

高等学校教材

金属学

JINSHUXUE

与

YU RECHULI

热处理

刘宗昌 等编著



化学工业出版社

TG1/14

2008

高等学校教材

金属学与 热处理

刘宗昌 等编著

JINSHUXUE YU RECHULI



化学工业出版社

· 北京 ·

元 00.25 · 分

《金属学与热处理》是冶金和材料类各专业的重要的技术基础课,并兼有一般基础课性质。本教材内容分为三篇,即金属学基本原理、固态相变原理及应用、金属材料学。书中全面系统地介绍了金属与合金的晶体结构,金属与合金相图与结晶,塑性变形与再结晶,扩散,金属固态相变基本理论,改进材料性能的基本工艺方法,常用的金属材料和新型金属材料等知识。本教材的特点是与时俱进,开拓创新,较之20世纪出版的同类教材,内容有所更新,淘汰了一些陈旧的概念和过时的知识,建立新概念,阐述新理论、新工艺、新材料。

本书可作为高等院校材料科学与工程、材料科学、金属材料、材料成型与控制、冶金工程等相关专业的本科教材。

图书在版编目(CIP)数据

金属学与热处理/刘宗昌等编著. —北京:化学工业出版社, 2008.7

高等学校教材

ISBN 978-7-122-03111-2

I. 金… II. 刘… III. ①金属学②热处理 IV. TG1

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第090482号

责任编辑:陶艳玲

装帧设计:王晓宇

责任校对:陶燕华

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22 字数617千字 2008年8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:38.00元

版权所有 违者必究

前 言

本书是根据“材料成型及控制工程”、“冶金工程”等专业 21 世纪《金属学与热处理》课程新教学大纲编著的新教材,依据教学改革要求,在近年来的教学实践的基础上撰写。

《金属学与热处理》是“材料成型及控制工程”、“冶金工程”各专业的重要的技术基础课,并兼有一般基础课性质。着重阐述金属与合金的化学成分、组织、结构与性能之间的关系及其变化规律,讲述其在材料生产技术中的应用。书中全面系统地介绍了金属与合金的晶体结构,金属与合金相图与结晶,塑性变形与再结晶,扩散,金属固态相变基本理论,改进材料性能的基本工艺方法,常用的金属材料 and 新型金属材料等知识。本书从组织结构角度出发来阐明问题,重点放在与金属材料科学有关的基本现象、基本概念、基本规律和基本技术方法上,以便为合理选择使用金属材料和制订热加工工艺规程,获得优质零件、构件、钢材掌握好必要的理论知识,并为从事金属材料的研究、开发打下基础。

本教材内容分为三篇,即金属学基本原理、固态相变原理及应用、金属材料学。阐述内容力求由浅入深,深广适中,循序渐进,注意理论联系实际,阐明各种现象的本质,避免作过多的数学推导,便于教学和学生阅读。为了使学生会总结归纳所学知识并训练学生分析问题和解决问题的能力,各章均安排了复习思考题。

教学改革,更新教学内容是永恒的主题。本教材是作者们在多年来讲授该课程的基础上,依据继承与创新相结合的原则,在讲述成熟理论的基础上,增加国内外近年来出现的新理论、新知识而编写的,同时精选内容,缩短篇幅,并注重理论向技术的转化,推动技术创新,适应 21 世纪教学改革和培养创新型人才的需求。

本教材的特点是与时俱进,开拓创新,较之 20 世纪出版的同类教材,内容有所更新。淘汰了一些陈旧的概念和过时的知识,建立新概念,阐述新理论、新工艺、新材料。

根据教学大纲的规定,本教材的讲课时数为 80 学时。考虑到各校对本课程的具体学时安排不尽相同,在使用本教材时可对有关内容根据实际情况作适当的增删和调整,讲授和自学相结合。

本教材共 17 章,其中第 1 章、第 4 章、第 7 章~10 章、第 12 章、第 13 章、第 15 章、第 16 章由刘宗昌撰写;第 2 章、第 3 章由高占勇撰写;第 5 章、第 6 章由李惠琴撰写;第 11 章、第 14 章由赵莉萍撰写;第 17 章由李涛、刘宗昌合作撰写;王海燕、冯甸臣编写了各章的复习思考题;最后,由刘宗昌负责全书的总成。

