



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料科学与工程基础

第二版

顾宜 赵长生 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料科学与工程基础

第二版

顾 宜 赵长生 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是“十一五”国家级规划教材，是教育部“面向 21 世纪课程教材”的修订版本。

本书共分 5 章。绪论、材料结构基础、材料组成与结构、材料的性能、材料的制备与成型加工。从材料科学与工程的基本原理出发，综合介绍了各种材料组成、结构、制备工艺、性能及应用的共性规律及金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料的个性特点和多种组分复合体系的基本特征。

本书供材料类专业本科学生使用，可供研究生、教师和工程技术人员阅读参考，也可供其他与材料专业相关的学生选读。

图书在版编目 (CIP) 数据

材料科学与工程基础/顾宜, 赵长生主编. —2 版.
北京: 化学工业出版社, 2011.7
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-11223-1

I. 材… II. ①顾…②赵… III. 材料科学-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 085090 号

责任编辑: 杨 菁
责任校对: 郑 捷

文字编辑: 林 丹
装帧设计: 关 飞

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: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 25 $\frac{1}{4}$ 字数 660 千字 2011 年 6 月北京第 2 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: 46.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

由四川大学主编的《材料科学与工程基础》教材于2002年4月正式出版发行，之后多次重印，在多个学校获得使用。自2001年以来，四川大学对《材料科学与工程基础》课程进行了一系列改革，于2004年评为国家级精品课程，2006年《材料科学与工程基础》教材列入“十一五”国家级规划教材进行修订。在课程建设过程中，我们引进了William D. Callister, Jr 编写的《Fundamentals of Materials Science and Engineering, (Fifth Edition)》(2001, John Wiley & Sons, Inc., New York)，将中英文教材的内容相结合，组织实施“双语”教学，建立了新的课程体系，编写了相应的讲义、课件、习题集；并在多年教学实践的基础上，按照新的课程内容体系完成了教材的修订。

目前，国内外有关《材料科学与工程基础》类的教材从内容体系上主要有两大系列，一是传统的模式，将金属材料、无机非金属材料和高分子材料等三大类材料分别按照结构、特征和性质进行讨论，另一种是现代的、集成化的模式，将三大类材料整合在一起，讨论材料的结构、特征和性质的共性规律和个性特征。由四川大学主持编写、于2002年出版的《材料科学与工程基础》教材，正是一本按集成化方式编写的教材。该教材的内容体系由我们独立创建，但与英文教材(Fundamentals of Materials Science and Engineering, Fifth Edition, William D. Callister, Jr.)不谋而合。William D. Callister, Jr 教授先后编写了Fundamentals of Materials Science and Engineering教材五个版本，前四个版本都是按传统的模式编写的。在多年教学总结的基础上，他从更有利于教和学的角度，按照集成化的模式编写了第五版教材，受到了广泛的欢迎。

与2002年版教材相比，修订版的《材料科学与工程基础》教材发生了一些显著的变化。通过删减一些不必要的内容和融入国外同类高水平教材部分内容，进一步完善了教材内容，使之更具先进性、科学性、系统性和适应性；通过增设教学例题和进一步丰富习题和思考题，更有利于学生学习和理解教学内容；通过在每一章节后添加一些小故事，介绍材料科学与工程领域中的著名科学家、高新技术领域的新材料，可扩展学生的知识面、激发学生的学习热情。

修订工作以国家精品课程的课堂讲义内容为主线，以2002年版教材为蓝本，由顾宜和赵长生提出修订大纲并统稿，其中部分章节内容变动较大，部分章节未作变动。修订分工为：顾宜(第1章，第2章2.1、2.2、2.3、2.4、2.7，第3章3.1、3.2、3.3、3.4，第4章4.2，第5章5.1、5.2.1)；谢邦互(第2章2.5、2.6、2.8)；赵长生(第4章4.1、4.6)；汤嘉陵(第3章3.5，第4章4.7、4.8)；沈新元(第4章4.3、4.4、4.5)；蔡绪伏(第5章5.2.2)；李曹(习题和小故事)。

虽然该修订教材内容已经过多年教学实践不断完善，但是材料科学与工程所涉及的学科和应用领域十分广阔，囿于我们的专业范围和知识水平，仍难免存在不少错误，敬请各位同仁批评指正。

编者
2010年12月

第一版前言

材料科学是 20 世纪 60 年代初期创立的研究材料共性规律的一门科学，其研究内容涉及金属、无机非金属、有机高分子等材料的成分、结构、加工同材料性能及材料应用之间的相互关系。由于材料的获得、质量的改进与使材料成为人们可用的器件或构件都离不开生产工艺、制造技术和应用技术等工程知识，所以，人们往往把“材料科学”与“工程”相提并论，而称为“材料科学与工程”。国外大学的工学院已广泛把材料科学与工程作为大学低年级的一门公共必修课。

四川大学（原成都科技大学）高分子材料系自 1989 年始，按照教育部教学改革方针，为培养知识面广、适应面宽、基础扎实的高分子材料高级专业人才，在本科生专业主干课程《高分子材料导论》中讲授材料科学与工程的基本原理，并于 1996 年正式开设《材料科学与工程基础》课程。在由四川大学牵头，北京化工大学、华东理工大学、东北大学、武汉工业大学主持，东华大学、吉林工业大学参加的国家教育部面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划《材料类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践》项目的五年研究中，项目组各校共同认识到：现代材料工业和科学技术的发展正推动着各类材料从多样化和单一性走向一体化和复合化；培养既掌握材料科学与工程基本原理，又通晓某一类材料制备与加工、组成与结构、性能与应用系统知识的宽专业人才，是 21 世纪材料类专业人才培养思路的重要内容。为此，决定设置材料科学与工程一级学科平台课程三门，并编写相应教材。《材料科学与工程基础》正是其中之一，该教材由四川大学主编，武汉工业大学和东华大学参编，教育部批准列入“面向 21 世纪课程教材”出版。

