

课题一

金属材料与非金属材料



学习目标

- 掌握金属材料的力学性能指标；
- 明确各力学性能指标的含义和各力学性能指标之间的关系；
- 了解金属材料的物理性能和化学性能；
- 了解常见非金属材料的性能。



相关知识

材料的选择与使用的主要依据就是材料的使用性能与工艺性能。所谓使用性能,是指材料在使用过程中表现出来的性能,包括力学性能、物理性能和化学性能。

材料的力学性能是指材料在外力作用下表现出来的抵抗能力。常用的力学性能有强度、塑性、硬度、韧度和抗疲劳性等。材料的力学性能主要取决于材料的化学成分、组织结构、冶金质量、表面和内部的缺陷等内在因素,一些外在因素如载荷性质、应力状态、温度、环境介质等也会对材料的力学性能产生较大的影响。不同的载荷,将有不同的力学性能判据。力学性能不仅是零件设计和选择材料的重要依据,而且也是验收、鉴定材料性能的重要依据。

材料受到自然界中光、重力、温度、电场和磁场等作用所表现出来的性能称为物理性能,它包括材料的光性能、密度、熔点、电性能和磁性能等。

材料的化学性能是指材料抵抗各种化学作用的能力。

材料的工艺性能是指材料在各种加工过程中所表现出来的性能,包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和可加工性能等。

学习情境一 金属材料的力学性能

一、强度和塑性

金属材料的强度和塑性是在静载荷作用下测定的。静载荷是指大小不变或变化缓慢的载荷。

1. 强度

材料在静载荷作用下抵抗塑性变形和破坏的能力称为强度。因材料的受载方式和变形

形式不同,可将强度分为抗拉强度、抗压强度和抗剪强度等。不同材料的抵抗静载荷作用和变形方式是不同的,因此,可以有不同的强度指标,并且不同材料的强度差别也很大。

1) 材料的静载荷拉伸试验

材料在静载荷作用下的形状和尺寸变化称为变形。材料受静载荷作用一般会经历弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。在静载荷的作用下,材料内部产生应力。

试验时,采用万能材料试验机,给拉伸试样缓慢施以拉力,测出拉力与变形的关系。

为了使金属材料的力学性能指标在测试时能排除因试样形状、尺寸不同而造成的影响,并便于分析比较,试验时先将被测材料制成标准试样。按国家标准,试样的截面可以为圆形、矩形、多边形、环形等,其中圆形拉伸试样如图 1-1 所示。当 $L_0 = 10d_0$ 时,称为长试样;当 $L_0 = 5d_0$ 时,称为短试样。将试样装夹在拉伸试验机上,慢慢增加拉伸力,试样标距的长度将逐渐增大,直到被拉断。

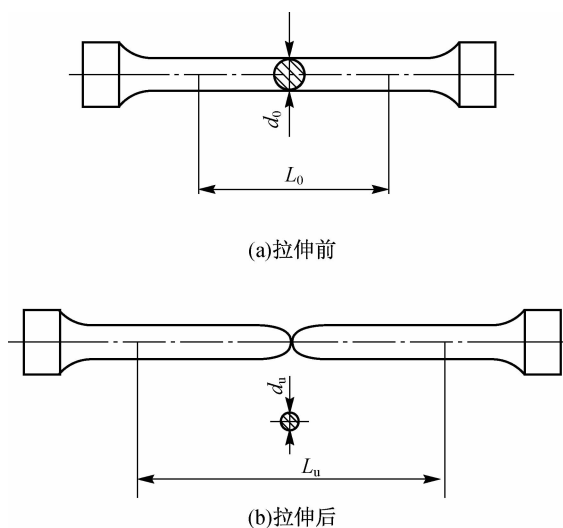


图 1-1 圆形拉伸试样

如图 1-2 所示为低碳钢试样的力-伸长曲线,曲线分为四个阶段。

(1)弹性变形阶段。 Oab 为弹性变形阶段, Oa 为直线。当静载荷不超过 F_p (a 点静载荷)时,拉伸曲线为一条直线,即静载荷与伸长量成正比,此时试样只产生弹性变形。外力去掉后,试样恢复原状。

当静载荷超过 F_p 而不大于 F_e (b 点静载荷)时,拉伸曲线稍偏离直线,试样发生微量塑性变形 ($0.001\% \sim 0.005\%$),其仍属于弹性变形阶段。

(2)屈服变形阶段。 bcd 为屈服变形阶段,屈服静载荷为 F_s (c 点静载荷)。

(3)均匀变形阶段。 dB 为均匀塑性变形阶段, F_m (B 点静载荷)为材料所能承受的最大静载荷。

(4)缩颈阶段。 Bk 为局部集中塑性变形,即缩颈阶段。试样在某个部位发生局部收缩,称为缩颈现象,最后在缩颈处断裂。

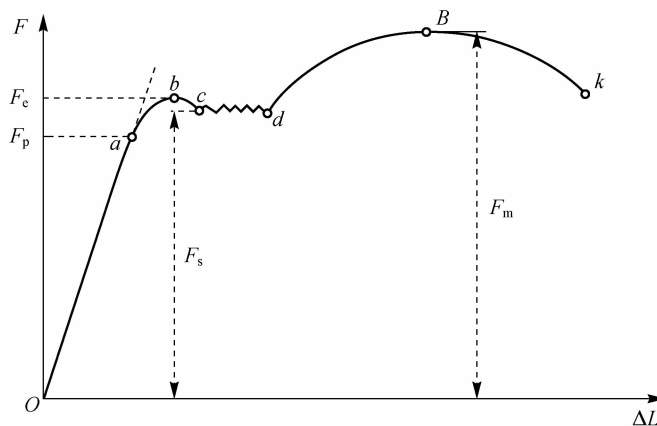


图 1-2 低碳钢试样的力-伸长曲线

2) 屈服强度

当金属材料呈现屈服现象时,在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点,有上屈服强度和下屈服强度之分。

(1)上屈服强度。试样发生屈服而力首次下降前的最高应力,称为上屈服强度,用符号 R_{eH} 表示,单位为 N/mm^2 或 MPa 。

(2)下屈服强度。在屈服期间,不计初始瞬时效应时的最低应力,称为下屈服强度,用符号 R_{eL} 表示,单位为 N/mm^2 或 MPa 。

3) 规定强度

(1)规定非比例延伸强度。非比例延伸率等于规定的引伸计标距百分率时的应力,称为规定非比例延伸强度,用符号 R_p 表示,单位为 N/mm^2 或 MPa 。使用时符号应附以下脚注说明所规定的百分率。如 $R_{p0.2}$ 表示规定非比例延伸率为 0.2% 时的应力。

(2)规定总延伸强度。总延伸率等于规定的引伸计标距百分率时的应力,称为规定总延伸强度,用符号 R_t 表示,单位为 N/mm^2 或 MPa 。使用时符号应附以下脚注说明所规定的百分率。如 $R_{t0.5}$ 表示规定总延伸率为 0.5% 时的应力。

(3)规定残余延伸强度。卸除应力后残余延伸率等于规定的引伸计标距百分率时的应力,称为规定残余延伸强度。用符号 R_r 表示,单位为 N/mm^2 或 MPa 。使用时符号应附以下脚注说明所规定的百分率。如 $R_{r0.2}$ 表示规定残余延伸率为 0.2% 时的应力。

4) 抗拉强度

材料在常温和静载荷作用下发生断裂前的最大应力称为抗拉强度,用符号 R_m 表示,单位为 N/mm^2 或 MPa 。

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (1-1)$$

R_m 表示材料抵抗断裂的能力。 R_m 越大,材料抵抗断裂的能力越强。

2. 塑性

塑性是指材料在断裂前产生塑性变形而不被破坏的能力。材料塑性的好坏可通过拉伸试验来测定。材料的塑性通常采用断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 两个指标来评定。

1) 断后伸长率

断后标距的残余伸长($L_u - L_0$)与原始标距(L_0)的百分比,称为断后伸长率,用符号 A 表示。

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中, L_u 为试样的断后标距,mm; L_0 为试样的原始标距,mm。

长试样与短试样的断后伸长率分别以 $A_{11.3}$ 和 A 表示,同种材料的 $A > A_{11.3}$ 。

2) 断面收缩率

试样拉断后断口处(缩颈处)横截面积的最大缩减量($S_0 - S_u$)与原始横截面积(S_0)的百分比,称为断面收缩率,用符号 Z 表示。

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中, S_u 为试样断裂处的最小横截面积,mm²; S_0 为试样的原始横截面积,mm²。

Z 值不受试样尺寸的影响,能可靠地反映材料的塑性。 A 和 Z 的值越大,则表示材料的塑性越好。塑性好的材料,如铝、铜、低碳钢等,容易进行压力加工;而塑性差的材料,如铸铁等,只能用铸造方法成形。大多数零件除要求具有较高的强度外,还必须有一定的塑性,这样才能提高安全系数。

二、硬度

硬度是衡量材料软硬程度的指标,其物理含义与试验方法有关。压入法的硬度值表示材料抵抗比它更硬的物体压入其表面产生局部变形的能力;刻划法的硬度值表示材料抵抗表面局部破裂的能力;而回跳法的硬度值用来表示材料弹性变形功的大小。因此,硬度值实际上是一种工程量或技术量,而不是物理量。一般认为,硬度是指材料表面抵抗局部塑性变形和破坏的能力。

压入法硬度试验包括布氏硬度试验、洛氏硬度试验和维氏硬度试验三种。

1. 布氏硬度及布氏硬度试验

布氏硬度的测定在布氏硬度试验机上进行,其试验原理如图 1-3 所示。

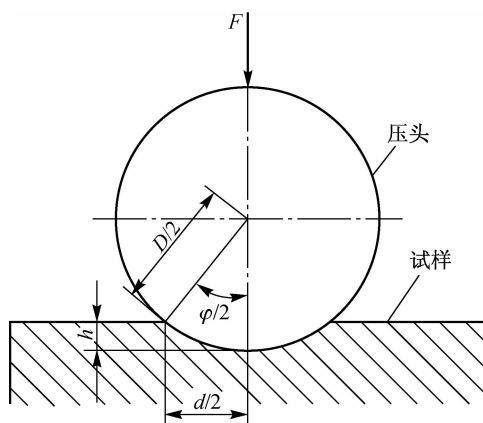


图 1-3 布氏硬度的试验原理

用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球为压头,在试验载荷 F 的作用下压入被测金属的表面,保持规定时间后卸除试验力,金属表面留下压痕,求出压痕表面积,则球面压痕单位面积上所承受的平均压力即为布氏硬度值,用符号 HBS(淬火钢球压头)或 HBW(硬质合金球压头)表示。

$$\text{HBS(HBW)}=0.102 \frac{2F}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2})} \tag{1-4}$$

式中, F 为试验载荷, N; D 为淬火钢球或硬质合金球的直径, mm; d 为压痕平均直径, mm。
在 F 和 D 一定时, 硬度值的高低取决于 h 的大小, 两者成反比。 h 值越大, 说明金属形变抗力越低, 故硬度值越小; 反之, 则硬度值越大。

在进行布氏硬度试验时, 首先应选择压头, 当材料的布氏硬度值在 450 以下(如灰铸铁, 非铁金属及经退火、正火和调质处理的钢材等)时, 应选用淬火钢球做压头; 当材料的布氏硬度值在 450~650 之间时, 则应选用硬质合金球做压头。 同时应根据被测材料的种类和试样厚度, 按照布氏硬度试验规范正确地选择压头直径 D 、试验载荷 F 和保持时间 t , 见表 1-1。

表 1-1 布氏硬度试验规范

材 料	硬度范围	压头直径 D /mm	F/D^2	保持时间 t /s
钢、铸铁	<140	10、5、2.5	10	10~15
	≥140	10、5、2.5	30	10
非铁金属	<35	10、5、2.5	2.5	60
	35~130	10、5、2.5	10	30
	≥130	10、5、2.5	30	30

布氏硬度值采用“硬度值+硬度符号(HBS 或 HBW)+球体直径/载荷大小/载荷保持时间”的形式来标记。如 280 HBS10/3 000/30, 表示压头直径为 10 mm 的球体在 3 000 kgf 试验力作用下保持 30 s 测得的布氏硬度值为 280。

布氏硬度试验压痕面积较大, 损伤零件表面, 试验过程比较烦琐, 但试验结果较为准确。因此, 布氏硬度试验只适于测试原材料, 半成品, 铸铁, 有色金属及退火、正火、调质钢件, 不适于检测成品件、太薄太小件和过硬件。

2. 洛氏硬度及洛氏硬度试验

洛氏硬度也是一种压痕测定硬度的方法, 相对布氏硬度有一定的改进。洛氏硬度的压头分硬质和软质两种。硬质的压头由顶角为 120°的金刚石圆锥体制成, 适于测定淬火钢材等较硬的金属材料; 软质的压头为直径 $D=1.587\ 5\ \text{mm}$ 或 $D=3.175\ \text{mm}$ 的钢球, 适于退火钢、有色金属等较软材料硬度值的测定。

洛氏硬度在洛氏硬度机上测定, 其试验原理如图 1-4 所示。

试验时, 首先加一初始载荷 F_0 , 在材料表面得到初始压痕深度 h_0 , 随后再加上主载荷 F_1 , 压头压入深度的增量为 h_1 。在这样的主载荷作用下, 金属表面产生的总变形包括弹性变形部分和塑性变形部分。保持一段时间后, 卸去主载荷, 总变形中的弹性变形部分得到恢复, 压头将回升一段距离, 金属表面总变形中残留下来的塑性变形部分即为压痕深度 h 。根据 h 的大小计算洛氏硬度值, 定义每 0.002 mm 相当于一个硬度单位。为适应习惯上数值越大硬

度越高的概念,采用常数 K 减去 $\frac{h}{0.002}$ 来表示洛氏硬度值的大小,用符号 HR 表示,即

$$HR = K - \frac{h}{0.002} \quad (1-5)$$

式中, K 为常数。金刚石压头的 K 为 100, 淬火钢球压头的 K 为 130。

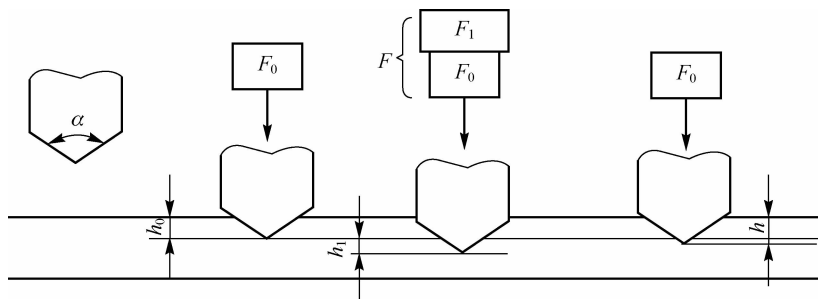


图 1-4 洛氏硬度试验原理

为了测定不同硬度的材料,需用不同的压头和试验力组成不同的硬度标尺,并用字母在 HR 后面加以注明。常用的洛氏硬度标尺有 A、B、C 三种,即 HRA、HRB 和 HRC。洛氏硬度标注时,硬度值写在硬度符号前面,如 50 HRC。

洛氏硬度试验操作简便,可直接从表盘上读出硬度值。其压痕小,可直接测量成品和较薄零件的硬度,但测得的数据不太准确和稳定,需在不同部位测定三点取其算术平均值。

3. 维氏硬度及维氏硬度试验

维氏硬度的测定原理和布氏硬度相同,不同的是维氏硬度采用锥面夹角为 136° 的四方角锥体,由金刚石制成。采用四方角锥体,当载荷改变时压入角不变,载荷可以任意选择,这是维氏硬度试验最主要的特点。维氏硬度的试验原理如图 1-5 所示。

已知载荷 F , 测定出压痕两对角线长度后取平均值 d , 用式(1-6)可计算维氏硬度,其符号用 HV 表示,即

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0.189 \frac{F}{d^2} \quad (1-6)$$

维氏硬度值采用“硬度值 + HV + 试验所用的载荷/载荷持续时间”的形式标记,如 640 HV49/20。

测定维氏硬度的压力一般可选 49 N、98 N、196 N、294 N、490 N、980 N、1 176 N 等,小于 98 N 的压力可以测定显微组织硬度。

硬度实际上是强度的局部反映(抵抗局部塑性变形的能力),强度高,其硬度必然高。而硬度试验相对于拉伸试验来说,更为简便迅速,经济实用,且可直接用于零件的测试而无须专制试样,故在生产科研中取得了广泛的应用。同时,对于磨损失效而言,钢的耐磨性随其硬度提高而增加,因此常把硬度作为技术要求写在零件图上。

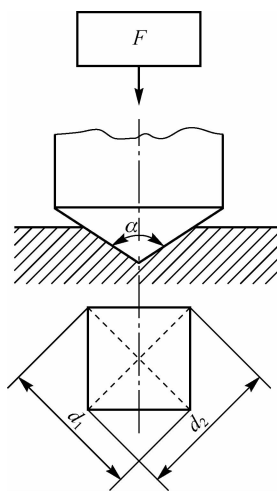


图 1-5 维氏硬度的试验原理

三、韧度与疲劳

强度、塑性、硬度等都是静载荷作用下的力学性能。在实际工作中,许多零件常受到冲击载荷或交变载荷的作用,如锤杆、冲头、齿轮、弹簧、连杆和主轴等。实践表明,冲击载荷比静载荷的破坏能力大得多,因此,对承受冲击力作用的零件,不仅要求其有高的强度和一定的硬度,还必须具有足够的抗冲击能力。韧度和疲劳就是在动载荷作用下测定的力学性能。

1. 韧度

金属材料抵抗冲击载荷破坏的能力称为冲击韧度,简称为韧度,用冲击吸收功 A_k 表示。

冲击吸收功的测定在摆锤式冲击试验机上进行。试验时,将带有缺口(V形缺口或U形缺口)的标准试样安放在试验机的机架上,使试样的缺口位于两支座中间,并背向摆锤的冲击方向,如图1-6所示。用摆锤一次冲断试样所消耗的能量即冲击吸收功 A_k 的大小来表示金属材料韧度的优劣, A_k 越大,表明材料韧度越好。

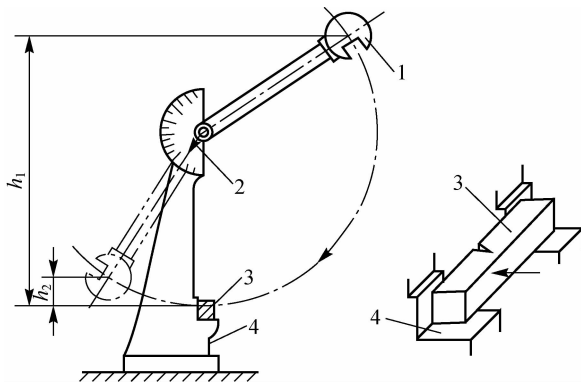


图 1-6 冲击试验原理图

1—摆锤；2—指针；3—试样；4—支座

在实际使用中,零件经过一次冲击即发生断裂的情况极少,许多零件在工作时往往承受小能量的多次冲击后才断裂。实践表明,抵抗这种小能量多次冲击破坏的能力主要取决于材料的强度,因此,可通过改变热处理方法(降低回火温度)来提高强度,从而达到提高零件使用寿命的目的。韧度实际上是材料强度和塑性的综合反映。

韧度与脆性是对立的,且能互相转化。因为冲击吸收功与试验时的温度有关,随试验温度的下降而降低,如图1-7所示。有些材料在低于某一温度时,冲击吸收功显著下降呈脆性,导致发生断裂。这一转变温度称为韧脆转变温度。韧脆转变温度低,表示材料低温冲击韧度好,否则不宜在高寒地区使用,以免在冬季低寒气温条件下金属构件发生断裂。

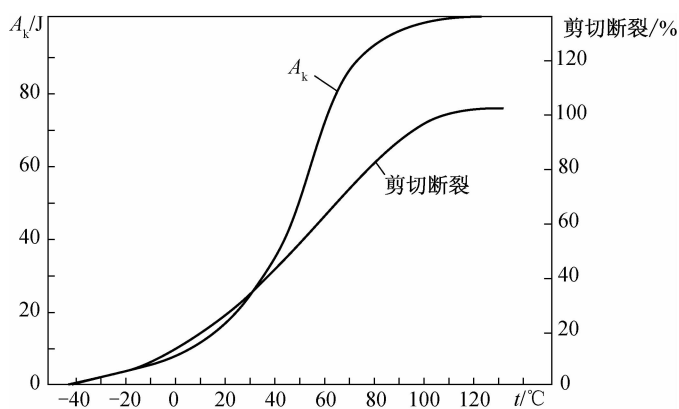
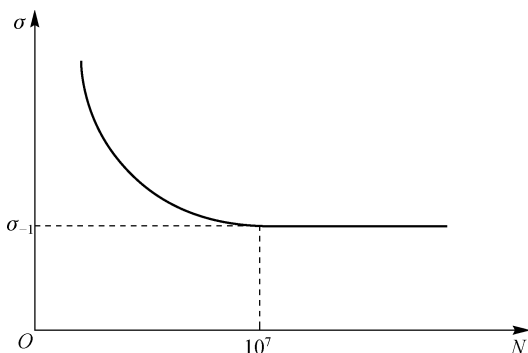


图 1-7 冲击吸收功与温度的关系

2. 疲劳

疲劳是指零件在循环应力作用下,过早发生破坏的现象。疲劳破坏事先没有明显的塑性变形,具有很大的突发性和危险性,往往会造成严重事故。

材料在循环应力作用下,经受无数次循环而不断裂的最大应力值称为材料的疲劳极限。材料疲劳极限的测量通常是在旋转对称弯曲疲劳试验机上进行的。把材料承受的循环应力 σ 与断裂循环次数 N 之间的关系用 σ - N 曲线来描述,如图 1-8 所示。

图 1-8 σ - N 曲线

从曲线上可以看出,应力值 σ 越低,断裂前的循环次数越多。当应力降低到某一定值后, σ - N 曲线与横坐标轴平行,当应力低于此值时,材料可经受无数次应力循环而不断裂,此时的应力值即为疲劳极限。

学习情境二 金属材料的其他性能

一、金属材料的物理性能

金属的物理性能包括电性能、热性能、磁性能、密度、熔点等,是材料固有的属性。

1. 电性能

1) 导电性

导电性是金属传导电流的能力,金属导电性的好坏常用电阻率 ρ 表示,也常用电导率 σ 表示,电导率是电阻率的倒数。电阻率是单位长度、单位截面积的电阻值,其单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。电阻率越小,电导率越大,导电性越好。金属材料的导电性随温度升高而降低。金属中银的导电性最好,铜与铝次之。通常金属的纯度越高,其导电性越好,合金的导电性比纯金属差,高分子材料和陶瓷一般都是绝缘体。

根据电阻率或电导率数值的大小,可将金属材料分为超导体、导体、半导体和绝缘体等。其电阻率分布如下:超导体 $\rho \rightarrow 0$,导体 ρ 为 $10^{-8} \sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$,半导体 ρ 为 $10^{-5} \sim 10^7 \Omega \cdot \text{m}$,绝缘体 ρ 为 $10^7 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{m}$ 。

电阻率是选用导电材料和绝缘材料的主要依据。导电器材常选用导电性良好的材料,以减少损耗;而加热元件、电阻丝则选用导电性差的材料制作,以提高功率。

2) 介电性能

电介质或介电体在电场内虽然没有电荷或电流的传输,但仍对电场表现出某些相应特性,可用材料的介电性能来描述。介电性能用介电常数 K 来表示,介电常数是电介质储存电荷的相对能力。介电常数与材料成分、温度和电场频率等因素有关。在强电场中,当电场强度超过某一临界值(称为介电强度)时,电介质就会丧失其绝缘性能,这种现象称为电击穿。

电绝缘体必须是介电体,要具有高的电阻率、高的介电强度和较小的介电常数。

3) 超导现象

温度下降到某一值时,导体的电阻会突然消失,这种现象称为超导现象。电阻突然变为零时的温度称为临界温度。具有超导性的物质称为超导体。超导体在超导状态下电阻为零,可输送大电流而不发热、不损耗,具有高载流能力,可长时间无损耗地储存大量的电能,产生极强的磁场。

目前发现具有超导性的金属元素有钛、钒、锆、铌、钼、钽、钨、铼等。非过渡族元素有铍、铝、锡等。但由于实现超导的温度太低,获得低温所消耗的电能远远超过超导所节省的电能,因而阻碍了超导技术的推广。

2. 热性能

1) 导热性

导热性是材料受热作用而反映出来的性能,用热导率 λ 表示。热导率的含义是在单位温度梯度下,单位时间内从单位垂直断面通过的热量,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 或 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。热导率越大,导热性越好。一般纯金属具有良好的导热性,合金的成分越复杂,导热性越差。

导热性是传热设备和元件应考虑的主要性能,如散热器等传热元件应采用导热性好的材料制造,保温器材应采用导热性差的材料制造。金属的热加工工艺与导热性有密切关系,在热处理、铸造、锻造、焊接过程中,若材料的导热性差,则会使工件内外产生大的温差而出现较大的内应力,导致工件变形或开裂。常用金属的热导率见表 1-2。

表 1-2 常用金属的热导率

材 料	银	铜	铝	铁	灰铸铁	碳钢
热导率 $\lambda/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	419	393	222	75	63	67(100 $^\circ\text{C}$)

2) 热膨胀性

金属随温度的升高而出现体积增大的现象称为热膨胀性,用线膨胀系数 α 或体膨胀系数 β 来表示。

线膨胀系数 α 是温度上升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时单位长度的伸长量,单位为 $1/^{\circ}\text{C}$ 。线膨胀系数不是一个固定不变的数值,它随温度的升高而增大。体膨胀系数约为线膨胀系数的 3 倍。

由热膨胀系数大的材料制造的零部件或结构,在温度变化时,尺寸和形状变化较大。装配、热加工和热处理时应考虑材料热膨胀的影响。异种材料组成的复合结构还要考虑热膨胀系数的匹配问题。

3. 磁性能

金属材料在磁场中被磁化能吸引铁、钴、镍等物质的性能称为磁性能。金属材料中只有三种金属(铁、钴、镍)及其合金具有显著的磁性能。磁性能只存在于一定温度的金属材料内,在高于一定温度时,其磁性能就会消失。如铁在 $770\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上就没有磁性能,这一温度称为居里点。

常用的磁性材料有如下几种。

1) 铁磁性材料

具有铁磁性的材料有铁、镍、钴及其合金,以及某些稀土元素的合金。

2) 亚铁磁性材料

亚铁磁性材料是指具有亚铁磁性的材料,如各种铁氧体。亚铁磁材料主要用于制造变压器铁心、电感器和存储器件等。

3) 永磁材料

材料经磁化后,当外磁场去除后仍保留磁性,并具有高的剩磁和矫顽力。

4) 软磁材料

软磁材料是指容易磁化和退磁的材料。

4. 密度

密度是指在一定温度下单位体积金属的质量,用符号 ρ 表示。密度的大小很大程度上决定了工件的质量。密度的计算公式为

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中, ρ 为金属的密度, kg/m^3 ; m 为金属的质量, kg ; V 为金属的体积, m^3 。

在机械制造中,一般将密度小于 $5 \times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$ 的金属称为轻金属;密度大于 $5 \times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$ 的金属称为重金属。某些机械零件选材时,必须考虑金属的密度,如发动机活塞,根据使用要求常选用密度小的铝合金制成。

常用金属材料的密度($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)见表 1-3。

表 1-3 常用金属材料的密度($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

材 料	铅	铜	铁	钛	铝	锡	钨
密度/ (kg/m^3)	11.3×10^3	8.9×10^3	7.8×10^3	4.5×10^3	2.7×10^3	7.28×10^3	19.3×10^3

5. 熔点

金属等晶体材料一般具有固定的熔点。熔点是金属由固态转变为液态的温度。按熔点

的高低金属分为低熔点(低于 700 ℃)金属和难熔金属两大类。锡、铅、铋、锌等属于低熔点金属,钨、钼、铬、钒等属于难熔金属。

不同熔点的金属具有不同的应用场合,难熔金属可用于制造耐高温的零件(如火箭、导弹、燃气轮机零件等),低熔点金属可用于制造熔丝、焊接钎料等。

金属的熔点是热加工的重要工艺参数。常用金属材料的熔点见表 1-4。

表 1-4 常用金属材料的熔点

材 料	钨	钼	钛	铁	铜	铝	铅	铋	锡	铸铁	碳钢	铝合金
熔点/℃	3 380	2 630	1 677	1 538	1 083	660.1	327	271.3	231.9	1 148~1 279	1 450~1 500	447~575

二、金属的化学性能

金属材料抵抗各种化学作用的能力称为化学性能,主要包括耐腐蚀性和抗氧化性。

1. 耐腐蚀性

金属材料在常温下抵抗氧、水及其他化学物质腐蚀的能力称为耐腐蚀性。

金属材料的腐蚀形式主要有两种,一种是化学腐蚀,另一种是电化学腐蚀。化学腐蚀是金属直接与周围介质发生纯化学作用。电化学腐蚀是金属在酸、碱、盐等电介质溶液中由于原电池的作用而引起的腐蚀。金属的腐蚀既造成表面金属光泽的缺失和材料的损失,也造成一些隐蔽性和突发性的事故。金属材料中铬镍不锈钢可以抵抗含氧酸的腐蚀;耐候钢、铜及铜合金、铝及铝合金能抵抗大气的腐蚀。

提高材料的耐腐蚀性的方法很多,如均匀化处理、表面处理等都可以提高材料的耐腐蚀性。

2. 抗氧化性

金属在高温下抵抗氧化的能力称为抗氧化性。

在高温下金属材料易与氧结合,形成氧化皮,造成金属的损耗和浪费,因此高温下使用的工件,要求其材料具有抗氧化性。如各种加热炉、锅炉等,应选用抗氧化性良好的材料。耐热钢、高温合金、钛合金等都具有好的抗氧化性。

提高抗氧化性的措施是使材料表面迅速氧化后形成一层连续而致密并与母体结合牢靠的膜,从而阻止其进一步氧化。

三、金属的工艺性能

1. 铸造性能

铸造性能是指金属用铸造方法获得优质铸件的性能。衡量金属材料铸造性能的指标有流动性和收缩率两种。流动性好的材料容易充满铸模获得完整而致密的铸件。收缩率小的材料铸造冷却后,铸件缩孔小,表面无空洞,也不会因收缩不均匀而引起开裂,尺寸比较稳定。

金属材料中铸铁、青铜有较好的铸造性能,可以用来铸造一些形状复杂的铸件。

2. 塑性加工性能

塑性加工性能是指金属通过塑性加工(锻造、冲压、挤压、轧制等)将原材料(如各型材)加工成优质零件(毛坯或成品)的性能。它取决于材料本身塑性高低和变形抗力(抵抗变形

能力)的大小,也与材料的成分和加工条件有很大关系。如铜、铝、低碳钢具有较好的塑性和较小的变形抗力,因此容易塑性加工成形;而铸铁、硬质合金不能进行塑性加工成形。

3. 焊接性能

焊接性能是指两种相同或不同的材料,通过加热、加压或两者并用将其连接在一起所表现出来的性能。焊接性能好的金属能获得没有裂纹、气孔等缺陷的焊缝,并且焊接接头具有一定的力学性能。

影响焊接性能的因素很多,导热性过高或过低、热膨胀系数大、塑性低或焊接时容易氧化的材料焊接性能较差。导热性好、热膨胀系数小的金属材料焊接性能都比较好,如低碳钢具有良好的焊接性,高碳钢、不锈钢、铸铁的焊接性较差。

4. 切削加工性能

金属材料的切削加工性能是指金属切削加工的难易程度。切削加工性能好的金属在切削加工时,刀具磨损量小,切削用量大,加工表面也比较光洁。

切削加工性能的好坏与金属材料的硬度、导热性、金属内部结构、加工硬化等因素有关。尤其与硬度关系较大,材料硬度在 170~230 HBW 时最容易切削加工。从材料种类而言,铸铁、铜合金、铝合金及一般碳素钢都具有较好的切削加工性能,而高合金钢的切削加工性能较差。

5. 热处理性能

热处理性能主要指钢接受淬火的能力(即淬透性),它是用淬硬层深度来表示的。不同的钢种接受淬火的能力不同。合金钢的淬透性能比碳钢好,则合金钢的淬硬层深度厚,也说明较大零件采用合金钢制造后可以获得均匀的淬火组织和均匀的力学性能。

学习情境三 非金属材料的基本知识

通常将金属材料以外的其他材料称为非金属材料。非金属材料的原料来源广泛,成形工艺简单,往往具有金属材料不具备的某些特殊性能,还可与其他材料组成复合材料,使其兼有两种材料的性能,从而获得更加广泛的应用。

一、高分子材料

高分子材料是以高分子化合物为主要成分的材料,可分为天然高分子化合物和合成高分子化合物两类。蛋白质、天然橡胶、蚕丝、皮革、木材等属于天然高分子化合物。而塑料、合成橡胶、黏结剂等属于合成高分子化合物。在机械工业中主要应用合成高分子化合物。

1. 塑料

塑料是以合成树脂为主要成分,加入某些添加剂制成的高分子材料。在加热、加压的条件下可塑制成形,生产效率高,产品在使用中可保持固定的形状。

1) 塑料的分类

常用的塑料按用途可分为通用塑料、工程塑料和高温塑料三类。

通用塑料用来制作生活用品、包装材料及一般的零件,如聚氯乙烯、聚乙烯、聚丙烯、氨

基酚醛塑料等。

工程塑料具有较好的力学性能,且在各种环境下仍能保持良好的性能。常用于制作工程结构、机器零件和各种设备,如尼龙、聚甲醛、ABS、聚碳酸酯等。

高温塑料可以在 150 ℃ 以上的环境下工作。根据树脂的受热特性可将其分为热塑性塑料和热固性塑料两类。热塑性塑料在特定温度范围内可反复加热软化、冷却硬化,如聚四氟乙烯、聚氯乙烯、聚乙烯、聚丙烯、有机玻璃、尼龙等;热固性塑料加热时软化并有部分熔融,塑制成形固化后不再软化,不能重复塑制,如酚醛塑料、氨基塑料、环氧树脂塑料等。热固性塑料可在较高温度下使用,强度不高,脆性较大。

2)塑料的性能

(1)化学性能。塑料具有良好的耐腐蚀性能。塑料大多耐酸、耐碱,聚四氟乙烯能耐“王水”的侵蚀,所以塑料制品不要保护层,不仅广泛用于化工设备中,还可用作钢铁材料的覆层,从而起到防止腐蚀的作用。

(2)物理性能。塑料密度小,不加填料的塑料密度为 0.85~2.2 g/cm³,泡沫塑料密度只有 0.02~0.2 g/cm³,使用塑料可大大减轻设备的自重。塑料的主要成分——树脂具有良好的电绝缘性,当塑料的成分发生变化时,电绝缘性也随之发生变化,如塑料的填充剂、增塑剂都使其电绝缘性降低。塑料的导热性差,是良好的绝热材料,但其热膨胀系数一般为钢的 3~10 倍,因此,塑料零件的尺寸精度不稳定,受环境温度的影响大。塑料遇热易老化、分解,大多数塑料只能在 100 ℃ 以下环境中使用。

(3)力学性能。一般塑料的强度、韧度较差,其强度仅为 30~150 MPa,其受温度的影响较大,温度稍有变化,其强度和塑性就产生很大的变化。塑料具有优良的耐磨和减摩性能、较好的减震性和消声性,常被用做隔音材料。

