

工程材料与机械制造基础

上 篇

曲国阳 舒 庆 主 编



哈 尔 滨 工 程 大 学 出 版 社

工程材料与机械制造基础

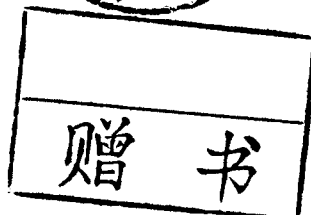
上 篇

(工 程 材 料)

主 编 曲国阳 舒 庆

副主编 朱世范 唐家玮

主 审 宋本基



00425432

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书共分十章,包括工程材料与结晶、金属的塑性变形与再结晶、合金的结构与相图、铁碳合金、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、非金属工程材料和工程材料的选用等。每章之后附有习题,可供学生用作复习和讨论。

本书可作为高等工科院校机械类专业和相近专业的教学用书,也适宜作为职工大学、业余大学和函授大学该类专业的教材及供有关工程技术人员参考。

125/17

工程材料与机械制造基础

上篇

曲国阳 舒 庆 主编

责任编辑 罗东明

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

新 华 书 店 经 销

东北林业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 14.875 字数 330 千字

1996 年 1 月第 1 版 1996 年 1 月第 1 次印刷

印数:1~1500 册

ISBN—81007—655—8

TG·12 定价:39.00 元

(共三册 13.00 元/册)

前 言

本书是参考全国高等工科院校《工程材料与机械制造基础》教学指导小组制订的教学基本要求,并结合编者的多年教学实践经验编写的。

全书分为《工程材料》、《热加工工艺基础》和《切削加工工艺基础》三册,既可分册单独授课,满足多学时专业的教学要求;又可成套合并使用,用于少学时专业的教学。全书采用最新国家标准和国际标准。

本书可作为高等工科院校机械类专业和相近专业的教学用书,也适宜作为职工大学、业余大学和函授大学该类专业的教材及供有关专业工程技术人员参考。

参加《工程材料》编写的有哈尔滨理工大学、哈尔滨工程大学、黑龙江商学院、东北重型机械学院、哈尔滨 703 研究所、哈尔滨市机电职工大学等单位。全书共分十章,绪论、第四、五章由曲国阳编写,第一章由朱世范、张兴军编写,第二、九章由舒庆编写,第三、八章由朱世范编写,第六章由张静、王艳滨编写,第七、十章由唐家玮编写。

全书由曲国阳、舒庆担任主编,朱世范、唐家玮担任副主编,哈尔滨工程大学宋本基担任主审。

本教材在编写和审稿过程中,得到不少同志的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1996 年 1 月

绪 论

材料是先于人类而存在的物质,它是人类生产活动和日常生活所必需的物质基础。材料的利用情况标志着人类文明的发展水平。历史学家把人类的历史按所使用的材料划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代。目前,人类已进入人工合成材料的新时代。

材料科学是以材料为研究对象的一门综合性科学。它是在物理学、化学、金属学、高分子科学以及陶瓷学的基础上建立起来的。它的研究内容包括:研究材料的化学组成、结构与性能的关系,探索其客观规律;研究材料的形成机理和制取方法;研究材料物理性能的测试技术和方法;分析材料的损坏机理;研究材料的合理加工方法和最佳使用方案,扩大材料的用途。

《工程材料》是材料科学的实用部分,重点介绍结构材料的成分、组织、性能以及应用方面的一般规律。结构材料是指工程上要求强度、韧性、塑性等机械性能的材料,主要用来制作工程结构件和机器零件。《工程材料》的具体任务是为工程结构和机器零件的设计和使用提供正确选材和合理用材的基本原则和方法;同时也为某些机械类学科提供必要的理论基础。

从某种意义上来说,人类的文明史就是使用各种材料的历史。人类最早使用的工具是石器。在六七千年前我们祖先开始用火烧制陶器,到东汉出现了瓷器,并于9世纪传至非洲东部和阿拉伯,15世纪传到欧洲。瓷器成了中国文化的象征,对世界的文化有很大影响。我国冶炼青铜的历史可以追溯到夏以前,而且发展很快,出土的很多青铜器证明了这一点,我们祖先在青铜材料的冶炼和使用方面达到了当时世界的高峰,创造了灿烂的青铜文化。我国的春秋战国时期开始大量使用铁器,冶铸技术已由泥砂造型进入铁模铸造的高级阶段。到西汉时期,采用煤作炼铁的燃料,要比欧洲早一千七八百年。我国古代创造了三种炼钢方法:第一种是从矿石中直接炼出自然钢;第二种是西汉时期经过“百次”冶炼锻打的百炼钢;第三种是南北朝时期的灌钢。先炼铁后炼钢的两步炼钢技术我国要比其它国家早一千六百多年。从西汉到明朝的一千五六百年间,我国钢铁生产技术远远超过世界各国。相应地,其它金属材料的工艺技术水平也很高。