本书编写从材料科学与工程的基本原理出发，力求较全面地说明各种材料的共性规律及金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料的个性特点和多种组分复合体系的基本特征。本着材料科学的范畴，以物质结构为基础，按照从微观到宏观、从内部到表面、从静态到动态、从单组分到多组分的顺序，阐述原子结构、原子间相互作用和结合方式，与固体内部和表面原子的空间排列状态、聚集态结构及变化规律之间的相互关系，使学生对材料组成（成分）与物质结构的内在联系有较系统、深刻的理解。从材料的组成（成分）入手，详细阐述高分子材料、金属材料和无机非金属材料的聚集态结构和宏观组织结构特点；详细阐述由特性不同的各类材料相互复合而成的纳米级、微米级、粒子填充、纤维增强等复合材料的微观和宏观结构以及界面结构，使学生较系统地掌握不同类型材料从微观到宏观的结构变化特点。本着材料科学的基本原理与材料的工程应用相结合，用大量篇幅阐明了在应力、热、电、光、磁、化学介质、氧等外界因素的作用下，各类材料所表现出来的宏观性质、破坏形式、及其内部结构的变化规律；讲述各类宏观物理性质的定义及测试和评价方法。使学生掌握材料结构与性能关系的基本规律，了解不同类材料的结构与性能特征，为材料的设计和应用奠定基础。并从原料出发，简要地讲述材料的制备原理和主要方法，及由各种材料的结构和性能特点，讲述其加工行为和主要加工方法，使学生在材料工程的基础上，建立材料制备-加工-结构-性能关系的整体概念。本书在编写中注意引入材料科学中的新原理和新方法，例如在第 4 章增加了“纳米材料及效应”一节，以便学生对材料科学与工程发展中的前沿领域有一定的初步了解。

本书由顾宜、尹光福、淡宜、曾光廷、汤嘉陵、赵长生、蔡绪伏（四川大学）、沈新元

(东华大学) 和黄学辉 (武汉工业大学) 编写。以顾宜和樊渝江 1996 年编写的《高分子材料导论 (上册)》为蓝本, 由顾宜提出编写大纲和统稿。编写分工为: 顾宜 (第 1 章、第 2 章 2.1、2.3、2.5.1、2.5.2、2.6.4、2.7、2.8、第 4 章 4.2), 黄学辉 (第 2 章 2.2、2.4、2.5.3、2.6、2.8.4), 沈新元 (第 4 章 4.3、4.4、4.5), 淡宜 (第 3 章 3.1、3.2, 第 5 章 5.1.3), 尹光福 (第 3 章 3.4、第 5 章 5.1.2), 曾光廷 (第 3 章 3.3、第 5 章 5.1.1、5.2.1), 汤嘉陵 (第 3 章 3.5、第 4 章 4.7、4.8), 赵长生 (第 4 章 4.1、4.6), 蔡绪伏 (第 5 章 5.2.2)。王劲协助编写习题和制图。

该书稿于 2000 年 12 月汇稿并印制讲义供四川大学材料工程类专业九九级学生试用一届后进行了修改并编写习题。材料科学与工程所涉及的学科和应用领域十分广阔, 囿于我们的专业范围和知识水平, 难免存在较多误漏, 祈望读者指正, 以利进一步修订。在此, 对教育部领导, 对支持本书编写的四川大学、武汉工业大学、东华大学以及北京化工大学、华东理工大学、东北大学、吉林工业大学的领导、同仁表示深切的谢意。

编 者
2001 年 8 月

目 录

| | | | |
|---------------------------------|----|---------------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论 | 1 | 2.6.1 固溶体 | 60 |
| 1.1 材料的定义、分类及基本性质 | 1 | 2.6.2 晶体结构缺陷 | 64 |
| 1.1.1 金属材料 | 1 | 2.6.3 非晶体 | 71 |
| 1.1.2 无机非金属材料 | 2 | 2.6.4 扩散 | 74 |
| 1.1.3 高分子材料 | 3 | 2.7 固体中的转变 | 81 |
| 1.1.4 复合材料 | 3 | 2.7.1 固体中的转变类型 | 82 |
| 1.2 材料科学与工程概述 | 4 | 2.7.2 平衡和相变 | 83 |
| 1.2.1 材料科学的由来 | 4 | 2.7.3 相图 | 86 |
| 1.2.2 材料科学与工程的性质与范围 | 5 | 2.8 固体的表面结构 | 94 |
| 1.2.3 材料科学在工程中的作用 | 6 | 2.8.1 表面力和表面力场 | 94 |
| 第 2 章 材料结构基础 | 9 | 2.8.2 表面能和表面张力 | 95 |
| 2.1 物质的组成、状态及材料结构 | 9 | 2.8.3 表面结构及几何形状 | 96 |
| 2.1.1 物质的组成和状态 | 9 | 2.8.4 固体表面的特性 | 97 |
| 2.1.2 材料结构的含义 | 10 | 第 3 章 材料组成与结构 | 105 |
| 2.2 材料的原子结构 | 11 | 3.1 材料组成和结构的基本内容 | 105 |
| 2.2.1 量子力学的几个基本概念 | 12 | 3.2 金属材料的组成与结构 | 105 |
| 2.2.2 原子核结构 | 14 | 3.2.1 金属材料 | 105 |
| 2.2.3 原子核外电子 | 14 | 3.2.2 合金材料 | 108 |
| 2.3 原子之间相互作用和结合 | 19 | 3.2.3 铁碳合金的基本知识 | 110 |
| 2.3.1 基本结合(化学键合) | 20 | 3.2.4 非铁金属及合金 | 120 |
| 2.3.2 派生结合(物理键合) | 23 | 3.2.5 非晶态合金 | 121 |
| 2.3.3 各种键性的比较 | 25 | 3.2.6 金属材料的再结晶 | 122 |
| 2.3.4 原子间距和空间排列 | 25 | 3.3 无机非金属材料的组成与结构 | 124 |
| 2.4 多原子体系中电子的相互作用与 稳定性 | 29 | 3.3.1 无机非金属材料的组成与结 合键 | 124 |
| 2.4.1 杂化轨道和分子轨道理论 | 30 | 3.3.2 无机非金属材料中的简单晶 体结构 | 125 |
| 2.4.2 费米能级 | 34 | 3.3.3 硅酸盐结构 | 130 |
| 2.4.3 固体中的能带 | 36 | 3.3.4 无机非金属材料的非晶体结构 | 134 |
| 2.5 固体中的原子有序 | 39 | 3.3.5 陶瓷 | 140 |
| 2.5.1 结晶体的特点与晶体的性质 | 39 | 3.3.6 碳化合物 | 141 |
| 2.5.2 晶体几何学基础 | 39 | 3.4 高分子材料的组成和结构 | 145 |
| 2.5.3 晶体的类型 | 51 | 3.4.1 高分子材料组成和结构的基本 | |
| 2.6 固体中的原子无序 | 60 | | |