(4)工艺性能。塑料成形工艺简单,可用挤压、注塑、胶黏等方法成形,表面光滑,也可以用普通的机械加工法进行加工。

常用塑料的性能、特点及应用见表 1-5。

表 1-5 常用塑料的性能、特点及应用

类 别	名 称	性能、特点	应用举例
热固性塑料	酚醛塑料 (PF) (俗称为电木)	由酚醛树脂加入填充剂、增塑剂、润滑剂压制而成。力学性能高,刚性大,冷流动性小,耐热性高(100 ℃ 以上),具有良好的电绝缘性和耐腐蚀性,摩擦系数小,价廉,较脆,不耐强氧化性酸的腐蚀	电话机外壳,各种开关、插头,农用水泵密封件、轴承、轴瓦、皮带轮、齿轮,各种容器的贮槽等
	氨基塑料	由尿醛树脂或密胺树脂与石棉配制而成。具有良好的自熄性、耐电弧性、耐热性,易着色	电器零件,餐具,日用品,防爆电器、熔断器的灭弧装置
	有机硅塑料	由有机硅树脂与石棉、玻璃纤维等配制而成。具有优良的电绝缘性,耐高、低温,防潮,防盐雾,抗黏防污,耐辐射等性能	电动机、变压器的绝缘材料,电子元器件的涂料
	环氧树脂塑料(EP)	由环氧树脂与玻璃纤维或其制品配制而成。强度高,韧度好,具有良好的电绝缘性,防水、防霉,耐热、耐寒,化学稳定性好	电器、电子元件及线圈的涂覆、封装,塑料模具、精密量具、机械仪表、电器结构零件

续表

类 别	名 称	性能、特点	应用举例
热塑性塑料	聚乙烯 (PE)	乙烯聚合物。按制造方法分为低压、中压、高压三种。低压聚乙烯质地坚硬,有良好的耐磨性、耐蚀性和电绝缘性能;高压聚乙烯最轻、化学稳定性好,具有良好的高频绝缘性、柔软性、耐冲击性和透明性	低压聚乙烯用于电缆的包皮,耐腐蚀管道、阀、泵的结构件,喷涂于金属表面以耐磨、减摩、防腐蚀;高压聚乙烯吹塑成薄膜、软管、塑料瓶等包装材料
	聚氯乙烯 (PVC)	在聚氯乙烯树脂中加入不同的增塑剂和稳定剂,制成硬质及软质制品。硬质聚氯乙烯机械强度高,电性能优良,耐酸碱能力强;软质聚氯乙烯机械强度较低,但伸长率较大,具有良好的电绝缘性能和耐寒能力	硬质聚氯乙烯用作化工设备衬里、耐腐蚀结构件,制作日用品,电气绝缘材料;软质聚氯乙烯用于电线、电缆的绝缘包皮,制作农用薄膜、日用品
	聚丙烯 (PP)	丙烯聚合物。质轻,具有高的刚性和耐热性、优良的耐蚀性和高频绝缘性	用于制作法兰、叶轮、齿轮等一般零件,受热电器的绝缘材料,也可吹成薄膜做包装材料
	聚四氟乙烯 (PTFE)	俗称为塑料王,具有优异的化学稳定性及电绝缘性,优良的耐高温、低温性,不吸水	用于制作耐化学腐蚀、耐高温的密封元件,如填料垫片等,也可用于制作输送腐蚀介质的高温管道的耐腐蚀衬里
	聚酰胺 (PA) (尼龙)	由二元胺与二元酸反应而成。具有优良的机械强度和耐磨性、自润滑性,以及良好的消声性和耐油性	常用的有尼龙 6、尼龙 66、尼龙 610 等。用于制作要求耐磨、耐蚀的齿轮、轴承、高压密封圈等,因其无毒,特别适用于食品机械
	聚酚氧	具有良好的力学性能,高的刚性、硬度和韧度,优良的抗蠕变性能,尺寸稳定	用于制作精密、形状复杂、耐磨、受力的传动零件,仪表,计算机零件等

2. 橡胶

1) 橡胶的分类

橡胶分为天然橡胶和合成橡胶两类,还可根据应用的范围分为通用橡胶与特种橡胶。

天然橡胶的主要成分为天然的聚异戊二烯,是从橡胶树或橡胶草的浆汁中去除杂质、分离水分等加工提取的,其具有良好的弹性和力学性能,不耐高温,易被汽油、苯等有机溶剂溶解而腐蚀。经硫化处理可使其性能发生改变。天然橡胶是一种通用橡胶,多用于制造一般的工业橡胶制品,如轮胎,电线、电缆的绝缘包皮和护套等。

合成橡胶是以石油、天然气、煤和农副产品等为原料,通过化学合成的方法制成单体,经聚合或缩聚制成的一类弹性很高的高分子材料。所用的原料不同,生产工艺不同,制成的橡胶在性能上也有较大的差异。

2) 橡胶的性能

橡胶具有高的弹性,在较小力的作用下就能产生较大的变形,取消外力后又能恢复原来的形状。具有良好的吸震能力,常被用于减震、防震的设备中。经过适当的处理以后,橡胶具有一定的耐蚀性,如耐油橡胶、耐酸橡胶等。另外,橡胶具有良好的耐磨性能和电绝缘性、足够的强度和积储能量的能力,具有较好的黏结性,能很好地与金属、纺织品、石棉等材料相

连接,制成复合材料。
常用橡胶的性能、特点和应用见表 1-6。

表 1-6 常用橡胶的性能、特点和应用

类 型	名 称	性能、特点	应用举例
通用橡胶	天然橡胶 (NR)	高的强度和弹性,伸长率为 650%~900%,使用温度为-50℃~120℃	轮胎、胶管、胶带,各种日用品
	丁苯橡胶 (SBR)	苯乙烯与丁二烯形成的共聚物,性能接近于天然橡胶,耐老化、耐热性优于天然橡胶,使用温度为-50℃~140℃	轮胎、胶布、胶板等通用橡胶件
	顺丁橡胶 (BR)	具有优异的弹性、耐磨性和耐寒性,使用温度不超过 120℃	V 形胶带、轮胎、耐寒运输带等
	丁腈橡胶 (NBR)	丁二烯和丙烯腈的共聚物。耐油性、气密性好,具有较好的耐热性,使用温度为-35℃~175℃,耐臭氧性、耐寒性较差	输油管,耐油的垫圈、胶辊、皮碗、密封圈等
特种橡胶	硅橡胶	一种缩聚物主链由硅、氧原子组成,侧链是碳氢化合物。耐高温、低温,耐辐射,耐臭氧老化,具有优异的电绝缘性能,机械强度较低,无毒、无味。使用温度为-70℃~275℃	高温使用的垫圈、密封件,食品及医疗用制品,绝缘制品
	氟橡胶 (FPM)	由含氟的单体共聚而成。耐高温,使用温度可达 300℃,耐油、耐腐蚀介质	耐蚀件、高级密封件,高真空橡胶制品、特种电线电缆护套等
	聚氨酯橡胶 (UR)	氨基甲酸酯的聚合物具有高弹性、耐磨性和强度	胶辊、实心轮胎、同步齿形带、特种垫圈等

二、陶瓷材料

陶瓷是一类无机非金属材料,现代陶瓷材料主要是一些金属或非金属的氧化物、氮化物、碳化物及硼化物等。陶瓷材料的性能取决于晶体结构、晶界性质和显微组织。

1. 陶瓷的种类

按所用原料和用途将陶瓷分为普通陶瓷和特种陶瓷两大类。

普通陶瓷又称为传统陶瓷,按性能和用途又可分为日用陶瓷、建筑陶瓷、电绝缘陶瓷、化工陶瓷、多孔陶瓷等。它是以黏土、长石、石英等天然材料为原料,经加工、成形、高温烧结而成。

特种陶瓷具有特殊的物理、化学、力学性能,可满足多种工程结构和工具材料的要求。特种陶瓷是以人工化合物(如 Al_2O_3 、 Si_3N_4 、BN、SiC 等)为原料经成形、高温烧结而成的,主要用于化工、电子、冶金、机械等行业及一些新技术中。按原材料的成分可将特种陶瓷分为氧化物陶瓷、氮化物陶瓷、碳化物陶瓷和金属陶瓷等;按特种陶瓷的用途又可分为高温陶瓷、压缩陶瓷、光学陶瓷和磁性陶瓷等。

2. 陶瓷的性能

1) 物理性能

多数陶瓷的热膨胀系数较小,导热性较差,同时陶瓷中的气孔对传热不利,所以陶瓷是良好的绝热材料。陶瓷的导电性能变化范围较大,多数具有良好的绝缘性能,但有些陶瓷具有一定的导电性。

2) 化学性能

陶瓷的结构非常稳定,介质中的氧很难与其发生反应,且陶瓷对酸、碱、盐等的腐蚀有较强的抵抗能力,也能抵抗熔融的有色金属的侵蚀。但在有些情况下陶瓷结构不稳定,例如,高温熔盐和氧化渣会使某些陶瓷材料受到腐蚀破坏。

3) 力学性能

陶瓷的硬度很高,远高于金属和高聚物。各种陶瓷的硬度多为 1 000~5 000 HV,淬火钢的硬度为 500~800 HV。陶瓷内部杂质多,成分、组织都不纯,存在各种缺陷,且有大量气孔,致密度小,使其实际的抗拉强度比它本身的理论强度低得多。大多陶瓷具有优于金属的高温强度,且具有很高的抗氧化能力,适宜做高温材料。陶瓷在室温时一般没有塑性,但在高温慢速加载条件下,特别是组织中存在玻璃相时,陶瓷能表现出一定的塑性。

常用陶瓷的性能、特点及应用见表 1-7。

表 1-7 常用陶瓷的性能、特点及应用

类 别	性能、特点	应用举例
普通陶瓷	以黏土、长石、石英为原料制成。质地坚硬,耐腐蚀,耐磨损,不导电,加工成形性好;强度低,耐高温性能较差,一般只能承受 1 200 ℃ 以下的温度。这类陶瓷的品种多,产量大	广泛用于电气、化工、建筑等行业,如各种建筑陶瓷、供电系统中的瓷等
氧化铝陶瓷	以 Al_2O_3 和 SiO_2 为主要成分。一般所说的氧化铝陶瓷, Al_2O_3 含量在 95% 以上,根据其 Al_2O_3 的含量分为 75 瓷、95 瓷、99 瓷等。具有高的强度和硬度,耐高温,耐磨,耐蚀,具有良好的抗氧化性、电绝缘性、真空气密性,脆性大,不能承受冲击载荷。99 瓷能在 1 600 ℃ 的高温下长期使用,蠕变很小,也不会氧化	高温器皿,电绝缘及电真空器件,耐磨零件,农用、石油、化工用泵的密封环,刀具材料
氮化硅陶瓷 (Si_3N_4)	具有良好的耐高温性能、耐磨性和化学稳定性,能抵抗各种酸、碱和熔融金属的侵蚀,硬度高,具有良好的电绝缘性和耐热疲劳性、较好的抗高温蠕变性和抗震能力,可在 1 650 ℃ 以上工作	高温轴承,热电偶套管,泵和阀的密封环,难切削加工材料的刀具
碳化硅陶瓷	耐高温,强度大,有很高的热传导能力以及良好的热稳定性、耐磨性、耐腐蚀性和抗高温蠕变性,在 1 400 ℃ 高温仍能保持相当高的抗弯强度	火箭尾管的喷嘴,热电偶套管,燃汽轮机的叶片、轴承等
氮化硼陶瓷 (BN)	具有良好的电绝缘性、耐热性、导热性和优异的化学稳定性、自润滑性。六方氮化硼硬度低,可进行切削加工。化学稳定性好,能抵抗许多熔融金属和玻璃熔体的侵蚀。由六方氮化硼转变成的立方氮化硼有很高的硬度,是优良的耐磨材料	热电偶套管,半导体散热绝缘零件、坩埚等。立方氮化硼用于磨料和金属切削刀具

三、复合材料

经人工组合使两种或两种以上不同性质或不同组织的材料形成的多相固体材料,称为复合材料。复合材料可以是非金属与金属的复合,也可以是非金属与非金属的复合或金属与金属的复合。复合材料能充分发挥组成材料的特点,克服或改善单一材料的性能缺点,使其成为具有特殊性能的工程材料。

复合材料的种类较多,根据结构的不同将其分为纤维增强复合材料、层叠复合材料、细

粒增强复合材料和骨架复合材料四种。

1. 纤维增强复合材料

纤维增强复合材料是目前应用最广泛、消耗量最大的一类复合材料,这类材料以纤维增强树脂为主。

1) 玻璃纤维-树脂复合材料

玻璃纤维-树脂复合材料通常称为玻璃钢。根据树脂的性质,玻璃钢可分为热塑性玻璃钢和热固性玻璃钢。

热塑性玻璃钢是由 20%~40% 的玻璃纤维和 60%~80% 的基体材料组成的,具有高强度、高冲击韧度、良好的低温性能和低的热膨胀系数。热固性玻璃钢是由 60%~70% 的玻璃纤维和 30%~40% 的基体材料组成的,其强度高,密度小,耐磨性、绝缘性和绝热性好,吸水性低,易于加工成形。

2) 碳纤维-树脂复合材料

常用的碳纤维-树脂复合材料由碳纤维与聚酯、酚醛、环氧和聚四氯乙烯等树脂组成。其性能优于玻璃钢,密度小,强度高,具有优良的抗疲劳、耐冲击性能和良好的自润滑性、减震性、耐磨性以及良好的耐腐蚀性和耐热性。

3) 碳化硅纤维-树脂复合材料

碳化硅纤维-树脂复合材料是由碳化硅与环氧树脂组成的复合材料。其强度极高,高温化学稳定性好,使用温度可达 1 370 ℃。

4) 芳纶纤维-树脂复合材料

芳纶纤维-树脂复合材料由芳纶有机纤维与环氧、聚乙烯、聚碳酸酯、聚酯等树脂组成。其特点是抗拉强度较高,与碳纤维-树脂复合材料类似,具有耐冲击性和良好的疲劳抗力。

2. 层叠复合材料

层叠复合材料可使材料强度、刚度、耐磨、耐蚀、绝热、隔音、密度等性能得到改善。层叠复合材料由两层或多层不同材料层叠复合而成。典型的双金属复合材料是以碳钢为基层、不锈钢为覆层的不锈复合钢板,基层的碳钢有良好的力学性能,覆层的不锈钢有良好的耐蚀性。这种材料广泛用于制作化工设备,也可以用塑料作为覆层代替不锈钢制成复合钢板,从而使设备的造价大大降低。如在两层玻璃间夹一层聚乙烯醇缩丁醛,则可制成安全玻璃。用钢作为基体,塑料作为覆层,在中间夹入青铜则可制成高强度、高耐磨性的耐磨材料,用于制作无油或少油润滑的轴承、垫片、球头座等磨损件。

3. 细粒增强复合材料

在基体材料中均匀分布一种或多种大小适宜的增强粒子所获得的高强度材料称为细粒增强复合材料。细粒增强复合材料的基体可以是金属,也可以是非金属;增强粒子可以是金属粒子,也可以是非金属粒子。增强的效果与增强粒子的尺寸有关。一般来说,粒子的尺寸越小,增强的效果越明显。粒子直径为 0.01~0.1 μm 的复合材料称为弥散强化材料,粒子直径为 1~50 μm 的复合材料称为颗粒增强材料。

将陶瓷微粉散于金属基体中制得的金属陶瓷具有强度高、耐磨损、耐腐蚀、耐高温的特性,克服了一般金属材料在高温条件下强度低的弱点,是优良的工具材料。例如,氧化铝金

属陶瓷作为高速切削刀具材料和高温耐磨材料;钴基碳化钨金属陶瓷即硬质合金作为刀具材料、拉丝模、阀门件等。

将石墨粉散于铝合金液体中浇注而成的复合材料、铅粉加在氟塑料中制成的复合材料都具有密度小、减摩性好和减震性好的特性,是新型的轴瓦材料。

4. 骨架复合材料

骨架复合材料有多孔浸渍材料和夹层结构材料两类。

多孔浸渍材料是以多孔材料为骨架,浸渍油脂或氟塑料制成的骨架复合材料,可用于制作轴承。

夹层结构材料是由两层薄而强的面板中间夹一层轻而弱的芯子构成的,芯子连接两层面板并保持两板间的距离。面板的材料可以是纸、木材、金属、塑料等,芯子的材料可以是纸、棉布、石棉布、金属箔等,面板与芯子一般用胶黏剂黏结。夹层结构材料具有质轻、比强度和比刚度高、表面光滑等特点。如用泡沫塑料做芯子材料,则具有良好的绝热、隔音等性能;如用石棉蜂窝结构的芯子,则具有耐高温、防火等性能。因此,夹层结构材料主要用于制作运输容器、发动机罩、防火隔板、隔音板等。



课后练习

1. 拉伸试验可以测定哪几种力学性能指标?
2. 什么是强度? 材料的强度指标有哪些?
3. 材料的塑性指标有哪些?
4. 有一钢试样,其直径为 10 mm,标距长度为 50 mm,当载荷达到 18 840 N 时,试样产生屈服现象。当载荷加至 36 110 N 时,试样发生缩颈现象,然后被拉断,拉断后标距长度为 73 mm,断裂处直径为 6.7 mm。试求该试样的 R_m 、 A 和 Z 。
5. 硬度试验方法有哪几种? 常用的洛氏硬度有哪三种? 说明其应用范围。
6. 一紧固螺栓使用后发现有塑性变形,试分析材料有哪些指标没有达到要求。
7. 金属的物理性能有哪几种?
8. 什么是金属的耐腐蚀性和抗氧化性?
9. 什么是金属的工艺性能? 金属的工艺性能有哪些内容?
10. 陶瓷的种类有哪些?
11. 复合材料可以由哪些材料复合到一起?

课题二

钢的热处理



学习目标

掌握金属中常见的晶格类型和金属的实际晶体结构；
掌握钢在热处理时的组织转变规律；
熟悉钢的热处理工艺知识。



相关知识

不同的金属材料具有不同的性能,这是由于不同的材料具有不同的化学成分和组织结构。即使成分相同的材料,当采用不同的热加工工艺或热处理工艺后,其性能也会有很大差异,根本原因是材料的内部结构不同。材料的组织结构和性能之间有着密切的关系,特别是金属材料,其组织结构发生变化,性能就会发生变化,甚至是截然不同的变化。利用材料的这一特性,生产中常常采用各种处理方法改变材料的组织结构,控制材料的性能,使材料能更好地满足各种要求。

钢的热处理是指通过加热、保温、冷却的工艺方法使钢的内部组织结构发生变化,从而获得所需性能的一种加工工艺。它能显著地提高钢铁零件的使用性能,充分发挥钢的潜力,延长零件的使用寿命。因此,钢的热处理在机械制造业中占有十分重要的地位。可以说,机械设备中重要的零件及各类工具几乎都需要经过热处理才能正常使用。

学习情境一 金属的晶体结构

固态物质按其原子排列的特性可分为晶体和非晶体两类。在自然界中除了少数的一些物质以外,包括金属在内的绝大多数固体都是晶体。晶体是指其原子呈周期性规则排列的固态物体。晶体具有周期性规则的原子排列,主要是各原子之间的相互吸引力与排斥力相平衡的结果。晶体还具有固定的熔点和各向异性的特征。而非晶体原子排列无规则,没有固定的熔点,且具有各向同性的特征。

一、常见的晶格类型

为了便于分析各种晶体中的原子排列规律,通常将每一个原子抽象为一个点,再把这些点用一些假想线条连接起来,形成一个空间格子,这种表示晶体中原子排列形式的空间几何图形称为晶格,如图 2-1(a)所示。组成晶格的最小的几何单元称为晶胞,如图 2-1(b)所示。

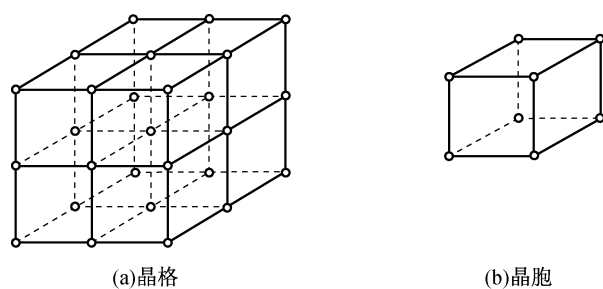


图 2-1 晶格和晶胞

1. 体心立方晶格

如图 2-2 所示,体心立方晶格的晶胞是一个长、宽、高都相等的立方体,在立方体的八个顶角和中心各有一个原子。属于体心立方晶格的金属有 α -Fe、铬(Cr)、钼(Mo)、钨(W)、钒(V)等。

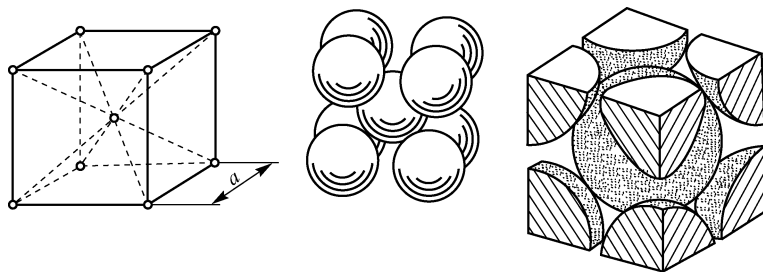


图 2-2 体心立方晶格的晶胞示意图

2. 面心立方晶格

如图 2-3 所示,面心立方晶格的晶胞也是一个长、宽、高都相等的立方体,在立方体的八个顶角和六个面的中心上各有一个原子。属于面心立方晶格的原子有 γ -Fe、铝(Al)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)等。

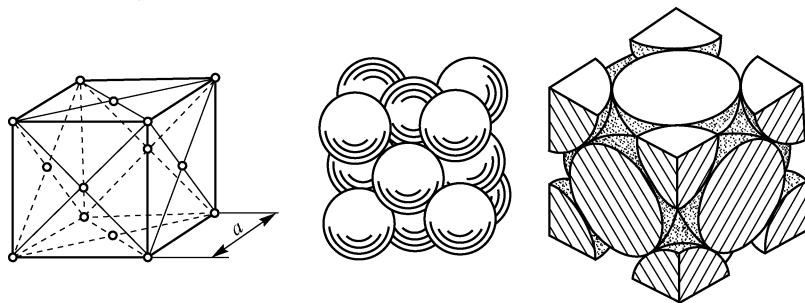


图 2-3 面心立方晶格的晶胞示意图

3. 密排六方晶格

如图 2-4 所示,密排六方晶格的晶胞是一个正六方柱体,在正六方柱体的十二个顶角和上下两个正六边形的中心各有一个原子,另外,在晶胞内部还有三个原子。属于密排六方晶

格的金属有镁(Mg)、锌(Zn)、铍(Be)、镉(Cd)等。

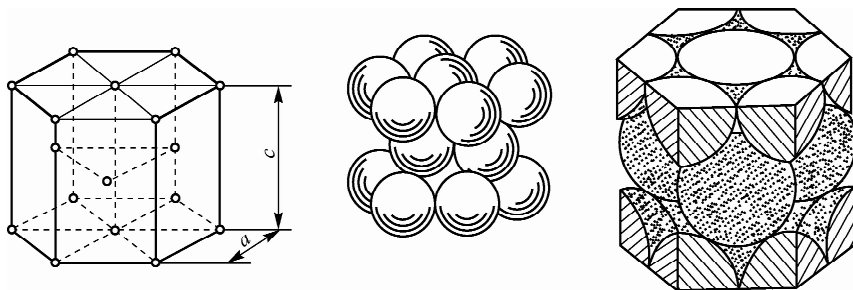


图 2-4 密排六方晶格的晶胞示意图

二、金属的实际晶体结构

如果一块晶体内部的晶格位向即原子排列的方向完全一致,这块晶体就称为单晶体,如图 2-5 所示。在单晶体中,由于各个方向上的原子密度不同,因此各个方向上所呈现的物理、化学和力学性能也就各不相同,这种现象称为晶体的“有向性”或“各向异性”。在工业生产中,只有通过特殊制作才能获得单晶体。

实际使用的金属大部分是采用熔炼、自然凝固等传统制取方法得到的多晶体结构,如图 2-6 所示。它是由许多外形不规则的微小的单晶体构成的,这些单晶体称为晶粒。各晶粒之间以界面分开,这个界面称为晶界。晶界处的原子为了适应两晶粒不同晶格位向的过渡,总是不规则排列的。晶粒内部晶格位向基本上是一致的,但各个晶粒彼此间的位向却不同。

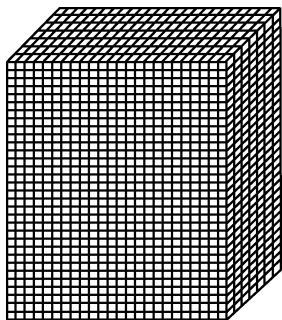


图 2-5 单晶体结构示意图

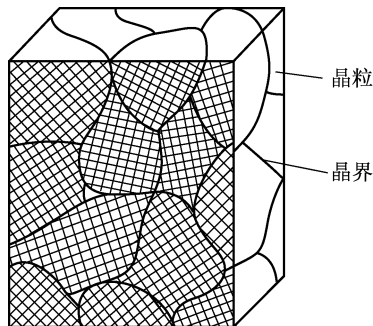


图 2-6 多晶体结构示意图

多晶体中各个晶粒的位向不同,它们互相交错咬合、补充或抵消,再加上晶界的作用,掩盖了单个晶粒的各向异性。因此,多晶体金属的性能在整体上并不呈现各向异性。如在多晶体的工业纯铁(α -Fe)中,各方向上的弹性模量 E 值均为 210 000 MPa。但在某些条件下,当外在因素使各晶粒的晶格位向趋于一致时,则多晶体金属也会显示出各向异性。

三、金属的晶体缺陷

由于原子的热运动、杂质原子的掺入以及其他外界因素的影响,原子排列并非完整无缺,而是存在着各种各样的晶体缺陷。晶体缺陷是指由于结晶条件或加工条件诸方面的影响,晶体内部的原子排列受到干扰而出现不规则的区域。金属晶体缺陷的存在对金属性能和组织结构转变均会产生很大影响。晶体缺陷根据其几何特征一般分为以下三类。

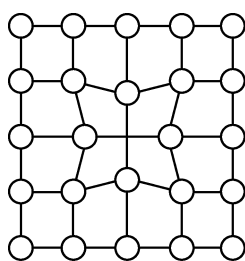
1. 点缺陷

当晶格中某些原子由于某种原因(如热振动的偶然偏差等)脱离其晶格结点而转移到晶格间隙,使晶格不能保持正常排列状态时便会造成点缺陷。点缺陷是在所有方向上的尺寸都很小的晶体缺陷,最常见的点缺陷是晶格空位和间隙原子,如图 2-7 所示。当晶格中的某些应被原子所占有的结点未被原子占有时,这种空着的位置称为晶格空位;当在个别晶格空隙处出现了多余的原子时,这种不占有正常结点位置而是处在晶格空隙中的原子称为间隙原子。

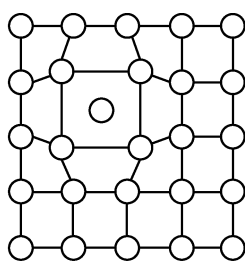
由于晶格空位和间隙原子的存在,周围原子间的平衡关系遭到破坏,致使原子间的距离减小或增大,晶格局部发生扭曲,引起晶格畸变。晶格畸变将使晶体性能发生改变,强度、硬度和电阻增加,塑性降低。在实践中,常常利用点缺陷来提高金属的强度。

2. 线缺陷

线缺陷是指在晶体的某一平面上沿着某一方向伸展的呈线状分布的缺陷。这种缺陷主要是指各种类型的位错。位错就是在晶体中某处有一列或若干列原子发生了某种有规律的错排现象。位错的类型很多,主要有刃型位错和螺旋位错两种基本形式,其中比较简单的是刃型位错,如图 2-8 所示。

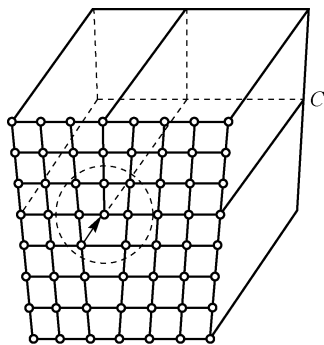


(a)晶格空位



(b)间隙原子

图 2-7 晶体的点缺陷



2-8 晶体的刃型位错示意图

由于位错线周围会产生晶格畸变,只需很小的力位错线就会从一个位置滑移到相邻的另一个位置,在滑移时位错线会相互缠结或合并,因而位错极大地影响着金属的力学性能。

3. 面缺陷

多晶体中,当从一个晶粒过渡到另一个晶粒时,晶界处必然会出现一个原子排列不规则的过渡层,如图 2-9(a)所示。在实际金属晶体的内部,原子不是完全理想的规则排列,而是存在许多尺寸更小、位相差更小的小晶块,它们相互镶嵌成一个晶粒,这些小晶块称为亚晶粒,亚晶粒的交界面称为亚晶界,如图 2-9(b)所示。

面缺陷是指在三维空间中一个方向上尺寸很小,另外两个方向上尺寸较大,呈界面状分布的缺陷。面缺陷主要由晶界和亚晶界引起。

由于晶界、亚晶界处的原子排列较杂乱,所以相对于晶粒内部的原子而言,晶界、亚晶界处的原子有更强的活动能力。当置于腐蚀性介质中时,晶界、亚晶界最容易被腐蚀,而且加热时也首先熔化。同时,晶界、亚晶界处也是位错和低熔点夹杂物聚集的地方,对金属的塑性变形起到阻碍作用,有着较高的强度和硬度。

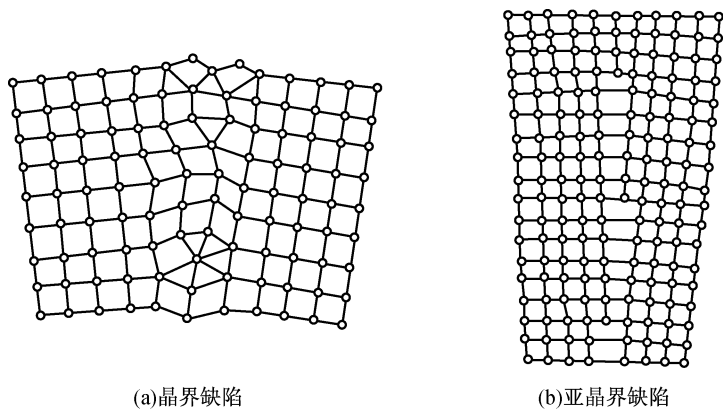


图 2-9 晶体的面缺陷示意图

四、金属的结晶

纯金属具有良好的导电性、导热性和塑性,但价格较贵,同时强度和硬度也较低,种类有限,多数不能满足工业生产中对金属材料多品种、高性能的要求。工业上使用的绝大多数金属材料都是根据需要配置成的各种不同成分的合金。纯金属与合金的结晶过程基本上遵循同样的规律。

金属的结晶是指金属由液态转变为固态的过程,也就是原子由不规则排列的非晶体状态过渡到原子作规则排列的晶体状态的过程。金属的晶体结构是在结晶过程中逐步形成的。

1. 纯金属的结晶

纯金属有一个固定的熔点(或结晶温度),因此,纯金属的结晶是在一定的温度下进行的。常用热分析方法找出液态金属的温度随时间的延长而下降的规律,从而可以得到如图 2-10 所示的冷却曲线。从曲线上可以看出,液态金属随着冷却时间的增加,它的热量向外散失,温度将不断地降低。当冷却到某一温度时,冷却时间虽然增长,但温度并不下降,在曲线上出现了一个平台,这个平台所对应的温度就是纯金属的结晶温度。曲线出现平台的原因是金属结晶过程中释放出的结晶潜热补偿了散失在空气中的热量,使温度不随冷却时间的增长而下降。直到金属结晶结束后,由于不再有潜热补偿向外散失,温度又重新下降。

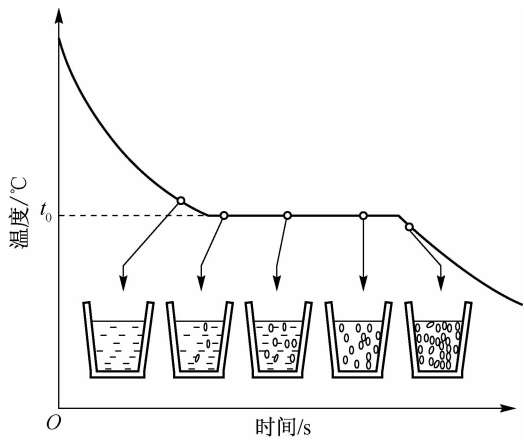


图 2-10 纯金属冷却曲线的绘制过程

纯金属液体在无限缓慢的冷却条件(即平衡条件)下结晶的温度,称为理论结晶温度,用 t_0 表示。在实际生产中,金属由液态结晶为固态时都有较快的冷却速度,金属总是在理论结晶温度以下的某温度时才开始结晶。此时的结晶温度称为实际结晶温度,用 t_1 表示。实际结晶温度低于理论结晶温度的现象称为过冷现象。理论结晶温度与实际结晶温度的差值称

为过冷度,用 Δt 表示,即 $\Delta t = t_0 - t_1$,如图 2-11 所示。

金属结晶时的过冷度不是一个恒定值。液体金属的冷却速度越快,实际结晶温度越低,即过冷度越大。实践证明,金属总是在一定的过冷度下结晶的,所以过冷是金属结晶的必要条件。

2. 纯金属的结晶过程

纯金属的结晶过程是在冷却曲线上平台所对应的时间内发生的,实质上是金属原子由不规则排列过渡到规则排列而形成晶体的过程,它是一个不断形成晶核和晶核不断长大的过程。

1) 形核

当液态金属的温度下降到接近 t_1 时,液体的局部会有一些原子规则地排列起来,形成极细小的晶体,这些小晶体很不稳定,遇到热流和振动就会消失,时聚时散,此起彼伏。当低于理论结晶温度时,稍大一点的细小晶体有了较好的稳定性,就有可能进一步长大成为结晶核心,称为晶核。

晶核的形成有两种方式:一种为自发形核,即如前所述的,液态金属在过冷条件下,由其原子自己规则排列而形成晶核;另一种为非自发形核,即依靠液态金属中某些现成的固态质点作为结晶核心进行结晶的方式。非自发形核在金属结晶过程中起着非常重要的作用。

2) 长大

晶核形成之后,会吸附其周围液体中的原子不断长大,在晶核长大的同时,液体中又会产生新的晶核并长大,直到液态金属全部消失,晶体彼此接触为止。

由于不同方位形成的小晶体与其周围的晶体相互接触,使得小晶体的外形几乎都呈不规则的颗粒状。一般纯金属是由许多晶核长成的外形不规则的晶粒和晶界所组成的多晶体。由于晶界处比晶粒内部凝固得晚,因此,金属中的低熔点杂质往往聚集在晶界上,从而使晶界处的性能不同于晶粒内部。

3. 金属结晶后的晶粒大小

晶粒大小是金属组织的重要标志之一。金属晶粒大小可用单位体积内的晶粒数目来表示,数目越多,晶粒越细小。但为了测量方便,常以单位截面上晶粒数目或晶粒的平均直径来表示。金属的晶粒大小对金属的力学性能有重要影响。一般来说,细晶粒金属比粗晶粒金属具有更高的强度、硬度、塑性和韧性。

金属晶粒越细小,晶界越多、越曲折,晶粒与晶粒之间相互咬合的机会就越多,彼此间的结合力就越强,就越不利于裂纹的传播和扩散,从而使金属组织强度、硬度提高,塑性、韧性也越好。因此,生产中总是希望获得