我国是最早使用丝绸这种天然高分子材料的国家,11世纪通过著名的“丝绸之路”把它传到波斯、阿拉伯、埃及,1470年传到意大利威尼斯,进入欧洲。历史充分说明,我们祖先在材料的制造和使用上有过辉煌的成就,为人类文明作出了巨大的贡献。

现代科学技术的发展为人们认识金属提供了技术手段和理论基础,近代物理、近代化学,特别是量子物理、量子化学等理论,以及显微镜、X射线技术、电子显微镜等新仪器的相继出现和发展,使金属学得到了长足的进步。

20世纪以来,作为现代技术三大支柱的材料、能源与信息的发展格外迅猛,材料科学中非金属的发展更是神速,其中以人工合成高分子材料的发展最快,现已成为一种重要的结构工程材料,并已渗透到包括日常生活用品在内的各个领域。工程结构也已不再只是使用金属材料了。近年来,金属与非金属材料相互渗透、相互结合,又出现了性能更为优越的各种复合材料。任何一种产品的优劣,很大程度上取决于组成这种产品的材料性能。材

料性能包括使用性能和工艺性能两方面,使用性能是材料在使用条件下表现出的性能,具体如力学(或机械)性能、物理性能和化学性能等;工艺性能则是材料在加工过程中表现出的性能,例如切削加工性能、铸造性能、压力加工性能、焊接性能、热处理性能等。材料不仅应当具有优良的使用性能,而且还应具有良好的工艺性能。一般构件在设计和选用材料时经常以机械性能指标作为主要依据,可是在不少情况下,加工工艺性能却是决定某种材料能否被选用的关键性因素。

材料的性能与其成分和组织以及加工工艺之间的关系是非常密切的。学习《工程材料》的目的就在于建立材料的成分、内部组织、加工工艺与性能之间的关系,找出其内在规律,以便通过控制材料的成分和冷、热加工工艺来控制其组织,提高材料的性能。

《工程材料》是机械类专业和相近专业的一门技术基础课,本书以金属材料热处理为重点,适当地添加了工程塑料、陶瓷和复合材料等方面的内容。具体介绍了各种常用材料的化学成分、组织、性能、加工工艺及其用途之间的关系。在学习本课程之后,使学生初步具有合理选用材料,正确确定加工方面,妥善安排工艺路线等方面的能力。

学习本课程前,学生应完成化学、物理和材料力学等课程的学习,并应经过金属工艺方面的基本工艺训练,在工程材料的加工方法方面有一定感性知识。

目 录

绪 论

第一章 工程材料的结构与结晶	(1)
第一节 金属的晶体结构	(1)
第二节 金属的实际结构和晶体缺陷	(6)
第三节 金属的结晶	(8)
第二章 金属的塑性变形与再结晶	(14)
第一节 金属的塑性变形	(14)
第二节 塑性变形对组织和性能的影响	(18)
第三节 变形金属在加热时的组织和性能的变化	(21)
第四节 金属的热加工	(24)
第三章 合金的结构与相图	(26)
第一节 合金的相结构	(26)
第二节 二元合金相图的建立	(31)
第三节 二元匀晶相图	(32)
第四节 二元共晶相图	(35)
第五节 二元包晶相图	(38)
第六节 其它相图	(40)
第七节 合金的性能与相图之间的关系	(41)
第四章 铁碳合金	(43)
第一节 铁碳合金的基本组元及性能	(43)
第二节 铁碳合金相图分析	(44)
第三节 含碳量与铁碳合金组织和性能的关系	(52)
第四节 铁碳合金相图的应用	(53)
第五节 碳钢	(54)
第五章 钢的热处理	(59)
第一节 钢在加热时的组织转变	(59)
第二节 钢在冷却时的组织转变	(63)
第三节 钢的退火与正火	(73)
第四节 钢的淬火	(75)
第五节 钢的淬透性	(79)
第六节 钢的回火	(85)
第七节 钢的表面淬火	(87)
第八节 钢的化学热处理	(90)
第九节 热处理对零件结构设计的要求	(96)

第六章 合金钢	(99)
第一节 概述	(99)
第二节 合金结构钢	(107)
第三节 合金工具钢	(118)
第四节 特殊性能钢	(128)
第七章 铸铁	(136)
第一节 概述	(136)
第二节 常用铸铁	(140)
第八章 有色金属及其合金	(150)
第一节 铝及其合金	(150)
第二节 铜及其合金	(156)
第三节 轴承合金	(161)
第四节 钛及其合金	(164)
第九章 非金属工程材料	(167)
第一节 高分子材料	(167)
第二节 常用塑料	(175)
第三节 其它高分子材料	(190)
第四节 陶瓷材料	(193)
第五节 复合材料	(202)
第十章 工程材料的选用	(209)
第一节 选用材料的一般原则	(209)
第二节 零件的失效形式分析	(214)
第三节 热处理技术条件标注	(219)
第四节 典型零件材料强化方法选择实例	(222)

