



Engineering Materials

工程材料

周继烈 倪益华 徐志农 主编



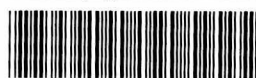
ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

013046815

TB3
321

工 程 材 料

周继烈 倪益华 徐志农 主 编



北航

C1652544

TB3/321



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

内容简介

本书是根据国家教育部制订的“工程材料及机械制造基础课程教学基本要求”中工程材料的基本内容和要求编写的。本书在浙江大学长期教学实践的基础上进行改革创新,在某些方面有适当加深和拓宽,如增加了新材料的介绍,以适应科技发展对材料要求多样性的需要;将二元合金、铁碳合金和铸铁材料合并在一章,利于教学;充分注意与《机械制造基础》教材的配合,增删有关内容。本书体系合理、结构严谨,注重工程背景和工程应用。

全书共分8章及附录,内容包括:工程材料结构、金属的塑形变形与再结晶、铁碳合金、钢的热处理、合金钢、非铁金属及合金、其他工程材料、工程材料选用、工程材料力学性能概念。

本书除可作为高等工科院校机械类各专业教材外,亦可供电视大学、函授大学和职工大学选作教材或参考书,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料 / 周继烈, 倪益华, 徐志农主编. — 杭州:
浙江大学出版社, 2013.6
ISBN 978-7-308-11596-4

I. ①工… II. ①周…②倪…③徐… III. ①工程材料 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 114956 号

工程材料

周继烈 倪益华 徐志农 主编

责任编辑 樊晓燕

封面设计 十木米

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排版 杭州中大图文设计有限公司

印刷 富阳市育才印刷有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 12.75

字数 310 千

版印次 2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-308-11596-4

定价 28.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88925591

前 言

本书是根据国家教育部制定的“工程材料及机械制造基础课程教学基本要求”中工程材料的基本内容和要求编写的,是《工程材料》、《机械制造基础》成套教材中的一本。本书在内容取舍和编写体系方面有一定的改革创新,在编写过程中在以下方面做了努力。

(1)全书内容仍按课程教学基本要求编写,保留了现有同类教材的基本内容,避免面目全非不利教学。但在某些方面有适当加深和拓宽,如增加了新材料的介绍,以适应科技发展对材料要求多样性的需要。

(2)尽力精选内容,避免繁琐的陈述,控制全书的篇幅,以适合 32~48 学时讲授。

(3)充分注意与《机械制造基础》教材的配合。如对液态合金的结晶过程、金属的塑性变形及各种金属材料的成分、组织、性能、牌号、应用等都作了详细阐述,为学习铸造和压力加工提供了充分的基础知识。

(4)将二元合金与铁碳合金合并在一章,利于教学。

(5)考虑到有些院校课堂教学时数较少,为方便教学,将常用金属材料编成一章,其他工程材料另编一章,便于在学时不够时灵活处理。

(6)工程材料力学性能的物理概念及表示方法以附录的形式编于书末,若讲授本课程时学生尚未学习材料力学课程,可将此内容作为一章安排在适当的位置讲授。

本书由浙江大学周继烈、浙江农林大学倪益华、浙江大学徐志农任主编。参加编写的有浙江大学周继烈(编写第五章),浙江农林大学倪益华(编写第一章、第三章),浙江大学徐志农(编写第七章),浙江农林大学侯英岢(编写第二章、第六章),浙江农林大学许小峰(编写第四章),浙江农林大学倪忠进(编写第八章、附录)。全书由潘晓弘教授审阅。

本书除可作为高等工科院校机械类各专业教材外,亦可供电视大学、函授大学和职工大学选作教材或参考书,还可供有关工程技术人员参考。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处,敬请广大同仁和读者批评指正。

