

高等学校“十二五”规划教材

工程材料



李涛 杨慧 主编

GONGCHENG CAILIAO



化学工业出版社

高等学校“十二五”规划教材

工 程 材 料

李 涛 杨 慧 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书内容分为四篇。第一篇为工程材料的基本理论，包括材料的结构与性能、金属材料组织与性能的基本理论和基本规律。第二篇为金属材料，系统地介绍了常用金属材料和新型金属材料等的知识。第三篇为其他工程材料，包括高分子材料、陶瓷材料、复合材料以及功能材料。第四篇介绍了机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用。

本书结合案例式教学模式，融入工程实际和科研成果，并加入工程材料的新发展、新理论、新应用。本书可作为高等工科院校机械类和近机类（电子、热能、水利、建筑等）专业教材，也可作为高等职业技术学院、高等专科学校相关专业教材和有关工程技术人员参考书。

图书在版编目（CIP）数据

工程材料/李涛，杨慧主编．—北京：化学工业出版社，2013.1
高等学校“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-15635-8

I. ①工… II. ①李…②杨… 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（2012）第 246266 号

责任编辑：陶艳玲	文字编辑：颜克俭
责任校对：陈 静	装帧设计：杨 北
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 装：三河市延风印装厂	
787mm×1092mm 1/16 印张 22½ 字数 577 千字 2013 年 1 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。	

前 言

本书是根据《教育部关于“十二五”期间普通高等教育教材建设与改革意见》的精神，参照有关专业教学的基本要求，以工程应用案例为索引，结合现代工程材料科学与技术的特点和发展趋势，为培养工程应用型创新人才为目标而编写的。

“工程材料”课程是机械、热能、车辆专业的必修专业基础课。本书以选择材料为主线，系统地阐述了工程材料的结构、组织与性能的基本理论和基本规律，并以金属材料为重点，同时介绍了高分子材料、陶瓷材料、复合材料以及新型功能材料。

本书精简传统内容，强化金属材料及选材的知识，力求使学生在掌握“材料结构与性能的关系”这一核心思想的基础上，掌握工程材料的基本理论、基本知识，具备根据机械零件使用条件和性能要求，对结构零件进行合理的选材及制定零件工艺路线的初步能力。

本书内容分为四篇，即工程材料的基本理论、金属材料、其他工程材料、机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用。阐述内容力求由浅入深，循序渐进。为了培养学生的自主学习能力和创新思维，拓宽学生知识面，培养工程应用型人才，本书是在多年讲授该课程的基础上精简、提炼、更新教学内容编写而成，并阐述了工程材料的新发展、新理论、新材料，修正了错误的概念和学说，增加工程实际和科研案例。此外，本书章节内容的组织以项目案例为主线，在每章中均以案例为导向，增设导读、实例、课后思考题，以便学生更容易理解、掌握教学内容。

本书可作为机械、热能、车辆专业等大学本科生必修的工程材料学课程的教材，参考学时为 60 学时。考虑到各校对本课程的具体学时安排不尽相同，在使用本教材时可根据实际情况对有关内容作适当的增删和调整，讲授和自学相结合。

本书共 14 章，由李涛、杨慧主编，冯佃臣副主编。其中第 1 章由杨慧、孙昊合作撰写，第 13、14 章由杨慧撰写，第 2、7 章由韩强撰写，第 3 章由王海燕、计云萍合作撰写，第 4 章由冯佃臣撰写，第 5 章由李涛撰写，第 6 章由冯佃臣、李涛合作撰写，第 8 章由孙昊撰写，第 9 章由李晓伟撰写，第 10 章由刘永珍撰写，第 11 章由王海燕撰写，第 12 章由计云萍撰写。最后，由李涛、杨慧负责全书的总成。

本书获内蒙古科技大学教材建设项目资助。由于编者水平有限，书中不当之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2012 年 10 月 10 日

目 录

第 1 篇 工程材料的基本理论	1
第 1 章 金属材料的结构与性能特点	1
1.1 金属材料的结构与组织	1
1.1.1 纯金属的晶体结构	1
1.1.2 实际金属中的晶体缺陷	5
1.1.3 合金的晶体结构	7
1.1.4 金属材料的组织	10
1.2 金属材料的性能特点	11
1.2.1 金属材料的工艺性能	11
1.2.2 金属材料的使用性能	12
习题与思考题	19
第 2 章 纯金属和合金的结晶	20
2.1 纯金属的结晶	20
2.1.1 金属的结晶过程及过冷	20
2.1.2 金属结晶的热力学条件和结构条件	21
2.1.3 金属的形核和晶核的长大	22
2.1.4 细晶粒的获得	23
2.2 合金的结晶	23
2.2.1 二元系相图	23
2.2.2 铁碳合金相图	30
2.2.3 合金铸件的组织与缺陷	39
习题与思考题	41
第 3 章 金属的塑性加工与再结晶	43
3.1 金属的塑性变形	43
3.1.1 单晶体的塑性变形	43
3.1.2 多晶体的塑性变形	46
3.1.3 合金的塑性变形	48
3.1.4 塑性变形对金属材料组织和性能的影响	50
3.2 冷变形金属在加热时的变化	52
3.2.1 概述	52
3.2.2 加热时显微组织的变化	54
3.2.3 冷变形金属的转变驱动力	54
3.2.4 加热时力学性能的变化	54
3.3 回复	55
3.3.1 定义	55
3.3.2 回复过程性能的变化	55
3.3.3 回复的应用	56
3.4 再结晶	56
3.4.1 定义	57
3.4.2 再结晶的特点	57
3.4.3 再结晶的形核与长大	57
3.4.4 再结晶温度	58
3.5 金属的热加工	60
3.5.1 热加工与冷加工	60
3.5.2 动态回复和动态再结晶	60
3.5.3 静态回复和静态再结晶	61
3.5.4 热加工后的组织与性能	61
习题与思考题	61
第 4 章 钢的热处理	63
4.1 钢在加热时的转变	63
4.1.1 奥氏体的形成过程	63
4.1.2 奥氏体晶粒的大小及其影响因素	64
4.2 钢在冷却时的转变	65
4.2.1 过冷奥氏体等温转变曲线	66
4.2.2 影响过冷奥氏体等温转变的因素	67
4.2.3 过冷奥氏体转变及其产物的组织形态与性能	68
4.3 钢的表面淬火	86
4.3.1 感应加热表面淬火	86
4.3.2 火焰加热表面淬火	87
4.4 钢的化学热处理	87
4.4.1 化学热处理的基本过程	88
4.4.2 钢的渗碳	88
4.4.3 钢的氮化	90
4.4.4 钢的氰化	90
习题与思考题	91
第 5 章 钢的合金化	92
5.1 合金元素在钢中的存在形式	92
5.2 合金元素与铁、碳的作用	93
5.2.1 合金元素与铁的相互作用	93
5.2.2 合金元素与碳的作用	95

