



普通高等教育机电类“十三五”规划教材



机械工程材料与成型技术 (第3版)

刘贯军 李勇峰 主 编
张亚奇 吴婷婷 副主编
徐献忠 主 审

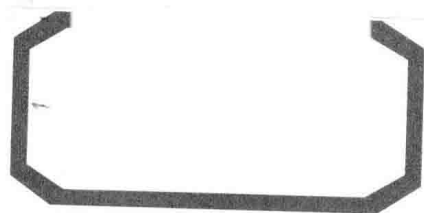
- 精品课程配套教材
- 采用国家最新标准
- 配套习题、答案、课件等教学资源
- 教学资源请登录华信教育资源网 (www.hxedu.com.cn) 免费获取



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



普通高等教育机电类“十三五”规划教材

机械工程材料与成型技术

(第3版)

主 编	刘贯军	李勇峰
副主编	张亚奇	吴婷婷
参 编	付成果	赵红远
	冯宜鹏	李发闯
主 审	徐献忠	



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书根据教育部面向 21 世纪工科本科机械类专业人才培养模式改革要求和新制定的“工程材料及机械制造基础课程教学要求”，并结合培养应用型工程技术人才教学经验编写而成。

全书共 17 章，以“典型材料（名称）→成分特点→组织特点→力学性能→典型用途→工艺性能→成型技术”为主线，重点对金属材料及其成型技术，以及零件选材和成型工艺选择进行了介绍。考虑到近年来增材制造技术的快速发展和日益广泛的实际应用，本版专门增加了“增材制造技术”一章。针对近几年来新材料、新技术在工业生产中的逐步推广应用，本书还对常见的高分子材料、陶瓷材料和复合材料及其成型技术，以及零件选材和成型工艺选择性地进行了介绍。

本书内容广泛、重点突出、实用性强，可作为高等工科院校机械类和近机类各专业学生的教材，也可供高职高专、成人教育学院相关专业学生选用及有关工程技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

机械工程材料与成型技术/刘贯军，李勇峰主编. —3 版. —北京：电子工业出版社，2019.7

普通高等教育机电类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-121-37073-1

I. ①机… II. ①刘… ②李… 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（2019）第 141733 号

策划编辑：李 洁

责任编辑：刘真平 特约编辑：李 姣

印 刷：三河市君旺印务有限公司

装 订：三河市君旺印务有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：22 字数：606 千字

版 次：2011 年 3 月第 1 版

2019 年 7 月第 3 版

印 次：2019 年 7 月第 1 次印刷

定 价：55.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：lijie@phei.com.cn。

前 言

本教材根据教育部面向 21 世纪工科本科机械类专业人才培养模式改革要求和新制定的“工程材料及机械制造基础课程教学要求”，同时结合培养应用型工程技术人才教学经验编写而成。

本教材内容包括机械工程材料和材料成型技术两大部分。除了重点介绍工业生产中广泛应用的金属材料及热处理工艺和成型技术外，还结合近几年新材料与成型新技术在机械零件上的应用情况，从发展的角度介绍了高分子材料、陶瓷材料和复合材料等结构材料的组织与性能特点、用途、选用原则及其常见成型工艺，并对金属材料的表面处理技术和增材制造技术进行了介绍，旨在使学生建立机械产品生产过程的基本概念和知识体系，了解新材料，掌握现代制造和工艺方法，培养学生的工程素质、实践能力和创新设计能力，使学生设计的机械零件结构既满足使用要求，又符合材料成型规律和经济性要求，同时树立从零件选材、成型、加工制造直到报废回收处理全过程的环保理念。

本教材是在电子工业出版社出版、由刘贯军教授主编的《机械工程材料与成型技术》（第 2 版）基础上修订而成的。由于原教材在编写目的、课程体系设计和内容组织上与同类教材相比特色鲜明，深受同行和同学们的好评，所以，本教材延续了第 2 版的基本特色，在内容组织上继续以“典型材料（名称）→成分特点→组织特点→力学性能→典型用途→工艺性能→成型技术”为主线，将工程材料与成型工艺有机结合，一一对应，既相互渗透，又避免重复；同时，紧贴生产实际，对现代工业生产中广泛应用的材料及其成型技术进行介绍，既有一定的理论性和前瞻性，又重视其实际应用。与第 2 版相比，本教材更加突出了实用、够用和管用的指导思想，重点考虑了授课时数因素与学生专业基本需要，对原教材中的前 5 章部分内容及第 9~11、15 章部分内容进行了精简和重新组织，以突出重点；考虑到近年来增材制造技术的快速发展和日益广泛的实际应用，教材也应与时俱进，专门增加了“增材制造技术”一章，这也是对传统材料成型技术的有力补充。另外，为了与实际工作接轨，针对市场上常见的一些国外金属材料如不锈钢、模具钢等牌号，也与国内钢号做了对应表述。全书结构分明，信息量大，每章相对独立又相互衔接，文字叙述力求精练，实用性强。为方便教学和学生自学，本教材各章节还配有 PPT 课件，读者可登录华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）注册后免费下载。

全书共 17 章。参加编写的有河南科技学院刘贯军（绪论、第 5 章）、李勇峰（第 6、10 章）、张亚奇（第 8、11 章）、吴婷婷（第 2、7、15 章）、付成果（第 3、4 章）、赵红远（第 13、14、16 章）、冯宜鹏（第 9 章）、河南工学院李发闯（第 1、12 章）。全书由刘贯军、李勇峰任主编，张亚奇、吴婷婷任副主编。

全书由刘贯军统稿。郑州大学徐献忠教授认真审阅了本书，在此表示感谢。

本教材在编写过程中，参阅了部分相关教材、专著及论文，在此一并向文献作者致以深切的谢意。

本书建议授课学时数为 48~64 学时，实验 4~8 学时。各章学时分配可根据各校实际酌情掌握。

鉴于编者学识有限，书中难免有不足和欠妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2019 年 1 月