第一章 工程材料的结构与结晶

自然界的物质都是由原子组成的,原子的排列位置和空间分布称为结构。物质的聚集状态有三种,即气态、液态和固态。工程上常用的材料是固态。固体物质依原子排列情况分为两种形式,即结晶体和无定形体,常称晶体和非晶体。大多数固体物质是晶体。固态金属基本都是晶体物质,如钢、铁、铜、铝等。在工业上应用较多的非金属材料大多也具有晶体结构,如金刚石、硅酸盐、氧化镁等。而常见的玻璃、松香及赛璐珞等,则为非晶体物质。

第一节 金属的晶体结构

一、晶体的概念

晶体是指其内部原子(离子或分子)呈规则排列的物体。而非晶体的内部原子是无规则排列的。晶体具有确定的熔点和凝固点,非晶体没有固定的熔点(或凝固点)。图 1-1(a)所示为一最简单的晶体结构示例。晶体之所以具有这种规则的原子排列,主要是由于各原子之间的相互吸引力和排斥力相平衡的结果。

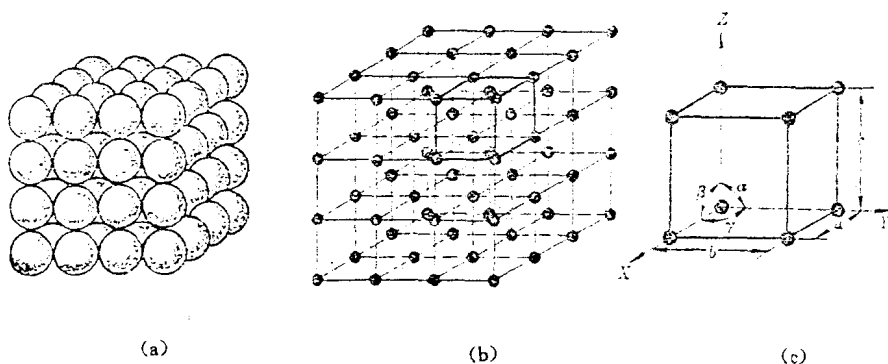


图 1-1 简单立方晶体

(a)简单立方晶体 (b)晶格 (c)晶胞

为了便于分析各种晶体中的原子排列规律,通常以通过各原子中心的一些假想联线把它们在三维空间里的几何排列形式描绘出来,如图 1-1(b)所示,各联线的交点称为结点,在结点上的小圆圈(或黑点)表示各原子中心的位置,我们把这种表示晶体中原子排列形式的空间格子称为晶格(或称点阵)。显然,由于晶体中原子重复排列的规律性,我们可以从其晶格中确定一个最基本的几何单元来表达其排列形式的特征,如图 1-1(c)所示。组成晶格的这种最基本的几何单元,称为晶胞。晶胞的各边尺寸 a 、 b 、 c 称为晶格常数,其大

小以 $\text{\AA}$ (埃)为计量单位($1\text{\AA}=1\times 10^{-8}\text{cm}$);晶胞各边之间的相互夹角常分别以 α 、 β 和 γ 表示。图 1-1(c)所示的晶胞,其晶格常数 $a=b=c$,而 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$,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的晶体中,在金属中则看不到。

各种晶体物质,由于其原子构造、原子间的结合力(或称结合键)的性质不同,其晶格形式不同,导致其晶格常数不同;而晶格形式和晶格常数的不同,使不同晶体表现出不同的物理、化学和机械性能。

二、常见的金属晶格

常见的金属晶格形式有体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格等三种。

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞(图 1-2)是由八个原子构成的立方体,并在其立方体的体积中心还有一个原子,因其晶格常数 $a=b=c$,故通常只用一个常数 a 即可表示。同时 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$,晶胞的空间对角线方向上的原子是彼此紧密接触排列的,该对角线长度 $\sqrt{3}a$ 上所分布的原子数目是 2 个,则原子半径的尺寸为 $r=\frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。在这种晶胞中,因每个顶点上的原子是同时属于周围八个晶胞所共有,所以只有 $1/8$ 个原子属于该晶胞,而晶胞中心的一个原子才属于这个体心立方晶胞所有,故实际上每个体心立方晶胞中含原子数为 $\frac{1}{8}\times 8+1=2$ 个。具有这种晶格的金属有铁($<912^\circ\text{C}$, $\alpha\text{-Fe}$)、铬(Cr)、钼(Mo)、钨(W)、钒(V)等。

