



# 目 录

项目一 设计概论 .....	(1)
1.1 课题一:本课程的性质和研究对象、主要内容和任务 .....	(1)
1.2 课题二:机械工程材料 .....	(1)
1.3 课题三:物体的受力分析 .....	(62)
1.4 课题四:机械设计概述 .....	(71)
项目二 机构的设计 .....	(81)
2.1 课题一:平面连杆机构 .....	(81)
2.2 课题二:凸轮机构 .....	(96)
2.3 课题三:其他常用机构 .....	(110)
项目三 零部件的设计 .....	(120)
3.1 课题一:连接 .....	(120)
3.2 课题二:轴 .....	(139)
3.3 课题三:轴承 .....	(153)
项目四 传动装置的设计 .....	(180)
4.1 课题一:带传动 .....	(180)
4.2 课题二:齿轮传动 .....	(194)
4.3 课题三:齿轮系 .....	(227)
附录 型钢 .....	(246)
参考文献 .....	(250)



# 项目一 设计概论

## 1.1 课题一：本课程的性质和研究对象、主要内容和任务

随着科学技术的进步和生产过程的机械化、自动化水平的不断提高,除机械制造部门外,在动力、采矿、冶金、石油、化工、土建、轻纺、食品工业等各部门工作的工程技术人员,也常遇到机械设备的使用、维护、管理问题和机械产品的研制与开发问题。这就要求各个专业的工程技术人员都应具备一定的机械设计基础知识,才能更好地为国民经济现代化服务。因此,机械设计基础是重要的技术基础课。

本课程的研究对象是常用机构和通用零件。主要阐述机械设计的一般原则、步骤、应满足的基本要求,零件的设计准则和工作能力,常用工程材料选用、力学模型的简化与计算、常用机构、通用零件、传动装置等的工作原理、特点和基本设计方法。

机械设计基础是机类专业必修的一门专业技术基础课,其任务是使学生获得金属材料及热处理、力学、机械原理及机械零件的基本知识和基本技能。通过学习,学会选材、学会使用手册查阅资料、选用标准;研究机械零部件在载荷等因素作用下的平衡问题及承载能力,具有设计机械传动及简单机械装置的能力,同时为后续课程的学习和解决工程实际问题打下坚实的基础。



## 1.2 课题二：机械工程材料

### 1.2.1 金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是指在力的作用下,所显示与变形与破坏有关的性能。常用的力学性能指标有强度、塑性、硬度、冲击吸收功、疲劳极限等。

#### 1.2.1.1 强度和塑性

##### A. 拉伸试验及拉伸曲线

静载荷拉伸试验是工业上最常用的力学性能试验方法之一。试验时在试样两端缓慢地施加试验力,使试样的标距部分受轴向拉力,沿轴向伸长,直至试样拉断为止。测定试样对外加试验力的抗力,可以求出材料的强度值;测定试样在断裂后塑性变形的大小,可以求出材料的塑性值。

试验前,将材料制成一定形状和尺寸的标准拉伸试样。图 1-1 所示为常用的圆形拉伸试样。若设试样从开始加载直到断裂前所受的拉力为  $F$ ,与其所对应的试样原始标距长度  $L_0$  的伸长量  $\Delta L$  绘成曲线,便得到拉伸曲线。图 1-2 为退火状态的低碳钢拉伸曲线。用试样原始截面积  $S_0$  去除拉力  $F$  得到应力,以试样原始标距  $L_0$  去除绝对伸长量  $\Delta L$  得到应变



$\epsilon$ , 即  $\sigma = F/S_0$ ,  $\epsilon = \Delta L/L_0$ , 则力—伸长 ( $F-\Delta L$ ) 曲线就成了工程上的应力—应变 ( $\sigma-\epsilon$ ) 曲线。

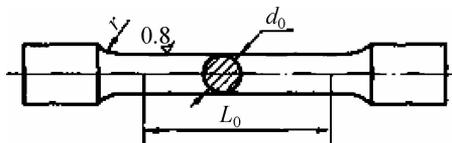


图 1-1 标准拉伸试样

从图 1-2 拉伸曲线可看出, 低碳钢在拉伸过程中明显地表现出不同的变形阶段, 所以通常将低碳钢的应力-应变 ( $\sigma-\epsilon$ ) 曲线当作典型情况来说明材料的力学性能。整个曲线可分为弹性变形、塑性变形、及断裂三个阶段。在弹性变形阶段 ( $oe$  段) 中, 若卸除试验力, 试样能完全恢复到原来的形状和尺寸; 其中在  $op$  阶段, 应力与应变呈正比关系, 即符合虎克定律。当应力超过, 塑性变形便进入屈服阶段 ( $es$  段), 应力应变曲线出现平台或锯齿, 应力不增加或只有微小增加, 试样却继续伸长。屈服之后材料进入均匀塑性变形阶段 ( $sb$  段), 均匀变形的原因是冷变形强化 (加工硬化) 所致, 变形与硬化交替进行, 变形量越大, 为使材料变形所需的应力越大。当试样变形达到最高点  $b$  时, 变形强化跟不上变形的变化, 不能再使变形转移, 致使某处截面开始减小。在断裂阶段 ( $bk$  段), 应力增加, 变形加剧, 形成缩颈。此时, 施加于试样的力减小, 而变形继续增加, 直至断裂 ( $k$  点)。

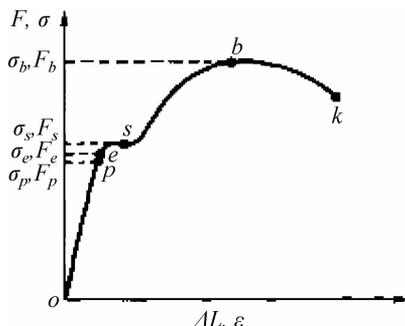


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

### B. 常用强度性能指标

强度是材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。工程上常用的强度指标有规定非比例伸长应力、屈服强度、抗拉强度等。

#### a. 规定非比例伸长应力

金属材料在载荷作用下, 试样标注部分的非比例伸长达达到规定的原始标注百分比时的应力, 以  $\sigma_p$  表示, 单位为 MPa。

$$\sigma_p = F_p / S_0$$

式中  $F_p$ ——试样非比例伸长为规定量时的拉力, N;

$S_0$ ——试样原始横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

弹性极限是理论上的概念, 一般难以用实验直接测定。在实际工程上, 常以屈服点或规定残余伸长应力代替之。

规定非比例伸长应力是弹性元件设计和选材的主要依据。

#### b. 屈服强度



金属材料在载荷作用下,产生屈服时的最低应力称为材料的屈服强度,以 $\sigma_s$ 表示,单位为MPa:

$$\sigma_s = F_s / S_0$$

式中  $F_s$ ——材料屈服时的拉伸力。

屈服点是具有屈服现象的材料特有的强度指标。除退火或热轧的低碳钢和中碳钢等少数合金有屈服点外,大多数合金都没有屈服现象,因此提出“规定残余伸长应力”作为相应的强度指标。国家标准规定:当试样卸除拉伸力后,其标距部分的残余伸长达到规定的原始标距百分比的应力,作为规定残余伸长应力 $\sigma_r$ 。表示此应力的符号应附以角标说明,例如 $\sigma_{r0.2}$ 表示规定残余伸长率为0.2%时的应力。

$$\sigma_y = F_r / S_0$$

式中  $F_r$ ——产生规定残余伸长时的拉力,N。

国标曾将产生0.2%残余伸长率的规定残余伸长应力 $\sigma_{r0.2}$ 称为屈服强度,以 $\sigma_{0.2}$ 表示。目前一些技术资料仍沿用这一术语。

屈服强度是金属工程结构设计和选材的主要依据。

#### c. 抗拉强度

金属材料在载荷作用下,断裂前所能承受的最大应力称为抗拉强度(曾称强度极限),以 $\sigma_b$ 表示,单位为MPa:

$$\sigma_b = F_b / S_0$$

抗拉强度的物理意义是表征材料在载荷作用下,对最大均匀变形的抗力,表征材料在拉伸条件下所能承受最大力的应力值,它是设计和选材的主要依据之一,是工程技术上的主要强度指标。

### C. 塑性性能指标

金属材料在载荷作用下,断裂前发生不可逆永久变形的能力就是塑性。常用的塑性指标是材料断裂时最大相对塑性变形,如拉伸时的断后伸长率和断面收缩率。

#### a. 断后伸长率

试样拉断后,标距的伸长与原始标距的百分比称为断后伸长率,以 $\delta$ 表示:

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中  $L_1$ ——试样拉断后的标距,mm;

$L_0$ ——试样原始标距,mm。

试样的长度和截面尺寸对 $\delta$ 是有影响的。按直径的尺寸分为标准试样和比例试样两种。标准试样的直径为20mm,而比例试样直径是任意的。因采用标距的不同,又有长、短试样之分。国家标准规定,长标距试样的标距以公式 $L_0 = 10d_0$ ,短试样的标距以公式 $L_0 = 5d_0$ ,式中的 $d_0$ 和 $S_0$ 分别为试样原始直径和原始截面积。短试样的伸长率用符号 $\delta_5$ 表示,长试样的伸长率用符号 $\delta_{10}$ 表示,对同一材料 $\delta_5 > \delta_{10}$ ,通常试验优先选取短的比例试样。

#### b. 断面收缩率

试样拉断后,缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率,以 $\psi$ 表示。其数值按下式计算:

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$



式中  $S_0$ ——试样原始面积,  $\text{mm}^2$ ;

$S_1$ ——试样断裂后缩颈处的最小横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

$\delta$  或  $\psi$  数值越大, 则材料的塑性越好。

除常温试验之外, 还有金属材料高温拉伸试验方法(GB/T4338—1995)和低温拉伸试验方法(GB/T13239—1991)供选用。

### 1.2.1.2 硬度

硬度能够反映出金属材料在化学成分、金相组织和热处理状态上的差异, 是检验产品质量、研制新材料和确定合理的加工工艺所不可缺少的快速检测性能之一; 同时硬度试验是金属力学性能试验中最简便、最迅速的一种方法。

硬度实际是指一个小的金属表面或小的体积内抵抗弹性变形、塑性变形或抵抗断裂的一种抗力, 因此硬度不是一个单纯的确定的物理量, 不是基本的力学性能指标, 而是一个由材料的弹性、强度、塑性、韧性等一系列不同力学性能组成的综合性能指标, 所以硬度所表示的量不仅决定于材料本身, 而且还取决于试验方法和试验条件。

硬度试验方法一般采用压入法, 常用的硬度性能指标有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。

#### A. 布氏硬度

布氏硬度的测定原理是用一定大小的试验力  $F(\text{N})$ , 把直径为  $D(\text{mm})$  的淬火钢球或硬质合金球压入被测金属的表面(图 1-3), 保持规定的时间后卸除试验力, 用读数显微镜测出压痕平均直径  $d(\text{mm})$ , 然后按公式求出布氏硬度  $HB$  值, 或者根据  $d$  值从有关的布氏硬度表中查出  $HB$  值:

$$HBS(HBW) = 0.102 \frac{F}{\pi D h} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

由于金属材料有硬有软, 被测工件有厚有薄, 有大有小, 如果只采用一种标准的试验力  $F$  和压头直径  $D$ , 就会出现对某些材料和工件不适应的现象。因此, 在生产中进行布氏硬度试验时, 要求能使用不同大小的试验力和压头直径, 对同一种材料采用不同的  $F$  和  $D$  进行试验时, 能否得到同一的布氏硬度值, 关键在于压痕几何形状的相似, 即可建立  $F$  和  $D$  的某种选配关系, 以保证布氏硬度的不变性。

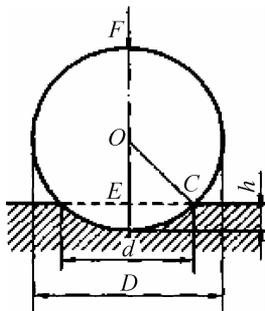


图 1-3 布氏硬度试验原理

国家标准(GB231—1984)规定布氏硬度试验时, 常用的  $0.102F/D^2$  的比例为 30、10、2.5 三种, 根据金属材料种类、试样硬度范围和厚度的不同, 按照表 1-1 的规范选择试验压头(钢球)直径  $D$ 、试验力  $F$  及保持时间。