| | | | |
|------------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 特征 | 145 | 4.4.4 非金属材料的磁学性能 | 280 |
| 3.4.2 高分子链的组成和结构 | 146 | 4.4.5 高分子材料的磁学性能 | 283 |
| 3.4.3 高分子链的聚集态结构 | 153 | 4.5 材料的光学性能 | 284 |
| 3.4.4 高分子材料的组成和织态结构 及微区结构 | 163 | 4.5.1 电磁辐射及其与原子的相互 作用 | 284 |
| 3.4.5 聚合物共混材料 | 166 | 4.5.2 反射、吸收和透射 | 285 |
| 3.5 复合材料的组成与结构 | 170 | 4.5.3 材料的光学性质 | 291 |
| 3.5.1 复合材料定义及分类 | 170 | 4.5.4 旋光性及非线性光学性 | 292 |
| 3.5.2 复合材料的组成 | 171 | 4.5.5 光泽 | 293 |
| 3.5.3 复合材料的结构 | 174 | 4.5.6 发光 | 294 |
| 3.5.4 复合材料的界面 | 174 | 4.5.7 光敏性 | 295 |
| 第4章 材料的性能 | 186 | 4.6 材料的耐腐蚀性 | 296 |
| 4.1 固体材料的力学性能 | 186 | 4.6.1 物理腐蚀 | 297 |
| 4.1.1 材料的力学状态 | 186 | 4.6.2 化学腐蚀 | 299 |
| 4.1.2 应力和应变 | 189 | 4.6.3 电化学腐蚀 | 306 |
| 4.1.3 弹性形变 | 192 | 4.7 复合材料的性能 | 309 |
| 4.1.4 永久形变 | 202 | 4.7.1 复合材料的特性 | 309 |
| 4.1.5 强度、断裂及断裂韧性 | 207 | 4.7.2 复合材料性质的复合效应 | 310 |
| 4.1.6 硬度 | 225 | 4.7.3 复合材料的力学性能 | 314 |
| 4.1.7 摩擦和磨损 | 229 | 4.8 纳米材料及效应 | 321 |
| 4.1.8 疲劳 | 235 | 4.8.1 纳米材料的结构 | 321 |
| 4.2 材料的热性能 | 239 | 4.8.2 纳米材料的基本物理效应 | 325 |
| 4.2.1 热导率和比热容 | 239 | 4.8.3 纳米材料的应用 | 327 |
| 4.2.2 热膨胀性 | 243 | 第5章 材料的制备与成型加工 | 336 |
| 4.2.3 耐热性 | 245 | 5.1 材料制备原理及方法 | 336 |
| 4.2.4 热稳定性 | 246 | 5.1.1 金属材料的制备 | 336 |
| 4.2.5 高分子材料的燃烧特性 | 247 | 5.1.2 无机非金属材料的制备 | 343 |
| 4.3 材料的电学性能 | 250 | 5.1.3 高分子材料的制备 | 359 |
| 4.3.1 电导率和电阻率 | 251 | 5.2 材料的成型加工性 | 364 |
| 4.3.2 材料的结构与导电性 | 254 | 5.2.1 金属材料的加工工艺性 | 364 |
| 4.3.3 材料的超导电性 | 264 | 5.2.2 聚合物的成型加工特性及成型 加工方法 | 372 |
| 4.3.4 材料的介电性 | 266 | 参考文献 | 392 |
| 4.4 材料的磁学性能 | 272 | | |
| 4.4.1 物质的磁性 | 272 | | |
| 4.4.2 磁畴与磁滞回线 | 276 | | |
| 4.4.3 金属材料的磁学性能 | 278 | | |

第 1 章 绪 论

在人类的生产和生活中，材料是必需的物质基础。历史学者曾将人类的历史按石器时代、铜器时代、铁器时代来划分。新材料的使用对人类历史的发展起到重要的作用。20 世纪 70 年代人们曾把材料、信息、能源归纳为现代文明的三大支柱，现在又预言新的技术革命即将来临，并且把信息技术、生物技术和新型材料作为这次技术革命的重要标志。材料科学是一门以材料为研究对象的科学，是发展国民经济和实现国防现代化的具有全局性的重要科学技术领域之一。

因此，作为材料工作者，系统学习材料科学与工程基本理论，学习和掌握各类材料的共性与个性、结构、性能及应用的特点，具有十分重要的意义。

1.1 材料的定义、分类及基本性质

材料是指具有满足指定工作条件下使用要求的形态和物理性状的物质，是组成生产工具的物质基础。

目前世界各国注册的材料有几十万种，并在不断增加。材料可有多种分类方法。按状态来分，材料有气态、液态和固态三大类。工程技术中最普遍使用的是固态材料。按材料组成和结合键的性能，把材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷（无机非金属材料）以及半导体材料四大类。价键四面体（见图 1-1）清晰地表示出各类材料之间的本质区别和内在联系。