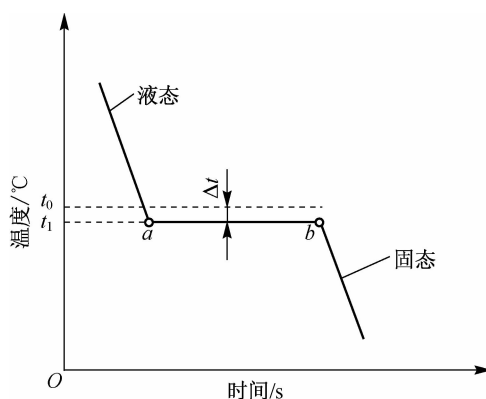


图 2-11 纯金属的过冷现象

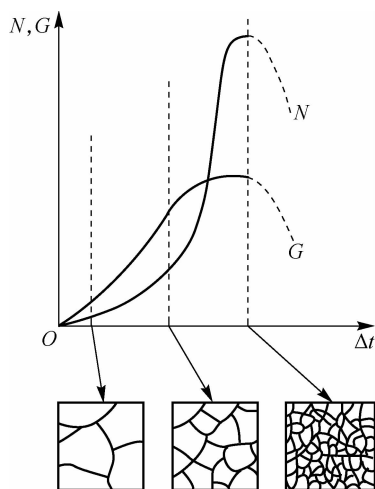


图 2-12 形核率和长大速率与过冷度的关系

细晶组织。为了能够获得细晶组织,实际生产中常采用增大过冷度 Δt 、变质处理、附加振动和降低浇注速度等方法。

1) 增加过冷度

液态金属结晶时的形核率 N 、长大速率 G 与过冷度 Δt 之间的关系如图 2-12 所示。如图中实线部分所示,形核率 N 和长大速率 G 都随过冷度 Δt 的增大而增加,但是形核率的增加比长大速率的增加要快。因此,增加过冷度总能使晶粒细化。

增加过冷度需要提高金属凝固时的冷却速度。实际生产中常采用金属型铸造来提高冷却速度,这种方法只适用于中、小型铸件,对于大型铸件则需要用其他方法来细化晶粒。

2) 变质处理

对于液态金属来说,特别是对于数量多、体积大的液态金属来说,获得大的过冷度是不容易办到的。在液态金属结晶前加入一些细小的被称为变质剂的某种物质,以增加形核率或降低长大速率,从而细化晶粒,这种方法称为变质处理,也称为孕育处理。如往铝液中加入钛、硼,由于生成的 TiB_2 和 $TiAl$ 化合物在结构和尺寸上与铝相近,所以有效地起到外来核心的作用,从而细化了铝的晶粒。有些加入液体金属中的高熔点杂质,不是充当人工核心,而是使晶体生长速度变慢。如在 Al-Si 合金中加入钠盐,同样可以达到细化晶粒的目的。

3) 附加振动

金属结晶时,对金属液附加机械振动、超声波振动、电磁振动等措施,可以增加形核率,也可使生长中的枝晶破碎,而破碎的枝晶尖端又可起晶核作用,从而细化晶粒。

4) 降低浇注速度

在慢速浇注时,液态金属不是在静止状态下进行结晶,先形成的晶粒可能被流动的金属液冲击碎化而成为新的晶核,增加了形核率 N 。因此,降低浇注速度也可达到细化晶粒的目的。

五、合金的结晶

1. 合金的基本概念

合金是指由两种或两种以上的金属元素或非金属元素组成的具有金属特性的物质。

组成合金的最基本的独立单元称为组元。组元可以是金属,也可以是非金属,经熔炼、烧结或其他方法组合而成。给定组元可以按不同比例配制一系列不同成分的合金,构成一个合金系。合金系可以根据构成它的组元命名,如铁碳合金;也可以根据其组元的个数命名,如两个组元组成的合金系称为二元合金。

合金系中具有相同的化学成分、相同的晶体结构、相同的物理和化学性能,并与该系统的其他部分以界面分开的组成部分称为相。液体合金通常为一个相,而纯金属在结晶时具有固态和液态并存的两个相。相与相之间的转变称为相变。

2. 合金的相结构

由于组元间相互作用不同,固态合金的相结构可以分为固溶体和金属化合物。

1) 固溶体

固溶体是指组成合金的组元在液态和固态下均能相互溶解,形成均匀一致的且晶体结构与组元之一相同的固态合金。在各组元中,晶格类型与固溶体相同的组元称为溶剂,其他组元称为溶质。如铁碳合金中的铁素体相是固溶体,由碳原子溶入 $\alpha\text{-Fe}$ 形成,其溶剂为 $\alpha\text{-Fe}$,保持体心立方晶格。碳原子溶入到 $\alpha\text{-Fe}$ 晶格之中,其原有的晶格消失。

2) 金属化合物

由合金组元之间相互化合形成的具有金属特性的一种新相称为金属化合物。其晶体类型和特性完全不同于原来任何一个组元。金属化合物一般用分子式表示。如在铁碳合金中,碳的质量分数超过铁的溶解能力时,多余的碳与铁相互作用形成金属化合物 Fe_3C 。 Fe_3C 的晶格类型不同于铁的晶格,也不同于碳的晶格,是复杂的斜方晶格,如图 2-13 所示。

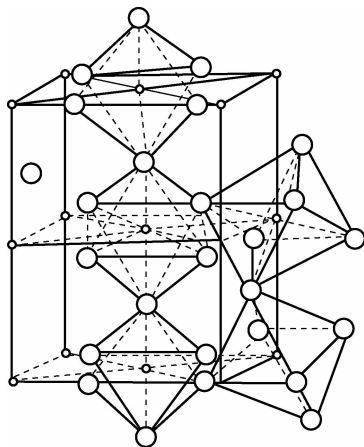


图 2-13 Fe_3C 的晶体结构

3. 合金相图的建立

为了便于研究合金的结晶过程的特点和组织变化规律,需要应用合金相图这一重要工具。合金相图是通过实验方法建立的,先在极缓慢冷却的条件下,作出该合金系中一系列不同成分合金的冷却曲线,确定冷却曲线上的结晶转变温度(临界点),然后把这些临界点在温度-成分坐标中标出,最后把坐标图上的各相应点连接起来,就可得出该合金系的相图。

以铜镍合金为例,用热分析法建立相图的步骤如下:

(1) 配置一系列不同成分的 Cu-Ni 合金,见表 2-1。

表 2-1 Cu-Ni 合金的成分和临界点

合金编号	合金化学成分		合金的临界点	
	$w_{\text{Cu}}/\%$	$w_{\text{Ni}}/\%$	开始结晶温度 $t/^\circ\text{C}$	结晶终了温度 $t/^\circ\text{C}$
1	100	0	1 083	1 083
2	80	20	1 175	1 130
3	60	40	1 260	1 195
4	40	60	1 340	1 270
5	20	80	1 410	1 360
6	0	100	1 455	1 455

(2) 用热分析法测出上述各不同成分合金的冷却曲线,如图 2-14(a)所示,找出冷却曲线上的临界点。

(3) 将各临界点描绘在温度-成分坐标系中,然后连接各相同意义的临界点,所得的线称为相界线。得到的 Cu-Ni 合金相图如图 2-14(b)所示。

相图上的每个点、线、区均有一定的物理意义。相图中的 A、B 点分别为铜和镍的熔点。连接起来的曲线将相图分为三个区。开始结晶温度点的连线为液相线,该线以上为液相区,用符号 L 表示,Cu-Ni 合金均处于液态。结晶终了温度点连线为固相线,该线以下为固相

区,用符号 α 表示,Cu-Ni 合金均处于固态。两曲线之间为液、固两相共存的两相区,用符号 $L+\alpha$ 表示,两相区的存在说明 Cu-Ni 合金的结晶是在一个温度范围内进行的。

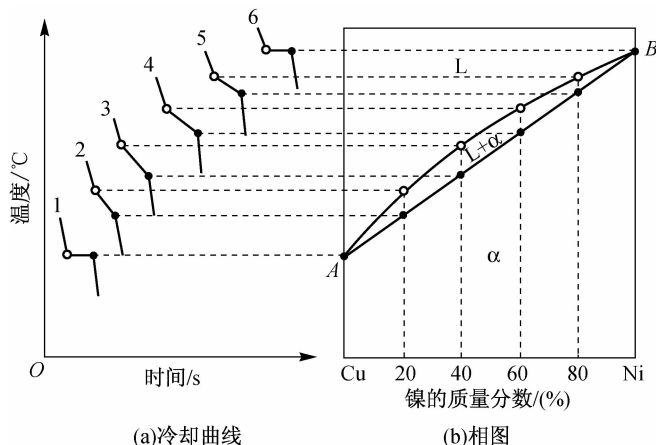


图 2-14 热分析法测定 Cu-Ni 合金相图

4. 二元合金的结晶过程

合金的结晶过程也是在过冷条件下通过形成晶核和晶核长大来完成的。但由于合金成分中包含有两个以上的组元,使其结晶过程和组织比纯金属要复杂得多:一是纯金属的结晶过程是在恒温下进行的,而合金的结晶却不一定在恒温下进行;二是纯金属在结晶过程中只有一个液相和一个固相,而合金在结晶过程中,在不同的温度范围内会存在不同数量的相,且各相的成分有时也会变化;三是同一合金系成分不同,其组织也不同。即便是同一成分的合金,其组织也会随温度的不同而发生变化。

二元合金相图的基本类型有匀晶相图、共晶相图、包晶相图和共析相图等。下面分别利用匀晶相图和共晶相图分析合金的结晶过程。

1) 匀晶相图

当两组元在液态和固态均能无限互溶时,所形成的合金称为二元匀晶合金,所构成的相图称为二元匀晶相图。如图 2-15 所示为 Cu-Ni 匀晶相图。

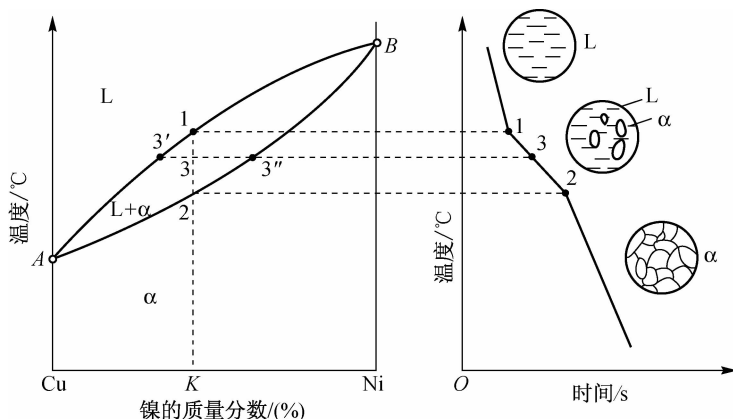


图 2-15 Cu-Ni 匀晶相图

(1)相图分析。图中液相线之上为液相区,固相线之下为固相区,液相线与固相线之间

是液、固两相共存区。A 点是铜的熔点($1\ 083\ ^\circ\text{C}$), B 点是镍的熔点($1\ 455\ ^\circ\text{C}$)。

(2) 结晶过程分析。以图中 K 点成分合金为例进行分析: 合金温度缓慢降至 1 点温度时, 开始从 L 相中结晶出 α 固溶体; 随着温度的下降, α 相增多, L 相减少; 至 2 点时, 结晶过程结束, L 相全部转变为 α 相。

匀晶合金的结晶过程是在一定温度范围内进行的(从 1 点温度开始到 2 点温度结束)。结晶过程中, 液相的成分沿液相线变化, 固相的成分沿固相线变化。如 K 点成分的合金温度缓慢降至 3 点时, 其液相部分具有 3' 点的成分, 而固相部分具有 3'' 点的成分。

(3) 枝晶偏析。固溶体合金在结晶过程中, 只有在极其缓慢的冷却、原子能充分扩散的条件下, 固相的成分才能沿固相线均匀地变化, 最终获得与原合金成分相同的均匀的 α 固溶体。由于实际结晶过程不可能无限缓慢, 原子得不到充分的扩散, 结果在每个晶粒内, 先结晶的固溶体含高熔点组元(如 Cu-Ni 合金中的 Ni)较多, 后结晶的固溶体内含低熔点组元(如 Cu-Ni 合金中的 Cu)较多。这种在一个晶粒内部化学成分不均匀的现象称为枝晶偏析。

枝晶偏析严重影响合金的力学性能和耐蚀性, 要设法消除。生产上一般将铸件加热到固相线以下 $100\sim 200\ ^\circ\text{C}$ 的温度, 保温较长时间后缓慢冷却, 使原子充分扩散, 从而达到成分均匀的目的。这种处理方法称为均匀化退火。

2) 共晶相图

两组元在液态无限互溶, 当冷却到某一温度时, 同时结晶出两种成分不同的固相。把液相在恒温下同时结晶出两个固相的转变称为共晶转变, 具有共晶转变的合金称为共晶合金。发生共晶转变的二元合金相图称为二元共晶相图。Pb-Sn、Pb-Sb、Cu-Ag 等合金的相图均属于二元共晶相图。如图 2-16 所示为 Pb-Sn 二元共晶相图。

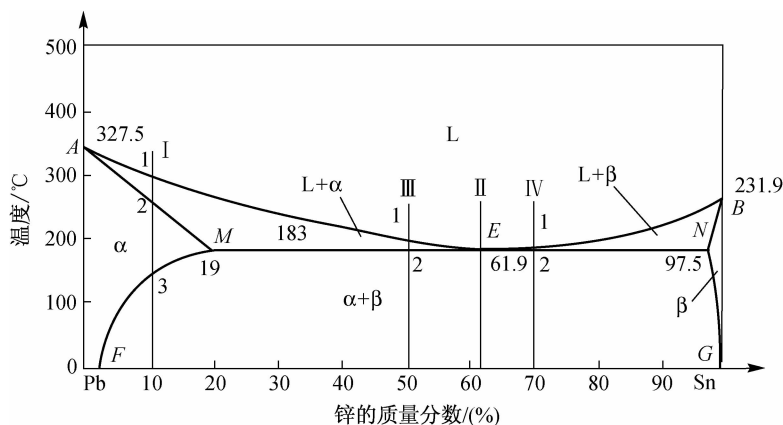


图 2-16 Pb-Sn 二元共晶相图

(1) 相图分析。图 2-16 中 A 点为铅的熔点($327.5\ ^\circ\text{C}$), B 点为锡的熔点($231.9\ ^\circ\text{C}$)。液相线 AEB 以上为液相区, 固相线 AMENB 以下为 α 、 β 固相区。L、 α 、 β 为 Pb-Sn 合金的三个基本相, 其中 α 相为锡溶于铅中形成的有限固溶体, MF 线为锡在铅中的溶解度曲线; β 相为铅溶于锡中形成的有限固溶体, NG 线为铅在锡中的溶解度曲线。相图中的三个两相区为 L+ α 、L+ β 、 α + β 。MEN 线为三相平衡线, 又称为共晶线。共晶温度为 $183\ ^\circ\text{C}$, 在该温度下, E 点成分的液相同时结晶出两种不同的固相。

E 点称为共晶点, 温度为 $183\ ^\circ\text{C}$, $w_{\text{Sn}} = 61.9\%$, 成分在 E 点的合金称为共晶合金, E 点对应的温度称为共晶温度。成分在 ME 之间的合金称为亚共晶合金, 成分在 EN 之间的合金称为过共晶合金。

(2)结晶过程分析。共晶成分的合金在冷却过程中,经过 E 点时发生共晶反应,生成共晶体 $\alpha+\beta$ 。

亚共晶成分的合金如图中合金Ⅲ,在冷却过程中经 1 点时结晶出 α 固溶体,温度在 1~2 点之间,随温度的不断降低, α 固溶体的量不断增多,其成分不断沿 ME 线变化,剩余液相的量不断减少,其成分不断沿 AE 线变化。温度降到 2 点时,剩余液相的成分达到共晶点成分,在共晶温度($183\text{ }^{\circ}\text{C}$)下发生共晶转变,同时结晶出 $\alpha+\beta$ 共晶体,直到液相全部消失为止,此时,合金的组织由先结晶出来的 α 固溶体(称为先共晶相或初晶)和共晶体 $\alpha+\beta$ 组成。继续冷却到 2 点温度以下时,随着温度的降低, α 、 β 的溶解度减小,分别从 α 、 β 中析出 β_{II} 、 α_{II} 两种次生相。 β_{II} 、 α_{II} 都相应地同共晶 α 、 β 连在一起,且数量较少,不影响共晶组织的基本形貌,室温组织仍可视作 $\alpha+\beta$ 。

过共晶成分的合金如图中合金Ⅳ,过共晶合金的平衡结晶过程及组织与共晶成分的合金相类似,不同的是先结晶出来的固相是 β 固溶体。

无共晶反应的合金如图中合金Ⅰ,合金在冷却过程中不会发生共晶反应。在冷却过程中经 1 点时结晶出 α 固溶体,温度在 1~2 点之间,随温度的不断降低, α 固溶体的量不断增多,到达 2 点全部转变为 α 相,温度继续降低,经 3 点时析出 β 相。

六、铁碳合金

铁碳合金是以铁和碳为基本组元组成的合金,是钢和铸铁的统称。由于钢铁材料具有优良的力学性能和工艺性能,因此在现代工业中成为应用最广泛的金属材料。

1. 铁碳合金相图

铁碳合金相图是由实验方法获得的。 $w_{\text{C}} > 6.69\%$ 的铁碳合金在工业上没有实用意义。当 $w_{\text{C}} = 6.69\%$ 时,铁和碳形成较稳定的渗碳体,可作为合金的一个组元。铁碳合金相图就是以纯铁(Fe)为一组元、渗碳体(Fe_3C)为另一组元组成的,故又称为 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图。它描述了铁碳合金在平衡状态下成分、温度与组织之间的关系。简化的铁碳合金相图如图 2-17 所示。

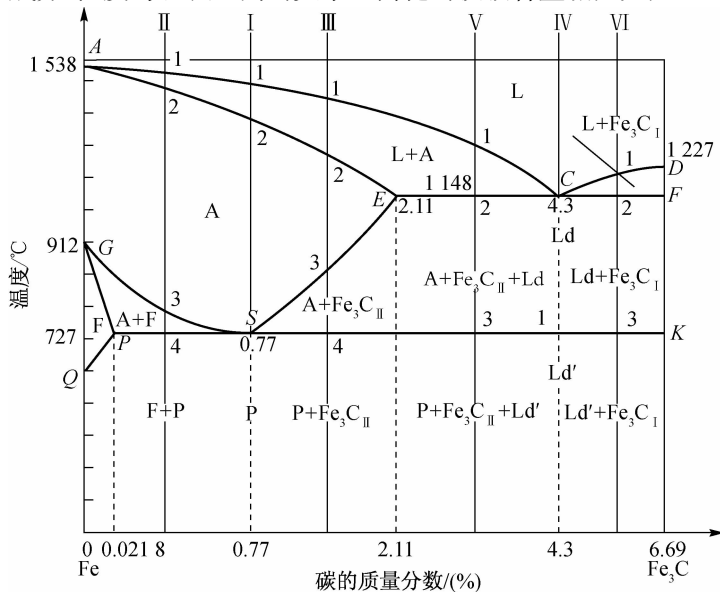


图 2-17 简化的 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图

2. 铁碳合金中的组元和相

1) 纯铁

纯铁熔点为 $1\,538\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度变化时发生同素异构转变。同素异构转变是指在固态下晶格结构随温度变化而发生变化的现象。纯铁的冷却曲线如图 2-18 所示。

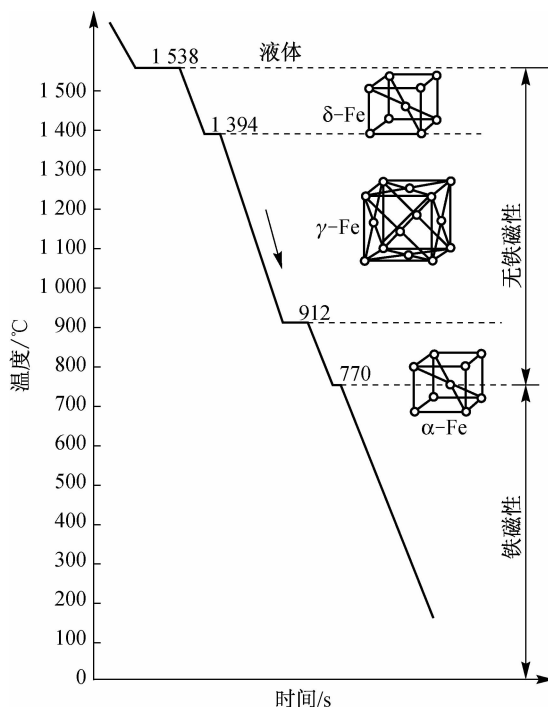
2) 铁的固溶体

碳溶于 $\alpha\text{-Fe}$ 或 $\delta\text{-Fe}$ 中形成的固溶体称为铁素体，用 F 表示。碳在铁素体中的最大质量分数为 $0.021\,8\%$ 。

碳溶于 $\gamma\text{-Fe}$ 中形成的固溶体称为奥氏体，用 A 表示。碳在奥氏体中的最大质量分数为 2.11% 。

3) 渗碳体

渗碳体具有复杂的斜方结构，无同素异构转变。硬度很高，几乎没有塑性，是脆硬相。其在钢和铸铁内呈片状、球状、网状和板状，是碳钢中的主要强化相。渗碳体的量和形状、分布对钢的性能影响较大。



3. 铁碳合金相图主要点、线、区的分析

1) 特性点的分析

铁碳合金相图中的各点的温度、碳的质量分数及含义见表 2-2。

表 2-2 铁碳合金相图的特性点含义

特性点	温度/ $^{\circ}\text{C}$	碳的质量分数/(%)	含 义
A	1 538	0	纯铁的熔点
C	1 148	4.3	共晶点
D	1 227	6.69	渗碳体的熔点
E	1 148	2.11	碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的最大质量分数
G	912	0	$\alpha\text{-Fe}$ 、 $\gamma\text{-Fe}$ 同素异构转变点
P	727	0.021 8	碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的最大质量分数
S	727	0.77	共析点
Q	600	$\approx 0.005\,7$	$600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的最大质量分数

2) 特性线的分析

ACD 线为液相线。液相线以上所有铁碳合金都处于液相。铁碳合金冷却到此线时开始结晶，在 AC 线以下从液相中结晶出奥氏体，在 CD 线以下从液相中结晶出渗碳体，称为一次渗碳体，用 Fe_3C_I 表示。

$AECF$ 线为固相线。液体合金冷却到固相线全部结晶为固体。

ECF 水平线为共晶线。具有共晶成分 ($w_c > 2.11\%$) 的液相在共晶温度 $1\,148\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，要同时结晶出奥氏体与渗碳体的共晶体，称为莱氏体，用 L_d 表示。

PSK 水平线为共析线,通常称为 A_1 线。 $w_C > 0.0218\%$ 的铁碳合金在 PSK 线上都发生共析反应,同时析出铁素体与渗碳体的机械混合物,称为珠光体,用 P 表示。

ES 线为碳在奥氏体中的固溶线,通常称为 A_{cm} 线。从该线可以看出,奥氏体的最大溶碳量在 $1148\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 2.11% ,随着温度的降低,奥氏体的溶碳量逐渐减小,温度为 $727\text{ }^\circ\text{C}$ 时仅为 0.77% 。因此,凡 $w_C > 0.77\%$ 的铁碳合金从 $1148\text{ }^\circ\text{C}$ 冷却到 $727\text{ }^\circ\text{C}$ 时,就有渗碳体从奥氏体中析出,称为二次渗碳体析出,二次渗碳体用 Fe_3C_{II} 表示。

GS 线为冷却时由奥氏体析出铁素体的开始线,通常称为 A_3 线。

PQ 线为碳在铁素体中的固溶线。从该线可看出,铁素体的最大溶碳量在 $727\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 0.0218% ,而在室温下仅为 0.0008% ,几乎不溶碳。因此,铁碳合金从 $727\text{ }^\circ\text{C}$ 冷却到室温时均会从铁素体中析出渗碳体,称为三次渗碳体析出,三次渗碳体用 Fe_3C_{III} 表示。因其数量很少,所以一般不考虑。

3) 铁碳合金相图中的相区

ACD 以上为液相区 L , $AESG$ 为奥氏体区 A , GPQ 为铁素体区 F , AEC 为 $L+A$ 区, CDF 为 $L+Fe_3C_I$ 区, GSP 为 $A+F$ 区。

4. 典型铁碳合金的结晶过程

在铁碳合金相图上, $w_C = 0.0218\% \sim 2.11\%$ 的合金称为碳钢。其中 $w_C = 0.77\%$ 的合金为共析钢, $w_C = 0.0218\% \sim 0.77\%$ 的合金是亚共析钢, $w_C = 0.77\% \sim 2.11\%$ 的合金是过共析钢。 $w_C = 2.11\% \sim 6.69\%$ 的合金称为白口铁。其中 $w_C = 4.3\%$ 的合金是共晶白口铁, $w_C = 2.11\% \sim 4.3\%$ 的合金是亚共晶白口铁, $w_C = 4.3\% \sim 6.69\%$ 的合金是过共晶白口铁。

1) 共析钢

在图 2-17 中合金 I 为共析钢,它在 1 点温度以上为液相,缓慢冷却到 1 点时开始从液相中结晶出奥氏体,奥氏体的数量随温度的下降而增多。冷却到 2 点时液相全部结晶成为奥氏体。2~S 点之间奥氏体没有成分变化,继续缓冷到 S 点,奥氏体发生共析反应,全部转变成珠光体。 $727\text{ }^\circ\text{C}$ 以下时,珠光体基本不发生变化,所以共析钢冷却到室温的最终组织为珠光体。共析钢的结晶过程如图 2-19 所示。

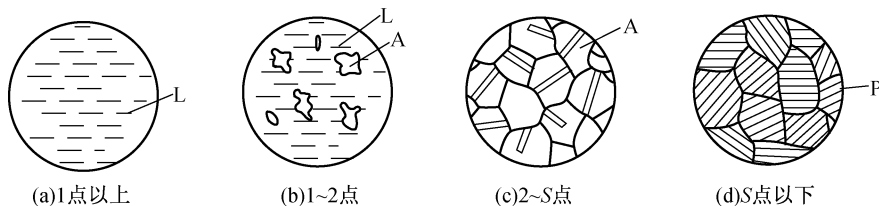


图 2-19 共析钢结晶过程示意图

2) 亚共析钢

在图 2-17 中的合金 II 为亚共析钢。合金 II 冷却到 3 点前的结晶过程与合金 I 相似。冷却到 3 点 (GS 线) 时,从奥氏体中开始析出铁素体,随着温度继续下降,析出的铁素体量逐渐增多,剩余奥氏体量逐渐减少。由于从奥氏体中析出了碳的质量分数极低的铁素体,使未转变的奥氏体的碳的质量分数沿着 GS 线升高。当缓慢冷却到 4 点时,剩余奥氏体碳的质量分数为 0.77% ,将发生共析反应,转变为珠光体,此时先析出的铁素体不变,所以合金 II 冷却到室温时的组织为铁素体和珠光体。亚共析钢的结晶过程如图 2-20 所示。

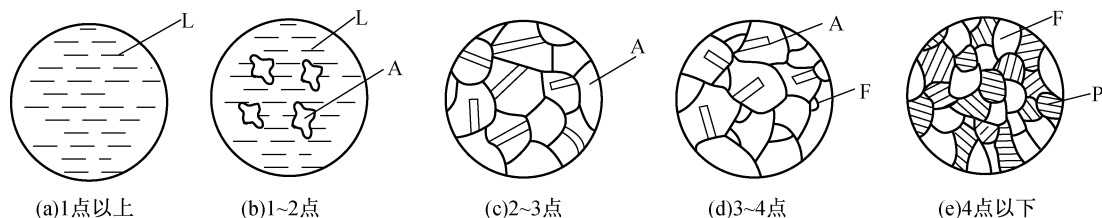


图 2-20 亚共析钢结晶过程示意图

所有亚共析钢在室温下的组织都是铁素体和珠光体,不同的是碳的质量分数越高,珠光体的量越多,铁素体的量越少。

3) 过共析钢

在图 2-17 中合金Ⅲ为过共析钢。合金Ⅲ冷却到 3 点前的结晶过程变化与合金Ⅰ、Ⅱ相同。当冷却到 3 点 (ES 线) 时,奥氏体中开始从晶界处析出渗碳体。随着温度继续降低,二次渗碳体不断地析出,奥氏体中的碳的质量分数沿着 ES 线不断下降。当缓慢冷却到 4 点时,剩余奥氏体碳的质量分数为 0.77%,将发生共析反应,转变为珠光体,所以合金Ⅲ冷却到室温时的组织为二次渗碳体和珠光体,二次渗碳体分布在珠光体的晶界上。过共析钢的结晶过程如图 2-21 所示。

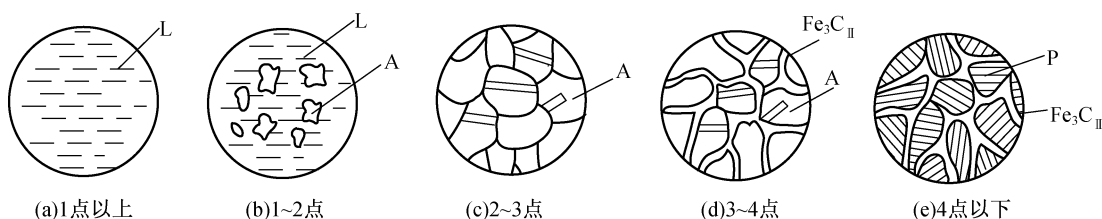


图 2-21 过共析钢结晶过程示意图

4) 共晶白口铁

在图 2-17 中的合金Ⅳ为共晶白口铁。 C 点温度以上为液相,当缓慢冷却到 C 点时,发生共晶转变,形成高温莱氏体,用符号 L_d 表示。继续缓慢冷却,高温莱氏体中的奥氏体的碳的质量分数沿 ES 线减少,不断析出二次渗碳体。 $C \sim 1$ 点之间的组织为高温莱氏体,由奥氏体、二次渗碳体和共晶渗碳体组成。当缓慢冷却到 1 点时,剩余奥氏体碳的质量分数为 0.77%,将发生共析反应,转变为珠光体。高温莱氏体转变为低温莱氏体,用符号 L_d' 表示。其组织由珠光体、二次渗碳体和共晶渗碳体组成,所以合金Ⅳ冷却到室温的组织为低温莱氏体。共晶白口铁的结晶过程如图 2-22 所示。

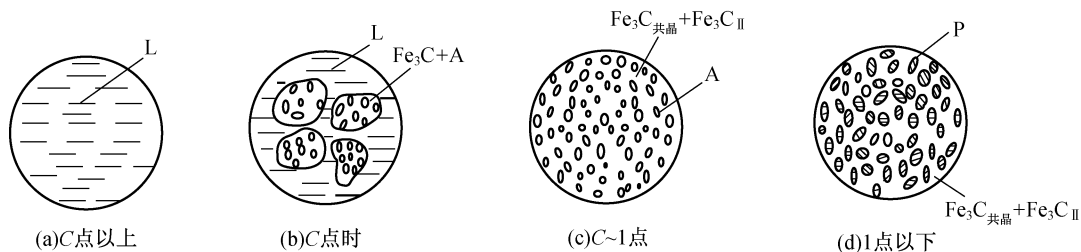


图 2-22 共晶白口铁结晶过程示意图

5) 亚共晶白口铁

在图 2-17 中合金 V 表示亚共晶白口铁。合金在 1 点温度以上为液相, 缓冷至 1 点温度时, 开始从液相中结晶出奥氏体。继续缓冷, 结晶出的奥氏体量不断增多, 而液相量不断减少, 奥氏体的碳的质量分数不断沿 AE 线变化, 液体的碳浓度沿 AC 线变化。温度缓冷至 2 点时, 奥氏体的碳的质量分数为 E 点的成分, 液体的碳浓度为 C 点的浓度, 液体将发生共晶转变。在 2~3 点温度区间, 随着温度的不断下降, 奥氏体的碳的质量分数沿 ES 线变化, 并不断析出二次渗碳体, 因此 2~3 点温度区间内的组织为奥氏体、二次渗碳体和高温莱氏体。缓冷至 3 点时, 碳的质量分数为 0.77% 的奥氏体发生共析转变, 转变为珠光体。最后室温组织为珠光体、二次渗碳体和低温莱氏体。亚共晶白口铁的结晶过程如图 2-23 所示。

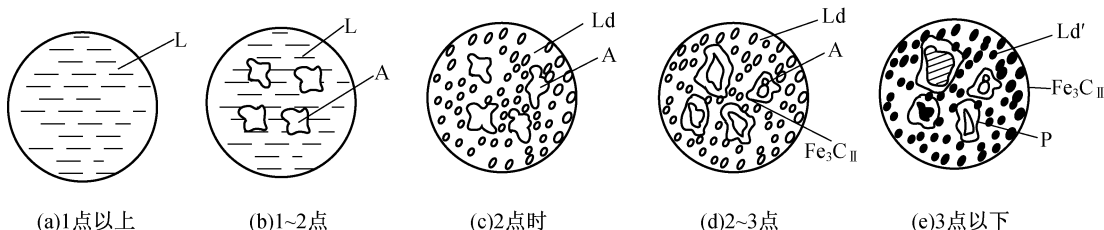


图 2-23 亚共晶白口铁结晶过程示意图

6) 过共晶白口铁

在图 2-17 中合金 VI 为过共晶白口铁。1 点温度以上为液相, 当缓慢冷却到 1 点时, 开始从液相结晶出一次渗碳体, 缓慢冷却到 2 点时, 组织为液相和一次渗碳体。继续冷却, 一次渗碳体不发生成分和结构的变化, 液相与共晶白口铁的转变过程一样。合金 VI 冷却到室温的组织为一次渗碳体和低温莱氏体, 其结晶过程如图 2-24 所示。

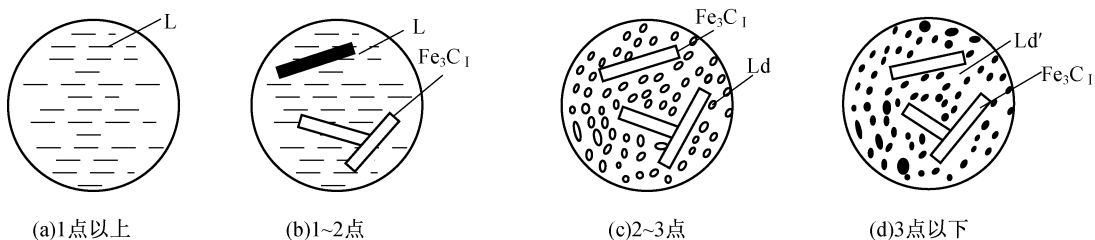


图 2-24 过共晶白口铁结晶过程示意图

5. 铁碳合金的室温组织和性能随成分变化的规律

1) 铁碳合金的室温组织变化

不同成分的铁碳合金在室温时的组织都由铁素体和渗碳体两个基本相组成。但随着碳的质量分数的增加, 铁素体的量减少, 渗碳体的量增加, 且渗碳体的形态和分布也发生变化。在珠光体中的渗碳体以层片状分布, 继而以网状分布在珠光体晶界上最后形成莱氏体时, 渗碳体以针状分布。这就说明不同成分的铁碳合金具有不同的组织, 也决定了其具有不同的性能。

2) 碳的质量分数对铁碳合金性能的影响

渗碳体的硬度高, 一般认为渗碳体是一种强化相。当渗碳体存在于以铁素体为基体的

珠光体中时,可提高其强度和硬度,因此铁碳合金中含珠光体越多,强度和硬度越高,塑性与韧性越低。但在过共析钢中,渗碳体以网状分布在晶界上,以及在白口铁中,渗碳体以基体形式存在时,都使铁碳合金的塑性与韧性大大降低,导致过共析钢和白口铁脆性很高。所以,不同成分的铁碳合金具有不同的室温组织和性能,如图 2-25 所示。