在撰写过程中参考了许多著作、教科书、论文等资料,特向这些专家和作者致谢。由于作者水平有限,书中难免存在缺点,敬希批评指正。

刘宗昌
2008 年 4 月

目 录

第 1 篇 金属学基本原理

第 1 章 金属及合金的晶体结构 2

1.1 材料的地位和分类 2

1.2 决定金属材料性能的基本因素 3

1.3 金属与合金 4

1.3.1 基本概念 4

1.3.2 原子结构 4

1.3.3 原子间的键合 6

1.4 金属的晶体结构 7

1.4.1 空间点阵、晶格、晶胞 7

1.4.2 晶面指数和晶向指数 10

1.4.3 纯金属的典型晶体结构 12

1.4.4 各向异性和多晶型性 16

1.5 实际金属的晶体缺陷 17

1.5.1 点缺陷 17

1.5.2 线缺陷 18

1.5.3 面缺陷 22

1.6 合金的相结构 27

1.6.1 合金系统、相及其分类 27

1.6.2 固溶体 29

1.6.3 中间相(金属化合物) 33

复习思考题 34

第 2 章 金属及合金的相图 36

2.1 二元合金相图 36

2.1.1 二元合金相图的建立和表示方法 36

2.1.2 相律和杠杆定律 38

2.1.3 二元相图的基本类型 39

2.2 三元合金相图 44

2.2.1 三元相图的成分表示方法 44

2.2.2 三元匀晶相图 45

2.2.3 组元在固态完全互不溶解的三元共晶相图 48

2.2.4 实际三元相图举例 51

复习思考题 52

第 3 章 金属与合金的结晶 53

3.1 结晶的基本规律 53

3.1.1 结晶过程 53

3.1.2 结晶热力学条件 54

3.1.3 形核 54

3.1.4 晶核的长大 59

3.2 固溶体的结晶和组织 62

3.2.1 平衡结晶 62

3.2.2 非平衡结晶 64

3.2.3 组成过冷 64

3.2.4 区域偏析 65

3.2.5 组成过冷对晶体形状和铸锭组织的影响 66

3.3 金属铸锭的组织 and 缺陷 67

3.3.1 铸锭的组织 67

3.3.2 铸锭的缺陷 68

复习思考题 70

第 4 章 铁碳合金及 Fe-Fe₃C 相图 71

4.1 铁碳合金中的基本相 71

4.1.1 铁(Fe) 71

4.1.2 铁与碳的化合物(Fe₃C_γ) 72

4.2 Fe-Fe₃C 相图分析 73

4.2.1 Fe-Fe₃C 平衡相图 73

4.2.2 铁碳合金的平衡结晶过程及平衡组织 76

4.2.3 碳含量对铁碳合金平衡组织和性能的影响 80

复习思考题 81

第 5 章 金属及合金的塑性变形 82

5.1 应力与应变 82

5.1.1 真应力-真应变变曲线 82

5.1.2 工程应力-应变曲线 83

5.2 金属及合金的弹性变形 84

5.2.1 弹性变形的宏观定律 84

5.2.2 弹性应变能 84

5.2.3 影响弹性变形的内在因素 84

5.3 单晶体的塑性变形 85

5.3.1 滑移	85	6.3.2 影响再结晶的因素	112
5.3.2 孪生	93	6.4 晶粒长大	114
5.4 多晶体的塑性变形	94	6.4.1 正常晶粒长大	114
5.4.1 多晶体塑性变形的特点	94	6.4.2 晶粒的异常长大	116
5.4.2 晶粒大小对塑性变形的 影响	95	6.4.3 再结晶退火后的组织	116
5.4.3 上、下屈服点和吕德 斯带	96	6.5 金属的热加工	118
5.5 塑性变形对金属组织和性能的 影响	97	6.5.1 动态回复	118
5.5.1 塑性变形对金属组织结构的 影响	97	6.5.2 动态再结晶	119
5.5.2 塑性变形对金属性能的 影响	99	6.5.3 热加工后组织与性能	120
5.6 金属的断裂	100	复习思考题	121
5.6.1 断裂的基本形式	100	第7章 金属及合金中的扩散	122
5.6.2 金属的断裂过程及断口 特征	102	7.1 扩散现象及定义	122
5.6.3 影响断裂的基本因素	105	7.1.1 扩散现象	122
复习思考题	106	7.1.2 扩散的定义	123
第6章 金属及合金的回复与再 结晶	107	7.2 金属中的扩散理论概要	124
6.1 变形金属与合金在加热时的 变化	107	7.2.1 扩散定律	124
6.1.1 显微组织的变化	107	7.2.2 扩散定律在固态相变中的 应用	124
6.1.2 储存能及内应力的变化	107	7.2.3 原子的运动和扩散系数	126
6.1.3 力学性能的变化	108	7.2.4 扩散机理	127
6.1.4 物理性能的变化	108	7.3 原子迁移的热力学分析	129
6.2 回复	108	7.3.1 扩散的驱动力	129
6.2.1 回复动力学	108	7.3.2 原子热激活跃迁	130
6.2.2 回复机制	109	7.4 实际金属中的扩散	131
6.3 再结晶	110	7.4.1 纯金属中的自扩散	131
6.3.1 再结晶晶核的形成与 长大	110	7.4.2 金属晶体结构对扩散系数的 影响	132
		7.5 固态相变中原子的迁移	134
		7.5.1 温度对扩散的影响	134
		7.5.2 体扩散和晶界扩散	135
		7.5.3 碳原子在钢中的扩散	135
		7.5.4 合金元素的扩散	136
		7.5.5 铁原子的自扩散	137
		复习思考题	137

第2篇 固态相变原理及应用

第8章 金属固态相变原理	140	8.2.4 奥氏体晶粒长大及控制	151
8.1 金属固态相变概论	140	8.3 钢的冷却转变概述	154
8.1.1 固态相变的类型	140	8.3.1 过冷奥氏体的等温转 变图(TTT图)	154
8.1.2 固态相变的特点	142	8.3.2 过冷奥氏体的连续冷却转 变图(CCT图)	155
8.2 钢的加热转变	146	8.3.3 影响冷却转变的因素	157
8.2.1 奥氏体的组织结构	146	8.4 共析分解与珠光体	160
8.2.2 奥氏体的形成	147		
8.2.3 奥氏体形成动力学	149		

