

高等学校教材

工 程 材 料

(附光盘)

刘新佳 主编
姜银方 姜世杭 副主编
赵永武 主审



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料 / 刘新佳主编. — 北京 : 化学工业出版社, 2005. 11
高等学校教材
ISBN 7-5025-7877-3

I. 工… II. 刘… III. 工程材料-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 133280 号

高等学校教材
工 程 材 料
(附光盘)

刘新佳 主编
姜银方 姜世杭 副主编
赵永武 主审
责任编辑: 程树珍 陈 丽
责任校对: 蒋 宇
封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
购书咨询: (010)64982530
(010)64918013
购书传真: (010)64982630
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市昌平振南印刷厂印刷
三河市海波装订厂装订
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18¼ 字数 445 千字
2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-7877-3
定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

本教材是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》中工程材料的教学基本内容和要求为依据来编写的。为与目前机械类专业少学时、宽口径、重技能的教学改革要求相适应，在适度、够用的前提下以精简理论、加强基础、注重应用、拓宽知识面、更新教材内容为基本编写原则。

本教材的内容体系是以重点高等工科院校《工程材料及机械制造基础》系列课程改革指南中工程材料课程改革参考方案为依据，在总结近几年工程材料及机械制造基础系列课程教改成果和遵循材料科学与工程体系的基础上，将《工程材料》课程内容进行有机整合并优化，以机械工业广泛使用的工程材料为研究对象，以材料的“化学成分—加工工艺—组织结构—性能—应用”为纲，由浅入深地展开。内容编排上力求在探索教材新结构的同时保证教材内容的科学性、先进性、适用性和相对稳定性。

本教材在内容选择上注意根据材料科学与工程的发展，顺应制造工程的实际需要，阐述了现代机械工程技术人员所应必备的材料学基本理论和知识。在重点剖析结构材料的同时，适当地介绍功能材料；在重点分析工业上广泛使用的金属材料的同时，适量地介绍非金属材料、新型材料以及新技术、新工艺等方面的有关知识，尽可能体现教材内容的先进性。注重理论联系实际，学以致用，加强对实际工程能力的培养。

近年来，为与国际先进技术接轨，已对许多材料试验方法标准、材料牌号标准、材料技术条件标准进行了修订，有些更新力度还比较大。本教材力求体现这种更新，采用最新的国家标准和行业标准并增加生产实践中广泛应用的相关图表、资料、经验公式和材料设计实例，以增加本教材的实用性。

为培养学生创造性思维和独立分析与解决实际问题的能力，各章末均附有习题，旨在帮助学生及时理解、消化本章内容。

为在少学时的教学条件下，帮助学生尽快掌握教学内容，我们还进行了以下两方面工作。一是在文字版教材的基础上研制了助学版多媒体教学光盘。光盘除包含全部文字教材内容外，对一些教学上的难点、疑点以及工程实际过程，大量运用自制的动画及视频、图片等形式直观表达，还配有约6万字的多种实用附录和助学资料以减少文字教材篇幅。二是配套设置网上在线学习、考核系统（网址：<http://sme.sytu.edu.cn/reviews/index.asp>）。题型以选择题为主，其特点是题干及题支（备选项）具有双随机性，运行时系统随机地从题库中选择题干，对应于每道题干题支的顺序也随机产生。多名学生同时学习或集中考试时，所选到的同一道题题支的顺序是不固定的，以最大限度地保证学生学习到正确的答案内容而不只是记忆备选项的标号，可以较好地防止在集中学习或考试过程中可能的作弊行为。系统还具有自动记录上线时间、答题情况、统计成绩等功能，可作为检查学习效果的辅助工具，进一步帮助学生培养自主学习的能力、正确理解和应用教学内容。

本书由刘新佳（江南大学）任主编，姜银方（江苏大学）、姜世杭（扬州大学）任副主

编，王海彦（江南大学）参编；多媒体教学光盘由刘新佳和姜世杭负责制作；在线学习、考核系统由刘新佳和赵又力（江南大学）负责研制。编写过程中，江苏大学王宏宇老师提出了许多有益的建议。江南大学“太湖学者”特聘教授、博士生导师赵永武教授审阅了全部书稿并提出了宝贵的修改意见，对此，全体编者表示衷心的感谢！

