

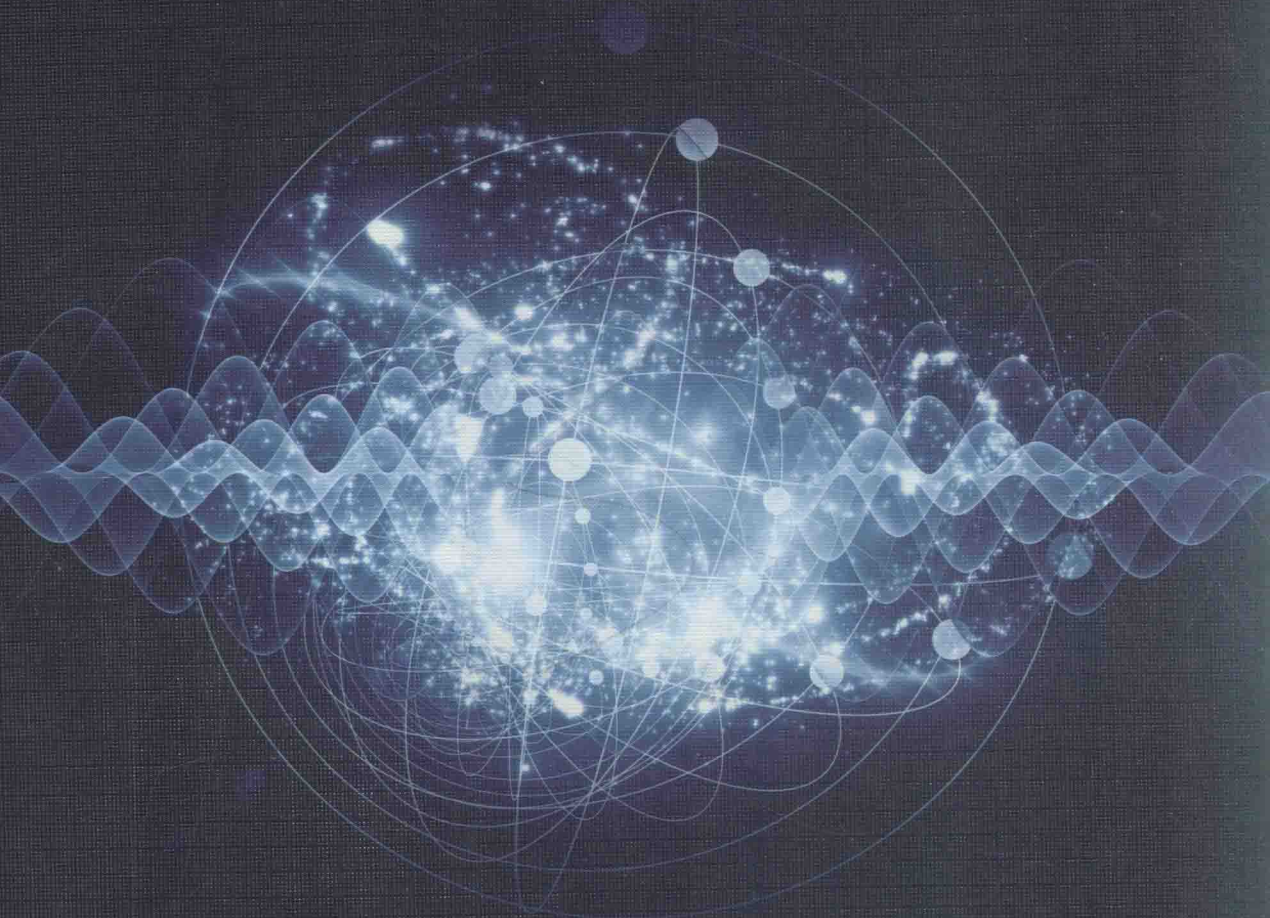


普通高等教育“十三五”规划教材

# 高分子材料概论

GAOFENZI CAILIAO GAILUN

高长有 编著



化学工业出版社



普通高等教育“十三五”规划教材

# 高分子材料概论

GAOFENZI CAILIAO GAILUN

高长有 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统地阐述了通用高分子材料（塑料、橡胶、纤维、涂料、黏合剂、聚合物共混物）的制备、结构、性能和应用，同时强调特定种类高分子材料的共性科学规律。全书共分七章。第1章为材料与高分子材料，重点介绍材料的定义、分类、高分子材料的概念及发展等。第2章为高分子材料的结构与性能，重点阐述高分子链结构、聚集态结构以及高分子材料的力学性能、物理性能（热性能、电性能、光性能等）、化学性能（聚合物的化学反应、老化、燃烧、力化学等）。第3~6章分别详细介绍塑料、橡胶、纤维、胶黏剂和涂料，在每章前面首先阐述该类材料的共性结构和性能特点，针对橡胶和纤维材料介绍了其主要性能指标和检测方法；然后围绕制备—结构—性能—应用这一主线，详细介绍了几十种高分子材料。第7章为聚合物共混物，介绍了聚合物共混物的制备方法和原理、结构、研究手段；从应用角度看这不是一类新材料，但通过共混可以有效提高材料的综合性能，获得增韧增强高分子材料。

本书可供高分子及相关专业本科生、研究生作为教材使用，也可供教师和工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

高分子材料概论/高长有编著. —北京：化学工业出版社，2018.7

ISBN 978-7-122-32082-7

I. ①高… II. ①高… III. ①高分子材料-概论  
IV. ①TB324

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 086738 号

责任编辑：蔡洪伟

文字编辑：陈雨

责任校对：王静

装帧设计：王晓宇

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：中煤（北京）印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张18½ 字数494千字 2018年9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：48.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