目 录

第 0 章 绪论	(1)	3.1.2 奥氏体晶粒长大及其影响因素	(51)
0.1 材料及其成型工艺的发展	(1)	3.2 钢在冷却时的组织转变	(52)
0.2 工程材料的分类	(3)	3.2.1 过冷奥氏体的等温转变	(53)
0.3 材料成型工艺分类	(4)	3.2.2 过冷奥氏体的连续冷却转变	(57)
0.4 本课程教学目的与要求	(4)	3.3 钢的热处理工艺	(58)
第 1 章 材料的结构与性能	(6)	3.3.1 退火	(58)
1.1 金属材料的结构、组织与性能	(6)	3.3.2 正火	(60)
1.1.1 纯金属的晶体结构	(6)	3.3.3 淬火	(61)
1.1.2 合金的晶体结构	(11)	3.3.4 回火	(63)
1.1.3 金属材料的组织	(13)	3.3.5 表面淬火	(65)
1.1.4 金属材料的主要性能	(15)	3.3.6 化学热处理	(66)
1.2 高分子材料的结构与性能	(20)	思考题	(69)
1.2.1 高分子材料的结构	(20)	第 4 章 表面技术	(70)
1.2.2 高分子材料的性能	(22)	4.1 电刷镀	(70)
1.3 陶瓷材料的结构与性能	(24)	4.1.1 电刷镀的原理与特点	(71)
1.3.1 陶瓷材料的结构	(24)	4.1.2 电刷镀工艺及应用	(71)
1.3.2 陶瓷材料的性能	(25)	4.2 热喷涂技术	(72)
1.4 复合材料的结构与性能	(26)	4.2.1 热喷涂技术的原理与特点	(72)
1.4.1 复合材料的结构	(26)	4.2.2 热喷涂工艺及应用	(74)
1.4.2 复合材料的性能	(27)	4.3 气相沉积技术	(75)
思考题	(28)	4.3.1 物理气相沉积	(75)
第 2 章 金属材料的结晶与组织	(29)	4.3.2 化学气相沉积	(78)
2.1 金属的结晶	(29)	4.4 激光表面改性	(80)
2.1.1 纯金属的结晶	(29)	4.5 化学镀	(82)
2.1.2 金属的晶体结构与同素异构转变	(31)	4.5.1 化学镀镍的原理与特点	(82)
2.1.3 铸锭的结构	(32)	4.5.2 化学镀镍工艺及应用	(83)
2.1.4 铸态金属晶粒的细化	(32)	思考题	(84)
2.2 合金的结晶	(34)	第 5 章 金属材料及应用	(85)
2.2.1 合金的结晶过程	(34)	5.1 碳钢	(85)
2.2.2 合金性能与相图的关系	(37)	5.1.1 碳钢的成分与分类	(85)
2.2.3 铁碳合金的结晶	(38)	5.1.2 碳钢的牌号与用途	(86)
思考题	(47)	5.2 合金钢	(90)
第 3 章 钢的热处理	(49)	5.2.1 合金钢的分类与编号	(90)
3.1 钢在加热时的组织转变	(49)	5.2.2 合金结构钢及应用	(91)
3.1.1 奥氏体的形成	(50)	5.2.3 合金工具钢及应用	(103)

5.2.4 特殊性能钢及应用	(112)	第9章 铸造成型	(171)
5.3 铸钢与铸铁	(118)	9.1 铸造工艺基础	(171)
5.3.1 铸钢及应用	(118)	9.1.1 液态合金的充型	(172)
5.3.2 铸铁及应用	(120)	9.1.2 液态合金的凝固与收缩	(174)
5.4 有色金属及合金	(130)	9.1.3 铸造内应力、变形、裂纹和气孔	(177)
5.4.1 铝、铝合金及应用	(130)	9.2 铸造方法及应用	(180)
5.4.2 铜、铜合金及应用	(136)	9.2.1 砂型铸造	(180)
5.4.3 镁、镁合金及应用	(141)	9.2.2 特种铸造	(185)
5.4.4 钛、钛合金及应用	(144)	9.2.3 常见铸造方法的比较及选择	(195)
5.4.5 滑动轴承合金及应用	(145)	9.3 砂型铸造工艺设计	(197)
思考题	(148)	9.3.1 浇铸位置与分型面的选择	(197)
第6章 高分子材料及应用	(151)	9.3.2 铸造工艺参数的选择	(200)
6.1 概述	(151)	9.4 铸造结构设计	(202)
6.1.1 高分子材料的分类	(151)	9.4.1 砂型铸造工艺对铸件结构的要求	(202)
6.1.2 塑料的组成与分类	(152)	9.4.2 合金铸造性能对铸件结构的要求	(205)
6.2 常用工程塑料及应用	(153)	9.5 常用合金铸件的生产特点	(209)
6.2.1 热塑性塑料	(153)	9.5.1 铸铁件的生产	(209)
6.2.2 热固性塑料	(156)	9.5.2 铸钢件的生产	(212)
思考题	(156)	9.5.3 有色合金铸件的生产	(213)
第7章 陶瓷材料及应用	(157)	思考题	(214)
7.1 概述	(157)	第10章 塑性成型	(217)
7.1.1 陶瓷材料及分类	(157)	10.1 金属的塑性变形	(218)
7.1.2 结构陶瓷材料及分类	(157)	10.1.1 金属塑性变形机理	(218)
7.2 常用结构陶瓷材料及应用	(158)	10.1.2 塑性变形后金属的组织性能	(220)
7.2.1 氧化物结构陶瓷材料	(158)	10.1.3 金属的可锻性	(222)
7.2.2 非氧化物结构陶瓷材料	(159)	10.2 锻造	(224)
思考题	(163)	10.2.1 自由锻造	(225)
第8章 复合材料及应用	(164)	10.2.2 模型锻造	(229)
8.1 概述	(164)	10.2.3 胎模锻造	(235)
8.1.1 复合材料的分类	(164)	10.3 板料冲压	(236)
8.1.2 复合材料的特点	(165)	10.3.1 分离工序	(238)
8.2 非金属基复合材料	(165)	10.3.2 成型工序	(242)
8.2.1 聚合物基复合材料及应用	(165)	10.3.3 冲压件结构工艺性分析	(251)
8.2.2 陶瓷基复合材料及应用	(166)	思考题	(254)
8.2.3 碳基复合材料及应用	(168)	第11章 焊接成型	(255)
8.3 金属基复合材料	(168)	11.1 电弧焊	(256)
8.3.1 金属陶瓷	(168)		
8.3.2 铝基复合材料	(169)		
8.3.3 镁基复合材料	(170)		
8.3.4 钛基复合材料	(170)		
思考题	(170)		

