



高等教育
机械类课程规划教材

机械工程材料

主 编 丁晓非
主 审 谭 毅

大连理工大学出版社



高等教育
机械类课程规划教材

机械工程材料

主 编 丁晓非
副主编 任桂华 梁 艳 罗彩霞 谢忠东
主 审 谭 毅

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料 / 丁晓非主编. — 大连: 大连理工大学出版社, 2010.10
高等教育机械类课程规划教材
ISBN 978-7-5611-5870-8

I. ①机… II. ①丁… III. ①机械制造材料—高等学校—教材 IV. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 204452 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路80号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:http://www.dutp.cn

丹东新东方彩色包装印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 185mm×260mm 印张: 12.5 字数: 304千字

印数: 1~3000

2010年10月第1版

2010年10月第1次印刷

责任编辑: 孔泳滔

责任校对: 王 哲

封面设计: 张 莹

ISBN 978-7-5611-5870-8 定 价: 24.00 元

前 言

《机械工程材料》是高等教育机械类课程规划教材之一，是高等院校机械类和相关专业的一门十分重要的技术基础课教材。

材料科学是研究材料的组织结构、性质、生产流程和使用效能以及它们之间相互关系的科学。

本教材是按照“金属材料的结构与性能—金属材料组织和性能的控制—常用机械工程材料—材料的应用”这一顺序编写的，在编写过程中力求突出以下特色：

1. 本教材主要针对应用型本科非材料专业，课程体系在保证理论知识适度、够用的前提下，兼顾材料学知识的系统性和实践性，突出工程材料应用技能，把过于深奥的理论和复杂的公式推导都进行了适当简化，把机械设计、制造的选材和用材结合起来，把机械制造中常用的加工方法与材料的工艺性能结合起来，符合培养应用型人才的需求。

2. 注重材料的多样性和广泛性。教材内容在保证传统、成熟材料知识的前提下，兼顾高分子材料、陶瓷材料及复合材料，还增加了材料表面改性新技术、新型结构材料与功能材料等反映学科发展及新材料技术的内容。

3. 编写精练，简单易懂，非常符合本课程学时数少的教学特点。学生在掌握基本知识的同时，又拓展了知识面，确保内容新、应用性强。

4. 教材中采用的数据和资料尽可能反映当前最新的信息，而且引用最新国家标准和牌号，体现了“宽、新、应用”的特色，旨在重点培养学生在工程实践中选材、用材的能力。

5. 教材列举了大量有参考价值的应用实例，分析了典型零件的性能、失效形式、热处理及选材原则，突出了实用性。

本教材由大连海洋大学丁晓非任主编，由黄石理工学院任桂华、大连理工大学梁艳、太原科技大学罗彩霞、大连海洋大学谢忠东任副主编。本教材共分4篇14章，具体编写分工如下：第1章金属材料的晶体结构和第5章铁-碳合金相图由任桂华编写；第2章金属材料的性能、第3章金属的结晶与同素异构转变、第4章二元合金相图、第6章金属的塑性变形与再结晶及第8章钢的合金化由丁晓非编写；第7章钢的热处

理、第13章机械零件的失效与选材及第14章典型零件选材及工艺路线分析由罗彩霞编写；第9章非合金钢及合金钢、第10章铸铁、第11章有色金属及其合金由梁艳编写；第12章非金属材料及新材料由谢忠东编写。大连理工大学谭毅审阅了全部书稿，大连理工大学王富岗教授在本教材的编写过程中提出了许多宝贵意见，大连海洋大学林艾光副教授在教材内容的校核等方面做了大量工作，编者对此表示深深的谢意。在本教材编写过程中，编者参阅了国内外出版的相关资料，在此对相关文献的作者表示诚挚的敬意和衷心的感谢！

限于编者水平，本教材中难免有疏漏之处，恳请读者多多批评指正，以便及时修订完善。

所有意见和建议请发往：dutpbk@163.com

欢迎访问我们的网站：<http://www.dutpgz.cn>

联系电话：0411-84707424 84706676

编 者

2010年10月



第 1 篇 金属材料的结构与性能

第 1 章 金属材料的晶体结构	3
1.1 纯金属的晶体结构	3
1.2 实际金属的晶体结构与晶体缺陷	10
1.3 合金的相结构	14
思考题	17
第 2 章 金属材料的性能	19
2.1 金属材料的力学性能	19
2.2 金属材料的物理、化学性能	22
2.3 金属材料的工艺性能	23
思考题	24

