



自动化

高等学校机械设计制造及自动化专业“十一五”规划教材



工程实践训练基础

周桂莲 付 平 主编
张 明 主审



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校机械设计制造及自动化专业“十一五”规划教材

工程实践训练基础

主 编 周桂莲 付 平

副主编 李镇江 赵海霞

参 编 刘春廷 吴俊飞 高 进 周建强

孔令兵 姜元志 孙海迎

主 审 张 明

西安电子科技大学出版社

2007

内 容 简 介

本书是根据教育部机械基础课程教学指导分委员会有关“重点院校金属工艺学课程改革指南”精神,在认真总结近几年来各校工程实践训练教学改革经验的基础上,并结合作者多年来的理论和实践教学经验编写而成的。

本书在内容上涵盖了现代机械制造工艺过程的主要知识和工程训练的基本要求,正确处理了传统工艺与现代新科技的关系。全书共9章,内容包括工程材料及热处理、铸造、锻压、焊接、机械加工基础知识、零件表面常规加工方法、特种加工、机械加工工艺过程概论和数控加工。本书在编写过程中,对于目前仍在广泛应用的传统工艺精选保留,对于过时的内容予以淘汰,增加了技术上较为成熟的、应用范围较宽或发展前景看好的“三新”(即新材料、新技术和新工艺)内容,加大了特种加工和数控加工内容所占的比重,各章后均有思考题。在编写过程中,本书力求取材新颖、联系实际、结构紧凑、文字简练、直观形象、图文并茂,做到基本概念清晰、重点突出。

本书可作为高等工科院校近机类、非机类专业在实训实践基础上的理论教学用书,也可作为高职、高专、中央广播电视大学、职工大学等相关专业师生及有关领域的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程实践训练基础 / 周桂莲, 付平主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.4

高等学校机械设计制造及自动化专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-1811-1

I. 工… II. ①周… ②付… 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 (2007) 第 033192 号

策 划 毛红兵

责任编辑 南 景 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2007年4月第1版 2007年4月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 14.625

字 数 341千字

印 数 1~4000册

定 价 18.00元

ISBN 978-7-5606-1811-1/TH·0072

XDUP 2103001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

前 言

多年来,随着高等教育的发展与技术进步,为满足宽口径人才培养模式和日趋重要的实践能力的需求,各工科院校纷纷成立了工程实践训练中心,加大了对工程训练经费和先进设备的投入。工程实践训练基础课程已逐步吸收了不同学科大量的新材料、新工艺和新技术知识,将传统的金工实习逐步发展为面向跨学科,体现实践能力、综合素质和创新能力培养的现代工程实践训练,使之逐渐具备了基础性、实践性、趣味性和跨学科的知识结构。因此,它不仅是必修的工艺性技术基础课和工程实践课,是对工科大学生进行综合工程素质教育和现代制造技术教育的重要阵地,而且也对提高本科生的全面素质,培养高质量、高层次、复合型的工程技术人才方面起到了其他课程不可替代的作用。

本书是一部面向 21 世纪,建立在原金属工艺学基础上,力图把传统与先进制造工艺基础联系在一起,口径宽,涉及不同学科的工程实训基础教材。书中包括了工程材料及热处理、铸造、锻压、焊接、机械加工基础知识、零件表面常规加工方法、特种加工、机械加工工艺过程概论、数控加工等方面的知识,对传统内容进行了精选,尽量避免了与工程实训教材内容的重复,同时较大幅度地补充了新内容。

本书在内容编排上有一定的灵活性,在保证教学基本要求的前提下,各院校在安排教学时,可结合自己学校的情况来决定。

本书由青岛科技大学、山东轻工业学院和青岛农业大学等高校长期从事机械制造基础课教学和指导工程实践训练教学的具有丰富理论与实践教学经验的教师和工程技术人员编写。具体参加本书编写的人员有周桂莲、付平、李镇江、赵海霞、刘春廷、吴俊飞、高进、周建强、孔令兵、姜元志、孙海迎,周桂莲教授、付平副教授任主编,李镇江教授、赵海霞老师任副主编。全书由周桂莲、付平统稿,青岛科技大学张明教授主审。

