

# 第 1 章

## 金属材料性能

目前世界上在册的工程材料有上百万种,并且这个数量在一直不断地增加。科学技术的进步与发展均离不开工程材料,对于任何一种先进的机械设备或者零部件来说,其性能、使用寿命等很多方面都受到所选材料的制约。如果选择了恰当的材料,必将获得性能优越的产品;相反,如果所选择的材料质量欠佳,那么在相同的设计及生产能力水平下所得到的产品也比较粗糙,并且与之相应的产品的使用寿命也不会很长,由此造成的结果必然是机器和设备的质量难以保证。

常用的工程材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类。

人类社会的进步和文明的发展与金属材料的关系十分密切。在源远流长的历史长河中,铜器时代、铁器时代等均以金属材料的应用为其时代的显著标志。对于现代工业生产和日常生活来说,种类繁多的金属材料已成为人类社会发展的物质基础。

### 1.1 金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是指金属材料在承受外力时所表现出来的一系列力学性能指标,或者说是金属材料抵抗各种外加载荷的能力,能够反映出金属材料在各种形式外力作用下抵抗变形或破坏的某些能力。其中包括弹性和刚度、强度、塑性、硬度、冲击韧性、断裂韧性及疲劳强度等,它们是衡量金属材料性能极其重要的指标。

#### 1.1.1 弹性和刚度

所有金属材料在外力作用下都会产生变形,只是变形量的大小不一样而已。在使用某一种工程材料时,需要注意两方面的问题:一是材料承受某一外力时所产生的变形量的大小;二是当卸去所承受的外力时,材料能否恢复到其原来的状态。对于上述第二个方面的问题,如果材料能够恢复其原来的状态,说明该材料具有弹性,相应地随着外力的卸去而消失的变形称为弹性变形。科学研究表明,弹性变形的大小与材料所承受的外力成正比,学术上将材料抵抗变形的能力称为材料的刚度。

材料的弹性和刚度可以通过拉伸试验得到。

图 1-1(a)所示为碳钢材料拉伸试样的初始形状,在专用的拉伸试验机上对该试样施加轴向静载荷  $F$ ,此时试样便逐渐产生变形,如图 1-1(b)所示,其变形量  $\Delta L = L_1 - L_0$ 。以拉力

$F$  为纵轴,变形量  $\Delta L$  为横轴,绘制拉力-形变( $F-\Delta L$ )曲线(研究中为了方便,通常用应力  $\sigma$  代替拉力  $F$ ,用应变  $\epsilon$  代替变形量  $\Delta L$ ,所绘制的曲线图称为应力-应变图,表示为  $\sigma-\epsilon$  图,如图 1-2 所示),该曲线能够反映出碳钢材料从弹性变形至拉断的全部过程。

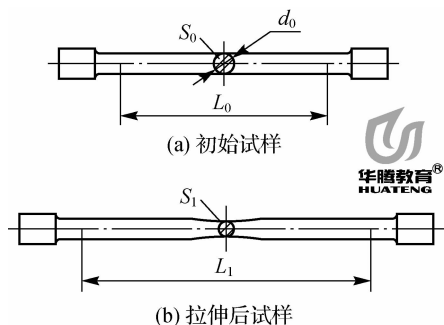


图 1-1 拉伸试样

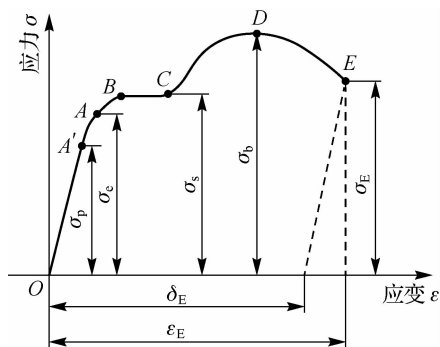


图 1-2 碳钢材料拉伸的应力-应变曲线

$\sigma-\epsilon$  曲线和  $F-\Delta L$  曲线相同,只是坐标参数不同。

观察  $\sigma-\epsilon$  曲线可知,该曲线可以分为以下三部分。

### 1. 弹性变形部分

当应力低于  $\sigma_e$  时,应力与试样的应变成正比,应力去除,变形消失,即试样处于弹性变形阶段。 $\sigma_e$  为材料的弹性极限,它表示材料保持完全弹性变形的最大应力。

在弹性变形范围内,材料的应力  $\sigma$  与其所产生的应变  $\epsilon$  成正比,且其比值  $E = \sigma/\epsilon$  称为材料的弹性模量,单位为 MPa。弹性模量能够表示材料抵抗弹性变形的能力,表示的是材料的刚度。金属材料的弹性模量是一个对组织不敏感的力学性能指标,即合金化、热处理、冷塑性变形等对弹性模量的影响较小,温度、加载速率等外在因素对其影响也不大,可以近似地认为金属材料的弹性模量为一个常数。但是在实际工程应用中,金属材料的弹性模量并不等于零件的刚度,因为零件的刚度受其结构的影响。

### 2. 塑性变形部分

在应力超过  $\sigma_e$  后,应力与应变之间不再遵循直线关系,出现屈服平台(图 1-2 中 B—C 段)或屈服齿。此时如果卸去载荷,试样只能恢复部分变形,而部分残余变形无法恢复,这部分残余变形即为试样的塑性变形,至此钢的变形进入塑性变形阶段。 $\sigma_s$  称为材料的屈服强度(或称为屈服点)。

在应力超过  $\sigma_s$  后,试样发生明显且均匀的塑性变形,此时若要使试样的应变增大,那么必须增加应力值。此时试样塑性变形持续增大,塑性变形抗力也不断增加,这种现象称为加工硬化(或称为形变强化)。当应力达到  $\sigma_b$  时,试样的均匀塑性变形阶段结束,最大应力  $\sigma_b$  称为材料的强度极限(或称为抗拉强度),它表示材料对最大均匀塑性变形的抗力。

### 3. 无规则变形至断裂部分

在应力达到  $\sigma_b$  之后,试样的塑性变形产生不均匀现象,并且继而发生缩颈现象,此时应力急剧下降,直至应力达到  $\sigma_E$  时试样断裂。 $\sigma_E$  为材料的条件断裂强度,它表示材料对塑性

的极限抗力。

上述讨论的前提是应力和应变均以试样的初始尺寸为基础,但是在拉伸试样的过程中试样的尺寸是不断发生变化的,也就是说真实的应力是不断地发生变化,其数值应该是瞬时载荷  $F$  除以试样的瞬时截面积  $A$ ,即  $\sigma=F/A$ ;同理,真实的应变  $\epsilon$  应该是瞬时伸长量与试样瞬时长度之比  $d\epsilon=dL/L$ 。因此,真实的应力-应变曲线在载荷达到最大值后应继续上升,而不是上述应力-应变曲线那样在载荷达到最大值后急剧下降,这一现象说明金属在塑性变形过程中不断地发生加工硬化,如果想使其继续产生变形,必须不断地提升载荷的大小(即使在出现缩颈之后,缩颈处的真实应力仍在升高)。

### 1.1.2 强度

强度是指金属材料在受到外力时,其自身所具有的抵抗塑性变形的能力。

如果金属材料受到载荷没有产生变形,那么一定在其内部产生了足以抵消外力的内力。研究中将单位面积上的内力称为内应力。金属所能承受的内应力的大小表征了金属材料强度的大小。

#### 1. 屈服点和屈服强度

屈服点是指材料产生屈服现象的最低应力值,用  $\sigma_s$  表示。

对于实际应用中的某些材料,如铸铁、高碳钢等,这类材料在做拉伸试验时并没有产生明显的屈服现象,也就没有明确的屈服点,GB/T 228 中规定,用屈服强度  $\sigma_{0.2}$  (试验试样标距产生 0.2%残余伸长时的应力值)来表示其屈服点。

对于机器和设备零部件来说,断裂为最严重的失效形式,但是往往在其产生塑性变形而未断裂时就已经失效。其尺寸和外形改变而不能满足正常使用要求,因此常用  $\sigma_s$  和  $\sigma_{0.2}$  来表示材料的许用应力,在做结构件选材和设计时应加以考虑。

#### 2. 抗拉强度

抗拉强度是指金属材料在断裂前所能承受的最大拉应力。

脆性材料在拉伸过程中一般不产生缩颈现象,而是直接被拉断,因此抗拉强度即是其断裂强度;塑性材料在做拉伸试验过程中产生大量而均匀的塑性变形,其抗拉强度便是抵抗这些变形的能力,在做结构件选材和设计时应加以考虑。

### 1.1.3 塑性

塑性是指材料受到外力而被破坏前所能承受的最大塑性变形的能力。表征塑性的参数有伸长率和断面收缩率。

#### 1. 伸长率

伸长率即试样被拉断后,其断面标距部分的增长量与试样初始长度的比值,用  $\delta$  表示。

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中,  $l_0$  为材料原始标距;  $l_1$  为材料断后标距。

## 2. 断面收缩率

断面收缩率即试样被拉断后,其横截面积最大缩减量与原始横截面积的比值,用 $\psi$ 表示。

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中, $F_0$ 为材料原始横截面积; $F_1$ 为材料断后横截面积。

显然,金属材料的伸长率和断面收缩率越大,该材料的塑性越好,即材料能承受较大的塑性变形而不被破坏。两者相比,用伸长率表示塑性比用断面收缩率表示塑性更接近真实应变。在研究中,如果材料伸长率大于5%,那么称该金属材料为塑性材料,如低碳钢等;如果材料的伸长率小于5%,那么称该金属材料为脆性材料,如灰口铸铁等。材料的塑性越好,其产生塑性变形的范围便越广,并且在产生塑性变形的同时,还能够使金属材料因塑性变形而得到一定的强化,从而起到提高材料强度的效果,能够很好地保证零件的安全使用。此外,塑性好的材料可以顺利地进行某些成型加工工艺,如冲压、冷弯、冷拔、校直等。因此,在做机械结构件的选材和设计时,应使材料满足一定的塑性指标。

### 1.1.4 硬度

硬度是指材料抵抗硬物体压入其表面的能力。硬度是金属材料的重要性能指标之一,一般硬度越高,其耐磨性越好。

材料的硬度与其力学性能(如强度、韧性等)和工艺性能(如焊接性能和切削加工性能)之间有一定的关系,又因为材料的硬度表示方法比较简单(常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度三种),所以在零件图纸上常常将零件的硬度要求标注出来。

#### 1. 布氏硬度

布氏硬度用 HBW 表示。图 1-3 所示为布氏硬度试验原理图,直径为  $D$  的硬质合金球在载荷  $F$  的作用下被压入试样表面,保持一段时间后将载荷  $F$  卸载,此时在试样表面会出现直径为  $d$  的压痕,布氏硬度的数值大小便为  $F$  与压痕表面积的比值。

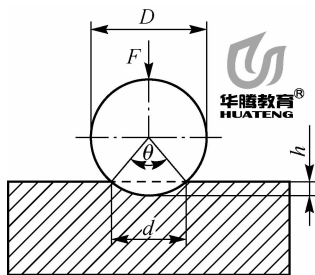


图 1-3 布氏硬度试验原理图

$$\text{HBW} = \frac{F}{A} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \times 100\%$$

式中, $F$ 为载荷(N); $D$ 为刚球直径(mm); $d$ 为压痕直径(mm);布氏硬度的单位为 MPa,在实际应用中习惯不标注单位,并且只需要测量出压痕的直径 $d$ ,然后根据 $d$ 值在相关文件表



格中查出布氏硬度值即可。

布氏硬度测量结果准确且操作简单快捷,实用方便,但其破坏了试样的表面,故不适宜用来测量成品零件的硬度。

## 2. 洛氏硬度

洛氏硬度用 HR(HRA、HRB、HRC 三种)表示。

洛氏硬度的试验原理为用规定的载荷将顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为  $S\phi 1.588\text{ mm}$  的淬火钢球压头压入试样表面,与布氏硬度试验不同的是试验载荷由两部分组成,即初试验力和主试验力,引入初试验力是为了消除试样表面粗糙度不佳对试验结果的准确性造成的不良影响。

图 1-4 所示为洛氏硬度试验原理图,当压头处在  $a-a$  位置时,其还没有和试样接触;当压头处在  $b-b$  位置时,在初试验力作用下压头压入试样表面深度为  $h_b$ ;当压头处在  $c-c$  位置时,在总试验力(初试验力+主试验力)作用下,压头压入试样表面深度为  $h_c$ ;移除主试验力后,由于金属弹性变形得到恢复,压头处在  $d-d$  位置,此时压头实际压入试样表面深度为  $h_d$ 。由图中的几何关系可知,由主试验力引起的塑性变形使压头压入试样表面深度为  $h = h_d - h_b$ ,洛氏硬度便是通过此值来衡量的。

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

式中,  $K$  为给定标尺的硬度数;  $S$  为给定标尺的单位,通常以 0.002 作为一个单位。

显然,  $h$  越大,被测试金属的硬度就越低;反之则越高。

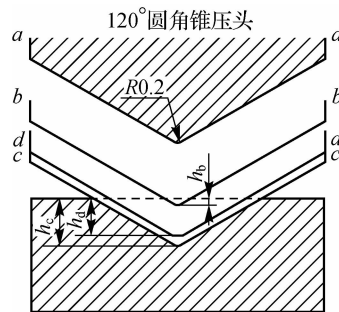


图 1-4 洛氏硬度试验原理图

为了准确地表示材料的硬度,洛氏硬度又分为 HRA、HRB、HRC 三种,其试验条件和应用范围见表 1-1。

表 1-1 洛氏硬度的试验条件和应用范围

洛氏硬度	压 头	总载荷/N(kgf)	测量范围	应 用
HRC	120°金刚石圆锥体	1470(150)	20~67 HRC	调质钢、淬火钢等
HRA	120°金刚石圆锥体	588(60)	70 HRA	硬质合金、表面淬火层或渗碳层等
HRB	$S\phi 1.588$ 球体	980(100)	25~100 HRB	有色金属和退火钢、正火钢

