

# 材料科学

张留成 编著

## 导论

河北大学出版社

Cailiaoxue Daolun

Cailiaoxue Daolun

# 材 料 学 导 论

张留成 编著

河北大学出版社

中国 保定

责任编辑:韩建民/马 力

平面设计:张志伟

责任校对:高俊刚

责任印制:蔡进建

### 图书在版编目(CIP)数据

材料学导论/张留成编著. - 保定:河北大学出版社,  
1999.4

ISBN 7-81028-529-7

I. 材… II. 张… III. 材料科学 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 15748 号

---

出版:河北大学出版社(保定市合作路 1 号)

经销:全国新华书店

印制:河北新华印刷一厂

规格:1/32(850mm×1168mm)

印张:17.75 字数:420 千字

印数:1~8000 册

版次:1999 年 5 月第 1 版

印次:1999 年 5 月第 1 次

---

定价:28.00 元

## 前 言

材料是科学与工业技术发展的基础。先进材料已成为当代文明的主要支柱之一。掌握现代材料科学技术对从事科学、技术领域的科技人员是十分迫切和必要的，培养大批材料科学方面的技术人才更是当务之急。

材料科学是一门多学科相互交叉的新兴综合性科学。材料大致可分为金属材料、无机材料（陶瓷材料）和有机高分子材料三大类。从这三类材料所涉及的基础科学而言，有共性亦有个性。从基础而言，学习金属材料科学，结晶学、相变及相平衡是最主要的基础理论；对于陶瓷材料，除相变及相平衡之外，无机化学是主要的基础；对学习高分子材料科学，有机化学和有机合成的基础必须扎实。然而，由于这三个领域的相互交叉、相互渗透和相互借鉴，所以学习一种材料科学时，应当对其它类的材料也有一般了解。对材料科学的本科生而言，以前专业设置大致分金属材料、无机材料和高分子材料三类专业，当前，为拓宽专业面，一些高校已将这三类专业合并为一个材料专业，但作者认为，加强共性课程是对的，但不宜忽视各自的特点，特别是专业基础课应有所区别，否则难以保证教学质量。在硕士生阶段的课程则应注重在三类材料的相互交叉、相互渗透等共性方面。本书的编写就是在这种思想指导下进行的。本书前八章是有关材料科学的基本知识，着眼于使初学材料科学者对三种基本材料都有一个概括的了解，可作为教学参考书或教材。第9章简要阐述各种材料的进展和发展趋势，目的是使此书对已掌握材料科学基本知识的读

者仍有所帮助。

作者水平有限，书中难免不当和错误之处，敬请读者批评斧正。

编者

1999.1.8

## 内 容 提 要

本书以材料的结构-性能-成型加工工艺及应用为主线,阐述了金属材料、陶瓷材料及高分子材料的基本结构、性能和主要应用领域及品种。本书的特点是将上述三类材料融会贯通,形成一个整体。

全书共分:绪论、材料概述、材料结构、相态及其变化、材料工艺、材料的力学性能、材料物理性能、材料的化学损伤及其防护、材料科学进展共九章。全书重点在阐明材料科学与工程的基本理论和基本知识,力求阐明金属、陶瓷及高分子三类材料在结构-性能-应用之间关系上的一致性,并使读者在学习这三类材料时可以相互借鉴、相互启迪、融会贯通。

本书适用于材料、高分子材料、无机材料、金属材料专业高年级学生、研究生作教材或教学参考书,也可供材料科学及有关专业的科技、工程技术和科技管理工作参考。

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....            | 1  |
| 1.1 材料科学的范畴及任务 .....      | 1  |
| 1.2 材料的类别 .....           | 3  |
| 1.3 材料结构与性能 .....         | 4  |
| 1.4 材料工艺及其与结构和性能的关系 ..... | 6  |
| 参考文献 .....                | 8  |
| 第 2 章 材料概述 .....          | 10 |
| 2.1 金属材料 .....            | 10 |
| 2.1.1 黑色金属 .....          | 10 |
| 2.1.1.1 铁及碳钢 .....        | 11 |
| 2.1.1.2 合金钢 .....         | 12 |
| 2.1.2 有色金属 .....          | 13 |
| 2.2 无机材料 .....            | 14 |
| 2.2.1 分类 .....            | 16 |
| 2.2.2 陶瓷 .....            | 16 |
| 2.2.3 玻璃 .....            | 17 |
| 2.3 高分子材料 .....           | 20 |
| 2.3.1 命名及分类 .....         | 21 |
| 2.3.2 高分子合成反应 .....       | 26 |
| 2.3.3 塑料 .....            | 28 |
| 2.3.3.1 塑料的组分及其作用 .....   | 30 |
| 2.3.3.2 热塑性塑料 .....       | 34 |
| 2.3.3.3 热固性塑料 .....       | 41 |
| 2.3.4 橡胶 .....            | 42 |
| 2.3.4.1 天然橡胶 .....        | 44 |