本书的编写是对加强实践教学和提高工程实践教学质量的初步尝试。由于编者水平所限,书中难免有不妥和疏漏之处,诚请广大读者提出宝贵意见。

编 者

2006 年 11 月

目 录

第 1 章 工程材料及热处理	1
1.1 材料学基础	1
1.1.1 金属的晶体结构	1
1.1.2 多晶体结构及晶体缺陷	4
1.1.3 二元合金相图	6
1.1.4 铁碳合金相图	15
1.2 热处理工艺	28
1.2.1 退火及正火工艺	29
1.2.2 淬火及回火工艺	30
思考题	35
第 2 章 铸造	36
2.1 铸造工艺基础	36
2.1.1 液态合金的充型	36
2.1.2 铸件的收缩	39
2.2 砂型铸造	41
2.2.1 砂型铸造工艺过程	42
2.2.2 手工造型	43
2.2.3 机器造型	45
2.2.4 砂型铸造常见缺陷	47
2.3 特种铸造	48
2.3.1 熔模铸造	48
2.3.2 金属型铸造	50
2.3.3 压力铸造	51
2.3.4 低压铸造	52
2.3.5 离心铸造	52
2.3.6 铸造方法的选择	53
2.4 铸件结构工艺性	53
2.4.1 从简化铸造工艺过程分析	54
2.4.2 从避免产生铸造缺陷分析	56
2.4.3 铸件结构要便于后续加工	58
2.4.4 组合铸件的应用	58
思考题	59
第 3 章 锻压	60
3.1 金属的塑性变形理论	61
3.1.1 金属塑性变形的实质	61

3.1.2 塑性变形对金属组织及性能的影响	64
3.1.3 金属的锻造性能	65
3.2 锻造	68
3.2.1 自由锻造	68
3.2.2 模型锻造	72
3.3 板料冲压	75
3.3.1 板料冲压基本工序	75
3.3.2 冲压件结构工艺性	78
思考题	80
第4章 焊接	81
4.1 手工电弧焊	82
4.1.1 手弧焊设备	82
4.1.2 焊条	83
4.1.3 手弧焊工艺	85
4.2 其他焊接方法	88
4.2.1 埋弧自动焊	88
4.2.2 气体保护焊	89
4.2.3 电阻焊	91
4.2.4 钎焊	93
4.3 焊接质量及其控制	94
4.3.1 金属材料可焊性的概念	94
4.3.2 焊接接头金属组织性能的变化	95
4.3.3 焊接应力与焊接变形	96
4.3.4 焊件结构工艺性	98
4.3.5 焊接缺陷及防止措施	99
思考题	100
第5章 机械加工基础知识	102
5.1 切削运动及切削要素	102
5.1.1 零件表面的形成	102
5.1.2 切削运动	103
5.1.3 切削用量	104
5.1.4 切削层参数	105
5.2 切削刀具及其材料	106
5.2.1 切削刀具	106
5.2.2 刀具材料	111
5.3 切削过程及控制	113
5.3.1 切屑的形成过程及切屑类型	113
5.3.2 切削力	115
5.3.3 切削热和切削温度	116

5.3.4 刀具磨损和刀具耐用度	118
5.4 工件材料的切削加工	119
5.4.1 常用的工件材料切削加工性的评定指标	120
5.4.2 改善工件材料切削加工性的途径	120
思考题	121
第6章 零件表面的常规加工方法	122
6.1 外圆面的加工	122
6.1.1 外圆面的车削	122
6.1.2 外圆面的磨削	131
6.1.3 外圆面的光整加工	137
6.1.4 外圆面加工方案的分析与选择	139
6.2 孔的加工	139
6.2.1 钻孔	140
6.2.2 扩孔	145
6.2.3 铰孔	145
6.2.4 镗孔	146
6.2.5 拉孔	147
6.2.6 磨孔	149
6.2.7 研磨孔	150
6.2.8 珩磨孔	151
6.2.9 孔加工方案的选择	151
6.3 平面的加工	152
6.3.1 车平面	152
6.3.2 刨平面	153
6.3.3 铣平面	157
6.3.4 拉平面	164
6.3.5 磨平面	164
6.3.6 研磨平面	166
6.3.7 刮削平面	166
6.3.8 平面加工方案的选择	166
6.4 成形表面的加工	167
6.5 螺纹加工	168
6.5.1 攻螺纹和套螺纹	169
6.5.2 车螺纹	170
6.5.3 铣螺纹	171
6.5.4 磨螺纹	172
6.5.5 滚压螺纹	173
6.6 齿形加工	174
6.6.1 铣齿	174

6.6.2 滚齿	175
6.6.3 插齿	177
6.6.4 齿形的精加工	178
思考题	182
第7章 特种加工	183
7.1 电火花加工	183
7.1.1 电火花加工的原理	183
7.1.2 电火花加工的特点	184
7.1.3 电火花加工的应用范围	185
7.2 电解加工	186
7.2.1 电解加工的原理	186
7.2.2 电解加工的特点	187
7.2.3 电解加工的应用	188
7.3 超声波加工	188
7.3.1 超声波加工的原理	188
7.3.2 超声波加工的特点	189
7.3.3 超声波加工的应用	189
7.4 高能束流加工	191
7.4.1 激光加工	191
7.4.2 电子束和离子束加工	193
思考题	197
第8章 机械加工工艺过程概论	198
8.1 基本概念	198
8.1.1 生产过程和工艺过程	198
8.1.2 机械加工工艺过程的组成	198
8.1.3 生产纲领和生产类型	201
8.2 工件的安装和夹具	203
8.2.1 工件的安装	203
8.2.2 机床夹具的分类和组成	203
8.2.3 基准及其选择	205
8.3 零件机械加工工艺规程的制定	207
8.3.1 机械加工工艺规程的内容及作用	207
8.3.2 制定工艺规程的原则和原始资料	207
8.3.3 制定工艺规程的步骤	208
8.3.4 工艺文件的编制	211
8.4 零件的切削结构工艺性分析	212
思考题	216
第9章 数控机床加工	217
9.1 数控机床的基本组成	217

