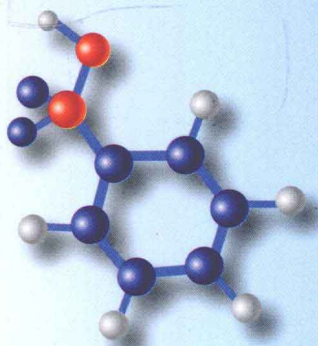




21世纪全国高等院校材料类**创新型**应用人才培养规划教材



MATERIALS

材料科学基础

主 编 张代东 吴 润

Materials



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

材料科学基础

主 编	张代东	吴 润
副主编	李明亚	任 鑫
参 编	吴志方	王晓强



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

“材料科学基础”是高等教育材料科学类、材料类和机械类相关专业的技术基础课,本书以金属材料为主线研究材料的成分、组织结构、制备工艺与材料性能和应用之间的相互关系。本书共分10章,全面系统地介绍金属材料的微观结构、晶体缺陷、结晶过程、合金相结构、相图、塑性变形与再结晶、扩散、固态相变、强化机理等。本书注重基础、联系实际、内容丰富,内容由浅入深、循序渐进,便于学生掌握。

本书可作为高等院校材料物理、材料化学、冶金工程、金属材料工程、材料成形与控制工程等专业本科生、研究生的通用教材,也可作为相关专业的师生和技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

材料科学基础/张代东,吴润主编. —北京:北京大学出版社,2011.1

(21世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-18350-2

I. ①材… II. ①张…②吴… III. ①材料科学—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第260434号

书 名: 材料科学基础

著作责任者: 张代东 吴 润 主编

策 划 编 辑: 童君鑫

责 任 编 辑: 宋亚玲

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-18350-2/TG·0014

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 三河市欣欣印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 20印张 462千字

2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷

定 价: 36.00元

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

北京大学出版社材料类相关教材书目

序号	书 名	标准书号	主 编	定价	出版日期
1	金属学与热处理	ISBN 7-5038-4451-5	朱兴元, 刘忆	24	2007.7
2	材料成型设备控制基础	ISBN 978-7-301-13169-5	刘立君	34	2008.1
3	锻造工艺过程及模具设计	ISBN 7-5038-4453-1	胡亚民, 华林	30	2008.6
4	材料成形 CAD/CAE/CAM 基础	ISBN 978-7-301-14106-9	余世浩, 朱春东	35	2008.8
5	材料成型控制工程基础	ISBN 978-7-301-14456-5	刘立君	35	2009.2
6	铸造工程基础	ISBN 978-7-301-15543-1	范金辉, 华勤	40	2009.8
7	材料科学基础	ISBN 978-7-301-15565-3	张晓燕	32	2009.8
8	模具设计与制造	ISBN 978-7-301-15741-1	田光辉, 林红旗	42	2009.9
9	造型材料	ISBN 978-7-301-15650-6	石德全	28	2009.9
10	材料物理与性能学	ISBN 978-7-301-16321-4	耿桂宏	39	2010.1
11	金属材料成形工艺及控制	ISBN 978-7-301-16125-8	孙玉福, 张春香	40	2010.2
12	冲压工艺与模具设计(第2版)	ISBN 978-7-301-16872-1	牟林, 胡建华	34	2010.6
13	材料腐蚀及控制工程	ISBN 978-7-301-16600-0	刘敬福	32	2010.7
14	摩擦材料及其制品生产技术	ISBN 978-7-301-17463-0	中荣华, 何林	45	2010.7
15	纳米材料基础与应用	ISBN 978-7-301-17580-4	林志东	35	2010.8
16	热加工测控技术	ISBN 978-7-301-17638-2	石德全, 高桂丽	40	2010.8
17	智能材料与结构系统	ISBN 978-7-301-17661-0	张光磊, 杜彦良	28	2010.8
18	材料力学性能	ISBN 978-7-301-17600-3	时海芳, 任鑫	32	2010.8
19	材料性能学	ISBN 978-7-301-17695-5	付华, 张光磊	34	2010.9
20	金属学与热处理	ISBN 978-7-301-17687-0	崔占全, 王昆林, 吴润	50	2010.10
21	特种塑性成形理论及技术	ISBN 978-7-301-18345-8	李峰	30	2011.1
22	材料科学基础	ISBN 978-7-301-18350-2	张代东, 吴润	36	2011.1
23	DEFORM-3D 塑性成形 CAE 应用教程	ISBN 978-7-301-18392-2	胡建军, 李小平	34	2011.1

电子书(PDF版)、电子课件和相关教学资源下载地址: <http://www.pup6.com/ebook.htm>, 欢迎下载。

欢迎免费索取样书, 请填写并通过 E-mail 提交教师调查表, 下载地址: <http://www.pup6.com/down/教师信息调查表 Excel 版.xls>, 欢迎订购。