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| 2.3.4.2 合成橡胶 .....        | 44        |
| 2.3.5 纤维 .....            | 47        |
| 2.3.5.1 天然纤维和人造纤维 .....   | 49        |
| 2.3.5.2 合成纤维 .....        | 51        |
| 2.3.6 胶粘剂及涂料 .....        | 55        |
| 2.3.6.1 胶粘剂 .....         | 55        |
| 2.3.6.2 涂料 .....          | 58        |
| 2.4 复合材料 .....            | 61        |
| 2.4.1 基本概念和分类 .....       | 61        |
| 2.4.2 纤维增强复合材料 .....      | 64        |
| 参考文献 .....                | 66        |
| <b>第3章 材料结构</b> .....     | <b>67</b> |
| 3.1 原子结构、结合键及原子排列 .....   | 67        |
| 3.2 晶体结构 .....            | 71        |
| 3.2.1 晶体结构的基本概念 .....     | 71        |
| 3.2.2 金属晶体结构 .....        | 76        |
| 3.2.2.1 纯金属晶体结构 .....     | 76        |
| 3.2.2.2 合金相晶体结构 .....     | 79        |
| 3.2.3 共价键晶体及离子键晶体结构 ..... | 83        |
| 3.2.3.1 共价键晶体结构 .....     | 83        |
| 3.2.3.2 离子晶体结构 .....      | 83        |
| 3.2.3.3 硅酸盐的晶体结构 .....    | 92        |
| 3.2.3.4 二氧化硅的晶体结构 .....   | 96        |
| 3.2.4 聚合物晶体结构 .....       | 97        |
| 3.2.4.1 大分子的结构与形态 .....   | 98        |
| 3.2.4.2 聚合物聚集态及晶体结构 ..... | 103       |
| 3.2.5 多晶态及晶体缺陷 .....      | 108       |
| 3.2.5.1 多晶态 .....         | 108       |
| 3.2.5.2 缺陷 .....          | 109       |
| 3.3 非晶态结构 .....           | 116       |
| 3.3.1 非晶态及其特征 .....       | 116       |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 3.3.2 玻璃及玻璃化转变 .....       | 119        |
| 3.3.3 非晶态聚合物材料 .....       | 120        |
| 3.3.3.1 聚合物的非晶态结构 .....    | 120        |
| 3.3.3.2 聚合物分子运动及物理态 .....  | 121        |
| 3.3.4 非晶态合金 .....          | 128        |
| 3.4 材料的显微组织 .....          | 130        |
| 3.4.1 分析仪器和基本方法 .....      | 130        |
| 3.4.2 显微组织的组成单元类型与性状 ..... | 134        |
| 参考文献 .....                 | 141        |
| <b>第4章 相态及其变化</b> .....    | <b>143</b> |
| 4.1 材料相态变化的基本类型及特点 .....   | 143        |
| 4.1.1 相态变化的基本类型 .....      | 143        |
| 4.1.1.1 按热力学函数分类 .....     | 143        |
| 4.1.1.2 按相变动力学特征分类 .....   | 144        |
| 4.1.2 松弛过程及其特点 .....       | 145        |
| 4.1.2.1 松弛过程 .....         | 145        |
| 4.1.2.2 时——温的相互转化 .....    | 147        |
| 4.1.3 相态转变的热力学及动力学 .....   | 147        |
| 4.2 凝固过程 .....             | 148        |
| 4.2.1 成核过程 .....           | 148        |
| 4.2.1.1 均质成核 .....         | 148        |
| 4.2.1.2 非均质成核 .....        | 152        |
| 4.2.1.3 成核率 .....          | 154        |
| 4.2.2 晶体长大 .....           | 155        |
| 4.2.2.1 晶体长大机理 .....       | 157        |
| 4.2.2.2 晶体的生长形态 .....      | 158        |
| 4.2.3 多组分体系的凝固 .....       | 161        |
| 4.2.4 凝固条件对铸锭组织结构的影响 ..... | 162        |
| 4.2.4.1 铸锭组织结构 .....       | 162        |
| 4.2.4.2 缩孔与疏松 .....        | 164        |
| 4.2.5 界面能对晶体组织与形态影响 .....  | 165        |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 4.3 固态相变 .....                | 166 |
| 4.3.1 固态相转变的特点 .....          | 167 |
| 4.3.2 固体中的原子扩散 .....          | 167 |
| 4.3.2.1 扩散机理 .....            | 168 |
| 4.3.2.2 稳态扩散 .....            | 168 |
| 4.3.2.3 非稳态扩散 .....           | 169 |
| 4.3.3 固态相变的成核及其长大 .....       | 170 |
| 4.3.3.1 成核 .....              | 170 |
| 4.3.3.2 长大 .....              | 171 |
| 4.3.4 相变速率 .....              | 172 |
| 4.4 相图 .....                  | 173 |
| 4.4.1 相律及相图的建立 .....          | 173 |
| 4.4.1.1 相律 .....              | 173 |
| 4.4.1.2 相图的建立 .....           | 175 |
| 4.4.2 单元系相图 .....             | 177 |
| 4.4.3 二元相图 .....              | 177 |
| 4.4.3.1 匀晶相图 .....            | 177 |
| 4.4.3.2 共晶和共析相图 .....         | 184 |
| 4.4.3.3 包晶与包析相图 .....         | 187 |
| 4.4.3.4 二元相图中其它三相平衡反应 .....   | 189 |
| 4.4.3.5 形成化合物或中间相的二元相图 .....  | 190 |
| 4.4.3.6 二元相图的一些基本规律 .....     | 191 |
| 4.4.3.7 铁碳相图 .....            | 193 |
| 4.4.3.8 碳钢的凝固过程及其显微结构特点 ..... | 195 |
