

目 录

绪 论	(1)
-----	-----

第一章 金属的晶体结构与结晶

§ 1-1 金属的晶体结构	(3)
一 晶体与非晶体	(3)
二 纯金属的常见晶体结构	(3)
三 金属晶体结构的一些重要参数	(5)
四 晶面指数和晶向指数	(6)
五 晶体的各向异性	(7)
§ 1-2 实际金属的晶体结构和晶体缺陷	(8)
一 多晶体结构	(8)
二 晶体缺陷	(8)
§ 1-3 金属的结晶和铸锭	(10)
结晶的概念	(10)
一 结晶条件	(10)
二 结晶过程	(11)
四 影响晶核形成与长大的因素	(12)
五 金属铸锭的组织及其特性	(13)

第二章 金属的塑性变形与再结晶

§ 2-1 金属的塑性变形	(15)
金属的变形与断裂	(15)
一 单晶体金属的塑性变形	(18)
二 多晶体金属的塑性变形	(19)
§ 2-2 冷塑性变形对金属的组织 ¹ 性能的影响	(20)
一 冷塑性变形对金属组织结构的影响	(20)
二 冷塑性变形对金属性能的影响	(23)
§ 2-3 回复与再结晶	(24)
回复	(24)
一 再结晶	(24)
二 晶粒长大	(25)
四 影响再结晶退火后晶粒大小的因素	(26)
§ 2-4 金属的冷加工	(27)

一 热加工的概念	(27)
二 热加工对金属组织与性能的影响	(27)

第三章 合金的相结构与结晶

§ 3-1 合金的基本概念	(29)
§ 3-2 固态合金的相结构	(29)
一 固溶体	(29)
二 金属化合物	(32)
§ 3-3 二元合金相图	(34)
一 相图定义及其应用	(34)
二 二元合金相图的测定方法	(34)
三 匀晶相图	(35)
四 共晶相图	(38)
五 具有稳定金属化合物相图	(41)
六 包晶相图	(41)
七 具有共析转变的二元合金相图	(43)
§ 3-4 铁碳合金相图	(44)
一 铁碳合金相图的基本组元及其性能	(44)
二 $Fe-Fe_3C$ 相图中重要合金成分线的分析	(47)
三 典型铁碳合金的平衡结晶过程及其组织	(48)
四 含碳量对铁碳合金的组织与性能的影响	(53)
五 $Fe-Fe_3C$ 相图的应用	(54)
§ 3-5 合金性能与相图的关系	(55)
一 合金的机械性能与物理性能与相图的关系	(55)
二 合金的工艺性能与相图的关系	(55)

第四章 钢的热处理

§ 4-1 概述	(57)
§ 4-2 钢在加热时的转变	(57)
一 奥氏体的形成	(57)
二 奥氏体晶粒长大及其影响因素	(59)
三 奥氏体晶粒度的概念	(59)
§ 4-3 钢在冷却时的转变	(60)
一 过冷奥氏体等温冷却转变	(60)
二 过冷奥氏体连续冷却转变	(69)
§ 4-4 钢的退火与正火	(70)
一 退火	(70)
二 正火	(72)

§ 4-5 钢的淬火	(73)
一 淬火温度的选择	(73)
二 淬火介质	(73)
三 淬火方法	(74)
§ 4-6 钢的淬透性	(75)
一 淬透性的定义	(75)
二 影响淬透性的因素	(76)
三 淬透性的测定及其表示方法	(76)
四 设计中应如何考虑钢的淬透性	(77)
§ 4-7 钢的回火	(77)
回火的目的	(78)
一 淬火钢在回火时的组织转变	(78)
二 淬火钢回火后的组织与性能	(79)
四 回火的种类及应用	(81)
§ 4-8 钢的表面淬火	(81)
概述	(81)
二 感应加热表面淬火	(82)
三 火焰加热表面淬火	(84)
§ 4-9 钢的化学热处理	(85)
概述	(85)
二 钢的渗碳	(86)
三 钢的氮化	(87)
四 几种氮化新工艺	(89)

第五章 铁合金

§ 5-1 碳钢	(91)
碳钢中常存杂质的影响	(91)
二 碳钢的分类、编号及一般用途	(92)
§ 5-2 铸钢	(95)
概述	(95)
一 铸钢铸锭	(97)
三 铸钢的热处理	(102)
四 铸钢机械铸造	(104)

第六章 合金钢

§ 6-1 概论	(106)
一 合金元素对钢中基相的影响	(106)
二 合金元素对相平衡的影响	(108)

二 合金元素对热处理时的相变过程的影响	(110)
四 合金钢的分类及编号	(112)
§ 6-2 合金结构钢	(114)
一 低合金高强度钢	(114)
二 合金调质钢	(115)
三 渗碳钢	(117)
四 弹簧钢	(119)
五 微动轴承钢	(121)
六 低屈服钢与超高强度钢	(123)
§ 6-3 合金工具钢	(128)
合金刀具钢	(128)
二 合金模具钢	(132)
三 量具钢	(135)
§ 6-4 特殊性能钢及合金	(135)
不锈钢	(136)
一 耐热钢及高温合金	(140)
二 耐蚀钢	(144)

