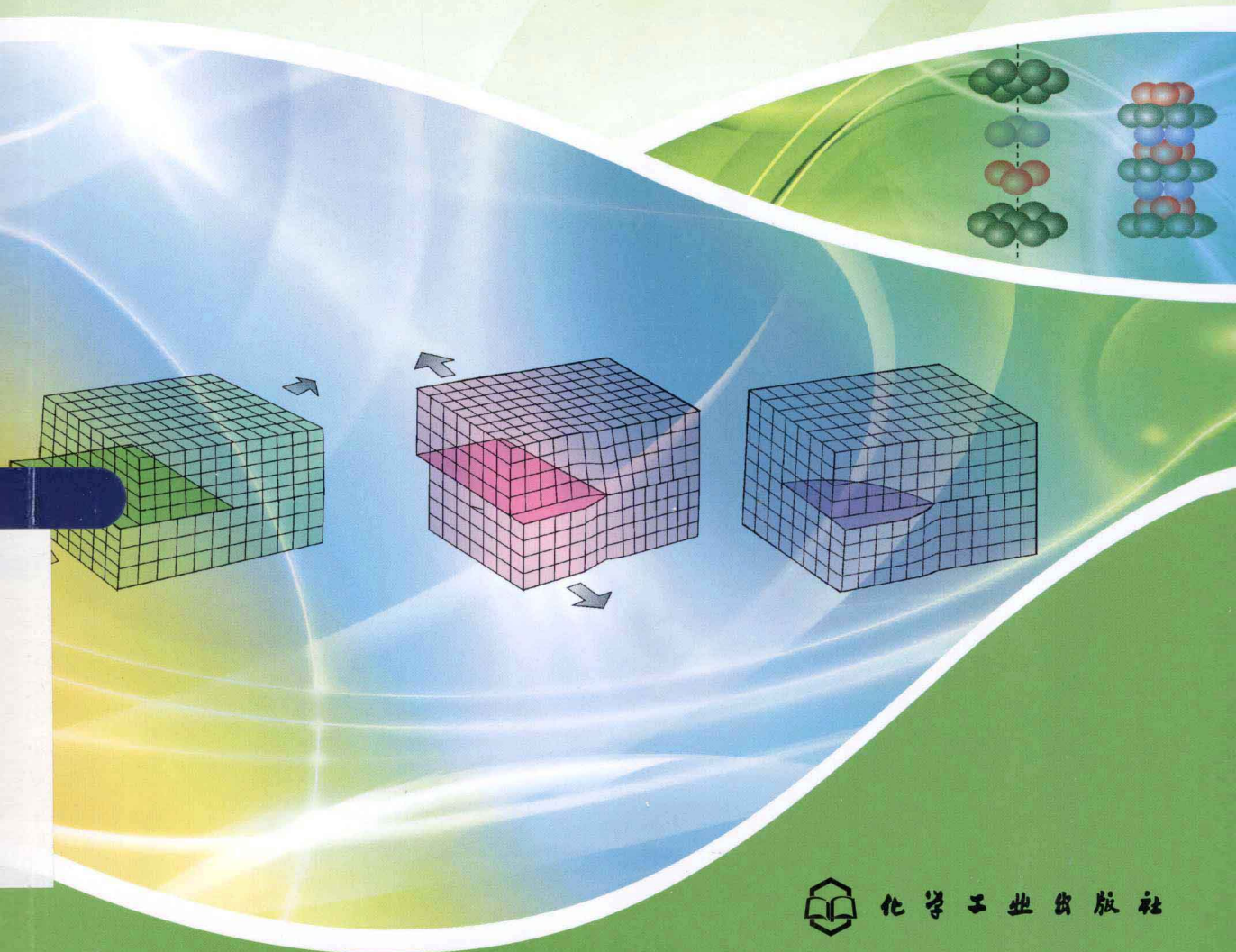


工程材料及机械制造基础精品课程系列教材
普通高等教育“十二五”规划教材



工程材料及成型基础

李镇江 主编 张淼 副主编



化学工业出版社

工程材料及机械制造基础精品课程系列教材
普通高等教育“十二五”规划教材



工程材料及成型基础

李镇江 主编 张 淼 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是根据高等教育“十二五”规划材料类、冶金类和机械类等相关专业人才培养目标制定的基本教学要求,结合作者多年来从事中外合作办学相关专业的教学经验编写而成。本书系统介绍了材料科学的基本知识、常用工程材料及材料成型工艺。全书共分十一章,主要内容有:金属材料结构、纯金属的结晶、二元合金与铁碳合金相图、金属的塑性变形与再结晶、材料中的扩散、钢的热处理、金属工程材料、非金属工程材料、铸造、锻压、焊接。根据教学需要,在附录中安排了相应实验内容,以利于学生掌握相关基本概念和理论。

本书可作为材料成型、金属材料、冶金类、机械类等相关专业本科生的教学用书,也可供相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及成型基础/李镇江主编. —北京:化学工业出版社,2013.7

工程材料及机械制造基础精品课程系列教材
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-17550-2

I. ①工… II. ①李… III. ①工程材料-高等学校-教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第120466号

责任编辑:刘俊之
责任校对:吴静

文字编辑:孙凤英
装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印刷:北京云浩印刷有限责任公司
装订:三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张15 $\frac{3}{4}$ 字数406千字 2013年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.80元