本书可作为高等学校本科机械类、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用书。

编写过程中，编者参阅了部分国内外相关教材、科技著作及论文，在此向资料作者表示深切的谢意！

由于编者学识所限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

联系方式：jdjg2006@126.com。

编 者

2005 年 10 月

目 录

| | |
|----------------------------------|----|
| 绪论 | 1 |
| 0.1 材料及材料科学的发展 | 1 |
| 0.2 工程材料及其分类 | 2 |
| 0.3 材料科学在机械工程中的地位和作用 | 3 |
| 0.4 工程材料课程的基本任务、学习内容、目的与方法 | 4 |
| 1 材料力学性能 | 6 |
| 1.1 材料的静载力学性能 | 6 |
| 1.1.1 材料承受静拉伸时的力学性能指标 | 6 |
| 1.1.2 硬度 | 10 |
| 1.2 材料的动载力学性能 | 12 |
| 1.2.1 冲击韧性 | 12 |
| 1.2.2 疲劳强度 | 14 |
| 1.3 材料的断裂韧度 | 14 |
| 1.4 材料的高、低温力学性能 | 15 |
| 1.4.1 高温力学性能 | 15 |
| 1.4.2 低温力学性能 | 16 |
| 1.5 材料的磨损性能 | 17 |
| 习题 | 17 |
| 2 材料结构 | 19 |
| 2.1 材料中的原子键合方式 | 19 |
| 2.1.1 金属键 | 19 |
| 2.1.2 离子键 | 19 |
| 2.1.3 共价键 | 20 |
| 2.1.4 分子键 | 20 |
| 2.2 金属晶体结构 | 21 |
| 2.2.1 有关晶体结构的基本概念 | 21 |
| 2.2.2 典型的金属晶体结构 | 21 |
| 2.2.3 实际金属的结构 | 23 |
| 2.3 合金相结构 | 25 |
| 2.3.1 固溶体 | 25 |
| 2.3.2 金属化合物 | 26 |
| 2.4 金属表面结构 | 27 |
| 2.4.1 金属表面的类型 | 27 |
| 2.4.2 金属表面的组织形貌 | 27 |

| | | |
|-------|--------------------|-----|
| 2.5 | 高分子化合物的结构 | 28 |
| 2.5.1 | 大分子链结构 | 29 |
| 2.5.2 | 高分子化合物的聚集态结构 | 30 |
| 2.6 | 陶瓷材料的组织结构 | 30 |
| | 习题 | 31 |
| 3 | 材料相变基础知识 | 32 |
| 3.1 | 纯金属的结晶 | 32 |
| 3.1.1 | 结晶的概念及条件 | 32 |
| 3.1.2 | 结晶过程 | 33 |
| 3.1.3 | 结晶晶粒大小及控制 | 34 |
| 3.1.4 | 晶体的同素异构 | 35 |
| 3.2 | 二元合金相图 | 35 |
| 3.2.1 | 合金相图的建立 | 36 |
| 3.2.2 | 二元合金相图的基本类型 | 37 |
| 3.2.3 | 相图与合金性能的关系 | 42 |
| 3.3 | 铁碳合金相图 | 44 |
| 3.3.1 | 铁碳合金中的基本相 | 44 |
| 3.3.2 | 铁碳合金相图分析 | 45 |
| 3.3.3 | 铁碳合金成分、组织与性能的关系 | 50 |
| 3.3.4 | 铁碳相图的应用简介 | 53 |
| 3.4 | 钢的固态相变 | 54 |
| 3.4.1 | 钢在加热时的转变 | 55 |
| 3.4.2 | 钢在冷却时的转变 | 57 |
| | 习题 | 67 |
| 4 | 材料的改性 | 69 |
| 4.1 | 钢的热处理 | 69 |
| 4.1.1 | 钢的整体热处理工艺 | 70 |
| 4.1.2 | 钢的表面淬火和化学热处理 | 81 |
| 4.1.3 | 先进热处理技术 | 87 |
| 4.1.4 | 热处理常见缺陷 | 91 |
| 4.1.5 | 热处理零件的技术要求 | 94 |
| 4.2 | 金属材料的固溶处理和时效强化 | 95 |
| 4.3 | 金属的形变改性 | 96 |
| 4.3.1 | 塑性变形机理 | 96 |
| 4.3.2 | 冷塑性变形对金属组织与性能的影响 | 99 |
| 4.3.3 | 塑性变形金属在加热时组织与性能的变化 | 102 |
| 4.3.4 | 金属的热塑性变形 | 104 |
| 4.4 | 钢的合金化改性 | 106 |
| 4.4.1 | 钢中常存杂质元素对钢性能的影响 | 106 |
| 4.4.2 | 合金元素在钢中的主要作用 | 107 |
| 4.5 | 高分子材料的改性 | 110 |
| 4.5.1 | 物理改性 | 110 |