第七章 有色金属及其合金

§ 7-1 铜及其合金	(146)
一 概述	(146)
二 铜及铜合金的分类及牌号	(147)
三 铜的合金化	(150)
四 铜合金的热处理	(151)
五 形变铝合金(简称形变铝)	(152)
六 铸造铝合金(简称铸铝)	(154)
§ 7-2 铝及其合金	(159)
一 概述	(159)
二 铝合金	(159)
三 铝及铝合金的热处理	(162)
四 铝基复合材料	(162)
§ 7-3 钢及其合金	(163)
工业纯铜(紫铜)的性质及应用	(163)
二 黄铜	(164)
三 青铜	(167)
§ 7-4 滑动轴承合金	(172)
对滑动轴承合金的性能要求及其组织特征	(172)
一 铜基及铝基轴承合金	(172)

一、 铜基轴承合金	(174)
四、 铝基轴承合金	(174)

第八章 非金属材料

§ 8-1 高分子材料	(176)
基本概念	(176)
一 高分子材料的分类	(177)
三 高分子材料的结构及其特点	(178)
四 高聚物材料的热行为	(181)
五 高聚物材料的机械性能	(183)
六 工程用高聚物材料简介	(184)
§ 8-2 工程陶瓷材料	(187)
陶瓷的概念及其特点	(187)
一 陶瓷材料的分类	(188)
一 组成陶瓷材料的基本相及其结构	(188)
四 陶瓷材料的性能	(189)
§ 8-3 复合材料	(190)
一 复合材料的概念	(190)
一 复合材料的特点	(191)
一 复合材料的种类	(192)
四 复合材料的复合理论	(192)
五 几种纤维增强复合材料	(193)

第九章 机械工程设计选材的一般原则及热处理零件结构工艺性分析

§ 9-1 机械工程设计选材的一般原则	(195)
一 选材材料满足零件工作条件下所要求的综合性能指标	(195)
一 选材材料具有良好的工艺性能	(196)
二 应考虑经济性	(197)
§ 9-2 典型零、部件选材分析	(197)
一 机床主轴的选材	(197)
箱体火箭发动机壳体的选材	(198)
§ 9-3 齿轮零件热处理技术条件的标注	(199)
§ 9-4 金属材料热处理零件的结构工艺性	(202)

附录

1 钢的晶粒度等级图	(202)
1 国内外常用钢号对照表	(203)
主要参考书目	(206)

绪 论

工程材料是我国社会主义经济建设和国防建设的基本材料,是工业的粮食。工程材料在国民经济各部门和人民日常生活中占有相当重要的地位,不仅在民用工业,如机械制造、农业机械、交通运输、仪器仪表、化工设备、电机电器等;就是在国防工业,如枪炮、坦克、飞机、军舰、火箭、导弹、宇宙飞船、核动力装置等常规和尖端武器方面,均需要大量的工程材料。工程材料之所以能获得如此广泛的应用,不仅是由于它的来源丰富,而且还由于它具有优良的使用性能和工艺性能。工程材料在使用条件下所表现的性能称为使用性能,它包括物理、化学及机械性能。工程材料在生产加工过程中所表现的性能称为工艺性能,它包括铸造性能、压力加工性能、焊接性能、热处理性能、切削加工性能等。

工程材料品种繁多,工程上所用的材料有金属材料(如钢铁及有色金属合金)、高分子材料、陶瓷材料及复合材料等。各种材料成份不同,性能各异,在工程上的应用也不尽相同。几十年来,金属材料一直是工程上采用的主要材料。随着科学技术及生产的发展,高分子材料、陶瓷材料及复合材料在性能上和成本上与某些金属材料几乎相当,有的甚至更好,成为一类独特的工程材料。进入到20世纪以来,金属与非金属互相渗透、互相结合,组成一个完整的材料体系。材料科学也就在金属学、高分子材料学和陶瓷学等基础上很快地发展起来了。

《工程材料学基础》是机械类各专业的技术基础课,其主要培养目标足:使机械类专业学生具有金属学、热处理等基础理论知识,合理选用工程材料,正确确定金属热处理工艺方法,妥善处理热处理零件结构工艺性。众所周知,目前,机械工业正朝着高速、自动、精密的方向发展。作为机械工程技术人员,不论从事机械设计、机械制造还是使用维修,所遇到的工程材料的使用和金属热处理问题,将日趋增多,机械工业与工程材料学科之间的关系将更加密切。实践证明,由于设计选材不当或热处理工艺不妥,都将导致机械零件在使用中产生早期失效。如过早地出现塑性变形、磨损、开裂或断裂等现象,造成不应有的损失。因此,作为一名机械工程技术人员必须掌握各种工程材料的组织、性能及其变化规律,并能运用这些规律去解决生产实际问题。为此,就要求具有较全面的、系统的工程材料与金属热处理方面的理论知识。