版权所有 违者必究

前言

本书是根据高等教育“十二五”规划材料类、冶金类和机械类等相关专业人才培养目标制定的基本教学要求，结合作者多年来中外合作办学的教学经验编写而成。本书可作为材料成型、金属材料、冶金类、机械类等相关专业的本科生教学用书，也可供相关领域的工程技术人员参考。

本书结合目前教学改革的基本指导思想和原则，以培养新世纪创新型人才为目标，系统介绍了材料科学的基本知识、常用工程材料及材料成型工艺。全书共分十一章，主要内容有：金属材料结构、纯金属的结晶、二元合金与铁碳合金相图、金属的塑性变形与再结晶、材料中的扩散、钢的热处理、金属工程材料、非金属工程材料、铸造、锻压、焊接，建议理论教学 72 学时，实验教学 8 学时。

本书在编写过程中，从教学实际出发，注重做到“清晰基本概念、突出基本理论、强化实际应用”，根据教学需要，在附录中安排了相应实验内容，以利于学生掌握相关基本概念和理论。每章通过“动脑筋”的提问形式引出该章的教学内容，并明确提出学习目标，以利于在授课过程中对学生进行启发式教学，让学生“在思考中学习，在学习中思考”；同时，每章都配以一定的思考与练习，以便于学生课后复习思考，让学生通过习题练习能够对所学知识点得以良好的巩固。通过《工程材料及成型基础》课程的学习，让学生既有一定的理论知识，又有较强的实践能力，培养其系统分析问题、解决问题的能力。

本书由青岛科技大学机电工程学院李镇江任主编，负责全书的统稿及编撰并完成第 2 章的编写；绪论、第 1 章、第 4 章、第 6 章、第 10 章及附录实验部分由张淼编写；第 3 章、第 9 章由孙士斌编写；第 5 章、第 11 章由王为波编写；第 7 章、第 8 章由侯俊英编写。

本书在编写过程中参考了相关文献，在此向其作者表示深切的感谢。

由于编者水平有限，在编写中难免存在错误和不足之处，敬请广大读者批评指正，以求改进。如读者在使用本书过程中有其他意见或建议，恳请向编者（zjli126@126.com）提出并交流，不胜感激。

编者
2013 年 3 月

目 录

绪论

1

- 0.1 材料与人类文明史 1
- 0.2 材料学、工程材料科学与工程材料 2
 - 0.2.1 按材料的化学组成分类 2
 - 0.2.2 按材料的使用性能分类 3