5.3 合金元素对 Fe-Fe ₃ C 相图的影响	97	转变的影响	101
5.3.1 合金元素对奥氏体、铁素体区存在范围的影响	97	5.4.3 合金元素对淬火钢回火转变的影响	103
5.3.2 合金元素对 Fe-Fe ₃ C 相图共析点 S 的影响	98	5.5 合金元素对钢强韧性的影响	105
5.4 合金元素对钢相变的影响	99	5.5.1 强化途径	105
5.4.1 合金元素对钢在加热时奥氏体形成过程的影响	99	5.5.2 韧化途径	107
5.4.2 合金元素对钢的过冷奥氏体分解		5.6 合金元素对钢的工艺性能的影响	111
		习题与思考题	111

第 2 篇 金属材料 113

第 6 章 工业用钢	113	7.3.4 可锻铸铁石墨化退火实例	194
6.1 碳钢	113	7.4 球墨铸铁	195
6.1.1 常存杂质元素对碳钢性能的影响	113	7.4.1 球墨铸铁的牌号和化学成分	195
6.1.2 碳钢的分类	115	7.4.2 球墨铸铁的组织 and 性能	195
6.1.3 钢的牌号和用途	115	7.4.3 球墨铸铁的球化剂	196
6.2 合金钢	121	7.4.4 球墨铸铁的热处理	196
6.2.1 概述	121	7.4.5 球墨铸铁的特性 and 用途	198
6.2.2 合金结构钢	123	7.5 特殊性能铸铁	199
6.2.3 合金工具钢	153	7.5.1 耐磨合金铸铁	200
6.2.4 特殊性能钢	169	7.5.2 耐热合金铸铁	202
习题与思考题	183	7.5.3 耐蚀合金铸铁	205
第 7 章 铸铁	185	习题与思考题	207
7.1 铸铁概述	185	第 8 章 有色金属及其合金	208
7.1.1 铁碳合金双重相图	185	8.1 铝及铝合金	208
7.1.2 铸铁的石墨化	186	8.1.1 纯铝	208
7.1.3 铸铁的分类	187	8.1.2 铝合金	209
7.2 灰铸铁	189	8.2 铜及其合金	215
7.2.1 灰铸铁的牌号和化学成分	189	8.2.1 纯铜的特性及应用	215
7.2.2 灰铸铁的基本组织特征	190	8.2.2 铜合金	216
7.2.3 灰铸铁的孕育处理及热处理	190	8.3 钛及其合金	222
7.2.4 灰铸铁的性能及用途	191	8.3.1 纯钛	222
7.3 可锻铸铁	192	8.3.2 钛合金	223
7.3.1 可锻铸铁的牌号、性能及组织	192	8.4 镁及其合金	227
7.3.2 可锻铸铁的石墨化退火	193	8.4.1 纯镁	227
7.3.3 可锻铸铁的特性及用途	194	8.4.2 镁合金	228
		习题与思考题	231

第 3 篇 其他工程材料 233

第 9 章 高分子材料	233	9.2.1 塑料的分类及特点	240
9.1 高分子材料的结构与性能特点	233	9.2.2 通用塑料	240
9.1.1 高分子材料的基本概念	233	9.2.3 工程塑料	244
9.1.2 高分子材料的结构	234	9.2.4 塑料制品的组分与作用	249
9.1.3 高分子材料的性能特点	236	9.2.5 塑料制品的成型加工方法	250
9.2 塑料	239	9.3 橡胶	252