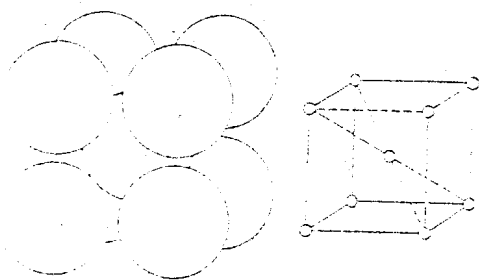


图 1-2 体心立方晶胞

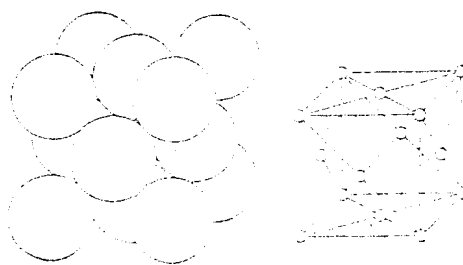


图 1-3 面心立方晶胞

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞(图 1-3)也是由八个原子构成的立方体,但在立方体的每一面的中心还各有一个原子。显然,在这种晶胞中,每个面的对角线上各原子彼此相互接触,因而其原子半径的尺寸应为 $r=\frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。又因每一面中心位置上的原子是同时属于两个晶胞所共有,故每个面心立方晶胞中包含有 $\frac{1}{8}\times 8+\frac{1}{2}\times 6=4$ 个原子。属于这种晶格的金属有铝(Al)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)等。

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞(图 1—4)是在由 12 个原子所构成的简单六方体的上下两个六方面的中心各有一个原子,而且在两个六方面之间还有三个原子。密排六方晶格的晶格常数比值 $c/a \approx 1.633$ 。属于这种晶格的金属有铍(Be)、镁(Mg)、锌(Zn)、镉(Cd)等。

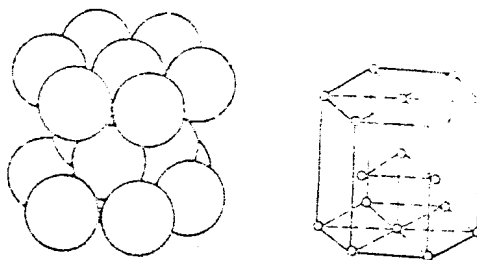


图 1—4 密排六方晶胞

三、晶格的致密度及晶面和晶向的分析

1. 晶格的致密度

金属晶胞中原子本身所占体积的百分数称为晶格的密排系数或晶格的致密度。例如,在体心立方晶格中,每个晶胞含有 2 个原子,原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$,晶胞体积为 a^3 ,故体心立方晶格的致密度为 $2 \times \frac{4}{3}\pi r^3 / a^3 = 2 \times \frac{4\pi}{3} (\frac{\sqrt{3}}{4}a)^3 / a^3 = 0.68$,即晶格中有 68% 的体积被原子所占据,其余为空隙。同样可求出面心立方及密排六方晶格的致密度均为 0.74,而简单立方晶格的致密度则仅为 0.52。

此外,在定性评定晶体中原子排列的紧密程度时,还经常用到配位数。晶格中任一原子周围所紧邻的最近且等距离的原子数称为配位数。显然,配位数越大,原子排列也就越紧密。体心立方晶格的配位数为 8,这从晶胞体心位置上的那个原子很容易看出来;当然,体心立方晶胞中任一顶点上的原子也是同时属于它周围 8 个晶胞所共有,即它周围 8 个晶胞中每个体心的原子与它都是最近邻且等距的。与此类似,面心立方与密排六方晶格的配位数均为 12。现将三种典型金属晶格的各种数据总结于表 1—1。由表列数据可见,不论从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都同样是最紧密的。

表 1—1 三种典型金属晶格的数据

晶 格 类 型	晶胞中的原子数	原 子 半 径	配 位 数	致 密 度
体心立方	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	8	0.68
面心立方	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	12	0.74
密排六方	6	$\frac{1}{2}a$	12	0.74

2. 晶面及晶向指数

晶体中各种方位上的原子面称为晶面;各种方向上的原子列称为晶向。在研究金属晶体结构及其性能时,为了分析它们的各种晶面和晶向中原子分布的特点,常以一定符号表示出晶面和晶向在晶体中的方位或方向。晶面和晶向的相应符号分别称为晶面指数和晶向指数。

确定晶面指数,可按下面三个步骤进行:

(1)以晶格中某一原子为原点,通过该点平行于晶胞的三棱边作 OX 、 OY 、 OZ 三坐标轴,以晶格常数 a 、 b 、 c 分别作为相应的三个坐标轴上的量度单位,求出所需要确定的晶面

在三坐标轴上的截距,如图 1—5 所示;

(2)将所得的三截距值变为倒数;

(3)再将这三个倒数按比例化为最小的整数,并加上一圆括号,即为晶面指数。晶面指数的一般形式用 (hkl) 表示。

图 1—5 中所示带影线的晶面,其晶面指数的确定步骤为:(1)取它与 OX 、 OY 、 OZ 三坐标轴的截距为 1、2、 ∞ ; (2)三截距的倒数是 1 、 $\frac{1}{2}$ 、0; (3)化为最小整数后的晶面指数为 (210) 。

图 1—6 所示的三种晶面 (100) 、 (110) 与 (111) ,是立方晶格中最具有意义的晶面,需要特别注意的是,所谓晶面指数,并非仅指一晶格中的某一个晶面,而是泛指该晶格中所有那些与其相平行且位向相同的晶面。另外,在一种晶格中,某些晶面,虽然的位向不同,但各晶面中的原子排列相同时(如 (100) 、 (010) 及 (001) 等),这时若无必要予以区别,则可把这些晶面笼统地用 $\{100\}$ 一种晶面指数来表示,换句话说,即 (hkl) 这类符号系指某一确定位向的晶面指数,而 $\{hkl\}$ 则可指所有那些位向不同而原子排列相同的晶面指数。

