



21st CENTURY
十一五规划

21世纪全国应用型本科

大机械系列 实用规划教材



机械工程材料

主 编 戈晓岚 洪 琢
副主编 钟利萍 谭群燕
主 审 张学政

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材

机 械 工 程 材 料

主 编	戈晓岚	洪 琢	
副主编	钟利萍	谭群燕	
参 编	孙步功	胡世华	冯瑞宁
主 审	张学政		

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书注重能力培养, 强调应用, 将内容和学习指导有机融合, 书中的基本术语和材料牌号等均采用了最新标准。全书内容共分 9 章, 分别讲述材料的结构与组成、材料的力学行为、二元合金相图及相变基础知识、材料的改性、工业用钢及铸铁、有色金属及其合金、非金属材料、材料的选用、新材料。每章都安排有帮助读者掌握、巩固、深化学习内容和应用的教学提示、教学要求和习题。

本书可作为高等院校本科机械类和近机类专业学生教材, 也可作为高等职业技术学院、高等专科学校相关专业的教材和有关专业人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/戈晓岚, 洪琢主编. —北京: 中国林业出版社; 北京大学出版社, 2006.8

(21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材)

ISBN 7-5038-4452-3

I. 机… II. ①戈… ②洪… III. 机械制造材料—高等学校—教材 IV. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 076947 号

书 名: 机械工程材料

著作责任者: 戈晓岚 洪 琢 主编

策划编辑: 李昱涛

责任编辑: 郭穗娟 郑铁志

标准书号: ISBN 7-5038-4452-3

出 版 者: 中国林业出版社(地址: 北京市西城区德内大街刘海胡同 7 号 邮编: 100009)

<http://www.cfph.com.cn> E-mail: cfphz@public.bta.net.cn

电话: 编辑部 66170109 营销中心 66187711

北京大学出版社(地址: 北京市海淀区成府路 205 号 邮编: 100871)

<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com> E-mail: pup_6@163.com

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

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

发 行 者: 北京大学出版社 中国林业出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 420 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 29.00 元

《21世纪全国应用型本科火机械系列实用规划教材》

专家编审委员会

名誉主任 胡正寰*

主任委员 殷国富

副主任委员 (按拼音排序)

戴冠军 江征风 李郝林 梅 宁 任乃飞

王述洋 杨化仁 张成忠 张新义

顾 问 (按拼音排序)

傅水根 姜继海 孔祥东 陆国栋

陆启建 孙建东 张 金 赵松年

委 员 (按拼音排序)

方 新 郭秀云 韩健海 洪 波

侯书林 胡如风 胡亚民 胡志勇

华 林 姜军生 李自光 刘仲国

柳舟通 毛 磊 孟宪颐 任建平

陶健民 田 勇 王亮申 王守城

魏 建 魏修亭 杨振中 袁根福

曾 忠 张伟强 郑竹林 周晓福

*胡正寰: 北京科技大学教授, 中国工程院机械与运载工程学部院士

丛书总序

殷国富*

机械是人类生产和生活的基本工具要素之一，是人类物质文明最重要的一个组成部分。机械工业担负着向国民经济各部门，包括工业、农业和社会生活各个方面提供各种性能先进、使用安全可靠的技术装备的任务，在国家现代化建设中占有举足轻重的地位。20 世纪 80 年代以来，以微电子、信息、新材料、系统科学等为代表的新一代科学技术的发展及其在机械工程领域中的广泛渗透、应用和衍生，极大地拓展了机械产品设计制造活动的深度和广度，改变了现代制造业的产品设计方法、产品结构、生产方式、生产工艺和设备以及生产组织模式，产生了一大批新的机械设计制造方法和制造系统。这些机械方面的新方法和系统的主要技术特征表现在以下几个方面：

(1) 信息技术在机械行业的广泛渗透和应用，使得现代机电产品已不再是单纯的机械构件，而是由机械、电子、信息、计算机与自动控制等集成的机电一体化产品，其功能不仅限于加强、延伸或取代人的体力劳动，而且扩大到加强、延伸或取代人的某些感官功能与大脑功能。

(2) 随着设计手段的计算机化和数字化，CAD/CAM/CAE/PDM 集成技术和软件系统得到广泛使用，促进了产品创新设计、并行设计、快速设计、虚拟设计、智能设计、反求设计、广义优化设计、绿色产品设计、面向全寿命周期设计等现代设计理论和技术方法的不断发展。机械产品的设计不只是单纯追求某项性能指标的先进和高低，而是注重综合考虑质量、市场、价格、安全、美学、资源、环境等方面的影响。

(3) 传统机械制造技术在不断吸收电子、信息、材料、能源和现代管理等方面成果的基础上形成了先进制造技术，并将其综合应用于机械产品设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务的机械产品制造全过程，以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产，提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力。

(4) 机械产品加工制造的精密化、快速化，制造过程的网络化、全球化得到很大的发展，涌现出 CIMS、并行工程、敏捷制造、绿色制造、网络制造、虚拟制造、智能制造、大规模定制等先进生产模式，制造装备和制造系统的柔性可重组已成为 21 世纪制造技术的显著特征。