### 3. 维氏硬度

维氏硬度用 HV 表示。图 1-5 所示为维氏硬度试验原理图。其与布氏硬度试验原理相同,不同的是其压头是一个相对面夹角为  $136^\circ$  的金刚石正四棱锥体,所施加的载荷为  $5\sim 120\text{ kgf}(49\sim 1\,177\text{ N})$ 。试验时,用规定的载荷  $P$  将压头压入试样表面并保持一段时间后移除载荷,然后测量出压痕投影两对角线的平均值  $d$ ,进而求出压痕的表面积,压痕表面上的压力便是维氏硬度值。

$$HV = \frac{P}{S} = \frac{P}{\frac{d^2}{2\sin 68^\circ}} = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

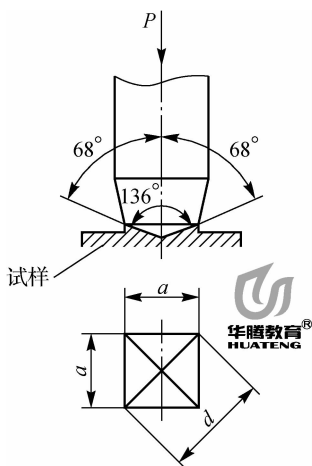


图 1-5 维氏硬度试验原理图

维氏硬度所得到的试验数值比布氏硬度和洛氏硬度更加精确,因为其压头压入试样表面浅,所以尤其适用于测定表面处理过的零件的表面层的硬度。改变载荷的大小可以测量范围更广(从极软到极硬)的材料的硬度,缺点是测量过程比较烦琐,且对试样表面的要求较高。

#### 1.1.5 冲击韧性

汽车在换挡时,变速箱齿轮受到冲击;钟表摆动换向时产生冲击……

许多机械设备在工作时都会受到冲击载荷的作用,而冲床、锻床、震动筛等设备利用冲击能工作……

因此,在进行机械结构件的选材和设计时,冲击问题也是必须要考虑的问题。

冲击韧性是指材料抵抗冲击载荷的能力。冲击载荷是一种能量,冲击载荷的大小用材料受到冲击破坏时单位面积上所消耗的能量来衡量。可通过一次摆锤冲击试验和多次摆锤冲击试验来测量材料的冲击韧性。

##### 1. 一次摆锤冲击试验

一次摆锤冲击试验是在摆锤式冲击试验机上进行的,如图 1-6 所示。标准试样如图 1-7 所示,将试样水平放置于试验机支座上,缺口位于冲击相背方向。将具有一定质量  $G$  的摆锤

举至高度  $H_1$  的位置,使其获得一定位能  $GH_1$ ,然后释放摆锤冲断试样,摆锤继续向左上方摆动,直至到达高度  $H_2$  处,此时摆锤的剩余能量为  $GH_2$ ,则摆锤冲断试样失去的位能为  $(GH_1 - GH_2)$ ,此即为试样变形和断裂所吸收的功,称为冲击吸收功或冲击功,用  $A_k$  表示,单位为 J。其具体的试验方法及操作规范可参考《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》(GB/T 229—2007)。

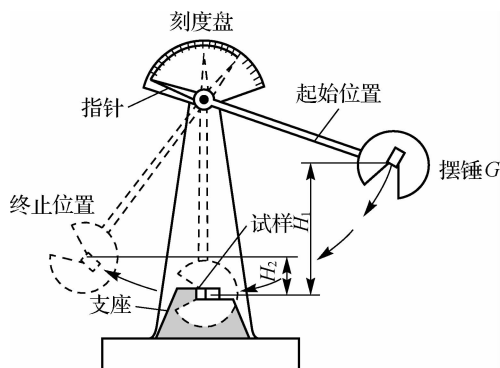


图 1-6 一次摆锤冲击试验示意图

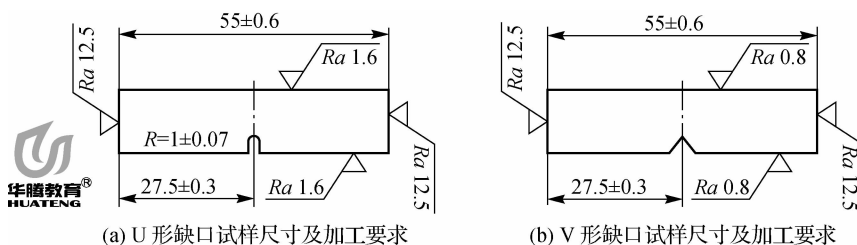


图 1-7 一次摆锤冲击试验标准试样

$A_k$  与断裂处的原始面积  $A_0$  的比值即为冲击韧性,即

$$\alpha_k = \frac{A_k}{A_0}$$

研究表明,  $A_k$  值的大小受材料组织缺陷的影响很大,也就是说  $A_k$  值的大小能够反映出材料的品质、宏观缺陷、微观组织等方面的变化。在现代工业生产和研究中,  $A_k$  常用来检验冶炼、热处理、热加工等工艺质量。

利用冲击韧性还可以很方便地测出材料由韧性向脆性的转变温度(韧脆转变温度),该温度的高低是评定金属材料呈现韧性或者脆性的重要指标。科学研究表明,高碳钢和高强度钢无明显的韧脆转变温度;低碳钢和低合金钢的韧脆转变温度较明显且低。

冲击功  $A_k$  虽可表示材料的变脆倾向,但不能真正反映材料的韧脆程度。因为用于冲断试样的冲击功  $A_k$  并非完全被试样的变形和断裂过程所吸收,其中有一部分功消耗在空气阻力、机身震动、轴承与测量机构的摩擦及冲断试样飞出等方面。

一次摆锤冲击试验主要有以下两方面用途:

(1)它能反映出原始材料的冶金质量和热加工产品的质量。通过测量  $A_k$  值和对冲断试

样的断口分析,可揭示原材料中的气孔、夹杂、偏析、严重分层和夹杂物超标等冶金缺陷;还可检查过热、过烧、回火脆性等锻造或热处理缺陷,测定材料的韧脆转变温度。根据系列冲击试验(低温冲击试验)可获得  $A_k$  与温度的关系曲线,据此确定材料的韧脆转变温度,以供选材参考或抗脆断设计。

(2)对  $\sigma_s$  大致相同的材料,根据  $A_k$  值可以评定材料对大能量冲击破坏的缺口敏感性。

## 2. 多次摆锤冲击试验

当材料在冲击载荷下工作时,很少是在大能量的冲击下一次断裂的,即使那些通常承受剧烈冲击载荷的零部件,也很少有只经受一次或几次冲击就断裂的。绝大多数零部件断裂都是在小能量多次冲击下损伤积累的结果,这个过程不同于一次冲击,所以多次冲击抗力不能用  $A_k$  值简单代替。因此,为了解决零部件多冲断裂失效问题,应对材料进行小能量的多次冲击试验,提出多次冲击抗力,并研究它的变化规律。

研究表明,材料的强度和塑性综合影响着多次冲击抗力。为了证明这个结论,采用三种材质不同且热处理方式不同的材料进行多次冲击试验,试验原理如图 1-8 所示,试验结果曲线如图 1-9 所示。

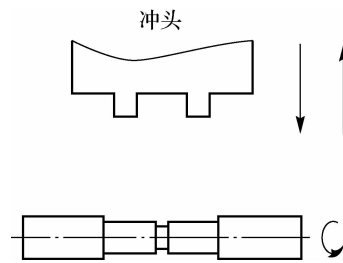


图 1-8 多次冲击抗力试验原理

分析图 1-9 可知,三条曲线有三个交点 A、B、C,且它们的多冲抗力曲线位置不同。分析曲线,在低冲击能量下(图中交点 A 右方),强度高而塑性差的 T8 钢多冲抗力最高,说明此时强度对多冲抗力的影响较大,起主导作用;当冲击能量较高时(图中交点 C 的左方),此时塑性高而强度低的 25 钢的多冲抗力最高,说明此时塑性对多冲抗力的影响较大,起主导作用。

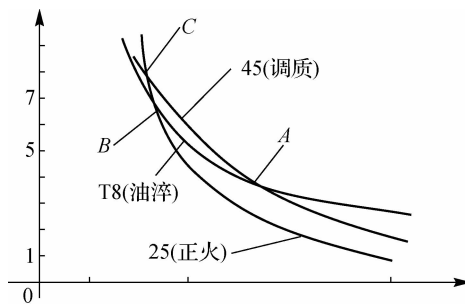


图 1-9 三种材料的多冲抗力曲线

现代工业的发展对零部件的要求越来越高,承受冲击载荷的零件在工作寿命内所承受的冲击次数达到  $10^4 \sim 10^6$  次,均在图中交点 A 的右侧,为小能量多次冲击。也就是说,生产中零件的多冲抗力主要受强度的影响,在选材时应特别注意,不能仅追求塑性和冲击韧性。

### 1.1.6 断裂韧性

断裂韧性是指材料抵抗裂纹失稳扩展断裂的能力。

在实际工程中有时会发生这种情况:对零件和构件在设计时明明保证了足够的伸长率、韧性和屈服强度,但它们还是会断裂。如大型轧辊、转子、桥梁和船舶等,它们断裂时的实际应力明显低于材料的屈服强度,究其原因是一些构件或零部件内部存在着裂纹或类似于裂纹的缺陷,这些裂纹或类似于裂纹的缺陷或大或小,或多或少。这些裂纹或缺陷在应力的作用下失稳,并且向四周扩展,从而导致构件或零部件断裂。

当材料中存在裂纹或类似于裂纹的缺陷时,在它们的尖端就会产生裂纹尖端应力场,根据断裂力学的理论,应力场强度因子  $K_I$  (单位为  $\text{MPa} \times \text{m}^{1/2}$ ) 表述了应力场的大小。 $K_I$  的大小与裂纹尺寸 ( $2d$ ) 和外应力场  $\sigma$  有关,并且有如下关系:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}$$

式中,  $Y$  为由裂纹形状、加载方式和试样几何尺寸决定的无量纲系数;  $\sigma$  为外加应力场 ( $\text{MPa}$ );  $a$  为裂纹长度的  $1/2$  ( $\text{mm}$ )。

$K_I$  随着应力的增大而不断增大,当其增大到一定量时,裂纹前沿的内应力便会使材料分离,此时裂纹便产生剧烈的扩展,导致材料发生断裂。 $K_I$  的临界值称为材料的断裂韧性,用  $K_{IC}$  表示。

断裂韧性很好地反映了材料存在裂纹时,其抵抗脆性断裂的能力,综合地体现了材料的强度和韧性的优劣性。 $K_{IC}$  是材料自身的属性,与材料的热处理方式和材料成分等因素有关。

### 1.1.7 疲劳强度

材料在规定次数(钢铁材料为  $10^7$  次,有色金属及其合金为  $10^8$  次)交变载荷的作用下,不引起断裂的最大应力称为疲劳强度。

机械零件如轴、齿轮、轴承、叶片、弹簧等,在工作过程中各点的应力随时间做周期性的变化。这种随时间做周期性变化的应力称为交变应力(也称循环应力)。在交变应力的作用下,虽然零件所承受的应力低于材料的屈服点,但经过较长时间的工作后产生裂纹或突然发生完全断裂的现象称为金属的疲劳。

疲劳破坏是机械零件失效的主要原因之一。据统计,在机械零件失效中有 80% 以上属于疲劳破坏,而且疲劳破坏前没有明显的变形,所以疲劳破坏经常造成重大事故。因此,对于轴、齿轮、轴承、叶片、弹簧等承受交变载荷的零件要选择疲劳强度较好的材料来制造。

根据材料所承受的交变应力的大小和断裂循环次数之间的关系,可以绘制图 1-10 所示

的疲劳曲线。在对机械构件选材和设计时,要充分考虑材料疲劳强度的影响。

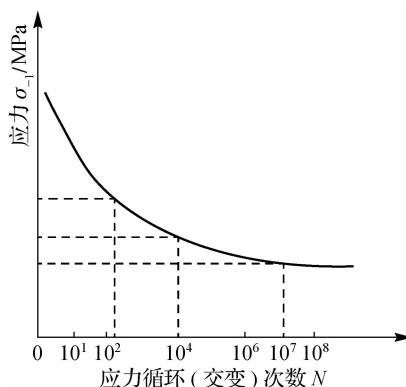


图 1-10 疲劳曲线

## 1.2 金属材料的其他性能简介

金属材料的其他性能包括物理性能、化学性能和工艺性能等。

### 1.2.1 物理性能

#### 1. 密度

密度是指单位体积金属的质量。密度小于  $45 \text{ g/cm}^3$  的称为轻金属,如铝、钛;密度大于  $45 \text{ g/cm}^3$  的则称为重金属。

#### 2. 熔点

金属由固态转变为液态时的温度称为熔点。熔点越高,材料在高温状态下力学性能越好。在高温状态下工作的结构件在选材时就要选择熔点高的金属。

#### 3. 热膨胀性

热膨胀性是指金属材料在受热后体积增大、受冷时体积减小的特性。通常用线性膨胀系数来表示材料的热膨胀性。线性膨胀系数是指温度升高  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  时单位长度材料的膨胀量。在工程应用中有时必须考虑材料的热膨胀性,如精密设备、精密量具、铁轨、桥梁、超精密零部件加工工具等,此时应选用膨胀系数低的材料。

#### 4. 导热性

通常用导热率来表示金属材料的导热性。导热性是指在物体上下表面温度相差  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  时,单位时间内通过导体横截面的热量,单位为  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。纯金属的导热性好,其中银(约为 418.6)最好,铜(约为 393.5)、铝(约为 211.9)次之,钨(约为 166.2)、镁(约为 153.7)等再次之。合金的导热性比纯金属差。导热性好的金属散热性也较好,可以用来做散热零部件,如家用暖气片,冰箱、空调、计算机 CPU 的散热片,等等。



## 5. 导电性

物体传导电流的能力称为导电性。各种金属的导电性各不相同,通常银的导电性最好,其次是铜和金。在工业应用中,通常用铜和铝作为导电材料。导电性差的材料电阻率高,可以做成电阻加热丝、短路保护器等,如铁铬合金、镍铬铝等。