联系方式: 010-62750667, 童编辑, tjxin_0405@163.com, pup_6@126.com, 欢迎来电来信。

欢迎访问立体化教材建设网址: <http://blog.pup6.com/>。

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

编审指导与建设委员会

成员名单（按拼音排序）

白培康（中北大学）	陈华辉（中国矿业大学）
崔占全（燕山大学）	杜彦良（石家庄铁道大学）
杜振民（北京科技大学）	耿桂宏（北方民族大学）
关绍康（郑州大学）	胡志强（大连工业大学）
李楠（武汉科技大学）	梁金生（河北工业大学）
林志东（武汉工程大学）	刘爱民（大连理工大学）
刘开平（长安大学）	芦笙（江苏科技大学）
裴坚（北京大学）	时海芳（辽宁工程技术大学）
孙凤莲（哈尔滨理工大学）	孙玉福（郑州大学）
万发荣（北京科技大学）	王春青（哈尔滨工业大学）
王峰（北京化工大学）	王金淑（北京工业大学）
王昆林（清华大学）	卫英慧（太原理工大学）
伍玉娇（贵州大学）	夏华（重庆理工大学）
徐鸿（华北电力大学）	余心宏（西北工业大学）
张朝晖（北京理工大学）	张海涛（安徽工程大学）
张敏刚（太原科技大学）	张锐（郑州航空工业管理学院）
张晓燕（贵州大学）	赵惠忠（武汉科技大学）
赵莉萍（内蒙古科技大学）	赵玉涛（江苏大学）

前 言

科学技术的进步为人类创造了巨大的物质财富和精神财富。能源、信息和材料是现代科学技术进步的三大支柱产业，其中材料是科学技术发展的基础。材料科学是研究材料的组织结构、性质、生产流程和使用效能，以及它们之间相互关系的科学。材料科学的发展与人类社会的进步和发展密切相关，是人类文明进程的一种标志。可以说，没有先进材料的生产及应用，就没有先进的工业、农业、国防和科学技术的发展。当今社会，科学技术发展日新月异，传统材料性能与应用不断拓展、各种功能性材料不断涌现，人类已步入先进材料发展与应用的新时代。

本书在论述材料的成分、组织结构、制备工艺与材料性能和应用之间的相互关系的基础上，系统地介绍了金属材料科学的基础理论，探讨金属材料的共性和普遍规律，以及无机非金属材料、高分子材料、复合材料和其他先进材料之间的关系。

本书是材料科学类、材料类和机械类相关专业的一门重要专业技术基础课，着重阐述金属材料的基础知识，比较全面系统地介绍金属材料的微观结构、晶体缺陷、结晶过程、合金相结构、相图、塑性变形与再结晶、扩散、固态相变、强化机理等内容。本书以金属材料基本概念和基本理论为基础，由浅入深、循序渐进、理论联系实际地揭示材料结构、成分与性能之间的内在关系及规律，为对材料的认识、改进和研究提供必要的理论基础、依据和思路。

本书主要内容包括：第1章，金属的晶体结构，主要分析典型金属晶体的结构特点和表征方法，以及金属晶体缺陷等；第2章，金属的结晶，主要分析金属结晶的基本规律和晶粒大小及控制等；第3章，合金相结构与二元合金相图，主要分析固溶体、金属化合物的特性和二元合金相图的基本形态与特征等；第4章，铁碳合金相图，主要分析Fe-Fe₃C二元合金（钢铁材料）的基本组织与特性等；第5章，三元合金相图，主要分析三元合金的表征方法和相平衡原理等；第6章，金属的塑性变形，以滑移为主线主要分析塑性变形的过程及实质等；第7章，回复与再结晶，主要分析塑性变形金属加热时的转变过程与组织特征等；第8章，金属的固态扩散，主要分析扩散定律和影响扩散系数的因素等；第9章，金属与合金的固态相变，主要分析固态相变的类型、转变特点、组织特征等；第10章，金属材料的强化机制，以位错的弹性行为特征为基础，主要分析金属材料的强化机理。

本书由张代东、吴润主编，其中第1章由东北大学秦皇岛分校李明亚编写；第0、2、9章由太原科技大学张代东编写；第3、4章由武汉科技大学吴志方编写；第5、8章由辽宁工程技术大学任鑫编写；第6、7章由东北大学秦皇岛分校王晓强编写；第10章由武汉科技大学吴润编写，本书由张代东统稿。本书在编写过程中得到了北京大学出版社的大力支持和热情指导，得到了太原科技大学材料科学与工程学院，尤其是材料教研室、实验室很多老师的关怀与协助，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者
2010年9月

目 录

第 0 章 绪论	1
----------------	---

第 1 章 金属的晶体结构	5
---------------------	---

1.1 金属键与金属特性	6
1.1.1 金属键	6
1.1.2 金属特性	8
1.2 金属晶体学基础	9
1.2.1 空间点阵	10
1.2.2 晶向指数与晶面指数	13
1.2.3 典型金属晶体结构	18
1.3 实际金属晶体结构	25
1.3.1 单晶体与多晶体	25
1.3.2 点缺陷	26
1.3.3 线缺陷	29
1.3.4 面缺陷	37
习题	45