| | | |
|-------|------------------|-----|
| 4.5.2 | 化学改性 | 111 |
| 4.6 | 材料表面改性技术 | 112 |
| 4.6.1 | 高能束表面技术 | 112 |
| 4.6.2 | 气相沉积技术 | 115 |
| 4.6.3 | 电镀、刷镀和化学镀 | 117 |
| 4.6.4 | 热喷涂技术 | 120 |
| 4.6.5 | 化学转化膜技术 | 121 |
| 4.6.6 | 表面形变强化 | 123 |
| | 习题 | 123 |
| 5 | 金属材料 | 125 |
| 5.1 | 工业用钢 | 125 |
| 5.1.1 | 钢的分类与牌号 | 125 |
| 5.1.2 | 结构钢 | 132 |
| 5.1.3 | 工具钢 | 150 |
| 5.1.4 | 特殊性能钢 | 162 |
| 5.2 | 铸铁 | 172 |
| 5.2.1 | 铸铁的石墨化 | 172 |
| 5.2.2 | 铸铁的分类与牌号 | 173 |
| 5.2.3 | 灰铸铁 | 174 |
| 5.2.4 | 球墨铸铁 | 177 |
| 5.2.5 | 蠕墨铸铁 | 180 |
| 5.2.6 | 可锻铸铁 | 181 |
| 5.2.7 | 合金铸铁 | 183 |
| 5.3 | 非铁金属及其合金 | 184 |
| 5.3.1 | 铝及铝合金 | 184 |
| 5.3.2 | 铜及铜合金 | 188 |
| 5.3.3 | 钛及钛合金 | 192 |
| 5.3.4 | 轴承合金 | 194 |
| 5.4 | 粉末冶金材料 | 196 |
| 5.4.1 | 粉末冶金机器零件材料 | 196 |
| 5.4.2 | 粉末冶金工具材料 | 197 |
| 5.5 | 新型金属功能材料 | 198 |
| 5.5.1 | 形状记忆材料 | 198 |
| 5.5.2 | 磁性材料 | 200 |
| 5.5.3 | 超导材料 | 202 |
| 5.5.4 | 储氢材料 | 203 |
| 5.5.5 | 智能材料 | 205 |
| 5.5.6 | 功能梯度材料 | 206 |
| 5.5.7 | 纳米材料 | 207 |
| 5.5.8 | 非晶态金属 | 209 |
| | 习题 | 211 |
| 6 | 高分子材料 | 213 |

| | | |
|-------|----------------|-----|
| 6.1 | 高分子材料的基本概念 | 213 |
| 6.1.1 | 高分子化合物的组成 | 213 |
| 6.1.2 | 高分子化合物的合成方法 | 213 |
| 6.1.3 | 高分子化合物的分类 | 214 |
| 6.2 | 高分子材料的性能 | 214 |
| 6.2.1 | 力学性能 | 214 |
| 6.2.2 | 物理化学性能 | 215 |
| 6.2.3 | 高分子化合物的老化及防止措施 | 215 |
| 6.2.4 | 高分子材料性能影响因素分析 | 215 |
| 6.3 | 工程塑料 | 217 |
| 6.3.1 | 塑料的组成及分类 | 217 |
| 6.3.2 | 常用塑料 | 218 |
| 6.3.3 | 几类典型塑料零件的选材 | 220 |
| 6.4 | 橡胶 | 221 |
| 6.4.1 | 橡胶的组成 | 221 |
| 6.4.2 | 常用橡胶 | 222 |
| 6.5 | 合成纤维 | 223 |
| 6.5.1 | 合成纤维的分类 | 223 |
| 6.5.2 | 常用合成纤维 | 224 |
| 6.6 | 胶黏剂 | 224 |
| 6.6.1 | 胶黏剂的分类 | 224 |
| 6.6.2 | 常用胶黏剂 | 225 |
| 6.7 | 涂料 | 226 |
| 6.7.1 | 涂料的组成 | 226 |
| 6.7.2 | 常用涂料 | 226 |
| 6.8 | 功能高分子材料 | 227 |
| 6.8.1 | 离子交换树脂 | 228 |
| 6.8.2 | 导电高分子材料 | 229 |
| 6.8.3 | 液晶高分子材料 | 229 |
| 6.8.4 | 生物医用高分子材料 | 229 |
| | 习题 | 230 |
| 7 | 陶瓷材料 | 231 |
| 7.1 | 陶瓷材料的性能 | 231 |
| 7.1.1 | 力学性能 | 231 |
| 7.1.2 | 物理化学性能 | 231 |
| 7.2 | 常用陶瓷材料 | 231 |
| 7.2.1 | 陶瓷材料的分类 | 231 |
| 7.2.2 | 结构陶瓷材料 | 232 |
| 7.3 | 功能陶瓷材料 | 234 |
| 7.3.1 | 铁电陶瓷 | 235 |
| 7.3.2 | 热释电陶瓷 | 235 |
| 7.3.3 | 压电陶瓷 | 236 |