编 者

2013 年 6 月

目 录

绪 论	1
第 1 章 工程材料结构	3
第 1 节 金属材料结构	3
一、纯金属的晶体结构与结晶	3
二、合金的结构	10
第 2 节 非金属材料结构	14
一、高分子材料结构	14
二、陶瓷材料结构	20
复习思考题	23
第 2 章 金属的塑性变形与再结晶	24
第 1 节 塑性变形过程及组织、性能的变化	24
一、单晶体的塑性变形	24
二、多晶体的塑性变形	26
第 2 节 塑性变形金属的再结晶	27
一、再结晶过程	27
二、再结晶后的晶粒度	28
第 3 节 金属的热变形	29
一、热变形的组织与性能特征	29
二、热变形纤维组织的利用	29
复习思考题	30
第 3 章 铁碳合金	31
第 1 节 二元合金状态图	31
一、匀晶状态图	31
二、共晶状态图	33
三、包晶状态图	34
四、共析状态图	35
第 2 节 铁碳合金的相结构与性能	36
一、纯 铁	36

二、铁碳合金中的基本相、组织	37
第3节 铁碳合金相图	38
一、Fe-C合金状态图分析	38
二、典型成分合金结晶后的组织转变	40
三、Fe-C合金中含碳量与性能的关系	43
第4节 碳素钢	44
一、碳素钢的分类及各元素对钢性能的影响	44
二、碳素结构钢与优质碳素结构钢	46
三、碳素工具钢	46
四、铸造碳钢	51
第5节 铸 铁	52
一、概 述	52
二、铸铁的石墨化	52
三、灰铸铁	55
四、球墨铸铁	58
五、可锻铸铁	60
六、其他铸铁简介	61
复习思考题	63
第4章 钢的热处理	65
第1节 概 述	65
第2节 碳素钢热处理的理论基础	65
一、钢加热时的组织转变	65
二、钢冷却时的组织转变	69
第3节 钢的热处理工艺	74
一、退 火	74
二、正 火	76
三、淬 火	76
四、回 火	78
五、表面淬火与局部淬火	79
六、表面化学热处理	81
第4节 影响热处理效果的因素	85
一、淬硬性及其影响因素	85
二、淬透性及其影响因素	85
复习思考题	87
第5章 合金钢	89
第1节 合金钢的分类、编号及合金元素在钢中的作用	89
一、合金钢的分类	89

二、合金钢的编号	93
三、合金元素在钢中的作用	93
第2节 合金结构钢	97
一、工程结构钢	97
二、机器结构钢	98
第3节 合金工具钢	106
一、合金刀具钢	106
二、合金模具钢	110
三、合金量具钢	116
第4节 特殊性能钢	117
一、高强度钢	117
二、耐磨钢	117
三、耐热钢	118
四、耐蚀钢	120
复习思考题	123
第6章 非铁金属及其合金	125
第1节 铜及铜合金	125
一、纯 铜	125
二、铜合金	126
第2节 铝及铝合金	130
一、纯 铝	130
二、铝合金	131
第3节 其他非铁合金	135
一、滑动轴承合金	135
二、钛合金	138
复习思考题	139
第7章 其他工程材料	140
第1节 粉末冶金材料	140
一、粉末冶金摩擦材料	140
二、粉末冶金减摩材料	142
三、粉末冶金结构材料	144
四、其他粉末冶金材料	146
第2节 高分子材料	148
一、塑 料	149
二、合成橡胶	160
三、合成胶粘剂	161
第3节 陶瓷材料	162

一、陶瓷的分类	162
二、陶瓷的性能特点	163
三、常用陶瓷材料	164
第4节 复合材料	165
一、复合材料概述	165
二、复合材料的分类	166
三、复合机理简介	166
四、复合材料的性能特点	167
五、常用复合材料	168
复习思考题	171
第8章 工程材料的选用	172
第1节 选材的一般原则	172
一、按零件使用要求选材	172
二、按制造工艺要求选材	178
三、按经济性原则选材	180
第2节 选材综合举例	181
一、材料类别选择分析	181
二、各类常用零件的选材	182
复习思考题	185
附录 工程材料力学性能概念	187
一、刚度、强度、塑性	187
二、疲劳强度	188
三、硬 度	189
四、冲击韧性	191
五、断裂韧性	192
参考文献	193

绪 论

材料是人类生产和生活的重要物质基础,材料的研究和生产水平已成为一个国家工业技术水平的重要标志。

人类社会的全部活动都与材料紧密相关。每一种有重要影响的新材料的问世,都会推动生产技术的一次飞跃。石器的应用使原始社会的生产水平提高了一大步。炼铜技术的成熟,使人类社会从石器时代进入了铜器时代,社会生产力也随之大大提高。炼铁技术的发展,又使人类社会进入一个新的历史时代——铁器时代。在这些伟大的人类历史发展进程中,我国都处于世界的前列。