## 6. 磁性

金属的导磁能力称为磁性。金属材料可以分为抗磁性材料、顺磁性材料和铁磁性材料,其导磁能力依次增强,铁磁性材料常用来做变压器、电机线圈铁心等零件。

### 1.2.2 化学性能

金属材料的化学性能是指材料对外界接触的耐受性,主要包括耐腐蚀性和高温抗氧化性。

#### 1. 耐腐蚀性

金属材料的耐腐蚀性指的是在常温下其抵抗氧、水及其他化学物质腐蚀破坏的能力。材料的耐腐蚀性常用每年腐蚀深度(渗蚀度) $K_a$ (mm/年)来表征。

金属的腐蚀不仅会造成表面金属光泽的缺失和材料的损失,进而影响金属的使用性能,还有可能造成一些隐蔽性和突发性的事故。在金属材料中加入铬、镍等微量元素可以耐含氧酸的腐蚀,而耐候钢、铜及铜合金、铝及铝合金能耐大气的腐蚀,合成高分子材料和陶瓷材料一般都具有良好的耐腐蚀性。

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。前者为金属直接与周围介质发生纯化学作用,如常见的钢的氧化反应;后者为金属在酸、碱、盐等电介质溶液中由原电池的作用引起的腐蚀。

提高材料耐腐蚀性的方法很多,如均匀化处理、表面处理等。

#### 2. 高温抗氧化性

在高温下金属材料易与氧结合形成氧化皮,造成了金属的损耗和浪费,所以对于工作环境温度较高的零件,要求其材料具有高温抗氧化的能力。想要提高材料的高温抗氧化性,可以采用使材料迅速氧化的方法。材料迅速氧化后,能在表面形成一层连续而致密并与母体结合牢靠的膜,从而阻止进一步氧化。

### 1.2.3 工艺性能

在不同的加工手段下,材料所表现出的特性不同,这种“特性”指的便是材料的可加工性,即工艺性能,主要包括铸造性能、锻压性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能。如果材料的工艺性能太低,那么即使其使用性能再高,也难以获得较广泛的使用。工艺性能会限制材料的使用性能。所以评价一种材料的好与坏,不仅要看其使用性能,还要综合来考虑其工艺性能。

### 1. 铸造性能

评价材料铸造性能的参数为流动性、收缩性。流动性和收缩性越好,材料的铸造性能就越好。不同材料的铸造性能不同。在常用材料中,铸造铝合金、铜合金的铸造性能优于铸铁和铸钢,铸铁优于铸钢。在铸铁中,灰铸铁的铸造性能最好。

### 2. 锻压性能

评价材料锻压性能的参数为塑性和变形抗力等。塑性好易成型,不易产生裂纹,加工所得到的型面质量好;变形抗力小,变形功小,金属易于充满模膛,不易产生缺陷。在常用材料中,碳钢锻压性能比合金钢好,低碳钢锻压性能优于高碳钢。

### 3. 焊接性能

评价材料焊接性能好与坏的参数为碳当量。当材料碳当量小于 0.4% 时,焊接工艺简便,焊缝质量好,且焊接时不易产生裂纹和气孔等缺陷。在常见材料中,低碳钢和低合金高强度结构钢焊接性能良好,碳与合金元素含量越高,焊接性能越差。

### 4. 切削加工性能

评价材料切削加工性能的参数为最高切削速度、切削力大小、加工面  $Ra$  值大小、断屑难易程度和刀具磨损等。一般来说,硬度值为 170~230 HBS 的材料,切削加工性能好。

### 5. 热处理性能

评价材料热处理性能常用淬透性、淬硬性、变形开裂倾向、耐回火性和氧化脱碳倾向等参数。一般来说,碳钢的淬透性差,强度较低,加热时易过热,淬火时易变形开裂;而合金钢的淬透性优于碳钢。

## 习 题

### 1. 名词解释

弹性 刚度 强度 塑性 韧性 弹性变形 塑性变形 弹性模量 屈服强度 抗拉强度 伸长率 断面收缩率 疲劳强度 冲击韧性 断裂韧性

2. 试说明下列力学性能指标的名称、单位和意义。

(1)  $\sigma_e$ ; (2)  $\sigma_s$ ; (3)  $\sigma_{0.2}$ ; (4)  $\delta$ ; (5)  $\sigma_b$ ; (6)  $\psi$ ; (7)  $\sigma_{-1}$ 。

3. 什么是塑性? 塑性对材料的使用有什么实用意义?

4. 如何用材料的应力-应变曲线判断材料的韧性?

5. 可否通过增加零件尺寸来提高其弹性模量? 为什么?

6. 设计好刚度的零件应根据何种指标选择材料? 材料的弹性模量  $E$  越大,则材料的塑性越差。这种说法是否正确? 为什么?

7.  $\sigma_s$  和  $\sigma_{0.2}$  有什么不同?

8. 什么是硬度? 试说明布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度的测量原理与应用范围。

9. 能够反映材料受冲击载荷的性能指标是什么?

10. 拉伸试样的原标距长度为 100 mm,直径为 10 mm,拉伸断裂后试样长度为 143 mm,

缩颈区的最小直径为 5.3 mm,求该试样拉伸时的伸长率和断面收缩率。

11. 疲劳破坏是如何产生的? 可以通过哪些途径和措施来提高零件的疲劳强度?
12. 现有一紧固螺栓,在使用了一段时间后发现其有少量塑性变形(伸长),试分析材料的哪些性能指标没有达到要求。
13. 什么是工艺性能? 工艺性能包含哪些内容?

## 第 2 章

# 晶体结构与结晶

材料的化学成分、组织结构及其加工工艺过程共同决定了材料的性能,同一种材料如果其内部结构或组织状态不一样,所表现出来的性能也不尽相同。所以如今越来越多的人和组织将精力放在研究材料的内部结构上。

结构是指物质内部的原子在空间的分布和排列规律。材料内部的原子结构决定了原子的结合方式,按照原子排列分布情况,材料分为晶体与非晶体两大类;按照原子的结合方式,材料分为金属材料、陶瓷材料和高分子材料等。

### 2.1 金属键与金属特性

#### 2.1.1 金属键

图 2-1 所示为金属内部原子的排列与结合示意图,即金属键模型,其具有以下特点:最外层电子数很少,一般不超过 4 个,在通常情况下只有 1~2 个;因为最外层的电子和原子核的结合能力比较弱,所以它们很容易脱离原子核的约束而成为自由电子(带负电),与此相应的金属原子由于失去最外层的电子而带正电。固态金属原子正是由于带电正离子和负离子的相互作用才紧密地结合在一起的。研究中将这种原子相互结合的方式称为金属键。

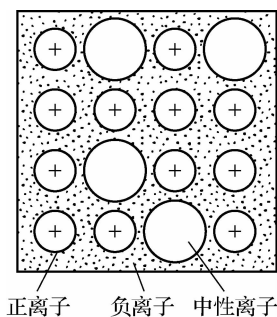


图 2-1 金属键模型

### 2.1.2 金属特性

金属内部原子的结合方式促使金属具有以下特性:较好的塑性,具有明显的金属光泽,较好的导热性,较好的导电性,正的电阻温度系数(电阻随温度的升高而升高)。而金属具有以上特性的根本原因就是金属键。

#### 1. 塑性

在金属内部,因失去最外层电子而带正电的离子的四周充满了带负电的自由电子,由于正离子与负离子相互吸引并结合,这就促使金属内部离子受力方面具有各向同性的特点,所以当金属中出现各层原子发生相对位移的现象时,仍然可以依靠这种结合力使金属不至于发生较大的变形甚至断裂。

#### 2. 金属光泽

当金属电子受到可见光的作用(研究表明,金属电子很容易受到可见光的激发)而呈现活跃状态时,便会越级跳到较高的能量级上;当其挣脱原子核的束缚而重新回到低能级时,其便会将在高能级所吸收的可见光以电磁波的形式释放出来,从而在宏观上使金属呈现出光泽。

#### 3. 导热性

在金属内部的原子结构中,带正电荷的离子容易产生震动,而带负电荷的自由电子通常较活跃,在原子内部自由运动,两者在运动时将金属内部的热能传递开来,故金属具有较好的导热性。

#### 4. 导电性

与导热原理相同,自由电子在运动时形成电流,故金属具有较好的导电性。

#### 5. 正的电阻温度系数

随着金属温度的升高,其内部带电正离子的震动振幅增大,从而造成带负电的自由电子在运动时所承受的阻力增大,由此带来的结果是电阻增高,所以金属具有正的电阻温度系数。

## 2.2 金属的晶体结构

与金属键相比,金属内部原子在空间的排列方式(晶体结构)对金属特性的影响更大。

### 2.2.1 晶体的基本概念

#### 1. 晶体和非晶体

自然界中的固体物质按照原子排列分布情况分为晶体与非晶体两大类,且大多数物质都是晶体,如金属、金属合金和绝大部分的矿物质,它们的原子排列规则,具有一定的规律可循;另外少数固体物质是非晶体,如松香、玻璃等,它们的原子排列不规则,没有明显的规律性。

## 2. 晶格和晶胞

(1) 晶格。为了便于研究,将组成晶体的质子(原子、离子、电子)看作一个一个的刚性球体,因此晶体就可以近似地认为是这些刚性球体按照一定的规律周期性地堆积在一起而成的。如图 2-2(a)所示,堆积方式不同,晶体所表现出来的特性也不同。如果进一步假设,将刚性球体看作一个点(将这个点称为结点),并且该点的位置处于刚性球体的球心,从宏观上看这些结点便形成了空间点阵,晶格便是用假想的直线将这些结点连接在一起所形成的三维空间框架,典型的晶格如图 2-2(b)所示,晶格能够直观地表示出晶体中质子(原子、离子、电子)的排列规律。

(2) 晶胞。微观上的晶体是无限大的,比较难以对其进行研究,为了克服这个问题,常从晶体中选择一个很小的几何单元进行研究,这个单元是能够代表晶体原子排列规律的最小几何体,这个最小几何体便是晶胞,如图 2-2(c)所示。根据晶胞的定义可知,晶胞在三维空间中重复排列便可以得到其所代表的晶格和晶体。

在图 2-2(c)中,尺寸  $a$ 、 $b$ 、 $c$  表示的是晶格在三维空间上各个方向的尺寸,也称为晶格常数, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为各棱边之间的夹角。晶格的大小和形状能够通过晶格常数与各棱边之间的夹角来准确描述。

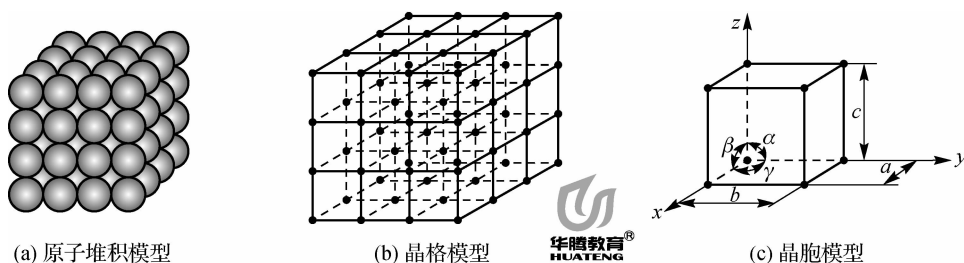


图 2-2 简单立方晶体示意图

### 2.2.2 常见金属晶格

常见金属晶格分为体心立方晶格、面心立方晶格和密排立方晶格,90%以上金属晶格都属于这三种晶体。

#### 1. 体心立方晶格

图 2-3 所示为体心立方晶格,从图中可以看出,在该晶格结构中,1 个原子处于立方体的中心,8 个原子分别处于立方体的 8 个角点上,中心与角点处的原子紧密接触。

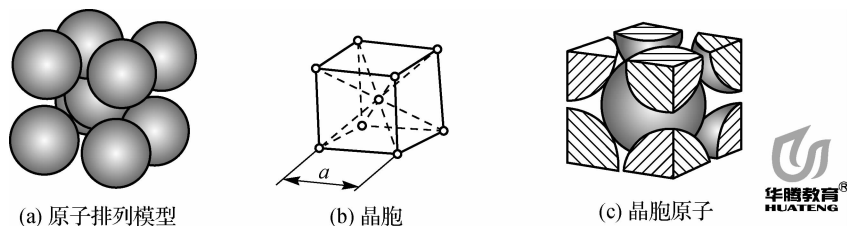


图 2-3 体心立方晶格



体心立方晶格具有以下特性:

(1)晶格常数: $a=b=c$ ,通常只用  $a$  表示。

(2)各棱夹角: $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

(3)晶胞原子数:立方体中心的 1 个原子属于该晶胞专有,角点上的 8 个原子都与其相邻 7 个晶胞所共有,晶胞原子总数为

$$1 + \frac{1}{8} \times 8 = 2$$

(4)原子半径:体心立方晶胞中立方体对角线为其中原子相距最近的方向,对角线长度为 $\sqrt{3}a$ ,在该方向上有 2 个原子,即 4 个原子半径,因此原子半径为

$$r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$$

常见的属于体心立方晶胞的金属有  $\alpha$ -Fe、Mo、W、V、Cr、Li、Na、Ti、Nb 等,通常用 bcc 表示体心立方晶格。

## 2. 面心立方晶格

图 2-4 所示为面心立方晶格,从图中可以看出,它也是一个立方体,在该晶格结构中,在正方体的各个角点和面中心分别有 1 个原子,这些原子紧密接触。

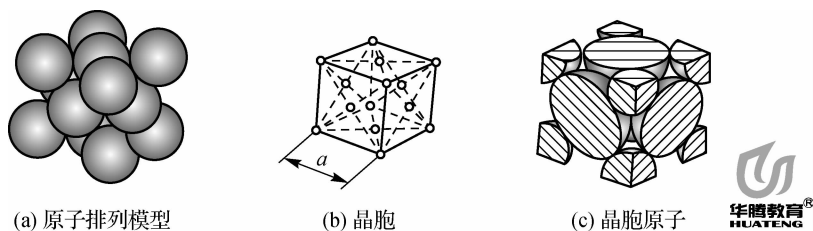


图 2-4 面心立方晶格

面心立方晶格具有以下特性:

(1)晶格常数: $a=b=c$ ,通常只用  $a$  表示。

(2)各棱夹角: $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

(3)晶胞原子数:立方体面心的 1 个原子被与其相邻的另外 1 个晶胞所共有,8 个角点上的每个原子都与其相邻 7 个晶胞所共有,晶胞原子总数为

$$6 \times \frac{1}{2} + \frac{1}{8} \times 8 = 4$$

(4)原子半径:面心立方晶胞中立方体 6 个面中的对角线为其中原子相距最近的方向,对角线长度为 $\sqrt{2}a$ ,在该方向上有 2 个原子,即 4 个原子半径,因此原子半径为

$$r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$$

常见的属于面心立方晶胞的金属有 Au、Ag、Cu、Al、Ni、Pb、 $\gamma$ -F、 $\beta$ -Co 等,通常用 fcc 表示面心立方晶格。

### 3. 密排立方晶格

图 2-5 所示为密排立方晶格,从图中可以看出,它是一个正六棱柱,在该晶格结构中,在正六棱柱的各个角点和上、下两面的中心各有 1 个原子,在上、下两面中间有 3 个原子,这些原子紧密接触。

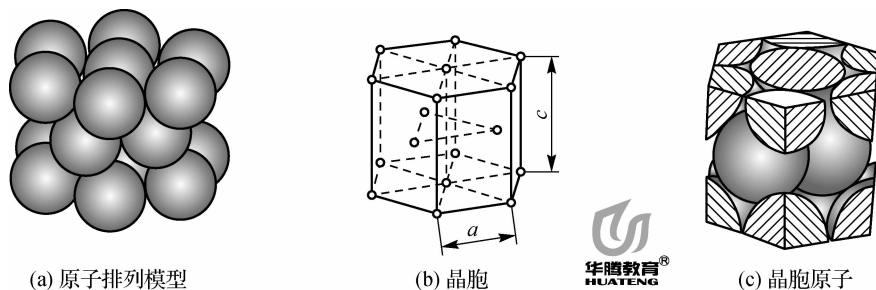


图 2-5 密排立方晶格

密排立方晶格具有以下特性:

(1)晶格常数: $a$  和  $c$ , 且  $c/a$  的值通常为  $1.58\sim 1.89$ , 并且当  $c/a=1.633$  时, 各个原子排列最紧密, 此时的晶胞为最理想的密排立方晶胞。

(2)各棱夹角: 两相邻侧棱之间的夹角为  $120^\circ$ , 底面与侧面间的夹角为  $90^\circ$ 。

(3)晶胞原子数: 正六棱柱的各个角点上的原子被与该晶胞相邻的其余 5 个晶胞所共有, 上、下两面的中心的 2 个原子分别被与其相邻的另外 1 个晶胞所共有, 上、下两面中间的 3 个原子被该晶胞所专有, 晶胞原子总数为

$$12 \times \frac{1}{6} + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$$

(4)原子半径: 密排立方晶胞中正六棱柱的上(下)面的对角线为其原子排列最紧密的方向, 长度为  $2a$ , 且在该方向上有 4 个半径, 因此原子半径为

$$r = \frac{1}{2}a$$

常见的属于密排立方晶胞的金属有 Mg、Zn、Be、Cd 等, 通常用 hcp 表示密排立方晶格。

#### 2.2.3 晶体中原子排列的紧密程度

配位数和致密度两个参数能够说明晶体中原子排列的紧密程度。

##### 1. 配位数

配位数是指晶格中与任意一个原子相邻且距离相等的原子数目。

从配位数的定义可知, 晶格的配位数越大, 其原子排列越紧密; 晶格的配位数越小, 原子排列越松散。

(1)体心立方晶格的配位数。在图 2-6(a)所示的体心立方晶格中, 如果以立方体中心原子为参照原子来分析, 观察晶体结构可知, 立方体 8 个角点上的原子与该中心原子距离相等, 所以体心立方晶格的配位数为 8。

(2)面心立方晶格的配位数。在图 2-6(b)所示的面心立方晶格中, 如果以立方体中任意

一面的中心原子为参照原子来分析,观察晶体结构可知,与其相邻且距离相等的原子有两部分,第一部分是原子所处平面的4个角点上的原子,第二部分是与该平面垂直的2个平面上的各4个原子,共有12个,所以面心立方晶格的配位数为12。

(3)密排立方晶格的配位数。在图2-6(c)所示的面心立方晶格中,如果以上面(或下面)的中心原子为参照原子来分析,观察晶体结构可知,与其相邻且距离相等的原子也分为两部分,第一部分是该立方平面的6个角点的原子,第二部分是该面上方和下方的位于密排立方晶体结构中心的各3个原子,共12个,所以密排立方晶体的配位数也是12。

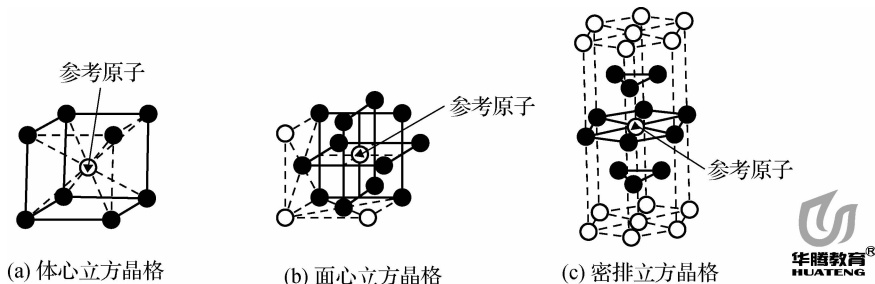


图 2-6 三种晶体结构的配位数示意图

## 2. 致密度

致密度是指金属晶胞中原子所占有的总体积与该晶胞体积之比。

致密度能够直观地说明晶体中原子排列的紧密程度,根据致密度的定义,可以得到金属晶胞致密度的计算公式为

$$\text{晶胞的致密度} = \frac{\text{晶胞中原子数目} \times \text{原子体积}}{\text{晶胞体积}}$$

对于体心立方晶体,

$$\text{致密度} = \frac{2 \times 4\pi r^3 / 3}{a^3} \times 100\% = \frac{2 \times 4 \times \left(\frac{\sqrt{3}}{4}a\right)^3 \pi / 3}{a^3} \times 100\% = 68\%$$

对于面心立方晶体,

$$\text{致密度} = \frac{4 \times 4\pi r^3 / 3}{a^3} \times 100\% = \frac{4 \times 4 \times \left(\frac{\sqrt{2}}{4}a\right)^3 \pi / 3}{a^3} \times 100\% = 74\%$$

对于密排立方晶体,

$$\text{致密度} = \frac{6 \times 4\pi r^3 / 3}{6 \times \frac{\sqrt{3}}{4}a \times a \times c} \times 100\% = \frac{6 \times 4 \times \left(\frac{1}{2}a\right)^3 \pi / 3}{6 \times \frac{\sqrt{3}}{4} \times 1.633 \times a^3} \times 100\% = 74\%$$

根据以上计算结果可以得到以下结论:

(1)体心立方晶体的致密度 < 面心立方晶体的致密度 = 密排立方晶体的致密度。

(2)在金属晶体内部,除去原子所占空间,其余部分为原子之间的空隙,不同类型晶体结构的空隙大小不一样,体心立方晶体为32%,面心立方晶体和密排立方晶体为26%。

因为致密度的计算较为复杂和烦琐,所以在研究和应用中经常用配位数来表示晶体中原子排列的紧密程度。

## 2.2.4 晶面及晶向

晶面即晶体中各种方位上的原子面。

晶向即晶体中各个方向上的原子列。

在晶体结构中,晶面和晶向中原子分布排列的方式对晶体结构的细节与晶体的性能都有较大的影响,所以需要在这两者进行研究。为了便于研究,引入了晶面指数和晶向指数两个参数,分别表征了在晶面和晶向中原子分布排列的方式。

以前述的立方晶体为例来讨论晶面和晶向。

### 1. 晶面指数

晶面指数的求证过程如下:

(1)如图 2-7 所示,以晶格中的某一个原子为坐标原点  $O$  作三条分别平行于晶胞三个棱边的直线  $OX$ 、 $OY$ 、 $OZ$ ,且将这三条直线视为坐标轴,以  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三个晶格常数作为三条坐标轴上的长度单位,然后求出所需确定的晶面在三个坐标轴上的截距。

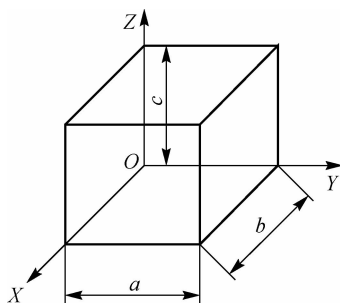


图 2-7 晶面指数求证坐标系

(2)将所得到的三个截距数值分别变为各自的倒数。

(3)将所得到的倒数按比例化为最小的整数,然后写在一起,并且在这个数值的两边加上括号。

经过以上三步得到的便是晶面指数,其一般形式为 $(\times\times\times)$ 。

例如,在图 2-8(a)所示的立方晶体中,取三个坐标轴的截距分别为  $1$ 、 $\infty$ 、 $\infty$ ,转化为各自的倒数,分别为  $1$ 、 $0$ 、 $0$ ,化为最小整数并在两边加上括号,所得到的晶面指数为  $(100)$ 。图 2-8(b)、图 2-8(c)所示的是立方晶格中的晶面及其指数。需要说明的是,晶面指数指的并不是某一个确定的晶面,而是一组相互平行的晶面,它们的晶面指数相同或者正负号相反。除了相互平行的晶面外,在晶体结构中还存在着原子排列完全相同、间距相等但是相互不平行的晶面,并且数量非常庞大,这些晶面称为晶面族,它们是性质相同的等同晶面。晶面族的表示方法是用大括号将三位数字(和晶面指数的三位数字意义相同)包含,如晶面族  $\{100\}$ 中包含着  $(100)$ 、 $(010)$ 和  $(001)$ 等晶面。

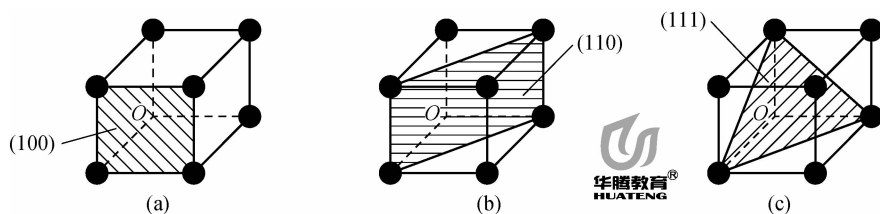


图 2-8 三种晶体结构的晶面指数示意图

## 2. 晶向指数

晶向指数的求证过程如下：

(1)如图 2-9 所示,以晶格中的某一个原子为坐标原点  $O$  作三条分别平行于晶胞三个棱边的直线  $OX$ 、 $OY$ 、 $OZ$ ,且将这三条直线视为坐标轴,通过坐标原点引一条平行于所求晶向的直线。

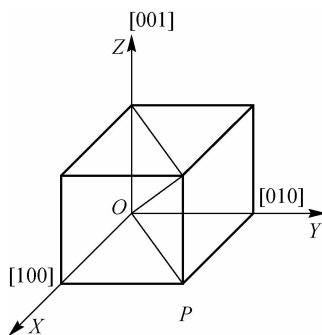


图 2-9 立方晶格中的三个重要晶向

(2)求出所作直线上任意一点的坐标  $(x, y, z)$ 。

(3)将所得到的坐标按比例化为最小的整数,然后写在一起,并且在这个数值的两边加上中括号。

经过以上三步得到的便是晶向指数,其一般形式为  $[\times\times\times]$ 。

除了相互平行的晶向外,在晶体结构中还存在着原子排列完全相同但是相互并不平行的晶向,这些晶向是等同的,并且数量非常庞大,这些晶向称为晶向族。晶向族的表示方法是用尖括号将三位数字(和晶向指数的三位数字意义相同)包含,及  $\langle\times\times\times\rangle$ ,如  $\langle 001\rangle$  晶向族包含着  $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$  等晶向。

## 3. 晶面及晶向的原子密度

晶面的原子密度即单位面积中的原子数。

晶向的原子密度即单位长度上的原子数。

晶格类型和结构不同,晶面及晶向的原子密度不同。体心立方晶格中主要晶面和晶向的原子密度见表 2-1。



表 2-1 体心立方晶格中主要晶面和晶向的原子密度

晶面指数	晶面密度(原子数/面积)	晶向指数	晶向密度(原子数/长度)
(100)	$\frac{\frac{1}{4} \times 4}{a^2} = \frac{1}{a^2}$	[100]	$\frac{\frac{1}{2} \times 2}{a} = \frac{1}{a}$
(110)	$\frac{\frac{1}{4} \times 4 + 1}{\sqrt{2}a^2} = \frac{1.4}{a^2}$	[110]	$\frac{\frac{1}{2} \times 2}{\sqrt{2}a} = \frac{0.7}{a}$
(111)	$\frac{\frac{1}{6} \times 1}{\frac{\sqrt{3}}{2}a^2} = \frac{0.58}{a^2}$	[111]	$\frac{\frac{1}{2} \times 2 + 1}{\sqrt{3}a} = \frac{1.15}{a}$

### 2.2.5 金属的实际晶体结构

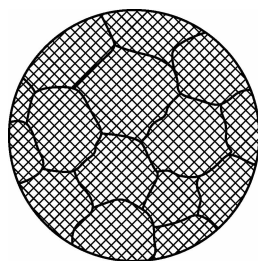
前面所讲述的晶体结构是以理想晶体为例子的,这种理想晶体的内部原子按一定的规律排列分布,晶格位向完全一致,是单晶体。但是实际的晶体并不是这样的,而是多晶体,且往往存在着形式不一的晶体缺陷。

#### 1. 多晶体结构

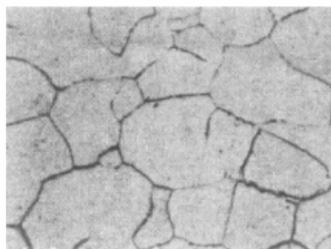
多晶体是由许多杂乱无章地排列着的小晶体组成的物质。

图 2-10(a)所示为在显微镜下观察的工业生产用的金属材料制成的试样的微观结构。可以看出,它由许许多多的很小的晶粒组成。研究中将晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。以工业用纯铁为例,因每个晶粒的晶向不同,故其表现出的性能为各向同性,所以纯铁的弹性模量在各个方向上大致相同。

