



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

冯之敬 主编

制造工程与技术原理

(第2版)

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

冯之敬 主编

制造工程与技术原理

(第2版)

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合前沿制造技术和科研成果,系统、全面地论述现代制造工程中主要制造技术和制造工程设计的基本原理。主要内容有:金属和非金属材料及其热处理性质和加工性质,金属的铸造成形原理,塑料、橡胶、玻璃制品成形原理,金属塑性成形加工原理,粉末冶金和陶瓷制备,焊接与切割工艺原理,机械组装与胶粘接,金属切削原理,机床、刀具、夹具的设计原理,加工表面质量和精度的分析与控制,金刚石切削、超声波加工、电加工、高能束加工、快速成形制造、微机械的制造等精密、特种加工工艺方法,表面工程技术原理,光学零件制造工艺原理,集成电路制造工艺和电子装配与组装方法,以及进行制造工程技术组织的机械加工工艺流程和装配工艺流程的基本设计原理等。本书重视制造的各种技术方法之间的内在联系,着力体现制造工程技术这个学术概念的系统性和完整性,以强化大学工科的专业基础教学为目标,特别注重阐明必要的基础理论。每篇后配有习题与思考题,以加深学生对书中知识的理解。

本书为高等工科院校的制造专业基础理论课教材,也可用于制造工程设计的参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

制造工程与技术原理/冯之敬主编. —2版. —北京:清华大学出版社,2009
ISBN 978-7-302-20057-4

I. 制… II. 冯… III. 机械制造工艺—高等学校—教材 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 064951 号

责任编辑:张秋玲

责任校对:王淑云

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:31.25 彩 插:1 字 数:679 千字

版 次:2009 年 7 月第 2 版

印 次:2009 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:45.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。

联系电话:010-62770177 转 3103

产品编号:033487-01

前言

制造工程与技术原理(第2版)

制造是创造物质财富的一种非常重要的生产活动。制造是用物理或化学的方法改变原材料的几何形状、性质和外观,制成零件以及将零件装配成产品的操作过程,通过这样的过程将原材料转变成具有使用价值和更大经济价值的产品。制造企业中除了生产组装起来的最终产品的企业外,还有一些企业专门为生产最终产品的企业提供原材料、零部件和配套件、工具、模具等,所以说,制造业包括一个很复杂的生产组织,分别生产不同层次、不同种类的中间产品和最终产品。

产品的制造通常是由一个包括很多关联工序的操作序列来实现的,每一步操作都使材料变得更接近于最终所希望的状态,完成操作过程必须将机器、工具、能源、操作者紧密结合起来。与手工操作的自由制作方式相比,现代制造工业是以严密的工程组织方式进行的,产品制造过程中每一步骤的工艺方法、工艺设备和工具、操作规范、工时定额、工业标准、成本核算,以及中间物料的传送和操作信息的传递、各个步骤的流程等都经过精心设计和科学制定,按照严格的符合生产规律的规程进行。

产品的制造工艺技术是企业生产某种产品的技术能力的核心,企业必须掌握先进的工业化的制造技术,产品才能具备市场竞争力。现代工业技术已经发展到很高的水平,并以很高的速度在继续进展。例如,飞机是最大的制造产品之一,使用铝合金、镁合金、钛合金等轻质金属和纤维增强的聚合物复合材料,以及在喷气发动机的涡轮和其他部件使用高强度的耐热合金等高性能新材料,通过精密加工零部件和严格的组装工艺而建造,是先进材料、先进工艺和先进生产组织方式的集中体现;汽车也是应用很多种类的材料和各种先进的制造技术进行大批量生产的机械电子紧密结合的机电产品典范。又如,集成电路制作在高纯度的硅薄片上,在 $0.414\text{ in} \times 0.649\text{ in}$ ($10.516\text{ mm} \times 16.485\text{ mm}$) 的面积上包含了百万个晶体管,它的制作处理序列是所有制造产品中最复杂的,包括几十道独立的工序,这些芯片通常在超净车间成千上万大批量地生产。再如,光学镜的制造,大口径光学天文望远镜的主镜口径已做到 8 m ,光刻机精密镜头的精度达到几纳米,通过哈勃空间望远镜已经观测到 120 亿光年的星系,先进的精密光学加工技术成为光学技术进步的重要技术支持。这些典型的例子说明制造技术是工业发展和科学技术发展的基础。