晶面指数的求法如下:

(1)通过坐标原点引一直线,使其平行于 x 所求的晶向;

(2)求出该直线上任意一点的三个坐标值;

(3)将三个坐标值按比例化为最小整数,加一方括号,即为所求的晶向指数,其一般形式为 $[uvw]$ 。

在图 1—7 中 AB 的晶向指数,可通过与其平行的 OP 直线上的任意一点的坐标化简而求出的 $[110]$ 。图 1—7 所示的 $[100]$ 、 $[110]$ 及 $[111]$ 晶向为立方晶格中最具有意义的三种晶向。与晶面指数的表示的方法相类似, $[100]$ 、 $[010]$ 和 $[001]$ 等具有相同原子排列的晶向,若无必要区分时,可笼统地用 $\langle 100 \rangle$ 这种符号来表示。将图 1—7 与图 1—6 对比可以看出,在立方晶格中,凡指数相同的晶面与

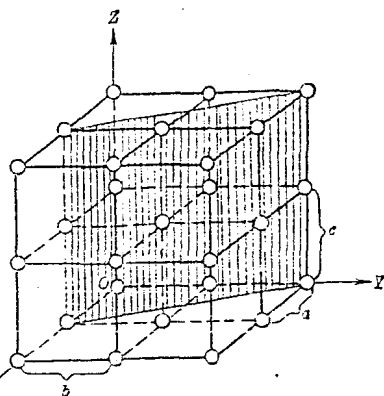


图 1—5 晶面指数的确定方法

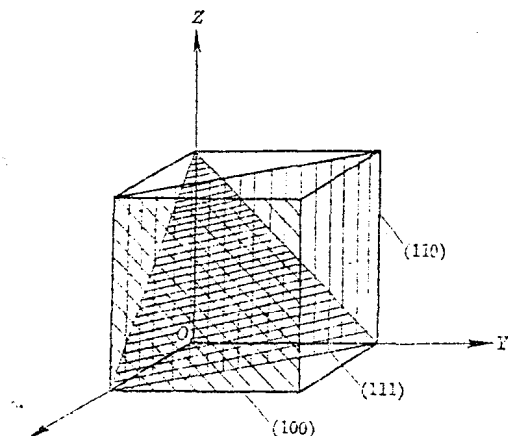


图 1—6 立方晶格中的三种重要晶面

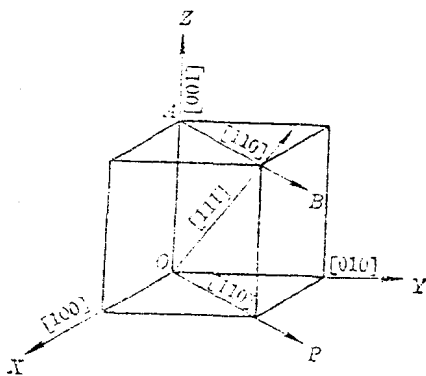


图 1—7 立方晶格中的三个重要晶向

晶向是相互垂直的。

3. 晶面和晶向的原子密度

晶面的原子密度是指其单位面积中的原子数,而晶向的原子密度则指其单位长度上的原子数。在各种晶格中,不同晶面和晶向上的原子密度都是不同的。例如,在体心立方晶格中的各主要晶面和晶向的原子密度见表 1—2。

从表 1—2 中可见,在体心立方晶格中,具有最大原子密度的晶面是 $\{110\}$,具有最大原子密度的晶向是 $\langle 111 \rangle$ 。

四、晶体的各向异性

晶体与非晶体最根本的差别之一,就是单晶体的性能具有明显的方向性,而非晶体没有,这是由于晶体中不同晶面和晶向上的原子密度不同。例如,体心立方的铁晶体,由于它在不同晶向的原子密度不同,原子结合力不同,因而其弹性模量 E 也不同,在 $\langle 111 \rangle$ 方向上 $E=290000\text{MN/m}^2$,而在 $\langle 100 \rangle$ 方向上 $E=135000\text{MN/m}^2$ 。许多晶体物质如石膏、云母、方解石等常沿一定的晶面易于破裂,具有一定的解理面,也是这个道理。

表 1—2 体心立方晶格中各主要晶面和晶向的原子密度

晶面指数	晶面示意图	晶面密度 (原子数/面积)	晶向指数	晶向密度 (原子数/长度)
$\{100\}$		$\frac{\frac{1}{4} \times 4}{a^2} = \frac{1}{a^2}$	$\langle 100 \rangle$	$\frac{\frac{1}{2} \times 2}{a} = \frac{1}{a}$
$\{110\}$		$\frac{\frac{1}{4} \times 4 + 1}{\sqrt{2} a^2} = \frac{1.4}{a^2}$	$\langle 110 \rangle$	$\frac{\frac{1}{2} \times 2}{\sqrt{2} a} = \frac{0.7}{a}$
$\{111\}$		$\frac{\frac{1}{6} \times 3}{\frac{\sqrt{3}}{2} a^2} = \frac{0.58}{a^2}$	$\langle 111 \rangle$	$\frac{\frac{1}{2} \times 2 + 1}{\sqrt{3} a} = \frac{1.16}{a}$