8.4.1 珠光体的组织结构和定义	160	硬化	188
8.4.2 珠光体的组织形态	160	8.7.5 淬火钢回火组织的概念	189
8.4.3 共析分解过程	162	8.7.6 回火组织的力学性能	190
8.4.4 粒状珠光体的形成	164	8.7.7 回火脆性	191
8.4.5 先共析相的析出	165	复习思考题	191
8.4.6 影响珠光体转变组织的内在因素	167	第9章 金属热处理工艺	193
8.5 马氏体相变	167	9.1 加热工艺	193
8.5.1 马氏体相变的基本特征	167	9.1.1 加热速度	193
8.5.2 马氏体相变及马氏体的定义	169	9.1.2 加热温度的选择	194
8.5.3 钢中马氏体的物理本质	169	9.1.3 升温、保温时间	195
8.5.4 Fe-C 合金马氏体相变热力学条件	172	9.2 钢的退火与正火	196
8.5.5 马氏体的形核与长大	173	9.2.1 钢的退火	196
8.5.6 奥氏体的热稳定性和残留奥氏体	174	9.2.2 钢的正火	203
8.5.7 马氏体的机械性能	175	9.3 钢的淬火和回火	203
8.6 贝氏体相变	176	9.3.1 钢的淬火	203
8.6.1 贝氏体的组织形貌	176	9.3.2 钢的回火	209
8.6.2 贝氏体相变的过渡性特征	178	9.4 钢的形变热处理	209
8.6.3 贝氏体的定义	180	9.4.1 高温形变热处理	209
8.6.4 关于贝氏体相变机制	181	9.4.2 低温形变热处理	210
8.6.5 钢中贝氏体的机械性能	181	9.5 钢的表面淬火	211
8.7 淬火钢的回火转变	182	9.5.1 感应加热原理	211
8.7.1 碳素钢马氏体的脱溶	183	9.5.2 感应加热表面淬火的特点	212
8.7.2 回火时 α 相的变化	185	9.6 钢的化学热处理	213
8.7.3 残余奥氏体的转变	187	9.6.1 化学热处理的基本原理和过程	213
8.7.4 回火硬度曲线和二次		9.6.2 渗碳	214
		9.6.3 氮化	215
		9.6.4 碳氮共渗	215
		复习思考题	216

第3篇 金属材料学

第10章 工业用钢总论	218	10.2.3 合金元素与铁的相互作用	222
10.1 钢的分类及编号	218	10.2.4 合金元素与碳的相互作用	223
10.1.1 钢的分类	219	10.2.5 钢中的金属间化合物	223
10.1.2 碳素钢的编号 (GB/T 221—2000)	220	10.2.6 合金元素对 Fe-C 相图的影响	223
10.1.3 合金钢的编号 (GB/T 221—2000)	220	10.2.7 合金元素对加热转变的影响	224
10.2 合金相概述	221	10.2.8 合金元素对过冷奥氏体转变的影响	225
10.2.1 合金钢是一个复杂系统	221		
10.2.2 合金元素在系统中的分布状态	221		

10.2.9	合金元素对淬火钢回火转变的影响	225
10.3	合金元素对钢性能的影响	226
10.3.1	力学性能与组织的关系	227
10.3.2	合金元素对钢强韧性的影响	228
	复习思考题	230
第 11 章	工程构件用钢	231
11.1	工程构件用钢的用途及特点	231
11.1.1	工程构件用钢的用途及性能要求	231
11.1.2	工程构件用钢的机械性能特点	231
11.1.3	合金元素对构件用钢性能的影响	233
11.2	钢的宏观组织及杂质的作用	234
11.2.1	钢的物理不均匀性	234
11.2.2	钢的化学不均匀性	236
11.2.3	碳和杂质元素对钢组织和性能的影响	237
11.3	工程构件用钢钢种	240
11.3.1	普通碳素工程构件用钢	240
11.3.2	低合金工程构件用钢	244
11.3.3	微合金化钢	246
11.3.4	低碳贝氏体型钢和铁素体-马氏体双相钢	248
11.3.5	低合金高强度钢的发展趋势	250
	复习思考题	251
第 12 章	机械制造用结构钢	252
12.1	调质钢	252
12.1.1	调质钢的工作条件及对性能的要求	252
12.1.2	调质钢的合金化	253
12.1.3	常用调质钢	253
12.1.4	调质钢的冶金质量	254
12.1.5	调质钢的热处理特点	255
12.2	渗碳钢	256
12.2.1	渗碳钢的服役条件和对性能的要求	256
12.2.2	渗碳钢的合金化	257

12.2.3	常用渗碳钢	258
12.2.4	渗碳钢的热处理特点	259
12.2.5	贝氏体渗碳钢	259
12.3	弹簧钢	260
12.3.1	弹簧的服役条件和性能要求	260
12.3.2	弹簧钢的合金化	260
12.3.3	典型弹簧钢	261
12.3.4	弹簧钢的热处理特点	261
12.4	轴承钢	262
12.4.1	滚动轴承的服役条件及对性能的要求	262
12.4.2	轴承钢的合金化	263
12.4.3	轴承钢的热处理特点	264
	复习思考题	265
第 13 章	工模具用钢	266
13.1	刀具钢	266
13.1.1	刀具钢的服役条件和性能要求	266
13.1.2	碳素工具钢	267
13.1.3	低合金刀具钢	267
13.2	高速钢	268
13.2.1	高速钢的服役条件和性能特点	268
13.2.2	高速钢的合金化	268
13.2.3	高速钢中的组成相和碳化物的不均匀性	269
13.2.4	高速钢的热处理特点	270
13.2.5	高速钢的发展	270
13.3	模具钢	271
13.3.1	冷作模具钢	271
13.3.2	热作模具钢	273
13.3.3	塑料模具钢	275
13.3.4	轧制工具钢	276
	复习思考题	277
第 14 章	特殊性能钢	278
14.1	不锈钢耐酸钢	278
14.1.1	金属的腐蚀	278
14.1.2	不锈钢的合金化	280
14.1.3	不锈钢的组织与分类	282
14.1.4	马氏体不锈钢	283
14.1.5	铁素体不锈钢	285
14.1.6	奥氏体不锈钢	287
14.1.7	其它类型不锈钢	289
14.2	耐热钢	290