9.1.1 输入与输出装置	218
9.1.2 数控系统	218
9.1.3 伺服系统	219
9.1.4 数控机床主机	219
9.1.5 数控机床的辅助装置	220
9.2 数控机床加工特点	220
9.3 数控编程的种类	221
9.3.1 手工编程	221
9.3.2 自动编程	221
思考题	222
参考文献	223

1.1 材料学基础

材料的化学成分不同,其性能也不同。同一成分的材料可通过改变其内部结构和组织状态的方法改变其性能。固态物质按其原子(离子或分子)的聚集状态可分为两大类:晶体和非晶体。金属在固态下通常都是晶体,因而,要了解金属的内部结构,首先要了解晶体的结构。

1.1.1 金属的晶体结构

1. 金属晶体结构的基本概念

固态物质按其原子(离子或分子)的聚集状态进行分类,可以分为晶体(crystal)和非晶体(non-crystal)两大类。

原子(离子或分子)在三维空间中有规则地周期性重复排列而形成的聚集状态,称为晶体;而原子(离子或分子)无规则地堆积在一起形成的一种无序的聚集状态,称为非晶体。晶体是固体中最的一类。大多数固态的无机物都是晶体,例如食盐、单晶硅等;只有少数是非晶体,例如普通玻璃、松香、石蜡等。金属在固态下一般为晶体。晶体往往都具有规则的宏观外形,如食盐结晶后呈立方体形。但晶体与非晶体的根本区别不在外表,关键在于其内部的原子(离子或分子)的排列情况,如金属制品、金属构件外观形态各异,但它们仍是晶体。

由于晶体与非晶体内部结构不同,其性能也有区别。晶体具有固定的熔点,且在各个不同方向上表现出不同的性能,即各向异性。而非晶体没有固定的熔点,是在一个温度范围内熔化,因其在各个方向上的原子聚集密度大致相同,故表现为各向同性。

虽然晶体与非晶体之间存在着本质的差别,但两者在一定的条件下可相互转化。例如:玻璃经长时间高温加热后能形成晶态玻璃;利用特殊方式使液态金属以极快的速度冷却,可获得非晶态金属等。当然,这些转变的结果,使物体的性能也产生了极大的变化。

为了研究晶体中原子的排列规律,假定理想晶体中的原子都是固定不动的钢球,晶体即由这些钢球堆垛而成,建立的原子堆垛的球体几何模型如图 1-1(a)所示。这种模型的优点是立体感强、很直观,但是钢球密密麻麻地堆垛在一起,很难看清楚内部原子排列的规律和特点。为了便于分析各种晶体中的原子排列规律性,常以通过各原子中心的一些假想连线来描绘其三维空间中的几何排列形式,如图 1-1(b)所示。各连线的交点称作“结点”,表

示各原子振动平衡的中心位置。这种用以描述晶体中原子排列的空间格架称为空间点阵(space lattice)或晶格(crystal lattice)。由于晶格中原子排列具有周期性的特点,为了简便起见,可从其晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的、具有代表性的、最基本的几何单元来表达晶体规则排列的形式特征,如图 1-1(c)所示。组成晶格的这种最基本的几何单元称为晶胞(crystal cell),晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c (称为晶格常数, lattice constant)和棱边间的夹角 α 、 β 、 γ 来表示。