11.1.1 电弧焊的工艺基础	(256)	13.2.4 浆料原位固化成型	(304)
11.1.2 焊条电弧焊	(262)	13.3 陶瓷制品的烧结	(305)
11.1.3 埋弧焊	(263)	思考题	(306)
11.1.4 气体保护焊	(265)	第 14 章 复合材料成型	(307)
11.2 其他常用焊接方法	(266)	14.1 复合材料成型工艺特点	(307)
11.2.1 熔焊	(266)	14.2 复合材料成型工艺	(307)
11.2.2 压焊	(272)	14.2.1 金属基复合材料成型工艺	(307)
11.2.3 钎焊	(275)	14.2.2 聚合物基复合材料成型工艺	(310)
11.3 常用金属材料的焊接	(276)	14.2.3 陶瓷基复合材料成型工艺	(313)
11.3.1 金属材料的可焊性	(276)	思考题	(315)
11.3.2 碳钢的焊接	(277)	第 15 章 增材制造技术	(316)
11.3.3 合金结构钢的焊接	(278)	15.1 增材制造原理与技术	(316)
11.3.4 不锈钢的焊接	(279)	15.1.1 增材制造原理	(316)
11.3.5 有色金属的焊接	(280)	15.1.2 增材制造技术	(317)
11.3.6 铸铁的焊补	(282)	15.2 金属增材制造	(320)
11.4 焊件结构设计	(283)	15.2.1 金属增材制造的主要方法	(321)
11.4.1 焊接结构件材料的选择	(283)	15.2.2 金属材料增材制造件的结构工艺性	(325)
11.4.2 焊接方法的选择	(283)	思考题	(327)
11.4.3 焊缝的布置	(285)	第 16 章 机械零件材料与成型方法的选择	(328)
11.4.4 焊接接头的设计	(287)	16.1 机械零件材料与成型方法的选择原则	(328)
思考题	(289)	16.1.1 机械零件材料的选择原则	(328)
第 12 章 工程塑料成型	(290)	16.1.2 机械零件成型方法的选择原则	(330)
12.1 工程塑料成型方法	(290)	16.2 典型机械零件材料与成型方法的选择	(333)
12.1.1 塑料注射成型	(290)	16.2.1 齿轮类零件	(333)
12.1.2 塑料挤出成型	(291)	16.2.2 轴类零件	(335)
12.1.3 塑料压缩成型	(292)	16.2.3 机架、箱体类零件	(337)
12.1.4 其他成型方法	(293)	16.2.4 工程塑料零件	(338)
12.2 工程塑料的结构工艺性	(295)	思考题	(339)
12.2.1 塑件几何形状的设计	(295)	参考文献	(340)
12.2.2 金属嵌件的设计	(297)		
思考题	(298)		
第 13 章 陶瓷材料成型	(299)		
13.1 粉体制备技术	(299)		
13.2 陶瓷制品的成型	(300)		
13.2.1 塑性成型	(300)		
13.2.2 注浆成型	(302)		
13.2.3 压制成型	(303)		

第 0 章 绪 论

材料是人类用来制造各种物品的物质，材料成型是将材料转化为人类所使用物品的最基本方法，是人类生活和生产赖以生存的物质基础和手段。人类社会的文明和发展伴随着材料及其成型工艺的发明和发展。从人类的出现到 21 世纪的今天，人类的文明程度不断提高，材料及材料科学也在不断发展。在人类文明的进程中社会的发展可按材料的使用与发展划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代、钢铁时代、高分子时代、半导体时代、先进陶瓷时代和复合材料时代。今天，材料的发展进入了一个丰富多彩的新时代。

0.1 材料及其成型工艺的发展

材料是人类文明进步的物质基础，材料及其成型方法的发明与发展促进了人类社会的进步。在人类社会的历史进程中，中华民族在材料及其成型工艺发展方面对人类社会做出了重大贡献。

我国在原始社会后期开始有陶器，至仰韶文化（发源于河南，公元前 4000 年—公元前 200 年）和龙山文化（发源于山东、河南等地）时期制陶技术已相当成熟，东汉时期发明了瓷器，成为最早生产瓷器的国家。后来，瓷器于 9 世纪传到非洲东部和阿拉伯国家，13 世纪传到日本，15 世纪传到欧洲。直至今日，中国瓷器仍畅销全球，名扬四海，对世界文明产生了极大的影响。瓷器已成为中国文化的象征，“瓷器”（china）已成为“中国”（China）的代名词。

我国劳动人民创造了灿烂的青铜文化。我国青铜的冶炼在夏朝（公元前 2140 年开始）以前就开始了，到夏商、西周时期已发展到很高的水平。青铜主要用于制造各种工具、食器、兵器。从河南安阳晚商遗址出土的后母戊鼎重达 875kg，外形尺寸为 $1.33\text{m} \times 0.78\text{m} \times 1.10\text{m}$ ，是迄今为止世界上最古老的大型青铜器，在制造时采用了精湛的铸造技术，在泥模塑造、陶范翻制、合范、熔炼、浇铸等铸造全过程中，充分体现了中国古代劳动人民的聪明才智和优秀的技艺。从湖北随县出土的战国青铜编钟（曾侯乙编钟）共计 65 枚，分三层悬挂，其造型壮观、音频准确、铸造精美、音律齐全、音域宽广、音色和美，乐律铭文珍贵，是我国古代文化艺术高度发达的见证。湖北江陵楚墓中发现的埋藏了 2000 多年的越王勾践的宝剑，至今仍异常锋利、寒光闪闪。陕西临潼秦始皇陵出土的大型彩绘铜车马，由 3000 多个零部件组成，综合采用了铸造、焊接、凿削、研磨、抛光及各种连接工艺，结构复杂，制作精美。