晶体的各向异性在物理、化学或机械性能方面,即在弹性模量、破断抗力、屈服强度,或电阻率、磁导率、线胀系数,以及在酸中的溶解速度等许多方面都会表现出来,并在工业上得到了应用。如制作变压器用的硅钢片,因为它在不同晶向的磁化能力不同,我们可通过特殊的轧制方向,使其易磁化的 $\langle 100 \rangle$ 晶向平行于轧制方向,从而得到优异的磁导率等。

在工业金属材料中,通常是见不到它们具有这种各向异性的特征的。例如,上述铁的

弹性模量,我们日常在材料试验时,不论从何种部位取样,所得数据均在 $E = 210000 \text{ MN/m}^2$ 左右,而从未发现过它在不同方向上的性能不同。这是因为以上所述只是一些具体结构的理想情况,与实际的金属晶体结构还相差很远。

第二节 金属的实际结构和晶体缺陷

一、多晶体结构

如果一块金属晶体,其内部的晶格位向完全一致时,称为单晶体,但在工业金属材料中,除非专门制作,即使是在一块很小的金属中也包含着许许多多的小晶体,每个小晶体的内部,晶格位向都是均匀一致,而各个小晶体之间,彼此的位向都不相同。如图 1—8 所示,由于其中每个小晶体的外形多为不规则的颗粒状,故通常都把它们称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称晶界。显然,该处的原子排列,为了适应晶粒间不同晶格位向的过渡,总是不规则的,这种实际上由多晶粒组成的晶体结构称为多晶体。如上所述,工业纯铁弹性模量等性能,之所以测不出它们象在单晶体中那样的各向异性,就是因为其中各晶粒的位向不同,结果只表现出它们的平均性能。

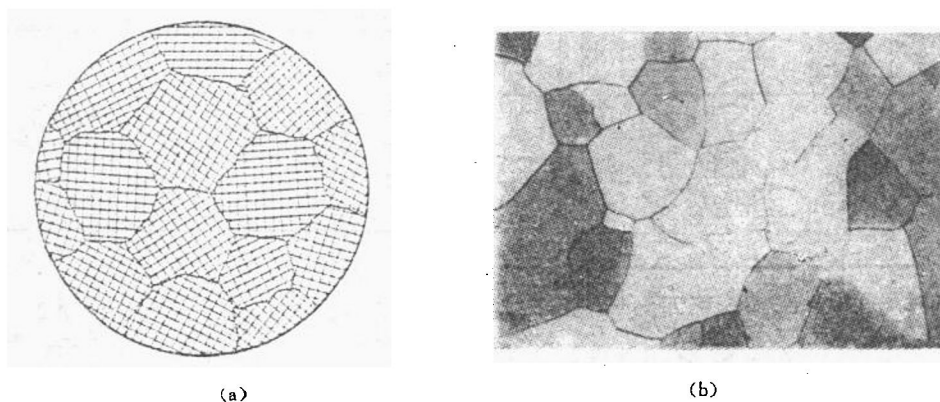


图 1—8 金属晶体结构的示意图及显微组织

在钢铁材料中,晶粒的尺寸,一般在 $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{ mm}$ 左右,因此必须在显微镜下才能看见。在显微镜下所观察到的金属中的各种晶粒的大小、形态和分布叫做显微组织,如图 1-8(b)所示纯铁的显微组织。有色金属,如铜、铝、锡、锌等的晶粒度一般都比钢铁的大些,有时甚至不用显微镜就能直接看见,如镀锌钢板表面的锌晶粒,其尺寸通常达数毫米至十几毫米。

在每一个晶粒的内部,实际上也不是

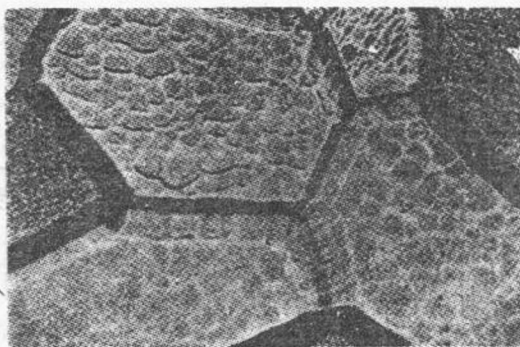


图 1—9 金属的亚晶组织

那么理想,即每个晶粒内部的晶格位向在不同区域上还有微小的差别,一般仅为 $10'$ ~ $20'$ 左右,最小的晶内小区域叫做亚晶或镶嵌块,如图 1—9 所示。因其尺寸较小,故常须在高倍显微镜或电子显微镜下才能观察到。