第 1 章 金属材料结构

4

- 1.1 金属的晶体结构 4
 - 1.1.1 晶体的基本概念 4
 - 1.1.2 金属中三种典型的晶体结构 8
- 1.2 实际金属的晶体结构 10
 - 1.2.1 单晶体与多晶体 10
 - 1.2.2 实际金属的晶体缺陷 10
- 思考与练习 15

第 2 章 纯金属的结晶

16

- 2.1 纯金属的结晶现象 16
 - 2.1.1 纯金属结晶的宏观现象 16
 - 2.1.2 纯金属结晶的微观现象 17
- 2.2 金属结晶的条件 18
 - 2.2.1 金属结晶的热力学条件 18
 - 2.2.2 金属结晶的结构条件 19
- 2.3 晶核的形成和长大 19
 - 2.3.1 晶核的形成 19
 - 2.3.2 晶核的长大 22
 - 2.3.3 晶粒大小的控制 27
- 思考与练习 28

3.1 合金的相结构	30
3.1.1 固溶体	31
3.1.2 中间相	32
3.2 二元合金相图与结晶	34
3.2.1 相图的基本知识	34
3.2.2 二元相图的基本类型	37
3.2.3 合金的性能与相图的关系	49
3.3 铁碳合金相图	50
3.3.1 铁碳合金中的基本相	51
3.3.2 铁碳合金相图分析	52
3.3.3 碳含量与铁碳合金组织和性能之间的关系	57
思考与练习	59

4.1 金属的塑性变形	60
4.1.1 弹性变形与塑性变形的微观机理	61
4.1.2 单晶体的塑性变形方式	62
4.1.3 多晶体的塑性变形	63
4.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	64
4.2.1 冷塑性变形对金属组织的影响	64
4.2.2 冷塑性变形对金属性能的影响	65
4.2.3 内应力与冷塑性变形	66
4.3 形变金属的回复与再结晶	67
4.3.1 回复	68
4.3.2 再结晶	68
4.3.3 晶粒长大	69
4.3.4 影响再结晶晶粒大小的因素	69
4.4 金属的热加工	71
4.4.1 金属热加工与冷加工的比较	71
4.4.2 热加工对金属组织和性能的影响	71
思考与练习	73

5.1 扩散定律及其应用	74
--------------------	----

5.1.1	扩散定律	74
5.1.2	扩散方程在生产中的应用举例	76
5.2	扩散机制	78
5.2.1	扩散机制类型	78
5.2.2	扩散系数	79
5.3	影响扩散的因素	80
5.3.1	温度	81
5.3.2	固溶体类型	81
5.3.3	晶体结构	81
5.3.4	浓度	81
5.3.5	合金元素	82
5.3.6	短路扩散	82
5.4	反应扩散	82
	思考与练习	83

第 6 章 钢的热处理

84

6.1	热处理概述	84
6.1.1	热处理的作用	84
6.1.2	热处理的基本类型	85
6.1.3	钢的固态转变及转变临界温度	85
6.2	钢的热处理原理	86
6.2.1	钢在加热时的转变	86
6.2.2	钢在冷却时的转变	90
6.3	钢的热处理工艺	97
6.3.1	钢的退火和正火	97
6.3.2	钢的淬火	100
6.3.3	钢的回火	105
6.4	钢的表面热处理	107
6.4.1	钢的表面淬火	107
6.4.2	化学热处理	109
6.5	钢的其他热处理工艺	110
6.5.1	钢的形变热处理	110
6.5.2	钢的时效处理	111
	思考与练习	113

第 7 章 金属工程材料

115

7.1	工业用钢	115
7.1.1	碳素钢	116

7.1.2 合金钢	120
7.2 铸铁	131
7.2.1 铸铁的石墨化与分类	131
7.2.2 常用铸铁	132
7.2.3 合金铸铁	136
7.3 有色金属及合金	137
7.3.1 铝及铝合金	137
7.3.2 铜及铜合金	140
7.3.3 钛及钛合金	143
7.3.4 镁及镁合金	144
思考与练习	146