高分子材料是以有机高分子化合物为主构成的，也称为有机高分子材料。人类很早就开始利用天然有机材料，如木材、皮革、橡胶、棉、麻、丝、毛等。自 20 世纪 20 年代以来，发展了人工合成的各种高分子材料，具有质轻、耐腐蚀、绝缘性好、易于成型加工等优点。当前，高分子材料的产量按体积已经超过了所有金属材料的总和，成为国民经济和国防建设中的基础材料之一。现阶段我国已成为合成橡胶、合成树脂世界第一生产和消费国。高分子材料已深入到社会发展的各行各业，极大地改善了人们的生活质量。通过分子设计和结构改性，可以进一步获得各类高性能材料和特殊功能材料，支撑各行业发展。新型的高分子工程材料在国防、航空航天、交通运输、船舶、采油和石化等领域也同样发挥着重要的、不可替代的作用。高分子材料正以突飞猛进的发展态势和广阔的应用前景成为 21 世纪最具生命力的新型材料。

高分子科学具有典型的理工交叉特性，其中高分子材料是体现其工学特色的一个重要内容。因此，《高分子材料概论》的课程对于帮助学生掌握传统高分子材料的制备、结构、性能和应用方面的知识至关重要；同时也是连接高分子化学、高分子物理、功能高分子、高分子加工及其他高分子前沿方向间的一个纽带，起着承上启下的重要作用。

广义上，高分子材料涵盖的范围非常宽，包括通用高分子材料、功能高分子材料、高分子复合材料、高分子材料加工等，有些教材还涵盖有高分子化学、高分子物理的相关章节。有鉴于除通用高分子材料外的诸多内容已有许多教材及专著可资参考，《高分子材料概论》将专注于系统阐述通用高分子材料的制备、结构、性能和应用，同时强调特定种类高分子材料的共性科学规律。全书共分 7 章，第 1~7 章分别为材料与高分子材料、高分子材料的结构与性能、塑料、橡胶、纤维、胶黏剂和涂料、聚合物共混物；最后的附录是“高分子材料概论”课程的教学方式探索，主要分享笔者及同事在讲授《高分子材料概论》时采用的一些教学方法，供广大同仁参考。本书适于高分子及相关专业本科生、研究生作为教材使用，也可供教师和工程技术人员参考。

在资料的收集整理和校对过程中，先后有多位研究生同学参与，包括韩璐璐、姜朋飞、叶辰、吴赛、郑鸿浩、张文博、张德腾等；胡玲、韩璐璐、叶辰、邓君、吴赛、张昊岚等同

学先后协助过《高分子材料概论》的教学和资料调研工作。他们有些人已经毕业，并成为教师或其他行业的骨干。在浙江大学，一同讲授《高分子材料概论》课程的还有马列、陈红征、施敏敏教授，大家共同参与了一些教学方法的探讨和改革。在本书完成之际，向上述同学、老师及所有给予过帮助的人致以诚挚的谢意！同时感谢在浙江大学 20 余年和我一同成长的诸多学子及广大同仁！

笔者从 1999 年开始讲授《高分子材料概论》课程至今，在所用课件基础上形成本书。撰写过程参考了高分子材料类的多本书籍及研究论文，部分资料来源于网络，诚表感谢！另外，由于笔者学识有限，疏漏之处实属难免，请广大读者批评指正。

编著者

2018. 6

# 目 录

## 第 1 章 材料与高分子材料

- 1.1 材料与材料科学 / 001
  - 1.1.1 材料的定义 / 001
  - 1.1.2 材料的利用与发展 / 001
  - 1.1.3 材料的作用 / 002
  - 1.1.4 新材料的发展方向 / 003
- 1.2 材料的制备与性能 / 004
  - 1.2.1 材料与物质 / 004
  - 1.2.2 材料工艺过程 / 004
  - 1.2.3 材料的结构 / 005
  - 1.2.4 材料的性能 / 005
- 1.3 材料的分类 / 005
  - 1.3.1 金属材料 / 006
  - 1.3.2 无机非金属材料 / 007
  - 1.3.3 高分子材料 / 007
  - 1.3.4 复合材料 / 008
- 1.4 高分子材料发展历史及未来 / 008
  - 1.4.1 高分子材料的三个发展阶段 / 008
  - 1.4.2 高分子材料展望 / 011
- 1.5 高分子与高分子材料 / 011
  - 1.5.1 基本概念 / 011
  - 1.5.2 高分子材料的命名 / 013
  - 1.5.3 高分子材料分类 / 015
  - 1.5.4 高分子材料与高分子化学与物理的关系 / 017
- 1.6 高分子材料的合成 / 018
  - 1.6.1 逐步聚合反应 / 018
  - 1.6.2 连锁聚合反应 / 018
- 参考文献 / 019
- 思考题 / 020

## 第 2 章 高分子材料的结构与性能

- 2.1 高分子链的链结构 (化学结构) / 021
  - 2.1.1 一级结构 / 022
  - 2.1.2 二级结构 / 024
- 2.2 高分子的聚集态结构与性能 / 024
  - 2.2.1 高分子结晶 / 025
  - 2.2.2 高分子液晶 / 025
  - 2.2.3 高分子取向 / 025
- 2.3 高分子材料的组成与性能 / 026
- 2.4 高分子材料的力学性能 / 026
  - 2.4.1 拉伸性能 / 026
  - 2.4.2 压缩性能 / 027
  - 2.4.3 弯曲性能 / 027
  - 2.4.4 冲击性能 / 027
  - 2.4.5 剪切性能 / 028
  - 2.4.6 硬度 / 028
  - 2.4.7 耐蠕变性 / 029
  - 2.4.8 持久强度 / 029
  - 2.4.9 疲劳强度 / 029
  - 2.4.10 摩擦与磨损 / 029
- 2.5 高分子材料的物理性能 / 030
  - 2.5.1 热学性能 / 030
  - 2.5.2 电学性能 / 033
  - 2.5.3 光学性能 / 035
  - 2.5.4 其他物理性能 / 037

- 2.6 高分子材料的化学性能 / 038
- 2.6.1 聚合物的化学反应 / 038
- 2.6.2 高分子材料的老化 / 042
- 2.6.3 高分子材料的燃烧特性 / 042
- 2.6.4 力化学性能 / 045