(5) 机械工程的理论基础不再局限于力学，制造过程的基础也不只是设计与制造经验及技艺的总结。今天的机械工程学科比以往任何时候都更紧密地依赖诸如现代数学、材料科学、微电子技术、计算机信息科学、生命科学、系统论与控制论等多门学科及其最新成就。

上述机械科学与工程特征和发展趋势表明，现代机械工程学科越来越多地体现着知识经济的特征。因此，加快培养适应我国国民经济建设所需要的高综合素质、高综合素质的机械工程学科人才的意义十分重大、任务十分繁重。我们必须通过各种层次和形式的教育，培养出适应世界机械工业发展潮流与我国机械制造业实际需要的技术人才与管理人才，不断推动我国机械科学与工程技术的进步。

为使机械工程学科毕业生的知识结构由较专、较深、适应性差向较通用、较广泛、适

*殷国富教授：现为教育部机械学科教学指导委员会委员，现任四川大学制造科学与工程学院院长

应性强方向转化,在教育部的领导与组织下,1998年对本科专业目录进行了第3次大的修订。调整后的机械大类专业变成4类8个专业,它们是:机械类4个专业(机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、过程装备与控制、工业设计);仪器仪表类1个专业(测控技术与仪器);能源动力类2个专业(热能与动力工程、核工程与核技术);工程力学类1个专业(工程力学)。此外还提出了面向更宽的引导性专业,即机械工程及自动化。因此,建立现代“大机械、全过程、多学科”的观点,探讨机械科学与工程技术学科专业创新人才的培养模式,是高校从事制造学科教学的教育工作者的责任;建立培养富有创新能力人才的教学体系和教材资源环境,是我们努力的目标。

要达到这一目标,进行适应现代机械学科发展要求的教材建设是十分重要的基础工作之一。因此,组织编写出版面向大机械学科的一系列教材就显得很有意义和十分必要。北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们通过对国内大学机械工程学科教材实际情况的调研,在与众多专家学者讨论的基础上,决定面向机械工程学科类专业的学生出版一套系列教材,这是促进高校教学改革发展的重大决策。按照教材编审委员会的规划,本系列教材将逐步出版。

本系列教材是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,合理定位,由长期在教学第一线从事教学工作的教师立足于21世纪机械工程学科发展的需要,以科学性、先进性、系统性和实用性为目标进行编写,以适应不同类型、不同层次的学校结合学校实际情况的需要。本系列教材编写的特色体现在以下几个方面:

(1) 关注全球机械科学与工程技术学科发展的大背景,建立现代大机械工程学科的新理念,拓宽理论基础和专业知识,特别是突出创造能力和创新意识。

(2) 重视强基础与宽专业知识面的要求。在保持较宽学科专业知识的前提下,在强化产品设计、制造、管理、市场、环境等基础理论方面,突出重点,进一步密切学科内各专业知识面之间的综合内在联系,尽快建立起系统性的知识体系结构。

(3) 学科交叉与综合的观念。现代力学、信息科学、生命科学、材料科学、系统科学等新兴学科与机械学科结合的内容在系列教材编写中得到一定的体现。

(4) 注重能力的培养,力求做到不断强化自我的自学能力、思维能力、创造性地解决问题的能力以及不断自我更新知识的能力,促进学生向着富有鲜明个性的方向发展。

总之,本系列教材注意了调整课程结构,加强学科基础,反映系列教材各门课程之间的联系和衔接,内容合理分配,既相互联系又避免不必要的重复,努力拓宽知识面,在培养学生的创新能力方面进行了初步的探索。当然,本系列教材还需要在内容的精选、音像电子课件、网络多媒体教学等方面进一步加强,使之能满足普通高等院校本科教学的需要,在众多的机械类教材中形成自己的特色。

最后,我要感谢参加本系列教材编著和审稿的各位老师所付出的大量卓有成效的辛勤劳动,也要感谢北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们对本系列教材的支持和编审工作。由于编写的时间紧、相互协调难度大等原因,本系列教材还存在一些不足和错漏。我相信,在使用本系列教材的教师和学生的关心和帮助下,不断改进和完善这套教材,使之在我国机械工程类学科专业的教学改革和课程体系建设中起到应有的促进作用。

前 言

教材是教学的依据，是教师多年教学经验的积累。同时，教材也是教改成果的体现以及教改的重点和难点。本书按照高校专业设置调整与合并所提出的教改要求，以国家教育部最新颁布的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》中工程材料的基本教学内容和要求为依据，对现有的相关教材进行了必要的分析，并在汲取国内外同类教材某些优点的基础上，结合相关院校的教改成果及作者多年的教学经验编写而成。本书以“保持特色、精炼基础；拓宽知识、跟踪时代；注重应用、强化能力”为编写原则，并坚持“精、实、广、新、活”的五字目标。具体地说，“精”就是提高起点、精炼基础；“实”就是注重应用，培养能力；“广”就是拓宽知识面，注重各学科知识的综合；“新”就是知识适当更新，既保持特色，又注意学科前沿；“活”就是强调学生的自学能力和科学思维方法的训练，变“学会”为“会学”。