表 1-1 布氏硬度试验规范

材料种类	布氏硬度使用范围( <i>HBS</i> )	球直径 <i>D</i> /mm	$0.102F/D^2$	试验力 <i>F</i> /N	试验力保持时间/s	备注
钢铸铁	$\geq 140$	10	30	29420	10	压痕中心距试样边缘距离不应小于压痕平均直径的 2.5 倍。 两相邻压痕中心距离不应小于压痕平均直径的 4 倍。 试样厚度至少应为压痕深度的 10 倍。试验后,试样支撑面应无可见变形痕迹
		5		7355		
		2.5		1839		
	$< 140$	10	10	9807	10~15	
		5		2452		
		2.5		613		
非铁金属材料	$\geq 130$	10	30	29420	30	
		5		7355		
		2.5		1839		
	35~130	10	10	9807	30	
		5		2452		
		2.5		613		
	$< 35$	10	2.5	2452	60	
		5		613		
		2.5		153		

淬火钢球作压头测得的硬度值以符号 *HBS* 表示,用硬质合金球作压头测得的硬度值以符号 *HBW* 表示。符号 *HBS* 和 *HBW* 之前的数字为硬度值,符号后面依次用相应数值注明压头直径(mm)、试验力(0.102FN)、试验力保持时间(s)(10~15s 不标注)。例如:500HBW5/750,表示用直径 5mm 硬质合金球在 7355N 试验力作用下保持 10~15s 测得的布氏硬度值为 500;120HBS10/1000/30,表示用直径 10mm 的钢球压头在 9807N 试验力作用下保持 30s 测得的布氏硬度值为 120。

目前,布氏硬度主要用于铸铁、非铁金属以及经退火、正火和调质处理的钢材的硬度测试。

### B. 洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前应用最广的性能试验方法,它是采用直接测量压痕深度来确定硬度值的。

洛氏硬度试验原理如图 1-4 所示。它是用顶角为  $120^\circ$  金刚石圆锥体或直径为 1.588mm (1/16in) 的淬火钢球作压头,先施加的初始试验力  $F_1$  (98N),再加上主试验力  $F_2$ ,其总试验力  $F=F_1+F_2$  (588N、980N、1471N)。图中 0-0 为压头没有与试样接触时的位置;1-1 为压头受到初试验力  $F_1$  后压入试样的位置;2-2 为压头受到总试验力  $F$  后压入试样的位置经规定的保持时间,卸除主试验力  $F_2$ ,仍保留初试验力  $F_1$ ,试样弹性变形的恢复使压头上升到 3-3 的位置。此时压头受主试验力作用压入的深度为  $h$ ,即 1-1 位置至 3-3 的位置。金属越硬, $h$  值越小。为适应人们习惯上数值越大硬度越高的观念,故人为的规定一常数  $K$  减去压痕深度  $h$  的值作为洛氏硬度指标,并规定每 0.002 mm 为一个洛氏硬度单位,用符号 *HR* 表示,则洛氏硬度值为:

$$HR = \frac{K - h}{0.002}$$



由此可见,洛氏硬度值是一无量纲的材料性能指标,使用金刚石压头时,常数  $K$  为 0.2,使用钢球压头时,常数  $K$  为 0.26。

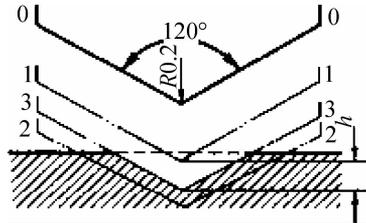


图 1-4 洛氏硬度试验原理

为了能用一种硬度计测定从软到硬的材料硬度,采用了不同的压头和总负荷组成几种不同的洛氏硬度标度,每一个标度用一个字母在洛氏硬度符号  $HR$  后加以注明,我国常用的是 HRA、HRB、HRC 三种,试验条件(GB230-1991)及应用范围见表 1-2。洛氏硬度值标注方法为硬度符号前面注明硬度数值,例如 52HRC、70HRA 等。

洛氏硬度 HRC 可以用于硬度很高的材料,操作简便迅速,而且压痕很小,几乎不损伤工作表面,故在钢件热处理质量检查中应用最多。但由于压痕小,硬度值代表性就差些。如果材料有偏析或组织不均匀的情况,则所测硬度值的重复性差,故需在试样不同部位测定三点,取其算术平均值。

上述硬度试验方法中,布氏硬度试验力与压头直径受约束关系的约束,并有钢球压头的变形问题;洛氏硬度各标度之间没有直接的简单的对应关系。维氏硬度(用符号  $HV$  表示)克服了上述二种硬度试验的缺点,其优点是试验力可以任意选择,特别适用于表面强化处理(如化学热处理)的零件和很薄的试样,但维氏硬度试验的生产率不如洛氏硬度试验高,不宜用于成批生产的常规检验。维氏硬度的测定原理与布氏硬度相类似,其试验方法和技术条件可参阅有关国家标准。

表 1-2 常用的三种洛氏硬度的试验条件及应用范围

硬度符号	压头类型	总实验力 $F/kN$	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥体	0.5884	70~85HRA	硬质合金,表面淬硬层,渗碳层
HRB	Φ1.588mm 钢球	0.9807	25~100HRB	非铁合金,退火、正火钢等
HRC	120°金刚石圆锥体	1.4711	20~67HRC	淬火钢,调质钢

### 1.2.1.3 冲击吸收功

机械零部件在工作过程中不仅受到静载荷或交变载荷作用,而且受到不同程度的冲击载荷作用,如锻锤、冲床、铆钉枪等。在设计和制造受冲击载荷的零件和工具时,必须考虑所用材料的冲击吸收功或冲击韧性。

目前最常见的冲击试验方法是摆锤式一次冲击试验,其试验原理如图 1-5 所示。

将被测定的材料先加工成标准试样,然后放在试验机的机架上,试样缺口背向摆锤冲击方向(见图 1-5),将具有一定重力  $F$  的摆锤举至一定高度  $H_1$ ;使其具有势能( $FH_1$ ),然后摆锤落下冲击试样;试样断裂后摆锤上摆到  $H_2$  高度,在忽略摩擦和阻尼等条件下,摆锤冲断



试样所做的功,称为冲击吸收功,以  $A_K$  表示,单位为  $J$ ,则有  $A_K = FH_1 - FH_2 = F(H_1 - H_2)$ 。在 GB/T229—1994 中,仅规定了冲击吸收功的概念。若用试样的断口处截面积  $S_N$  去除  $A_K$  即得到冲击韧性,用  $a_K$  表示,单位为  $J/cm^2$ 。

$$a_K = A_K / S_N$$

对一般常用钢材来说,所测冲击吸收功  $A_K$  越大,材料的韧性越好。但由于测出的冲击吸收功的  $A_K$  组成比较复杂,所以有时测得的  $A_K$  值及计算出来的  $a_K$  值不能真正反映材料的韧脆性质。

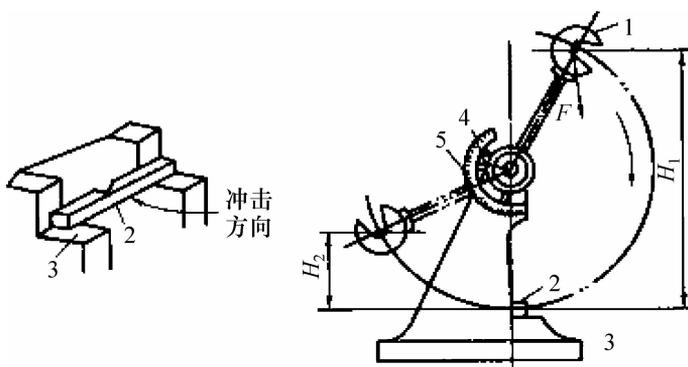


图 1-5 冲击实验原理图

1—摆锤;2—试样;3—机架;4—指针;5—刻度盘

长期生产实践证明  $A_K$ 、 $a_K$  值对材料的组织缺陷十分敏感,能灵敏地反映材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化,因而冲击试验是生产上用来检验冶炼和热加工质量的有效办法之一。由于温度对一些材料的韧脆程度影响较大,为了确定出材料由塑性状态向脆性状态转化趋势,可分别在一系列不同温度下进行冲击试验,测定出  $A_K$  值随试验温度的变化。实验表明, $A_K$  随温度的降低而减小;在某一温度范围,材料的  $A_K$  值急剧下降,表明材料由韧性状态向脆性状态转变,此时的温度称为韧脆转变温度。根据不同的钢材及使用条件,其韧脆转变温度的确定有冲击吸收功、脆性断面率、侧膨胀值等不同的评定方法。

#### 1.2.1.4 疲劳极限

许多机械零件如轴、齿轮、弹簧等许多工程结构都是在交变应力下工作的,它们工作时所承受的应力通常都低于材料的屈服强度。材料在循环应力和应变作用下,在一处或几处产生局部永久性累积损伤,经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程称为材料的疲劳破坏。

疲劳破坏与静载荷下的破坏不同,断裂前没有明显的塑性变化,发生断裂也较突然。这种断裂具有很大的危险性,常常造成严重的事故。据统计,大部分机械零件的失效是由金属疲劳造成的。因此,工程上十分重视对疲劳规律的研究。无裂纹材料的疲劳性能指标主要是疲劳极限和疲劳缺口敏感度等。

在交变载荷下,金属材料承受的交变应力( $\sigma$ )和断裂时应力循环次数( $N$ )之间的关系,通常用疲劳曲线来描述,如图 1-6 所示。金属材料承受的最大交变应力  $\sigma$  越大,则断裂时应力交变的次数  $N$  越小;反之  $\sigma$  越小,则  $N$  越大。当应力低于某值时,应力循环到无数次也不会发生疲劳断裂,此应力值称为材料的疲劳极限,以  $\sigma_D$  表示。常用钢铁材料的疲劳曲线,如



图 1-7a 所示形状有明显的水平部分,其它大多数金属材料的疲劳曲线,如图 1-7b 所示上没有水平部分,在这种情况下,规定某一循环次数  $N_0$  断裂时所对应的应力作为条件疲劳极限,以  $\sigma_R(N)$  表示。

通常材料疲劳性能的测定是在旋转弯曲疲劳实验机上进行,具体试验方法参阅 GB4337—1984 《金属旋转弯曲疲劳试验方法》。试验规范规定各种金属材料指定寿命(循环基数)  $N_0$  (如合金钢为 107,低碳钢  $5 \times 10^6$ ),应力循环次数达到  $N_0$  次仍不发生疲劳破坏,此时的最大应力可作为疲劳极限。通常在对称应力循环条件下的纯弯曲疲劳极限用  $\sigma_{-1}$  表示。

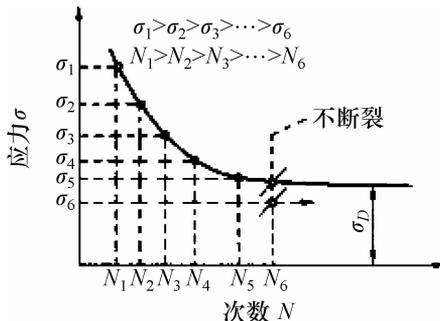


图 1-6 疲劳曲线示意图

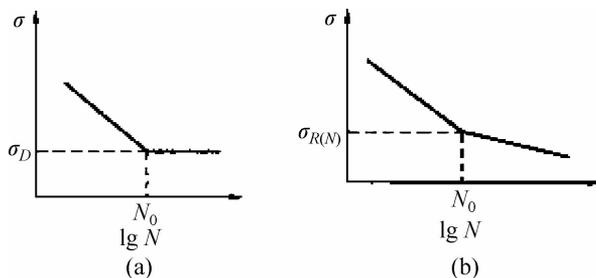


图 1-7 两种类型疲劳曲线

(a) 钢铁材料; (b) 部分非铁合金

由于疲劳断裂通常是从零件最薄弱的部位或外部缺陷所造成的应力集中处发生,因此疲劳断裂对许多因素很敏感,例如,循环应力特性、环境介质、温度、零件表面状态、内部组织缺陷等,这些因素导致疲劳裂纹的产生或裂纹迅速扩展而降低疲劳寿命。