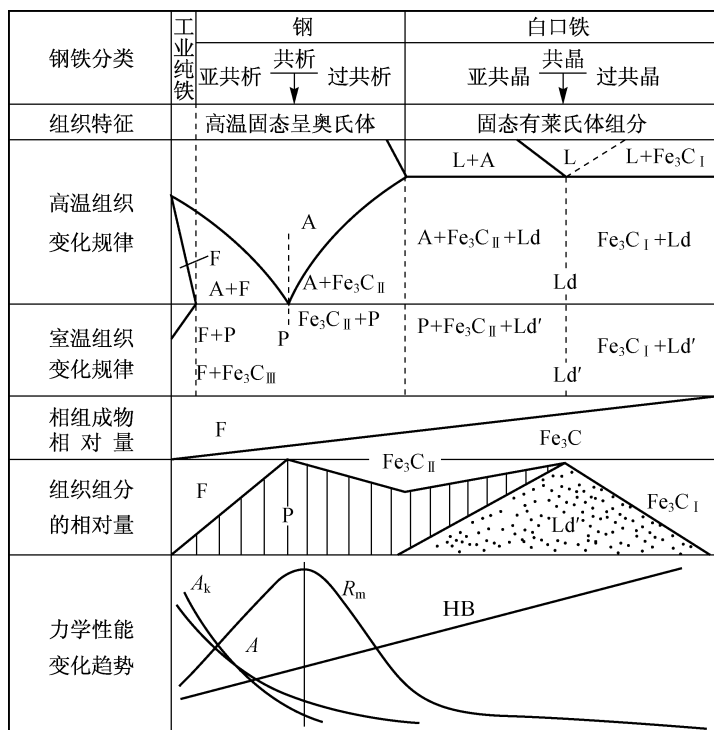


图 2-25 铁碳合金的成分、组织及性能变化规律

从图 2-25 可看出,随着碳的质量分数的增加,硬度直线上升,塑性和韧性不断下降。当碳的质量分数小于 0.9% 时,随着碳的质量分数的增加,强度基本呈直线上升;当碳的质量分数大于 0.9% 时,随着碳的质量分数的增加,强度急剧下降。为了保证工业上使用的碳钢具有一定的塑性和韧性,碳钢的质量分数不能超过 1.3%。碳的质量分数超过 2.11% 的白口铁,其性能硬而脆,难以加工,工业上很少使用。

学习情境二 钢在热处理时的组织转变

热处理是机械制造工艺中一个不可缺少的组成部分,是改善钢材性能和零件的加工工艺性能、提高材料的使用性能、延长零件使用寿命的有效手段。任何一种热处理工艺过程都包括加热、保温和冷却三个阶段,其中保温是加热的继续。因此,要掌握钢的热处理原理,主要就是掌握钢在加热和冷却时的组织转变规律。

一、钢在加热时的组织转变

铁碳合金相图是研究钢热处理的依据,而相图是在极其缓慢加热或冷却条件下得到的。

在实际生产中加热速度和冷却速度都比较快,其临界点、相区等都会有所偏离,如图 2-26 所示。加热速度和冷却速度越快,实际相变温度偏离临界点的程度越大。通常把加热时的实际临界点标为 Ac_1 、 Ac_3 、 Ac_{cm} ,冷却时的实际临界点标为 Ar_1 、 Ar_3 、 Ar_{cm} 。

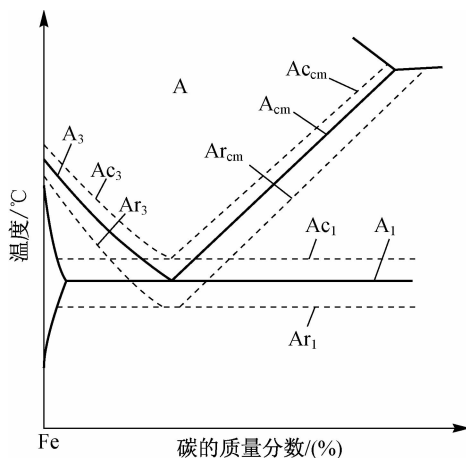


图 2-26 实际加热(冷却)时各临界点的位置

钢进行热处理时,首先要加热,任何钢加热到 A_1 线以上时,都要发生珠光体向奥氏体的转变。这种加热时获得奥氏体的组织转变称为奥氏体化。

1. 奥氏体化的过程

以共析钢为例,将共析钢加热至 Ac_1 温度时,将发生珠光体向奥氏体的转变,其转变过程是一个形核和长大的过程,如图 2-27 所示。

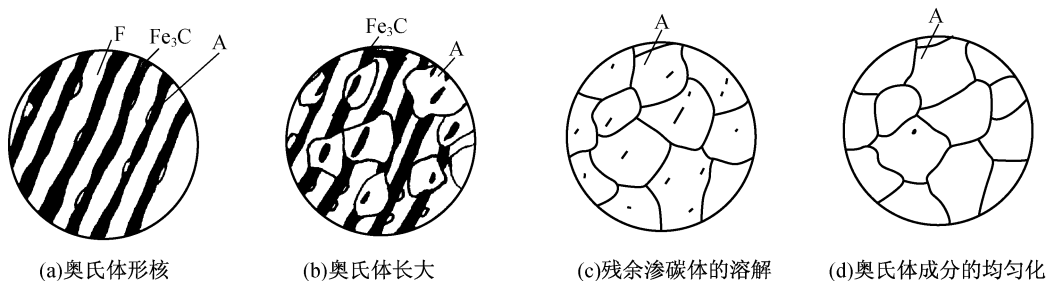


图 2-27 共析钢奥氏体的形成过程

1) 奥氏体的形核

一般在铁素体与渗碳体的相界面上首先形成奥氏体的晶核。这是因为在交界处原子排列比较紊乱,且奥氏体中碳的质量分数介于铁素体和渗碳体之间,所以在两相的交界处为奥氏体的形核提供了良好的条件。

2) 奥氏体的长大

奥氏体晶核形成后,它一面与渗碳体相接,另一面与铁素体相接,依靠铁、碳原子的扩散使其邻近的渗碳体不断溶解,铁素体晶格改组为面心立方晶格来完成晶核的长大。与此同时,新的奥氏体晶核也不断形成并随之长大,直至铁素体全部转变为奥氏体为止。

3) 残余渗碳体的溶解

由于渗碳体的晶格和碳的质量分数都与奥氏体差别很大,所以在奥氏体形成过程中,铁素体比渗碳体先消失,残留的渗碳体还需要一段时间才能完全溶解。

4) 奥氏体成分的均匀化

在刚形成的奥氏体晶粒中,原来渗碳体片层处比铁素体片层处碳的质量分数要高一些,碳原子的扩散就需要一定的时间。只有经过一定时间的保温才能得到成分均匀的奥氏体晶粒。

2. 奥氏体晶粒的长大

奥氏体化完成后,继续在较高温度下加热或进行长时间保温,奥氏体的晶粒容易长大。钢在加热时获得的奥氏体晶粒大小,直接影响到冷却后转变产物的晶粒大小和力学性能。加热时获得的奥氏体晶粒细小,冷却后转变产物的晶粒也细小,其强度、塑性和韧度较好;反之,粗大的奥氏体晶粒冷却后转变产物的晶粒也粗大,其强度、塑性较差,特别是韧度显著降低。因此,奥氏体晶粒的大小是评定热处理加热质量的主要指标之一。

钢加热到临界温度以上,奥氏体转变刚结束时的晶粒大小称为起始晶粒。起始晶粒总是细小的,随着继续加热或保温,它就会长大。因此,必须严格控制加热温度和保温时间,保证奥氏体晶粒不会过分粗大。

二、钢在冷却时的组织转变

冷却是热处理的关键工序。钢经奥氏体化后,在不同的冷却条件下可使钢获得不同的力学性能,因此,要正确制定热处理工艺,必须掌握钢在冷却时的组织转变规律。

在热处理生产中,等温冷却和连续冷却为两种常用的冷却方式,如图 2-28 所示。

等温冷却是将奥氏体迅速冷却到 A_1 以下某一温度进行保温,使奥氏体发生转变,然后再冷却到室温;连续冷却是将奥氏体自高温连续冷却到室温。

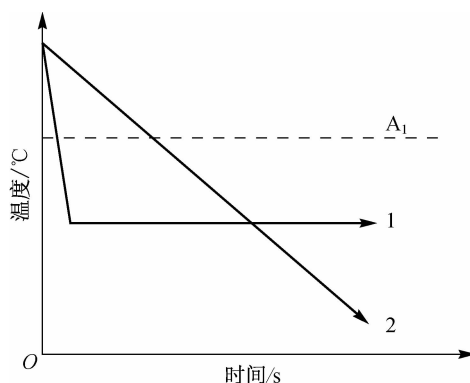


图 2-28 冷却方式示意图

1—等温冷却; 2—连续冷却

1. 过冷奥氏体的等温转变

过冷奥氏体就是在共析温度以下存在的奥氏体,它处于不稳定状态,用符号 A' 表示。

下面以共析钢为例来说明钢在等温冷却时的组织转变。

1) 过冷奥氏体的等温转变图

过冷奥氏体的等温转变图是表示过冷奥氏体在不同过冷度下的等温过程中,转变温度、转变时间与转变产物量的关系曲线图。因其形状与字母“C”形状相似,所以又称为 C 曲线。它可以通过实验方法得到。

把共析钢制成若干个尺寸相同的薄片试样,加热到 A_{c1} 温度以上使其奥氏体化。然后分别迅速放入低于 A_1 的不同温度(如 700°C 、 650°C 、 550°C 、 500°C 、 450°C 、 350°C …)的等温槽中,迫使过冷奥氏体发生转变。测出不同温度下过冷奥氏体转变开始和终了的时间,把

它们按相应的位置标记在温度-时间坐标图上,然后将所有的开始转变点和终止转变点分别连成光滑曲线,便可得到过冷奥氏体等温转变图,如图 2-29 所示。

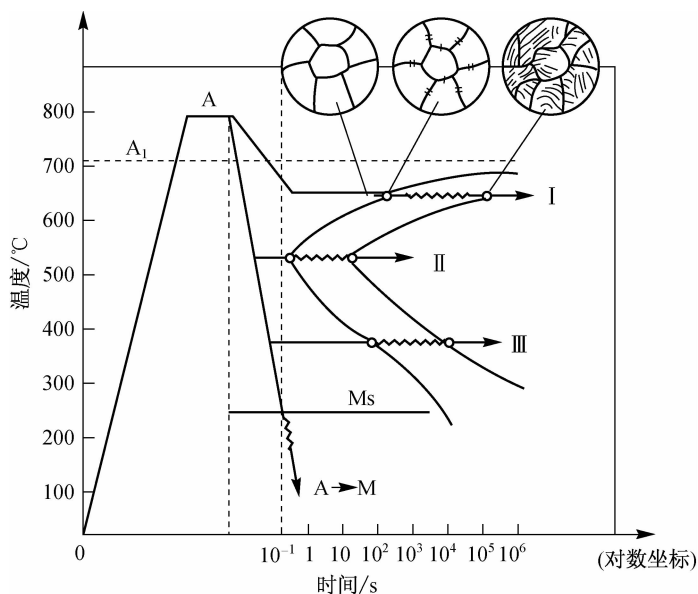


图 2-29 共析钢过冷奥氏体等温转变图的建立

如图 2-30 所示为共析钢过冷奥氏体等温转变图。两条 C 曲线中,左边的一条为过冷奥氏体转变开始线,右边一条为转变终了线,其右侧为转变产物区,两条 C 曲线之间为过冷奥氏体部分转变区。从图中可以看出, A_1 以上是奥氏体稳定区域;在 A_1 以下,转变开始线以左,由于过冷现象,奥氏体仍能存在一段时间,这段时间称为孕育期。孕育期的长短标志着过冷奥氏体的稳定性的。曲线的拐弯处(550 °C 左右)俗称为“鼻尖”,孕育期最短,过冷奥氏体稳定性最差。鼻尖将曲线分为上下两部分,上部称为高温转变区,下部称为中温转变区。

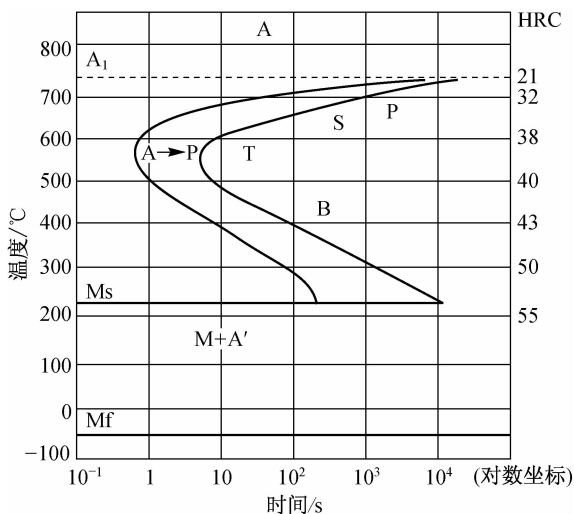
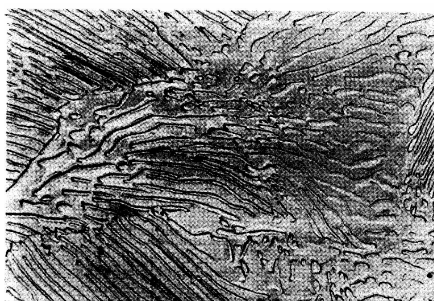


图 2-30 共析钢过冷奥氏体等温转变图

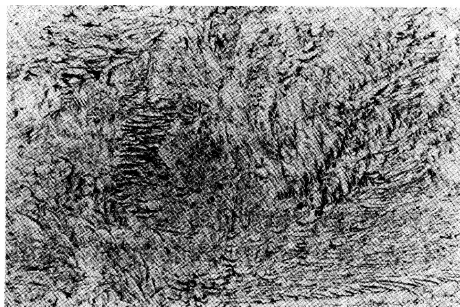
2) 过冷奥氏体等温转变产物的组织和性能

过冷奥氏体等温转变的温度不同,其转变特征和产物也不同。根据转变产物的不同,过冷奥氏体的等温转变分为珠光体型转变、贝氏体型转变和马氏体型转变。

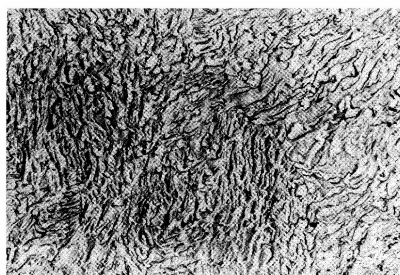
(1) 珠光体型转变。过冷奥氏体在 A_1 到鼻部的温度范围内等温冷却时,将发生珠光体型转变,转变产物为铁素体薄层和渗碳体薄层交替重叠的层状组织,即珠光体组织。随着转变温度的降低和过冷度的增大,珠光体晶粒将细化,片层间距变小,硬度提高。珠光体组织通常分为三种:在 $A_1 \sim 650^\circ\text{C}$ 形成较粗大的珠光体,仍称为珠光体;在 $650^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ 形成细珠光体,称为索氏体,用符号 S 表示;在 $600^\circ\text{C} \sim 550^\circ\text{C}$ 形成极细珠光体,称为托氏体,用符号 T 表示。其结构如图 2-31 所示。



(a) 珠光体



(b) 索氏体



(c) 托氏体

图 2-31 共析钢过冷奥氏体珠光体型转变组织

(2) 贝氏体型转变。过冷奥氏体在 $550^\circ\text{C} \sim M_s$ 温度范围内等温冷却时,将发生贝氏体型转变,转变产物为由含碳过饱和的铁素体和弥散分布的渗碳体组成的组织,即贝氏体组织,用符号 B 表示。等温温度不同,贝氏体的形态也不同。因此,贝氏体可分为上贝氏体和下贝氏体两种形态。在 $550^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ 之间形成的贝氏体为上贝氏体,其形态为在平行排列的条状铁素体之间均匀分布着细小的短杆状渗碳体,如图 2-32 所示,其塑性较差,脆性大,无实用价值;在 $350^\circ\text{C} \sim M_s$ 之间形成的贝氏体为下贝氏体,其形态为在针状铁素体基体上均匀分布的极细小的渗碳体,如图 2-33 所示,其韧度良好,综合力学性能较高。

(3) 马氏体型转变。在 M_s 以下温度范围内冷却,转变产物主要为马氏体。马氏体是碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中所形成的过饱和固溶体,用符号 M 表示。马氏体的硬度取决于碳的过饱和程度,即随着碳的质量分数增加,其强度明显增高。

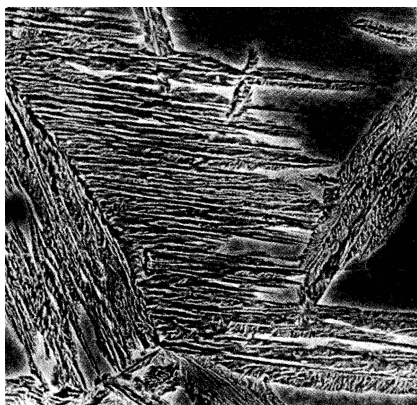


图 2-32 上贝氏体

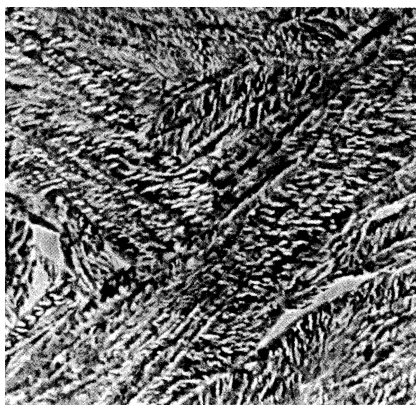


图 2-33 下贝氏体

3) 亚共析钢和过共析钢的等温转变图

亚共析钢和过共析钢的过冷奥氏体在转变为珠光体之前,要分别析出先析铁素体和先析渗碳体。因此,与共析钢相比,亚共析钢和过共析钢的等温转变图均多了一条先析相的析出线,如图 2-34 所示。同时 C 曲线位置也相对左移,说明亚共析钢和过共析钢过冷奥氏体的稳定性比共析钢差。

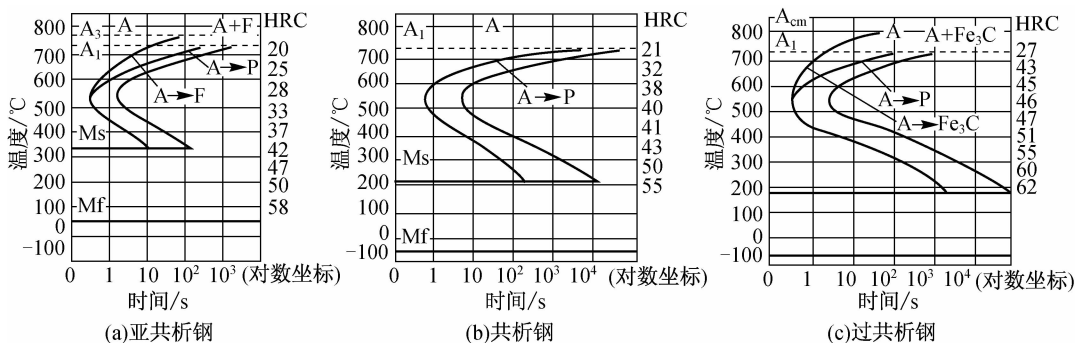


图 2-34 亚共析钢、共析钢和过共析钢的等温转变图

2. 过冷奥氏体的连续冷却转变

1) 奥氏体连续冷却转变图

连续冷却转变图是表示钢经奥氏体化后,在不同冷却速度的连续冷却条件下,过冷奥氏体转变开始及转变终了时间与转变温度之间的关系曲线图。

2) 过冷奥氏体连续冷却转变产物的组织和性能

由于连续冷却转变图的测定比较困难,生产中常借用同种钢的等温转变图来分析过冷奥氏体连续冷却转变产物的组织和性能,即将连续冷却曲线与 C 曲线相交,根据相交的大致位置来判断连续冷却后的组织和性能,如图 2-35 所示。由图 2-35 可知, v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 相应的产物分别为 P、S、M+T、M+A'。

冷却速度 v_K 表示使过冷奥氏体在连续冷却过程中不分解而全部冷却至 Ms 温度以下转变为马氏体的最小冷却速度,即钢在淬火时为抑制非马氏体转变所需的最小冷却速度,称为马氏体临界冷却速度。

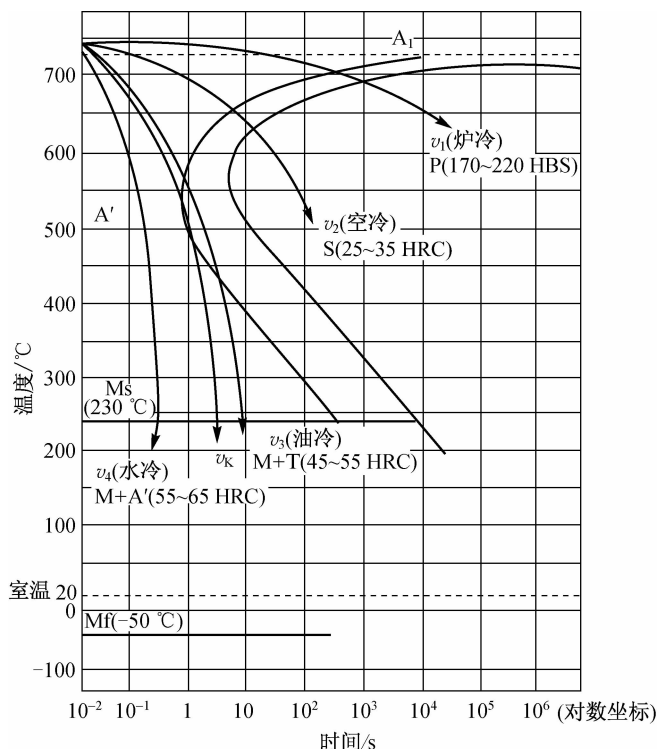


图 2-35 冷却速度线在等温转变图上的应用

学习情境三 钢的退火与正火

退火和正火一般是工件整个加工过程的中间热处理,以消除前一道工序(如铸造、锻造、轧制、焊接等)所带来的各种组织或性能上的缺陷,并为后一道工序和最终热处理做组织准备,故又称为预备热处理。但对于少数要求不高的铸、锻件亦可作为最终热处理。

一、钢的退火

将钢加热到适当温度,保持一定时间,然后缓慢冷却的热处理工艺称为退火,又称为焖火。退火的主要目的是细化晶粒,均匀钢的组织及成分,改善钢的性能及为以后的热处理做准备;降低钢的硬度,提高塑性,以利于切削加工及冷变形加工;消除钢中的残余应力,以防止变形及开裂。常用的退火方法可分为完全退火、球化退火和去应力退火等。

1. 完全退火

完全退火是将钢完全奥氏体化后缓慢冷却,获得接近平衡状态组织的退火工艺。

完全退火的加热温度为 A_{c3} 线以上 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于加热时钢的组织完全奥氏体化,在以后的缓冷过程中奥氏体全部转变为细小而均匀的平衡组织,从而降低钢的硬度,细化晶粒,充分消除内应力。

完全退火后的组织为铁素体加珠光体,主要用于亚共析钢结构件。一般件做最终热处理,重要件做预先热处理。

过共析钢不宜采用完全退火,因为过共析钢完全退火需加热到 A_{cm} 以上,在缓慢冷却时,钢中将析出网状渗碳体,使钢的力学性能和切削加工性能降低。

2. 球化退火

使钢中碳化物球状化而进行的退火工艺称为球化退火。球化退火的加热温度为 A_{c1} 以上 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温后的冷却有两种方式:普通球化退火时采用随炉缓冷至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷;等温球化退火则先在 A_{c1} 以下 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温足够时间,然后再随炉缓冷至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷。球化退火组织是呈球状小颗粒的碳化物(或渗碳体)均匀地分布在铁素体基体中。

共析钢和过共析钢经轧制、锻造后空冷,一般为细片状珠光体与二次渗碳体组织,其硬度较高,切削加工时刀具容易磨损,淬火时易于变形开裂。球化退火能降低硬度,改善工件的切削加工性;减少淬火时的变形、开裂倾向;淬火后能获得细针马氏体加粒状渗碳体,提高零件的力学性能,延长零件的使用寿命。因此,工具钢、轴承钢等锻轧后必须进行球化退火。

3. 去应力退火

内应力是指在没有外力作用时存在于物体内部的应力。一般当加热、冷却不均匀及冷加工变形时,都能产生内应力。

为了去除由于塑性变形加工、焊接等造成的应力以及铸件内存在的残余应力而进行的退火称为去应力退火。去应力退火的加热温度一般为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温后随炉缓冷至室温。

由于加热温度在 A_1 以下,因此去应力退火过程中一般不发生相变。去应力退火广泛用于消除铸件、锻件、焊接件、冷冲压件以及机加工件中的残余应力,以稳定钢件的尺寸,减少变形,防止开裂。

二、钢的正火

将工件奥氏体化后在空气中冷却的热处理工艺,称为正火。

正火的目的是细化晶粒、均匀组织、调整硬度和消除网状的二次渗碳体组织,与退火相似。正火冷却速度较快,过冷度较大,因此,正火组织的晶粒比较细小,强度、硬度比退火后要略高一些。

正火工艺简单、经济,主要用于以下几个方面。

- (1) $w_c < 0.5\%$ 的锻件,常用正火代替退火,以改善组织结构和切削加工性能。
- (2) 过共析钢常用正火来消除网状渗碳体,为球化退火做组织准备。
- (3) 亚共析钢在淬火前先进行正火,可使组织细化,能减少淬火的变形和开裂倾向。
- (4) 对力学性能要求不高的零件,常用正火作为最终热处理。

学习情境四 钢的淬火与回火

淬火与回火通常紧密地配合在一起,是在生产中广泛应用的热处理工艺,是强化钢材、提高机械零件使用寿命的重要手段。通过淬火和适当温度的回火相配合,可以获得不同的组织和性能,满足各类零件或工具对使用性能的不同要求。

一、钢的淬火

淬火是将钢加热到 A_{c3} 或 A_{c1} 以上某一温度,保持一定时间,然后以不小于临界冷却速度冷却,获得马氏体或下贝氏体组织的热处理工艺。

1. 淬火加热温度和保温时间的选择

碳钢的淬火加热温度可根据铁碳合金相图来确定。亚共析钢适宜的淬火温度为 A_{c3} 以上 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$;共析钢、过共析钢适宜的淬火温度为 A_{c1} 以上 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,如图 2-36 所示。合金钢在碳钢的基础上还要考虑合金元素的影响,加热温度可根据其相变点来选择。但由于大多数合金元素在钢中都具有细化晶粒的作用,因此合金钢的淬火温度可以适当提高。

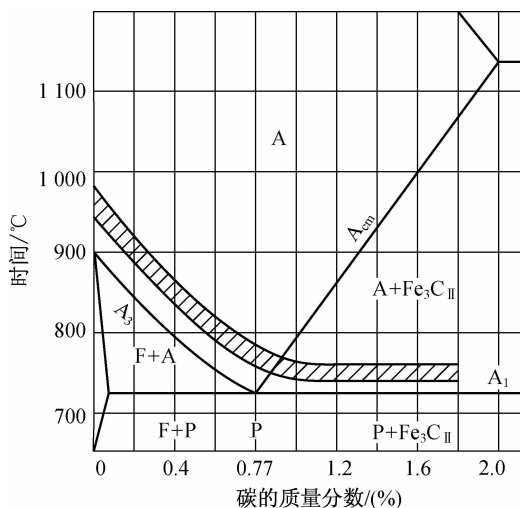


图 2-36 碳钢的淬火加热温度范围

确定淬火加热保温时间要综合考虑许多因素,如零件成分、结构形状、尺寸大小、性能要求,以及加热速度、加热炉功率、装炉量等。原则上以“烧透”(即零件内外均达到同一加热温度)为准。

2. 淬火介质

钢件进行淬火冷却所使用的介质称为淬火介质。淬火介质应具有足够的冷却能力、良好的冷却性能和较宽的使用范围,同时还应具有不易老化、不腐蚀零件、不易燃、易清洗、无公害、价廉等特点。

目前常用的淬火介质有水、矿物油、水溶性的盐类和碱类等。

淬火用水应为较干净的水,冷却能力大,但水容易造成工件的变形和开裂。随着水温的升高,其冷却能力将下降,生产中一般不允许超过 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

淬火用油为各种矿物质油。油温一般控制在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为宜。油的冷却能力低于水,但有利于减少变形。

为了减少零件淬火时的变形,也可采用盐浴做淬火介质。

淬火介质的选择主要考虑零件的尺寸形状和钢的淬透性。一般原则是碳钢水淬,合金钢油淬;大件水淬,小件油淬;简单件水淬,复杂件油淬。

3. 淬火方法

在实际生产中,目前还没有一种淬火介质能完全满足理想淬火冷却的要求,因此需考虑淬火方法。常用的淬火方法有以下几种。

1) 单液淬火法

将零件加热到淬火温度,保温后投入一种淬火介质中冷却至转变结束,称为单液淬火。

水淬、油淬都属于单液淬火法,操作方便,容易实现机械化、自动化,然而都存在一定的局限性。水淬可得到较深的淬硬层与高的硬度,但变形和开裂的倾向大。油淬的淬硬层薄,一般适用于形状简单、性能要求不太高的零件。

2) 双介质淬火法

双介质淬火是将钢件奥氏体化后,先浸入一种冷却能力强的介质中,待零件冷却至C曲线鼻部以下、 M_s 线以上温度区间时,再将零件马上淬入另一种冷却能力较弱的介质中冷却,如先水后油。

双介质淬火法既能保证淬硬,又能减少产生变形和裂纹的倾向。但操作较难掌握,主要用于形状较复杂的碳钢件和形状简单、截面较大的合金钢件。

3) 分级淬火

钢材奥氏体化后,随之投入温度在钢的 M_s 点左右的液态介质(盐浴或碱浴)中,保持适当时间,待钢件的内外层都达到介质温度后取出空冷,以获得马氏体组织。

马氏体分级淬火既避免高温时奥氏体分解,又达到低温时缓慢冷却的目的,减小了淬火内应力,且硬度均匀。分级淬火是防止变形和开裂的有效淬火方法。

马氏体分级淬火法在工艺上虽然比较理想,操作容易,但由于它在盐浴或碱浴中的冷却速度较慢,故只适用于形状复杂或尺寸较小的零件。

4) 等温淬火

钢件奥氏体化后,随之快冷到贝氏体转变温度区间($400\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$)等温冷却,使奥氏体转变为下贝氏体组织后再空冷的淬火方法称为等温淬火。

下贝氏体组织具有高硬度和良好的韧度。等温淬火处理的内应力显著下降,变形量小,但生产周期较长。常用于形状复杂,尺寸要求精确,强度、韧度要求较高的小型钢件,如各种模具、成形刀具和弹簧等。

各种淬火方法的冷却速度如图 2-37 所示。

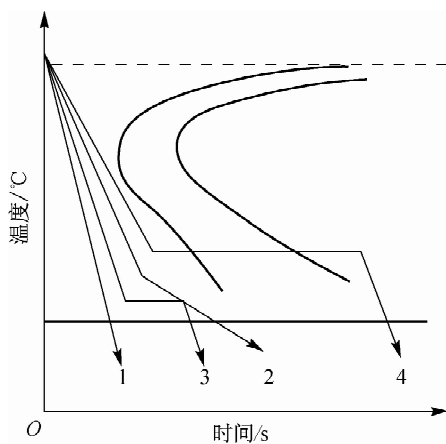


图 2-37 各种淬火方法的冷却速度

1—单液淬火；2—双介质淬火；
3—分级淬火；4—等温淬火

4. 钢的淬透性和淬硬性

淬透性是指在规定条件下,决定钢材淬硬深度和硬度分布的特性。它是重要的热处理工艺性能,淬透性的高低表示了钢接受淬火的能力,常用淬硬层深度表示,淬硬层深度是指钢表面到半马氏体(50%马氏体)组织的深度。

淬透性主要由钢的临界速度 v_k 决定。 v_k 越小,钢的淬透性越好。临界冷却速度与钢的化学成分、奥氏体化的温度及保温时间等都有密切的关系。如在碳钢中,共析钢的淬透性最

好。亚共析钢随着碳的质量分数的增加,其淬透性增加;过共析钢随着碳的质量分数的增加,其淬透性降低。除钴外,大多数合金元素如铬、钼、硅、镍、锰等都能显著提高钢的淬透性,即合金钢的淬透性高于碳素钢。提高奥氏体化温度和延长保温时间,会使奥氏体成分均匀,晶粒粗大,过冷奥氏体稳定性提高,马氏体临界冷却速度减小,淬透性提高。此外,采用的冷却介质也影响着钢的淬透性。

淬透性好的钢,经淬火、回火后组织均匀一致,具有良好的综合力学性能,有利于钢材潜力的发挥。同时,淬透性好的钢淬火时可采用低的冷却速度缓冷,以减少变形与开裂。

淬硬性是指钢在淬火时能达到最高硬度的能力。淬硬性取决于马氏体中碳的质量分数, w_C 越高,淬硬性越好。

二、钢的回火

钢的回火和淬火是密不可分的,淬火后必须立即回火,间隔时间不宜超过 1 h。回火是将淬火钢重新加热到 A_{c1} 以下某一温度,保温后冷却下来的一种热处理工艺。

1. 回火的目的

1) 获得所需要的力学性能

在通常情况下,工件淬火后强度和硬度有很大的提高,但塑性和韧性却明显降低,而工件的实际工作条件要求有良好的强度和韧性。选择适当的温度进行回火后,可以获得所需要的力学性能。

2) 稳定组织和尺寸

淬火后钢的组织中的马氏体和残留奥氏体有自发转变的趋势,只有经回火后才能稳定组织,使工件在使用过程中的性能与尺寸得到稳定。

3) 消除内应力

一般淬火后钢的内部存在很大的内应力,如不及时消除,将引起工件的变形与开裂。

2. 常用的回火方法

1) 低温回火

在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行的低温回火工艺,所得组织为回火马氏体,基本保持了马氏体的高硬度、高耐磨性,同时提高了韧性,降低了内应力。低温回火主要用于刀具、模具、量具、滚动轴承、渗碳件或表面淬火的零件。

2) 中温回火

在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行的中温回火工艺,所得组织为回火托氏体,硬度为 $35\sim 45\text{ HRC}$ 。中温回火后具有高的弹性极限和屈服点,同时有较好的韧性,消除了淬火应力。中温回火主要用于各种弹簧、弹簧夹头及某些要求较高强度的零件,如刀柄、轴套等。

3) 高温回火

在 $550\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行的高温回火,所得组织为回火索氏体,硬度为 $25\sim 40\text{ HRC}$ 。高温回火后钢具有一定的强度、硬度,又有较好的塑性、韧性。高温回火主要用于受力复杂的重要结构件。

淬火及高温回火的复合工艺称为调质处理。经调质处理的钢与正火钢相比,不仅强度高,而且塑性、韧性也高。

学习情境五 钢的表面淬火和化学热处理

在冲击载荷、交变载荷及摩擦条件下工作的齿轮、曲轴等零件,要求表面具有高硬度和耐磨性,心部具有足够的塑性和韧性。要满足上述要求,如果仅从选材方面去解决是很困难的。如果采用高碳钢,硬度虽高,但心部韧性不足;如果用低碳钢,心部韧性虽好,但表面硬度低,不耐磨。为此,工业上广泛采用表面热处理。

表面热处理是仅对工件表层进行热处理,以改变其组织和性能的工艺。它包括表面淬火和化学热处理两类。表面淬火只改变表面组织而不改变表面成分;化学热处理同时改变表面成分和组织。

一、钢的表面淬火

表面淬火是指把工件表层迅速加热到淬火温度进行淬火的工艺。经表面淬火后,工件表层得到马氏体组织,具有高的硬度和耐磨性,而心部仍为淬火前的组织,具有足够的强度和韧性。因此,表面淬火主要用于要求表面具有高硬度、高耐磨性,而心部具有足够强度和韧性的零件,如齿轮、轴类零件。