本书以选材和材料改性为主线，将金属与非金属材料的内容结合在一起，既突出共性，又兼顾个性，从理论上简明扼要地论述了材料成分、结构、组织与性能的关系，并着重叙述了材料改性的原理、方法及常用工程材料成分、结构和性能用途。另外，本书还从选材和材料改性等方面介绍了实际应用，最后还简介了新材料的相关知识。

使用本书时，可根据具体情况作必要的调整或增删，有些内容可供学生自学。

全书由江苏大学戈晓岚、上海理工大学洪琢、中南林业科技大学钟利萍、华北水利水电学院谭群燕、甘肃农业大学孙步功、九江学院胡世华、德州学院冯瑞宁编写，戈晓岚、洪琢任主编，钟利萍、谭群燕任副主编，由戈晓岚教授统一修改并统稿。清华大学张学政担任主审，并对全书提出了宝贵的修改意见，在此表示衷心感谢。在编写过程中，编者还参考了国内外许多相关教材、科技著作和论文，在此向这些资料的作者们表示深深的谢意！

由于编者水平、时间有限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者
2006年5月

《21世纪全国应用型本科大机械系列实用规划教材》

参编学校名单（按拼音排序）

- | | |
|-------------|---------------|
| 1 安徽建筑工业学院 | 30 吉林工程技术师范学院 |
| 2 安徽科技学院 | 31 江苏大学 |
| 3 安徽农业大学 | 32 江西理工大学 |
| 4 北华大学 | 33 九江学院 |
| 5 北京建筑工程学院 | 34 军事交通学院 |
| 6 北京联合大学 | 35 兰州理工大学 |
| 7 长春大学 | 36 辽宁工程技术大学 |
| 8 长沙理工大学 | 37 鲁东大学 |
| 9 重庆工学院 | 38 南昌航空工业学院 |
| 10 重庆交通学院 | 39 南华大学 |
| 11 德州学院 | 40 内蒙古工业大学 |
| 12 东北林业大学 | 41 青岛科技大学 |
| 13 东华理工学院 | 42 山东理工大学 |
| 14 福建工程学院 | 43 上海工程技术大学 |
| 15 甘肃农业大学 | 44 上海理工大学 |
| 16 桂林工学院 | 45 上海水产大学 |
| 17 河北大学 | 46 沈阳大学 |
| 18 河北建筑工程学院 | 47 四川农业大学 |
| 19 河北农业大学 | 48 潍坊学院 |
| 20 河南工业大学 | 49 武汉工业学院 |
| 21 河南科技学院 | 50 武汉科技大学 |
| 22 湖北汽车工业学院 | 51 武汉理工大学 |
| 23 湖南工程学院 | 52 湘潭大学 |
| 24 湖南工学院 | 53 徐州师范大学 |
| 25 湖南工业大学 | 54 郑州航空工业管理学院 |
| 26 湖南理工学院 | 55 中北大学 |
| 27 华北水利水电学院 | 56 中国农业大学 |
| 28 华东交通大学 | 57 中南林业科技大学 |
| 29 黄石理工学院 | |

目 录

第 1 章 材料的结构与组成 1	
1.1 材料的结构 1	
1.1.1 晶体与非晶体..... 1	
1.1.2 晶体中的化学键合..... 1	
1.1.3 晶体结构..... 4	
1.1.4 晶体中的缺陷..... 6	
1.2 合金的组成与结构 9	
1.2.1 金属及合金的化学组成..... 9	
1.2.2 合金材料组元的结合形式..... 10	
1.3 高分子化合物的组成与结构 12	
1.3.1 高分子化合物的组成..... 12	
1.3.2 高分子链的组成与结构..... 13	
1.3.3 高分子链的聚集态结构..... 15	
1.3.4 高分子材料的组成和织态 结构及微区结构..... 15	
1.4 陶瓷材料的组成与结构 18	
1.4.1 晶体相..... 19	
1.4.2 玻璃相..... 21	
1.4.3 气相..... 21	
1.5 晶体的结晶 22	
1.5.1 金属的结晶..... 22	
1.5.2 结晶理论的应用..... 25	
1.5.3 材料的同素异构现象..... 30	
习题 32	
第 2 章 材料的力学行为 34	
2.1 材料的性能 35	
2.1.1 静态力学性能..... 35	
2.1.2 动态力学性能..... 39	
2.1.3 高低温性能..... 42	
2.1.4 材料的工艺性能..... 43	
2.1.5 工艺过程对材料性能的影响..... 43	
2.2 金属的塑性变形与再结晶 45	
2.2.1 单晶体的弹性及塑性变形 45	
2.2.2 实际金属的塑性变形 48	
2.2.3 塑性变形对金属组织与性能 的影响 49	
2.2.4 金属的再结晶 51	
2.3 金属的热加工 54	
2.4 材料的超塑性 56	
2.5 高聚物的力学状态 58	
2.5.1 线形无定型高聚物的力学 状态 58	
2.5.2 结晶和交联对高聚物力学 状态的影响 60	
习题 62	
第 3 章 二元合金相图及相变基础 知识 63	
3.1 相图的概念 64	
3.1.1 平衡相图 64	
3.1.2 冷却曲线 64	
3.1.3 杠杆定律 66	
3.1.4 溶解度与相图的基本类型 67	
3.2 平衡相图的应用 68	
3.2.1 表象点的研究 68	
3.2.2 合金的结晶过程分析 69	
3.2.3 三相反应 72	
3.2.4 金属化合物 73	
3.2.5 相图与合金性能之间的关系 ... 74	
3.3 铁-碳平衡相图 75	
3.3.1 铁碳合金的基本相和组织 75	
3.3.2 铁碳合金相图分析 76	
3.3.3 铁碳合金在平衡冷却时 的转变 78	
3.3.4 含碳量对铁碳合金组织性能 的影响 84	