我国从春秋战国时期（公元前 770 年—公元前 221 年）已开始大量使用铁器。从兴隆战国铁器遗址中发掘出了浇铸农具用的铁模，说明冶铸技术已由泥砂造型水平进入铁模铸造的高级阶段。到了西汉时期，炼铁技术又有了很大的提高，采用煤作为炼铁的燃料，这要比欧洲早 1700 多年。1989 年，在山西省永济县黄河东岸出土的唐开元十二年铸造的四尊“镇河大铁牛”，每尊高约 1.9m、长约 3m、宽约 1.3m，最重的铁牛为 70t 以上。牛体之宏、分量之重、铁质之优、造型之美、数量之多、工艺之精、历史之久，实属千古佳作。现存于北京大钟寺内明朝永乐年间制造的大钟（重 46.5t），其上遍布经文 20 余万字，其浑厚悦耳的钟声至今仍伴随着华夏子孙辞旧迎新。所有这些均显示出中华民族在材料、成型方法及热处理等方面的卓越成就，以及对

世界文明和人类进步所做出的巨大贡献。春秋时期的《考工记》中关于钟鼎和刀剑不同的铜锡配比的珍贵记载,是迄今为止世界上发现最早的合金配比规律。

我国的锻造技术和焊接技术也有着悠久的历史。在河北藁城出土的商朝铁刃铜钺是我国发现最早的锻件,它表明我国早在 3000 年前就有了锻造和锻焊技术。到了战国时期,锻造工艺已普遍应用于刀剑和一些日常用具的制作中。在河南辉县战国墓中发掘出的殉葬铜器,其耳和足是用钎焊方法与本体连接的。

明朝(1368—1644 年)宋应星所著《天工开物》一书,记载了冶铁、铸钟、锻铁、焊接(锡焊和银焊)、淬火等多种金属成型和改性方法及日用品的生产技术和经验,并附有 123 幅工艺流程插图,是世界上有关金属加工工艺最早的科学论著之一。

丝绸是一种天然高分子材料,它在我国有着悠久的历史,于 11 世纪传到波斯、阿拉伯、埃及,并于 1470 年传到意大利的威尼斯,进入欧洲。中国丝绸质地柔软、色彩鲜艳、美观华丽、光彩夺目,深受世界各国人民的喜爱。

历史充分说明,我们勤劳智慧的祖先在材料的创造和使用上有着辉煌的成就,为人类文明、世界进步做出了巨大贡献。

然而,18 世纪以后,由于长期的封建统治和闭关自守,以及上百年来帝国主义的侵略和压迫,严重束缚了我国科学技术的发展,造成了与工业发达国家之间的巨大差距。

中华人民共和国成立以后,我国的钢铁冶炼技术有了突破性进展,目前,钢产量已跃居世界首位,钢的质量也在一步步接近国际先进水平。目前,我国能够冶炼包括高温合金、精密合金在内的 1000 多个钢种,能够轧制和加工包括板、带、管、型、线、丝等各种形状的 4 万多个品种规格,有 85% 以上的钢材是按国际标准生产的,其中 1/3 以上的产品质量达到国际先进水平。

我国非金属材料的发展也十分迅速,尤其以人工合成高分子材料的发展最为迅速。目前,高分子材料作为结构材料已经在机械、仪器仪表、汽车工业中得到广泛应用。新型陶瓷材料也以其高硬度和耐磨性、绝缘和耐高温等优异性能,成为人们关注的目标,现已成为一种重要的、不可缺少的工程材料。

近十几年来,随着国际局势的发展和变化,为了军事现代化建设,我国在新材料及其成型工艺方面的研究取得了突飞猛进的进展。我国在激光材料、钛合金技术、铁基超导材料及新型有序介孔碳—二氧化硅陶瓷吸波材料等方面的研究都已达到国际先进水平甚至处于领先地位,从而使我国的现代武器装备达到了一个很高的水平。

芳纶纤维是目前极为重要的国防军工材料。它具有超高强度、高弹性模量和耐高温、密度小、耐酸碱等优异性能,其强度是钢丝的 5~6 倍,弹性模量为钢丝或玻璃纤维的 2~3 倍,韧性是钢丝的 2 倍,密度仅为钢丝的 1/5 左右,且绝缘性能良好,抗老化,有很长的使用寿命。芳纶纤维是制造聚合物基和碳基复合材料的增强纤维,其在我国的研制成功标志着我国的导弹和军用飞机性能又上了一个新的台阶。

2006 年 12 月 30 日,由中国第一重型机械集团公司自行设计制造的世界上吨位最大、技术最先进的 15 000t 重型自由锻造水压机试车成功。15 000t 水压机成功试车和投产,是我国继 1958 年研制成功万吨水压机之后的又一重大技术成果,将为生产大型锻件提供重要的条件,最大锻件质量达 600t,极大地提升了电力、冶金、石化、船舶行业设备制造水平,对加快振兴重大装备制造制造业具有重大意义。

2007 年下半年,国家发改委批复了中国第二重型机械集团公司大型模锻压力机建设项目的可行性研究报告,项目拟建设的大型模锻压力机最大压力可达 80 000t,是目前世界上最大的模

锻压力机，超过了此前世界最大的俄罗斯 75 000t 模锻压力机。大型模锻压力机主要用于铝合金、钛合金、高温合金、粉末合金等难变形材料进行热模锻和等温超塑性成型。其锻造特点是可通过大的压力、长的保压时间、慢的变形速度来改善变形材料的致密度，用细化材料晶粒来提高锻件的综合性能，提高整个锻件的变形均匀性，使难变形材料和复杂结构锻件通过等温锻造和超塑性变形来满足设计要求，可节约材料 40%，达到机械加工量少或近净成型目标。等温模锻液压机是航空航天及其他重型机械生产重要锻件的关键设备。

2008 年，国内首台 6000t 快锻机项目建设在宝钢特殊钢分公司启动。该机组投产后，最大锻造锭质量可达 50t，将打破国内大型高端锻件长期依赖进口的局面，届时，我国将具备“大飞机”项目大型钛合金等温锻件的批量生产能力。

随着航空航天、电子、通信等技术及机械、化工、能源等工业的发展，对材料的性能和成型工艺的要求越来越高，传统的单一材料已不能满足使用要求。复合材料以其高的比强度、比刚度及优异的物理、化学性能，特别是其可设计性等引起了人们的高度重视。如玻璃纤维树脂复合材料（玻璃钢）、碳纤维树脂复合材料已应用于航空航天工业中制造卫星壳体、宇宙飞行器外壳、飞机机身、螺旋桨等，在交通运输工业中制造汽车车身、轻型船、艇等，在石油化工工业中制造耐酸、耐碱、耐油的容器及管道等。