| | | |
|-------|----------------------|-----|
| 7.3.4 | 铁氧体磁性材料 | 236 |
| 7.3.5 | 半导体陶瓷 | 237 |
| 7.3.6 | 超导陶瓷 | 238 |
| 7.3.7 | 生物陶瓷 | 239 |
| 7.3.8 | 功能陶瓷薄膜 | 240 |
| 7.3.9 | 纳米陶瓷 | 240 |
| | 习题 | 241 |
| 8 | 复合材料 | 242 |
| 8.1 | 复合材料基本知识 | 242 |
| 8.1.1 | 复合材料的分类 | 242 |
| 8.1.2 | 复合材料中的增强材料 | 242 |
| 8.2 | 复合材料的性能及复合增强原理 | 244 |
| 8.2.1 | 复合材料的性能 | 244 |
| 8.2.2 | 复合增强原理 | 245 |
| 8.3 | 常用复合材料 | 246 |
| 8.3.1 | 树脂基复合材料 | 246 |
| 8.3.2 | 金属基复合材料 | 249 |
| 8.3.3 | 陶瓷基复合材料 | 250 |
| 8.3.4 | 其他类型复合材料 | 251 |
| 8.4 | 功能复合材料 | 252 |
| 8.4.1 | 电功能复合材料 | 252 |
| 8.4.2 | 光功能复合材料 | 253 |
| 8.4.3 | 隐身复合材料 | 253 |
| 8.4.4 | 其他功能复合材料 | 254 |
| | 习题 | 255 |
| 9 | 材料的选用 | 256 |
| 9.1 | 选材的基本原则、过程和方法 | 256 |
| 9.1.1 | 选材的基本原则 | 256 |
| 9.1.2 | 选材的基本过程 | 260 |
| 9.1.3 | 选材方法 | 262 |
| 9.2 | 典型机械零件的选材 | 266 |
| 9.2.1 | 齿轮类零件的选材 | 266 |
| 9.2.2 | 轴类零件的选材 | 270 |
| 9.2.3 | 箱体支承类零件的选材 | 274 |
| | 习题 | 276 |
| | 参考文献 | 277 |

绪 论

0.1 材料及材料科学的发展

材料是人们用来制成机器、器件、结构等具有某种特性的物质的实体，人们感触到的任何东西都是由材料构成的。材料和人类社会的关系极为密切，它是人类赖以生活和生存的物质基础。人类所用材料的创新和进步大大推动了社会生产力的发展，它标志着历史发展和人类文明的进程。人类文明的发展史，实际上就是一部学习利用材料、制造材料、创新材料的历史。大约在 25000 年前，人类学会了使用第一种工具材料——石器；公元前 8000 年，人类第一次有意识地创造发明了自然界并没有的新材料——陶器；公元前 2140~1711 年，人类炼出了第一种金属材料——铜；公元前 770~475 年，发明了生铁冶铸技术；1800 多年前，中国掌握了两步炼钢法技术——先炼铁再炼钢，并一直沿用至今；今天随着高纯度、大直径的硅单晶体的研制成功而发展起来的集成电路产生了先进的计算机和电子设备。正因为如此，历史学家根据制造生产工具的材料，将人类生活的时代划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。当今，人类在发展高性能金属材料的同时，也在迅速发展和应用高性能的非金属材料并逐渐跨入人工合成材料的新时代。

然而，长期以来，人们对材料本质的认识是表面的、肤浅的。每种材料的发现、制造和使用过程都要靠工匠人的经验，如听声音、看火候或者祖传秘方等。后来，随着经验的积累，出现了讲述制造过程和规律的“材料工艺学”。18 世纪后，由于工业迅速发展，对材料特别是钢铁的需求急剧增长。为适应这一需要，在化学、物理、材料力学等学科的基础上，产生了一门新的科学——金属学。它明确地提出了金属的外在性能决定于内部结构的概念，并以探讨和研究金属组织和性能之间的关系为自己的主要任务。1863 年光学显微镜问世，并第一次被用于观察和研究金属材料的内部组织结构，出现了“金相学”。1913 年用 X 射线衍射技术研究固体材料的晶体结构和内部原子排列的规律。1932 年发明的电子显微镜以及后来出现的各种谱仪等分析手段，把人们对微观世界的认识带入了更深的层次。此外，化学、量子力学、固体物理等一些与材料有关的基础学科的进展也大大推动了材料研究的深化。陶瓷学、高分子科学等相关应用学科的发展，为上世纪后期跨越多学科的材料科学与工程的形成打下了基础。

材料科学是研究材料化学成分、组织结构和性能之间相互关系及其变化规律的一门科学。它的任务是解决材料的制备问题；合理有效地利用现有材料及不断研制新材料。其任务的实现实际是一个工程问题，故在材料科学这个名词出现后不久提出了材料科学与工程 (MSE) 的概念。材料科学与工程包括四个基本要素，即：成分和结构、合成和加工、性质、使用表现。任何材料都离不开这四个基本要素，这是几千年来人类对材料驾驭过程的总结。材料的合成与加工着重研究获取材料的手段，以工艺技术的进步为标志；材料的成分

(材料所含元素的种类和各元素的相对量)与结构(材料的内部构造)反应材料的本质,是认识材料的理论基础;材料的性质(材料在外界因素作用下表现出来的行为)表征了材料固有的性能如力学性能、物理性能、化学性能等,是选用材料的重要依据;材料的使用表现(材料在使用条件下表现出来的行为)可以用材料的加工性(工艺性能)和服役条件(使用性能)相结合来考察,它常常是材料科学与工程的目标。