本书结合前沿制造技术和科研成果,系统、全面地论述现代制造工程中主要制造技术的基本原理和制造工程设计的基本原理,内容包括金属和非金属材料的制造性质,成形、连接、切削加工的工艺方法、设备和工具的设计原理,加工质量的分析和控制,金刚石切削、电加工、表面工程、先进光学加工、电子制造组装等特殊加工工艺方法和精密制造技术,以及体现制造过程技术组织形式的加工工艺规程和装配工艺规程的基本设计原理等。本书重视制造的各种技术方法之间的内在联系,着力体现制造工程技术这个学术概念的系统性和完整性,以强化大学工科的专业基础教学为目标,特别注重阐明必要的基础理论。书中有些习题需要查阅课外参考书或工程手册,藉以扩展知识面和提高独立解决工程问题的能力。

本书为高等工科院校的制造专业基础理论课教材,也可用于制造工程设计的参考。

本书的编写人员和主要负责的编写工作如下:刘成颖第1~3章,朱跃峰第4、9、10章,张辉第7、8、16、18、19章,冯之敬第5、6、11~15、17、20、21章,冯之敬任主编并参与了各章的修改定稿。

作者在本书中融入了新的教学指导思想、新的学术见解和研究成果,也参考了大量的文献,在此谨向所列参考文献的作者致以诚挚的谢意,也向所有对本书提出过建议和帮助的同行人和同事致谢。

诚恳希望对本书的不足之处提出意见、建议和指正。

冯之敬

2009年3月

目

录

前言

第1篇 工程材料及其制造性质

1 工程材料的性能	2
1.1 工程材料的种类	2
1.2 工程材料的性能	3
2 金属材料及其热处理	5
2.1 金属与合金材料的结构	5
2.2 金属材料的热处理	21
2.3 常用金属材料	41
3 非金属材料 and 复合材料	47
3.1 高分子材料	47
3.2 陶瓷材料	53
3.3 复合材料	58
3.4 其他材料	59
习题与思考题	62

第2篇 模铸成形

4 金属的铸造成形	66
4.1 砂型铸造工艺原理	66
4.2 特种铸造方法	87

4.3 铸造合金种类及相应的铸造特点	98
5 塑料成形工艺及模具	113
5.1 塑料组分、分类及加工工艺性	113
5.2 注射成形工艺与模具	115
5.3 压缩和压注成形工艺	118
5.4 挤出成形、吹塑成形、泡沫塑料成形及玻璃钢缠绕成形	119
6 橡胶制品和玻璃制品成形工艺	122
6.1 橡胶制品的加工和成形	122
6.2 玻璃制品成形工艺	125
习题与思考题	129

第3篇 塑性成形

7 金属塑性成形加工	136
7.1 金属塑性成形的应力和应变	136
7.2 轧制	141
7.3 锻造	147
7.4 冲压	157
8 粉末冶金和陶瓷制备	168
8.1 粉末冶金	168
8.2 陶瓷	174
习题与思考题	179

第4篇 连接与分割

9 焊接	184
9.1 焊接的物理本质与分类	184
9.2 电弧焊	187
9.3 气焊和气割	202
9.4 其他焊接方法	206
9.5 焊接质量与检验	213
9.6 常用金属材料的焊接	220

10 机械连接与胶粘接	227
10.1 机械连接	227
10.2 胶粘接	229
习题与思考题	235

第5篇 切削加工

11 金属切削原理	240
11.1 切削运动和切削用量	240
11.2 刀具材料、几何形体与角度参数	243
11.3 金属切削的变形过程	257
11.4 切削力	264
11.5 切削热和切削温度	268
11.6 切削过程优化	270
12 机床、刀具与切削和磨削工艺	281
12.1 车床和车刀	281
12.2 钻床和麻花钻	287
12.3 铣床和铣刀	292
12.4 拉床和拉刀	297
12.5 齿轮加工机床和齿轮加工刀具	300
12.6 磨床和砂轮	310
12.7 组合机床	313
12.8 数控机床和加工中心	314
13 工件的定位夹紧与夹具	316
13.1 夹具的基本概念	316
13.2 工件在夹具上的定位	318
13.3 工件在夹具中的夹紧	327
14 机械加工表面质量和精度	331
14.1 机械加工表面质量	331
14.2 机械加工精度	341
习题与思考题	361