从机械类专业学生实际需要出发,本课程将扼要讲授金属学基础、热处理基本原理与工艺、钢铁材料、有色金属及其合金、高分子材料、陶瓷材料及复合材料等,并着重阐述金属材料成分、组织与性能之间关系,以及提高金属材料性能,充分发挥材料潜力的途径。学生在学习本课程时要特别注意:了解金属及合金的结构与结晶、金属的塑性变形与再结晶及二元合金相图的基础理论;熟悉常用工程材料的成分、组织、结构、性能和用途方面的基础知识;了解金属材料的热处理基本原理与工艺及其在零件加工过程中的地位与作用。

《工程材料学基础》既是后续课又是学习后续有关课程的基础课,学生在学习本课程之前,应学完普通化学、普通物理、材料力学及金属工艺学等课程,并应经过金属工艺实践方面的基本训练,在金属材料及非金属材料方面有一定的感性认识。在学习本课程时,既要加强基础理论学习,又要注重密切联系生产实际,重视实验环节,培养分析问题、解决问题的独立工作能力。

第一章 金属的晶体结构与结晶

§ 1-1 金属的晶体结构

固态物质按其原子(或分子)的聚集状态可分为晶体和非晶体两大类。金属在固态下通常都是晶体,它们的特性都与其结晶状态有关,要了解金属材料内部的微观构造,就必须首先掌握其晶体结构。为此,我们先介绍一些有关晶体的一般概念。

一、晶体与非晶体

在自然界中,除少数一些物质如普通玻璃、松香及沥青等外,绝大多数固体都是晶体。所谓晶体就是指其原子(或分子)在三维空间作有规则的周期性重复排列的物体。而非晶体就不具有这一特点。它们之中的原子(或分子)是无规则的堆积在一起,由于其结构与液体相同,故可看成是被“冻结”的液体。晶体之所以具有上述规则的原了排列,主要是由于各原子之间的吸引力与排斥力相平衡的结果。

晶体与非晶体的区别还表现在许多性能方面。从液态到非晶态固体的转变是逐渐过渡的,没有明显的凝固点(或熔点);而液体转变为晶体则是突变性的,有一定的凝固点(或熔点)。非晶体物质在各个方向上的原子聚集密度大致相同,沿任何方向测定其性能均表现出结果一致,称为各向同性或等向性。而晶体物质则相反,沿着一个晶体的不同方向所测得的性能并不相同,表现出或大或小的差异,此称为各向异性或异向性。晶体物质在一定条件下可能转化为非晶体,如将液态金属及合金以极高的冷却凝聚下来,可获得非晶态物质;而通常的非晶态如玻璃在高温下长时间加热后可能形成晶态玻璃。

二、纯金属的典型晶体结构

金属是呈规则排列的原子(或分子)的聚集体。金属的性能不仅取决于组成原子的本性,而且取决于原子排列的方式。晶体中原子(或分子)在空间呈规则排列的方式称为晶体结构。为了便于分析研究各种晶体中的原子排列规律,通常是把金属晶体中的原子抽象为刚性小球按一定几何规则紧密堆积而成,如图 1-1a 所示。为了观察方便起见,同时假设通过各原子中心划出许多空间直线,使之构成一个空间格架。各联线的交点称为结点,在结点上的小圆圈(或黑点)表示原子平衡中心的位置。这种假想的、用于描述原子在晶体中排列形式的几何空间格架在晶体学上称为结晶格子,简称晶格,如图 1-1b 所示。完全能够反映晶格特性的、最小的、最基本的几何单元称为晶胞,如图 1-1c 所示。晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 称为晶格常数,常以 Å (埃) 与单位 ($1 \text{ Å} = 1 \times 10^{-8} \text{ cm}$) 来表示,晶胞各棱边间的夹角常分别用 α 、 β 、 γ 表示之。如图 1-1c 所示的晶胞,其晶格常数 $a = b = c$, 而 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$,

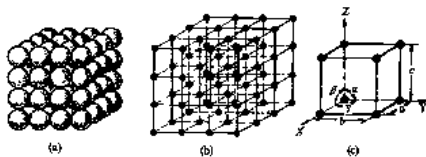


图 1-1

(a) 简单立方晶体:

(b) 晶格:

(c) 晶胞的示意图

这种晶胞称为简单立方晶胞。具有简单立方晶胞的晶格称为简单立方晶格。简单立方晶格只见于非金属晶体中，在金属中，约百分之九「以上的晶格是属于如下一种典型晶格类型。

1. 体心立方晶格 体心立方晶格的晶胞如图 1-2 所示。在体心立方晶胞中，金属原子分布在晶胞的八个角上和立方体的中心。因其晶胞是一个立方体， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 及 $a = b = c$ ，故只用一个晶格常数 a 表示。属于这种晶格类型的金属有 α -Fe、W、Mo、V、Cr 及 β -Ti 等。

