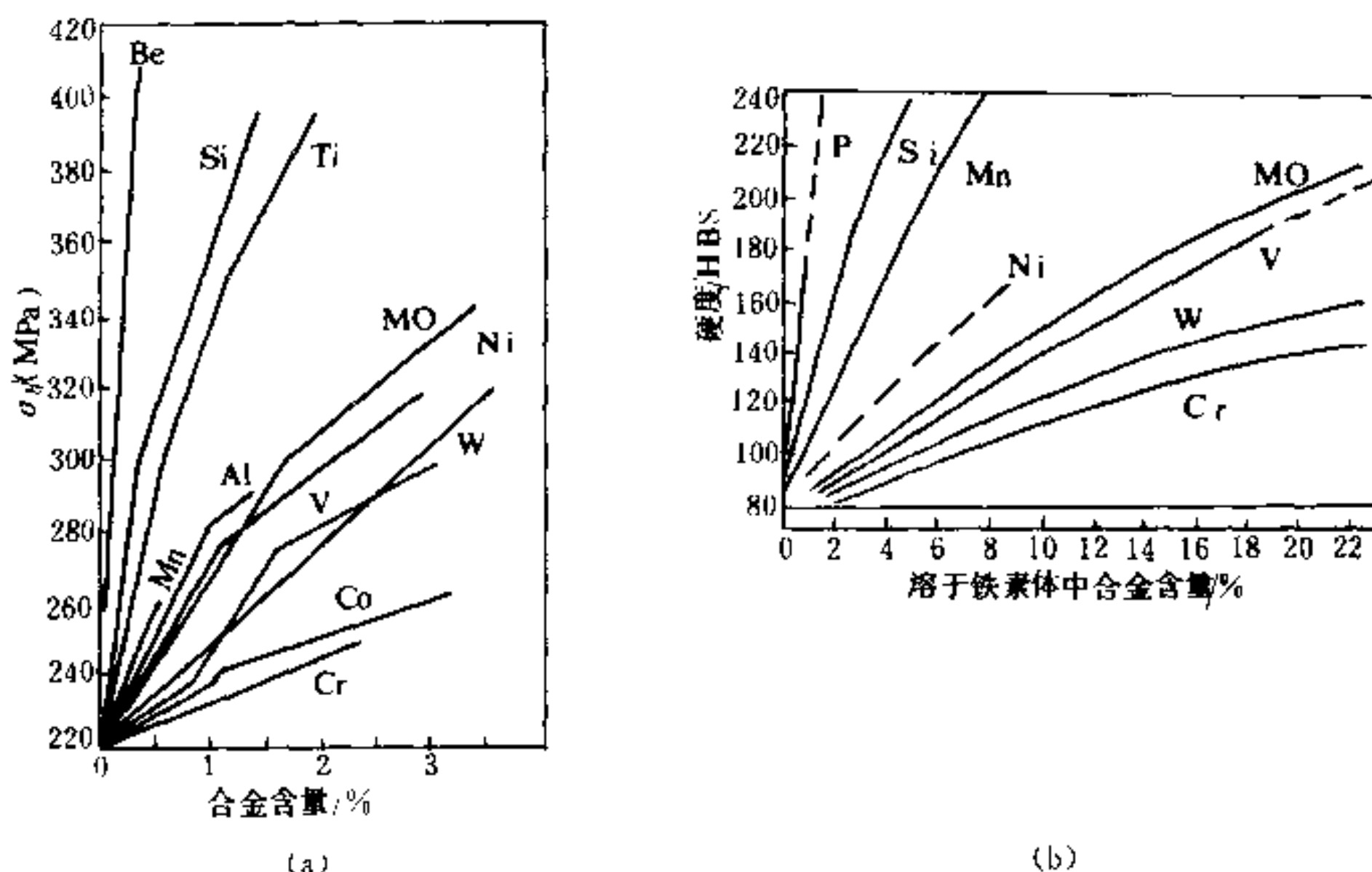


图 4-7 合金元素对铁素体固溶强化的作用

(a) 合金元素对强度的影响；(b) 合金元素对硬度的影响

从图 4-8 中可以看出，大多数合金元素含量不太高时，就使塑性、韧性下降。唯有 Ni 高达 5%~6% 还不会使铁素体塑性和冲击韧性大幅度下降，这是 Ni 的可贵之处。所以合金结构钢中 Si、Mn 含量一般控制在 1.5% 以下，含 Ni 的合金结构钢强韧性都比较高。

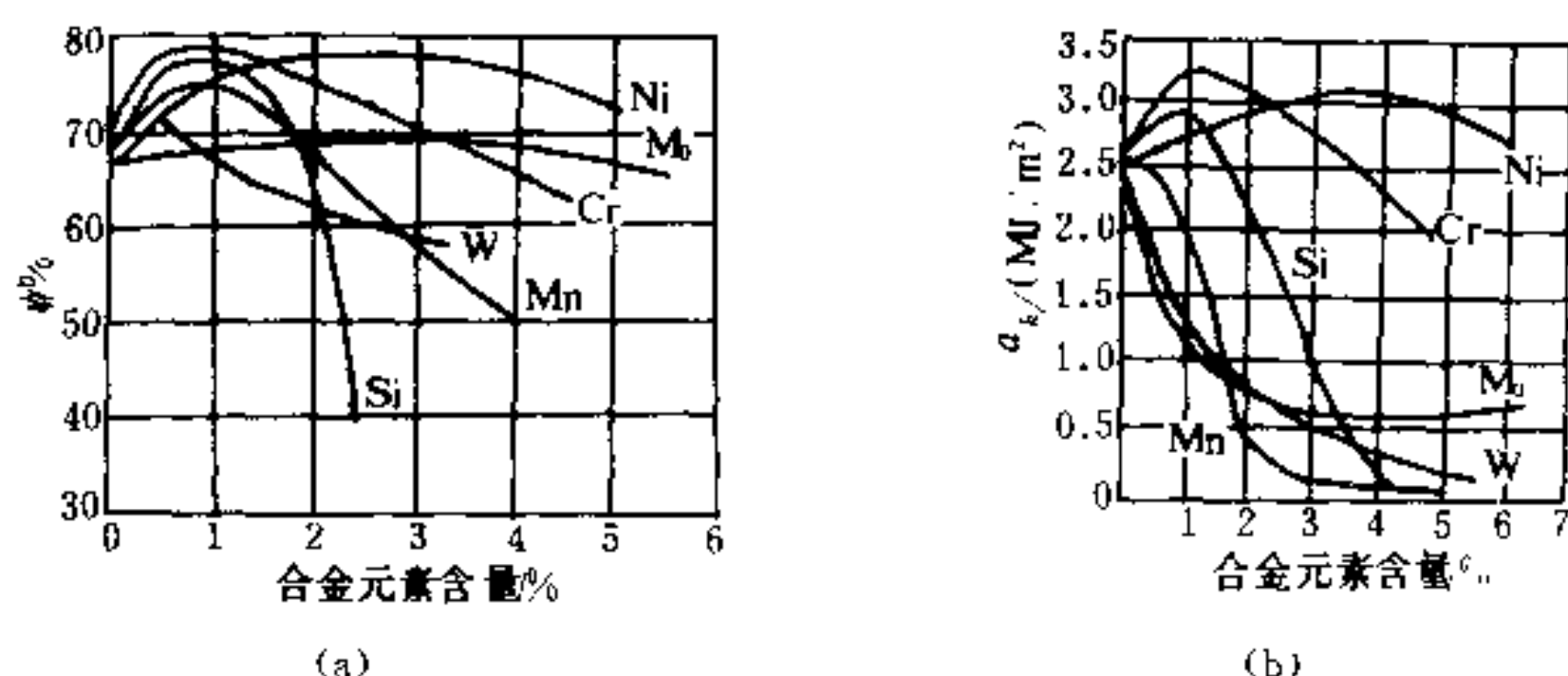


图 4-8 合金元素对铁素体的面缩率(ψ)和冲击韧性(α_k)的影响

与碳亲和力较强的元素如 Cr、W、Mo、V、Nb 等置换渗碳体中的 Fe 原子而形成合金渗碳体,如 $(Fe \cdot Cr)_3C$ 、 $(Fe \cdot W)_3C$ 等,增加了渗碳体的稳定性。

当形成碳化物的合金元素含量较高时,合金元素与碳可能形成新的碳化物,如 Cr_7C_3 、 $Cr_{23}C_6$ 、WC、MoC、TiC、VC 等,使钢的强度、硬度、耐磨性增加,但塑性、韧性下降。

此外,细化晶粒的元素如 Ti、V、W、Mo 等,对钢的强度和韧性都是有利的。

五、结构钢中常用的合金元素及其作用

合金结构钢中最常用的合金元素有 Mn、Si、Cr、Ni 以及 Mo、W、V、Ti、B 等。

上述合金元素中, Si、Mn、Cr 和 Ni 称为主加元素,它们对钢的影响起主导作用,这四种元素均能显著提高钢的淬透性。主加元素的含量一般在 1% 以上。

Mo、W、V、Ti、B 等是合金结构钢中的辅加元素,一般不单独使用而是和主加元素配合加入钢中,含量较少,一般多在 1% 以下。它们的作用是进一步提高钢的淬透性,如 Mo 和 B 等;有的可以阻止加热时奥氏体晶粒长大倾向,从而使晶粒细化,如 V、Ti(其次是 Mo、W);有的可以消除合金钢的高温回火脆性,如 Mo 和 W。

Mo 和 Cr、Mn 是强烈增加淬透性的三个元素。

微量 B(0.0005%~0.004%)加入钢中,能显著提高钢的淬透性。它对淬透性的影响相当于 1%Ni、0.3%Cr 或 0.2%Mo 的作用,但其含量不能太高,否则将降低淬透性,所以规定含 B 的钢中,B 量最高为 0.004%。而且是含碳越低的钢,B 提高淬透性的作用越大,所以 B 只加入低碳及中碳合金钢中。如:20MnVB、40MnB 等。

多种合金元素同时加入钢中,对淬透性的复合影响比单纯一种元素的效果要显著得多,例如:Cr 钢中加入 Ni(如 37CrNi3 等);Mn 钢中加入 Si(如 27SiMn 等);Cr—Mn 钢中加入 Mo(如 40CrMnMo 等)均能大大提高钢的淬透性。所以目前合金钢的发展过程中,有增加元素种类但减少每种元素含量的趋势。

除 Mn 和 B 以外,所有合金元素都有阻止奥氏体晶粒长大的作用,其中碳化物形成元素如 V、Ti、W、Mo、Cr 作用较强烈,尤其是 V 和 Ti 的影响更大。

由于合金元素 Mn 和 B 会促使加热时奥氏体晶粒长大,所以 Mn 钢和 B 钢热处理时易形成粗晶粒组织。为防止晶粒长大,必须严格控制加热温度,或加入阻止奥氏体晶粒长大的元素 V 和 Ti,如 20CrMnTi 钢中的 Ti、40MnVB 中的 V 元素均起此作用。

Mo 和 W 是可以消除合金钢高温回火脆性的两个主要合金元素,稀土元素铈、镧、镨、

钼等可降低某些钢(如 20SiMnVB)的高温回火脆性。对尺寸不太大的零件,可以采用回火后快速冷却的办法避免高温回火脆性的产生;但对大尺寸的零件,即使回火后在水中冷却,也达不到避免回火脆性所要求的冷却速度。因此尺寸较大的零件,只能用含有 Mo 或 W 的合金钢制造,以避免回火脆性。

综上所述,结构钢中合金元素的作用归纳起来如表 4-1 所示。

表 4-1 合金元素在钢中的作用

作 用	合 金 元 素
1. 提高淬透性	强烈的有:Mo,Cr,Mn,B,其次 Ni,Si
2. 细化晶粒(阻止奥氏体长大)	强烈的有:Ti,V,其次是 W,Mo,Cr
3. 促使晶粒长大	Mn 和 B
4. 消除高温回火脆性	Mo,W

第四节 结 构 钢

结构钢按用途分为机器零件用钢和工程构件用钢两大类。机器零件用钢主要用来制造各类零件,如轴类、连杆类、齿轮等,一般需经过热处理后使用。工程构件用钢用于各种工程结构,如桥梁、船体、建筑等,这类钢一般不需热处理,而直接在供应状态下使用。

一、碳钢

碳钢由铁和碳两种基本元素组成,此外,还含有 Mn、Si、S、P 等杂质元素。

碳钢冶炼方便、来源广泛、价格低廉,能满足一般的使用要求,故碳钢的产量约占钢总产量的 80%~90%。

在新的国家标准(GB700—88)中,将碳钢分为碳素结构钢(原普通碳素结构钢)、优质碳素结构钢、铸造碳素钢和易切削结构钢。

1. 碳素结构钢

碳素结构钢含硫、磷杂质较多,质量较差,价格便宜,应用普遍。这类钢一般都轧成圆钢、钢管、钢板、角钢、槽钢、钢筋等型材供应,通常不进行热处理。

碳素结构钢按其屈服强度分为五级,同时考虑质量等级和脱氧方法又可细分为二十种,见表 4-2。

碳素结构钢牌号表示方法是由字母(Q)、屈服点数值、质量等级符号、脱氧方法等四部分按顺序组成。

F 表示沸腾钢、Z 表示镇静钢、b 表示半镇静钢、TZ 表示特殊镇静钢。

例如:Q235—A·F 表示屈服点数值为 235 MPa 的 A 级沸腾钢。

碳素结构钢的力学性能见表 4-3(供应状态或正火态)。

这类钢主要用于建筑、桥梁、船舶、车辆制造等部门做金属结构,故又称建筑用钢。也可用于强度要求不高的机器零件。

Q195、Q215 含碳量低,强度低、塑性高、焊接性好。主要用于强度要求不高的普通零件,如铆钉、垫圈、开口销、垫块、炉撑等。也可用于冲压零件或焊接件。

表 4-2 碳素结构钢的牌号和化学成分(GB700—88)

牌 号	等 级	化 学 成 分 / %					脱 氧 方 法
		C	Mn	Si	S	P	
				不大于			
Q195	—	0.06~0.12	0.25~0.50	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
Q215	A	0.09~0.15	0.25~0.55	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
	B				0.045		
Q235	A	0.14~0.22	0.30~0.65 ¹⁾	0.30	0.050	0.045	F、b、Z
	B	0.12~0.20	0.30~0.70 ¹⁾		0.045		
	C	≤0.18	0.35~0.80		0.040	0.040	Z
	D	≤0.17			0.035	0.035	TZ
Q255	A	0.18~0.28	0.40~0.70	0.30	0.050	0.045	Z
	B				0.045		
Q275	—	0.28~0.38	0.50~0.80	0.35	0.050	0.045	Z

注:Q235A、B级沸腾钢锰含量上限为0.60%。

表 4-3 碳素结构钢的拉伸和冲击试验(GB700—88)

牌 号	等 级	拉 伸 试 验												冲 出 试 验		
		屈服点 $\sigma_s / (N \cdot mm^{-2})$						拉 抗 强 度 σ_b $/(N \cdot mm^{-2})$	伸 长 率 $\delta_s / \%$						温 度 / $^{\circ}C$	V 型 冲 击 功 (纵 向) / J
		钢 材 厚 度 或 直 径 / mm							钢 材 厚 度 或 直 径 / mm							
		≤ 16	>16 ~ 40	>40 ~ 60	>60 ~ 100	>100 ~ 150	>150		≤ 16	>16 ~ 40	>40 ~ 60	>60 ~ 100	>100 ~ 150	>150		
		不 小 于							不 小 于							
Q195	—	(195)	(185)	—	—	—	—	315~390	33	32	—	—	—	—	—	—
Q215	A	215	205	195	185	175	165	335~410	31	30	29	28	27	26	—	—
	B														20	27
Q235	A	235	225	215	205	195	185	375~460	26	25	24	23	22	21	—	27
	B														20	
	C														0	
	D														-20	
Q255	A	255	245	235	225	215	205	410~510	24	23	22	21	20	19	—	—
	B														20	27
Q275	—	275	265	255	245	235	225	490~610	20	19	18	17	16	15	—	—

Q235 主要用于建筑结构、桥梁等。也可用于强度要求一般的普通零件,如螺钉、螺母、螺栓、心轴、拉杆等。C、D级钢可作为重要的焊接件。

Q255、Q275 含碳量较高、强度较大,可用于强度要求较高的普通零件如转轴、楔键、吊

钩、摇杆等。

2. 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢含有害杂质(硫、磷)及非金属夹杂物较少,故塑性及韧性较高,可通过热处理强化,价格较合金钢低,广泛应用于制造各种机器零件,故又称机器零件用钢。

优质碳素结构钢的牌号和化学成分见表 4-4。

表 4-4 优质碳素结构钢的牌号和化学成分(GB699—88)

牌 号	化学成分/%							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
	≤							
08F	0.05~0.11	≤0.03	0.25~0.50	0.035	0.035	0.25	0.10	0.25
10F	0.07~0.14	≤0.07	0.25~0.50	0.035	0.035	0.25	0.15	0.25
15F	0.12~0.19	≤0.07	0.25~0.50	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
08	0.05~0.12	0.17~0.37	0.35~0.65	0.035	0.035	0.25	0.10	0.25
10	0.07~0.14	0.17~0.37	0.35~0.65	0.035	0.035	0.25	0.15	0.25
15	0.12~0.19	0.17~0.37	0.35~0.65	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
20	0.17~0.24	0.17~0.37	0.35~0.65	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
25	0.22~0.30	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
30	0.27~0.35	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
35	0.32~0.40	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
40	0.37~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
45	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
50	0.47~0.55	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
55	0.52~0.60	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
60	0.57~0.65	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
65	0.62~0.70	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
70	0.67~0.75	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
75	0.72~0.80	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
80	0.77~0.85	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
85	0.82~0.90	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
15Mn	0.12~0.19	0.17~0.37	0.70~1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
20Mn	0.17~0.24	0.17~0.37	0.70~1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
25Mn	0.22~0.30	0.17~0.37	0.70~1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
30Mn	0.27~0.35	0.17~0.37	0.70~1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
35Mn	0.32~0.40	0.17~0.37	0.70~1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
40Mn	0.37~0.45	0.17~0.37	0.70~1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
45Mn	0.42~0.50	0.17~0.37	0.70~1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
50Mn	0.48~0.56	0.17~0.37	0.70~1.00	0.035	0.25	0.25	0.25	0.25
60Mn	0.57~0.65	0.17~0.37	0.70~1.00	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
65Mn	0.62~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25
70Mn	0.67~0.75	0.17~0.37	0.90~1.20	0.035	0.035	0.25	0.25	0.25

这类钢按含锰量不同而有两种编号方法。

(1) 正常含锰量的优质碳素结构钢: 此类钢含锰量在 0.80% 以下, 编号方法以平均含碳量的万分数表示。如 20、45 分别表示平均含碳量为 0.20%、0.45% 的优质碳素结构钢。

(2) 较高含锰量的优质碳素结构钢: 这类钢含锰量在 0.70%~1.20% 之间, 其编号方法是在表示含碳量的两位数字后面附加化学元素符号“Mn”。例如钢号 20Mn 表示平均含碳量为 0.20%, 含锰量为 0.70%~1.0% 的钢。

优质碳素结构钢的力学性能见表 4-5。

表 4-5 优质碳素结构钢的力学性能(GB699-88)

牌 号	试样 毛坯 尺寸 /mm	推荐热处理 / °C			机 械 性 能					钢材交货状态硬度	
		正火	淬火	回火	σ_b /MPa (kgf·mm ⁻²)	σ_s /MPa (kgf·mm ⁻²)	δ_5 /%	ϕ /%	$A_K(a_k)$ /J(kgf·m·cm ⁻²)	/HBS ≤	
					≥					未热处理	退火钢
08F	25	930			295(30)	175(18)	35	60		131	
10F	25	930			315(32)	185(19)	33	55		137	
15F	25	920			355(36)	205(21)	29	55		143	
08	25	930			325(33)	195(20)	33	60		131	
10	25	930			335(34)	205(21)	31	55		137	
15	25	920			375(38)	225(23)	27	55		143	
20	25	910			410(42)	245(25)	25	55		156	
25	25	900	870	600	450(46)	275(28)	23	50	71(9)	170	
30	25	880	860	600	490(50)	295(30)	21	50	63(8)	179	
35	25	870	850	600	530(54)	315(32)	20	45	55(7)	197	
40	25	860	840	600	570(58)	335(34)	19	45	47(6)	217	187
45	25	850	840	600	600(61)	355(36)	16	40	39(5)	229	197
50	25	830	830	600	630(64)	375(38)	14	40	31(4)	241	207
55	25	820	820	600	645(66)	380(39)	13	35		255	217
60	25	810			675(69)	400(41)	12	35		255	229
65	25	810			695(71)	410(42)	10	30		255	229
70	25	790			715(73)	420(43)	9	30		269	229
75	试样		820	480	1080(110)	880(90)	7	30		285	241
80	试样		820	480	1080(110)	930(95)	6	30		285	241
85	试样		820	480	1130(115)	980(100)	6	30		302	255
15Mn	25	920			410(42)	245(25)	26	55		163	
20Mn	25	910			450(46)	275(28)	24	50		197	
25Mn	25	900	870	600	490(50)	295(30)	22	50	71(9)	207	
30Mn	25	880	860	600	540(55)	315(32)	20	45	63(8)	217	187
35Mn	25	870	850	600	560(57)	335(34)	19	45	55(7)	229	197
40Mn	25	860	840	600	590(60)	355(36)	17	45	47(6)	229	207
45Mn	25	850	840	600	620(63)	375(38)	15	40	39(5)	241	217
50Mn	25	830	830	600	645(66)	390(40)	13	40	31(4)	255	217
60Mn	25	810			695(71)	410(42)	11	35		269	229
65Mn	25	810			735(75)	430(44)	9	30		285	229
70Mn	25	790			785(80)	450(46)	8	30		285	229

含碳较低的优质碳素结构钢,其强度较低、塑性很好,有良好的焊接性,可作冷冲压制品及焊接件,经热处理后可用在冲击负荷及磨损条件下工作的零件。如 15、20、25 钢一般经热处理后可作小型活塞销,在矿山机械中作套筒滚子链的链管、滚子等。

含碳中等(含碳在 0.3%~0.6%之间)的优质碳素结构钢有较高的强度、充分的韧性,即有良好的综合力学性能,同时又具有较好的机械加工性能。30、35、40、45 钢进行热处理后可做各种机器结构件,如齿轮、连杆、轴及犁、铧等农机零件。其中以 40、45 钢应用最广,主要用于在中等负荷下要求有一定强度的零件,如低速齿轮、蜗杆、轴、键、紧固件以及要求较高光洁度的零件如手柄、活塞杆等。

含碳较高的优质碳素结构钢(含碳在 0.60%以上)具有高的强度、硬度和良好的弹性,经热处理后用于制造弹簧、钢丝绳等,如 60、70 钢。

在含碳量相同的情况下,较高含锰量的优质碳素结构钢比上述普通含锰量的优质碳素结构钢强度稍高,适合于制造强度要求较高、截面尺寸较大的零件,如 65Mn 适合于制造大尺寸的螺旋弹簧、板簧等。

3. 铸钢

有些形状复杂、不易锻造而用铸铁又不能满足性能要求的零件可采用铸钢,如采掘机械箱体、液压支架顶板等。铸钢含碳量一般 $\leq 0.65\%$ 。

一般工程用铸钢件的牌号由“铸钢”二字的汉语拼音首位字母和两组阿拉伯数字组成,第一组代表屈服强度值(MPa),第二组代表抗拉强度值(MPa),其牌号及化学成分见表 4-6,力学性能如表 4-7 所示。

表 4-6 铸钢的牌号和化学成分(GB11352-89)

牌 号	元素最高含量/%									
	C	Si	Mn	S	P	残 余 元 素				
						Ni	Cr	Cu	Mo	V
ZG200-400	0.20	0.50	0.80	0.04	0.04	0.30	0.35	0.30	0.20	0.05
ZG230-450	0.30		0.90							
ZG270-500	0.40									
ZG310-570	0.50									
ZG340-640	0.60									

表 4-7 铸钢的力学性能(GB11352-89)

牌 号	最 小 值					
	屈服强度 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ /MPa ($\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$)	抗拉强度 σ_b /MPa ($\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$)	伸长率 δ /%	断面收缩率 ψ /%	冲击韧性	
					A_{KV} /J	a_{KV} /($\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{cm}^{-2}$)
ZG200-400	200 (20.4)	400 (40.8)	25	40	30	6.0
ZG230-450	230 (23.5)	450 (45.4)	22	32	25	4.5
ZG270-500	270 (27.6)	500 (51.0)	18	25	22	3.5
ZG310-570	310 (31.6)	570 (58.2)	15	21	15	3.0
ZG340-640	340 (34.6)	640 (65.4)	10	18	10	2.0

4. 易切削结构钢

在自动机床上进行高速切削时,对钢材的基本要求有三个:一是切屑易断;二是刀具不易磨损;三是加工表面光洁度高。含硫、磷、锰较高的易切削钢,恰好满足了这些需求。易切削结构钢牌号的表示方法是由“易”字的汉语拼音首位字母“Y”、两位阿拉伯数字(平均含碳量的万分数)及化学元素符号(正常含量的化学元素不标注)三部分按顺序组成,其牌号及化学成分见表 4-8。

表 4-8 易切削结构钢的牌号和化学成分(GB8731—88)

牌 号	化学成分/%						
	C	Si	Mn	S	P	Pb	Ca
Y12	0.08~0.16	0.15~0.35	0.70~1.00	0.10~0.20	0.08~0.15	—	—
Y12Pb	0.08~0.16	≤0.15	0.70~1.10	0.15~0.25	0.05~0.10	0.15~0.35	—
Y15	0.10~0.18	≤0.15	0.80~1.20	0.23~0.33	0.05~0.10	—	—
Y15Pb	0.10~0.18	≤0.15	0.80~1.20	0.23~0.33	0.05~0.10	0.15~0.35	—
Y20	0.17~0.25	0.15~0.35	0.70~1.00	0.08~0.15	≤0.06	—	—
Y30	0.27~0.35	0.15~0.35	0.70~1.00	0.08~0.15	≤0.06	—	—
Y35	0.32~0.40	0.15~0.35	0.70~1.00	0.08~0.15	≤0.06	—	—
Y40Mn	0.37~0.45	0.15~0.35	1.20~1.55	0.20~0.30	≤0.05	—	—
Y45Ca	0.42~0.50	0.20~0.40	0.60~0.90	0.04~0.08	≤0.04	—	0.002~0.006

二、合金结构钢

我国合金结构钢的编号是用数字和符号来表示:

(1) 合金结构钢牌号的开头两位数字代表碳的平均含量以万分之几表示,例如 40Cr 前面的“40”就代表含碳 0.4%左右。

(2) 用化学符号表示所含的合金元素。

(3) 化学符号后面的数字表示该合金元素的近似含量,其单位是百分之几,如果合金元素平均含量低于 1.5%,则可将数字略去。当平均含量大于或等于 1.5%至 2.0%时,则写“2”,依此类推。

例如:20MnV 钢,表示钢中平均含 C 量约 0.2%,含 Mn、V 量低于 1.5%。查有关手册可知 20MnV 钢含 0.17%~0.23%C、1.20%~1.60%Mn、0.07%~0.12%V。又如 20Cr2Ni4 钢,表示钢中平均含 C 量约 0.2%、Cr 约 2%、Ni 约 4%,(实际含量为 0.17%~0.23%C、1.25%~1.75%Cr、3.25%~3.75%Ni)。

(4) 滚动轴承钢在钢号前加“G”。Cr 含量以千分之几表示,例如 GCr15 钢中 Cr 含量约 1.5%。

1. 工程构件用钢(低合金结构钢)

低合金结构钢(亦称之为低合金高强度钢)是在普通碳素钢的基础上加入少量合金元素(不超过 2%~3%)提高其强度。主要用于取代普通碳素钢制造各种结构件,如:桥梁、船舶、车辆、压力容器、输油管道、钻井平台、建筑结构件、煤矿巷道支护结构件等等。因其强度较普

通碳钢高,所以可减小构件截面,从而节约钢材。通常一吨低合金结构钢可顶 1.2~1.3 吨碳素钢使用。例如目前用量最大、使用最广的 16 Mn 钢制造上述构件与碳素钢 Q235 比较,一般可节约钢材 20%~30%。我国制造重量较轻的所谓锰钢自行车就是用 16 Mn 制造车架的。

结合我国资源情况,目前已研制成功几十种低合金结构钢,列入 GB1591-88。按强度分类,从 300 MPa~450 MPa 共分四级。表 4-9 中列出了几种代表性的钢种、化学成分及主要力学性能及大致的用途。

表 4-9 常用低合金结构钢的牌号、成分、性能及大致用途(GB1591-88)

级别 /MPa	牌 号	化学成分/%									力学性能			
		C	Mn	Si	V	Ti	Nb	P	RE 加入量	其它	厚度或 直径 /mm	σ_b /MPa	σ_s ≥ /MPa	δ_5 ≥ /%
300	12Mn	0.09~ 0.16	1.10~ 1.50	0.20~ 0.55	—	—	—	≤0.045	—	—	≤16	440~ 590	295	22
	09MnNb	≤0.12	0.80~ 1.20	0.20~ 0.55	—	—	0.015~ 0.050	≤0.045	—	—	≤16	410~ 560	295	23
350	16Mn	0.12~ 0.20	1.20~ 1.60	0.20~ 0.55	—	—	—	≤0.045	—	—	≤16	510~ 660	345	22
	09MnCuPTi	≤0.12	1.00~ 1.50	0.20~ 0.55	—	≤0.03	—	0.05~ 0.12	—	Cu 0.20~ 0.40	≤16	490~ 640	345	22
400	16MnNb	0.12~ 0.20	1.00~ 1.40	0.20~ 0.55	—	—	0.015~ 0.050	≤0.045	—	—	≤16	530~ 680	390	20
	10MnPNbRE	≤0.14	0.80~ 1.20	0.20~ 0.55	—	—	0.015~ 0.050	0.06~ 0.12	0.02~ 0.20	—	≤10	510~ 660	390	20
450	14MnVTiRE	≤0.18	1.30~ 1.60	0.20~ 0.55	0.04~ 0.10	0.09~ 0.16	—	≤0.045	0.02~ 0.20	—	≤12	550~ 700	440	19
	15MnVN	0.12~ 0.20	1.30~ 1.70	0.20~ 0.55	0.10~ 0.20	—	—	≤0.045	—	N 0.010~ 0.020	≤10	590~ 740	440	19

16 Mn 是 1958 年我国试制成功的第一个低合金结构钢。用来代替 Q235 碳素钢(其屈服强度提高 50%),制造各种承受动负荷的焊接结构件,如:我国用此钢建造南京长江大桥、东风号万吨轮船、煤矿用的运输机溜槽中板、机头侧板,以及井巷支护构件 U 型钢等。

10 MnPNbRE 是耐磨、耐蚀的新钢种,稀土元素加入有增加耐磨、抗蚀性的作用。

通常认为 P 和 S 是钢中两个有害杂质,它们的存在会使钢的脆性增加,但也有好的一面,例如 P 加入钢中有抗大气腐蚀的作用(尤其钢中含铜时更显著)。10 MnPNbRE 钢把 P 提高到 0.06%~0.12%(普通碳钢中含磷 0.05%以下)就是为了增加其耐蚀性。

由于各类工程构件(桥梁、车辆等)要求增大承载能力,提高载重/自重比值,这就需要进一步提高低合金结构钢的强度,以减轻自重,节约钢材。近年来,在碳钢和低合金钢的基础上加入微量(添加量不超过 0.2%,甚至低至 0.001%)的合金元素,如 Ti、Nb、V 等,在钢中起到细化晶粒和弥散强化作用。

关于低合金钢结构钢的标准现已由 GB/T1591-94 代替 GB1591-88(见表 4-10 和表

4-11)。低合金结构钢的牌号表示方法与碳素结构钢一样,由代表屈服点的汉语拼音字母(Q)、屈服点数值、质量等级符号(A、B、C、D、E)三个部分按顺序排列组成(见表4-10)。例如,Q390A表示屈服点的数值为390 MPa,质量等级为A。

表 4-10 常用低合金高强度结构钢成分(摘自 GB/T1591—94)

牌号	质量等级	化学成分/%										
		C ≤	Mn	Si ≤	P ≤	S ≤	V	Nb	Ti	Al ≥	Cr ≤	Ni ≤
Q295	A	0.16	0.80~1.50	0.55	0.045	0.045	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	—		
	B	0.16	0.80~1.50	0.55	0.040	0.040	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	—		
Q345	A	0.20	1.00~1.60	0.55	0.045	0.045	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	—		
	B	0.20	1.00~1.60	0.55	0.040	0.040	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	—		
	C	0.20	1.00~1.60	0.55	0.035	0.035	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015		
	D	0.18	1.00~1.60	0.55	0.030	0.030	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015		
	E	0.18	1.00~1.60	0.55	0.025	0.025	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015		
Q390	A	0.20	1.00~1.60	0.55	0.045	0.045	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	—	0.30	0.70
	B	0.20	1.00~1.60	0.55	0.040	0.040	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	—	0.30	0.70
	C	0.20	1.00~1.60	0.55	0.035	0.035	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015	0.30	0.70
	D	0.20	1.00~1.60	0.55	0.030	0.030	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015	0.30	0.70
	E	0.20	1.00~1.60	0.55	0.025	0.025	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015	0.30	0.70
Q420	A	0.20	1.00~1.70	0.55	0.045	0.045	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	—	0.40	0.70
	B	0.20	1.00~1.70	0.55	0.040	0.040	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	—	0.40	0.70
	C	0.20	1.00~1.70	0.55	0.035	0.035	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015	0.40	0.70
	D	0.20	1.00~1.70	0.55	0.030	0.030	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015	0.40	0.70
	E	0.20	1.00~1.70	0.55	0.025	0.025	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015	0.40	0.70
Q460	C	0.20	1.00~1.70	0.55	0.035	0.035	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015	0.70	0.70
	D	0.20	1.00~1.70	0.55	0.030	0.030	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015	0.70	0.70
	E	0.20	1.00~1.70	0.55	0.025	0.025	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	0.015	0.70	0.70

注:表中的 Al 为全铝含量。如化验酸溶铝时,其含量应不小于 0.010%。

2. 机器零件用钢

(1) 渗碳钢

渗碳钢一般含碳量为 0.10%~0.25%,有的可达 0.3%,合金元素含量多在 1%~3% 之间,含镍的钢中合金元素的含量可高达 6%~7%。

合金渗碳钢中加入的合金元素,重要的作用是为了提高淬透性,主要有 Cr(<2%)、Mn (<2%)以及 Ni(<4%)。此外加入少量阻止奥氏体晶粒长大的元素,防止在渗碳过程中晶粒过分粗化,主要是 Mo(<0.6%)、Ti(<0.1%)和 V(<0.4%),而 Mo 又可进一步提高钢的淬透性。

表 4-11

常用低合金高强度结构钢性能(摘自 GB/T 1591—94)

牌 号	质 量 等 级	屈服点 σ_s /MPa				抗拉强度 σ_b /MPa	伸 长 率 $\sigma_s/\%$	冲击功, A_{KV} , (纵向)/J				180°弯曲试验 d =弯心直径 a =试样厚度(直径)	
		厚度(直径,边长)/mm						+20℃	0℃	-20℃	-40℃		
		≤16	>16~35	>35~50	>50~100			不小于				钢材厚度(直径),mm	
		不小于										≤16	>16~100
Q295	A	295	275	255	235	390~570	23					$d=2a$	$d=3a$
	B	295	275	255	235	390~570	23	34				$d=2a$	$d=3a$
Q345	A	345	325	295	275	470~630	21					$d=2a$	$d=3a$
	B	345	325	295	275	470~630	21	34				$d=2a$	$d=3a$
	C	345	325	295	275	470~630	22		34			$d=2a$	$d=3a$
	D	345	325	295	275	470~630	22			34		$d=2a$	$d=3a$
	E	345	325	295	275	470~630	22				27	$d=2a$	$d=3a$
Q390	A	390	370	350	330	490~650	19					$d=2a$	$d=3a$
	B	390	370	350	330	490~650	19	34				$d=2a$	$d=3a$
	C	390	370	350	330	490~650	20		34			$d=2a$	$d=3a$
	D	390	370	350	330	490~650	20			34		$d=2a$	$d=3a$
	E	390	370	350	330	490~650	20				27	$d=2a$	$d=3a$
Q420	A	420	400	380	360	520~680	18					$d=2a$	$d=3a$
	B	420	400	380	360	520~680	18	34				$d=2a$	$d=3a$
	C	420	400	380	360	520~680	19		34			$d=2a$	$d=3a$
	D	420	400	380	360	520~680	19			34		$d=2a$	$d=3a$
	E	420	400	380	360	520~680	19				27	$d=2a$	$d=3a$
Q460	C	460	440	420	400	550~720	17		34			$d=2a$	$d=3a$
	D	460	440	420	400	550~720	17			34		$d=2a$	$d=3a$
	E	460	440	420	400	550~720	17				27	$d=2a$	$d=3a$

因硅有降低碳在钢中扩散速度的作用,使渗碳过程减慢,所以过去都不用含硅的钢做渗碳零件。但后来有人发现,硅可使渗碳表层含碳量降低,碳浓度变化均匀,提高钢的力学性能,所以也采用了含硅的渗碳钢,例如,我国的 20SiMnVB(含 0.5%~0.8%Si)和原苏联牌号渗碳钢 25XΓCA(含 0.8%~1.1%Cr、0.8%~1.1%Mn、0.9%~1.2%Si)和 12XH₂C(含 0.8%~1.1%Cr、1.5%~2.0%Ni、0.9%~1.2%Si)中均含有硅元素。

渗碳钢用于制造要求表面硬度高、耐磨且受冲击的零件,例如汽车、拖拉机和矿用运输机、采煤机上的齿轮、轴齿轮等。

渗碳钢经渗碳淬火并低温回火后,表面硬度达 HRC60 左右,心部为 HRC35 左右(含碳高的渗碳钢心部硬度更高些)。

常用的渗碳钢根据淬透性的大小大致可分为以下四类(见表 4-12)。

第一类是碳素渗碳钢,常用的有 15 号钢、20 号钢。

第二类是低淬透性的合金渗碳钢,常用的有 20Cr、20CrNi、20MnV 等。

第三类是中等淬透性的合金渗碳钢,常用的有 20CrMn、20CrMnTi、20MnTiB、20SiMnVB、20CrMnMo 等。

第四类是高淬透性合金渗碳钢,常用的有 20SiMn2MoV、20Cr2Ni4 和 18Cr2Ni4W 等。

表 4-12

常用渗碳钢的钢号、成分、热处理、性能及用途

类 别	钢 号	化 学 成 分/%						热 处 理/℃				心 部 力 学 性 能 (不 小 于)					毛 坯 尺 寸 /mm	用 途
		C	Si	Mn	W	Cr	其它	渗碳	预处理	淬火	回火	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%	A_k /J		
碳素 渗碳钢	15	0.12~ 0.19	0.17~ 0.37	0.35~ 0.65				930	890± 10	700~ 800	200	375	225	27	55		25	活塞销等
	20Mn2	0.17~ 0.24	0.17~ 0.37	1.40~ 1.80				930	850~ 870	770~ 800	200	785	590	10	40	47	15	小齿轮、小轴、活 塞销等
低 淬 透 性	20Cr	0.18~ 0.24	0.17~ 0.37	0.50~ 0.80		0.70~ 1.00		930	880	800	200	835	540	10	40	47	15	齿 轮、小轴、活 塞 销等
	20MnV	0.17~ 0.24	0.17~ 0.37	1.30~ 1.60			V 0.07~ 0.12	930		880	200	785	590	10	40	55	15	同 上
	20CrV	0.17~ 0.23	0.17~ 0.37	0.50~ 0.80		0.80~ 1.10	V 0.10~ 0.20	930	880	800	200	835	590	12	45	55	15	同 上
	20CrMn	0.17~ 0.23	0.17~ 0.37	0.90~ 1.20		0.90~ 1.20		930		850	200	930	735	10	45	47	15	齿 轮、轴、蜗杆、活 塞销等
中 等 淬 透 性	20CrMnTi	0.17~ 0.23	0.17~ 0.37			1.00~ 1.30	Ti 0.04~ 0.10	930	830	860	200	1080	835	10	45	55	15	齿 轮、轴、摩 擦 轮 等
	20MnTiB	0.17~ 0.24	0.17~ 0.37	0.80~ 1.10			Ti 0.04~ 0.10	930		860	200	1130	930	10	45	55	15	代 20CrMnTi
	20SiMnVB	0.17~ 0.24	0.50~ 0.80	1.30~ 1.60			V 0.07~ 0.12 B 0.0005~ 0.0035	930		900	200	1175	980	10	45	55	15	代 20CrMnTi
	18Cr2Ni4WA	0.13~ 0.19	0.17~ 0.37	0.30~ 0.60	0.80~ 1.20	1.35~ 1.65	0Ni 4.00~ 4.50	930			200	1200		10	45		15	大型渗碳齿轮和 轴类
高 淬 透 性	20Cr2Ni4A	0.17~ 0.23	0.17~ 0.37	0.30~ 0.60		1.25~ 1.65	Ni 3.25~ 3.65	930										同 上

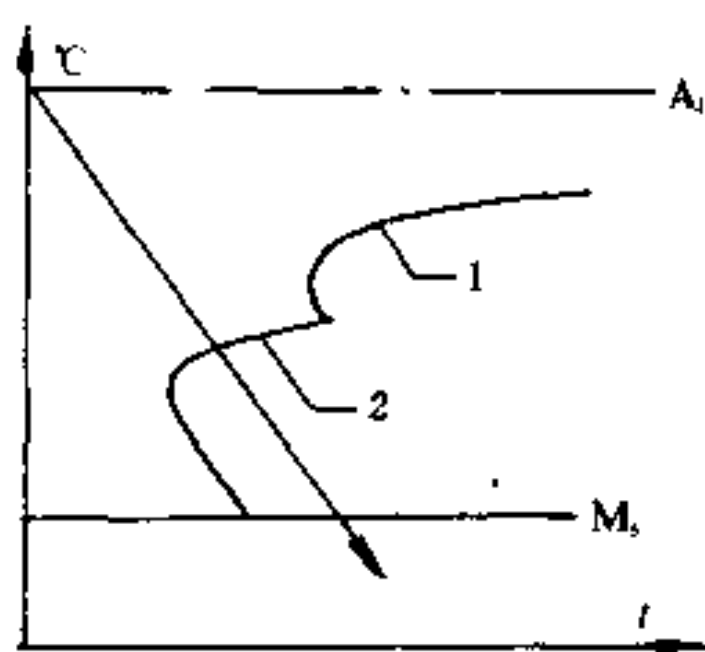


图 4-9 低强度合金渗碳钢 C 曲线示意图

1——珠光体转变;2——贝氏体转变

第一类碳素渗碳钢因其 C 曲线靠近纵轴,淬透性低,尤其是低碳钢淬透性更低(含碳越高淬透性越高,至共析成分含碳 0.77% 时达最高值)。因此,必须用水做淬火剂,从而使零件变形增大,故一般只用于形状简单、强度要求不高的耐磨零件,如套筒和小轴、自行车的挡和挡碗、链条等零件。

第二类低合金渗碳钢因合金元素 Cr、Mn、Ni 的作用,使 C 曲线中珠光体类组织转变的上半曲线右移较多(如图 4-9 所示),既使用冷却能力较弱的油淬火,也能使心部得到贝氏体组织,其强度有一定程度的提高。这类钢有代表性的是 20Cr,

它是当前国内外都广泛应用的钢种。20MnV 是 20Cr 的代用材料。Mn 和 Cr 都是提高淬透性的主加元素,它们提高淬透性的程度也差不多。但锰有一个最大缺点,即加热时奥氏体晶粒易长大,而在 20MnV 中加入钒,就是为了克服锰的这一缺点。

第二类合金渗碳钢用于要求一定强度、并在受冲击和磨损条件下工作的机器零件,如套筒、活塞销、小齿轮、凸轮等。

第三类钢因 C 曲线右移程度更大,淬火后零件心部可得到马氏体组织(或部分下贝氏体组织),所以强化作用大。经过渗碳的零件,淬火并低温回火后,其 σ_s 达 1000 MPa 以上。这类钢是汽车、拖拉机和矿山机械制造中应用最为广泛的渗碳钢。

20CrMnTi 是这类钢中有代表性的一种钢材,因其价格较便宜,工艺性能优良,汽车、拖拉机以及煤矿运输机等许多齿轮都用这种钢制造。Cr 和 Mn 是提高淬透性的主加元素,加入少量 Ti 是为了阻止渗碳加热时奥氏体晶粒长大,起细化晶粒的作用,以提高钢的韧性。因此,这种钢渗碳后可直接淬火,可减小零件变形。20CrMnTi 钢淬透性不太高,一般用于截面尺寸 $\Phi 30$ mm 以下承受高速、中等载荷或重载及冲击、摩擦的重要零件。

30CrMnTi 含碳稍高,淬透性比 20CrMnTi 大一些,所以这种钢适用于截面较大的渗碳齿轮。我国煤矿目前使用的一种采煤机(80 型)上的大模数齿轮和齿轮轴,就是用 30CrMnTi 钢制造的。

30CrMnTi 含碳较高,也可做调质钢使用。

20MnVB、20Mn2TiB 和 20SiMnVB 是 20CrMnTi 的代用材料(为了不用 Cr)。其中 20SiMnVB 的淬透性比 20CrMnTi 还高些,综合力学性能较优良。我国许多汽车厂、拖拉机厂、机床厂已比较广泛地用上述含硼(B)钢代替 20CrMnTi 钢制造齿轮,有的矿山机械厂也开始试用,如某些运输机的齿轮就是用 20MnVB 制造的。

根据工厂试用(齿轮)认为,这几种含硼渗碳钢,热处理后变形稍大些,变形规律性较差。

20CrMnMo 是性能比 20CrMnTi 更为优良的渗碳钢,其中 Mo 可以细化晶粒,并进一步提高淬透性。也是一种重要的齿轮用钢,常用于受冲击较大的零件,如矿用凿岩机的活塞等。

由于微量稀土元素对钢材性能的有益影响,近年来含稀土元素的新钢种引起国内外的普遍重视。我国在试制和试用稀土齿轮钢材方面也取得了可喜的成绩。例如某拖拉机厂原用 20CrMnTi 制造拖拉机中央传动齿轮,一般使用 2000 小时左右齿面就出现麻点剥落,甚至轮齿打断。经改用 20CrMnMo 制造后,虽然性能有所提高,但 5000 小时以内损坏的仍然

不少。最后采用 25MnTiBRE 制造,使用性能就大为改善,齿轮损坏率低于 20CrMnMo,使用寿命最长达 12300 多小时。我国稀土资源极为丰富,新的稀土钢种将会不断被研制出来。25MnTiBRE 已被列入国标 GB3077-88 中。

第四类钢中的 20Cr2Ni4A 和 18Cr2Ni4WA 是两个性能优良的含镍钢种。镍除了提高钢的淬透性外,更可贵的是,在含量很高(达 5%)的情况下,仍能提高各种热处理状态下钢的韧性,并可大大改善钢的抗冲击疲劳强度,这是含镍钢在重载下寿命较高的原因。20Cr2Ni4A 和 18Cr2Ni4WA 用于负荷大的重要齿轮和类似零件。我国采煤机大模数重载齿轮也用这类钢制造。但我国镍资源较缺,除了在特殊情况下非用不可时才选用,在一般情况下,应尽量不用含镍钢。近年来,我国科技工作者也研制出不含镍或少含镍的重载齿轮用钢,性能近似 18Cr2Ni4WA,如:15CrMn2SiMo 和 18CrMnNiMo,这两种钢正在某些矿山机械厂试用,以取代 18Cr2Ni4WA 钢。

必须注意,18Cr2Ni4WA 钢用普通的退火不能使之软化。因为合金元素的影响,这种钢的 C 曲线,没有珠光体转变,不论零件尺寸多么大,冷却速度多么慢,奥氏体也不能转变为硬度低的珠光体。也就是说这种钢只要加热到高温变为奥氏体组织后,不管快冷或慢冷,均将变为硬度高的马氏体(或贝氏体)组织。为使这种钢软化以便进行切削加工,就只有一种办法——正火加高温回火(640~670℃)。因为马氏体高温回火时分解为铁素体加渗碳体,从而使硬度大大下降。