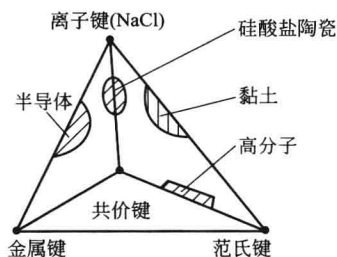


图 1-1 价键四面体

按照材料特性，可将其分为金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料三类。金属材料包括各种纯金属及其合金。塑料、合成橡胶、合成纤维等称为有机高分子材料。还有许多材料，如陶瓷、玻璃、水泥和耐火材料等，既不是金属材料，又不是有机高分子材料，人们统称它们为无机非金属材料。此外，人们还发展了一系列将两种以上的材料通过特殊方法结合起来而构成的复合材料。按照材料所起的作用，可分为结构材料和功能材料两类。按照使用领域的不同，又可将它们分为建筑材料、电子材料、医用材料、仪表材料、能源材料等。

按照材料所起的作用，可分为结构材料和功能材料两类。按照使用领域的不同，又可将它们分为建筑材料、电子材料、医用材料、仪表材料、能源材料等。

1.1.1 金属材料

金属材料通常分为黑色金属材料和有色金属材料（非铁材料）两类。黑色金属材料包括钢和铸铁。钢按照化学成分分为碳素钢和合金钢；按照品质分为普通钢、优质钢和高级优质钢；按照冶炼方法分为平炉钢、转炉钢、电炉钢和奥氏体钢；按照用途分为建筑及工程用钢、结构钢、工具钢、特殊性能钢及专业用钢。铸铁通常分为灰铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁和特殊性能铸铁等。钢铁是现代工业中的主要金属材料，在机械产品中占整个用材消耗的 60% 以上。有色金属材料是指除 Fe 以外的其他金属及其合金。这些金属约有八十余种，分为轻金属（相对密度小于 4）、重金属（相对密度大于 4.5）、贵金属、类金属和稀有金属五类。工程上最重要的有色金属是 Al、Cu、Zn、Sn、

Pb、Mg、Ni、Ti 及其合金。有色金属材料的消耗虽然只占金属材料总消耗的 5%，但是因为它们具有优良的导电导热性，同时密度小、化学性质稳定、耐热、耐腐蚀，因而使得它们在工程上占有重要地位。

金属材料的基本特性：

- ① 结合键为金属键，常规方法生产的金属为晶体结构；
- ② 金属在常温下一般为固体，熔点较高；
- ③ 具有金属光泽；
- ④ 纯金属范性大，展性、延性也大；
- ⑤ 强度较高；
- ⑥ 自由电子的存在，金属的导热和导电性好；
- ⑦ 多数金属在空气中易被氧化。

1.1.2 无机非金属材料

无机非金属材料又称硅酸盐材料，主要包括陶瓷、玻璃、水泥和耐火材料四类。它们的主要原料是天然的硅酸盐矿物和人工合成的氧化物及其他少数化合物。它们的生产过程与传统的陶瓷的生产过程相同，需经过原料处理→成型→煅烧三个阶段。在这四类材料中，陶瓷是最早使用的无机材料，因此无机非金属材料又常常被统称为“陶瓷”（ceramics）。

按照成分、化学结构和用途，无机非金属材料的分类见图 1-2。

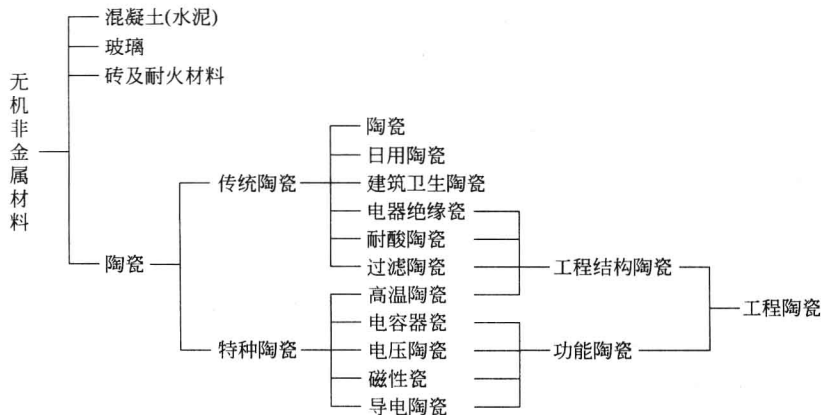


图 1-2 无机非金属材料的分类

陶瓷是含有玻璃相和气相的晶体。绝大多数陶瓷是一种或几种金属元素与非金属元素组成的化合物。陶瓷分为传统陶瓷和特种陶瓷。传统陶瓷以天然硅酸盐矿物为原料，经粉碎、成型和烧结制成，主要用做日用陶瓷。建筑陶瓷和卫生陶瓷（部分传统陶瓷也作为工程陶瓷使用），要求烧结后不变形、外观美，但对强度要求不高。特种陶瓷是以人工化合物（氧化物、氮化物、碳化物、硼化物等）为原料制成的，主要用于化工机械、动力、电子、能源和某些新技术领域。工程陶瓷主要指的是特种陶瓷。

无机非金属材料（以陶瓷为例）的基本特性：

- ① 结合键主要是离子键、共价键以及它们的混合键；
- ② 硬而脆、韧性低、抗压不抗拉、对缺陷敏感；
- ③ 熔点较高，具有优良的耐高温、抗氧化性能；
- ④ 自由电子数目少、导热性和导电性较小；
- ⑤ 耐化学腐蚀性好；

- ⑥ 耐磨损；
- ⑦ 成型方式为粉末制坯、烧结成型。

1.1.3 高分子材料

高分子化合物以 C、H、N、O 等元素为基础，由许多结构相同的小单位（链节）重复连接组成，含有成千上万个原子，分子量很大，并在某一范围内变化着。

目前高分子材料（化合物）的分类方法很多，根据来源可分为天然和人工合成的两类；根据使用性质可分为塑料、橡胶、纤维、黏合剂、涂料等类；根据高分子化合物的主链结构可分为碳链、杂链、元素高聚物三类；根据其对热的性质又可分为热塑性、热固性及热稳定性高聚物三类。如果按照材料的用途，又可分为高分子结构材料、高分子绝缘材料、耐高温高聚物、导电高分子、高分子建筑材料、生物医用高分子材料、高分子催化剂、包装材料等多种品种。