第 2 章 金属的结晶	46
-------------------	----

2.1 结晶的基本概念	47
2.1.1 晶核形成与晶核长大	47
2.1.2 结晶的条件	47
2.2 晶核形成规律	50
2.2.1 均匀形核	50
2.2.2 非均匀形核	53
2.3 晶核长大规律	55
2.3.1 液固界面的微观结构	56
2.3.2 晶核长大机制	57
2.3.3 晶体生长的形态	58
2.3.4 晶体长大速度	60
2.3.5 晶粒大小的控制	60
2.4 金属铸锭的组织与缺陷	63
2.4.1 金属铸锭组织	63
2.4.2 金属铸锭组织的控制	64

2.4.3 金属铸锭中的缺陷	65
2.5 结晶理论的拓展与应用	66
2.5.1 定向凝固技术	66
2.5.2 急冷凝固技术	67
习题	69

第 3 章 合金相结构与二元合金相图 ..	71
-----------------------	----

3.1 合金相结构	72
3.1.1 基本概念	72
3.1.2 合金固溶体及类型	73
3.1.3 金属化合物(中间相)	77
3.2 液态合金固化(二元合金的凝固理论)	82
3.2.1 合金凝固时溶质的分配	82
3.2.2 成分过冷	87
3.3 二元合金相图的建立	91
3.3.1 相图测定方法	91
3.3.2 相律	93
3.3.3 二元相图杠杆定律	94
3.4 二元匀晶相图	95
3.4.1 相图分析	96
3.4.2 平衡结晶过程	96
3.4.3 非平衡结晶	97
3.5 二元共晶相图	98
3.5.1 相图分析	98
3.5.2 平衡结晶过程	99
3.5.3 非平衡结晶	106
3.6 二元包晶相图	109
3.6.1 相图分析	109
3.6.2 平衡结晶过程	110
3.6.3 非平衡结晶	112
3.7 其他类型的二元合金相图	113
3.7.1 具有共晶型恒温转变的 其他相图	113



3.7.2 具有包晶型恒温转变的 其他相图	114	4.5.3 常用碳钢	147
3.7.3 具有中间相形成的二元 合金相图	115	4.5.4 连铸坯	148
3.8 二元合金相图与二元合金性能的 关系	116	习题	149
3.8.1 合金相的力学性能与 物理性能	116	第5章 三元合金相图	150
3.8.2 二元合金的加工工艺 性能	117	5.1 三元合金相图表示方法	151
3.9 二元相图热力学初步	118	5.1.1 三元合金相图的成分 表示方法	151
3.9.1 合金自由能概念	118	5.1.2 三元合金相图的建立	153
3.9.2 二元合金的几何规律	121	5.1.3 三元相图定量法则	154
习题	123	5.1.4 三元相图热力学概述	156
第4章 铁碳合金相图	126	5.2 三元匀晶相图	157
4.1 铁碳合金组元性质	127	5.2.1 相图的空间模型	157
4.1.1 铁元素和碳元素	127	5.2.2 固溶体合金的平衡结晶 过程	157
4.1.2 铁碳合金组元	128	5.2.3 截面图分析	158
4.2 Fe-Fe ₃ C 相图分析	130	5.2.4 投影图	160
4.2.1 相图中的点、线、区及其 意义	130	5.3 三元共晶相图	161
4.2.2 包晶转变(水平线 HJB) ...	132	5.3.1 组元在固态完全不溶的 共晶相图	161
4.2.3 共晶转变(水平线 ECF) ...	132	5.3.2 组元在固态有限互溶的 共晶相图	165
4.2.4 共析转变(水平线 PSK) ...	132	5.4 其他形式的三元合金相图	170
4.2.5 三条重要的特性曲线	133	5.4.1 两个共晶型二元系与一个 匀晶型二元系构成的 三元相图	170
4.3 Fe-Fe ₃ C 相图典型合金平衡 结晶过程	133	5.4.2 包共晶型三元相图	170
4.3.1 工业纯铁	134	5.4.3 具有四相平衡包晶转变的 相图	171
4.3.2 钢	135	5.5 三元合金相图总结	171
4.3.3 白口铸铁	137	5.6 三元合金相图应用实例分析	175
4.4 Fe-Fe ₃ C 相图的应用	139	5.6.1 Fe-C-Si 三元相图的 垂直截面	175
4.4.1 以组织组成物标示的 Fe-Fe ₃ C 相图	139	5.6.2 Fe-C-Cr 三元相图的 等温截面	177
4.4.2 Fe-Fe ₃ C 相图在选材上的 应用	141	习题	177
4.4.3 Fe-Fe ₃ C 相图在制定 加工工艺上的应用	142	第6章 金属的塑性变形	181
4.5 碳钢	143	6.1 金属变形的三个阶段	182
4.5.1 钢中常存的杂质元素	143	6.1.1 弹性变形	182
4.5.2 碳钢的分类	146	6.1.2 塑性变形	185