第 2 篇 金属材料组织和性能的控制

第 3 章 金属的结晶与同素异构转变	27
3.1 金属结晶的概念	27
3.2 金属的结晶过程	28
3.3 同素异构转变	31
思考题	31
第 4 章 二元合金相图	32
4.1 二元合金相图的建立	32
4.2 二元相图的基本类型与分析	33
思考题	42
第 5 章 铁-碳合金相图	43
5.1 铁-碳合金的组元及基本相	44
5.2 铁-碳相图分析	45
5.3 典型铁-碳合金的结晶过程及其组织	48

5.4 铁-碳合金的成分、组织及性能的关系	52
5.5 Fe-Fe ₃ C 相图的应用	55
思考题	57
第 6 章 金属的塑性变形与再结晶	58
6.1 金属的塑性变形	58
6.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	63
6.3 回复与再结晶	66
6.4 热加工对金属组织与性能的影响	69
思考题	70
第 7 章 钢的热处理	71
7.1 钢在加热时的转变	71
7.2 钢在冷却时的转变	73
7.3 钢的退火与正火	80
7.4 钢的淬火	82
7.5 钢的回火	86
7.6 钢的表面热处理和化学热处理	89
7.7 钢的热处理新技术与表面处理新技术	94
思考题	97
第 8 章 钢的合金化	99
8.1 常存元素和杂质对钢性能的影响	99
8.2 合金元素在钢中的作用	100
思考题	104

第 3 篇 常用机械工程材料

第 9 章 非合金钢及合金钢	107
9.1 非合金钢	107
9.2 合金钢	111
思考题	128
第 10 章 铸 铁	129
10.1 概 述	129
10.2 灰口铸铁	132
10.3 球墨铸铁	134
10.4 蠕墨铸铁	137
10.5 可锻铸铁	138

10.6 特殊性能铸铁·····	139
思考题·····	141
第 11 章 有色金属及其合金 ·····	142
11.1 铝及铝合金·····	142
11.2 铜及铜合金·····	149
11.3 钛及其合金·····	153
11.4 滑动轴承合金·····	155
思考题·····	159
第 12 章 非金属材料及新材料 ·····	160
12.1 高分子材料·····	160
12.2 陶瓷材料·····	165
12.3 复合材料·····	169
12.4 新材料简介·····	172
思考题·····	174