9.3.1 橡胶的组成	252	11.3.1 主要的液相工艺	281
9.3.2 橡胶的性能特点	252	11.3.2 主要的固相工艺	282
9.3.3 合成橡胶的主要品种	252	11.3.3 主要的气相工艺	283
9.4 合成纤维	255	11.4 复合材料的界面	284
9.4.1 纤维的分类	255	11.4.1 定义	284
9.4.2 合成纤维的主要品种	256	11.4.2 界面反应	285
习题与思考题	259	11.4.3 界面效应	286
第10章 陶瓷材料	260	11.5 复合材料的应用	286
10.1 陶瓷材料的结构与性能	260	11.5.1 复合材料的主要应用领域	286
10.1.1 陶瓷材料的结构	260	11.5.2 金属基复合材料的应用	287
10.1.2 陶瓷材料的性能	264	11.5.3 陶瓷基复合材料的应用	288
10.2 陶瓷材料	266	11.5.4 树脂基复合材料	288
10.2.1 特种陶瓷	267	11.5.5 纳米复合材料	289
10.2.2 结构陶瓷	267	11.6 复合材料目前存在的问题	289
习题与思考题	274	习题与思考题	289
第11章 复合材料	275	第12章 功能材料及新材料	290
11.1 概述	275	12.1 功能材料	290
11.1.1 复合材料的发展史	275	12.1.1 概述	290
11.1.2 复合材料的定义	276	12.1.2 电功能材料	291
11.1.3 复合材料的特点	276	12.1.3 磁功能材料	296
11.1.4 复合材料的性能	276	12.1.4 热功能材料	300
11.2 复合材料的分类	277	12.1.5 光功能材料	302
11.2.1 按基体相性质分类	277	12.1.6 声功能材料	304
11.2.2 按性能分类	279	12.1.7 其他功能材料	305
11.2.3 按用途分类	279	12.2 未来材料的发展方向	309
11.2.4 按增强剂分类	279	习题与思考题	310
11.3 复合材料的制造方法	280		
第4篇 机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用	311		
第13章 机械零件失效与强化	311	习题与思考题	330
13.1 机械零件的失效形式	311	第14章 典型工件的选材及工程材料的应用	331
13.1.1 过量变形失效	313	14.1 典型零件的选材及工艺路线设计	331
13.1.2 断裂失效	313	14.1.1 轴类零件的选材及工艺路线设计	331
13.1.3 磨损失效	317	14.1.2 齿轮选材	333
13.1.4 腐蚀失效	318	14.1.3 弹簧选材	335
13.2 机械零件的失效分析	319	14.1.4 刀具选材	339
13.2.1 机械零件失效的原因	320	14.2 工程材料的应用	341
13.2.2 零件失效分析	321	14.2.1 汽车用材	341
13.2.3 零件失效分析案例	322	14.2.2 机床用材	345
13.3 工程材料的强化与强韧化	323	14.2.3 化工设备用材	347
13.3.1 工程材料的强化方法	324	14.2.4 航空航天器用材	348
13.3.2 工程材料的强韧化	325	习题与思考题	350
13.4 机械零件选材的一般原则	326	参考文献	352
13.4.1 使用性能原则	326		
13.4.2 工艺性能原则	327		
13.4.3 经济性原则	329		

第 1 篇 工程材料的基本理论

第 1 章 金属材料的结构与性能特点

本章目的：了解金属材料的结构，掌握结构和性能之间的关系。

本章重点：金属材料的结构与组织。

本章难点：金属的强化与组织结构的关系。

1.1 金属材料的结构与组织

材料的性能决定于材料的化学成分和其内部的组织结构。固态物质按其原子（离子或分子）的聚集状态可分为两大类：晶体与非晶体。原子（离子或分子）在三维空间有规则地周期性重复排列的物体称为晶体，如天然金刚石、水晶、氧化钠等。原子（离子或分子）在空间无规则排列的物体称为非晶体，如松香、石蜡、玻璃等。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，但是近年的发展，在工艺生产和科学研究中采用特殊制备工艺和手段，已经可以制备固态的非晶态金属，如 Ni-P 合金。

1.1.1 纯金属的晶体结构

【案例一】 室温下，纯铁的抗拉强度为 200MPa，纯铜为 60MPa。

引入：纯铁、纯铜都是晶体，但它们的性能却不相同，这是为什么？

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（或离子）的中心画出许多空间直线，这些直线形成的空间格架，称为晶格。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，如图 1-1 所示。晶胞的基本特性即反映该晶体结构（晶格）的特点。

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 等六

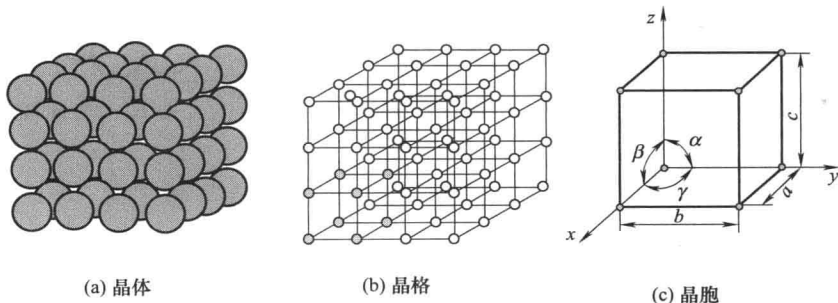


图 1-1 晶体、晶格和晶胞示意

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及晶格常数的不同, 表现出不同的物理、化学和力学性能。金属的晶体结构可用 X 射线结构分析技术进行测定。

1.1.1.1 三种常见的金属晶体结构

(1) 体心立方晶格(胞)(BCC 晶格) 体心立方晶格的晶胞, 如图 1-2 所示, 8 个原子处于立方体的角上, 1 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钼 (Mo)、钨 (W)、钒 (V)、 α -铁 ($\alpha\text{-Fe}$, $< 912^\circ\text{C}$) 等。

体心立方晶胞具有下列特征。

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

② 晶胞原子数 在体心立方晶胞中, 每个角上的原子在晶格中同时属于 8 个相邻的晶胞, 因而每个角上的原子仅有 $1/8$ 属于一个晶胞, 而中心的原子则完全属于这个晶胞。所以一个体心立方晶胞所含的原子数为 $\frac{1}{8} \times 8 + 1$, 即 2 个。

③ 原子半径 晶胞中相距最近的两个原子之间的距离的一半称为原子半径 ($r_{\text{原子}}$)。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所占有的体积与该晶胞体积之比称为致密度 (也称密排系数)。致密度越大, 原子排列紧密程度越大。体心立方晶胞的致密度为:

$$K = \frac{nV_1}{V} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3}{a^3} = 0.68$$

式中, K 为致密度; n 为晶胞原子数; V_1 为原子体积; V 为晶胞体积。

故, 体心立方晶胞或晶格中有 68% 的体积被原子占据, 其余为空隙。

⑤ 配位数 晶格中与任一原子相距最近且距离相等的原子的数目叫做配位数。配位数越大, 原子排列紧密程度就越大。体心立方晶格的配位数为 8。

(2) 面心立方晶格(胞)(FCC 晶格) 面心立方晶胞如图 1-3 所示。金属原子分布在立方体的 8 个角上和 6 个面的中心。面中心的原子与该面 4 个角上的原子紧靠。具有这种晶格的金属有铝 (Al)、铜 (Cu)、镍 (Ni)、金 (Au)、银 (Ag)、 γ -铁 ($\gamma\text{-Fe}$, $912 \sim 1394^\circ\text{C}$) 等。