总之，材料及其成型技术的发明和发展推动了现代科技的发展，而现代科技的发展又对材料及其成型技术提出了更高的要求，周而复始地推动社会不断向前发展。

0.2 工程材料的分类

工程材料种类繁多，通常按其组成特点、结构特点或性能特点进行分类。根据使用性能，材料分为结构材料和功能材料。工程材料主要是指结构材料，是用于机械、车辆、建筑、船舶、化工、仪器仪表、航空航天、军工等各工程领域中制造结构件的材料，主要利用材料的力学性能，如强度、硬度、塑性及韧性等。工程材料按组成特点可分为金属材料、有机高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类，如图 0-1 所示。



图 0-1 工程材料的分类

除上述工程材料外，还有功能材料。功能材料是用于制造功能元件（磁性器件、光敏元件、各种传感器等）的材料，主要使用材料的特殊物理、化学性能，如电、磁、光、声、热等。

另外，根据材料的具体用途，又可将材料分为航空航天材料、信息材料、电子材料、能源材料、机械工程材料、建筑材料、生物材料、农用材料等。有时也将材料分为传统材料和新型

材料。传统材料一般是指需求量和生产规模大的材料，而新型材料是建立在新思路、新概念、新工艺的基础上，以材料的优异性能为主要特征的材料。两者并无严格区别，因为传统材料也在不断提高质量、降低成本、扩大品种，在工艺及性能方面不断更新。

本教材主要介绍工程结构材料。下面各章均按上述工程材料的分类进行讨论。

0.3 材料成型工艺分类

材料成型加工是生产各种零件或零件毛坯的主要方法。材料成型的方法种类繁多，涉及的物理、化学和力学现象十分复杂，是一个多学科交叉、融合的研究和应用领域。按传统的学科分类方法，材料成型技术包括铸造成型技术、塑性成型技术（包括锻压和板料冲压）、焊接成型技术、高分子材料成型技术、陶瓷材料成型技术、复合材料成型技术和粉末冶金成型技术等。大多数机械零件用上述方法制成毛坯，然后经切削加工（车、铣、刨、磨、钳等），使之具有符合要求的尺寸、形状和表面质量。为了便于切削加工或提高使用性能，有的零件还需要在毛坯制造和切削加工过程中穿插不同的热处理工序。

0.4 本课程教学目的与要求

机械工程材料及成型技术是机械类专业学生必修的一门重要技术基础课，也是近机类和部分非机类专业普遍开设的一门课程，主要包括机械工程材料相关知识和材料成型技术两方面内容。本课程旨在使学生建立机械生产过程的基本概念，掌握相关基本知识，了解新材料，掌握现代制造和工艺方法，培养学生的工程素质、实践能力和创新设计能力。

在学完本课程以后，学生应达到以下基本要求：

- ① 建立机械工程材料及其成型工艺与现代机械制造的完整概念，培养良好的工程意识。
- ② 掌握金属材料的成分、组织、性能之间的关系，以及强化金属材料性能和零件表面性能的基本途径。
- ③ 掌握钢的热处理原理及常用热处理工艺，熟悉常用金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料等结构材料的性质、特点、用途和选用原则。
- ④ 掌握各种常见成型方法和常用设备的基本工作原理、工艺特点和适用对象，具有合理选择毛坯成型方法的能力。
- ⑤ 掌握零件（毛坯）的结构工艺性，并具有设计毛坯和零件结构的初步能力。
- ⑥ 了解与本课程有关的新技术、新工艺。

本课程是一门体系较为庞杂、知识点多而分散的课程，因此，在学习时要遵循课程的主线。本课程有机械工程材料和材料成型技术两条主线。机械工程材料这一主线的主要内容是“材料名称（牌号）—化学成分—组织—性能特点—用途（热处理工艺）”；材料成型技术这一主线则基本上围绕着“成型原理—成型方法及应用—成型工艺设计—成型件的结构工艺性”展开。讲授和学习时，应按照主线对知识点进行归纳整理，这将有利于在学习中保持清晰思路，有利于对本课程内容的总体把握。与此同时，还要注意比较不同材料的性能特点和成型工艺特点，进行相关知识点之间的横向比较，这将有利于对所学知识的融会贯通，加强理解记忆。在分析和解决问题时，就能够做到触类旁通。

本课程具有丰富的工程应用背景，融多种工艺方法于一体，信息量大，实践性强，必须在金工教学实习获得感性认识的基础上进行课堂教学，才能收到预期效果。在课堂教学中，应同时辅之以电教片、多媒体 CAI、现场参观、课堂讨论等多种教学手段和形式，以增强学生的感性认识，加深其对教学内容的理解；教学过程中应注意理论联系实际，使学生在掌握理论知识的同时，提高分析问题和解决问题的工程实践能力；学生应注意观察和了解平时接触到的机械装置，按要求完成一定量的作业及复习思考题；对于课程中的结构工艺性内容，应在充分理解各工艺原理的基础上进行掌握，在后续课程及课程设计、毕业设计中还应反复练习、提高，运用所学知识尝试解决有关问题，才能较好地理解和掌握本课程内容，提高课堂教学效果。

第 1 章 材料的结构与性能

正如绪论中所述，工程材料按其结合键性质分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类。工程材料由于其不同的结构类型，性能有很大差异。本章从这四类不同材料的结构入手，重点介绍其表现出来的力学性能差异。

1.1 金属材料的结构、组织与性能

在自然界中，所有的固态物质，就其原子（离子或分子）排列的规则性来分类，可分为晶体和非晶体两大类。固态物质内部的原子（离子或分子）呈周期性规则排列的物质称为晶体，如天然金刚石、水晶、氯化钠等；原子（离子或分子）在空间无规则排列的物质则称为非晶体，如松香、石蜡、玻璃等。晶体具有固定熔点、各向异性（指单晶）的特征；而非晶体无固定熔点，并在一个温度范围内熔化，各方向上原子聚集密度大致相同，所以表现为各向同性。晶体与非晶体在一定条件下可以相互转化。由于金属由金属键结合，其内部的金属离子在空间有规则地排列，因此，固态金属一般情况下均是晶体。