| 4.4.4 三元相图 .....              | 197 |
| 4.4.4.1 成分三角形 (组成三角形) .....   | 198 |
| 4.4.4.2 两相平衡时的组成和杠杆定理 .....   | 198 |
| 4.4.4.3 三相平衡时的组成及重心法则 .....   | 199 |
| 4.4.4.4 三元相图表示法 .....         | 200 |
| 4.5 金属热处理 .....               | 205 |
| 4.5.1 碳钢的淬火 .....             | 205 |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 4.5.2 奥氏体的等温分解 .....     | 208        |
| 4.5.3 共析钢的连续冷却转变 .....   | 211        |
| 4.5.4 碳钢的退火和正火 .....     | 213        |
| 4.5.5 碳钢的回火 .....        | 213        |
| 4.5.6 分级淬火和等温淬火 .....    | 215        |
| 4.5.7 沉淀硬化 .....         | 217        |
| 参考文献 .....               | 221        |
| <b>第5章 材料工艺</b> .....    | <b>222</b> |
| 5.1 生产工艺 .....           | 222        |
| 5.1.1 金属材料生产工艺 .....     | 222        |
| 5.1.1.1 火法冶金 .....       | 223        |
| 5.1.1.2 湿法冶金 .....       | 231        |
| 5.1.1.3 电冶金 .....        | 232        |
| 5.1.2 陶瓷材料生产工艺 .....     | 233        |
| 5.1.2.1 原料制备 .....       | 233        |
| 5.1.2.2 成型与烧结 .....      | 235        |
| 5.1.2.3 熔融固化 .....       | 237        |
| 5.1.3 单晶材料的制备 .....      | 237        |
| 5.1.4 高分子材料生产 .....      | 238        |
| 5.2 成型及加工工艺 .....        | 239        |
| 5.2.1 金属材料的成型与加工 .....   | 239        |
| 5.2.1.1 铸造 .....         | 239        |
| 5.2.1.2 粉末冶金 .....       | 242        |
| 5.2.1.3 金属加工工艺 .....     | 242        |
| 5.2.1.4 金属的超塑性成型加工 ..... | 245        |
| 5.2.1.5 切削加工 .....       | 245        |
| 5.2.1.6 焊接 .....         | 247        |
| 5.2.1.7 表面改性 .....       | 253        |
| 5.2.2 高分子材料的成型加工 .....   | 255        |
| 5.2.2.1 塑料的成型加工 .....    | 255        |
| 5.2.2.2 橡胶的成型加工 .....    | 261        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 5.2.2.3 纤维加工 .....            | 262        |
| 5.2.2.4 复合材料的成型工艺 .....       | 267        |
| 参考文献 .....                    | 269        |
| <b>第6章 材料的力学性能</b> .....      | <b>270</b> |
| 6.1 力学性能的基本物理量 .....          | 270        |
| 6.1.1 应力与应变 .....             | 270        |
| 6.1.2 弹性模量 .....              | 273        |
| 6.1.3 硬度 .....                | 275        |
| 6.1.4 强度 .....                | 276        |
| 6.2 弹性形变 .....                | 279        |
| 6.2.1 两类弹性 .....              | 279        |
| 6.2.2 高弹形变 .....              | 280        |
| 6.2.3 粘弹性形变 .....             | 283        |
| 6.3 塑性形变 .....                | 286        |
| 6.3.1 金属材料的低温塑性形变 .....       | 287        |
| 6.3.1.1 金属单晶体的塑性变形 .....      | 287        |
| 6.3.1.2 多晶体和合金的塑性形变 .....     | 297        |
| 6.3.1.3 塑性形变对显微组织及性能的影响 ..... | 299        |
| 6.3.1.4 屈服及屈服强度 .....         | 302        |
| 6.3.1.5 加工硬化(应变硬化) .....      | 304        |
| 6.3.2 冷变形金属材料的回复和再结晶 .....    | 305        |
| 6.3.2.1 回复 .....              | 306        |
| 6.3.2.2 再结晶及晶粒长大 .....        | 307        |
| 6.3.2.3 动态回复与动态再结晶 .....      | 308        |
| 6.4 金属材料的断裂、疲劳、蠕变及持久强度 .....  | 311        |
| 6.4.1 金属的断裂 .....             | 311        |
| 6.4.2 金属材料的疲劳 .....           | 313        |
| 6.4.3 金属材料的蠕变和持久强度 .....      | 314        |
| 6.5 陶瓷材料力学性能特点 .....          | 316        |
| 6.5.1 力学性能特点 .....            | 316        |
| 6.5.2 影响陶瓷材料强度的因素 .....       | 318        |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 6.6 高分子材料的力学特征 .....      | 319        |
| 6.6.1 高分子材料的力学屈服 .....    | 319        |
| 6.6.2 力学强度 .....          | 324        |
| 6.6.3 摩擦与磨损 .....         | 327        |
| 6.6.4 疲劳强度 .....          | 329        |
| 6.7 材料的强化机制与方法 .....      | 330        |
| 6.7.1 提高材料的刚度 .....       | 330        |
| 6.7.2 提高材料的屈服强度 .....     | 331        |
| 6.7.2.1 冷变形强化(应变硬化) ..... | 331        |
| 6.7.2.2 细晶强化 .....        | 331        |
| 6.7.2.3 固溶强化 .....        | 332        |
| 6.7.2.4 多相强化 .....        | 332        |
| 6.7.2.5 分散强化 .....        | 333        |
| 6.7.2.6 马氏体强化 .....       | 333        |