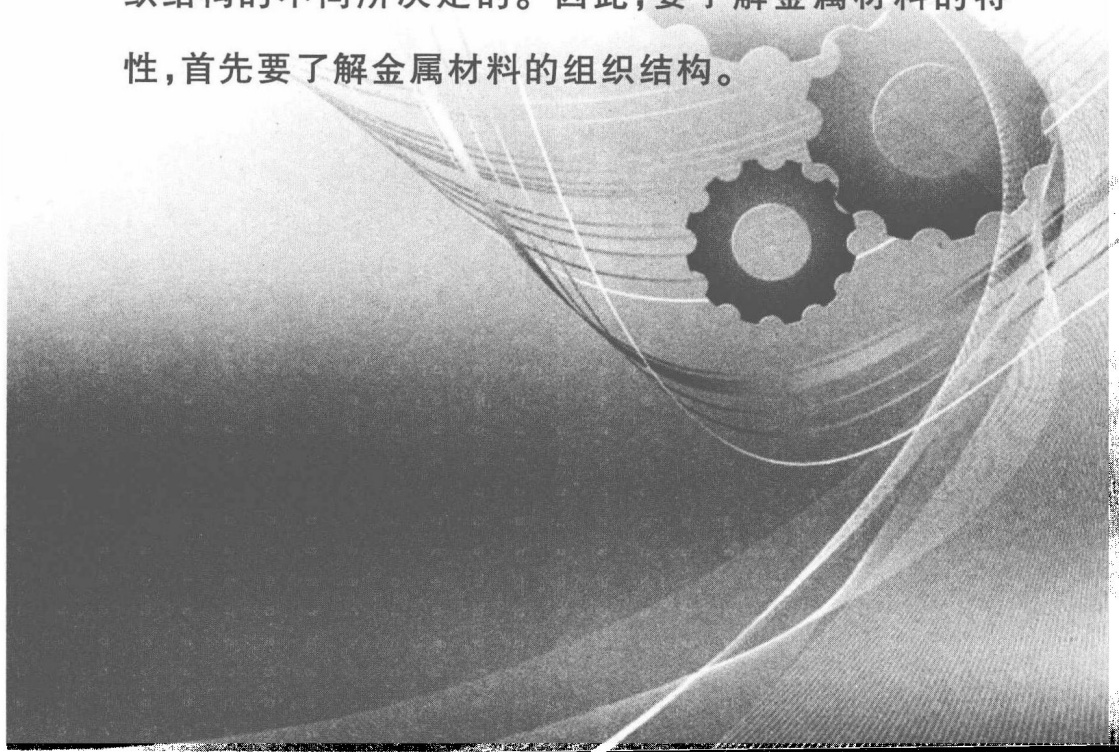
第 4 篇 材料的应用

第 13 章 机械零件的失效与选材 ·····	177
13.1 零件的失效·····	177
13.2 材料的选择·····	180
思考题·····	182
第 14 章 典型零件选材及工艺路线分析 ·····	183
14.1 齿 轮·····	183
14.2 轴类零件·····	185
14.3 弹 簧·····	186
14.4 刀 具·····	187
14.5 工程材料应用示例·····	188
思考题·····	190
参考文献 ·····	191

第 1 篇

金属材料的结构与性能

金属材料是机械工程中应用最为广泛的材料,不同成分的金属材料具有不同的力学性能,即使是成分相同的金属材料,在不同的条件下其力学性能也是不相同的。金属材料性能的这种差异是由于其成分、组织结构的不同所决定的。因此,要了解金属材料的特性,首先要了解金属材料的组织结构。



第1章

金属材料的晶体结构

1.1 纯金属的晶体结构

1.1.1 晶体和非晶体

按其内部原子排列方式的不同,通常可将固态物质分为晶体和非晶体两大类。

晶体中的原子按一定的几何规律规则排列,如图1-1所示。它是固态物质中最多的一类。固态金属通常都是晶体。非晶体的原子是无规则杂乱地堆积在一起的。自然界中少数固态物质(如普通玻璃、松香、沥青等)是非晶体。

晶体和非晶体原子排列方式的不同,导致了它们在性能上的明显差异。例如晶体具有固定的熔点(如铁的熔点为 1534°C ,铜的熔点为 1083°C ,铝的熔点为 660°C),且在不同方向上具有不同的性能,即表现出各向异性。而非晶体没有固定的熔点,随着温度的升高,固态非晶体将逐渐变软,最终成为有流动性的液体。冷却时,液体逐渐稠化,最终变为固体。此外,非晶体在各个方向上的原子聚集密度大致相同,即表现出各向同性。

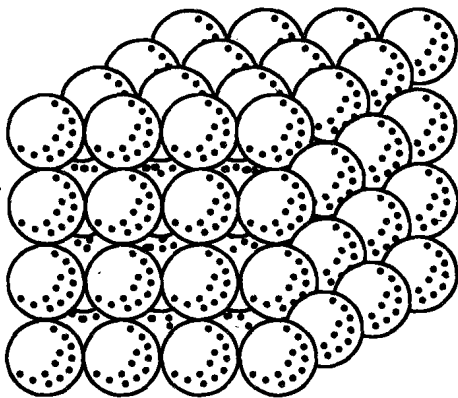


图1-1 晶体中的原子排列模型

1.1.2 金属材料的特性和金属键

金属原子的结构特点是其外层电子(价电子)的数目少,而且它们与原子核的结合力较弱,故各个价电子极易挣脱原子核的束缚而成为自由电子。当大量的金属原子聚合在一起构成金属晶体时,绝大部分金属原子将失去价电子而变成正离子,而正离子又按一定几何形式规则地排列起来,并在固定位置上做高频热振动,脱离了原子核束缚的价电子以自由电子的形式在整个金属内运动,即弥漫于正离子间,形成“电子云”。金属晶体就是依靠各正离子