延伸阅读资料：力化学在食品加工中的应用 / 046

参考文献 / 048

思考题 / 048

## 第3章 塑料

- 3.1 概述 / 049
- 3.1.1 类型及性能 / 049
- 3.1.2 组分及作用 / 050
- 3.1.3 成型加工方法 / 057
- 3.2 聚烯烃塑料 / 061
- 3.2.1 聚乙烯 / 061
- 3.2.2 聚丙烯 / 071
- 3.2.3 聚苯乙烯系树脂 / 072
- 3.2.4 其他聚烯烃塑料 / 075
- 3.3 其他热塑性塑料 / 078
- 3.3.1 聚氯乙烯系树脂 / 078
- 3.3.2 聚乙烯醇及其衍生物塑料 / 082
- 3.3.3 丙烯酸塑料 / 084
- 3.3.4 聚氨酯 / 086
- 3.3.5 纤维素塑料 / 089
- 3.4 工程塑料 / 090
- 3.4.1 聚酰胺 / 091
- 3.4.2 聚碳酸酯 / 097
- 3.4.3 聚甲醛 / 098
- 3.4.4 聚苯醚 / 099
- 3.4.5 聚对苯二甲酸丁二醇酯 / 100

- 3.4.6 聚对苯二甲酸乙二醇酯 / 101
  - 3.4.7 聚酰亚胺 / 102
  - 3.4.8 氟塑料 / 105
  - 3.4.9 聚矾类树脂 / 109
  - 3.4.10 聚苯硫醚 / 112
  - 3.4.11 聚苯酯 / 113
  - 3.4.12 聚芳酯 / 114
  - 3.4.13 聚醚醚酮 / 115
  - 3.4.14 液晶聚合物 / 116
  - 3.5 热固性塑料 / 117
  - 3.5.1 酚醛塑料 / 117
  - 3.5.2 氨基塑料 / 119
  - 3.5.3 呋喃塑料 / 121
  - 3.5.4 环氧树脂 / 122
  - 3.5.5 不饱和聚酯塑料 / 124
  - 3.5.6 有机硅塑料 / 125
  - 3.5.7 双马来酰亚胺塑料 / 126
- 延伸阅读资料：天然树脂 / 127
- 参考文献 / 132
- 思考题 / 132

## 第4章 橡胶

- 4.1 概述 / 134
- 4.1.1 发现与定义 / 134
- 4.1.2 组分与作用 / 135
- 4.1.3 橡胶的配方 / 140
- 4.1.4 橡胶的加工 / 142
- 4.1.5 橡胶的结构与性能 / 147
- 4.1.6 橡胶的主要性能指标 / 150
- 4.2 天然橡胶 / 155
- 4.2.1 天然橡胶的分类 / 155
- 4.2.2 天然橡胶的品种 / 156
- 4.2.3 天然橡胶的成分 / 157
- 4.2.4 天然橡胶性能与应用 / 157
- 4.2.5 古塔波胶 / 158
- 4.2.6 杜仲胶 / 158
- 4.3 二烯类橡胶 / 158
- 4.3.1 聚丁二烯橡胶  
(polybutadiene, PB) / 159
- 4.3.2 聚异戊二烯橡胶  
(polyisoprene, IR) / 161
- 4.3.3 丁苯橡胶 (styrene-butadiene rubber, SBR) / 161
- 4.3.4 丁腈橡胶 (nitrile rubber, acrylonitrile-butadiene rubber, NBR) / 162
- 4.4 其他橡胶 / 164

- 4.4.1 氯丁橡胶 (chloroprene rubber, CR) / 164
- 4.4.2 聚异丁烯和丁基橡胶 / 165
- 4.4.3 以乙烯为基础的橡胶 / 167
- 4.4.4 其他合成橡胶 / 169
- 4.5 热塑性弹性体 (thermoplastic elastomer, TPE) / 175
  - 4.5.1 结构特征 / 175
  - 4.5.2 聚烯烃类热塑性弹性体 (polyolefin thermoplastic elastomer) / 176
  - 4.5.3 聚苯乙烯类嵌段共聚物 / 176
  - 4.5.4 聚酯型 (polyester type) / 176
  - 4.5.5 聚氨酯型 (thermoplastic polyurethane, TPU) / 176
- 参考文献 / 177
- 思考题 / 178

## 第 5 章 纤维

- 5.1 纤维概述 / 179
  - 5.1.1 纤维的分类 / 179
  - 5.1.2 纤维的主要性能指标 / 179
  - 5.1.3 纤维加工的一般过程 / 183
  - 5.1.4 纤维加工过程中结构的变化 / 188
  - 5.1.5 结构与性能的关系 / 190
- 5.2 天然纤维和人造纤维 / 191
  - 5.2.1 天然纤维 / 191
  - 5.2.2 人造纤维 (artificial fiber) / 194
- 5.3 合成纤维 / 202
  - 5.3.1 聚酰胺纤维 / 202
  - 5.3.2 聚酯纤维 / 204
  - 延伸阅读 / 205
  - 5.3.3 聚丙烯腈纤维 / 206
  - 5.3.4 聚丙烯纤维 / 208
  - 5.3.5 聚乙烯醇纤维 / 209
  - 5.3.6 聚氯乙烯纤维 / 211
  - 5.3.7 聚乳酸纤维 / 212
  - 延伸阅读 / 213
- 5.4 特种合成纤维 / 213
  - 5.4.1 耐高温纤维 / 213
  - 5.4.2 耐腐蚀纤维 / 216
  - 5.4.3 阻燃纤维 / 216
  - 5.4.4 弹性纤维 / 216
  - 5.4.5 吸湿性纤维和抗静电纤维 / 216
- 参考文献 / 217
- 思考题 / 217

## 第 6 章 胶黏剂和涂料

- 6.1 胶黏剂 / 218
  - 6.1.1 胶黏剂的组成 / 218
  - 6.1.2 胶黏剂的分类 / 219
  - 6.1.3 胶接及其机理 / 220
  - 6.1.4 胶黏剂的选择 / 223
  - 6.1.5 环氧树脂胶黏剂 / 223
  - 6.1.6 聚氨酯胶黏剂 / 225
  - 6.1.7 酚醛树脂胶黏剂 / 227
  - 6.1.8 丙烯酸酯类胶黏剂 / 228
  - 6.1.9 橡胶胶黏剂 / 230
  - 6.1.10 其他常用的胶黏剂 / 232
- 6.2 涂料 / 233
  - 6.2.1 涂料的组成 / 233
  - 6.2.2 涂料的类型 / 234
  - 6.2.3 涂料的涂装方法 / 235
  - 6.2.4 油基树脂漆 / 236
  - 6.2.5 合成树脂漆 / 238
  - 6.2.6 水性树脂涂料 / 241
  - 6.2.7 粉末涂料 / 242
- 参考文献 / 243
- 思考题 / 244