第 8 章 非金属材料

147

8.1 聚合物材料	147
8.1.1 塑料	147
8.1.2 橡胶	152
8.2 无机非金属材料	155
8.2.1 陶瓷	155
8.2.2 玻璃	159
8.2.3 硅酸盐水泥	162
8.3 复合材料	164
8.3.1 复合材料的概念	164
8.3.2 复合材料的分类	164
8.3.3 复合材料的性能	165
8.3.4 复合材料的成型方法	165
8.3.5 复合材料的应用	165
8.3.6 复合材料的发展	166
思考与练习	167

第 9 章 铸造

168

9.1 铸造工艺基本原理	169
9.1.1 液态合金的充型能力	169
9.1.2 合金的收缩	171
9.2 铸造成型方法	174
9.2.1 砂型铸造	174
9.2.2 特种铸造	177
9.2.3 铸造方法的选择	181
9.3 铸件的结构设计	181

9.3.1 铸造工艺对铸件结构的要求	181
9.3.2 合金铸造性能对铸件结构的要求	182
思考与练习	183

第 10 章 锻压

184

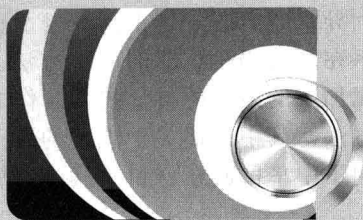
10.1 锻压工艺基础	185
10.1.1 锻压的基本成型方法	185
10.1.2 坯料的加热和锻件的冷却	185
10.2 常用锻造方法	188
10.2.1 自由锻	188
10.2.2 模锻	192
10.3 板料冲压	195
10.3.1 板料冲压的基本工序	196
10.3.2 冲床	198
10.3.3 冲模	199
思考与练习	200

第 11 章 焊接

201

11.1 焊接理论基础	202
11.1.1 焊接电弧	202
11.1.2 焊接的化学冶金过程	202
11.1.3 焊接接头的组织和性能	204
11.2 焊接成型方法	205
11.2.1 熔化焊	205
11.2.2 压力焊	213
11.2.3 钎焊	216
11.3 金属材料的焊接	217
11.3.1 金属材料的焊接性	217
11.3.2 常用金属材料的焊接	218
11.4 焊接结构工艺性	222
11.4.1 焊接应力和变形	222
11.4.2 焊接接头的设计	225
11.4.3 焊接缺陷	227
11.4.4 焊接检验	229
11.5 现代焊接技术新进展	230
思考与练习	232

实验一	金相试样制备及金相显微镜的使用	233
实验二	铁碳合金平衡组织观察	237
实验三	碳钢的热处理工艺、组织观察及硬度测定	238
实验四	常用金属材料组织观察	240



动脑筋

找一个生活中您熟悉的某种制品或零件，根据常识您认为它是用什么材料制作的，为什么用这种材料？是用什么方法做出来的，为什么采用这种成型方法？



学习目标

- 了解材料的发展史。
- 了解工程材料与成型工艺的概念与分类及其在机械制造过程中的地位和作用。

0.1 材料与人类文明史

纵观人类利用材料的历史，可以清楚地看到每一类重要新材料的发现和应⤵用，都会引起生产技术的革命，并大大加速社会文明发展的进程。材料是人类生活和从事生产的物质基础，是衡量人类社会文明程度及生产力发展水平的标志。

中华民族在材料生产及其成型加工工艺技术方面取得了辉煌的成就。我国原始社会后期开始有陶器，早在仰韶文化和龙山文化时期，制陶技术已经很成熟。我国的青铜冶炼开始于夏代，到了距现在 3000 多年前的殷商、西周时期，技术已达当时世界高峰，用青铜制造的工具、食具、兵器和车马饰，得到普遍应用。湖北江陵楚墓中发现的埋藏 2000 多年仍金光闪闪的越王勾践宝剑，陕西临潼秦皇陵陪葬坑发现的工艺复杂、制作精美的铜车马等，都显示了当时制作工艺的精细。春秋战国时期，我国开始大量使用铁器，白口铸铁、可锻铸铁相继出现。1953 年从河北兴隆地区发掘出来的战国铁器遗址中，就有浇铸农具用的铁模子，说明当时已掌握铁模铸造技术，随后出现了炼钢、锻造、钎焊和退火、淬火、正火、渗碳等