材料也是近代科学技术发展的重要支柱之一。每一种新材料的发明和应用,都促使某一新兴工业的产生和发展,并使人类的生活更加丰富多彩。例如,合成纤维的研究成功,改变了化学工业和纺织工业的面貌,人们的衣着发生了重大变化;超高温合金的发明,使航空航天技术高速度发展;超纯半导体材料的研制和应用,使超大规模集成电路技术日新月异,为当代计算机工业的迅速发展提供了物质保证;光导纤维的开发应用,使通信技术发生了重大变革;高硬度、高强度材料的开发,具有各种优异性能的工、模具材料的应用,热强钢、高淬透性钢以及某些功能材料的应用,使机械制造业从产品设计到制造工艺都发生了重大变化,并向机电一体化和自动化方向前进了一大步。

目前,我国机械工业中应用的材料仍以金属材料为主。在金属材料中又以铁合金材料为主,其中碳素钢和灰铸铁占总用量的一半以上;各类合金钢的用量约占铁合金的 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{6}$ 。一批高强度合金(如钛合金)已在机械工业中得到应用。非铁合金(铜合金和铝合金)在机械工业中的应用目前仍占较小比例,其中铝合金的生产和应用正在逐年增多。在非金属材料中,目前应用最多的是塑料。塑料的应用已遍及机械工业各个领域和国民经济的各部门。粉末冶金材料由于其成型方法比较简单、成分和结构容易调整并具有某些特殊性能,其应用范围正在逐步扩大。复合材料是近来发展起来的新型结构材料,可根据使用要求调整材料组分而获得满意性能,因而应用范围越来越广。非金属材料中的陶瓷材料具有独特的性能,其耐热性、耐磨性、耐蚀性和电绝缘性是其他材料不能与之媲美的,在机械、化工、电气、纺织等工业部门的某些领域,是不可替代的重要材料。

随着科学技术的高速发展、材料应用领域的不断扩大、各种产品的不断更新换代,对材料的要求越来越高。在机械工业中,机电一体化的进程正在加快,机械设备多功能化、智能化和自动化程度迅速提高,因此对材料性能的要求也愈来愈多样化。除了高强度、高硬度等力学性能外,要求材料具有良好的耐热性、耐蚀性、耐疲劳性、耐候性,有些领域则要求材料具有压电效应、热电效应、光电效应等物理性能。尤其是在轻工业领域,功能材料的开发具

有十分重大的意义,是产品升级换代的重要条件。兵器工业、航天工业、核能工业等特殊工业部门,更需要有大量具有某种特殊性能的新材料。随着材料的研制、生产和应用的发展,钢铁材料的应用比例将逐步减少,非金属材料的应用比例将增加,对材料性能的要求将向综合性和功能化发展。可以预见,在不远的将来,将有大量新材料问世,那时整个工业领域乃至人类生活将更加五彩斑斓。