3.4 钢在加热时的转变	86	尺寸	130
3.4.1 奥氏体形成过程及其影响 因素	86	4.7.3 第二相强化	130
3.4.2 奥氏体晶粒度及其影响 因素	88	4.7.4 相变增韧	131
3.5 钢在非平衡冷却时的转变	89	4.7.5 纤维补强	131
3.5.1 过冷奥氏体等温冷却转变	89	习题	131
3.5.2 过冷奥氏体连续冷却转变	94	第 5 章 工业用钢及铸铁	133
3.5.3 TTT 图与 CCT 图的比较	97	5.1 钢的综述	134
习题	97	5.1.1 钢材生产简介	134
第 4 章 材料的改性	99	5.1.2 钢的分类、编号和成分 特点	135
4.1 钢的预备热处理	100	5.1.3 碳钢和合金钢的特点	138
4.1.1 钢的退火	100	5.1.4 合金元素在钢中的作用	139
4.1.2 钢的正火	103	5.2 结构钢	140
4.1.3 退火与正火的选用	103	5.2.1 工程结构钢	140
4.2 钢的最终热处理	103	5.2.2 机器结构钢	143
4.2.1 钢的淬火	103	5.3 工具钢	151
4.2.2 钢的回火	108	5.3.1 刃具钢	151
4.2.3 淬火钢的三大特性	113	5.3.2 模具钢	155
4.3 热处理新工艺简介	115	5.3.3 量具钢	157
4.3.1 形变热处理	115	5.4 特殊性能钢	158
4.3.2 强韧化处理	116	5.4.1 不锈钢	158
4.3.3 循环热处理	117	5.4.2 耐热钢	159
4.4 金属材料的表面改性	117	5.4.3 耐磨钢	160
4.4.1 表面改性的目的	117	5.5 铸铁	161
4.4.2 钢的表面淬火	118	5.5.1 灰铸铁	164
4.4.3 化学热处理	121	5.5.2 蠕墨铸铁	166
4.4.4 表面变形强化	125	5.5.3 可锻铸铁	167
4.4.5 气相沉积	125	5.5.4 球墨铸铁	168
4.5 金属材料的固溶处理及时效强化	126	5.5.5 合金铸铁	169
4.5.1 铝合金的固溶时效强化	126	5.5.6 铸铁热处理特点	170
4.5.2 铜合金的固溶时效强化	127	习题	171
4.6 高聚物的改性	128	第 6 章 有色金属及其合金	174
4.6.1 化学改性	128	6.1 铝及铝合金	174
4.6.2 物理改性	129	6.1.1 综述	174
4.7 陶瓷材料的改性	130	6.1.2 形变铝合金	175
4.7.1 固溶强化	130	6.1.3 铸造铝合金	178
4.7.2 细化晶粒及降低陶瓷的裂纹		6.2 铜及铜合金	181

6.2.1 综述.....	181	8.2.3 经济性与选材	225
6.2.2 黄铜.....	181	8.2.4 选材的一般方法	227
6.2.3 青铜.....	183	8.3 常用材料的性能比较	229
6.3 轴承合金	186	8.3.1 材料的力学性能比较	229
6.3.1 锡基轴承合金.....	186	8.3.2 材料的物理性能比较	231
6.3.2 基轴承合金.....	187	8.4 典型零件的选材	232
6.3.3 其他轴承合金.....	188	8.4.1 轴类零件的选材	233
6.4 其他有色金属及合金	189	8.4.2 齿轮类零件的选材	237
6.4.1 钛及钛合金.....	189	8.4.3 箱体支承类零件的选材	239
6.4.2 锌基合金.....	190	8.4.4 工模具的选材	240
6.4.3 镍基合金.....	191	8.5 常用机械用材	242
习题	192	8.5.1 常用机械用材情况与趋向	242
第 7 章 非金属材料	193	8.5.2 材料的代用与节材	243
7.1 高分子材料	193	习题	245
7.1.1 工程塑料.....	194	第 9 章 新材料	247
7.1.2 橡胶.....	200	9.1 减振合金和形状记忆材料	247
7.1.3 聚合物合金及互穿聚合物 网络.....	203	9.1.1 减振合金	247
7.1.4 胶粘剂.....	204	9.1.2 形状记忆材料	249
7.2 工业陶瓷	206	9.2 磁性材料和超导材料	252
7.2.1 普通陶瓷.....	206	9.2.1 磁性材料	252
7.2.2 特种陶瓷.....	206	9.2.2 超导材料	254
7.2.3 现代陶瓷.....	207	9.3 发展中的金属间化合物	255
7.2.4 金属陶瓷.....	209	9.3.1 铁的铝化物和环境的影响	255
7.3 复合材料	211	9.3.2 Ni_3Al 和晶间断裂	255
7.3.1 复合材料的增强机制 与性能.....	211	9.3.3 NiAl 和微量合金元素 的作用	256
7.3.2 常用复合材料.....	213	9.4 纳米材料	256
习题	217	9.4.1 纳米微粒	256
第 8 章 材料的选用	219	9.4.2 纳米结构材料	258
8.1 零件的失效分析	219	9.4.3 纳米管及纳米结构	258
8.1.1 失效的概念.....	219	9.5 其他新材料	262
8.1.2 零件失效类型及原因.....	220	9.5.1 非晶态金属	262
8.1.3 失效分析方法.....	221	9.5.2 梯度功能材料	264
8.2 材料选用的原则与方法	222	9.5.3 储氢合金	267
8.2.1 使用性与选材.....	222	附录: 机械工程材料常用词汇汉—英 对照表	268
8.2.2 工艺性与选材.....	224	参考文献	279