20Cr2Ni4A 和 18Cr2Ni4WA 钢的缺点是价格高、切削加工性差和热处理工艺较复杂。

(2) 调质钢

调质钢是结构中用量最大、品种最多的钢种。含碳量大多为 0.25%~0.5%,合金元素含量一般在 1%~5% 范围内,属中碳钢。这类钢锻造性能及切削加工性好,调质处理后具有较高的强度和韧性,综合力学性能好。轴类零件常采用调质处理。为了充分发挥调质钢的潜力,提高表面硬度、耐磨性和疲劳强度等,调质钢在调质处理后,还可施以表面加热淬火及渗氮、软氮化等表面热处理。

根据淬透性及强度大小可将合金调质钢分为四类,常用的调质钢列入表 4-13 中。

第一类是优质中碳钢 40 钢、45 钢,其淬透性低,强度低。如 40 号钢 $\Phi 12$ mm,用水可淬透(90%~95% 马氏体)。因其价格便宜,在机械制造中应用极为广泛,如用来制造各种轴、键、销、链以及齿轮等,尤其是机床零件应用的更多。

第二类调质钢是在中碳钢的基础上加入合金元素 Cr、Mn、B 等,使钢的淬透性提高。这类钢一般用油冷却淬火。截面 $\Phi 20$ mm 油中可淬透,截面 $\Phi 50$ mm 水中可淬透(均指得到 90%~95% 的马氏体)。

40Cr 是我国目前用量最大的合金调质钢,矿山机械制造中应用的很多,例如运输机和采煤机中的一些轴和齿轮,以及煤电钻中的全部齿轮均用 40Cr 钢制造。但铬在我国也是比较缺少的,应尽可能少用含铬钢。而硅、锰、硼、钒都是我国矿产丰富的元素,所以 40Mn2、40MnB、40MnVB 等都是 40Cr 钢较合适的代用材料。

40Mn2 和 40Cr 淬透性相近,但因 Mn 钢加热时奥氏体晶粒易长大,力学性能稍低。锰钢中加入钒可克服此缺点,故 40MnVB 的力学性能较好。

第三类 Cr—Mn—Ti、Cr—Mn—Si 钢淬透性较大。截面为 $\Phi 35$ mm 的零件油冷可淬透。

Cr—Mn—Si 钢经适当热处理后,可获得优良的力学性能,故矿山机械中要求高强度的

表 4-13

常用调质钢的钢号、成分、热处理、性能及用途

类 别	钢 号	化 学 成 分 / %								热 处 理 / °C			力 学 性 能					退火或 高温回 火态 HBS≤	用 途
		C	Si	Mn	Mo	W	Cr	Ni	其它	淬火 /°C	回火 /°C	毛坯 尺寸 /mm	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	A_k /J		
碳素 调质钢	45	0.42~ 0.50	0.17~ 0.37	0.50~ 0.80						830~ 840	580~ 640	<100	≥600	≥355	≥16	≥40		167	主轴、曲轴、齿轮
	40Cr	0.37~ 0.44	0.17~ 0.37	0.50~ 0.80			0.80~ 1.10			850	520	25	980	785	≥9	≥45	47	207	轴类、连杆、螺栓、 重要齿轮等
	40MnB	0.37~ 0.44	0.17~ 0.37	1.10~ 1.40					B 0.0005~ 0.0035	850	500	25	980	785	≥9	≥45	47	207	主轴、曲轴、齿轮
	40MnVB	0.37~ 0.44	0.17~ 0.37	1.10~ 1.40					V 0.05~0.10 B 0.0005~ 0.0035	850	520	25	980	785	≥10	≥45	45	207	可代替 40Cr 及部 分代替 40CrNi 做 重要零件
低淬 透性																			
中 等 淬 透 性	38CrSi	0.35~ 0.43	1.00~ 1.30	0.30~ 0.60			1.30~ 1.60			900	600	25	980	835	≥12	≥50	55	225	大载荷轴类、车辆 上的调质件
	30CrMnSi	0.27~ 0.34	0.90~ 1.20	0.80~ 1.10			0.80~ 1.10			880	520	25	1080	885	≥10	≥45	39	229	高强度钢、高速载 荷轴类
	35CrMo	0.32~ 0.40	0.17~ 0.37	0.40~ 0.70	0.15~ 0.25		0.80~ 1.10			850	550	25	980	835	≥12	≥45	63	229	重要调质件、曲 轴、连杆、大截面 轴等
	38CrMoAl	0.35~ 0.42	0.20~ 0.45	0.30~ 0.60	0.15~ 0.25				Al 0.90~ 1.10	940	640	30	980	835	≥14	≥50	71		氮化零件、连杆、 缸套等
高 淬 透 性																			
高淬 透性	37CrNi3	0.34~ 0.41	0.17~ 0.37	0.30~ 0.60			1.20~ 1.60	3.00~ 3.50		820	500	25	1130	980	≥10	≥50	47	269	大截面并需高强 度、高韧性零件
	40CrMnMo	0.37~ 0.45	0.17~ 0.37	0.90~ 1.20	0.20~ 0.30		0.90~ 1.20			850	600	25	980	785	≥10	≥45	63	217	相当于 40CrNiMo 高级调质钢
	25Cr2Ni4WA	0.21~ 0.28	0.17~ 0.37	0.30~ 0.60		0.80~ 1.20	1.35~ 1.65	4.00~ 4.50		850	550	25	1080	930	≥11	≥45	71	269	力学性能要求高 的大截面零件
	40CrNiMoA	0.37~ 0.44	0.17~ 0.37	0.50~ 0.80	0.15~ 0.25		0.60~ 0.90	1.25~ 1.65		850	600	25	980	835	≥12	≥55	78	269	高强度零件、飞机 发动机轴等

结构件常用这类钢制造。例如：金属支架、运输机链环(20CrMnSi)、金属顶梁(30CrMnSi)、采煤机齿座和齿杆(35CrMnSi)等。

Cr—Mn—Ti 钢多用于轴类和齿轮，例如采煤机的一些受力大的齿轮轴就是采用 30CrMnTi 钢制造。

这类钢回火脆性较大，所以调质时高温回火后，必须把零件放入水中快冷，以避免第二类回火脆性出现。

第四类钢淬透性最高，例如 40CrMnMo 和 40CrNiMo 截面 $\Phi 70$ mm 的零件在油中冷却可以淬透。这类钢因含有 Mo，所以回火脆性敏感性小，用于制造大截面承受高负荷的机器零件。

(3) 弹簧钢

弹簧(板簧、螺旋弹簧等)及类似零件要求具有高的弹性，因此，要求弹簧材料具有高的弹性极限、高的屈服强度和抗拉强度。为达到这种性能要求，可通过合金化加适当热处理来实现。弹簧钢一般含碳量为 0.5%~0.9%，合金弹簧钢主要加入硅和锰，以提高淬透性和弹性极限。

常用弹簧钢的牌号见表 4-14。

表 4-14 弹簧钢的成分、热处理、力学性能及用途(GB1222—84)

钢号	化学成分/%					热处理/℃		力学性能					用途
	C	Si	Mn	Cr	V	淬火	回火	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	δ_{10} /%	ψ /%	
65	0.62 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	\leq 0.25		840±20	500±50	800	1000		9	35	截面<12 mm 的小弹簧
70	0.62 ~ 0.75	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	\leq 0.25		830±20	480±50	850	1050		8	30	截面<12 mm 的小弹簧
85	0.82 ~ 0.90	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	\leq 0.25		820±20	480±50	1000	1150		6	30	截面<12 mm 的小弹簧
65Mn	0.62 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	\leq 0.25		830±20	500±50	800	1000		8	35	截面<25 mm 的各种圆簧、板簧
60Si2Mn	0.56 ~ 0.64	1.50 ~ 2.00	0.60 ~ 0.90	\leq 0.35		870±20	480±50	1200	1300		5	25	截面<25 mm 的各种圆簧、板簧
50CrVA	0.46 ~ 0.54	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.80 ~ 1.10	0.10 ~ 0.20	850±20	500±50	1150	1300	10		40	截面<30 mm 的重载圆、板簧及低于 400℃ 工作的簧

碳素弹簧钢因淬透性差,只用于制造小尺寸弹簧(截面小于 $\Phi 12$ mm),合金元素硅、锰等不仅提高了钢的淬透性,而且使其弹性极限有很大提高,所以汽车、拖拉机及各种矿山机械的弹簧多用合金弹簧钢制造,尤其硅、锰钢价格也比较便宜,故应用较广。例如矿山机械中的螺旋弹簧(截面 $\Phi 25$ mm 以下)多用 60Si2Mn。普通的弹簧圈、弹簧挡圈等类似的小截面零件,可用淬透性差一些的 65Mn 制造。

弹簧的热处理都采用淬火加中温回火。因为中温回火后钢材具有最高的弹性极限,其硬度在 HRC40~45 范围。如图 4-10 所示。

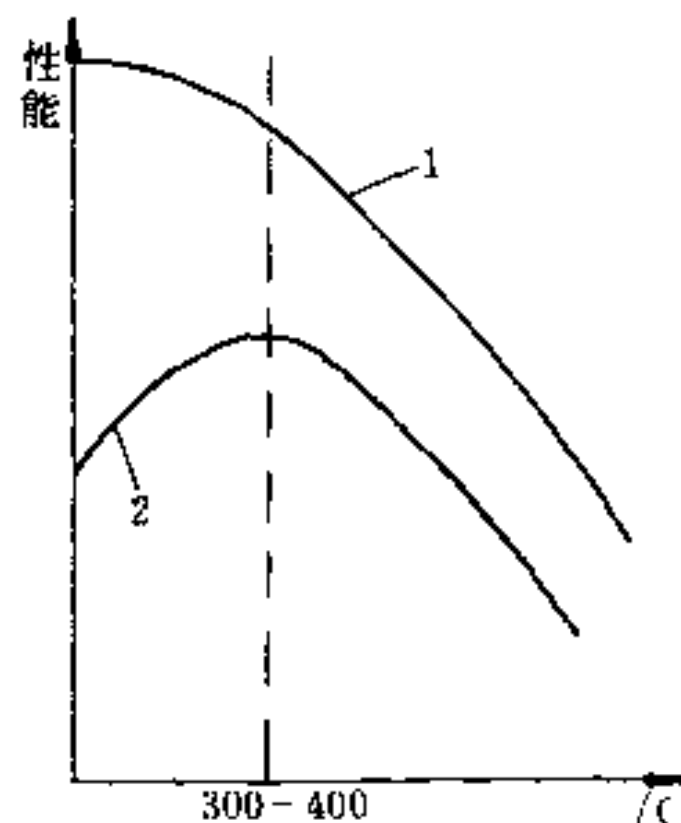


图 4-10 回火对弹性极限的影响
1---硬度;2——弹性极限

小弹簧用冷拔钢丝(叫白钢丝)制造,因冷拔(冷塑性变形)使之发生“加工硬化”,从而使弹性极限和强度极限都有很大程度提高,所以用这种钢冷卷成的弹簧不需淬火,只进行 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ 的低温回火以消除冷卷时所产生的内应力就可以了。内应力消除后可使弹性得到提高。

冷拔钢丝分普通级、高强度级和最高强度级三个等级。以 $\Phi 6$ mm 的白钢丝为例,普通级 $\sigma_b=1000$ MPa;高强度级 $\sigma_b=1200$ MPa;最高强度级 $\sigma_b=1600$ MPa。

(4) 滚动轴承钢

在各类高速运转的机械中都广泛地使用滚动轴承,用于制造滚动轴承的钢称为滚动轴承钢。根据滚动轴承的工作条件(承受交变载荷、较大的接触压力)要求轴承钢具有高硬度、高耐磨性、高接触疲劳抗力以及足够的韧性和耐腐蚀性。为此滚动轴承钢的含碳量是结构钢中最高的,一般为 $0.95\%\sim 1.15\%$ 。铬是其基本元素,含量在 $0.40\%\sim 1.65\%$,对于大型轴承的轴承钢还需加入 Si、Mn 等元素。合金元素的作用主要是提高淬透性,形成弥散分布的铬铁碳化物,并能保证足够的韧性。

滚动轴承钢的预备热处理是采用球化退火,以改善切削加工性,并为淬火做好组织准备,退火后的金相组织为铁素体+粒状碳化物,硬度低于 210HBS,便于切削加工。

最终热处理是淬火+低温回火,金相组织为回火马氏体+粒状碳化物+少量残余奥氏体,硬度为 HRC61~65,确保高硬度、高耐磨性及接触疲劳性。

轴承一般需磨削加工,为消除磨削应力、稳定组织、提高尺寸稳定性,常在磨削加工后再进行一次低温回火($120\sim 130^{\circ}\text{C}$,保温时间 $5\sim 10$ h),称为稳定化处理。常用的滚动轴承钢见表 4-15。

滚动轴承钢不只限于作滚动轴承还可作为工具钢来用。

表 4-15

常用滚动轴承钢的钢号、化学成分、热处理及用途

钢 号	化学成分/%								典型热处理			用途
	C	Cr	Mn	Si	Mo	V	RE	S、P	淬火/℃	回火/℃	回火后 硬度/HRC	
GCr9	1.0~ 1.10	0.9~ 1.2	0.2~ 0.4	0.15~ 0.35	—	—	—	—	810~830	150~170	62~66	10~20 mm 的 滚珠
GCr15	0.95~ 1.05	1.3~ 1.65	0.2~ 0.4	0.15~ 0.35	—	—	—	—	825~845	150~170	62~66	壁厚 20 mm 中 小型套圈、 $\Phi < 50$ mm 钢球
GCr15SiMn	0.95~ 1.05	1.3~ 1.65	0.9~ 1.2	0.4~ 0.65	—	—	—	—	820~840	150~170	≥ 62	壁厚 > 30 mm 的大型套圈、 $\Phi 50 \sim 100$ mm 钢球

思考题与习题

1. 名词解释

(1) 碳化物及非碳化物形成元素；(2) 扩大 γ 区和缩小 γ 区元素；(3) 回火稳定性；(4) 回火脆性。

2. 合金元素与铁形成何种固溶体？它们对铁素体的性能有何影响？

3. 合金元素对 Fe—Fe₃C 相图的 A_1 、 A_3 、 S 、 E 点的影响规律是什么？这种影响在生产中有什么意义？

4. 根据图 4-11 判断下列合金钢是亚共析钢还是过共析钢？

(1) Fe—0.45% C—10% W；(2) Fe—0.55% C—7% Cr；(3) Fe—0.60% C—5% Mo；(4) Fe—0.50% C—6% Ni；(5) Fe—0.30% C—2% Cr—8% W。

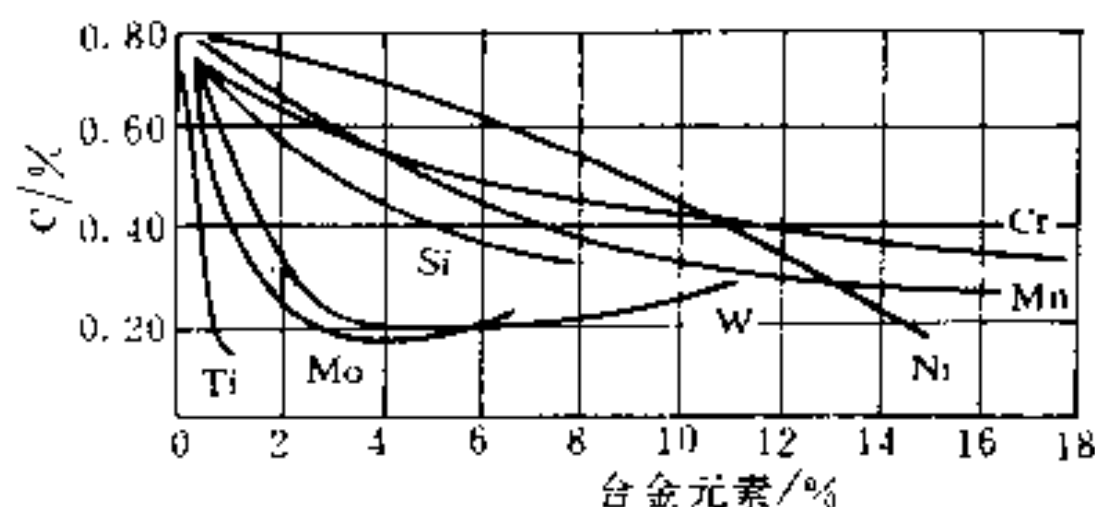


图 4-11 合金元素对共析点含碳量的影响

5. 碳化物形成元素有哪些？它们主要形成哪几种类型碳化物？举例说明各类碳化物主要存在于哪些钢中？它们的主要作用是什么？

6. 合金元素对 C 曲线的影响规律是什么？要求淬透性高的钢应该加入哪些合金元素？

7. 合金元素对马氏体开始转变点 M_s 有何影响？对钢中残余奥氏体数量有何影响？

8. 何谓碳钢？分哪几类？钢中的碳及常存杂质对钢的力学性能有何影响？
9. 低合金结构钢与碳素结构钢区别何在？低合金结构钢中的主加元素是哪些？它们的作用是什么？
10. 合金结构钢中合金元素的主要作用是什么？
11. 合金调质钢中常加入哪些合金元素？它们在调质钢中的作用是什么？
12. 常用调质钢有哪些？热处理特点是什么？
13. 合金渗碳钢中常含哪些合金元素？它们对渗碳钢的热处理、组织和性能有何影响？为什么常用渗碳钢在渗碳淬火之后均进行低温回火？
14. 为什么合金弹簧钢中以 Si 为重要合金元素？弹簧钢淬火之后为什么必须进行中温回火？
15. 为什么拖拉机、汽车齿轮常用 20CrMnTi, 而机床齿轮常用 45 钢或 40Cr 钢？
16. 对滚动轴承的性能有哪些要求？滚动轴承钢中基本合金元素及其作用是什么？滚动轴承钢热处理有何特点？

第五章 结构钢选用

在机械设计和制造过程中,合理地选用钢材是一个十分重要的问题,尤其是对于大批量生产的零件,这个问题更是不能忽视。选材不当,可能会造成零件的力学性能满足不了使用要求而引起过早地失效;也可能选用的钢材过于高级,超过了零件实际需要,浪费了钢材。因此选材时必须从多方面考虑,既要满足零件使用中各项性能要求(主要是力学性能)又要考虑其工艺性(如切削性、焊接性、可锻性、热处理性能等)和经济性,以便合理地使用钢材。

在各种金属材料中,结构钢种类最多,用量最大,本章着重从力学性能、淬透性(保证力学性能的关键)、工艺性以及钢材的灵活使用等几个方面讨论结构钢的选用问题。

第一节 力学性能与钢材选用

在设计机械零件和选用钢材时,要根据使用条件和损坏形式找出该零件的主要性能指标要求,例如起重机上的钢丝绳,在吊起几吨或几十吨重物时绝不允许断裂,设计人员选材时的主要依据是材料的抗拉强度。又如机床主轴,它的受力情况较为复杂,在工作中要承受弯曲、扭转、冲击、疲劳以及局部的磨损,因此要求它具有一定的强度、塑性、韧性和局部的耐磨性(高硬度),选材时就要从这几方面考虑,并且还要有适当的热处理工艺与之相配合。

金属材料的力学性能指标主要是强度、硬度、塑性、韧性。强度与韧性的配合称为综合力学性能。我们通常所说的提高材料的力学性能,一般都是指综合力学性能。

一、常用的力学性能指标

常用的力学性能指标是指在单向静拉伸条件下获得的强度指标(弹性极限 σ_e 、屈服极限 σ_s 、 $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度 σ_b)、塑性指标(延伸率 δ 、断面收缩率 ψ),以及一次摆锤冲击试验获得的冲击值(a_{KU} 、 a_{KV}),还有硬度试验得出的硬度值,常用的有布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HRC)和维氏硬度(HV)。

强度指标 σ_e 、 σ_s ($\sigma_{0.2}$)、 σ_b 可直接用于零件的强度设计,也是选材的主要依据,但也要根据零件使用要求,选择适当的塑性、韧性相配合,这样才能确保零件的使用安全。

金属常用的四大性能指标之间虽无严格的换算关系,但根据大量试验数据,可以看出它们之间的变化趋势,如图5-1所示。

强度、硬度与塑性、韧性呈反比关系,而强度与硬度呈正比关系,对于钢铁材料来说,硬度与强度的粗略换算关系是

$$\sigma_b \approx 3.5 \text{ HBS}$$

例如,测出零件的硬度值为300 HBS,那么,该零件用钢的抗拉强度 σ_b 大约为1050 MPa。我国计量科学研究院等单位通过大量试验和分析已经制定出黑色金属、铝合金、铜合金的硬度与强度换算值,但若要求得到较精确的强度数据,仍需通过拉伸试验。

硬度试验设备简单、操作方便、迅速,并且仅在零件表面局部体积内产生很小的压痕,一

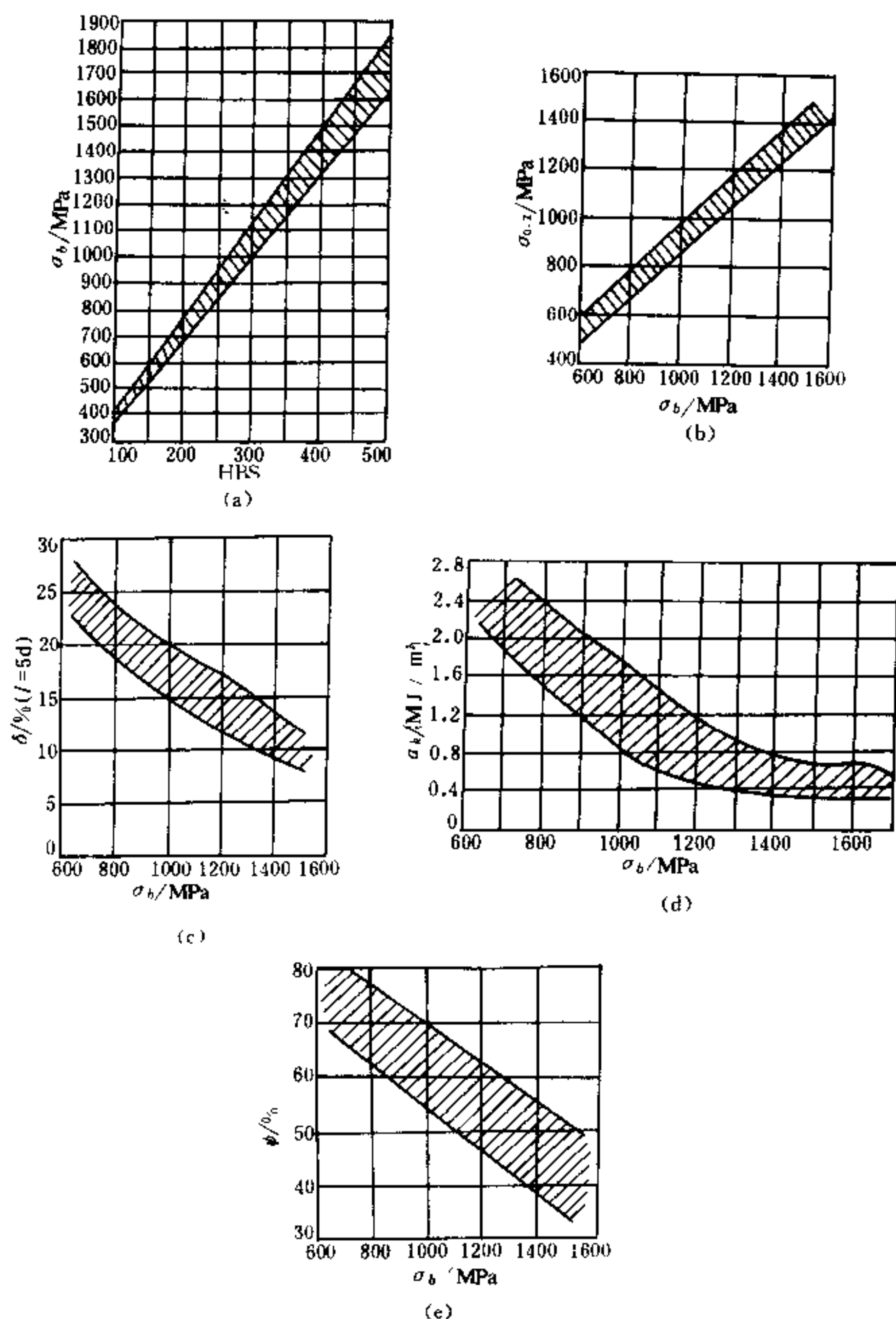


图 5-1 淬火回火后钢的各种力学性能之间的关系

般情况下不影响零件的使用,通常视为无损检测,所以在热处理后产品质量检验中得到广泛应用,在零件产品图纸上,一般也只注明硬度的要求。

选用的钢材能否达到零件要求的硬度值,主要取决于钢材中的含碳量,例如要求达到的硬度值为 HRC50~55,就必须选用含碳量在 0.4% 以上的钢。但对不同零件来说,材料成分一定,能否达到所要求的硬度值,还要看零件尺寸的大小,若零件的截面尺寸大,淬火冷却时,冷却速度会相应减慢,就有可能达不到零件要求的硬度值。在附录 3 中可以看出,对 45

号钢来说,水淬时,截面厚度在 3 mm 以下时,硬度可以达到 HRC54~59,而当零件厚度增加到 30~50 mm 时,同样水淬,硬度只能达到 HRC45~50,这就是所谓“尺寸效应”,所以,在选材时,必须考虑零件截面尺寸大小的影响。

二、弹性模量(E)与构件刚度

有些机械零件在使用过程中不允许产生过量的弹性变形,如机床主轴、镗床的镗杆等。材料的弹性模量表征材料对弹性变形的抵抗能力,其值愈大,则在相同外力作用下产生的弹性变形量愈小,所以也把它称为材料的刚度。根据虎克定律,在材料的弹性变形阶段有如下关系:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\Delta l/l_0}$$

$$\Delta l = \frac{Fl_0}{EA}$$

式中 Δl ——弹性变形量;

l_0 ——零件的长度;

F ——外加载荷;

A ——零件的截面尺寸;

E ——正弹性模量。

若零件的原长度和外加载荷不变,零件的弹性变形量主要取决于弹性模量 E 和零件的截面面积 A ,故 EA 称之为构件的刚度, EA 愈大,零件的弹性变形量就愈小。要增加构件刚度,减少使用中零件的弹性变形量,就需要选用弹性模量大的材料或增大零件的截面尺寸。当材料已定,弹性模量也就一定,就只有增加零件的截面尺寸来满足构件刚度的要求。必须指出,对于钢铁材料来说,含碳量、合金元素及各种热处理方法等对材料的弹性模量基本上无多大影响,所以,不能靠改变钢材牌号或者改变热处理方法来提高构件的刚度。

三、疲劳强度

在交变载荷作用下(变动载荷),零件所受应力远远小于金属屈服强度而发生断裂的现象,叫做金属的疲劳。应力愈小,金属发生疲劳断裂前所承受的交变次数愈多,当应力小到一定程度时,材料经过无数次应力循环也不会发生断裂,如图 5-2 中水平线所对应的应力值。材料经受无限次应力循环而不发生断裂的最大应力值称为该材料的疲劳极限或疲劳强度,通常以 σ_r 表示,如果交变载荷的最大载荷和最小载荷的大小相等、方向相

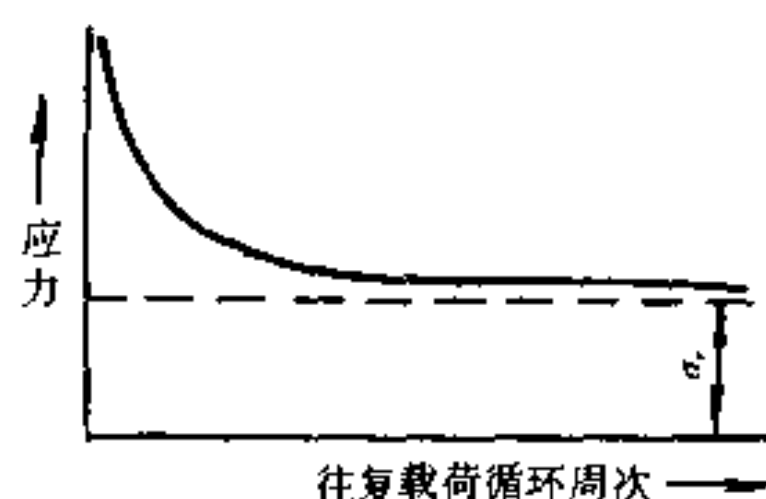


图 5-2 疲劳曲线

反则称为对称循环,疲劳极限以 σ_{-1} 表示,我们通常所说的疲劳极限大都指的是 σ_{-1} 。

机械零件疲劳破坏后其断口上将保留一些独特的特征。从宏观来看,一般有三个区,即疲劳源、疲劳裂纹扩展区和瞬时断裂区。如图 5-3 所示。

疲劳源是疲劳破坏的起始点,一般在机械零件的表面,因为表面常常存在各种缺陷及台阶,如加工痕迹、非金属夹杂、热处理裂纹等应力集中点比较多。如果零件内部存在有夹杂、孔洞或成分偏析等缺陷时,它们也可能成为内部或次表面的疲劳源。

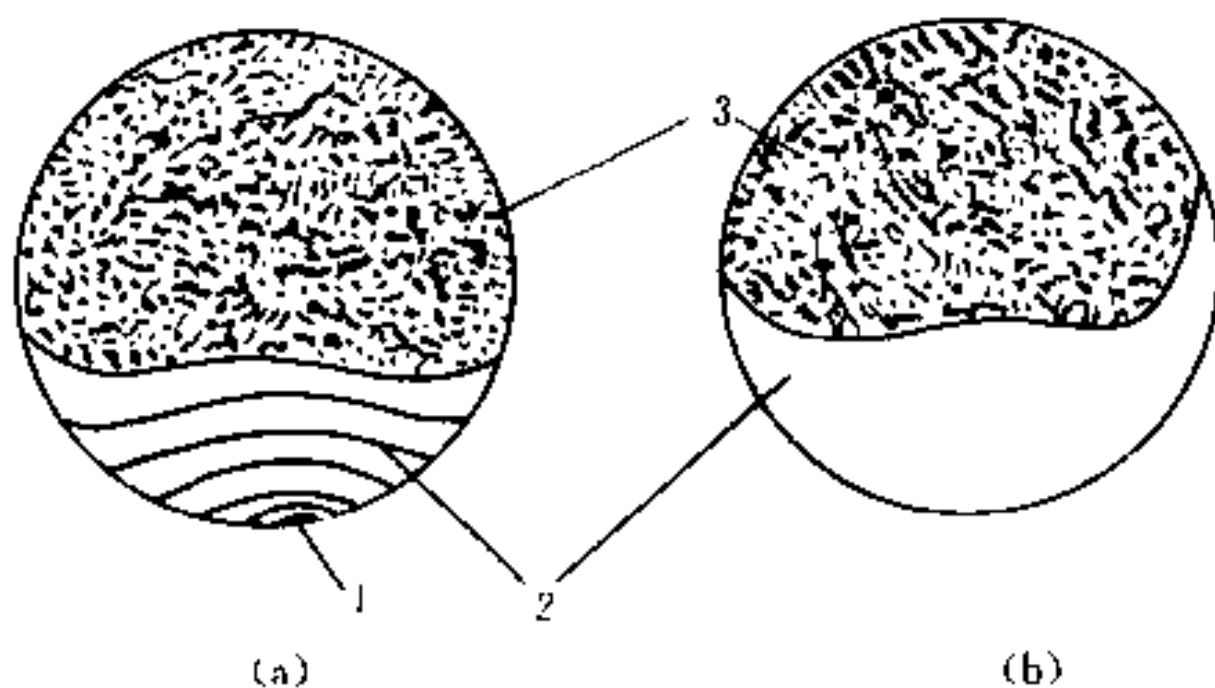


图 5-3 疲劳断口示意图

1——疲劳源；2——裂纹扩展区（贝壳状条纹或磨光面）；
3——最后断裂（粗晶粒或纤维状）

绝大多数零件都是承受周期交变载荷，如轴、齿轮、弹簧及钢轨、桥梁等，这些零件的损坏 90% 以上是属于疲劳断裂，因此，在设计及选择钢材时，疲劳极限也是非常重要的依据。

疲劳极限与硬度的关系如图 5-4 所示。它是由 15 种含碳 0.3%~0.7% 的各种碳钢和合金钢实验得出的，试样直径均为 6 mm，实验时保证全部试样都能淬透。由图 5-4 可以看出，当硬度小于 HRC40 时，疲劳极限 σ_{-1} 是随着硬度的增加而增加的，也就是说，各种钢只要处理成相同的硬度，其疲劳极限基本上相同，这说明合金元素对钢的疲劳极限没有明显影响，合金元素是通过提高钢的淬透性和改善钢的组织结构来提高疲劳极限的。碳素钢淬透性低，对截面尺寸较大的零件，不可能使其淬透，这时就可显示出合金钢的优越性。

当硬度超过 HRC40 时，疲劳极限与硬度间的关系就会在较大范围内变化。硬度过高钢的脆性增大，对疲劳极限不利。合金元素加入，降低钢的脆性就会使疲劳极限提高。对结构钢来说，疲劳极限与硬度之间的关系大致如下：

$$\sigma_{-1} \approx 0.5 \sigma_b \quad (\sigma_b \approx 3.5 \text{ HBS})$$

$$\sigma_{-1} \approx 1.75 \text{ HBS}$$

凿岩石用的风钻钎子是煤矿、地质、冶金、铁道等部门不可缺少的工具，使用中绝大多数是疲劳断裂，具有明显的疲劳断口特征。该工件属于细长杆件，直径 $\Phi 22 \sim 25 \text{ mm}$ ，长度 1~2 m，显然对于这类工件不宜采用热处理手段提高其硬度（热处理易产生变形），因此选材是十分重要的，长期以来选用 T8 钢轧制空冷后使用，但由于碳钢空冷后硬度不高，疲劳强度低，使用寿命短。我国研制成功的新型钎钢 55SiMnMo，经正火处理硬度可达 HRC40 左右，从而使其疲劳寿命大幅度提高。

表面淬火、渗碳、渗氮、碳氮共渗以及喷丸、滚压等表面强化手段都是提高疲劳强度的有效方法。机械零件经上述方法处理后，除了可以提高表面硬度外，还可以在其表面形成残余

疲劳裂纹扩展区比较光亮，呈磨光面状态，它是在交变应力作用下，断面反复挤压面成的，有时在磨光的表面上有一条条的同心弧线，称为贝纹线。这是由于载荷大小、机器运行中途停车起动等原因引起裂纹扩展产生相应的微小变化所造成的。

瞬时断裂区即最后断裂区，它呈粗晶粒状或纤维状（韧性材料为纤维状，脆性材料为粗晶粒状）。

机械零件断裂后，可根据宏观断口上的特征来鉴别是否由疲劳而造成的破坏。

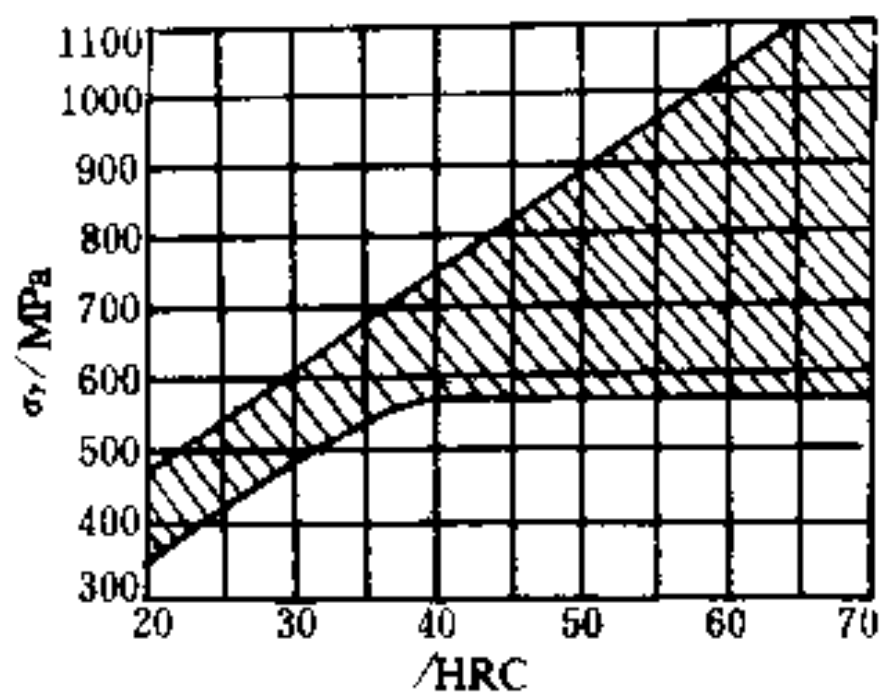


图 5-4 疲劳极限与硬度关系曲线

压应力,降低机械零件表面所承受的有效拉应力,提高了机械零件的疲劳强度。

四、冲击疲劳

冲击疲劳指的是重复冲击载荷所引起的破坏。各类机械中,即使是通常认为承受剧烈冲击载荷的机件(如锻锤锤杆),也很少是只经过一次或很少几次冲击就断裂的,多数是承受较小能量的多次冲击才会破坏。试验证明,当试样破坏前承受的冲击次数较少时(500~1000次)断裂的原因基本上与一次冲击相同,当冲击次数大于 10^5 次时,破坏后具有疲劳断口的典型特征。试样破断前所能承受冲击次数的多少(在一定的冲击能量下)称为多冲抗力。

按照传统观念,这类零件一般选用中碳钢和中碳合金钢进行调质处理,这样一来,使强度下降很多,例如,40号钢淬火后,回火温度由200℃提高到600℃, a_k 值由0.2 MJ/m²提高到1.4 MJ/m²,而抗拉强度 σ_b 则从1400 MPa下降到700 MPa(参见图3-43、3-44)。

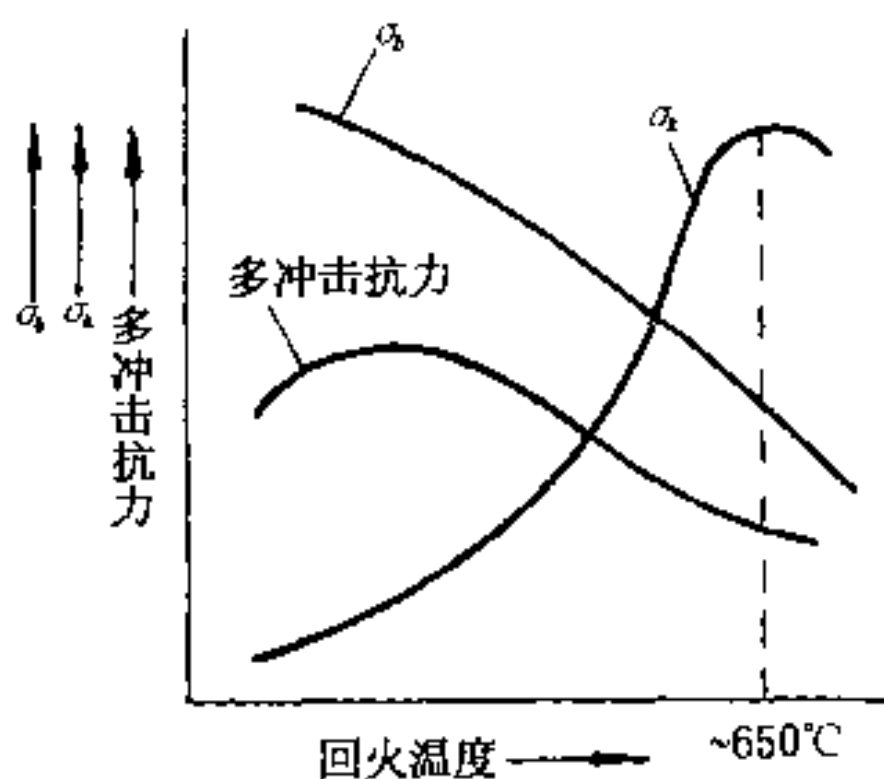


图 5-5 多冲抗力、 σ_b 、 a_k 与回火温度关系的示意图

大量试验表明,多冲抗力随回火温度的变化不是单调的变化,而是在某一温度下有一峰值(如图5-5所示),峰值对应的温度一般在低温或中温回火区域。在此温度范围内抗拉强度 σ_b 仍保持有较高的值。具体的回火温度取决于钢的成分和冲击能量的大小,因此承受多次冲击载荷的零件采用中温或低温回火比采用高温回火的调质处理更为适合。我国许多工厂根据这一观点改进了一些零件的热处理工艺,使其寿命得到提高。例如某厂模锻锤锤杆,原采用45Cr钢油淬,650℃高温回火,硬度低, a_k 值高。但在使用过程中常易折断,寿命低。后来改为淬火后450~500℃中温回火,虽然 a_k 值由原来的1.3 MJ/m²下降到0.4 MJ/m²

但锤杆的寿命却大幅度提高(未经热处理的使用寿命10~17天折断,650℃高温回火的寿命也只有一个月左右,450~500℃回火的可使用9~12个月)。

五、断裂韧性

断裂是机件的一种最危险的失效形式,为了防止断裂失效,在进行零件或构件的强度设计时,一般运用强度储备来确定零件或构件的许用应力和工作应力,即: $\sigma \leq \frac{\sigma_{0.2}}{n}$,式中 σ 为工作应力, $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度, n 为强度储备系数或安全系数(一般取1.5~2)。然后再根据材料的使用经验,对材料的塑性(δ 、 ψ)、韧性(a_k)等安全性能指标提出一定的要求。照这样设计的机件或构件一般认为是安全可靠的,既不会发生塑性变形,更不会发生断裂。但实际情况并非完全如此,如高强度钢和超高强度钢制的机件或构件及中、低强度钢大型构件(如火箭壳体、大型转子、大型焊接构件等)常在工作应力低于屈服强度的条件下发生脆性断裂,造成重大意外事故。这种在屈服强度以下发生的脆性断裂(断裂前不产生塑性变形或者发生极少量的塑性变形)称为低应力脆断。

大量断裂事例分析表明,机件或构件的低应力脆断是宏观裂纹失稳扩展引起的。在实际金属中,宏观裂纹往往是难以避免的,它可能是在冶炼和加工过程中产生的,也可能是在服役过程中产生的,当这种裂纹达到一定尺寸后,就会影响机件内部的应力状态和材料的断裂

性质。不同强度等级的钢材以及不同尺寸的机件,其影响结果是不一样的。

在断裂力学基础上,建立了金属材料抵抗裂纹失稳扩展能力的性能指标——断裂韧性,它与其它韧性指标一样,综合地反映了材料的强度和塑性。在防止低应力脆断选材时,根据材料的断裂韧性指标(与其它性能指标一样由实验测得)可以对机件允许的工作应力和裂纹尺寸进行定量计算,提出明确的数值要求。因此,它和常规性能指标一样具有重要意义。

超高强度钢、高强度钢的薄壁容器和中、低强度钢的大型构件易发生低应力脆断。因此在设计这类零件选材时,断裂韧性指标十分重要,在保证不产生塑性失稳的前提下,应该尽量选用断裂韧性高而屈服强度低的材料,以防止脆性破坏的发生。

第二节 淬透性与钢材选用

淬透性是钢的重要性能也是保证钢材力学性能的关键之一,用它来表示钢材接受淬火的能力,不同成分的钢,接受淬火的能力是不同的。设计人员应对钢的淬透性有充分的了解和认识,以便根据零件的使用条件和性能要求进行合理的选材。

一、在设计中如何考虑钢的淬透性

机械中受拉、压应力、剪切应力的许多重要零件如连杆、高强度螺栓等,要求表面和心部的力学性能均匀一致,此时应选择能将零件截面全部淬透的钢。根据零件截面尺寸的大小不同而选用不同淬透性的钢种。各种钢都有其临界淬火直径(即能淬透的最大直径),可查有关手册。举例如下:

40	临界直径约 $\Phi 20$ mm	水淬
40Cr(或 42Mn2V)	临界直径约 $\Phi 20$ mm	油淬
30CrMnSi	临界直径约 $\Phi 30$ mm	油淬
40CrMnMo	临界直径约 $\Phi 70$ mm	油淬

对某些允许心部力学性能稍低的零件,如承受扭转、弯曲的轴类可以选用淬透性较低的材料,淬火后表层硬度高、耐磨性高,而心部硬度低,韧性、塑性好,对零件使用寿命有利。

对有些零件不能选用淬透性高的钢制造,如焊接件,若选用淬透性高的钢材,就易在焊缝及热影响区内出现淬火组织,造成焊件开裂。

在设计选材时,除了从以上几方面考虑钢的淬透性外,还必须注意以下几点:

(1) 当钢材尺寸特别小时(均能淬透的情况下),只要采用不同的回火温度,各种钢的力学性能基本上相同,参考表 4-13。因此从《材料手册》上查找力学性能时,必须注意获得此性能的热处理条件,《材料手册》中各种钢的力学性能不是固定不变的,这些性能数据仅代表在一定的热处理条件下的情况。

(2) 在设计中不可根据从《手册》中查到的小尺寸试样性能数据用于大尺寸零件的强度设计,要考虑尺寸效应。

(3) 由淬透性低的钢制成的大尺寸零件,淬硬层很浅,在安排零件的加工工艺时,应考虑在淬火之前进行切削加工。

(4) 碳钢的淬透性很低,有时在设计大截面尺寸的零件(碳钢淬不硬)和某些非重要零件,用碳钢调质处理不如用正火经济些。如 45 钢调质后抗拉强度约为 650 MPa 而正火可达到 600 MPa,参考附录 4。

二、选用钢材时淬透性曲线的应用

当钢材尺寸很小时(保证能淬透),价格较贵的合金钢显示不出它的优越性,如 40 钢、40Cr、40CrNiMo,在保证完全淬透的情况下,其力学性能无多大差别,但对于大截面尺寸零件来说,它们的性能差别就会很大,这就取决于钢的淬透性了。钢的淬透性大小可以由淬透性曲线查出。图 5-6 是含碳量相同而合金元素不同的四种钢的淬透性曲线(40、40Cr、40Mn2、40MnB),从图中可以看出,40 钢离顶端 9 mm 处的平均硬度约为 HRC27,而 40Cr 则为 HRC17 左右,这说明 40Cr 钢的淬透性比 40 钢大的多。