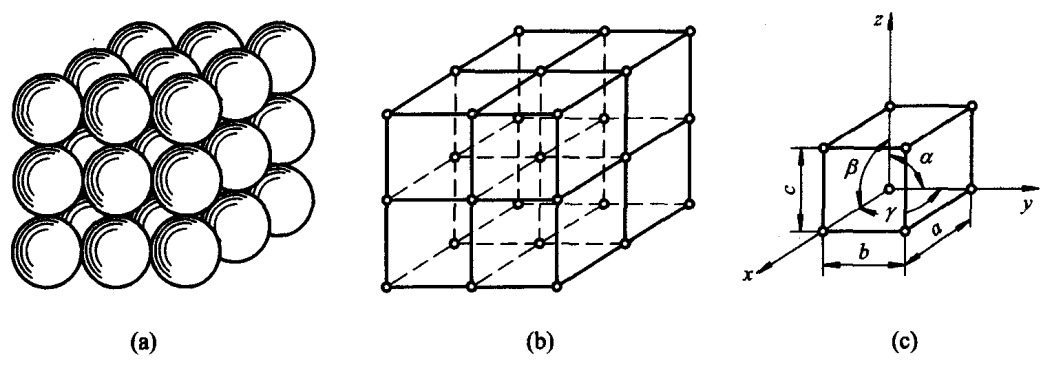


图 1-1 立方晶体球体几何模型、晶格和晶胞示意图

(a) 晶体的球体几何模型; (b) 晶格; (c) 晶胞及晶格常数

2. 典型的金属晶体结构

自然界中的各种晶体物质,或其晶格形式不同,或其晶格常数不同。这主要与其原子构造以及原子间的结合力的性质有关。对于金属晶体来说,其原子结构的共同特点是价电子数少,一般为 1~2 个,最多不超过 4 个;价电子与原子核间的结合力弱,很容易脱离原子核的束缚而变成自由电子。贡献出价电子的原子,变为正离子。自由电子穿梭于各离子之间作高速运动,就形成了电子云。正离子沉浸在电子云中,依靠运动于其间的公有化的自由电子的静电作用而结合起来,金属的这种结合方式称作金属键(metallic bond)。金属键没有方向性,也不存在键的饱和性。由于金属原子趋向于紧密排列,所以在工业上使用的金属元素中,除了少数具有复杂的晶体结构外,绝大多数都具有比较简单的晶体结构,其中最典型、最常见的金属晶体结构有三种类型,即体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

1) 体心立方晶格

体心立方晶格(body-centered cubic lattice)的晶胞模型如图 1-2 所示。

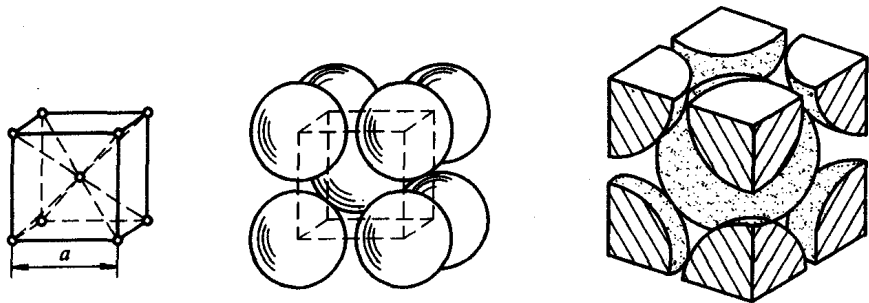


图 1-2 体心立方晶胞模型

由图 1-2 可以看到，其晶胞是一个立方体，晶胞的三个棱边长度 $a=b=c$ ，通常只用一个晶格常数 a 表示即可。三个棱边之间夹角均为 90° 。在体心立方晶胞的每个角上和晶胞中心都排列有一个原子。体心立方晶胞中属于单个晶胞的原子数为 $(1/8) \times 8 + 1 = 2$ 。在体心立方晶胞中，原子沿立方体对角线紧密地接触排列，长度为 $\sqrt{3}a$ ，等于 4 个原子半径，所以体心立方晶格的原子半径 $r = \sqrt{3}a/4$ 。

具有体心立方晶格结构的金属有 α -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W、 β -Ti 等。

2) 面心立方晶格

面心立方晶格(face-centered cubic lattice)的晶胞模型如图 1-3 所示，其晶胞也是一个立方体，晶格常数用 a 表示。在面心立方晶胞的每个角上和晶胞的六个表面的中心都排列有一个原子。面心立方晶胞中属于单个晶胞的原子数为 $(1/8) \times 8 + (1/2) \times 6 = 4$ 。在面心立方晶胞中，原子沿晶胞六个表面的对角线紧密地接触排列，长度为 $\sqrt{2}a$ ，等于 4 个原子半径，所以面心立方晶格的原子半径 $r = \sqrt{2}a/4$ 。