第1章 材料的结构与组成

教学提示:

一、学习方法

学习本章时,只要掌握和理解基本内容即可,着重理解晶体结构、金属的结晶过程及名词、术语的物理意义。有些内容一时不能理解的,可结合后面章节的学习进一步理解。

二、重点和难点

本章重点是金属的晶体结构、金属的结晶过程和纯铁的同素异构转变,实际晶体的结构和晶体缺陷,高分子材料的柔顺性和聚集态结构,陶瓷的典型组织和结构。本章难点是晶体的形核与长大;实际晶体的缺陷;高分子材料的柔顺性。

教学要求:

一、学习要求

掌握金属的晶体结构、金属的结晶过程和纯铁的同素异构转变,为学习铁碳合金打下基础;掌握实际晶体的结构和晶体缺陷;掌握大分子链的柔顺性和高分子材料的聚集态结构;陶瓷的典型组织和结构。

二、本章应注意以下内容

1. 晶格、晶胞、晶面、晶向,以及三种常见晶格;
2. 实际晶体的结构和晶体的三种缺陷;
3. 金属的结晶过程、过冷度、晶核、晶粒、晶界及晶粒细化方法;
4. 大分子链的结构、构象及柔顺性、高分子材料的聚集态结构和微区结构;
5. 陶瓷的典型组织和结构;
6. 纯铁的同素异构转变,同素异构及同分异构都对材料的性能产生明显的影响。

1.1 材料的结构

1.1.1 晶体与非晶体

固态物质按其内部原子或分子的排列是否有序,可分为晶体和非晶体两大类。

晶体是原子(离子或分子)在三维空间作有规则的周期性排列的物体。非晶体中这些质点则呈无规则排列。自然界中绝大多数固体都是晶体,如常用的金属材料、半导体材料、磁性薄膜及光学材料等。晶体材料被广泛应用于各个领域。

1.1.2 晶体中的化学键合

各种材料都由不同元素的原子、离子或分子结合而成。原子间的结合力称为结合键。材料的许多性能在很大程度上都取决于其键合方式。根据结合键的强弱可把结合键分为两大类:

- (1) 一次键(又称主价键)。结合力较强, 包括离子键、共价键和金属键。
- (2) 二次键(又称次价键)。结合力较弱, 包括范德华键(分子键)和氢键。

1. 金属键及金属晶体

金属原子之间的结合键称为金属键。金属原子间依靠金属键结合形成金属晶体。

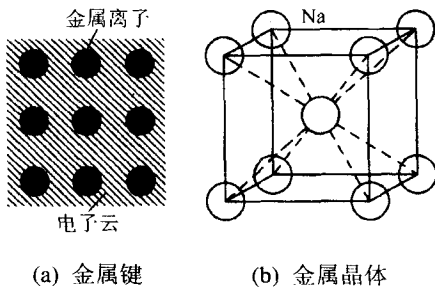
金属键的基本特点是电子共有化。在金属原子相互紧密接近时, 由于原子间的相互作用, 金属原子的价电子便从各个原子中脱离出来, 为整个金属所共用, 形成“电子云”。金属正离子与自由电子间的静电作用, 使金属原子结合起来, 形成金属晶体, 这种结合方式称为金属键, 如图 1.1 所示。

除铍、锑、锆、镓等亚金属为共价键结合外, 绝大多数都是金属晶体。

在金属晶体中, 价电子弥漫在整个体积内, 所有的金属离子都处于同样的环境中, 全部离子(原子)均可看成具有一定体积的圆球, 所以金属键无所谓方向性和饱和性。金属晶体具有良好的导电性、导热性、正的电阻温度系数及排列紧密和呈现特有的金属光泽等都直接起因于金属键结合。

