

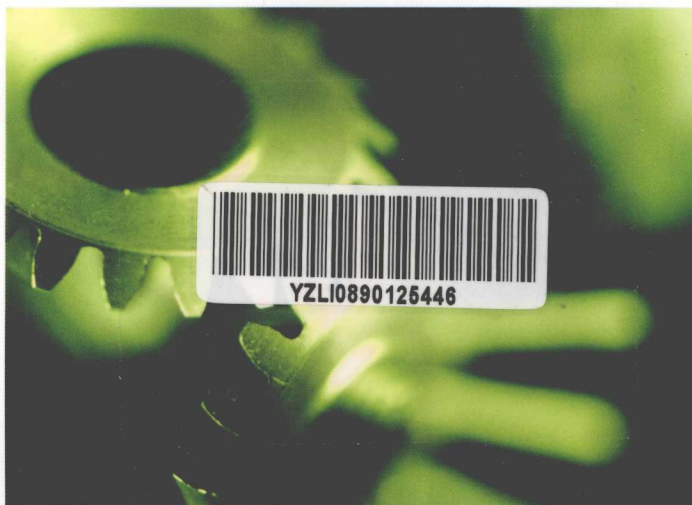


普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

机械工程材料

主编 王廷和 王进



 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

机械工程材料

主 编 王廷和 王 进
副主编 杨建民 郑少梅 刘长松



YZLI0890125446

北 京

冶金工业出版社

2011

内 容 提 要

本书以机械工程材料的基础知识为重点,兼顾基本原理与实际应用,注重培养学生分析问题和解决问题的能力,由浅入深、循序渐进,分别讲解了金属学基础、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、常用金属材料、非金属材料、机械零件失效与选材等相关内容。

本书可作为普通高等学校机械类和近机类本科专业通用教材,也可以作为无机非金属材料等材料类专业教材,还可以作为职业学校相关专业教材或企业技术人员的培训教材,还可作为相关技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/王廷和,王进主编. —北京:冶金工业出版社, 2011. 2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5494-4

I. ①机… II. ①王… ②王… 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(2011) 第 017954 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 陈慰萍 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5494-4

北京印刷一厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011 年 2 月第 1 版, 2011 年 2 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 9.75 印张; 234 千字; 147 页

22.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

科学技术的不断进步和我国机械工业的飞速发展,对高等学校相关专业人才的培养提出了更高的要求。本书致力于帮助机械类各专业学生更好地理解和使用材料,以适应行业技术未来的发展。

“机械工程材料”是机械类各专业的一门专业基础课,涉及的知识面广,实用性强。本书从机械工程材料的应用角度出发,介绍了机械工程中常用材料的成分、组织、结构及其与性能间的相关规律;改变常用材料成分、组织、结构的工艺方法;常见工件选材用材等基本知识。通过本课程的学习,学生应掌握机械工程材料一般知识,尤其是掌握常用机械工程材料的成分、组织、结构、性能以及用途、加工工艺之间的关系和规律,从而在机械设计和选材用材过程中能够正确选材,避免“小材大用”;能够合理用材,避免“大材小用”;同时能够正确选择工件加工方法,妥善安排制订加工工艺路线。

本书在内容安排上分为6章,分别为金属学基础、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、常用金属材料、非金属材料、机械零件失效与选材。本书在编写顺序上以机械工程材料的基础知识为重点,由浅入深、循序渐进,注重培养学生分析问题和解决问题的能力。

参加本书的编者都是多年从事“机械工程材料”第一线教学工作的教师,他们分别是:青岛理工大学的王廷和、王进、郑少梅、刘长松、褚忠、李志文;青岛大学的杨建民;山东理工大学的莫德秀;河南科技大学的陈学文;山东建筑大学的唐炳涛;西安建筑科技大学的洪涛。全书由王廷和和王进担任主编并负责统稿,中南大学周海涛教授主审。

本书在编写过程中,参考了很多同行的文献,编者在此向文献作者表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中存在的缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