具有面心立方晶格结构的金属有 γ -Fe、Cu、Ni、Al、Au、Pb、Pt、 β -Co 等。

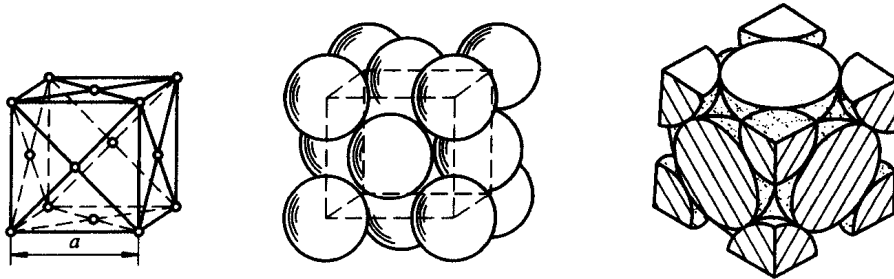


图 1-3 面心立方晶胞模型

3) 密排六方晶格

密排六方晶格(close-packed hexagonal lattice)的晶胞模型如图 1-4 所示。

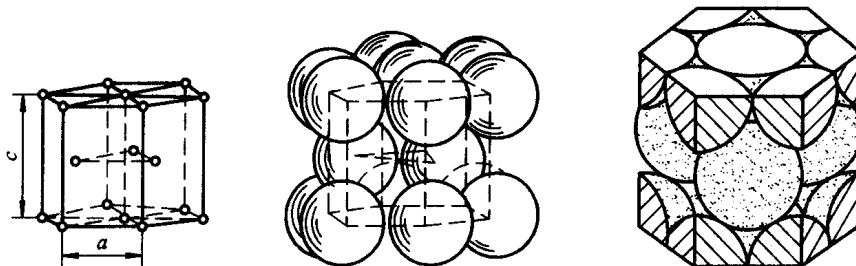


图 1-4 密排六方晶胞模型

由图 1-4 可以看到，在其晶胞的 12 个角上各有一个原子，构成六方体，上、下底面的中心各有一个原子，晶胞内还有三个原子。晶格常数用柱体高度 c 和六边形的边长 a 两个晶格常数来表示。 c 与 a 之比 c/a 称为轴比。典型的密排六方晶格中 $c/a = \sqrt{8/3} \approx 1.633$ 。

密排六方晶胞中属于单个晶胞的原子数为 $(1/6) \times 12 + (1/2) \times 2 + 3 = 6$ 。对于典型的密排六方晶格金属，相邻的两个原子紧密地接触排列，长度为 a ，等于2个原子半径，所以密排六方晶格的原子半径 $r = a/2$ 。

具有密排六方晶格结构的金属有 Mg、Zn、Be、Cd、 α -Ti、 α -Co 等。

1.1.2 多晶体结构及晶体缺陷

1. 多晶体结构和亚结构

前面所讲的晶体是没有任何缺陷的理想晶体，这种晶体在自然界中是不存在的。近年来，科学工作者虽然用人工的办法制造出了单晶体，但尺寸很小，事实上也还存在一些缺陷。

实际金属是由许多多晶体组成的，多晶体又是由许多小的、位向不一致的单晶体(晶粒)所组成，即多晶体结构(poly-crystalline structure)。单晶体与多晶体的结构如图 1-5 所示。这种外形不规则的小晶体称作晶粒(crystal grain)。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界(grain boundary)。多晶体由于各个晶粒的各向异性相互抵消，一般测不出其在单晶体中那样的各向异性(anisotropy)而显示出各向同性(isotropy)。如果对多晶体金属进行单向压力变形(如冷轧、冷拔)，使晶粒及夹杂物的位向趋于一致，成为明显的带状组织，才显示出各向异性。

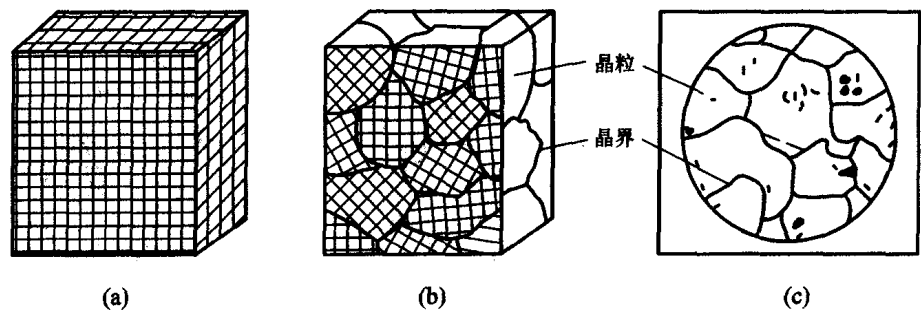


图 1-5 单晶体与多晶体的结构

(a) 单晶体; (b) 多晶体; (c) 多晶体纯铁在显微镜下的组织结构

实践证明，在多晶体的每个晶粒内部，实际上也并不像理想单晶体那样晶格位向完全一致，而是存在着许多尺寸更小，位向差也很小(一般是 $10' \sim 20'$ ，最大是 $1^\circ \sim 2^\circ$)的小晶块。它们相互嵌镶成一颗晶粒，这些在晶格位向上彼此有微小差别的晶内小区域称为亚结构(meta-structure)或嵌镶块。因其尺寸更小，故须在高倍显微镜或电子显微镜下才能观察到。图 1-5(c)是多晶体纯铁在显微镜下的组织结构。

2. 实际金属晶体缺陷

实际金属是多晶体结构，晶粒内存在着亚结构。同时，由于结晶条件等原因，使晶体内部某些区域原子排列的规则性受到干扰而破坏，不像理想晶体那样规则和完整。这种偏离理想状态的区域称为晶体缺陷(crystal defect)或晶格缺陷，按其几何形态特征分为以下三类：