14.2.1	耐热钢的热稳定性和热 强性	290	16.1.5	有色金属的合金化	310
14.2.2	常用耐热钢及热处理	292	16.2	铜及铜合金	311
14.3	耐磨钢	295	16.2.1	工业纯铜	311
14.3.1	钢的耐磨性及其影响 因素	295	16.2.2	黄铜	311
14.3.2	高锰钢	296	16.2.3	青铜	312
14.3.3	低合金耐磨钢及 石墨钢	297	16.3	铝及其合金	314
	复习思考题	298	16.3.1	工业纯铝	314
第 15 章	铸铁	299	16.3.2	铝合金	315
15.1	铸铁的石墨化及分类	299	16.4	钛及钛合金	319
15.1.1	铁碳合金双重相图	299	16.4.1	纯钛	319
15.1.2	铸铁的石墨化	299	16.4.2	钛的合金化	320
15.1.3	铸铁的分类	300	16.4.3	钛合金的热处理	320
15.2	工业常用铸铁	302		复习思考题	322
15.2.1	灰口铸铁	302	第 17 章	新型金属材料	323
15.2.2	球墨铸铁	303	17.1	金属功能材料	323
15.2.3	蠕墨铸铁	304	17.1.1	电磁材料	323
15.2.4	可锻铸铁	304	17.1.2	形状记忆合金	327
15.2.5	合金铸铁	305	17.1.3	贮氢合金	328
	复习思考题	306	17.2	金属亚稳材料	329
第 16 章	有色金属及合金	307	17.2.1	纳米材料	330
16.1	有色金属及合金概论	307	17.2.2	非晶态材料	331
16.1.1	有色金属的分类及 编号	307	17.3	有序金属间化合物结构 材料	333
16.1.2	有色合金的分类及 编号	307	17.3.1	金属间化合物的基本 结构	333
16.1.3	有色金属及合金的 用途	308	17.3.2	金属间化合物材料的性能 特点	335
16.1.4	有色金属及合金的 生产	309	17.3.3	金属间化合物工程 合金	336
				复习思考题	339
			参考文献	340	

第 1 篇

金属学原理包括许多内容，本篇仅讲述了金属及合金的晶体结构，合金相图，金属及合金的凝固，形变和再结晶，扩散等基本的内容。

第1章 金属及合金的晶体结构

本章导读：本章内容极为重要，学习本章应当熟练地掌握金属、合金、金属键、晶体、相等概念，掌握晶体学基本知识，熟悉晶面、晶向表示法，金属典型的晶体结构，实际金属的晶体缺陷，合金相结构等。

1.1 材料的地位和分类

人类社会发展的历史证明，材料是人类生存和发展、征服自然和改造自然的物质基础，也是人类社会现代文明的重要支柱。纵观人类利用材料的历史，可以清楚地看到，每一种重要的新材料的发现和运用，都把人类支配自然的能力提高到一个新的水平。材料科学技术的每一次重大突破，都会引起生产技术的革命，大大加速社会发展的进程，并给社会生产和人类生活带来巨大的变化。材料对社会、经济及科学技术活动的影响面大、带动作用强，既是支撑国民经济发展的基础产业，也是当代科技创新的前沿，更是人类社会进步的里程碑，是社会文明程度的重要标志。

在远古，我们的祖先是石器为主要工具的，他们在寻找石器的过程中认识了矿石，并在烧陶生产中发展了冶铜术，开创了冶金技术。公元前 5000 年，人类进入青铜器时代。公元前 1200 年左右，人类进入了铁器时代。开始使用的是铸铁，后来制钢工业迅速发展，成为 18 世纪产业革命的重要内容和物质基础。

20 世纪后期，基础科学、工程技术的进步，材料科学技术取得了一系列创新的突破，新材料大批涌现，应用领域和规模不断扩大，已经成为当代极富活力的高新技术产业。科学技术突飞猛进、日新月异，作为“发明之母”和“产业粮食”的新材料研制更是异常活跃，出现了一个“材料革命”的新时代。

当今国际社会公认，材料、能源和信息技术是现代文明的三大支柱。从现代科学技术发展史中可以看到，每一项重大的新技术发现，往往都有赖于新材料的发展。对国民经济和现代科学技术具有重要作用的半导体材料就是一个明显的例证。半导体材料的出现对电子工业的发展具有极大的推动作用。以电子计算机为例，自 1946 年世界上第一台真空管电子计算机问世以来，由于锗、硅等半导体材料和晶体管等半导体器件的相继研制成功和广泛应用，计算机技术获得了极其迅速的发展，在短短 40 多年里，经历了一代代产品更新。

所谓材料，是指人类能用来制作有用物件的物质。所谓新材料，主要是指最近发展或正在发展之中的具有比传统材料更为优异的性能的一类材料。目前世界上传统材料已有几十万种，而新材料的品种正以每年大约 5% 的速度在增长。世界上现有 800 多万种人工合成的化合物，而且还在每年以 25 万种的速度递增，其中相当一部分有发展成为新材料的潜力。

世界各国对材料的分类不尽相同，但就大的类别来说，可以分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料及复合材料四大类。若按照材料的使用性能来看，可分为结构材料与功能材料两大类。结构材料的使用性能主要是力学性能；功能材料的使用性能主要是光、电、磁、热、声等功能性能。从材料的应用对象来看，它又可分为信息材料、能源材料、建筑材料、生物材料、航空航天材料等多种类别。

国际上关于材料科学与工程战略研究表明，它是高新技术发展的一个关键，而且对国计

民生、国家安全以及增强国家在国际市场上的竞争力都有重要影响。

直到 20 世纪中叶,金属材料在材料工业中一直占绝对优势。近半个世纪以来,随着高分子材料、无机非金属材料以及各种先进复合材料的发展,金属材料的绝对主导地位才有所削弱。但是,在可以预见的将来,金属材料仍将占据材料工业的主导地位,这种情况在发展中国家尤其如此。这是因为金属材料(例如钢铁)工业已经具有一整套相当成熟的生产技术和庞大的生产能力,并且质量稳定,供应方便,在性能价格比上也占有一定优势;在相当长时期内,金属材料的资源也是有保证的。当然最重要和根本的原因还在于金属材料具有其它材料体系所不能完全取代的独特性质和使用性能。例如:金属有比高分子材料高得多的模量,有比陶瓷高得多的韧性以及具有磁性和导电性等优异的物理性能。金属材料还在不断地推陈出新,许多新兴金属材料应运而生,涌现了许多新型高性能金属材料。金属材料等正在向着高功能化和多功能化方向发展。