热处理技术。用现代技术对古代宝剑进行检验，揭开了宝剑在阴暗潮湿的地下埋藏 2000 多年仍保持通体光亮锋利异常的奥妙，越王剑经过了硫化处理，秦皇陶俑剑采用了钝化处理技术，这些表面处理技术在现代仍是重要的防护方法。明朝宋应星所著《天工开物》，是举世公认的有关金属加工的最早的科学技术著作之一，书中记载了冶铁、铸造、锻造、淬火等各种金属加工的方法，其中记述关于锉刀的制造、翻修和热处理工艺与今日相差无几。上述史实，生动地说明了中华民族在材料及其成型加工方面对世界文明和人类进步作出的卓越贡献。

进入 20 世纪后半叶，新材料研制日新月异，出现了高分子材料时代、半导体材料时代、先进陶瓷材料时代、复合材料时代、人工合成材料时代和纳米材料时代。材料发展进入了丰富多彩的新时期。

今天人类正处在人工合成材料、机敏智能材料的时代。目前，材料的品种、数量和质量已是衡量一个国家科学技术和国民经济发展水平及国防力量的重要标志之一。

人类从钻木取火、油灯照明至核能发电，从人力车、马车到宇宙飞船，从弓箭、火炮到巡航导弹……充分反映了制造生产工具的材料所发挥的重要作用。近代科学技术的发展足迹时刻记录着材料所做出的卓越贡献。18 世纪 60 年代蒸汽机的出现引发了以蒸汽为动力的工具自动化。19 世纪 70 年代由于电磁场理论的发展而导致发电机、电动机的大量采用，从而出现了以电为动力的工业电气化。20 世纪四项重大发现，即原子能、半导体、计算机、激光器的发展及应用，带动了高度信息的工业自动化。如果没有钢铁材料，没有有色金属材料以及非晶、微晶、纳米材料、陶瓷、高分子材料及人工合成材料提供物质保证，这一切均是不可能的。材料、能源、信息已被誉为现代科学技术发展的三大支柱。可以预见，随着科学技术及国民经济的发展，材料将起着愈来愈大的作用，21 世纪，材料科学必将在当代科学技术迅猛发展的基础上，朝着精细化（加工技术手段精、组织越来越细化）、高功能化、超高性能化、复杂化（复合化和杂化）、智能化、生态环境化的方向发展，从而为人类社会的物质文明建设作出更大贡献。与此相应，关于材料科学方面的研究已成为国际、国内科学研究中最重要的领域之一。

0.2 材料学、工程材料学与工程材料

材料学是研究所有固体材料的成分、组织和性能之间关系的一门科学，而“工程材料学”则是材料科学的一部分，它是以工程材料为研究对象，阐述工程材料的成分、组织和性能之间关系的学科。工程材料是指与工程制造有关的材料，主要应用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域。

工程材料种类繁多，有许多不同的分类方法。

0.2.1 按材料的化学组成分类

(1) 金属材料 金属材料可分为黑色金属材料（钢和铸铁）及有色金属材料（除钢铁之外的金属材料）。有色金属材料种类很多，按照它们的特性不同，又可分为轻金属、重金属、贵金属、稀有金属和放射性金属等多种。目前金属材料仍然是应用最广泛的工程材料。

(2) 无机非金属材料 无机非金属材料包括水泥、玻璃、耐火材料和陶瓷等。它们的主要原料是硅酸盐矿物，又称硅酸盐材料，因不具备金属性质亦称无机非金属材料。



(3) 高分子材料 高分子材料按材料来源可分为天然高分子材料(蛋白、淀粉、纤维素等)和人工合成高分子材料(合成塑料、合成橡胶、合成纤维)。按性能及用途可分为塑料、橡胶、纤维、胶黏剂、涂料。