2. 面心立方晶格 面心立方晶格的晶胞如图 1-3 所示。在面心立方晶胞中，金属原子分布在晶胞的八个角上及立方体的六个面的中心。因晶胞也是一个立方体，故也只用一个晶格常数 a 表示。属于这种晶格类型的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ag、Ni、Pd、Pt、Co 等。

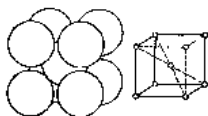


图 1-2 体心立方晶胞

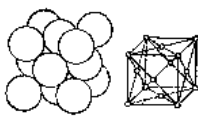


图 1-3 面心立方晶胞

3. 密排六方晶格 密排六方晶格的晶胞如图 1-4 所示。其晶胞是一个六方柱体，它是由六个长方形的侧面和两个呈六边形的上、下底面所组成。密排六方晶胞通常需两个晶格常数才能表示，一个是六边形底面的边长 a ，另一个是两底面间（也就是六方柱体）的高度 c 。分析表明，密排六方晶格的晶格常数 c 和 a 之比值 c/a 为 1.633 时，其晶胞内的原子才是真正密集地排列着的。属于这种晶格类型的金属有 Mg、Zn、Be、Cd、 α -Ti、 α -Co 等。

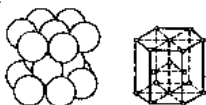


图 1-4 密排六方晶胞

除上述二种最典型的晶格类型外，少数金属或合金还具有其他类型的晶格，如在钢中还有正方晶格（淬火马氏体）、斜方晶格（渗碳体）等等。这些均留待以后的章节中去讨论。

各种金属之所以具有不同的结构,就在于其原子排列密度和晶格常数不同。下面用几个重要的参数来说明这三种典型的金属晶体结构的特征。

三、金属晶体结构的一些重要参数

1. 晶胞原子数 所谓晶胞原子数是指一个晶胞中所含的原子数目。它对金属的许多性能均有很大的影响。在体心立方晶格的晶胞中,每个角上的原子在空间同属于八个相邻晶胞所共有,而每个晶胞实际只占有 $1/8$ 个原子。但立方体中心的原子则完全属于该晶胞所独有,故体心立方晶格的晶胞原子数为 2,即: $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 。同样可以算出,面心立方晶格的晶胞原子数为 4,即: $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 。密排六方晶格的晶胞原子数为 6,即: $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ 。

2. 原子半径 所谓原子半径通常是指晶胞中原子密度最大的方向上相邻两原子间的平衡距离的一半,或晶胞中相距最近的两个原子间距离的一半。它与晶格常数有密切关系,是一个很重要的参数。在体心立方晶格中,由于只有其立方体晶胞对角线上的原子是彼此紧密相接触排列着的,根据简单的几何关系,很容易推算出互相接触的两个相邻原子间的中心距离 $d = (\sqrt{3}/2)a$,故原子半径 $r = (\sqrt{3}/4)a$;在面心立方晶格中,只有组成立方体晶胞六个面上沿面对角线方向上的原子是彼此紧密相接触排列着的,面对角线之半为最近的原子间距,其值 $d = (\sqrt{2}/2)a$,故原子半径 $r = (\sqrt{2}/4)a$;面心密排六方晶格中,在理想的密排情况下(即 $c/a = 1.633$ 时),晶胞中原子相距最近的是上下底面的对角线,其值 $d = a$,故原子半径 $r = (1/2)a$ 。

值得指出的是,原子半径并不是一成不变的,同一种金属原子,处于不同类型的晶格中时,其原子半径也是不一样的,它们随结合键的类型和晶体结构的配位数大小而改变,在使用各元素的原子半径时应予注意。

3. 配位数 指晶格结构中与之任一原子是邻近、等距离的原子数目。显然,配位数越大,晶体中原子排列便越紧密。根据三种典型的金属结构特点(如图 1-5(a)、(b)、(c)所示)可看出,体心立方晶格的配位数为 8,面心立方晶格和密排六方晶格的配位数均是 12。

4. 致密度 指晶胞中原子(刚性球)所占体积与该晶胞总体积之比。根据这个原则,可算出三种典型金属晶体结构的致密度。例如,在体心立方晶格中,每个晶胞实际只包含两个原子($n = 2$),原子半径 $r = (\sqrt{3}/4)a$,晶胞总体积为 a^3 ,故其致密度为:

$$\kappa = 2 \times \frac{4\pi r^3}{3} / a^3 = 2 \times \frac{4\pi}{3} \left[\frac{\sqrt{3}}{4} a \right]^3 / a^3 = 0.68$$