## 第 7 章 聚合物共混物

- 7.1 聚合物共混物及其制备方法 / 245
  - 7.1.1 基本概念 / 245
  - 7.1.2 共混方法 / 246
- 7.2 聚合物共混物的相容性 / 248



- 7.2.1 基本概念 / 248
- 7.2.2 热力学相容性判断 / 249
- 7.2.3 聚合物之间相容性的基本特点 / 250
- 7.2.4 提高相容性的方法 / 252
- 7.2.5 相容性研究方法 / 253
- 7.3 聚合物共混物的形态结构 / 255
  - 7.3.1 形态结构的基本类型 / 255
  - 7.3.2 聚合物的界面层 / 259
  - 7.3.3 相容性对形态结构和性能的影响 / 260
  - 7.3.4 制备方法对形态结构的影响 / 261
  - 7.3.5 形态结构测定方法 / 262
- 7.4 聚合物共混物的性能 / 262
  - 7.4.1 性能-组成关系 / 262
  - 7.4.2 力学松弛性能 / 263
  - 7.4.3 模量和强度 / 263
  - 7.4.4 流变性能 / 264
  - 7.4.5 其他性能 / 264
- 7.5 基于塑料的聚合物共混物 / 265
  - 7.5.1 以聚乙烯为基的共混物 / 265
  - 7.5.2 以聚丙烯为基的共混物 / 266
  - 7.5.3 以聚氯乙烯为基的共混物 / 267
  - 7.5.4 以聚苯乙烯为基的共混物 / 268
  - 7.5.5 其他聚合物共混物 / 269
- 7.6 橡胶增韧塑料的机理 / 270
  - 7.6.1 橡胶增韧塑料的特点 / 270
  - 7.6.2 橡胶增韧塑料的机理 / 271
  - 7.6.3 影响抗冲强度的因素 / 274
- 7.7 非弹性体增韧 / 275
  - 7.7.1 有机粒子增韧 / 275
  - 7.7.2 无机粒子增韧 / 275
  - 7.7.3 非弹性体增韧作用机理 / 276
- 参考文献 / 276
- 思考题 / 277

## 附录 “高分子材料概论” 课程的教学方式探索

# 第1章

# 材料与高分子材料

## 1.1 材料与材料科学

材料是人类社会发展的重要物质基础，是人类文明的基石。材料的发现和使用使人类在与自然界的斗争中，从愚昧走向文明。在很大程度上，人类社会的发展史就是一部材料的发展史，先后经历了石器、青铜器、铁器等不同时代。当今，材料在人类社会发展中起到基础性和战略性的作用。某一种新材料的问世及其应用，往往会引起人类社会的重大变革。例如，半导体硅材料、光纤的大量应用和发展使得计算机得到广泛应用，从而使人类进入了信息社会。信息、能源和材料是现代文明和生活的三大支柱，其中材料又是信息和能源的基础。

### 1.1.1 材料的定义

能够满足指定工作条件下使用要求的具有一定形态和物理性状的物质称为材料。具有如下特点：一定的组成和配比；成型加工性；一定的物理形状，且能够保持；回收和再生性；具有经济价值。木材、陶瓷、棉、毛、丝、麻、皮革、纸张、天然橡胶、金属、玻璃、砖瓦、水泥等都是常见的材料。还有一些具有特殊性质和功能材料，如高强度复合材料、高绝缘材料、导电材料、耐辐射材料、耐低温与耐高温材料、感光材料、生物材料等。

人们在日常生活中所见即材料。同时，材料还可以在某些极端条件下使用，如高速飞行、宇航、深海、电子技术、原子能工业等。

### 1.1.2 材料的利用与发展

材料是人类生存和生活必不可少的部分，是人类文明的物质基础和先导，是社会发展的动力。通过对新材料的发现、发明和利用，人类使用材料的能力不断提升。

在人类漫长的历史发展中，经历了诸如石器时代、青铜器时代、铁器时代等。原始人使用天然材料如石头、骨骼、木材、兽皮等来制造工具、武器、住所、衣服、用品等，这个时代叫做旧石器时代。随着石器加工制作水平的提高，出现了原始手工业如制陶和纺织，标志着人类进入了新石器时代。在人类的进化史上，这是一个里程碑，因为这标志着人类的智慧发展到将天然材料改造为人工材料。之后的青铜器时代是以使用青铜器为标志的人类物质文化发展阶段。青铜器时代源于4000~5000年前，青铜是铜、锡、铅等元素组成的合金，熔点低、硬度高，比石器易制作且耐用。青铜器的应用大大促进了农业和手工业的出现。而铁

器时代始于 2000 多年前。春秋战国时代，由铁制作的农具、手工工具及各种兵器得以广泛应用，极大促进了当时社会的发展。

经过数千年的发展，现代材料主要包括金属与合金、无机非金属材料、有机高分子材料、复合材料等。钢铁、水泥等材料的出现和广泛应用，使得人类社会开始从农业和手工业社会进入工业社会；而新材料如高分子材料、半导体硅、高集成芯片的普及应用，使得人类社会向信息和知识经济社会过渡。在当代信息社会中，具有代表性的材料主要有纳米材料、生物材料、信息材料等。

### 1.1.3 材料的作用

#### 1.1.3.1 材料科学在经济发展中的作用

在经济和社会的发展过程中，某种新材料的发展和运用往往会推动经济的发展；一般来说，产品技术含量越高，收益越高。

例如，作为 3D 打印 (3D printing) 技术的关键因素，3D 打印材料近年来发展迅速，促进了相关领域的经济发展。全球 3D 打印塑性材料收入达到 1.83 亿美元，并将以 23.4% 的年均复合增长率继续增长，至 2018 年将达到 5.83 亿美元。2012 年北美和亚太地区占了 3D 打印材料销售收益的 68.0%；北美地区的 3D 打印材料市场收入最高，亚太地区第二。从全球来看，美国、日本、中国、英国和德国的 3D 打印材料需求巨大。