图 2-10(b)所示为用电子显微镜观察到的晶粒的内部结构,可以发现晶粒内部的晶格位向在不同区域上也存在微小的差别,但是不明显,一般为  $1^\circ \sim 2^\circ$ ,最大不超过  $2^\circ$ 。研究中将这种在晶粒内部存在的微小差别的区域称为“亚晶”或“嵌镶块”。



(a) 示意图



(b) 电子显微镜下观察到的晶粒的内部结构

图 2-10 金属材料微观结构

#### 2. 晶体缺陷

在理想完整的晶体中,原子按一定的规律严格地排列分布在原子核周围。但在实际晶



体中,受多方面的影响(晶体形成条件、原子的热运动等),原子并不是完全遵循理想模型的规律分布和排列的,往往存在偏离理想晶体结构的区域。这些与完整周期性点阵结构的偏离就是晶体中的缺陷,它破坏了晶体的对称性。

晶体缺陷即晶体内部结构完整性受到破坏的所在位置,按其延展程度可分成点缺陷、线缺陷和面缺陷。

(1)点缺陷。点缺陷即在空间三个方向上,原子排列不规则的区域很小,不超过几个原子直径的缺陷,如图 2-11 所示。典型的点缺陷有空位、间隙原子、置换原子。

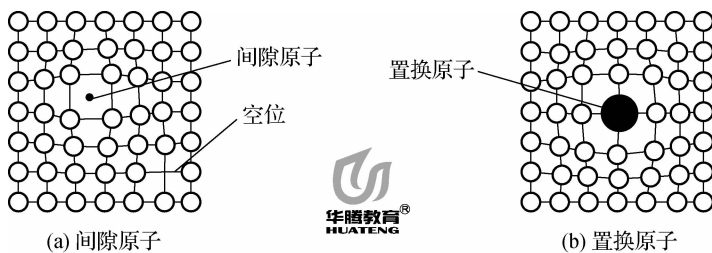


图 2-11 点缺陷

①空位即在晶体的晶格中某个结点上没有原子。因存在空位,其附近的原子就很容易偏离正常的位置,带来的结果是晶格畸变。空位的存在促使了金属内部原子的迁移,产生了扩散现象。

②间隙原子即位于晶格间隙的原子。间隙原子的存在造成了其附近原子产生的晶格畸变程度大。纯金属往往存在着杂质原子,称为异类原子,如果异类原子的直径比金属原子小得多,那么异类原子便会滞留在晶格空隙中,从而导致附近晶格产生畸变;如果异类原子的直径和金属原子的直径差不多,异类原子便会挤走金属原子而占据一些结点。这两种情况都会使异类原子附近的晶格产生畸变。

在金属晶格中,空位和间隙原子一直处于活跃状态,即在不断地运动和变化着。如果金属的温度一定,那么晶体空位和间隙原子也处于平衡状态,研究中常将这个温度称为固溶温度或溶解度。

③置换原子即占据在原基体原子平衡位置的异类原子。置换原子的大小与基体原子的大小不可能完全相等,所以在其周围的临近原子便会偏离原来的平衡位置,从而造成晶格畸变。

研究表明,空位和间隙原子是导致金属原子扩散的主要方式,这一现象对金属材料的热处理过程极为重要。金属晶体产生缺陷的原因很多,如高温淬火、氧化高能粒子(如 $\alpha$ 粒子、中子、高速电子等)轰击,点缺陷造成了金属晶格的局部畸变,从而使材料的性能也发生变化,具体表现为强度和硬度增加,塑性和韧性降低,电阻率增加,等等。

(2)线缺陷。线缺陷即晶体中产生位错。晶格中一部分晶体相对于另一部分晶体产生沿某一晶面局部滑移,滑移部分与未滑移部分的交界线称为位错。常见的位错有刃型位错和螺旋型位错两种,如图 2-12 所示。这里详细介绍刃型位错。

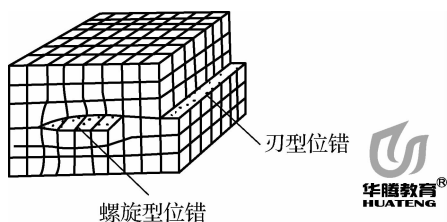


图 2-12 位错

图 2-13 所示为刃型位错示意图,图 2-12(a)中多余半原子面为一个假想的原子面,它从完整晶体的上部插入,终止于晶体的内部。从图 2-12(a)中可以看出,以滑移面为基准,位错分为两种情况:如果多余半原子面在位错面的上方,那么这种位错称为正刃型位错,用符号“ $\perp$ ”表示;如果多余半原子面在位错面的下方,那么这种位错称为负刃型位错,用符号“ $\dashv$ ”表示。两种形式的位错分别如图 2-13(b)所示。研究中将晶体单位体积内所包含的位错线的总长度称为位错密度,用符号  $\rho$  表示,且

$$\rho=L/V$$

式中, $L$  为位错线总长度; $V$  为体积。

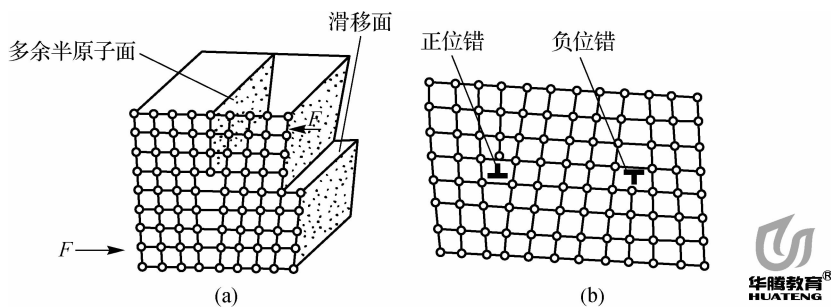


图 2-13 刃型位错示意图

位错现象是金属产生塑性变形的直接原因,所以阻碍位错运动能够很好地达到强化金属的目的,通过图 2-14 所示的金属强度和位错密度的关系曲线可以看出,以退火状态时的位错密度为基准,增大或减小位错密度都可以提高金属的强度。

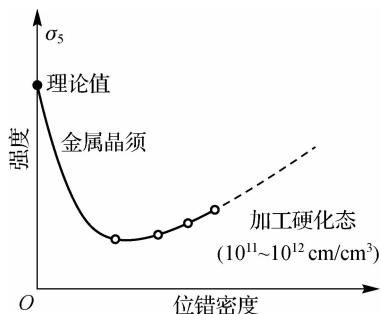


图 2-14 金属强度和位错密度的关系曲线

(3)面缺陷。面缺陷即在三维空间内两个方向上的缺陷尺寸很大,在另外一个方向上尺寸很小的缺陷。金属晶体的面缺陷包括晶界、亚晶界和相界等。

①晶界。晶界即不同位向晶粒之间的过渡区。常见的晶界原子排列示意图如图 2-15 所示。在晶界上,原子排列受相邻晶粒的影响而不能严格按照一定的规律排列,但并不意味着其排列是完全杂乱无章的。在相邻晶粒的影响下,原子常处于不同位置的折中位置,且位错密度高,晶格畸变大。在晶界上杂质原子的含量一般也要高于晶粒内部杂质原子的含量,常见晶界宽度为 2~4 个原子间距。

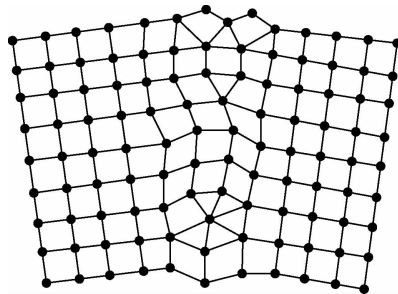


图 2-15 常见的晶界原子排列示意图

②亚晶界。图 2-16 所示为亚晶界结构示意图。亚晶界可以看作由一系列的刃型位错组成的,其特征和晶界相似。

对于工业中常用的金属来说,在其晶体结构中,晶界和亚晶界所占的面积越大,金属的强度和硬度越高,这种现象称为金属的细晶强化。研究表明,晶界对金属的塑性变形、相变等过程同样有着不可忽略的影响,在这里不一一赘述。

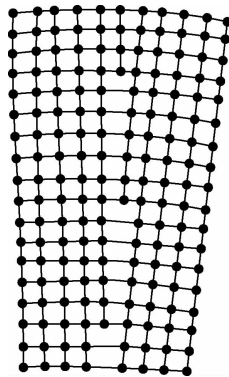


图 2-16 亚晶界结构示意图

③相界。由结构不同或虽然结构相同但是点阵参数不同的两块晶体相互交接而形成的相的界面称为相界。

任何物质都不可能绝对纯净,同理,金属晶体中的缺陷也是不可避免的。晶体缺陷的存在使金属的力学性能、物理性能、化学性能、工艺特性等都受到了影响,这些影响有好的方

面,如晶界的存在增大了金属的强度和硬度,也有不好的方面,在实际使用时要加以甄别后选用。

## 2.3 金属的结晶

金属的结晶过程对其性能影响很大,结晶条件不同,金属的结构及其性能也不尽相同,采用不同的加工工艺和热处理方法虽然能够有效地改变金属的组织与性能,但金属最原始的组织对金属性能的影响是不会消失的。

### 2.3.1 结晶概念和结晶温度

结晶即金属由液态转变为固态的过程。

金属的结晶过程是原子排列由无规则到规则的过程,在这个过程中必定要有一个平衡结晶温度  $T_0$ 。

平衡结晶温度即能够使液态金属转变为晶体的速度与由晶体转变为液态金属的速度相等的温度。处于平衡结晶温度的金属不能有效地结晶,如要实现结晶过程,需将温度  $T_0$  降低到平衡结晶温度以下的  $T_n$ ,  $T_n$  称为实际结晶温度。根据实际结晶温度和平衡结晶温度的定义,可知  $T_n < T_0$ , 研究中将两者之差称为过冷度,用  $\Delta T$  表示,即

$$\Delta T = T_0 - T_n$$

冷却速度和金属纯度共同决定了过冷度的大小,金属纯度越高,冷却速度越大,那么过冷度也就越大。

### 2.3.2 金属的冷却曲线

在研究中经常通过测绘冷却曲线的方法来确定金属(纯金属)的结晶温度。

冷却曲线可以利用热分析法得到,具体过程如下:将测定金属放在坩埚中,升高温度使金属融化成液态,然后让金属以非常缓慢的速度冷却下来,并且在冷却过程中每隔一段时间就记录一次晶体的温度( $\Delta T$  在一个很短的时间段内得到),然后将所记录的温度和时间连成曲线并放在二维坐标系中,就得到金属结晶冷却曲线,如图 2-17 所示。

从图中可以看出,该曲线有一段水平线,该水平线所对应的温度便是实际结晶温度。前述已经说明,液态金属的冷却速度非常缓慢,在结晶过程中,由结晶过程释放出来的热量与金属散发到外界的热量达到动态平衡,所以会出现随时间推移温度不变的平台现象,在结晶完成后平衡状态被打破,金属持续向外界散热,但是没有结晶释放热量补偿,所以温度便出现下降,直至与外界一致。

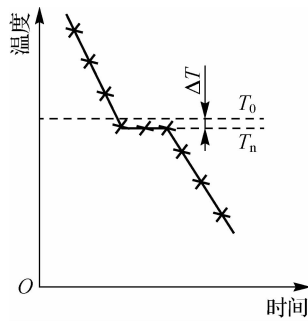


图 2-17 金属结晶冷却曲线

### 2.3.3 结晶的必要条件

凡处于自然界中的物质,其都有由不稳定状态趋于稳定状态、由高能量状态转化到低能量状态的特性,金属的结晶便是由较高能的液态状态向较低能的固态状态转变的过程。物质中所含有自由能的高低决定了它是否处于稳定状态。高自由能的物体状态不稳定,低自由能的物体状态稳定。

如果要使金属的结晶能够自发地进行,那么需要满足固态时的自由能  $F_L$  小于液态时的自由能  $F_S$  这一条件。从图 2-18 可以清晰地看出,无论是液态还是固态,金属的自由能都与温度有关系。温度升高时两种状态下的自由能都减小,并且液态时的自由能减小速度要快于固态时的自由能减小速度,两条曲线的交点即为平衡结晶温度  $T_0$ 。当金属处于  $T_0$  温度时,液态自由能与固态自由能相等,金属既不熔化又不结晶。此时,若将温度降低则产生结晶现象,若将温度升高则产生熔化现象。

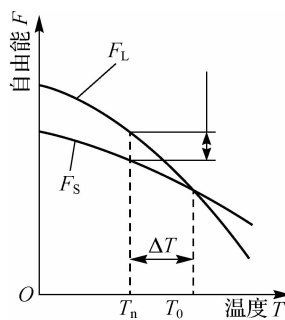


图 2-18 液态自由能和固态自由能随温度变化示意图

### 2.3.4 结晶过程

一般而言,纯金属的结晶过程发生在冷却曲线的水平线段内。研究表明,金属结晶时晶核的形成有两种方式:一是从液态金属中自发形成晶核,二是外来的难溶物质形成非自发晶

核。无论以哪种方式形成的晶核都会随时间的推移而不断长大。在这些晶核长大的过程中,在液态金属内部还有其他新的晶核生成及长大,直至液态的金属全部消失,因此可以说液态金属的结晶过程就是金属中晶核不断形成和长大的过程。金属的结晶过程示意图如图 2-19 所示。

在结晶过程中,晶核成长的最终结果是晶粒。当晶核之间无接触时,晶核的成长不受外力的约束,可以自由地生长;随着晶核的不断变大,晶核之间彼此相互接触。这样一来,晶核的生长便受到了约束,使其不能像原来一样自由生长,最终形成的多晶体由许多相位不同的晶粒组成。处于晶界上的晶粒比其他位置的晶粒内部凝固速度慢,所以晶界上含有数量较多的难溶物质。

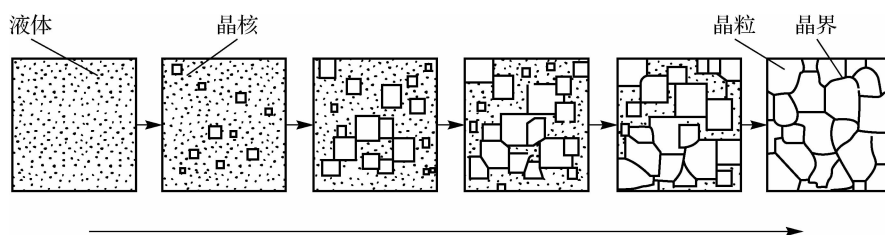


图 2-19 金属的结晶过程示意图

## 习 题

### 1. 名词解释

金属键 晶体 非晶体 晶格

晶胞 配位数 致密度 晶面

晶向 结晶 晶体缺陷 点缺陷

线缺陷 面缺陷 过冷度 平衡结晶温度

2. 常见的晶体结构有哪几种? 简述它们的特征。

3. 影响结晶后晶粒大小的因素有哪些? 晶粒大小对金属的力学性能有哪些影响?