6.1.3 断裂	187
6.2 单晶体的塑性变形	191
6.2.1 塑性变形基本方式	191
6.2.2 滑移特征	193
6.2.3 滑移的临界分切应力	196
6.2.4 塑性变形的实质	197
6.2.5 孪生变形	200
6.3 多晶体的塑性变形	202
6.3.1 晶界对塑性变形的 影响	202
6.3.2 晶粒位向对塑性变形的 影响	204
6.4 合金的塑性变形	205
6.4.1 固溶体中的塑性变形	205
6.4.2 第二相存在对塑性变形的 影响	207
6.5 塑性变形对组织和性能的影响	210
6.5.1 纤维组织	210
6.5.2 加工硬化	210
6.5.3 变形织构	213
6.5.4 变形内应力	214
习题	215

第7章 回复与再结晶

7.1 冷塑性变形金属在加热时的 转变	217
7.1.1 显微组织的变化	217
7.1.2 性能的变化	219
7.2 回复阶段	219
7.2.1 回复动力学	219
7.2.2 回复机制	221
7.3 再结晶	222
7.3.1 再结晶动力学	222
7.3.2 再结晶晶核的形成与 长大	223
7.3.3 影响再结晶的因素	226
7.3.4 再结晶晶粒大小的 控制	229
7.4 金属的热塑性变形	230
7.4.1 热、冷塑性变形的区别	230

7.4.2 热塑性变形对组织和 性能的影响	232
习题	235

第8章 金属的固态扩散

8.1 扩散概述	238
8.1.1 固态扩散的分类	238
8.1.2 扩散的微观机制	239
8.2 固态扩散定律	242
8.2.1 扩散第一定律	242
8.2.2 扩散第二定律	242
8.2.3 扩散第二定律的解及其 应用	243
8.3 扩散系数及影响扩散的因素	248
8.3.1 原子跳动和扩散系数	248
8.3.2 扩散激活能	250
8.3.3 柯肯达尔效应与 扩散驱动力	253
8.3.4 影响扩散的因素	255
8.3.5 反应扩散与应用	261
习题	263

第9章 金属与合金的固态相变

9.1 固态相变的分类与特征	266
9.1.1 固态相变的分类	266
9.1.2 固态相变的特征	268
9.2 固态相变的晶核形成过程	270
9.2.1 均匀形核	270
9.2.2 非均匀形核	271
9.2.3 形核率	273
9.3 固态相变的晶核长大	273
9.3.1 扩散型相变的晶核长大	273
9.3.2 非扩散型相变的 晶核长大	275
9.3.3 固态相变的动力学曲线	275
9.4 过饱和固溶体的分解转变	276
9.4.1 调幅分解	276
9.4.2 脱溶转变	277
9.5 马氏体型相变与形状记忆合金	281
9.5.1 马氏体的可逆转变	281



9.5.2 马氏体的形状记忆效应	282
9.5.3 形状记忆合金	283
习题	284
第 10 章 金属材料的强化机制	286
10.1 位错的弹性行为	287
10.1.1 静态位错的弹性行为 ...	287
10.1.2 动态位错的弹性行为 ...	291
10.2 实际晶体位错	294
10.2.1 单位位错、不全位错和全位错	294
10.2.2 面心立方晶体中的位错	295
10.3 金属材料的位错强化机制	299
10.3.1 加工强化	300
10.3.2 固溶强化	303
10.3.3 弥散强化	304
习题	304
参考文献	307

第〇章

绪论

材料科学是研究材料的组织结构、性质、生产流程和使用效能，以及它们之间相互关系的科学。

能源、信息和材料被认为是现代国民经济的三大支柱产业，其中材料是各行各业发展的基础。可以说，没有先进材料的生产及应用，就没有先进的工业、农业、国防和科学技术的发展。材料科学的发展与人类社会的进步和发展密切相关，是人类文明进步的一种标志。

材料是一类物质，是人类用以制造生产和生活所需物品或产品的物质。材料的种类繁多，用途广泛，一般按材料的物理化学性能将其分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料(有人将它们称为固体材料的四大家族)。在所有应用材料中，金属材料，尤其是钢铁，在机械制造业中应用最为广泛，各种机械设备、交通运输工具、航空航天器械、水利水电设施、仪器仪表产品、国防武器装备等所用材料中，金属材料都占有主导(90%以上)地位。

金属材料是指由金属元素或以金属元素为主要成分而组成的，具有金属特性的材料的统称。金属材料的金属特性主要包括：导电性、导热性、延展性、金属光泽和正的电阻温度系数等。金属材料是材料的一个大类，是人类社会发展的极为重要的物质基础之一，是现代工业、农业、国防和科学技术等部门应用最为广泛的材料。

金属材料来源丰富，品种极多。从元素周期表看，在自然界已知所存在 94 种化学元素中金属元素占了 72 种(人造元素除外)，像铝、铁、钙、钠、钾、镁、铜等金属元素在地壳中含量较大，通过冶炼等手段可获得它们的单质固体材料(称为纯金属，如纯铜、纯铁、纯铝等)或以它们为主体的不同成分的固体材料(称为合金，如青铜、合金钢、硬铝等)。金属材料之所以能够对人类文明发挥重要的作用，一方面是由于其本身具有比其他材料优良的使用性能和加工工艺性能，可通过各种加工手段制成各种形状、尺寸、粗糙度和不同性能要求的零件和工具，以满足社会生产和生活的各种需要；另一方面，是其在性能方面以及数量和质量方面的巨大潜在能力，可供随时挖掘，因而能够随着日益增长的名目繁多的要求，而不断地更新和发展。