为了提高零件的疲劳抗力,防止疲劳断裂事故的发生,在进行机械零件设计和加工时,应选择合理的结构形状,防止表面损伤,避免应力集中。由于金属表面是疲劳裂纹易于产生的地方,而实际零件大部分都承受交变弯曲或交变扭转载荷,表面处应力最大。因此,表面强化处理就成为提高疲劳极限的有效途径。

由于工程实际的要求,对疲劳的研究工作已逐渐从正常条件下的疲劳问题扩展到特殊条件下的疲劳问题,如腐蚀疲劳、接触疲劳、高温疲劳、热疲劳、微动磨损疲劳等。对这些疲劳及其测试技术还在广泛进行研究,并已逐步标准化。

### 1.2.2 金属材料的晶体结构与结晶

不同的金属材料具有不同的力学性能;即使是成分相同的材料,当经过不同的冷热加工后性能也会有很大差异。材料性能上的差异主要取决于金属内部原子排列规律和结构缺陷。

#### 1.2.2.1 金属的晶体结构

##### A. 金属是晶体

固态物质根据其原子排列特征,可分为晶体和非晶体两类。晶体的特点是:(1)组成晶



体的基本质点(原子、离子或分子)在三维空间呈规则排列,因此晶体一般有规则的外形;(2)具有一定的熔点;(3)具有各向异性。一般情况下固态金属都是晶体。

### B. 晶体结构的基本概念

实际晶体中的各类质点(主要是原子)虽然都是在不停地运动着,但是,通常在讨论晶体结构时,常把构成晶体的原子看成是一个个固定的小球,这些原子小球按一定的几何形式在空间紧密堆积,如图 1-8(a)所示。

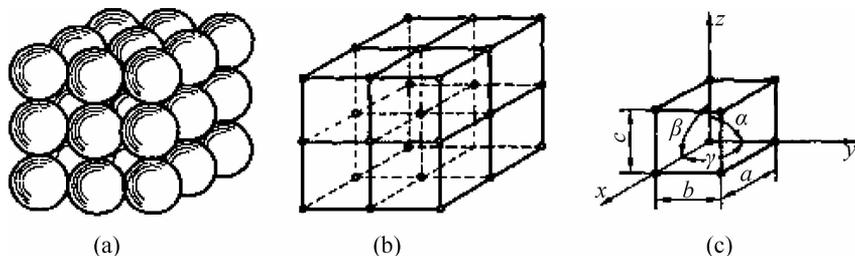


图 1-8 简单立方晶格与晶胞示意图

(a) 晶体中的原子排列; (b) 晶格; (c) 晶胞及晶格参数表示方法

工程上便于描述晶体内部原子排列的规律,人为地将原子视为一个几何质点,并用一些假想的线条将各原子连接起来,便形成一个空间格子,简称晶格,如图 1-8(b)所示。由于晶体中原子作周期性规则排列,因此可以在晶格内取一个能代表晶格特征的,由最少数目的原子排列成最小结构单元来表示晶格,称为晶胞,如图 1-8(c)所示。不难看出晶格是由晶胞不断重复堆砌而成;通过对晶胞的研究可找出该种晶体中原子在空间的排列规律。

### C. 常见金属的晶体结构

根据晶体细胞中原子小球排列的规律不同,可以将晶格基本类型划分为 14 种。在金属材料中,常见晶格类型有体心立方晶格、面心立方晶格、密排立方晶格三种。

体心立方晶格的晶胞是一个立方体,在立方体的八个角上和晶胞中心各有一个原子,如图 1-9 所示。体心立方晶胞每个角上的原子均为相邻八个晶胞所独有,所以体心立方晶胞中的原子数为  $1+8 \times 1/8=2$  个。属于这种晶格类型的金属有  $\alpha$ -Fe、Cr、W、Mo、V 等。

原子在晶格中排列的紧密程度对晶体性质有较大影响,晶胞中原子所占有的体积与晶胞体积的比值称为晶格的致密度。晶格的致密度越大,则原子排列越紧密。体心立方晶格的致密度为 0.68。这表明在体心立方晶格中有 68% 的体积被原子所占有,其余为空隙。

面心立方晶胞和密排立方晶胞示意图分别如图 1-10 和图 1-11 所示,三种典型晶体结构晶格特征见表 1-3。属于面心立方晶格类型的金属有  $\gamma$ -Fe、Cu、Ni、等;属于密排六方晶格类型的金属有 Mg、Zn、Cd、 $\alpha$ -Ti 等。

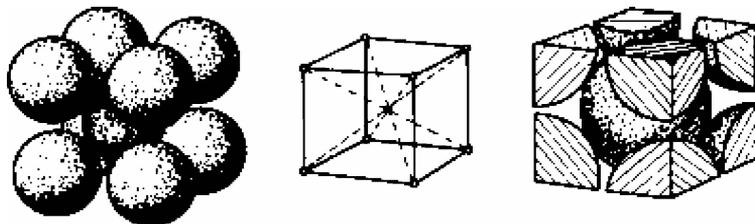


图 1-9 体心立方晶胞示意图

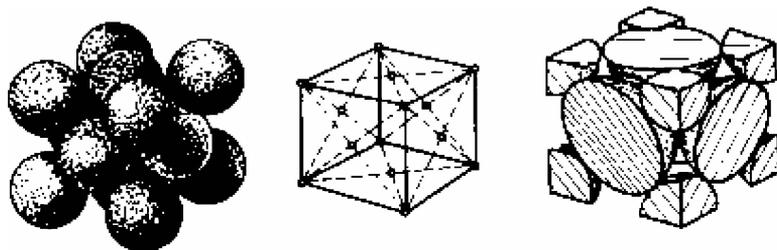


图 1-10 面心立方晶胞示意图

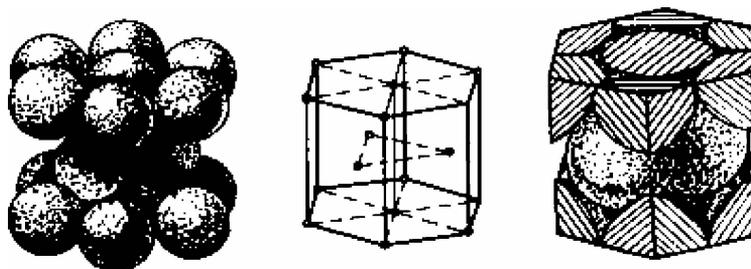


图 1-11 密排六方晶胞示意图

表 1-3 晶体类型及特性参数

结构类型	晶格常数	晶胞中原子数目	最近原子间距 $d_0$	致密度
面心立方	a	$1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$	a/2	0.74
体心立方	a	$1/8 \times 8 + 1 = 2$	a/2	0.68
密排立方	a, c	$1/6 \times 12 + 3 + 1/2 \times 2 = 6$	a	0.74

由于晶体中不同晶面和晶向上原子密度不同,原子间结合力也就不同,因此晶体在不同晶面和晶向上表现出不同的性能,这就是晶体具有各向异性的原因。但在实际金属材料中,一般却见不到它们具有这种各向异性的特征。例如在不同晶向测得的  $\alpha$ -Fe 单晶的弹性模量是不同的,在  $[111]$  方向  $E=286000\text{MPa}$ ,在  $[100]$  方向  $E=132000\text{MPa}$ ,而实际应用的  $\alpha$ -Fe(工业纯铁)取样测试,从任何位向所测得的结果均为  $E=210000\text{MPa}$  左右。这是因为金属实际晶体结构与理想晶体结构有很大的差异所致。

### 1.2.2.2 金属的实际晶体结构

#### A. 单晶体和多晶体

晶体内部的晶格位向完全一致的晶体称为单晶体。金属的单晶体只能靠特殊的方法制得。实际使用的金属材料都是由许多晶格位向不同微小晶体组成的;每个小晶体都相当于是一个单晶体,晶体内部的晶格位向是一致的;小晶体之间的位向却不相同。这种外形呈多面体颗粒状的小晶体称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。由许多晶粒组成的晶体称为多晶体如图 1-12 所示。

#### B. 晶体缺陷

金属晶体内部原子规则有序地排列是理想晶体的状态。实际上金属由于结晶或其他加工等条件的影响,内部原子排列并不是理想完整的,存在大量的晶体缺陷。这些缺陷的存在,对金属性能会产生显著的影响。

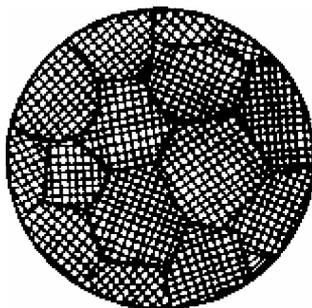


图 1-12 多晶体的晶粒与晶界示意图

根据晶体缺陷存在形式的几何特点,通常将晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三大类。

#### a. 点缺陷

点缺陷特征是在晶体空间三个方向尺寸都很小,不超过几个原子间距,最常见的点缺陷是晶格空位和间隙原子,如图 1-13 所示。由于点缺陷的存在,会使其周围的晶格发生畸变,并使材料的强度、硬度升高。

#### b. 线缺陷

线缺陷的特征是在晶体空间两个方向上尺寸很小,而第三个方向的尺寸很大。属于这一类型主要是各种类型的位错。

位错是一种很重要的晶体缺陷。其特点是围绕晶体中一条很长的线,在一定范围内原子发生有规律的错排,都离开它们原来的平衡位置。位错的主要类型有刃型位错和螺型位错。这里只介绍简单立方晶体中的刃型位错几何模型。如图 1-14 所示,在一个完整晶体的某一晶面(如图示 ABC 面)上,沿 EF 线垂直插入半个晶面。由于这多出的晶面像刀刃一样切入,使晶体中以 EF 为中心线的附近一定范围的区域内原子位置都发生错动,其特点是:ABC 晶面上半部原子受挤压,下半部受拉伸,而位错线中心的原子错动最大,晶格畸变严重,离位错线越远,晶格畸变越小,直至恢复正常。

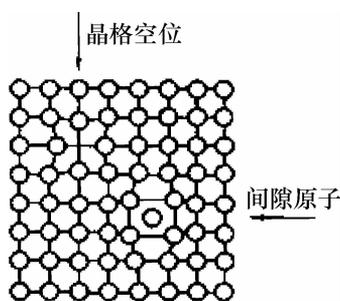


图 1-13 晶格点缺陷示意图

金属晶体中的位错线往往大量存在,相互连接呈网状分布。单位体积晶体中位错的总长度称为为位错密度。透射电子显微镜可观察位错并测定其密度。一般退火状态下,金属的位错密度约  $10^4 \sim 10^6/\text{cm}^{-2}$ ,经过冷变形加工后可增至约  $10^{12}/\text{cm}^{-2}$ 。

晶体中的位错不是固定不变的,在相应外部条件下,晶体中的原子发生热运动或晶体受外力作用而发生塑性变形时,位错在晶体中能够进行不同形式的运动,致使位错密度及组态发生变化。

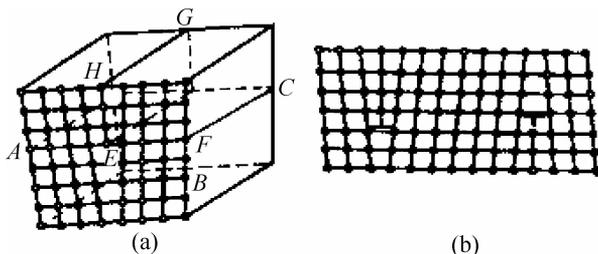


图 1-14 刃型位错几何模型

(a)立体;(b)平面

位错的存在及其密度的变化对金属的力学性能及组织转变有显著影响。图 1-15 所示为定性表达了金属强度与金属中位错密度之间的关系。如果用特殊方法制成不含位错的直径为  $1.6\mu\text{m}$  的铁晶须,其抗拉力强度竟高达  $13000\text{MPa}$ ,而退火纯铁的抗拉强度则低于  $300\text{MPa}$ ,由于晶须中不含位错,不易塑性变形,故强度很高;而一般金属中含有位错,易于塑性变形,故强度较低.如果金属中位错密度很高,由于位错之间的相互作用和制约,金属强度也可以提高(见图 1-15 中经强化后的金属)。例如经剧烈冷变形的纯铁,由于晶体内产生了大量位错,其抗拉强度也就提高很多。