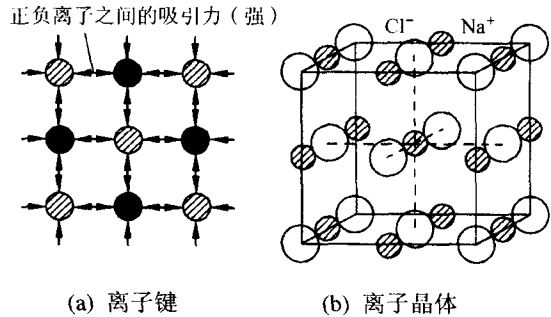
2. 离子键及离子晶体

当正电性金属原子与负电性非金属原子形成化合物时, 通过外层电子的重新分布和正、负离子间的静电作用而相互结合, 从而形成离子晶体, 这种结合键为离子键。大部分盐类、碱类和金属氧化物都属离子晶体, 部分陶瓷材料(MgO 、 Al_2O_3 、 ZrO_2 等)及钢中的一些非金属夹杂物也以此键结合, 如图 1.2 所示。



(a) 金属键 (b) 金属晶体

图 1.1 金属键及金属晶体



(a) 离子键 (b) 离子晶体

图 1.2 离子键及离子晶体

离子键的结合力很大, 因此离子晶体的硬度高, 强度大, 热胀系数小, 但脆性大。离子键中很难产生自由电子, 所以离子晶体都是良好的绝缘体。

3. 共价键及共价晶体

当两个相同的原子或性质相差不大的原子相互接近时, 它们的原子间不会有电子转移。此时相邻原子各提供一个电子形成共用电子对, 以达到稳定的电子结构。这种由共用电子对所产生的力称为共价键[图 1.3(a)], 以此键结合的称为共价晶体[图 1.3(b)]。

共价键结合时, 由于电子对之间强烈的排斥力, 使共价键具有明显的方向性。由于方向性不允许改变原子之间的相对位置, 使材料不具有塑性且比较坚硬, 如金刚石就是材料中最坚硬的物质之一。共价键的结合力很大, 熔点高, 沸点高, 挥发性低。锡、锆、铅等亚金属及金刚石、 SiC 、 Si_3N_4 、 BN 等非金属材料都是共价晶体。

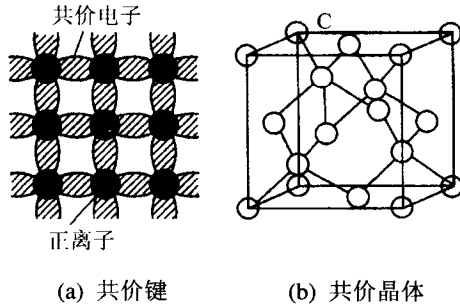


图 1.3 共价键及共价晶体

4. 分子键与分子晶体

一次键的结合方式都是依靠外层电子的转移或形成共用电子对而形成稳定的电子结构，从而使原子相互结合起来。在另外一些情况下，原子和分子本身已具有稳定的电子结构，如已经形成稳定电子壳层的惰性气体 He、Ar、Ne 等和分子状态的 CH_4 、 H_2 、 H_2O 等在低温时能凝聚成液体或固体。它们不是依靠电子的得失或共享结合，而是借助于原子之间的偶极吸引力结合而成。这种存在于中性原子或分子之间的结合力称为二次键。图 1.4 所示为范德华键结合示意图。

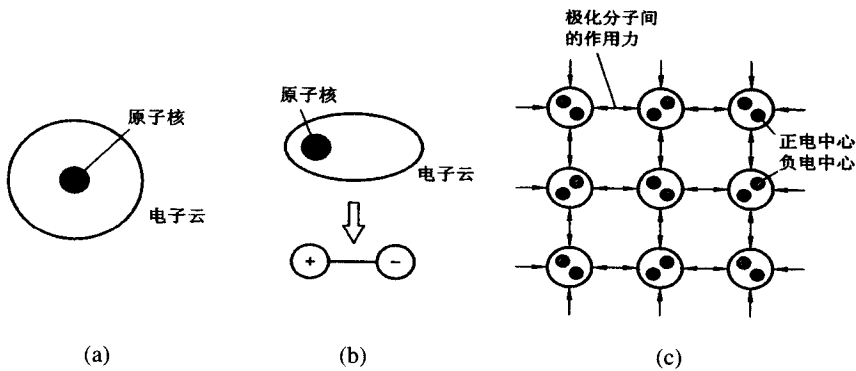


图 1.4 范德华键结合示意图

分子键(又称范德华键)与氢键都是二次键，即依靠原子(或分子、原子团)的偶极吸引力结合而成，只是氢键中的氢原子起了关键作用，即氢原子在两个电负性很强的原子或原子团之间形成一个桥梁，把两者结合起来。或者说，氢键是一种较强的、有方向性的范德华键。

依靠分子键结合起来的晶体称分子晶体。高分子材料大分子内的原子之间为共价键结合，而大分子链与大分子链之间结合成固体则依靠范德华键结合；在带有一 COOH 、 —OH 、 —NH_2 原子团的高聚物中常依靠氢键将长链分子结合起来。