第1章 工程材料结构

一个机械零件应选用何种材料制造,要考虑材料的性能。材料的性能取决于材料的结构。因此,了解材料的结构是了解材料性能的必要基础。

常用工程材料有金属材料和非金属材料两大类。下面简要分析两类材料的结构特点。

第1节 金属材料结构

金属材料属晶体材料,要了解金属材料的特性,首先应分析其晶体结构特征。

一、纯金属的晶体结构与结晶

1. 晶体的一些重要概念

(1) 晶体

固体材料按原子排列是否有序,可分为晶体和非晶体。原子按一定规则排列的称为晶体,如图 1-1(a)所示。原子排列不规则的称非晶体。绝大多数的固体金属都是晶体。

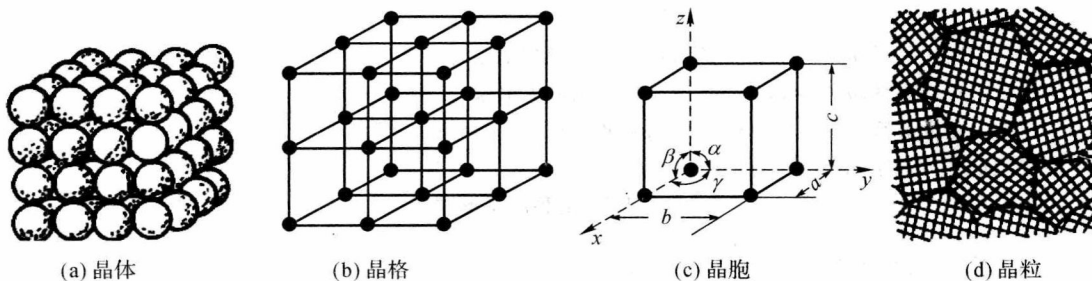


图 1-1 晶体结构

(2) 晶格

在晶体中,通过原子中心用线段连接起来,即呈一定的空间几何形状,这种空间格子称为晶格,又称晶体的空间点阵,如图 1-1(b)所示。晶格形式与晶体的性能有密切关系。

(3) 晶胞

晶格中最基本的几何单元称为晶胞,如图 1-1(c)所示。每一种晶格都是由晶胞堆砌而成的,晶胞的结构特征就是晶格的结构特征。

(4) 晶格常数

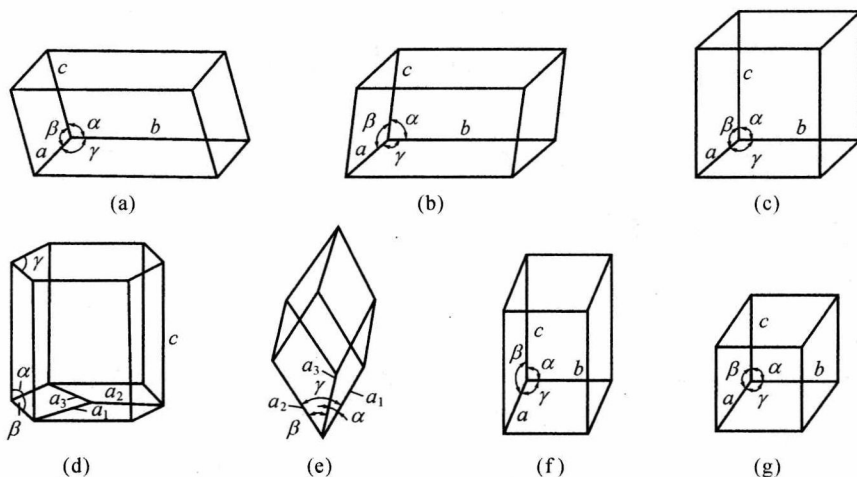
用以表示晶胞大小及几何特征的参数称为晶格常数。通常用晶胞中各棱边的长度及各棱边的夹角表示,如图 1-1(c)所示。

(5) 晶粒

晶体中晶格方位相同的晶区称为晶粒,如图 1-1(d)所示。在一个晶粒内,由于各个方向原子排列的状况不同,故呈现各向异性。但实际金属都是由很多晶粒组成的多晶体结构,因而呈现各向同性。

2. 常用金属的晶格及其主要参数

目前已知的晶格形式有七种晶系,如图 1-2 所示。每一种晶系又有多种空间点阵,如体心点阵、面心点阵、密排点阵等。然而在常用的金属中,主要的晶格形式只有三种,即体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。



- (a) 三斜晶系, $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ (b) 单斜晶系, $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
 (c) 正交晶系, $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (d) 六方晶系, $a_1 = a_2 = a_3 \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
 (e) 菱方晶系, $a_1 = a_2 = a_3, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ (f) 正方晶系, $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
 (g) 立方晶系, $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

图 1-2 七种晶系形式

(1) 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞是立方体,如图 1-3 所示。晶格常数 $a=b=c$,三棱边的夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。立方体的 8 个顶点各有 1 个原子,立方体的中心有 1 个原子,各原子紧密堆积,故立方体内对角线上原子靠紧,而 8 个顶点的原子彼此有一定间隙(假定原子呈球形,以下同)。晶格在一定范围内是连续的,故晶胞各顶点的原子均属相邻 8 个晶胞共有,只有晶胞中心的原子属该晶胞所有,因此每个晶胞实际包含的原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$ 。若以晶格常