根据加热方法的不同,常用的表面淬火方法有感应加热表面淬火和火焰加热表面淬火等。

1. 感应加热表面淬火

感应加热表面淬火是利用感应电流通过工件所产生的热效应,使工件表面、局部或整体加热并进行快速冷却的淬火工艺,它是目前应用较为广泛的表面淬火方法。

1) 感应加热表面淬火的基本原理

如图 2-38 所示,在一个感应线圈中,通过一定频率的交流电,在线圈内外将会产生一个频率相同的交变磁场。将工件放入线圈内,在工件内部产生同频率的感应电流(涡流)。由于感应电流的集肤效应(电流集中分布在工件表面)和热效应,使工件表层迅速加热到淬火温度,而心部仍处于相变点温度以下,随即快速冷却,从而达到表面淬火的目的。

2) 感应加热表面淬火的特点

与普通加热淬火相比,感应加热表面淬火具有如下特点。

(1) 加热速度快,只需几秒至几十秒就可将工件表层一定深度加热至淬火温度,使表层获得晶粒细小的奥氏体组织。淬火后表层组织为细隐晶马氏体,表面硬度比普通淬火高 2~3 HRC,且脆性较小。

(2) 因加热时间短,减少了工件的氧化脱碳。

(3) 因工件内部并未加热,淬火变形小。

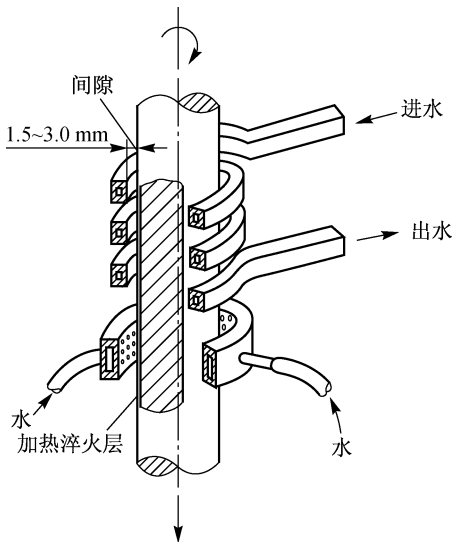


图 2-38 感应加热表面淬火示意图

(4)易于控制淬硬层深度,可满足各种工件对淬硬层深度的不同要求。

(5)便于机械化和自动化生产,生产率高,适于大批量生产。

但感应加热表面淬火设备比较昂贵,零件形状复杂时感应器制造困难,因此不适于单件小批量生产。

2. 火焰加热表面淬火

火焰淬火是应用氧-乙炔(或其他可燃气体)火焰对零件表面进行快速加热,随之快速冷却的工艺,如图 2-39 所示。

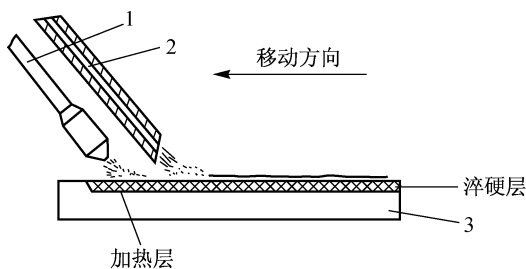


图 2-39 火焰淬火示意图

1—烧嘴; 2—喷水管; 3—工件

火焰淬火的淬硬层深度一般为 2~6 mm。火焰淬火的设备简单,工艺灵活,淬硬速度快,变形小,但淬火质量不稳定,加热温度和淬硬层深度难以控制,容易过热,因而使用上有一定的局限性。火焰淬火适用于单件、小批量生产以及大型工件(如大模数齿轮、大轴轴颈等)的表面淬火。

二、钢的化学热处理

钢的化学热处理是将钢铁零件置于一定温度的化学活性介质中加热、保温,通过向钢的表层渗入一种或几种合金元素,改变钢的表层化学成分,从而使钢零件表面具有某些特殊的力学性能或物理、化学性能的热处理工艺。

化学热处理的种类很多,根据渗入元素的不同,化学热处理有渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗金属等。不论哪一种方法都包含以下三个基本过程。

(1)分解。在一定的温度下,介质发生化学分解,产生能被零件表面吸收的活性原子。

(2)吸收。活性原子先吸附在零件的表面,然后被零件表面吸收。

(3)扩散。表面吸收了活性原子后,渗入元素的浓度升高,表层和内部形成显著的浓度差。在一定的温度下,原子沿着浓度下降的方向扩散,形成一定厚度的扩散层。

钢的化学热处理常用的工艺方法有渗碳、渗氮和碳氮共渗三种。

1. 钢的渗碳

将工件在渗碳介质中加热、保温,使碳原子渗入表层,提高工件表层碳的质量分数并形成一定的碳浓度梯度的化学热处理工艺称为渗碳。

为保证工件渗碳后表层具有高的硬度和高的耐磨性,而心部具有良好的韧度,渗碳零件一般为碳的质量分数是 0.1%~0.25%的低碳钢和低碳合金钢。

按照使用的渗碳剂不同,渗碳方法可分为气体渗碳、固体渗碳和液体渗碳三种。其中气体渗碳方法生产效率高,渗碳过程容易控制,在当前生产中应用广泛。

气体渗碳法是工件在气体渗碳剂中进行的渗碳。渗碳炉示意图如图 2-40 所示,将工件放在密封的渗碳炉内,滴入煤油、丙酮或甲醇等渗碳剂并加热到 $900\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$,渗碳剂在高温下分解,产生碳的活性原子渗入工件表面并向内部扩散形成渗碳层,从而达到渗碳的目的。

渗碳层深度由保温时间来决定,生产中一般按每小时 $0.10\sim 0.15\text{ mm}$ 估算,或用试棒实测确定。渗碳零件所要求的渗碳层厚度,随其具体尺寸及工作条件而定。如齿轮的渗碳层厚度是根据齿轮的工作条件及模数大小等因素来确定的,渗碳层太薄易引起表面疲劳剥落,太厚反而使冲击疲劳寿命降低。

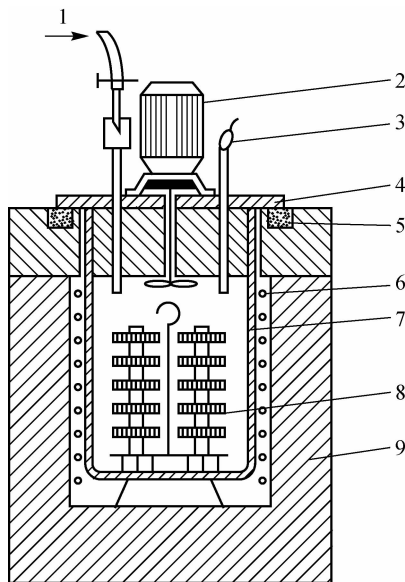


图 2-40 渗碳炉示意图

1—煤油; 2—风扇电动机; 3—废气火焰; 4—炉盖; 5—砂封;
6—电阻丝; 7—耐热罐; 8—工件; 9—炉体

零件渗碳后,碳的质量分数从表面到心部逐渐减少,其表面碳的质量分数可达 $0.85\%\sim 1.05\%$,心部仍保持原来低碳钢的碳的质量分数。在缓慢冷却条件下,渗碳层的组织由表面向心部依次为过共析区、共析区、亚共析区(过渡层),中心区为原来的组织。

渗碳后的零件必须经淬火加低温回火热处理,使其表面获得细小片状回火马氏体及少量渗碳体,硬度为 $58\sim 64\text{ HRC}$,而心部组织随钢的淬透性而定。普通低碳钢由铁素体和珠光体组成,硬度为 $10\sim 15\text{ HRC}$;而某些低碳合金钢由回火低碳马氏体及铁素体组成,其硬度为 $35\sim 45\text{ HRC}$,且韧度好。

对于使用性能要求很高的渗碳零件,经常采用两次淬火或一次正火加一次淬火,以保证心部和表层都达到高的性能。第一次淬火或正火主要是为了使心部的亚共析钢原始组织发生重结晶,使晶粒再次细化,同时可消除表面可能存在的网状渗碳体,因此其加热温度常选择大于 A_{c3} 以上的温度。第二次淬火(即最后一次淬火)主要是为了使表面层晶粒变小、组织细化,因此其加热温度按共析钢和过共析钢的正常淬火温度来考虑,即 $(A_{c1}+30-70)^{\circ}\text{C}$ 。渗碳零件经二次淬火后,再进行 $150\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温回火,其主要目的是保持表面的硬度及降低淬火的残余应力。而对于一些力学性能要求不很高的渗碳零件,则可自渗碳温度直接淬火,或在渗碳后再加热至 $850\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火(一次淬火法)。

渗碳后进行适当的淬火和低温回火处理,可提高表面硬度、耐磨性及抗疲劳强度,而心

部仍保持良好的韧度及塑性。因此,渗碳主要用于表面遭受严重磨损并受较大冲击载荷的零件,如汽车齿轮、活塞销、套筒等。

2. 钢的渗氮

渗氮是向钢的表面渗入氮原子的过程。渗氮能使工件获得比渗碳更高的表面硬度、耐磨性、热硬性和疲劳强度,同时还可提高工件的抗腐蚀性能。目前,常用的渗氮方法是气体渗氮。

气体渗氮是将工件放入密闭的炉内加热到 $500\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 通入氨气 NH_3 , 氨气分解出活性氮原子, 活性氮原子被零件表面吸收并向内层扩散, 与钢中的铝、铬、钼形成氮化物。

氮化层深度一般为 $0.1\sim 0.6\text{ mm}$ 。氮化后随炉降温到 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下停止供氮, 工件出炉空冷。

渗氮和渗碳相比有如下特点。

(1) 氮化后的零件不用淬火就能得到高的表层硬度和耐磨性, 且在 $600\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时仍能保持高硬度(即红硬性好)。而渗碳件的硬度在高于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 即逐渐失去耐磨性。

(2) 氮化温度低, 故变形小, 可适用于处理精密零件, 如精密齿轮、磨床主轴、精密丝杠等。

(3) 氮化零件具有很好的耐蚀性, 可防止水、蒸汽、碱性溶液的腐蚀。

(4) 氮化后, 显著地提高了钢的疲劳强度。这是因为氮化层具有较大的残余压应力, 它能部分地抵消在疲劳载荷下产生的拉应力, 延缓了疲劳破坏过程, 所以常用于提高弹簧的抗疲劳能力。

3. 钢的碳氮共渗

碳氮共渗又叫氰化, 是在奥氏体状态下同时将碳、氮渗入工件表层, 并以渗碳为主的化学热处理工艺。

常用的气体碳氮共渗法, 是在气体渗碳的基础上, 同时向炉内送入定量的氨气, 使它们分解为碳的活性原子和氮原子。共渗温度为 $820\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 870\text{ }^{\circ}\text{C}$, 共渗层表面碳的质量分数为 $0.7\%\sim 1.0\%$, 氮的质量分数为 $0.15\%\sim 0.50\%$ 。它与渗碳相比有下列优点。

(1) 渗层表面具有比渗碳略高的硬度、较高的耐磨性和抗疲劳强度。

(2) 由于氮的渗入, 降低奥氏体组织的存在温度, 使碳氮共渗可在较低温度下进行, 工件不易过热。

(3) 在同样条件下, 共渗层深度比渗碳厚, 能缩短生产周期。

(4) 氮的渗入增加了渗层的淬透性, 所以可用普通碳钢代替合金钢, 或采用冷却能力较弱的淬火介质, 有利于减少工件的变形和开裂倾向。

碳氮共渗后必须进行淬火及低温回火才能获得高硬度的耐磨表层。以上所述的是中温碳氮共渗, 主要应用于结构零件的表面热处理。

目前, 生产上广泛应用的一种低温氮碳共渗, 是在含有碳、氮的活性原子的介质中, 以渗氮为主的氮碳共渗。氮碳共渗的介质常用尿素、甲酰胺、三乙醇胺等。这些介质在渗氮温度下将同时分解出活性氮、碳原子, 起到共渗的作用。氮碳共渗工艺, 温度为 $540\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 570\text{ }^{\circ}\text{C}$, 时间为 $1\sim 3\text{ h}$ 。共渗后的组织是由氮碳化合物加扩散层组成。该化合物层的突出优点是硬而不脆, 具有一定的韧度, 能起到耐磨和抗胶合的作用。

氮碳共渗能大幅度地提高零件的耐磨损、抗疲劳和抗胶合的性能。氮碳共渗的处理周期短, 成本低, 变形小, 又不受钢种的限制。各种碳钢、低合金钢、高合金钢、铸铁和粉末冶金

制成的零件,以及刀具、工模具等,都能通过氮碳共渗提高使用寿命。

上述的渗碳、渗氮、碳氮共渗等只是钢化学热处理中的一小部分,也是工厂中应用较广泛的工艺。随着科学技术的发展,化学热处理的应用领域不断扩大,如真空渗碳、流动粒子炉渗碳或渗氮、超声波化学热处理、气相沉积氮化钛或碳化钛等,都给化学热处理的发展赋予了强大的生命力。



课后练习

1. 晶体和非晶体的主要区别是什么?
2. 简述纯金属的结晶过程。
3. 何谓过冷度? 影响过冷度大小的因素是什么?
4. 晶粒粗细对金属的力学性能有何影响? 细化晶粒可采取哪些措施?
5. 什么是合金相图? 什么是共晶转变和共析转变?
6. 简述纯铁的同素异构转变。
7. 何谓钢的热处理? 简述热处理的工艺过程。
8. 共析钢加热时组织结构如何变化?
9. 热处理加热后保温的目的是什么?
10. 过冷奥氏体等温转变时,按过冷度的不同,能得到哪几种组织?
11. 过冷奥氏体连续冷却时的临界冷却速度表示什么意义?
12. 何谓退火? 退火分为哪几类?
13. 完全退火的目的是什么? 为什么不宜用于过共析钢?
14. 去应力退火时钢中是否有相的变化? 为什么?
15. 何谓正火? 正火的目的是什么?
16. 为什么低碳钢用正火比退火更为合适?
17. 淬火加热温度如何选择? 为什么?
18. 淬火方法分哪几类? 各有何特点?
19. 简述回火的分类及其目的。
20. 说明不同温度下回火的组织变化。
21. 说明感应加热表面淬火的特点及其应用。
22. 什么是钢的化学热处理? 常用的化学热处理方法有哪几种?
23. 有一传动齿轮,用 20 钢制作,要求齿表面具有高的硬度(60 HRC)和耐磨性,心部具有良好的韧度,试编制其热处理工艺。

课题三

金属材料与非金属材料的成形



学习目标

掌握凝固成形的工艺理论基础、砂型铸造的工艺要点；
掌握自由锻、模锻和冲压生产的特点和工艺过程；
熟悉焊接成形的特点和应用；
了解非金属材料的成形特点和成形方法。



相关知识

工程材料的成形方法较多,各种成形方法都有各自的特点。

金属材料的成形包括凝固成形、塑性成形和焊接成形。凝固成形允许坯件的复杂程度较高,塑性成形的坯料力学性能较好,焊接成形可以充分使用型材。只有合理利用各种成形方法的特点,才能加工制造出经济、耐用的坯料、零件。

随着科学技术的发展,非金属材料得到了广泛的应用。由于非金属材料与金属材料在结构和性能上有很大差异,因此其成形特点和成形方法与金属材料也不相同。

学习情境一 金属的凝固成形

熔炼金属,将液态金属浇注到与零件形状和尺寸相适应的铸型型腔中,待其冷却后得到坯料或零件的方法称为液态凝固成形,或称为铸造成形方法。

一、铸造的特点、分类及性能

1. 铸造的特点

由于铸造成形是由液态凝结成固态的过程,故铸造生产具有以下特点。

1) 成形方便

铸造成形方法对工件的尺寸形状几乎没有任何限制,铸件的可大可小,可获得形状复杂的机械零件。因此,形状复杂的零件或大型机械零件一般采用铸造方法初步成形。在各种批量的生产中,铸造都是重要的成形方法。

2) 适应性强

铸件的材料可以是各种金属材料,也可以是高分子材料和陶瓷材料。

3) 成本较低

由于铸造成形方便,铸件毛坯与零件形状相近,能节省金属材料和切削加工工时;铸造原材料来源广泛,可以利用废料、废件等,节约国家资源;铸造设备通常比较简单,价格低廉。因此,铸件的成本较低。

4) 组织性能较差

一般条件下,铸件晶粒粗大(铸态组织),化学成分不均,因此,受力不大或承受静载荷的机械零件,如箱体、床身、支架等常用铸件毛坯。

2. 铸造的分类

铸造的工艺方法很多,一般习惯于将铸造成形方法分为砂型铸造和特种铸造两大类,砂型铸造应用较广。

1) 砂型铸造

直接形成铸型的原材料主要为型砂,且液态金属完全靠重力充满整个铸型型腔,这种铸造方法称为砂型铸造。砂型铸造是用型砂紧实成铸型的铸造方法,是目前生产中应用最多、最基本的铸造方法,其生产的铸件约占铸件总量的 80% 以上。砂型铸造一般可分为手工砂型铸造和机器砂型铸造两类。前者主要适用于单件、小批量生产以及复杂和大型铸件的生产,后者主要适用于大批量的生产。如图 3-1 所示为砂型铸造的生产过程。

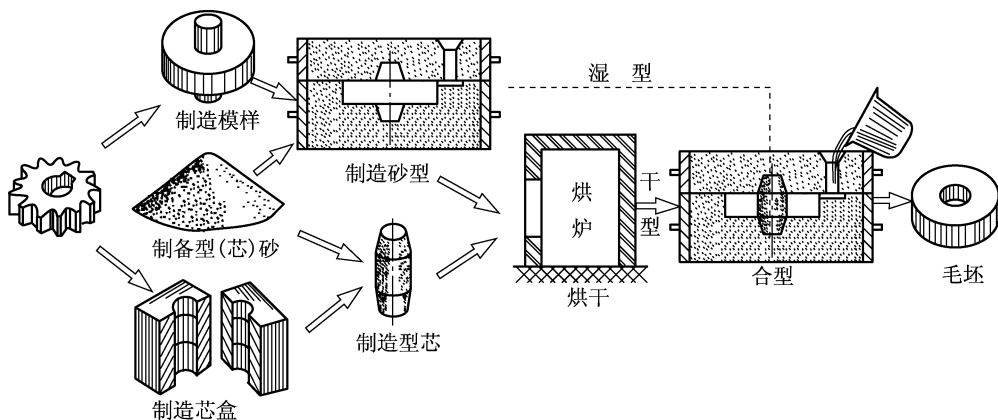


图 3-1 砂型铸造的生产过程

2) 特种铸造

凡不同于砂型铸造的所有铸造方法,统称为特种铸造。如金属型铸造、压力铸造、离心铸造、熔模铸造、低压铸造等。

3. 金属的铸造性能

金属在铸造过程中所表现出来的性能统称为金属的铸造性能,主要是指流动性、收缩性、偏析和吸气性等。

1) 流动性

金属的流动性是指液态合金的流动能力,流动性的好坏可用螺旋形试样进行测定,如图 3-2 所示。

液态金属的流动性好,充型能力强,能浇出形状复杂、壁薄的铸件,能够避免产生浇不足、冷隔等缺陷;有利于金属液中气体和夹杂物的上浮和

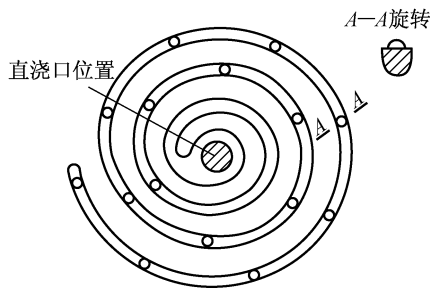


图 3-2 螺旋形试样

排除,可减少气孔、渣眼等缺陷;铸件在凝固及收缩过程中,可得到来自冒口的液态金属的补充,防止铸件产生缩孔、缩松等缺陷。影响流动性的因素很多,主要有以下几种。

(1)合金成分。不同成分的合金具有不同的结晶特点,其流动性不同。如共晶成分的合金流动性最好,凝固温度范围小的合金流动性较好,而凝固温度范围大的合金流动性差,这是因为较早生长的树枝状晶体对液态合金的流动产生较大阻力。成分不同的合金其熔点不同,熔点高的合金难以过热,保持在液态的时间短,流动性较差。在常用的铸造合金中,铸铁的流动性好,铸钢的流动性较差。

(2)浇注温度。浇注温度高,可使金属在液态下保持的时间较长,且液态合金的黏度小,流动性好。但浇注温度不宜过高,过高的浇注温度会导致金属总收缩量增加,吸收气体过多,造成缩孔和气孔缺陷。

(3)浇注压力。浇注时液态金属所受压力越大,则流速越大,流动性越好,充型能力越强。

(4)铸型。铸型中凡能增加合金液态流动阻力、降低流速和增加冷却速度的因素,都会影响合金的流动性。如内浇道横截面小、型腔表面粗糙、型砂透气性差、铸型排气条件不良等均会增加液态合金的流动阻力,降低流速。另外,铸型材料导热快,会使液态合金的冷却速度增大,导致流动性下降。

2)收缩性

合金在冷却和凝固过程中,其体积和尺寸减小的性能称为收缩性。合金的收缩可分为液态收缩、凝固收缩和固态收缩三个阶段。液态收缩是在高温下进行的,只造成铸型冒口部分金属液面的降低;凝固收缩是铸件产生缩孔、缩松的基本原因;固态收缩是产生铸造应力、变形和裂纹的基本原因。

影响铸件收缩的主要因素有合金成分、浇注温度,以及铸型和铸件结构等。

(1)合金成分。不同成分的合金具有不同的收缩率。灰铸铁的收缩率最小,这是因为灰铸铁在冷却过程中结晶出比容大的石墨相时,产生的体积膨胀抵消了部分收缩。

(2)浇注温度。浇注温度越高,合金的液态收缩越大。为减少收缩,浇注温度不宜过高。

(3)铸型及铸件结构。铸件各部分收缩时受到的相互制约及铸型和型芯对铸件收缩的阻碍,使铸件受到收缩阻力的作用。

3)偏析

合金在凝固过程中出现化学成分不均匀的现象称为偏析。偏析与合金的液相线和固相线温度间隔有关,凝固温度区间越大,则偏析越显著。偏析分为晶内偏析和区域偏析两大类。晶内偏析是指晶粒内各部分化学成分不均匀的现象。采用扩散退火可消除晶内偏析。区域偏析是指铸件上、下部分化学成分不均匀的现象。为防止区域偏析,在浇注时应充分搅拌或加速合金液冷却。

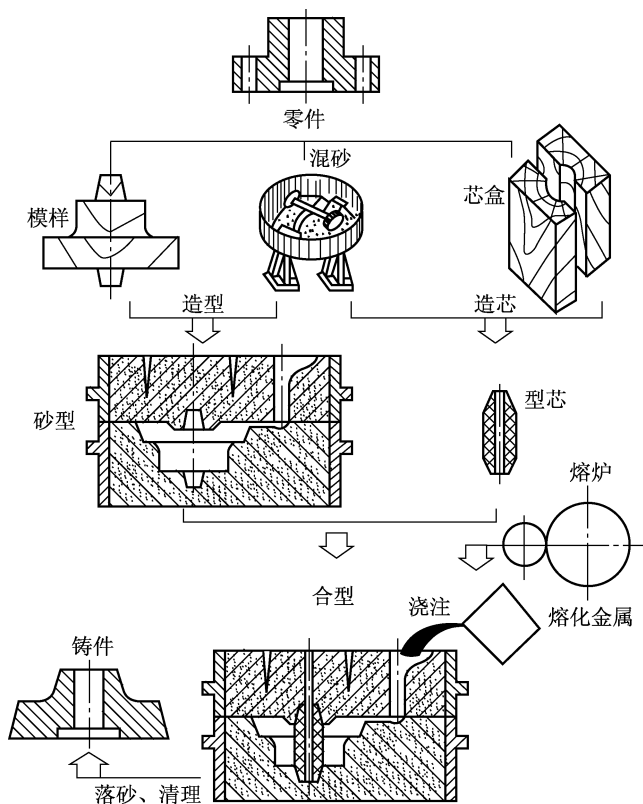
4)吸气性

合金在熔炼和浇注时吸收气体的性能称为合金的吸气性。气体来源于炉料熔化和燃料燃烧时产生的各种氧化物和水汽,浇注时带入铸型的空气、造型材料中的水分等。在合金液冷凝过程中,气体来不及从合金液中逸出,将在铸件中形成气孔、针孔或非金属夹杂物(如 FeO 、 Al_2O_3 等),从而降低了铸件的力学性能和致密性。为减少合金的吸气性,常采用缩短熔炼时间,选用烘干过的炉料;在熔剂覆盖层下、在保护性气体介质中或在真空中熔炼合金;进行精炼除气处理;提高铸型和型芯的透气性;降低造型材料中的含水量和对铸型进行烘干等。

二、砂型铸造

1. 砂型铸造的工艺过程

砂型铸造的生产过程如图 3-3 所示。根据零件图的形状和尺寸,设计制造模样和芯盒;制备型砂和芯砂;用模样制造砂型;用芯盒制造型芯;把烘干的型芯装入砂型并合型;熔炼合金并将金属液浇入铸型;凝固后落砂、清理;检验合格便获得铸件。



视频
翻砂铸造

图 3-3 砂型铸造的工艺过程

砂型铸造用型砂和芯砂来制造铸型。由于这些材料来源广泛,价格低廉,而且能浇注各种不同的金属,因此砂型铸造得到了广泛的应用。但是,由型(芯)砂制造的铸型只能浇注一次,不能重复使用,从而使得整个生产过程工序多、效率低。另外,砂型铸造的铸件表面较粗糙,尺寸精度低。

2. 造型材料

制造砂型的造型材料包括型砂、芯砂及涂料等。型砂和芯砂是按一定比例配合制成的混合料,造型材料质量的优劣对铸件质量具有决定性的影响。为此,应合理地选用和配制造型材料。

1) 型砂和芯砂的性能要求

铸型在浇注凝固过程中要承受液体金属的冲刷、静压力 and 高温的作用,要排除大量气体,型芯还要受到铸件凝固时的收缩压力等,因而型砂和芯砂的性能应满足下列要求。

(1)可塑性。型(芯)砂在外力作用下容易获得清晰的模样印迹,外力去除后仍能完整地

保持其形状的性能称为可塑性。为了得到合格的铸件,型砂必须具有良好的可塑性。砂子本身几乎是不可塑的,黏土却有很好的可塑性,所以型砂中黏土的质量分数越大,可塑性越高,一般水的质量分数为8%时,可塑性也较好。

(2)强度。砂型承受外力作用而不易变形和被破坏的性能称为强度。铸型必须具有足够的强度,以便在修整、搬运及液体金属浇注时受冲击和压力作用的情况下,不致变形或破坏。若型砂强度不足,会造成塌箱、冲砂和砂眼等缺陷。通过增加黏结剂、减小砂粒尺寸、增大大型砂紧实度等,均可提高强度。

(3)耐火度。型(芯)砂在高温液体金属注入时,不软化、不易熔融烧结并黏附在铸件表面上的性能,称为耐火度。若型砂耐火度不足,会造成黏砂,使切削加工困难。黏砂严重难以清理的铸件,可能成为废品。型(芯)砂中 SiO_2 越多、砂粒越粗,则耐火度越好。

(4)透气性。型砂由于内部砂粒之间存在空隙,能够通过气体的能力,称为透气性。当高温液体金属注入铸型后,会产生气体,砂型和型芯中也会产生大量气体。若型砂透气性差,会使铸件产生气孔缺陷。用圆形、粒大的砂降低黏土含量和造型紧实度,可提高透气性。

(5)退让性。铸件冷却收缩时,砂型和砂芯的体积可以被压缩的性能,称为退让性。退让性差,会阻碍金属收缩,使铸件产生内应力,甚至造成裂纹等缺陷。为了提高退让性,可在型砂中加入附加物,如草灰和木屑等,使砂粒之间的空隙增加,从而提高了退让性。

2) 型砂的组成

型(芯)砂是由原砂、黏结剂、附加材料、旧砂和水等混合搅拌而成的。

(1)原砂。原砂是型砂的主体,其主要成分为 SiO_2 ,采自山地、海滨或河滨。要求 SiO_2 含量高,砂粒大小均匀,形状以球形为佳。 SiO_2 的含量与型砂耐火度有直接关系, SiO_2 的含量越高,耐火度越好。

(2)黏结剂。黏结剂一般分为黏土和膨润土两种,有时也用水玻璃、植物油或合脂(合成脂肪酸的副产品)做黏结剂。黏结剂的作用是使型砂具有一定的强度和可塑性。膨润土的质点比普通黏土更为细小,黏结性更好。

(3)附加材料。煤粉和锯木屑是常用的廉价附加材料。加入的煤粉在浇注时燃烧生成还原性气体,在铸型与金属液体之间产生气膜,防止铸件表面粘砂;加入锯木屑可改善型砂的退让性和透气性。

(4)旧砂。已用过的型砂,经过适当处理后仍可掺在型砂中使用,以便节约新砂的用量。

3. 造型和造芯

用造型材料及模样、芯盒等工艺装备制造砂型和型芯的过程称为造型和造芯。造型时用模样形成砂型的型腔,在浇注后形成铸件的外部轮廓。型芯用芯盒制成,置于铸型中。浇注后形成铸件的内孔或局部外形。模样和芯盒在单件、小批量生产时通常用木材制造;生产批量较大时,也可用塑料和金属制造。

根据机械化程度的不同,造型、造芯可分别由手工或机器完成。

1) 手工造型

手工造型的造型过程全部由手工或手动工具完成。手工造型方法操作灵活,适应性强,模样成本低,生产准备时间短,但铸件质量不稳定,生产率低,且劳动强度大,主要用于单件、小批量生产。

实际生产中,由于铸件的大小、形状、铸造合金、生产批量和技术要求不同,手工造型的

方法也不同,常用的手工造型方法有整模造型、分模造型、挖砂造型、活块造型、刮板造型等。

(1)整模造型。整模造型过程如图 3-4 所示。其特点是模样为一整体,放在一个砂箱内,能避免铸件出现错型缺陷,造型操作简单,铸件的尺寸精度高。适用于生产形状简单、最大截面在端部且为平面的铸件。

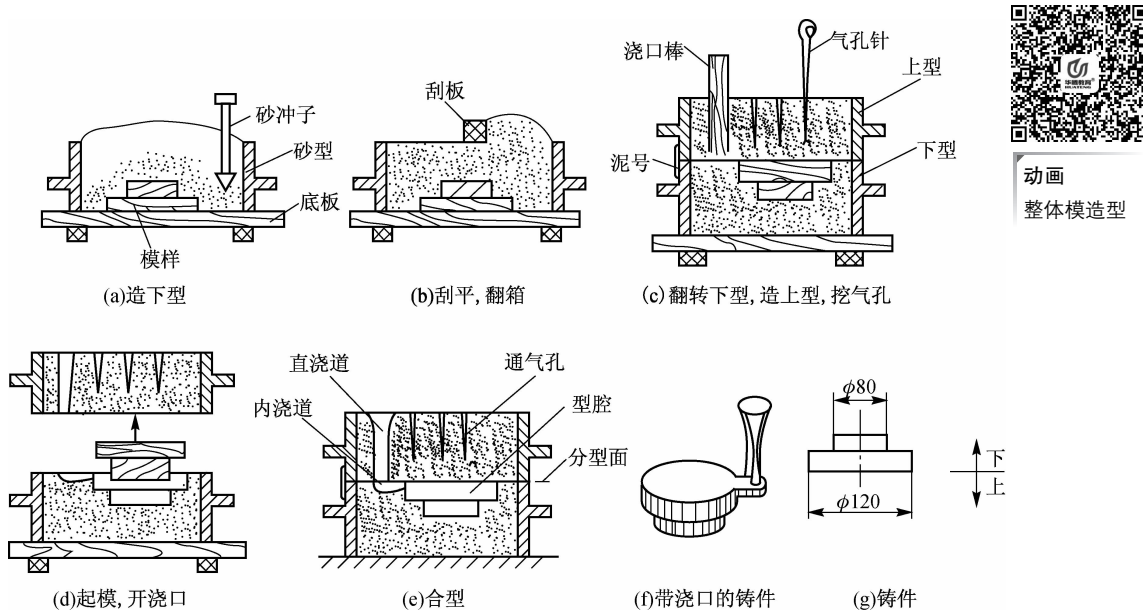


图 3-4 整模造型

(2)分模造型。分模造型过程如图 3-5 所示。为了便于造型时将模样从砂型内起出,模样沿最大截面处分开。造出的铸型型腔不在同一砂箱中,上下铸型错移会造成铸件错型。这种方法操作也很简便,对各种铸件的适应性好,应用最为广泛。

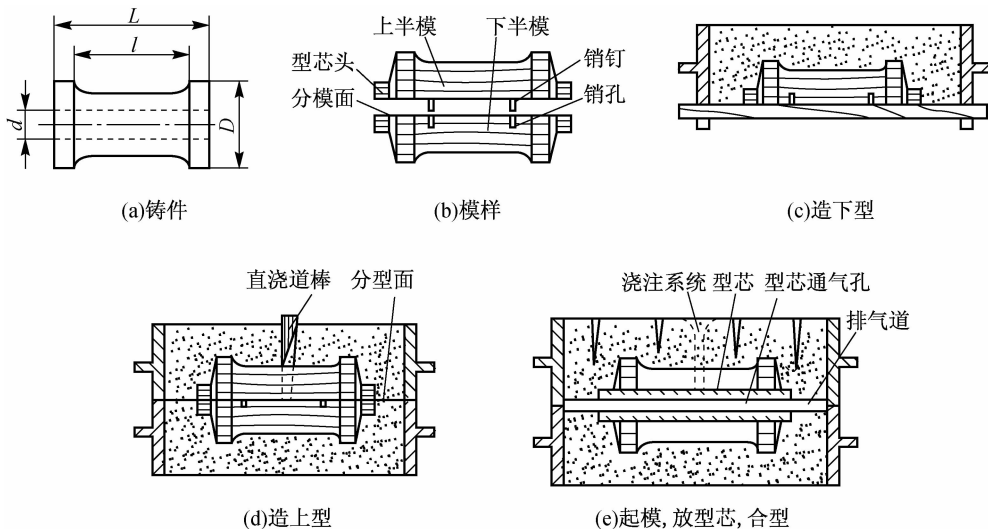


图 3-5 分模造型



动画
挖砂造型

对于一些复杂的零件采用分模两箱造型仍不能起出模样时,可采用分模多箱造型。

(3)挖砂造型。有些铸件外形轮廓为曲面,但又要求整模造型,则造型时需挖出阻碍起模的型砂。挖砂造型要求准确挖砂至模样的最大截面处,技术要求较高,生产率低,只适用于单件、小批量,最大截面不在端部且模样又不便分开的铸件的生产。生产批量较大时,可在假箱或成形底板上造下砂型,免除了挖砂操作,提高了生产率。

(4)刮板造型。刮板造型时用一个与铸件截面形状相应的刮板代替模样,来刮出所需铸型的型腔,如图 3-6 所示。刮板造型节省了模样材料和模样加工,但操作费时,生产率较低,多适用于单件、小批量,尤其是尺寸较大的旋转体铸件的生产。