2010年12月

目 录

绪论	1
1 金属学基础	3
1.1 金属的晶体结构	3
1.1.1 晶体与非晶体	3
1.1.2 理想金属的晶体结构	3
1.1.3 实际金属的晶体结构	10
1.2 合金与合金的相结构	14
1.2.1 合金的基本概念	14
1.2.2 合金的相结构	14
1.3 纯金属的结晶	17
1.3.1 冷却曲线和过冷现象	17
1.3.2 结晶过程及其基本规律	18
1.3.3 影响金属结晶后晶粒大小的因素与控制措施	19
1.4 合金的结晶	20
1.4.1 二元合金相图的基本知识	21
1.4.2 二元合金相图的基本类型	22
1.4.3 合金性能与合金相图之间的关系	30
1.5 铁碳合金相图	32
1.5.1 纯铁、铁碳合金的基本相和组织组成物	33
1.5.2 铁碳合金相图分析	36
1.5.3 铁碳合金的成分、组织和性能间的关系	44
2 金属的塑性变形与再结晶	47
2.1 金属的塑性变形	47
2.1.1 金属单晶体的塑性变形	47
2.1.2 多晶体金属的塑性变形	49
2.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	49
2.2.1 冷塑性变形对组织结构的影响	50
2.2.2 冷塑性变形对性能的影响	51

2.3 回复与再结晶	52
2.3.1 回复	52
2.3.2 再结晶	52
2.3.3 晶粒长大	53
2.4 金属的热塑性加工	53
2.4.1 热加工与冷加工的区别	53
2.4.2 热加工对金属组织和性能的影响	54
3 钢的热处理	55
3.1 钢在加热时的转变	55
3.1.1 奥氏体的形成过程	55
3.1.2 奥氏体晶粒的大小及其控制	57
3.2 钢在冷却时的组织转变	59
3.2.1 过冷奥氏体的等温转变	59
3.2.2 过冷奥氏体的连续冷却转变	65
3.3 钢的退火和正火	70
3.3.1 钢的退火	70
3.3.2 钢的正火	71
3.4 钢的淬火	72
3.4.1 淬火的目的是	72
3.4.2 淬火温度的选择	72
3.4.3 淬火冷却介质	73
3.4.4 常用淬火方法	74
3.4.5 钢的淬透性与淬硬性	74
3.5 钢的回火	77
3.5.1 回火的目的	77
3.5.2 淬火钢在回火时的组织和性能变化	78
3.5.3 回火的分类和应用	78
3.5.4 钢的回火脆性	79
3.5.5 淬火、回火时常见的工艺缺陷	80
3.6 钢的表面淬火	80
3.6.1 火焰加热表面淬火	81
3.6.2 感应加热表面淬火	81
3.7 钢的化学热处理	82
3.7.1 钢的渗碳	82
3.7.2 钢的氮化	84
3.7.3 钢的碳氮共渗	85

4 常用金属材料	87
4.1 工业用钢	87
4.1.1 钢的分类和牌号	87
4.1.2 合金元素在钢中的作用	89
4.1.3 结构钢	90
4.1.4 工具钢	96
4.1.5 特殊性能钢	101
4.2 铸 铁	104
4.2.1 铸铁的石墨化	104
4.2.2 常用铸铁	105
4.2.3 合金铸铁	111
4.3 有色金属及其合金	113
4.3.1 铝及铝合金	113
4.3.2 铜及铜合金	118
4.3.3 滑动轴承合金	121
5 非金属材料	125
5.1 高分子材料	125
5.1.1 高分子材料的基本知识	125
5.1.2 高分子材料的性能	126
5.1.3 常用的高分子材料	127
5.2 陶瓷材料	131
5.2.1 陶瓷材料的基本知识及分类	131
5.2.2 陶瓷材料的性能	132
5.2.3 常用陶瓷材料	132
5.3 复合材料	133
5.3.1 复合材料的基本知识	133
5.3.2 复合材料的性能	134
5.3.3 常用的复合材料	134
6 机械零件失效与选材	136
6.1 机械零件失效概述	136
6.1.1 机械零件失效形式	136
6.1.2 机械零件失效的原因	136
6.2 材料选择原则	137
6.2.1 使用性能原则	137