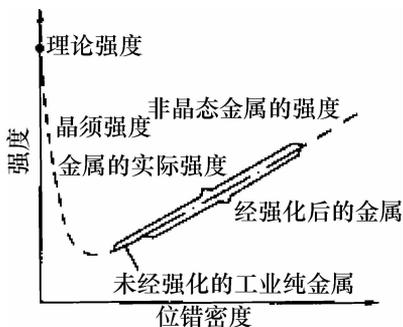


图 1-15 金属强度与位错密度之间的关系

c. 面缺陷

面缺陷特征是在一个方向上尺寸很小,而另两个方向上尺寸很大,主要指晶界和亚晶界。

晶界处原子排列与晶内是不同的,要同时受到其两侧晶粒不同位向的综合影响,所以晶界处原子排列是不规则的,是从一种取向过渡到另一种取向的过渡状态,如图 1-16 所示。大多数相邻晶粒的位向差都在  $15^\circ$  以上,称之为大角晶界。

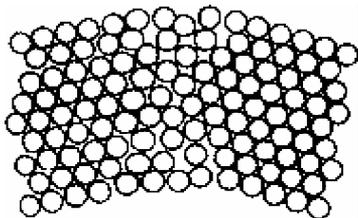


图 1-16 大角晶界的过渡结构模型

在一个晶粒内部,还可能存在许多更细小的晶块,它们之间晶格位向差很小,通常小于  $2^\circ\sim 3^\circ$ ,这些小晶块称为亚晶(有时将细小的亚晶粒称为镶嵌块)。亚晶粒之间的界面称为亚



晶界。晶粒中这种亚晶与亚晶界称为亚组织,如图 1-17 所示。亚晶界是由一些位错排列而成的小角度晶界,图 1-18 所示为由刃型位错构成的小角度晶界示意图。

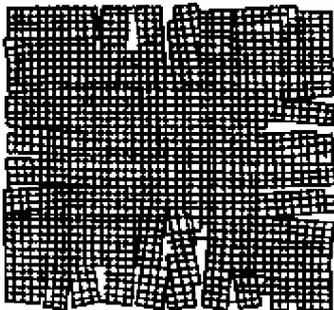


图 1-17 亚组织示意图

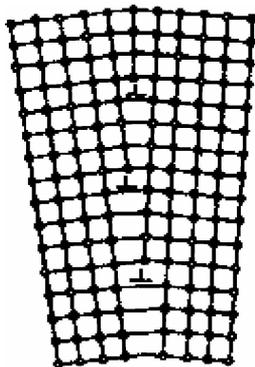


图 1-18 小角晶界结构示意图

由于晶界处原子排列不规则,偏离平衡位置,因而使晶界上原子的平均能量高于晶内原子的平均能量,这部分高出的能量称为界面能(晶界能)。界面能的存在和原子排列不规则使晶界具有一系列不同于晶内的特性。例如,晶界比晶内易受腐蚀,晶界处熔点低,晶界对塑性变形(位错运动)的阻碍作用等。在常温下,晶界处不易产生塑性变形,故晶界处硬度和强度均较晶内高。晶粒越细小,晶界也越多,则金属的强度和硬度亦越高。

### 1.2.2.3 纯金属的结晶

#### A. 结晶的基本概念

物质由液态转变为固态的过程称为凝固,如果通过凝固形成晶体结构,则又称为结晶。晶体物质都有一个平衡结晶温度(熔点),液体低于这一温度时才能结晶,固体高于这一温度时便发生熔化。在平衡结晶温度,液体与晶体同时共存,处于平衡状态。

纯金属的实际结晶过程可用冷却曲线来描述。冷却曲线是金属的温度随时间而变化的曲线,可用热分析法测绘。从图 1-19 所示冷却曲线看出,液态金属随时间冷却到某一温度时,在曲线上出现一个平台,这个平台所对应的温度就是纯金属的实际结晶温度。因为结晶时放出结晶潜热,补偿了此时向环境散发的热量,使温度保持恒定,结晶完成后,温度继续下降。

实验表明,纯金属的实际结晶温度  $T_1$  总是低于平衡温度  $T_0$ 。这种现象称为过冷现象。实际结晶温度  $T_1$  与平衡结晶温度  $T_0$ (熔点)差值  $\Delta T$  称为过冷度。液体冷却速度越大,  $\Delta T$



越大。从理论上说,当散热速度无限小时, $\Delta T$  趋于 0,即实际结晶温度与平衡结晶温度趋于一致。

根据热力学第二定律,在等温等容(体积不变)条件下,一切自发变化过程都是朝着自由能降低的方向进行。自由能是受温度、压力、容积……多因素影响的物质状态函数,由于液体和晶体的结构不同,同一物质的液体和晶体在不同温度下的自由能变化是不同的,如图 1-20 所示。在温度  $T_0$ ,液体和晶体自由能相等,二者处于平衡状态。 $T_0$  就是平衡结晶温度,即理论结晶温度。温度低于  $T_0$  时,即有一定过冷度,晶体的自由能低于液体,这时结晶可以自发进行。过冷度 $\Delta T$  越大,液体和晶体的自由能差 $\Delta E$  越大,结晶倾向越大。

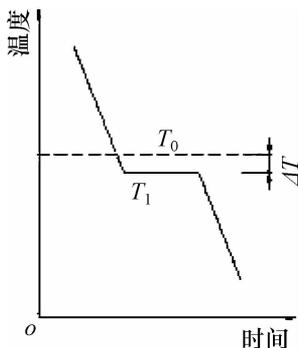


图 1-19 纯金属结晶时的冷却曲线

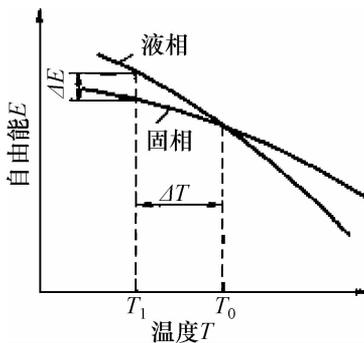


图 1-20 液体和晶体自由能 E 随温度变化曲线

### B. 结晶时晶核的形成和长大过程

实验证明,结晶是晶体在液体中从无到有(晶核形成),由小变大(晶核长大)的过程。

液体内部是由尺寸较小、极不稳定、时聚时散的在一定范围内呈规则排列的原子集团组成;温度越低,原子集团的尺寸越大,存在的时间越长。这种不稳定的原子集团,是结晶中产生晶核的基础。当液体被过冷到结晶温度以下时,某些尺寸较大的原子小集团变得稳定,能够自发地成长,即成为结晶的晶核。这种只依靠液体本身在一定过冷度条件下形成晶核称为自发形核。在实际生产中,金属液体中常存在各种固态的杂质微粒。金属结晶时,依附于这些杂质的表面形成晶核比较容易。这种依附于杂质表面而形成晶核的过程称为非自发形核。一般情况下,非自发形核是金属结晶的主要形式。

晶核形成以后,便开始长大,如图 1-21 所示。当第一批晶核形成后,形核与长大这两个过程是同时在进行着的,直至每个晶核长大到相互接触,而每个长大了的晶核也就成为一个晶粒。



晶核长大受过冷度影响,当过冷度较大时,金属晶体常以树枝状态方式长大。图 1-22 所示为树枝状态晶体的形状。相邻的树枝状骨架相遇时,树枝骨架停止扩展,每个晶轴不断变粗长出新的晶轴,直到枝晶间液体全部消失,每一枝晶成长为一个晶粒。

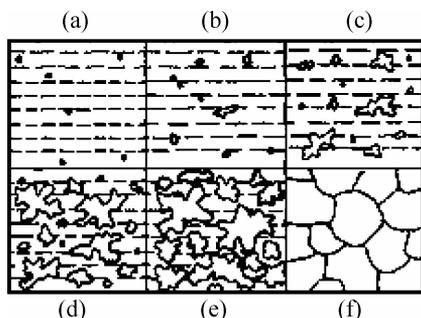


图 1-21 金属结晶过程示意图



图 1-22 树枝状晶体示意图

### C. 金属结晶后的晶粒大小及控制

金属结晶后,获得由许多晶粒组成的多晶体组织。晶粒的大小对金属的力学性能、物理性能和化学性能均有很大影响。细晶粒组织的金属强度、硬度高,而且塑性、韧性也好;而粗晶粒金属的耐蚀性好。作为软磁材料的纯铁,晶粒越粗大,则磁导率越大,磁滞损耗减少。

为了提高金属材料的力学性能,必须了解晶粒大小的影响因素及控制方法。

晶粒大小可以用单位体积内晶粒的数目来表示,通常测量常以单位截面积上晶粒数目或晶粒的平均直径来表示。

金属结晶后晶粒大小取决于形核率  $N$  [晶核形成数目/( $\text{mm}^3 \cdot \text{s}$ )]和长大率  $G$  ( $\text{mm}/\text{s}$ )。  $N$  越大,  $G$  越小,则晶粒越细。

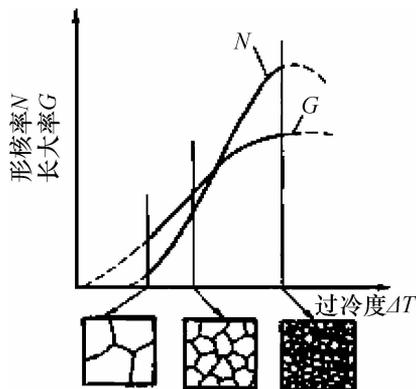
图 1-23 定性地表示了形核率  $N$  及长大率  $G$  与过冷度  $\Delta T$  之间的关系。  $N$  和  $G$  都是随  $\Delta T$  的增大而增大的。但两者的增长程度是不同的,  $N$  的增长率大于  $G$  的增长率。  $\Delta T$  增大,单位体积内晶核数目增多,故晶粒变细。

在实际生产中,为了获得细晶粒组织,浇注前在液态金属中加入少量的变质剂,促使形成大量非自发晶核,提高形核率  $N$  这种细化晶粒的方法称为变质处理。变质处理在冶金和铸造生产中应用十分广泛,如钢中加入铝、钛、钒、硼等;铸铁中加入硅钙等;铸造铝硅合金中加入钠盐等。另外,在金属结晶时,对液态金属附加机械振动、超声波振动、电磁波振动等措施,造成晶枝破碎,使晶核数量增大,也能使晶核细化。

### D. 合金的相结构

#### a. 概述

由于纯金属力学性能较差,不宜制造机械零件和工模具等。实际生产中通过配制各种

图 1-23 形核率  $N$  及长大率  $G$  与过冷度  $\Delta T$  之间的关系

不同成分的合金材料,以获得所需的力学和特殊的电、磁、化学等方面性能。合金是由两种或两种以上的金属元素,或金属和非金属元素组成的具有金属特性的物质。

组成合金的基本的物质称为组元。组元大多是元素,如铁碳合金(碳钢、铸铁)的主要组元是铁和碳,有时也可将稳定的化合物作为组元。由两个组元组成的合金称为二元合金,由三个组元组成的合金称为三元合金等。当组元不变,而组元比例发生变化,可以得到一系列不同成分的合金,称这一系列相同组元的合金为合金系。

化学成分是决定合金材料性能的基本因素之一,即使是相同化学成分的合金材料,其性能也可以有显著区别。例如,同一化学成分的某种刀具钢,其淬火态的刀具可以切削退火态的制件,其性能差别如此之大,起决定性作用的是“组织”和“相”两个因素。

“组织”是指用肉眼或借助于放大镜、显微镜等观察到的材料内部的具有一定形貌特征的物质结构。一般将用肉眼和放大镜观察到的组织称为宏观组织,在显微镜下观察到的组织称为显微组织。组织的含义包括组成物“相”的种类、形状、大小及不同“相”之间的相对数量和相对分布。

所谓“相”是金属或合金中具有相同化学成分、相同结构并以界面相互分开的各个均匀的组成部分。一般常把固态下的相统称为固相,而液体状态称为液相。金属与合金的一种相在一定条件下可以变为另一种相,称为相变,例如金属结晶,是液相变为固相的一种相变。金属在固态下由一种晶格转变为另一种晶格的“同素异构转变”是一种固态相变。