1) 点缺陷

点缺陷(point defect)是指空间三维尺寸都很小，都相当于原子尺寸的缺陷，包括空位、间隙原子和置换原子等。

在实际晶体结构中，晶格的某些结点若未被原子所占据则形成空位。空位是一种平衡含量极小的热平衡缺陷，随晶体温度升高，空位的含量也随之提高。晶体中有些原子不占有正常的晶格结点位置，而处于晶格间隙中，称为间隙原子。同类原子晶格不易形成间隙原子，异类间隙原子大多数是原子半径很小的原子，如钢中的氢、氮、碳、硼等。晶体中若有异类原子占据了原来晶格中的结点位置，并替换了某些基体原子，则形成置换原子。

由于点缺陷的存在，使其周围的原子离开了原来的平衡位置，造成晶格畸变，如图 1-6 所示。

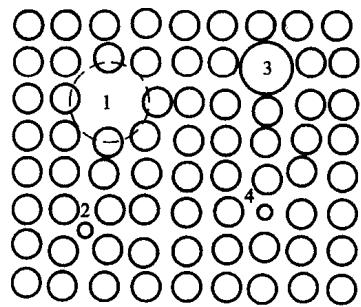


图 1-6 点缺陷示意图

1—空位；2—间隙原子；3、4—置换原子

2) 线缺陷

线缺陷(line defect)是指空间三维尺寸中，两维尺寸很小，在原子尺寸范围内，另一维尺寸相对很大的缺陷，属于这一类缺陷的主要是位错。

位错(dislocation)是晶体中某处有一列或若干列原子发生有规律的错排现象。位错可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位错线。晶体中位错的基本类型有刃型位错(edge dislocation)和螺型位错(spire dislocation)两种。刃型位错模型如图 1-7 所示，其中某一原子面在晶体内部中断，宛如用一把锋利的钢刀切入晶体沿刀口插入一额外半原子面一样，刀口处的原子列即为刃型位错线。螺型位错模型如图 1-8 所示，相当于钢刀切入晶体后，被切的上、下两部分沿刀口相对错动了一个原子间距，上、下两层相邻原子发生了错排和不对齐的现象。沿刀口的错排原子被扭曲成了螺旋形，即为螺型位错线。无论是刃型位错还是螺型位错，沿位错线周围的原子排列都偏离了平衡位置，产生晶格畸变。