| 6.7.3 提高断裂强度 .....        | 333        |
| 6.7.4 提高韧性 .....          | 335        |
| 6.7.4.1 陶瓷的增韧 .....       | 335        |
| 6.7.4.2 橡胶增韧塑料 .....      | 336        |
| 参考文献 .....                | 344        |
| <b>第7章 材料的物理性能</b> .....  | <b>345</b> |
| 7.1 材料的电性能 .....          | 345        |
| 7.1.1 导电性能的能带理论 .....     | 345        |
| 7.1.2 金属材料的电阻 .....       | 348        |
| 7.1.3 绝缘体 .....           | 350        |
| 7.1.4 半导体 .....           | 354        |
| 7.1.5 材料的其它电性能 .....      | 363        |
| 7.2 材料的磁性能 .....          | 366        |
| 7.2.1 几个基本物理量和基本概念 .....  | 366        |
| 7.2.2 抗磁性和顺磁性 .....       | 368        |
| 7.2.3 铁磁性 .....           | 370        |
| 7.2.4 反铁磁性和亚铁磁性 .....     | 371        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 7.2.5 温度对磁性的影响 .....          | 373        |
| 7.2.6 磁化与退磁化 .....            | 373        |
| 7.2.7 磁性材料 .....              | 377        |
| 7.3 材料的热性能 .....              | 380        |
| 7.3.1 热容 .....                | 380        |
| 7.3.2 热膨胀 .....               | 384        |
| 7.3.3 热传导 .....               | 385        |
| 7.3.4 热应力 .....               | 387        |
| 7.4 材料的光学性能 .....             | 389        |
| 7.4.1 光与固体的相互作用 .....         | 390        |
| 7.4.2 金属的光学性能 .....           | 391        |
| 7.4.3 非金属材料的光学性能 .....        | 391        |
| 7.4.4 其它光学现象和光学材料 .....       | 397        |
| 参考文献 .....                    | 403        |
| <b>第8章 材料的化学损伤及其防护</b> .....  | <b>404</b> |
| 8.1 金属材料的腐蚀 .....             | 404        |
| 8.1.1 金属材料的水溶液腐蚀 .....        | 405        |
| 8.1.1.1 金属材料水溶液腐蚀的电化学本质 ..... | 405        |
| 8.1.1.2 原电池腐蚀 .....           | 408        |
| 8.1.1.3 钝化 .....              | 412        |
| 8.1.1.4 极化与腐蚀速度 .....         | 414        |
| 8.1.2 局部腐蚀 .....              | 416        |
| 8.1.2.1 电偶腐蚀 .....            | 416        |
| 8.1.2.2 孔蚀 .....              | 416        |
| 8.1.2.3 缝隙腐蚀 .....            | 417        |
| 8.1.2.4 晶界腐蚀 .....            | 418        |
| 8.1.2.5 应力腐蚀破裂与磨损腐蚀 .....     | 420        |
| 8.1.2.6 选择性腐蚀 .....           | 422        |
| 8.1.2.7 腐蚀疲劳 .....            | 423        |
| 8.1.3 金属材料的氧化腐蚀 .....         | 424        |
| 8.1.4 金属材料耐蚀性的表征 .....        | 426        |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 8.2 腐蚀的控制与防护 .....           | 428        |
| 8.2.1 合理选材合理设计 .....         | 428        |
| 8.2.2 表面保护 .....             | 429        |
| 8.2.3 环境控制 .....             | 430        |
| 8.2.4 电化学保护 .....            | 430        |
| 8.3 陶瓷材料的耐蚀性能 .....          | 432        |
| 8.4 高分子材料的化学性能及老化 .....      | 433        |
| 8.4.1 溶解性和渗透性 .....          | 434        |
| 8.4.2 力化学性能和环境应力开裂 .....     | 438        |
| 8.4.2.1 力化学性能 .....          | 438        |
| 8.4.2.2 环境应力开裂 .....         | 442        |
| 8.4.3 高分子材料的燃烧特性 .....       | 443        |
| 8.4.4 高分子材料的老化 .....         | 447        |
| 参考文献 .....                   | 449        |
| <b>第9章 材料科学进展</b> .....      | <b>450</b> |
| 9.1 概述 .....                 | 450        |
| 9.1.1 新型材料及其特点 .....         | 450        |
| 9.1.2 新型材料发展的重点和趋势 .....     | 451        |
| 9.1.3 基础研究及新技术的应用 .....      | 471        |
| 9.2 陶瓷材料的进展 .....            | 476        |
| 9.2.1 精细陶瓷的主要应用领域及性能特征 ..... | 476        |
| 9.2.2 研究与发展方向 .....          | 477        |
| 9.3 金属材料进展 .....             | 478        |
| 9.3.1 金属材料的发展趋势 .....        | 479        |
| 9.3.2 采用新技术和新工艺 .....        | 490        |
| 9.3.3 基础理论 .....             | 493        |
| 9.4 高分子材料进展 .....            | 496        |
| 9.4.1 液晶高分子 .....            | 497        |
| 9.4.2 聚合物共混物 .....           | 509        |
| 9.4.3 功能高分子 .....            | 519        |
| 参考文献 .....                   | 547        |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 材料科学的范畴及任务