第6篇 特种加工工艺方法和精密制造技术

15 精密超精密加工和特种加工	370
15.1 金刚石超精密切削.....	370
15.2 精密磨料加工.....	371
15.3 超声波加工.....	374
15.4 电解加工.....	375
15.5 电铸加工.....	376
15.6 电火花成形加工与线切割.....	377
15.7 电子束加工和离子束加工.....	378
15.8 激光加工.....	381
15.9 快速成形制造技术.....	382
15.10 微机械的制造技术.....	383
16 表面工程技术	385
16.1 表面预处理.....	385
16.2 表面强化和改性.....	386
16.3 表面涂覆和表面膜.....	390
17 光学零件制造工艺	398
17.1 光学玻璃镜的加工.....	398
17.2 特种光学零件工艺.....	406
18 集成电路制造工艺	411
18.1 硅晶片制备.....	412
18.2 光刻技术.....	415
18.3 薄膜制备及刻蚀技术.....	418
18.4 集成电路组装.....	422
19 电子装配和组装	425
19.1 电子组装.....	425
19.2 印刷电路板制造工艺.....	425
19.3 印刷电路板装配.....	429
习题与思考题	433

第7篇 工艺规程设计原理

20 机械加工工艺规程设计	436
20.1 机械加工工艺规程设计的基本概念	436
20.2 定位基准及选择	441
20.3 工艺路线的制定	443
20.4 加工余量、工序尺寸及公差的确定	450
20.5 工艺尺寸链	453
20.6 时间定额和提高生产率的工艺途径	456
20.7 自动生产线和柔性制造系统	458
21 装配工艺规程设计	465
21.1 装配工艺规程的制定	465
21.2 装配尺寸链	469
习题与思考题	482
参考文献	486



第

1

篇

工程材料及其制造性质



1.1 工程材料的种类

工程材料主要指广泛用于机械、电器、建筑、化工以及航空航天等领域的材料。工程材料种类很多,用途广泛,按其性能特点和用途可分为两大类:一类是结构材料,主要是利用材料的力学性能来满足工程结构上的需要;另一类称为功能材料,主要利用材料具有光、电、磁、热等特殊的物理性能。根据其化学组成进行分类,大多数的工程材料属于金属材料、陶瓷材料和高分子材料 3 种基本类型,以及由多种材料组成的复合材料,如图 1-1 所示。

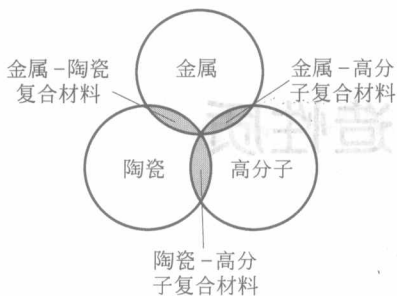


图 1-1 3 种基本材料类型和复合材料

金属材料是工程材料中最重要的材料之一,包括纯金属和以金属元素为主的合金,在制造中合金比纯金属有更大的使用价值。工业上通常把金属材料分为两类:一类是黑色金属,它是指铁、锰、铬及其合金,其中以铁为基的合金(钢和铸铁)材料应用最广;另一类是有色金属,是指黑色金属以外的所有金属及合金。由于金属材料具有良好的力学性能、物理性能、化学性能及工艺性能,能采用比较便宜和经济的工艺方法制成零件,因此金属材料仍然是目前应用最广泛的材料。

陶瓷材料是指硅酸盐、金属与非金属元素的化合物(主要是氧化物、碳化物、氮化物等),如水泥、玻璃、耐火材料。它具有不可燃烧性、高耐热性、高化学稳定性、不老老化性以及高的硬度和良好的耐压性,且原料丰富,受到材料工作者和特殊行业的广泛关注。