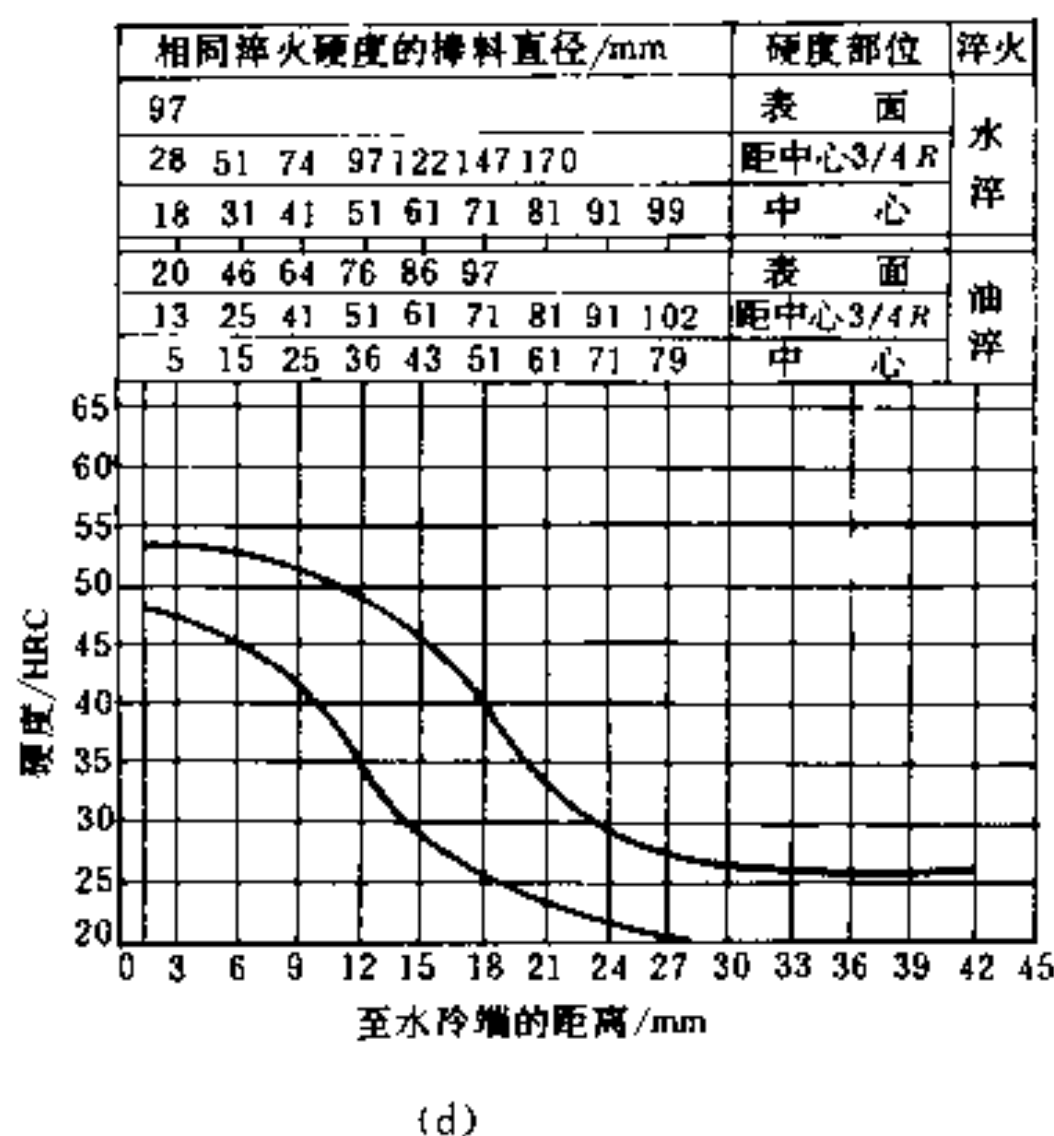
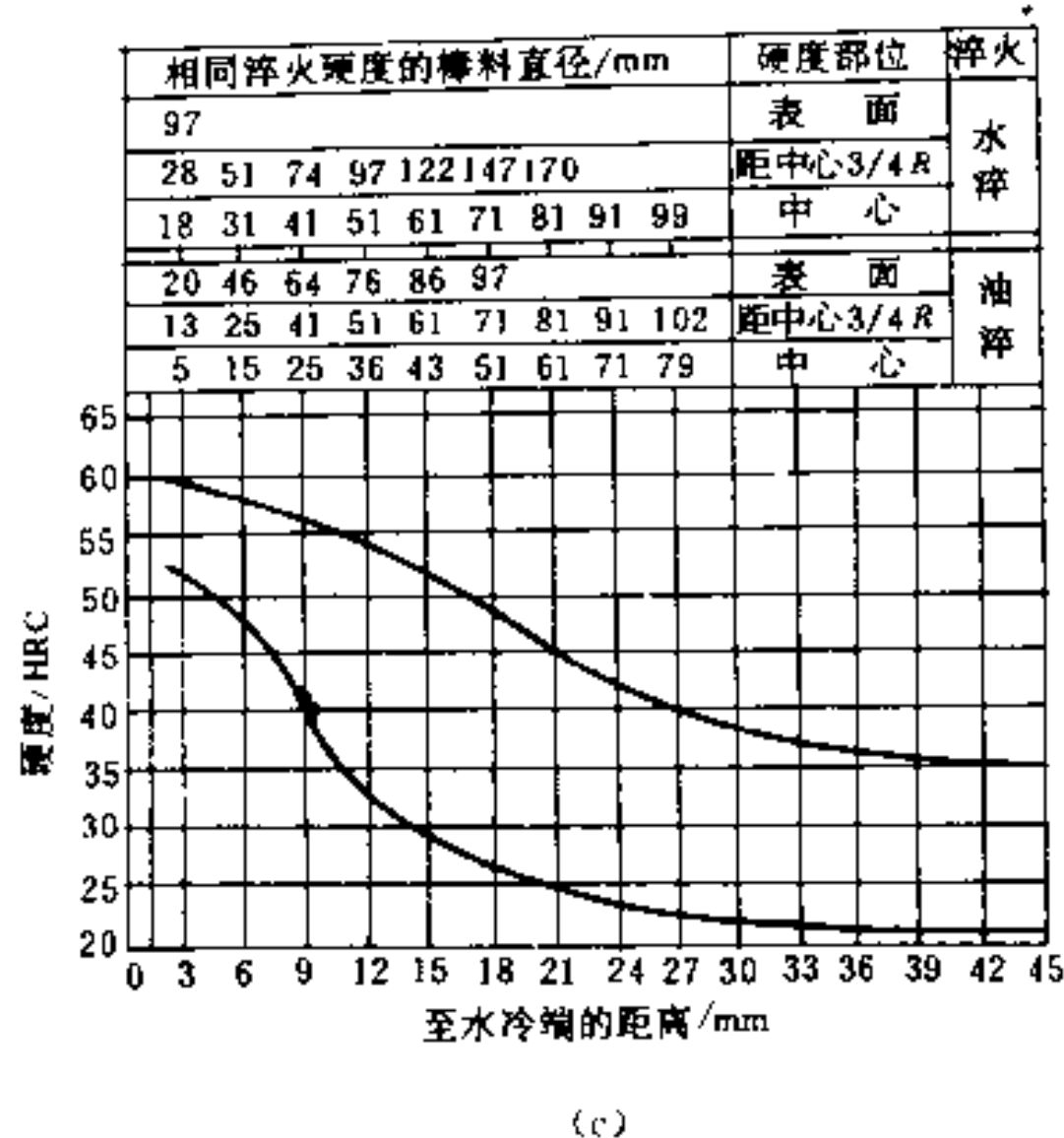
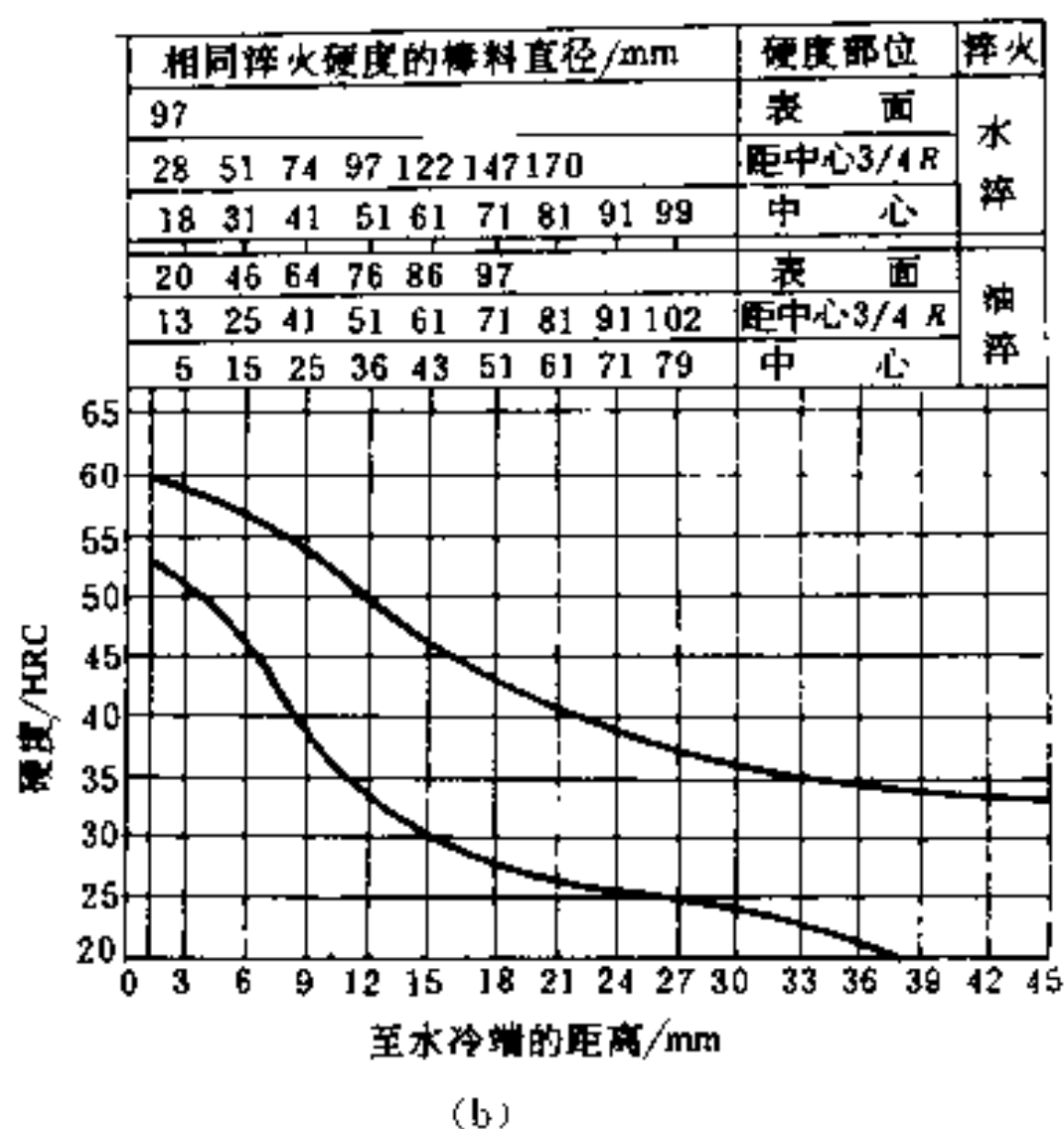
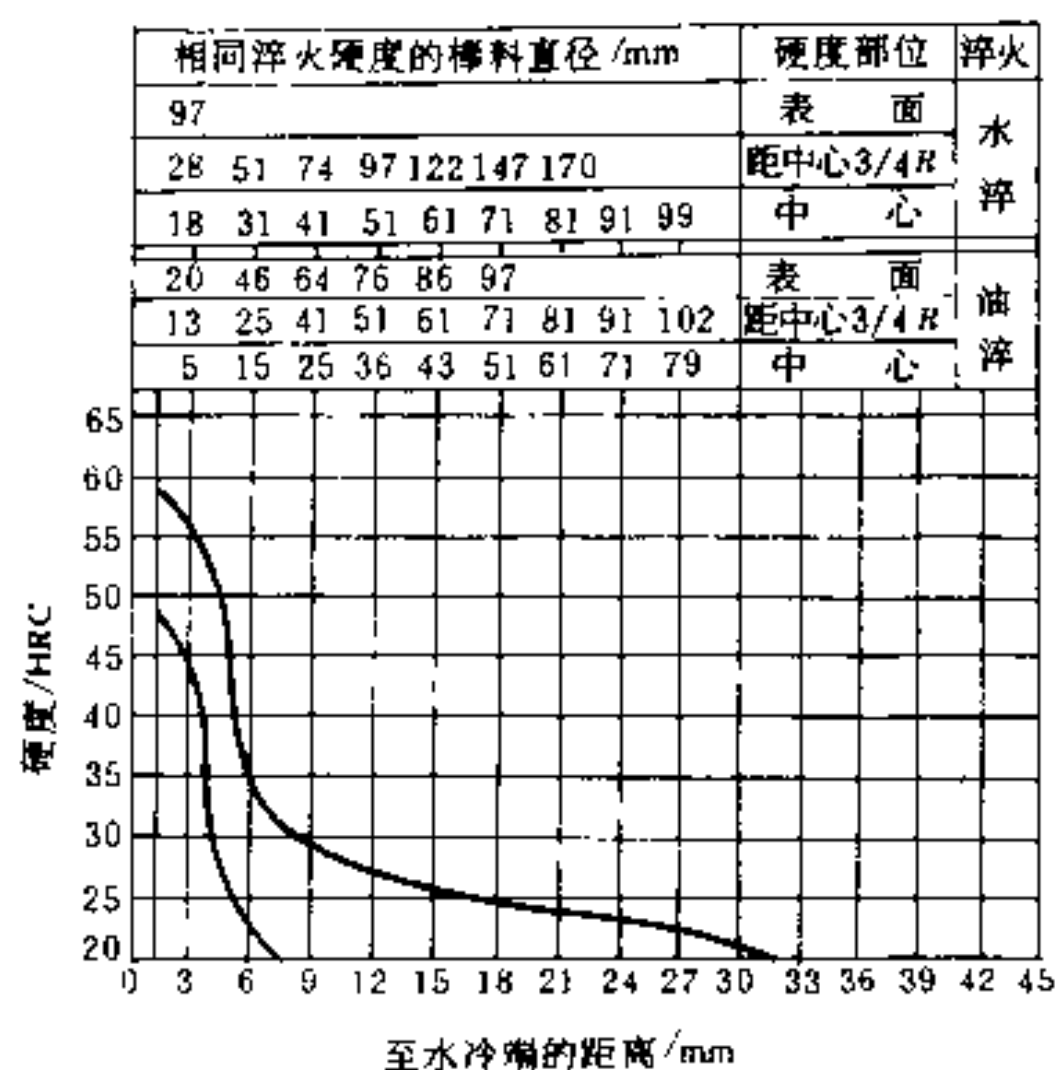


图 5-6 四种钢的淬透性曲线

(a) 40 号钢; (b) 40Cr; (c) 40Mn2; (d) 40MnB

以轴类零件为例,说明淬透性在钢材选用中的应用。对于承受扭转、弯曲的轴类零件,心部力学性能要求不高,一般淬硬层深度只要等于 1/4 半径就行了,也就是说从中心算起 3/4

半径处组织有 90% 的马氏体(承受应力大的重要轴类)或 80% 的马氏体(承受应力不大的轴类件)。各种钢含碳量与组织中马氏体百分比和硬度的关系如图 5-7 所示。各种不同直径的钢材淬火后其表面、中心、1/2 和 3/4 半径处与顶端淬火试样各处冷却速度的对应关系如图 5-8 所示。

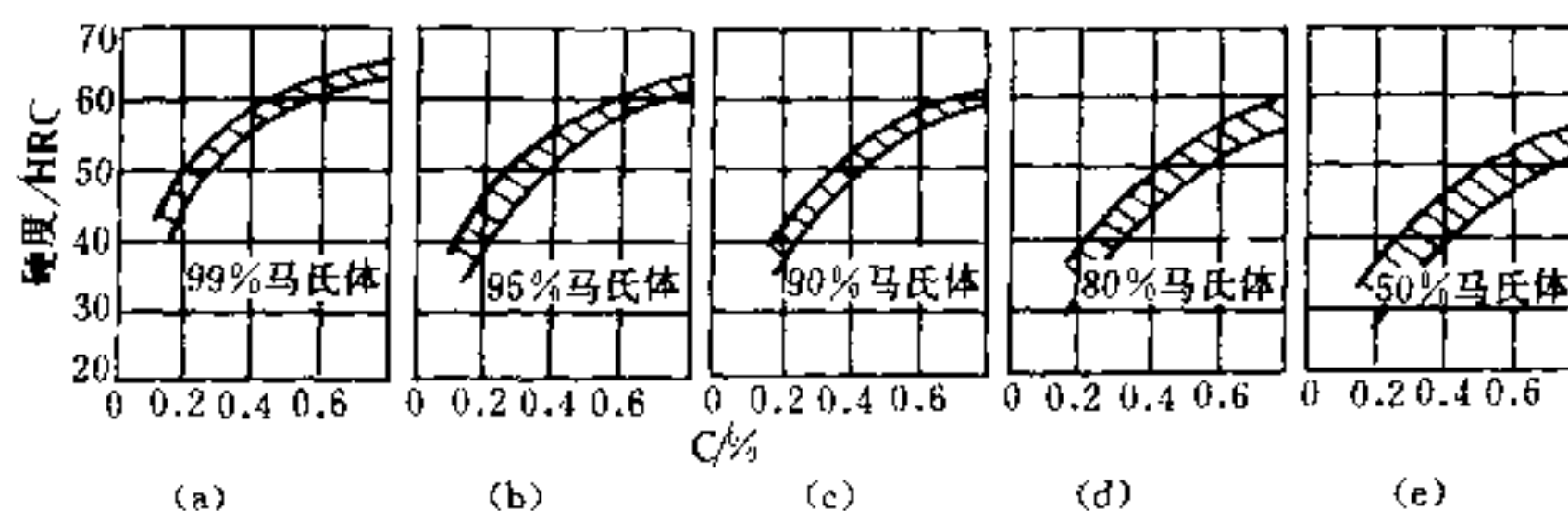


图 5-7 淬火钢的硬度与钢的含碳量和组织中马氏体百分数的关系

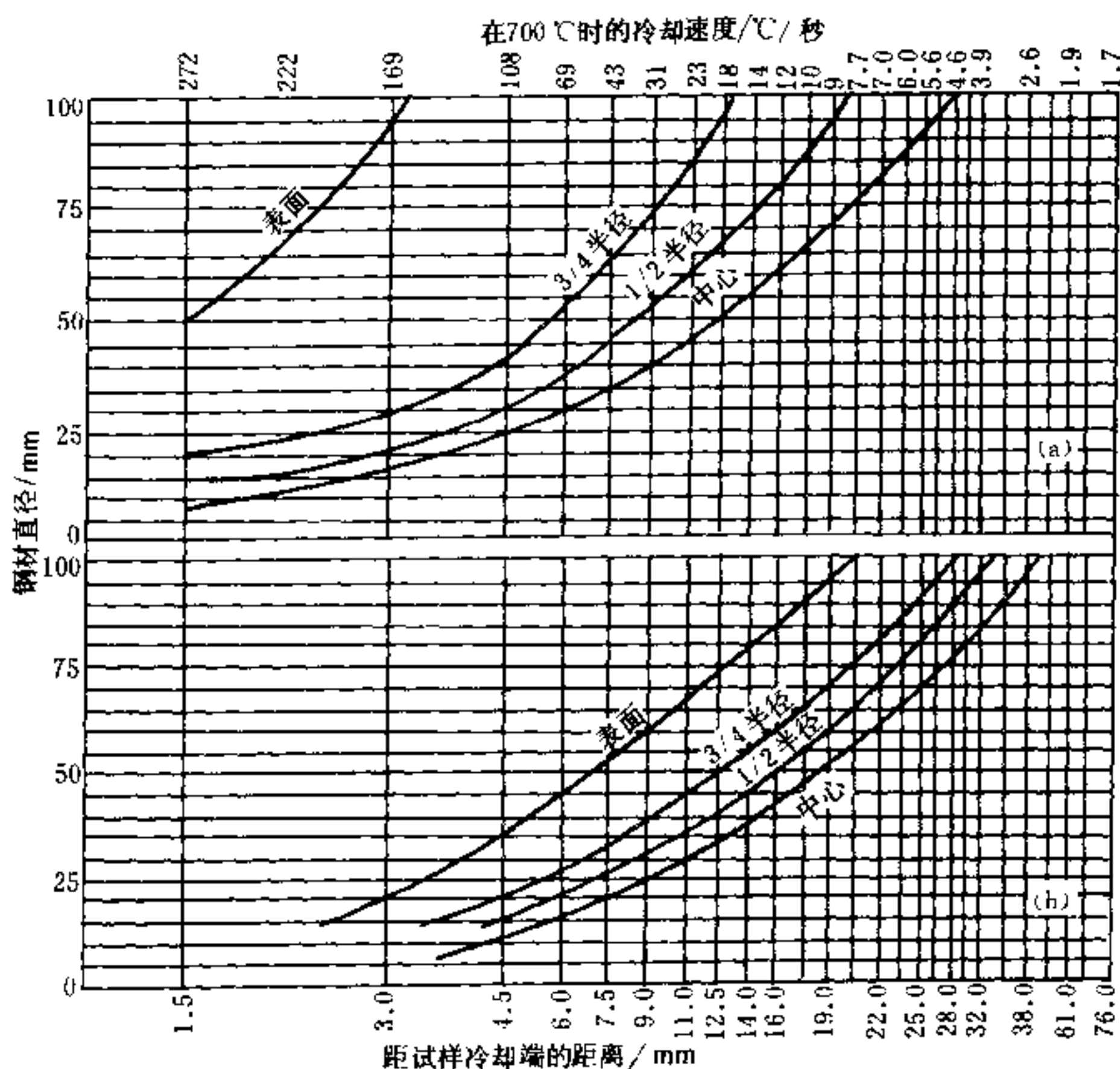


图 5-8 由淬透性曲线换算为截面上硬度分布的关系曲线

(a) 淬入缓动的水中; (b) 淬入缓动的油中

例如,某一承受应力不太大的轴,其直径为 $\Phi 40$ mm,拟用含碳量 0.4% 的钢制造,并用油作为淬火剂调质处理,试问选用什么样的钢材合适?

在这种条件下,调质淬火时轴的 3/4 半径处(从中心算起 15 mm 处)组织中有 80% 马氏

体即可,从图 5-7(d)中可以查出含碳 0.4%的钢,其组织中有 80%马氏体,硬度值约为 HRC46。

由图 5-8(b)查出直径为 $\Phi 40$ mm 的轴在油中淬火时其 $3/4$ 半径处的冷却速度相当于顶端淬火时距顶端约 9 mm 处的冷速,从我们给出的图 5-6 中四种含碳 0.4%钢的淬透性曲线上,可找出适合这种轴的钢材。

用这种方法验证一下某厂生产的汽车后桥半轴的选材。半轴直径 $\Phi 40$ mm,选用 40MnB 制造,硬度要求 HRC40~43,保证淬硬层深度达到半轴直径 $1/2$ (按测量到半马氏体区域计算),防止开裂用油作淬火剂。

首先按图 5-7(e)验证一下含碳 0.4%的钢,组织中有 50%马氏体时硬度能否满足要求(能满足)。

第二步,在图 5-8(b)中找出 $\Phi 40$ mm 直径的 $1/2$ 半径处相当于顶端淬火法距顶端多少毫米处的冷却速度(大约 12 mm 处)。

第三步,按照图 5-6(d)给出的 40MnB 淬透性曲线查出距冷却端 12 mm 处硬度能否满足 HRC40~43(能满足,选材正确)。

用这种方法选择钢材,在满足零件使用要求的条件下,可选用最便宜的钢。

第三节 工艺性能与钢材选用

工艺性能主要包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能及热处理性能等。铸造性能包括金属的流动性、收缩性等,它是铸造材料选材问题,在金属工艺学中已有介绍,本章不再讲述。

金属的可锻性常用金属的塑性和变形抗力来综合衡量。锻造时,需要把钢加热到临界温度以上,使之转变为塑性较高的奥氏体组织。温度愈高,金属塑性变形抗力愈小,也就愈易进行锻造。但锻造温度不能过高,如果加热至钢开始熔化温度附近(固相线)不仅表面氧化脱碳严重,而且氧会渗入钢件内部,在晶界上形成氧化层,使晶粒之间失去结合力,锻造时将发生像“豆腐渣状”的破裂现象,这种现象叫“过烧”。从铁碳相图上可以看出,含碳愈高,钢的熔化温度愈低,因而锻造温度范围愈窄,锻造性愈差。钢中含有形成碳化物的元素如 Cr、W、Mo、V 等,使可锻性下降,尤其是高碳高合金工具钢(如下一章介绍的高速钢和模具钢 Cr12),在锻造的加热温度下,组织中还有大量的合金碳化物,其锻造性能比碳钢要差很多。

焊接性好坏的主要标准是焊后产生裂纹的难易。不易产生裂纹的焊接性好,易产生裂纹的焊接性不好。钢的含碳量对焊接性影响很大,含碳量愈高,焊接性愈差,故可以把钢中含碳量的多少作为判断钢材焊接性的主要依据。除碳外,合金元素也都降低钢的焊接性。根据合金元素对焊接性影响的大小,可以折合成相当于含碳量多少的影响,即所谓“碳当量”,并按此值判断焊接性。可用下列公式来计算低合金钢的碳当量。

碳当量(%) = $C\% + \frac{Mn\%}{5} + \frac{Cr\%}{3} + \frac{Mo\%}{4} + \frac{V\%}{5} + \frac{Cu\%}{13} + \frac{P\%}{2} + \frac{Ni\%}{15}$, 如果碳当量小于 0.25%, 焊接性良好; 等于 0.25%~0.35%, 焊接性合格; 等于 0.35%~0.45%, 焊接性不好; 大于 0.45% 焊接性低劣。常用钢材的焊接性列于表 5-1。

表 5-1

常用钢材焊接性分类

焊接性等级	钢 的 牌 号	特 征
良 好	低碳钢:含碳小于 0.28%,如 Q235、Q255、10、15、20、25 等;低合金钢:15Cr、20Cr、16Mn、20Mn、15CrV 等	焊接规范、结构尺寸允许有大的变动,仍可获得高质量接头
合 格	中碳钢:0.28%~0.40%C, Q275、30、35 等; 低合金钢:20CrMnSi、20CrV、30Cr 等	裂纹产生倾向较小,调整焊接规范即可获得优良接头,厚板结构预热 150℃
不 好	中碳钢:0.40%~0.55%C, 40、45、50 等; 低合金钢:30CrMo、35CrMn、30CrMnSi、40Cr 等	裂纹产生倾向大,仅靠调整焊接规范很难获得优质接头,大多数情况需预热 150℃以上
低 劣	碳素钢含碳大于 0.55%, 65、70,各种高碳工具钢; 低合金钢:35CrMnSi、45Mn2、50Mn、55Cr、60Si2 等	产生裂纹倾向极大,必须严格控制工艺条件,焊前预热 200~450℃。焊后热处理

衡量材料切削加工性好坏的指标是切削时刀具的耐用度及被加工零件的表面粗糙度。钢材的硬度、强度愈低,切削时抗力愈小,刀具磨损愈慢,寿命愈长。但当其塑性高时,在切削过程中,刀具的刃口部分易形成切削瘤,而且发生“粘刀”现象,使刀具的寿命降低,加工后的零件表面粗糙度高,显然对切削加工不利。

钢的硬度和塑性是互相矛盾的两个性能指标,通常钢的硬度低,则塑性高,因而只有当钢具有一定的硬度时,其切削加工性能最好。对于车削加工,硬度 170~190 HBS 较好,而对拉削、插削或切齿加工,硬度在 190~210 HBS 范围内较好。各类切削加工性能较差的钢(如高碳钢、合金钢)可以通过适当的热处理方法来改善它的切削加工性。

第四节 钢材选用的经济性和灵活性

选用钢材时,应根据零件的使用性能要求首先考虑的是立足于我国资源条件。我国的富产矿源为锰、硅、钒、钼、稀土、硼和钨,而缺少铬、镍。因此,应尽可能不用含镍的钢,少用含铬的钢,在满足使用要求的前提下,选用价格便宜的钢。各种金属材料的相对比价见附录 9。

在实际工作中,常常会碰到某些零件的惯用钢材因一时缺少需要用其它材料代替,或者根据我国资源情况需要把某些惯用钢材淘汰而用新的材料代替等问题。此时,首先考虑的是钢的含碳量,因为碳是影响钢材性能的主要元素,所以代用钢材一般情况下含碳量要与原钢材相近。例如 45 钢与 40 钢,按材料标准,40 钢含碳量的上限 0.45%比 45 钢的下限 0.4%还要高,因此,这两种钢相互代用对零件的性能影响不太大。

淬透性是选择代用钢材是否适宜的重要标准。代用材料与原来使用的钢种淬透性必须相近。如果淬透性过低,热处理后力学性能达不到要求,如果淬透性过高,则大材小用造成不必要的浪费。

在机械制造业中使用极为广泛的 40Cr 和 20CrMnTi 可分别用不含铬的钢种 40Mn2、40MnB、40MnVB、35SiMn、42Mn2V 和 20MnVB、20MnTiB、20SiMnVB 来代替,这些代用钢的淬透性与 40Cr 或 20CrMnTi 相近。

虽然锰与铬提高钢的淬透性作用差不多,但 40Mn 比 40Cr 淬透性低,这是因为各类钢中都含有锰元素,40Cr 实际上是含有铬及锰(0.5%~0.8%Mn)的钢,因而用锰钢代替铬钢时,必须多加锰(如用 40Mn2 代替 40Cr)或另外加入能增加淬透性的合金元素(如 40MnB、35SiMn 等)。

第五节 典型零件的钢材选择及热处理

连杆、轴、齿轮是具有代表性的机器零件,由于使用中受力情况不同,钢材的选择和热处理方法也应有所区别。

一、连杆类零件

连杆类零件受力情况主要是拉力及压力,零件整个截面受力是均匀的。为了使零件有较高强度(σ_b 、 σ_s),所以选用的钢材应具有高的淬透性,经热处理后,使其心部强度也能得到大幅度提高。此类零件一般都进行调质处理。

例如,螺栓承受拉力或剪切力,这两种应力都是均匀地分布在整個截面上,所以重要的螺栓也选用淬透性较高的钢,以保证调质处理时整个截面能淬透,使心部强度得到提高。

矿用运输机的链条,主要是承受拉应力。虽然链环的截面不大(圆环链为 $\Phi 14$ 、 $\Phi 18$ 、 $\Phi 22$ mm),为了能使零件得到较高的强度,也需要采用淬透性高的合金钢,如 30CrMnSi、35CrMnSi(模锻链)和 20CrMnSi、20MnVB、20Mn2V 和 20MnV(圆环链)等。

二、轴类零件

轴类零件一般是承受弯曲和扭转应力,这种应力在轴的截面上分布是不均匀的,表面应力最大,中心应力为零,因此这类零件如本章第二节所介绍调质时并不需要整个截面淬透,只要能保证表面淬硬层为其半径的 1/4 即可。因此,一般的轴多用 40、45 钢制造,重要的轴可用各类合金调质钢制造(如 40Cr、35CrMnSi、42Mn2V、35CrMo、40CrMnMo 等)。

调质处理的轴和连杆类零件加工工艺一般安排如下:

备料 → 锻造 → 正火或退火 → 粗加工 → 调质 → 精加工

其中正火和退火目的是为了改善钢的切削加工性,一般碳钢是用正火,合金钢用退火。

调质安排在粗加工和精加工之间,如果安排在粗加工之前,加工时会把力学性能优良的淬硬层车去,同时调质后硬度较高,对切削加工不利。

此外,在某些特殊情况下轴类零件也可采用渗碳处理,如图 5-9 所示万能磨床内圆磨头主轴,为同时解决内锥孔及 $\Phi 25$ mm 直径处的耐磨性问题,可选用渗碳钢进行渗碳处理,工艺流程大致安排如下:

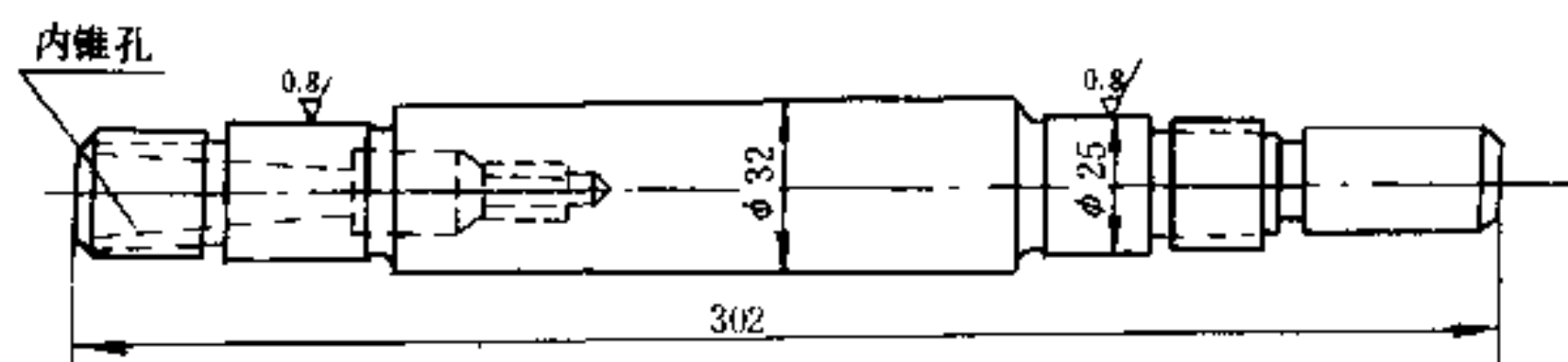


图 5-9 万能磨床内圆磨头主轴

备料→锻造→正火→车削→渗碳→车螺纹→淬火、回火→磨削。

三、齿轮

齿轮是用于传递动力、改变运动方向或速度的重要零件,在工作中它的受力情况比较复杂,因此齿轮一般都需经过适当的热处理,以提高承载能力和延长使用寿命。但是,如果热处理进行不当,会使齿轮性能恶化或精度降低,造成早期损坏或增大噪音。齿轮热处理是机械制造中的一个重要环节。

齿轮的主要损坏形式有齿面接触疲劳(齿面出现麻点或剥落)、磨损和轮齿折断等。

增加齿面强度可以大大提高接触疲劳抗力和耐磨性。轮齿折断是弯曲疲劳引起的,除了增加齿面硬度外,还必须使轮齿的心部具有足够的强度($\sigma_b \approx 1200 \text{ MPa}$ 、HRC35~40),此外采用渗碳、渗氮、喷丸、齿间滚压等处理手段,使齿轮表面产生压应力,均可提高齿轮的弯曲疲劳抗力,防止断齿,延长齿轮的使用寿命。

低碳合金钢以及中碳钢、中碳合金钢是齿轮常用的材料。各种热处理方法,如渗碳、渗氮、碳氮共渗、表面淬火、调质和正火等在齿轮制造中都被应用,因此,齿轮的选材和热处理方法的选用较其它零件复杂。

下面简要介绍齿轮常用的几种热处理方法及材料的选用。

1. 渗碳

如果选用的钢材淬透性合适,渗碳齿轮淬火后可以达到齿面高硬度(HRC58~60),而心部强度 $\sigma_b \approx 1200 \text{ MPa}$ (HRC35~40)的理想性能要求。因渗碳齿轮的性能较高,在汽车、拖拉机以及矿山机械制造业中得到了极其广泛的应用。

渗碳层含碳量0.8%~0.9%时性能最好,含碳量不足,淬火后硬度低,降低齿面耐磨性及抗接触疲劳能力,含碳过高,则降低其弯曲疲劳抗力。

普通方法渗碳后,表层含碳量一般都超过0.9%,为了保证含碳量在要求的范围内,可用红外线法、氧探头法及露点法等进行控制,以保证渗碳层的质量。

渗碳层的层深对性能有很大影响,渗层较厚,齿面的接触疲劳抗力增加,可以防止渗层剥落。但渗层太厚,不但需要延长渗碳时间,增加热处理费用,还会使表面压应力下降、表层含碳量增高,淬火后残余奥氏体和大块碳化物增多,导致疲劳强度和冲击韧性降低。因此渗碳层的厚度达到一定数值时性能较好,一般情况下,相当于齿轮模数的0.15~0.2倍比较合理,除特大齿轮外,一般不超过2 mm。

齿轮渗碳淬火后,渗层不允许有网状渗碳体及过多的残余奥氏体,一般奥氏体含量应低于5%~10%。齿轮心部组织通常为低碳马氏体,零件较大时,允许心部组织为屈氏体或索氏体,但不允许有过多的大块铁素体存在,否则会使心部硬度过低,使用时,心部易产生塑性变形,使渗层剥落。

与表面淬火相比,渗碳齿轮变形较大,为了减小变形量,在很多情况下,可以通过实践找出变形规律,在热处理前调整齿轮的机械加工尺寸,使热处理后能满足齿轮公差的要求。气体渗碳齿轮,可采用直接淬火、分级淬火或高频淬火等方法来减少变形量。

渗碳齿轮一般采用合金渗碳钢,而不采用碳素钢,因为碳素钢渗碳后淬火时要用水作淬火剂,变形量大。

提高渗碳钢的含碳量,不仅可以增加其抗弯强度和钢的淬透性,改善切削加工性,而且还允许适当的减小零件渗碳层的深度,缩短了渗碳时间。因而目前各国渗碳齿轮用钢的含碳

量比已往有所增加。模数不同的齿轮,可采用不同含碳量的钢。例如,小模数齿轮,一般采用 20CrMnTi 钢(0.16%~0.24%C),大模数齿轮,采用 30CrMnTi 钢(0.24%~0.32%C)。

对于承受冲击、重载荷的大模数齿轮,常采用韧性高、淬透性大的 18Cr2Ni4WA 和 20Cr2Ni4A 等高级渗碳钢,经热处理后,表面有高的硬度及耐磨性,心部又具有高的强度及良好的韧性和很低的缺口敏感性。

为了节约镍,在我国的标准中 15CrMn2SiMoA 的力学性能接近 18Cr2Ni4WA,故可作为 18Cr2Ni4WA 的代用钢。但应指出,这两种钢的切削性能较差。

渗碳齿轮加工工艺流程大致如下:

备料 → 锻造成型 → 正火或退火、调质 → 切削加工 → 渗碳 → 淬火 → 低温回火

锻造成型后,是采用正火、退火还是调质处理来改善切削加工性能,要根据所采用的材料来选定。

2. 表面淬火

目前,齿轮表面淬火最常用的加热方法仍是感应加热和火焰加热。齿轮感应加热淬火方法有全齿同时加热淬火、单齿加热淬火和沿齿沟加热淬火。火焰加热淬火也有类似的三种方法,回转淬火、单齿淬火和沿齿沟淬火。

表面加热淬火有很多优点,如淬火加热时,只产生极薄的氧化皮,淬火变形小等。感应加热设备较复杂,投资较大,但操作简单,质量稳定。火焰加热淬火的设备简单,对各种直径和模数的齿轮都能适用,但手工操作时,淬火质量不稳定,只有使用完善的测量和控制设备及机械化操作,才能保证质量。所以,目前感应加热淬火应用较为广泛。

高频感应淬火时,小模数齿轮($m=2\sim3$),可采用全齿淬火法,使用的环形感应器如图 5-10 所示。模数较大的齿轮($m>6$)可采用单齿加热淬火,如图 5-11 所示,而模数 3~6 的齿轮,一般情况下,不宜采用高频感应加热淬火,因为用全齿淬火法不能将齿沟淬硬,使轮齿根部表面产生拉应力,将使疲劳强度大大降低,而采用齿间加热,感应器制作困难。为了提高齿轮质量,必须设法使淬硬层沿齿廓分布,或将齿面和齿沟淬硬(齿顶可以不淬硬),使齿轮表面造成压应力。为此,对于中等模数的齿轮可以采用双频淬火法(高频和中频同时感应加热),高频优先加热齿顶,中频优先加热齿根和齿沟。但它需要大功率的高频设备,增加了热处理费用。模数大于 10 的齿轮可采用沿齿沟淬火法,见图 5-12,但每次只能淬硬一个齿沟,

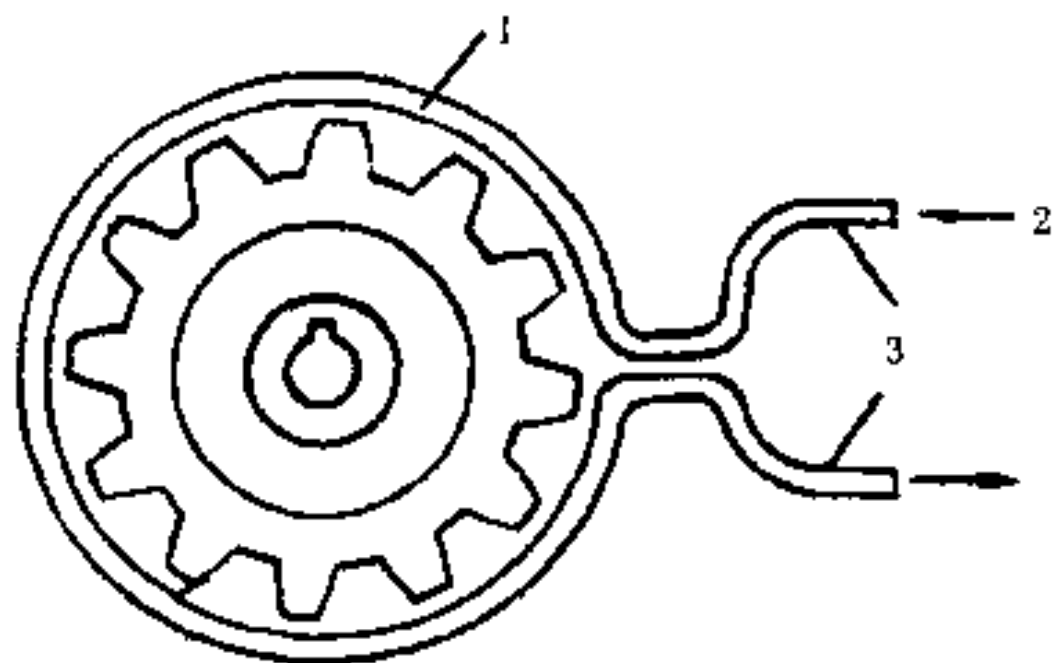


图 5-10 全齿淬火法

1——感应器;2——冷却水;3——接高频电源

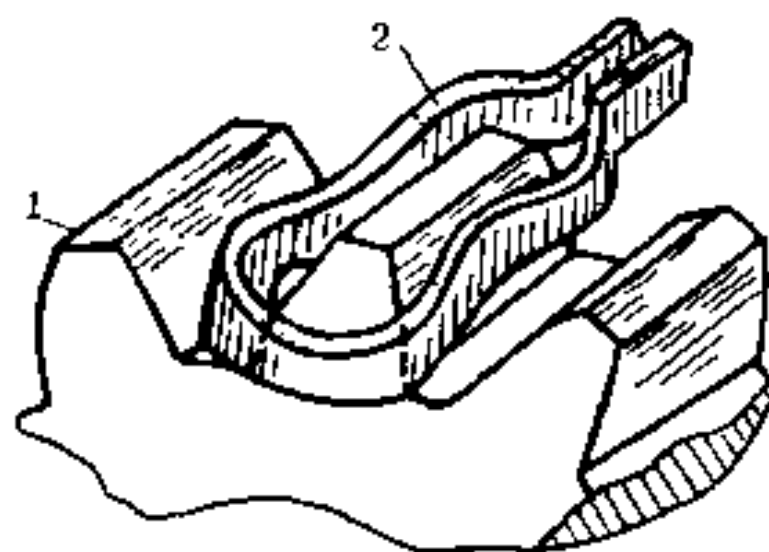


图 5-11 单齿淬火法

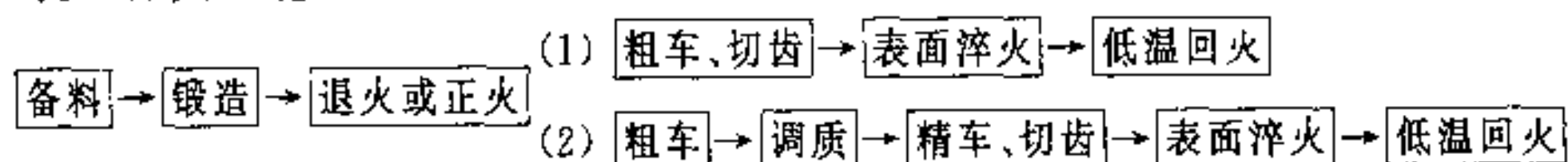
1——齿轮;2——感应器

与全齿淬火法相比,生产率低。目前多数工厂主要还是应用全齿淬火(小模数齿轮)及单齿淬火(大模数齿轮)两种方法。

表面淬火法仅加热工件的表面,所以不需要使用淬透性大的钢材,一般使用中碳钢(40、45)和低淬透性的合金钢(40Cr 等),淬硬层深度一般为 0.2~0.3 倍的齿轮模数。

与渗碳比较,表面淬火生产率高,热处理变形小,在机床制造业中得到了广泛的应用,但因表面淬火产生的表面压应力比渗碳处理的小,所以疲劳强度不如渗碳齿轮高。此外渗碳齿轮经淬火及回火后,表面硬度较高(HRC58~60),轮齿心部强度也能满足要求(HRC35~40)。总的来说,表面淬火齿轮的力学性能不如渗碳齿轮,因而汽车、拖拉机、矿山机械等繁重的齿轮,大多采用渗碳处理,而金属切削机床所用的齿轮受冲击力较小,选用表面淬火处理的比较普遍。

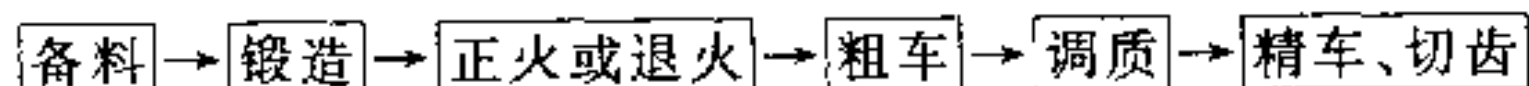
表面淬火齿轮加工工序大致安排如下:



3. 调质或正火

调质齿轮一般用中碳钢(40、45 钢)或低合金中碳钢(40Cr、40Mn、40MnB 等)制造。调质后硬度约为 200~300 HBS。相互配对使用的小齿轮硬度稍高对使用寿命有利,可以比大齿轮高数十个布氏硬度值。某研究单位认为齿轮对的硬度差在 70~120 HBS 范围内较好,过高或过低都会影响齿轮的承载能力。

调质齿轮的加工工序安排如下:



由于调质齿轮表面硬度低,而且也不存在表面压应力,故其承载能力和疲劳强度都比渗碳齿轮差,但因调质齿轮切削加工后不再进行热处理减少了淬火引起的变形,能保证齿轮的制造精度,故对大型齿轮特别适宜(一般认为 $\Phi 350$ mm 以下为小齿轮, $\Phi 350 \sim 500$ mm 为中型齿轮, $\Phi 500 \sim 1000$ mm 为大型齿轮, $\Phi 1000$ mm 以上为特大齿轮)。冶金、矿山机械中的某些重型齿轮也要选用调质处理,如矿用提升机齿轮等。

大型齿轮也常用正火处理,正火齿轮的力学性能不如调质齿轮,故仅用于制造不重要的大型齿轮,材料多用碳素钢 Q275 或优质碳素钢 40、45 号钢。

4. 渗氮

渗氮齿轮需要用专门的中碳合金钢制造,最常用的是 38CrMnAl。齿轮在精加工之前预先进行调质处理。由于渗氮温度低,渗氮后也不再进行热处理,变形小,易于得到高精度齿轮。

渗氮齿轮硬度最高、变形最小,但因渗层薄,承载能力不如渗碳齿轮,所以,一般齿轮较少采用渗氮。

各种不同热处理的齿轮所需材料归纳起来一般为:

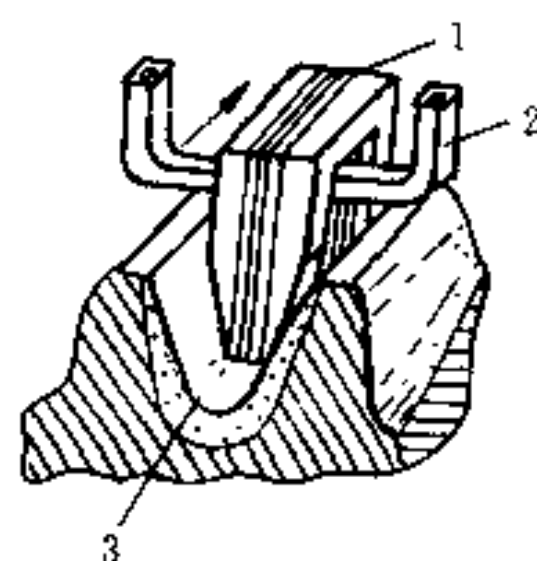


图 5-12 沿齿沟淬火法

1——导磁体;2——感应器;3——淬硬层

(1) 渗碳齿轮 各种渗碳钢,包括淬透性较低、较高的以及最高的各种合金渗碳钢均被采用。20CrMnTi、30CrMnTi 是常用的渗碳齿轮钢。载荷重、冲击力大的可用 20Cr2Ni4A 和 18Cr2Ni4WA 钢。渗碳齿轮一般不用碳素钢;

(2) 表面淬火齿轮 主要用碳素调质钢(40、45 号),也用淬透性较低的合金调质钢(40Cr、42SiMn、40MnB 等);

(3) 调质齿轮 用一般碳素钢(40、45 号)或淬透性较低的合金调质钢(如 40Cr、40MnB 等);

(4) 正火齿轮 用碳素结构钢 Q275 或优质碳素结构钢(40、45 号);

(5) 渗氮齿轮 渗氮专用钢 38CrMnAl 等。

由于热处理方法和使用材料不同,齿轮承载能力也不相同。可分为下列几类:

(1) 高承载能力的重要齿轮,如低碳合金钢渗碳齿轮。

(2) 中等承载能力的齿轮:① 中碳钢和中碳合金钢表面淬火齿轮;② 中碳合金钢渗氮齿轮。

(3) 较低承载能力齿轮:① 中碳钢调质齿轮,一般硬度为 250HBS 左右;② 中碳钢正火齿轮。

(4) 低承载能力齿轮:① 中碳铸钢齿轮(主要用于 $\Phi > 500$ mm 的大齿轮),比锻钢齿轮强度低 10%左右;② 铸铁齿轮。

思考题与习题

1. 结构钢的选用原则有哪些?