塑料是极重要的一类高分子材料，除树脂外，塑料还含有增塑剂、填料、防老剂、固化剂等各种添加剂。从使用的角度，塑料分为通用塑料和工程塑料。通用塑料是指产量大、用途广、价格低的一类塑料，主要包括六大品种，即聚乙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯、酚醛塑料和氨基塑料。工程塑料一般是指具有高强度、高模量并能在较高温度下长期使用的塑料，如拉伸强度大于 49MPa、拉伸和弯曲模量超过 2GPa，并能在一定载荷作用下于 100℃ 以上长期使用的塑料。常见的工程塑料有耐冲击的 ABS（丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚体）、聚酰胺、聚甲醛、聚碳酸酯、聚砜、聚苯硫醚、聚酰亚胺和氟塑料等。

高分子材料的基本特性：

- ① 结合键主要为共价键，有部分范德华键；
- ② 分子量大，无明显的熔点，有玻璃化转变温度、黏流温度。并有热塑性和热固性两类；
- ③ 力学状态有玻璃态、高弹态和黏流态、强度较高；
- ④ 重量轻；
- ⑤ 具有良好的绝缘性；
- ⑥ 优越的化学稳定性；
- ⑦ 成型方法较多。

1.1.4 复合材料

由两种或两种以上组分组成，并具有与其组成不同的新的性能的材料称为复合材料。

复合材料按性能分为结构复合材料和功能复合材料。目前研究比较充分、应用较多的主要是前者。而后者尚处于探索阶段。

根据增强剂形状及增强原理，可分为粒子增强复合材料和纤维复合材料。后者复合效果最突出，研究最多，应用最广。

结构复合材料根据所用增强体和基体不同，可有许多种类，见表 1-1。

其中，连续纤维增强的聚合物基复合材料的基本特点：

- ① 比强度和比模量高；
- ② 良好的抗疲劳性能；
- ③ 耐烧蚀性和耐高温性好；
- ④ 结构件减振性能好；
- ⑤ 具有良好的减摩、耐磨和自润滑性能。

表 1-1 复合材料的种类

| 增强体 | | 基体 | 金 属 | 无 机 非 金 属 | | | | 有 机 材 料 | | |
|-----------|--------|----------|-------------|-------------|------------|----------|---------------|---------|----------------|----------------|
| | | | | 陶 瓷 | 玻 璃 | 水 泥 | 碳 素 | 木 材 | 塑 料 | 橡 胶 |
| 金属 | | | 陶瓷基 复合材料 | 陶瓷基 复合材料 | 金属网嵌 玻璃 | 钢筋 水泥 | 无 | 无 | 金属丝增 强塑料 | 金属丝增 强橡胶 |
| 无机非 金属 | 陶瓷 | 纤维 粒料 | 金属基 超硬合金 | 增强 陶瓷 | 陶瓷增 强玻璃 | 增强 水泥 | 无 | 无 | 陶瓷纤维 增强塑料 | 陶瓷纤维 增强橡胶 |
| | 碳素 | 纤维 粒料 | 碳纤维 增强金属 | 增强 陶瓷 | 陶瓷增 强玻璃 | 增强 水泥 | 碳纤维强碳 复合材料 | 无 | 碳纤维 增强塑料 | 碳纤维炭黑 增强橡胶 |
| | 玻璃 | 纤维 粒料 | 无 | 无 | 无 | 增强 水泥 | 无 | 无 | 玻璃纤维 增强塑料 | 玻璃纤维 增强橡胶 |
| 有机材 料 | 木材 | | 无 | 无 | 无 | 水泥木丝板 | 无 | 无 | 纤维板 | 无 |
| | 高聚合物纤维 | | 无 | 无 | 无 | 增强水泥 | 无 | 塑料合板 | 高聚合物纤维 增强塑料 | 高聚合物纤维 增强橡胶 |
| | 橡胶胶粒 | | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 橡胶合板 | 高聚物 合金 | 高聚物 合金 |

1.2 材料科学与工程概述

1.2.1 材料科学的由来

材料非常重要，发展也很快，但是就研究材料整体来说，认为它已构成为一门科学，还是近 30 多年的事。在 20 世纪 50 年代末、60 年代初，美国学者首先提出材料科学这个名词。由于材料的获得、质量的改进与使材料成为人们可用的器件或构件都离不开生产工艺和制造技术等工程知识，所以，人们往往把“材料科学”与“工程”相提并论，而称为“材料科学与工程”。这里所指的材料，包括金属材料、陶瓷材料（无机非金属材料）、有机高分子材料以及由几种材料组合在一起的复合材料。将这些原来分属不同学科的知识融为一体，形成新的学科，是材料应用水平和科学技术发展的必然结果。

首先，各种材料的制造和应用发展到一个崭新的阶段。18 世纪蒸汽机的发明和 19 世纪电动机的发明，使材料在新品种开发和规模生产等方面发生了飞跃。如 1856 年和 1864 年先后发明了转炉和平炉炼钢，使世界钢的产量从 1850 年的 6 万吨突增到 1900 年的 2800 万吨，大大促进了机械制造、铁路交通的发展。随之不同类型的特殊钢种也相继出现，如 1887 年高锰钢、1903 年硅钢及 1910 年镍铬不锈钢等的问世，使人类进入了钢铁时代。在此前后，铜、铅、锌也得到大量应用，而后铝、镁、钛和稀有金属相继问世，从而使金属材料在 20 世纪中占据了材料的主导地位。20 世纪初，人工合成高分子材料问世，如 1909 年的酚醛树脂（胶木），1925 年的聚苯乙烯，1931 年的聚氯乙烯以及 1941 年的尼龙等，且发展十分迅速，如今世界年产量在 1 亿吨以上，论体积已超过了钢。有些工业发达国家如美国，高分子材料的体积已是钢的两倍。而有些材料如木材、砖瓦、石料、水泥及玻璃等一直占有十分重要的地位，因为这些材料资源丰富，性能价格比在所有材料中最有竞争能力。20 世纪 50 年代，通过合成化工原料或特殊制备方法，制造出一系列先进陶瓷。由于其资源丰富、密度小、耐高温、耐磨等特点，很有发展前途，成为近五十多年来研究工作的重点，且用途在不断扩大，有人甚至认为“新陶瓷时代”即将到来。