1.1.1 纯金属的晶体结构

在自然界中，人类已经发现的化学元素中有 81 种属于纯金属。其中，素有“五金”之称的金（Au）、银（Ag）、铜（Cu）、铁（Fe）、锡（Sn）是人类历史上应用最早的纯金属。

在晶体中，原子（离子或分子）规则排列的方式称为晶体结构。为了便于研究，假设通过金属原子（离子）的中心画出许多空间直线，这些直线形成空间格架，称为晶格（见图 1-1）。晶格的节点为金属原子（或离子）平衡中心的位置。能反映该晶格特征的最小组成单元称为晶胞，晶胞在三维空间重复排列构成晶格。晶胞的基本特性即反映该晶体结构（晶格）的特点。

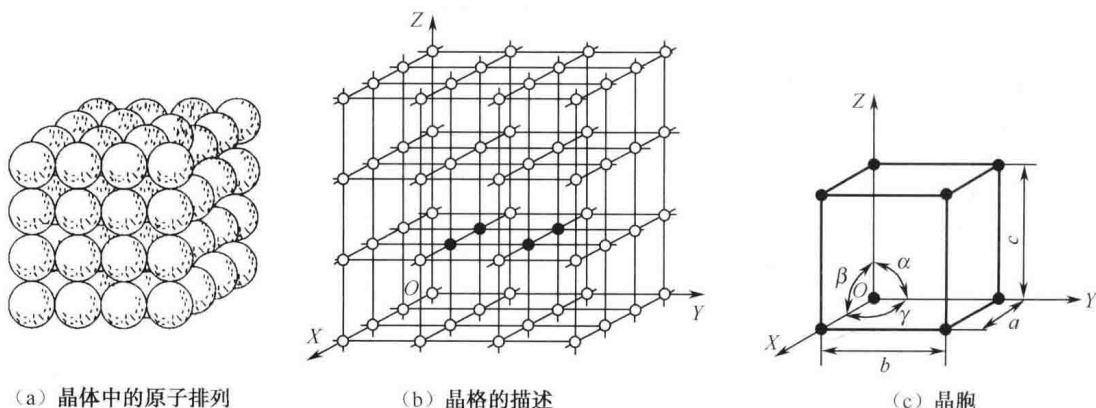


图 1-1 晶体、晶格和晶胞示意图

晶胞的几何特征可以用晶胞的三条棱边长 a 、 b 、 c 和三条棱边之间的夹角 α 、 β 、 γ 这 6 个

参数来描述。其中 a 、 b 、 c 为晶格常数，金属的晶格常数一般为 $0.1 \sim 0.7 \text{ nm}$ 。不同元素组成的金属晶体因晶格形式和晶格常数不同，表现出不同的物理、化学和力学性能。金属晶体的晶格类型很多，但元素周期表中有 90% 以上的金属元素的晶体都属于以下三种原子紧密排列的晶格形式。

1. 三种常见的金属晶体结构

(1) 体心立方晶格 (bcc 晶格)

体心立方晶格的晶胞中 (见图 1-2)，8 个原子分别处于立方体的 8 个角上，一个原子处于立方体的中心，角上 8 个原子与中心原子紧靠。具有体心立方晶格的金属有铁 ($\alpha\text{-Fe}$)、铬 (Cr)、钼 (Mo)、钨 (W)、钒 (V) 等，其大多具有较高的熔点、硬度及强度，而塑性、韧性较低，并具有冷脆性。

体心立方晶格具有下列特征：

① 晶格常数： $a = b = c$ ； $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。

② 晶胞原子数：体心立方晶胞中，每个角上的原子在晶格中同时属于 8 个相邻的晶胞，因此每个角上的原子仅有 $1/8$ 属于一个晶胞，而中心的一个原子则完全属于这个晶胞。所以，一个体心立方晶胞中所含的原子数为 $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ ，即两个原子。

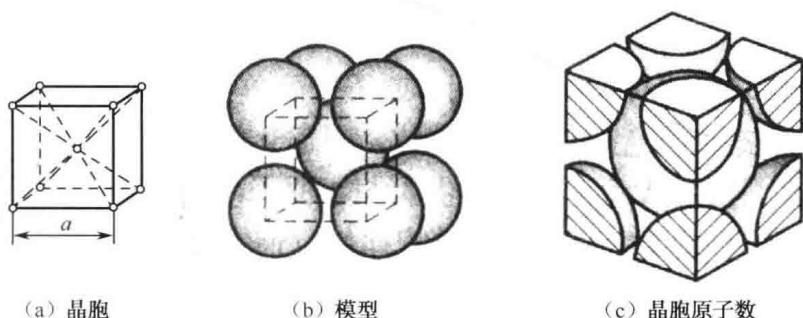


图 1-2 体心立方结构晶胞示意图

③ 原子半径：晶胞中相距最近的两个原子之间距离的 $1/2$ 称为原子半径 $r_{\text{原子}}$ 。体心立方晶胞中原子相距最近的方向是体对角线，所以，原子半径与晶格常数 a 之间的关系为 $r_{\text{原子}} = \frac{\sqrt{3}}{4} a$ 。

④ 致密度：晶胞中所包含的原子占有的体积与该晶胞体积之比称为致密度，通常用于表示原子排列的紧密程度。体心立方晶胞的致密度为 0.68，即体心立方晶胞中有 68% 的体积被原子所占据，其余为空隙。

⑤ 空隙半径：若在晶胞空隙中放入刚性球，则能放入球的最大半径为空隙半径。体心立方晶胞中有两种空隙：一种为四面体空隙，其半径为 $r_{\text{四}} = 0.29 r_{\text{原子}}$ ；另一种为八面体空隙，其半径为 $r_{\text{八}} = 0.15 r_{\text{原子}}$ 。

⑥ 配位数：晶格中与任一个原子相距且距离相等的原子的数目称为配位数。这是另一种表示原子紧密程度的方法。体心立方晶胞的配位数为 8。

(2) 面心立方晶格 (fcc 晶格)

面心立方晶格的晶胞中 (见图 1-3)，8 个原子分别处于立方体的 8 个角上，同时还有 6 个原子分别位于立方体的 6 个面的中心。具有面心立方晶格的金属有铁 ($\gamma\text{-Fe}$)、铝 (Al)、铜 (Cu)、