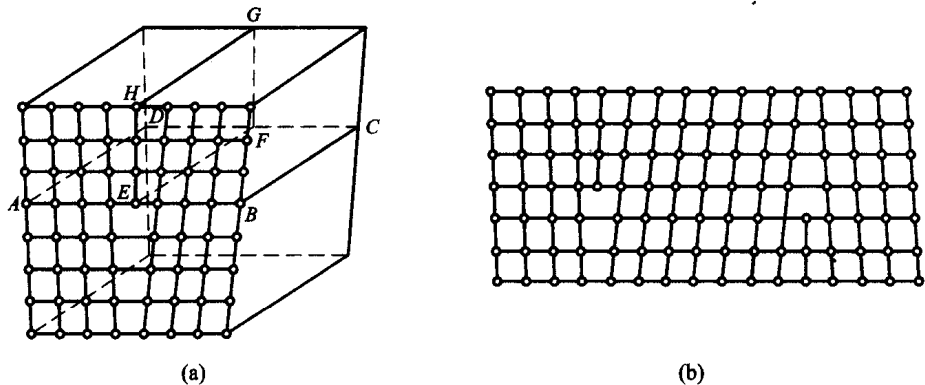


图 1-7 刃型位错示意图

(a) 立体模型；(b) 平面模型

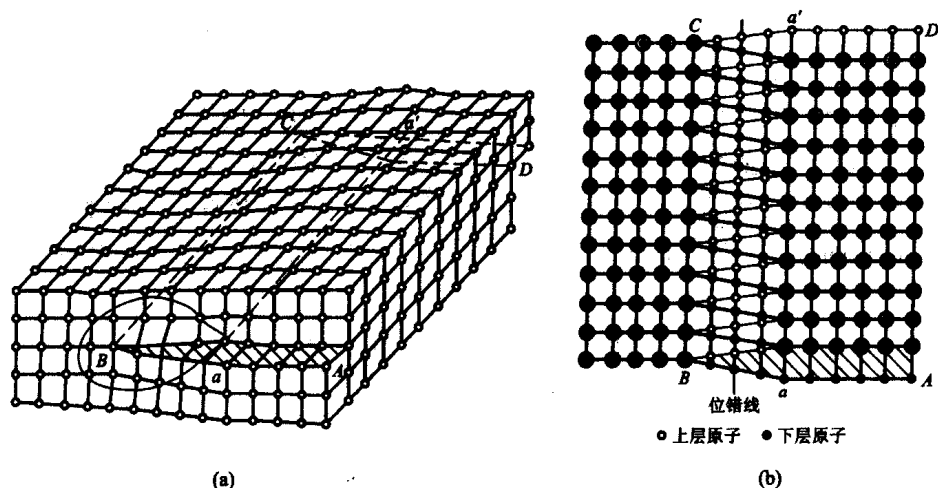


图 1-8 螺型位错示意图

(a) 立体模型; (b) 平面模型

3) 面缺陷

面缺陷(face defect)是指空间三维尺寸中, 一维尺寸很小, 在原子尺寸范围内, 另外两维尺寸相对很大的缺陷, 包括晶界、亚晶界(sub-boundary)和相界(phase-boundary)等。实际金属是多晶体, 各晶粒间位向不同, 晶界处原子排列的规律性受到破坏。晶界实际上是不同位向晶粒之间原子排列无规则的过渡层。亚晶界同样是小区域的原子排列无规则的过渡层。无论是晶界还是亚晶界, 过渡层中晶格均产生了畸变, 如图 1-9 所示。相界是具有不同晶体结构的两相之间的分界面, 由于相界面上的原子偏离平衡位置产生了畸变。

综上所述, 晶体缺陷处及其周围均有明显的晶格畸变产生, 引起晶格能量的升高, 使金属的物理、化学和力学性能发生显著变化。

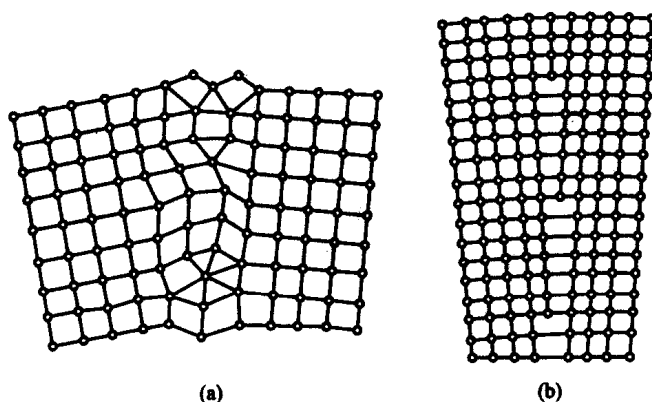


图 1-9 晶界、亚晶界的过渡区结构示意图

(a) 晶界; (b) 亚晶界

1.1.3 二元合金相图

1. 合金的结构

1) 合金的基本概念

合金(alloy)是在金属中加入一种或几种(金属或非金属)元素, 熔合而成为具有金属性质

的物质。如在铁中加碳熔炼成钢铁，在铜中加入锌而熔合成为黄铜等，都是机械工程上常用的合金材料。纯金属材料的机械性能、工艺性能和物理化学性能常常不能满足工程上的要求，且提炼价格昂贵，故在机械工程中广泛采用合金材料，尤其是铁碳合金。

组元(component)是组成合金的最基本的、独立的物质。组元通常是纯元素，也可以是稳定的化合物。根据组成合金组元数目的多少，合金可分成二元合金、三元合金或多元合金等。

相(phase)是指合金中具有同一化学成分且结构相同的均匀部分。合金在固态下可以形成均匀的单相合金，也可以是由几种不同的相组成的多相合金。合金中相和相之间有明显的界面。

2) 合金的相结构

液态是完全互溶的合金，在其凝固时，按合金组元原子之间相互作用的不同，可能出现三种基本情况：合金呈单相的固溶体；合金呈单相的金属化合物；合金由两相(固溶体与固溶体、固溶体与金属化合物、金属化合物与金属化合物)组成的机械混合物。

(1) 固溶体(solid solution)。金属在固态下也具有溶解某些元素的能力，从而形成一种成分和性质均匀的固态合金，叫固溶体。同溶液一样，固溶体也有溶剂与溶质之分。固溶体的晶格结构与两组元之一的晶格结构相同，被保持晶格的元素称为溶剂，溶入溶剂的元素称为溶质。根据溶质原子在溶剂中的分布状况，固溶体主要有以下两种形式：

① 置换固溶体(substitution solid solution)。在溶剂晶格某些结点上，其原子被溶质原子所替代而形成的固溶体，称为置换固溶体，如图 1-10 和图 1-11(a)所示。