高分子材料又称聚合物,是由分子质量很大的大分子组成,其主要原料是石油化工产品。按其性能用途和使用状态,可分为塑料、橡胶、合成纤维和胶粘剂等 4 大类型。塑料是最主要的高分子材料,常分为通用塑料和工程塑料。通用塑料主要用于制作薄膜、容器和包装用品,占塑料生产的 70% 左右,聚乙烯是其典型代表。工程塑料是指力学性能较高的聚合物,聚酰胺是这类材料的代表。高分子材料具有金属材料所不具备的某些优异性能,如重量轻、电绝缘性、隔热保温性、耐腐蚀性等,并具有原料丰富、成本低、加工方便等优点,发展极其迅速,目前已在工业上得到广泛应用,并将越来越多地被采用。

复合材料是由基体材料(树脂、金属、陶瓷)和增强剂(颗粒、纤维、晶粒)复合而成的。金属、高分子、陶瓷材料各有优缺点,将以上两种或两种以上的材料组合在一起便形成了复合材料。复合材料既保持所组成材料的各自优点,还有着单一材料不具备的优良性能,而且它的力学性能和功能可以根据使用需要进行设计、制造,所以自1940年玻璃钢问世以来,复合材料的应用领域在迅速扩大,品种、数量和质量有了飞速发展。由于材料质轻、强度高、耐高温、耐磨损,不仅是航空、航天的理想材料,也是建筑、化工、机械、造船等工业领域广泛使用的材料。

1.2 工程材料的性能

工程材料的性能包括使用性能和工艺性能,如图1-2所示。材料在不同的条件下使用,如在载荷、温度、介质、电磁场等作用下,将表现出不同的行为,即为材料的使用性能,包括材料的力学性能、物理性能、化学性能等。工程材料的使用性能,决定了它的应用范围和产品寿命。由于工程结构与机器零件以传递力和能、实现规定的机械运动为主要功能,因此材料的力学性能是最重要的使用性能。工艺性能是指材料在加工过程中对所涉及的加工工艺所表现出来的适应性,包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能等,而将材料加工成所要求形状的工艺方法反过来又影响产品的最终性能、使用寿命和成本。因此,作为材料性能的两个方面,使用性能和工艺性能既有联系又有区别,两者有时是统一的,但更多的情况下是相互矛盾。合理地解决两者之间的矛盾并使之不断改善,是材料研究和应用的主要任务之一。

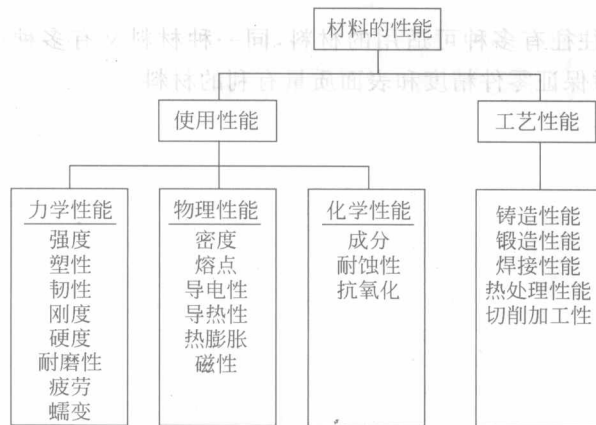


图 1-2 材料的性能

任何一个产品的设计,都是要通过对材料的加工制作而实现的。在制造过程中,产品设计、制造工艺和材料选择三者是相互影响的因素,为了能够既保证质量,又符合经济地进行

生产,这三者之间必须恰当地配合。优质的机械产品是合理的材料、优良的设计、正确的加工这三者的整体配合,而材料是其基础。

设计时材料的选择不仅要考虑材料的使用性能、工艺性能,还要考虑加工工艺对零件结构的要求。图 1-3 简要说明了它们之间的关系,可以看出,正确的选择材料和合理的加工工艺是零件达到加工质量的保证。这一问题如解决得好,可以获得优质产品;相反,很多质量问题也是由于材料及其工艺过程引起的,材料选择不好或其工艺不当,不仅影响产品的质量、寿命,而且关系到产品的制造成本。因此材料是实现零件设计要求的前提,材料的选择和使用在加工中占有十分重要的地位。