6.2.2	工艺性能原则	137
6.2.3	经济性原则	138
6.3	典型零件选材实例分析	138
6.3.1	齿轮类零件选材	139
6.3.2	轴类零件选材	142
6.3.3	其他常用机械零件选材	145
参考文献		147

绪 论

A 机械工程材料的分类与应用

材料是人类发展的重要物质基础，是人类文明进步的里程碑。时代的发展需要材料，而材料又推动时代的发展。当今，人们已经把材料视为现代科学技术与文明的支柱之一。

现代材料的种类和分类方法繁多。通常所说的机械工程材料是指用于机械、电气、建筑、化工、航空航天等工程领域的材料。按化学成分和结合键的不同，机械工程材料一般分为金属材料和非金属材料两大类。

a 金属材料

金属材料是指具有金属性质的材料。按化学成分的不同，金属材料一般分为黑色金属材料 and 有色金属材料两大类。

(1) 黑色金属材料。黑色金属材料是指铁和以铁为基体的合金，即钢铁材料。黑色金属一般分为钢和铸铁两大类。钢按照化学成分可分为碳素钢、合金钢，按照用途又分为结构钢、工具钢和特殊性能钢等。铸铁可分为灰口铸铁、可锻铸铁和球墨铸铁等。黑色金属材料由于具有优良的力学性能和低廉的价格，在机械工程材料中所占比重最大。

(2) 有色金属材料。有色金属材料是指除铁和以铁为基体的合金以外的所有金属及其合金。有色金属按其性质、用途、产量及其在地壳中的储量状况，一般分为有色轻金属（如铝、镁等）、有色重金属（如铅、锡等）、贵金属（如金、银等）、稀有金属（如钛、钒、钼等）和半金属（如硅、硼等）五大类。在有色金属材料中，铝、铜及其合金用途最广。

金属材料由于具有良好的综合性能，在机械工程材料中用途最广，用量也最大，用量约占机械工程材料的 80% 以上。

b 非金属材料

非金属材料是指由非金属元素或化合物构成的材料。它主要包括高分子材料、陶瓷材料和复合材料三大类。

(1) 高分子材料。高分子材料又称聚合物材料，它的主要成分为碳和氢。按用途和使用状态，高分子材料一般分为橡胶、塑料、合成纤维和胶黏剂四大类。高分子材料的密度较小、耐腐蚀，常用于化工、机械、航空航天等领域。

(2) 陶瓷材料。陶瓷材料是指硅酸盐，金属与非金属元素的氧化物、氮化物、碳化物等。它一般分为普通陶瓷、特种陶瓷和金属陶瓷三大类。陶瓷材料硬度高、耐腐蚀、绝缘性好，常用于电器、化工、航空航天等领域。

(3) 复合材料。复合材料是指两种或两种以上性质不同或组织结构不同的材料，以宏观或微观的形式组合在一起而构成的材料。复合材料一般分为树脂基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料三大类。复合材料一般密度较小，比强度和比刚度高，发挥了组

成材料的性能优点,主要用于航空航天等领域。

B 金属材料成分、组织、结构、性能间的关系

材料成分是指材料中含有各种元素的质量分数。每种材料有若干个牌号,每个牌号都有固定的成分。例如 45 钢含有 0.45% C,其余为 Fe; 40Cr 钢含有 0.40% C, 1% Cr, 其余为 Fe。

材料的组织是指把材料制备成试样,在显微镜下观察到的图像,又称显微组织或组织。

材料的结构是指材料原子(分子或离子)排列的“格式”。

材料的性能包括使用性能和工艺性能。材料的使用性能是指材料在使用时表现出的性能,包括力学性能、物理性能和化学性能。反映材料力学性能的指标有强度、硬度、塑性、韧性等,反映材料物理性能的主要指标有熔点、导热性、导电性、密度、热胀性和磁性等,反映材料化学性能的主要指标有耐蚀性、耐热性和耐磨性等。材料的工艺性能是指材料在加工时表现出的性能,包括铸造性、可锻性、切削加工性、焊接性和热处理工艺性等。