其次，固体物理、无机化学、有机化学、物理化学等学科的发展，以及现代分析测试技术和设备的发展，对物质结构和物性的深入研究，推动了对材料本质的了解；同时，冶金

学、金属学、陶瓷学、高分子科学等的发展也使对材料本身的研究大大加强，从而对材料的制备、结构与性能，以及它们之间的相互关系的研究也愈来愈深入，为材料科学的形成打下了比较坚实的基础。

第三，在材料科学这个名词出现以前，金属材料、高分子材料与陶瓷材料都已自成体系，目前复合材料也正在形成学科体系。但它们之间存在着颇多相似之处，不同类型的材料可以相互借鉴，从而促进本学科的发展。如马氏体相变本来是金属学家提出来的，而且广泛地被用来作为钢热处理的理论基础；但在氧化锆陶瓷中也发现了马氏体相变现象，并用来作为陶瓷增韧的一种有效手段。又如材料制备方法中的溶胶-凝胶法，是利用金属有机化合物的分解而得到纳米级高纯氧化物粒子，成为改进陶瓷性能的有效途径。复合材料更需要借鉴利用其他材料的基础知识和制备方法。

第四，各类材料的研究设备与生产手段颇多共同之处。虽然不同类型的材料各有其专用测试设备与生产装置，但许多方面是相同或相近的，如显微镜、电子显微镜、表面测试及物性与力学性能测试设备等。在材料生产中，许多加工装置也是通用的。如挤压机，对金属材料可以用来成型及冷加工以提高强度；而某些高分子材料，在采用挤压成丝工艺以后，可使有机纤维的比强度和比刚度大幅度提高。研究设备与生产装备的通用不但节约资金，更重要的是相互得到启发和借鉴，加速材料的发展。

第五，许多不同类型的材料可以相互代替和补充，能更充分发挥各种材料的优越性，达到物尽其用的目的。但长期以来，金属、高分子及无机非金属材料相互分割，自成体系。由于互不了解，习惯于使用金属材料的，便想不到采用高分子材料，即使是想用，又因对其不太了解，而不敢用；相反，习惯于用高分子材料的，也想不到用金属材料或陶瓷材料来代替。设计人员的“因循守旧”，对采用异种类型的新材料持怀疑态度，这既不利于材料的推广，又有碍于使用材料的行业的发展。

第六，复合材料在多数情况下是不同类型材料的组合，特别是出现超混杂复合材料以来更为如此。如果对不同类型材料没有一个全面的了解，复合材料的发展必然受到影响，而复合材料又是今后新材料发展重点之一。因此，发展材料科学，对各种类型材料有一个更深入的了解，是复合材料发展的必要的基础。

正是在这样的背景下，一门新的综合性学科——材料学科诞生了。

1.2.2 材料科学与工程 的性质与范围

材料科学与工程有以下几个特点：①材料科学是多学科交叉的新兴学科。作为每一类材料来说，各自早就是一门学科了，如与金属材料有关的物理冶金和冶金学等，有机高分子材料传统上是有机化学的一个分支，陶瓷材料则是无机化学中的一部分，都积累了丰富的专门知识和基础理论。材料科学理所当然地继承了其中的精粹部分。此外，材料科学与许多基础学科还有不可分割的关系，如固体物理学、电子学、光学、声学、固体化学、量子化学、有机化学、无机化学、胶体化学、数学与计算科学等。作为正在发展中的生物材料，当然脱离不开生物学，乃至医学。因此，材料科学的边界不十分固定，其范围随科学技术的发展而不断变化，研究对象的内涵也在变化。因此，材料科学工作者要有广阔而坚实的基础知识，也要有因需要而变更研究课题的能力和素质。②材料科学与工程有不可分割的关系。材料科学研究材料的组织结构与性能的关系，从而发展新型材料，并合理有效地使用材料；但是材料要能商品化，要经过一定经济合理的工艺流程才能制成，这就是材料工程。反之，工程要发展，也需要研制出新的材料才能实现。因此，材料科学与工程是相辅相成的。广义而言，控制材料的微观结构也是一种工程，例如分子工程是发展高分子材料最重要的手段，界

面工程是当前控制陶瓷材料和复合材料韧性和结合力的一个有效途径。③材料科学与工程有很强的应用目的和明确的应用背景，这和材料物理有重要区别。研究材料中的基本规律，目的

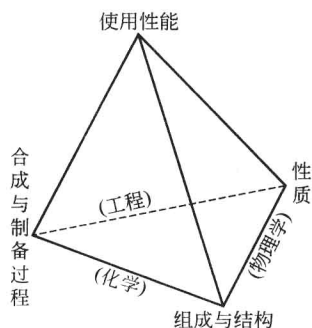


图 1-3 材料科学与工程四要素的关系

的在于为发展新型材料提供新的途径和新技术、新方法或新流程；或者为更好地使用已有材料，以充分发挥其作用，进而能对使用寿命作出正确的估算。因此，材料科学与工程是一门应用基础科学，它既要探讨材料的普遍规律，又有很强的针对性。材料科学研究往往通过具体材料的研究找出带有普遍性的规律进而促进材料的发展和推广使用。

根据上述的学科性质，可以把材料科学与工程定义为“关于材料组成、结构、制备工艺与其性能及使用过程间相互关系的知识开发及应用的科学”，可用图 1-3 来表示。

图 1-3 中所说材料的性质是指材料对电、磁、光、热、机械载荷的反应，而这些性质主要取决于材料的组成与结构，不管它是固体、液体或气体，还是微观或宏观。使用性能是材料在使用状态下表现出的行为，它与设计、工程环境密切相关，有些材料的实验室性能很好，但在复杂的使用条件下，如在氧化与腐蚀、疲劳及其他复杂载荷条件下，就不能令人满意。使用性能要包括可靠性、耐用性、寿命预测及延寿措施等。有的材料性能可能不尽如人意，但是通过优化设计，可以得到解决，如脆性很大的陶瓷材料，有可能通过设计而得到广泛应用。