和自由电子间的相互引力而结合起来的。而电子与电子间及正离子与正离子间的排斥力与这种引力相平衡,从而使金属呈现稳定的晶体状态。这种由金属正离子和自由电子相互作用而结合的方式称为金属键,如图 1-2 所示。因自由电子的运动,故金属键无方向性和饱和性。

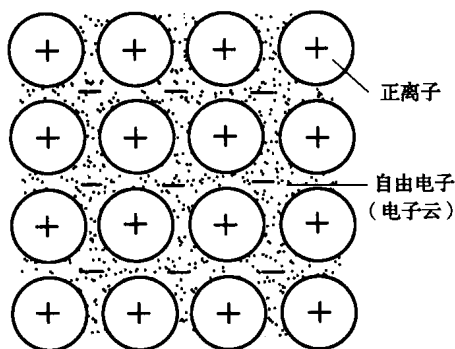


图 1-2 金属键示意图

由于绝大多数金属均以金属键方式结合,所以可以根据金属键的性质解释固态金属的一些基本特性。例如:在外电场作用下,金属中的自由电子会沿着电场方向做定向运动而形成电流,故金属具有良好的导电性;

金属中的正离子在固定位置做高频热振动,对自由电子的流动造成阻碍作用,且随着温度的升高,正离子的振幅加大,对自由电子通过的阻碍作用加大,故金属具有正的电阻温度系数;由于正离子的振动和自由电子的流动可以传递热能,故金属具有良好的导热性;当金属中发生原子面的相对位移时,金属晶体仍旧保持金属键结合,故金属具有良好的塑性。此外,金属中的自由电子可吸收可见光的能量,故金属具有不透明性;吸收了能量的自由电子被激发、跃迁到较高能级,当它跳回到原来能级时,将所吸收的能量以电磁波的形式辐射出来,使金属具有光泽。

1.1.3 晶体结构的概念

1. 晶格

为便于分析和描述晶体内部原子的排列规律,我们把晶体内部的原子近似地视为刚性质点,并用假想的线条将这些点的中心连接起来,就得到一个表示晶体内部原子排列规律的空间格架——晶格,如图 1-3(a)所示。

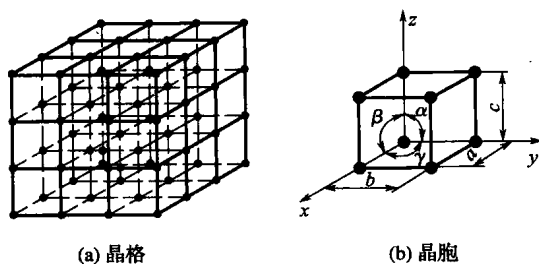


图 1-3 晶格和晶胞

2. 晶胞

晶体中原子排列具有周期性的特点,为了便于分析,通常从晶格中选取一个能完全反映晶格特征的最小几何单元来研究晶体中原子排列的规律,这个最小的几何单元称为晶胞,如图 1-3(b)所示。实际上,整个晶格是由许多大小、形状和位向相同的晶胞周期性重复堆积而成的。

3. 晶格常数

晶胞的大小和形状用晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 和棱边夹角 α 、 β 、 γ 来表示,如图 1-3(b)所

示。晶胞中各棱边的长度称为晶格常数。晶格常数 $a=b=c$ 、棱边夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 的晶格称为立方晶格。

1.1.4 金属中常见的晶格类型

除少数金属具有复杂的晶格结构外,大多数金属具有以下三种晶格类型:

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞是一个立方体,如图 1-4 所示,通常只用一个晶格常数 a 表示即可。在体心立方晶胞的每个顶角上和晶胞中心处都排列一个原子,如图 1-4(a)所示。由图 1-4(c)可见,体心立方晶胞每个角上的原子为相邻的八个晶胞所共有,每个晶胞实际上只占有 $1/8$ 个原子,而中心的原子为该晶胞所独占。因此,体心立方晶胞中的原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$ 个。