4. 为什么金属结晶一定要有 过冷度? 简述金属的结晶过程。

5. 在立方晶胞中,某一平面通过  $x=3$ 、 $y=1$  且平行于  $Z$  轴,它的晶面指数是多少? 请绘图表示。

6. 实际晶体中有哪些缺陷? 它们分别有何特征? 它们对金属性能有何影响?

7. 配位数和致密度可以用来说明哪些问题?

8. 晶面指数和晶向指数有什么不同?

9. 为何单晶体具有各向异性,而多晶体在一般情况下不显示出各向异性?

10. 过冷度与冷却速度有何关系? 它对金属结晶过程有何影响? 对铸件晶粒大小有何



影响？

11. 纯金属结晶时,其冷却曲线为什么有一段水平线段？
12. 为什么晶粒越细,金属的强度越高,塑性、韧性就越好？
13. 从原子结构上说明晶体与非晶体的区别。

## 第 3 章

# 二元合金及相图

因为纯金属具有良好的导热性、导电性和塑性等性能,所以它在工业生产中获得了较为广泛的应用,但又因为其强度、硬度和耐磨性较差,对机械性能要求较高的零部件便不再适用;再者,纯金属的价格一般较昂贵,所以在一般情况下满足不了人们的使用要求,或者虽然能够满足使用要求但代价较高。因此,使用较多的是合金。

### 3.1 合金及其种类

合金是由两种或两种以上的金属或者金属与非金属组成的具有金属特性的物质。

组成合金的最基本的独立物质称为组元。对于常见的合金来说,组成合金的元素是组元或化合物。例如,铁铬铝合金的组元是铁、铬和铝,铜镍合金的组元是铜和镍。在铁碳合金中, $\text{Fe}_3\text{C}$ 为其组元。合金根据其组元的多少来命名。例如,由两个组元组成的合金称为二元合金,由三个组元组成的合金称为三元合金,依此类推。与纯金属相比较,合金除了具有更好的力学性能外,还具有纯金属所不具备的特性,在实际工程应用中,合金的应用范围也比纯金属更广泛。

合金中化学成分和晶体结构均相同,且有界面分开的均匀组成部分(称为相)。固态金属的相按其结构与特点可以分为固溶体和金属化合物两类。

#### 3.1.1 固溶体

固溶体是指一种元素的晶格中包含其他元素的合金相,包含元素和被包含元素分别称为溶剂元素和溶质元素。宏观上,固溶体晶体结构仍然表现为溶剂元素的特性,溶质元素只会引起晶体结构的改变。

##### 1. 固溶体的分类

溶质原子溶于固溶体的量称为固溶体的浓度。在一定条件下,溶质元素溶于固溶体中的最大量称为固溶体的溶解度。按照溶质原子在固溶体中的位置,可以将固溶体分为间隙固溶体和置换固溶体两大类。

(1) 间隙固溶体。无论是前述章节中所讲述的三种常见晶格类型还是其他类型的晶格,在其原子间都存在一定的间隙,如果晶格原子直径较大,那么原子间隙也较大,此时在这个间隙上便可能存在其他尺寸较小的原子,基于此所形成的固溶体称为间隙固溶体,即溶质原

子嵌入溶剂原子晶格中所形成的固溶体。研究表明,在间隙固溶体中, $D_{\text{溶质}}/D_{\text{溶剂}} \leq 0.59$ 。例如, $\alpha\text{-Fe}$ 和 $\gamma\text{-Fe}$ 的晶格空隙中可以溶解碳原子而形成间隙固溶体。如果溶剂元素固定,那么其原子间距也一定,所以只能形成溶解度有限的间隙固溶体,并且其溶解度随温度的升高而增加。间隙固溶体示意图如图3-1所示。

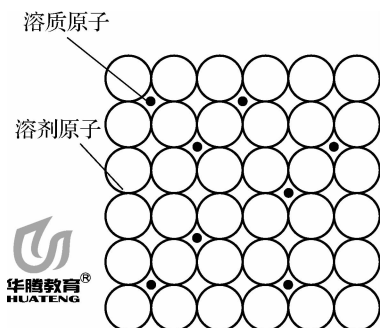


图 3-1 间隙固溶体示意图

(2)置换固溶体。置换固溶体即溶剂晶格中的部分原子被溶质原子代替所形成的固溶体。当溶剂原子半径和溶质原子半径差别不大时较容易形成置换固溶体。按溶解度的不同,置换固溶体可以分为两类,即有限置换固溶体(如Cu-Au)和无限置换固溶体(如Cu-Ni)。常见的置换固溶体大多数为有限置换固溶体,只有极少数的为无限置换固溶体。置换固溶体示意图如图3-2所示。

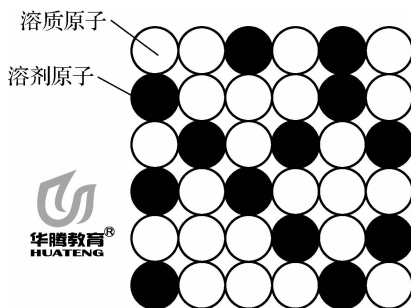


图 3-2 置换固溶体示意图

## 2. 影响固溶体溶解度的因素

影响固溶体溶解度的因素主要包括以下三方面:

(1)原子大小。原子大小对两种固溶体溶解度的影响不一样。对于间隙固溶体来说, $D_{\text{溶质}}/D_{\text{溶剂}} \leq 0.59$ ,并且比值越小溶解度越大;对于置换固溶体来说,溶质原子与溶剂原子直径越接近溶解度越大。

(2)晶格类型。如果溶质原子和溶剂原子的晶格类型相同,那么固溶体的溶解度增大。需要指出的是,晶格类型相同是形成无限置换固溶体的必要条件。

(3)负电性。如果元素的负电性相近,那么溶解度增加;反之,溶解度减小。

### 3. 固溶强化和固溶体的特点

溶质元素的加入导致固溶体的滑移变形较之前更难以进行,此时若要实现滑移变形,需增大外力,也就是说固溶现象增大了合金的强度,这种现象称为固溶强化。晶格畸变概率越大,变形程度就越大,固溶强化作用越显著,在固溶强化时合金的塑性和韧性也都得到了提升。

固溶体的强度和塑性都优于纯金属,所以固溶体在工程中的应用很广泛,金属材料中大多数组元是固溶体,其对合金的性能有着很重要的影响。固溶体有以下特点:

(1)固溶体的晶格类型与溶剂元素相同,但晶格常数发生了改变。

(2)固溶体中溶质原子越多,固溶体的溶解度越大,晶格畸变越严重,因此固溶强化的效果也就越显著。

(3)溶质原子溶于溶剂原子后固溶体的成分可能会有所改变,但其变化范围不大,也就是说溶入的原子数可多可少。

#### 3.1.2 金属化合物

金属化合物是指合金组元之间发生相互作用而形成的一种新的固相物质。

金属化合物的晶格类型和性质与任意一个组元都不相同,其特性除了有离子键和共价键的作用外,还要受到金属键的影响,所以金属化合物具有明显的金属特性。金属化合物通常作为合金的组成相而存在。

##### 1. 金属化合物的分类

金属化合物可以分为以下几种:

(1)正常价化合物。正常价化合物的成分固定,符合一般化合物的原子价规律,它一般由两部分组成,第一部分是金属元素或类金属元素,常见的有化学元素周期表中IV、V、VI族元素,如Sb、Bi、Pb、Sn等;第二部分是强金属元素,如Mg、Ca、Na、K等。正常价化合物一般较难以自身为机体形成固溶体。

(2)电子价化合物。电子价化合物的化合原则是一定的电子浓度(价电子数/原子数)而不是正常的化合价,因此将其称为电子价化合物。电子价化合物按电子浓度可以分为以下三种:

①  $\beta$ 相。电子浓度为1的电子价化合物,它们的晶格类型为体心立方晶格,常见的该类化合物有CuZn、Cu<sub>5</sub>Sn、Cu<sub>3</sub>Al、FeAl、NiAl等。

②  $\gamma$ 相。电子浓度为21/13的电子价化合物,它们的晶格类型为复杂立方晶格,常见的该类化合物有Cu<sub>5</sub>Sn<sub>8</sub>、Cu<sub>31</sub>Sn<sub>8</sub>、Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>等。

③  $\epsilon$ 相。电子浓度为7/4(21/12)的电子价化合物,它们的晶格类型为体心立方晶格,常见的该类化合物有CuSn<sub>3</sub>、Cu<sub>3</sub>Sn、Cu<sub>5</sub>Al<sub>3</sub>等。

因为电子价化合物能溶解一定量的组元,所以电子价化合物的化学式仅仅表达的是其组成成分,并不能表达出各个成分的含量,如Cu-Zn合金。一些元素在形成合金时能贡献的价电子数目见表3-1。

表 3-1 一些元素在形成合金时能贡献的价电子数目

元素名称	价电子数
Cu, Ag, Au	1
Be, Mg, Zn, Cd, Hg	2
Al, Ga	3
Sn, Si, Ge, Pb	4
As, Sb, Bi, P	5
Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Ce, La, Pr, Nd	0

(3) 间隙化合物。间隙化合物一般由原子直径较小的非金属元素和原子直径较大的过渡族金属元素(如 Fe、Ge、Mo、W、V 等)组成,这类化合物的性质主要受原子尺寸的影响,如果  $r_{\text{非金属}}/r_{\text{金属}} < 0.59$ ,那么所形成的间隙化合物的晶格较复杂,是钢中最常见的强化相。

## 2. 金属化合物的特点

金属化合物的晶格类型与原组成元素的晶格类型不同,它的晶格类型比较复杂,结构也比较复杂,滑移系、滑移方向和滑移面都比较少,强度、硬度和塑性都比较大,另外熔点和电阻也比较高,它们一般以硬质点的形式存在于合金材料中,起到了强化材料的作用,一般不能作为金属材料的机体,在实际使用中可以根据不同的需要添加合适的物质来改变金属的性能。金属化合物对金属性能起着至关重要的作用,虽然它们的含量并不多。

## 3.2 二元合金相图及杠杆定理

合金的性能与其成分结构(固溶体和化合物)的含量、大小、形状和分布形式等都有很大的关系,那么这些因素是如何影响合金的性质呢?合金的相图便是用于研究这方面的问题的,它是研究合金性能的重要理论基础,能够清晰地表达出合金的状态与温度、成分之间的关系。

从理论上讲,利用热力学定律及其参数便可以计算出合金的性能与成分、温度之间的关系,从而建立起合金的相图,但是到目前为止还做不到。现有的相图都是根据成分、温度、结构等参数的不同造成其物理化学性能不同的原理,利用实验方法得到的。常用的实验方法有磁性分析法、电阻分析法、X 射线分析法、热分析法和热膨胀法,每种方法都有其特点和适用的场合,在实际工程和研究中往往将它们配合使用,并且往往以合金所表现出来的最显著的宏观性能来决定使用哪种方法。

### 3.2.1 二元合金相图的建立

二元合金相图是以温度为纵坐标、材料成分为横坐标绘制曲线。截至目前,绝大多数二

元合金相图不是直接计算得到的,而是统计多个实验结果的数据,然后将它们绘制在二维坐标系中并连接成光滑的曲线得到的,常用的试验方法是热力分析法。下面以 Cu-Ni 合金为例来说明二元合金相图的建立过程。

(1)选择元素含量不同的 Cu-Ni 合金,见表 3-2。

表 3-2 Cu-Ni 合金元素含量表

序 号	元素与含量	序 号	元素与含量
1	100%Cu	4	40%Cu+60%Ni
2	80%Cu+20%Ni	5	20%Cu+80%Ni
3	60%Cu+40%Ni	6	100%Ni

(2)利用热力分析法测出 6 种合金的结晶开始温度和终了温度,将它们绘制在温度-时间坐标系中,如图 3-3(a)所示。

(3)绘制温度-成分坐标系,使其与温度-时间坐标系对齐,如图 3-3(b)所示,将 Ni 的成分标注在横坐标轴上(图中为 20,40,60,80),并过这些点作向上的竖直线。

(4)通过温度-时间坐标系中的结晶开始温度点和终了温度点向右作水平线,每条水平线都与温度-成分坐标系中竖直成分线有两个交点。

(5)将竖直成分线上意义相同的交点连接起来,最终结果如图 3-3 所示。图 3-3(b)中结晶开始温度点连接而成的曲线称为液相线,结晶终了温度点连接而成的曲线称为固相线。