1957年11月,原苏联人造卫星被送入太空,对当时的美国造成极大震动。美国政府的调查表明,主要问题在于材料科学与工程相对落后于原苏联。此后,以美国为代表的西方先进工业国家就十分重视材料的研究与开发。这就逐步促进了该(MSE)新兴边缘学科的形成。能源、材料、信息是现代科学技术的三大支柱,在中国也形成了相应的三大支柱产业;而能源与信息产业的发展在很大程度上要依赖于材料的发展。所以,全世界工业技术先进国家都十分重视该领域内的研究与开发。美国的关键技术委员会早在1991年确定的22项关键技术中,材料就占了五项:①材料的合成与加工;②电子和光电子材料;③陶瓷;④复合材料;⑤高性能金属和合金。日本为开拓21世纪科学研究领域选定的基础技术研究项目中共涉及46个领域,其中有关新材料的基础研究项目就占14项之多。

研究材料科学与工程的目标是期望实现按指定性能来进行材料的设计。新材料将建立在“分子设计”基础之上,改变利用化学方法探索和研制新材料的传统做法。将来,新材料的合成,只要通过化学计算,重新组合分子就行了。人类将会完全摆脱对天然材料的依赖,使材料的研究和生产发生根本性变革,人类的物质文明将进入一个令人神往的新时代。

0.2 工程材料及其分类

解决不同工程用途所需要的材料称为工程材料,对本课程而言主要是指固体材料领域中与工程(结构、零件、工具等)有关材料。

现代工程材料种类繁多。据1980年的粗略统计,世界工业发达国家登记注册的材料总和已达36万多种,并且每年还以5%的增长率增加。其中,在机械制造工程中使用的材料通常可按其化学成分、使用功能或开发、使用时间的长短及先进性等进行分类。

机械工程材料按其化学成分分为:金属材料、高分子材料、无机非金属材料 and 复合材料四大类,这是从科学意义和实用意义上综合考虑的最有价值的分类方法。

金属材料是指化学元素周期表B-At线左侧的全部元素和由这些元素构成的合金材料。其主要特征是具有金属光泽、良好的塑性、导电性、导热性、较高的刚度和正的电阻温度系数。这是工程领域中用量最大的一类材料。依据其成分又分为由铁和以铁为基的合金构成的钢铁材料和由除铁外的其他金属及其合金构成的非铁(有色)金属材料两大类,其中钢铁材料因其具有优良的力学性能、工艺性能和低成本等综合优势,占据了主导地位,达金属材料用量的95%,并且这种趋势仍将延续一段时间。

高分子材料由分子量很大的大分子组成,主要含碳、氢、氧、氮、氯、氟等元素。其主要特征是轻,比强度高,橡胶高弹态,耐磨耐蚀,易老化,刚性差,高温性能差。工程上使用的高分子材料是用石油或天然气等作原料,经一系列反应获得的合成高分子材料,包括塑料、合成橡胶、合成纤维等。目前全世界每年生产的高分子材料超过了2亿吨,体积是钢铁的两倍,其中塑料占了约75%。高分子材料具备金属材料不具备的某些特性,发展很快,应用日益广泛,已成为工程上不可缺少甚至不可取代的重要材料。

无机非金属(陶瓷)材料主要由氧和硅或其他金属化合物、碳化物、氯化物等组成。其

主要特征是耐高温、耐蚀，高强度，高脆性，无塑性。按照习惯，陶瓷一般分为传统陶瓷和特种陶瓷两大类。传统陶瓷主要包括用于日用、建筑、卫生等领域的陶瓷以及工业上应用的电器绝缘陶瓷（高压电瓷）、化工耐酸陶瓷和过滤陶瓷等。特种陶瓷具有独特的力学、物理、化学、电、磁、光学等性能，能满足工程技术的特殊要求，是发展宇航、原子能和电子等高、精、尖科学技术不可缺少的材料，并已成为高温材料和功能材料的主力军。

复合材料是由两种或两种以上不同化学性质或不同组织结构的物质，通过人工制成的一种多相固体材料。按增强相的性质和形态，可分为细粒复合材料、纤维复合材料、层叠复合材料、骨架复合材料及涂层复合材料等。最常用的是纤维复合材料，如玻璃纤维复合材料（即玻璃钢）、碳纤维复合材料、硼纤维复合材料、金属纤维复合材料和须晶复合材料等。由于复合材料集中了各类单纯材料（金属材料、高分子材料及陶瓷材料）的优点，因此曾在20世纪下半叶得到很大进展，今后仍可望得到进一步发展。

当然，上述各种材料之间也存在着交叉关系，如非晶态金属介于金属和非金属之间；复合材料把金属和非金属结合起来。

机械工程材料按其使用功能分为结构材料和功能材料两大类。结构材料主要是利用它们的强度、硬度、韧性、弹性等力学性能，用以制造受力为主的构件，是机械工程、建筑工程、交通运输、能源工程等方面的物质基础。结构材料包括金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料。功能材料主要是利用它们所具有的电、光、声、磁、热等功能和物理效应而形成的一类材料。它们在电子、红外、激光、能源、计算机、通讯电子、空间等许多新技术的发展中起着十分重要的作用。