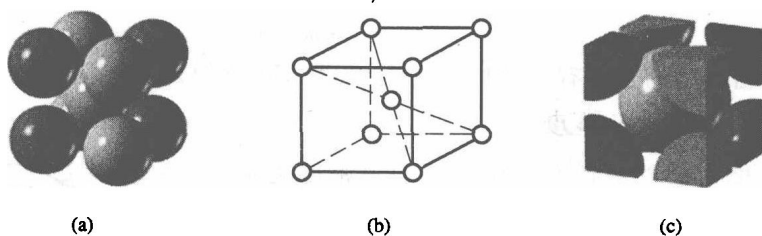


图 1-4 体心立方晶胞示意图

具有体心立方晶格的不同金属,由于其原子直径不同,所以其晶格常数也不同。属于这种晶格类型的金属有铬(Cr)、钨(W)、钼(Mo)、钒(V)及 α -铁(α -Fe)等。

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞也是一个立方体,如图 1-5 所示,也只用一个晶格常数 a 表示即可。在面心立方晶胞的每个角上和六个面的中心都排列一个原子,如图 1-5(a)所示。由图 1-5(c)可见,面心立方晶胞每个角的原子为相邻的八个晶胞所共有,而每个面的中心处的原子为两个晶胞所共有。因此,面心立方晶胞的原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$ 个。

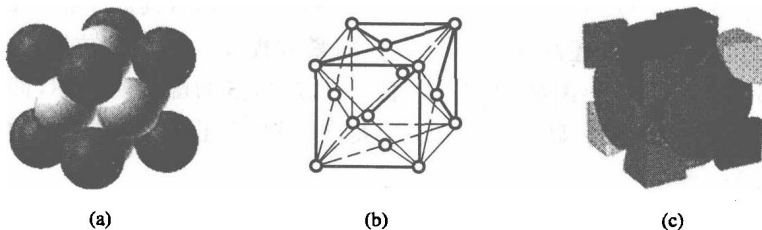


图 1-5 面心立方晶胞示意图

不同金属的面心立方晶格的晶格常数不同。属于这种晶格类型的金属有铝(Al)、铜(Cu)、金(Au)、银(Ag)、铅(Pb)、镍(Ni)及 γ -铁(γ -Fe)等。

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞是一个六棱柱,它由六个呈长方形的侧面和两个呈六边形的上、下底面组成,其晶格常数为柱体的高度 c 和六边形底面的边长 a 。在密排六方晶胞的各个棱

角上和上、下两个底面的中心处都排列一个原子,此外在六棱柱的中间还排列三个原子,如图 1-6(a)所示。由图 1-6(c)可见,密排六方晶胞各个棱角上的原子为相邻的六个晶胞所共有,上、下底面中心的原子为两个晶胞所共有,晶胞中间的三个原子为该晶胞独有。因此,密排六方晶胞的原子数为 $12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6$ 个。

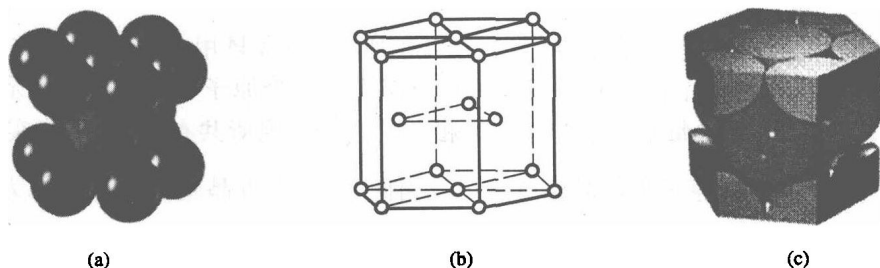


图 1-6 密排六方晶胞示意图

属于这种晶格类型的金属有镁(Mg)、铍(Be)、镉(Cd)、锌(Zn)等。

1.1.5 晶格的致密度

晶格中原子排列的紧密程度常用晶格的致密度表示,致密度是指晶胞中原子所占体积与该晶胞体积之比。在体心立方晶格中,如图 1-7 所示,每个晶胞含有 2 个原子,这 2 个原子的体积为 $2 \times (\frac{4}{3} \pi r^3)$,其中 r 为原子半径。原子半径 r 与晶格常数 a 的关系为 $r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$ 。晶胞体积为 a^3 ,故体心立方晶格的致密度为