1.2 决定金属材料性能的基本因素

金属材料在性能方面所表现出的多样性、多变性和特殊性,使它具有远比其它材料较为优越的性能,这种优越性是其固有的内在因素在一定外在条件下的综合反映。决定金属材料性能的基本因素是化学成分和组织结构。

组成金属材料的主要元素是金属元素,正如化学上所讲过的,金属作为元素的一大类来说,它的原子结构具有区别于其它元素的一些共性(外层电子较少),这个共性决定了金属原子间结合键的特点,而结合键的特点,又在一定程度上决定了内部原子集合体的结构特征。金属材料内部原子间的结合主要依靠金属键,它几乎贯穿在所有金属材料之中,这就是金属材料有别于其它材料的根本原因。

同一化学成分,甚至同一结构的材料,它的某些性能仍然可以在一个相当大的范围内发生显著变化。例如,同一化学成分의 钢件,其硬度之差可以达到这样的程度,以致一个可以切削掉另一个,而这是受称之为“组织”和“结构”的因素所控制的,它实质上也是原子集合体内部运动状态不同的一种表现。由此可见,化学成分,原子集合体的结构以及内部组织是决定金属材料性能的内在基本因素,金属材料性能方面的多变性,也正是通过这三个内在因素的多变性而表现出来的。

在金属学中,“组织”这个概念是指用肉眼或借助于各种不同放大倍数的显微镜所观察到的金属材料内部的情景。习惯上用放大几十倍的放大镜或用肉眼所观察到的组织,称为低倍组织或宏观组织;用放大 100~2000 倍的显微镜所观察到的组织,称为高倍组织或显微组织;用放大几千倍到几十万倍电子显微镜(以下简称电镜)所观察到的组织,称为电镜显微组织或精细结构。

对金属进行 X 射线分析和高分辨电镜分析可以观测金属原子集合体中原子的具体组合状态,即金属的“晶体结构”,简称“结构”。

成分、组织和结构三者既相互区别,又相互渗透,并分别在不同程度上相互制约着,它们的综合作用决定了金属材料的性能。当各种外界条件(如温度、压力和其它物理化学作用等)影响到内在因素时,才会对金属材料产生实质性的效应,也即是才会影响或改变金属材料的性能。

各种性能受内在三因素的控制作用,其程度或大小是不同的。不言而喻,化学成分应当是基础,只有在这个基础上,才能谈到结构和组织的作用。

当化学成分一定时,金属材料的某些性能主要是由结构类型所控制的。有些性能对结构的变化,特别是组织的变化很不敏感,以致从应用角度来看,几乎可以忽略不计。我们将这类性能列为对结构组织不敏感(或弱敏感)的性能。金属材料的密度、弹性模量、热膨胀、热传

导、电阻（金属）、电化学位、热电性、顺磁和逆磁性、光反射等即属于这类。其中有的对成分的变化也不大敏感，例如，一般工业用钢，无论碳钢或低合金钢，其弹性模量大致稳定在 215745MN/m^2 (22000kg/mm^2) 左右；普通黄铜，即使合金元素锌由零增至 40%，它的弹性模量的变化也仅 5%~6% 而已。

金属材料的另一类性能，对组织结构的变化反映很敏感，我们称它为对组织结构敏感的性能，属于这一类性能的有屈服强度、抗拉强度、断裂强度、硬度、韧性、延伸率、面缩率、滞弹性、蠕变、铁磁性（包括导磁系数、残余磁感、矫顽力）等。正是在这些性能上，组织和结构才能显示出作用来。正因为如此，组织结构才受到高度重视，而成为金属材料学的重要内容。

1.3 金属与合金

1.3.1 基本概念

在化学元素周期表中列出 105 种元素，金属元素有 83 种。这些金属元素有一个共性，即均随着温度的升高，其电阻增大，而非金属的电阻均随着温度的升高，其电阻减小。

金属的定义：金属是具有正的电阻温度系数的物质。

自古至今，在国民经济和日常生活中应用的金属材料，其中绝大部分是由两种或多种元素所组成。例如，常用的钢铁材料都含有 Fe、C、Si、Mn、S、P 等元素；再如，黄铜主要是由 Cu、Zn 元素组成的。它们都是经过冶炼熔合而成，且具有金属特性。

合金的定义：由一种金属元素跟其它金属或非金属元素熔合而成的、具有金属特性的物质。

通常将基本上由一种金属元素组成的物质称为纯金属，并且按照纯度的不同分为工业纯金属和化学纯金属。纯金属只是应用现代科学技术才能大量生产，现代技术已能制出纯度高达 99.999% 以上的纯金属。无论纯度如何高，总是或多或少地含有杂质元素。因此，从理论上和应用上，很难将纯金属和合金截然分开。广义上讲，“金属”是包括合金在内的。

1.3.2 原子结构

1.3.2.1 物质的组成

一切物质都是由粒子按一定的方式聚集而成的。这些粒子可能是分子、原子或离子。

分子是能单独存在并且保持物质化学特性的粒子。分子的体积很小，如 H_2O 分子的直径约为 0.2nm ；分子的质量有大有小， H_2 分子是分子世界中最小的，它的相对分子质量只有 2，而高分子化合物——蛋白质的分子很大，其相对分子质量可高达几百万。

分子是由更小的粒子——原子组成的。在化学变化中，分子可以再分成原子，而原子却不能再分，故原子是化学变化中的最小粒子。从量子力学中得知，原子并不是物质的最小粒子，它具有复杂结构。原子结构直接影响原子间的结合方式。