二、晶格缺陷

由于金属晶体结晶条件的不同,以及金属材料在压力加工过程中所受到的变形等因素的影响,经常出现大量的晶格缺陷。这些缺陷使晶格中部分原子偏离正常的位置,导致晶格发生畸变。晶格缺陷按其几何形式特点可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷等三类。

1. 点缺陷

点缺陷是指晶格空位和间隙原子。如图 1—10 所示,晶格空位是在正常的晶格结点上出现空位;间隙原子是在晶格的间隙中存在多余原子。

点缺陷的形成主要是由于原子在各自平衡位置上作不停的热运动的结果。当某个原子有足够大的能量克服周围原子对它的牵制时,便跳到晶界处或晶格间隙处,形成间隙原子,而在晶格原来的位置上留下空位。空位的数目随着温度的升高而增加,例如铝在室温时, 1cm^3 中有 8×10^{10} 个空位,当温度升高到 600°C 时,其空位可剧增至 3×10^{19} 个。

由于晶格点缺陷的出现,可促使周围的原子发生靠拢或撑开的现象,从而造成晶格畸变。

2. 线缺陷

线缺陷即晶格中的位错。位错可视为晶格中一部分晶体相对于另一部分晶体的局部滑移而造成的结果,晶体滑移部分与未滑移部分的交界线即为位错线。由于晶体中局部滑移的方式不同,可形成不同类型的位错,图 1—11 所示为因该晶体的右上部分相对于右部分的局部滑移所造成的一种最简单的位错,由于右上部分的局部滑移,结果在晶格的半部中挤出了一层多余的原子面,好象在晶格中额外插入了半层原子面一样,该多余半原子面的边缘便为位错线,这种位错线称为刃型位错。在位错线的周围,晶格发生了畸变

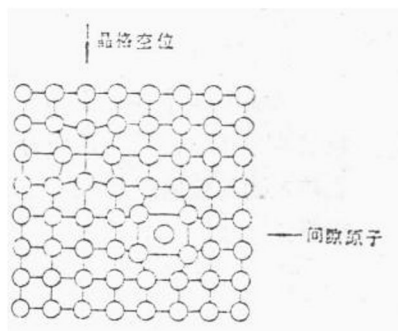


图 1—10 点缺陷示意图

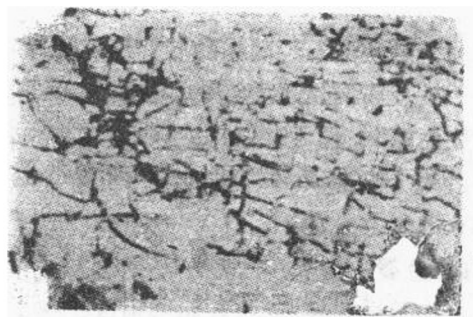
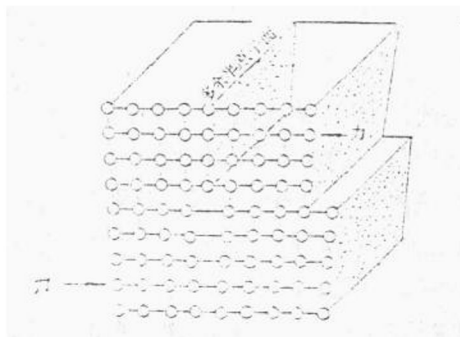


图 1—11 刃型位错结的晶格结构示意图 图 1—12 电子显微镜下观察到的铁中位错
金属晶体中的位错线往往大量存在,相互连结呈图 1—12 所示的网状分布。位错线的

密度通常在 $10^4 \sim 10^{12} \text{cm/cm}^3$ 范围内。

3. 面缺陷

面缺陷即晶界和亚晶界,如图 1—13 所示。晶界是由于金属中各晶粒的位向不同,晶粒之间必然形成的交界面。晶界处原子排列不规则,晶格畸变较大。亚晶界是亚晶的交界。晶粒之间的位向差较大,亚晶之间位向差较小,其结构可以看成是位错的规则排列或称位错壁。

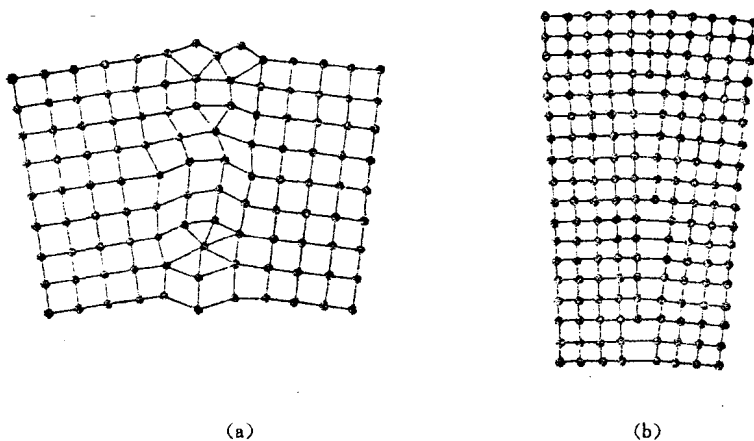


图 1—13 晶界及亚晶界的示意图

通过上述讨论可见,凡晶格缺陷处及附近,均有明显的晶格畸变,因而会引起晶格能量的提高,并使金属的物理、化学和机械性能发生显著的变化,如晶界和亚晶界愈多位错密度愈大,金属的强度便愈高。