金属材料的使用性能包括力学性能和物理化学性能。金属材料的力学性能主要包括强



度、硬度、塑性和韧性等。强度反映金属材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力,如屈服强度、抗拉强度、疲劳强度等。硬度是金属材料表面局部区域抵抗变形或破裂的能力,如根据试验方法和适用范围的不同,可分为布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。塑性是金属材料在外力作用下产生永久变形(去掉外力后不能恢复原状的变形),但不会被破坏的能力,一般用伸长率和断面收缩率等指标来表示。韧性反映金属材料抵抗冲击载荷的能力,通常用冲击吸收功、断裂韧性等指标来表示。金属材料的物理化学性能主要包括密度、导电性、导热性、膨胀系数、抗氧化性、耐腐蚀性等。

金属材料的加工工艺性能主要有切削加工工艺性能、铸造加工工艺性能、锻造加工工艺性能、焊接加工工艺性能和热处理加工工艺性能等。切削加工工艺性能是指车、铣、刨、磨、钻等切削加工时刀具不易磨损、所需切削力较小且被切削工件的表面质量高的性能。可切削性的好坏常用加工后工件的表面粗糙度、允许的切削速度以及刀具的磨损程度来衡量,与金属材料的化学成分、力学性能、导热性及加工硬化程度等诸多因素有关。铸造加工工艺性能是指金属材料能用铸造的方法获得合格铸件的性能。可铸性主要包括流动性、收缩性和偏析等,与金属材料的熔点、成分、吸气性、氧化性、冷缩率等因素有关。锻造加工工艺性能是指金属材料在压力加工时,能够改变形状或成形且不产生裂纹的性能。可锻性包括在热态或冷态下能够进行锤锻、轧制、拉伸、挤压等的加工,主要取决于金属材料的化学成分,一般来说材料的塑性越好,变形抗力越小,金属的锻造性越好。焊接加工工艺性能是指金属材料对焊接加工的适应性能,主要是指在一定的焊接工艺条件下,获得优质焊接接头的难易程度。可焊性反映金属材料在局部快速加热,使结合部位迅速熔化或半熔化(需加压),从而使结合部位牢固地结合在一起而成为整体的能力,与金属材料的熔点、吸气性、氧化性、导热性、热胀冷缩特性等因素有关。热处理加工工艺性能是指金属材料以不同加热、保温、冷却方式来改善或提高其力学性能和其他可加工工艺性的性能。可热处理性主要考虑金属材料在固态下的组织结构变化,与金属材料的化学成分紧密相关。正确运用热处理方法,能充分发挥金属材料的性能潜力,减轻工件重量、便于加工成形、降低生产成本、提高产品质量、延长使用寿命,在机械制造业中意义重大。

我国古代劳动人民在有关金属材料的生产、加工和热处理技术应用方面积累有丰富的经验,为人类的文明发展做出了巨大的贡献。从全国各地已出土的大量古代金属遗物和文献记载中可以看到中国古代很多精湛的冶炼、铸造、锻造、热处理等的重要成果。7000多年前,我们的祖先就发现并开始使用铜,4000多年前的夏朝(龙山时代)已有青铜冶铸技术。中国的青铜器时代从夏、商、西周、春秋、战国延续1500余年,主要用铜和铜合金生产礼器、兵器、工具和生活用品等。到商晚期和西周早期,青铜冶铸业达到高峰,是青铜器发展的鼎盛时期,器型多种多样,浑厚凝重,花纹繁缛富丽,安阳殷墟出土的重达875kg的司母戊大方鼎是世界上罕见的大型青铜器。春秋的《考工记》记载了当时青铜器的制造技术,称为“六齐”规律:“金有六齐,六分其金而锡居一,谓之钟鼎之齐;五分其金而锡居一,谓之斧斤之齐;四分其金而锡居一,谓之戈戟之齐;三分其金而锡居一,谓之大刃之齐;五分其金而锡居二,谓之削杀矢之齐;金锡半,谓之鉴燧之齐。”是世界上已知关于合金成分、性能和用途之间关系规律的最早记载。青铜器的使用与发展,是社会生产力发展到一个新阶段的标志,是社会进入文明时代的一个重要分水岭。3000多年前,人类就开始认识和使用铁器,到春秋时期,中国已经在农业、手工业生产上广泛使用铁制品,中国最早的关于使用铁制工具的文字记载,是《左传》中的晋国铸铁鼎。铁器的