1.3.2.2 原子的结构

近代科学实验证明：原子是由质子和中子组成的原子核以及核外的电子所构成的。原子核内的中子呈电中性，质子带有正电荷。一个质子的正电荷量正好与一个电子的负电荷量相等。通过静电吸引，带负电荷的电子被牢牢地束缚在原子核周围。因为在中性原子中，电子和质子数目相等，所以原子作为一个整体，呈电中性。

原子的体积很小，原子直径约为 10^{-10}m 数量级，而其原子核直径更小，仅为 10^{-15}m 数量级。原子的质量主要集中在原子核内。因为每个质子和中子的质量大致为 $1.67 \times 10^{-24}\text{g}$ ，而电子的质量约为 $9.11 \times 10^{-28}\text{g}$ ，仅为质子的 $1/1836$ 。

1.3.2.3 原子的电子结构

电子在原子核外空间进行高速旋转，就好像带负电荷的云雾笼罩在原子核周围，故形象地称它为电子云。电子运动没有固定的轨道，但可根据电子的能量高低，用统计方法判断其在核外空间某一区域内出现的几率的大小。能量低的，通常在离核近的区域（壳层）运动；能量高的，通常在离核远的区域运动。描述原子中一个电子的空间位置和能量可用以下四个量子数表示。

① 主量子数 n 决定原子中电子能量以及与核的平均距离，即表示电子所处的量子壳层，只限于正整数 1, 2, 3, 4..., 如 $n=1$ ，即最低能级量子壳层，称为 K 壳层。图 1-1 所示为钠原子（原子序数为 11）结构中 K, L, M 量子壳层的电子分布情况。当 $n=2, 3, 4$ 等时，则依次为 L, M, N 壳层。

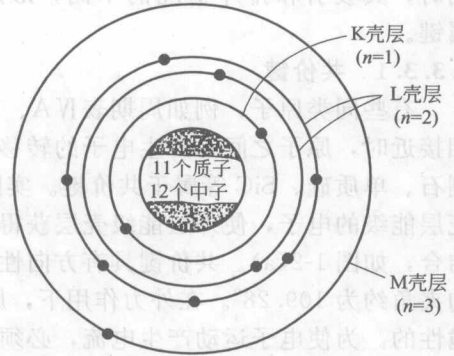


图 1-1 钠原子结构图

② 轨道角动量量子数 l_i 给出电子在同一量子壳层内所处的能级（电子亚层），与电子运动的角动量有关，取值为 0, 1, 2, ..., $n-1$ ，例如 $n=2$ ，就有两个轨道角动量量子数 $l_2=0$ 和 $l_2=1$ ，即在 L 壳层中，包含有两个电子亚层。常用小写的英文字母来标注对应于轨道角动量量子数 l_i 的电子能级（亚层）。

l_i :	0	1	2	3	4
能级:	s	p	d	f	g

在同一量子壳层里，亚层电子的能量是按 s, p, d, f, g 的次序递增的。

③ 磁量子数 m_i 给出每个轨道角动量量子数的能级数或轨道数。每个 l_i 下的磁量子数的总数为 $2l_i+1$ 。当 $l_i=2$ 时，磁量子数为 $2 \times 2 + 1 = 5$ 。

磁量子数决定了电子云的空间取向。如果把在一定的量子壳层上具有一定的形状和伸展方向的电子云所占据的空间称为一个轨道，那么 s, p, d, f 四个亚层就分别有 1, 3, 5, 7 个轨道。

④ 自旋角动量量子数 s_i 反映电子不同的自旋方向。反映电子顺时针和逆时针两种自旋方向，通常用“ $\uparrow$ ”和“ $\downarrow$ ”表示。

至于在多电子的原子中，核外电子的排布规律则遵循以下三个原则。

① 能量最低原理 电子的排布总是尽可能使体系的能量最低。也就是说，电子总是先占据能量最低的壳层，只有当这些壳层占满后，电子才依次进入能量较高的壳层，即核外电子排满了 K 层才排 L 层，排满了 L 层才排 M 层……由里往外依次类推；而在同一电子层中，电子则依次按 s, p, d, f 的次序排列。

② Pauli 不相容原理 在一个原子中不可能有运动状态完全相同的两个电子，即不能有上述四个量子数都相同的两个原子。因此，主量子数为 n 的壳层，最多容纳 $2n^2$ 个电子。

③ Hund 规则 在同一亚层中的各个能级中，电子的排布尽可能分占不同的能级，而且自旋方向相同。当电子排布的全充满、半充满或全空时，是比较稳定的，整个原子的能量最低。例如，碳元素原子的电子层排布为 $1s^2 2s^2 2p^2$ 。

但是，当原子序数比较大，d 和 f 能级开始被填充时，电子排列不同，以原子序数为 26 的铁原子为例，其理论电子结构应为



然而，实际上铁原子的电子结构却为



偏离了理论电子结构，3d 层排满为 10 个电子，只排了 6 个，成为过渡族元素。未填满的 3d 能级使铁产生磁性行为。

1.3.3 原子间的键合

结合键可分为化学键和物理键两类。组成物质整体的粒子（原子、分子或离子）间的相互作用力叫化学键，是主价键；物理键是次价键，也称为范德瓦尔斯力。由于原子等粒子相互作用时，其吸引和排斥情况的不同，形成了不同类型的化学键，主要有共价键、离子键和金属键。