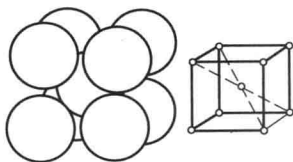


图 1-2 体心立方晶胞

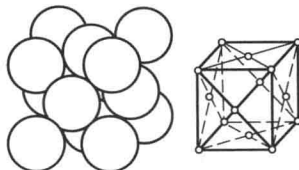


图 1-3 面心立方晶胞

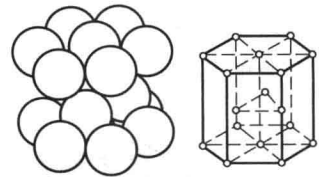


图 1-4 密排六方晶胞

面心立方晶胞的特征如下。

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

② 晶胞原子数 $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$ (个)

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

④ 致密度

$$K = \frac{nV_1}{V} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4} a \right)^3}{a^3} = 0.37$$

故，面心立方晶胞或晶格中有 37% 的体积被原子占据，其余为空隙。

⑤ 配位数 12。

(3) 密排六方晶格 (胞) (HCP 晶格) 密排六方晶格的晶胞，如图 1-4 所示，12 个金属原子分布在六方体的 12 个角上，在上、下底面的中心各分布 1 个原子，上、下底面之间均匀分布 3 个原子。具有这种晶格的金属有镁 (Mg)、镉 (Cd)、锌 (Zn)、铍 (Be) 等。

密排六方晶胞的特征如下。

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 来表达，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 $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ (个)

③ 原子半径 $r_{\text{原子}} = \frac{1}{2}a$

④ 致密度 $K = \frac{nV_1}{V} = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{\frac{3\sqrt{3}}{2} a^2 \sqrt{\frac{8}{3}} a} = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2} \right)^3}{3\sqrt{2} a^3} = 0.74$

故，密排六方晶胞或晶格有 74% 的体积被原子占据，其余为空隙。

⑤ 配位数 12。

由以上三种金属晶体结构的特征可看出：面心立方晶格和密排六方晶格中的原子排列紧密程度完全一样，在空间是最紧密排列的两种形式。体心立方晶格中的原子排列紧密程度要差些。

案例一分析：室温下，纯铁为体心立方结构，纯铜为面心立方结构，两者晶格中原子排列的紧密程度不同，故性能也不相同，纯铁的强度优于纯铜，但塑性比纯铜低。

当同一种金属 (如 Fe) 从面心立方晶格向体心立方晶格转变时，其性能也会改变，例如体积将膨胀，就是钢在淬火因相变而发生体积变化的原因。

1.1.1.2 晶面、晶向表示方法与晶体的各向异性

【案例二】科学研究和工程实践表明，在同一类型晶格的不同方向上的性能也有差异，体心立方晶格的 α -Fe 单晶体，其 $\langle 111 \rangle$ 晶向的弹性模量， $\langle 100 \rangle$ 晶向的 $E = 1.35 \times 10^5$ MPa，前者是后者的两倍多。

引入：金属中的许多性能和现象都与晶体中的特定晶面和晶向有密切关系，如何简单地表达晶体中的晶面和晶向呢？

在晶体中，由一系列原子所组成的平面称为晶面。任意两个原子之间的连线称为原子列，其所指方向称为晶向。表示晶面的符号称为晶面指数，例如 (100)；表示晶向的符号称为晶向指数，例如 $[101]$ 。下面介绍它们的确定方法。

(1) 晶向指数的确定方法

① 以晶胞中的某原子为原点，确定三维晶轴坐标系，通过原点作平行于所求晶向的

直线。

② 以相应的晶格常数为单位, 求出直线上任意一点的三个坐标值。

③ 将所求坐标值化为最简整数, 并用方括号括起, 即为所求的晶向指数, 例如 $[101]$ 。

具体晶向指数如图 1-5 所示, 其形式为 $[uvw]$ 。

(2) 晶面指数的确定方法

① 设坐标轴 以晶胞的三条棱边为坐标轴, 坐标原点应在待定晶面之外。

② 求截距 以晶格常数 a 、 b 、 c 为度量单位, 求出晶面在各轴上的截距。

③ 求倒数 求三个截距值的倒数。

④ 化整数 将所得数值化为最简单的整数, 并用圆括号括起, 即为晶面指数, 如图 1-6 所示, 其形式为 (hkl) 。

值得注意的是每一个晶面指数 (或晶向指数) 并非仅指晶体中的某一个晶面 (或晶向), 而是泛指晶格中一系列与之相平行的一组晶面 (或晶向)。立方晶系中, 凡是指指数相同的晶面与晶向是相互垂直的, 例如: $[111]$ 晶向垂直于 (111) 晶面, 如图 1-7 所示。同时, 在晶体中存在一些这样的晶面 (或晶向), 虽然它们在空间的位向各不相同, 但各晶面 (或晶向) 中原子排列方式是相同的, 如 (100) 、 (010) 、 (001) 等。通常将这些原子排列情况相同但空间位向不同的晶面 (或晶向) 统称为晶面 (或晶向) 族, 用 $\{hkl\}$ (或 $\langle uvw \rangle$) 表示。