即晶格中有 68% 的体积被原子所占据,其余为空隙。

同理可求出面心立方及密排六方晶格的致密度均为 0.74。

现将三种典型金属晶格的各种数据汇总于表 1-1。由表列数据可知,无论是从晶体中晶格致密度或配位数来看,面心立方和密排六方晶格的原子排列均是最紧密的,这一点对金属的许多性能和行为有很大的影响。但是,晶体结构的致密度仅仅是决定晶体某些性能的重要参数之一。而晶体中不同晶面及晶向上原子排列的方式也是决定晶体许多性能的

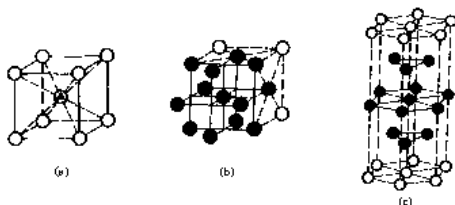


图 1-5 两种典型晶体结构的配位示意图

另一个重要因素。

表 1-1 三种典型金属晶格的参数

晶格类型	晶胞中的原子数	晶格常数	配位数	致密度
体心立方	2	$(\sqrt{2}/4)a$	8	0.68
面心立方	4	$(\sqrt{2}/4)a$	12	0.74
密排六方	6	$(1/2)a$	12	0.74

四、晶面指数和晶向指数

在金属晶体中,通过一系列原子中心的平面称为晶面,通过两个以上原子中心的直线为原子列,各原子列的方向称为晶向。为便于研究晶体中各晶面和晶向上原子排列的情况和特点,必须给予各种晶面和晶向以一定的符号,以表示它们在晶体中的位向。表示晶面的符号称为晶面指数,表示晶向的符号称为晶向指数。

1. 晶面指数 现以图 1-6 所示立方晶系为例说明确定晶面指数的方法与步骤。

(1)在晶格中,析晶胞相互垂直的三条棱边设参考坐标轴 X, Y, Z ,坐标的极点 O 应位于该待定面(如图中影线所示的晶面)之外,以免出现零距离;

(2)以晶胞的棱边长度(即晶格常数)为度量单位,求该晶面在各坐标轴上的截距。如图 1-6 中影线所示晶面在 X, Y, Z 轴上的截距分别为 $1, 2, \infty$;

(3)取各截距的倒数。上列所得截距的倒数为 $1/1, 1/2, 1/\infty$, 即 $1, 1/2, 0$, 其目的在于避免晶面指数出现 ∞ ;

(4)将三个数化为最小的简单整数,上列为 $2, 1, 0$;

(5)将所得各整数依次写在圆括号 $()$ 内,即得晶面指数。故 $(2\ 1\ 0)$ 即为图 1-6 中影线所示晶面的晶面指数。

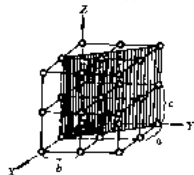


图 1-6 晶面指数的确定方法

在一般情况下,晶面指数是以 (hkl) 的普遍形式表示。如果所求晶面在坐标轴上的截距为负值,则应在相应的指数上方加“—”号,如 $(\bar{h}kl)$ 、 $(h\bar{k}l)$ 、 $(hkl\bar{l})$ 等。

在立方晶格中,具有重要意义的晶面及晶面指数是图 1-7 中所示的 (100) 、 (110) 及 (111) 三种晶面。

值得指出的是,晶面指数并非仅指某一晶格中的某一个晶面,而是泛指该晶格中所有那些与其平行的方位相同的晶面。在同一种晶格中,有些晶面虽然空间位向不同,但其原子排列情况相同,如立方晶格中的 (100) 、 (010) 、 (001) 、 $(\bar{1}00)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 及 $(00\bar{1})$ 等,这些晶面均属于一个晶面族,若无必要予以区别,则可把这些晶面统一用一种晶面指数 $\{100\}$ 来表示。也就是说, $\{hkl\}$ 不仅包括一系列互相平行的某组晶面,而且还包括若干组空间位向不同但其原子排列情况相同的晶面。

2. 晶向指数 以图 1-8 所示立方晶系中 AB 晶向为例说明确定晶向指数的方法与步骤。

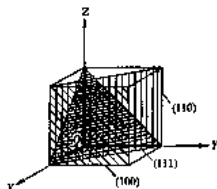


图 1-7 立方晶格中一些重要晶面及晶面指数

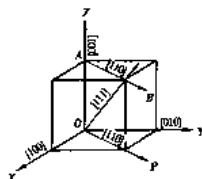


图 1-8 立方晶格中某些晶向及晶向指数

(1)通过坐标原点 O 引直线 OP ,使其平行于所求晶向 AB ;

(2)求出该直线上任意一点在 X 、 Y 、 Z 轴上的坐标值;