数来表示原子的大小,则原子直径 $d = \frac{\sqrt{3}a}{2}$ (立方体对角线包含两个原子直径)。晶胞内原子实际占有的体积与晶胞体积之比称为晶格致密度,用符号 η 表示。体心立方晶格的致密度为

$$\eta_{\text{体}} = \frac{2 \times \left[\frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3 \right]}{a^3} \approx 0.68 = 68\%$$

属于这类晶格的金属有 α -Fe、铬、钼、钨、钒等。

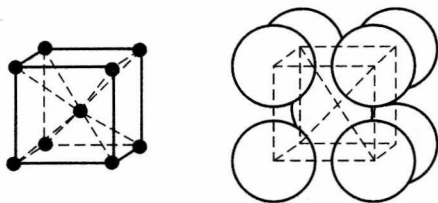


图 1-3 体心立方晶胞

(2) 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞也呈立方体,如图 1-4 所示。立方体的 8 个顶点各有 1 个原子,立方体 6 个面的中心各有 1 个原子。各原子紧密堆积,故立方体 6 个面的对角线上原子靠紧。晶胞各顶点的原子属 8 个晶胞共有,6 个面中心的原子属两个晶胞共有,故每个晶胞实际包含的原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$ 。原子直径 $d = \frac{\sqrt{2}a}{2}$,晶格致密度

$$\eta_{\text{面}} = \frac{4 \times \left[\frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4} a \right)^3 \right]}{a^3} \approx 0.74 = 74\%$$

属于这类晶格的金属有 γ -Fe、铜、铝等。

(3) 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞呈六方柱体,如图 1-5 所示。六方柱的 12 个顶点各有 1 个原子,上下面的中心各有 1 个原子,上下面之间有 3 个原子。六方面边长为 a ,六方柱高为 c , $c = 1.633a$ 。晶胞实际包含的原子数为 $12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6$ 。原子直径 $d = a$ 。晶格致密度

$$\eta_{\text{密}} = \frac{6 \times \left[\frac{4}{3} \pi \left(\frac{1}{2} a \right)^3 \right]}{6 \times \frac{\sqrt{3}}{4} \times a \times a \times c} \approx 0.74 = 74\%$$

属于这类晶格的金属有铍、镁、锌等。

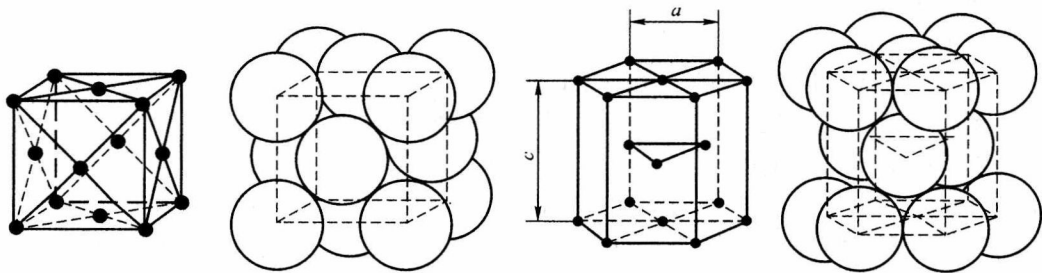


图 1-4 面心立方晶胞

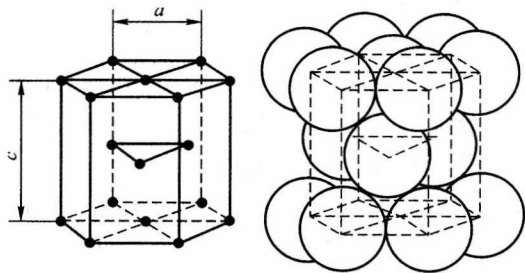


图 1-5 密排六方晶格

3. 晶面与晶向的表示方法

晶体中不同方位的原子面(通过原子中心的平面)称为晶面。不同方向的原子列(通过原子中心的方向)称为晶向。不同晶面和不同晶向上原子排列的状态不同,为便于分析,用晶面指数和晶向指数来表示晶面的方位和晶向的方向。

(1) 立方晶系的晶面指数

确定立方晶系晶面指数的步骤如下:

1) 选定晶胞的一个结点为坐标系原点,以与该点连接的三条棱边为坐标轴,即 O_x 、 O_y 、 O_z (反向为负值)。

2) 以晶格常数作为坐标轴上的度量单位,求出欲定晶面在 3 个坐标轴上的截距(截距为负值时,在指数上方加“-”号)。

3) 求 3 个截距的倒数并化为最小整数。

4) 将 3 个整数加圆括号,整数间不加标点。

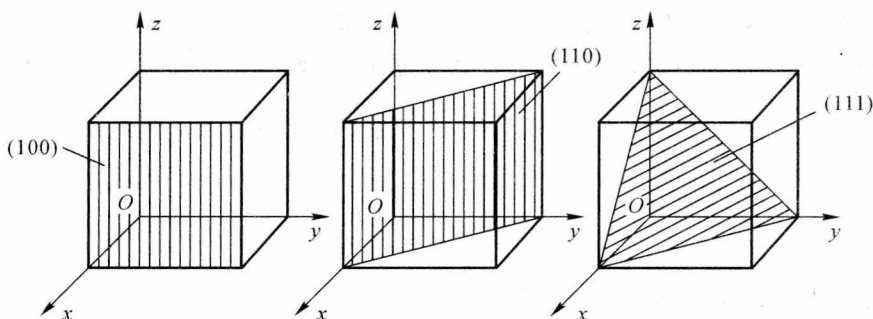


图 1-6 立方晶系主要晶面指数

用符号表示所得晶面指数写成 (hkl) , 图 1-6 为立方晶系 3 个主要晶面的晶面指数。 (hkl) 是以某个特定晶面求得的晶面指数, 由于坐标系可以平移, 故此晶面指数实际上代表了原子排列相同的所有平行晶面的晶面指数。某些晶面虽然彼此不平行, 但原子排列情况相同, 这些晶面称为晶面族。将 hkl 加以大括号 $\{hkl\}$, 即表示晶面族的晶面指数。在立方晶系中, $\{100\}$ 包含 3 个 (100) , $\{110\}$ 包含 6 个 (110) , $\{111\}$ 包含 4 个 (111) 。

(2) 立方晶系的晶向指数

确定立方晶系晶向指数的步骤如下:

1) 同上述方法选定坐标系。

2) 过坐标原点作一直线平行欲求晶向。

3) 求出该直线上任意点在三坐标轴上的投影值。

4) 将 3 个投影值化为最小整数, 并加方括号, 整数间不加标点。

用符号表示所得晶向指数写成 $[uvw]$, 图 1-7 表示立方晶系 3 个主要晶向指数。 $[uvw]$ 同样表示原子排列相同的所有平行晶向的晶向指数。将 3 个指数加括号 (uvw) , 即表示彼此不平行但原子排列相同的晶向族的晶向指数。在立方晶系中, (100) 包含 6 个 $[100]$ (其中三个对应负号, 下同), (110) 包含 12 个 $[110]$, (111) 包含 8 个 $[111]$ 。

(3) 六方晶系的晶面指数与晶向指数

六方晶系的坐标系由 4 个坐标轴组成, 如图 1-8 所示。在底平面上选择 3 个坐标轴并

互成 120° ，三轴交点为原点 O ，过原点与三轴垂直的方向为第四坐标轴。晶面指数为 (hkl) ，晶面族指数为 $\{hkl\}$ 。晶向指数为 $[uvw]$ ，晶向族指数为 $\{uvw\}$ 。指数确定方法与立方晶系相同。