工业社会向知识经济社会过渡的重要标志是工业产品中传统的金属材料比重降低，无机非金属材料、有机合成材料的比重越来越大；产业结构从劳动密集型、资金密集型向技术密集型和知识密集型方向发展。1980 年，美国的电子工业产值超过了钢铁和纺织工业，仅次于化工和汽车工业。而日本所谓的“超级钢计划”，则是通过冶炼等技术的改进来大幅度提高传统金属材料的性能，如将钢的性能提高一倍，实质上就是节约了一倍的资源，使得产品更具竞争力。在新材料产业领域中，2000 年的世界新材料市场销售额 4000 亿美元，美国 40%，日本 20%，而我国差距较大。

#### 1.1.3.2 新材料的应用

新材料既是当代高新技术的重要组成部分，又是发展高新技术的重要支柱和突破口。高强度的合金、新的能源材料及各种非金属材料在航空和汽车工业领域应用广泛。例如光纤用于光纤通讯领域，而半导体材料在计算机技术和信息技术的应用较广。与此同时，新技术的发展为材料科学研究提供了更先进的手段。较为先进的技术有精密测试技术、电子显微技术、高速、大容量计算技术等。高技术的发展对材料提出了更高的要求。

新材料产业是构筑现代产业共性关键技术的基础性产业，它的下游产业几乎包括了所有的制造业，包括能源、计算机、交通运输、航空航天、电子信息、汽车、建筑等各种行业。可以说，现代产业包括工业、农业、军事等一切领域，都离不开新材料产业。新材料产业中所采用的技术已经成为构筑现代产业的共性技术，对新材料是否使用已经成为现代产业能否具有领先性的基础性条件之一。例如，大飞机制造是一个国家综合实力和航空工业水平的体现，代表了科技和工业基础的制高点。

“一代材料，一代飞机”是航空工业发展的生动写照。飞机性能的改进有 2/3 靠材料，因此，材料的先进性在相当程度上决定了飞机的性能。大飞机项目大规模集成了现代高新技术，对材料提出了更高的要求。目前，大型客机机体材料主要包括铝合金 (aluminum alloy)、钛合金 (titanium alloy) 和树脂基复合材料 (resin matrix composite) 等，而发展重点则集中在低成本、高性能的树脂基复合材料技术。例如，我国具有自主知识产权的 C919 大型客机，于 2017 年 5 月 5 日首飞成功。C919 在材料使用上，采用了大量的先进复合材料 (composite material) 和先进的第三代铝锂合金 (aluminum lithium alloy) 等，其

中复合材料使用量达到 20%，使得飞机在保证设计强度的前提下大大减小了结构重量。世界先进的第三代铝锂合金在国内民机上使用尚属首次，铝锂合金的使用比例甚至超过了空客 A380。另外，C919 使用了占全机结构重量 20%~30% 的国产铝合金、钛合金以及钢 (steel) 等材料。

近年来，在航空领域，碳纤维复合材料 (carbon fiber composite) 是实现航空武器装备及民用航空装备轻量化、低成本、高性能的关键性材料。尽管复合材料较铝合金昂贵，但是可以使飞机减重 10%~30%，所带来的经济效益远远抵偿了其成本高的负面影响。当前，民机 50% 以上的结构使用的都是复合材料，像空客 A350、波音 787，我们所能看到的外部结构，除了起落架，其他使用的几乎都是复合材料。

高铁的建设也促进了新材料行业的发展。车体材料方面，目前使用的是不锈钢和铝合金；由于车辆轻量化的要求越来越高，复合材料日渐受到关注。例如，意大利 ETR500 高速列车的车头前突部分采用的是芳纶纤维增强环氧树脂 (epoxy resin, EP)；法国国营铁路公司 (SNCF) 的 TGV 高速列车采用碳和玻璃纤维强化环氧树脂包覆发泡蜂窝材料芯。而高铁铁轨所用的高分子减振、降噪材料多达十几种：聚氨酯 (polyurethane, PU)、碳纤维复合材料、热塑性弹性体 (thermoplastic elastomer, TPE)、聚氯乙烯 (polyvinyl chloride, PVC)、硅橡胶 (silicone rubber)、环氧树脂、丁基橡胶 (isobutylene isoprene rubber, IIR)、丁苯橡胶 (butadiene styrene rubber, SBR)、三元乙丙橡胶 (ethylene-propylene-diene terpolymer rubber, EPDM) 等。其中，用于高速铁路路基和轨道之间的减振材料主要从国外进口。美国杜邦公司的售价在 10 万元/吨左右甚至更高。如果该材料实现国产化，价格可以降低一半。

#### 1.1.4 新材料的发展方向

目前应用和发展的新材料正在朝着以下的几个方向发展。

##### 1.1.4.1 高性能化、高功能化、高智能化

高性能材料：掌握原理，采用新工艺、新技术、新设备，创造出性能更好的新型材料。对于结构材料来说，旨在改善材料的强度、刚度、韧性、耐高温、耐腐蚀、高弹、高阻尼等性能。通过新工艺生产的新产品体积小、重量轻、资源省、能耗低、成本低、利润高。

功能材料：单一功能向多种功能发展，把功能材料与元器件结合起来，实现一体化，即材料本身就具有元器件的功能。

智能材料：具有感知和响应双重功能，如形状记忆合金、压电陶瓷、光导纤维、磁致伸缩材料等。智能材料是一种超功能材料，能够解决传统材料难以解决的技术难题。例如美国空军采用智能材料制造飞机机翼，可随工作状态的不同自动调节形状，改变升力和阻力，以适应飞机的起降，使飞机更加安全，降低油耗。

##### 1.1.4.2 复合化

单一材料，如金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料都有各自的优缺点，难以满足当代高技术对材料综合性能的要求。