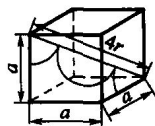


图 1-7 体心立方晶胞中原子半径计算示意图

$$\frac{\text{2个原子体积}}{\text{晶胞体积}} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi (\frac{\sqrt{3}}{4} a)^3}{a^3} = \frac{\sqrt{3}}{8} \pi = 0.68$$

即在体心立方晶格中有 68% 的体积被原子所占据,其余为空隙。同理,可求出面心立方晶格及密排六方晶格的致密度为 0.74。显然,晶格的致密度越大,其原子排列越紧密。

此外,还常用配位数来描述晶体中原子排列的紧密程度。所谓配位数,是指晶格中任一原子周围所紧邻的最近且等距离的原子数。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为 12。显然,配位数越大,原子排列也越紧密。三种典型金属晶格的相关数据见表 1-1。

表 1-1 三种典型金属晶格的相关数据

晶格类型	晶胞中的原子数	原子半径	致密度	配位数
体心立方晶格	2	$\frac{\sqrt{3}}{4} a$	0.68	8
面心立方晶格	4	$\frac{\sqrt{2}}{4} a$	0.74	12
密排六方晶格	6	$\frac{1}{2} a$	0.74	12

1.1.6 晶面和晶向及晶体的各向异性

在金属晶体中,通过一系列原子中心所构成的平面称为晶面。通过两个以上原子中心的直线,可代表某一原子列在晶格空间的位向,称为晶向。

为了便于研究,晶格中任何一个晶面和晶向都用一定的符号来表示。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 1-8 中的晶面 $ABB'A'$ 为例,说明确定晶面指数的方法。

(1) 设坐标

在晶格中,分别设沿晶胞的互相垂直的三条棱边为 x 、 y 、 z 坐标轴,坐标轴的原点应位于欲定晶面之外,以免出现零截距。

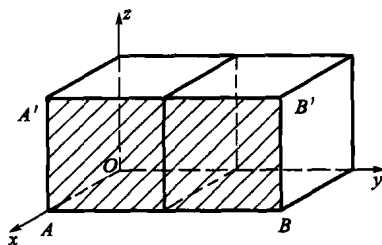


图 1-8 晶面指数的确定方法

(2) 求截距

以晶格常数为长度单位,求出欲定晶面在三条坐标轴上的截距。图 1-8 中晶面 $ABB'A'$ 在 x 、 y 、 z 轴上的截距分别为 1 、 ∞ 、 ∞ 。

(3) 取倒数

将各截距值取倒数。由图 1-8 所得的截距的倒数分别为 1 、 0 、 0 (取倒数的目的是为了

(4) 化整数

将上述三个倒数按比例化为最小的简单整数,即 1 、 0 、 0 。

(5) 列括号

将上述各整数依次列入圆括号内,即得晶面指数。晶面指数的一般格式为 (hkl) 。因此,图 1-8 中晶面 $ABB'A'$ 的晶面指数为 (100) 。

图 1-9 所示为立方晶格中常用的晶面及晶面指数,包括 (100) 、 (110) 、 (111) 。

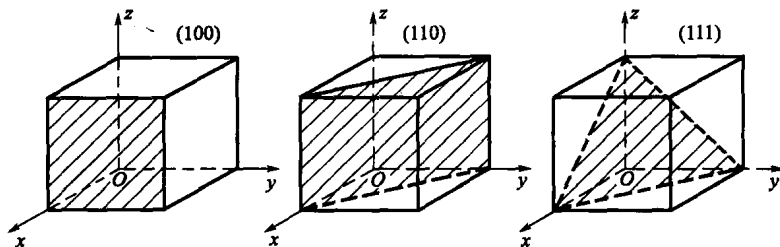


图 1-9 立方晶格中常用的晶面及晶面指数

若晶面的截距为负数,则在指数上加负号,如 $(\bar{1}11)$ 晶面。若某个晶面的指数 (hkl) 都乘以 -1 ,则得到 $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$ 晶面,那么 (hkl) 晶面与 $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$ 晶面属于一组平行晶面,例如 (111) 晶面与 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 晶面一般用一个晶面指数 (111) 来表示。