机械工程材料按其开发、使用时间的长短及先进性可分为传统材料和新型材料两类。传统材料是指那些已经成熟且长期在工程中大量应用的材料，如钢铁、塑料等。其特征是需求量大、生产规模大，但环境污染严重。新型材料是指那些为适应高新技术产业需求而正在发展且具有优异性能和应用前景的材料，如新型高性能金属材料、特种陶瓷、陶瓷基和金属基复合材料等。其特征是投资强度大、附加值高、更新换代快、风险性大、知识和技术密集程度高，一旦成功，回报率也较高，且不以规模取胜。2003年发生的伊拉克战争，实际上是海、陆、空、天、电五维高技术战争。包括使用的主战坦克、隐形飞机及间谍卫星等，无一例外都使用了许多新材料。新材料成为现代战争中高技术武器装备的物质基础。但传统材料与新型材料间并无严格的界限。

鉴于工程材料数量巨大、品种繁多，本课程从机械工程技术人员必须具备的选材、用材知识要求出发，考虑金属材料在机械行业使用的广泛性，将其研究对象限定为已经标准化的、具有特定的化学成分、组织结构、固有特性和规定用途的一类材料，重点介绍金属材料，特别是钢铁材料。

0.3 材料科学在机械工程中的地位和作用

作为基础工业，机械工业为各行各业提供了大量的机械装备；而各种机械装备又都是由性能各异的工程材料加工成各种零件并装配而成的。作为机械科学的重要组成部分，材料科学与工程对机械工业的发展产生了巨大的推动作用。

当前机械工程正向着大型、微型、高速、耐高温、耐高压、耐低温和耐受恶劣环境等方向发展。这就要求材料在机械产品规定的服役期内，在保证功能稳定、可靠的同时满足机械加工的各种工艺条件对材料的质量要求。从材料对飞机性能的影响中可以看到材料对提高机

械产品质量所起的作用。航空发动机是飞机的核心，自 1941 年喷气式飞机问世以来，航空发动机的性能不断提高，主要表现为推力的不断提高。由于发动机的工作温度每提高 100℃，其推力可提高约 15%，通过材料与工艺的创新，其关键部件涡轮叶片耐热温度的提高在其中作出了巨大贡献。目前涡轮叶片的耐热温度已在 1093℃ 以上，更高耐热温度涡轮叶片也已在开发之中。此外，飞机自重的减轻有 70% 是靠材料实现的。可见，材料科学的发展为保证机械产品质量提供了重要保障。

对于机械工程技术人员，在进行产品设计选材及必不可少地考虑后续加工时，面临着许多种可能的选择。事实上一个好材料的选用，应是设计—材料—工艺—用户（效果）最佳组合的结果。材料设计作为机械设计过程的核心内容，对机械装备技术功能的发挥具有举足轻重的作用。设计是以材料的性能数据为依据的。材料科学的发展，使人类对材料性能随其化学组成、内部微观组织结构和条件变化的规律的认识逐步深入。材料微观组织及缺陷和材料宏观性能之间定量和半定量关系的建立，为高水平的机械设计提供了重要依据。

在机械制造中，材料的工艺性能在很大程度上决定着适宜加工方法的选择，也直接影响到生产效率。如机械制造中约有 70% 的零件最后需经刀具切削加工，而机床的切削速度往往决定于刀具材料的性能。刀具材料由高碳钢到高速钢、硬质合金、金属陶瓷的变化，使切削速度从不到 10m/min 提高到 200m/min 甚至 500m/min。新材料的应用还使一些传统工艺发生了革命性的变化。因此，材料科学的发展极大地推进了机械制造工艺的进步。

材料科学的发展，新材料的不断涌现，使机械制造中一些合金资源消耗大、成形困难材料的消耗比例不断下降，非金属材料特别是高分子材料部分替代了钢铁和非铁金属材料，改善了机械工业的用材结构。

0.4 工程材料课程的基本任务、学习内容、目的与方法

工程材料的成分不同，其性能也就不同。例如，纯铁非常软、强度低，而在纯铁中加入一定量的碳，便成了钢，它的硬度高、强度大。但是成分相同的工程材料，通过不同的改性处理，性能也会随之改变。例如，钳工用的锯条硬而脆、易折断，但加热烧红后缓慢冷却下来时会变得软而韧。这表明化学成分并不是工程材料性能上产生差异的惟一原因，工程材料的性能还与它的内部构造即组织结构有关。锯条在使用状态下内部是高硬度的组织，而加热缓冷后形成的则是一种硬度较低的内部组织。可见，成分是决定材料组织结构的内因，而加工工艺是决定组织结构的外因。成分和工艺的改变，将会引起材料组织结构的变化，从而引起性能的变化。对于金属材料，最常用的改性工艺是热处理。热处理即是通过在固态下加热、保温、冷却等过程使金属内部组织发生变化从而得到所要求性能的工艺。本课程作为材料科学的应用部分，其基本任务就是建立材料的成分、内部组织、加工（改性处理）工艺与性能之间的关系，找出相互影响规律，以便通过控制材料的成分和加工过程来控制其组织，提高材料性能，充分发挥材料的性能潜力。此外，从机械工程实践过程来看，材料科学与工程的基础知识对于机械工程技术人员来说也是必不可少的。在解决工程应用问题时，机械工程技术人员必须了解工程材料的分类、性能以及选材因素、选材原则和选材方法等。所以，本课程的学习内容主要有：材料科学和工程的基础知识，包括材料性能、材料结构、材料相变基础知识和材料改性等；工程材料学的基础知识，包括各类常用材料的成分、组织、性能特征及选用等。