不同种类、不同性能材料复合，可获得比单一材料性能更好或具有某种特殊性能的复合材料。例如，碳纤维增强的陶瓷基复合材料 (ceramic matrix composite)，其抗冲击强度比普通陶瓷高 40 倍，能经受数千摄氏度高温，是航空工业的重要结构材料。

##### 1.1.4.3 极限化

在尺寸、压力、温度、纯度各种量纲范围内追求极限，使材料的性能产生根本性的飞

跃。例如，在超高温、超高压下用石墨合成金刚石；在超高真空环境中制备新型的半导体器件和高度集成的芯片；利用宇宙空间实验室内的微重力、高真空、超低温、无菌等特殊环境制备在地面无法制备的具有特殊性能的新材料，如冶炼高纯金属等。

#### 1.1.4.4 仿生化

通过研究自然界中生物体的物质结构及其特有的功能，获得一种制备新材料的思路和途径，并在某些材料的设计和制造中加以模仿。用现有简单而丰富的原料，通过错综复杂的生物过程制得高强度和多功能的新材料。

蜘蛛丝比钢丝更强、更富有弹性，具有很强缓冲外力冲击的能力，且低温性能良好，是制造防弹服装和降落伞的理想材料。因此，通过把水溶性的蛋白质分子纺织成既坚韧又不溶解的人造蛛丝，可以用来制作军用品。

生物医用材料仿造人体的细胞外基质结构与成分，有良好的生物相容性能，可以用于人体组织和器官的矫形、修补和再造。

某些仿生材料以生物体合成的蛋白质为基础，取代合成人工材料，有利于解决资源、能源枯竭问题，并且对环境没有危害。

#### 1.1.4.5 绿色化

绿色材料或环境友好材料是指资源和能源消耗少、再生循环利用率高，或可降解使用的材料。

废弃的普通塑料越来越多，并因其耐久性好而长久存留自然界已经成为公害。我国于2008年6月1日开始实行“限塑令”。

可降解塑料则能够实现绿色循环。通过乳酸（lactic acid）聚合可合成聚乳酸（polylactic acid, PLA）。细菌合成可降解塑料如聚羟基丁酸酯（polyhydroxybutyrate, PHB）、聚羟基戊酸酯（polyhydroxyvalerate, PHV）及其共聚物（copolymer）PHBV [poly (hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate)] 等。用二氧化碳可合成降解塑料包括聚碳酸酯（polycarbonate, PC）等。这些生物可降解材料已在日常生活（如包装、牙刷、杯子）、医疗（如骨钉、骨板、缝合线）等多个领域得到了应用。

## 1.2 材料的制备与性能

### 1.2.1 材料与物质

材料与物质既密切相关，又有所区别。材料都是由物质构成的：可以是一种或多种，如橡胶、塑料，通常含有多种添加剂以提高材料的综合性能。同一种物质，可以制备成不同的材料。例如，聚乙烯（polyethylene, PE）可以通过改变合成工艺得到高密度聚乙烯（high density polyethylene, HDPE）、低密度聚乙烯（low density polyethylene, LDPE）、超高分子量聚乙烯（ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE）、线形低密度聚乙烯（linear low density polyethylene, LLDPE）等聚乙烯塑料；聚丙烯（polypropylene, PP）既可以做塑料，也可以做纤维。

### 1.2.2 材料工艺过程

由化学物质或原料转变成适于一定用场的材料，其转变过程称为材料化过程，包括材料的制备过程（化学与化工过程）和加工过程。例如，高分子（macromolecule）材料，一般要经历单体（monomer）的聚合（polymerization）、造粒、复合、加工成型（注塑、挤出、压延、吹塑）等。制备过程主要是化学反应，有时也有物理过程，如微结构调整、相变等。

加工过程以物理过程为主，热固性塑料同时有化学反应过程。

材料工艺过程对材料性能有着显著的影响。例如，用高压法合成的聚乙烯（PE）支链多、密度小、结晶度低；而低压法合成的 PE 支链少、密度大、结晶度高。相反，材料原始组织结构又影响加工方法。例如热固性树脂（thermosetting resin）与通常的热塑性塑料（thermoplastic plastics）的加工方法有所不同。又如茂金属（metallocene）催化的聚丙烯（PP）分子量分布窄、熔体黏度大，按照普通 PP 的加工工艺，即使选用很高的熔融温度，PP 的挤出也相当困难。目前，改变茂金属聚烯烃的加工性有以下几个途径：①选用不同茂金属催化剂或混合催化剂，加宽茂金属聚烯烃树脂的分子量分布或生产双峰分布树脂；②在茂金属聚烯烃树脂中引入长支链；③采用共混方法，添加其他类型树脂。目前，这几种途径，国外各大石化公司都在进行研究。

### 1.2.3 材料的结构

材料的结构从宏观到微观可以分为三类。宏观组织结构： $>0.1\text{mm}$ ，肉眼可见；显微组织结构： $0.1\mu\text{m}\sim 0.1\text{mm}$ ，光电显微镜、扫描电子显微镜下可见，主要是晶粒、相、微区结构；微观结构： $<0.1\mu\text{m}$ （ $100\text{nm}$ ），透射电子显微镜、原子力显微镜下可见，是典型的纳米材料。

根据结晶度的大小可以分为晶态结构与非晶态结构。晶态结构在无机和金属材料中较为常见，结晶的形态共分为 7 大晶系 [高级晶系：立方、六方；中级晶系：四方（正方）、正交（斜方）；三方；初级晶系：单斜、三斜]。高分子则很难结晶，即使结晶也多为初级或中级晶系。高分子形成的晶体可以分为单晶、球晶、串晶、柱晶、伸直链晶体和纤维晶等多种形态。而非晶态结构是指无规线团结构，无固定的熔点、物理性质各向同性。

### 1.2.4 材料的性能

材料的性能包括特征性能和功能物性。材料的特征性能指的是材料本身所固有的性质，即给材料某一种外场刺激，反映出来的是这种刺激对应的性能。例如，材料的力学性能、热性能、电性能、磁性能、光性能、化学性能等。材料的功能物性是指对材料施加某种外场作用，通过材料将这种作用转换成另外一种形式的功能。实现某种功能的材料被称为功能材料。例如热-电、电-热转换材料，光-热、光-电、电-光转换材料，以及材料的生物性能等。