还需指出:晶面指数并非仅指晶格中的某一晶面,而是泛指该晶格中所有与其平行的位向相同的晶面。此外,在立方晶格中,由于原子排列具有高度的对称性,所以往往存在许多原子排列完全相同但在空间位向不同(不平行)的晶面,这些晶面统称为晶面族,用大括号表

示,即 $\{hkl\}$ 。换言之, (hkl) 是指某一确定位向的晶面指数,而 $\{hkl\}$ 则是指所有位向不同而原子排列相同的晶面指数。

例如 (100) 、 (010) 、 (001) 晶面同属 $\{100\}$ 晶面族,即可以表示为

$$\{100\} = (100) + (010) + (001)$$

2. 晶向指数

现以图 1-10 中的晶向 OA 为例,说明确定晶向指数的方法。

(1) 设坐标

在晶格中设坐标轴 x 、 y 、 z ,原点应在欲定晶向所在的直线上。图 1-10 中分别设沿晶胞的互相垂直的三条棱边为 x 、 y 、 z 坐标轴,坐标轴的原点为欲定晶向的一个结点。

(2) 求坐标值

以晶格常数为长度单位,在该晶向所在的直线上任选一点,求出该点的坐标值。图 1-10 中选取欲定晶向上另一结点,其坐标值分别为 1、0、0。

(3) 化整数

将上述三个坐标值按比例化为最小整数,即 1、0、0。

(4) 列括号

将化好的整数依次记录在中括号内,即得所求晶向 OA 的晶向指数 $[100]$ 。

图 1-11 所示为立方晶格中典型的晶向及晶向指数,即 $[111]$ 、 $[110]$ 、 $[100]$ 。

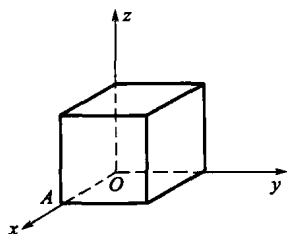


图 1-10 确定晶向指数的方法

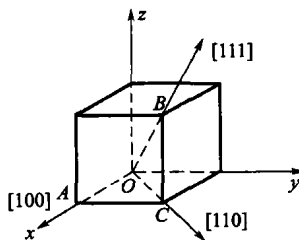


图 1-11 立方晶格中的几个晶向及晶向指数

晶向指数标志的一般格式为 $[uvw]$ 。 $[uvw]$ 实际表示一组原子排列相同的平行晶向。晶向指数也可能出现负数。若两组晶向的全部指数数值相同而符号相反,例如 $[110]$ 与 $[\bar{1}\bar{1}0]$,则它们相互平行或为同一原子列,但方向相反。若只研究该原子列的原子排列情况,则晶向 $[110]$ 与 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 可用 $[110]$ 表示。

原子排列情况相同而在空间位向不同(不平行)的晶向统称为晶向族,用尖括号表示,即 $\langle uvw \rangle$ 。例如, $\langle 100 \rangle = [100] + [010] + [001]$ 。

在立方晶系中,若一个晶面指数与一个晶向指数的数值和符号都相同,则该晶面与该晶向互相垂直,例如 $(111) \perp [111]$ 。

3. 密排面和密排方向

不同晶体结构中,不同晶面、不同晶向上原子排列方式和排列密度不一样。在体心立方晶格中,原子密度最大的晶面为 $\{110\}$,称为密排面,原子密度最大的晶向为 $\langle 111 \rangle$,称为密排方向。在面心立方晶格中,密排面为 $\{111\}$,密排方向为 $\langle 110 \rangle$ 。体心立方晶格和面心立方晶格的主要晶面和主要晶向的原子排列和密度分别见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2