实践和研究表明,金属材料的成分、组织、结构与性能间的关系及其变化是有一定规律的。例如,若材料的成分相同、组织相同、结构相同,则其性能一定相同;若材料的成分、组织、结构中任何一项或几项不同,则其性能一定不同。也就是说,金属材料的成分、组织、结构决定了金属材料的性能,材料的性能又决定了材料的用途。因此,生产中人们总是通过改变材料成分、组织、结构等工艺方法来改变材料的性能。其他机械工程材料的成分、组织、结构和性能也有其内在的规律。

C 课程的性质、内容与任务

“机械工程材料”是机械类、近机类专业的一门技术基础课,也是无机非金属材料等材料类专业的一门专业课。

该课程的主要内容包括金属学基础、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、常用金属材料、非金属材料、机械零件失效与选用。

该课程的任务是通过教学,使学生获得有关机械工程材料的基本理论和基本知识,初步掌握常用机械工程材料的成分、组织、结构及其与性能间的相关规律,以及改变常用材料成分、组织、结构的工艺方法,常见工件选材用材的基本知识。在机械设计和选材用材过程中,基本做到正确选材,合理用材,避免“小材大用”或“大材小用”;基本做到正确选择工件加工方法,妥善安排制订加工工艺路线。同时也为后继有关课程的学习奠定基础。

1 金属学基础

金属材料的成分、组织、结构决定了材料的性能，而且金属材料的成分、组织、结构和性能间的关系有着其内在规律。本章以金属材料为例，介绍成分、组织、结构和性能间的关系及有关的基础知识。

1.1 金属的晶体结构

1.1.1 晶体与非晶体

固体按其原子（或分子、离子）聚集状态的不同，分为晶体和非晶体两类。

(1) 晶体。晶体是质点（原子、分子或离子，下同）在三维空间按一定几何规律作周期性重复排列所形成的物体，如结晶盐、天然金刚石、水晶和所有金属等。

(2) 非晶体。非晶体是质点在三维空间无规律堆积在一起所形成的物体。如普通玻璃、石蜡等。

(3) 晶体与非晶体的特征与区别。

1) 质点排列：晶体质点规则排列，有规则外形（金属等除外）；非晶体质点无规则排列，无规则外形。

2) 熔点：晶体有固定熔点；非晶体无固定熔点。

3) 各向性能：晶体各向异性；非晶体各向同性。

1.1.2 理想金属的晶体结构

所谓的“理想金属”只是为了研究问题方便而进行的一种假设，即假设存在一种没有缺陷的单晶体的纯金属，我们称它为理想金属。

1.1.2.1 金属原子的构造与键合方式

(1) 金属原子的构造特点。固态金属是晶体，其原子的构造如图 1-1 所示。

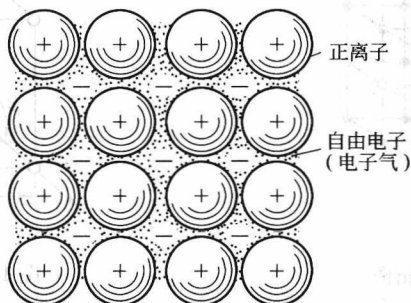


图 1-1 金属键模型示意图

1) 自由电子。金属原子最外层价电子数少, 与原子核的结合力弱, 易摆脱原子核的束缚而成为“自由电子”。

2) 正离子。金属原子因为失去电子而成为在原位置上高频振动的正离子。

3) 电子气。“自由电子”在正离子间穿来穿去, 为整个金属共有, 形成“电子气”。

(2) 金属键。金属晶体是靠正离子和自由电子的吸引力、离子与离子、电子与电子的排斥力的平衡来结合的, 这种结合形式称为金属键。

(3) 金属具有的特性及其原因。金属晶体以金属键结合, 因此金属(晶体)除了具有一般晶体的特点外, 还具有一些特性, 如有光泽, 有良好的导电性、导热性、塑性, 有正的电阻温度系数(与非金属晶体的根本区别)。