第三节 金属的结晶

金属的组织与结晶过程有密切关系,因为金属一般都要经过熔炼、浇注成形或浇注成铸锭后再经冷热加工成形。这样结晶形成的组织,直接影响金属内部的组织与性能,所以,应该了解金属由液态向固态转变过程的结晶规律。

一、纯金属结晶的温度条件

纯金属结晶是指金属从液态转变为晶体状态的过程。从物质的内部结构(指内部原子排列情况)来看,结晶就是从原子不规则排列状态(液态)过渡到规则排列状态(晶体状态)的过程。纯金属都有确定的熔点,在熔点温度时,液体结晶为固体的速度与固体上的原子溶入液体中的速度相等,此状态为动态平衡。但这种状态实际上是很难实现的理想情况。因此,金属的熔点是理论结晶温度(T_0),也称平衡结晶温度。

实际结晶时,液体金属必须低于该金属的理论结晶温度才能结晶,通常把液体冷却到低于理论结晶温度的这一现象称为过冷。因此,使液态纯金属能顺利结晶的条件是它必须过冷。而理论结晶温度与实际结晶温度的差值称为过冷度。过冷度的大小可采用热分析

法来测定,如图 1—14 所示。将一个小坩埚 2 放入炉 1 内,使欲测的纯金属在坩埚内熔化。然后将热电偶浸入熔融的金属液中,并停炉缓慢冷却。每隔一定时间间隔记录一次温度。这样就测出了液体金属在结晶时的温度—时间曲线,把该曲线称为冷却曲线,如图 1—15 所示。

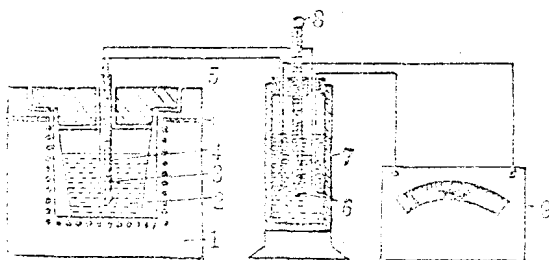


图 1—14 热分析法装置简图

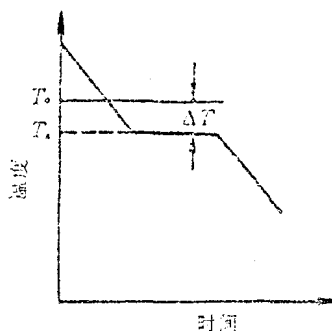


图 1—15 纯金属结晶的冷却曲线

1. 电炉;2. 坩埚;3. 保护管;4. 绝缘管;5. 热电偶
6. 热电偶冷端;7. 杜瓦瓶;8. 温度计;9. 毫伏计

通过曲线可以看出,当液体金属下降到一定温度时,在冷却曲线上出现了平台,这意味着坩埚内的温度停止下降保持不变。产生这种现象的原因,是由于液体金属结晶时释放出了热量,称此热量为结晶潜热。当坩埚中液体金属结晶时放出的潜热与坩埚向周围环境散失的热量相等时,则坩埚内温度不变,冷却曲线出现平台。当液态金属全部结晶后,由于再无潜热放出,坩埚内的温度继续下降。因而,在一般情况下,冷却曲线上出现平台时,是液体正在结晶,这时的温度就是纯金属的实际结晶温度。因此,过冷度可用下式表示

$$\Delta T = T_0 - T_1$$

式中 T_0 ——理论结晶温度;

T_1 ——金属实际结晶温度;

ΔT ——过冷度。

不同冷却速度时的过冷度是不一样的,冷却速度愈大,则过冷度也愈大,如图 1—16 所示。

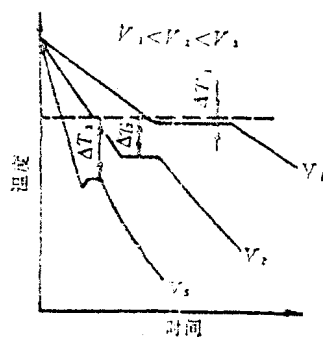


图 1—16 过冷度与冷却速度的关系

二、纯金属的结晶过程

如图 1—17 所示,在金属的结晶过程中,液体金属中的原子进行着无规则的热运动,且无严格的排列规则,但随着温度的下降,原子的运动渐渐减弱,原子的活动范围也缩小,相互之间逐渐接近。当温度下降到结晶的温度时,某些部位的原子开始按着金属的固有晶格,有规则的排列成小晶体,称这些小晶体为晶核,结晶开始时各晶核都按各自的位向吸