动画
刮板造型

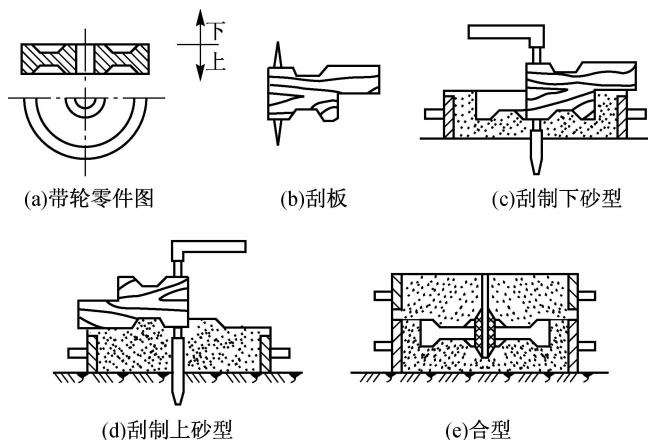


图 3-6 刮板造型

2) 机器造型

机器造型就是用机器全部完成或至少完成紧砂操作的造型方法。机器造型使工人的劳动强度降低,生产率高,铸件质量稳定,便于组织流水线生产。但由于设备投资大,主要用于成批大量生产。

紧砂的目的就是使砂箱内松散的型砂紧实,从而使砂型具有一定的强度。其方法可分为压实、震实、震压和抛砂四种基本形式,其中以震压式应用较广。如图 3-7 所示为震压式造型机紧砂机构示意图,机构采用先震后压的组合紧砂方法。工作时压缩空气从震实进气口 9 进入震实活塞 4 的下方,使震实活塞 4 带动工作台 5 及砂箱 6 上升,当震实活塞 4 上升至一定高度后,震实排气口 10 即被打开,砂箱 6 连同工作台 5 因自重而下落,完成一次震实。如此反复多次,便将型砂震实。当压缩空气进入压实汽缸 1 时,压实活塞 3 带动工作台 5 再次上升,使型砂触及压头 8,实现压实。最后使压实汽缸 1 排气,砂箱 6 随工作台降落,完成全部紧砂过程。震压式紧砂方法可使型砂紧实度分布均匀,生产效率高,是大批量生产中小型铸件的基本方法。

3) 造芯

最常用的造芯方法是用芯盒造芯。将芯砂填入芯盒,经紧砂、脱盒、烘干、修整后即可制成型芯。根据结构的不同,芯盒可分为整体式、对开式、可拆式等结构形式。

根据填砂与紧砂的方法不同,造芯也可分为手工造芯和机器造芯。前者主要用于单件、小批量生产,后者主要用于大批量生产。

由于型芯是放置于砂型内腔的,浇注时受四周金属的包围,因此制造型芯时除采用合适

的芯砂外,还需在型芯中放置芯骨,并将型芯烘干以增加强度。在型芯中应做出通气孔,将浇注时产生的气体由型芯经芯头通至铸型外,以免铸件产生气孔缺陷。

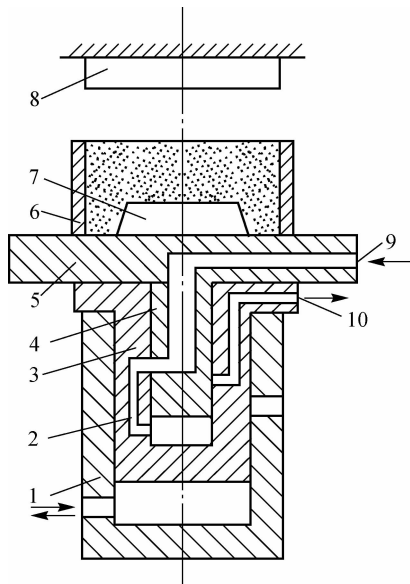


图 3-7 震压式造型机

1—压实汽缸；2—震实气路；3—压实活塞；4—震实活塞；5—工作台；6—砂箱；
7—模样；8—压头；9—震实进气口；10—震实排气口

4. 浇注系统

浇注系统是指将金属液体注入型腔而在铸型中开设的一系列通道。它是在造型时利用一定的模样来形成的。浇注系统包括冒口在内,统称为浇冒系统。对浇注系统的要求如下。

- (1)能均匀连续而平稳地将液态金属引入并充满型腔,防止液态金属冲坏砂型。
- (2)防止熔渣进入型腔。
- (3)调节铸件凝固顺序,补给铸件冷却凝固收缩时所需的金属。

典型的浇注系统由浇口杯、直浇道、横浇道和内浇道等组成,如图 3-8 所示。浇口杯为开口较大的漏斗形,用来将来自浇包的金属引入直浇道,液态金属在浇口杯内有短暂的停留,使得上浮的熔渣不致流入型腔,以缓和冲击,分离熔渣。直浇道为一圆锥形垂直通道,引导液态金属流入型腔,利用其高度使金属液产生一定的静压力,来控制金属液流入铸型的速度,提高充型能力。横浇道分配金属液进入内浇道,它的断面一般为梯形,并设在内浇道之上,起到挡渣的作用。内浇道是引导金属液进入型腔的部分,其作用是控制金属液的流速和流向,调整铸件各部分的温度分布。

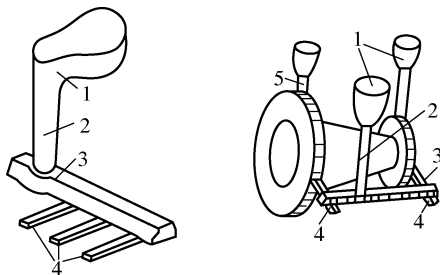


图 3-8 典型的浇注系统

1—浇口杯；2—直浇道；3—横浇道；
4—内浇道；5—出气口

冒口与出气孔的作用是排出型腔内的气体,还可以在金属凝固时把金属液补给铸件。冒口一般设在铸件的最高处或最厚处。

5. 合型与铸件检查

合型是铸型的装配工序。合型要保证砂型型腔的几何形状、尺寸的准确性,并检查型芯的安放是否稳固。在型芯放好后,必须详细检查各个部分,才能扣上上型,然后放置浇口杯。扣型时应防止偏差或错型,合型后,为防浇注时上砂箱被金属液抬起,造成抬型、射箱(铁液流出箱外)或跑火(着火的气体窜出箱外)事故,应将上、下两型紧扣或放上压箱铁。

6. 铸件的浇注、落砂和清理

1) 浇注

金属熔化后,用浇包将金属液浇入铸型的操作称为浇注。浇注时应注意控制浇注温度和浇注速度。浇注温度过高,铸件收缩大,黏砂严重,晶粒粗大。浇注温度偏低,会使铸件产生冷隔、浇不足等缺陷。浇注温度应根据铸造合金的种类、铸件结构及尺寸等确定。浇注速度的大小应能保持金属液连续不断地注入铸型,不得断流,应该使浇口杯一直处于充满状态。

2) 落砂和清理

落砂是使铸件与型砂、砂箱分离的操作。铸件浇注后要在砂型中冷却到一定温度后才能落砂。落砂过早,铸件易产生白口,难以切削加工,还会产生铸造应力,引起变形开裂;落砂过晚,铸件固态收缩受阻,也会产生铸造应力,而且会影响生产率。一般 10 kg 左右的铸件需冷却 1~2 h 才能开型,上百吨的大型铸件需冷却十几天。落砂过程还包括清除铸件表面和孔穴中的浮砂和型(芯)砂。

清理是指落砂后从铸件上清除表面黏砂或粗糙部分,浇道和冒口多余金属等过程的总称。铸件表面的黏砂、粗糙部分可用滚筒清理、抛丸清理、打磨清理等。铸铁件上的浇道、冒口可用铁锤敲掉,韧度材料的铸件可用锯割或气割等方法去除。

三、铸造工艺设计

为了生产合格的铸件,需根据铸件的结构特点、技术要求、生产批量、生产条件等,确定工艺方案和工艺参数,绘制图样和标注符号,编制工艺卡和工艺规程等,这些称为铸造工艺设计。这里主要讨论砂型铸造工艺设计的基本内容。

1. 浇注位置的选择

浇注位置确定了铸件在浇注时受重力作用的状态,选择时应以保证铸件质量为前提,同时考虑造型和浇注的方便。浇注位置的选择原则如下。

1) 铸件的重要表面应朝下或位于侧面

浇注时铸件处于上方的部分缺陷比较多,组织也不如下部致密。这是因为浇注后金属液中的砂粒、渣粒和气体上浮的结果。当铸件有数个面要加工时,应将较大的面朝下,并对朝上的面采用增大加工余量的办法来保证质量。如图 3-9 所示的机床导轨面、齿轮工作面都是重要表面,浇注时应朝下放置。某些铸件因结构原因重要表面不能朝下时,也应尽可能置于侧立位置,以减少缺陷的产生。如图 3-10 所示为吊车卷筒的浇注位置。因卷筒圆周表面的质量要求高,不允许有铸造缺陷,所以采用立浇,可使卷筒的全部圆周表面均处于侧面,保证质量均匀一致。

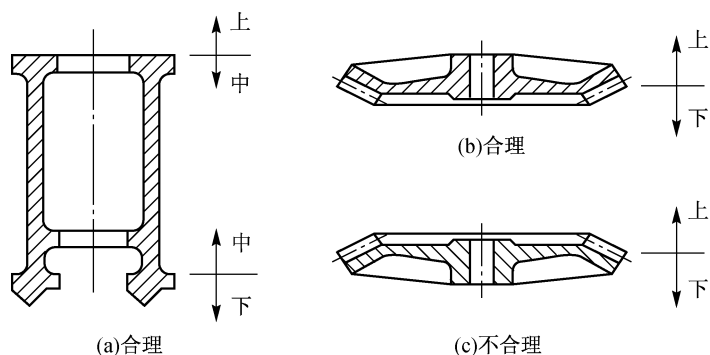


图 3-9 床身和锥齿轮的浇注位置

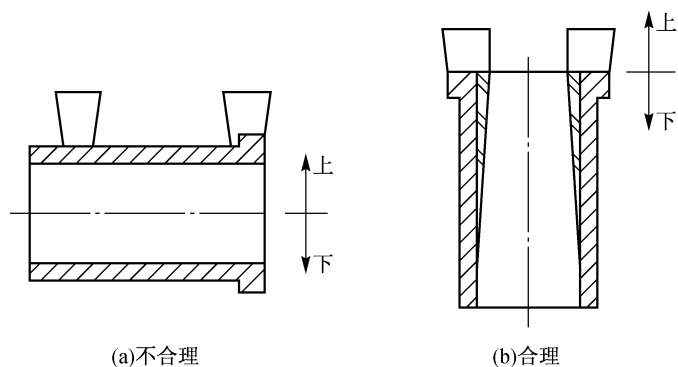


图 3-10 吊车卷筒的浇注位置

2) 铸件上的大平面应尽可能朝下

铸件上表面除容易产生砂眼、气孔和夹渣等缺陷外,铸件朝上的大平面还极易产生夹砂缺陷。这是由于大平面浇注时,金属液上升速度慢,铸型顶面型砂在金属液的高温辐射下,会急剧膨胀起拱或开裂,造成铸件夹砂,严重时会使铸件报废。如图 3-11 所示为平板铸件的合理浇注位置。

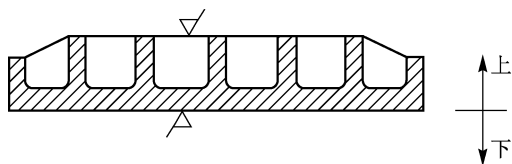


图 3-11 平板铸件的合理浇注位置

3) 铸件的薄壁部位应置于下部

置于铸型下部的铸件因浇注压力高,可以防止浇不足、冷隔等缺陷。

4) 截面较厚的部分放在上部或侧面

易形成缩孔的铸件应将截面较厚的部分放在分型面附近的上部或侧面,以便于在厚壁处直接放置冒口,形成自下而上的顺序凝固,有利于补缩,如图 3-12 所示。

为了简化造型,浇注位置还应有利于下芯、合型检验等。

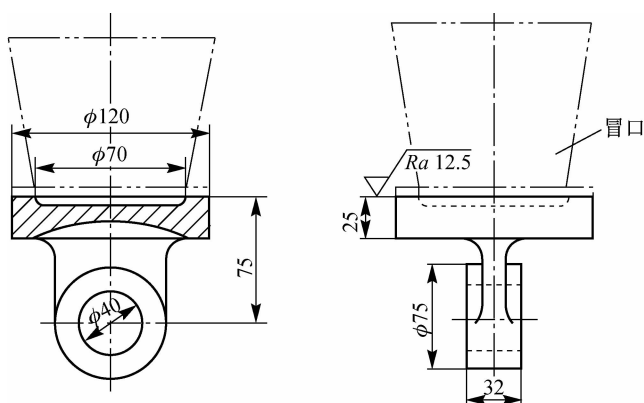


图 3-12 缸头

2. 分型面的选择

分型面的设置是为了造型时模样能从铸型中取出。分型面选择是否合理,对于铸件质量以及制模、制芯、合箱和切削加工等工序的复杂程度有很大影响。选择铸件分型面应满足造型工艺的要求,还要有利于提高铸件的质量。分型面的选择原则如下。

1) 便于起模

分型面选得合适,模样就能顺利地从铸型中取出。为此,通常将铸件的最大截面作为分型面,以保证模样的取出。

2) 简化造型

尽量使分型面平直、数量少,以避免不必要的活块和型芯,便于下芯、合型和检验等,如图 3-13 所示。

3) 尽量使铸件位于同一砂箱内

铸件集中在一个砂箱内,可减少错型引起的缺陷,有利于保证铸件上各表面间的位置精度,方便切削加工,同时也便于合箱。

4) 尽量使加工面与加工基准面位于同一砂箱内

如图 3-14(a)所示螺栓塞头的分型面是不合理的,图 3-14(b)所示螺栓塞头的分型面是合理的。因为铸件上部的方头(夹具所夹处)是车削外圆面上螺纹的基准,它们处于同一砂箱,可避免错箱,保证铸件质量。

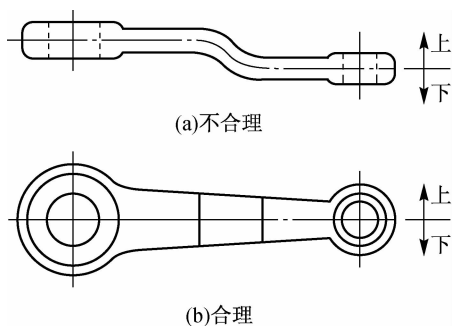


图 3-13 弯曲臂分型面的选择

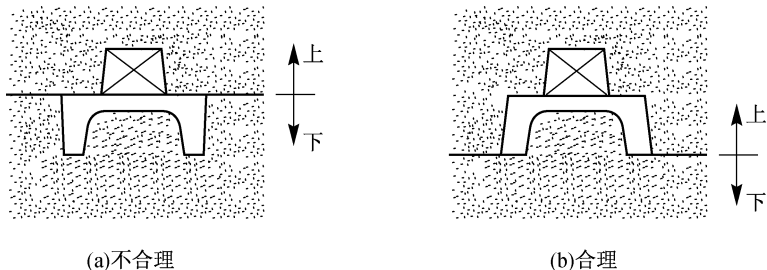


图 3-14 螺栓塞头的分型面

5) 应尽量使型腔和主要型芯处于下箱

为便于造型、下芯、合箱及检验型腔尺寸,应尽量使型腔和主要型芯处于下箱。如图 3-15 所示的两个分型面方案,虽然都便于在下芯时检查铸件壁厚,但方案Ⅱ可使型腔及型芯的大部分都位于下箱。上箱型腔浅,形状简单,这可降低上箱高度,有利于起模和翻箱操作。但下箱的型腔也不宜过深,并力求避免使用吊芯和大的吊砂。

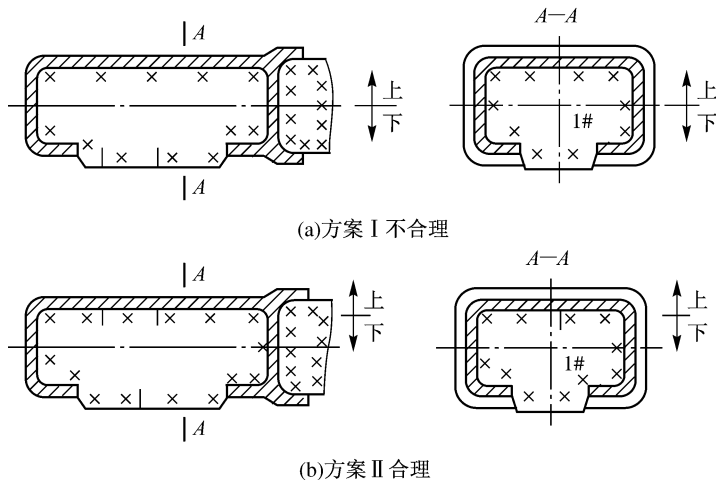


图 3-15 机床支柱

此外,分型面的选择也应结合浇注位置综合考虑,尽可能使二者相适应,避免合型后翻动铸型引起的偏芯、砂眼、错型等缺陷。

3. 工艺参数的确定

铸造工艺参数是与铸造工艺过程有关的某些工艺数据,直接影响模样、芯盒的尺寸和结构,选择不当会影响铸件的精度和成本。

1) 加工余量和铸孔

加工余量是指为保证铸件加工面尺寸和零件精度,在进行铸件工艺设计时预先增加切削加工时切去的金属层厚度。加工余量的大小取决于铸件的材料、铸造方法、铸件尺寸与复杂程度、生产批量、加工面在铸型中的位置、加工质量要求等。灰铸铁件表面较平整,加工余量小;铸钢件因浇注温度高,表面粗糙,变形大,加工余量应比铸铁件大;有色金属件表面光洁,且材料昂贵,加工余量比铸铁小;手工造型、单件生产、铸件尺寸较大、形状复杂、加工质量要求较高的,加工余量应大些;大批量生产,因使用机器造型,工艺装备完善,故加工余量小些。在浇注位置中处于上面的铸件表面,由于容易出现缺陷,所以其加工余量等级应比侧面和底面大一级。

铸件上的孔与槽是否铸出,应考虑工艺上的可能性和使用上的必要性。一般来说,较大的孔、槽应当铸出,以减少切削加工工时,节约金属材料,同时也可减少铸件上的热节;较小的孔,尤其是位置精度要求较高的孔、槽则不必铸出,留待机械加工时钻孔更经济。

2) 线收缩率

线收缩率是指铸件从线收缩起始温度冷却至室温的收缩率,常以模样与铸件的长度差除以模样长度所得的百分比表示。铸件线收缩率的大小不仅与合金的种类有关,而且还与铸件的尺寸、结构形状及铸型种类等因素有关。通常灰铸铁件的线收缩率为 $0.7\% \sim 1.0\%$,铸钢件的线收缩率为 $1.5\% \sim 2.0\%$,有色金属件的线收缩率为 $1.0\% \sim 1.5\%$ 。制造模样或芯盒

时要按确定的线收缩率,将模样(芯盒)尺寸放大一些,以保证冷却后铸件尺寸符合要求。

3) 起模斜度

起模斜度是指为使模样容易从铸型中取出或使型芯容易从芯盒脱出,平行于起模方向在模样或芯盒壁上的斜度。起模斜度的大小与造型方法、模样材料、垂直壁高度等有关。一般来说,木模外壁的起模斜度为 $30' \sim 3^\circ$, 平行壁越高,其斜度越小,内壁的斜度比外壁大;金属模的斜度小于木模;机器造型的斜度比手工造型小。

4) 芯头

芯头是指型芯的外伸部分,不形成铸件轮廓。在铸型中芯头可使型芯定位准确,安放牢固,排气顺利。根据型芯的安放位置,芯头可分为垂直芯头和水平芯头,其结构如图 3-16 所示。

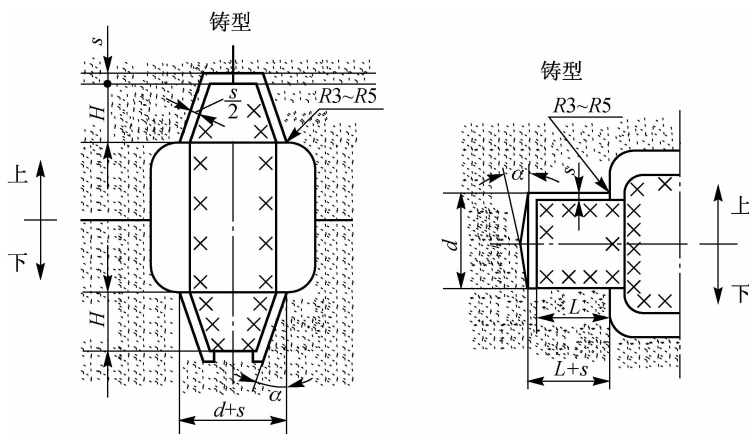


图 3-16 芯头结构

5) 铸造圆角

为了减少铸件裂纹,方便造型和制芯,应将模样及型芯盒的交角处做成圆角,此圆角称为铸造圆角,如图 3-17 所示。

4. 绘制铸造工艺图

铸件图是指反映铸件实际形状、尺寸和技术要求的图样,是铸造生产、铸件检验与验收的主要依据。根据铸造工艺图可以方便地绘出铸件图。

铸造工艺图是指导铸造生产过程的文件,是组织和实施铸件生产的基本依据,是表示铸型分型面、浇冒口系统、浇注位置、型芯结构尺寸、控制凝固措施(如放置冷铁)等的图样。

根据生产规模的不同,铸造工艺图可直接在铸件零件图上用红、蓝色笔绘出规定的工艺符号和文字,也可以用墨线另行单独绘制。铸造工艺图中应明确表示出铸件的浇注位置、分型面、型芯、浇冒口设置和工艺参数等内容。其中工艺参数可在技术条件中用文字作集中说明,以使图面清晰明了。对个别不宜集中说明的参数,可在图上单独注明,如铸件上的加工余量。若某个表面由于特别需要而采用非标准的加工余量值时,则可在相应表面上标出具体数值。

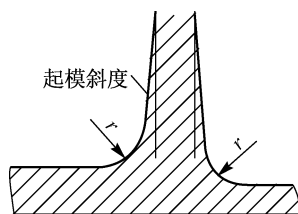


图 3-17 铸造圆角

四、特种铸造

砂型铸造的铸件表面粗糙,须留有较大的切削加工余量,废品率较高,生产效率低,劳动条件差。为了克服上述缺点,实践中有一些与砂型铸造不同的铸造方法,这些方法统称为特种铸造。

1. 熔模铸造

熔模铸造是用蜡料制成蜡模,蜡模上包裹多层耐高温材料后制成型壳,加热使蜡制模样熔化排出,再经高温对型壳焙烧,形成浇注型腔的铸造方法。熔模铸造能够获得较高精度和较好表面质量的铸件。

2. 金属型铸造

金属型铸造的铸型一般由铸铁或钢制作,可以反复使用,减少了造型的工作量。但金属型铸造导热快,使液体合金的充型能力下降,容易使铸件产生浇不足和冷隔等现象。无退让性和透气性,使铸件容易出现裂纹、气孔等缺陷。

3. 离心铸造

离心铸造是将金属液注入高速旋转的特定铸型中,利用离心力使液态金属填充铸型的方法。离心铸造必须在离心铸造机上进行。

4. 压力铸造

压力铸造是在高压下把液态金属快速充满型腔,并在压力下凝固的铸造方法。其使用的铸型为金属型,在压铸机上完成铸造过程。



视频
熔模铸造过程

学习情境二 金属的塑性成形

塑性成形是在外力作用下使金属改变形状和改善性能,获得型材、坯料或零件的加工方法。金属经过塑性变形后,不仅可以获得预定的坯件形状,而且可以使粗大的晶粒破碎,晶粒细化,从而提高金属的力学性能。因此,塑性成形方法获得了广泛应用。

金属塑性成形的适用范围非常广泛,是许多型材和重要构件的主要成形方法。但是塑性成形方法与凝固成形相比,所允许的构件复杂程度不及凝固成形。

一、金属的塑性变形

1. 塑性变形的实质

金属在外力作用下产生一定的变形,随着外力的增加,金属的变形由弹性变形阶段进入弹-塑性变形阶段。在弹性变形阶段,金属变形是可逆的,不能用于成形加工,而弹-塑性变形阶段的塑性变形是永久性不可恢复的变形,能用于成形加工。为了便于了解金属塑性变形的实质,首先讨论单晶体的塑性变形。

1) 单晶体的塑性变形

单晶体塑性变形方式有滑移和孪生(孪晶)两种,单晶体塑性变形的主要方式是滑移。

(1) 滑移。滑移是指在切应力的作用下,单晶体的一部分沿着一定的晶面和晶向(分别称为滑移面和滑移方向)相对于另一部分产生滑动的现象。

单晶体金属受外力作用时,作用在晶体内一定晶面上的外力可分解为正应力 σ 和切应力 τ 。正应力只能引起晶格的弹性伸长或进一步把晶体拉断,而切应力可以使晶格在发生扭曲之后产生滑动,使晶体产生塑性变形。滑移过程如图 3-18 所示。

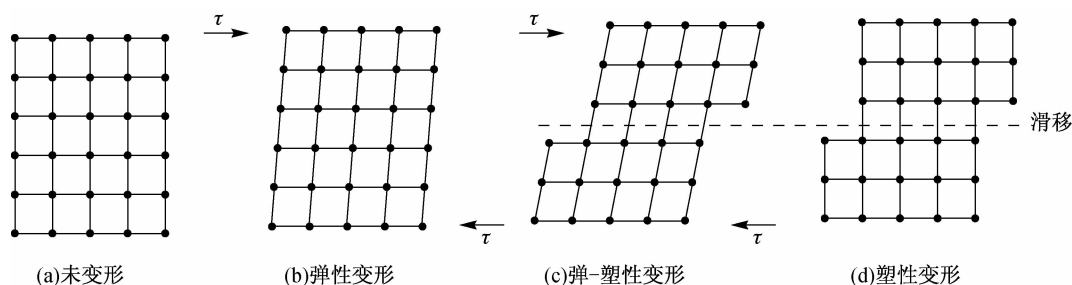


图 3-18 单晶体滑移变形过程

各种晶格中,滑移并不是沿任意晶面和晶向发生的,通常是沿晶体中原子排列最密集的晶面和原子密度最大的晶向发生的,这是因为原子密度最大的晶面和晶向对滑移所产生的阻力最小,如图 3-19 所示。

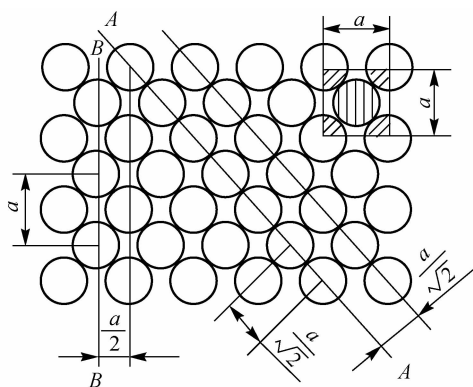


图 3-19 滑移面示意图

(2) 孪生(孪晶)。孪生是晶体变形的另一种形式。孪生变形一般发生在切应力难以使晶体内部产生滑移变形的金属中,如密排六方晶格金属。

孪生是发生在晶体内部的均匀切变过程,其沿晶体内一定晶面(孪晶面)、一定方向(孪生方向)发生,变形后晶体的变形部分与未变形部分以孪晶面为分界面构成镜面对称的位向关系,如图 3-20 所示。

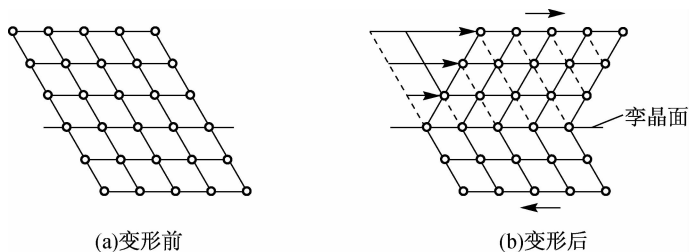


图 3-20 单晶体的孪生变形过程

2) 多晶体的塑性变形

多晶体的塑性变形与单晶体相比无本质上的区别,一般可分为晶内变形和晶间变形两种形式。晶粒本身的塑性变形称为晶内变形,晶粒与晶粒之间的相对滑动或转动称为晶间

变形。

晶内变形方式和单晶体的塑性变形方式一样,也分为滑移和孪生两种。但多晶体由许多形状、大小、位相不同的晶粒组成,各晶粒在塑性变形时将受到周围位相不同的晶粒及晶界的影响。因此在外力的作用下,各个晶粒产生滑移变形的难易程度有很大差别。

(1)晶界的影响。晶界对塑性变形有较大的阻碍作用,晶界的这种特性可通过实验得到证实。如图 3-21(a)所示试样,由于晶界处的结构与晶粒内部不同,这里的原子排列比较紊乱,并常有杂质集聚,阻碍了滑移的进行,在晶界处出现“竹节现象”,如图 3-21(b)所示。相邻晶粒的晶格方向差别越大,晶界处的排列越紊乱,滑移抗力就越大。多晶体的晶粒越细,晶界越多,则塑性变形抗力也越大。

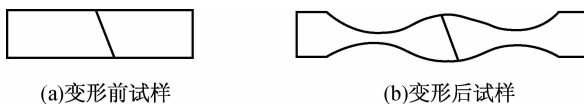


图 3-21 多晶体试样在拉伸时的塑性变形

(2)晶粒位向的影响。在外力的作用下,多晶体金属中因晶格方位不同,有的晶粒处于滑移的有利位置,有的处在不利位置。产生滑移的晶粒受到周围未滑移晶粒的牵制和阻碍,未滑移晶粒则受到滑移晶粒变形的作用而产生弹性变形,致使滑移的阻力增加。

(3)晶粒大小的影响。细晶粒的塑性和冲击韧度比粗晶粒好得多。如图 3-22 所示,画有阴影线的晶粒是可以滑移的。粗晶的塑性变形集中在少数晶粒上面,由于变形不均匀,容易使少数晶粒滑移过度而造成破裂;细晶的晶粒数目较多,有利于滑移的晶粒也多,金属的塑性变形能分散地分布在较多的晶粒内,使多晶体能承受较大的塑性变形而不致破裂,这就是细晶粒金属塑性和韧度较好的原因。

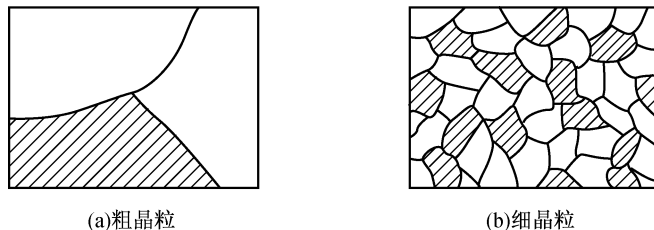


图 3-22 晶粒大小对变形均匀性的影响

从对塑性变形的讨论可以得出结论:金属的力学性能与其原子间的结合力大小和晶粒的大小有关。晶粒越细,金属的总晶界越大,塑性变形抗力越大,即强度也越高。

2. 金属的冷塑性变形

冷塑性变形是指坯料低于再结晶温度状态下进行的变形加工,冷塑性变形加工不仅改变了金属材料的外形与尺寸,而且还使金属的组织及性能发生很大的变化。

1) 冷塑性变形对金属组织结构的影响

冷塑性变形在改变金属外形的同时,也使内部晶粒的形状发生了相应的变化。经过冷塑性变形后,晶粒随着变形量的增加沿变形方向被拉长。当变形程度很大时,晶粒变为纤维状,晶粒边界也模糊了,金属中的夹杂物也沿着变形方向被拉长。形成所谓的“纤维结构”,如图 3-23 所示。晶粒内部的晶格逐渐发生歪扭,并有晶粒碎片出现。由于各晶粒变形和晶

粒内部的变形都不均匀,有的变形大,有的变形小;有的发生了塑性变形,有的处于弹性阶段,造成相互牵制,引起残余应力。冷塑性变形后,由于晶格畸变及残余应力的存在,使其处于不稳定状态,因此有向稳定状态转化的趋势。

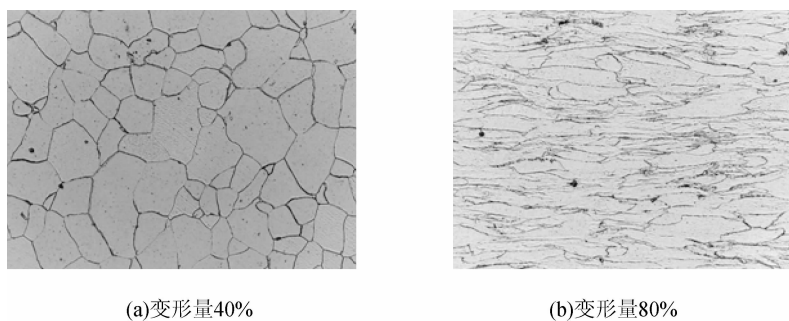


图 3-23 工业纯铁冷塑性变形后的显微组织

2) 冷塑性变形对金属性能的影响

金属材料随着变形度的增加,强度、硬度提高,而塑性及韧性下降的现象称为加工硬化现象或形变强化现象,如图 3-24 所示。加工硬化使金属进一步加工发生困难,如需继续冷变形加工,就得进行中间退火来消除加工硬化。此外,冷塑性变形后金属的某些物理、化学性能也发生显著的变化。如电阻增加、耐蚀性降低等。

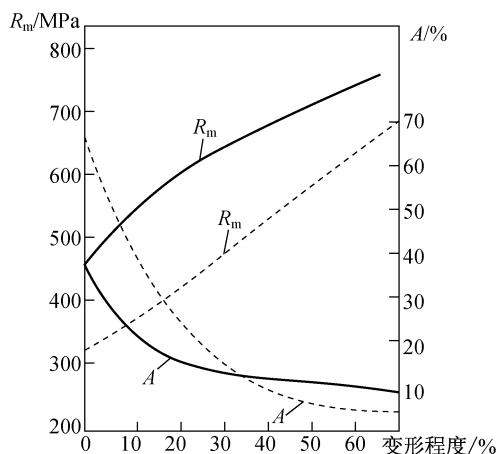


图 3-24 冷塑性变形对金属力学性能的影响

实线—冷拉的低碳钢;虚线—冷轧的黄铜

金属的加工硬化现象对金属材料的使用有非常重要的实际意义。首先,加工硬化是提高金属强度的重要方法之一,这对于纯金属以及不能用热处理强化的合金来说尤其重要;其次,加工硬化也是工件能够成形的重要因素,如冷拉钢丝从模孔拉过的部分,由于发生了加工硬化便不再继续变形,而使变形转移到尚未拉过模孔的部分,这样钢丝才能通过模孔产生均匀的变形;再次,加工硬化可以提高产品的表面质量和耐磨性,当零件意外超载时,加工硬化作用可以防止零件的突然破裂。

加工硬化现象不仅存在于黑色金属加工过程中,不少有色金属材料(铝、铜等)也常用加工硬化的方法来提高其硬度和强度。

3. 回复与再结晶

加工硬化组织是一种不稳定的组织状态,具有自发地向稳定状态转化的趋势。常温下,原子活动能力很低,这种转化难以实现。生产中,经常采用“中间退火”的处理方法,对加工硬化组织进行加热,增强金属原子的活动能力,加速金属组织向稳定状态转化。随着加热温度的升高,变形金属将相继发生回复、再结晶和晶粒长大三个阶段的变化,如图 3-25 所示。

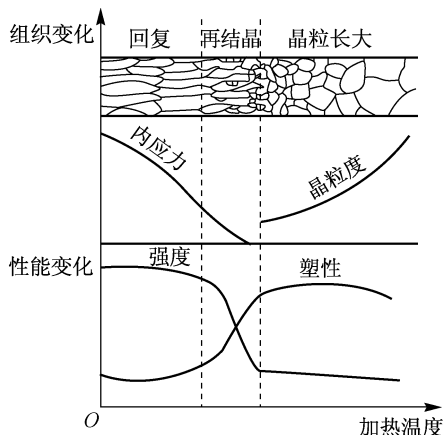


图 3-25 冷塑性变形金属加热时组织和性能的变化

1) 回复

当加热温度较低时,原子活动能力不很大,变形金属的纤维组织不发生显著变化,变形金属处于回复阶段。此时强度、硬度略有下降,塑性、韧性有所回升,内应力有较明显的降低。在工业生产中,利用低温加热的回复过程,在保持变形金属很高强度的同时降低它的内应力,这种处理称为去应力退火。如冷拔弹簧钢丝绕制弹簧后常进行低温去应力退火处理,就是为了既保持冷拔钢丝的高强度,又降低或消除冷卷弹簧时产生的内应力。