## 1.3 材料的分类

材料可以从不同的角度进行分类。按照化学组成来分类，可以分为金属材料、无机材料和有机材料（主要是高分子材料）三类。按照状态分类，有气态、液态和固态三类。一般使用的大都是固态材料。固态材料又分为单晶、多晶、非晶以及复合材料等。按材料所起的作用分类，可分为结构材料和功能材料两种类型。结构材料主要考虑其机械力学性能，是机械制造、工程建设、交通运输、能源利用等方面的物质基础。功能材料是利用其各种物理和化学特性，在电子、红外、激光、能源、通讯等方面起关键作用。例如，铁电材料、压电材料、光电材料、超导材料、声光材料、电光材料等都属于功能材料。此外，也可按照使用领域分为电子材料、耐火材料、医用材料、耐蚀材料、建筑材料等不同种类。材料的分类如图 1-1 所示。

为了便于阐明材料制备—结构—性能—应用之间的关系，通常根据组成来分类介绍，即金属材料、无机材料、高分子材料和复合材料。

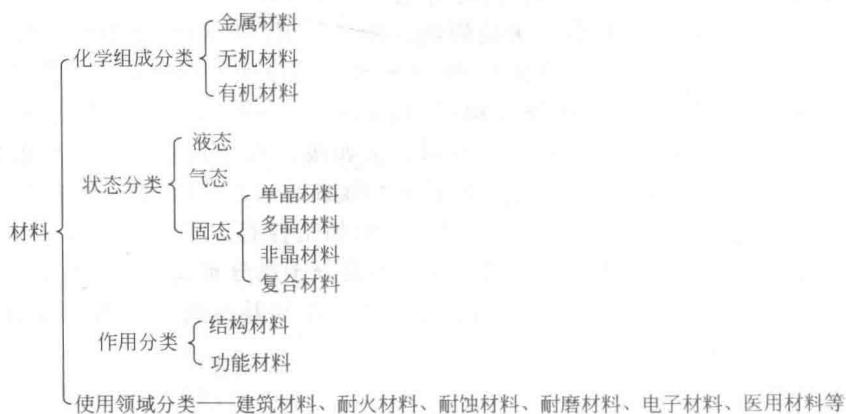


图 1-1 材料的分类

### 1.3.1 金属材料

金属材料有两种：一种是利用其固有特性以纯金属状态使用的，如作导体用的铜和铝；另一种是由几种金属组成或者加入适当的杂质成分以改善其原有特性而使用的，如合金钢、铸铁等。金属的键合无方向性，其结晶多是立方、六方的最密堆砌结构，富于展性和延性、良好的导电以及导热性、较高的强度以及耐冲击性。用各种热处理方法可以改变金属及合金的组织结构从而赋予各种特性。这些特点使金属材料成为用途最广、用量最大的材料。

在工业上，通常将金属材料分为黑色金属（铁基合金）和有色金属两种类型。

黑色金属主要是以铁-碳为基的合金，包括普通碳钢、合金钢、不锈钢和铸铁。钢的性能主要是由渗碳体的数量、尺寸、形状和分布决定的，而渗碳体的数量、尺寸、形态又由不同的热处理工艺所决定。合金元素的最重要功能是改善这些热处理能力，有助于使产生的组织结构在高温下更加稳定。不锈钢至少含 12% 的铬（Cr），这种钢暴露在氧气中时，形成一层薄的氧化铬，对表面起保护作用，因而具有优异的耐蚀性。铸铁为铁-碳-硅合金，典型的铸铁含有 2%~4% 的碳和 0.5%~5% 的硅。不同的铸造工艺可生成不同类型、不同用途的铸铁。

有色金属是除了铁之外的纯金属或者以其为基的合金，常用的有铝合金、镁合金（magnesium alloy）、铜合金（copper alloy）、钛合金等。

#### (1) 镁及镁合金

镁由于具有优良的物理性能和机械加工性能，以及丰富的蕴藏量，被认为是最有前途的轻量化材料之一及 21 世纪的绿色金属材料。镁作为实际应用中最轻的金属结构材料，在汽车减重和性能改善中有重要作用。世界各大汽车公司已经将镁合金制造零件作为重要发展方向。

#### (2) 钛及钛合金

钛及钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀性好、耐高温等优良特性。随着国民经济和国防工业的发展，被广泛应用于汽车、电子、化工、航空、航天、兵器等领域。

#### (3) 铝及铝合金

铝合金具有密度小、导热性好、易于成型、价格低廉等优点，已广泛应用于航空航天、交通运输、轻工建材等部门，是轻合金中应用最广、用量最多的合金。目前，交通运输业已成为铝合金材料的第一大用户。铝及铝合金是最早用于汽车制造的轻质金属材料，也是工程材料中最经济实用、最有竞争力的汽车用轻金属材料。虽然铝合金在大飞机上的应用受到复

合材料和钛合金的挑战，但是其作为主体结构材料的地位还没有改变；目前正在使用的民用客机中，还在大量使用铝合金。例如，美铝公司开发的第三代铝锂合金，其与碳纤维复合材料相比，气动性好、防腐能力强、可回收，而且重量还要轻 10%，制造、运行、维修成本要低 30%。该型合金已经用到了波音 787、空客 A350XWB、A380 和庞巴迪 C 系列飞机上。

### 1.3.2 无机非金属材料

无机材料是由无机化合物构成的材料，其中包括诸如锗、硅、碳之类的单质所构成的材料。硅和锗是主要的半导体材料，由于其重要性，已经独立成为材料的一个分支。

主要的无机材料是硅酸盐 (silicate) 材料。硅酸盐是地壳中存在量最大的矿物，折合成  $\text{SiO}_2$  约占造岩氧化物的 60%。与  $\text{SiO}_2$  结合组成硅酸盐的氧化物主要有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$  等。以硅酸盐为主要成分的天然矿物，由于分布广、采取容易，很早就被人类用作材料使用。在石器时代，直接用于制成各种工具；在史前时期，则制成了陶器；随后发展到制作玻璃、陶瓷、水泥等各种硅酸盐材料。