2. 常用的四大力学性能指标是什么?它们之间有什么关系?为什么零件图纸上通常只标注硬度要求?

3. 镗床的镗杆刚度不足,镗出的零件内孔会出现什么现象?采用淬火方法提高其强度能否将刚度提高?为什么?

4. 什么叫金属的疲劳和疲劳极限?疲劳极限的高低主要取决于材料的什么性质?提高疲劳极限的方法有哪些?

5. 什么叫多冲抗力?承受冲击载荷的凿岩机钻杆能否以冲击韧性作为主要性能指标进行选材和制定热处理工艺?为什么?

6. $\Phi 60$ mm 的轴,淬火后要求心部硬度为 HRC30~35,表面硬度为 HRC50~55,利用书中给出的几种淬透性曲线选用最适宜的钢种,并说明原因。

7. 齿轮在以下情况宜选用何种钢材和热处理方法?

(1) 承受较低载荷的大尺寸齿轮($\Phi 600$ mm 以上);

(2) 齿轮精度要求较高,但缺少磨齿机的情况下;

(3) 齿轮承受较大载荷,要求齿面耐磨性好;

(4) 机床小模数齿轮。

8. 一般结构钢含碳量多在 0.5%以下,但滚动轴承用含碳 0.95%~1.15%的 GCr15 钢,凿岩机活塞用 T10V,精密机床丝杠用 T10、T11、T12、9MnV 等工具钢,这是为什么?

9. 某载重汽车发动机的气缸盖螺栓,原选用 40Cr 钢调质处理,硬度为 HRC33~35,后

改用 15MnVB 钢 880℃油淬、200℃低温回火,硬度 HRC38~41,提高使用寿命 1.5 倍,试分析原因。

10. 从典型零件(连杆类、轴类、齿轮类)受载及失效特点说明它们的选材和热处理有什么不同?为什么煤矿下采掘机械齿轮多采用合金渗碳钢制造?

11. 利用书后附录 5 说明在图纸上如何标注热处理技术条件?试举例说明。

12. 各种不同热处理齿轮选材有什么不同?

第六章 其它金属材料

第一节 工具钢

在机械制造中,都要使用各式各样的工具,如车刀、铣刀、冷冲压模、热锻模等,用来制造这些工具的钢材称为工具钢,它们都是在磨损条件下工作,所以要求高硬度、高耐磨性。但由于它们具体工作条件不同,而各自又有特殊要求,如刀具的主要矛盾是硬度;高速切削时要求红硬性好;冷模具要求热处理变形小;热模具要求在高温下保持高强度和韧性,以及耐热疲劳性好;量具则要求在热处理后组织均匀稳定,在使用过程中不变形,因此各类工具使用的钢材和热处理方法也不一样。常用工具钢分为碳素工具钢及合金工具钢。

一、碳素工具钢

这类钢含碳为 0.65%~1.36%,可满足高硬度、高耐磨性要求、但其塑性较低,为改善此性能,故有害杂质 S、P 的含量控制得更为严格,规定含 $P \leq 0.035\%$ 、 $S \leq 0.03\%$ 。所以碳素工具钢均属优质钢。

碳素工具钢的牌号以“T”字开头(“T”系“碳”字汉语拼音的第一个字母),后面的数字表示平均含碳量的千分之几,如 T7、T8……T12 分别表示含碳量为 0.70%、0.80%……1.2% 的碳素工具钢。其中含杂质更少的($S \leq 0.02\%$, $P \leq 0.03\%$)称高级优质碳素工具钢,其表示方法是在碳素工具钢的牌号后面加“A”。如 T12A 表示平均含碳量为 1.2% 的高级优质碳素工具钢。碳素工具钢的牌号、化学成分及用途见表 6-1。

碳素工具热处理后硬度 $\geq HRC62$,其耐磨性和加工性都较好,价格低,生产上得到广泛应用。但碳素工具钢红硬性差。红硬性是指钢在高温下保持高硬度的能力。碳素工具钢在 250℃ 以下可以保持较高硬度,高于 250℃ 时,硬度、耐磨性显著降低。此外碳钢淬透性低,用水作为淬火剂易产生变形和开裂,因此碳素工具钢一般用于制造低速的刀具以及较小尺寸的模具和量具。

二、合金工具钢

合金工具钢的编号方法是:平均含碳量 $\geq 1\%$ 的不标出,平均含碳量 $< 1\%$ 的用千分之几表示;高速钢的含碳量不标出。合金元素及含量的表示方法与结构钢相同。如 CrWMn,表示含碳量 $\geq 1\%$,Cr、W、Mn 的平均含量 $< 1.5\%$ 。

合金工具钢按合金含量的多少可分为低合金工具钢和高合金工具钢,按用途可分为刀具钢、模具钢和量具钢。

1. 刀具钢

用于制造各种刀具如车刀、铣刀、钻头等。

刀具在切削过程中要切入金属,同时要与工件和切屑发生摩擦产生热量。因此刀具必须具有高硬度(一般在 HRC60 以上),良好的耐磨性,足够的强度和韧性。特别是高速切削的

表 6-1

碳素工具钢的性能和应用

牌 号	含碳量 /%	退火钢的硬 度 HBS≤	淬火温度及 冷却剂	淬火后的性 能 HRC≥	应 用 举 例
T7、T7A	0.63~0.74	187	800~820℃水	62	用作受振动、冲击、有较高的韧性的工具如垫模、铆钉模、顶尖、剪刀、钻软岩石的钻头、铁锤头、木工及钳工工具
T8、T8A	0.75~0.84	187	780~800℃水	62	需要有足够韧性和较高硬度的工具、木工工具、气动工具、钻凿工具、冲头等
T8MnA	0.8~0.9	187	780~800℃水	62	作横纹锉刀、手锯条
T9、T9A	0.85~0.94	192	760~780℃水	62	各种冲模、冲头
T10、T10A	0.95~1.04	197	760~780℃水	62	做不受突然冲击的锋利刀具、具有一定韧性工具,如车刀、锯件、刨刀、拉丝模、钻头及要求不高的丝锥等
T11、T11A	1.05~1.14	207	760~780℃水	62	除同T10外,可做钻硬岩石的钻头、刻锉刀纹的凿子等
T12、T12A	1.15~1.24	207	760~780℃水	62	硬度要求高、同时又耐磨的工具:如车刀、刨刀、钻头、丝锥、扩孔钻、剪刀片等
T13、T13A	1.25~1.35	217	760~780℃水	62	做高硬度不受冲击的锋利工具,如剃刀、刮刀、手用铰刀、钻头、刻字工具、锉刀、拉丝模具等

刀具,刃部温度高达 500~600℃,要求此时刃部硬度不降低,具有高的红硬性

(1) 低合金刀具钢

常用的低合金刀具钢有 9SiCr、CrWMn、9Mn2V 等。其含碳量在 0.8%~1.5%之间,碳量较高可以保证有足够的硬度和耐磨性,加入合金元素 Cr、Si、Mn 的主要作用是提高淬透性和耐回火性,使其在 250~300℃回火后仍能保持高硬度,如图 6-1 所示。此外加入碳化物形成元素 W、V 等,这些元素在正常淬火加热时不溶于奥氏体中,而以碳化物形式存在,增加钢的耐磨性。并且碳化物颗粒能阻碍淬火加热时奥氏体晶粒长大,也使钢的强度、韧性和耐磨性得到提高。

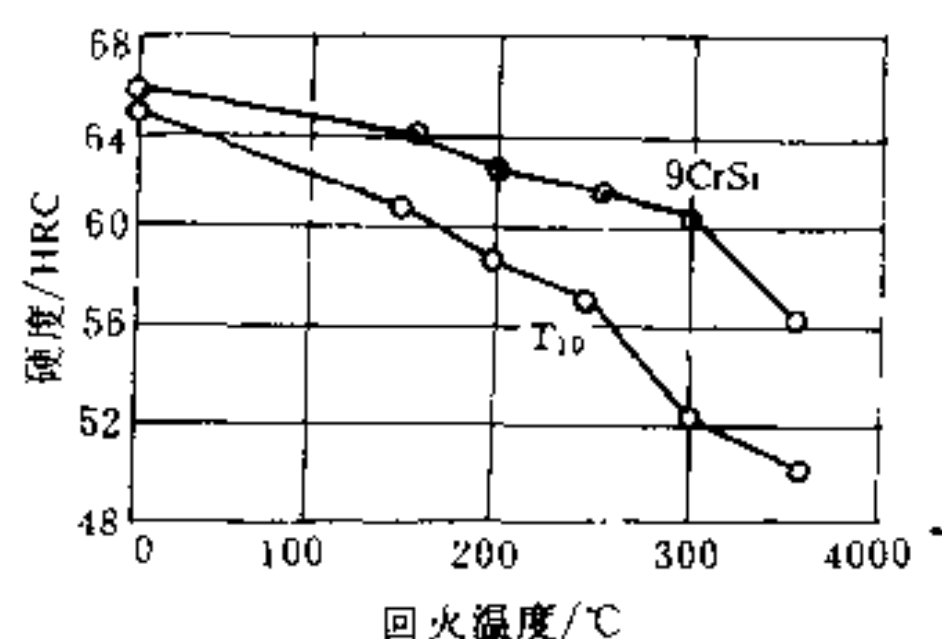


图 6-1 T10、9SiCr 钢硬度随回火温度的变化

由于淬透性较碳素工具钢高,可以用油淬火,减小了热处理变形,用于制造截面尺寸较大、精度较高、形状复杂的刀具,如丝锥、板牙、铰刀等。

(2) 高合金刀具钢(高速钢)

高速钢是常用的高合金刀具钢,加入的合金元素有 Cr、W、Mo、V 等。其特点是具有高的红硬性,在 600℃左右仍可保持 HRC60 左右的硬度,因此许多成型刀具如拉刀、铣刀、钻

头,以及车刀、刨刀等都采用高速钢制造。

我国目前使用最广泛的高速钢是 W18Cr4V(简称 18-4-1)、W6Mo5Cr4V2(简称 6-5-4-2)。6-5-4-2 与 18-4-1 相比,减少了含钨(W)量,增加了含钼(Mo)量,合金元素总量有所减少,因此碳化物的数量也减少了,且分布较均匀,使钢的塑性得到提高,锻造性能改善。其缺点是脱碳敏感性和过热敏感性较大。

由于高速钢含有大量的合金元素,使铸态组织中含有大量分布不均的粗大碳化物。这些粗大的碳化物不能用热处理方法消除,只能用反复锻造的方法将其打碎,使其分布均匀。因为高速钢中合金元素的作用使锻后的硬度仍很高,为改善其切削加工性,高速钢锻造后必须经过退火才能加工。其退火温度约为 $870\sim 880^{\circ}\text{C}$,退火后的硬度为 $207\sim 255\text{HBS}$ 。退火时的冷却速度必须十分缓慢。

高速钢的优良性能只有经过正确的热处理才能充分发挥出来。高速钢的淬火温度比一般结构钢高的多。这是因为高速钢中含有大量的碳化物形成元素,形成大量的碳化铬、碳化钨、碳化钒等合金碳化物,它们的溶解温度很高,直到接近钢的熔化温度时还会有部分未溶解。加热温度越高,碳化物溶入奥氏体中越多,淬火后马氏体中含合金元素量也就越多,回火抗力也越大,即钢的红硬性越高。但淬火温度也不能太高,如 18-4-1 高速钢,当温度超过 1280°C 时,未溶碳化物大量减少,对奥氏体晶粒长大的阻碍作用减弱,晶粒会变得粗大,使高速钢脆性增加。

高速钢淬火,一般在盐浴炉中加热,在无适当的盐炉而需在高温电炉(用 SiC 棒做加热体)中加热时,因高速钢易脱碳,所以在加热前要涂上硼砂等防氧化涂料作保护剂。为防止加热时产生变形和开裂,要求加热速度缓慢,一般要进行两次预热。

高速钢淬火后必须立即回火,回火温度约 $560\sim 580^{\circ}\text{C}$ 。因高速钢中含有大量合金元素, M_s 点较低,所以淬火组织中有大量的残余奥氏体(约 30%),必须通过回火消除。一般要进行三次回火,才能使大部分残余奥氏体变成马氏体。高速钢回火后硬度可进一步提高,这种现象叫“二次硬化”。故高速钢回火具有特殊意义,它不仅减少内应力、降低脆性、提高韧性,还能提高硬度、增加耐磨性。图 6-2 是高速钢的热处理工艺。

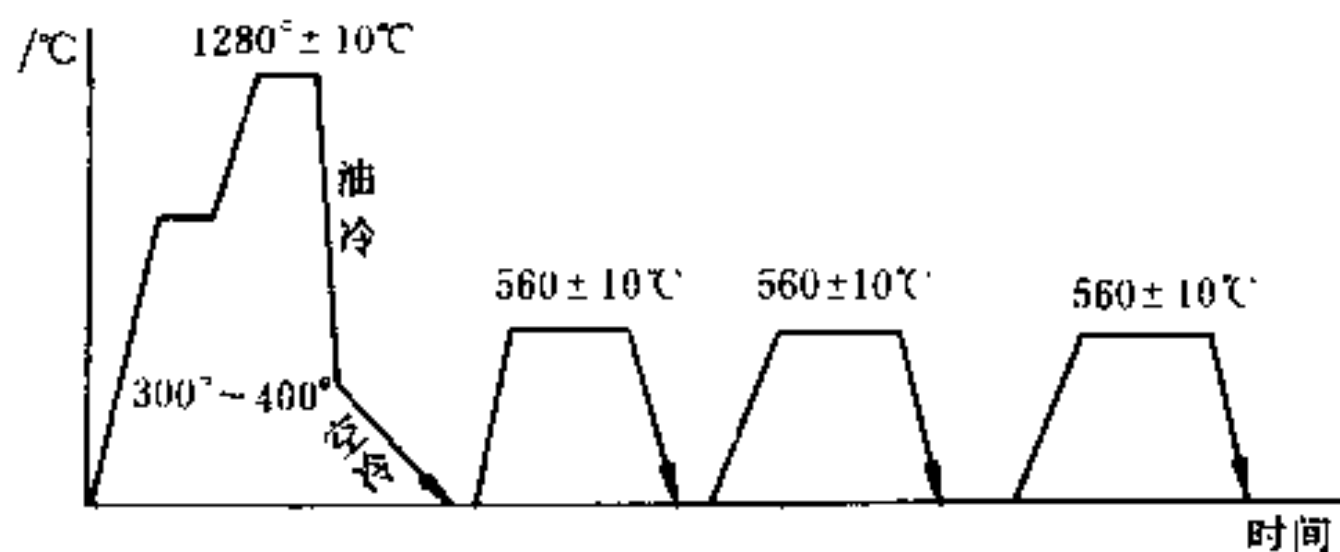


图 6-2 W18Cr4V 高速钢热处理工艺

2. 模具钢

根据工作条件不同分为冷作模具钢和热作模具钢。

(1) 冷作模具钢

冷作模具钢是用于各种冷成型模具如:冷冲模、冷镦模、冷挤模、搓丝板等。这类模具在工作时承受很大的剪切力、冲击力和摩擦力。因此要求模具工作部分有高的硬度(HRC50~

60)、耐磨性、强度和韧性。但更重要的是要求热处理变形小,因为这类钢含碳量高,淬火后回火温度低,精加工比较困难。

常用冷作模具钢也分为碳素钢、低合金钢和高合金钢三类。

尺寸小、形状简单、负荷轻的冷模具,如小冲头、剪薄板的剪刀、切边模等可选用 T7A、T8A、T10A、T12A 等碳素钢制造。这类钢淬透性低。以 T10A 应用最普遍。

尺寸较大、形状复杂、淬透性要求较高的冷作模具,如冷冲模等。一般选用低合金工具钢 9SiCr、9Mn2V、CrWMn 或 GCr15 钢制造。

尺寸大、形状复杂、负荷重、变形要求严格的冷模具,需要用高合金冷作模具钢,如 Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo 等,这类钢含 C1.4%~2.3%、含 Cr 11%~12%,具有高硬度、高耐磨性。由于大量合金元素的作用,它具有很高的淬透性,截面 $\Phi 200\sim 300$ mm 可淬透。并且在一定温度范围淬火,控制马氏体与残余奥氏体的比例,可使淬火变形极小,因此它是著名的微变形钢,可用于重负荷、大型复杂的冷作模具。高速钢 18-4-1 和 6-5-4-2 也能满足这类模具的性能要求,但采用高速钢制造冷作模具时,只利用其高淬透性和高耐磨性,而不用其红硬性,故一般采用高速钢低温淬火,例如, W18Cr4V,采用 950~1100℃ 淬火,这样可提高韧性,延长模具使用寿命。

(2) 热作模具钢

热作模具是使热金属或液态金属成型的模具,包括热锻模、热挤压模和压铸模等。工作时,使 1100~1200℃ 的高温金属在冲击和压力下产生变形,模具的温度可达 300~800℃。因此模具在较高温度下应具有足够的强度和韧性,同时还应具有良好的导热性和耐热疲劳性能(即在反复受热和冷却时不发生龟裂)。

目前常用的热变形模具钢是 5CrNiMo、5CrMnMo,它们是中碳钢。当含碳量过高时,塑性、韧性下降,导热性也下降。含碳量过低,硬度和耐磨性达不到要求。5CrMnMo 与 5CrNiMo 比较,淬透性相同,以 Mn 代 Ni,价格便宜。但 5CrMnMo 的耐热疲劳和高温冲击韧性比 5CrNiMo 差,故通常用于制造边长 300~400 mm 的中型模具。而边长大于 400 mm 的形状复杂、冲击负荷重的大型模具常用 5CrNiMo。为了保证热作模具有较好的综合力学性能,最终热处理采用 860℃ 加热淬火和 500~550℃ 高温回火。

此外,压铸模具比热锻模工作条件更差,受熔融的金属冲刷与浸蚀,因而要求有更高的高温力学性能和耐热疲劳性能。目前常用的有 3Cr2W8V 钢。这种钢在高温下具有较高的强度和硬度。它的最终热处理是淬火(980~1100℃)加高温回火(550℃左右)。此时有二次硬化现象,硬度达 HRC47 左右。

为克服 3Cr2W8V 钢热疲劳抗力和韧性较低的缺点,近年来 4Cr5MoSiV(美国 H13)得到应用。这类钢的主要特点是含 Cr 高并含有 Si,可提高临界点及抗氧化性,有利于提高耐热疲劳性能。我国许多工厂用此钢取代了 3Cr2W8V 钢制造压铸模具和压力机用锻模,效果好。模具寿命大幅度提高。是一个值得推广的新钢种。

3. 量具钢

量规、卡尺、塞规、卡板、样板等量具的工作部分应有高的硬度(\geq HRC62)和耐磨性。并且要求热处理变形小、尺寸稳定,保证尺寸精度。

最常用的量具钢为碳素工具钢和低合金工具钢(包括 GCr15 钢)。

碳素工具钢淬透性低、变形大,常用于尺寸小、形状简单、精度要求不高的量具;

低合金工具钢中因含有少量合金元素,提高了淬透性,采用油淬变形小。为减少残余奥氏体,稳定尺寸,必要时淬火后可采用冷处理,冷处理后仍需 140~160℃ 的低温回火。精度要求高的量具,不仅要淬火、冷处理和低温回火,在精加工过程中,还要进行 110~120℃ 时效处理。

三、工具钢的选用

可以从下述几个方面考虑工具钢的选用问题。

1. 根据工具的使用性能选用钢材

按含碳量,工具钢分中碳(5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr2W8V 等)和高碳(T10、9SiCr、Cr12、高速钢等)两类。中碳工具钢韧性好,用于受冲击力大的热锻模等方面。而高碳工具钢硬度高、耐磨性好,用于量具、刀具、冷作模具,多数工具钢属于此类。

按合金元素含量多少,工具钢分为碳钢(T8、T10 等)、低合金工具钢(9SiCr、CrWMn、GCr15 等)和高合金工具钢(3Cr2W8V、Cr12、高速钢等)。

中碳类 3Cr2W8V 与 5CrNiMo、5CrMnMo 相比较,3Cr2W8V 由于合金元素含量多,热硬性较高,适用于制造在较高温度下使用的模具,如压铸模和挤压模。矿用锻钎机锻造钎头的模具就是用 3Cr2W8V 制造的。

刀具、冷作模具和量具的共同要求是硬度高、耐磨性好。因而淬火后硬度达 HRC60 以上的各类高碳钢(包括碳钢、低合金钢及高合金钢)均可使用。除少数形状简单、精度较低的样板、塞规等量具用碳钢制造外,一般量具大都用高碳低合金工具钢,如 CrWMn、GCr15 等。因量具不要求很高的淬透性、不需要热硬性,故一般不用价格高的高合金钢制造。但为保证硬度均匀、淬火变形小、尺寸稳定,所以多采用以油作淬火剂的低合金工具钢制造。

刀具既要求硬度高又要求热硬性。除了手工操作或切削速度较慢的工具(如锯条、铰刀、丝锥、板牙)用碳钢或低合金钢制造外,绝大部分切削工具的材料都是高速钢。为了减少淬火变形,丝锥、板牙大都用低合金高碳钢,很少用碳钢。此外低合金钢的耐磨性比碳钢稍高。

Cr12 型钢(包括 Cr12、Cr12Mo、Cr12MoV)可以说是专用冷作模具钢,这类钢的耐磨性最好、热处理变形小。用这类钢制造的冲模等工具,其使用寿命比用其它类型钢材制造要高的多。大量生产使用的模具,用这类钢制造比较合适。

GCr15 钢除大量用于制造滚动轴承外,还用于工模量具及油泵、油马达等耐磨零件。

2. 根据经济原则选用钢材

从使用性能来说,冷作模具钢以 Cr12 型最佳。但这类钢价格高,锻造和切削工艺性较差,而且其韧性是各类工具钢中最差的。所以当加工的零件数量不是很多的情况下,其模具用高碳低合金钢(如 9SiCr、GCr15、CrWMn 等)或碳钢(如 T8、T10 等)制造较合适。

3. 根据工艺要求选用钢材

有的小型工模具,从性能要求上说碳钢就可以满足要求,但从制造工艺考虑,有时需要改用合金钢,如小尺寸丝锥、板牙主要是为了减小热处理变形才选用低合金钢的。形状复杂、热处理过程中易于变形的一些模具,虽然从使用性能和经济效益上考虑,不需要用高合金钢制造,但是为了达到模具形状尺寸精度要求,有时需选用 Cr12 型钢制造。Cr12、3CrW8V 和高速钢一样都属于空冷自硬钢,即加热至淬火温度后,在空气中冷却,就可以转变为马氏体组织。因此,尺寸不是太大的模具(如截面尺寸 80~100 mm 以下者)加热后在空气中冷却即可,这样可大大减少淬火变形,而其硬度一般只比油淬低 1~2 HRC。表 6-2 可作为选用各种

工具钢的参考。

表 6-2 常用工具钢

类 型	钢 号	含碳量 /%	退火硬度 /HBS	淬 火			用 途
				加热温度 /℃	冷却剂	硬度 /HRC	
碳素工 具 钢	T8A	0.75~0.84	≤187	770~790	水	≥62	木工工具、冲头、剪刀、简单冲 压模、切边模、小锻粗模
	T10A	0.95~1.04	≤197	770~790	水	≥62	刨刀、手工锯条、卡尺、简单冲 压模、切边模、小锻粗模
	T12A	1.15~1.24	≤207	770~790	水	≥62	锉刀、锯条、钻头、刮刀等，简 单冲压模、切边模、小锻粗模
低合金 工具钢	9Mn2V	0.85~0.95	≤229	780~810	油	≥62	小冲头、冷压模、塑料模
	CrWMn	0.95~1.05	225~207	800~830	油	≥62	高精度拉刀、板牙、块规等，形 状复杂、精度较高的冲模，塑料 模
	9SiCr	0.85~0.95	241~197	820~860	油	≥62	要求变形小和薄刃刀具如板 牙、丝锥、铰刀等，冷冲模
	GCr15	0.95~1.10	197~219	820~860	油	≥60	拉刀、铰刀、铣刀及量具、冷冲 模
冷变形 模具钢	Cr12	2.0~2.3	269~217	950~1000	油	≥60	拉伸模、冷冲模、粉末冶金模
	Cr12MoV	1.45~1.70	255~207	1020~1040	油	≥60	拉伸模、冷冲模、粉末冶金模
热变形 模具钢	5CrMnMo	0.5~0.6	241~197	820~850	油	55	中型锤锻模、热压模、小型压 铸模
	3CrNiMo	0.5~0.6	241~197	830~860	油	57	大型锤锻模、热压模、小型压 铸模等
	3Cr2W8V	0.3~0.4	255~207	1075~1125	油	50	热压模、压铸模、热切剪刀等
高速钢	W18Cr4V	0.7~0.8	255~207	1260~1300	油	≥63~66	拉刀、铣刀、滚刀、剃齿刀、成 型车刀、钻头、滚丝模
	W6Mo5Cr4V2	0.8~0.9	255~207	1210~1245	油	≥63~66	拉刀、铣刀、滚刀、成型车刀、 钻头等

各类工具钢的耐磨性、韧性和红硬性的高低大致如下，随箭头所示方向不断升高。

(1) 耐磨性：T8~T12→GCr15、CrWMn、9Mn2V、3Cr2W8V→高速钢→Cr12 型。

(2) 韧性：Cr12 型→高速钢、CrWMn、9Mn2V、9SiCr、GCr15、T12~T8→3Cr2W8V、5CrMnMo、5CrNiMo。

(3) 红硬性：T8~T12→9Mn2V、GCr15、CrWMn、9SiCr→Cr12 型→3Cr2W8V→高速钢。

第二节 硬质合金

一、概述

采煤机截齿、凿岩机钎头以及许多切削工具的刃口都镶焊着硬质合金。硬质合金的主要特点是其硬度和耐磨性比任何种类的钢都高。

硬质合金是用粉末冶金法制成的。所谓粉末冶金，就是把极细的金属(或金属化合物)粉

末在模具中压制所需形状的胚胎,然后在温度比原材料熔点低的条件下加热烧结,使粉末粒子互相粘合起来。粉末冶金法不但用于难熔原料硬质合金的生产,而且也可用于铁基材料制造钢铁零件。

硬质合金的高硬度是由原材料硬质化合物保证的。当前的硬质合金主要是以 WC 和 TiC 为硬质化合物。近年来也生产了一些含有 TaC 和 NbC 的硬质合金。

普通硬质合金都是用高韧性的钴粉作粘结材料(把硬质化合物粉末和钴粉混合均匀,压制成型后烧结)。近年来还研究和试制以各种钢材(如高速钢)的粉末为粘结原料制成所谓的“钢结硬质合金”。

二、硬质合金的分类和牌号

我国的硬质合金主要为 YG、YT 和 YW 三类。

1. YG 类(钨钴类)

YG 类是由碳化钨(WC)和起粘结作用的金属钴所组成的,其成分、性能见表 6-3。牌号中的“Y”和“G”分别是“硬”“钴”二字汉语拼音的头一个字母,“G”后面的数字代表钴的含量。例如,YG8 即含钴 8%的钨钴类硬质合金。合金中含钴愈多韧性愈高,但硬度和耐磨性愈低。

表 6-3 硬质合金牌号及性能

合金 牌号	化学成份/%				力学性能		使用性能	用途
	WC	TiC	Co	TaC	硬度/HRA (大于)	抗弯强度/ MPa 大于		
YG3	97		3		91.0	1050	钨钴类硬质合金中耐磨性最好的,但韧性差	铸铁及有色金属的切削刀具
YG3X	97		3		93	900		
YG6	94		6		89.5	1400	耐磨性高于 YG8,但低于 YG3	铸铁及有色金属的切削刀具
YG6C	94		6		88.7	1500		
YG6X	94		6		91.0	1350		
YG8	92		8		89	1500	强度及韧性较好但耐磨性稍低	采煤机截齿,凿岩机钎头、铸铁、切削刀具
YG15	85		15		87	1900	强度韧性高、耐磨性低	采煤机截齿,凿岩机钎头等
YT5	85	5	10		89.5	1300	在钨钛类合金中,强度及韧性最好,不易崩刃,但耐磨性较差	钢材切削刀具
YT15	79	15	6		91.0	1150	耐磨性高于 YT5,但强度低于 YT5	钢材切削刀具
YT30	66	30	4		92.8	900	耐磨性特别高,但强度、韧性低	钢材切削刀具
YW1	84	6	6	4	92	1350	红硬性高,耐磨性、强度均优,是一种通用性较好的合金	适于耐热钢、高锰钢、不锈钢等难加工钢材及普通钢材和铸铁的切削工具
YW2	82	6	8	4	91	1600	耐磨性稍低于 YW1 但强度、韧性高	同 YW1,但更适于粗加工及用于有冲击负荷时

牌号后面的“C”表示为粗晶粒合金,“X”表示细晶粒合金。晶粒的粗细决定于原材料碳化钨粉末的粗细。晶粒细则硬度高,但强度低。这类硬质合金主要用来制造切削铸铁、青铜等脆性材料的刀具。矿山、地质钻探的凿岩工具也使用这类合金中含钴较高的牌号。

2. YT 类(钛钨钴类)

这类合金除 WC 和 Co 外,还含有硬度比 WC 更高的 TiC 硬质粉末。这类合金耐磨性高,但强度和韧性低,一般用来制造切削钢材的工具。

3. YW 类

这类合金含有 TaC,是新发展起来的类型。加入 TaC 对其强度影响不大,但却明显的提高了红硬性。用这类硬质合金制造的刀具可用来切削耐热钢、不锈钢、高锰钢、高速钢等切削性能差的钢材。

三、硬质合金的特点

硬质合金主要有两个优点,即硬度和红硬性高。我们知道一般钢材淬火后的最高硬度是 HRC65 左右,而硬质合金则高达 HRA85 以上(相当于 HRC70~75)。所以用硬质合金制造的工具其耐磨性比任何钢材都好。因此许多矿山工具(如采煤机截齿等)需要用硬质合金制造。红硬性对机加工用的切削工具很重要,高速钢的红硬性为 $\sim 600^{\circ}\text{C}$,因而高速钢刀具允许的切削速度比碳钢和一般合金钢刀具高的多。硬质合金的红硬性更高,可达 1000°C 左右,因而硬质合金刀具可进一步提高切削速度。

硬质合金的另一特点是不需要热处理,也不能够热处理。它的硬度不是靠淬火得来的,而是决定于它所含的化合物(WC、TiC 等)的高硬度。买来的硬质合金块直接焊在刀体上刃磨后即可使用。不需热处理是它的优点,可省去一般钢质工具必须进行的淬火回火工序。但不能热处理也是它的缺点,因为它既不能淬火使之硬度提高,也不能退火使之硬度降低,所以除了刃磨外无法对其进行切削加工(特殊的工艺方法除外)。我们所需的硬质合金的形状和大小只能在定货时由冶金厂保证。

硬质合金的最大缺点是脆性大和价格高,所以硬质合金工具一般都是焊接在刃口处,而不是整体工具都用硬质合金制造。

为了克服硬质合金的上述缺点,近年来又研制了一些所谓“钢结硬质合金”。这种合金的粘结金属不是用“钴”,而是用各种不同成分的“钢”。这类硬质合金可以进行热处理,比普通硬质合金的强度和韧性高。例如以高速钢为粘结材料的硬质合金(TiC 与高速钢之比为 35:65),退火后的硬度为 HRC40~45,淬火回火后可达 HRC69~73。这类硬质合金可用来制造冷作模具及形状复杂的刀具。

第三节 特殊性能的钢及合金

在工业生产中,有很多机件在特殊条件下工作,如岩石、煤粉的强烈冲击磨损,矿井下潮湿的大气、矿水的浸蚀或在高温下工作的构件,必须使用特殊性能钢,即耐磨钢、不锈钢和耐热钢。

一、高锰耐磨钢

一般说来,钢材的硬度愈高耐磨性愈好,但硬度愈高则韧性愈低。许多矿山机械零件是在冲击和磨损条件下工作的,要求它具有高的耐磨性,同时还应具有高的韧性。前面讲过,可

以用热处理的方法(渗碳、渗氮等)来达到这种要求,但也可以向钢中加入一定的合金元素以改变钢的组织,使它具有这种性能,高锰耐磨钢就属于这种钢。

高锰钢 Mn13 其含碳量为 1%~1.4%,锰为 10%~14%,由于大量锰的影响, M_s 点降至零度以下,经 1000~1050℃水淬后可以得到单一的奥氏体组织(称水韧处理),具有良好的塑性和韧性。使用时,在压力作用下由于工件表面发生塑性变形,引起强烈的加工硬化,其硬度急剧提高,表面硬度可由 200HBS 升高到 500HBS,如图 6-3 所示。但是,如果含锰量低于 10%~14%,淬火后出现马氏体组织,高于 10%~14%则淬火后出现复合碳化物,使性能变脆。

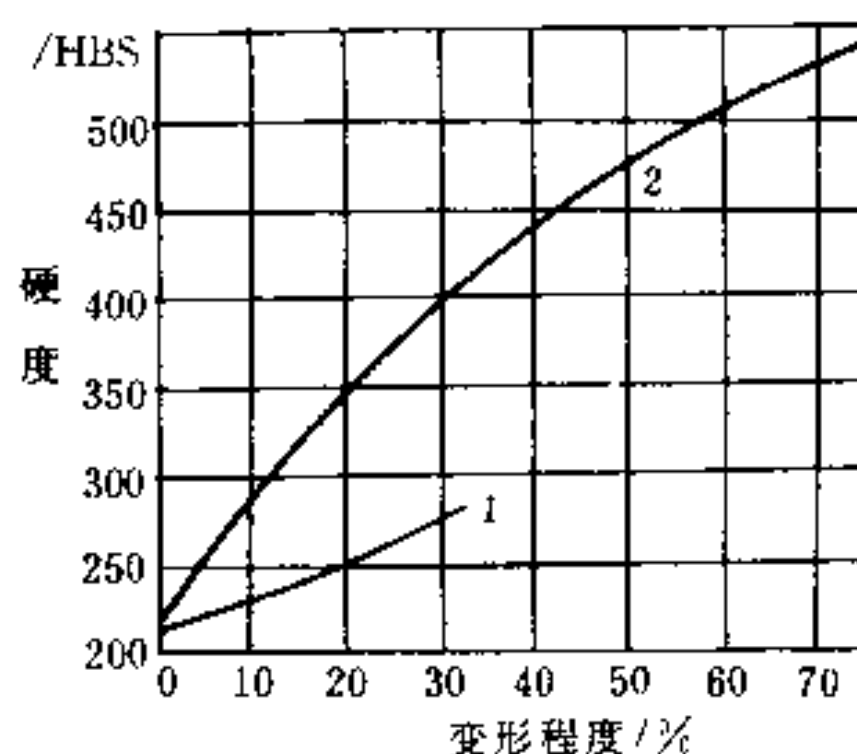


图 6-3 变形与硬化的关系

1——40 钢;2——高锰钢

高锰钢淬火后不需要回火,因为淬火后的高锰钢在加热时将从奥氏体组织中析出脆性的碳化锰,使其塑性、韧性急剧下降。因而高锰钢制造的零件只能在常温下使用。

高锰钢加工硬化作用大,切削困难,因而只能使用铸造状态(钢号写作 ZGMn13)或少量加工(需要硬质合金刀具)的零件,这使其应用范围受到限制。

因高锰钢同时具有高韧性和高耐磨性的特点,所以广泛用于受冲击和磨损的零件。如露天采矿用的电铲履带和斗子、破碎机的零件、球磨机衬里以及坦克和拖拉机的履带板等。

应该说明,对于在无很大压力条件下工作而要求耐磨的零件,不能选用高锰钢。

二、不锈钢耐酸钢

一般金属在空气、水或酸、碱、盐中都会受到腐蚀。矿山机械的工作环境是在矿下潮湿的空气中或者含有碱性、酸性的水介质中,受到化学腐蚀或电化学腐蚀使金属生锈,降低了表面质量或力学性能,甚至完全报废。有的矿山,矿下水含酸量大,排水泵只能用几小时或几十小时就腐蚀破坏。因而,必须采用有抗蚀能力的金属材料来制造。钢中加入某些合金元素,可以提高其抗腐蚀能力。具有抗大气腐蚀性能的钢称不锈钢,在腐蚀性强烈的酸性介质中能抗腐蚀作用的称为耐酸钢。

不锈钢为什么能抵抗浸蚀呢?这是因为不锈钢与介质作用后,表面生成一层很薄的保护性薄膜称“钝化膜”,这层保护膜使钢的表面不被介质进一步腐蚀或者减缓其腐蚀。铬是使钢产生钝化膜的主要元素。加入量达到 13%时,钢就具有不锈钢的性能。这就是应用最广泛的 Cr13 型不锈钢。包括 1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13,含碳 0.1%~0.4%,含铬 13%。含碳越高强度越高,但抗蚀性是含碳低的好。1Cr13 和 2Cr13 作结构件如汽轮机叶片、蒸气管附件等。3Cr13、4Cr13 作工具及耐磨零件使用,如内燃机油针、抗蚀轴承、医疗器械等。这类钢淬透性都比较好,用 3Cr13、4Cr13 及截面尺寸小于 50 mm 的 1Cr13、2Cr13 制的零件,在热加工后空冷即可得到马氏体和碳化物组织。为了防止产生裂纹,热加工后必须立即进行 860~900℃退火的软化处理。

1Cr13 和 2Cr13 在 1050℃油中淬火,600~780℃回火后使用。3Cr13 和 4Cr13 在 1050℃油中淬火,200~280℃回火后(硬度达 HRC48~56)使用。

铬不锈钢抗硝酸腐蚀,但对盐酸、硫酸抗蚀性差。在含铬 18%的钢中加入 8%~10%镍,

抗蚀性显著提高,这即有名的 18—8 型镍铬不锈钢耐酸钢,如 1Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti、2Cr18Ni9 等。这类钢在退火态组织为 A 体+碳化物,欲使碳化物溶入奥氏体中,可在 1050~1150℃加热后,水中冷却(称为固溶处理)。铬镍不锈钢不仅有优良的抗蚀性和低温韧性,而且还有良好的冷变形性能,在常温下能承受深拉及冲压。这类钢加热和冷却时无相变,故不能用热处理进行强化,只能用冷加工变形的方法提高其强度。加工硬化后 σ_b 达 1400 MPa、 σ_s 可达 1200 MPa。

我国近年已成功地研制了不用镍或少用镍的 Cr—Mn—N 系不锈钢,例如 Cr18Mn10Ni5Mo3N,已用于尿素工业、维尼纶工业中。

几种常用不锈钢耐酸钢的成分、性能和用途列入表 6-4。

表 6-4 不锈钢耐酸钢成分、性能和用途

钢 号	化学成分/%				热处理 状 态	机械性能						用 途
	C	Cr	Ni	其它		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta/\%$	$\psi/\%$	a_k /(MJ/m ²)	/HBS	
1Cr13	≤0.15	12~14			1000~1050℃ 油淬	600	420	30	00	0.9	187~217	抗大气腐蚀良好,常用作结构钢如制汽轮机叶片、水压机阀体、石油热裂管路等
2Cr13	0.16~0.24	12~14			600~790℃ 油回火	660	450	46	55	0.8	197~240	
3Cr13	0.25~0.34	12~14			1000~1050℃ 油冷 600℃ 回火空冷	850	650	12	45	0.5	≥241	3Cr13 常作耐磨件如热油泵的轴和阀门、刀具等;4Cr13 作医疗刀具、量具等
4Cr13	0.35~0.45	12~14			1000~1050℃ 油冷 200~300℃回火						50~56 HRC	
1Cr18Ni9	≤0.14	17~19	8~11		1100~1150℃ 水冷	550	200	45	50			冷轧材料制造结构件如发电机水接头刷握罩等
2Cr18Ni9	0.15~0.24	17~19	8~11		1100~1150℃ 水冷	58	220	40	55			冷轧带板,制飞机结构、船舶控制设备的非磁性零件
1Cr18Ni9Ti	≤0.14	17~19	8~11	Ti0.4~0.8	1100~1150℃ 水冷	550	300	40	55			化工焊接件、硝酸工业、氮肥工业、仪表零件

三、耐热钢

钢材的耐热性是包括抗氧化和高温强度的一个综合概念。耐热钢是指高温下能抵抗氧化和一定机械负荷的钢材。它主要用于高温下工作的内燃机、汽轮机、高压锅炉及加热炉、冶金炉的构件等。

钢中加入 Cr、Al、Si 等合金元素就可以形成致密的 Cr₂O₃、Al₂O₃ 及 SiO₂ 的氧化膜,提高抗氧化能力。加入 Ni、W、Mo、V 等合金元素可提高高温强度。

电炉丝以往都用 Ni—Cr 合金(Cr20Ni80),价格极为昂贵。现多用 Fe—Cr—Al 合金,(如

一般 950℃ 以下的中温电炉用 1Cr25Al5)。铁铬铝合金高温强度较低,冷却后有脆性易折断。

加热炉底板、渗碳罐等也都用 Ni—Cr 合金(如 Cr25Ni20),但价格很贵,为了节省镍、铬,现在采用 Cr—Mn—N 系的 Cr20Mn9Ni2Si2N,以减少 Cr、Ni 含量。

表 6-5 是耐热钢性能和用途举例。

表 6-5 耐热钢性能和用途举例

钢 号	主 要 性 质	用 途 举 例
Cr8Al15 Cr7Al17	在 950~1000℃ 不起皮 比电阻 1.2 欧·毫米 ² /米	电炉用电阻丝
1Cr25Al5	在 1150℃ 以下不起皮 比电阻 1.35 欧·毫米 ² /米	大型电炉用电阻丝及电阻带
Cr25Ni20 0Cr19Ni13Mo3 3Cr18Mn12Si2N	奥氏体钢,塑性好、冷变形性能好、切削加工困难、焊接性好。可在 900~1100℃ 使用	用作炉底板、渗碳箱、盐浴坩埚、正火炉料盘及连续加热炉传送带等
Cr20Mn9Ni2Si2N (101 钢)	有良好的综合力学性能,较好的抗氧化性和抗渗碳性、抗热冷脆性,时效脆性倾向较大,用于 900~1000℃	炉用耐热构件,可代 Cr25Ni20Si2 和 Cr20Ni14Si2 等高 Cr—Ni 钢
12CrMo	≤510℃	锅炉零件
4Cr9Si2	≤900℃ 不起皮。700℃ 以下可承受负荷	柴油机、汽油机排气阀等
4Cr14Ni14W2Mo	奥氏体钢,650℃ 以下力学性能良好,600~700℃ 易因强烈的时效而强化,800℃ 以下不起皮。切削加工困难,可冷加工变形,焊接性差	燃气轮机叶片、紧固螺栓、大功率航空及船舶发动机排气阀、石油及化工高压容器螺栓等

四、其它特殊性能的钢及合金

除了上述不锈钢、高锰钢及耐热钢外,还有一些特殊用途的钢和合金。例如对电器工业不可缺少的重要合金磁钢和磁性材料、高电阻合金以及特殊膨胀合金等,现作扼要介绍。

1. 软磁合金

电机、变压器用的硅钢片(矽钢片)属软磁合金。软磁材料最主要的特性是导磁率高,矫顽力低,这样就能使磁滞损失小,纯铁符合这一要求。但为了减小电磁材料使用中的涡流损失,必须增加其电阻。为此目的,在纯铁中加入硅使之形成固溶体组织,这样就可以在大幅度增加电阻的同时,仍保持纯铁的高导磁率和低矫顽力的性能。硅钢片就是铁硅合金,一般含硅 1.0%~4.5%(电机用硅钢片中含硅多,变压器用硅钢片含硅少)。软磁材料中,除硅钢片外,还有性能更高的铁—镍软磁材料,在航空、航天工业中广泛应用。

2. 硬磁合金

作永久磁铁的合金称硬磁合金。与软磁合金相反,它要求具有高的矫顽力,以便经磁化后的永久磁铁的磁性稳定,长期使用而不退磁。硬磁合金分淬火硬化型磁钢(高碳钢及含 W、Cr、Co 等高碳合金钢)和弥散硬化磁合金两类。弥散硬化磁合金的成分由 Fe—Ni—Al、Fe—Ni—Al—Cu 或 Fe—Ni—Al—Cu—Co 组成。这种合金的磁性强,用于制造尺寸小、重量轻的强力磁铁。

3. 高电阻合金

两种元素形成固溶体时其电阻将大为升高,因而高电阻合金必须采用能形成固溶体的合金。变阻器的使用温度较低,一般用铜基高电阻合金制造。常用的有康铜(59%Cu、40%Ni、1%Mn)和锰铜(84%Cu、4%Ni、12%Mn)两种。

电炉加热用的电阻丝,都是在高温下使用,所以除了要求高电阻外,还需具有抵抗高温氧化的能力。这类合金的成分为Cr—Ni(85%Ni、15%Cr)或Fe—Cr—Al合金。

4. 特殊膨胀合金

在工程上,尤其仪器制造中,常常需要膨胀系数特殊的合金。例如有时要求膨胀系数大,有时要求膨胀系数小甚至等于零,有时要求膨胀系数与玻璃相等。

含36%Ni的Fe—Ni合金叫茵瓦合金。它在100℃以下膨胀系数几乎等于零。这种合金常用在温度变化时,要求尺寸不发生变化的一些仪器零件。

5. 恒弹性合金

在仪器制造中,有时需要不随温度变化的恒定弹性系数的合金(制造弹簧等)。埃林瓦合金(0.6%~0.7%C、33%~35%Ni、7%~8%Cr、2%~4%W、2%~8%Mn、其余为Fe)可以满足这种要求,它在一50℃~+50℃之间其弹性模量不变。

第四节 铸 铁

铸铁是含碳大于2%的铁碳合金,除铁、碳元素外还含有硅、锰、硫、磷等杂质。通常使用的铸铁含碳量都在2.5%~4%。

因铸铁价格便宜,熔化设备简单,并具有较好的工艺性(如铸造性和切削性)等,所以在汽车、拖拉机,尤其是机床制造工业方面用量很大。但因铸铁的力学性能(强度、韧性)较低,所以矿山机械尤其井下机械应用较少。

一、铸铁的分类及性能

1. 白口铁(白口铸铁)

碳在铸铁中以两种形态存在,石墨和渗碳体(Fe_3C)。其中碳全部以渗碳体形态存在的叫白口铁,这种铸铁打断后,其断面呈白亮色。因渗碳体硬度特别高,所以白口铁不易切削加工。因而一般都不用白口铁制造机器零件,而是作为炼钢原料。

2. 灰铸铁(灰口铸铁)

当前机械制造中应用最多的是灰铸铁,其中碳全部或大部分以片状的石墨形态存在。灰口铁的组织就是片状的石墨分布在钢的基体上(钢的组织是珠光体、珠光体加铁素体或珠光体加渗碳体),因石墨的力学性能极低,其强度几乎等于零,所以可把灰口铁看作内部布满大量片状孔洞或裂缝的钢材。这些孔洞或裂缝的存在使铸铁的抗拉强度和塑性大大低于钢材(一般灰口铁的 σ_b 等于120~240 MPa、 $\delta \leq 0.5\%$)。但片状石墨的存在对抗压强度和硬度影响不大,所以灰口铁的抗压强度和硬度仍接近于钢。