1) 导电性: 自由电子在电场作用下做定向移动形成电流, 即导电。

2) 正的电阻温度系数: 温度越高, 正离子在固定位置上的振动幅度和频率越大, 阻碍电子通过的作用越大, 即电阻越大。

3) 导热性: 自由电子的自由运动和正离子的振动都能传递热量, 即导热。

4) 良好的塑性: 当金属发生塑性变形, 即一部分相对另一部分滑移后, 正离子与自由电子间仍然保持金属键结合。

5) 不透明性: 自由电子吸收可见光能量。

6) 金属的光泽: 光线照到金属上, 原子内层电子吸收能量跃到外层。当跃到外层的电子又回到内层时, 将以电磁波的形式放出能量, 表现出金属的光泽。

1.1.2.2 金属晶体结构的基本概念

(1) 晶体结构。晶体中原子(离子或分子)在三维空间的排列形式称为晶体结构, 如图 1-2 所示。

(2) 晶格。把晶体中的原子(离子或分子)抽象为几何点, 并用假想的直线连接起来, 所形成的空间格子称为晶格, 如图 1-3 所示。

(3) 结点。晶格中表示原子(离子或分子)所在位置的几何点称为结点。

(4) 晶胞。能够反映晶格中原子排列特征的最小几何单元称为晶胞, 如图 1-4 所示。

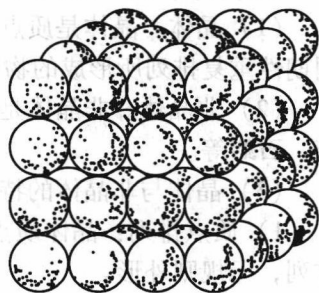


图 1-2 简单立方晶体结构

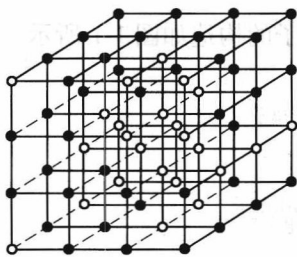


图 1-3 简单立方晶格

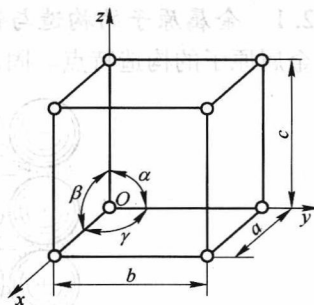


图 1-4 简单立方晶胞

从图 1-3、图 1-4 可以看出晶胞和晶格的关系, 即晶胞是构成晶格的最基本单元; 晶

格是晶胞在三维空间的重复排列。

研究晶胞的意义在于晶胞能够描绘晶体中原子的排列规律,因此研究晶体结构只要研究其中一个晶胞即可。

(5) 晶格常数。如图 1-4 所示,表示晶胞的大小和形状需要晶胞各边尺寸 a 、 b 、 c 和各边夹角 α 、 β 、 γ 六个参数。其中 a 、 b 、 c 称为晶格常数,单位为 nm。

如果晶胞的 $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$, 则该晶格称为简单立方晶格,如图 1-3、图 1-4 所示。

(6) 晶面。通过晶格中任意三个及以上原子的中心所构成的平面称为晶面。

(7) 晶向。通过晶格中任意两个及以上原子的中心所连成的带有方向的直线称为晶向。

(8) 晶胞原子数。一个晶胞内所包含的原子数目称为晶胞原子数。

(9) 原子半径。晶胞中接触排列的两个原子之间平衡距离的一半称为原子半径。它与晶格常数大小成正比。若一种金属具有几种晶体结构,其处于不同晶体结构时的原子半径是不同的。

(10) 致密度。晶胞中原子所占体积与晶胞体积之比的百分数称为晶格的致密度,即

$$K = \frac{nV_1}{V}$$

式中 K ——晶格的致密度;

V_1 ——每个原子的体积,其值为 $\frac{4}{3}\pi r^3$ (r 为原子半径);

n ——晶胞实际包含的原子数;