体心立方、面心立方晶格主要晶面的原子排列和密度

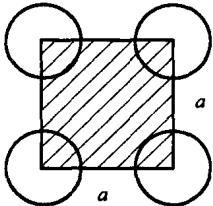
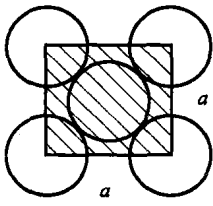
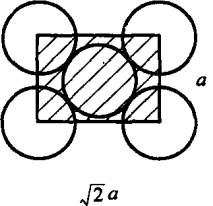
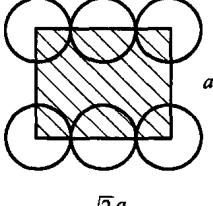
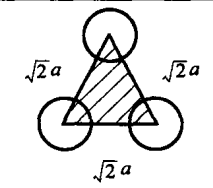
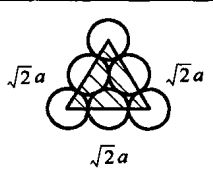
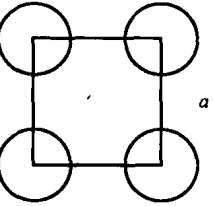
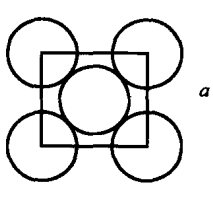
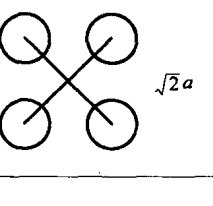
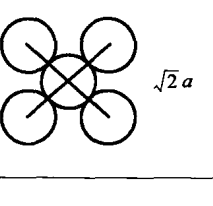
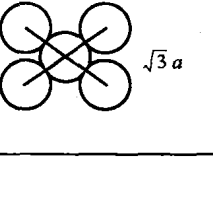
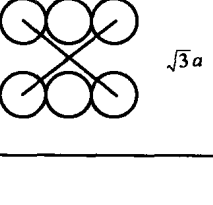
晶面指数	体心立方晶格		面心立方晶格	
	晶面原子排列示意图	晶面原子密度 (原子数/面积)	晶面原子排列示意图	晶面原子密度 (原子数/面积)
$\{100\}$		$\frac{4 \times \frac{1}{4}}{a^2} = \frac{1}{a^2}$		$\frac{4 \times \frac{1}{4} + 1}{a^2} = \frac{2}{a^2}$
$\{110\}$		$\frac{4 \times \frac{1}{4} + 1}{\sqrt{2}a^2} = \frac{1.4}{a^2}$		$\frac{4 \times \frac{1}{4} + 2 \times \frac{1}{2}}{\sqrt{2}a^2} = \frac{1.4}{a^2}$
$\{111\}$		$\frac{3 \times \frac{1}{6}}{\frac{\sqrt{3}}{2}a^2} = \frac{0.58}{a^2}$		$\frac{3 \times \frac{1}{6} + 3 \times \frac{1}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}a^2} = \frac{2.3}{a^2}$

表 1-3

体心立方、面心立方晶格主要晶向的原子排列和密度

晶面指数	体心立方晶格		面心立方晶格	
	晶向原子排列示意图	晶向原子密度 (原子数/长度)	晶向原子排列示意图	晶向原子密度 (原子数/长度)
$\langle 100 \rangle$		$\frac{2 \times \frac{1}{2}}{a} = \frac{1}{a}$		$\frac{2 \times \frac{1}{2}}{a} = \frac{1}{a}$
$\langle 110 \rangle$		$\frac{2 \times \frac{1}{2}}{\sqrt{2}a} = \frac{0.7}{a}$		$\frac{2 \times \frac{1}{2} + 1}{\sqrt{2}a} = \frac{1.4}{a}$
$\langle 111 \rangle$		$\frac{2 \times \frac{1}{2} + 1}{\sqrt{3}a} = \frac{1.15}{a}$		$\frac{2 \times \frac{1}{2}}{\sqrt{3}a} = \frac{0.58}{a}$