1.3.3.1 共价键

有些同类原子，例如周期表ⅣA、ⅤA、ⅥA族中大多数元素或电负性相差不大的原子互相结合时，原子之间不产生电子的转移，此时借共用电子对所产生的力结合，形成共价键。金刚石、单质硅、SiC等属于共价键。实践证明，一个硅原子与4个在其周围的硅原子共享其外壳层能级的电子，使外层能级壳层获得8个电子，每个硅原子通过4个共价键与4个邻近原子结合，如图1-2(a)。共价键具有方向性，对硅来说，所形成的四面体结构中，每个共价键之间的夹角约为 109.28° 。在外力作用下，原子发生相对位移时，键将遭到破坏，故共价键材料是脆性的。为使电子运动产生电流，必须破坏共价键，需加高温、高压，因此共价键材料具有很好的绝缘性。金刚石中碳原子间的共价键非常牢固，其熔点高达 3750°C ，是自然界中最坚硬的固体。共价键的结合极为牢固，因此，共价键晶体具有结构稳定、熔点高、质硬而脆等特点。由于束缚在相邻原子间的“共有电子对”不能自由运动，因此，具有共价键结合的材料一般是绝缘体。

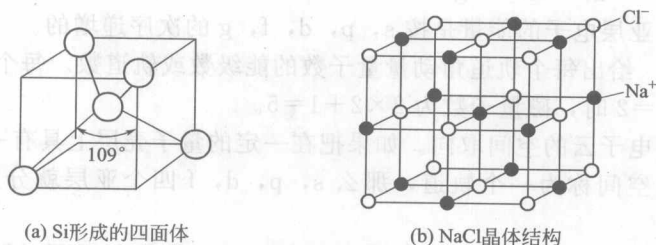


图 1-2 材料的结合

1.3.3.2 离子键

大部分盐类、碱类和金属氧化物在固态下是不能导电的，熔融时可以导电。这类化合物为离子化合物。当两种电负性相差大的原子（如碱金属元素与卤族元素的原子）相互靠近时，其中电负性小的原子失去电子，成为正离子，电负性大的原子获得电子成为负离子，两种离子靠静电引力结合在一起形成离子键。由于离子的电荷分布是球形对称的，因此它在各方向上都可以和相反电荷的离子相吸引，即离子键没有方向性。离子键的另一个特性是无饱和性，即一个离子可以同时和几个异号离子相结合。例如，在NaCl晶体中，每个 Cl^- 离子周围都有6个Na离子，每个Na离子也有6个 Cl^- 离子等距离排列着。离子晶体在空间三个方向上不断延续就形成了巨大的离子晶体。NaCl晶体结构如图1-2(b)所示。

离子型晶体中，正、负离子间有很强的电的吸引力，所以有较高熔点，离子晶体如果发生相对移动，将失去电平衡，使离子键遭到破坏，故离子键材料是脆性的。离子的运动不像电子那么容易，故固态时导电性很差。

1.3.3.3 金属键

金属原子的结构特点是外层电子少，容易失去。当金属原子相互靠近时，其外层的价电子脱离原子成为自由电子，为整个金属所共有，即电子的共有化，它们在整个金属内部运动，形成电子云。这种由金属正离子和自由电子之间互相作用而构成的键称为金属键，如图1-3所示。

金属键无方向性和饱和性，故金属的晶体结构大多具有高对称性，利用金属键可解释金属所具有的各种特性。金属内原子面之间相对位移，仍旧保持着金属键结合，故金属具有良好的延展性。在一定电位差下，自由电子可在金属中定向运动，形成电流，显示出良好的导电性。随温度升高，正离子（或原子）本身振幅增大，阻碍电子通过，使电阻升高，因此金属具有正的电阻温度系数，即金属是具有正的电阻温度系数的物质。

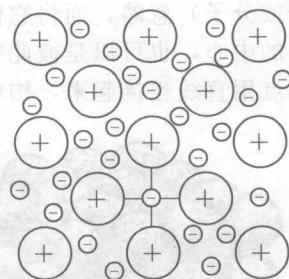


图 1-3 金属键

固态金属中，不仅正离子的振动可传递热能，而且电子的运动也能传递热能，故比非金属具有更好的导热性。金属中的自由电子可吸收可见光的能量，被激发、跃迁到较高能级，因此金属不透明。当它跳回到原来能级时，将所吸收的能量重新辐射出来，故使金属具有金属光泽。

1.3.3.4 范德瓦尔斯力

许多物质其分子具有永久极性。分子的一部分往往带正电荷，而另一部分往往带负电荷，一个分子的正电荷部位和另一分子的负电荷部位间，以微弱静电力相吸引，使之结合在一起，称为范德瓦尔斯力，也叫分子键或范德瓦尔斯键。分子晶体因其结合键能很低，所以其熔点很低。在金属与合金中这种键不多，而聚合物通常在链内是共价键，而链与链之间是范德瓦尔斯力。

1.3.3.5 工程材料中的键性

在实际的工程材料中，原子（或离子、分子）间相互作用的性质，只有少数是这四种键的极端情况，大多数是这四种键型的过渡。

金属材料的结合键主要是金属键，但四价锡却有明显的共价键特点，而 Mg_3Sb_2 这样的金属间化合物却显示出强烈的离子键特性。陶瓷材料的结合键主要是离子键与共价键。高分子材料的链状分子间的结合是范德瓦尔斯键，而链内是共价键。材料的键型不同，表现出不同的特性。

1.4 金属的晶体结构

在固态金属中，原子依靠金属键结合在一起，如图 1-2 和图 1-3 所示的那样规则地排列着。为使固态金属具有最低的能量，以便保持其稳定的状态，大量的原子之间必须保持一定的平衡距离，这是固态金属中原子规则排列的重要原因。

一个原子的周围最近邻的原子数越多，原子之间的结合能（势能）越低。能量最低的状态是最为稳定的状态。任何系统都是自发地从高能量状态向低能量状态演化。因此，通常金属中的原子总是自发地趋于较为紧密的规则排列，以维持其最稳定状态。但是，原子（或离子、分子）并非在平衡位置上固定不动，而是以平衡位置为中心做热振动，温度越高，热振动的振幅越大。这种物质是晶体。