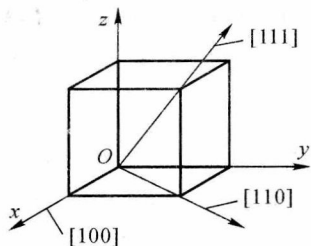


图 1-7 立方晶系主要晶向指数

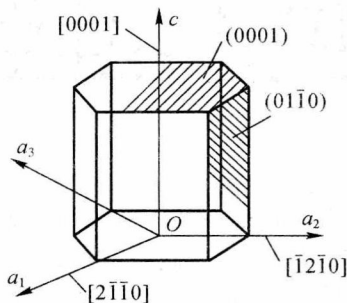


图 1-8 六方晶系的晶面指数与晶向指数

4. 晶体结构的不完整性

晶体结构中，若全部原子按一定的晶格类型规则地排列在各结点上，既不多一个原子，也不缺一个原子，也无原子偏离结点位置，这种晶体称为理想晶体。

在实际金属中，绝大多数原子按一定的晶格类型排列在晶格的各结点上，但由于原子热振动的作用和其他原因，有少数原子偏离正常位置，或余缺原子，或局部原子错排。这种现象称为晶体结构的不完整性，或称**晶体缺陷**。按照缺陷的形态特征和区域大小，可分为以下三种。

(1) 点缺陷

点缺陷是指晶体中范围很小的缺陷，通常只有几个原子直径的大小。点缺陷又有三种形式。

1) 空位

空位指在晶格的某个结点上没有原子存在，如图 1-9(a)所示。晶体中空位的位置是变化的，而且有时是连续几个结点空位。空位主要由原子的热运动产生，因此晶体的空位平衡浓度(晶体中的空位数与总原子数之比)随温度的升高而增大。

2) 置换原子

置换原子是指晶体中的异类原子不是位于晶格的间隙处，而是取代晶体的原子位于晶格的结点上，如图 1-9(b)所示。这种缺陷通常在异类原子与晶体原子大小相近时存在。

3) 间隙原子

间隙原子是指在晶体的非结点位置存在原子，这种缺陷又可分为自间隙原子(图 1-9(c))和杂质间隙原子(图 1-9(d))。自间隙原子是晶体本身的原子偏离结点位置而存在于晶格的间隙中；杂质间隙原子则是由于晶体中存在异类原子而形成的。

以上几种点缺陷都使缺陷周围的晶格发生畸变，提高晶体的内能，从而使晶体抵抗外力作用的能力增强。

(2) 线缺陷

线缺陷是二维尺度很小、三维尺度很大的缺陷。在金属晶体中，线缺陷的基本形式是位错，即在某一长度方向的周围原子排列错位，如图 1-10 所示。图 1-10(a)为刃型位错(图

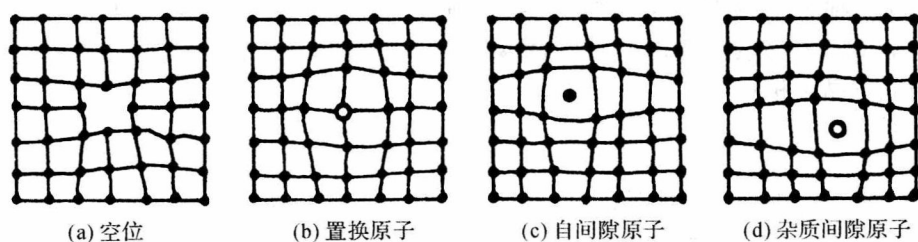


图 1-9 晶体点缺陷

中加上符号),其特征是在某一晶面的一侧多了一个原子面。这个原子面好像一片没有插到底的刀片,故称刃型位错。此“多余”原子面的底部就是位错线。图 1-10(b)所示为螺型位错,其特征相当于从 AB 切至 CD ,然后左右两边沿切开面作综合平移与旋转一个或几个原子间距,这样, CD 周围位错形式的原子就呈螺旋线形排列,故称螺型位错, CD 为位错线。位错线周围晶格发生畸变,原子排列不规则。位错线多呈不规则曲线,且相互缠绕。位错密度(单位体积晶体中所含位错线的总长度)的大小对金属性能有重大影响。位错密度很小或很大时,金属的强度较高。当位错密度在某一范围时,金属的强度最低。