V ——晶胞的体积。

K 值越大,说明晶格中原子排列得越紧密。

(11) 配位数。晶格中任一原子周围最邻近且等距离的原子个数。配位数越大,说明晶格中原子排列得越紧密。

1.1.2.3 金属中常见的三种晶格结构

因为晶体的晶格类型或常数不同,晶体的力学性能、物理性能和化学性能也不同,所以,人们研究晶体结构的目的是要找出晶体结构与性能之间的关系,以便合理利用。

晶体共有 14 种晶格,分为 7 个晶系。金属中常见的体心立方、面心立方、密排六方三种晶格结构约占金属晶格的 90% 以上。

(1) 体心立方晶格。体心立方晶胞模型如图 1-5 所示。

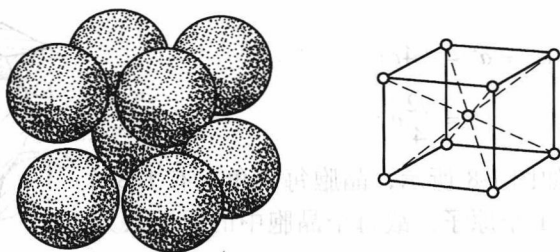


图 1-5 体心立方晶胞

- 1) 晶胞构成。由构成立方体的 8 个原子和立方体中心的 1 个原子构成。
- 2) 晶格常数。 $a = b = c$, 用 a 表示。
- 3) 原子半径。如图 1-6 所示, 晶胞对角线上的原子是接触排列。故有:

$$a^2 + a^2 + a^2 = (4r)^2$$

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

- 4) 晶胞原子数。如图 1-6 所示, 晶胞每个角上有 $1/8$ 个原子, 体心有 1 个原子, 故每个晶胞中的原子数为: $8 \times 1/8 + 1 = 2$ 个。

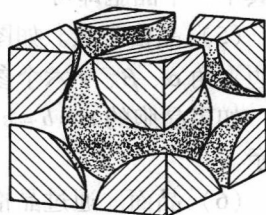


图 1-6 体心立方晶胞

- 5) 晶格的致密度。按致密度公式计算有:

$$K = 2 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4}a \right)^3 / a^3 = 68\%$$

这说明晶格中有 68% 的体积被原子占有, 其余 32% 为空隙。

- 6) 配位数。晶格中任一原子周围最邻近且等距离的原子数 8。

具有体心立方晶格的金属有 Fe ($<912^\circ\text{C}$, $\alpha\text{-Fe}$)、Cr、Mo、W、V 等。

(2) 面心立方晶格。面心立方晶胞模型如图 1-7 所示。

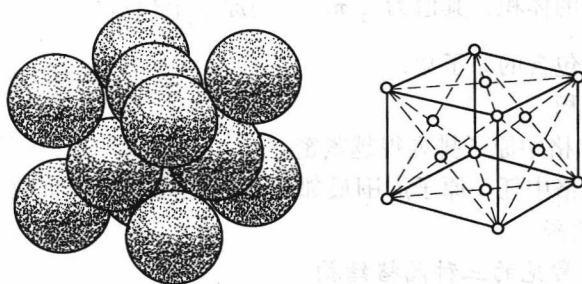


图 1-7 面心立方晶胞

- 1) 晶胞构成。由构成立方体的 8 个原子和每个面中心的 1 个原子构成。
- 2) 晶格常数。 $a = b = c$, 用 a 表示。
- 3) 原子半径。如图 1-8 所示, 晶胞每个面对角线上的原子是接触排列。故有:

$$a^2 + a^2 = (4r)^2$$

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

- 4) 晶胞原子数。如图 1-8 所示, 晶胞每个角上有 $1/8$ 个原子, 每个面的中心有 1 个原子, 故每个晶胞中的原子数为:

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

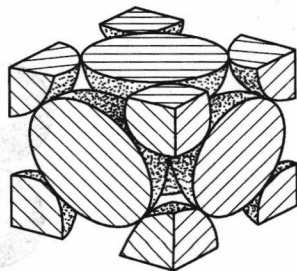


图 1-8 面心立方晶胞

5) 晶格的致密度。按致密度公式计算有:

$$K = 4 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4} a \right)^3 / a^3 = 74\%$$