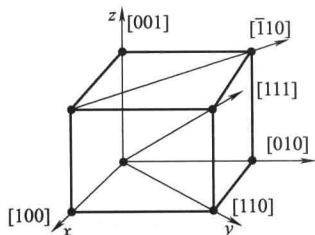


图 1-5 一些晶向的晶向指数

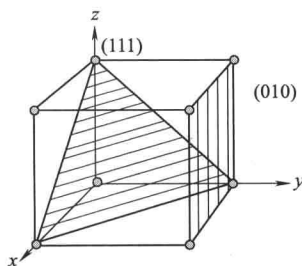


图 1-6 一些晶面的晶面指数

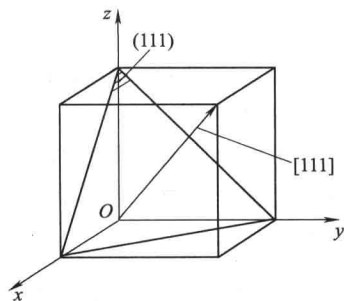


图 1-7 晶向和晶面指数的示意

(3) 金属晶体的各向异性 晶体在不同方向上性能不同的现象称为各向异性。

案例二分析: 在晶体中, 不同晶面和晶向上原子排列的密度不同, 它们之间的结合力的大小也不相同, 因而金属晶体不同方向上的性能也不同, 体心立方晶格的 α -Fe 单晶体, 其 $\langle 100 \rangle$ 晶向的原子密度 (单位长度的原子数) 为 $1/a$ (a 为晶格常数), $\langle 111 \rangle$ 晶向的原子密度为 $1.16/a$, 所以 $\langle 111 \rangle$ 晶向的原子密度大, 其弹性模量大, 同样, 沿原子密度大的晶向的屈服强度、磁导率等性能, 也显示出明显的优越性。

总之, 金属晶体的力学、物理和化学等方面的性能在不同的方向上是不一样的。非晶体在各个方向上的性能完全相同, 这种性质叫非晶体的各向同性。

但是对于实际使用的金属, 由于其内部有许多晶粒组成, 通常称为多晶体, 每个晶粒在空间分布的位向不同, 如图 1-8 所示。因而在宏观上沿各个方向上的性能趋于相同, 晶体的各向异性就显示不出来了。

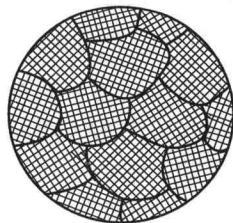


图 1-8 金属多晶体结构示意图

1.1.2 实际金属中的晶体缺陷

【案例三】 在铸造生产中,人们将液态 Al-Cu 合金喷洒在一个吸热能力很强的冷却板上,它所产生的冷却速度可达 $10^6\text{ }^{\circ}\text{C/s}$,生产出的晶粒大小为十分之几微米,它的强度比用一般铸造方法得到的强度高 6 倍以上。

引入:在实际应用的金属材料中,总是不可避免地存在着一些原子偏离规则排列的不完整区域,称为晶体缺陷,它们的存在对金属的性能有影响吗?

按照几何特征,晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。金属的晶体缺陷对金属的性能影响很大,实际上一般的金属材料采用的强化方法主要就是调整结构缺陷而进行的,因此晶体缺陷在强度理论中是非常重要的。

1.1.2.1 点缺陷

点缺陷是指在三维尺度上都很小的,不超过几个原子直径的缺陷。

(1) 空位 在晶体晶格中,若某结点上没有原子,则这结点称为空位,如图 1-9 所示。晶格中原子处于高频热振动中,当某些原子的动能大大超过给定温度下的平均动能,原子可能脱离原来的结点,跑到晶体的表面(包括晶界面、孔洞、裂纹等内表面),甚至从表面蒸发,使晶体内部形成无原子的结点,即空位。塑性变形、高能粒子辐射、热处理等会促进空位的形成。空位附近的原子会偏离正常结点位置,造成晶格畸变。空位的存在有利于金属内部原子的迁移(即扩散)。

(2) 间隙原子 位于晶格间隙之中的原子叫间隙原子,如图 1-10 所示。形成间隙原子是非常困难的,在纯金属中,主要的缺陷是空位而不是间隙原子。例如,铜在 1000°C 时,空位浓度约为间隙原子浓度的 10^{35} 倍。间隙原子会造成其附近晶格的很大畸变。

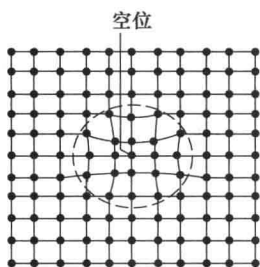


图 1-9 空位

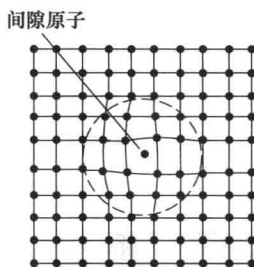


图 1-10 间隙原子

点缺陷造成局部晶格畸变,使金属的电阻率、屈服强度增加,密度发生变化。

1.1.2.2 线缺陷

线缺陷指二维尺度很小而第三维尺度很大的缺陷,称为位错,由晶体中原子平面的错动引起。从位错的几何结构来看,分为两种类型:刃型位错和螺型位错。

(1) 刃型位错 在金属晶体中,金属的一部分相对于另一部分出现一个多余的半原子面。这个多余的半原子面犹如切入晶体的刀片,刀片的刃口线 EF 即为位错线,这种线缺陷称刃型位错。半原子面在上面的称正刃型位错,半原子面在下面的称负刃型位错。如图 1-11 所示。

(2) 螺型位错 图 1-12 中晶体右边的上部点相对于下部的原子向后错动一个原子间距,即右边上部相对于下部晶面发生错动。若将错动区的原子用线连接起来,则具有螺旋型特征。这种线缺陷称螺型位错。螺旋线的中心线即是螺型位错的位错线。若螺旋线为右螺旋,则位错为右螺型位错。若螺旋线为正刃型位错左螺旋,则位错为左螺型位错负刃性位错。