#### b. 合金的相结构

固态合金中的相,按其组元原子的存在方式可分为固溶体和金属化合物两大基本类型。

(1)固溶体。溶质原子溶于溶剂晶格中而仍保持溶剂晶格类型的合金相称为固溶体。根据溶质原子在溶剂晶格中所占位置不同,固溶体可分为置换固溶体和间隙固溶体两类。

溶质原子占据晶格结点位置而形成的固溶体称为置换固溶体,如图 1-24(a)所示。按溶质原子在置换固溶体中的溶解度不同,又可分成有限固溶体和无限固溶体。溶质原子占据溶剂晶格间隙所形成的固溶体为间隙固溶体,如图 1-24(b)所示。由于晶格中空隙位置是有限的,因此间隙固溶体是有限固溶体,并且要求溶质原子直径与溶剂原子直径比值不大于 0.59。从元素性质看,过渡族金属元素与 H、B、C 等非金属元素结合时可形成间隙固溶体。

由于溶质原子的溶入,会引起固溶体晶格发生畸变,使合金的强度、硬度提高,塑性、韧性有所下降。这种通过溶入原子,使合金的强度和硬度提高的方法叫做固溶强化。固溶强



化是提高材料力学性能的重要途径之一。

(2)金属化合物(又称中间相)。金属化合物是合金元素间发生相互作用而生成的具有金属性质的一种新相,其晶格类型和性能不同于合金中的任一组成元素,一般可用分子式来表示。

金属化合物一般具有复杂的晶体结构,熔点高,硬而脆。当合金中出现金属化合物时,通常能提高合金的强度、硬度和耐磨性,但会降低塑性和韧性。金属化合物是各种合金钢、硬质合金及许多非金属的重要组成相。

金属化合物的种类很多,常见的有正常价化合物、电子化合物和间隙化合物等三种类型。

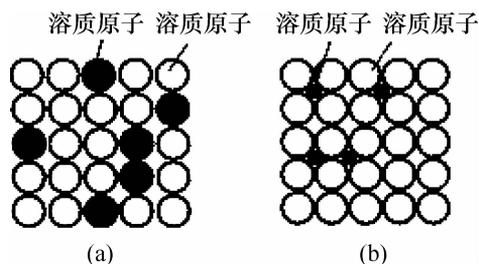


图 1-24 两种固溶体结构示意图

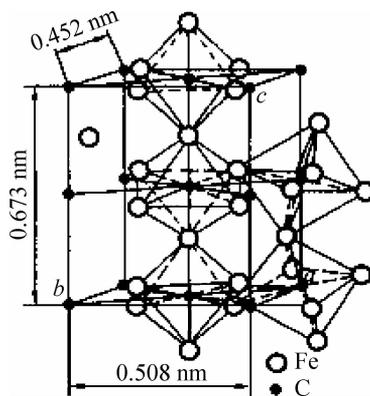


图 1-25  $\text{Fe}_3\text{C}$  的晶体结构

渗碳体( $\text{Fe}_3\text{C}$ )是铁碳合金的间隙化合物,其晶体结构如图 1-25 所示,具有复杂的斜方晶格( $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ),含碳量  $\omega_c = 6.69\%$ ,性能上硬而脆。

### c. 合金的组织

合金的组织组成可能出现以下几种状况:(1)由单相固溶体晶粒组成;(2)由单相的金属化合物晶粒组成;(3)由两种固溶体的混合物组成;(4)由固溶体和金属化合物混合组成。

合金组织的组成中,固溶体强度、硬度较低,塑性、韧性较好;金属化合物硬度高、脆性大;而由固溶体和金属化合物组合的机械混合物的性能往往介于二者之间,即强度硬度较高,塑性韧性较好。由两种以上固溶体及金属化合物组成的多相合金组织,又会因其各组成相的相对数量、尺寸、形状和分布不同,形成各种各样组织形态,从而影响合金的性能。例如,碳钢退火状态下的组织是铁素体(碳在  $\alpha\text{-Fe}$  中的间隙固溶体)与化合物  $\text{Fe}_3\text{C}$  的混合物。铁素体塑性韧性好强度低,  $\text{Fe}_3\text{C}$  硬而脆。不同含碳量的钢中,  $\text{Fe}_3\text{C}$  数量不同,其性能有很大差别。一定含碳量的高碳钢中,  $\text{Fe}_3\text{C}$  数量一定,但  $\text{Fe}_3\text{C}$  呈粒状或片状形态不同,将在很大程



度上影响钢的性能。 $\text{Fe}_3\text{C}$ 呈细粒状分布,可获得良好的综合力学性能。

因此,要了解合金的成分与性能的关系,除了要了解相的结构和性能之外,还必须掌握合金及固态转变过程中所形成的各个相的数量及其分布规律,通过合金相图,可以掌握缓慢转变过程中合金组织变化的规律。

### 1.2.3 铁碳合金相图

钢和铸铁是工业上广泛应用的金属材料,主要有铁和碳两种元素组成,统称铁碳合金。不同成分的铁碳合金在不同的温度下具有不同的组织,因而表现出不同的性能。铁碳合金相图是研究铁碳合金的成分、温度和组织三者关系的图形。

在铁碳合金中,铁和碳可以形成 $\text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{C}$ 、 $\text{FeC}$ 等一系列的金属化合物,因此整个的 $\text{Fe-C}$ 合金状态图应由 $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe-Fe}_2\text{C}$ 、 $\text{Fe-FeC}$ 等一系列相图组成。 $\text{Fe}_3\text{C}$ 中碳的质量分数为6.69%,由于碳的质量分数超过6.69%的铁碳合金脆性很大没有使用价值,所以工程中深入研究的只有 $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ 部分。

#### 1.2.3.1 铁碳合金的基本组织

纯铁具有较好的塑性,但强度低,不能用来制造工程结构与机械零件;在纯铁中加入少量的碳,会使其强度与硬度明显提高。

在固态的铁碳合金中,铁和碳有两种基本结合形式:一种是碳固溶于铁中形成间隙固溶体,另一种是铁和碳按一定比例形成金属化合物。

铁碳合金的基本组织有:铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体和莱氏体。

##### A. 铁素体

铁素体是碳固溶于 $\alpha\text{-Fe}$ 中形成的间隙固溶体,用符号F表示。它仍保持 $\alpha\text{-Fe}$ 的体心立方晶格。由于体心立方晶格体中的间隙较小,故碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的溶解度较小。在 $727^\circ\text{C}$ 时为0.0218%,在 $20^\circ\text{C}$ 时为0.0008%。铁素体的性能与纯铁相似,即塑性、韧性较好,强度、硬度较低。低碳钢中含有较多的铁素体,故具有较好的塑性。

##### B. 奥氏体

奥氏体是碳固溶于 $\gamma\text{-Fe}$ 中形成的间隙固溶体,用符号A表示。它仍保持 $\gamma\text{-Fe}$ 的面心立方晶格。由于面心立方晶格原子间的间隙比体心立方晶格大,因此碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的溶解度要大,在 $1148^\circ\text{C}$ 时 $\omega_c=2.11\%$ ,在 $727^\circ\text{C}$ 时 $\omega_c=0.77\%$ 。奥氏体一般在高温时存在,具有很好的塑性,很适合于锻造。所以绝大多数钢材锻造前都要加热到奥氏体状态。

##### C. 渗碳体

渗碳体是具有复杂晶格的间隙化合物,用符号 $\text{Fe}_3\text{C}$ 表示。其 $\omega_c=6.69\%$ ,熔点为 $1227^\circ\text{C}$ 。渗碳体具有很高的硬度,约为800HBW,而韧性很差、极脆。渗碳体是钢中的主要强化相。渗碳体在钢和铸铁中的存在形式有:球状、粒状、网状和片状,它的数量、形状、大小和分布情况对钢和铸铁的性能影响很大。

##### D. 珠光体

铁素体和渗碳体组成的机械混合物称为珠光体,用符号P表示。其 $\omega_c=0.77\%$ ,它的性能介于铁素体和渗碳体之间,缓冷时硬度约为180~200HBS。

##### E. 莱氏体



碳的质量分数为 4.3% 的铁碳合金液,冷却到 1148℃ 时,同时结晶出奥氏体和渗碳体的共晶体,该共晶体称为高温莱氏体。用符号  $L_d$  表示。在 727℃ 以下由珠光体和渗碳体所组成的莱氏体,称为低温莱氏体。用符号  $L'_d$  表示,莱氏体硬而脆,是白口铸铁的基本组织。

### 1.2.3.2 铁碳合金相图分析

#### A. 简化的铁碳合金相图

经简化后的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图如图 1-26 所示。

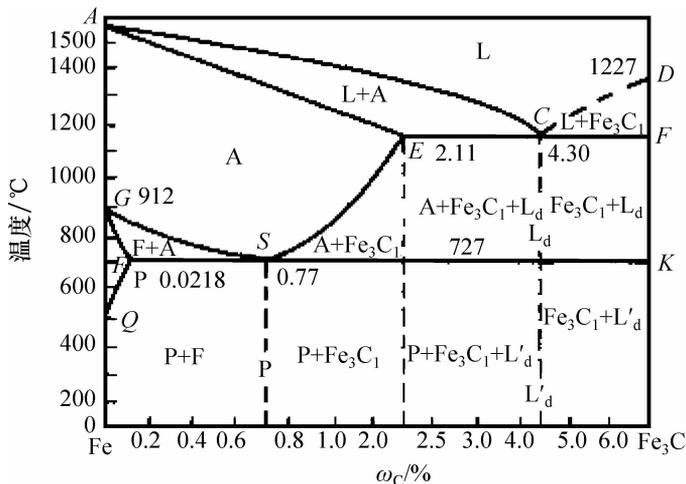


图 1-26 简化后的 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图

#### B. 铁碳合金相图分析

图中纵坐标是温度,横坐标是成分,碳的质量分数是 0~6.69%。

##### a. 图中主要的特性点及其意义

A: 纯铁的熔点(1538℃)。

D: 渗碳体的熔点(理论计算值 1227℃)。

C: 共晶点(1148℃, ω<sub>c</sub>=4.3%)。

E: 温度为 1148℃, ω<sub>c</sub>=2.11%, 表示碳在 γ-Fe 中的最大溶解度。

G: 纯铁的同素异晶转变点,在 912℃ 时,α-Fe 与 γ-Fe 相互转变。

S: 温度为 727℃, ω<sub>c</sub>=0.77%, 在该温度时,奥氏体同时析出铁素体和渗碳体的机械混合物,即珠光体。这一过程即共析反应,S 点为共析点。

##### b. 图中主要特性线及其意义:

ABCD: 液相线。该线以上全部为液态金属。用符号 L 表示,液态铁碳合金冷却到该线时开始结晶,在 AC 线以下结晶出奥氏体,在 CD 线以下结晶出渗碳体,称为一次渗碳体,用符号 Fe<sub>3</sub>C<sub>1</sub> 表示。

AHJECF: 固相线,该线以下全部为固态。

ECF: 共晶线,液态合金冷却到该线时发生共晶反应。

ES: 又称 A<sub>cm</sub> 线,是碳在 γ-Fe 中的溶解度曲线,随着温度的降低,从奥氏体中析出二次渗碳体,用符号 Fe<sub>3</sub>C<sub>1</sub> 表示。

GS: 又称 A<sub>3</sub> 线,是奥氏体和铁素体的相互转变线,随着温度的降低,从奥氏体中析出铁素体。



PSK; 又称  $A_1$  线, 是共析线, 温度为  $727^\circ\text{C}$ , 凡  $\omega_c$  在  $0.0218\% \sim 6.69\%$  的铁碳合金, 在此温度时奥氏体都会发生析转变。

根据上述各主要特点、线意义的分析, 可以填写出铁碳合金相图中各区域的组织。

### c. 铁碳合金的分类

在铁碳合金相图中, 各种不同成分的铁碳合金, 根据其组织和性能的特点以及在相图中位置, 可以分为工业纯铁、钢和白口铸铁三大类:

(1) 工业纯铁。成分在  $P$  点左面, 碳的质量分数小于  $0.0218\%$  的铁碳合金。

(2) 钢。成分在  $P$  点与  $E$  点之间, 碳的质量分数  $0.0218\% \sim 2.11\%$  的铁碳合金, 根据其室温组织的特点, 又可以  $S$  点为界分为三类。

共析钢:  $\omega_c = 0.77\%$ ;

亚共析钢:  $\omega_c = 0.0218\% \sim 0.77\%$ ;