以硅酸盐为主要成分的材料有玻璃、陶瓷和水泥三大类。硅酸盐材料在发展过程中，使用的原料除了以硅酸盐为主要成分的天然硅石、黏土外，也采用了其他不含  $\text{SiO}_2$  的氧化物和以碳为主要成分的石墨等，按照同样的工艺方法制成了各种制品。虽然这些材料已经不是硅酸盐，但习惯上仍然归属于硅酸盐材料。

20 世纪 40 年代以来，由于新技术的发展，在原有硅酸盐材料基础上相继研制成了许多新型的无机材料，如用氧化铝制成的刚玉制品，用焦炭和石英砂制成的碳化硅制品，以及钛酸钡铁电材料等。常把这些材料称作新型无机材料以与传统的硅酸盐材料相区别。在欧美各国常把无机材料通称为陶瓷材料，因此也称上述的新型无机材料为“新型陶瓷”。

无机材料一般硬度大、性脆、强度高、抗化学腐蚀、对电和热的绝缘性好。

### 1.3.3 高分子材料

高分子材料通常是由脂肪族和芳香族的 C—C 共价键为主链结构的高分子构成的化合物为主要成分构成的，也称为有机高分子材料。人们使用有机材料的历史很早，自然界的天然有机产物，如木材、皮革、橡胶、棉、麻、丝、毛等都属于这一类。自 20 世纪 20 年代以来，发展了人工合成的各种高分子材料。高分子材料的一般特点是质轻、耐腐蚀、绝缘性好、易于成型加工，但是强度、耐磨性及使用寿命较差。因此，高强度、耐高温、耐老化的高分子材料是当前高分子材料的重要发展方向。

高分子材料有各种不同的分类方法。例如，按照来源可以分为天然高分子材料和合成高分子材料，按照大分子主链结构可以分为碳链高分子材料、杂链高分子 (heterochain polymer) 材料和元素有机高分子 (elemento-organic polymer) 材料等。碳链高分子材料的主链完全由碳原子构成，如烯类和二烯类的加成聚合物。杂链高分子材料的主链中不仅含有 C，还含有其他杂原子，如 O、N、S 等。聚醚 (polyether)、聚酯 (polyester)、聚氨酯、聚酰胺 (polyamide)、聚碳酸酯、聚砜 (polysulfone) 等聚合物都属于杂链高分子材料。元素有机高分子材料如硅橡胶的主链中没有碳原子，由杂原子 Si、B、Al、O、N、S、P 等组成，侧基含有有机基团。

通常根据高分子材料的性能和用途进行分类，包括塑料 (plastic)、橡胶 (rubber)、纤维 (fiber)、胶黏剂 (adhesive)、涂料 (coating)、功能高分子 (functional polymer) 材料。本书即采用这种分类方法来介绍各类通用高分子材料。此外，高分子材料还包括聚合物共混物、聚合物基复合材料等不同结构的高分子材料。



### 1.3.4 复合材料

由两种或两种以上物理化学性质不同的物质,用适当的工艺方式方法组合起来,而得到的具有复合效应的多相固体材料称之为复合材料。所谓复合效应是指通过复合所得的产物性能要优于组成它的材料或者具有新的性能特点。多相体系和复合效应是复合材料区别于化合物和混合材料的两个主要特点。

广义而言,复合材料是指由两个或者多个物理相组成的固体材料,如玻璃纤维增强塑料、钢筋混凝土、橡胶制品、石棉水泥板、三合板、泡沫塑料、多孔陶瓷等都可归入复合材料的范畴。狭义的是指用玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、陶瓷纤维、晶须、芳香族聚酰胺纤维等增强的塑料、金属和陶瓷材料。

从不同的角度可将复合材料分为若干的类别。

#### (1) 按构成原料分类

根据构成原料在复合材料中的形态,可以分为基体材料和分散材料。基体是构成连续相的材料,它把纤维或者颗粒等分散材料固结成一体。现在习惯上常把复合材料归入基体所属类的材料中,例如把以金属材料为基体的复合材料归入金属材料的范畴,而把以聚合物为基体的复合材料归入高分子材料的范畴等。但是,对于像包层金属、胶合板之类的复合材料,则分不出哪个是基体,哪个是分散材料。

根据这种分类的方法,复合材料有三种命名方法:一是以基体为主,如树脂基复合材料、金属基复合材料等;二是以分散材料为主,如玻璃纤维增强复合材料、碳纤维增强复合材料等;三是基体和分散材料并用,如不饱和聚酯-玻璃纤维层压板、木材-塑料复合材料等。

#### (2) 按复合材料的形态和形状分类

可以分为颗粒状、纤维状、层状三类。

#### (3) 按照复合性质分类

可分为合体复合(物理复合)和生成复合(化学复合)两种。合体复合在复合前后原材料的性质、形态、含量大体上没有变化。常见的复合材料,如玻璃纤维增强塑料等,均属这类复合。化学复合前后,组成材料的性质、形态、含量等均发生显著变化,其特点是通过化学过程形成多相结构。例如动物、植物组织等天然材料即属这类复合材料,目前已经应用的人生成复合材料为数尚少。

#### (4) 按复合效果分类

可以分为结构复合材料和功能复合材料两大类。

由于现代科学技术特别是航空、航天和海洋工程技术的要求,复合材料的发展十分迅速。复合材料的品类很多,但是目前应用最广的主要是聚合物基复合材料。金属基复合材料尚处于研究阶段,尚未达到大规模生产的程度;陶瓷基复合材料尚处于起步阶段,但二者的发展趋势十分迅猛。

## 1.4 高分子材料发展历史及未来

### 1.4.1 高分子材料的三个发展阶段

#### 1.4.1.1 高分子材料发展第一阶段:材料的出现先于科学概念的建立

##### (1) 天然橡胶(natural rubber, NR)的利用、开发与改性

在中美洲与南美洲,11世纪左右当地人用天然橡胶做游戏与生活用品,如容器与雨具