(3) 位错密度 晶体中位错的量可以用位错线长度来表示,位错可以用透射电镜观察到,如图 1-13 所示。

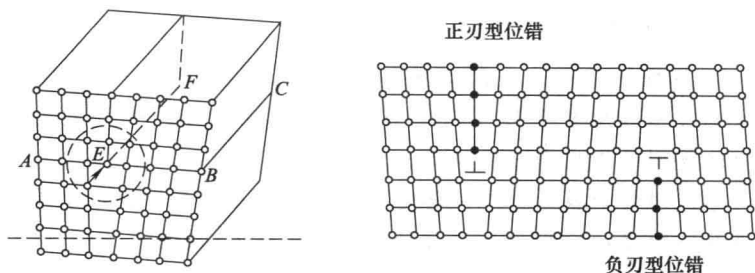


图 1-11 刃型位错

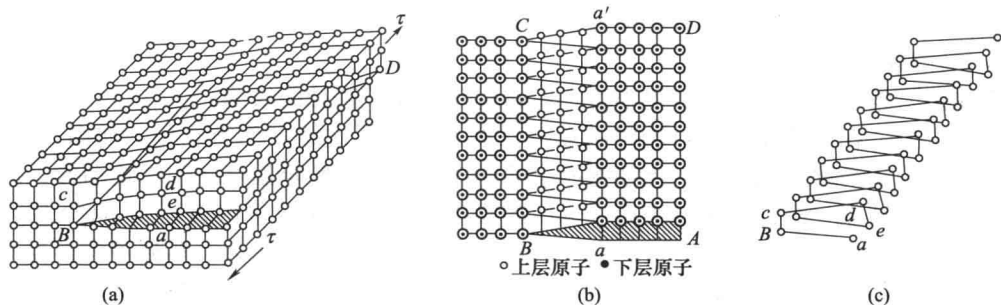


图 1-12 螺型位错

位错密度是指单位体积中位错线的总长度，即：

$$\rho = \frac{\sum L}{V}$$

式中， ρ 为位错密度， m^{-2} ； $\sum L$ 为位错线总长度， m ； V 为体积， m^3 。

退火金属中位错密度一般为 $10^{10} \sim 10^{12} \text{ m}^{-2}$ ，冷变形后的金属可达 10^{16} m^{-2} 。位错的存在极大地影响金属的力学性能，当金属为理想金属或仅含极少位错时，金属的屈服强度 σ_s 很高，当含有一定量的位错时，强度降低。当进行形变加工时，位错密度增加， σ_s 又增高，如图 1-14 所示。

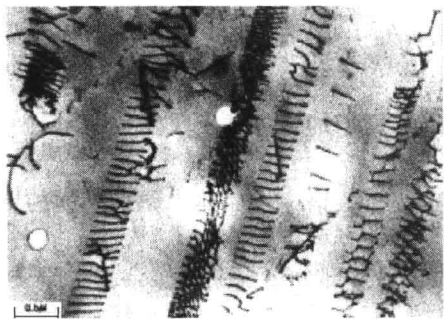


图 1-13 18Cr-Ni 不锈钢的平面排列的位错

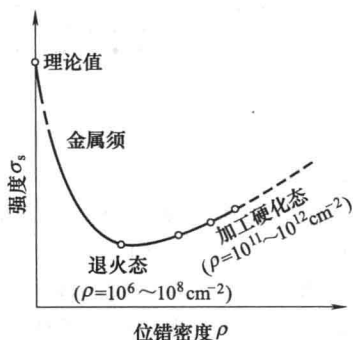


图 1-14 金属强度与位错密度的关系示意

1.1.2.3 面缺陷

面缺陷是指二维尺度很大而三维尺度很小的缺陷。金属晶体中的面缺陷主要有晶界和亚晶界两种。

(1) 晶界 实际金属是由大量外形不规则的小晶体即晶粒组成的，如图 1-15 所示。一个晶粒内所有原子都按相同方式和方位排列，但是晶粒彼此之间的位向却不同，把晶粒之间

的接触界面称为晶界，实际晶界具有几个原子间距的宽度，如图 1-16 所示。由于晶界两侧相邻晶粒的取向不同，晶界上的原子排列不能有效堆积，规则性较差，晶界上的原子比晶粒内部的原子具有更高能量，晶界的原子致密度也较低，这些都会影响金属的性能。

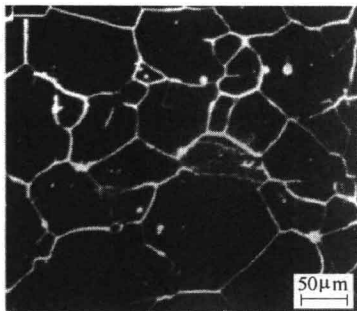


图 1-15 50CrVA 钢的奥氏体晶粒（暗场像）

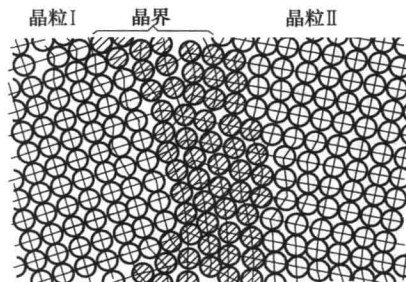


图 1-16 晶界原子排列的示意

(2) 亚晶界 每一个晶粒内部，原子的排列位向也不完全相同，晶粒内存在许多尺寸更小、位向差也更小的小晶块，称为亚晶粒（或亚结构、嵌镶块），亚晶粒之间的界面叫亚晶界。

1.1.2.4 晶体缺陷与强化

晶体缺陷破坏了晶体的完整性，使晶格畸变、能量增高、金属的晶体性质发生偏差，对金属性能有较大的影响。实验表明，可以通过减少或增加晶体缺陷这两个方面来提高金属强度，由于实际工程中不容易制备缺陷少的大尺寸工件，因此常通过增加晶体缺陷的方法来提高材料强度。

案例三分析：在生产 Al-Cu 合金合金时，因冷却速度很快，此时在液体中形成极大数量的晶核，它们尚未来得及长大便相互碰撞接触了，所以晶粒很细小，仅为十分之几微米，晶界很多，从而使材料强化。

1.1.3 合金的晶体结构

一种金属元素同另一种或几种其他元素，通过熔化或其他方法结合在一起所形成的具有金属特性的物质叫做合金。组成合金的最独立的、最基本的单元叫做组元，组元可以是金属、非金属元素或稳定化合物。由两个组元组成的合金称为二元合金，例如工程上常用的铁碳合金、铜镍合金、铝铜合金等。合金的强度、硬度、耐磨性等力学性能比纯金属高许多，某些合金还具有特殊的电、磁、耐热、耐蚀等物理、化学性能。