对铸铁中的石墨也要一分为二地看待,虽然它降低灰铸铁的力学性能,但由于石墨的存在使材料具有良好的消震性、减摩性和切削加工性。再加上灰口铁的铸造性好、熔化设备简单、价格便宜,所以灰口铁仍然是机械制造中应用最多的一种材料。

为了改善灰口铁的力学性能,往熔化的铁水中加入硅铁或硅钙合金等对铸铁进行孕育

处理,使铸铁中的片状石墨变细变小,并均匀地分布在金属基体中,从而提高灰口铁的力学性能,这种铸铁叫做孕育铸铁或变质铸铁。

表 6-6 为灰铸铁的牌号和力学性能。牌号前的“HT”是“灰铁”二字汉语拼音的头一个字母,其后的数字表示最低抗拉强度 σ_b 。例如灰铸铁 HT200,表示最低抗拉强度为 200 MPa (用直径 30 mm 单铸试棒测定抗拉强度)其中 HT300 和 HT350 两种灰铸铁是经过孕育处理的;HT100 为铁素体灰铸铁;HT150 为铁素体—珠光体灰铸铁;HT200、HT250 为珠光体灰铸铁。金相组织如图 6-4 所示。

表 6-6 灰铸铁的牌号及力学性能(GB9439—88)

牌 号	抗拉强度/MPa	牌 号	抗拉强度/MPa
HT100	≥ 100	HT250	≥ 250
HT150	≥ 150	HT300	≥ 300
HT200	≥ 200	HT350	≥ 350

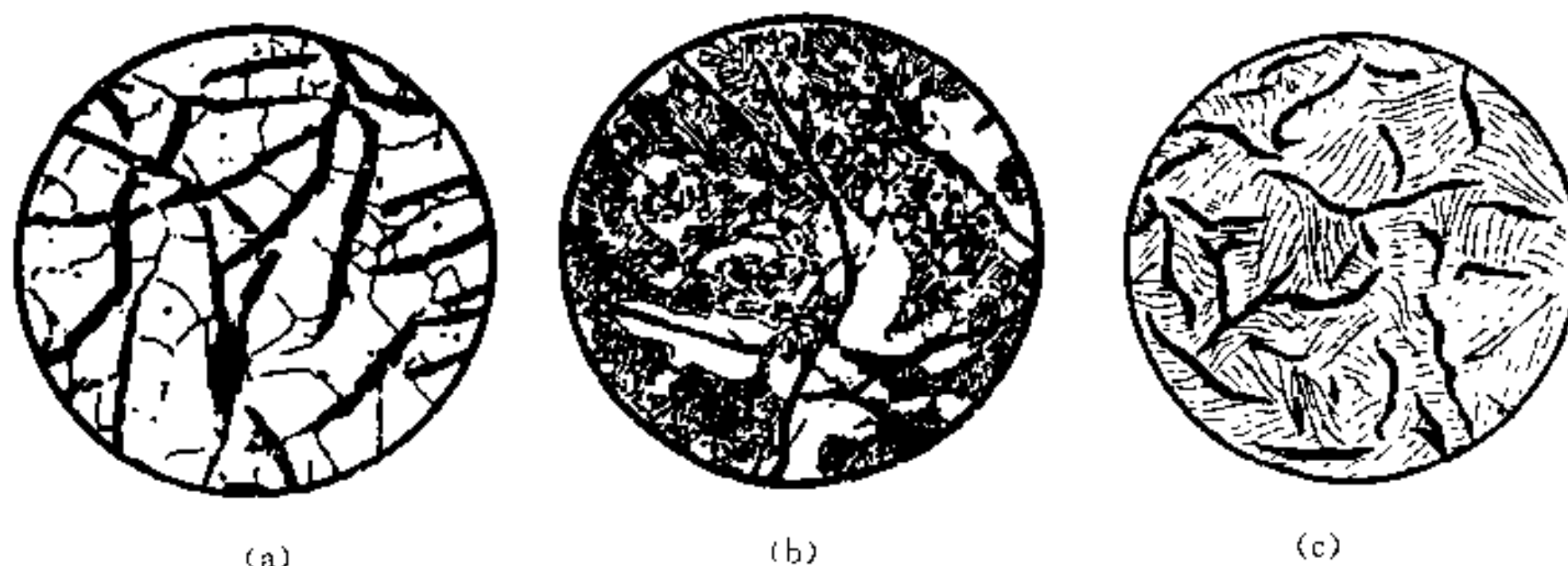


图 6-4 灰铸铁显微组织示意图

(a) 铁素体灰铸铁;(b) 铁素体—珠光体灰铸铁;(c) 珠光体灰铸铁

3. 可锻铸铁

孕育处理虽然对铸铁的力学性能有所提高,但因孕育铸铁中的石墨仍为片状,所以其力学性能还很低,尤其是延展性和普通灰口铸铁一样仍接近于零。如果能使石墨成为团球状,则石墨对铸铁基体的割裂作用将大为减轻,也将会使铸铁的性能得到根本地改善。可锻铸铁就是一定成分的白口铸铁经过长时间(几十小时至一百多小时)高温(900~950℃)退火,使其中的渗碳体分解为石墨。这样形成的石墨为团絮状。虽然可锻铸铁有一定的韧性(α_k 值可达 0.3 MJ/m²)和塑性(δ 可达 15%),但它和所有的铸铁一样,仍然是不可锻造的。

表 6-7 是我国可锻铸铁的牌号和力学性能。牌号前边的“KT”是“可铁”二字汉语拼音的头一个字母。“KTH”为基体是铁素体的可锻铸铁,KTZ 为基体是珠光体的可锻铸铁。KTH 或 KTZ 后面的两组数字分别代表抗拉强度和延伸率。铁素体基可锻铸铁的塑性及韧性较好,而强度较低;珠光体可锻铸铁强度高而塑性、韧性差。金相显微组织见图 6-5。

由于可锻铸铁生产工艺麻烦,只有某些较大的汽车、拖拉机厂以及一些专门的工厂生产。现在可锻铸铁主要用于汽车、拖拉机零件(如轮毂、后桥、发动机支架、转向器壳等)及各种管接头、农业机械零件等方面。

表 6-7 可锻铸铁的牌号和力学性能(GB9440--88)

牌 号		试样直径 <i>d</i> /mm	抗拉强度 σ_b	屈服强度 $\sigma_{0.2}$	伸长率 δ / % ($L_0=3d$)	硬 度 /HBS
			/MPa			
A	B		不小于			
KTH300 -06	-	12 或 15	300	-	6	不大于 150
	KTH330-08		330	-	8	
KTH350--10	-		350	200	10	
	KTH370-12		370	-	12	
KTZ450-06	-		450	270	6	150~200
KTZ550-04	-		550	340	4	180~230
KTZ650 -02	-		650	430	2	210~260
KTZ700 -02	-		700	530	2	240~290

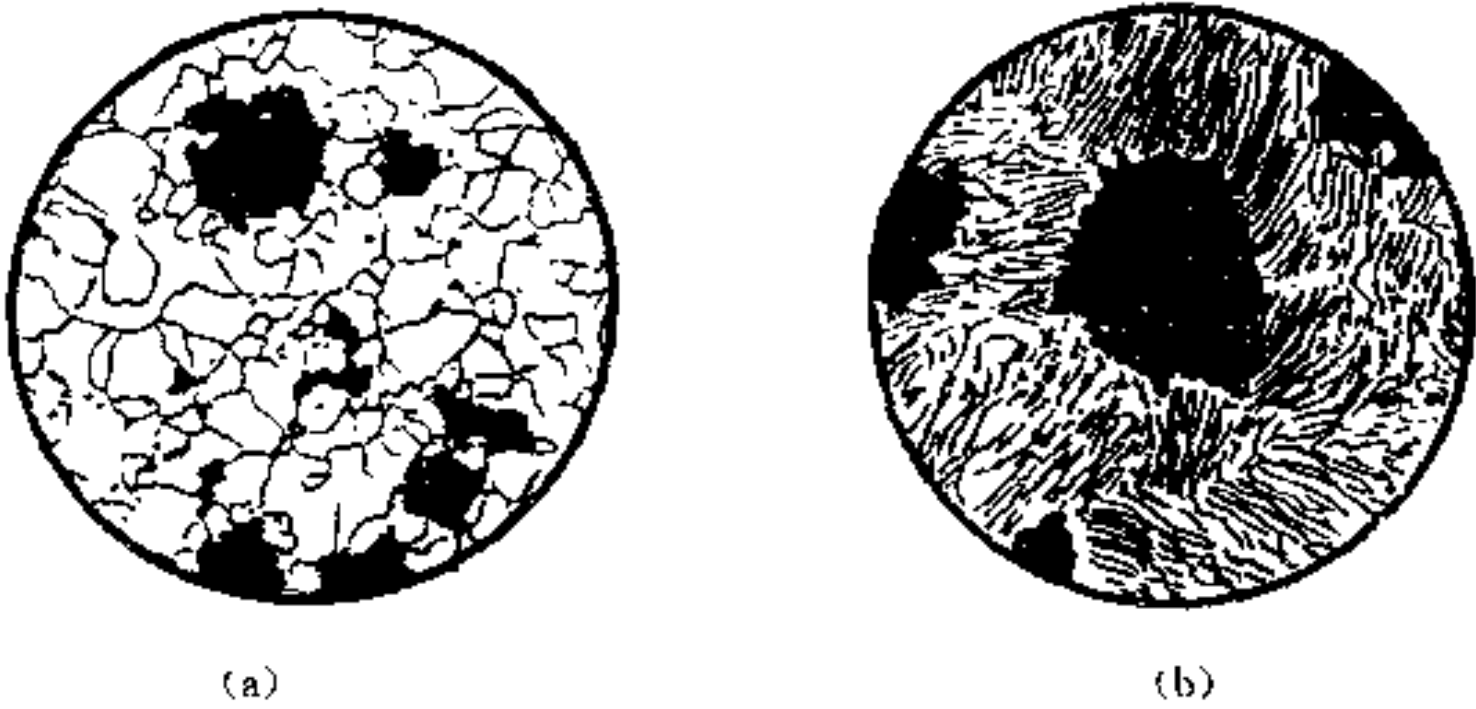


图 6-5 可锻铸铁的显微组织
(a) 铁素体可锻铸铁；(b) 珠光体可锻铸铁

4. 球墨铸铁

将球化剂(镁、铈、稀土镁等)加入熔化的铁水中,使石墨呈球状析出,经这样处理的铸铁叫球墨铸铁。表 6-8 列出了球墨铸铁的牌号及力学性能。球铁的基体组织常用的有珠光体、珠光体—铁素体和铁素体三种。经过热处理也可获得贝氏体、马氏体等基体组织。铁素体球铁由铸造或铸造后退火获得,具有较高塑性;珠光体球铁一般经铸造后正火获得;贝氏体球铁一般由等温淬火获得。常用球铁的金相组织如图 6-6 所示。

表 6-8 球墨铸铁的单铸试块力学性能(GB1348-88)

牌 号	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	延伸率 δ /%	供 参 考	
	最小值			布氏硬度 /HBS	主要金相组织
QT400-18	400	250	18	130~180	铁素体
QT400-15	400	250	15	130~180	铁素体
QT450-10	450	310	10	160~210	铁素体
QT500-7	500	320	7	170~230	铁素体+珠光体
QT600-3	600	370	3	190~270	珠光体+铁素体
QT700-2	700	420	2	225~305	珠光体
QT800-2	800	480	2	245~335	珠光体或回火组织
QT900-2	900	600	2	280~360	贝氏体或回火马氏体

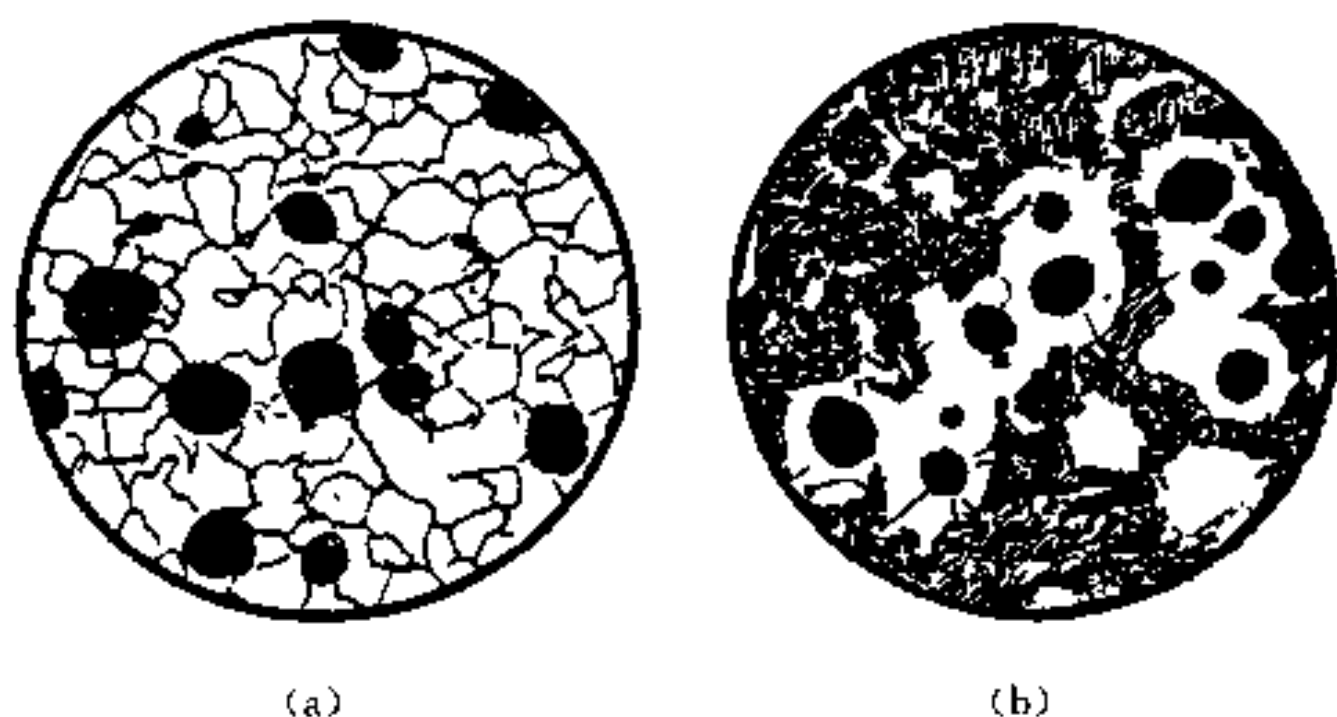


图 6-6 球墨铸铁的显微组织示意图
(a) 铁素体基体球墨铸铁；(b) 珠光体基体球墨铸铁

球墨铸铁的力学性能比灰口铸铁高得多，抗拉强度一般为 400~600 MPa，接近于铸钢，其工艺过程比可锻铸铁简单，一般中小工厂都有条件生产。所以，虽然目前我国球墨铸铁的总产量还赶不上可锻铸铁，但预计不久的将来通过进一步生产实践，将会克服球墨铸铁质量不够稳定的缺点，使球墨铸铁在各个工业部门得到极其广泛的应用。我国某煤机厂已用球墨铸铁代替铸钢用于采煤机壳体。

二、影响石墨化的因素

前面已经谈到，铸铁中的“碳”可以呈渗碳体状态存在，也可以呈石墨状态存在。为什么铸铁中的“碳”有两种形态呢？也就是说在什么样的条件下“碳”成为渗碳体或石墨状态。影响碳存在形态的因素（也就是影响石墨化的因素）有内因和外因。内在因素是铸铁的成分。其中碳、硅是促进石墨化的元素，锰、硫（尤其是硫）是阻止石墨化的元素，磷对石墨化影响不大。铸铁含碳、硅愈多，愈易成为灰口铸铁。一般铸铁中含碳量的差别不是太大，锰含量的变化也不大。硫和磷因降低铸铁的力学性能，对其含量有一定的限制。因而主要是硅决定了碳在铸铁中的状态。白口铸铁和灰口铸铁成分的主要区别就是含硅量不同。含硅多的，碳易形成石墨，成为灰铸铁，反之则易形成白口铸铁。

冷却速度是影响石墨化的外在因素。冷速快，促进铸铁中的碳形成渗碳体，冷速慢，则促使碳形成石墨。因而同样成分的铸铁，薄壁铸件和铸件表面易形成白口。

三、铸铁的热处理

因为热处理只能改变铸铁基体的性能，而灰口铁中的片状石墨对其性能起决定作用，所以通常不进行提高其力学性能的热处理（如调质）。有的灰口铁铸件毛坯（如机床床身），为了消除其铸造应力，使尺寸稳定，保证加工精度，要进行消除应力的低温退火。退火温度为 500~550℃。在该温度保温数小时后（可按铸件壁厚，每 25 毫米保温 1 小时计算），随炉冷至 200℃ 以下，出炉空冷。为使铸铁件加工后尺寸稳定，以往常采用在室温下长期存放的方法，这种方法叫自然时效或季节处理（一般需保存数月或更长的时间）。

灰口铁铸件有时在表层或薄截面的地方会出现白口，因白口不易切削加工，这时就需要采用高温退火（加热至 900℃ 左右）的方法来消除白口（使 Fe_3C 分解为石墨和铁），从而降低硬度便于切削加工。

为了提高硬度增加耐磨性，灰口铸铁件（如机床导轨等）还可以进行表面淬火。

基体组织对球墨铸铁的力学性能有很大影响,所以球墨铸铁可以进行正火、调质及等温淬火等热处理以提高其力学性能。其中应用最多的是正火处理。

四、高铬铸铁(高铬白口铁)

白口铁中的碳基本上以脆性极大的 Fe_3C 存在,并含有以 Fe_3C 为基体的莱氏体组织,从而决定了白口铁硬而脆的特性。所以除了作为炼钢原料之外,工业上一般都不使用。在白口铁的基础上加入一定量的铬以后,其性能发生了极大的变化。常用的高铬铸铁含碳量为 2.4%~3.6%,含铬量为 12%~30%,此外还常加入钼、镍、铜、锰等元素。

铸铁中加铬超过 10%后,其中渗碳体型化合物 $(\text{Fe} \cdot \text{Cr})_3\text{C}$ (硬度 800~1200 HV) 将变为硬度更高的 $(\text{Cr} \cdot \text{Fe})_7\text{C}_3$ (1300~1800 HV) 型化合物,从而提高了它的耐磨性。此外,含 Cr 超过 10%以后,网状碳化物将成为不连续状态,显著地提高了铸铁的韧性。

高铬白口铸铁还可以进行热处理改变其基体组织,即可以进行退火(HRC35~45)和淬火(HRC60~67)改变其性能。

高铬铸铁是当代最优异的耐磨材料之一。

第五节 常用有色金属

在机械设备中使用的金属材料除钢铁(黑色金属)外,一些有色合金也得到广泛的应用。最常用的有色合金是铝合金、钛合金、铜合金和巴氏轴承合金等。

一、铝合金

铝相对密度小(2.7)约为铁的 1/3,熔点低(658℃),塑性很高,可辗压成铝箔。导电和导热性良好,相当于铜导电性的 60%(若以同重量的铝和铜相比,则铝的导电性为铜的 200%)。铝在大气中的抗腐蚀性很高,因表面生成致密的 Al_2O_3 氧化膜,阻止进一步氧化。

纯铝强度很低(约 80 MPa),一般只用于电器材料。为了提高其强度(作结构材料),改善切削加工性,往往加入铜、镁、锌、硅等合金元素,制成不同性能和用途的铝合金。

铝合金按其成分和工艺特点分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。

图 6-7 为铝合金状态图的一般类型。状态图上最大饱和溶解度为 D 点,合金成分大于 D 点,由于有共晶组织存在,流动性好、塑性相对差,适用于铸造,称为铸造铝合金。

D 点以左的合金没有共晶组织,加热到 DF 线以上,形成单一的固溶体,其变形能力好,故可以进行锻造、压延、挤压等压力加工,因而称形变铝合金。

形变铝合金又分为两类,成分在 F 点以左的合金,其固溶体成分不随温度而变化,加热、冷却无相变,故称为不能热处理强化铝合金。位于 DF 之间的合金,其固溶体成分随温度而改变,故可利用固溶一时效热处理方式强化,称为可热处理强化铝合金。

1. 形变铝合金

形变铝合金按其性能、用途又可分为:防锈铝(LF)、硬铝(LY)、锻铝(LD)、超硬铝(LC),

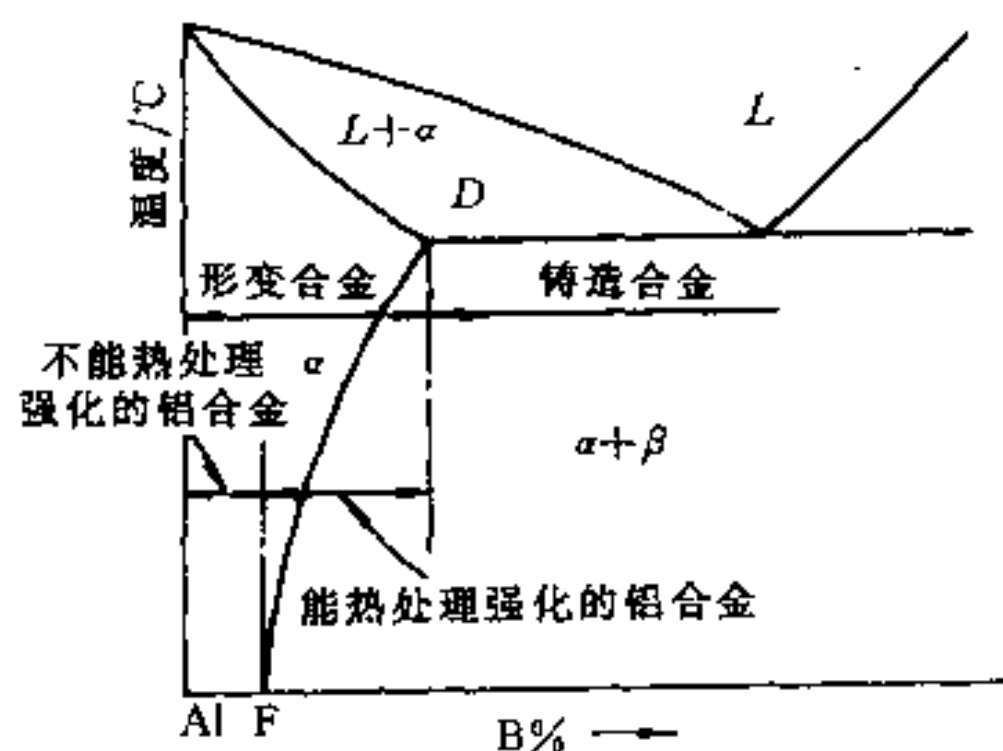


图 6-7 铝合金分类示意图

常用的主要牌号、成分及用途列入表 6-9。

防锈铝合金中含有 Mn、Mg 元素,主要作用是固溶强化和提高耐蚀性,这类合金不能用热处理强化,常采用冷变形方法提高其强度。

除防锈铝外,形变铝合金都可用热处理强化。

热处理强化方法是通过淬火和随后的时效来达到强化目的。淬火是将铝合金加热到较高温度(500℃以上)使它转变为均匀的固溶体,然后淬入水中,得到过饱和的固溶体。这种状态的合金是不稳定的,它力图变为稳定状态而进行分解。因而合金的性能就随时间延长而发生变化,这种现象称之为时效,时效将使强度、硬度增加,塑性、韧性降低。这种变化过程如果在室温下进行称自然时效,如果是在一定温度下进行则称人工时效。人工时效比自然时效可缩短很多时间,如 LY12 自然时效需 96~144 小时,而在 180~190℃人工时效只需 12 小时即可。

表 6-9 变形铝合金成分、性能及用途

类别	牌号	化学成分/%					力学性能*			用途
		Cu	Mg	Mn		其 他	σ_b /MPa	δ /%	/HBS	
防锈 铝合 金	LF5		4.0~5.0	0.3~0.6		V:0.02~0.10 (或 0.2)	270	23	70	焊接件、管道、容 器铆钉、线材及日用 品、装饰品
	LF11		4.8~5.5	0.3~0.6			270	23	70	
	LF21			1.0~1.6			130	23	30	
硬铝 合金	LY1	2.7~3.0	0.2~0.5			LY4 含:	300	24	70	飞机的重要结构 材料,如飞机大梁、 肋骨、隔框、蒙皮、螺 旋桨叶及铆钉等
	LY4	3.2~3.7	2.1~2.6	0.5~0.8		Ti:0.05~0.4	460	15	105	
	LY11	3.8~4.8	0.4~0.8	0.4~0.8		B:0.001~0.01	420	18	100	
超硬 铝合 金	LC4	1.4~2.0	1.8~2.8	0.2~0.6	Zn: 5.0~7.0	Cr:0.10~0.25	600	12	150	
	LC6	2.2~2.8	2.5~3.2	0.2~0.5	Zn: 7.6~8.6	Cr:0.10~0.25	680	7	170	
锻铝 合金	LD5	1.8~2.6	0.4~0.8		Ti:0.02 ~0.10	Si:0.7~1.2	420	13	105	用锻造或其它压 力加工方法制造复 杂的零件
	LD7	1.9~2.5	1.4~1.8	0.4~0.8	Ni:1.0 ~1.5	Fe:1.0~1.5	440	13	120	
	LD10	3.9~4.8	0.4~0.8	0.4~1.0		Si:0.6~1.2	480	10	135	

* 力学性能:防锈铝合金为退火状态指标;

硬铝合金为淬火+自然时效状态指标;

超硬铝合金为淬火+人工时效状态指标;

锻铝合金为淬火+人工时效状态指标。

注:表中锻铝合金 Ti 和 Ni 含量是 LD7 的成分。

2. 铸造铝合金

铸造铝合金一般含合金量较多,熔点低、流动性好。工业上常用铸铝合金可分为 Al—Si 系、Al—Cu 系、Al—Mg 系和 Al—Zn 系四大类,其中 Al—Si 系铝合金应用最广泛。

在国家颁布的 GB1173—86 标准中规定,铸造铝合金代号由字母“ZL”表示,“ZL”是

“铸”、“铝”汉语拼音第一个字母,在 ZL 后面加上三位数字,第一位数表示合金系列,其中 1、2、3、4 分别表示 Al—Si、Al—Cu、Al—Mg、Al—Zn 系列合金,第二、三位数表示顺序号。例如 ZL101、ZL201、ZL301、ZL401 等等。铸造铝合金牌号是由铝及主要合金元素的化学元素符号组成(混合稀土用“R”表示)。在牌号前冠以字母“Z”表示铸造合金,化学元素后面的数字表示该元素的平均含量,以百分之几表示,含量小于 1% 时不标。杂质含量较少、性能高的优质合金在牌号后面附加字母“A”。例如 ZAlCu5MnA,代号为 ZL201A,属于 Al—Cu 合金。Cu 平均含量 5%、Mn 含量小于 1%、A 表示含杂质少的优质合金。常用的铸造铝合金牌号、代号、成分、热处理、性能及用途列入表 6-10 中。

铝硅铸造合金称为硅铝明,ZL102 是最简单的硅铝明,含 Si 量为 11%~13%,其铸造组织粗大,强度低($\sigma_b=143\sim153$ MPa)、塑性差($\delta\approx3\%$)。浇注前在液态合金中加入 1%~3% 的钠盐和钾盐(如 62.5%NaCl+25%NaF+12.5%KCl)的混合物,进行变质处理,可以细化晶粒,使力学性能提高($\sigma_b\approx180$ MPa, $\delta\approx8\%$)。也可加入一些元素如硼、钛等以细化晶粒。

在简单硅铝明的基础上,加入 Cu、Mg、Zn 等元素称为特殊硅铝明,这类合金除了变质处理外,还可进行固溶时效强化,进一步提高合金的强度。如 ZL104 中含有 0.17%~0.30% 的 Mg 元素,抗拉强度可提高到 200~240 MPa。

在轻合金中,除铝合金外,钛和钛合金也是一种很有前途的新型结构材料,工业纯钛是制造化工设备、船舶用零部件和化工用热交换器的优良材料。钛合金是制造大型运输机和超音速运输机叶片、火箭发动机壳体、人造卫星外壳、载人宇宙飞船舱等重要结构材料。有关钛和钛合金的情况,请查阅有关资料。

二、铜合金

纯铜又称紫铜,相对密度 8.96,熔点 1083℃,具有很好的导电性、导热性及抗大气腐蚀性,是抗磁性金属,广泛用来作电线、电缆、冷却器以及传热体、防磁器械等。

纯铜具有面心立方晶格,无同素异构转变现象。强度低、塑性好,可进行冷变形强化,但塑性显著下降,例如,当变形度为 50% 时, σ_b 从 230~250 MPa 提高到 400~430 MPa,延伸率 δ 由 40%~50% 却降低到 1%~2%。

纯铜中的杂质主要有 Pb、Bi、O、S、P 等,这些杂质对纯铜性能影响很大,必须加以控制。

工业纯铜有 T1、T2、T3、T4 四个牌号,“T”为“铜”汉语拼音的第一个字母,其后的数字愈大,纯度越低,T1 纯度不小于 99.95%、T4 纯度为 99.5%。

纯铜的强度低,不宜直接用来制造机器零件,而是采用铜合金(黄铜或青铜)。

1. 黄铜

普通黄铜是铜与锌的合金,它的颜色随含锌量的增加由黄红色变到淡黄色(价格也相应降低)。用“黄”字汉语拼音第一个字母“H”来表示,其后的数字表示平均含铜量,例 H70 表示平均含铜量 70% 的普通黄铜。

普通黄铜的性能受含 Zn 量的影响,当含锌量小于 32% 时,强度、塑性随含 Zn 的增加而增加,大于 32% 后塑性开始下降,大于 45% 之后强度、塑性急剧下降,所以,工业黄铜中的含锌量一般不超过 47%。

普通黄铜 H70 和 H68 具有较高的强度和塑性,可进行冷热变形加工,适用于在常温下冲压形状复杂的零件及弹壳等。这类黄铜中铜与锌之比约为 7:3,故常称为“三七”黄铜。

H62、H59(也称“四六黄铜”),室温组织中有脆性相,不适冷变形加工,只适用于热加工。

表 6-10

常用铸造铝合金属号、成分、热处理、性能及用途

类别	牌号及 代 号	化学成分/%							铸造 方法	热处理	力学性能			用 途
		Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Al	其 它			σ_b /MPa	δ /%	/HBS	
铝 硅 合 金	ZAlSi7Mg ZL101	6.50~ 7.50		0.25~ 0.45		0.08~ 0.20	余量		金属型 砂型变质	淬火+自然时效 淬火+人工时效	190 230	4 1	50 70	飞机、仪器零件
	ZAlSi12 ZL102	0.00~ 13.00					余量		砂型变质 金属型		143 153	4 2	50 50	仪表、抽水机壳体 等外型复杂件
	ZAlSi9Mg ZL104	8.00~ 10.50		0.17~ 0.30	0.20~ 0.50		余量		金属型 金属型	人工时效 淬火+人工时效	200 240	1.5 2	70 70	电动机壳体、气缸 体等
	ZAlSi5Cu1Mg ZL105	4.50~ 5.50	1.00~ 1.50	0.40~ 0.60			余量		金属型 金属型	淬火+不完全时效 淬火+稳定回火	240 180	0.5 1	70 65	风冷发动机气缸 头、油泵壳体
	ZAlSi12Cu1Mg1Ni1 ZL109	1.00~ 13.00	0.50~ 1.50	0.80~ 1.30			余量	Ni; 0.80~1.50	金属型 金属型	人工时效 淬火+人工时效	200 250	0.5 —	90 100	活塞及高温下工 作的零件
铝 铜 合 金	ZAlCu5Mn ZL201		4.50~ 5.30		0.60~ 1.00	0.15~ 0.35	余量		砂型 砂型	淬火+自然时效 淬火+不完全时效	300 340	8 4	70 90	内燃机汽缸头活 塞等
	ZAlCu10 ZL202		9.00~ 11.00				余量		砂型 金属型	淬火+人工时效 淬火+人工时效	170 170	—	100 100	高温不受冲击的 零件
铝 镁 合 金	ZAlMg10 ZL301			9.50~ 11.00			余量		砂型	淬火+自然时效	280	9	60	舰船配件
	ZAlMg5Si1 ZL303	0.80~ 1.30		4.50~ 5.50	0.1~ 0.4		余量		砂型 金属型	—	150	1	55	氨用泵体
铝 锌 合 金	ZAlZn11Si7 ZL401	6.00~ 8.00		0.10~ 0.30			余量	Zn; 9.00~13.00	金属型	人工时效	250	1.5	90	结构形状复杂的 汽车、飞机仪器零 件
	ZAlZn6Mg ZL402			0.50~ 0.60		0.15~ 0.25	余量	Zn; 5.0~6.5 Cr; 0.40~0.60	金属型	人工时效	240	4	70	同上

这类黄铜强度高、抗蚀性良好、价格便宜,广泛用来制造散热器、热圈、弹簧、各种金属网以及热压、热轧零件等。

为了改善普通黄铜的某些性能,常加入一些其它元素,如 Al、Sn、Ni、Mn 等提高铜合金的强度和抗蚀性,加入 Si、Pb 等改善切削加工性和耐磨性。复杂黄铜的编号方法是:H+主加元素+铜的含量+主加元素含量,例如 HSn62-1 表示主加元素是 Sn,Cu 的平均含量 62%,主加元素 Sn 的平均含量为 1%。铸造黄铜在“H”前加“Z”,如 ZHSi80-3 表示铸造复杂黄铜。常用的黄铜成分、性能、用途列入表 6-11 中。

表 6-11 常用黄铜成分、性能和用途

牌号及代号	化学成分/%				力学性能						用途
	Cu	Zn	其它元素	杂质 总和	σ_b /MPa		δ /%		HBS		
					状态	数值	状态	数值	状态	数值	
62 黄铜 H62	60.5 ~63.5	其余		0.5	铸造 硬质 软质	328 680 360	铸造 硬质 软质	35.5 9 49	硬质 软质	164 56	具有高塑性、 足够强度和耐 蚀性,拉伸性 好、可作散热器 和热工设备零 件等
68 黄铜 H68	67~70	其余		0.3	铸造 硬质 软质	280 520 330	铸造 硬质 软质	48 12 56	硬质	150	具有极好的 力学性能、极 好的压力加工 性、作复杂冲 压件、弹壳黄 铜、三七黄铜
锡黄铜 HSn70-1	69~71	其余	Sn 1~1.5	0.3	金属型 硬质 软质	250 580 350	金属型 硬质 软质	49 10 62	金属型 硬质 软质	60 142 48	具有极高的 耐蚀性和足够 力学性能,主 要以管材用于 热工设备
铁黄铜 HFe59-1-1	57~60	其余	Fe0.6~1.2 Mn0.5~0.8 Sn0.3~0.7 Al0.1~0.2	0.25	金属型 硬质 软质	460 550 ~660 450	金属型	25	金属型 硬质 软质	90 160 80	具有高的强 度、韧性和耐 磨性,可作受 海水腐蚀和耐 摩擦零件
铅黄铜 HPb59-1	57~60	其余	Pb0.8~1.9	0.75	金属型 硬质 软质	340 620 420	金属型 硬质 软质	27 4~6 36~50	铸造 硬质 软质 半硬质	81 149 75 116	具有很好的 强度、耐磨 性、切削性能 好,主要用于 钟表工业
铸硅黄铜 ZHSi80-3	80	其余	Si3 Pb3		金属型 砂型	300 250	金属型 砂型	15 10	金属型 砂型	110 110	有高的力学 性能、抗蚀 性和流动性,能 获光洁的高密 度铸件,可制 齿轮及船舶零 件

注:硬质塑性变形程度 50%;软质 600℃退火。

2. 青铜

青铜是人类历史上应用最早的铜合金,是指 Cu—Sn 合金。目前工业上把以 Al、Si、Pb、Be、Mn 等元素为主的铜合金也称为青铜,为区别起见称为无锡青铜或分别称为铝青铜、硅

青铜、铍青铜等等。

青铜编号方法是：Q+主加元素符号+主加元素含量+其它元素含量，“Q”表示“青”汉语拼音第一个字母。例如 QSn10-2 表示平均含 Sn 量 10% 含 Zn2%，其余为 Cu。铸造青铜在编号前加“Z”。

锡青铜的性能与含 Sn 量有关，随含 Sn 量增加抗拉强度和延伸率增加，当含 Sn 大于 6%~7% 后，延伸率迅速降低，含 Sn 量大于 20% 后，组织中出现脆性相，合金变脆，强度和塑性急剧下降，因此工业用锡青铜的含 Sn 量一般为 3%~14%。含 Sn 量低于 8% 的锡青铜塑性好，适用于压力，也称压力加工锡青铜，含 Sn 量大于 10% 的锡青铜塑性差，只适用于铸造用，称铸造锡青铜。

铸造锡青铜含锡量比压力加工的高，结晶温度间隔大，易产生偏析和分散小缩孔。为了改善锡青铜性能加入少量锌，能缩小结晶间隔提高流动性；加入铅提高耐磨性和切削性；加入磷可提高抗磨性，故磷青铜可制造轴承、齿轮、轴套等耐磨零件。

因为锡是贵重金属，故在铜基合金中加入铝、镍、硅、锰、铍等形成无锡青铜。它具有高的强度、耐腐蚀性和耐磨性，是锡青铜的很好代用品，在机械制造中应用最多的是铝青铜。

因合金元素溶入铜中(形成固溶体)使其导电性大为降低。有些零部件(如电阻焊机的电极等)既需要高的导电性又需要一定的硬度及耐磨性。铬青铜(0.5%Cr、0.17%Mg、0.2%Al 其余为铜)可以满足这种性能要求。它在具有高硬度高耐磨性的同时，还保持高的导电性。这种合金经适当热处理后(980~1000℃淬火，460℃时效)硬度可达 100~120 HBS，而导电性与纯铜相比仅降低百分之十几。铜中加入镉也具有导电性降低不大而使其硬度和耐磨性大为升高的作用。

常用青铜的成分、性能和用途列入表 6-12。

表 6-12 常用青铜的成分、性能和用途

牌号及代号	化 学 成 分 / %								力 学 性 能			用 途	
	Sn	Zn	Pb	P	Al	Fe	Cu	杂质	状态	σ_b	$\delta / \%$		/HBS
										不 小 于			
锡青铜 QSn4-3	3.3~ 4.0	2.7~ 3.3					其余		退火	350	40	60	弹簧、化工机械等
6-6-3 锡青铜 ZQSn6-6-3	5~7	5~7	2~4				其余	1.30	金属型	180~ 250	4~ 8	65~ 75	轴承、轴承座等
10-1 磷锡青铜 ZQSn10-1	9~ 11			0.8~ 1.2			其余	0.75	金属型	250~ 350	7~ 10	90~ 120	精密机床轴承、蜗 轮、齿圈、螺母等
9-4 铝青铜 QA19-4					8~ 10	2~ 4	其余	2.7	变形 金属型	550 500	5 12	160~ 200 100	轴承、蜗轮、阀座、 齿轮等
8-12 铅锡青铜 QSn8-12	7~ 9		11~ 13				其余	0.75	金属型	200	3.8	60	铁路车辆轴承等
4-4-2.5 青铜 QSn4-4-2.5	3~ 5.0	3~ 5.0	1.5~ 3.5				其余		退火	300~ 350	35~ 40	60	汽车、拖拉机的轴 套垫等
10-3-1.5 铝青铜 QA110-3-1.5			Mn: 1~2		9~ 11	2~ 4	其余	< 0.75	变形	600	12	120	轴承、轴套、齿轮等 重要零件等

三、巴氏轴承合金

制造滑动轴承瓦的合金称为轴承合金。轴是在旋转条件下工作的,它对轴承施以交变载荷,因此,轴承材料应具有一定的抗压强度和疲劳强度以及良好的塑性、冲击韧性和耐磨性。

对轴承材料不能要求硬度过高,否则轴要磨损。但也不能硬度过低,否则摩擦系数大,工作时发生大量的热。一般要求轴承材料基体是软的,而在其上面分布着均匀的硬质点,这样

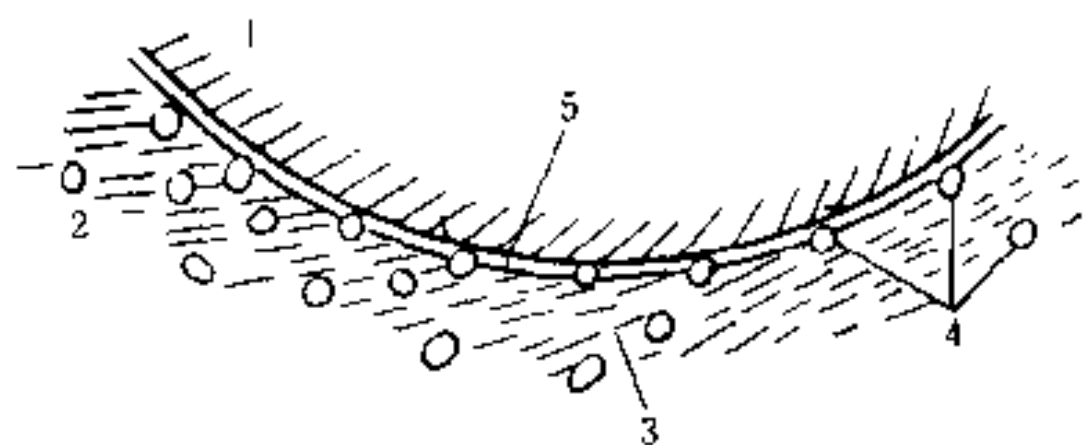


图 6-8 轴与轴瓦接触面示意图

1—轴;2—轴瓦;3—软基体;4—硬质点;
5—储存润滑油的空间

其工作状态就比较理想,如图 6-8 所示。这样的组织在较短时间工作以后(跑合),因基体较软,塑性大,就能保证与轴密切配合,应力分布均匀。同时,因软基体与硬质点耐磨性不同而形成微凸起,此时轴与轴承接触面积较小,其间隙可以储存润滑油,故摩擦系数与磨损都小。如果材料选择不当,则引起强烈磨损,伴之而来的是强烈发热,导致润滑油粘度降低,润滑条件变坏,最后导致轴承烧坏。在外力作用下,轴和轴承还会发生胶合现象(即轴与轴承粘在一起)。

胶合现象一旦发生,便是恶性循环,即胶合引起剧烈磨损和发热;磨损和发热又进一步促使胶合更加严重,最后使轴和轴承损坏。在正常磨损情况下,将使轴和轴承配合间隙增大,当此间隙足以影响机器正常运转时,则需要更换轴承(轴耐磨性较轴承高)。而更换轴承是比较经济合理的,因轴的加工工序多,价格较贵,与轴连接的零件较多,安装比较困难。

此外,要求轴承材料对油的吸附力强,能够保持润滑油,以保证最低的摩擦系数,与中等硬度的轴颈配合工作时不引起擦伤,有良好的导热性,易将热量从摩擦表面上传出,以免烧伤轴承。

常用的轴承材料有巴氏合金(乌金)、青铜两种。有时也用珠光体灰口铸铁,但由于它的摩擦系数大,只能用于不重要的低速机器轴承,下面简要介绍巴氏合金。

巴氏合金有锡基和铅基两种。

最典型的锡基巴氏合金是 ChSnSb11-6。“Ch”代表轴承合金,其成分是:含锡(Sn)83%、锑(Sb)11%、铜(Cu)6%。其组织是 Sb 和 Sn 的固溶体(软基体)上均匀分布着硬质点(SnSb 及 Cu_3Sn 化合物)所组成。这种合金可用作汽轮机、发动机、火车车辆等的轴瓦。

ChPbSb11-16-1.8 是铅基轴承合金,其成分是:含铅(Pb)66%、锡(Sn)16%、锑(Sb)16%、铜(Cu)1.8%。它也是软基体[(Pb)+Sn(Sb)]共晶组织上分布着 PbSb、 Cu_3Sn 或 Cu_2Sb 化合物等硬质点。其性能不如锡基巴氏合金,但成本低,常用于中等负荷机器轴瓦,如汽车、拖拉机的曲柄轴瓦。

除巴氏合金外,锡青铜、铅青铜、磷青铜都可作为轴承材料,与巴氏合金相比,具有较高的强度和导热性,但摩擦系数较大。

铝基轴承合金是最近几十年发展起来的一种新型轴承材料,其特点是相对密度小、导热性好、疲劳强度和耐磨性好、价格便宜,但热膨胀系数大、抗胶合性较差。目前常用的铝基轴承合金有铝锑镁轴承合金和高锡铝基轴承合金。

铝锑镁轴承合金成分是 4% Sb、0.3%~0.7% Mg,其余为铝。它以 08 钢作背衬,将合金覆于钢板上冷轧成双金属带材。这种材料作的轴瓦承载能力高,抗疲劳性能和耐磨性高。可

在中等负荷的内燃机上使用。

铝基高锡轴承合金成分为 20%Sn、1%Cu,其余为铝。轴承是钢背衬,纯铝为中间层及铝锡合金三层轧制成带材。承载能力提高 50%,可在高速及重载条件下工作的内燃机上使用。

巴氏轴承合金的成分、性能和用途列入表 6-13。

表 6-13 巴氏轴承合金的成分、性能和用途

类别	牌号及代号	化学成分/%					机械性能			用途
		Sn	Pb	Cu	Sb	其 它	σ_b /MPa	δ /%	/HBS	
锡基轴承合金	11-6 锡锑轴承合金 ZChSnSb11-6	其余	0.35	5.5~6.5	10.0~12.0	杂质 0.55	90	6.0	30	高级轴承合金,能承受较高冲击负荷,用于重型机床、锻压设备和大型动力机械如汽轮机、发动机主轴轴瓦等
	8-3 锡锑轴承合金 ZChSnSb8-3	其余		2.3~3.5	7.25~8.25		80	10.6	24.3	
	4.5-4.5 锡锑轴承合金 ZChSnSb4.5-4.5	其余		4~5	4~5		80	7.0	22	
铅基轴承合金	16-16-2 铅锑轴承合金 ZChPb16-16-2	15~17	其余	1.5~2	15~17	杂质 0.6	78	0.2	30	能承受一定冲击负荷,用于中等负荷机器轴瓦,如汽车、拖拉机曲轴轴瓦等
	6-15-3 铅锑轴承合金 ZChPb6-15-3	5~6	其余	2.5~3.5	14~16	As0.6~1.0 Cd1.75~2.25	68	0.2	32	
	2-0.5-0.5 铅锑轴承合金 ZChPb2-0.5-0.5	1.5~2.5	其余	~	~	Ca0.35~0.55 Na0.25~0.5 Mg0.04~0.09	93	8.1	19.7	

四、低熔点合金

有时需要低熔化温度的合金。例如为了防止液压连轴器过载运行,连轴器上需安装一个易熔“安全塞”。当负荷超过额定标准时,连轴器中的油温将升至正常范围以上,这时安全塞受热熔化,将油泄出,从而保护设备不受损害。

铅、锡、铋、镉四种金属可以配制成各种不同温度的低熔点合金。它们的四元共晶成分(49.5%Bi、27.3%Pb、13.1%Sn、10.1%Cd)熔化温度最低为 70℃。有名的低熔点材料“乌德合金”的熔点与上述共晶温度接近,其成分是:50%Bi、25%Pb、12.5%Sn、12.5%Cd。乌德合金中再加入汞或铟,可使其熔化温度降至 70℃以下。

铅、锡、铋、镉的熔点都很低,熔炼容易,需要时可以自己配制。

五、钎焊合金

钎焊是用低熔点合金作钎料将高熔点金属粘结起来,通常称为锡焊和铜焊。依我国冶金部钎料编号为 HI1××(Cu—Zn 合金),HI2××(Cu—P 合金),HI3××(Ag 合金),HI4××(Al 合金),HI5××(Zn 及 Cd 合金),HI6××(Sn—Pb 合金),HI7××(镍基合金)。