(4) 复合材料 由于多数金属材料不耐腐蚀、无机非金属材料脆性大、高分子材料不耐高温,人们把上述两种或两种以上的不同材料组合起来,使之取长补短、相得益彰就构成了复合材料。复合材料由基体材料和增强材料复合而成。基体材料有金属、塑料、陶瓷等,增强材料有各种纤维和无机化合物颗粒等。

0.2.2 按材料的使用性能分类

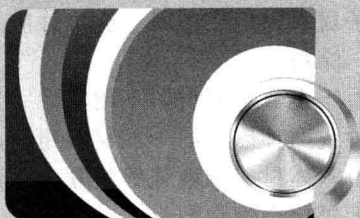
(1) 结构材料 结构材料是以强度、刚度、塑性、韧性、硬度、疲劳强度、耐磨性等力学性能为性能指标,用来制造承受载荷、传递动力的零件和构件的材料。其可以是金属材料、高分子材料、陶瓷材料或复合材料。

(2) 功能材料 功能材料是以声、光、电、磁、热等物理性能为性能指标,用来制造具有特殊性能的元件的材料,如大规模集成电路材料、信息记录材料、光学材料、充电材料、激光材料、超导材料、传感器材料、储氢材料等都属于功能材料。目前功能材料在通信、计算机、电子、激光和空间科学等领域中扮演着极重要的角色。



工程材料及成型基础
GONGCHENG CAILIAO JI
CHENGXING JICHU

第 1 章



金属材料结构



动脑筋

为什么我们常见的材料各自有不同的性能呢？其取决于什么？



学习目标

- 通过对金属晶体结构和晶体缺陷的学习，了解晶体中原子结合键的特点。
- 理解金属晶体结构和晶体缺陷对其性能的影响。
- 掌握晶体与非晶体、晶体结构以及单晶体与多晶体和晶体缺陷的相关概念。

1.1 金属的晶体结构

1.1.1 晶体的基本概念

1.1.1.1 晶体和非晶体

固态物质按其内部粒子的聚集状态可分为晶体和非晶体两大类。

原子或分子在空间呈周期性规则排列的物质称为晶体，如金刚石、石墨和固态金属及其合金等。原子或分子呈无规则排列或短程有序排列的物质称为非晶体，如松香、塑料、普通玻璃、沥青、石蜡等。

因为晶体与非晶体的原子排列方式不同，所以两者在性能上的表现有所不同。晶体一般具有规则的外形，有固定的熔点，且单晶体性能上表现出各向异性；非晶体没有固定的熔点，热导率和热膨胀系数均小，组成的变化范围大，在各个方向上原子的聚集密度大致相同，性能上表现出各向同性。

晶体与非晶体在一定条件下是可以转化的。有些金属液体极快速冷却可以凝固成非晶态金属，而普通玻璃高温加热后长时间保温可以形成晶态玻璃。

1.1.1.2 晶格、晶胞和晶格常数

为了便于分析晶体中的原子排列情况，把晶体中的原子（离子、分子或原子团）抽象成几何质点，称之为阵点。这些阵点可以是原子的中心，也可以是彼此等同的原子群的中心，所有阵点的物理环境和几何环境都相同。由这些阵点有规则地周期性重复排列所形成的三维空间阵列称为空间点阵（如图 1-1 所示）。用假想的直线将阵点在空间的三个方向上连接起来而形成的空间格架，称为晶格（如图 1-2 所示），晶格能够形象地表示晶体中原子的排列规律。

从晶格中提取能够完全反映空间晶体结构特征的最基本的几何单元，称之为晶胞（如图 1-3 所示），晶胞在三维空间的重复排列就构成晶格并形成晶体。晶胞各棱边长度分别用 a 、 b 、 c 表示，通常称为晶格常数或点阵常数；棱边之间夹角分别用 α 、 β 、 γ 表示，又成为棱间夹角或轴间夹角。晶胞的几何形状和大小常以晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 和棱间夹角 α 、 β 、 γ 表示。