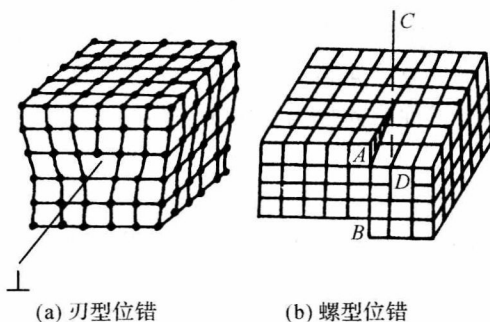


图 1-10

(3) 面缺陷

面缺陷是二维尺度较大、第三维尺度很小的缺陷。金属晶体中面缺陷的基本形式是晶界和亚晶界,如图 1-11 所示。

晶界为相邻晶粒的接触界面。由于相邻晶粒的晶格位向不同,故界面上存在一个晶格位向的过渡区。过渡区内原子排列不甚规则,但也不是杂乱无章,而是由一个晶粒的位向逐步过渡到另一个晶粒的位向(图 1-11(a))。过渡区内晶格发生畸变并存在较多的位错。在实际金属中,晶界处常存在一些低熔点的杂质原子。

亚晶界是晶粒内部由于位错的堆积而使一部分晶体的晶格位向与另一部分晶体的晶格位向产生小角度偏差而形成的界面(图 1-11(b))。这样在晶粒的内部就形成亚晶粒。虽然亚晶粒的位向差较小,通常小于 $1^\circ \sim 2^\circ$,但亚晶粒的存在对金属的性能仍有许多影响。

上述几种晶体缺陷的共同特点是,缺陷处及其周围存在晶格畸变而使金属的某些性能发生变化。生产中常利用这一特点提高金属的某些性能,使其发挥更大的作用。

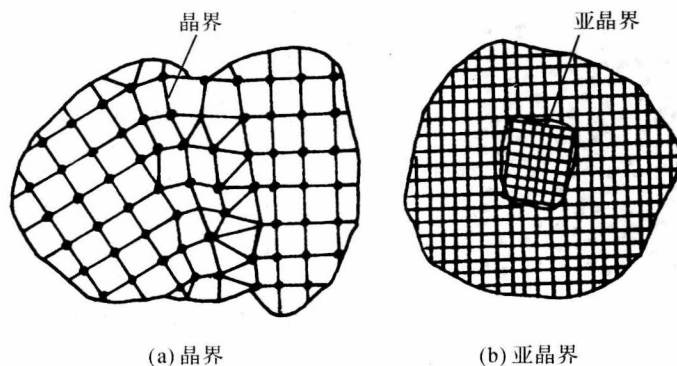


图 1-11 晶界与亚晶界

5. 纯金属的结晶

金属的结晶过程是原子从无序排列的液态转变为有序排列的固态(结晶态)的过程。纯金属的结晶过程是在恒温情况下进行的,可用冷却曲线(温度—时间—状态关系曲线)表示,如图 1-12 所示。图中 T_0 是金属的理论结晶温度,实际结晶温度 T 略低于 T_0 ,即有 $T_0 - T = \Delta T$, ΔT 称为过冷度。过冷度随冷却速度的增大而增大。

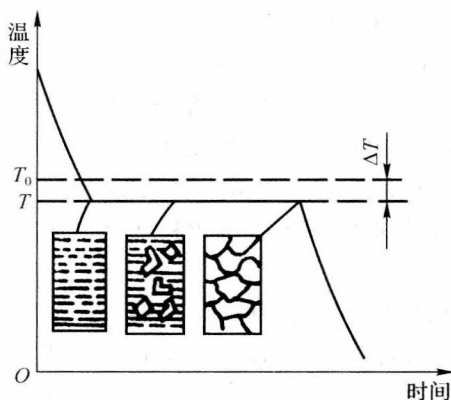


图 1-12 纯金属结晶过程

金属自液态冷却至温度 T 时开始结晶,由于结晶时放出结晶潜热,使冷却曲线呈现一水平线段,结晶完毕后继续冷却至室温,晶体结构不发生变化。

结晶过程包括两个阶段:晶核形成和晶核长大。

(1) 晶核的形成

液态金属原子呈无序状态,当温度降低至接近结晶温度时,某些区域的原子出现瞬时近程有序状态,即某些原子短时间呈有序排列,但很快又消失。如果在许多区域同时出现这种情况,则称为结构起伏。这种瞬时近程有序的区域称为晶胚,如图 1-13 所示。当温度降低到理论结晶温度以下时,此时固态自由能低于液态自由能,如图 1-14 所示。系统自发向低位状态转变,结构起伏形成的较大的晶胚不再熔化,成为稳定的固态晶区,即为晶核。