这说明晶格中有 74% 的体积被原子占有, 其余 26% 为空隙。

6) 配位数。面心立方晶格的配位数为 12。

具有面心立方晶格的金属有 Fe ($>912^{\circ}\text{C}$, $\gamma\text{-Fe}$)、Al、Cu、Ni、Pb 等。

(3) 密排六方晶格。密排六方晶胞模型如图 1-9 所示。

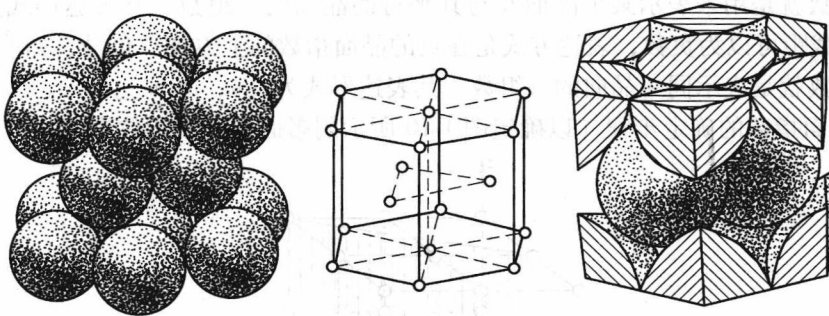


图 1-9 密排六方晶胞

1) 晶胞构成。由 12 个原子构成正六棱柱体, 上下两个六方面的中心各 1 个原子, 正六棱柱体中均布 3 个原子。

2) 晶格常数。 $a = b \neq c$, $c/a = 1.633$ 。

3) 原子半径 $r = a/2$ 。

4) 晶胞原子数。如图 1-9 所示, 晶胞原子数为 $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ 个。

5) 晶格的致密度 $K = 0.74$ 。这说明密排六方晶格与面心立方晶格相同, 晶胞体积的 74% 被原子占有, 其余 26% 为空隙。

6) 配位数为 12。

具有面心立方晶格的金属有 Mg、Zn、Be、Cd 等。

表 1-1 为金属中常见的三种晶体结构的数据。

表 1-1 金属中常见的三种晶体结构的数据

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

从致密度和配位数可见,面心立方晶格和密排六方晶格的原子紧密程度一样,比体心立方晶格紧密。

1.1.2.4 金属晶体中晶面指数、晶向指数

在金属晶体中,由于原子在不同晶面或晶向上的分布及密度不同,所以金属晶体在不同晶面和晶向上的性能也不同。

为了区分不同的晶面和晶向,用一组数字给每个晶面和晶向命名,这组数字分别称为“晶面指数”和“晶向指数”。晶面指数和晶向指数可以表示出晶面或晶向在晶体中的方位。

晶面指数就是用来表示某个晶面及与其平行的晶面的一组数,其表达式为 (h, k, l) 。晶面的截距可以为负数,表达方式是在负的晶面指数的上方加一负号,如 $(\bar{h}, \bar{k}, \bar{l})$ 。