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称为材料。这就是说，材料和物质这两个概念具有不同的涵义。材料总是和一定的用场相联系的。材料可由一种物质或若干种物质构成。同一种物质，由于制备方法或加工方法的不同，可成为用场迥异的不同类型的材料。例如对矾土  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，将其制成单晶就成为宝石或激光材料；作成多孔的多晶体，则用作催化剂载体或敏感材料；作成多晶体就为集成电路用的放热基板材料、高温电炉用的炉管或机械切削用的工具材料。但在化学上，它们是同一物质。又如化学组成相同的聚丙烯，由于制备方法和加工成型方法的不同，可制成纤维或者塑料。

70 年代人们把能源、信息和材料归纳为现代物质文明的三大支柱，材料又是一切技术发展的物质基础。材料的使用和发展与生产力和科学技术水平密切相关。人类的历史也可以说是按使用材料的种类来划分的，由史前的“石器时代”经过了“青铜时代”、“铁器时代”，发展到了今天，材料的品种正日新月异地增加。事实上，一个国家使用的材料品种和数量是衡量这个国家科学技术和经济发展水平的重要标志。

以炼金术为开端而发展起来的化学工业为人类以人工方法制备和合成各种材料奠定了基础，开辟了广阔的前途。继铜和铁之后，又冶炼出了各种金属材料。利用天然石灰石、粘土烧制出了水泥。用石英砂、石灰石和苏打熔制出了玻璃，在此基础上建立了冶金和硅酸盐工业的庞大工业体系。近 40 年来，随着石油化工和合成化学的发展又人工合成了橡胶、塑料、纤维、涂料等一系列高分子材料。