晶体的定义：原子（或分子、离子）在三维空间做有规则的周期性重复排列的物质，称为晶体。

在通常情况下，金属和合金均为晶体。如果使用特殊的设备，将液态金属以极快的速度冷却下来，可以制出非晶态金属。相反，玻璃是非晶体，将其在高温下长时间加热后能够形成晶态玻璃。

1.4.1 空间点阵、晶格、晶胞

假定理想晶体中的原子都是固定不动的刚性球，则这些刚球堆垛而成晶体，图 1-4(a) 即为这种原子的堆垛模型。可见，原子在各个方向的排列都是很规则的。这种模型的优点是立体感强，很直观，缺点是这些刚性球密密麻麻地堆在一起，很难看清内部排列的规律和特点，不便于研究。为了清楚地表明原子在空间排列的规律性，常常将构成晶体的实际质点（原子、离

子或分子)忽略,而将它们抽象为纯粹的几何点,称为阵点或结点。这些阵点可以是原子或分子的中心,也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心,各个阵点的周围环境都相同。将这些阵点用直线连接起来,构成三维的空间格架,称其为空间点阵。如图 1-4(b) 所示。

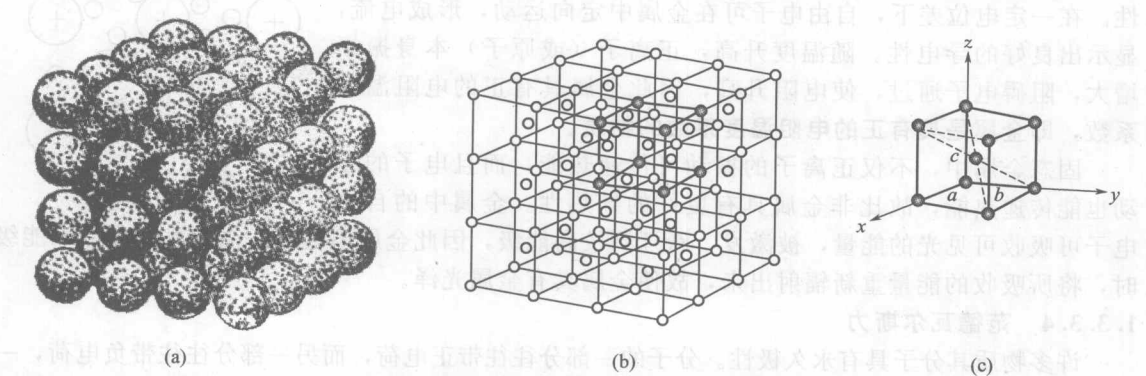


图 1-4 晶体中的原子堆垛模型 (a)、晶格示意图 (b) 和晶胞 (c)

空间点阵定义: 描述晶体中原子 (离子或分子) 规律排列的空间格架称为空间点阵或晶格。

由于原子在晶格中排列具有周期性,因此,为了简便起见,可以从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的最小的几何单元,来分析晶体中原子排列的规律性,这个最小的几何单元称为晶胞,如图 1-4(c) 所示。

以晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 及棱间夹角 α 、 β 、 γ 6 个点阵参数来表示晶胞的大小和形状,如图 1-5 所示。图中沿晶胞三条相交于一点的棱边设置了三个坐标轴 (或晶轴) x 、 y 、 z 。习惯上,以原点的前、右、上方为轴的正方向,反之为负方向。晶胞的棱边长度一般称为晶格常数或点阵常数,在 x 、 y 、 z 轴上分别以 a 、 b 、 c 表示。晶胞的棱间夹角又称为轴间夹角。

事实上,采用三个点阵矢量 a 、 b 、 c 来描述晶胞较为方便,这三个点阵矢量不仅确定了晶胞的大小和形状,并且完全确定了此空间点阵。

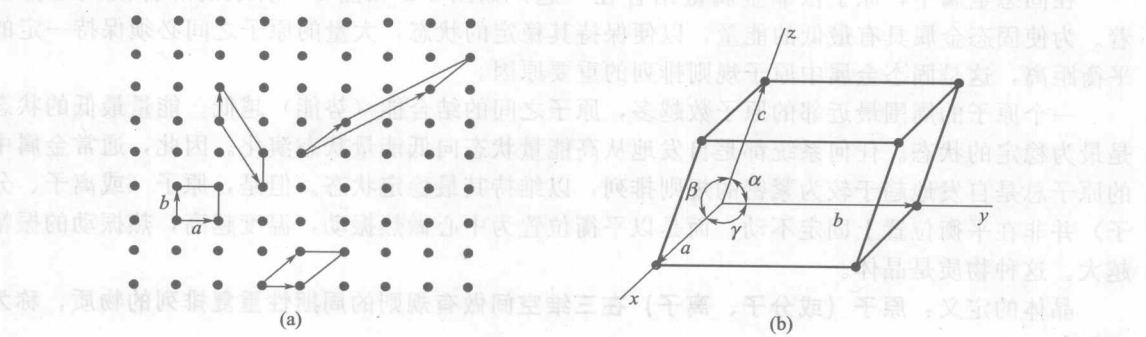


图 1-5 在点阵中选取晶胞 (a) 和晶胞中的点阵矢量 (b)

同一空间点阵可因选取方式不同而得到不同的晶胞,如图 1-5 表示。为此,要求选取晶胞最能反映该点阵的对称性,规定选取晶胞时把握下列原则。

- ① 选取的平行六面体应反映出点阵的最高对称性;
- ② 平行六面体内的棱和角相等的数目应最多;
- ③ 当平行六面体的棱边夹角存在直角时,直角数目应最多;
- ④ 在满足上述条件的情况下,晶胞应具有最小的体积。

根据 6 个点阵参数间的相互关系,可将全部空间点阵归属于 7 种类型,即 7 个晶系,如表 1-1 所列。