镍 (Ni)、铅 (Pb)、金 (Au)、银 (Ag) 等, 这类金属不具有冷脆性。

面心立方晶格具有下列特征:

① 晶格常数: $a=b=c$; $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

② 晶胞原子数: $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$, 即 4 个原子。

③ 原子半径: $r_{\text{原子}} = \frac{\sqrt{2}}{4} a$ 。

④ 致密度: 0.74。

⑤ 空隙半径: 四面体空隙, 其半径为 $r_{\text{四}} = 0.225 r_{\text{原子}}$; 八面体空隙, 其半径为 $r_{\text{八}} = 0.414 r_{\text{原子}}$ 。

⑥ 配位数: 12。

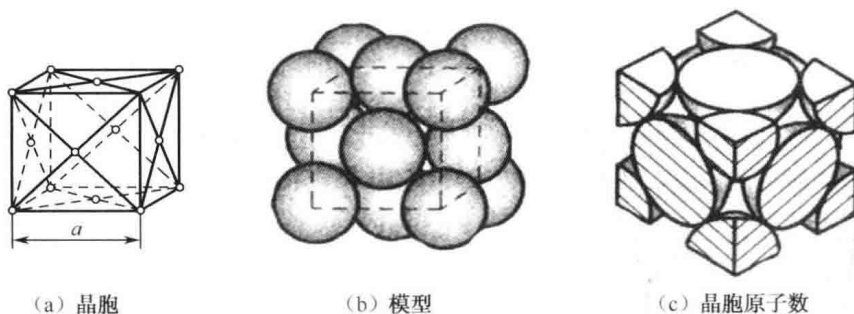


图 1-3 面心立方结构晶胞示意图

(3) 密排六方晶格 (hcp 晶格)

密排六方晶格的晶胞中 (见图 1-4), 12 个原子分别占据简单六方体的 12 个顶点位置, 简单六方体的上、下正六边形面的中心位置各占据一个原子位置, 而且, 此六方体的中间还有 3 个原子。具有密排六方晶格的金属有镁 (Mg)、锌 (Zn)、镉 (Cd)、铍 (Be) 等, 石墨也是密排六方晶格结构。这类金属大多数不具有冷脆性, 但力学性能不突出, 很少单独用于结构材料。

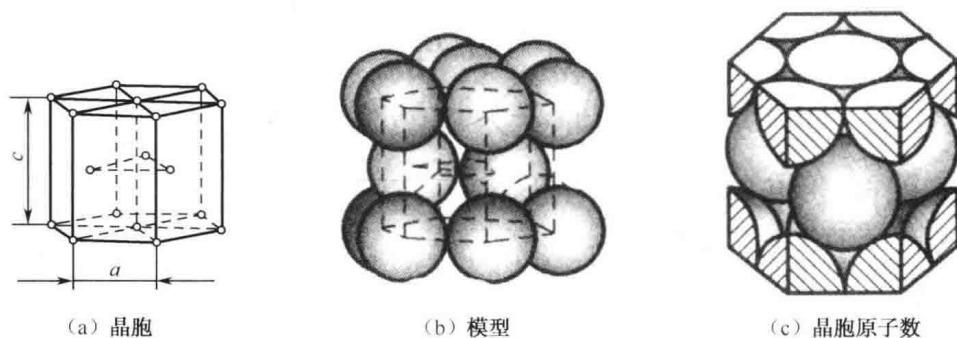


图 1-4 密排六方结构晶胞示意图

密排六方晶格具有下列特征:

① 晶格常数: 用底面正六边形的边长 a 和两底面之间的距离 c 来表示, 两相邻侧面之间的夹角为 120° , 侧面与底面之间的夹角为 90° 。

② 晶胞原子数: $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$, 即 6 个原子。

③ 原子半径: $r_{\text{原子}} = \frac{1}{2} a$ 。

④ 致密度: 0.74。

⑤ 空隙半径: 四面体空隙, 其半径为 $r_{\text{四}} = 0.225r_{\text{原子}}$; 八面体空隙, 其半径为 $r_{\text{八}} = 0.414r_{\text{原子}}$ 。

⑥ 配位数: 12。

2. 金属晶体的各向异性

在晶体学中, 通过晶体中原子中心的平面称为晶面; 通过原子中心的直线称为原子列, 其所代表的方向称为晶向。晶面和晶向可分别用晶面指数和晶向指数来表达。

在晶体中, 不同晶面和晶向上原子排列的密度不同, 它们之间的结合力大小也不一样, 使得金属晶体在不同方向上的性能不同, 这种性质称为晶体的各向异性。非晶体中由于原子排列杂乱无章, 其在各个方向上的性能完全相同。

3. 实际金属中的晶体缺陷

实际金属晶体内部的原子排列并不像理想晶体那样规则和完整, 总是存在一些原子偏离理想规则排列的区域, 称为晶体缺陷。这些缺陷造成了实际晶体的不完整性, 并对金属和陶瓷材料的许多性能产生极其重要的影响。按照晶体缺陷的几何特征, 可将其分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。

(1) 点缺陷

点缺陷是指在三维尺寸上都很小的、不超过几个原子直径的缺陷, 主要是指空位、间隙原子和置换原子, 如图 1-5 所示。

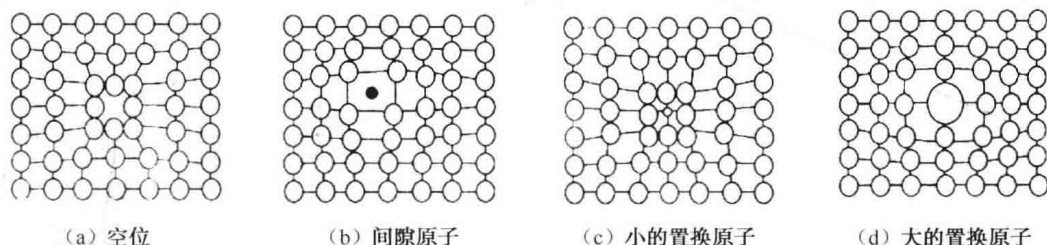


图 1-5 晶体中的点缺陷

空位是指未被原子占据的晶格节点。这种缺陷可能是晶体在结晶过程中由于堆积不完善所造成的, 也可能是已形成的晶体在高温或外力作用下而引起的, 温度的作用尤为明显。晶体中的原子并不是静止不动的, 而是在平衡位置中心做热振动, 并受周围原子的约束, 处于平衡状态。由于各原子的能量并不完全相等, 当温度升高后, 原子振动的能量加大, 当能量达到足以克服周围原子的约束时, 该原子就可能脱离原子振动中心, 跑到金属表面或晶格的间隙中, 形成空位。而跑到晶格间隙中的原子称为间隙原子, 若间隙原子是外来的异类原子, 则称为置换原子。