(3)将三个坐标值按比例化为最小整数,加一方括号,即为所求晶向指数。一般情况下用 $[uvw]$ 表示,同族的晶向用 $\langle uvw \rangle$ 表示,如果所求晶向在坐标轴上的截距为负值,则应在相应的指数上方加“—”号,如 $[\bar{u}vw]$ 、 $[u\bar{v}w]$ 等。

图 1-8 为立方晶格中某些晶向及晶向指数,即 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 、 $[110]$ 、 $[111]$ 、 $[00\bar{1}]$ 等五种晶向。

与晶面指数的表示法相似,如 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 等具有相同原子排列的晶向均属于同一个晶向族,若无必要予以区分时,可笼统地用 $\langle 100 \rangle$ 符号表示。

由图 1-7 与图 1-8 对比可看出,在立方晶格中,凡指数相同的晶面与晶向彼此是互相垂直的。如 $(111) \perp [111]$ 、 $(110) \perp [110]$ 、 $(100) \perp [100]$ 等。

五、晶体的各向异性

在相同晶体中,不同晶面和晶向中原子排列的疏密程度不同,造成晶体沿不同方向性能不同的现象称各向异性。如,具有体心立方晶格的铁的弹性模量 E 按不同方向测出来的

数据均不同。在 $\langle 111 \rangle$ 方向, $E = 290000 \text{ MN/m}^2$; 在 $\langle 100 \rangle$ 方向, $E = 135000 \text{ MN/m}^2$ 。许多晶体物质如石膏、云母片、方解石等常沿一定的晶面易于破裂, 具有一定的解理面, 也都是这个道理。

但必须指出, 工业用金属材料中, 这种所谓晶体的各向异性常常表现出不很明显。如上述铁的弹性模量 E , 不论从何种位向取样, 所得数据均是 $E = 210000 \text{ MN/m}^2$ 左右。一般没有各向异性的特征。这是因为上面所讨论的金属晶体都是理想状态的晶体结构, 而实际上的金属晶体结构不像理想晶体那样规则和完整。它是兼有完善性(规则性)和不完善性(不规则性)两方面的统一体。为此, 还必须进一步讨论实际金属的晶体结构。

§ 1-2 实际金属的晶体结构和晶体缺陷

一、多晶体结构

在讨论金属的晶体结构时, 是把整个晶体看成由晶胞规则或复排列的理想结构, 即晶体内部的晶格位向是完全一致的, 我们称这种晶体为单晶体。这是晶体的理想结构情况。在实际金属晶体中, 原子排列不可能这样规则和完整, 而是存在许多不同类型的缺陷和由许多颗粒状小晶体组成, 每个小晶体内部的晶格位向是一致的, 而各个小晶体彼此间有一定的位向差, 如图 1-8 所示。这种外形不规则的小晶体通常称为“晶粒”。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。这种实际由许多晶粒组成的晶体结构称为多晶体结构。

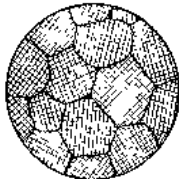


图 1-8 多晶体结构示意图

二、晶体缺陷

金属中的晶体缺陷, 按其几何特征可分为如下三类。

1. 点缺陷 是指在三维空间, 其长、宽、高尺寸均很小(不超过几个原子直径)的缺陷。通常是由原子热运动所引起的, 主要有晶格空位和间隙(或多位)原子两种。在实际晶体结构中, 由于晶格结点上的原子总是不停的以其平衡位置为中心作热运动, 当某些原子的能量大到足以克服周围原子对它的束缚作用, 就可能脱离其原来的平衡位置而迁移到别处。结果, 在原来的位置上出现了空结点, 这种空着的结点位置称为空位。同时, 又可能在个别晶格空隙处出现多余的原子, 这种不占有正常晶格结点位置而处在晶格空隙之间的原子称为间隙原子, 如图 1-10 所示。

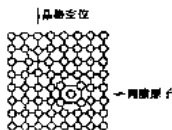


图 1-10 空位和间隙原子示意图

2. 线缺陷 是指晶体中的某平面上沿某一方向伸展开来的呈线状分布的缺陷。这类缺陷在金属中就是位错。位错是指晶体中某处有一列或若干列原子发生有规律的错排现象。晶体中最简单的位错是刃型位错。如图 1-11(a)所示, 在金属晶体中, 一个完整晶体的某一个晶面(如图中 ABC 面)以上, 于某处(B 处)沿 KK' 线被垂直插入半个“多余的”原

了面。由于这多余的半个原子面像刀刃一样切入,使晶体中位于 ABC 面上下两部分晶体间产生了错排现象,因而称为刃型位错。其中产生位错的边缘 RP 线称为位错线。在位错线附近的区域,由于原子错排现象使晶格发生了畸变,形成一个应力集中区。

为了研究的方便,将晶体上半部出现多余半层原子面的刃型位错称为正刃型位错,用符号“ $\perp$ ”表示;而将晶体下半部出现多余半层原子面的刃型位错称为负刃型位错,用符号“ $\neg$ ”表示,如图 1-11(b)所示。