过共析钢:  $\omega_c = 0.77\% \sim 2.11\%$ 。

(3) 白口铸铁。成分在  $E$  点和  $F$  点之间, 碳的质量分数为  $2.11\% \sim 6.69\%$  的铁碳合金。白口铸铁组织的特点, 也可以  $C$  点为界分为三类。

共晶白口铸铁:  $\omega_c = 4.30\%$ ;

亚共晶白口铸铁:  $\omega_c = 2.11\% \sim 4.30\%$ ;

过共晶白口铸铁:  $\omega_c = 4.30\% \sim 6.69\%$ 。

### 1.2.3.3 钢的结晶过程

下面讨论图 1-26 中所示的结晶过程, 以便深入了解铁碳合金组织形成规律。

#### A. 共析钢的结晶过程

图 1-27 中 I 合金在 1 点温度以上为液态合金, 当缓慢冷却到 1 点时, 开始从液体中结晶出奥氏体, 直至 2 点结晶完毕。在 2~3 点间为单相的奥氏体。继续缓慢冷却到 3 点 ( $S$  点) 时, 奥氏体发生共析反应, 转变成珠光体。以上结晶过程如图 1-28 所示。

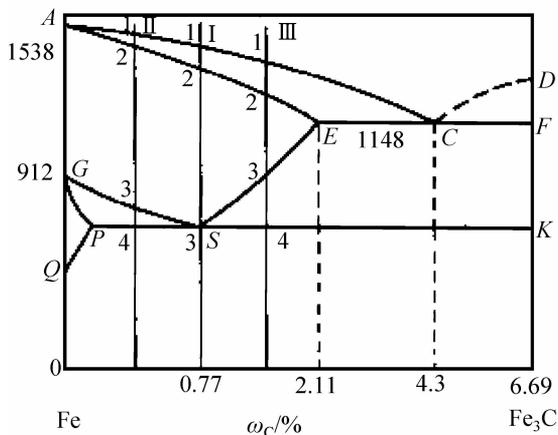


图 1-27 铁碳合金相图中的典型合金

#### B. 亚共析钢的结晶过程

图 1-27 中合金 II 为亚共析钢, 亚共析钢的结晶过程如图 1-29 所示。合金温度在 3 点以上的组织转变过程与共析钢相同。当温度降到 3 点时, 奥氏体中碳的质量分数沿  $GS$  线增



加。当温度降低到 4 点时, 剩余奥氏体中碳的质量分数达到 0.77%, 进行共析反应转变为珠光体, 4 点以下, 合金组织基本上不发生变化。所有亚共析钢的室温组织都由铁素体和珠光体组成, 其差别仅在于其中铁素体与珠光体的相对量不同, 合金中的碳的质量分数愈高, 珠光体愈多, 铁素体则愈少。

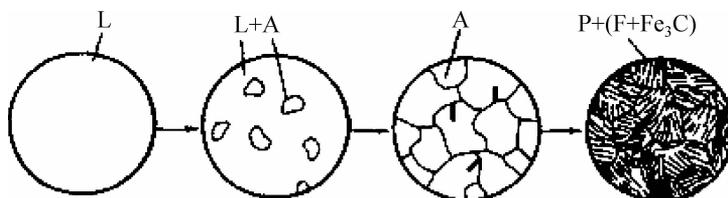


图 1-28 共析钢的结晶过程示意图

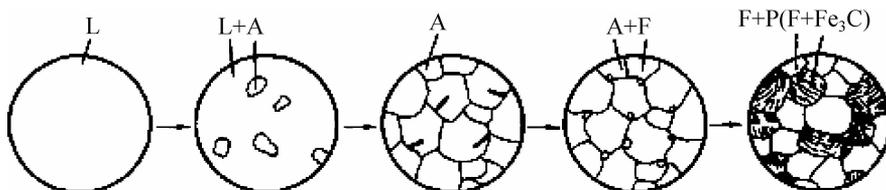


图 1-29 亚共析钢的结晶过程示意图

### C. 过共析钢的结晶过程

图 1-27 中合金 III 为过共析钢。过共析钢结晶过程如图 1-30 所示, 它与共析钢的主要区别是当温度降低到 3 点时, 将从奥氏体晶界处析出二次渗碳体。随着二次渗碳体的析出, 奥氏体中的碳的质量分数沿  $ES$  线不断下降。当温度冷至 4 点时, 奥氏体中碳的质量分数 0.77%, 故在  $727^{\circ}\text{C}$  发生共析转变, 生成珠光体, 最后得到的过共析钢室温组织为网状二次渗碳体和珠光体。

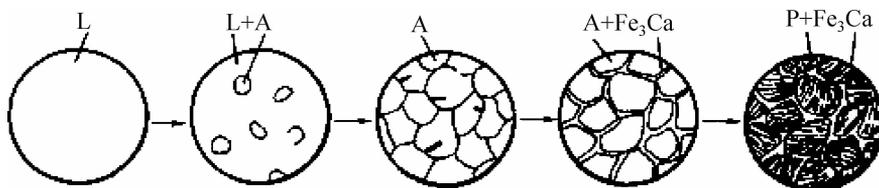


图 1-30 过共析钢的结晶过程示意图

## 1.2.3.4 铁碳合金成分、组织、性能之间的关系及应用

### A. 碳的质量分数对平衡组织的影响

由上面分析可知, 不同成分的液态铁碳合金, 在冷却过程中发生的组织变化是不同的, 因此, 最后在室温下得到组织也不同。随着碳的质量分数的增加, 合金的显微组织发生如下变化:



由此可见, 随着碳的质量分数的增加, 组织中渗碳体的相对量将不断增多, 而且渗碳体的形状和分布情况也有变化, 故不同成分的铁碳合金具有不同的性能。

### B. 碳的质量分数对力学性能的影响

碳的质量分数对力学性能的影响如图 1-31 所示。当碳的质量分数小于 0.90% 时, 随着



碳的质量分数增加,强度、硬度直线上升,而塑性、韧性不断降低。这是由于组织中的渗碳体数量增多引起的,渗碳体的数量越多,分布越均匀,钢的强度就越高。当碳的质量分数大于0.9%以后,渗碳体以网状分布于晶界处或以粗大片状存在于基本中,钢的塑性、韧性进一步降低,强度也明显下降。工业上用钢碳的质量分数一般不超过1.3%~1.4%。

碳的质量分数大于2.11%的白口铸铁,由于组织中存在较多渗碳体,在性能上显得特别硬而脆,难以切削加工,因此在一般机械制造工业中应用不广。

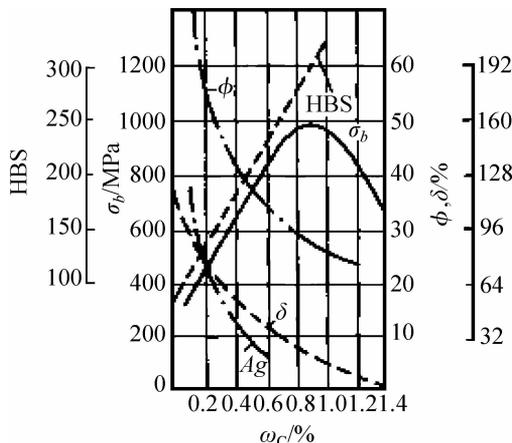


图 1-31 碳的质量分数对缓冷钢力学性能的影响

### C. 铁碳合金相图的应用

铁碳合金相图对工业生产具有指导意义,它不仅为合理选材料提供了理论基础,而且是制订铸造、锻压、焊接和热处理等工艺规范的重要依据。

#### a. 在选材方面的应用

铁碳合金相图揭示了合金的组织随成分变化的规律,根据组织可以判断其大致性能,便于合理选择材料。

建筑结构和各种型钢需要塑性、韧性好的材料,应选用低碳钢( $\omega_c \leq 0.25\%$ );各种机器零件需要强度、塑性及韧性都较好的材料,应选用中碳钢( $0.25\% < \omega_c < 0.60\%$ );各种工具需要硬度高耐磨性好的材料,应采用高碳钢( $\omega_c > 0.60\%$ )。

#### b. 在制定工艺规范方面的应用

在铸造工艺方面的应用。根据相图可以确定合适的浇注温度,由相图可知:共晶成分的合金,其温度凝固温度间隙最小(为零),故流动性好,分散缩孔较少,有可能得到致密的铸件;共晶成分合金的熔点最低,就可以用比较简易的熔炼设备。

在锻造工艺方面的应用。奥氏体的强度很低,塑性较好,便于塑性变形。因此,钢材的锻造或轧制应选择加热到单相奥氏体区(塑性较好)的温度范围内进行,始锻(轧)温度一般控制在固相线以下 $100 \sim 200^\circ\text{C}$ 范围内,终锻(轧)温度对于亚共析钢应控制在稍高于GS线以上,对于过共析钢应控制在稍高于PSK线以上。

#### c. 在焊接工艺方面的应用

焊接时,由焊缝到母材各区域加热温度不同,随后的冷却也就可能出现不同的组织与性能,这就需要在焊接后采用热处理方法加以改善。

#### d. 在热处理工艺方面的应用



各种热处理工艺与 Fe-FeC<sub>3</sub> 相图更有密切关系,退火、正火、淬火的温度选择都需要参照铁碳合金相图。

### 1.2.4 钢的热处理

钢的热处理是将钢在固态下通过加热、保温和以不同的方式冷却,以改变钢的内部组织结构,从而获得所需性能的工艺方法。

在生产中,制造机器零件不仅需要经过各种冷、热加工工序,而且在各工序之间往往还要穿插多次热处理,例如,铸造或锻造→正火或退火→切削加工→淬火、回火→精加工等。热处理不仅可以改善材料的加工工艺性能,更重要的是可以显著提高材料的力学性能,从而延长零件的寿命和节约金属材料。

#### 1.2.4.1 钢的热处理基本原理

##### A. 加热与保温

对钢加热的目的一般是使钢奥氏体化。由 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图可知,共析钢在 A<sub>1</sub> 线温度以下时为珠光体。要使珠光体变为奥氏体,必须把钢加热到 A<sub>1</sub> 以上的某一温度。而且要保温一段时间,才能使内外温度一致,成分均匀,以便在冷却后得到均匀的组织与稳定的性能。

珠光体全部转变成奥氏体初期的晶粒细小,但加热温度高或保温时间长,奥氏体晶粒都会长大,这就就会影响材料的力学性能。所以热处理时加热温度不可太高,保温时间不能过长,才能获得细小晶粒的奥氏体,冷却后就得到细晶粒组织。

##### B. 奥氏体等温冷却转变曲线

完全转变成奥氏体的共析钢只有在缓慢冷却到 A<sub>1</sub> 线以下某一温度才变成珠光体。若冷却速度加快,则奥氏体开始转变的温度也随之降低。由于过冷度的不同,转变以后的产物及其性能也不同。

用通过实验建立的等温转变曲线可清楚地反映奥氏体等温转变规律。例如,将共析钢加热到奥氏体状态,然后分别测得在 A<sub>1</sub> 线以下各个温度时的奥氏体转变开始时间和转变終了时间,最后在温度—时间坐标上把所有转变开始点和转变終了点分别连接起来,便形成奥氏体等温转变曲线,如图 1-32 所示。因曲线形状象字母“C”,故奥氏体等温转变曲线又称 C 曲线。

从 C 曲线的上半部可以看出,当过冷度很小时,即 A<sub>1</sub> 线下至 650°C,过冷的奥氏体生成渗碳体层片较粗的珠光体(P),其硬度为 7~25HRC。当过冷度稍大时,在 650~600°C 范围内,则生成渗碳体层片较细的珠光体,称索氏体(S),其硬度为 25~35HRC。当过冷度再增大时,在 600~500°C 范围内,则生成渗碳体层片极细的珠光体,称屈氏体(T),其硬度为 35~45HRC。

C 曲线的下半部,由于温度很低,碳原子扩散困难,过冷奥氏体开始转变前保持的时间又重新增长。在 500~230°C 范围内,等温转变的产物虽然仍是铁素体和渗碳体的机械混合物,但其组织和形状皆明显地不同于珠光体,称为贝氏体(B),硬度为 40~55HRC。

当奥氏体以更大的冷却速度过冷到很低的温度,即在 230°C 即 M<sub>s</sub> 线以下时,碳原子无法扩散,不能形成渗碳体,但 γ-Fe 仍转变成 α-Fe,碳原子被迫全部存在 α-Fe 中,形成一种碳在 α-Fe 中的过饱和固溶体,称为马氏体(M)。马氏体的硬度很高,可达到 65HRC,但是很