合成与制备过程内容很丰富，既包括传统的冶炼、铸锭、制粉、压力加工、焊接等，也包括各种新发展的真空溅射、气相沉积等新工艺；从微观水平到宏观制品，从制取高纯单一元素到多种材料复合，各种化学的、物理的、机械加工的方法均应综合应用。这对实现新材料的生产应用往往起决定性的影响。进而言之，新工艺的出现又将促进产生一系列新型材料。现在对材料合成的理解更为深入，如制造“人造材料”，它包括材料在原子尺度上的合成，称之为电子材料的工艺过程。

材料科学与工程所包括的内容，除了用上述图 1-3 的表达方式之外，还可用图 1-4 来表示，它把学科基础与应用对象都包括进来，更容易看清材料科学与工程所涉及的范围及相互关系。

图 1-4 说明通过基础学科已有的知识指导材料成分、结构与性能的研究，也指导了工艺流程的发展，通过工艺流程生产出可供使用的工程材料，而工程材料在使用过程中所暴露的问题，再反馈到成分、结构与性能的研究，进而改进工艺过程，得到更为合适的工程材料，这里所指工程材料包括结构材料和功能材料。如此反复，使材料不断改进而更加成熟。这就是材料科学与工程的内容与任务。

1.2.3 材料科学在工程中的作用

材料科学在机电、能源、空间、激光、红外、环境保护、通信等各个技术领域中已获得一系列重要的具体应用。

例如，机电工程技术人员常与各种材料打交道，虽然可在有关手册中查到使用的数据，但要运用自如

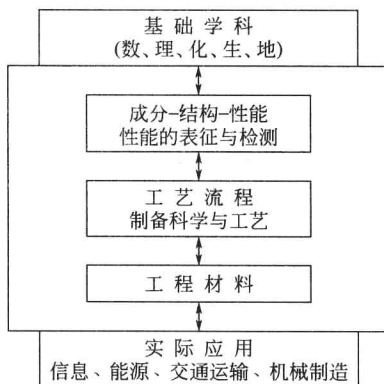


图 1-4 材料科学与工程的范围及其与基础科学与使用间的关系

地选用材料是不容易做到的。人们经常由于对材料的本质以及影响材料性能的各种因素缺乏足够的认识,而可能造成机件的早期损坏或其他意外事故。例如二次世界大战期间,美国近两千艘自由轮在使用中曾发生一千多次脆性破坏事故。又如用于密封圈的橡皮或塑料必须富有弹性和柔软性,这种性能可由材料内部分子连接成长链而得到。但是在核反应器中,中子辐照会引起链的断裂和促使链间键的变形,导致橡皮变硬而失去密封的作用。

人们在了解材料的内在规律之后,也可以将这些规律运用到设计中,获得许多有用的结果。例如光电材料的导电率取决于表面电磁辐照强度和波长,故把光电材料放到电路中可起光检测器的作用。又如半导体的电阻值对温度很敏感,可用作精密的温度计或温度控制元件等。

工程设计和制造人员有了一定的材料科学知识,就能更好地向材料科学工作者提出问题,相互研讨,加速新材料的研制,反过来又加速工程的发展。例如,用于变压器芯子的磁性材料,过去曾用纯铁制作,20世纪初人们发现含3%~4%硅的铁硅合金具有比纯铁更高的导磁率和更低的功率损失。后又发现,将这种合金加工成薄板,在经一种特殊的处理,板的磁性将随方向变化,产生了所谓的“各向异性”。工程设计人员利用这种性质,使变压器的功率损失大为降低。现在进一步发现,用超高速冷却等方法制成的非晶态合金,其做芯子所具有的功率损失更低。据统计,美国1980年因铁芯发热损失21亿美元(电动机占14亿,变压器占7.4亿),如能成功地用非晶态磁性材料代替硅钢,则可节约4亿美元,相应节省电力 $1.4 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$,相当于我国葛洲坝水电站一年的发电量。目前虽存在一定的困难,但这种前景是令人鼓舞的。

材料科学好像是一座桥梁,将许多基础学科的研究结论与工程应用连接起来,这既加深了人们对工程材料性能的理解,又导致了許多重大工程技术的形成和发展。所谓的亚微观与分子工程便是一个突出的方面。这类工程所制作的对象与传统构件如工字梁、电器开关、真空管、电阻等不同,是非常小的,即在一个分子或一个单晶片上制作器件和设备。实践表明,在许多电器、电子产品上,器件做得愈小,不仅大大缩小了产品的体积和重量,而且可靠性高,价格低。经过多年努力,人们在理论上说明了材料,特别是半导体材料的微观结构与宏观性质之间的关系,因而可以把许多诸如杂质原子、表面和捕获中心等具有原子线度的微量取出来作为工程应用的数据来设计器件。20世纪60年代初人们在晶体管发展的基础上发明了集成电路,在一个芯片上完成的不再是一个晶体管的放大或开关效应,而是一个电路的功能。近十多年来,一个芯片已从包含几个到几十个晶体管的所谓小规模集成电路发展到包含几千、几万个晶体管的超大规模集成电路,使一个电路能完成非常复杂的功能,从而引起许多工业和科技部门的巨大变革。

目前人们对材料的研究还很不够。由于材料的限制,阻碍了许多工程的发展。例如燃气轮机的热效率随燃气温度增高而增大,但目前叶片材料的使用温度还很有限,影响了燃气轮机的发展。有些国家正在大力研究用快速凝固来制备微晶合金,它有极细和极均匀的显微结构,并且有很高的合金溶解度,从而有可能使叶片工作温度提高 100°C 。另一方面,全陶瓷的燃气轮机作为汽车等的动力装置正在发展之中,其不仅成本低廉,而且可以达到比金属更高的工作温度。但目前尚存在一些问题,其中之一就是陶瓷中的微小裂纹会引起脆性断裂,故还有赖于无损检测等技术的发展。