通过上述内容的学习，期望能达到以下目的：熟悉常用工程材料的成分、加工工艺、组

织结构与性能之间的关系及其变化规律；初步掌握常用材料的性能与应用范围，具备选用常用材料的初步能力，正确合理地选材、用材；对一般简单机械零件初步具备选定加工处理方法特别是确定金属材料热处理工艺方法的能力，能正确地制定热处理工艺技术要求及妥善安排加工工艺路线；对失效机件，能运用材料科学的基础知识进行初步分析，判断大致的失效原因，为机械设计提供依据。

工程材料课程是一门理论性和实践性都很强的技术基础课，特别是材料科学基础理论部分比较抽象，而很多理论又来源于生产实践和科学实验。因此，需要理论联系实际地学习，除对理论知识的系统学习外，还必须认真对待一些实践性环节的学习（如实验和后续的课程设计等）。通过操练和运用，使所学知识得到巩固与提高，进而真正掌握这方面的知识。此外，与已学习过的其他一些课程相比，本课程有不同的特点，如它的公式和计算不多，但概念很多，叙述性内容多，需要理解、记忆的内容多。因此学习中需要改进思维方式，调整和改进学习方法，注重主动学习、自主学习，提高学习效率。应注意运用已学过的知识，注重于分析、理解与应用，特别是注意前后知识的综合运用，把相对分散、孤立的材料科学知识转变为系统而整体的印象，培养独立分析问题与解决问题的能力，从而真正达到上述的学习目的。

1 材料力学性能

材料性能是指材料在外界因素作用下表现出来的行为。材料的力学性能是材料在一定环境因素下承受外加载荷时所表现出的行为，通常表现为变形（材料受到载荷作用而产生的几何形状和尺寸的变化）与断裂。材料用于结构零件时，其力学性能是工程设计的重要依据。当材料以其他性能如物理、化学性能为主要使用要求时，其力学性能同样是设计的主要参考依据。不同使用条件下，材料所承受的外力的性质和环境条件是各种各样的，对材料力学性能的要求也是各不相同的，本章主要讨论几种常用力学性能指标的意义和应用。

1.1 材料的静载力学性能

静载荷是指大小不变或变化过程缓慢的载荷。材料的静载力学性能指标主要有强度、塑性和硬度等。

1.1.1 材料承受静拉伸时的力学性能指标

材料承受静拉伸时的力学性能指标是通过拉伸试验测定的。其过程为：将被测材料按 GB/T228—2002 要求制成标准拉伸试样（图 1-1），在拉伸试验机上夹紧试样两端，缓慢地

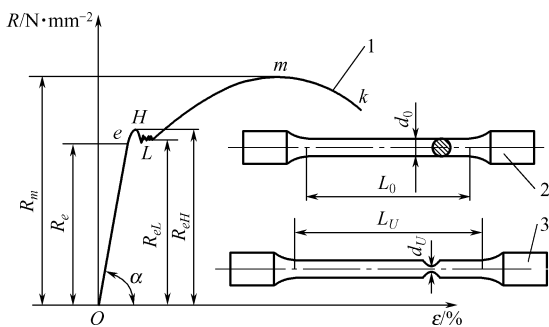


图 1-1 拉伸试样与拉伸曲线

1—低碳钢拉伸曲线；2—拉伸试样；3—拉断后的试样

对试样施加轴向拉伸力，使试样被逐渐拉长，最后被拉断。通过试验可以得到拉伸力 F 与试样伸长量 ΔL 之间的关系曲线（称为拉伸曲线）。为消除试样几何尺寸对试验结果的影响，将拉伸试验过程中试样所受的拉伸力转化为试样单位面积上所受的力称为应力，用 R 表示，即 $R = F/S_0$ ，单位为 N/mm^2 ①；试样伸长量转化为试样单位长度上的伸长量称为应变，用 ϵ 表示，即 $\epsilon = \Delta L/L_0$ ，从而得到 $R-\epsilon$ 曲线（图 1-1），其形状与 $F-\Delta L$ 曲线完全一致。