晶向指数就是表示同一晶向的一组数,其表达式为 $[u, v, w]$ 。

(1) 晶面指数的确定步骤(以确定图 1-10 所示阴影面的晶面指数为例)。

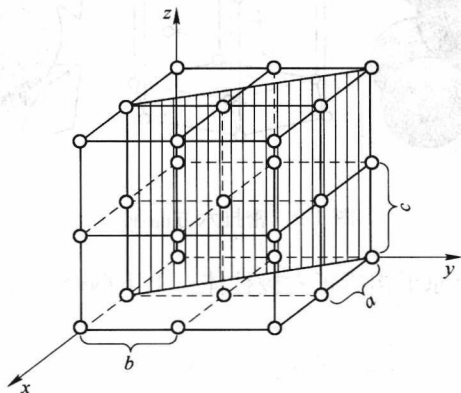


图 1-10 立方晶格中晶面指数的确定

1) 建立坐标:以晶格某原子为原点作坐标轴,分别以 a 、 b 、 c 作 x 、 y 、 z 轴的度量单位。

2) 求截距:求出晶面在三坐标轴上的截距, $1 \ 2 \ \infty$ 。

3) 求倒数:将所得的三个截距值变为倒数, $1 \ \frac{1}{2} \ 0$ 。

4) 化最小整数:将三个倒数化为最小整数, $2 \ 1 \ 0$ 。

5) 加圆括号: (210) 。

(210) 即为所求晶面以及与其平行的所有晶面的晶面指数。

立方晶格三个重要晶面及指数如图 1-11 所示。

在晶体学上,把原子排列相同而彼此不平行的晶面称为晶面族,用大括号表示,即 $\{h, k, l\}$ 。

晶面(晶面族)指数的意义是: (h, k, l) 表示某一晶面及与其平行的所有晶面; $\{h, k, l\}$ 表示原子排列方式相同但位向不同的所有晶面。例如, $\{111\}$ 晶面族包括 (111) 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(\bar{1}1\bar{1})$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 等晶面。

(2) 晶向指数的确定步骤(以确定与图 1-12 中 OB 平行的晶向为例)。

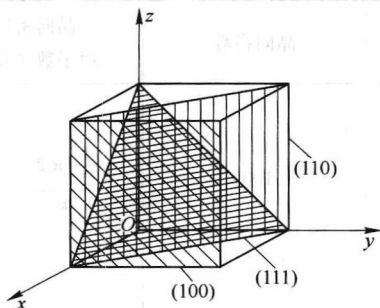


图 1-11 立方晶格中的三种主要晶面

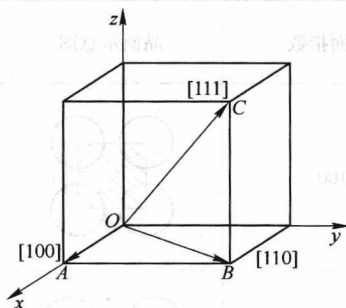


图 1-12 立方晶格中的三种主要晶向

- 1) 建立坐标：通过坐标原点引一直线 OB 平行于待求晶向。
- 2) 求坐标值：求出该直线上任意点坐标值，1 1 0。
- 3) 化最小整数：将三个坐标值按比例化为最小整数，1 1 0。
- 4) 加方括号： $[110]$ 。

$[110]$ 即为所求晶向 OB 以及与其方向相同的所有晶向的晶向指数。

立方晶格三个重要晶向及指数如图 1-12 所示。

在晶体学上，把原子排列相同而彼此方向不同的晶向称为晶向族，用尖括号表示，即 $\langle u, v, w \rangle$ 。

晶向（晶向族）指数的意义是： $[u, v, w]$ 表示某一个晶向及与其方向相同的所有晶向； $\langle u, v, w \rangle$ 表示原子排列相同，但方向不同的所有晶向-晶向族。例如，立方晶格的面对角线 $\langle 110 \rangle$ 晶向族包括 $[110]$, $[101]$, $[011]$, $[\bar{1}10]$, $[\bar{1}01]$, $[0\bar{1}1]$, $[1\bar{1}0]$, $[10\bar{1}]$, $[01\bar{1}]$, $[\bar{1}\bar{1}0]$, $[\bar{1}0\bar{1}]$, $[0\bar{1}\bar{1}]$ 等晶向。

在立方晶系中，晶面指数与晶向指数相同时，则晶面与晶向相互垂直，例如 $(111) \perp [111]$ ，如图 1-11 和图 1-12 所示。

(3) 六方晶系的晶面指数和晶向指数都是四位数，确定时需要建立四个坐标轴的坐标系。

1.1.2.5 金属晶体的原子密度与各向异性

(1) 晶面及晶向的原子密度。

1) 晶面原子密度：单位晶面面积上的原子数。晶面原子密度越大，则该晶面上原子排列得越紧密。不同晶面（族）上的晶面原子密度不同。

2) 晶向原子密度：单位晶向长度上的原子数。晶向原子密度越大，则该晶向上原子排列得越紧密。不同晶向（族）上的晶向原子密度不同。

体心立方晶格中几个主要晶面和晶向的原子密度见表 1-2。

可见，在体心立方晶格中，原子密度最大的晶面是 $\{110\}$ ，原子密度最大的晶向是 $\langle 111 \rangle$ 。

(2) 金属晶体的各向异性。金属晶体沿不同方向表现出的性能不相同的现象称为晶体的各向异性。