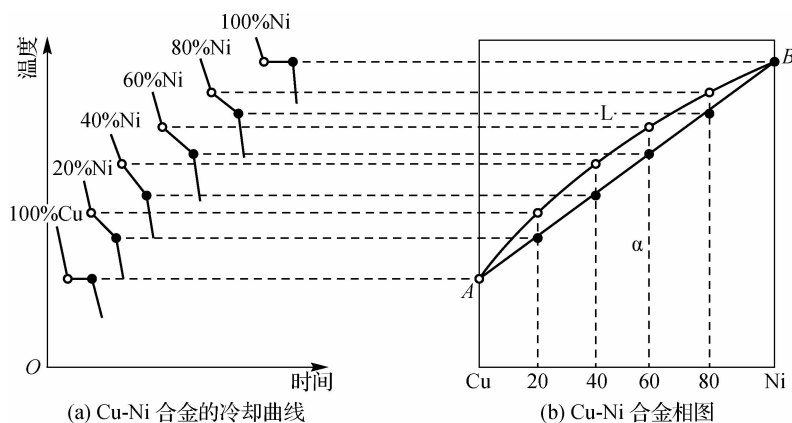


图 3-3 二元合金相图的建立过程

### 3.2.2 相图分析

相即在金属或合金中成分相同、结构相同并与其他部位有明显界限分开的均匀组成部分。

在图 3-4 所示的二元合金相图中,共有两个单相区(L 和  $\alpha$ )和一个双相区(L+ $\alpha$ ),以及两条相线(AB 上弧线和 AB 下弧线)。

- (1) L 相: 液相, 由铜和镍组成的液体, 在高温下才能存在。
- (2)  $\alpha$  相: 固相, 由铜和镍互相溶解而组成的固溶体。
- (3) L+ $\alpha$  相: 固液共存相, 既有固相的物质, 又有液相的物质。
- (4) AB 上弧线: 液相线, 表示合金结晶的开始温度, 在它之上的合金的状态为液相。
- (5) AB 下弧线: 固相线, 表示合金结晶的终了温度, 在它之下的合金的状态为固相。

在相图中, 可以清晰地看出不同成分的合金在不同温度下所处的状态, 以及改变合金温度对其状态的影响。处在单相区内的合金, 其成分和数量相对来说比较容易确定, 而在双相区内两项的成分和相对数量就比较难以确定, 只有充分了解了合金在两相区中的成分和数量, 以及温度改变时合金状态的变化规律, 才能更好地掌握合金的性能, 杠杆定理便是用来解决这个问题的。

### 3.2.3 杠杆定理

合金在缓慢冷却的过程中, 其固相和液相的成分及其含量一直在不断变化, 杠杆定理能够表示出在某一温度时合金中的成分及各成分的含量。

#### 1. 确定合金的成分

以 Cu-Ni 合金为例, 图 3-4 中  $r$  点表示的是 Ni 的含量为 1% 的合金在  $T_1$  温度时的状态。

因为  $r$  点处于 L+ $\alpha$  相区, 所以此时合金由液相和固相组成。过点  $r$  作水平线, 与液相线和固相线分别相交于点  $a$  与点  $b$ , 然后过点  $a$  和点  $b$  作竖直线, 与横轴的交点便为合金的成分, 可知此时合金由  $\omega_{\text{Ni}} = C_{\alpha}\%$  的固相和  $\omega_{\text{Ni}} = C_{\text{L}}\%$  的液相组成。

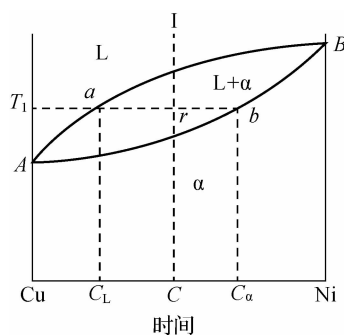


图 3-4 杠杆定理示意图

#### 2. 确定平衡相的质量

如果合金 I 的总质量为  $m$ , 其中固相和液相的质量分别为  $m_{\text{L}}$  与  $m_{\alpha}$ , 那么有

$$\begin{cases} m_{\text{L}} + m_{\alpha} = m \\ m_{\text{L}} C_{\text{L}} + m_{\alpha} C_{\alpha} = m C \end{cases}$$

由以上方程式可以得到

$$\frac{m_{\text{L}}}{m_{\alpha}} = \frac{\overline{rb}}{\overline{ra}}$$



也就是说,两相的质量之比是两相成分点到合金成分点的距离的反比,这便是杠杆定理的内容。有了这个关系后,便可以很方便地求出任意平衡状态下二元合金中两相的质量。需要注意的是,杠杆定理只适用于处于平衡状态下的二相区。

### 3.3 常见相图

常见的相图有匀晶相图和共晶相图两种。

#### 3.3.1 匀晶相图

匀晶相图即组成二元合金的组元在固态和液态时均能无限互溶的合金的相图。常见的Cu-Ni、Ag-Au、Fe-Cr、Fe-Ni、Cr-Mo、Mo-W等合金的相图都是二元匀晶相图。

##### 1. 相图分析

以Cu-Ni合金的相图为例来分析匀晶相图。在图3-5(a)中,左、右两条竖直线为温度轴, A、B两点分别为纯铜和纯镍的熔点,最底部的横线为铜和镍的含量线,中间两条线 $AI_1B$ (固相线)和 $A\alpha_1B$ (液相线)将相图分为三个区域:L相区(液相线以上)内合金中各种成分均为液态; $\alpha$ 相区(固相线以下)内合金中各种成分均为单相 $\alpha$ 固溶体;液相线以下、固相线以上为L+ $\alpha$ 相共存区(L+ $\alpha$ 区),处于此区域内的合金正在进行结晶过程,既有液相又有 $\alpha$ 固溶体。

相图中液相线表示的是合金在缓慢加热时熔化的终了温度,也是合金在缓慢冷却时结晶的开始温度;固相线表示的是合金在加热时开始熔化的温度,也是合金缓慢冷却时结晶的终了温度。

##### 2. 结晶过程分析

以镍的含量为 $I\%$ 的合金为例来分析合金的匀晶反应的结晶过程,如图3-5所示。

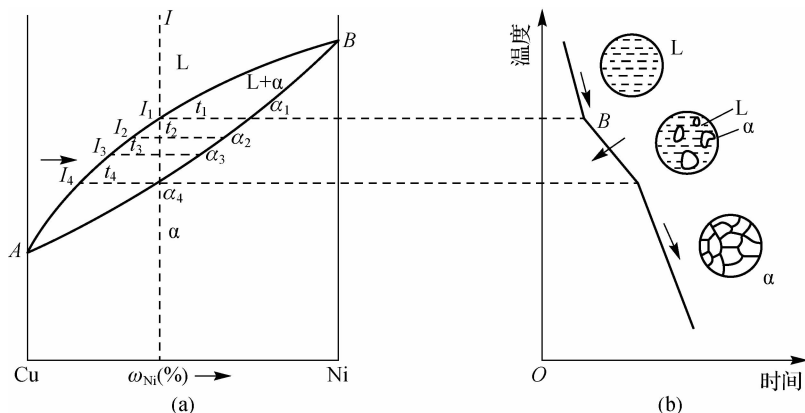


图 3-5 Cu-Ni 合金的匀晶相图

当合金的温度在 $t_1$ 点以上时,合金为单一的液相L,降低合金温度至 $t_1$ 点时,由于此时的温度达到了合金液相结晶温度,此时便会开始从液相中产生 $\alpha$ 相;继续冷却,当合金的温

度处在  $t_1 \sim t_2$  (液相线与固相线之间) 时, 便会在合金内部发生匀晶转变现象, 不断地从液相中析出固相  $\alpha$ , 合金处于固液共存区, 即  $L + \alpha$  相区。在这个时间段内, 合金中液相成分的数量沿液相线变化不断减少,  $\alpha$  固相成分的数量沿固相线变化不断增多。继续冷却合金至  $t_2$  点温度, 此时合金中的液相全部转化为  $\alpha$  相, 匀晶转变结束。合金最终的组元为均匀的单相  $\alpha$  固溶体。

### 3. 晶内偏析

晶内偏析即晶粒内部化学成分不均匀的现象。

在理想条件下, 在固溶体的结晶过程中, 其固相和液相成分的含量在不断地变化, 原子的扩散现象进行得很充分, 最终形成的固溶体成分也比较均匀。但在实际生产过程中, 液态金属往往以较大的冷却速度进行结晶 (在理想条件下为十分缓慢的速度), 而在固态时原子的扩散也比较难以进行, 因此合金的结晶过程并非均匀进行, 而是按照树枝的方式进行。即温度较高时合金中先结晶出枝干,  $\alpha$  相中 Ni 的含量较高; 温度降低后结晶出枝间,  $\alpha$  相中 Ni 的含量较低。枝晶偏析示意图与所形成的偏析组织分别如图 3-6(a) 和图 3-6(b) 所示。枝晶偏析会造成材料的塑性和韧性下降, 且容易引起晶内腐蚀, 以及给热加工带来不便。

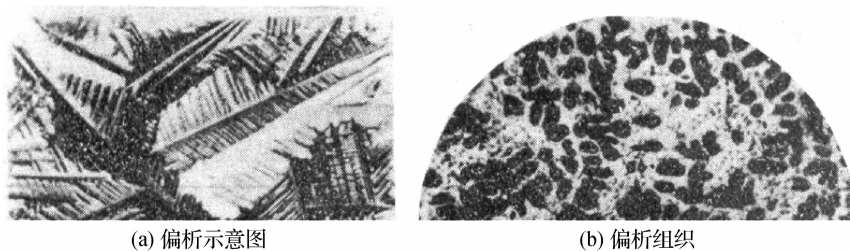


图 3-6 枝晶偏析示意图和偏析组织

消除晶内偏析的有效方式是均匀化退火, 即将合金的温度加热到固相线以下  $100 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$  并且保温较长时间, 促使金属原子能够进行充分的扩散, 从而达到使成分较均匀的目的。

### 3.3.2 共晶相图

共晶反应即在一定温度下, 一定成分的液相同时结晶出两个成分和结构都不相同的新固相的转变过程。

#### 1. 相图分析

共晶相图如图 3-7 所示, A 点为 Pb 的熔点 ( $327 \text{ }^\circ\text{C}$ ), B 点为 Sn 的熔点 ( $232 \text{ }^\circ\text{C}$ ), AEB 线为液相线, ACEDB 为固相线。相图中共有 L、 $\alpha$ 、 $\beta$  三种相: L 相在液相之上为液相区;  $\alpha$  相位于靠近纯组元 Pb 的封闭区域内, 是 Sn 溶解在 Pb 中所形成的固溶体;  $\beta$  相位于靠近纯组元 Sn 的封闭区域内, 是 Pb 溶解在 Sn 中所形成的固溶体。每两个单相区之间的部位为两相区, 分别是  $L + \alpha$ 、 $L + \beta$  和  $\alpha + \beta$ 。CF 线和 DG 线分别是 Sn 在 Pb 中和 Pb 在 Sn 中的溶解度曲线 (即饱和浓度线), 称为固溶线。从相图中可以看出, 温度越低, 固溶体的溶解度也越低。

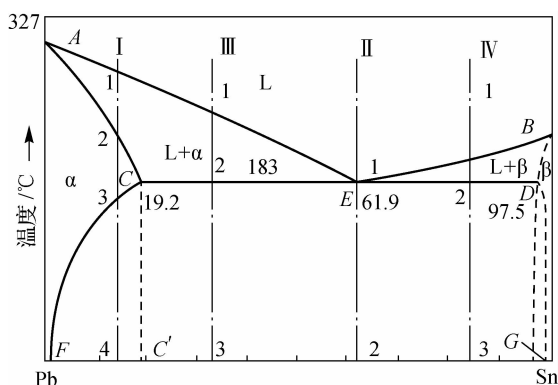
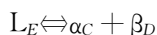


图 3-7 共晶相图

水平线  $CED$  称为相图中的共晶线。从图中可以看出,共晶线所对应的温度是  $183\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 位于点  $E$  的成分能够同时结晶出点  $C$  和点  $D$  的两种固溶体,分别是  $\alpha$  固溶体和  $\beta$  固溶体,即



此时便产生了共晶反应(也称共晶转变)。

共晶反应所形成的两相混合物称为共晶体或共晶组织。合金发生共晶反应时的温度称为共晶温度,共晶温度和共晶成分所处的点称为共晶点,能够产生共晶成分的合金称为共晶合金。

在研究中,将成分位于共晶点以左的合金称为亚共晶合金,位于共晶点以右的合金称为过共晶合金。凡具有共晶成分的合金液体在冷却到共晶温度时都将发生共晶反应。发生共晶反应时, $L$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  三个相平衡共存,它们的成分固定,但各自的重量不断变化。因此,水平线  $CED$  是一个三相区。

## 2. 结晶过程分析

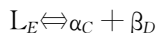
(1)合金 I 成分。从图 3-7 中可以看出,液态合金冷却时,在 2 点所对应的温度前所发生的为匀晶反应,结晶产物为单相  $\alpha$  固溶体,将其称为一次相(或初生相);温度继续降低到 2 点所对应的温度时, $\beta$  固溶体被 Sn 过饱和,由于晶体的晶格不稳定,此时便会出现第二相  $\beta$  相,将这种由固相析出新固相称为二次相(或次生相)。二次相的产生过程称为二次析出,产物二次  $\beta$  为细粒状物质,用  $\beta_{II}$  表示。温度继续下降, $\alpha$  相和  $\beta_{II}$  的成分分别沿  $CF$  线与  $DG$  线变化,并且  $\beta_{II}$  的相对重量增加,室温下  $\beta_{II}$  的相对重量的百分比可以表示为

$$\omega_{\beta_{II}} = F4/FG$$

合金 I 的室温组织为  $\alpha + \beta_{II}$ 。图 3-8 所示为其冷却曲线和组织转变示意图。

对于成分 Sn 含量大于  $D$  点的合金,其结晶过程与上述合金 I 相似,室温组织为  $\beta + \alpha_{II}$ 。

(2)合金 II 成分。当合金冷却到点  $E$  时,发生共晶反应



此时析出的产物为  $\alpha_C$  和  $\beta_D$ ,反应终了后所获得的产物为  $\alpha + \beta$  的共晶组织。

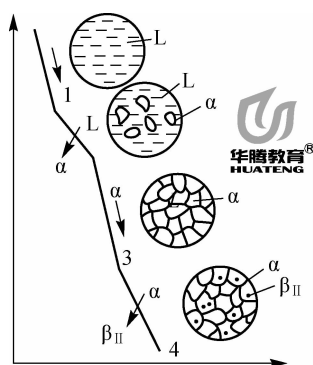


图 3-8 合金 I 的冷却曲线和组织转变示意图

在上述过程中,伴随着元素的扩散现象,成分均匀的液态合金同时结晶析出两种固相成分,且两种成分的差异很大。现假设最先析出的固相物质为 Pb 含量较多的  $\alpha$  相晶核,在它不断长大的过程中,其周围的液体中必定会出现 Pb 多 Zn 少的现象,促使  $\beta$  相晶核的形成,而 Zn 的不断消耗,又促使周围液体中  $\alpha$  相晶核的形成和长大,两者相互促进,所得到的共晶组织呈片、针、棒或点球等形状,且晶粒较细。研究中将共晶组织中的相称为共晶相,如共晶  $\alpha$ 、共晶  $\beta$ 。利用杠杆定理可以求出共晶反应刚结束时刻两相的相对重量百分比:

$$\begin{cases} Q_{\alpha} = \frac{ED}{CD} \times 100\% = \frac{97.5 - 61.9}{97.5 - 19.2} \times 100\% \approx 45.5\% \\ Q_{\beta} = 100\% - Q_{\alpha} = 100\% - 45.5\% = 54.5\% \end{cases}$$