又如开发新能源是当代重大的科学技术课题之一。目前开发研究的新能源有多种,直接把日光变成电的太阳能电池是其中一种。它能否普遍使用,关键在于材料。如能将这种发电成本进一步大幅度降低,即研制出价廉而转换效率高的太阳能电池,则能获得一种取之不尽的能源。

再如目前超导材料通常只能在液氮(77K)下使用,需要一套制冷系统,因而大大限制了超导技术的应用。要是能找到较高使用温度的超导材料,无疑会引起许多工业技术的巨大变革。

尤其是随着现代科学技术和社会文明程度的高速发展,以环保和节能为中心的新材料和新技术开发及资源循环利用已得到高度重视。

总之,新材料的开发将主宰着一系列重要的工程技术成就的取得;同时,对现有的材料进行深入研究,不断提高质量,增加品种,降低成本,也具有很大的实际意义。这一切,必须促使材料科学与工程这门学科的迅速发展。

小故事

改变我们的视觉革命的材料——液晶

1555年,奥地利科学家 F. Reinitzer 在加热胆甾醇苯甲酸酯结晶的实验中发现:在 145.5℃ 时,结晶熔解为浑浊黏稠的液体,加热到 178.5℃ 时,则形成了透明的液体。第二年,德国物理学家莱曼用偏光显微镜观察时,发现这种材料具有双折射现象,他阐明了这一现象,并提出了“液晶”这一学术用语。

20世纪70年代初, Helfrich 和 Schadt 利用扭曲向列相液晶的电光效应和集成电路相结合,将其制成了显示器件,实现了液晶材料的产业化。液晶显示器中最主要的物质就是液晶,当通电时导通,分子排列变得有秩序,使光线容易通过;不通电时分子排列混乱,阻止光线通过。让液晶分子如闸门般地阻隔或让光线穿透。

因为液晶材料本身并不发光,所以在显示屏两边都设有作为光源的灯管,而在液晶显示屏背面有一块背光板(或称匀光板)和反光膜,背光板是由荧光物质组成的,可以发射光线,其作用主要是提供均匀的背景光源。背光板发出的光线在穿过第一层偏振过滤层之后进入包含成千上万液晶液滴的液晶层。对于液晶显示器来说,亮度往往和它的背板光源有关。背板光源越亮,整个液晶显示器的亮度也会随之提高。

液晶显示器以其零辐射、低耗能、散热小、纤薄轻巧、精确还原图像等优势已经在众多领域取代传统 CRT 显示器,为我们的工作生活带来了便利。

第 2 章 材料结构基础

本章所涉及的内容是材料结构和组成的普遍原理。该原理是认识和研究各类材料在结构与性能方面所表现出来的个性和共性的基础。

2.1 物质的组成、状态及材料结构

2.1.1 物质的组成和状态

世界按其本性来说主要是物质的，也就是说，物质组成了世界。我们在自然中观察到的多种多样的现象，都是运动着的物质的各种不同形式。物质是自然界中一切过程的唯一源泉和最终原因。物质具有质量和能量，并占有一定的空间。所以物质在时间上是永恒的，在空间上是无穷无尽的，它不会重新产生，也不会消失；它不能被创造，也不能被消灭，它只能改变自己的形式。

物质有两大类型，即物体和场（引力场、电磁场、核力场等）。我们日常所见到的物体以三种状态——固态、液态和气态的形式存在于自然界。除此之外还有高空的等离子态，地球内部高温高压作用下的塑态等状态。

自然界中所有的物体都是由化学元素及其化合物组成的，即由原子和分子组成。由于原子的排列状态及相互作用的不同，物体便表现出各种形态。在宇宙中人们已经发现 103 种元素。而组成地球的有 90 种天然元素，它们在自然界的含量有着很大的差别。在通常环境下，这些元素有的以固态形式存在，有的则以液体或气态形式存在。这些元素在大气层、水圈和岩石圈中的分布是不均衡的。

大气层中只有惰性气体元素是以原子状态存在的（表 2-1），其余的大多数化学元素则以分子状态存在，它们由两个或两个以上的同类原子或异类原子组成（如 H_2 、 O_2 、 N_2 或 CO_2 ）。水圈（即海洋）主要是水，其中数量不等地溶有各种物质元素，如表 2-2 所示。这些物质大多数是离子的状态（带电状态），而不是原子的状态（中性状态）。岩圈（即地壳）从地球表面至 10~15km 的地球外壳上部中的岩石、砂子和泥土主要是元素的一些化合物的固态聚集体（表 2-3），这些化合物有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O ，在不同的岩圈样品中，这些化合物的比例是不同的。除此之外，在岩圈中亦还有其他的化合物，如水和碳氢化合物等。

物质按其状态可分为固体、液体和气体。这完全是由于它们之间原子或分子结构的不同而产生的。当原子或分子之间相距较远、相互之间的作用力较小时，则原子或分子的运动显得非常自由，则此时原子或分子的排列没有规则，客观上表现出物质没有一定的形状也没有一定的体积，此时物质为气体形态。当原子间力（或分子间力）较大时足以使原子或分子之间不能轻易脱离，但这种力还不是很强，原子或分子还可以自由运动，此时分子或原子的排列出现局部有序，宏观的物质表现为有一定的体积但无一定的形状，这种形态称为液体。当原子间力（或分子间力）非常强大足以使原子或分子不能自由运动迫使它只能在某一平衡位置作振动时，物体表现为具有一定的形状又有一定的体积，此时物体的状态称为固体。处于固体的物质其原子或分子的排列可以是有规则的也可以是无规则的。固体可分为晶体与非晶体两大类。原子或分子按一定规律呈周期性的排列时的固体物质称为晶体，如金属、岩盐、