广泛使用,使人类的工具制造进入了一个全新的领域,生产力得到极大提高。恩格斯说:“铁使更大面积的农田耕作,开垦广阔的森林地区成为可能;它给手工业工人提供了一种极其坚固和锐利非石头或当时所知道的其他金属所能抵挡的工具。”我国具有悠久的钢铁生产及热处理技术应用历史,春秋时期已能熔炼铸铁,到战国时期,铸铁的生产和应用已有较大发展,所谓白口铁、可锻铸铁、麻口铁相继出现,随后发展到由铸铁而炼钢,并相继开始采用各种热处理方法:退火、淬火、正火和渗碳等来改善钢和铸铁的性能。西汉时,钢和铸铁的冶炼技术已大大提高,产量、质量和应用得到空前的发展。如武安出土的战国时期的铁铤,就是现在的可锻铸铁;辽阳出土的西汉钢剑,其内部组织为淬火马氏体;满城出土的西汉佩剑为现在的表面渗碳组织等。汉代所发明的“百炼钢”“炒钢”是在生铁冶铸技术的基础上发展起来的炼钢新技术,经过反复加热、折叠、锻打使钢的组织更加细密,成分更加均匀,所以钢的质量有很大提高。后经近 1500 多年的发展,直到明朝,特别是中间又经过盛唐时代的大发展后,钢铁生产一直在世界遥遥领先。“二十四史”中就有许多关于钢铁材料生产、加工、热处理等的科学技术记载,如《史记》(汉·司马迁著)中有“水与火合为焠(淬)”,《北史》(唐·李延寿著)中有綦母怀文(南北朝人)“造宿铁刀,其法烧生铁精,以重柔铤,数宿则成刚。以柔铁为刀脊,浴以五牲之溺,淬以五牲之脂,斩过三十札”。《太平御览》(宋·李昉等编辑)引《蒲元传》中说蒲元(三国时代的制刀名匠)“君性多奇思,於斜谷,为诸葛亮铸刀三千口。刀成,自言汉水钝弱,不任淬用,蜀江爽烈,是谓大金之元精,天分其野,乃命人于成都取江水”。《天工开物》(明·宋应星著)在五金篇中写道:“其铁流入塘内,数人执柳木棍排立墙上。先以污潮泥晒干,春筛细罗如面,一人疾手撒炎,众人柳棍疾搅,实时炒成熟铁”是典型的“炒铁”生产工艺;在锤锻篇中有“凡针,先锤铁为细条。用铁尺一根,锥成线眼,抽过条铁成线,逐寸剪断成针。先蹉其末成颖,用小槌敲扁其本,刚锥穿鼻,复蹉其外。然后入釜,慢火炒熬。炒后以土末松木、火矢、豆豉三物罨盖,下用火蒸。留针二三口,插于其外,以试火候。其外针入手捻成粉样,则其下针火候皆足,然后开封入水健之”是典型的固体渗碳工艺。《天工开物》是中国古代一部综合性的科学技术著作,也是世界上第一部关于农业和手工业生产的综合性著作,被欧洲学者称为“17 世纪的工艺百科全书”。

18~19 世纪的欧洲工业革命将欧洲带入冶铁和机械制造的快速发展时期,现代平炉和转炉炼钢技术的出现,纺织机、蒸汽机、轮船、火车、汽锤、车床的广泛应用,使人类迈进钢铁应用新时代,大大促进了人类现代文明的进程。20 世纪是科学技术发展突飞猛进的世纪,人类在本世纪所取得的科技成就和创造的物质财富超过了以往任何一个时代。随着物理学和化学等科学的发展,相对论和量子力学的诞生以及电子显微镜等各种检测技术的相继出现,产生了一批新兴的高科技技术产业,像核能技术、航天技术、信息技术、激光技术和生物技术等。这些新技术的诞生与发展无一不需要新材料,都要求材料能与之同步或领先发展,包括核燃料、轻质材料、记忆材料、磁能材料、超导材料、热强材料、纳米材料等,其中金属材料的开发应用仍占有主导地位。如不锈钢的规模化生产、球墨铸铁的推广应用以及热处理技术、设备等的进步使钢铁材料的工业应用及机械制造基础工业发展进入鼎盛期。铝和铝合金的工业应用,促进了航空业的发展,并扩展到建筑、包装、交通运输、电力、机械制造和石油化工等国民经济各个领域,应用到人们的日常生活当中。现在,铝材的用量之多,范围之广,仅次于钢铁,成为第二大金属材料。钛和钛合金的工业化生产,促进了航天技术的发展,并用于制作电解工业的电极、发电站的冷凝器、



海水淡化的加热器、生物牙齿骨骼以及生产贮氢材料和形状记忆合金等。镁和镁合金是目前工业应用中最轻的结构材料，主要用在汽车、飞机等零部件和计算机外壳等 3C 产品上，以实现环保和轻量化，又被誉为 21 世纪绿色金属材料。当今时代，科学技术发展日新月异，各种功能性材料层出不穷，人类已步入先进材料的新时代。