合金中具有相同化学成分、相同晶体结构并有界面与其他部分隔开的均匀组成部分叫做相，各种合金中存在多种多样的相，但可将它们归为两类：固溶体和金属化合物。

1.1.3.1 固溶体与固溶强化

【案例四】 纯铜的 σ_b 为 220MPa，硬度为 40HB 当加入 1% 镍形成单相固溶体后，强度升高到 390MPa，硬度升高到 70HB。

引入：为什么纯铜中加入少量的镍，强度、硬度就提高了？

合金组元通过溶解形成一种成分和性能均匀的、且结构与组元之一相同的固相称为固溶体。与固溶体晶格相同的组元为溶剂，一般在合金中含量较多；另一组元为溶质，含量较少。固溶体用 α 、 β 、 γ 等符号表示。A、B 组元组成的固溶体也可表示为 A (B)，其中

A 为溶剂, B 为溶质。例如铜锌合金中锌溶入铜中形成的固溶体一般用 α 表示, 亦可表示为 Cu (Zn)。

(1) 固溶体的分类 按溶质原子在溶剂晶格中的位置, 固溶体可分为置换固溶体与间隙固溶体两种。置换固溶体中溶质原子代换了溶剂晶格某些结点上的原子, 如图 1-17 (a) 所示, 间隙固溶体中溶质原子进入溶剂晶格的间隙之中, 如图 1-17 (b) 所示。

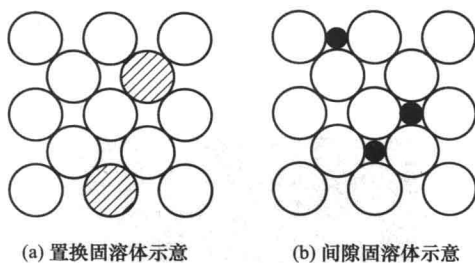


图 1-17 固溶体结构示意图

按溶质原子在溶剂中的溶解度, 固溶体可分为有限固溶体和无限固溶体两种。固溶体中溶质的含量即为固溶体的浓度, 用重量百分数或原子百分数表示。在一定的温度和压力等条件下, 溶质在固溶体中的极限浓度即为溶质在固溶体中的溶解度。若超过这个溶解度有其他相形成, 此种固溶体为有限固溶体。若溶质可以任意比例溶入, 即溶质的溶解度可达 100%, 则此种固溶体为无限固溶体。

影响固溶体类型和溶解度的主要因素有组元的原子半径、电化学特性和晶格类型等。原子半径、电化学特性接近、晶格类型相同的组元, 容易形成置换固溶体。当组元原子半径相差较大时, 容易形成间隙固溶体。

(2) 固溶强化

案例四分析: 纯铜的加入 1% 镍形成单相固溶体后, 随着镍原子的融入, 其晶格发生畸变, 增大了位错运动的阻力, 从而将其强度由 220MPa 升高到 390MPa, 硬度由 40HB 升高到 70HB。

这种通过形成固溶体使金属强度和硬度提高的现象称为固溶强化。固溶强化是金属强化的一种重要形式。在溶质含量适当时, 可显著提高材料的强度和硬度, 而塑性和韧性只略有降低。固溶体的综合力学性能很好, 常常作为结构合金的基体相。同时, 固溶体与纯金属相比, 物理性能有较大的变化, 如电阻率上升、电导率下降、磁矫顽力增大。

1.1.3.2 金属化合物与弥散强化

【案例五】 钳工锯 T10 等钢料时比锯 10 钢费力, 锯条容易磨钝。

引入: 为什么 10 钢比 T10 钢软呢?

合金组元相互作用形成的晶格类型和特性完全不同于任一组元的新相叫金属化合物, 或称中间相。金属化合物一般熔点较高, 硬度高, 脆性大。合金中含有金属化合物时, 强度、硬度和耐磨性提高, 而塑性和韧性降低。金属化合物是许多金属的重要组成相。根据形成条件及结构特点, 金属化合物主要有以下几类。

(1) 正常价化合物 严格遵守化合价规律的化合物称正常价化合物。它们由元素周期表中相距较远、电负性相差较大的两元素组成, 可用确定的化学式表示, 例如 MnS 、 ZnS 、 AlP 、 Mg_2Si 等。正常价化合物性能的特点是硬度高、脆性大。

(2) 电子化合物 不遵守化合价规律但符合于一定电子浓度 (化合物中价电子数与原子数之比) 的化合物叫做电子化合物。一定电子浓度的化合物相应有一定的晶体结构, 并且还可溶解其他组元, 形成以电子化合物为基的固溶体。生成这种合金相时, 元素的每个原子所贡献的价电子数一定, 例如 CuZn 是电子化合物, Cu 的价电子数为 1, Zn 的价电子数为 2,

化合物的总价电子数为3，原子数为2，所以CuZn电子浓度等于 $2/3$ 。电子化合物主要以金属键结合，具有明显的金属特性，可以导电。它们的熔点和硬度较高，塑性较差，在许多有色金属中为重要的强化相。

(3) 间隙化合物 由过渡族金属元素与碳、氮、氢、硼等原子半径较小的非金属元素形成的化合物为间隙化合物。尺寸较大的过渡族元素原子占据晶格的结点位置，尺寸较小的非金属原子则有规则地嵌入晶格的间隙之中。根据结构特点，间隙化合物分为间隙相和复杂结构的间隙化合物两种。

① 间隙相 当非金属原子半径与金属原子半径之比小于0.59时，形成具有简单晶格的间隙化合物，称为间隙相。如面心立方晶格的TiC、VC，体心立方晶格的Ti、ZrN，密排六方结构晶格的 Fe_2N 、 Cr_2N 、 W_2C 。间隙相具有金属特性，有极高的熔点和硬度，如表1-1所示，非常稳定。它们的合理存在，可有效地提高钢的强度、热强性、红硬性和耐磨性，是高合金钢和硬质合金中的重要组成相。