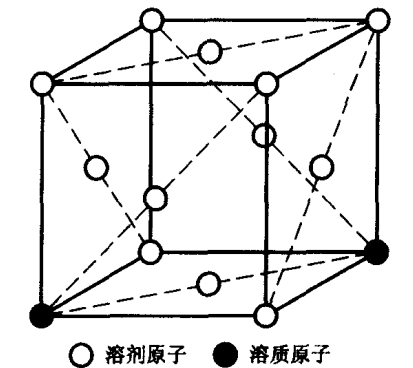


图 1-10 置换固溶体立体结构示意图

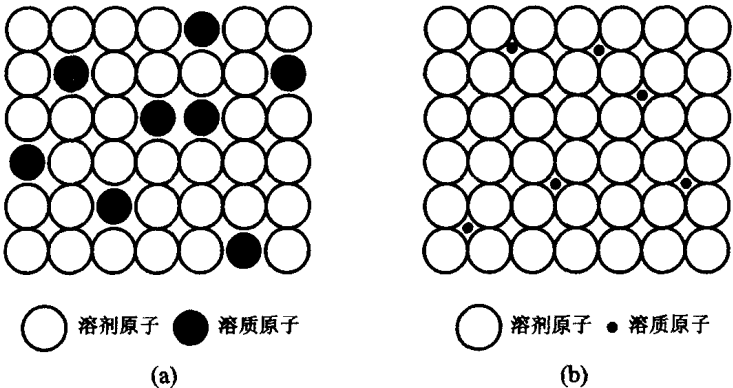


图 1-11 固溶体结构平面示意图

(a) 置换固溶体；(b) 间隙固溶体

大多数元素,如 Si、Mn、Cr、Ni 等,均可溶入 α -Fe 或 γ -Fe 中形成置换固溶体。溶质原子在溶剂晶格中的溶解度决定于二者原子直径的差别和在周期表中相互位置的距离。

② 间隙固溶体(space solid solution)。不论何种形式的晶格,其原子与原子之间总有一些空隙存在。直径较大的原子所组成的晶格,其空隙的尺寸也较大,有时能容纳一些尺寸较小的原子,这种溶解方式形成的固溶体,称为间隙固溶体,如图 1-11(b)所示。

(2) 金属化合物(metal compound)。当组成合金的各元素之间的化学性质差别较大,原子直径大小也不相同时,则合金能按一定组成形成金属化合物。化合物的种类较多,根据化合物结构的特点,常分如下三类:

① 正常价化合物(normal-valence compound)。这类化合物是由元素周期表上相距较远而电化学性质相差较大的两元素形成的。它们的特征是严格遵守化合价规律,因而这类化合物对其两个组元几乎没有溶解度,其成分可用化学式来表示,如 Mg_2Si 、 ZnS 等。

② 电子化合物(electron compound)。这类化合物与正常价化合物不同,它不遵守一般的化合价规律。但是,如果将这类化合物的价电子数与原子数的比值(该比值称为电子浓度)进行统计,就会发现一定的规律性:凡电子浓度为 $3/2$ 的电子化合物,皆具有体心立方晶格,习惯上称为 β 相,如 CuZn 、 Cu_5Sn 、 NiAl 、 FeAl 等;凡电子浓度为 $21/13$ 的电子化合物,皆具有复杂立方晶格,称为 γ 相,如 Cu_5Zn_8 、 $\text{Cu}_{31}\text{Zn}_8$ 等;凡电子浓度为 $7/4$ 的电子化合物,皆具有密排六方晶格,称 ϵ 相,如 CuZn_3 、 Cu_3Sn 等。

③ 间隙化合物(space compound)。间隙化合物是由过渡族金属元素(Fe、Cu、Mn、Mo、W、V 等)和原子直径很小的类金属元素(C、N、H、B)形成的。最常见的间隙化合物有金属的碳化物、氮化物和硼化物等。

2. 合金的结晶与二元合金相图

1) 二元合金相图的基本知识

由两种或两种以上的组元按不同的比例配制成一系列不同成分的所有合金称为合金系,如 Al-Si 合金系、Fe-C-Si 合金系。为了研究合金系中合金的组织与性能之间的关系,就必须了解合金中各种组织的形成及变化规律。合金相图就是用图解的方法表示合金系中合金的状态、组织、温度和成分之间的关系。

相图(phase diagram)又称为平衡相图或状态图,它是表明合金系中不同成分合金在不同温度下,是由哪些相组成以及这些相之间平衡关系的图形。利用合金相图可以知道各种成分的合金在不同的温度下有哪些相,各相的相对含量、成分以及温度变化时可能发生的变化。掌握合金相图的分析和使用方法,有助于了解合金的组织状态和预测合金的性能,也可按要求研究配制新的合金。生产实践中,合金相图是制定合金熔炼、锻造和热处理工艺的重要依据。

2) 二元合金相图的建立方法

现有的合金相图都是通过实验建立的。其根据是,不同成分的合金,晶体结构不同,物理化学性能也不同。当合金中有相转变时,必然伴随有物理化学性能的变化,测定发生这些变化的温度和成分,再经综合,即可建立整个相图。建立合金相图常用的方法有热分析法、膨胀法、电阻法、X-射线分析法和磁性分析法等。

以热分析法建立 Cu-Ni 合金相图为例,建立合金相图的具体步骤如下所述。