应用最广泛的是 Pb—Sn 合金,加入 6%锑可代替锡改善力学性能,Sb—Ag、Pb—Ag—Sn 可提高强度、抗蚀性,改善焊接性。含铟钎料如 54Sn—26Pb—20In 用于钎焊铝,Zn—Cd、Zn—Al 和 Sn—Zn 也用于钎焊铝。

HCuZn64(HI101)含 Zn64%、Cu36%，熔点 800~823℃，用于钎焊含铜大于 68%的合金。BCu58ZnMn(HI104)含 Cu60%、Mn3~4%，其余为 Zn，熔点 890~905℃，用于钎焊硬质合金刀具。

六、记忆合金

是指一定形状的合金在某种条件下经任意塑性变形，然后加热至该材料的某一临界点以上时，又完全恢复其原来形状的现象。如 Ti—Ni、Au—Cd、In—Ti、Cu—Al—Ni、Cu—Zn—Sn、Au—Cu—Zn、Fe—Pt、Cu—Zn、Ni—Al 等合金在马氏体相变中具有形状记忆效应，在一定条件下可自动做功，得以应用。例如，① 自动组装的结构件。如用相变点低于海底温度的 Ti—Ni 结构件，冷至相变点以下压缩，抛下海底，在海水的温度作用下使其加热回复原状，组装甚为方便；② 热敏装置和安全装置。如火灾报警器、记忆铆钉。用相变点低于化工介质温度的 Ti—Ni 套管，低温下扩径套入，则在化工介质下，套管依其记忆自动缩径使其紧固起来；③ 热能—机械能转换装置。利用马氏体相变逆转中产生的应力和位移，将热能直接转换为机械功，如用 Ti—Ni 在热水中收缩，在冷水中膨胀制成 Ti—Ni 小马达或用太阳能为动力的 Ti—Ni 发动机。

思考题与习题

1. 说明下列现象产生的原因：

- (1) 在相同状态下，T10 钢比 50 钢的硬度高。
- (2) 在室温下，退火态 T8 钢的抗拉强度比退火态 T12 钢的抗拉强度高。
- (3) 在 1100℃ 温度下，40 钢能进行锻造，而含碳量为 4.0% 的白口铸铁却不能锻造。
- (4) 钢铆钉一般用低碳钢制造。
- (5) 绑扎物件一般用低碳钢丝，而起重机吊重物却用中高碳钢丝绳(50、60、65 钢制成)。
- (6) 钳工锯 T8、T10、T12 等钢料时比锯 10、20 钢料要费力，且锯条易磨钝。
- (7) 钢宜于通过压力加工成型、而铸铁适宜用铸造成型。

2. 指出下列钢号的类别、平均含碳量及主要用途：

Q235、45、15Mn、T8Mn、T12、ZG200-400、Y20、Y40Mn、20Cr、20CrMnTi、18Cr2Ni4W、35CrMnSi、40Cr、40CrMnMo、65Mn、60Si2Mn、GCr15、Cr12MoV、W18Cr4V、5CrMnMo、3Cr2W8V、9SiCr、9Mn2V。

3. 合金工具钢性能有何特殊要求？有哪些种类、牌号和特点？

4. 高速钢在空气中冷却即可变硬，为什么还要淬火并回火三次？

5. 高速钢刀具在切削中温度可高达 600℃，而硬度降低很少，这是为什么？

6. 什么是红硬性及二次硬化？碳钢、低合金工具钢、高速钢、硬质合金的红硬性各为多少？为什么会产生差异？

7. 矿山凿岩切岩刀具多用哪种牌号的硬质合金？有何特点？

8. ZGMn13 有何特点？为什么能耐磨？它使用的条件是什么？是否凡需要耐磨的地方都能用 ZGMn13？高铬铸铁有何特点？为什么耐磨？

9. 不锈钢和耐热钢性能有何区别？通常有哪两类不锈钢？耐热钢有哪些种类？各有何

用途？

10. 电器工业中不可缺少的特殊性能钢及合金有哪些？各有何特点？
11. 铸铁有何特点？如何分类？其牌号是如何表示性能的？
12. 影响石墨化的因素有哪些？怎样使石墨在结晶过程中变为球团状？
13. 铸铁是否需要热处理？常进行哪些热处理？
14. 变形铝和铸造铝合金有何区别？铝合金是否可以热处理？有什么特点？
15. 黄铜、青铜成分性能有何区别？多用于何种零件上，试举例说明。
16. 巴氏合金为什么耐磨？从润滑原理上有何特点？锡基、铅基各有何不同？怎样选用？
17. 铝锑镁轴承合金有何特点？铝基高锡轴承合金有何特点？使用条件有何不同？
18. 低熔点合金有何特殊用途？有哪几种元素配成？为什么使用共晶合金？

第七章 非金属材料

非金属材料广义上讲是金属材料以外一切材料的总称,包括有机物、无机物和各种有机物或无机物在适当的组合下,经过一定的物理或化学方法处理后而得到的材料。近 50 年来,非金属材料以其丰富的资源和优良的物理、化学以及功能特性等综合性能,而得到迅速发展。非金属材料特别是其中的高分子材料在机械工业中,已越来越多地被采用来代替部分金属制造零件,尤其是在替代某些有色金属和其它贵金属方面,经济效益更为突出。目前工业上使用的非金属材料主要有高分子材料(工程塑料、橡胶和合成纤维)、工业陶瓷和复合材料三大类。本章将简要介绍它们的组织结构、性能及用途。

第一节 高分子工程材料

高分子工程材料(又称工程聚合物)是以高分子化合物为主要组分(适当加入添加剂)的材料,如塑料、橡胶及纤维等。

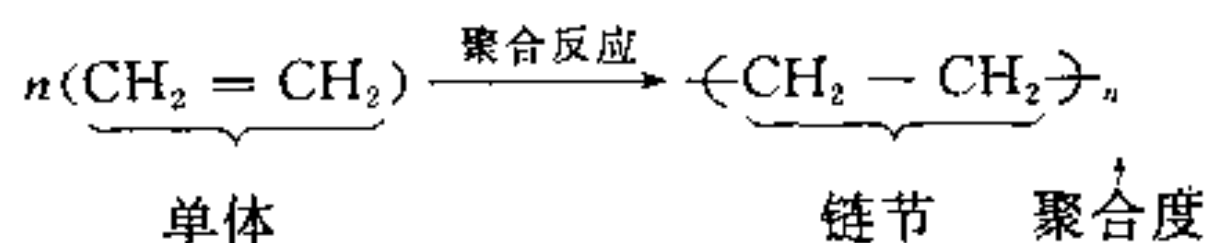
高分子化合物都是由一种或多种简单低分子化合物聚合而成的,它的分子量很大,通常被称为高聚物或聚合物,它具有较高的强度、塑性和弹性等力学性能,而低分子化合物没有这些性能。一般来说,只有分子量达到了使力学性能具有工程意义的化合物,才可认为是工程用高分子化合物。

一、高分子材料的结构与性质

1. 高分子的概念

高分子物质是分子量特别大的有机化合物的总称。一般分子量小于 500 的称为低分子物质,分子量大于 500 的称为高分子物质,但没有严格的界限,高分子材料的分子量通常在 $10^3 \sim 10^6$ 之间。

高分子物质虽然分子量很大,结构复杂,但组成高分子物质的大分子链都是由一种或几种简单的低分子有机化合物重复连接而成的。如聚乙烯是由众多乙烯分子($\text{CH}_2=\text{CH}_2$)打开双键形成了单体的不饱和键,这些不饱和键首尾相连就形成了链式大分子聚乙烯,其化学式为:



凡是可以聚合成大分子链的低分子有机化合物称为单体,如聚乙烯的单体是乙烯($\text{CH}_2=\text{CH}_2$);大分子中的重复结构单元称之为链节,如聚乙烯的链节为 $\text{-(CH}_2-\text{CH}_2\text{-)}$;组成大分子时,链节的数目(n)叫做聚合度。不难理解,大分子链的分子量(M)就是链节的分子量(m)和聚合度(n)的乘积(即 $M=n \times m$)。高分子材料由大量的大分子链聚集而成,合成时,大分子链长短不一,其数量呈统计规律分布。所以高分子材料的分子量是大量大分子链分子量的

平均值。

2. 高分子的形状与大小

高分子的性能与其分子链的几何形状有着密切关系。根据分子链在空间排列形状的不同,可分为线型、支链型和体型三种结构。如图 7-1(a)、(b)、(c)。

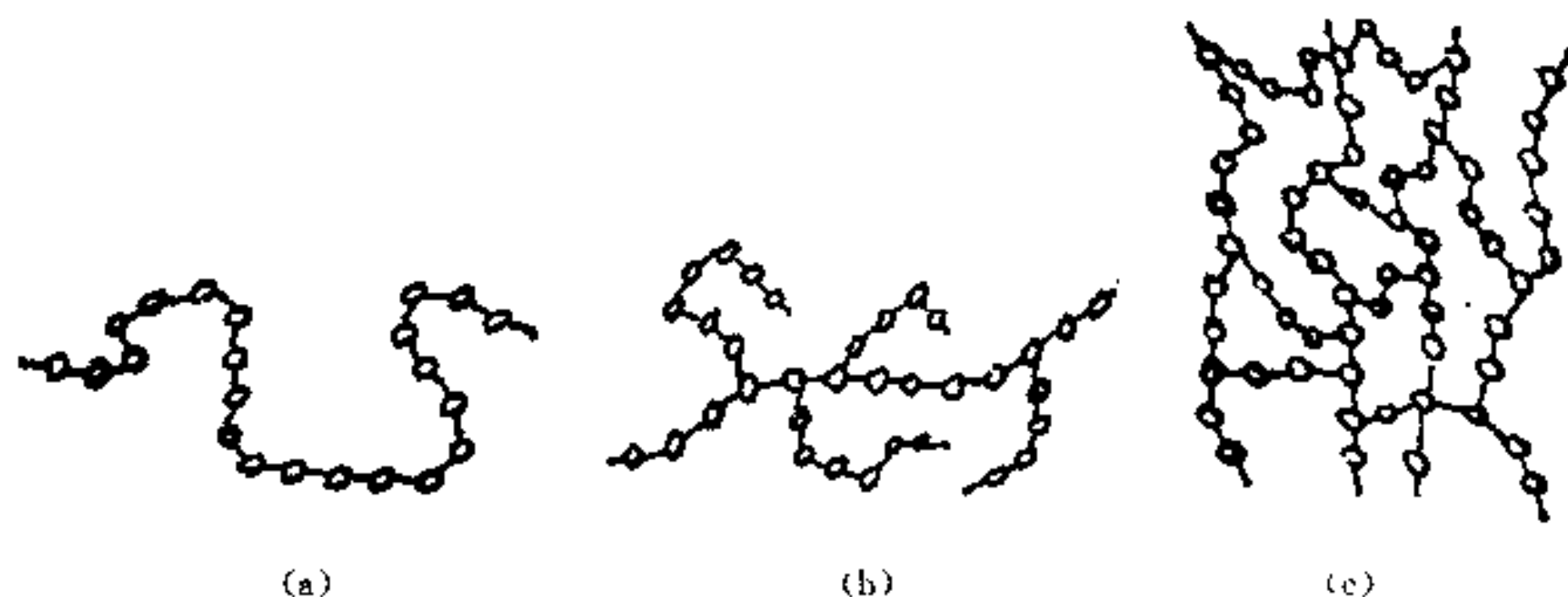


图 7-1 高聚物大分子的三种形态

(a) 线型; (b) 支链型; (c) 体型(网状)

线型高聚物只有主链没有支链,如图 7-1(a)所示。因其分子链是自由的,所以在加热和外力作用下分子链可以相互位移,便于加工成型,可反复使用;并具有一定的弹性、塑性和柔软性;可在适当的溶剂中溶解。即具有可溶性、可熔性。一些合成纤维和热塑性高聚物属于此类,如聚氯乙烯、聚苯乙烯等。

支链型高聚物是在其主链上又接出一些短的支链,如图 7-1(b)所示。实际聚合物中完全是直链的很少,多少都带有一些支链,由于支链的存在与否及支链的多少较难判断,故一般有短链的,也常以直链表示。支链的存在使聚合物的性能发生变化,如熔点升高、粘度增加、强度提高。如果把与主链完全不同的支链有意识接到主链上去,就可形成接枝共聚物。性能优异的 ABS 工程塑料就是这种结构。

体型高聚物是一个主链上的支链与另一主链相接而形成的,如图 7-1(c)所示。即一条支链在两条主链间起着桥梁作用,这种聚合物具有不溶性、不熔性,且耐热性好、强度高、形态稳定。这类高聚物一次成型后不可逆变,故也称热固性高聚物。如硫化橡胶、酚醛树脂等就属于体型高聚物。

高分子链有大小之分,分子大小对聚合物的性质有很大影响。在低分子物中,每种低分子物都按它的分子式有确切的分子量,而且每个分子都一样。高分子物则不然,它们总是由不同大小的分子组成。因此,聚合物是同一化学组成,聚合度不等(链长不同,分子量不同)的同系混合物。这一现象通常称为聚合物分子量的多分散性。故高分子化合物的分子量是平均分子量。

3. 大分子间作用力及聚集状态

高分子是由大分子链聚集在一起组成的。当大分子链之间距离足够近($3\sim 5\text{Å}$)时,分子间产生范德华力,其大小只有 $0.84\sim 8.4\text{ kJ/mol}$,为链内共价键主价力的 $1/10\sim 1/100$ 。但单体间的范德华力具有加和性。因此,高聚物中,大分子之间的作用力(常称为次价力)之和通常超过分子链内主价力。当高聚物发生各种拉伸破坏时,总是分子链首先发生断裂(共价

键破坏)而不是分子滑动。分子间的力对高聚物的强度、弹性、粘度及物理化学性能均有很大影响,尤其是对材料的强度有着决定性的作用。

分子间作用力大小不仅和分子量有关,还和大分子链之间的排列情况(聚集状态)有关。高分子中大分子链的聚集状态主要有三种结构:完全无规则排列的非晶态结构即线型无定型结构、折叠链片晶结构和伸直链晶体结构。如图 7-2(a)、(b)、(c)所示。

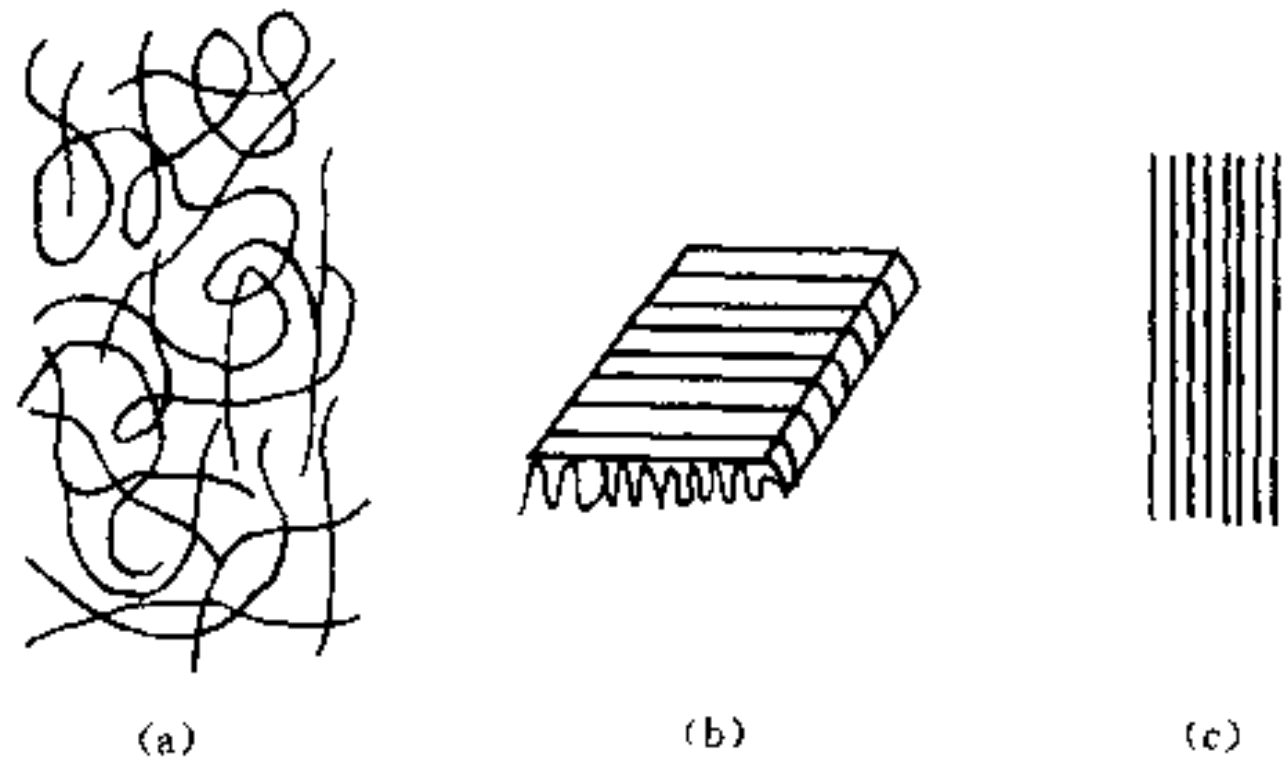


图 7-2 大分子链三种聚集态结构示意图
(a) 非晶态;(b) 折叠链片晶;(c) 伸直链晶体

4. 高分子的基本特点

高分子具有和低分子截然不同的结构特征,具有下列一些基本特点:

(1) 大分子的可分割性 低分子物质的分子不能用一般的机械方法把它分开。如果把它分开,它就改变性质(即分解),成为另外的物质。如水(H_2O)拆开就变成氢气(H_2)和氧气(O_2)。高分子则不然,因为它分子很大。一个分子量很大的分子用外力把它拉断或切开,变成两个分子后,高分子化合物的性质一般没有明显的改变。高分子结构的这种特征称为可分割性。

(2) 具有弹性 所谓弹性是指某物体形变的可恢复性。高分子化合物在外力作用下容易发生形变,当外力解除,这种形变就可以恢复到原状。弹性是高分子化合物重要的特性之一。线型或轻度网型聚合物都有不同程度的弹性。轻度网型的高分子化合物可作为理想的弹性材料使用。

(3) 具有可塑性 高分子化合物受热以后先是经过一个较长的软化过程,而后才能变为可流动的液体。因为高分子化合物是由很长的大分子链所构成,当链的某一部分受热时,这一部分链的运动能量增加。但由于大分子链不易传热,因此,除了这一部分受热外,链的其它部分则受热不多,这些部分的运动能量就不大。只有经过一个较长的时间和温度间隔,分子链受热部分不断扩大,整个大分子链才会变软。总之,高分子化合物不可能一下子达到由固体状态转变为液体状态。这是高分子化合物具有可塑性的原因。这一特点对聚合物的加工成型十分重要。这是线型或支链型聚合物的特性,网型聚合物则没有,所以不易加工成型。

(4) 具有绝缘性 高分子化合物对电、热、声具有良好的绝缘性能。从结构上看这是因为高分子化合物大都是有机化合物,分子中的化学键都是共价键,不能电离,因此不能传递电子,又因为大分子链呈蜷曲状态,互相纠缠在一起,在受热、受声作用之后,分子不易振动起来,因而它对热、声也具有绝缘性。

温下使用。

高弹态:当温度超过玻璃化温度 T_g 以后,内旋转运动加强(高分子的主链是由共价键组成,这些共价键是可以自由旋转的)。分子的热运动能量已能使链段产生运动,大分子链为适应外力作用,可不断蜷曲或伸展,表现出很大的柔性,高聚物呈现高弹态(可产生 100%~1000% 的弹性变形)。高弹态为高聚物所特有,但并不是一切高聚物都具有明显的高弹性。 T_g 温度在室温以下的称为橡胶,即高弹态是橡胶的使用状态。如天然橡胶 $T_g = -73^\circ\text{C}$, 顺丁橡胶 $T_g = -105^\circ\text{C}$ 。

粘流态:当温度达到 T_f 时,大分子产生整体位移,呈粘性流动状态,即粘流态。 T_f 为粘流化温度,即大分子链开始滑动位移的温度,也是高弹态转变为粘流态的转变温度。 T_d 是高聚物的分解温度。粘流态是高聚物材料加工成型状态,也是胶粘剂、涂料的施工工艺状态。

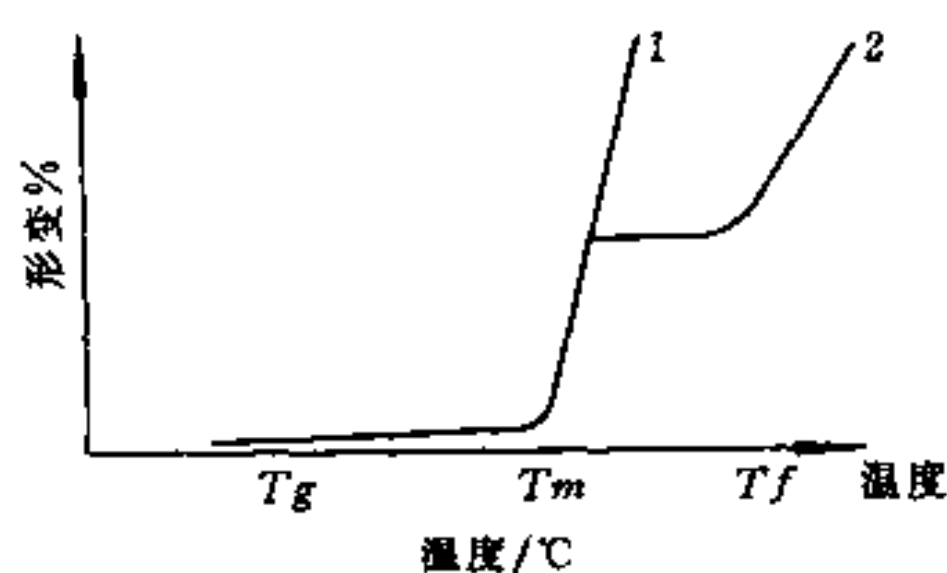


图 7-4 晶态聚合物的温度-形变曲线
1——代表一般分子量;2——代表分子量很大

2. 结晶聚合物的力学状态

结晶聚合物的主要转变为结晶的熔融。结晶熔化的温度称为熔点,通常用 T_m 表示。结晶聚合物的温度形变曲线,可以分为一般分子量的及分子量很大的两种情况。一般分子量的晶态聚合物的温度-形变曲线如图 7-4 中的曲线 1,在低温时,晶态聚合物受晶格能的限制,高分子链段不能活动(即使温度高于 T_g),所以形变很小,一直维持到熔点 T_m ,这时,由于热运动克服了晶格能,高分子

突然活动起来,便进入了粘流态,所以 T_m 又是粘性流动温度。如果聚合物的分子量很大,如曲线 2,温度达到 T_m 时,还不能使整个分子发生流动,只能发生链段运动,于是进入高弹态,当温度升至 T_f 时才进入粘流态。由此可知,一般晶态聚合物只有两个态:在 T_m 以下处于晶态,这时与非晶态聚合物的玻璃态相似,可以作塑料或纤维用;到温度高于 T_m 时,聚合物处于粘流态,便可以进行成型。而分子量很大的晶态聚合物则不同,它在温度达到 T_m 时进入高弹态,到 T_f 才进入粘流态。因此,这种晶态聚合物有三个态:温度在 T_m 以下时为晶态,温度在 T_m 与 T_f 之间为高弹态,温度在 T_f 以上为粘流态,此时才能加工成型。由于高弹态一般不便于成型,而温度高了又容易分解,使成型产品质量降低,所以晶态聚合物的分子量不宜太高。

结晶聚合物不同于其它晶体,它是部分结晶。由于无定形部分的存在,链段仍可进行运动,因此,在 $T_g \sim T_m$ 范围内聚合物为韧性,此时无定形区的链段已能运动,而结晶区尚未熔化,故物体有一定的柔顺性又有一定的刚性。这对使用很有意义,当其用作塑料时,表现为韧性塑料。常温下的聚乙烯属于这种情况。 T_m 则为这种韧性塑料的使用温度上限。当温度低于 T_g 时,无定形区链段也不能运动,物体表现刚性而为硬性塑料。聚乙烯在 -70°C 以下属于这种情况。硬性塑料的使用温度上限仍为 T_g 。

四、高分子聚合物的分类和名称

1. 高分子聚合物的分类

到目前为止,聚合物的种类非常繁多,品种更是数不胜数。可以按照不同的原则,或从不同角度把聚合物加以分类(见图 7-5):

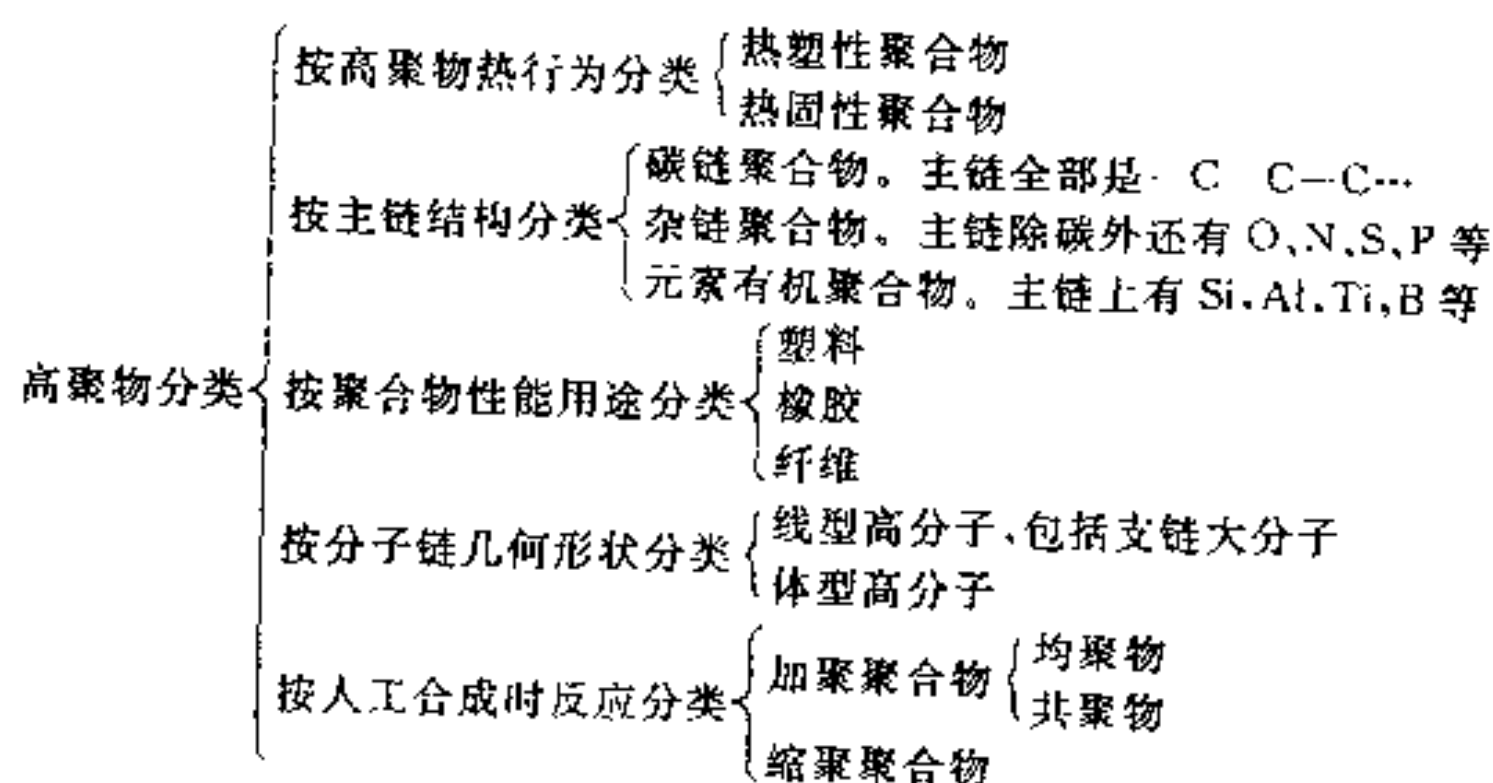


图 7-5 高聚物分类图

其中前三种分类方法最为重要, 现分别叙述如下:

(1) 根据聚合物的热行为分类

根据聚合物热行为可分为热塑性聚合物和热固性聚合物。

热塑性聚合物(如聚乙烯和聚丙烯)是具有热可塑性的聚合物。这类聚合物具有线型分子结构, 加热时可以熔融, 冷却后又凝固成型, 再加热可再熔融且不改变材料的基本结构和性能。聚合物的加工成型主要是利用这一性能。

热固性聚合物具有三维网络结构。这类聚合物在成型之前是分子量相对较小的线型分子(或称齐聚物), 加热成型后转变成不溶(不熔)的网络结构, 不能再进行加工成型, 例如不饱和聚酯树脂。热固性聚合物在成型过程中, 一般有低分子物(如水等)逸出, 因而结构也有一定变化, 如酚醛树脂等。

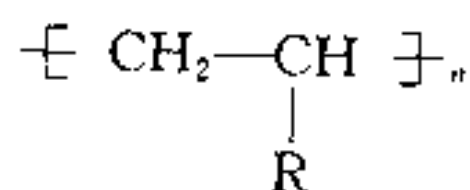
成型后的热固性聚合物, 其大分子链通过共价键键成交联网络, 相对于由范德华力结合的热塑性高聚物, 其耐热性更高。

(2) 按主链结构分类

按主链结构可分为碳链聚合物、杂链聚合物及元素有机聚合物。

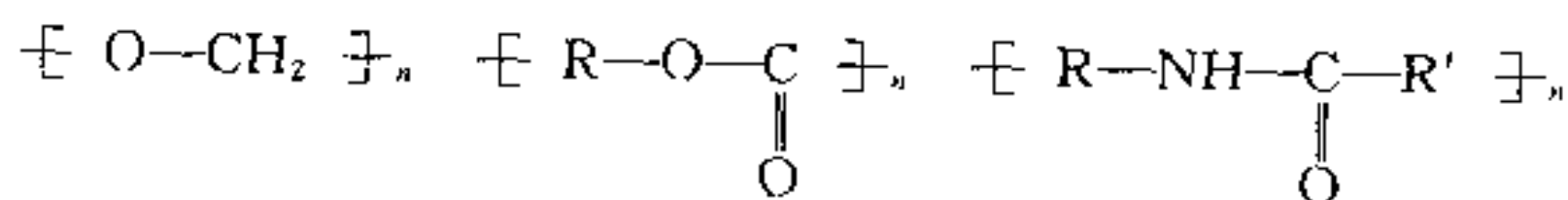
① 碳链聚合物

聚合物主链由碳原子构成, 绝大部分烯烃和二烯烃聚合物都属于这一类。例如聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、聚丁二烯等。分子通式为



② 杂链聚合物

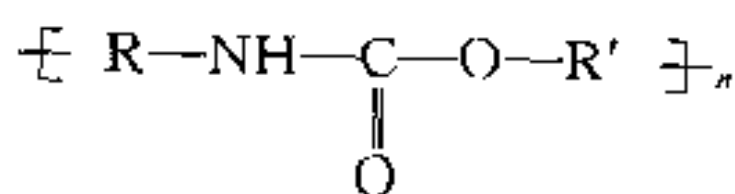
在聚合物主链上除碳原子之外还含有氧、氮、硫等杂原子。这类聚合物有聚醚、聚酯、聚酰胺、聚氨酯等。分子通式为:



聚醚

聚酯

聚酰胺



聚氨酯

式中 R、R' 为取代基,如 $-\text{CH}_3$, $-\text{Cl}$ 等。

聚硫橡胶主链上含有硫原子,也属这一类。酚醛树脂虽然没有杂原子,但主链中有芳环,根据其合成方法和树脂性能,仍归入这类为宜。

③ 元素有机聚合物

大分子主链中没有碳原子,主要由硅、硼、铝和氧、氮、硫、磷等原子组成,但侧基却由有机基团组成,如甲基、乙基、乙烯基、芳基等。聚有机硅氧烷是典型的例子。

$$\left[\begin{array}{c} \text{R} \\ | \\ \text{—Si—O—} \\ | \\ \text{R}' \end{array} \right]_n$$
 中, R 和 R' 可以相同,也可以不同。如果主链和侧链均无碳原子,则为无机高分子。

(3) 按聚合物性能用途分类

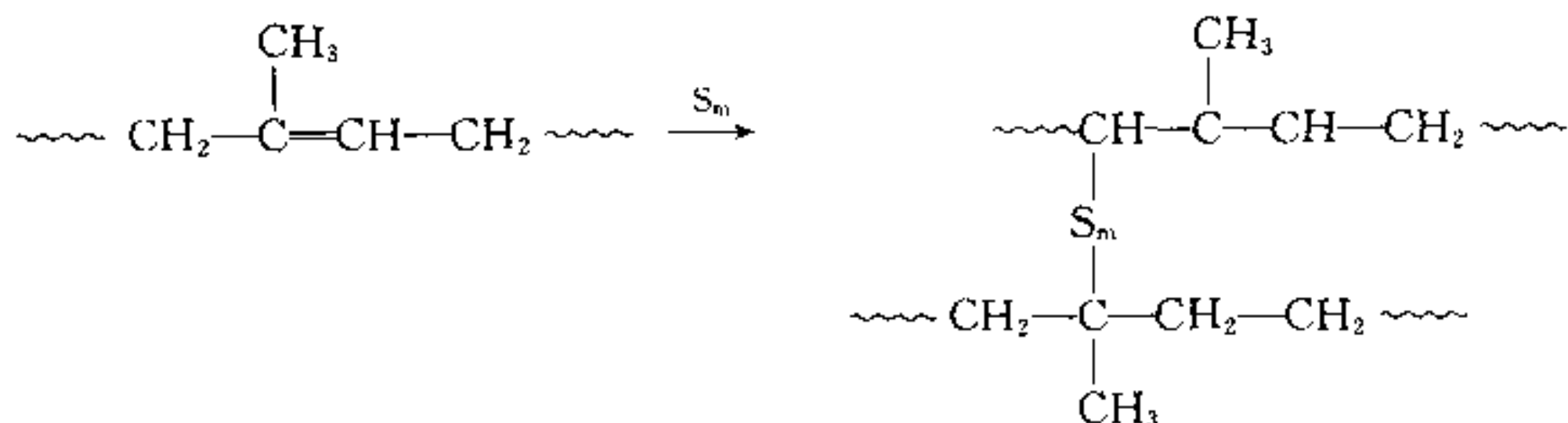
按聚合物的性能用途可分为塑料、橡胶、纤维等。

① 塑料

塑料是以合成树脂为基料,加入(或不加入)各种助剂和填料而塑制成型的材料。按其使用性能又分为通用塑料和工程塑料。工程塑料是具有较高强度和某些特殊性能的聚合物,可制作机械结构和零部件。如尼龙,由于韧性大,尺寸稳定性好和强度高,可制造齿轮。

② 橡胶

橡胶是具有可逆形变的高弹性聚合物材料。生胶(线型聚合物)经硫化后,使线型高聚物轻度交联,以获得所需要的弹性和其它性能。如天然橡胶的硫化反应:



③ 纤维

纤维是柔韧而纤细的丝状物。合成纤维如尼龙和涤纶等强度高、弹性大。这些性能都优于天然纤维,不足的是吸湿性小,染色性差。

塑料、橡胶、纤维三类聚合物很难严格划分。例如尼龙是很好的工程塑料,但也能抽成丝。尼龙纤维织物强度高,耐磨性好。聚氯乙烯是典型的塑料,配入适量增塑剂,可制成类似橡胶的软制品。一般这样简单地规定塑料和橡胶的概念,凡是在室温下处于玻璃态的高聚物叫做塑料,而处于高弹态的叫做橡胶。随着高分子科学的发展,出现了聚氨酯这类聚合物,它在室温下既有玻璃态性质,又有很好的弹性,很难说它属于哪一类聚合物。

2. 高聚物的命名

聚合物的名称可用系统命名法和习惯命名法来命名。系统命名法比较复杂不易掌握,也很少采用。系统命名法的优点是能反映高分子化合物的结构特征,习惯命名法比较简单,在实际中也常用。

现将习惯命名法简述如下:

(1) 天然高分子化合物,一般按它的来源或性质有专有名称。如纤维素、淀粉、蛋白质、虫胶等。

(2) 加聚类高分子化合物通常在原料低分子物前加一个“聚”字。如乙烯加聚生成聚乙烯;氯乙烯加聚生成聚氯乙烯等。

(3) 缩聚类以及共聚类高分子化合物的名称是在原料低分子化合物后加“树脂”或“橡胶”两字。如酚类和醛类的聚合物为酚醛树脂,由丁二烯和苯乙烯合成的聚合物称丁苯橡胶。

(4) 有些结构复杂的高分子化合物直称其商品名称即可,如聚对苯二甲酸乙二醇酯称涤纶树脂。聚己内酰胺又可叫锦纶。聚己二酰己二胺又可称尼龙-66。

五、常用工程聚合物及其应用

1. 塑料及其应用

塑料按其应用范围分为两大类:① 通用塑料指产量大、用途广、价格低的聚乙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯、酚醛塑料和氨基塑料等。它们占塑料总产量 3/4 以上,用于社会生活的各个方面。② 工程塑料指作为结构材料在机械装备和工程结构中使用的塑料。它们具有良好的强度、刚度和韧性,并具有一定的耐热、耐辐射、耐蚀性等独特性能和特殊用途。这里仅介绍一些常用的工程塑料。

(1) 热塑性工程塑料

① ABS 塑料 它是由丙烯腈(A)、丁二烯(B)、苯乙烯(S)组成的三元共聚物,兼有各单体的“硬、韧、刚”的混合特性,并可通过调整各单体的相对含量改变其性能。如增加丙烯腈,可提高塑料的耐热、耐蚀性和表面硬度;丁二烯可提高弹性和韧性;苯乙烯可改善电性能和成型能力,因此,具有良好的综合力学性能。

ABS 塑料在机械工业中得到广泛应用。如制造齿轮、轴承、泵叶轮、储槽内衬、电机外壳、仪器仪表外壳等。飞机上用作机舱内装饰板、窗框、隔音板等。ABS 是一种原料来源广、价格便宜、性能优良的工程塑料。

② 聚酰胺(PA) 通常称为尼龙,它是由二元胺与二元酸缩合而成,或由氨基酸脱水成内酰胺再聚合而成。机械工业中应用较广的有尼龙 6、尼龙 66、尼龙 610、尼龙 1010 以及 MC 铸型尼龙。尼龙最突出的优点是具有较高的耐磨性和自润滑性能,可代替青铜使用。此外,尼龙具有较高的强度(因吸水不同而异)和韧性。尼龙一般的缺点是吸水性高、成型收缩率大、尺寸稳定性较差、耐热性不高、只能在 100℃ 以下工作,蠕变值也较大。

尼龙在机械工业中可用于制造要求耐磨、耐蚀的某些承载和传动零件。例如轴承、齿轮、凸轮、导板、导向环、滑块、螺钉、螺母以及其它小型零件等。

③ 聚甲醛(POM) 按聚合方式有均聚甲醛和共聚甲醛两类,工业上常用共聚甲醛。聚甲醛具有较高的耐疲劳性能(在热塑性工程塑料中是最高的),摩擦系数低而稳定,在干摩擦条件下尤为突出,较高的弹性模量和强度,较强的抗蠕变能力。原料甲醛来源广泛,价格便宜。其缺点是耐热性较差,收缩率大。

聚甲醛已广泛用于机械、仪表和化工部门制作主要受摩擦的各种零件,例如轴承、齿轮、凸轮、辊子、阀杆等。加入少量聚四氟乙烯粉末或玻璃纤维等填料时,可大大改善耐磨性能。聚甲醛也可制造垫圈、垫片、法兰、弹簧、各种仪表板和外壳、化工容器、管道、配电盘、线圈座以及农药喷雾器零件等。

④ 聚碳酸酯(PC) 聚碳酸酯被誉为“透明金属”。它具有优良的综合性能;冲击韧性

(33~45 kJ/m²)和延性尤为突出,在热塑性塑料中是最高的;抗蠕变性能好并具有优良尺寸稳定性;可在-60~120℃温度范围内长期工作,透明度高(透光率75%~88%),可染成各种颜色;良好的电绝缘性能和耐气候性。其主要缺点是疲劳强度低;较易产生应力开裂;自润滑性差;不耐碱、氯化烃、酮和芳香烃的腐蚀。

在机械工业中,聚碳酸酯可用于制造受载不大但冲击韧性和尺寸稳定性要求高的零件,如轻载齿轮、心轴、凸轮、螺栓、螺帽、铆钉,以及精密齿轮、蜗轮、蜗杆、齿条等。利用其高的电绝缘性能,制造垫圈、垫片、套管、电容器等绝缘件,并可作电子仪器仪表的外壳、护罩等。由于透明性好,在航空及宇航工业中,是一种不可缺少的制造信号灯、挡风玻璃、座舱罩、帽盔等的重要材料。

⑤ 氟塑料 是含氟塑料的总称。机械工业中应用最多的有聚四氟乙烯(F-4)、聚三氟乙烯(F-3)、聚偏氟乙烯(F-2)、聚氟乙烯(F-1),以及聚全氟乙丙烯(F-46)等。

氟塑料最突出的优点是耐高温、低温、耐腐蚀、耐老化和良好的电绝缘性能,抗水性强和摩擦系数低,尤以F-4最突出。

聚四氟乙烯俗称塑料王,具有非常优良的耐高、低温性能,可在-180~260℃的范围内长期使用,熔点327℃。几乎耐所有的化学药品,在浸蚀性极强的王水中煮沸也不受腐蚀。摩擦系数极低,仅为0.04,并具有自润滑性。不粘,不吸水。电性能优异,是目前介电常数和介电损耗最小的固体绝缘材料。主要用于制作减摩密封零件、化工耐蚀零件及耐腐蚀衬里、热交换器,以及高频或潮湿条件下的绝缘材料。它的最大缺点是加热后粘度很大,不能用热塑性塑料成型的一般方法成型,只能采取类似粉末冶金的预压、烧结成型工艺;在高温时,它会分解出对人体有剧毒的气体,给成型和使用增加了困难;价格昂贵也限制了它的使用。

其它氟塑料的性能与F-4基本类似,但F-3的成型加工性能较好;F-2的耐候性较好;F-1的抗老化能力更强等。

⑥ 聚砜(PSF) 指主链中含有砜基 $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{---S---} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$ 的高聚物。根据原料的不同,可分为双酚A

型聚砜和非双酚A型聚砜(又名聚苯醚砜)两种。

聚砜是透明微黄色的线型非晶态聚合物,一般具有优良的耐热性、耐寒性、抗蠕变性和尺寸稳定性。它的机械强度高,其冲击韧性和抗蠕变性尤为突出。可在-65~150℃温度区间长期使用。耐酸、碱和有机溶剂。在水、潮湿空气中和高温下仍能保持高的介电性能。能自熄、易电镀、透明等。它的缺点是加工困难,要在330~380℃的高温下进行成型加工。

聚砜可用于高强度、耐热、抗蠕变的构件和电绝缘体。如精密齿轮、凸轮、真空泵叶片、线圈骨架、仪器仪表零件;还可通过电镀金属制成印刷电路板和印刷线路薄膜等。

⑦ 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA) 俗称有机玻璃。它的透明度比无机玻璃(透光率88%)还高,透光率达92%;密度只有后者的一半(为1.18 g/cm³)。机械性能比普通玻璃高得多(与温度有关),拉伸强度为50~80 MPa,冲击韧性为1.6~2.7 kJ/m²。抗稀酸、稀碱、润滑油和碳氢燃料的作用。耐候性好,在自然条件下不易老化。在80℃开始软化。在105~150℃间塑性良好,可以进行成型加工。

缺点是表面硬度不高,不耐磨、易擦伤。由于导热性能差和热膨胀系数大,易在表面或内

部引起微裂纹(即所谓“银纹”),因而比较脆。此外,易溶于有机溶剂中。

有机玻璃广泛用于航空、汽车、仪表、光学等工业中,作风档、弦窗、电视和雷达的屏幕、仪表护罩、外壳、光学元件、透镜等。

(2) 热固性工程塑料

① 酚醛塑料(PF) 指由酚类和醛类在酸或碱催化作用下缩聚合成酚醛树脂,再加入添加剂而制得的高聚物。常用的添加剂有木粉、纸、布、玻璃布、石棉等。

酚醛塑料具有一定的机械强度(抗拉强度约 40 MPa)和硬度,耐磨性好。绝缘性良好,击穿电压在 10 kV 以上。耐热性较高,马丁耐热温度在 110℃ 以上。耐酸性优良,价格便宜。缺点是脆性大不耐碱。这类塑料的性能因填料的不同可以发生变化。加入添加剂可以改变酚醛树脂的多种性能。如玻璃布增强的层压材料(玻璃钢),其比强度可与金属媲美,适用于制造强度较高的构件;加入木粉(俗称胶木粉),具有较高的耐热性和电绝缘性能,可制作仪表壳体、电器绝缘板等。

酚醛塑料广泛应用于制作各种电讯器材和电木制品,例如插头、开关、电话机、仪表盒等。制造汽车刹车片、内燃机曲轴、皮带轮、纺织机和仪表中的无声齿轮、化工用耐酸泵等。在日用工业中制作各种用具,但不宜作食品器皿。

② 环氧塑料(EP) 环氧塑料为环氧树脂加入固化剂后形成的热固性塑料。一般以铸型方式成型。常用固化剂为胺类和酸酐类。

环氧塑料强度较高,韧性较好;尺寸稳定性高且耐久性好;具有优良的绝缘性能。耐热、耐寒,可在 -80~155℃ 温度范围内长期工作。化学稳定性很高,耐稀酸稀碱;成型工艺性能好。缺点是有某些毒性,价格比较贵。

环氧树脂是很好的胶粘剂,对各种材料(金属及非金属)都有很强的胶粘能力,有“万能胶”之称,用于制作塑料模具和精密量具;灌封电器和电子仪表装置;配制飞机漆、油船漆、罐头盒涂料、电器绝缘及印刷电路;制备各种复合材料等等。

(3) 塑料零件的选材原则及方法

塑料的合理选用直接影响其在工程上的应用,塑料零件的选材是否合理,与零件的精心设计,良好成型方法和正确使用三者有密切关系。

① 选材原则 正确选择材料,必须满足下面三个方面的要求:良好的使用性能、优良的工艺性能及合理的经济性。

使用性能 使用性能是选材考虑的主要问题,而且对使用性能的要求是多方面的,如传动零件,首先必须符合力学性能的要求,同时也要兼顾热性能或抗蚀性能;电器零件首要的是介电性能,但也必须兼顾力学性能、热性能或抗蚀性能;化工耐蚀零件除首先满足耐蚀要求外,有些零件同时要求力学性能。尤其应该注意的是,塑料的各种性能之间的相互关系比金属材料密切。温度或其它介质对塑料的力学性能影响很大,选材时必须考虑其使用条件。

工艺性能 材料工艺性能的好坏与生产批量和零件特点有关,故判断所选择材料的工艺性能是否优良,应以零件特点及生产批量为依据。例如生产批量很大的制品,一般选择可用注射成型的热塑性塑料比热固性塑料为好;当零件尺寸较大时,则选用浇铸成型材料更为适宜。如大型齿轮,一般产量不大,选用 MC 尼龙比普通尼龙合理。相反,尺寸小、批量大的轴承则应选择普通尼龙,便于采用注射成型。

经济性 在满足使用要求和工艺可行的前提下,应尽量选用价廉且供应充足的材料,提

倡选用国产材料。选择材料不能只从材料单价衡量,而应以零件单价、实际成本的高低为标准,例如:有的材料虽然单价稍高,但具有较好的机械性能及优良的工艺性能,最后使零件总成本降低。常用工程塑料的相对价格见表 7-1。在通常情况下,必须防止大材小用和优材劣用的情况出现。

表 7-1 常用工程塑料相对价格

材 料	单位重量相对价格	单位体积相对价格	单位强度相对价格
聚苯乙烯	1	1	1
聚乙烯(高压)	0.597	0.512	2.50
聚乙烯(低压)	0.77	0.682	1.129
聚丙烯	0.70	0.592	0.860
ABS	1.62	1.62	1.285
聚氯乙烯	0.48	0.647	0.682
聚氯乙烯(板)	0.81	1.09	0.885
尼龙 1010	4.69	4.609	4.307
尼龙 610	4.74	4.811	4.496
尼龙 6	2.92	3.159	2.393
聚碳酸酯	3.55	3.991	2.978
聚甲醛	2.49	3.305	2.360
聚砒	4.27	4.949	3.152
有机玻璃(板)	4.40	4.864	4.486
酚醛树脂	1.12	1.332	1.263