5. 混合键

实际上，大多数材料内部原子的结合键往往是几种键的混合，其中以一种结合键为主，如金属主要是金属键结合，但也会出现一些非金属键；陶瓷化合物则常为离子键和共价键混合。

1.1.3 晶体结构

1. 晶体、晶格、晶胞

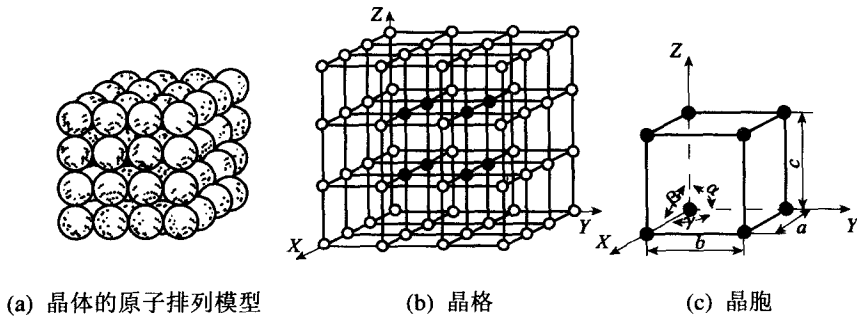


图 1.5 晶体、晶格和晶胞示意图

晶体是内部原子规则排列的物体，但排列的方式有多种。晶体中原子(分子或离子)在空间的规则排列的方式称为晶体结构。为便于描述晶体结构，把每个原子抽象成一个点，把这些点用假想直线连接起来，构成空间格架，称为晶格，如图 1.5(b)所示。组成晶格的最小几何单元称为晶胞，如图 1.5(c)所示。晶胞的大小和形状可用晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 和棱边夹角 α 、 β 、 γ 来表示，如图 1.5(c)所示，它们被称为晶格常数，其长度单位为 10^{-10}m 。晶格中的每个点称为结点。

2. 晶向、晶面

在晶体中，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；由一系列原子所组成的平面称为晶面。

3. 金属的晶体结构

金属中由于原子间通过较强的金属键结合，原子趋于紧密排列，构成少数几种高对称性的简单晶体结构。在金属元素中，约有 90% 以上的金属晶体结构都属于下列三种晶格形式。

(1) 体心立方晶格也称 B.C.C.晶格(Body-Centered Cubic Lattice)。如图 1.6 所示，在体心立方晶格的晶胞中，立方体的 8 个角上各有一个原子，在立方体的中心排列一个原子。

体心立方晶格具有如下特征。

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

② 晶胞原子数：体心立方晶胞每个角上的原子为相邻的 8 个晶胞所共有，因此实际上每个晶胞所含原子数为： $(1/8 \times 8 + 1)$ 个 = 2 个 [图 1.5(c)]。

③ 原子半径：因其体对角线方向上的原子彼此紧密排列 [图 1.6(a)]，显然体对角线长度 $\sqrt{3}a$ 等于 4 个原子半径，故体心立方晶胞的原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}a}{4}$ 。

④ 致密度：晶胞中原子排列的紧密程度可用致密度来表示，致密度是指晶胞中原子所占的体积与该晶胞体积之比。体心立方晶胞中原子所占的体积为 $\frac{4}{3} \pi r^3 \times 2$ ，晶胞体积为 a^3 ，

故可算出其致密度为 0.68。即在体心立方晶格金属中，有 68% 的体积被原子所占据，其余 32% 的体积为空隙。

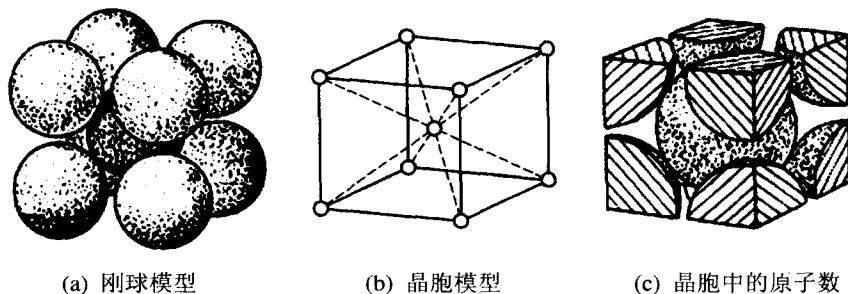


图 1.6 体心立方晶胞示意图

属于体心立方晶格的金属有 α -Fe、Cr、Mn、Mo、W、V、Nb、 β -Ti 等。

(2) 面心立方晶格也称 F.C.C. 晶格 (Face-Centered Cubic Lattice)。面心立方晶格如图 1.7 所示。在晶胞 8 个角及 6 个面的中心各分布着一个原子，在面对角线上，面中心的原子与该面 4 个角上的各原子相互接触，紧密排列，其原子半径 $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。每个面心位置的原子同时属于两个晶胞所共有，故每个面心立方晶胞中仅包含 $(1/8 \times 8 + 1/2 \times 6)$ 个 = 4 个原子，其致密度为 0.74。

具有面心立方晶格的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ni、Au、Ag、Pt、 β -Co 等。