图 1-3 设计、工艺与材料之间的关系

实际上一个零件往往有多种可适用的材料,同一种材料又有多种可适应的工艺方法。因此,应该优先选用对保证零件精度和表面质量有利的材料。

2

金属材料及其热处理

2.1 金属与合金材料的结构

材料的化学成分不同其性能也不同。对于同一成分的材料也可以通过不同的加工工艺使材料内部的结构和组织状态发生改变,从而使材料性能发生很大的变化。金属材料属晶体材料,金属材料的性能取决于其晶体结构特征。

2.1.1 金属的晶体结构

1. 晶体学基本知识

固体材料按其原子(或分子)的聚集状态分为两类:晶体和非晶体。晶体是原子(或分子)在三维空间按一定的几何规律周期性重复排列的固体,非晶体是原子(或分子)无规则的堆砌而成的。这是晶体与非晶体的根本区别。

晶体具有固定的熔点、规则的几何外形,且在不同的方向上性能不同,即具有各向异性的特性;非晶体没有固定的熔点,各个方向上原子聚集密度大致相同,表现出各向同性。在一定条件下晶体和非晶体可以相互转化。

在自然界中,除少数物质(如普通玻璃、沥青、松香等)是非晶体外,绝大多数固态无机物(包括金属和合金等)都是晶体。

实际晶体中的各类质点(包括离子、原子等)虽然都在不停地运动着,但是在讨论晶体结构时,常把构成晶体的原子看成是一个个刚性的小球,这些原子小球按一定的几何形式在空间紧密堆积,如图 2-1(a)所示。

为了便于描述晶体内部原子排列的规律,将每个原子视为一个几何质点,并用假想的几何线条将各质点的中心连接起来,便形成一个空间格架,这种抽象的用于描述原子在晶体中排列方式的几何空间格架称为晶格,又称晶体的空间点阵,如图 2-1(b)所示。晶格形式与晶体的性能有密切关系。

由于晶体中原子作周期性规则排列,因此可以在晶格中选择一个能够完全反映晶格特征的、最小的几何单元来表示原子排列规律,这个最小的几何单元称为晶胞,如图 2-1(c)所示。每一个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。

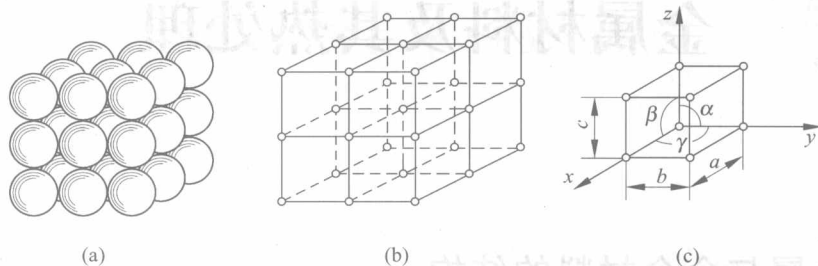


图 2-1 晶体结构示意图

(a) 晶体中原子的排列; (b) 晶格; (c) 晶胞及晶格常数

表示晶胞大小及几何特征参数称为晶格常数。这些参数包括晶胞中各棱边的长度 a 、 b 、 c 及各棱边的夹角 α 、 β 、 γ , 如图 2-1(c) 所示。

目前已知的晶格型式有 7 种晶系, 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。但大多数金属材料的晶格型式只有 3 种, 即体心立方晶格、面心立方晶格、密排六方晶格, 如图 2-2 所示。

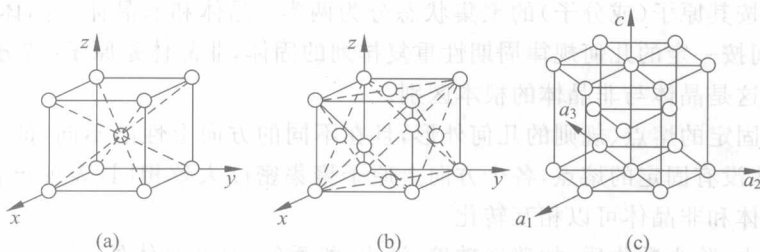


图 2-2 典型晶胞

(a) 体心立方晶胞; (b) 面心立方晶胞; (c) 密排六方晶胞

(1) 体心立方晶格。它的晶胞是一个立方体, 如图 2-2(a) 所示, 晶格常数 $a=b=c$, 三棱边的夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。在立方体的 8 个顶角上和立方体中心各有 1 个原子。具有这种晶格的金属有铬、钨、钼、钒、铌和 912°C 以下的铁($\alpha\text{-Fe}$)等。