注:单位强度相对价格 = $\frac{\sigma_{\text{聚苯乙烯}}}{\sigma_X} \times \text{单位体积相对价格}$ (X——对比材料,σ——拉伸强度)

② 选材方法 全面了解零件的使用要求,即不但要知道正常工作时零件应具备的性能指标,同时要弄清零件的工作环境(如温度、湿度、介质等)及其可能发生的变化等。因为条件变化,其性能上的差异较大。

掌握材料的性能特征。要正确选用材料,不能只对各种材料的性能作一般了解,应就每一种材料找出 1~2 项比较突出的性能,作为优先选用的对象。例如,某材料以高强度著称,则优先考虑用作承受重载荷的零件;某些材料摩擦系数特别小或具有优异的自润滑性,则优先考虑用作摩擦零件;有些材料特点耐腐蚀,则优先考虑用于化工方面的防腐零件等。有些塑料,其树脂的性能不能满足某个零件的要求,必须经过改性或加入合适的填料之后,才能变成很理想的材料。

初步选定、反复试验。初选时可能有几种材料性能相近,必须综合考虑。选择其中优点最多的一种材料作为选择对象。制成样品后经多次反复试验和实际使用考核之后,才能最后确定。

2. 合成橡胶及其应用

(1) 常用合成橡胶

橡胶是制造橡胶制品的主要原料。为了防止分子链的彼此滑动,得到高的弹性,橡胶要经过硫化处理;加入适当的填料以调整机械性能,如强度、磨损抗力和刚度等。使用最普通的填料是碳黑,另一种重要的增强添加物是帘布、纤维和带状物。为了使橡胶分子间的距离增加,减少分子间移动的阻力,改善橡胶的塑性,常添加油性增塑剂。为了延缓橡胶制品老化,

表 7-2

常用橡胶性能的比较

名 称	通 用 橡 胶						特 种 橡 胶				
	天然橡胶	丁苯橡胶	顺丁橡胶	丁基橡胶	氯丁橡胶	丁腈橡胶	聚胺脂	乙丙橡胶	氟橡胶	硅橡胶	聚硫橡胶
代 号	NR	SBR	BR	HR	CR	NBR	UR	EPDM	FPM		
抗拉强度/MPa	25~30	15~20	18~25	17~21	25~27	15~30	20~35	10~25	20~22	4~10	9~15
伸长率/%	650~900	500~800	450~800	650~800	800~1000	300~800	300~800	400~800	100~500	50~500	100~700
抗撕裂性	好	中	中	中	好	中	中	好	中	差	差
使用温度/℃	-50~120	-50~140	120	120~170	-35~130	-35~175	80	150	-50~300	70~275	80~130
耐磨性	中	好	好	中	中	中	好	中	中	差	差
回弹性	好	中	好	中	中	中	中	中	中	差	差
耐油性	差			中	好	好	好		好		好
耐碱性				好	好		差		好		好
耐老化				好				好	好		好
成本		高			高				高	高	
特殊性能	高强, 绝缘, 防震	耐磨	耐寒, 耐磨	耐酸碱, 气密, 绝缘, 防震	耐酸, 耐碱, 耐燃	耐油, 耐水, 气密	高强, 耐磨	耐水, 绝缘	耐油, 耐碱, 耐真空, 耐热	耐热, 绝缘	耐油, 耐碱
制品举例	通用制品, 轮胎	通用品, 胶板, 胶布, 轮胎	轮胎, 耐寒运输带	内胎, 水胎, 化工衬里, 防震品	管道, 胶带	耐油垫圈, 油管	实心胎, 胶辊, 耐磨件	汽车配件, 散热器管, 绝缘件	化工衬里, 高级密封件, 高真空胶件	耐高低温零件, 绝缘件	丁腈改性用

还需添加防老化剂。

目前使用最普通的橡胶是苯乙烯和丁二烯的共聚物,即丁苯橡胶;其次是含有丁二烯和有限的其它材料的橡胶,如丁基橡胶、丁腈橡胶和氯丁橡胶,聚异戊二烯即天然橡胶。表 7-2 是常用橡胶的性能比较及用途。

最广泛使用的丁苯橡胶,经过适当的增强和处理后,非常类似天然橡胶,它的抗拉强度超过 24 MPa,磨损抗力和耐候性也很好。但是,与聚异戊二烯相比,它的高温抗力不很理想。丁苯橡胶广泛用于制造各种制品,如轮胎、模压产品、地面材料、胶带、胶管等。丁基橡胶或聚异丁烯是一种特殊用途的橡胶,它虽然比丁苯橡胶强度低,磨损抗力差,但它有非常低的透气率,可用于制造粘结剂、嵌缝胶、密封物和轮胎内胎。丁腈橡胶是丁二烯和丙烯腈的聚合物。它最突出的性能是耐油性很好,并随丙烯腈含量的增加,耐油性增强,但耐寒性下降。它主要用作耐油制品。氯丁橡胶(聚氯丁二烯)具有耐油、耐腐蚀、耐老化、不透气、不燃烧等优良性能,因此得到广泛的应用。它的缺点主要是耐寒性较差,比重较大。

(2) 橡胶材料的选用

橡胶材料品种繁多,性能各不相同。它们所适应的环境也不大一样,因而,选用橡胶材料时一定要根据使用条件选用合适的品种。根据使用条件选用橡胶材料可参看表 7-3。

表 7-3 橡胶选用参数

使用要求	适用品种(按顺序)	辅助措施
耐热	200~300℃ 硅橡胶、氟橡胶 130~170℃ 三元乙丙橡胶、丁腈橡胶、丁基橡胶	采用新型硫化体系
耐寒	硅橡胶、三元乙丙橡胶、顺丁橡胶、丁基橡胶、天然橡胶	通过生胶的接枝镶嵌,降低其结晶倾向,使用耐低温增塑剂
高强度	聚氨酯橡胶,天然橡胶	配用硬质碳黑,掺用酚醛树脂
低硬度	不限	大量填充软化剂
耐磨	聚氨酯橡胶、丁苯橡胶、顺丁橡胶	配用硬质碳黑
耐油	聚硫橡胶、氟橡胶、丁腈橡胶	充分交联,少用增塑剂
耐水	丁腈橡胶、三元乙丙橡胶	配用吸水性低的填充剂,如硫酸钡、陶土等
耐酸碱	氟橡胶、丁基橡胶、氯丁橡胶	多用填充剂
耐臭氧	硅橡胶、三元乙丙橡胶、丁基橡胶、氯丁橡胶	配用对苯二胺类防护剂
耐燃	氯丁橡胶	少用软化剂与易燃配合剂,使用阻燃剂如三氧化锑
气密	丁基橡胶、丁腈橡胶	少用挥发性大的组分
绝缘	硅橡胶、天然橡胶、丁基橡胶	配合高结构填充剂或金属粉,配用抗静电剂
磁性	氯丁橡胶、天然橡胶	采用钡铁氧粉、铝镍粉等填充剂
耐高真空	丁基橡胶、氟橡胶	配用挥发性小的配合剂
防射线透过	天然橡胶、丁基橡胶	配用高遮蔽力的遮蔽剂,如铅粉、钨粉、氧化锌、锌钡和硫酸钡
防震	天然橡胶、丁基橡胶	

3. 合成纤维

合成纤维一般都具有强度高、比重小、耐磨、不霉不腐等特点,广泛用于制作衣料。此外,还用于工农业生产、交通运输及国防建设等部门。有些用途则是天然纤维所不及的。如用锦纶帘子线增强的汽车轮胎,其行驶里程比一般纤维增强的轮胎增加 1~2 倍,还可节约橡胶用量 20%。

表 7-4 为六大纶(占合成纤维总量的 90%)的性能和用途。

表 7-4 几种合成纤维的性能和用途

化学名称		聚酯纤维	聚酰胺纤维	聚丙烯腈	聚烯烃	聚乙烯醇缩醛	含氯纤维	其 它
商品名称		涤纶 (的确凉)	锦纶 (尼龙)	腈纶 (人造毛)	丙纶	维纶	氯纶	氟纶 芳纶
产 量 占合成纤维/%		>40	>30	>20	5	1	1	
强度	干态	优	优	中	优	优	中	
	湿态	优	中	中	优	中	中	
比 重		1.38	1.14	1.14~1.17	0.91	1.26~1.3	1.39	
吸湿率		0.4~0.5	3.5~5	1.2~2.0	0	4.5~5	0	
软化温度/℃		238~240	180	190~230	140~150	220~230	60~90	
耐磨性		优	最优	差	优	优	中	
耐日光性		优	差	最优	差	优	中	
耐酸性		优	中	优	中	中	优	
耐碱性		中	优	优	优	优	优	
特 点		挺括不皱 耐冲击疲劳	结实耐磨	蓬松耐晒	轻、坚牢	成本低	耐磨、不易燃	强度极高
工业应用举例		高级帘子布、渔网、缆绳帆布	2/3 用于工业帘子布、渔网、降落伞、运输带	制做碳纤维及石墨纤维原料	军用被服、绳索、渔网水龙带、合成纸	2/3 用于工业帆布、过滤布、渔具缆绳	导火索皮、口罩、帐幕劳保用品	

第二节 陶瓷材料

陶瓷材料作为材料大家族的一个重要组成部分,其名称与含义几经变迁。早期,陶瓷是陶器与瓷器的总称。在近代,陶瓷材料是无机非金属材料同义语,不仅包括传统的陶与瓷,而且包括硅酸盐材料和氧化物、碳化物、氮化物等新型材料。

陶瓷材料具有熔点高、硬度高、化学稳定性好、耐高温、耐磨损、耐氧化和腐蚀,以及重量轻、弹性模量大、强度高等优良性能。因此,陶瓷材料能够在各种苛刻的环境(如高温、腐蚀、辐照环境)下工作,成为非常有发展前途的工程结构材料。另一方面,陶瓷材料具有性能和用途的多样性与可变性,因而在磁性材料、介电材料、半导体材料、光学材料等方面占据了重要

地位并展现了广阔的应用前景。

本节将介绍常见陶瓷体系的微观结构、力学与物理性能、一般生产工艺过程以及近代陶瓷材料及其工程上的应用。

一、陶瓷材料的物质结构

1. 陶瓷材料的相组成

陶瓷材料的显微结构通常由三种不同的相组成,即晶相、玻璃相和气相(气孔)。

晶相是陶瓷材料中最主要的组成相。决定陶瓷材料物理、化学性质的是主要晶相。例如刚玉瓷的主要晶相是 α - Al_2O_3 ,由于结构紧密,因而具有机械强度高、耐高温、耐腐蚀等特性。

玻璃相是非晶态结构的低熔点固体。对于不同陶瓷,玻璃相的含量不同,日用瓷及电瓷中玻璃相含量较高;高纯度的氧化物陶瓷(如氧化铝瓷)中玻璃相含量较低。玻璃相的作用是充填晶粒间隙,粘结晶粒,提高陶瓷材料的致密程度,降低烧成温度,改善工艺,抑制晶粒长大等。

气相(气孔)在陶瓷材料中占有重要地位。大部分气孔是在工艺过程中形成并保留下来的。有些气孔则通过特殊的工艺方法获得。气孔含量(按材料容积)在0%~90%之间变化。气孔包括开口气孔和闭口气孔两种。在烧结前全是开口气孔,烧结过程中一部分开口气孔消失,一部分转变为闭口气孔。陶瓷的许多电性能和热性能随着气孔率、气孔尺寸及分布的不同,可在很大范围内变化。合理控制陶瓷中气孔数量、形态和分布是非常重要的。

2. 陶瓷材料的典型晶体结构

与金属材料相比,陶瓷材料的晶体结构要复杂得多,其中立方、四方与六方晶系仍是最重要的。在陶瓷材料中,某些晶体结构是用典型化合物的名字表示的,如NaCl结构、 CaF_2 结构等。

(1) 氧化物结构

氧化物结构的结合键以离子键型为主,通常以 A_mX_n 表示其分子式,其中A—代表阳离子;X—代表阴离子。大多数氧化物中氧离子的半径大于阳离子半径。其结构特点是以大直径离子密堆排列组成面心立方点阵或六方点阵,小直径的离子排入点阵的间隙处。典型的氧化物结构类型见表7-5所示。AX型MgO的晶体结构见图7-6。

表 7-5 氧化物结构类型

结构类型	晶体结构	陶瓷中主要化合物
AX	面心立方	碱土金属氧化物 MgO 、 BaO 等,碱金属卤化物,碱土金属硫化物
AX_2	面心立方	CaF_2 (萤石), ThO_2 , UO_2 等
	简单四方	TiO_2 (金红石), SiO_2 (高温方石英)等
A_2X_3	菱形晶系	α - Al_2O_3 (刚玉)
ABX_3	简单立方	CaTiO_3 (钙钛矿)、 BaTiO_3 等
	菱形晶系	FeTiO_3 (钛铁矿)、 LiNbO_3 等
AB_2X_4	面心立方	MgAl_2O_4 (尖晶石)等 100 多种

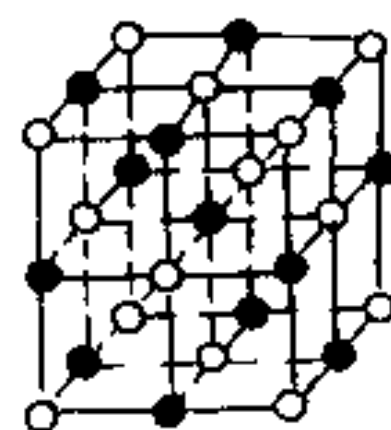


图 7-6 氧化镁晶体

●——Mg; ○——O

(2) 硅酸盐结构

硅酸盐材料在自然界中大量存在,约占已知矿物的三分之一。硅酸盐结构属于最复杂的结构之列,它们是由硅氧四面体(SiO_4)为基本结构单元的各种硅氧团组成的。硅氧四面体的

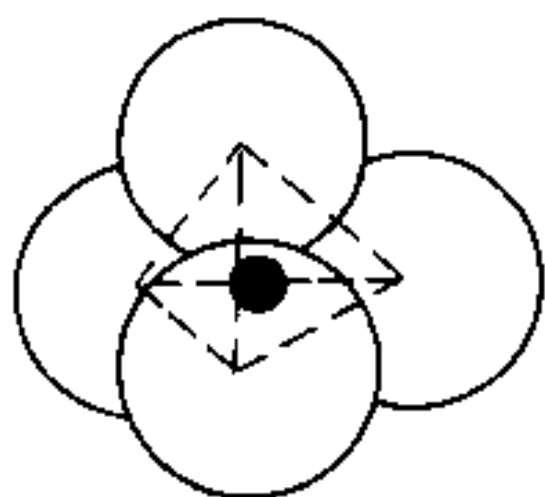


图 7-7 硅氧四面体

●——Si

结构示于图 7-7。按照硅氧四面体在空间的不同组合,可形成四大类不同结构特征的材料。硅酸盐材料的基本类型见表 7-6 所示。

3. 同质异构现象

同有些金属一样,陶瓷晶体相中有些化合物也存在同质异构转变。 ZrO_2 、 Al_2O_3 、 SiC 、 Si_3N_4 、 SiO_2 、 TiO_2 等重要陶瓷材料都有同质异构现象。在陶瓷材料中同质异构转变主要是通过下面两种相变过程而实现的:

(1) 位移相变 位移相变过程不需要化学键的破坏和原子的重新组合,只需要原子在原先位置上作微小位移(或键角转动)就可以实现。位移需要的能量小,转变速度快。

表 7-6

硅酸盐结构与典型物质

类 型	$[\text{SiO}_4]$ 四面体的形状	O : Si	举 例	
			名 称	分 子 式
岛 状	四面体	4.0	镁橄榄石	$\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$
		3.5	硅 钙 石	$\text{Ca}_3[\text{Si}_2\text{O}_7]$
	四面体环	3.0	绿宝石等	$\text{Al}_2\text{Be}_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$
链 状	单 链	3.0	顽火辉石	$\text{Mg}[\text{SiO}_3]$
	双 链	2.75	透 闪 石	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$
层 状	单 层	2.5	高 岭 石	$\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_3$
架 状	—	2.0	石 英	SiO_2

例:立方 $\text{BaTiO}_3 \xrightleftharpoons{120^\circ\text{C}}$ 四方 BaTiO_3
(钛酸钡) (钛酸钡)

四方 $\text{ZrO}_2 \xrightleftharpoons{1000^\circ\text{C}}$ 单斜 ZrO_2

(2) 重构相变 重构相变需要破坏原子的键合并重新组合,需要较大的激活能来实现原子的迁移和扩散。相变通常不完全,高温稳定相冷却到转变温度以下仍可部分地保持下来,处于亚稳状态。在陶瓷材料中,重构型相变可以通过下列途径来实现:新相在固态旧相中形核长大,新相与旧相某个晶面共格。对于饱和蒸汽压高的材料,可以通过蒸发凝聚而转变成稳定晶型。在有液相存在时,不稳定晶型可以溶解到液相中,而后析出稳定晶型。

4. 陶瓷材料中的晶体缺陷

存在于金属晶体中的点缺陷、线缺陷、面缺陷等晶体缺陷,也同样存在于陶瓷晶体之中。晶体缺陷对陶瓷材料性能的影响有些与金属晶体的情况类似,但也不尽相同。

(1) 点缺陷

陶瓷晶体中也存在置换原子、间隙原子及空位等点缺陷,并且可形成置换固溶体与间隙固溶体。

与金属晶体的情况不同。在陶瓷晶体中,如果外加离子的原子价与基质原子价不同,置换还是可以进行,然而为了保持总的电中性也要求有其它的结构变化。通常,电中性的要求

是通过留下一个随机分布的空位来实现的。例如,正常的FeO结构为NaCl型结构,但晶体中若存在一些 Fe^{3+} ,那么,为了平衡2个 Fe^{3+} ,就必须出现一个 Fe^{2+} 空位。图7-8中符号“□”表示一个离子空位。为了平衡2个 Fe^{3+} 引起的多余电荷,该位置上的一个 Fe^{2+} 离开正常格点位置。这就是所谓正离子空位。若置换离子是一个小于正常化合价的

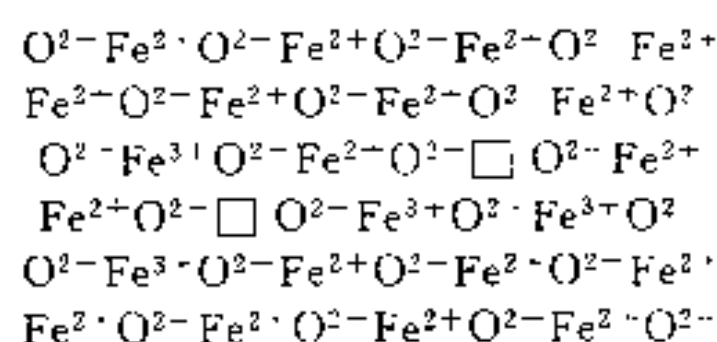


图 7-8 FeO 结构缺陷

正离子(如 K^+),则需要出现负离子空位以平衡电荷,即此时一些 O^{2-} 要离开正常格点位置。

可见,金属晶体中出现点缺陷时,总是毫无例外地使晶体导电性下降,而在陶瓷晶体中,点缺陷可用于提高晶体的导电性。

(2) 线缺陷

在金属材料中位错与金属材料的强化密切相关,相比之下,位错在陶瓷材料中的作用远不如在金属材料中那么重要。这主要是因为陶瓷材料中形成位错需要的能量大,不易形成位错,因而陶瓷材料中位错密度很低。此外,在陶瓷材料中,离子键或共价键结合造成位错的可动性极低。

(3) 面缺陷

陶瓷是由微细颗粒的原料烧结而成的,所以,陶瓷材料一般都是多晶体。因而,陶瓷中也存在着晶界、亚晶界等面缺陷。

如同金属材料一样,细化晶粒也是强化陶瓷材料的有效手段。例如,刚玉瓷的平均晶粒尺寸由 $50.3\ \mu\text{m}$ 减小到 $2.1\ \mu\text{m}$ 时,其抗弯强度可由 $208\ \text{MPa}$ 提高到 $580\ \text{MPa}$ 。

二、陶瓷材料的性能特点

由于陶瓷材料键合能量很高,因此具有高熔点、高硬度、良好的化学和热稳定性,并具有耐高温、耐腐蚀等特点。其最大缺点是脆性很大,多数陶瓷材料在常温下没有塑性。此外,陶瓷有绝电、绝热的性质。某些陶瓷还具有特殊的功能特性。

1. 力学性能

(1) 硬度 高硬度高耐磨性是陶瓷材料重要性能指标,其硬度数值用莫氏硬度(即刻划硬度)来表示。莫氏硬度共分10级(或15级),用以表示材料硬度的相对高低。数值越大,硬度越高。陶瓷的硬度一般在莫氏7~9.5之间。

(2) 塑性 陶瓷的主要缺点之一是塑性差。受外力作用时,大多只产生少量的弹性变形,几乎不产生塑性变形。通常在高温下才具有一定塑性。

(3) 强度 陶瓷的理论强度很高,因陶瓷内部含气孔及各种缺陷,所以陶瓷的实际抗拉强度很低,但抗压强度较高。减少杂质和气孔,细化晶粒,提高致密度和均匀度,可提高强度。若将陶瓷制成纤维或很细的单晶体,减少甚至消除了晶体缺陷,其抗拉强度可接近或等于理论强度。

(4) 高温性能 耐高温是陶瓷重要特点之一。高温下不仅具有高的硬度,而且抗氧化能力强。所以广泛用作高温材料,如火箭导弹的雷达防护罩(Al_2O_3 、 ZrO_2)、发动机燃料室喷嘴(BeO 、 Si_3N_4)和高温观察窗(透明 Al_2O_3)以及电炉的发热体和炉膛等。

作为高温材料,多数陶瓷不耐急冷急热,经不起热的冲击。因急冷急热时,陶瓷内部的温度梯度很大,因而引起很大的热应力,致使陶瓷开裂。

高温下,因热膨胀致使陶瓷尺寸增加,但有例外。例如石英的热膨胀系数接近于零,几乎

无热胀现象,使石英在工程技术上有着独特的重要作用。

2. 化学稳定性

陶瓷的结构非常稳定。在以离子晶体为主的陶瓷中,金属原子为氧原子所包围,很难再同介质中的氧发生作用,甚至在千度以上的高温下也是如此,所以具有很高的耐火性能或不可燃烧性,是很好的耐火材料。另外,陶瓷对酸、碱、盐等腐蚀性很强的介质均具有较强的抗蚀能力,与许多金属的熔体不发生作用,所以也是很好的坩埚材料。

3. 功能特性

在功能材料中,陶瓷占有重要地位。功能材料是指用于工业技术中具有特定物理功能,即具有特定的电、磁、光、声、热等特性的各类材料。这些材料是能源、计算技术、电子、通讯、激光和空间等现代技术的基础。陶瓷在这方面的应用非常广泛。例如,用作绝缘材料的 Al_2O_3 陶瓷; $\text{CuO}-\text{Cu}$ 陶瓷可用于整流元件;铁氧体磁性材料;多孔或泡沫陶瓷具有隔热耐高温、吸声等功能; Al_2O_3 掺入铬离子可产生激光等。

三、陶瓷制品的工艺流程

陶瓷的整个工艺流程相当复杂,但可归纳为三大工艺步骤:

原料配制→坯料成型→窑炉烧成

对于精细陶瓷来讲,还存在精加工这一步骤。

1. 原料配制

(1) 普通陶瓷 在普通陶瓷中主要原料是石英、粘土和长石。石英构成陶瓷制品的骨架、赋予制品耐热、耐蚀等特性;粘土是一种含水铝硅酸盐矿物,主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 H_2O 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 等,粘土具有独特的可塑性与结合性,调水后成为软泥,能塑造成型,烧结后变得致密坚硬;长石是一族矿物的总称,为架状硅酸盐结构,长石在高温下为有粘性的熔融液体,并润湿粉体,冷却至室温后,可使粉体中的各组分牢固结合,成为致密的陶瓷制品。

调整上述三种组分并适当加入其它一些天然矿物、可获得具有不同特点和风格的陶瓷制品。

(2) 特种陶瓷 特种陶瓷的原料是由人工合成的,因此具有纯度高、颗粒细小等特点,只加入很少甚至完全不加助熔剂与提高可塑性的添加剂。

2. 陶瓷制品的常用成型技术

在配制好的陶瓷原料中加入水或其它成型助剂(粘合剂),使其具有一定可塑性,然后通过某种方法使其成为具有一定形状的坯体的工艺过程叫做成型。常用成型方法有以下几种:

(1) 挤压成型法 使用增塑剂与水混合均匀后的粉末作为坯料,由真空挤压机将坯料从挤型口挤出。

(2) 注浆成型法 注浆成型法如图 7-9 所示。将制备好的坯料泥浆注入多孔性模型内。由于多孔性模型的吸水性,泥浆贴近模壁的一层被模子吸水而形成均匀的泥层。该泥层随着时间的延长而逐渐加厚。当达到所需的厚度时,将多余的泥浆倾出。最后该泥层继续脱水收缩而与模型脱离,从模型中取出后即为毛坯。

(3) 模压成型法 模压成型是利用压力将干粉坯料在模型中压成致密坯体的一种成型方法。模压法示于图 7 10。

对特种陶瓷,还可以采用冷等静压成型、注射成型法等先进工艺方法。

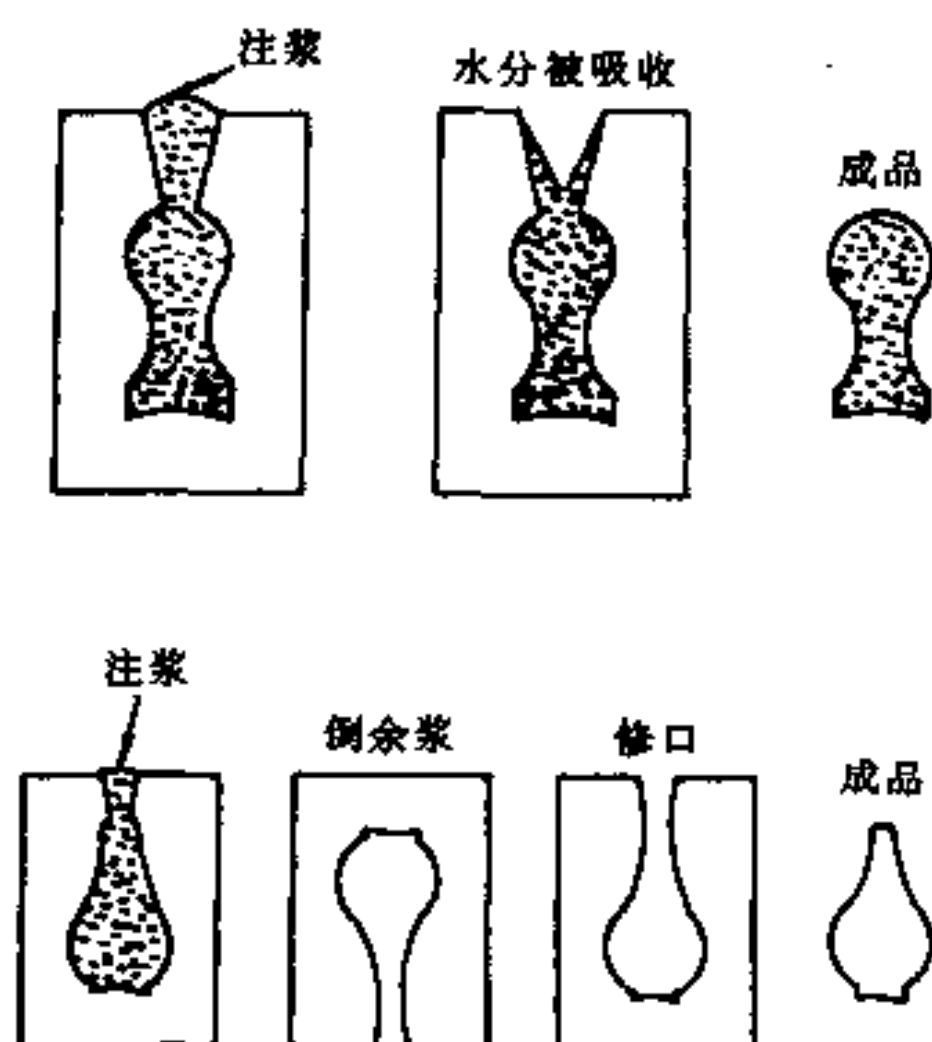


图 7-9 注浆成型法

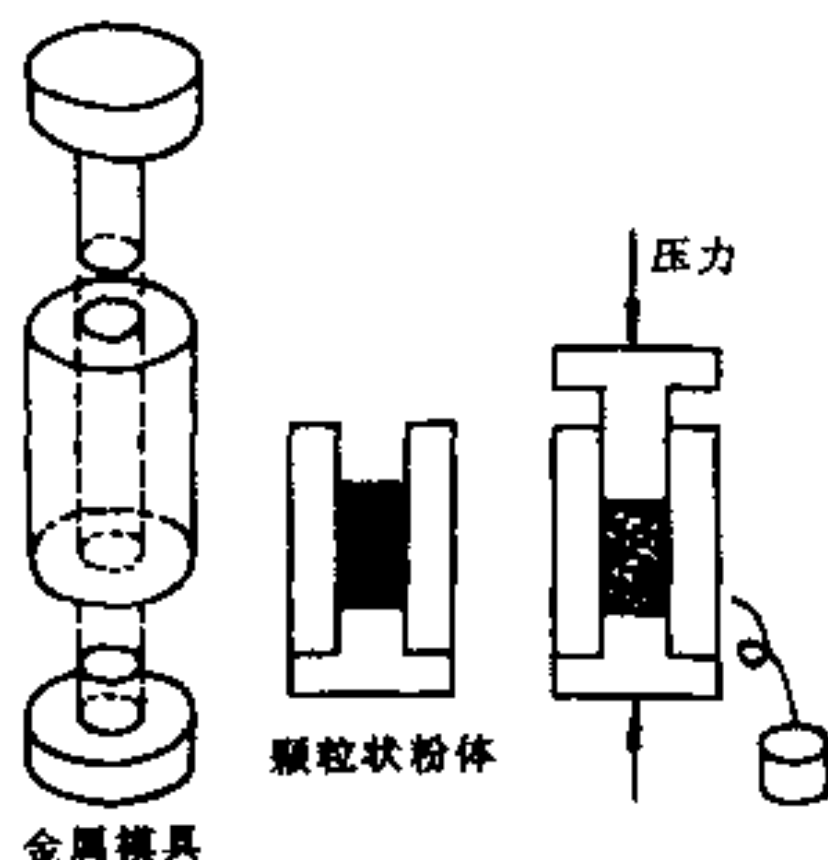


图 7-10 模压成型法

3. 烧成

经过成型的坯料,必须最后通过高温烧成才能获得陶瓷的特性。烧成也称烧结,目的是去除坯体内所含溶剂、粘结剂、增塑剂等,并减少坯体中的气孔,增强颗粒间的结合强度。

四、陶瓷材料及其应用

1. 普通陶瓷

这类陶瓷的主要原料是粘土($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、石英(SiO_2)和长石($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$)等。组成不同时,对陶瓷性能有较大的影响。例如粘土或石英含量高时,耐高温性能和机械强度较高。但由于粘土的熔化温度高,烧结时由于熔融不充分而影响抗电性能。增加长石的含量,由于它的熔化温度较低,烧结后陶瓷致密,可以提高抗电性能,而耐热性能和机械强度较低。

普通陶瓷一般用作电工绝缘、耐酸、耐碱的化学陶瓷、受力不大的结构瓷和日用瓷。

普通陶瓷质地坚硬而脆性大,绝缘性能高,耐蚀性好,一般能耐大约 1200°C 的高温。加之它本身的制造工艺性良好,成本低廉,所以在各类陶瓷中用量最大。

普通陶瓷的种类、性能及用途见表 7-7。

2. 特种陶瓷

特种陶瓷又称精细陶瓷、先进陶瓷,是以人工合成的高纯度的化合物为原料制成的,在结构中不含或含有少量烧结助剂所形成的玻璃相。

几种常用的特种陶瓷材料的种类、性能及用途示于表 7-8。

这里主要讨论对机械工程比较重要的高温陶瓷。

(1) 氧化物陶瓷

氧化物陶瓷在工程上应用很广。它们的熔点多超过 2000°C 。应用最多的有 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 MgO 、 CaO 、 BeO 、 ThO_2 和 UO_2 等。氧化物陶瓷主要是单相多晶体结构。除了晶体相之外,可能还含有少量的气相(气孔)。微晶氧化物的强度较高,粗晶结构时,晶界面上的内应力较大,使强度降低。随着温度的升高,氧化物陶瓷的强度降低,但在 1000°C 以下,强度的降低不大。

表 7-7

普通陶瓷的种类、性能及用途

种 类	原 料	性 能	用 途
日用陶瓷	粘土、石英、长石、滑石等	具有一定的热稳定性、致密度、机械强度和硬度	生活器皿
建筑用瓷	粘土、长石、石英等	具有较好的吸水性、耐磨性、耐酸碱腐蚀性	铺设地面、输水管道、卫生间
电 瓷	一般用粘土、长石、石英等配制	介电强度高,抗拉强度和抗弯强度较高,耐温度急变性能较好,有防污染性	隔电的机械支承件、瓷质绝缘器件
化工陶瓷	粘土、焦宝石(熟料)、滑石、长石等	耐酸、碱腐蚀性好,不污染介质	石油化工、冶炼、造纸、化纤、制药工业
多孔陶瓷	原料品种多,如以石英砂、河砂为骨料等	作过滤材料,流体从气孔通过时达到净化过滤及均匀化的效果	耐强酸、耐高温的多孔陶瓷器件

表 7-8

特种陶瓷的种类、性能及用途

种 类	成 分	性 能	用 途
氧化铝瓷	Al_2O_3 、 SiO_2	硬度高、耐磨性好、耐高温、耐蚀性强、具有良好的电绝缘性能	刀具、模具、轴承;熔化金属的坩埚、高温热电偶套管、化工用泵的密封滑环、机轴套、叶轮等
氮化硅陶瓷	$\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$	强度很高,热压氮化硅的室温抗弯强度可达800~1000 MPa;硬度很高;且摩擦系数小;具有良好的抗热震性和化学稳定性。同时也具有良好的电绝缘性	工具、模具、刀具、高温轴承滚珠、泵的机械密封环、热电偶套管、陶瓷发动机中的转子、定子、涡形管、燃烧器、气缸套等
碳化硅陶瓷	$\alpha\text{-SiC}$ $\beta\text{-SiC}$	高温强度高,在1400℃时抗弯强度仍保持在500~600 MPa的较高水平;有很好的耐磨损、耐腐蚀抗蠕变性能	火箭尾喷管的喷嘴;热电偶套管、炉管;燃气轮机的叶片、轴承;陶瓷发动机、耐火材料
氮化硼陶瓷	BN	化学稳定性好;硬度低,摩擦系数小;具有良好的导热性和电绝缘性以及良好的抗热冲击性;氮化硼制品具有可机械加工性	高温润滑剂;火箭燃烧室内衬;宇宙飞船的热屏蔽材料;磁流体发电机的耐蚀件;电炉加热器的绝缘子,加热套管,制作半导体材料的坩埚容器;原子反应堆的中子吸收棒和屏蔽材料

纯氧化物陶瓷在任何高温下都不会氧化。所以这些陶瓷都是很好的高耐火度结构材料。

Al_2O_3 (刚玉)陶瓷具有高的强度和高温强度,高的化学稳定性和介电性能,但热稳定性较低。广泛用于制造高速切削工具、量规、拉丝模、高温炉零件、空压机泵零件、内燃机火花塞等。致密陶瓷可作为真空陶瓷;多孔陶瓷能作为绝热材料使用。

ZrO_2 陶瓷的特点是导热系数小(在100~1000℃区间 $\lambda=6.3\sim 7.1\text{ kJ/m}\cdot\text{h}\cdot\text{C}$)。这种陶瓷的推荐使用温度为2000~2200℃,主要用作耐火坩埚,炉子和反应堆的绝热材料,金属表面的防护涂层等。

MgO 、 CaO 陶瓷能抗各种金属碱性渣的作用。它们的热稳定性差。 MgO 在高温下易挥

发;CaO 甚至在空气中也易水化。它们可用于制造坩埚,MgO 还可作炉衬和高温装置等。

BeO 陶瓷的特点是导热性好,具有很高的热稳定性,但强度较低。这种陶瓷消散高能辐射的能力强,用于制造熔化某些纯金属的坩埚,并可作为真空陶瓷和原子反应堆用陶瓷。

ThO₂、UO₂ 陶瓷有很高的熔点,高的密度,并且有放射性,主要用于制造熔化铀、铂、银和其它金属的坩埚、电炉构件(ThO₂)、动力反应堆中的放热元件等。

(2) 非氧化合物陶瓷

难熔非氧化合物陶瓷的特点是高的耐火度、高的硬度(有时接近于金刚石)和高的耐磨性。但这些材料的脆性都很大。碳化物和硼化物的抗氧化温度为 900~1000℃;氮化物略低些;硅化物的抗氧化温度为 1300~1700℃,因为表面能形成氧化硅膜。

碳化硅陶瓷应用最广泛,它的密度为 3.2 g/cm³,弯曲强度为 200~250 MPa,压缩强度为 1000~1500 MPa,硬度为莫氏硬度 9.2 级。能抗氧化但不抗强碱,主要用于加热元件、石墨的表面保护层,以及作砂轮、磨料等。

氮化硼陶瓷(白石墨)具有石墨类型六方结构。可用作为介电体和耐火润滑剂。在高压和 1360℃温度时,氮化硼转变为立方结构的 β-BN,密度为 3.45 g/cm³,有极高的硬度,能耐 2000℃的高温。立方氮化硼为金刚石的代用品。

第三节 复合材料

一、复合材料的含义和分类

1. 复合材料的含义

随着近代科学技术的发展,特别是由于航空和宇航工业的发展,要求使用比重小、刚度大,以及其它性能更加优越的结构材料。要获得这样的材料,可将具有高弹性模量、高强度的材料与具有高韧性的材料结合在一起,形成复合材料,使它们互相取长补短,在具有高强度、高弹性模量的同时又具有高的韧性,从而防止突然的脆性破断。

复合材料的含义,一般理解为:由两种或两种以上物理、化学性质不同的物质,经人工组合而得到的多相固体材料,例如玻璃钢含有两个相:其一是玻璃纤维,主要用来承受载荷,并称为增强相或增强材料;其二是各类树脂,主要起粘结作用,并称为基体相或基体材料。因此,复合材料既可说是多相材料,也可说是增强材料与基体材料经复合而成的新材料。

2. 复合材料的分类

复合材料种类繁多,常根据以下三种情况进行分类:

(1) 按基体类型分类,可以分为树脂基、金属基和陶瓷基三大类,第一种用量较大。

(2) 按增强材料种类和形状分类,可以分为纤维增强、颗粒增强、层叠增强等复合材料。

(3) 按性能分类,可以分为结构复合材料和功能复合材料。

纤维复合材料是以纤维为增强材料,以树脂、金属或其它物质为基体构成的。常用纤维为玻璃纤维、碳纤维和硼纤维等。

颗粒复合材料是由微小粒状金属粉或陶瓷等物质和基体构成。基体可以是金属,也可以是树脂。

层叠复合材料是由两层或多层材料构成的。

结构复合材料是指用于结构零件的复合材料,可以是树脂基体,也可以是金属基体。目

前使用多以纤维增强的树脂基为主。

功能复合材料是指具有某种物理性能的复合材料。例如将某些金属细粒复合于塑料中,可使这种细粒复合型塑料具有导电、导热或磁性等。

二、复合材料的特点

1. 比强度、比模量高

比强度和比模量是指材料的强度和模量与相对密度之比。它是衡量材料承载能力的一个重要指标。比强度越大,零件自重越小;比模量越大,零件的刚性越大。纤维增强复合材料的比强度和比模量在各类材料中是最高的,可超过一般钢材和铝合金材料。例如碳纤维和环氧树脂组成的复合材料,其比强度是钢的七倍,比模量比钢大三倍。

2. 良好的抗疲劳性能

多数金属的疲劳极限是其抗拉强度的40%~50%,而碳纤维增强的复合材料则可达70%~80%。

3. 具有良好的减摩、耐磨和自润滑性能

4. 破损安全性好

纤维复合材料基体中含有大量独立的纤维,平均每平方厘米面积上的纤维少者几千根,多至几万根(纤维直径一般为10~100 μm),当用这类材料制成的构件超载并有少量纤维断裂时,其载荷会迅速重新分配到未破坏的纤维上,这样在短时间内不致使整个构件失去承载能力。

5. 改善了高温性能

一般铝合金在400℃时弹性模量大幅度降低,并接近于零,强度也显著降低。然而碳(或硼)纤维增强复合材料在此温度下强度和模量基本不变。

6. 良好的化学稳定性

7. 其它特殊性能

如复合材料具有隔热性、烧蚀性和电、光、磁等特殊性能。并具有良好的加工工艺性能。

三、复合机理

如何才能复合出性能优异的材料并使用好这种材料?这就需要了解复合原理和复合材料的特性。复合材料的性能,主要与三方面的因素有关,即基体的类型与性质;增强材料的类型、形状、性质、大小、含量和分布排列方式;以及基体与增强材料间的结合力。以下仅从材料机械性能的角度,简要阐述其复合原理。

提高材料机械性能的复合理论,有弥散增强、粒子增强和纤维增强三类。粒子增强复合是将增强粒子高度弥散地分布在基体中,使其阻碍导致塑性变形的位错运动(金属基体)或分子链运动(高聚物基体)。粒子直径一般在0.01~0.1 μm 范围内时增强效果最好。直径过大时,引起应力集中,直径小子0.01 μm 时,则近于固溶体结构,作用不大。增强粒子的数量大于20%时,称为粒子增强性复合材料,含量较少时称为弥散强化材料。

纤维增强复合的效果取决于纤维和基体本身的性质、两者界面间物理和化学作用的特点以及纤维的含量、长度、排列方式等因素。为了达到纤维增强的目的,必须注意以下问题:

(1) 纤维增强复合材料中,增强纤维主要承受外加载荷。因此应选择强度和弹性模量都高于基体的纤维材料作增强剂,并要求基体材料对增强纤维不论在室温还是高温下都没有损伤或有害的化学反应;

(2) 纤维和基体之间要有一定的粘结作用,两者之间的结合力要能保证基体所受的力通过界面传递给纤维。但结合力不能过大,因为复合材料受力破坏时,纤维从基体中拔出时要消耗能量,过大的结合力使纤维失去拔出过程,而发生脆性断裂;

(3) 纤维的排列方向要和构件的受力方向一致,才能发挥增强作用;

(4) 纤维复合增强效果还与如下因素有关:纤维和基体的热膨胀系数应相适应;纤维应占有一定的体积百分比;不连续短纤维的长度必须大于一定的长度等等。

四、复合材料的种类和应用

1. 增强材料

(1) 增强粒子的种类

增强粒子的种类很多,使用较多的是无机填料,如碳酸钙、硫酸钙、云母粉、滑石粉、二氧化硅、碳黑等;还有金属粉,如铝、铜、青铜、镍、锌粉等;有机填料粒子有木粉、稻壳等。常用填料粒子的种类示于表 7-9。

表 7-9 常用填料粒子的化学成分与形态

填料名称	相对密度	颗粒形状	颗粒度 / μm	颜色	化 学 成 分
轻质碳酸钙	2.75	针状结晶	3~10 占 88%	白	$\text{CaCO}_3 > 98.5\%$
重质碳酸钙	2.65	不规则块状	3~10 占 55%	浅 黄	$\text{CaCO}_3 > 95\%$
硫酸钙	2.94	圆柱状结晶	3~10 占 25%	浅 黄	CaSO_4 占 57%
亚硫酸钙	2.59	柱状结晶	3~10 占 77%	白	$\text{CaSO}_3 > 97\%$
滑石粉	2.74	不规则块状	3~10 占 33%	淡 黄	$3\text{Mg} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
菱苦土	2.9	不规则块状	3~10 占 60%	灰	MgCO_3 占 60%
二氧化钛	3.84	球状结晶	在 0.1 以下	白	TiO_2 占 97%
硫酸污泥	5.12	不规则块状	10 以上	深 褐	Fe_2O_3 占 40%~50%, CaO 占 20%~30% SiO_2 占 10%
云 母	2.7~3.1	片 状	20~60 000		$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
高岭土	2.58~2.63	不规则块状	6.9~3.0	白	SiO_2 占 40%~50%, Al_2O_3 占 30%~40%
二氧化硅	1.95~2.66	块 状		白	SiO_2 占 99.5%
碳 黑	1.8~2.1	块 状	0.02	黑	C: 70%~80%
粉煤灰	2.0~2.4	球 状	100	灰	SiO_2 61.17%, Al_2O_3 21.45%, CaO 3.77%
玻璃微球	0.4~2.48	球 状	100	乳白色 半透明	SiO_2 72%, $\text{Na}_2\text{O}(\text{K}_2\text{O})$ 14%, CaO 8%, MgO 4%
硫酸钡	4.5	粒 状	0.5~1.0	白	BaSO_4 98.8%
氢氧化铝	2.42	块 状	3~20	白	Al_2O_3 38%, H_2O 22%~28%

(2) 增强纤维的种类和性能

各种增强纤维及性能示于表 7-10。

表 7-10

增强纤维的种类和性能

品种	纤维种类	熔点(软化点) /℃	密度 /(g/cm ³)	直径 /μm	抗拉强度 /(10 ³ MPa)	比强度 /(10 ⁶ cm)	弹性模量 /(10 ⁶ MPa)	比模量 /(10 ⁷ cm)
玻璃纤维类	E 玻璃纤维	700	2.55	10	3.6	14	0.74	2.9
	S 玻璃纤维	840	2.50	10	4.6	18	0.89	3.5
	4H-J 玻璃纤维	900	2.66	—	5.1	19	1.0	2.8
	石英纤维	1660	2.10	35	6.0	20	0.74	3.3
微晶体纤维类	Al ₂ O ₃ 纤维	2040	3.15	—	2.1	6.6	1.8	3.5
	ZrO ₂ 纤维	2650	4.81	—	2.1	4.3	3.5	7.1
	碳纤维(普通)	3650	1.70	10	2.0	11.8	2.0	11.3
	碳纤维(高强)	3650	1.75	7	3.0	17.1	2.2	12.5
	碳纤维(高模)	3650	1.90	7	2.5	13.1	4.5	23.6
	氮化硼纤维	2980	1.90	7	1.4	7.4	0.92	4.8
	碳化硅纤维	2690	2.55	10	3.0	11.5	2.0	7.9
复合纤维类	硼纤维(钨芯)	2300	2.62	115	2.8	11.0	3.9	15
	B ₄ C 纤维(钨芯)	2450	2.36	—	2.3	9.9	4.9	21
	SiC 纤维(钨芯)	2660	4.09	76	3.5	8.6	4.9	12
	TiB ₄ 纤维(钨芯)	2980	4.18	—	1.1	2.3	5.2	12
有机纤维类	Kevlar49	—	1.54	12	3.9	25.0	1.27	8.3
	Kevlar29	—	1.54	12	3.6	24.0	0.74	4.8
	PRD49	—	1.47	12	2.8	19.0	1.4	9.5
	NOMEX	371℃分解	1.38	10	0.7	5.1	1.8	13
金属丝	钨 丝	3400	19.4	13	4.0	2.0	4.2	2.1
	钼 丝	1280	1.83	130	1.3	7.1	2.5	14
	不锈钢丝	1400	7.74	17	4.2	5.3	2.0	2.6
晶须	Al ₂ O ₃	2040	3.96	3~10	21	53	4.3	11
	SiC	2690	3.18	1~3	21	66	4.9	19
	石墨	3650	1.96	—	20	100	7.1	36