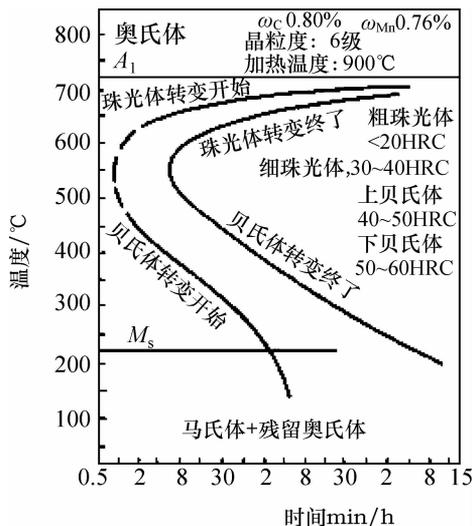


图 1-32 共析钢过冷奥氏体等温冷却转变曲线

脆。在这一转变过程中,因马氏体的比热容比奥氏体大,故会发生体积膨胀,这就对尚未转变的奥氏体造成很大的压力,阻碍它们向马氏体转变,所以就有一部分残余奥氏体存在。残余奥氏体越多,钢的硬度就越低。随着温度的降低,转变成马氏体的量就增多,直至 $-50^{\circ}\text{C}$ 时,奥氏体才能全部转变成马氏体。

与共析钢比较,亚共析钢和过共析钢的C曲线上部分别有一条先析出铁素体和一条二次渗碳体的析出线。

C曲线对研究热处理理论和编制热处理工艺具有重要的指导意义。每种成分的钢都有自己的C曲线,可以在有关手册上查到。

### C. 奥氏体连续冷却转变

在实际生产中,奥氏体的转变一般是在连续冷却过程中进行的,与等温转变有一定的区别。图 1-33 所示为共析钢过冷奥氏体连续冷却转变图。图中  $P_s$  线为珠光体转变开始线,  $P_f$  线为珠光体转变终了线,  $K$  线为珠光体转变中止线。 $v_c$  为马氏体转变时的临界淬火冷却速度,又称上临界冷却速度,是钢在淬火时为抑制非马氏体转变所需的最小冷却速度; $v_c'$  为上临界冷却速度,是保证过冷奥氏体全部转变为珠光体的最大冷却速度。冷却速度介于  $v_c'$  与  $v_c$  之间,过冷奥氏体一部分转变为珠光体,当冷却曲线与  $K$  线相交时,转变中止,剩余奥氏体在冷至  $M_s$  线以下,发生马氏体转变。

#### 1.2.4.2 钢的热处理工艺

热处理的工艺过程包括加热、保温和冷却三个阶段。通常可以用温度—时间坐标系的图形来表示,称为热处理工艺曲线。

##### A. 退火

将钢件加热到  $A_3$  (对亚共析钢)或  $A_1$  (对过共析钢)线以上某一温度范围,保温一段时间后,在炉中或埋入导热性较差的介质中,使其缓慢冷却的热处理方法称为退火。

退火的目的是:降低硬度以利于切削加工;细化晶粒,改善组织,提高力学性能;消除零件中的内应力(加热到  $A_1$  线以下即可)。

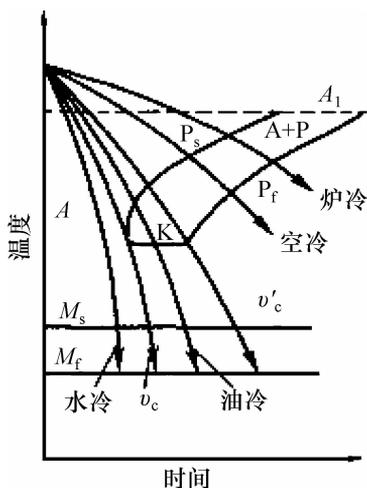


图 1-33 共析钢过冷奥氏体连续冷却转变曲线

### B. 正火

正火的作用与退火相似。正火是将钢加热到  $A_3$  或  $A_{cm}$  线以上某一温度范围,保温一段时间后,从炉中取出在空气中冷却的热处理方法。由于正火的冷却速度比退火快,所以得到的珠光体组织比退火后更细,强度和硬度都有所提高。另外,正火是炉外冷却,不占用设备,生产效率高,所以正火工艺应用广泛。

### C. 淬火

将钢加热到  $A_3$  或  $A_1$  线以上某一温度范围,保温一段时间,在水中或油中急剧冷却的热处理方法叫做淬火。淬火可使钢获得马氏体组织。马氏体是钢的基体组织中强度与硬度最高的组织。淬火的目的是,对于工具或耐磨零件来说,是提高硬度和耐磨性;对于一般结构零件来说,能使强度和韧性得到良好的配合,一适应不同工作条件的需要。对于含碳量很低的钢进行一般的淬火处理是没有意义的。

### D. 回火

把淬火后的工件重新加热到  $A_1$  线以下,保温一段时间,再以适当的冷却速度冷却到室温的热处理方法称为回火。回火的目的是为了消除因淬火冷却速度过快而产生的内应力,防止工件变形和开裂,并减小脆性。此外,回火可使淬火组织趋于稳定,使工件获得适当的硬度、稳定的尺寸和较好的综合力学性能等,故回火总是伴随在淬火后进行。

根据加热温度的不同,回火可分为低温回火,中温回火和高温回火。淬火工件的硬度随回火温度的升高而降低。

低温回火(加热温度为  $150\sim 250^\circ\text{C}$ )可减小工件的内应力、降低脆性,保持高的硬度。用于要求硬度高、耐磨性好的零件,如刀具、模具等。

中温回火(加热温度为  $350\sim 500^\circ\text{C}$ )可显著减小工件的淬火应力,提高弹性,常用于各种弹簧。

高温回火(加热温度为  $500\sim 650^\circ\text{C}$ )可消除淬火应力,使零件获得较高的强度和韧性。通常把淬火加高温回火的操作称为调质处理。调质处理广泛用于要求具有较好综合力学性能的重要零件,如齿轮、连杆、螺栓和轴等。

### E. 钢的表面热处理



零件在机器中的作用不同,对它们的要求也各不相同。在动载荷和摩擦条件下工作的齿轮、曲轴等,要求表面具有高硬度和耐磨性,同时要求其心部有足够的强度和韧性。如果仅从材料方面考虑是无法满足要求的。采用高碳钢,硬度虽高,但心部韧性不足;若采用低碳钢,心部韧性虽好,但表面硬度很低,易磨损。为了兼顾零件表面和心部的要求,工业上广泛采用表面热处理的方法。所谓表面热处理,就是通过改变零件表面层组织或同时改变表面层化学成分的一种热处理工艺,常用的表面热处理方法有两种,即表面淬火和表面化学热处理。

#### a. 表面淬火

表面淬火是将工件的表面层淬硬到一定深度,而心部仍保持未淬火状态的一种局部淬火方法。它主要是改变零件的表面层组织。常用的表面淬火方法有:

(1)火焰表面淬火。火焰表面淬火是利用氧—乙炔或氧—煤气混合气体燃烧的火焰对零件进行快速加热,使工件表面很快达到淬火温度后,立即喷水或喷乳化液进行冷却的方法。火焰淬火的设备简单,淬硬速度快,变形小。但容易过热,淬火效果不够稳定,因而使用上有一定的局限性。

(2)感应加热表面淬火。其加热原理是在一个导体线圈中通过一定频率的交流电,线圈内外即产生一个频率相同的交变磁场。若把工件放入线圈(感应圈)内,工件上就会产生与线圈电流频率相同、方向相反的感应电流,此电流在工件内自成回路,称为涡流。涡流能使电能变成热能,使工件加热,涡流主要集中在零件的表面,频率越高,涡流集中的表面层就越薄,这种现象称为集肤效应。

根据电流频率的不同,可分为高频(100~1000kHz)表面淬火、中频(1~10kHz)表面淬火和工频(普通工业电 50Hz)表面淬火。高频淬火可得到 0.5~2mm 深的淬硬层,中频淬火可得到 3~5mm 深的淬硬层,工频淬火可达到大于 10~15mm 深的淬硬层。

感应加热表面淬火速度快,生产效率高,产品质量好,易于实现机械化和自动化,所以在工业上获得日益广泛的应用,对大批量流水线生产更为有利。但因设备较贵,维修、调整困难,形状复杂零件的感应器不易制造,故不宜用于单件生产。

#### b. 钢的化学热处理

化学热处理是将钢件放在某种化学介质中,通过加热、保温、使介质中的某些元素渗入工件表面,以改变表面层的化学成分和组织,从而改变工件表面层性能的热处理方法。常见的化学热处理有渗碳、渗氮、渗铝和渗铬等,其中,以渗碳和渗氮应用最多。

渗氮是使碳钢零件表面增碳的过程。在渗碳后,零件紧接着淬火处理,可使表面硬度、耐磨性提高,而心部仍保持良好的塑性和韧性。

渗氮是使氮渗入钢件表面的过程,又称氮化。氮化层具有高度硬度、高耐磨性和良好的抗蚀性,经过渗氮处理的零件可用到 600℃ 高温而表面硬度不会显著降低。氮化用钢应是含有铬、钼、铝等元素的合金钢,因为这些合金元素的氮化物分布在氮化层中,能使零件表面获得极高的硬度(可达 70HRC 以上)。渗氮处理时的温度不高(500~650℃),渗氮后又不需淬火,因而零件变形小,能保持较高的精度。

### 1.2.5 工程金属材料

工程金属材料包括黑色金属和有色金属。其中黑色金属实用较多为钢,而有色金属使



用较多则为铝、铜、钛及其合金。

### 1.2.5.1 合金钢

#### A. 钢的分类和牌号

##### a. 钢的分类

工业用钢的种类繁多,根据不同需要,可采用不同的分类方法,在有些情况下可将几种不同方法混合使用。

传统的分类方法:

(1)按钢的用途。可分为建筑及工程用钢、机械制造用结构钢、工具钢、特殊性能钢、专业用钢(如桥梁钢、锅炉用钢)等,每一大类又可分为许多小类。

(2)按钢的冶金质量(有害杂质硫、磷含量)可划分为普通质量钢、优质钢、高级优质钢。

(3)按冶炼方法。可分为平炉钢、转炉钢、电炉钢;根据炼钢时所用脱氧方法,可分为沸腾钢、镇静钢和半镇静钢。

(4)按钢中含碳量。可分为低碳钢( $\omega_C \leq 0.25\%$ )、中碳钢( $\omega_C = 0.25\% \sim 0.60\%$ )、高碳钢( $\omega_C > 0.60\%$ )。

(5)合金钢按钢中合金元素总含量。可分为低合金钢( $\omega_{Me} \leq 5\%$ )、中合金钢( $\omega_{Me} = 5\% \sim 10\%$ )、高合金钢( $\omega_{Me} > 10\%$ )。

(6)根据钢中合金元素的种类。可分为锰钢、铬钢、硼钢、硅锰钢、铬镍钢等。

(7)按合金在空气中冷却后所得到的组织。可分为珠光体钢、贝氏体钢、马氏体钢、奥氏体钢、莱氏体钢等。

(8)工业用钢材按最终加工方法。分为热轧材或冷轧材、拉拔材、锻材、挤压材、铸件等。

新的钢分类方法:国家标准 GB/T13304—1991《钢分类》是参照国际标准制定的。钢的分类分为“按化学成分分类”、“按主要质量等级和主要性能及使用特性分类”两部分。

按化学成分分类。根据各种合金元素规定含量界限值,将钢分为非合金钢、低合金钢、合金钢三大类,见表 1-4。

表 1-4 非合金钢、低合金钢和合金钢中合金元素规定质量分数的界限值

合金元素	合金元素规定质量分数界限值/%			合金元素	合金元素规定质量分数界限值/%		
	非合金钢	低合金	合金钢		非合金钢	低合金	合金钢
Al	<0.10	—	$\geq 0.10$	Se	<0.10	—	$\geq 0.10$
B	<0.0005	—	$\geq 0.0005$	Si	<0.50	0.50~0.90	$\geq 0.90$
Bi	<0.10	—	$\geq 0.10$	Te	<0.10	—	$\geq 0.10$
Cr	<0.30	0.30~0.50	$\geq 0.50$	Ti	<0.05	0.05~0.13	$\geq 0.13$
Co	<0.10	—	$\geq 0.10$	W	<0.10	—	$\geq 0.10$
Cu	<0.10	0.10~0.50	$\geq 0.50$	V	<0.04	0.04~0.12	$\geq 0.12$
Mn	<1.00	1.00~1.40	$\geq 1.40$	Zr	<0.05	0.05~0.12	$\geq 0.12$
Mo	<0.05	0.50~0.10	$\geq 0.10$	混合稀土	<0.02	0.02~0.05	$\geq 0.05$