1949 年中华人民共和国的成立，推翻了压在中国人民头上的三座大山(帝国主义、封建主义、官僚资本主义)，甩掉了 200 年科学技术衰落，工业、农业、商业、交通运输业等极不发达，人民生活极度贫穷落后的帽子。半个多世纪以来，为了中华民族的伟大复兴、富裕与安宁，为了实现国家的工业化和自动化，中国人民进行了不屈不挠的努力，取得了举世瞩目的伟大成就。今天的中华大地已经发生了翻天覆地的变化，在所有重大科学技术领域都开展了科学研究与开发工作，在很多重要的科学技术领域已达到和接近世界先进水平，综合国力业已进入世界前列。以钢铁材料为主导的材料科学和材料科学技术产业，成就辉煌，并渗透到各行各业，许多领域都与材料的制备、性质、应用等密切相关，使得材料成为机械、电子、化工、建筑、能源、生物、冶金、交通运输、信息科技等行业的基础，并与这些相关学科交叉发展。对于中国，实现现代化的前提是工业化，实现工业化的主力军是制造业，而制造业的基础是金属材料。在从工业化向现代化发展的进程中，中国必须紧密跟踪世界潮流，努力发展以金属材料为主体的制造产业和服务产业，以现代科学技术努力提升现有材料的产能、不断挖掘其性能潜力，并紧跟世界材料科学发展前沿，不断研究开发先进材料。

当今世界，是科学技术高速发展的世界，与发达国家相比中国的科学技术发展底子薄、起步晚，要赶超世界先进水平有待时日，需广大科技工作者和全国各族人民的共同努力。中国今天仍然是一个发展中国家，工业化和现代化进程仍处于初级阶段。因此，我们要努力学习，积极工作，用先进科学技术成果武装自己，加速中国科技的发展，以早日实现现代化的宏伟目标。

“材料科学基础”主要研究金属材料的成分、组织结构、制备工艺与材料性能和应用之间的相互关系。《材料科学基础》系统地介绍了金属材料科学的基础理论，探讨金属材料的共性和普遍规律以及无机非金属材料、高分子材料、复合材料和先进材料之间的关系，它与材料科技的发展密切相关，是千百年来广大劳动人民生活劳动的结晶。

“材料科学基础”是一个多学科交叉的学科领域，是一门与工业生产和工程技术密不可分的应用科学。它以数学、物理、化学、材料力学、机械制造原理等为基础，从金属材料的晶体结构、结晶规律、塑性变形规律、合金相图、热处理技术、材料应用等方面全面阐述金属材料的成分、组织结构与性能之间的基本规律以及提高材料性能、充分发挥材料性能潜力的途径。《材料科学基础》是材料科学类、材料类和机械类相关专业的一门重要的专业技术基础课程，全面学习和掌握能为材料的正确生产、选用、设计、加工、处理和研究开发打下坚实的专业基础。

第 1 章

金属的晶体结构



本章教学目标

- ★ 掌握晶体和金属晶体的基本特征
- ★ 了解布拉菲点阵，掌握典型金属晶体结构特点和表征方法
- ★ 掌握实际金属点缺陷、线缺陷、面缺陷形成特点



本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
金属键	熟悉原子间结合键类型及特点，重点掌握金属键结合特点和金属特性	元素及其原子结构，键合方式，原子结合特性，金属键与金属特性
金属晶体学基础	熟悉布拉菲点阵模型，掌握典型金属晶体的表征方法	空间点阵、晶胞、晶格常数，14 种布拉菲点阵，晶面指数、晶向指数，典型金属晶体结构、间隙
金属晶体缺陷	了解实际金属晶体与理想晶体的区别，掌握三种缺陷类型和特征	单晶体、多晶体，点缺陷类型、平衡浓度，位错类型、密度、柏氏矢量，晶界、孪晶界、亚晶界、相界、表面、界面能



实践和研究表明：决定金属材料性能最根本的因素是组成材料的各元素的原子结构、原子之间的结合方式、原子在空间的排列分布和运动规律，以及原子集合体的形貌特征等。如具有面心立方晶体结构的金、银、铜、铝等金属，均具有优良的延展性能，而具有密排六方晶体结构的镁、锌、镉等金属则较脆。因而，要正确地选择符合性能要求的金属材料或研制性能更加优异的材料，都需要掌握乃至控制其结构。

1.1 金属键与金属特性

1.1.1 金属键

1. 金属原子的特点

近代科学实验证明：原子是由带正电的原子核和带负电的核外电子所组成。原子核中又包括质子和中子，中子呈电中性，质子具有正电荷。每个质子所带的正电荷正好与一个电子所带负电荷相等，等于 $-e$ ($e=1.6022\times 10^{-19}\text{C}$)。每个原子中的质子数与核外电子数相等。因而，原子作为一个整体呈电中性。通过正负电荷的相互吸引，电子被牢牢地束缚在原子核周围。原子的尺寸很小，直径约为 10^{-8}cm 数量级，其原子核的尺寸更小，仅为 10^{-13}cm 数量级。然而，原子的质量却主要集中于原子核内。质子和中子的质量大致相等，约为 $1.67\times 10^{-24}\text{g}$ ，电子的质量约为 $9.11\times 10^{-28}\text{g}$ ，仅为质子的 $1/1836$ 。