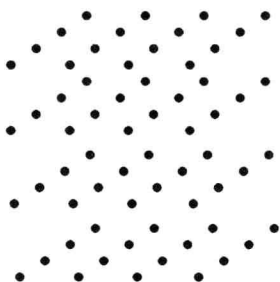


图 1-1 空间点阵

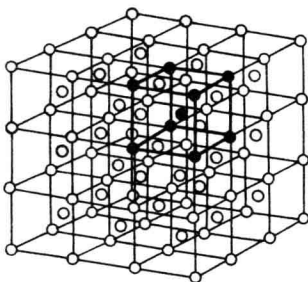


图 1-2 晶格

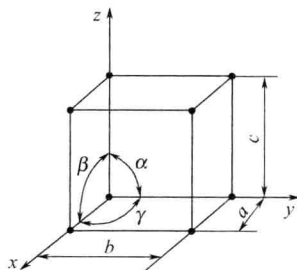


图 1-3 晶胞

根据晶胞的晶格常数和棱间夹角的相互关系分析所有的晶体，发现它们的空间点阵可分为 14 种类型，称为布拉菲点阵；进一步根据空间点阵的基本特点进行归纳整理，可将 14 种空间点阵归属于 7 个晶系，如表 1-1 所示。

1.1.1.3 晶面和晶向及其标定

晶体中由一系列原子组成的平面称为晶面，任意两个原子之间连线所指的方向称为晶向。由于金属的许多性能和金属中发生的许多现象都与晶体中的特定晶面和晶向有关，所以晶面和晶向的表达就具有特别的重要性，用数字符号定量地表示晶面或晶向，这种数字符号称为晶面指数 (hkl) 或晶向指数 $[uvw]$ 。

现以立方晶格为例，说明晶面指数和晶向指数的标定步骤。

(1) 晶面指数的标定

① 设坐标 以晶胞的某一顶点作为空间坐标系的原点 O （坐标原点应位于待定晶面之外），以互相垂直的三个棱边为坐标轴 x 、 y 、 z ，如图 1-4 所示。

② 求截距 以晶胞的棱边长度（晶格常数）

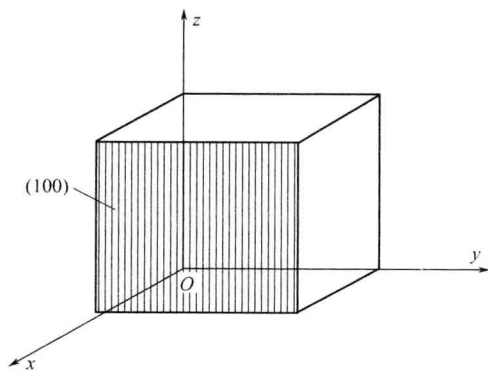


图 1-4 晶面指数标定示意图

表 1-1 7 个晶系和 14 种点阵

晶系和实例	点阵类型			
	简单	底心	体心	面心
三斜晶系 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ $a \neq b \neq c$ $K_2Cr_2O_7$				
单斜晶系 $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ $a \neq b \neq c$ $\beta\text{-S}$				
正交晶系 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $a \neq b \neq c$ $\alpha\text{-S, Fe}_3\text{C}$				
四方晶系 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $a = b \neq c$ $\beta\text{-Sn}$				
立方晶系 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $a = b = c$ Fe, Cr, Ag				
菱方晶系 $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ $a = b = c$ As, Sb, Bi				
六方晶系 $a_1 = a_2 = a_3 \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ Zn, Cd, Mg				

为度量单位,量取某一晶面在三个坐标轴上的截距,图 1-4 阴影所示晶面在三个坐标轴上的截距分别为 1、 ∞ 、 ∞ 。

③ 取倒数 求出截距的倒数,图 1-4 阴影所示晶面截距取倒数为 $1/1$ 、 $1/\infty$ 、 $1/\infty$,即 1、0、0。

④ 化整数、加括号 将三个倒数化成等比例的简单整数,并将所得数依次连写后列入圆括号内,即得到晶面指数,图 1-4 阴影所示晶面的晶面指数为 (100)。

晶面指数的一般表示形式为 (hkl) ,如果所求晶面在坐标轴上的截距为负值,则在相应的指数上方加上负号,如 $(\bar{h}kl)$ 。图 1-5 所示为立方晶格中的一些常见晶面的晶面指数。