表 1-1 钢中常见碳化物的硬度及熔点

类 型	间 隙 相							复杂结构 间隙化合物	
化学式	TiC	ZrC	VC	NbC	TaC	WC	MoC	Cr_{23}C_6	Fe_3C
硬度(HV)	2850	2840	2010	2050	1550	1730	1480	1650	~800
熔点/℃	3080	3472±20	2650	3608±50	3983	2785±5	2527	1577	1227

② 复杂结构的间隙化合物 当非金属原子半径与金属原子半径之比大于0.59时，形成具有复杂结构的间隙化合物。钢中的 Fe_3C 、 Cr_{23}C_6 、 Cr_7C_3 、 Mn_3C 、FeB、 Fe_2B 等都是这类化合物。 Fe_3C 是铁碳合金中的重要组成相，具有复杂的斜方晶格，如图1-18所示。其中铁原子可以部分地被锰、铬、钼、钨等金属原子所置换，形成以间隙化合物为基的固溶体，如 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 等。复杂结构的间隙化合物也具有极高的熔点和硬度，但比间隙相稍低些，在钢中也起强化相作用。

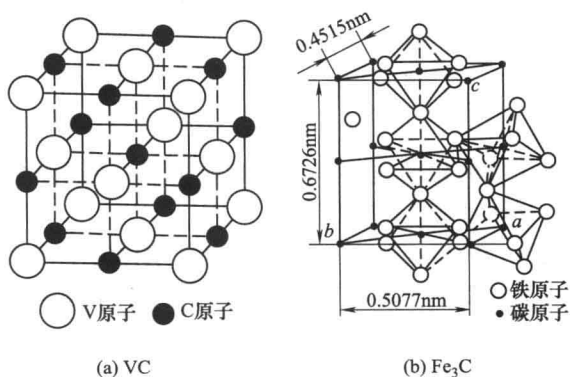


图 1-18 间隙化合物的晶体结构

(4) 弥散强化 金属化合物一般具有硬度和熔点高、性脆的特性，因此以金属化合物为主的合金可以作为功能材料应用，但是难以作为结构材料使用。工程中的合金常常以固溶体为主，辅以金属化合物弥散分布，来提高合金整体的强度、硬度和耐磨性，这种强化方式称为弥散强化或者第二相质点强化。

案例五分析：10 钢含碳量为 0.1%，T10 钢的含碳量为 1.0%，后者含碳量远大于前者，形成的 Fe_3C 多于 10 钢，作为间隙化合物存在的 Fe_3C 很硬，佐以弥散强化，显著提高材料的强度和硬度，故钳工在锯其时非常费力，锯条也容易磨钝。

1.1.4 金属材料的组织

1.1.4.1 组织的概念

【案例六】 纯铁经冷拔后，晶粒被拉长变形，其强度与硬度均比未变形前要高得多。纯铁经变形度为 80% 的冷拔变形后，其抗拉强度由冷拔前的 180MPa 提高到 500MPa。

引入：金属的性能除了与其结构有关外，为什么其形貌发生了变化，性能也跟着改变？

将一小块金属材料用金相砂纸磨光后进行抛光，然后用侵蚀剂侵蚀。在金相显微镜下观察，可以看到金属材料内部的微观形貌。材料的微观组成称做显微组织（简称组织）。组织由数量、形态、大小和分布方式不同的各种相组成。金属材料的组织可以由单相组成，也可以由多相组成。例如，图 1-19 (a) 为纯铁的室温平衡组织，这种组织叫铁素体（注：本节中出现的各种组织将在后面的章节中具体介绍），由颗粒状的单相 α 相（也称铁素体相）组成。图 1-19 (b) 是碳含量为 0.77% 的铁碳合金的室温平衡组织，叫珠光体。它是由粗片状的 α 相和细片状的 Fe_3C 相两相相间所组成。

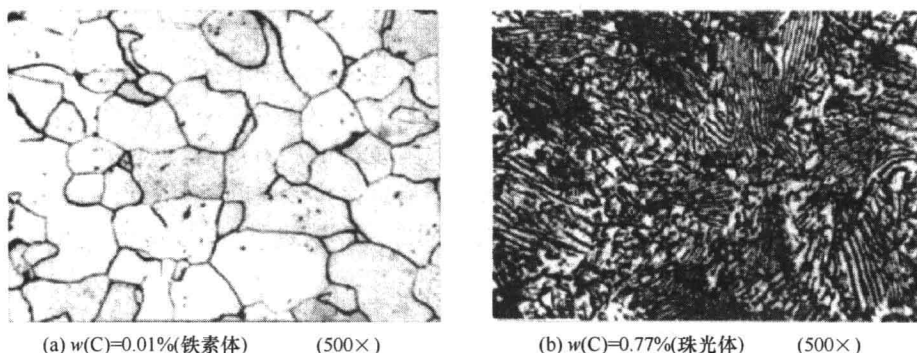


图 1-19 两种不同碳含量的铁碳合金的室温平衡组织

1.1.4.2 组织的决定因素

金属材料的组织取决于它的化学成分和制造工艺过程。不同碳含量的铁碳合金在平衡结晶后获得的室温组织不一样，如图 1-19 所示。

金属材料的化学成分一定时，工艺过程则是其组织的最重要的影响因素。碳含量为 0.77% 的铁碳合金经球化退火后，得到的组织为球状珠光体，如图 1-20 所示，与室温平衡组织片状珠光体的形态完全不一样。

1.1.4.3 组织与性能的关系

金属材料的性能由金属内部的组织、结构所决定。

案例六分析：纯铁经变形度为 80% 的冷拔变形后，其组织如图 1-21 所示，与图 1-18 (a) 对比，组织形貌发生了很大的变化，由原来的等轴形状的铁素体晶粒变成拉长了的铁素体晶粒，同时，内部位错密度等晶体缺陷增多，显著提高其强度与硬度，此种强化方法在工业上被广泛应用。