需要说明的是,此时用的是  $\alpha + \beta$  两相区的上沿,而不是三相区。

在共晶转变结束后,如果温度继续下降,两共晶相的成分分别沿  $CF$  和  $DG$  线变化,分别从共晶  $\alpha$  和共晶  $\beta$  中析出  $\beta_{II}$  和  $\alpha_{II}$ ,  $\alpha_{II}$  与共晶  $\alpha$  结合,  $\beta_{II}$  与共晶  $\beta$  结合,共晶组织细,使得二次相较难分辨,所以最终的室温组织仍为  $\alpha + \beta$  共晶体。共晶合金的冷却曲线和组织转变过程如图 3-9 所示。

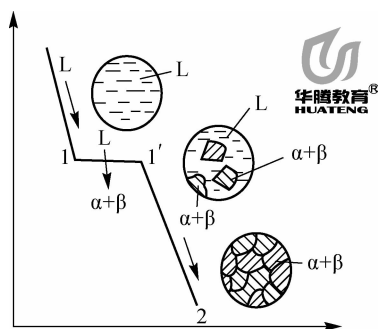
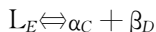


图 3-9 共晶合金的冷却曲线和组织转变过程

(3)合金 III 成分。液态合金在 1-2 点时发生匀晶转变,产物为一次  $\alpha$  相。此时,随着合金的不断冷却,一次  $\alpha$  相的成分沿  $AC$  线变化到  $C$  点,液相的成分沿  $AE$  线变化到  $E$  点,当温度刚到达 2 点时,利用杠杆定理可以求得两相的相对重量百分比为

$$\begin{cases} Q_L = \frac{C_2}{CE} \times 100\% \\ Q_\alpha = \frac{2E}{CE} \times 100\% \end{cases}$$

在 2 点时, 剩余液态合金中具有 E 点成分的合金转变为共晶组织, 发生的共晶反应为



并且共晶体的总重量与共晶反应前液态合金的重量相等, 也就是说

$$Q_E = Q_L = \frac{C_2}{CE} \times 100\%$$

在共晶反应结束时刻,  $\alpha$ 、 $\beta$  两相的相对重量百分比为

$$\begin{cases} Q_\alpha = \frac{2D}{CE} \times 100\% \\ Q_\beta = \frac{C_2}{CD} \times 100\% \end{cases}$$

在共晶转变结束后, 如果温度继续下降, 那么将从一次  $\alpha$  相和共晶  $\beta$  相中析出  $\beta_{II}$ , 从共晶  $\beta$  中析出  $\alpha_{II}$ 。共晶组织中的二次相同样也不能作为独立组织看待, 但是一次  $\alpha$  相晶粒较大, 所以析出的  $\beta_{II}$  分布于一次  $\alpha$  相上时不能将其忽略, 所以亚共晶合金的室温组织为  $\alpha + (\alpha + \beta) + \beta_{II}$ 。图 3-10 所示为亚共晶合金的冷却曲线及组织转变示意图。

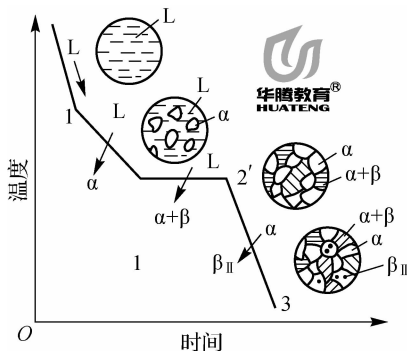


图 3-10 亚共晶合金的冷却曲线及组织转变示意图

### 3.4 其他二元合金相图

除了常见的匀晶相图和共晶相图外, 还有包晶相图和共析相图。

#### 3.4.1 包晶相图

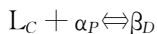
##### 1. 相图分析

包晶反应即当合金凝固到一定温度时, 已结晶出来的一定成分的(旧)固相与剩余液相(有确定成分)发生反应生成另一种(新)固相的恒温转变过程。

发生包晶反应所产生的相图称为包晶相图, Pt-Ag、Ag-Sn 等合金具有包晶相图, 现以

Pt-Ag 合金相图为例来介绍包晶相图。

如图 3-11(a)所示,相图中的水平线  $PDC$  称为包晶线, $D$  点为包晶体,相图上共有  $L$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  三个单相区和  $L+\alpha$ 、 $L+\beta$  和  $\alpha+\beta$  三个两相区,与包晶线成分所对应的合金在包晶线温度下发生包晶反应



上述反应的过程如下:液相  $L$  包含着固相  $\alpha$ ,新相  $\beta$  在  $L$  与  $\alpha$  的界面上形成新的晶核,在原子扩散的作用下相  $L$  和  $\alpha$  两侧长大。

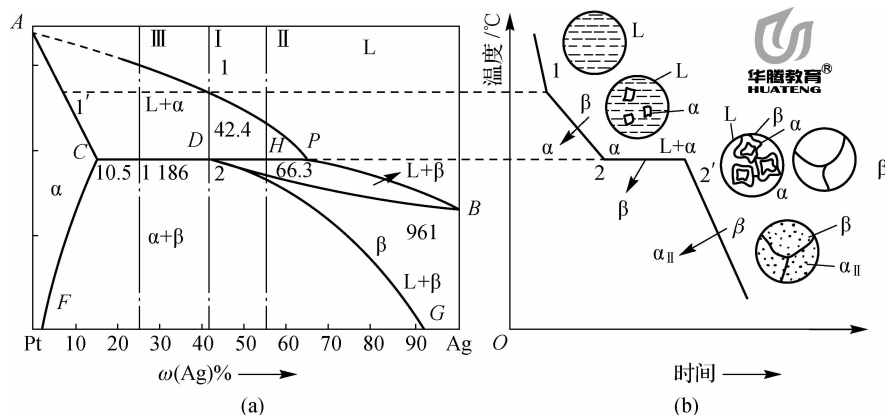


图 3-11 包晶相图及组织转变过程

## 2. 结晶过程分析

I 合金成分处于点  $D$  时,其结晶过程如图 3-11(b)所示。在液态合金由 1 点冷却到 2 点的过程中,结晶出  $\alpha$  固溶体,到达 2 点时, $\alpha$  相的成分沿  $AP$  线变化到  $P$  点,液相成分沿  $AC$  线变化到  $C$  点,此时  $C$  点成分的液相  $L$  包着先析出的  $P$  点成分的  $\alpha$  相发生包晶反应,生成  $D$  点成分  $\beta$  相,这个过程一直在消耗着  $\alpha$  相,直至将其全部消耗完。如果继续冷却,那么将从  $\beta$  相中析出  $\alpha_{II}$ ,最终室温下的组织为  $\beta+\alpha_{II}$ 。

II 合金成分处于  $P$ 、 $D$  点之间,其在 2 点之前结晶出  $\alpha$  相,降低合金的温度至 2 点时,发生包晶反应,待反应结束液相  $L$  被消耗完时还有  $\alpha$  相剩余,继续冷却  $\alpha$  相和  $\beta$  相都会发生二次析出产物,分别为  $\alpha_{II}$  和  $\beta_{II}$ ,最终的室温组织为  $\alpha+\beta+\alpha_{II}+\beta_{II}$ 。

III 合金成分位于  $C$ 、 $D$  点之间,其也是在 2 点发生包晶反应,反应结束后  $\alpha$  相被消耗完,而  $L$  相还有剩余,此时若继续冷却,液相  $L$  便会向  $\beta$  相转变,当温度达到 3 点以下时,便会从  $\beta$  相中析出  $\alpha_{II}$  相,所以最终的室温组织为  $\beta+\alpha_{II}$ 。

### 3.4.2 共析相图

共析反应即自某一种均匀一致的固相中同时析出两种化学成分和晶格结构完全不同的新固相的转变过程。

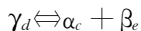
共析反应也称为共析转变,其方程式为



固相  $\Leftrightarrow$  固相 + 固相

共析反应的产物为共析组织,具有共析反应的相图称为共析相图。共析反应与共晶反应极为相似,唯一不同的是其反应产物只能是固相而不能是液相或固液混合物,它属于二次结晶。

共析反应的二元合金相图如图 3-12 所示,相图的形状与共晶反应完全相同,共析组织也是两相混合物,组织更加均匀。图中水平线  $cde$  称为共析线,点  $d$  为共析点,当固溶体冷却到共析线上  $d$  点成分时,合金发生共析反应



在共析线上,  $\gamma$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  三相共存。

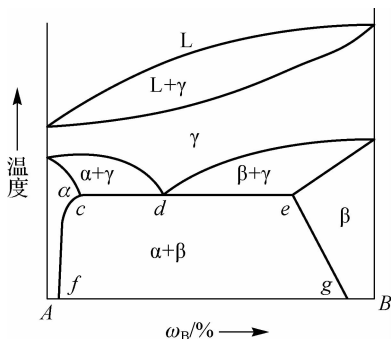


图 3-12 共析反应的二元合金相图

### 3.5 合金的性能与相图的关系

合金的成分、组织、结晶等因素决定了合金的性能;另一方面,这些参数与二元合金相图有十分紧密的关系。由此可知,合金的相图与合金的性能也有着必然的关系。

#### 3.5.1 机械性能与相图的关系

如果合金的组织为两相机械混合物,那么其性能与合金成分呈正(或反)比例关系,并且数值为两相性能的算术平均值。各参数满足关系式

$$\begin{cases} \sigma_{混} = \sigma_{\alpha} \times Q_{\alpha} + \sigma_{\beta} \times Q_{\beta} \\ HB_{混} = HB_{\alpha} \times Q_{\alpha} + HB_{\beta} \times Q_{\beta} \end{cases}$$

式中,  $Q_{\alpha}$  和  $Q_{\beta}$  是两相的相对质量百分比。

如果合金的组织为固溶体,那么随着溶质元素含量的增加,发生固溶强化现象,合金的强度和硬度也增大。如果是无限互溶的合金,那么当溶质含量为 50% 左右时,合金的强度和硬度最高,此时合金的性能与成分之间的关系如图 3-13(a) 曲线所示。如果合金有稳定的化合物,那么在其成分曲线上必定会出现拐点,如图 3-13(b) 所示的拐点。图中出现拐点的原因如下:共晶合金和共析合金晶粒较细,造成了合金的性能在共晶和共析成分附近偏离比例指向位置。



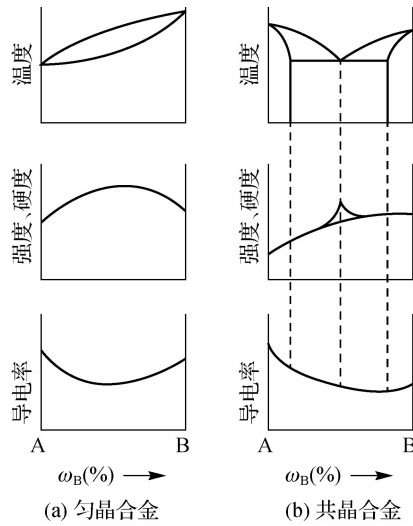


图 3-13 合金的机械性能与相图的关系

合金的电导率变化与上述力学性能相反。

### 3.5.2 铸造性能与相图的关系

图 3-14 所示为合金铸造性能与相图的关系,从图中可以看出,合金的液相线和固相线间的距离(水平距离和竖直距离)越大,合金的流动性能越差,偏析现象越严重,合金的铸造性能就比较差。另外,在所有合金中共晶合金的铸造性能是最好的,如果条件允许,一般的铸造合金要尽量选取共晶合金。

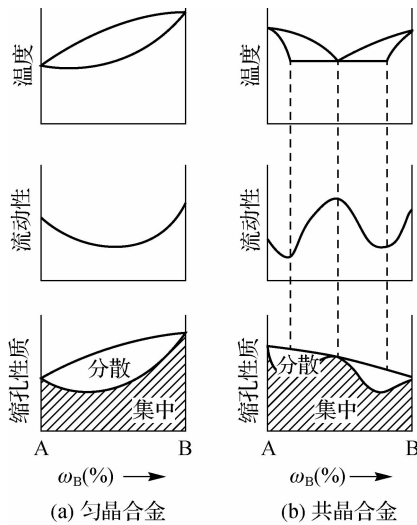


图 3-14 合金铸造性能与相图的关系

## 习 题

### 1. 名词解释

合金 组元 相 固溶体 固溶体的浓度 间隙固溶体 置换固溶体 金属化合物  
匀晶反应 共晶反应 包晶反应 共析反应 晶内偏析

2. 固态金属按其组成可以分为哪几类?

3. 按照溶质原子在固溶体中的位置,固溶体可以分为哪几类?

4. 影响固溶体溶解度的因素有哪些?

5. 金属化合物有哪些特点? 它可以分为哪几类?

6. 简述二元合金相图建立的步骤。

7. 试简述杠杆定理的用途。

8. 常见相图有哪些? 试简述各个相图的结晶过程。

9. 试简述合金的性能与相图的关系。

10. 固溶体和金属间化合物在结构与性能上有什么主要差别?

11. 何谓共析反应和共晶反应? 试比较这两种反应的异同点。

12. 根据匀晶相图分析产生晶内偏析的原因。简述晶内偏析受哪些因素的影响。