Ni	<0.30	0.30~0.5	≥0.50	其他元素(S, P,C,N 除外)	<0.05	—	≥0.05
Nb	<0.02	0.02~0.06	≥0.06				
Pb	<0.40	—	≥0.40				

此外,根据表 1-4 的分类,采用“非合钢”一词代替传统的“碳素钢”。但在 1992 年施行新的钢分类以前所制订的有关技术标准中均采用“碳素钢”。这种标准中,有的仍属现行标准,所以“碳素钢”名称也将会沿用一段时间。

按主要质量等级、主要性能及使用特性分类:

(1) 非合金钢的主要分类。非合金钢按主要质量等级分类划分为普通质量非合金钢、优质非合金钢、特殊质量非合金钢;

1) 普通质量非合金钢。对生产过程中控制质量无特殊规定的,一般用途的非合金钢。并应同时满足下列条件:化学成分符合表 2-1 中对非合金钢的规定;不规定钢材热处理条件;如产品技术条件有规定,其特性值(最高值和最低值)应符合表 1-5;未规定其他质量要求。

表 1-5 普通质量非合金钢特性值

最高值		最低值		最高值		最低值	
C 的质量分数	0.10%	$\sigma_b = 690\text{MPa}$		N 的质量分数		弯心直径	
S 的质量分数	0.045%	$\sigma_s$ 或 $\sigma_{0.2} = 360\text{MPa}$		0.007%		$\geq 0.5 \times \text{试样厚度}$	
P 的质量分数	0.045%	$\delta = 33\%$		硬度 60HRB		$A_{KV}(20^\circ\text{C}) \leq 27\text{J}$	

普通质量非合金钢主要包括:一般用途非合金结构钢;非合金钢筋钢;铁道轻轨和垫板用碳钢;一般用途低碳钢丝;花纹钢板。

2) 优质非合金钢 在生产过程中需要按规定控制质量,如控制晶粒度,降低硫、磷含量,改善表面质量或增加工艺控制等,以达到比普通质量非合金钢较高的质量要求。

优质非合金钢主要包括:机械结构用优质非合金钢;工程结构用非合金钢(如 GB700—88 中的 C、D 级碳钢);冲压用低碳薄钢板;冷镦用钢板;锅炉和压力容器用钢;造船用钢;铁道重轨碳钢等。

3) 特殊质量非合金钢 在生产过程中需要严格控制质量和性能的非合金钢,例如要求控制淬透性和纯洁度,同时还根据不同情况规定一些特殊要求。例如冲击性能、有效淬硬深度或表面硬度、表面缺陷、钢中非金属夹杂物含量、磷、硫的质量分数(成品  $\omega_P(\omega_s) \leq 0.025\%$ )、残余元素 Cu、Co、V 的最高含量等方面的要求。

特殊质量非合金钢主要包括:保证淬透性非合金钢;保证厚度方向性能非合金钢;铁道用非合金钢;航空、兵器等专业用非合金结构钢;核能用非合金钢;碳素弹簧钢;碳素工具钢等。

(2) 低合金钢的主要分类。低合金钢按主要质量等级,可分为普通质量低合金钢、优质低合金钢、特殊质量低合金钢。按主要性能及使用特性分类,有可焊接的低合金高强度结构钢、低合金耐候钢、低合金钢筋钢、铁道用低合金钢、矿用低合金钢、其他低合金钢。

1) 普通质量低合金钢。对生产过程中控制质量无特殊规定的、一般用途的低合金钢、合金含量较低,不规定钢材热处理条件(钢厂根据工艺需要进行的退火、正火、消除应力及软化处理除外),对产品特性值规定类似表 2-2 的条件。



普通质量低合金钢主要包括:一般用途低合金钢(如 Q295、Q345);一般低合金钢筋钢;低合金轻轨;矿用低合金结构钢。

2) 优质低合金钢。与优质非合金钢类似,在生产过程中需要规定控制质量。这类钢主要包括:可焊接的低合金高强钢(如 Q390、Q420);锅炉和压力容器用低合金钢;造船用低合金钢;低合金高耐候性钢等

3) 特殊质量低合金钢。在生产工程中需要严格控制质量和性能的低合金钢,特别是要求控制硫、磷等含量和提高纯洁度,并至少应满足下列之一的特殊质量要求:规定限制非金属夹杂物含量和(或)材质内部均匀性,如钢板抗层状撕裂性能;规定严格限制磷和(或)硫的最高含量,规定熔炼分析值  $\omega_P(\omega_S) \leq 0.020\%$ ,成品分析值  $\omega_P(\omega_S)_S \leq 0.025\%$ ;规定限制残余元素 Cu、Co、V 的最高含量;规定钢材的低温( $-40^\circ\text{C}$  以下)冲击性能;e) 对可焊接的低合金最高强度钢,规定  $\sigma_s$  最低值  $\geq 420\text{MPa}$ 。

特殊质量低合金钢主要包括:核能用低合金钢;保证厚度方向性能低合金钢;铁路用低合金车轮钢等。

(3) 合金钢的主要分类。按主要质量等级和按主要使用特性划分子各钢类系列。

1) 优质合金钢。主要包括:一般工程结构用合金钢;合金钢筋钢;地质、石油钻探用合金钢等。

2) 特殊质量合金钢。主要包括:压力容器用合金钢;热处理合金钢筋钢;合金结构钢;合金弹簧钢;轴承钢;合金工具钢;不锈钢和耐热钢;特殊物理性能钢等。

b. 工业用钢牌号表示方法

按 GB/T221—2000 的规定,我国钢铁产品采用汉语拼音字母、化学元素符号与阿拉伯数字相结合的原则表示钢的牌号。即:

(1) 钢铁产品牌号中化学元素采用国际常用的化学元素符号表示,混合稀土元素用“RE”表示。

(2) 钢铁产品的名称、用途、特性和工艺方法等,一般采用汉语拼音的缩写字母表示,质量等级采用 A、B、C、D、E 字母表示。

非合金结构钢和低合金高强度结构钢的牌号表示:

(1) 碳素结构钢和低合金高强度结构钢。钢号冠以“Q”,后面的数字表示屈服点值(MPa)。必要时钢号后面可标出质量等级和脱氧方法符号。其中,质量等级用 A、B、C、D、E 表示硫磷含量不同;脱氧方法符号:F(沸腾钢)、b(半镇静钢)、Z(镇静钢)、TZ(特殊镇静钢)。例如 Q235AF,代表屈服点  $\sigma_s = 235\text{MPa}$ 、质量为 A 级的沸腾碳素结构钢。

(2) 优质碳素结构钢。钢号开头的两位数字表示钢的平均含碳量,以平均含碳量  $\times 100$  表示,Mn 含量较高的优质碳素结构钢数字后面应标出“Mn”。例如,45Mn 表示钢中平均含碳量为 0.45% 且 Mn 含量较高的优质碳素结构钢。

(3) 易切削结构钢。钢号冠以“Y”,以区别优质碳素结构钢;例如 Y30 表示平均含碳量 0.3% 的易切削结构钢。

(4) 碳素工具钢。钢号冠以“T”,后面的数字表示平均含碳量  $\times 10$ ;例如 T8,表示平均  $\omega_c = 0.80\%$  的碳素工具钢。Mn 含量较高者,在钢号的数字后标出“Mn”,高级优质碳素工具钢钢号后加注“A”。

合金钢的牌号:合金钢的编号是按照合金钢中的含量及所含合金元素的种类(元素符



号)和含量来编制的。一般牌号的首部是表示碳的平均质量分数的数字;对于结构钢,以平均含碳量 $\times 10$ 表示,对于工具钢以平均含碳量 $\times 100$ 表示。当钢中某合金元素的平均质量分数 $\omega_{Me} < 1.5$ 时,牌号中只标出元素符号,不标明含量;当 $\omega_{Me} = 1.5 \sim 2.5$ 、 $2.5 \sim 3.5 \dots$ 时,在该元素后面相应地用整数 2、3、 $\dots$ 注出其近似含量:

(1)合金结构钢。例如 60Si2Mn,表示平均 $\omega_C = 0.6\%$ 、 $1.5\% < \omega_{Si} < 2.5\%$ 、 $\omega_{Mn} < 1.5\%$ 的合金结构钢;09Mn2表示平均 $\omega_C = 0.09\%$ 、 $1.5\% < \omega_{Mn} < 2.5\%$ 的合金结构钢。钢中钒、钛、铝、硼、稀土等均属为微量合金元素,虽然含量很低,但仍应在钢号中标出,例如 40MnVB、25MnTiBRE 等。

(2)合金工具钢。当平均 $\omega_C < 1.0\%$ 时,用一位数字表示碳的平均质量分数,如前所述;当 $\omega_C \geq 1\%$ 时,为了避免与结构钢相混淆,牌号前不标数字。例如 9Mn2V 表示平均 $\omega_C = 0.9\%$ 、 $\omega_{Mn} = 2\%$ ,含少量 V 的合金工具钢,CrWMn 牌号前面没有数字,表示钢中平均 $\omega_C > 1.0\%$ 、 $\omega_W < 1.5\%$ 、 $\omega_{Mn} < 1.5\%$ 的合金工具钢。高速工具钢牌号中不标出含碳量,如 W18Cr4V。

(3)特殊性能钢。牌号表示方法与合金工具钢基本相同,只是当 $\omega_C \leq 0.08\%$ 及 $\omega_C \leq 0.03\%$ 时,在牌号前面分别冠以“0”及“00”,例如 0Cr19Ni9、00Cr30Mo2 等。

铸钢的牌号:

(1)工程用铸造碳钢。牌号前面是 ZG(“铸钢”二字汉语拼音字首),后面第一组数字表示屈服点,第二组数字表示抗拉强度,若牌号末尾标字母 H(焊)表示该钢是焊接结构用碳素铸钢。例如,ZG230—450 表示屈服强度为 260MPa、抗拉强度为 450MPa 的工程用铸钢。

(2)GB/T5613—1995《铸钢牌号表示方法》规定以化学成分表示的铸钢牌号中“ZG”后面一组数字表示铸钢的名义万分碳含量,其后排列各主要合金元素符合及名义百分含量。例如 ZG15Cr1Mo1V,表示平均 $\omega_C = 0.15\%$ 、 $\omega_{Cr} = 0.9\% \sim 1.40\%$ 、 $\omega_{Mo} = 0.9\% \sim 1.4\%$ 、 $\omega_V = 0.9\%$ 的铸钢。

#### B. 杂质元素和合金元素在钢中的作用

实际使用的非合金钢并不是单纯的铁碳合金,由于冶炼时所用原料以及冶炼工艺方法等影响,钢中总不免有少量其他元素存在,如硅、锰、硫、磷、等,这些并非有意加入或保留的元素一般作为杂质看待。它们的存在对钢的性能有较大影响。

为使金属具有某些特性,在基体金属中有意加入或保留的金属或非金属元素称为合金元素,钢中常有的有铬、硅、镍、钼、钨、钛、铝、铜、硼、氮、稀土等。硫、磷在特定条件下也可认为是合金元素,如易切削钢中的硫。

合金元素在钢中的作用,主要表现为合金元素与铁、碳之间的相互作用以及对铁碳相图和热处理相变过程的影响。

##### a. 主要常存元素在非合金钢中的作用

###### (1)锰的作用。

锰在碳钢中质量分数一般为 $\omega_{Mn} = 0.25\% \sim 0.8\%$ 。锰能溶于铁素体,使铁素体强化,也能溶于渗碳体,提高其硬度。锰还能增加并细化珠光体,从而提高钢的强度和硬度。锰可与硫形成 MnS,以消除硫的有害作用,因此锰在钢中是有益的元素。

###### (2)硅的作用。