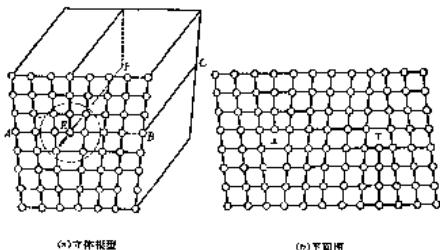


图 1-11 刃型位错示意图

3. 面缺陷 是指一维尺寸很大而另一维尺寸很小呈面状分布的缺陷。金属晶体中的面缺陷主要有两种:

(1)晶界 如上述,在实际金属的多晶体结构中,大量外形不规则的小晶粒的结构完全相同,但彼此之间位向不同,故在晶界处原子排列的规律就不可能一致,必须从一种位向过渡到另一种位向。因此,晶界上原子的排列是混乱的,无规则的,并采取相邻两晶粒的折衷位置,如图 1-12 所示。由于晶界结构的不完整性,故其中积累较多的位错、空位和杂质原子等,使晶界结构复杂化。

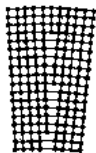


图 1-12 晶界的乱置结构示意图

(2)亚晶界 在多晶体金属中,每个晶粒内部的原子排列只是大体上整齐一致而不是绝对完整的。实际上是由许多尺寸很小、位向差很小(一般为几十分到 $1\sim 2^\circ$)的小晶块嵌合而成晶粒。图 1-13 为金-镍合金的嵌银块组织。这些小晶块称为亚结构(或称亚晶、嵌银块)。亚结构之间的边界称为亚晶界。亚晶界也是一种刃型位错规则排列所组成的小角度晶界,如图 1-14 所示。故可以把它看成是一种位错线的堆积或称“位错壁”。

亚晶界处原子排列同样要产生晶格畸变,因此,亚晶界的存在同样对金属性能特别是机械性能有很大的影响。

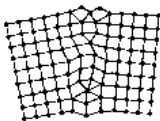


图 1-13 金-铝合金中的位错网络



图 1-14 由位错型构成晶界的示意图

§ 1-3 金属的结晶和铸锭

一、结晶的概念

金属制品,除少数粉末冶金产品外,大多数都是在液态下经过冶炼和浇注工序后铸造成固态金属的。由液态金属冷却转变为固态金属的过程,是原子由不规则排列的液态逐步过渡到原子作规则排列的晶体状态,因此,这一过程称为结晶过程。纯金属的结晶过程总是在一个恒定温度下进行的,高于此温度便发生熔化,低于此温度才进行结晶,在结晶温度时,液体与晶体同时共存达到可逆平衡,故此温度又叫平衡结晶温度。

二、结晶条件

金属凝固为何会有一个严格不变的平衡结晶温度呢?这是由结晶时的能量条件所决定的。热力学定律指出,自然界所有自发转变过程总是由一种能量较高的状态趋向于能量最低的稳定状态。所以,在等温等压条件下,只有那些引起系统自由能(F) (即能够对外作功的那部分能量)降低的过程才能自动进行。

计算结果表明,金属在各种状态的自由能都是随温度的升高而降低。由于液态金属中原子排列的规则性比固态金属中差,故在自由能-温度关系曲线上,液态金属的自由能变化曲线比固态金属的更陡些(图 1-15),在某一特定温度(T_0)下两曲线相交于一点,此时, $F_L = F_S$,液态与固态处于动平衡,此温度 T_0 称为理论结晶温度或熔点。由此观之,液态金属要结晶,必须处于 T_0 温度以下,即低于理论结晶温度。换言之,金属必须过冷,以造成液态金属与晶体间的自由能差($\Delta F = F_L - F_S$),才能推动结晶过程的进行。故过冷是结晶的必要条件,所谓过冷就是指液态金属实际冷却到结晶温度以下而暂不结晶的现象,常用过冷度(ΔT)表示,它是理论结晶温度 T_0 与实际结晶温度 T_1 之差,即 $\Delta T = T_0 - T_1$ (如图 1-16 所示),液态金属的过冷度(ΔT),既取决于液态金属的本性与纯度,也取决于液态金属的冷却速度。冷却速愈大, ΔT 愈大,自由能差 ΔF 亦愈大,那么,结晶驱动力就愈大,结晶倾向也愈大。

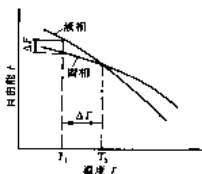


图 1-15 金属在各种状态的自由能与温度的关系示意图

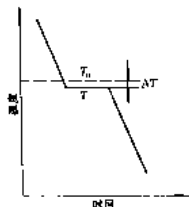


图 1-16 纯金属结晶时的冷却曲线

三、结晶过程

通过对一些低熔点有机物品体结晶过程的观察表明,任何晶体物质由液态转变为固态时,其结晶过程总是依靠两个密切联系的基本过程——晶核形成与晶核长大来实现的。纯金属的结晶过程也遵循这一规律。