晶体中出现空位和间隙原子后, 破坏了原子间的平衡, 使它们偏离平衡位置, 造成了晶格局部的弹性变形, 称为晶格畸变。因此, 空位和间隙原子的出现破坏了原子排列的规律性, 其结果导致金属的强度和电阻等增加、塑性下降, 这是金属固溶强化的主要原因。

(2) 线缺陷

晶体中的线缺陷就是位错, 是指晶体中的原子发生了有规律的错排现象。根据位错的形态可分为刃型位错和螺型位错两种常见位错 (见图 1-6)。

刃型位错可以描述为晶体内多余半原子面的刃口, 好像一片刀刃切入晶体, 中止于内部。沿着半原子面的刃边 EF 线附近, 晶格发生很大的畸变, 这就是一条刃型位错, 晶格畸变中心的

连线 EF 就是刃型位错线。位错线并不是一个原子列，而是一个晶格畸变的“管道”。不难看出，位错线附近的上半部原子在一定的范围内将受到垂直于位错线两侧的原子压力。相反，在位错线附近的下半部原子在一定范围内则受到两侧的原子拉应力。因此，沿着位错线其晶格能量总是增加的。

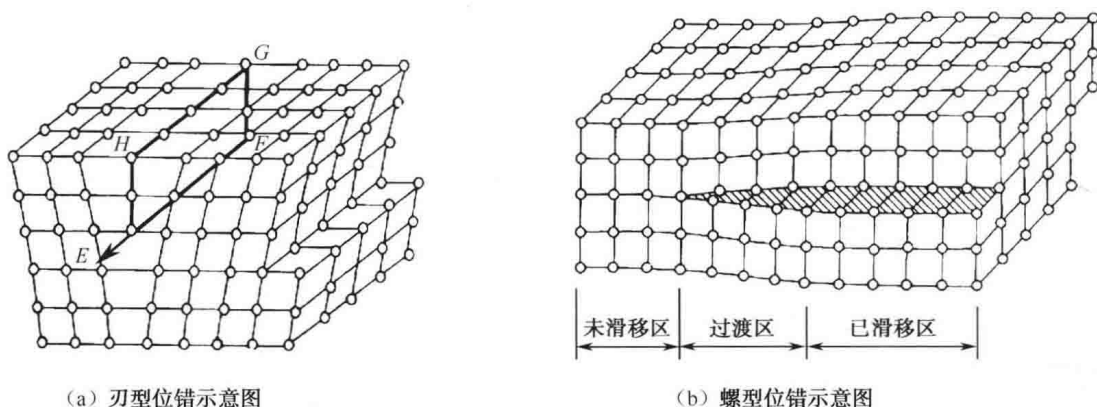


图 1-6 位错模型

螺型位错是指晶体右边上部的点相对于下部的点向后错动一个原子间距，若将错动区的原子用线连接起来，则具有螺旋形特征。

晶体中的位错可在由液体转变为固体的过程中产生，而在固态经塑性变形时位错更易产生。它在温度和外力作用下还能够不断地运动。因此，晶体中的位错数量在外界条件（温度、外力）作用下会发生变化。为了评定金属中位错数量的多少，常用位错密度（ ρ ）来衡量。

位错密度是指单位体积中所包含位错线的总长度。位错密度的单位为 cm/cm^3 (cm^{-2})。金属中的位错密度一般为 $10^8 \sim 10^{13} \text{cm}^{-2}$ ，高密度的位错是导致加工硬化的主要原因之一。

(3) 面缺陷

面缺陷包括晶界和亚晶界两种。如果一块晶体内部的晶格位向完全一致，该晶体就是单晶体。实际使用的金属多是由无数个晶格位向不同的单晶体组成的多晶体，此时的单晶体又称为晶粒，如图 1-7 所示。金属通常都是多晶体，由于各晶体的位向不同，使其原子排列的规律性在相互交界处得不到统一，必须从一种排列取向过渡到另一种排列取向。晶界就是不同取向晶粒之间的过渡层，如图 1-8 (a) 所示，其宽度约为几个原子，其原子排列得比较不规则。晶界处还存在许多缺陷，如杂质原子、空位及位错等。此外，在一个晶粒内部也存在一些位向稍有差别的小晶块，称为亚结构或亚晶，它们之间的界面称为亚晶界，如图 1-8 (b) 所示。晶界与亚晶界都是具有缺陷的界面，故称为面缺陷。

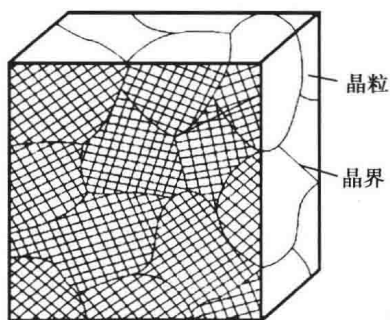


图 1-7 多晶体结构示意图

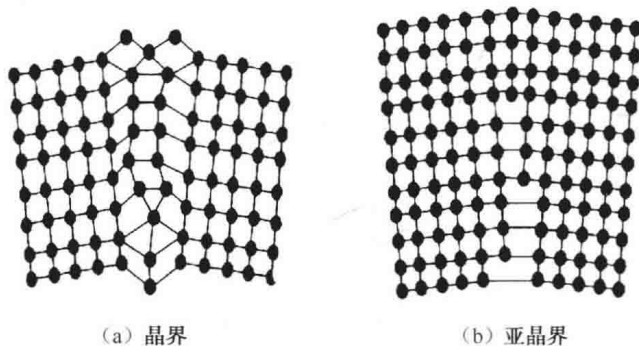


图 1-8 面缺陷示意图