电子在原子核外作高速旋转运动，就好像带负电荷的云雾笼罩在原子核的周围，这一现象被称为电子云。电子运动没有固定的轨道，只能用统计的方法判断其在某一区域内出现概率的大小。电子在原子核外按其能量的不同由低至高分层排列着。内层电子的能量最低，最为稳定。最外层电子的能量高，与原子核结合弱，这样的电子通常称为价电子。

金属原子外层的价电子数很少，一般为 $1\sim 2$ 个，最多不超过4个。由于这些外层电子与原子核的结合力弱，所以很容易脱离原子核的束缚成为自由电子，使原子变为正离子。而非金属元素的原子结构刚好与此相反，其外层的价电子数较多，最多达7个，最少有4个，所以易于获得电子，使外层电子结构成为稳定的结构，此时的原子即变为负离子。铁、钴、镍等过渡金属元素的原子结构比较特殊，在其次外层尚未填满的情况下，最外层就先填充了电子。因而，过渡金属的原子，不仅容易丢失最外层电子，而且还容易丢失次外层的 $1\sim 2$ 个电子。当过渡金属的原子彼此相互结合时，不仅最外层电子参与结合，而且次外层电子也参与结合。因此，过渡金属的原子间结合力特别强，宏观表现为熔点高、强度高。由此可见，原子外层参与结合的电子数目，不仅决定着原子间结合键的本质，而且对其化学性能和强度等特性也具有重要影响。

2. 金属键

两个或多个原子能够相互结合成分子或晶体，说明原子间存在着某种强烈的相互作用，而且，这种作用将使体系的能量状态降低。从本质上讲，原子结合成分子或固体的结合力都起源于原子核和电子间的静电交互作用。原子结合成分子或固体的方式和结合力的大小称为结合键。根据电子围绕原子的分布方式，结合键又可分为金属键、共价键、离子

键、分子键和氢键。

在元素周期表所列 100 多化学元素中,金属元素约占 4/5,形成金属物体时其原子大多以金属键相结合。典型金属原子结构的特点是外层电子较少,并且各个原子的价电子极易挣脱原子核的束缚而成为自由电子,金属原子则成为正离子。正离子排列在金属晶体的阵点上,自由电子为相互结合的集体原子所共有,并在整个晶体内自由转移和流动,形成负电子云。金属正离子和公有化的自由电子之间产生强烈的静电相互作用(库仑引力),使金属原子结合成一个整体,这种结合方式称为金属键,如图 1.1 所示。负电子云的分布可看作是球形对称的,因而金属键没有饱和性和方向性。这样,金属物体中的每个原子有可能与更多的原子相结合,形成具有高对称性的紧密排列的晶体结构。

3. 其他键合方式

1) 离子键

金属元素与非金属元素是通过离子键结合的。当这两类元素结合时,金属原子将其最外层的价电子给予非金属原子,金属原子失去价电子后成为带正电的正离子,非金属原子得到电子后成为带负电的负离子。这种正负离子通过静电引力使原子结合在一起的结合方式称为离子键。离子键结合的基本单元是离子而不是原子。离子键的键合方式要求正负离子相间排列(图 1.2),故离子键没有方向性和饱和性。典型的离子晶体有 NaCl、 $MgCl_2$ 等。

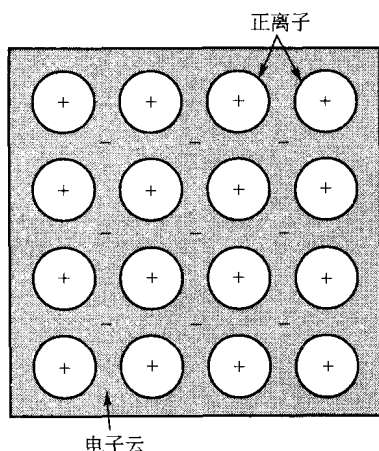


图 1.1 金属键模型

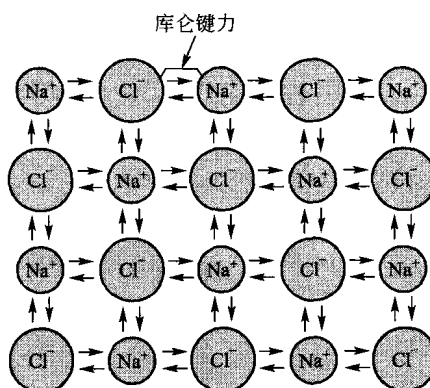


图 1.2 NaCl 离子键的示意图

2) 共价键

两个或多个电负性相差不大的原子之间通过共用电子对结合在一起而形成分子或晶体的结合方式称为共价键。原子结构理论表明, s 亚层的电子云呈球对称,而 p、d 等亚层的电子云均具有一定的方向性。在形成共价键时,为使不同原子电子云的重叠达到最大限度,共价键具有方向性;另一方面,当一个电子与另一个电子形成电子对后,就不能和第三个电子配对,因而共价键具有饱和性。

3) 分子键

由于电子云的密度随时间而变,在每一瞬间,负电荷中心与正电荷中心并不重合,这样就形成瞬时电偶极矩,产生瞬时电场。这种靠瞬时的电偶极矩的感应作用,使原来具有