1. 晶核形成 首先在液态金属中形成一些极微小的类似于晶体中原子有规则排列的小集团,我们称它为晶胚或晶芽。在理论结晶温度(T_0)以上,这些小集团不仅尺寸较小,大小不一,而且极不稳定,时聚时散,此起彼伏。当实际结晶温度(T_1)低于理论结晶温度(T_0)时,这些小集团中尺寸较大的一部分就成为稳定的所谓结晶核心逐渐长大。这些真正能够得到长大的晶胚便称为晶核。

在液态金属结晶过程中,晶核的形成一般存在两种方式,即自发形核与非自发形核(又称人工形核)。所谓自发形核是指在液态金属中原子有规则排列的小集团开始变得稳定并自发成为结晶核心者;所谓非自发形核是指那些依附于外来杂质面形成的核心。

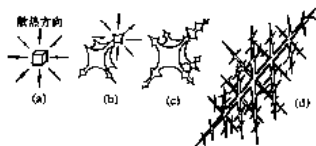


图 1-17 晶体长大过程示意图

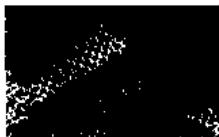


图 1-18 铜液凝固的树枝状晶体

2. 晶核长大 液态金属结晶时,晶核的长大初期,因其内部原子规则排列的特点,其外形也大多数是比较规则的,但随着晶核的长大,形成了晶体的棱角和棱边,由于棱角和棱边的散热条件优于其他部位,晶核在棱角和棱边处就先长大,如图 1-17 所示。其生长

方式象树枝一样,先长出树干,或称一次晶轴,再长出枝干,称二次晶轴,然后再长出分枝,称三次晶轴,最后把晶间填满,这些晶轴彼此交错,有如枝条茂密的树枝,因此称树枝状结晶品,所得到的晶体称树枝状晶体,简称枝晶。液态金属的过冷度愈大,其枝晶长大特点愈明显。图 1-18 所示为锌锭表面的树枝状晶体。它是由于枝晶间未被填满和铸金属结晶时体积略有膨胀,使树枝状晶轴在铸锭表面凸起所造成的。

四、影响晶核形成与长大的因素

液态金属结晶后的晶粒大小与形核率(N)和长大速度(G)有关。当长大速度一定时,形核率愈大,则结晶后的晶粒愈多,晶粒愈细,反之,则愈粗。若形核率不变,晶核长大速度愈大,晶粒数目就愈少,即晶粒愈粗。反之,则愈细。金属单位体积中晶粒的总数目(Z_T)与形核率(N)和长大速度(G)之间存在一定关系,即

$$Z_T = 0.9 \left(\frac{N}{G} \right)^{3/4}$$

由此可知,要控制结晶后晶粒的大小,必须控制形核率与长大速度这两个因素。而影响晶粒的形核率和长大速度的最重要因素是结晶时的过冷度和液态金属中的熔体杂质。

1. 过冷度的影响 实践表明,液态金属结晶时的冷却速度愈大,其过冷度亦愈大,晶核形成率和长大速度均增大,并在一定的过冷度下达到最大值。而后,当过冷度再度增大时,它们又逐渐减小,直至在很大的过冷度时两者先后各趋于零,但随过冷度的增大,两者的变化率并不相同,如图 1-19 所示。过冷度对晶核形成率和长大速度的这种影响,主要与结晶过程中两个相反的因素同时起作用有关。其一是如上所述的液体与晶体之间自由能差(ΔF),它是晶核形成与长大的推动力,其二是液体中原子扩散系数(D),它是晶核形成与长大的必需条件。如图 1-20 所示,随过冷度(ΔT)增加,液体与晶体间的自由能差(ΔF)愈大,而原子扩散系数却迅速减小。正是由于这两个相反因素的综合作用,使晶核形成率和长大速度与过冷度的关系曲线上出现一个极大值。当过冷度较小时,虽然原子的扩散系数较大,但液体与晶体之间的自由能差很小,晶核形成率和长大速度均很小;当过冷度很大时,虽然液体与晶体之间的自由能差很大,但原子扩散系数很低,原子扩散困难,故也难使晶核形成和长大;只有过冷度适中,上述两种因素都能充分发挥其有利的影响时,晶核的形成率和长大速度才会达到极大值,结果使晶粒细化。

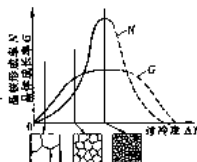


图 1-19 晶核形成率(N)和长大速度(G)与过冷度(ΔT)的关系

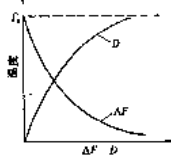


图 1-20 液体与晶体间自由能差(ΔF)和扩散系数(D)与过冷度(ΔT)的关系