2) 再结晶

当加热温度继续升高,原子活动能力增大,变形金属的纤维组织发生了显著的变化,破碎的、被伸长和压扁的晶粒将向均匀细小的等轴晶粒转化。金属的强度、硬度明显下降;塑性、韧性显著提高。由于这一过程类似于结晶过程,也是通过形核和长大的方式完成的,因此称为“再结晶”。再结晶前后晶粒的晶格类型不变,化学成分不变,只改变晶粒的形状,因此再结晶不是相变过程。

开始发生再结晶现象的温度称为再结晶温度。再结晶温度不是一个固定的温度,它与化学成分、冷加工变形量有关。金属变形程度越大,晶体缺陷越多,组织越不稳定,再结晶温度越低。在其他条件相同时,金属的熔点越高,其最低再结晶温度越高。当金属变形程度达到 70%~80%时,再结晶温度趋于稳定。金属中的杂质或合金元素起到阻碍金属原子扩散和晶界迁移的作用,使再结晶温度提高。纯金属的再结晶温度与熔点之间的大致关系为

$$t_{\text{再}} \approx 0.4 t_{\text{熔}}$$

3) 晶粒长大

冷塑性变形的金属经过再结晶后,一般都得到均匀的等轴晶粒。完成再结晶后,变形晶粒完全消失,若继续延长加热时间或提高加热温度,晶粒会明显长大,成为粗晶组织,金属的力学性能将下降,因此必须控制再结晶后金属晶粒的大小。

4. 金属的热塑性变形

1) 热塑性变形对金属组织的影响

在再结晶温度以上,加工后不造成加工硬化的塑性变形称为热塑性变形。热塑性变形能够改善铸态组织,如气泡、缩孔、疏松在高温下焊合,提高了金属的致密程度。铸态的粗大柱状晶通过变形破碎,经再结晶退火使晶粒细化。一些合金钢组织中的大块初生碳化物在变形中被粉碎,并使其分布状况得到了改善等等。在热加工过程中,钢锭中的粗大枝晶和各种夹杂物都沿变形方向伸长,形成流线,这种流线称为纤维组织。

2) 热塑性变形对金属性能的影响

金属的热塑性变形提高了金属的力学性能。钢经热塑性变形加工后,有时会出现带状组织,如图3-26所示。这是由于铸态组织中存在较严重的偏析或终锻(轧)温度过低造成的,应认为这些带状组织是一种缺陷。纤维组织和带状组织的存在,使金属材料力学性能呈现各向异性。在沿纤维伸展的方向上,具有较高的抗拉强度,而在垂直于纤维伸展的方向上,抗剪强度较大。

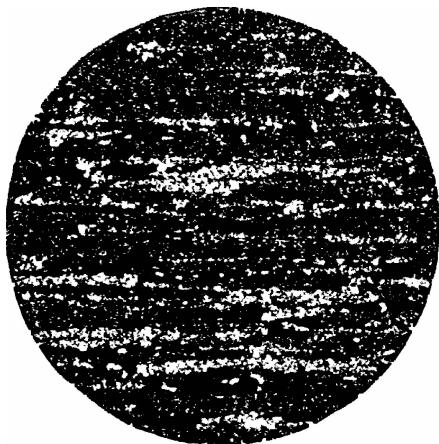
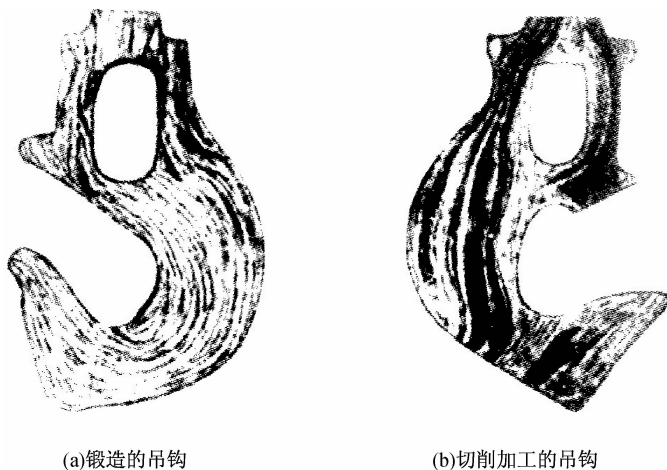


图 3-26 高速钢碳化物带状组织

因此,加工时必须合理控制流线的分布情况,如图 3-27 所示的两种吊钩。由于锻造吊钩(见图 3-27a)的流线是连续的,因而力学性能好得多。



(a)锻造的吊钩

(b)切削加工的吊钩

图 3-27 吊钩流线示意图

热加工流线形成后,用热处理方法难以消除或改变其分布状态,因此在制造和设计受冲击载荷的零件时,要充分考虑锻造流线的分布对金属性能的影响。尽量使纤维与拉应力的方向一致,以发挥其较高的使用性能,热加工流线沿着零件轮廓分布不被切除则更为合理。

5. 热塑性变形与冷塑性变形的对比

金属的冷、热塑性变形通常以再结晶温度为界加以区分。

由于热塑性变形的温度高于再结晶温度,变形所引起的加工硬化很快又发生了再结晶过程,因此,也可以把热塑性变形过程看做是加工硬化和再结晶两个过程叠加的结果。适合于尺寸较大、形状比较复杂的工件变形加工。热塑性变形产品表面易形成氧化皮,尺寸精度和表面质量较低,而且劳动条件较差。自由锻、热模锻、热轧等工艺都属于热塑性变形范畴。

冷塑性变形后具有明显的加工硬化现象,所以冷塑性变形的变形量不宜过大,避免工件撕裂或降低模具寿命。冷塑性变形产品具有尺寸精度高、表面质量好、力学性能好的特点,广泛应用于板料冲压、冷挤压、冷镦及冷轧等常温变形加工。

6. 金属的可锻性

金属的可锻性是衡量材料经塑性成形加工,获得优质锻件难易程度的一项工艺性能。生产中常用金属塑性和变形抗力两个因素来综合衡量。金属的塑性高,变形抗力小,金属的可锻性好,适宜锻压加工成形;相反则金属的可锻性差。

金属的可锻性取决于金属的本质和外界加工条件。

1) 化学成分

金属或合金的化学成分不同,其可锻性也不同。金属中合金元素的质量分数越高,锻造性能越差。一般纯金属的锻造性能优于合金,低碳钢的锻造性能优于高碳钢,碳的质量分数相同的碳钢的锻造性能优于合金钢,低合金钢的锻造性能优于高合金钢。

2) 组织状态

金属的组织状态不同,其可锻性也不同。单一固溶体的塑性高,变形抗力小,可锻性好。单一固溶体组织的晶格类型不同,可锻性也不同。奥氏体比铁素体的可锻性好,而奥氏体、铁素体的可锻性远远高于渗碳体,因此渗碳体不宜锻压加工。铸态柱状组织和粗晶粒结构不如细而均匀的组织可锻性好。钢中碳化物弥散分布的程度越高,晶粒越细小、均匀,其锻造性能越好。

3) 变形温度

金属通过加热可有效地提高其可变形性能。在一定的变形温度范围内,随着金属加热温度的升高,原子间结合力削弱,动能增高,有利于金属滑移变形,金属的可锻性得到改善。如低碳钢在 300℃ 以上随温度升高,塑性升高,从而改善了金属的锻造性能。但加热温度过高,会使金属出现过热、过烧等缺陷,塑性下降。

4) 变形速度

变形速度是指金属(材料)在单位时间内的变形量。采用普通锻压方法时,回复、再结晶不足以消除由塑性变形产生的加工硬化。随着变形速度的增加,金属的塑性降低,变形抗力增大,锻造性能变差。但当变形速度高于临界速度时,产生大量的变形热,使金属温度升高,加快了再结晶速度,金属的塑性增加,变形抗力减小,锻造性能得到改善。变形速度对金属

的塑性及变形抗力的影响如图 3-28 所示。

在锻造加工中,除了高速锤锻和高能成形外,常用的各种锻造设备都不会超过临界变形速度,因此在锻压加工中宜采用较小的变形速度。

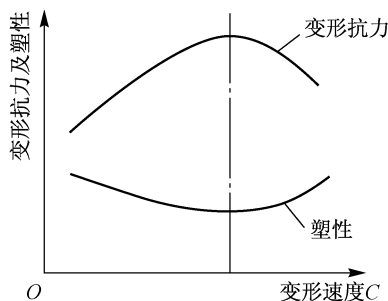


图 3-28 变形速度对金属可锻性的影响

5) 锻造比

锻造比是表示金属变形程度大小的一个参数,通常用变形前后的截面比、长度比或高度比来表示。锻造比与锻造工序有着密切关系。如镦粗时锻造比 Y 一般取值范围为 $2 \sim 2.5$, 拔长时锻造比 Y 一般取值范围为 $2.5 \sim 3$ 。锻造比对锻件质量影响很大,锻造比越大,热变形程度越大,热加工流线也越明显,其金属组织、性能改善越明显。但锻造比过大,金属的力学性能增加不明显,反而会增加金属的各向异性;锻造比过小时性能又达不到要求。

综上所述,在锻压加工中,合理选用金属材料 and 创造有利的变形条件,是提高金属塑性、降低变形抗力、提高其可锻性的最基本条件,这样才能以较小的能量消耗获得高质量的锻压件。

二、锻造工艺过程

锻造工艺过程一般包括加热、锻造成形、冷却、检验和热处理。

1. 加热

在锻造前,对金属进行加热,目的是提高其塑性,降低变形抗力,改善金属的可锻性,使之容易流动成形。

锻造时由始锻温度到终锻温度的间隔称为锻造温度范围。确定锻造温度范围的基本原则是金属在确定的锻造温度范围内具有良好的塑性和较低的变形抗力,并能获得优质锻件,不产生各种缺陷;加热次数少,生产效率高,成本低。碳钢始锻温度和终锻温度的确定主要依据铁碳合金相图。

1) 始锻温度

始锻温度是开始锻造的温度,也是允许的最高加热温度。始锻温度不宜过高,否则可能造成过烧和过热。但始锻温度也不宜太低,否则将缩短锻造操作的时间,缩小锻造的温度范围,增加锻造的困难。一般将始锻温度控制在固相线以下 $150^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 。

2) 终锻温度

终锻温度是停止锻造的温度。终锻温度过高,停止锻造后晶粒在高温下继续长大,使锻件晶粒粗大,降低锻件的力学性能;终锻温度过低,锻件塑性不良,变形困难,内应力增大,甚至导致锻件产生裂纹。碳素钢的终锻温度约为 800°C , 合金钢一般为 $800^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ 。

2. 锻造成形

金属加热后,即可锻造成形。根据锻造时所用的设备、工模具及成形方式不同,可将锻造成形分为自由锻成形和模锻成形等。

3. 冷却、检验与热处理

锻造后的锻件仍有较高的温度,冷却时由于表面冷却快,内部冷却慢,锻件内外冷却收缩不一致,可能会使一些塑性较低或大型复杂锻件产生变形或开裂等缺陷。锻件冷却的方式主要根据材料的化学成分、锻件形状特点和截面尺寸等因素确定。锻件的形状越复杂,尺寸越大,冷却速度越慢。碳钢和低合金钢中小锻件,多采用空冷;中碳钢、高碳钢和大多数低合金钢的中型锻件多在炉灰或干砂中缓冷;中碳钢和低合金钢的大型锻件以及高合金结构钢的重要零件,多在锻造后即将锻件放入 $500\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的炉中随炉缓冷。

锻后的零件或毛坯要按图样技术要求进行检验。经检验合格的锻件,最后进行热处理。

三、锻造技术

1. 自由锻

金属锻造时的变形是在上、下两铁砧之间自由流动的变形称为自由锻。自由锻锻件的形状和尺寸主要由操作工人的操作技术来保证。自由锻有手工锻造和机器锻造两种,机器锻造时的打击能量大,能够锻造较大的锻件。在机器锻造中,目前以压缩空气为驱动力的空气锤较为多见。

自由锻的设备较为简单,锻件表面粗糙,尺寸精度差,生产效率低,适于单件或小批量生产。

1) 自由锻的基本工序

自由锻的工序分为基本工序、辅助工序和精整工序三类。基本工序是使金属塑性变形的的主要工序,包括镦粗、拔长、冲孔、切割、扭转和错移等,常用的为镦粗、拔长和冲孔;辅助工序是为方便基本工序的操作所设置的预先变形工序,包括压钳口、倒棱和压肩等;精整工序能够提高锻件表面质量和精确锻件的尺寸,包括锻件整形和精压等。

(1) 镦粗。镦粗是使坯料的横截面增大和高度降低的工序,分为整体镦粗和局部镦粗,如图 3-29 所示。在大多数情况下,由于上、下铁砧对坯料两端的摩擦阻力所致,镦粗后坯料呈腰鼓形状,需要进行滚圆等纠正性操作。镦粗主要适用于圆盘类零件。

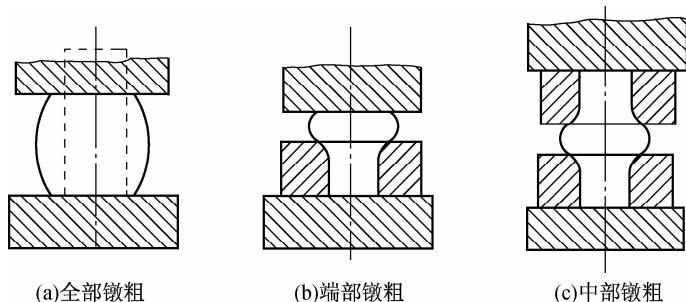


图 3-29 镦粗

(2) 拔长。锻造时使坯料的长度增加、截面减小的工序称为拔长。拔长包括平砧上拔长、带芯棒的拔长。平砧或 V 形砧上拔长主要用于轴杆类锻件;带芯棒拔长用于空心件,如



视频
大型锻件自由锻

套筒等管状锻件。为了使坯料变形均匀,拔长时要不断进行 90° 翻转坯料,如图 3-30 所示。每次送进量不宜太多,以避免坯料横向流动增大,影响拔长效率。

(3) 冲孔。利用冲头在坯料上冲出通孔或盲孔的工序称为冲孔。大多数锻件上的孔均采用实心冲头双面冲孔的方法冲出。冲孔主要用于锻造环套类零件,如圆环和套筒等。

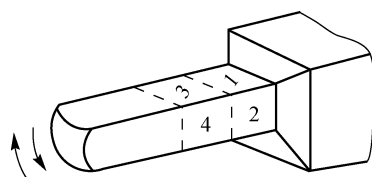


图 3-30 拔长的翻料方案

2) 自由锻工艺规程的制定

自由锻工艺规程是组织生产过程、规定操作规范、控制和检查产品质量的依据。自由锻工艺规程的制定主要包括绘制锻件图、确定锻造工序、计算坯料尺寸等,同时也要考虑锻造的锻造比、加热范围、锻造设备和辅助工具等。

(1) 绘制锻件图。锻件图是编制锻造工艺、设计工具、指导生产和检验锻件的主要依据,是根据零件的形状和大小,结合自由锻工艺特点绘制而成的。如图 3-31 所示为典型锻件及锻件图,图中用双点画线画出零件的主要轮廓形状,并在锻件尺寸线下面用括号注明零件尺寸。绘制锻件图应考虑工艺余块、加工余量、锻件公差等因素。

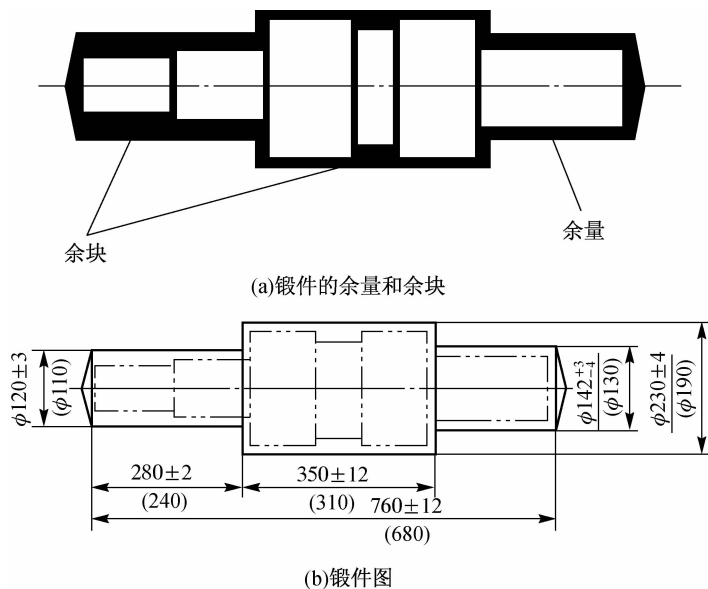


图 3-31 典型锻件及锻件图

① 工艺余块。为了简化自由锻件外形,在其难以锻造的部分(如零件上的小孔、台阶和凹档等处)增加一部分金属,增加的那一部分金属称为余块。添加余块应综合考虑工艺的可行性和金属材料的消耗等因素。

② 加工余量。自由锻件尺寸精度低,表面质量较差,一般需进行切削加工,因此在零件加工表面上需增加供切削加工用的金属层,增加的金属层称为余量。一般加工余量的大小与零件的形状、尺寸等因素有关。零件越大,形状越复杂,则加工余量越大。

③ 锻件公差。锻件实际尺寸(锻造尺寸)相对于锻件公称尺寸(零件基本尺寸+加工余量)所允许的变动量称为锻件公差。锻件公差的确定方法与加工余量的确定方法基本相同,通常为加工余量的 $1/4 \sim 1/3$ 。

锻件加工余量及公差可查阅相关手册。

(2)确定锻造工序。锻件形状不同,锻造工序也不相同。盘类零件一般需要以镦粗为主的锻造工序,轴类零件需要以拔长为主的锻造工序。

(3)计算坯料尺寸。根据锻件塑性变形前后的体积不变定律,按照锻件图中锻件的形状和尺寸,可以确定坯料的质量大小。计算锻件质量时还要考虑夹持部分的质量大小。根据计算出的锻件质量大小可以确定原始坯料的尺寸。由原始坯料的尺寸和锻件尺寸可以计算锻件的锻造比。采用轧制的碳钢锻造时,一般锻造比控制在 1.3~1.5。

2. 模锻

模锻是使材料在锻模模膛内一次或多次承受冲击力或压力的作用,而被迫流动成形的锻造方法。由于模膛对金属坯料流动的限制,最终获得的锻件与模膛形状相同。

1)模锻的主要特点

模锻加工的成形具有如下特点。

- (1)生产效率高,金属的变形在模膛内进行,锻件成形快,一般比自由锻高数倍。
- (2)锻件尺寸精度高,加工余量小,从而节约金属材料和切削加工的工时。
- (3)能锻造形状比较复杂的锻件。
- (4)热加工流线分布合理,大大提高了零件的力学性能和使用寿命。
- (5)操作过程简单,易于实现机械化和自动化生产,可以使工人劳动强度低。

由于锻模是用优质模具钢制成的,成本高,而且坯料整体变形,变形抗力较大,加工工艺复杂,生产周期长。因此,模锻只适用于中、小型锻件的大批量生产。

2)常用的模锻方法

按使用设备的不同将模锻分为锤上模锻、压力机上模锻和胎模锻等。

(1)锤上模锻。锤上模锻是在模锻锤上进行的模锻,可进行镦粗、拔长、滚挤、弯曲、成形、预锻和终锻等各变形工步的操作。

锤上模锻用的锻模是由带燕尾的活动上模 2 和固定下模 4 两部分组成,并分别用紧固楔铁 7、10 紧固在锤头 1 和模座 5 上。上、下模合模后,中部形成完整的模膛 9、分模面 8 和飞边槽 3,如图 3-32 所示。

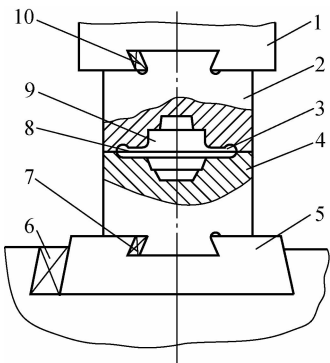


图 3-32 锻模构造

1—锤头；2—活动上模；3—飞边槽；4—固定下模；5—模座；
6、7、10—紧固楔铁；8—分模面；9—模膛

根据模膛的作用,锻模模膛可分为制坯模膛和模锻模膛两类。

制坯模膛的主要作用是使坯料形状基本接近模锻件形状,合理分布金属材料。

模锻模膛又可分为预锻模膛和终锻模膛两种。预锻模膛的作用是使坯料变形接近于锻件的形状和尺寸,使金属更容易充满终锻模膛,减少模膛磨损,增加模膛使用寿命。终锻模膛的形状和锻件形状相同,使坯料最后变形到锻件所要求的形状和尺寸。

根据模膛在锻模中的个数不同,模膛可分为单模膛和多模膛。单模膛形状与锻件基本相同,用于形状比较简单的锻件。但因锻件的冷却收缩,模膛尺寸应比锻件尺寸放大一个收缩量。在模膛的四周设有飞边槽,飞边槽的作用有三个:容纳多余的金属;有利于金属充满模膛;增加金属从模膛中流出的阻力,缓和上、下模间的冲击,延长模具的寿命。对于形状复杂的锻件,可在一副锻模上设置几个模膛,以便提高生产率,这类模膛称为多模膛,如图 3-33 所示为弯曲连杆在多模膛内的模锻过程。多模膛用于截面相差大或轴线弯曲的轴(杆)类锻件及形状不对称的锻件,多模膛由拔长模膛、滚压模膛、弯曲模膛、预锻模膛、终锻模膛等组成。

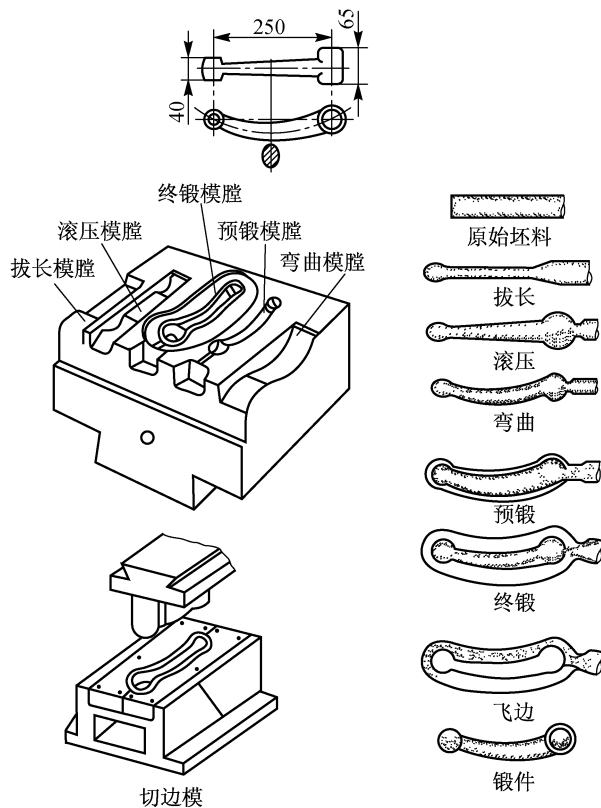


图 3-33 弯曲连杆在多模膛的模锻过程

(2) 压力机上模锻。模锻锤工作时振动噪音大,劳动条件差,因此近年来逐渐被压力机所代替。

① 摩擦压力机模锻。摩擦压力机是利用摩擦传动的,故称为摩擦压力机,其工作原理如图 3-34 所示。电动机 4 经过传动带 5 使装有两个圆轮 6 的圆轮轴旋转,锻模分别安在滑块 10 和机座 1 上,螺杆 8 两端分别与滑块 10 和飞轮 7 相连,并穿过固定在机架 2 上的螺母 9 带动滑块 10 沿导轨 3 作上下滑动。工作时,通过改变操纵杆位置可使圆轮轴沿轴向窜动。当某一圆轮靠紧飞轮边缘时,依靠摩擦力带动飞轮 7 和螺杆 8 作不同方向的转动。在螺母的制约下螺杆的转动变为滑块的上下滑动,实现模锻生产。

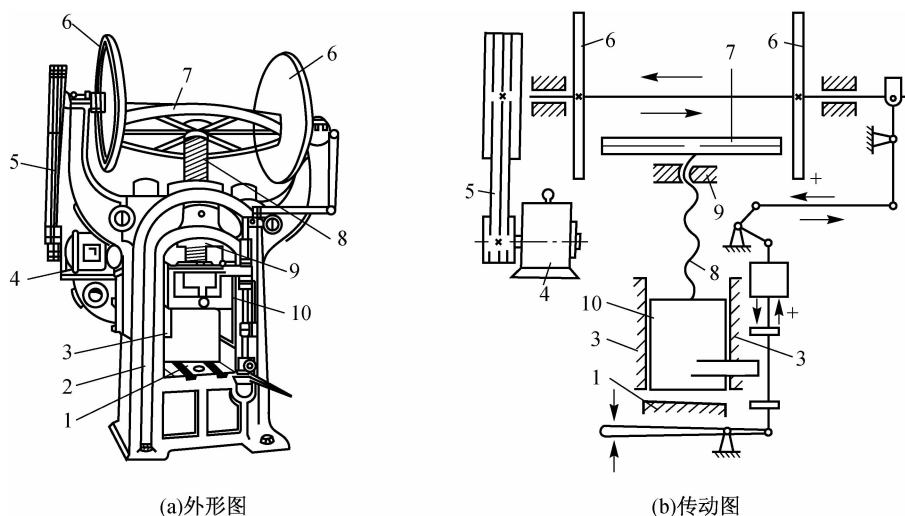


图 3-34 摩擦压力机传动图

1—机座；2—机架；3—导轨；4—电动机；5—传动带；6—圆轮；
7—飞轮；8—螺杆；9—螺母；10—滑块

摩擦压力机模锻的特点是能满足不同变形要求的锻件，工艺适应性强，如锻粗、成形、弯曲、预锻、终锻、切边、矫正等；滑块速度低(0.5~1 m/s)，锻击频率低(3~42 次/分)，易于锻造低塑性材料，金属变形过程中的再结晶可以充分进行；生产效率低，适用于单模膛模锻；摩擦压力机结构简单，造价低，维护方便，劳动条件好，是中、小型工厂普遍采用的锻造设备。

②曲柄压力机模锻。曲柄压力机又称为热模锻压力机，其传动系统如图 3-35 所示。曲柄连杆的运动由离合器 1 控制，使曲柄 2 旋转，通过连杆 3 带动滑块 4 上下往复运动，进行锻造加工。

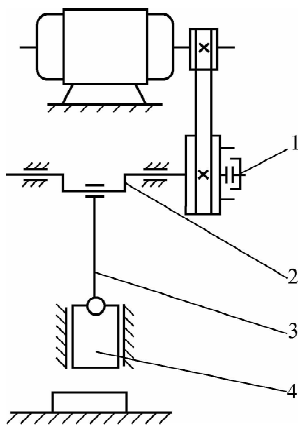


图 3-35 曲柄压力机传动图

1—离合器；2—曲柄；3—连杆；4—滑块

曲柄压力机模锻的特点是金属坯料在静压力下变形，无振动，噪音小，劳动条件好；机身刚度大，且具有良好的导向装置，上下模膛合模准确，锻件不易产生错移；锻造时滑块行程固定不变，锻件一次成形，易实现机械化和自动化，生产效率高；压力机上有推杆装置，能把锻件推出模膛，因此减小了模膛斜度。

曲柄压力机的设备费用高,结构较复杂,适用于大批生产的模锻件。

③平锻机模锻。平锻机属于曲柄压力机类设备,与普通曲柄压力机的主要区别在于平锻机具有两个滑块(主滑块和夹紧滑块),而且彼此是在同一水平面沿相互垂直方向作往复运动进行锻造的,故取名为平锻机或卧式锻造机。

利用平锻机可锻造出其他设备难以完成的两个方向上带有凹槽或凹孔的锻件;生产效率高,锻件尺寸精确,表面光洁;可完成切边、剪料、弯曲、热精压等联合工序。

(3)胎模锻。在自由锻设备上,使用可移动胎模具生产锻件的锻造方法称为胎模锻。胎模不固定在自由锻锤的砧块上,需要时才放上去。锻造时,将加热后的坯料放入胎模锻压成形。一般是先将坯料经过自由锻预锻成近似锻件的形状,然后在胎模内终锻成形。

按照胎模的结构形式,常用胎模可分为以下几种:

①摔模。适用于锻造回转体轴类锻件,如图 3-36(a)所示。

②扣模。用来对坯料进行局部或全部扣形,适用于生产非回转体的扣形件和制坯,如图 3-36(b)所示。

③套筒模。呈套筒形,适用于生产回转体盘类锻件,如齿轮、法兰盘等,如图 3-36(c)所示。

④合模。适用于生产形状复杂的非回转体锻件,如连杆及叉类件,如图 3-36(d)所示。

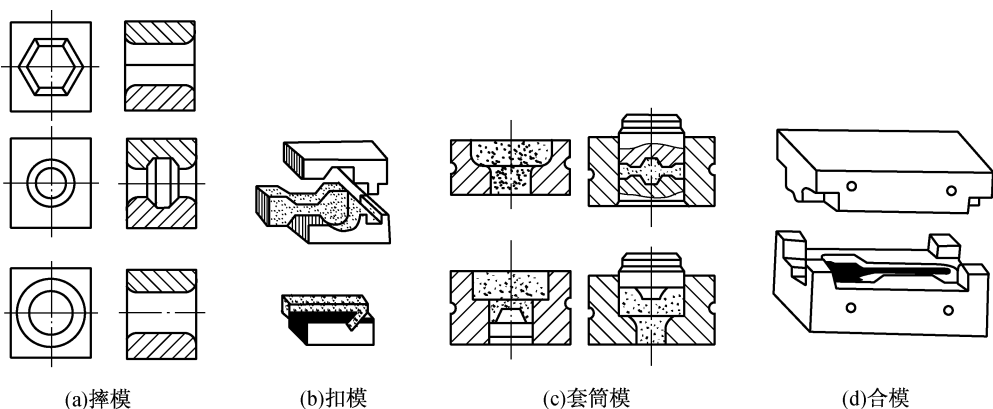


图 3-36 胎模种类

胎模锻与自由锻相比可获得形状较为复杂、尺寸较为精确的锻件,可节约金属,提高生产效率。与其他模锻相比,它具有模具简单、便于制造、造价低廉等优点。胎模锻生产效率低,锻件质量也不如其他的模锻,工人劳动强度大,锻模的寿命低,因此这种模锻方法适用于中、小批量生产,它在没有模锻设备的工厂中应用较为普遍。

四、板料冲压

板料冲压是利用装在压力机上的模具对金属板料加压,使其产生分离或变形,从而获得毛坯或零件的一种加工方法。因其坯料通常都是厚度在 1~2 mm 以下的金属板料,而且冲压时一般不需加热,所以板料冲压又称为薄板冲压或冷冲压,简称为冷冲或冲压。

板料冲压能压制形状复杂的零件,冲压件的尺寸精度高,互换性好,可直接装配使用。而且冲压件的强度高,刚度好,质量轻,材料的利用率高。板料冲压操作简便,易于实现机械化、自动化,生产效率高。但是板料冲压模具制造周期长,并需要较高的制模技术,成本高,因此板料冲压适用于大批量生产。在汽车、拖拉机、电机电器、仪表、国防工业及日常生产中

都得到广泛的应用。

冲压生产的工序有多种,其基本工序分为分离工序和变形工序两大类。分离工序是使坯料的一部分相对于另一部分产生分离的工序,主要包括剪切、冲裁、切口、切边及修整等;变形工序是使坯料的一部分相对于另一部分产生位移而不破坏的工序,包括弯曲、拉深、翻边、胀形等。

1. 冲裁

使坯料沿着封闭的轮廓线产生分离的冲压方法称为冲裁,包括冲孔和落料。二者坯料的变形过程和模具结构都是相同的,不同的是,对于冲孔来讲,板料上冲出的孔是产品,冲下来的部分是废料;而落料工序冲下来的部分为产品,周边是废料。

冲裁的变形过程如图 3-37 所示,板料在凸、凹模之间冲裁分离的变形过程可分为以下三个阶段。

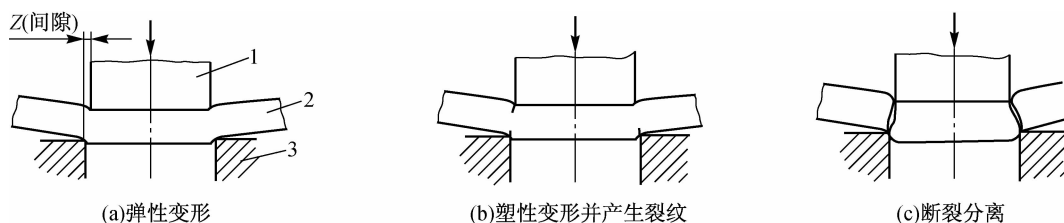


图 3-37 冲裁的变形

1—凸模; 2—板料; 3—凹模

1) 弹性变形阶段

凸模压缩板料,产生局部弹性拉深与弯曲变形,凹模上的板料向上翘曲。翘曲与凸凹模间隙有关,间隙越大,翘曲越严重。

2) 塑性变形并产生裂纹阶段

凸模继续压入,当材料的内应力超过屈服极限时,开始塑性变形,并引起加工硬化。随着凸模压入深度的增加,应力集中的刃口附近出现裂纹,此时冲裁力最大。

3) 断裂分离阶段

随着凸凹模刃口继续压入,裂纹向材料内部扩展并重合,使板料断裂分离。

冲裁后的断面分为圆角、光亮带、剪裂带和毛刺四部分,如图 3-38 所示。光亮带是在塑性变形开始阶段,凸凹模刃口附近挤压板料表面形成的,断面平整、光滑,尺寸精度比较高;剪裂带是由于微裂纹继续扩展形成倾斜的粗糙面;圆角是变形区的材料产生弯曲和拉伸变形的结果;毛刺是由于材料出现断裂时,凸凹模刀刃变钝或间隙不均匀产生的尖刺。

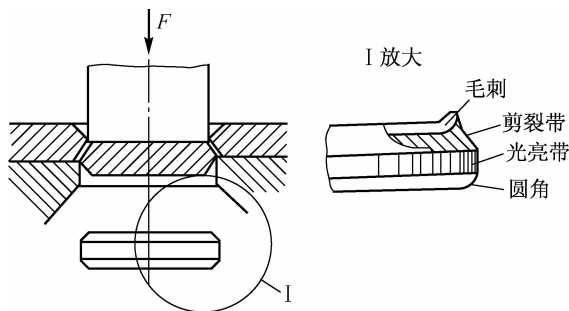


图 3-38 冲裁断口的组成

断面处各部分在冲裁断面所占的比例的大小,与材料的性质、厚度、冲裁凸凹模间隙、模具结构及冲裁条件等有关。材料的塑性好,光亮带宽,圆角和毛刺小,剪裂带窄;材料的塑性差则相反。

对于同一种材料,断面质量主要受凸凹模间隙的影响。在合理的冲裁间隙范围内,上、下裂纹能自然会合,光亮带约占板厚的 $1/3$,冲裁件断面质量处于最佳状态,冲裁件的尺寸几乎与模具一致,完全可以满足使用要求。如果间隙过大,上、下裂纹错开形成双层断裂层,光亮带变小,断面粗糙,毛刺增大;间隙过小,上、下裂纹边不重合,光亮带较大,毛刺也较大,断面质量差,同时模具刃口易磨损,使用寿命大大降低。因此,生产上采用合理的冲裁间隙是保证冲裁件质量的关键,合理的冲裁间隙应为材料厚度的 $6\% \sim 15\%$ 。冲裁间隙与材料性质、厚度有关,厚板与塑性低的金属应选上限值,薄板或塑性高的金属应选下限值。