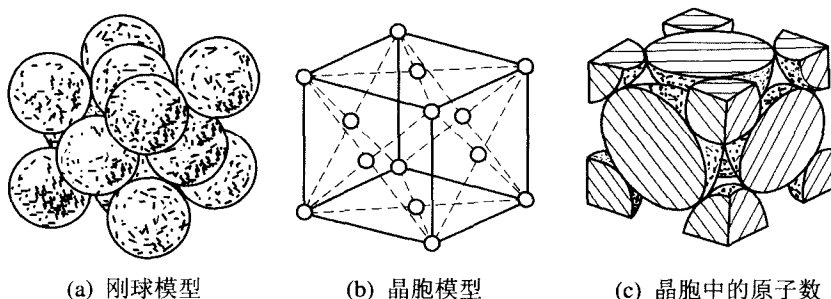


图 1.7 面心立方晶胞示意图

(3) 密排六方晶格又称 H.C.P. 晶格 (Hexagonal Close-Packed Lattice)。如图 1.8 所示，六方晶格的晶胞是六方柱体，它是由 6 个呈长方形的侧面和 2 个呈六边形的底面组成。所以要用两个晶格常数表示，一个是上、下底面间距 c 和六边形的边长 a ，在紧密排列情况下 $c/a = 1.633$ 。在密排六方晶胞中，在六方体的 12 个角上和上、下底面的中心各排列着一个原子，在晶胞中间还有 3 个均匀分布的原子。密排六方晶胞的原子半径为 $\frac{a}{2}$ ；因其每个角上的原子为相邻的 6 个晶胞所共有，上、下底面中心的原子为 2 个晶胞所共有，晶胞内部三个原子为该晶胞独有，所以密排六方晶胞中原子数为 $(12 \times 1/6 + 2 \times 1/2 + 3) = 6$ 个；其致密度为 0.74。

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

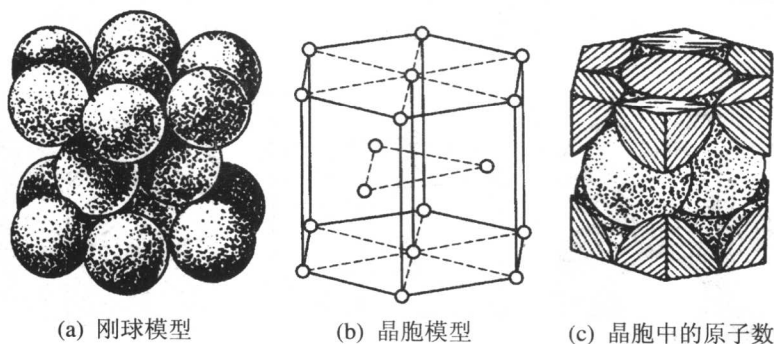


图 1.8 体心立方晶胞示意图

在晶体中，由于不同晶面和晶向上原子排列的方式和紧密程度不相同，不同方向上原子结合力的大小也就不同，所以金属晶体在不同方向上的力学、物理及化学性能也有一定的差异，此特性称为晶体的各向异性。

1.1.4 晶体中的缺陷

上述晶体结构是一种理想的结构，可看成是晶胞的重复堆砌，这种晶体称为单晶体，即原子排列的位向或方式均相同的晶体，如图 1.9(a)所示。由于许多因素的作用，实际金属远非理想完美的单晶体，结构中存在许多类型的缺陷，绝大多数的是多晶体，即由若干小的单晶体组成，这些小的单晶体称为晶粒，每个晶粒的原子位向各不相同，晶粒之间的边界称为晶界，如图1.9(b)所示。按照缺陷在空间的几何形状及尺寸，晶体缺陷可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷。结构的不完整性会对晶体的性能产生重大的影响。特别是对金属的塑性变形、固态相变以及扩散等过程都起着重要的作用。

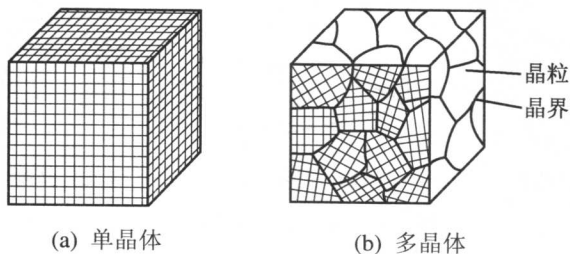


图 1.9 单晶体与多晶体

1. 点缺陷

点缺陷是指在三维空间各方向上尺寸都很小，约为一个或几个原子间距的缺陷，属于零维缺陷，如空位、间隙原子、异类原子等。

晶格中没有原子的结点称为空位[图 1.10(a)]；位于晶格间隙之中的原子叫间隙原子[图 1.11(b)]；挤入晶格间隙或占据正常结点的外来原子称为异类原子[图 1.10(c)、图 1.10(d)]。在上述点缺陷中，间隙原子最难形成，而空位却普遍存在。

空位的形成主要与原子的热振动有关。当某些原子振动的能量高到足以克服周围原子的束缚时，它们便有可能脱离原来的平衡位置(晶格的结点)而迁移至别处，结果在原来的结点上形成了空位。塑性变形、高能粒子辐射、热处理等也能促进空位的形成。