2. 基体材料

(1) 树脂基体

许多树脂基体被用于生产石墨纤维、硼纤维、芳纶类纤维增强的复合材料。环氧树脂及其热固性树脂类材料最普遍用于生产树脂基复合材料。其它树脂类型为热塑性聚砜和聚苯砜树脂以及服役于高温环境的热固性聚酰亚胺和酚醛树脂。

(2) 金属基体

用于与纤维进行复合的金属基体有铝及铝合金、钛及钛合金及镁、铜、铅等。

(3) 陶瓷基体

陶瓷材料具有耐热、抗氧化、耐磨耗、耐蚀等突出特点,但韧性差,难于加工的缺点使其

应用受到限制。在陶瓷材料中加入增强颗粒和增强纤维,能大幅度提高强度,改善脆性,所以可以用于复合的陶瓷基体材料基本上涵盖了所有的陶瓷材料。

3. 复合材料的种类

复合材料的内涵极其广泛,所以不同增强组元和基体材料复合所获得的复合材料的种类非常繁多。表 7-11 所示为复合材料的种类。

表 7-11 复合材料的种类

基 体 增强体		金 属	无机非金属				有机材料		
			陶 瓷	玻 璃	水 泥	碳 素	木 材	塑 料	橡 胶
金 属		金属基 复合材料	陶瓷基 复合材料	金属网 嵌玻璃	钢筋水泥	无	无	金 属 丝 增强塑料	金 属 丝 增强橡胶
无机非金属	陶瓷 { 纤维 粒料	金属基 超硬合金	增强陶瓷	陶瓷增 强玻璃	增强水泥	无	无	陶瓷纤维 增强塑料	陶瓷纤维 增强橡胶
	碳素 { 纤维 粒料	碳纤维 增强金属	增强陶瓷	陶瓷增 强玻璃	增强水泥	碳纤增强 碳复合材料	无	碳 纤 维 增强塑料	碳纤碳黑 增强橡胶
	玻璃 { 纤维 粒料	无	无	无	增强水泥	无	无	玻璃纤维 增强塑料	玻璃纤维 增强橡胶
有机材料	木 料	无	无	无	水泥木丝板	无	无	纤 维 板	无
	高聚物纤维	无	无	无	增强水泥	无	塑料合板	高聚物纤 维增强塑料	高聚物纤 维增强橡胶
	橡胶胶粒	无	无	无	无	无	橡胶合板	高聚物合金	高聚物合金

4. 复合材料的应用

复合材料优良的结构性能,潜在的和实际的能量节省,以及设计的灵活性是推动复合材料广泛应用的主要因素。随着现代技术的发展,原材料和产品组合成本将不断降低,复合材料的应用范围将更加广泛。

(1) 玻璃纤维增强树脂基复合材料

玻璃纤维增强树脂基复合材料俗称玻璃钢是最早得到应用的复合材料之一。目前玻璃纤维增强树脂基复合材料被广泛应用于房屋建筑、日用消费品、航空航天、交通运输工具等。

(2) 碳纤维增强树脂基复合材料

现在碳纤维复合材料主要应用于军用和民用飞机上。主要包括以下三类结构:机翼、尾翼和机身。随着碳纤维复合材料的组合成本的降低、碳纤维增强的复合材料已开始在民用产品上得到应用,例如体育及娱乐用品、汽车的部分零部件等。

(3) 硼纤维增强树脂基复合材料

近年来,硼纤维增强树脂基复合材料在商业领域内的应用进展很快,如体育用品:鱼杆、高尔夫球杆和网球拍等。在医疗器械领域,已设计制造出了几种用于超高速离心机硼纤维增强容器;最近硼纤维增强复合材料已被用于增强摩托车的后叉。其它方面,例如汽车、船舶和车床工具等方面也有硼纤维增强复合材料应用的例子。

(4) 金属基复合材料的应用

大部分商业应用都适合使用各种金属基复合材料。过高的成本阻碍了这类复合材料的应用。但最近金属基复合材料的特殊性能和原材料的加工/组合成本的降低对某些特殊应用产生了新的兴趣。

吸引设计者的金属基复合材料的主要性能通常是高的比强度和比模量、某些复合材料系统的高温能力、环境稳定性、尺寸稳定性。

硼/铝复合材料现在和可能的应用,是汽轮发动机风机叶片、飞机进出门、桁架、飞机舱壁、压缩机叶片、平衡环加强板、导弹构件、翼、压缩面板、飞船剪切梁和各种其它飞机构件。

原位增强复合材料的高强度和优良的热稳定性特别适合在飞机喷气发动机叶片上的应用。

Al/SiC 晶须复合材料的可能应用很多。例如,优良的高温性能(约 400℃),可以使其应用于许多结构件,其模量、强度、重量轻都优于钢和铝合金结构材料。发动机滑块、活塞、连杆、推杆是 Al/SiC 晶须复合材料应用的实例,其它可能的应用是船体结构、轻质桥梁、货车和汽车底盘、变速箱以及大量的火车车箱部件。

(5) 陶瓷基复合材料的应用

陶瓷基复合材料的起步比较晚,但由于其优异的力学性能、物理化学性能,发展速度非常迅猛。现已能制备多种增强材料形式的陶瓷基复合材料,例如纤维增强陶瓷基复合材料、颗粒增强陶瓷基复合材料等。这些陶瓷基复合材料成功地应用于高温刀具、模具材料,有效地提高了机械加工的效率和精度。此外,陶瓷基复合材料还有望在火箭发动机尾喷管、发动机叶片和航天飞机零部件上得到应用。

思考题与习题

1. 何谓聚合物? 线型聚合物的分子量大小怎样计算,聚合度 $n=1000\ 000$ 的聚氯乙烯,其分子量是多少?
2. 简述高聚物的分类方法。
3. 高聚物结构单元的键接方式有哪几种?
4. 高聚物的空间构型有哪几种,各自对性能有何影响?
5. 高聚物的柔顺性与其性能之间有何关系?
6. 简述线型无定型聚合物的三种力学状态。
7. 为什么根据 T_g 大小来区别塑料和橡胶? 又为什么 T_g 是非晶态热塑性塑料使用温度上限? 是橡胶使用温度下限?
8. 简述聚合物的基本性能及特点。
9. 何谓聚合物老化? 其产生原因是什么? 怎样防止?
10. 哪些是热塑性工程塑料? 哪些是热固性工程塑料? 各有什么特点?
11. 对于塑料零件怎样才能做到合理选材?
12. 合成橡胶有哪些种类? 各有何特点及用途?
13. 怎样正确选用橡胶材料?
14. 何谓陶瓷材料? 怎样成型? 有哪些种类?
15. 简述陶瓷的组成相及其结构。

16. 陶瓷有哪些使用性能？
17. 简述常用氧化物陶瓷的种类、特性及用途。
18. 何谓复合材料？它有哪些种类？
19. 简述复合材料的复合机理。
20. 复合材料有哪些特点？

附录 1

硬度的换算与对照

洛 氏 硬 度		布氏硬度	维氏硬度	强度(近似值)
/HRC	/HRA	/HBS(10/3000)	/HV	σ_b /MPa
65.0	83.6	—	798	—
64.0	83.1	—	774	—
63.0	82.6	—	751	—
62.0	82.1	—	730	—
61.0	81.5	—	708	—
60.0	81.0	—	687	2675
59.0	80.5	—	666	2555
58.0	80.0	—	645	2435
57.0	79.5	—	625	2315
56.0	78.9	—	605	2210
55.0	78.4	538	587	2115
54.0	77.9	526	569	2030
53.0	77.4	515	551	1945
52.0	76.9	503	535	1875
51.0	76.3	492	520	1805
50.0	75.8	480	504	1740
49.0	75.3	469	489	1685
48.0	74.8	457	475	1635
47.0	74.2	445	461	1580
46.0	73.7	433	448	1530
45.0	73.2	422	435	1480
44.0	72.7	411	423	1440
43.0	72.2	400	411	1390
42.0	71.7	390	400	1350
41.0	71.1	379	389	1310
40.0	70.6	369	378	1275
39.0	70.1	359	368	1235
38.0	(69.6)	349	358	1200
37.0	(69.0)	340	348	1170
36.0	(68.5)	331	339	1140
35.0	(68.0)	322	329	1115
34.0	(67.5)	314	321	1085
33.0	(67.0)	306	312	1060
32.0	(66.4)	298	304	1030

续表

洛氏硬度		布氏硬度	维氏硬度	强度(近似值)
/HRC	/HRA	/HBS(10/3000)	/HV	σ_b /MPa
31.0	(65.9)	291	296	1005
30.0	(65.4)	284	289	985
29.0	(64.9)	277	281	960
28.0	(64.4)	270	274	935
27.0	(63.8)	263	267	915
26.0	(63.3)	257	260	895
25.0	(62.8)	251	254	875
24.0	(62.3)	246	247	845
23.0	(61.7)	240	241	825
22.0	(61.2)	235	235	805
21.0	(60.7)	230	229	790
20.0	(60.2)	225	224	770
(19.0)	(59.7)	221	218	755
(18.0)	(59.1)	216	213	740
(17.0)	(58.6)	212	208	725
(16.0)	(58.1)	208	203	710
(15.0)	(57.6)	204	198	690
(14.0)	(57.1)	206	193	670
(13.0)	(56.5)	196	189	660
(12.0)	(56.0)	192	184	645
(11.0)	(55.5)	188	180	625
(10.0)	(55.0)	185	176	615
(9.0)	(54.5)	181	172	600
(8.0)	(53.9)	177	168	560

注:① 上表系由中国计量科学研究院提供。表中所列的硬度值是根据我国新硬度基准实际测定的;

② 括弧内数值仅供参考,在实际测试时不宜使用;

③ 各种硬度值及强度值之间并无理论上的关系,所列数值系根据试验数据统计所得的近似换算值,特别是强度值。

附录 2

钢材回火温度与硬度对照表

钢种	钢 号	淬火规范			回 火 温 度/℃												备 注
		加热温度 /℃	冷却剂	硬 度	180±10	240±10	280±10	320±10	360±10	380±10	420±10	480±10	540±10	580±10	620±10	650±10	
碳结 构钢	35	860±10	水	HRC>50	51±2	47±2	45±2	43±2	40±2	38±2	35±2	33±2	28±2	/HBS	/HBS		
	45	830±10	水	HRC>55	56±2	53±2	51±2	48±2	45±2	43±2	38±2	34±2	30±2	250±20	220±20		
碳 1. 具钢	T8,TA	790±10	水-油	HRC>62	62±2	58±2	56±2	54±2	51±2	49±2	45±2	39±2	34±2	29±2	25±2		
	T10,T10A	780±10	水-油	HRC>62	63±2	59±2	57±2	55±2	52±2	50±2	46±2	41±2	36±2	30±2	26±2		
合金 钢	40Cr	850±10	油	HRC>55	54±2	53±2	52±2	50±2	49±2	47±2	44±2	41±2	36±2	31±2	260HBS		具有回火脆 性的钢(如 40Cr、65Mn、 30CrMnSi 等),在中温 或高温回火 后用清水或 油冷却
	50CrVA	850±10	油	HRC>60	58±2	56±2	54±2	53±2	51±2	49±2	47±2	43±2	40±2	36±2		30±2	
	60Si2MnA	870±10	油	HRC>60	60±2	58±2	56±2	55±2	54±2	52±2	50±2	44±2	35±2	30±2			
	65Mn	820±10	油	HRC>60	58±2	56±2	54±2	52±2	50±2	47±2	44±2	40±2	34±2	32±2	28±2		
	5CrMnMo	840±10	油	HRC>52	55±2	53±2	52±2	48±2	45±2	44±2	44±2	13±2	38±2	36±2	34±2	32±2	
	30CrMnSi	860±10	油	HRC>48	48±2	48±2	47±2		43±2	42±2			36±2		30±2	26±2	
	GCr15	850±10	油	HRC>62	61±2	59±2	58±2	55±2	53±2	52±1	50±2		41±2		30±2		
	9SiCr	850±10	油	HRC>62	62±2	60±2	58±2	57±2	56±2	55±1	52±2	51±2	45±2				
	CrWMn	830±10	油	HRC>62	61±2	58±2	57±2	55±2	54±2	52±2	50±2	46±2	44±2				
	9Mn2V	800±10	油	HRC>62	60±2	58±2	56±2	54±2	51±2	49±1	41±2						
高合 金钢	3Cr2W8	1100	分级,油	HRC≈48								46±2	48±2	48±2	43±2	41±2	一般采用 560 ~580℃回火二 次
	Cr12	980±10	分级,油	HRC>62	62	59±2		57±2			55±2		52±2			45±2	一般采用低温 回火 一般采用 500 ~520℃回火二 次 560℃三次回 火,每次一小时
	Cr12Mo	1030±10	分级,油	HRC>62	62	62	60		57±2				53±2			45±2	
	Cr12Mo	1120±10	分级,油	HRC>44	44	45			48	48		51±2	63±2	52±2			
	W18Cr4V	1270±10	分级,油	HRC>64													

注:1. 水冷剂为 10%NaCl 水溶液;

2. 淬火加热在盐浴炉内进行,回火在井式炉内进行;

3. 回火保温时间可参考有效厚度及装炉量确定,一般碳钢采用 60~90 分钟,合金钢采用 90~120 分钟。

附录 3

常用钢材不同截面淬火后的硬度值(HRC)

硬度值 截面尺寸 钢种及处理	<3	4~10	11~20	20~30	30~50	50~80	80~120
15 渗碳水淬	58~65	58~65	58~65	58~65	58~62	50~60	
15 渗碳油淬	58~62	40~60					
35 水淬	45~50	45~50	45~50	35~45	30~40		
45 水淬	54~59	50~58	50~55	48~52	45~50	40~45	25~35
45 油淬	40~45	30~35					
T8 油淬	55~62						
20Cr 渗碳油淬	60~65	60~65	60~65	60~65	56~62	45~55	
40Cr 油淬	50~60	50~55	50~55	45~50	40~45	35~40	
35SiMn 油淬	48~53	48~53	48~53	45~50	40~45	35~40	
65SiMn 油淬	58~64	58~64	50~60	48~55	45~50	40~45	35~40
GCr15 油淬	60~64	60~64	60~64	58~63	52~62	48~50	
CrWMn 油淬	60~65	60~65	60~65	60~64	58~63	56~62	56~60
T8 水淬	60~65	60~65	60~65	60~65	62~65	50~55	40~45

附录 4

常用结构钢截面尺寸对力学性能影响

钢 号	热处理 类 型	截面尺寸 /mm	力 学 性 能					硬 度		备 注
			抗拉 强度 σ_b	屈服 强度 σ_s	延伸 率 δ_5	收缩 率 ψ	冲击值 a_k	/HBS	表面淬火 /HRC	
			/MPa		/%		/(MJ/m ²)			
			\geq							
10	正火	25	340	210	31	55		≤ 137		
20	正火	25	420	250	25	55		≤ 156	截面 ≤ 50 mm 渗碳淬火后 56~62 心部 HBS 137~163	
	正火 回火	≤ 100	400	220	24	53	0.55	103~156		
		$> 100 \sim 300$	380	200	23	50	0.50			
		$> 300 \sim 500$	370	190	22	45	0.50			
		$> 500 \sim 700$	360	180	20	40	0.45			
25	正火	25	460	280	23	50	0.90	≤ 170	截面 ≤ 50 mm 渗碳淬火后 56~62 心部 HBS 137~170	
	正火 回火	≤ 100	430	240	22	50	0.50	111~170		
		$> 100 \sim 300$	400	220	20	48	0.40			
		$> 300 \sim 500$	390	210	18	40	0.40			
35	回火	25	540	320	20	45	0.70	≤ 187	35~45	
	正火 回火	≤ 100	520	270	18	43	0.35	149~187		
		$> 100 \sim 300$	500	260	18	40	0.30	143~187		
		$> 300 \sim 500$	480	240	17	37	0.30	143~187		
		$> 500 \sim 700$	460	230	16	32	0.25	137~187		
		$> 750 \sim 1000$	440	220	15	28	0.25	137~187		
	调质	≤ 100	560	300	19	48	0.60	156~207		
$> 100 \sim 300$	540	280	18	40	0.50					
45	正火	25	610	360	16	40	0.50	≥ 241	40~50	
	正火 回火	≤ 100	600	300	15	38	0.30	170~217		
		$> 100 \sim 300$	580	290	15	35	0.25	162~217		
		$> 300 \sim 500$	560	280	14	32	0.25	162~217		
		$> 500 \sim 750$	540	270	13	30	0.20	156~217		
调质	≤ 200	650	360	17	35	0.40	217~255			
55	正火	25	660	330	13	35		≥ 255	45~55	
	正火 回火	≤ 100	660	330	12	35	0.30	187~229		
		$> 100 \sim 300$	640	320	11	28	0.25	179~229		
		$> 300 \sim 500$	620	310	10	25	0.25			
40Mn	正火	25 ≤ 50	600 600	360 330	17 14	45 45	0.60	≤ 229	40~50	
	调质	≤ 25 $> 50 \sim 100$	800 750	520 480	18 14	45 40		196~241		
50Mn	正火	25	600	400	13	40	0.40	≤ 255	45~55	
	正火 回火	≤ 100 $> 100 \sim 300$	650 620	340 320	13 12	35 33		187~229		
		调质	≤ 60 $> 60 \sim 100$	800 780	550 500	8 7	40 35	0.35 0.30		

续表

钢号	热处理类型	截面尺寸/mm	力学性能					硬 度		备 注
			抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	延伸率 δ_5	收缩率 ψ	冲击值 α_k	/HBS	表面淬火 /HRC	
			/MPa		/%		/(MJ/m ²)			
			≥							
35Mn2	正火 回火	≤100 >100~300	630 590	320 300	18 18	45 43	0.30	207~241	40~50	
	调质	25	850	700	12	45	0.70	229~269		
		≤60	800	650	16	50	0.60			
		>60~100	760	600	16	50	0.60			
		>100~300	700	500	16	45	0.60			
45Mn2	正火 回火	≤100 >100~300	700 680	360 340	16 15	38 35		187~241 179~241	45~55	
	调质	25	900	750	10	45	0.60	269~321		
	35SiMn	调质	25	900	750	15	45	0.60	229~286 217~269 217~255 196~255	45~55
≤100			800	520	15	45	0.60			
>100~300			750	450	14	35	0.50			
>300~400			700	400	13	30	0.45			
>400~500			650	380	11	28	0.40			
42SiMn	调质	25	900	750	15	40	0.60	229~286 217~269 217~255 169~255	45~55	
		≤100	800	520	15	45	0.40			
		>100~200	750	470	14	42	0.30			
		>200~300	700	450	13	40	0.30			
		>300~500	650	380	10	40	0.25			
37SiMn2MoV	调质	25	1000	850	12	50	0.80	269~302 241~286 241~269	50~55	
		≤200	880	700	14	40	0.40			
		>200~400	830	650	14	40	0.40			
		>400~600	780	600	14	40	0.40			
40MnB	调质	25	1000	800	10	45	0.60	241~286		
		≤200	750	500	12	40	0.50			
50SiMnMoB	调质	≤300	900	750	12	40	0.40	269~302		
		>300~500	900	650	12	38	0.40	255~286		
		>500~800	850	620	12	35	0.30	241~286		
40Cr	调质	25	1000	800	9	45	0.60	241~286 241~286 229~269 217~255	48~55	
		≤100	750	550	15	45	0.50			
		>100~300	700	500	14	45	0.40			
		>300~500	650	450	10	35	0.30			
		>500~800	600	350	8	30	0.20			
35CrMo	调质	25	1000	850	12	45	0.80	207~269 207~269 207~269 207~269	40~45	
		≤100	750	550	15	45	0.60			
		>100~300	700	500	15	45	0.50			
		>300~500	650	450	15	35	0.40			
		>500~800	600	400	12	30	0.30			
20Cr	一次淬火 二次淬火 回火	15	850	550	10	40	0.6		渗 碳 56~62	
	渗碳淬火 回火	30	650	400	12	40	0.6			
		≤60	650	400	13	40	0.5			

续表

钢号	热处理类型	截面尺寸/mm	力学性能					硬 度		备 注
			抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	延伸率 δ_5	收缩率 ψ	冲击值 α_k	/HBS	表面淬火 /HRC	
			/MPa		/%		/(MJ/m ²)			
			\geq							
20CrMnTi	渗碳淬火 回火	15	1100	850	10	45	0.7		渗碳 56~62	
20Mn2	同上	15	800	600	10	40	0.6		渗碳 56~62	
20MnVB	同上	15	1100	900	10	45	0.7		渗碳 56~62	
20SiMnVB	同上	15	1200	1000	10	45	0.7		渗碳 56~62	
38CrMoAlA	调质	30 $\Phi 80 \sim 150$	1000 ≥ 800	850 ≥ 600	14 ≥ 12	50	0.9 ≥ 0.5		氮化 HV>850	
16Mn	热轧态	<16 17~25 26~36 38~50 55~100 方、圆钢	520 500 480 480 480	350 330 310 290 280	21 19 19 19 19					
40MnVB	正火	30	840	540~ 550	20	59~ 60	0.8~ 0.9	210~240		
	调质	25 $\Phi 55 \sim 85$	≥ 1000 ≥ 850	≥ 800 ≥ 700	≥ 10 ≥ 14	≥ 45 ≥ 50	≥ 0.6 ≥ 0.7	241~255		
20CrMo	调质	15 16~40 40~100 100~250	≥ 900 800~950 700~850 650~800	>700 >550 >450 >420	≥ 12 >14 >15 >16	≥ 50 >55 >60 >65	>10 0.8~1.2 0.8~1.2 0.8~1.2			
20CrMnMo	一次淬火 低温回火	≤ 80	1200	900	10	45	0.7			
	调质	~80	700	550	15	55	1.0	223~269		
	渗碳 淬火回火	~15 ~150	1100 900	900 700	10 10	45 40	0.8 0.5		58 56	
Q235	供应态 或 正火	~100	460 ~ 375	205	23	49				
		100~150		195	22	43				
		>150		185	21	38				
Q275	供应态 或 正火	~100	610 ~ 490	245	17	39				
		100~150		235	16	35				
		>150		225	15	30				

续表

钢号	热处理类型	截面尺寸/mm	力学性能					硬 度		备 注
			抗拉强度 σ_b	屈服强度 σ_s	延伸率 δ_5	收缩率 ψ	冲击值 α_k	/HBS	表面淬火 /HRC	
			/MPa		/%		/(MJ/m ²)			
			\geq							
40CrNi	调质	>100	850	600	10	40	0.5	241~286		
		100~300	800	580	9	38	0.4	217~269		
		300~500	750	560	8	36	0.3	207~225		
		500~700	700	540	8	35	0.3	207~255		
40CrNiMo	调质	<120	850	700	13	50	0.8	241~286		
		<240	800	600	13	45	0.6	229~286		
20CrMnSi	调质	<60	900	600	10	40	0.6	≤ 207 (退火)		
30CrMnSi	调质	<100	850	600	12	35	0.6	241~293		
		100~200	730	470	16	35	0.5	207~229		
30CrNi3A	调质	<80	900	800	20	62	1.4	380		
12Cr2Ni4	淬火后 低温回火	<60	1200	900	11	62	1.4	350		
18Cr2Ni4WA	860~870℃ 水淬 150~170℃ 回火	<150	1150	850	11	50	1.2	332~387		
	淬火后 550~575℃ 回火	<150	1100	800	12	50	1.2	321~387		
38SiMnMo	调质	≤ 100	750	600	16	40	0.6	229~286	45~55	
		>100~300	700	550	14	35	0.5	217~269		
		>300~500	650	500	12	32	0.4	196~241		
		>500~800	600	400	10	30	0.3	187~241		
30CrMn2MoB	调质	100~300	900	730	12	40	0.4	269~302	50~55	
		>300~500	850	680	12	40	0.4	269~302		
		>500~800	800	630	12	40	0.4	241~286		
30CrMo	淬火后 540℃回火	25	≥ 900	≥ 800	≥ 12	≥ 50	≥ 0.8	退火 ≥ 229		
	淬火后 600~640℃ 回火	<100 100~300	≥ 630 ≥ 600	≥ 420 ≥ 400	≥ 16 ≥ 15	≥ 40 ≥ 35	>0.5 ≥ 0.45	196 196		
	淬火后 560℃回火	80	864	723			1.63	260		
42CrMo	850℃油淬后 600℃回火	25	≥ 1100	≥ 950	≥ 12	≥ 45	≥ 0.8			
		≤ 40	1000~1200	800	≥ 11	≥ 45				
		≤ 100	900~1050	700	≥ 12	≥ 50				
		≤ 250	759~900	550	≥ 14	≥ 55				

续表

钢 号	热处理 类 型	截面尺寸 /mm	力 学 性 能					硬 度		备 注
			抗拉 强度 σ_b	屈服 强度 σ_s	延伸 率 δ_5	收缩 率 ψ	冲击值 α_k	/HBS	表面淬火 /HRC	
			/MPa		/%		/(MJ/m ²)			
			≥							
40CrMnTi	淬火后 500℃回火	25	1150	1000	14	60	0.8			
		40	1000	850	16	60	0.85			
		60	1000	800	18	60	0.8			
40CrMnMo	调质	25	≥1000	≥800	≥10	≥45	≥0.9			
		60	875	695	17.5	54	0.78	255		
		300	800	550	15	57	0.75	217		
		400	700	450	18	48	0.6	220		
		540	620	500	16	43	0.8	217		
30Cr2MoV	调质	25	≥1250	≥1050	≥9	≥35	≥0.9			
		≤250	850~1100	700~800	8~13		0.4~0.6			
		≤500	800~950	600	10~14		0.3~0.5			
35CrNiMo	调质	<100	870	750	15	45	0.7	157~321		
		100~300	780	650	14	40	0.6	157~321		
		300~500	700	550	14	35	0.5	157~321		
		500~800	650	500	14	32	0.4	157~321		
30CrNi3Mo	调质	<100	920	800	14	40	0.7			
		100~300	870	750	14	38	0.6	269~341		
		300~500	820	700	13	35	0.5			
20Mn2SiMo	正火 (900~910℃)	1000	520	300	20	40	0.8			
	回火 (590~610℃)	1000	500	280	14	26	0.6			

附录 5 热处理方法代号及在蓝图上的表示方法

一、热处理方法代号

热处理方法代号(GC423-62)(一机部机床专业标准)

热处理方法	代号	标 注 举 例
退火	Th	
正火	Z	
调质	T	T235——调质至 HBS220~250
淬火	C	C48——淬火回火 HRC45~50
油冷淬火	Y	Y35——油冷淬火回火 HRC30~40
高频淬火	G	G52——高频淬火回火 HRC50~55
调质高频淬火	T-G	T-G54——调质后高频淬火回火 HRC52~58
火焰淬火	H	H54——火焰加热淬火回火 HRC52~58
氰化	Q	Q59——氰化淬火回火 HRC56~62
氮化	D	D0.3-900——氮化深度 0.3 mm, 硬度大于 HV850(维氏硬度 850 相当于 HRC64)
渗碳淬火	S-C	S0.5-C59——渗碳深度 0.5 mm, 淬火回火 HRC56~62
渗碳高频淬火	S-G	S0.8 G59——渗碳深度 0.8 mm, 高频淬火回火 HRC56~62

注:热处理方法代号中的数字是硬度范围的平均值。代号中渗碳及氮化深度也是指的平均值;只有对某些形状复杂、截面较小的零件,为避免热处理时过大的变形或开裂,才在设计时指定用油作冷却剂。

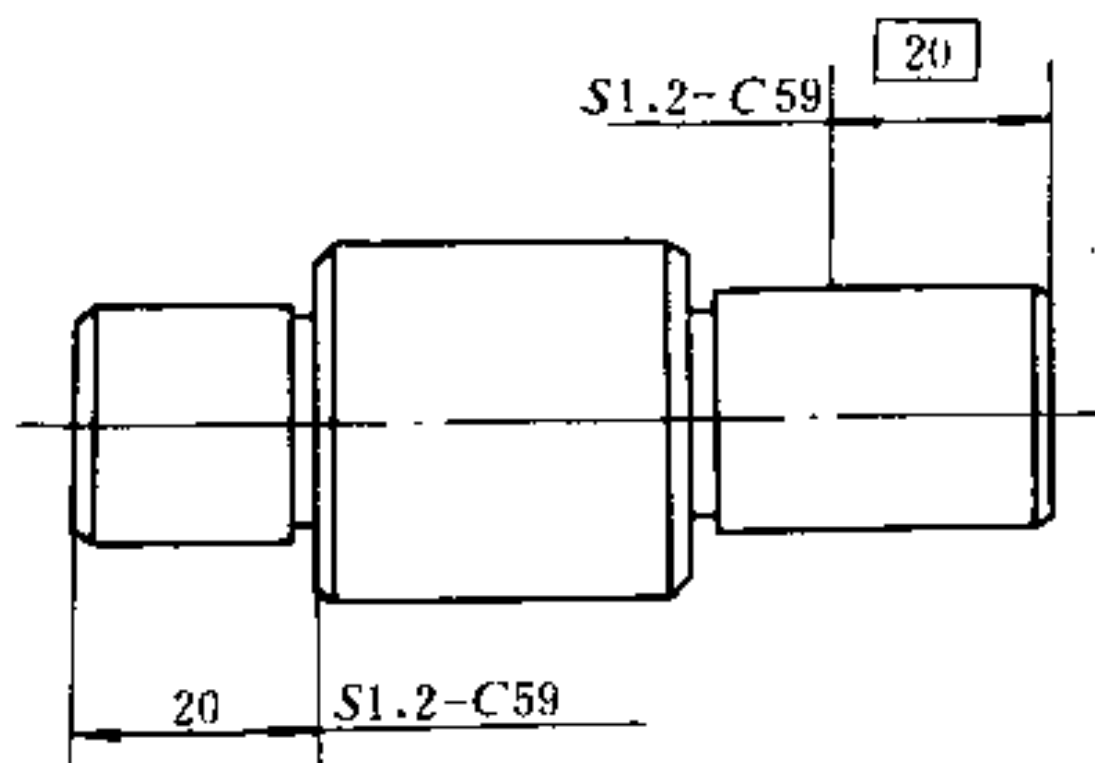
二、零件图上热处理注法

(1) 当钢件需要全部热处理时,代号在图纸标题上方或图纸右上角“热处理”一栏中单独标注。为了明显起见,最好勿与其它说明并列在一起。

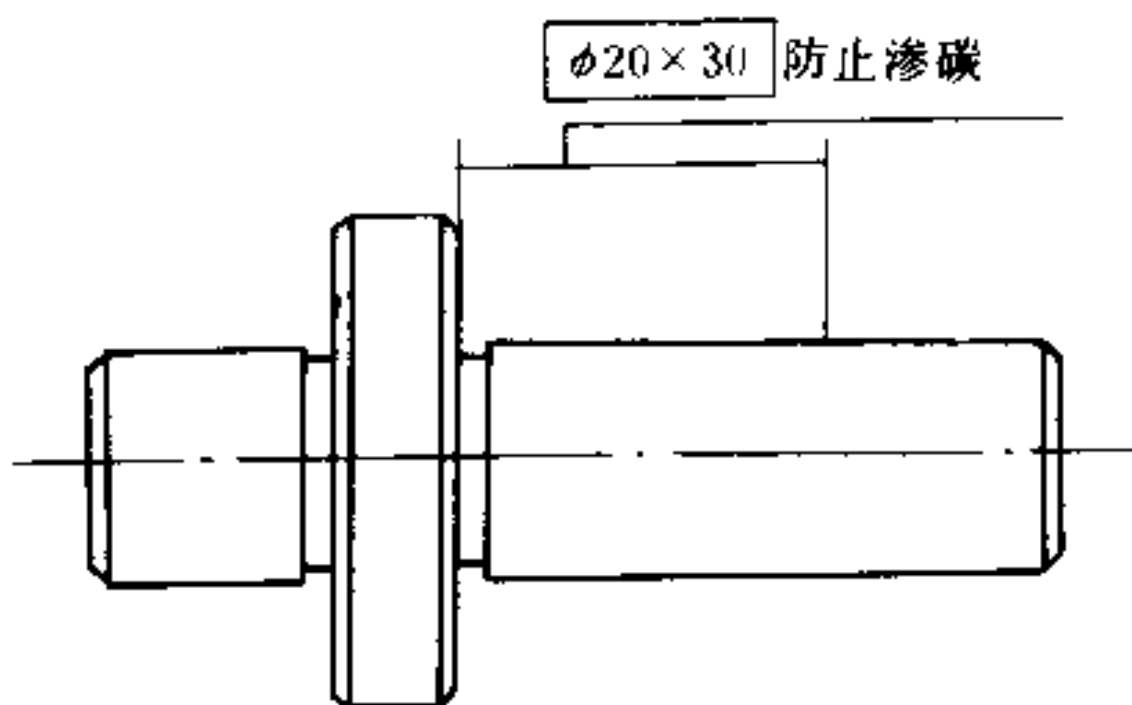
(2) 零件需要局部热处理时,热处理部位用细实线限定,在引出线上标注热处理代号,如附图 1,但在图纸上应注明“局部热处理”字样。

(3) 齿轮齿部(及其它类似情况)的局部热处理无法在零件图上用细实线限定局部热处理部位时,应在标题栏上方或右上角“热处理”一栏中注明局部热处理部位及热处理代号,如齿部 G42。

(4) 零件局部需要防止热处理时,防止热处理部位也用细实线限定,并在引出线上标注防止热处理的尺寸,如附图 2。



附图 1 热处理符号的标注



附图 2 不处理部分的标注

附录 7

钳工及木工工具热处理

工 具 名 称		材 料	淬火温度/℃ 及加热颜色	回火温度/℃ 及回火色	要求硬度/HRC a—工作部分 b—尾部	备 注
钳 工	扳 子	T7、T8	~830 浅樱桃红色	工作部分 240~300 棕色~紫蓝 尾 部 400~460	a:54~58 b:40~45	也可用弹簧钢制造
	起 子 (螺丝刀)	T7、T8	~830 浅樱桃红色	320~370	a(长约 20 mm) 46~52	
		45、50、60	830 亮红色	240~320 浅黄色~蓝灰色		
	冲 子 (冲心扳)	T7、T8	780~800 浅樱桃红色	工作部分 240~300 棕色~蓝色	54~58	
				尾 部 400~460	40~45	
	刮 刀	T11、T12、T13	780~800 浅樱桃红色	120~150 银白色	工作部分 (长约 10~20 mm) 62~64	
	手 锤	T7、T8	780~800 浅樱桃红色	工作部分 280~350	50~55	* 亦可用 45 号钢但需淬 白火或小黄火
尾 部 400~460				40~45		
扳 手	45、40Cr	~850 亮红色	300~400	40~45		
木 工	刨 刀	T7、T8	780~800 浅樱桃红色	180~200 银白~浅黄	工作部分 56~60	常用贴钢制造
	斧 头	T7、T8	780~800 浅樱桃红色	250~320	工作部分 52~56	1. 常用夹钢和贴钢制造 2. 劈木柴用的斧头硬度 应稍低些(45~50 HRC)
	扁 凿	T7、T8	780~800 浅樱桃红色	250~320	工作部分 52~56	常用贴钢制造

注:淬白火或小黄火指的是白回火的颜色

附录 8

我国与其他国家常用钢号对照表

材料 类别	中 国	前 苏 联	美 国		法 国	原 西 德	日 本	英 国
	GB	ГОСТ	SAE	AISI	NF	DIN	JIS	BS
	中国国家标准	前苏联国家标准	美国汽车工程 学会标准	美国钢铁协会标准	法国标准	原西德工业标准	日本工业标准	英国标准
优质碳素结构钢	08	08	1008	1008	XC6			040A04, 050A04
	10	10	1010	1012	XC10	C10, CK10	S10C	040A10, 045M10
	15	15	1015	1015	XC12(XC15)	C15, CK15	S15C	040A15, 080M15
	20	20	1020	1020	XC20	CK22, C22	S20C	050A20, 055M15
	30	30	1030	1030	XC30	C30	S30C	060A30
	40	40	1040	1040	XC42	C40, CK40	S40C	060A40
	45	45	1045	1045	XC45	C45, CK45	S45C	060A47
	50	50	1050	1050	XC50	C50, CK50	S50C	060A52
	60	60	1060	1060	XC60	C60, CK60	SWR, H4B	060A62
	65	65	1065	1064	XC65	CK67	SUP2, SWR7	060A67
	80	80	1078	1078		CK75		
	20Mn	20Г	1022	C1022	20M5	21M4		080A20
	30Mn	30Г	1033	C1033	32M5	30M4		080A30
	40Mn	40Г	1039	C1036	40M5	40Mn4		080A40
	65Mn	65Г	1065	C1065				080A67
弹簧钢	60SiMn	60СГ	9260	9260		60SiMn5	SUP6	
	55Si2Mn	55C2	9255	9255	55S7	55Si7		250A53
	60Si2MnA	60C2A				65Si7	SUP7	

续表

材料 类别	中 国	前 苏 联	美 国		法 国	原 西 德	日 本	英 国
	GB	ГОСТ	SAE	AISI	NF	DIN	JIS	BS
	中国国家标准	前苏联国家标准	美国汽车工程 学会标准	美国钢铁协会标准	法国标准	原西德工业标准	日本工业标准	英国标准
合金 结构 钢	20Mn2	20Г2	1320	1320		20Mn5	SMn420	150M19
	40Mn2	40Г2	1340	1340	40M5		SMn438	
	42Mn2V					42MnV7		
	20Cr	20X	5120	5120	18C3	17Cr3	SCr420	527A20
	40Cr	40X	5140	5140	42C4	41Cr4	SCr440	530A40, 530M40
	20CrMn	20XГ	5120	5120	20MC5	20MnCr5	SMnC420	
	40CrMn	40XГ	5140	5140				
	30CrMnSi	30XГC						
	20CrMnTi	18XГT						
	30CrMnTi	30XГT				30MnCrTi4		
	20CrMo	20XM	4118	4118	18CD4	20CrMo5	SCM420	CDS12
	42CrMo		4140	4140	42CD4	42CrMo4	SCM440	708M40
	38CrMoAlA	38XM80A			40CAD6.12	41CrAlMo7		905M39
	40B			14B35				
	40MnB				38MB5			
	40CrMnB	40XГP	50B40H					
	20CrNi	20XH	3120	3120				
	40CrNi	40XH	3140	3140		40NiCr6		640M40
	12CrNi3	12XH3A	3310	E3310	14NC12	14NiCr14	SNC815	655M12
	30CrNi3	30XH3A	3435	3435	30	30NC11	SNC836	653M31
	40CrNiMo	40XHM	4340	4340	40NCD3	36CrNiMo4	SNCM439	816M40

续表

材料类别	中 国	前 苏 联	美 国		法 国	原 西 德	日 本	英 国
	GB	ГОСТ	SAE	AISI	NF	DIN	JIS	BS
	中国国家标准	前苏联国家标准	美国汽车工程学会标准	美国钢铁协会标准	法国标准	原西德工业标准	日本工业标准	英国标准
滚珠轴承钢	GCr6	ГХХ6	50100	E50100	100C3	105Cr2		
	GCr9	ГХХ9	51100	E51100	100C5	105Cr4	SUJ1	
	GCr15	ГХХ15	52100	E52100	100C6	100Cr6	SUJ2	534A99
	GCr15SiMn	ГХХ15СF				100CrMn6		
碳素工具钢	T7, T7A	У7, У7А			Y ₃ 65	C70W2, C70W1	SK6	
	T8	У8	W108 Commercial		Y ₂ 75	C80W2	SK5	
	T8MnA	У8F				C85WS		
	T9	У9			Y ₃ 90			
	T10	У10	W110 Commercial	W110 Commercial		C105W2	SK3	BW ₁ B
	T11	У11			Y ₂ 105	C110W2		
	T12	У12	W112 Commercial	W112 Commercial	Y ₂ 120	C125W2	SK2	
	T13	У13			Y ₂ 135	C130W2	SK1	
合金工具钢	9SiCr	9XC				90CrSi5		
	Cr12	X12	D3	D3	Z200C12	X210Cr12	SKD1	
	5CrMnMo	5XFM				40CrMnMo7	SKT5	BD3
	Cr12MoV	X12M	D2	D2	Z160CDV12	X155CrMoV12.1	SKD11	BD2
	3Cr2W8V	3X2B8Φ	H21	H21	Z30WCV9	X30WCrV93	SKD5	BH21

续表

材料 类别	中 国	前 苏 联	美 国		法 国	原 西 德	日 本	英 国
	GB	ГОСТ	SAE	AISI	NF	DIN	JIS	BS
	中国国家标准	前苏联国家标准	美国汽车工程 学会标准	美国钢铁协会标准	法国标准	原西德工业标准	日本工业标准	英国标准
合金 工具钢	CrWMn	XBF			105WC13	105WCr6	SKS31	
	5CrNiMo	5XHM	L6	L6	55NCDV7	55NiCrMoV6	SKT4	
高速 工业 钢	W12Cr4V4Mo	P9Φ5.9H706			12-0-4	S12-1-4		
	W18Cr4V	P18	T1	T1	Z80CN18-04-01	S18-0-1	SKH2	BT1
	W9Cr4V2	P9	T7	T7	Z70WD12	S9-1-2		
不 锈 钢 与 耐 酸 钢	0Cr13	08X13		410	Z6C13	X7Cr13	SUS410S	
	1Cr13	12X13		410	Z12C13	X10Cr13	SUS410	410S21
	2Cr13	20X13	420	420	Z20C13	X20Cr13	SUS420J1	420S37
	3Cr13	30X13			Z30C13	X30Cr13	SUS420J2	420S54
	4Cr13	40X13			Z40C13	X40Cr13		
	0Cr18Ni9	08X18H10	30304	304H	Z7CN18.10	X5CrNi189	SUS304	304S15
	1Cr18Ni9	12X18H9	30302	302	Z10CN18.09	X12CrNi188	SUS302	302S25
	2Cr18Ni9	17X18H9			Z12CN18.10		SUS303	
	1Cr18Ni9Ti	12X18H10T	30321	321	Z6CNT18.12	X12CrNiTi189	SUS321	321S20
	1Cr18Ni11Nb	08X18H12B	30347	347	Z6CNNb18.10	X10CrNiNb189	SUS347	347S17
	1Cr17Ni12	14X17H2	51431	431	Z15CNDT16.12	X22CrNi172	SUS431	431S29

附录 9

金属材料相对比价表

材 料 名 称	规格尺寸 /mm 或纯度/%	价 格 (相对比价)	材 料 名 称	规格尺寸 /mm 或纯度/%	价 格 (相对比价)
生 铁	铸造 炼钢	130~187 100~110	有色金属:		
			一号铜	99.95%	5500
			一号铅	99.994%	2130
			一号锌	99.99%	1950
			一号锡		9630
			一号铝	99.5%	2700
			一号镍		26700
碳素钢	尺寸/mm Φ5~160 (镇静钢)	565~420	合金工具钢:		
优质碳素钢	Φ8~180	640~540	9CrSi	Φ8~180	1730~1470
碳素工具钢	Φ8~180	760~650	9Mn2V	Φ8~180	1090~930
低合金结构钢:			CrWMn	Φ8~180	1790~1520
09-19Mn	Φ8~180	560~485	5CrMnMo	Φ8~180	1740~1480
09Mn2	Φ8~180	570~495	5CrNiMo	Φ8~180	2070~1760
16MnCu			Cr12	Φ8~180	3120~2650
09-25MnSi			Cr12MoV	Φ8~180	3120~2650
08-45MnV			1Cr13	Φ8~180	2470~2100
09Mn2V	Φ8~180	630~545	2-4Cr13	Φ8~180	2360~2010
09SiV			0Cr18Ni9	Φ8~180	7420~6300
合金结构钢			1Cr18Ni19	Φ8~180	6660~5660
20-45MnB	Φ8~180	860~730	弹簧钢:		
20Mn2B	Φ8~180	860~730	65~85号碳钢	Φ8~180	770~650
20-40MnVB	Φ8~180	930~790	55MnSi	Φ8~180	800~680
20-40CrMnMoVB	Φ8~180	1140~980	90Si2Mn	Φ8~180	840~710
20-50CrNi	Φ8~180	1290~1100	50CrV	Φ8~180	1370~1160
12-20Cr2Ni4	Φ8~180	2490~2120	滚珠轴承钢:		
18Cr2Ni4WA	Φ8~180	2780~2360	GCr6~GCr15	Φ8~180	1330~1180
15-50Cr	Φ8~180	1010~860	高速钢:		
15-50Mn2	Φ8~180	760~650	18-4-1	Φ8~180	9290~7880
20MnV	Φ8~180	850~720	9-4-2	Φ8~180	8270~7020
25-42Mn2V	Φ8~180	1090~930	6-5-4-2	Φ8~180	7630~6480
12-42CrMo	Φ9~180	1030~870	硬质合金:		
14-35CrMnSi	Φ8~180	1040~880	YG3		40000
38CrMoAl	Φ8~180	1060~900	YG8		48000
18-40CrMnTi	Φ8~180	1060~900	YG15		55000
15-40CrMnMo	Φ8~180	1080~920	YT5		74000
			YT15		67000

注:相对比价,即以炼钢生铁为100的相对比价。

参考文献

- [1] 倪振尧,李植主编.金属材料及热处理.徐州:中国矿业大学出版社,1991 出版
- [2] 史美堂主编.金属材料及热处理.上海:上海科技出版社,1992 年版
- [3] A·GULYAEV,Physical Metallurgy,Mir Publishers,1980 年版
- [4] 章守华等.钢铁材料学.北京:冶金工业出版社,1992 年版
- [5] 赵忠主编.金属材料及热处理.北京:机械工业出版社,1986 年版
- [6] 麻启承主编.金属材料及热处理.北京:化学工业出版社,1980 年版
- [7] 王希琳主编.金属材料及热处理.北京:水力电力出版社,1992 年版
- [8] 刘世荣主编.金属学与热处理.北京:机械工业出版社,1985 年版
- [9] 王运炎主编.金属材料及热处理.北京:机械工业出版社,1984 年版
- [10] 陆友琪等.钢材实用手册.北京:中国科学技术出版社,1991 年版
- [11] 雍其龙等.微合金钢——物理和力学冶金.北京:机械工业出版社,1989 年版
- [12] 张鸿庆等.金属学与热处理.北京:机械工业出版社,1989 年版
- [13] 冶金部钢铁研究总院.合金钢手册,上册第一分册.北京:冶金工业出版社,1972 年版
- [14] 束德林主编.金属力学性能.北京:机械工业出版社,1988 年版
- [15] 中国机械工程学会热处理专业学会.热处理手册,第 2 版第 4 卷.北京:机械工业出版社,1992 年版
- [16] 张云兰,刘建华主编.非金属工程材料.北京:轻工业出版社,1987 年版
- [17] 郑明新主编.工程材料.北京:清华大学出版社,1991 年版
- [18] 梁光启,林子为编著.工程材料学.上海:上海科学技术出版社,1987 年版
- [19] 朱家才,马业英,李桦编著.非金属材料及其应用.湖北:湖北科学技术出版社,1992 年版
- [20] 陆漱逸,王于林主编.工程材料学.北京:航空工业出版社,1987 年版
- [21] 张启芳,韩克筠编.常用金属材料标准选编.南京:东南大学出版社,1991 年版
- [22] 王特典,卫家楣,张启芳编.工程材料.南京:东南大学出版社,1996 年版
- [23] 殷凤仕,姜学波等编.非金属材料学.北京:机械工业出版社,1999 年版
- [24] 陈贻瑞,王建.基础材料与新材料.天津:天津大学出版社,1994 年版
- [25] 戴金辉,葛兆明主编.无机非金属材料概论.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999 年版
- [26] 周玉著.陶瓷材料学.哈尔滨工业大学出版社,1995 年版
- [27] 王荣国,武卫莉,谷万里主编.复合材料概论.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999 年版
- [28] 周祖福.复合材料学.武汉:武汉工业大学出版社,1995 年版
- [29] 陈华辉等.现代复合材料.北京:中国物资出版社,1998 年版
- [30] 肖纪美著.材料的应用与发展.北京:宇航出版社,1992 年版

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名=工程材料：第二版

作者=

页数= 1 8 3

S S 号= 1 1 1 1 4 7 1 9

出版日期=