为了节省材料,减少废料,可利用冲孔余料冲制较小的落料件。对于冲孔件,可先落料后冲孔,或在连续冲裁模上同时落料和冲孔;对于落料件,应仔细考虑排样方法,如图 3-39 所示为落料件的两种排料方式,其中图 3-39(a)、(b)为有搭边的排料方式,其材料的利用率不高,但落料件尺寸质量好;图 3-39(c)、(d)采用无搭边的排料方式,虽然材料利用率很高,但零件尺寸难以保证,这种排料方式应用于要求不高的场合。

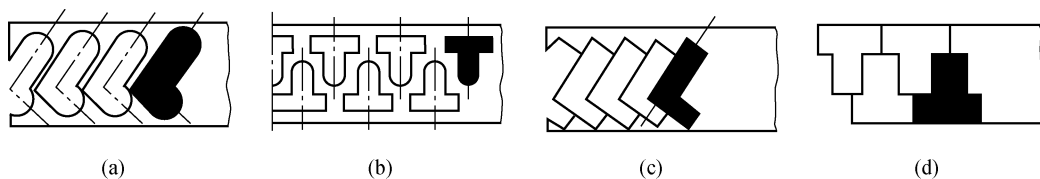


图 3-39 排料方式

2. 弯曲

弯曲是将板料、型材或管材在弯矩作用下,弯成具有一定的曲率和角度的成形方法,如图 3-40 所示。弯曲工序在生产中应用很广泛,如汽车大梁支架、自行车车把、门搭链等都是用弯曲方法成形的。

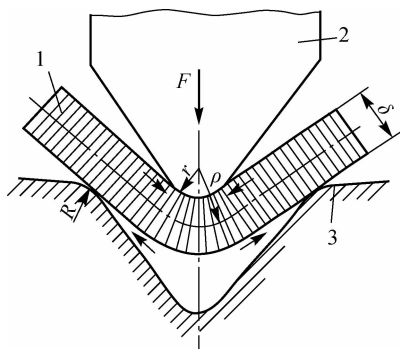


图 3-40 弯曲时的金属变形

1—坯料; 2—凸模; 3—凹模

1) 弯曲变形过程

当凸模下压时,板料外层金属受切向拉应力作用发生伸长变形,内层金属受切向压应力

作用发生缩短变形,而在板料中心部位的金属没有应力-应变的产生,故称为中性层。在弯曲变形区内,当拉应力超过材料的抗拉强度时,将会产生金属弯裂现象。为防止弯裂,生产上规定出最小弯曲半径 $r_{\min}$,通常取 $r_{\min} = (0.25 \sim 1)\delta$,其中 δ 为金属板料的厚度。材料塑性好,则弯曲半径可取较小值。

2) 弯曲变形后的质量缺陷

弯曲变形后容易产生的质量缺陷有弯裂、回弹和偏移。

为了防止弯裂,弯曲时应尽可能使弯曲线与坯料纤维方向垂直,同时也有利于提高零件的使用性能。在外载荷作用下,板料产生的变形是由塑性变形和弹性变形组成的。外载荷去除后,弹性变形要恢复,使零件的弯曲角增大,这种现象称为弹复。弹复程度通常以弹复角 $\Delta\alpha$ 表示。为抵消弹复现象对弯曲件质量的影响,在设计弯曲模时应考虑模具的角度比弯曲件小一个弹复角,一般弹复角为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 。材料的屈服极限越大,弹复角越大,弯曲半径越大。偏移是坯料沿凹模圆角变形时,由于坯料受到不同摩擦阻力的作用产生向左或向右偏移的现象。一般可利用零件上的工艺孔或压料装置加以排除。

3. 拉深

拉深是将冲裁得到的平板毛坯利用拉深模制成开口空心零件的成形工艺方法。用拉深的方法可以制成筒形、阶梯形、锥形、方盒形以及其他不规则和复杂的薄壁零件,在汽车、拖拉机、电器、仪表、电子等工业部门以及日常生活中应用很广泛。

1) 拉深过程

如图 3-41 所示,在凸模的作用下,坯料产生形状和厚度的变化,原始板料形成内径为 d ,高度为 H 的空心筒件。

在拉深过程中,板料各处的受力情况和变形过程是不一样的,如图 3-42 所示。

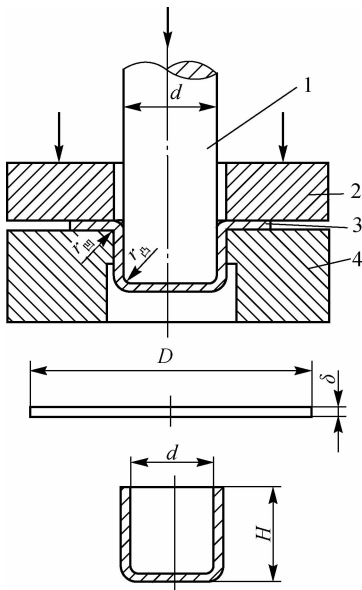
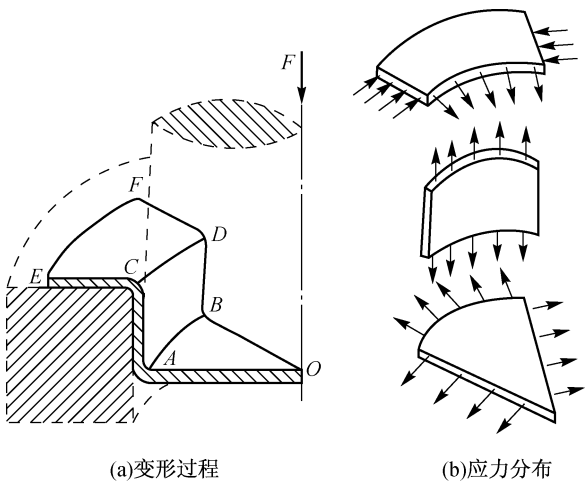


图 3-41 拉深过程

1—凸模；2—压边圈；3—板料；4—凹模



(a) 变形过程

(b) 应力分布

图 3-42 拉深过程中的变形与应力

(1)OAB 区形成筒底。在整个拉深过程中,这部分金属基本上不变形,受到径向和切向拉应力,其厚度不变。

(2)ABDC 区由底部以外的环形部分变形后,形成筒的侧壁。受到单向的轴向拉应力,其厚度有所减小,侧壁与筒底之间的过渡圆角部位被拉薄得最严重。

(3)CDEF 区(法兰部分)是坯料尚未进入凹模的环形区。受到径向拉应力和切向压应力,其厚度有所增加,如果继续拉深也将转化为侧壁。

2)拉深后的质量缺陷

拉深件最容易产生的质量缺陷是起皱和拉裂。在拉深过程中,坯料的法兰部分受到切向压应力达到一定数值时,将失去稳定而产生拱起,称为起皱,如图 3-43 所示。拉裂主要产生在侧壁与底的过渡圆角处,当拉应力超过材料的抗拉强度时,此处将被拉裂。

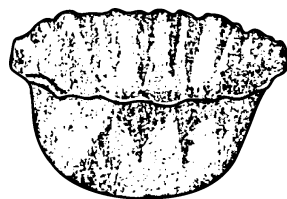


图 3-43 起皱

防止筒形拉深件产生拉裂、起皱等缺陷,可采取以下措施。

(1)凸凹模边缘都要做成圆角。凹模圆角半径 $r_{凹} = 10\delta$,凸模圆角半径 $r_{凸} = (0.6 \sim 1)\delta$,其中 δ 为板料的厚度。

(2)凸凹模之间应留有合适的间隙 Z 。一般 $Z = (1.1 \sim 1.2)\delta$,间隙过小易产生拉裂,降低模具的使用寿命;间隙过大则拉深件起皱,影响其精度。

(3)正确选用拉深系数。拉深系数是衡量拉深变形程度的指标。拉深后直径 d 与坯料直径 D 的比值称为拉深系数,用 m 表示,即 $m = d/D$ 。 m 越小,拉深件直径越小,变形程度越大,坯料拉入凹模越困难,越容易拉裂。一般 m 取值范围为 $0.5 \sim 0.8$,坯料的塑性好,可取小值。如果要求 m 值很小时,则不应一次拉深成形,可进行多次拉深,但在多次拉深过程中,将产生加工硬化现象,应安排再结晶退火。

(4)要进行良好润滑。为减小拉深件部位的拉应力及减少模具的磨损,拉深时应适当加入润滑剂。

(5)采用压边圈把坯料边缘压紧,可防止起皱。

学习情境三 焊接成形

焊接是指通过加热或加压,或二者并用,并且用(或不用)填充材料使分离的焊件牢固接合在一起的一种加工方法。

一、焊接概述

焊接通常指的是各种同种或异种金属材料(包括各类钢材、铝合金、钛合金、铜合金、镍合金以及其他一些特种金属合金)之间的连接。据工业发达国家统计,每年仅需要进行焊接加工之后使用的钢材就占钢总产量的 45% 左右。

1. 焊接的特点

焊接与其他连接方法有着本质的区别。焊接使被连接的焊件不仅在宏观上建立了永久性的联系,而且在微观上建立了组织之间的内在联系。焊接过程中必须使两个分离焊件(通常是金属)的连接表面接近到原子间的结合力能够发生作用的程度,换言之,要接近到金属

内部原子间的距离。为此,焊接时往往需要采用加热或加压或二者并用的措施来促使两个分离焊件紧密接触连接。

焊接具有以下特点。

- (1)焊接比其他的连接方法具有更高的强度及更好的密封性,且质量可靠。
- (2)可减轻结构质量,节约大量金属材料。
- (3)生产率高,便于机械化、自动化生产。
- (4)可以制造双金属结构的工件。
- (5)产品成本低。

2. 焊接方法分类

焊接方法种类繁多,而且新的方法仍在不断涌现,目前一般按其焊接过程的不同将焊接分为三大类。

1) 熔焊

熔焊是将待焊处的母材金属熔化以形成焊缝的焊接方法。实现熔焊的关键是加热热源,并且焊接时必须采取有效的措施隔离空气,以保护高温焊缝。

2) 压焊

焊接过程中,必须对焊件施加压力(加热或不加热)以完成焊接的方法称为压焊。

3) 钎焊

采用比母材熔点低的金属材料做钎料,将焊件和钎料加热到高于钎料熔点、低于母材熔点的温度,利用液态钎料润湿母材,填充接头间隙并与母材相互扩散实现连接的焊接方法称为钎焊。

热切割(如气割、等离子切割、激光切割等)、表面堆焊、喷镀、碳弧气刨、胶接等均是与焊接方法相近的金属加工方法,通常也属于焊接专业的技术范围。

二、焊条电弧焊

焊条电弧焊是应用最广泛的焊接方法。焊条电弧焊是用手工操作焊条进行焊接的方法,如图 3-44 所示。焊接时,焊工手握夹持着焊条的焊钳进行焊接,焊条和工件之间产生的电弧将工件局部加热到熔化状态形成熔池。随着电弧向前移动,熔池尾部液态金属逐步冷却结晶,最终形成焊缝。其焊接过程如图 3-45 所示。

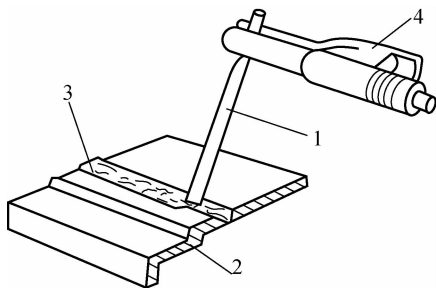


图 3-44 焊条电弧焊的操作

1—焊条; 2—工件; 3—焊缝; 4—绝缘手柄

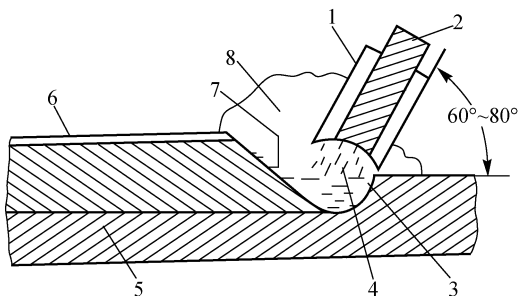


图 3-45 焊条电弧焊的焊接过程

1—涂层; 2—焊芯; 3—焊缝弧坑; 4—电弧; 5—热影响区;
6—熔渣; 7—熔池; 8—保护气体



视频
电弧焊远离及
操作

焊条电弧焊使用的设备简单,方法简便灵活,适应性强,但对焊工操作技术要求高,焊接质量在一定程度上取决于焊工的操作技术水平。此外,焊条电弧焊劳动条件差,生产率低。因此,适用于焊接单件或小批量产品,短的和不规则的,各种空间位置的以及不宜实现机械化焊接的焊缝。

焊条电弧焊适用于碳钢、低合金钢、不锈钢、铜及铜合金等金属材料的焊接,铸铁焊补和各种金属材料的堆焊等。

1. 焊接电弧

电弧是所有电弧焊接方法的能源。从物理本质上讲,电弧是电极与焊件之间的气体介质强烈持久的一种放(导)电现象。

常态下的气体不含带电粒子,要使气体导电,首先要有一个使它产生带电粒子的过程。在气体两端通过两个电极加上电压一般是不能使它产生电流的,必须先用其他措施使它产生带电粒子(如焊接中常见的把两个电极短路并迅速拉开),然后才能在外加电压作用下产生电流;其次是气体导电时,电流与电压的关系也很复杂,即在不同的电流范围内维持气体导电的电压数值变化很大。电弧是电流最大、电压最低、温度最高、发光最强的一种气体导电现象。

为了保持电弧的稳定,在电弧中间需不断发生电离作用,这种电离作用是由高温的阴极表面不断逸出电子和电弧区的高温状态而得到的。

2. 电弧的构造及极性

电弧是由阴极区、阳极区和弧柱区所构成的,如图 3-46 所示。各区域的温度随所用电极材料而不同。不同电极材料的阴极、阳极的温度可以高达 $2\,000\sim 4\,200\text{ K}$,一般阳极温度高于阴极温度,且多低于电极材料的沸点,但都可以使大多数的处于电弧阴极或阳极的金属达到熔化温度,并可能产生少量金属原子蒸气。弧柱区的温度受电极材料、气体介质、电极大小等因素的影响可在 $5\,000\sim 30\,000\text{ K}$ 之间。钢焊条焊接时,阳极区的温度可达 $2\,600\text{ K}$,阴极区的温度可达 $2\,400\text{ K}$,弧柱区的中心温度可达 $5\,000\sim 8\,000\text{ K}$ 。

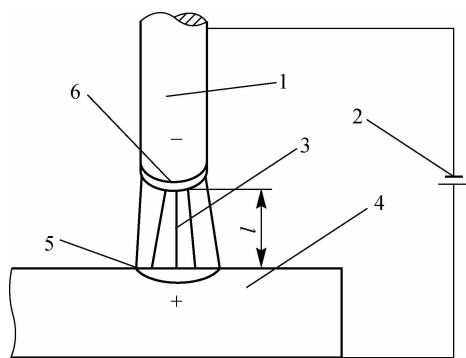


图 3-46 电弧结构示意图

1—焊条; 2—电源; 3—弧柱区; 4—焊件; 5—阳极区; 6—阴极区

阳极区的温度高于阴极区的温度,当采用直流电源焊接时,电极有两种接法:将工件接正极,焊条接负极,称为正接法,用于高熔点、尺寸较大的焊件的焊接;将工件接负极,焊条接正极,称为反接法,用于薄件、有色金属、不锈钢及铸铁等的焊接,如图 3-47 所示。

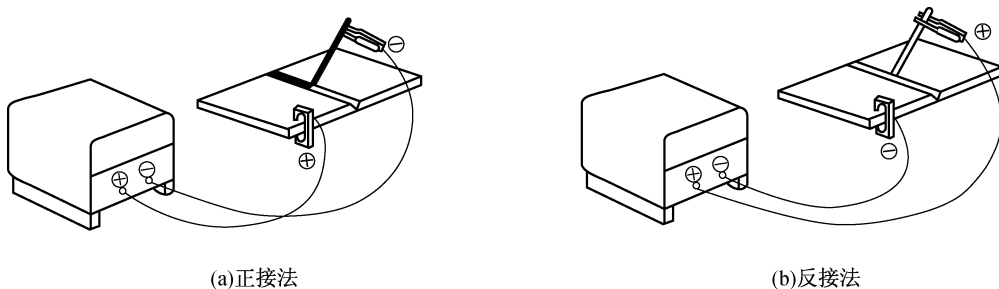


图 3-47 电极的两种接法

用交流电源焊接时,因为交流电极性是变化的,所以也就不存在正接法和反接法,两极的温度相等。一般情况下,交流电弧的稳定性比直流电弧差。

3. 焊接冶金的特点

焊条电弧焊以外部涂有涂料的焊条作为电极和填充金属。电弧在焊条的端部与被焊工件表面之间燃烧。涂层在电弧热作用下一方面可以产生气体以保护电弧;另一方面可以产生熔渣覆盖在熔池表面,防止熔化金属与周围气体的相互作用。同时,熔渣可与熔化金属产生物理化学反应以添加合金元素,改善焊缝金属的性能。

焊接时,在液态金属、熔渣和气体间进行一系列的冶金反应,其反应过程与一般冶炼反应过程有所不同。首先,从熔化到凝固的时间极短,熔池金属在焊接过程中温度变化很快,使得冶金反应的速度和方向发生迅速变化,有时气体和熔渣来不及浮出,就会在焊缝中产生气孔和夹渣的缺陷;其次,焊接电弧和熔池的温度比一般冶炼温度高,容易造成合金元素的蒸发和烧损。因此,焊前必须对焊件进行清理,焊接过程中必须对熔池金属进行机械保护和合金化。机械保护是指利用熔渣、保护气体等机械地把熔池与空气隔开;合金化是指向熔池中添加合金元素,以便改善焊缝金属的化学成分和组织。

4. 焊接工艺

1) 焊接接头

在焊条电弧焊中,由于产品结构形状、材料厚度和焊缝质量要求不同,需要采用不同形式的接头进行焊接。接头形式有对接、搭接、角接和 T 形接头,如图 3-48 所示。

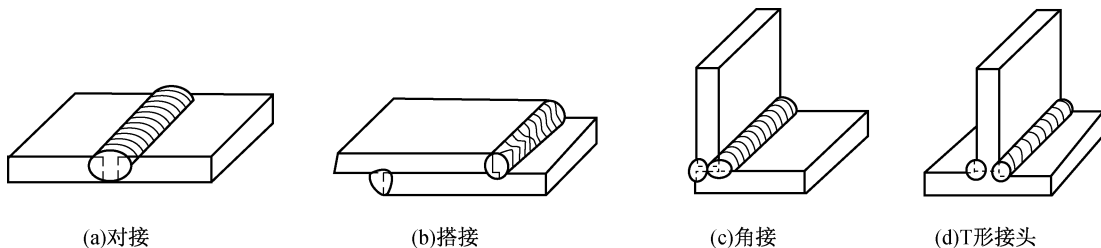


图 3-48 焊接接头形式

2) 接头的准备工作

接头的准备工作包括坡口、间隙和导钝。这些准备工作做得好,可使焊接时容易焊透,又可避免烧穿,有利于保证焊缝质量和焊缝尺寸。

坡口的几何形状如图 3-49 所示,坡口形式由焊件的厚度决定。

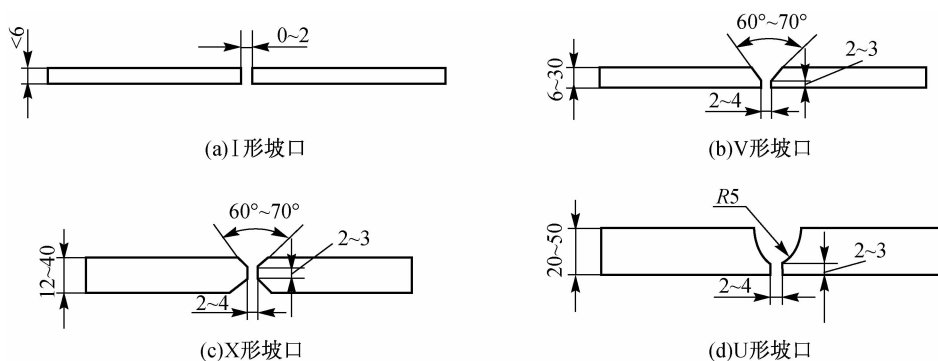


图 3-49 坡口形式

3) 焊条直径和焊接电流的选择

焊条直径和焊接电流直接影响焊接质量和生产率。

焊条直径取决于焊件厚度、接头形式和焊缝空间位置,通常按焊件厚度选取。焊接电流一般按焊条直径选取。增大焊接电流能提高生产率,增加熔深。但当电流太大时,会造成焊缝咬边、烧穿、飞溅和焊缝成形不良等缺陷;电流太小,电弧燃烧不稳定,易造成夹渣、未焊透等缺陷,且生产率低。

4) 操作方法

(1) 引弧。引弧的方法有敲击法和划擦法两种,如图 3-50 所示。敲击法引弧是将焊条垂直地接触焊件表面,短路后,立即将焊条提起;划擦法引弧与擦火柴相似,将焊条在焊件表面划动一下,点燃电弧。

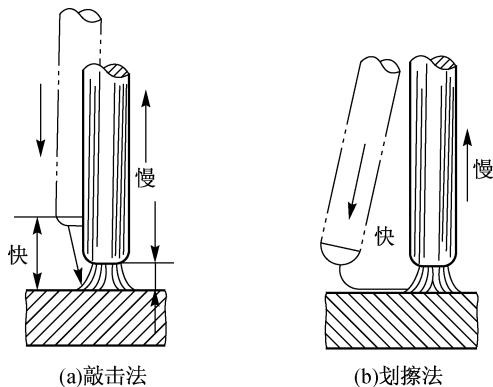


图 3-50 引弧的方法

(2) 控制弧长。电弧过大容易发生焊不透现象,还会使焊缝吸收有害气体;电弧过短,又会使焊条粘着焊件。一般规定正常的电弧长度 $L = (0.3 \sim 1.1)d$, d 为焊条直径。焊接时,焊工以与焊条熔化相同的速度将焊条送入电弧中,以保持电弧的长度不变。

(3) 运条。电弧引燃后,焊条需沿着焊接方向移动,移动太快焊不透,太慢则使焊缝过高,甚至发生焊穿等缺陷。为了获得所需宽度的焊缝,焊接时焊条还必须作横向摆动,而且力求均匀一致,以获得同样宽度的整齐焊缝。

5. 焊接接头的组织与性能

焊接后由焊缝、熔合区以及因焊接热而产生的热影响区三部分组成焊接接头。焊接接

头组织与性能对焊接质量影响很大。

1) 焊缝的组织与性能

焊缝是指焊件经焊接形成的接合部分。焊缝区为铸态组织,加热时使该区域的金属全部融化。随着焊接热源的向前移动,熔池中的液态金属开始迅速冷却结晶,然后形成焊缝。焊缝金属的结晶,首先从熔池底壁上许多未熔化的半个晶粒开始,逐步向熔池中心发展,生成柱状树枝晶,如图 3-51 所示。最后这些柱状树枝晶向前一直伸展到焊缝中心,相互接触后停止生长。结晶结束后得到的铸态组织晶粒粗大,组织不致密。当焊缝形状窄而深时,硫、磷等低熔点杂质易集中在焊缝中心上形成偏析,导致焊缝塑性降低,且易产生热裂纹。

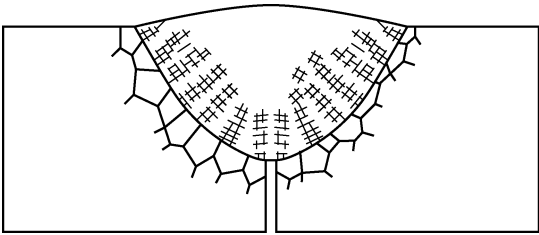


图 3-51 焊缝的柱状树枝晶

在焊接过程中,由于熔池体积小,冷却速度快,再加上严格控制焊芯的硫、磷含量,并通过焊条材料渗入合金,补偿合金元素的烧损,所以正常焊接时,焊缝的力学性能不低于母材金属。

2) 熔合区和热影响区的组织与性能

(1) 熔合区。熔合区是指在焊接接头中焊缝向热影响区过渡的区域。熔合区的温度介于固相线和液相线之间,已熔化的金属结晶后为铸态,未熔化晶粒因受到高温影响而造成晶粒严重粗大,化学成分不均匀,其力学性能最差,严重影响了焊接接头的力学性能。

(2) 热影响区。热影响区是指焊缝附近的金属,在焊接热源作用下,发生组织和性能变化的区域。热影响区各点温度不同,相当于各自经受了一次不同温度的热处理,其组织、性能不同。低碳钢的焊接接头热影响区可分为过热区、正火区和部分相变区,如图 3-52 所示。

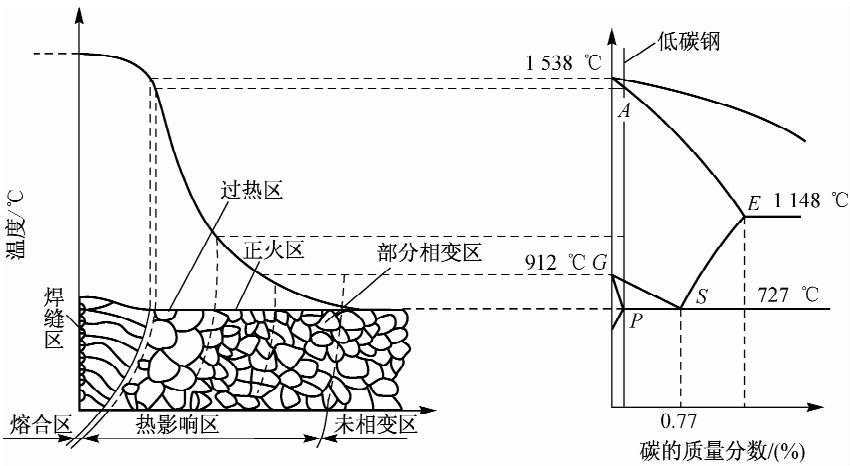


图 3-52 低碳钢的焊接接头

①过热区。温度在 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 至固相线之间,金属处于严重过热状态。奥氏体晶粒急剧长大,冷却后得到晶粒粗大的组织,其塑性、韧性很低。焊接刚度大的结构件,容易产生焊接裂纹。

②正火区。温度在 A_{c3} 至 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 之间,金属相当于经过正火处理,晶粒细化,力学性能好。

③部分相变区。温度在 $A_{c1} \sim A_{c3}$,加热时出现部分奥氏体晶粒,但保留的铁素体晶粒长大,部分金属组织发生相变。冷却后未熔的铁素体保留粗大晶粒,奥氏体转变为珠光体。晶粒大小不均匀,力学性能稍差。

易淬火钢的热影响区分为淬火区(A_{c3} 以上的区域)和部分淬火区($A_{c1} \sim A_{c3}$ 区域)。由于冷却速度过快,焊后在淬火区形成马氏体组织,易产生冷裂纹。

综上所述,熔合区、过热区及淬火区对焊接接头影响最大,因此在焊接过程中应尽量减少其宽度。

6. 焊接应力与变形

焊接应力是指焊接过程中焊件内产生的应力。焊接变形是指焊接过程中焊件产生的变形。

焊接过程中不均匀加热和冷却是产生焊接应力与变形的根本原因。焊接时,焊缝区被加热到高于母材的温度,离焊缝越远,温度越低。根据金属热胀冷缩的特性,焊件各区域温度不同将产生大小不等的纵向膨胀,母材受到拉应力,焊缝金属受到压应力。当焊缝区的压应力超过金属的屈服点时,该区就产生了一定量的压缩塑性变形,压应力也消失了一部分。冷却时,焊缝区域的收缩趋势大于母材的收缩趋势,造成母材受到压应力,而焊缝金属受到拉应力。拉应力和压应力处于互相平衡状态,并保留到室温,这种室温下被保留下来的焊接应力与变形,称为焊接残余应力与变形。

焊接应力和变形的存在,会对焊接结构的制造和使用带来不利影响。如降低结构的承载能力,甚至导致结构开裂,影响结构的加工精度和尺寸稳定性等。因此,在焊接过程中,必须设法减小或消除焊接应力与变形。预防和消除焊接应力的措施如下。

(1)焊前对焊件进行整体或局部预热,可以减小焊件各部分的温度差及焊后的冷却速度,从而减小焊接应力。

(2)采用合理的焊接顺序,尽量使焊缝纵向、横向都能自由收缩,从而减小焊接应力,如图 3-53 所示。

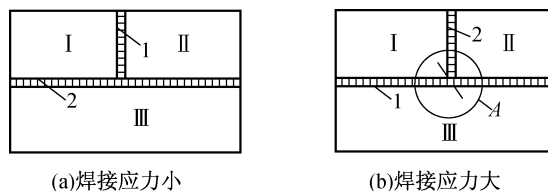


图 3-53 焊接顺序

(3)采用反变形法。通过计算和实验,确定焊件焊后产生变形的大小和方向,焊前将工件安放在与焊接变形方向相反的位置上,或在焊前将焊件反向变形。

(4)捶击焊缝使之产生塑性变形,以减小焊接应力。捶击路线如图 3-54 所示。

(5)焊后退火处理。将工件均匀加热到 $600\ ^\circ\text{C} \sim 650\ ^\circ\text{C}$,保温一定时间,然后缓慢冷却,整体退火可消除 $80\% \sim 90\%$ 的焊接应力。

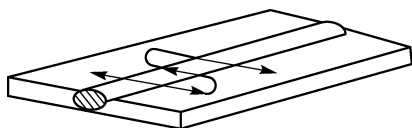


图 3-54 锤击焊缝的路线

三、其他焊接方法

1. 埋弧焊

电弧在焊剂层下燃烧所进行焊接的方法称为埋弧焊,其以连续送进的焊丝作为电极和填充金属。埋弧焊的焊缝形成过程如图 3-55 所示,焊接时,在焊接区的上面覆盖一层颗粒状的焊剂,电弧在焊剂层下燃烧,将焊丝端部和局部母材融化,形成焊缝。由于电弧在焊剂层下燃烧,能防止空气对焊接熔池的不良影响;焊丝连续送进,焊缝的连续性好,消除了焊条电弧焊焊接中因更换焊条而引起的缺陷;由于焊剂的覆盖,减少了金属烧损和飞溅,可节省焊接材料。

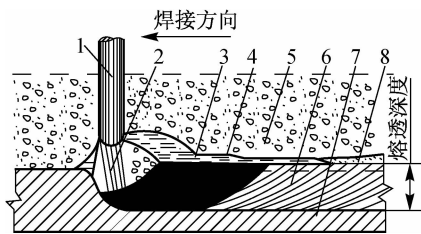


图 3-55 埋弧焊时焊缝的形成过程

1—焊丝; 2—电弧; 3—熔池金属; 4—熔渣; 5—焊剂;
6—焊缝; 7—焊件; 8—焊渣

埋弧焊在焊接过程中引燃电弧、焊丝送进和沿焊接方向的移动等全部用机械自动进行。埋弧焊的焊接过程如图 3-56 所示。埋弧焊可采用较大的焊接电流,埋弧焊与焊条电弧焊相比,具有生产率高、节约金属、提高焊缝质量和改善劳动条件等优点,在造船、锅炉、车辆等工业部门获得广泛的应用,特别适用于焊接大型工件的直缝和环缝。

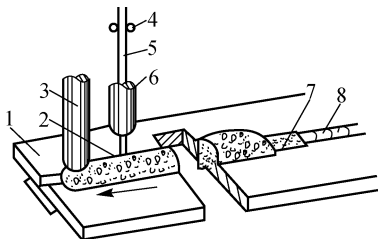


图 3-56 埋弧焊的焊接过程

1—焊件; 2—焊剂; 3—焊剂漏斗; 4—送丝轮; 5—焊丝;
6—导电嘴; 7—焊渣; 8—焊缝

2. 气体保护电弧焊

气体保护电弧焊简称为气体保护焊。它是利用外加气体作为电弧介质并保护电弧和焊接区的电弧焊方法。

1) 钨极气体保护电弧焊

钨极气体保护电弧焊是一种不熔化电极的气体保护电弧焊,它是利用钨极和工件之间的电弧使金属熔化而形成焊缝,如图 3-57 所示。焊接过程中,钨极不熔化,只起电极的作用,焊枪的喷嘴送进氩气或氦气做保护,还可根据需要另外添加填充金属。钨极气体保护焊由于能很好地控制热输入,所以它是连接薄板金属和打底焊的一种极好的方法。这种方法几乎可以用于所有金属的连接,尤其适用于焊接铝、镁等能形成难熔氧化物的金属以及钛和锆等活泼金属。

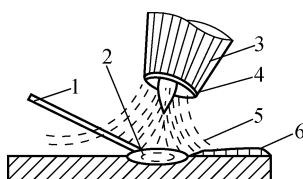


图 3-57 钨极氩弧焊示意图

1—焊丝；2—熔池；3—喷嘴；4—钨极；5—气流；6—焊缝

2) 二氧化碳气体保护焊

二氧化碳气体保护焊是以二氧化碳气体作为保护气体的气体保护焊,二氧化碳气体保护焊的焊接过程如图 3-58 所示。焊接过程中,以连续送进的焊丝与工件之间燃烧的电弧作为热源,二氧化碳气体经供气系统从焊枪喷出,当焊丝与焊件接触引燃电弧后,连续送给的焊丝末端和熔池被二氧化碳气流所保护,防止空气对熔化金属的有害作用,从而保证获得高质量的焊缝。

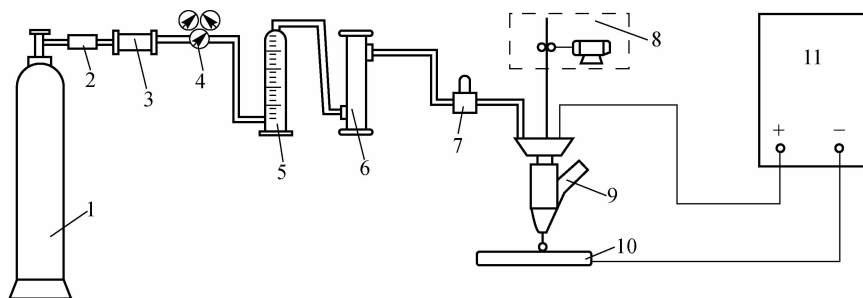


图 3-58 二氧化碳气体保护焊示意图

1—二氧化碳气瓶；2—预热器；3—高压干燥器；4—减压表；5—流量计；6—低压干燥器；
7—电磁气阀；8—送丝机构；9—焊枪；10—工件；11—电源控制箱

二氧化碳气体保护焊由于采用廉价的二氧化碳气体和焊丝来代替焊剂和焊条,加上电能消耗小,因此成本很低,一般仅为埋弧焊的 40%,为焊条电弧焊的 37%~42%。同时,由于二氧化碳气体保护焊采用高硅高锰型焊丝,它具有较强的脱氧还原和抗蚀能力,因此焊缝不易产生气孔,力学性能较好。已普遍用于汽车、造船及航空等工业部门,用来焊接低碳钢、低合金结构钢和高合金钢。

3. 电渣焊

电渣焊是利用电流通过液体熔渣所产生的电阻热进行焊接的方法,其焊接过程如图 3-59 所示。焊接过程是在立焊位置,电渣焊开始时,焊丝 5 与引弧板之间产生电弧,使电弧周围的焊剂熔化变为液体熔渣,待形成熔渣池 4 后,电弧熄灭,此时焊接电流通过熔渣池而产生的电