(2) 面心立方晶格。它的晶胞也是一个立方体, 如图 2-2(b) 所示。在立方体的 8 个顶角上各有 1 个原子, 6 个面的中心各有 1 个原子。具有这种晶格的金属有铜、铝、镍、铅、金、银和 $912\sim 1394^\circ\text{C}$ 的铁($\gamma\text{-Fe}$)等。

(3) 密排六方晶格。它的晶胞是一个六方柱体, 如图 2-2(c) 所示。它在六方柱体的上下六角形面的 12 个顶点上各有 1 个原子, 上下面的中心各有 1 个原子, 以及在六方柱体上下面之间还有 3 个原子。具有这种晶格的金属有镁、锌、镉和铍等。

2. 实际金属的晶体结构

以上讨论把金属晶体看成由原子按一定几何规律作周期性排列堆垛而成。其内部的晶格位向完全一致,完整无缺,这种晶体称为单晶体。在工业生产中,只有经过特殊制作才能获得内部结构相对完整的单晶体。一般所用工业金属材料,即使是体积很小,其内部仍包含有许许多多的小晶体,每个小晶体内部的晶格位向相对一致,而各个晶体彼此间位向各不相同,如图 2-3 所示。把这种外形不规则的小晶体称作物晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。这种实际上由多个晶粒组成的晶体称为多晶体。研究结果还发现,即使在一个晶粒内,实际金属的结构与理想状态也有差异。因此,在实际金属中或多或少地存在着偏离理想结构的微观区域,把这种偏离晶体完整性的微观区域称为晶体缺陷。原子水平的缺陷对聚合物材料没有什么影响,但对金属或陶瓷的性质和性能就会有很大的影响。按晶体缺陷的几何形态特征晶体缺陷有 3 种类型:点缺陷、线缺陷和面缺陷。

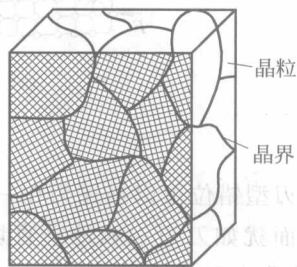


图 2-3 金属多晶体结构示意图

1) 点缺陷——空位、间隙原子和置换原子

空位是指晶格上没有原子的结点,如图 2-4(a)所示;间隙原子是指位于晶格间隙之中的原子,如图 2-4(b)所示,间隙原子一般是较小的异类原子;占据在原来基体原子平衡位置上的异类原子称为置换原子,如图 2-4(c)、(d)所示。不管存在哪类缺陷,都会使原子之间原来的作用力失去平衡,在缺陷原子周围的其他原子发生靠拢或会发生撑开现象,使晶体结构的规律性遭到破坏,晶格发生歪扭,即晶格畸变。晶格畸变的结果将对金属的性能产生影响。

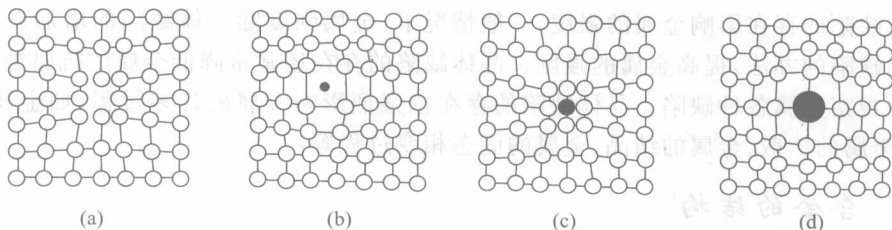


图 2-4 空位和间隙原子

(a) 空位; (b) 间隙原子; (c), (d) 置换原子

2) 线缺陷——位错

线缺陷就是晶体中的错位,某处有一列或若干列原子发生了某种有规律的错排现象,可以看作是晶体中一部分晶体相对于另一部分晶体产生局部滑移而造成的,滑移部分与未滑移部分的交界线即为错位线,如图 2-5 所示为刃型错位。