最初，各种材料的发展是分别进行，互不相关的。随着科学技术的发展，人们对材料的认识不断深入，积极吸取了近代物理、化学，特别是固体物理、量子化学等基础理论并应用各种先进的分析仪器和尖端技术研究和阐明材料的本性，为认识材料的性能-结构-加工及制备方法与应用之间的关系和探索新材料提供了理论基础。这样就在各种基础学科的渗透和近代科学仪器的帮助下，从本世纪 60 年代开始形成了一门新的综合性学科——材料科学。

材料科学是一门以材料为研究对象，介于基础科学与应用科学之间的应用基础科学。材料科学的内容包括以下几个方面。一是从化学的角度出发，研究材料的化学组成、键性、结构与性能的关系规律；

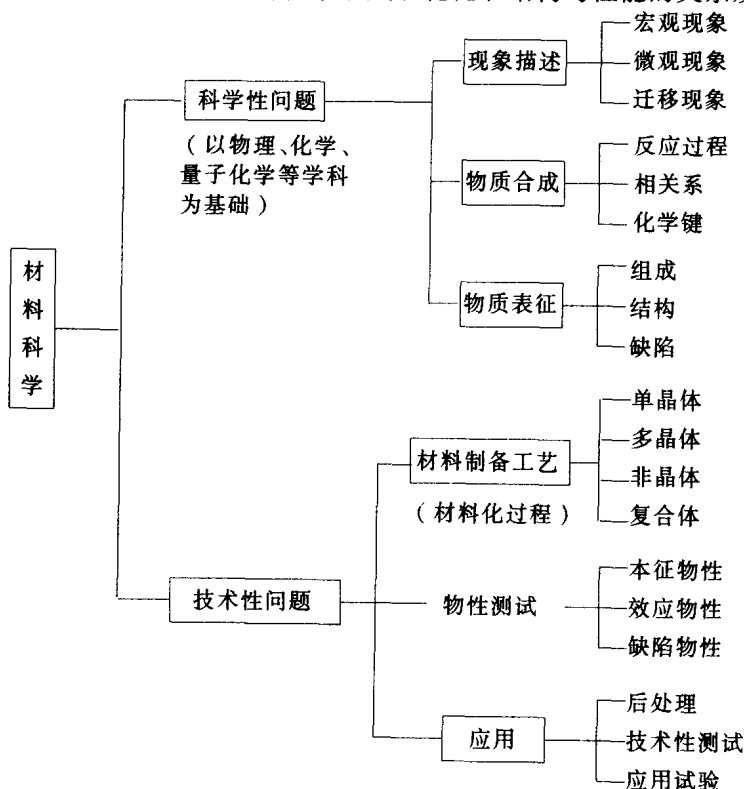


图 1.1 材料科学体系