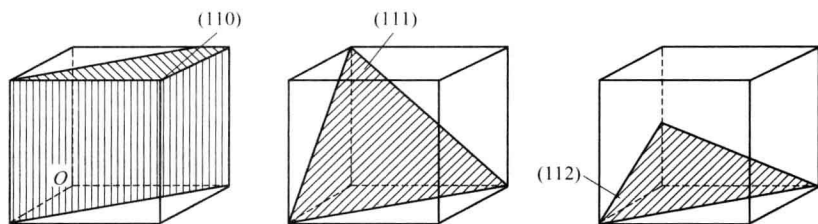


图 1-5 立方晶格中的一些常见晶面的晶面指数

(2) 晶向指数的标定 以图 1-6 中晶向 OA 为例介绍立方晶格中晶向指数的标定步骤。

① 设坐标 把坐标原点放在待标定晶向的任一原子中心处,如图 1-6 所示放在 O 点。

② 求坐标值 以晶格常数为度量单位,找出待标定晶向的另一原子中心在三个坐标轴上的坐标值。图 1-6 中 A 点的坐标值分别为: $x=1$, $y=1$, $z=1$ 。

③ 化整数、加括号 把坐标值化为最小的简单整数,并列在方括号中,即为该晶向的晶向指数,图 1-6 中 OA 的晶向指数为 $[111]$ 。

晶向指数的一般表示形式为 $[uvw]$,如果所求晶向中某一原子点在坐标轴上的坐标值为负值,则在相应的指数上方加上负号,如 $[\bar{u}vw]$ 。图 1-7 所示为立方晶格中的一些常见晶向的晶向指数。

在立方晶系中,由于原子排列具有高度的对称性,故存在着许多原子排列完全相同但不平行的对称晶面(或晶向),通常把这些晶面(或晶向)归结为同一晶面族(或晶向族),表

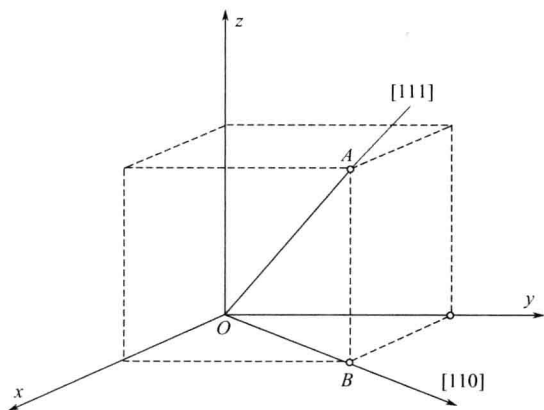


图 1-6 立方晶格中一些晶向的晶向指数

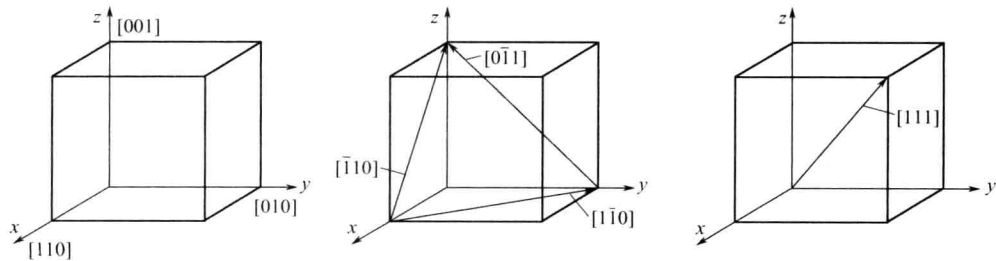


图 1-7 立方晶格中的一些常见晶向的晶向指数