拉伸曲线中， Oe 段为直线，即在应力不超过 R_e 时，应力与应变成正比关系，此时，将外力去除后，试样将恢复到原来的长度。这种能够完全恢复的变形称为弹性变形；当应力超过 R_e 后，试样的变形不能完全恢复而产生永久变形，这种永久变形称为塑性变形。当应力增大至 H 点后，曲线呈近似水平直线状，即应力不增大而试样伸长量在增加，这种现象称

① GB/T228—2002 规定采用国际单位制单位（SI 单位）。应力单位 N/mm^2 和 MPa ，都是国际单位制的倍数单位，两者都是中国规定的法定计量单位。标准中，应力单位采用了 N/mm^2 ，而 $1N/mm^2 = 1MPa$ ，如果使用应力单位 MPa ，不认为是错误，但从标准的归一化意义上来说，应力单位应采用 N/mm^2 ，为此本书统一采用 N/mm^2 。

为屈服。屈服后试样产生均匀的塑性变形，应力增大到 m 点后，试样产生不均匀的塑性变形，即试样发生局部直径变细的“颈缩”现象。至 k 点时，试样在颈缩处被拉断。

通过对拉伸曲线的分析，可以直接在曲线上读出一系列强度指标并可根据试验结果计算出塑性指标值。

1.1.1.1 弹性和刚性

材料的弹性指标主要是指弹性极限，刚性指标则是指材料的弹性模量。

(1) 弹性极限 (R_e)

弹性极限是指在产生完全弹性变形时材料所能承受的最大应力。即

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

式中 F_e ——试样完全弹性变形时所能承受的最大载荷，N；

S_0 ——试样原始截面积， mm^2 。

实际上 R_e 只是一个理论上的物理定义，对于实际使用的工程材料，用普通的测量方法很难测出准确而惟一的弹性极限数值，因此，为了便于实际测量和应用，一般规定以残余应变量为（即微量塑性变形量）为 0.01% 时的应力值作为“规定弹性极限”（或称“条件弹性极限”）。工程上，对于服役条件不允许产生微量塑性变形的弹性元件（如汽车板簧、仪表弹簧等）均是按弹性极限 R_e 来进行设计选材的。

(2) 弹性模量 (E)

弹性模量是指在应力应变曲线上完全弹性变形阶段，应力与应变的比值。即：

$$E = \frac{R}{\epsilon}$$

在工程上 E （单位 N/mm^2 ）称为材料的刚度，是材料的重要力学性能指标之一，它表征材料对弹性变形的抗力。其值愈大，材料产生一定量的弹性变形所需要的应力愈大，表明材料不容易产生弹性变形，即材料的刚度大。在机械工程中的一些零件或构件，除了满足强度要求外，还应严格控制弹性变形量，如锻模、镗床的镗杆，若没有足够的刚度，所加工的零件尺寸就不精确。

实际工件的刚度首先取决于其材料的弹性模量 E ，不同的材料，其刚度差异很大。陶瓷材料的刚度最大，金属材料与复合材料次之，而高分子材料最低。常用的金属材料中，钢铁材料刚性最好，铜及铜合金次之（为钢铁材料的 $2/3$ 左右），铝及铝合金最差（为钢铁材料的 $1/3$ 左右）。实际工件的刚度除取决于材料的弹性模量外还与工件的形状和尺寸有关。

需要指出的是，金属材料的弹性模量 E 主要决定于基体金属的性质，当基体金属确定时，难于通过合金化、热处理、冷热加工等方法使之改变，即 E 是结构不敏感性参数，如钢铁材料是铁基合金，不论其成分和组织结构如何变化，室温下的 E 值均在 $(20 \sim 21.4) \times 10^4 \text{ N}/\text{mm}^2$ 范围之内。而陶瓷材料、高分子材料、复合材料的弹性模量对其成分和组织结构是敏感的，可以通过不同的方法使之改变。

1.1.1.2 强度

强度是指材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。常用的材料强度指标有屈服强度和抗拉强度等。

(1) 屈服强度

屈服强度是指当材料呈现屈服现象时，在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点，区分为上屈服强度和下屈服强度。上屈服强度 (R_{eH}) 是试样发生屈服而力首次下降前的最高应力；下屈服强度 (R_{eL}) 是指在屈服期间，不计初始瞬时效应时的最低应力。即

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$$

式中 F_{eH} ——试样发生屈服而力首次下降前承受的最大载荷，N；

F_{eL} ——试样发生屈服时承受的最小载荷，N；

S_0 ——试样原始截面积， mm^2 。

对于无明显屈服现象的材料，则规定以残余应变达到 0.2% 时的应力值作为屈服强度，即所谓的“条件屈服强度”，记作 $R_{r0.2}$ 。

这里必须指出，国标 GB/T 228—2002 中并无条件屈服强度及前述的弹性极限等术语，而是统一成“规定残余延伸强度”并记作 R_r 。标准中不采用弹性极限、条件屈服强度等术语，这是因为理论上所定义的弹性极限、条件屈服强度在技术上却难以按定义进行准确而唯一的测定。而在实际工程中弹性极限、条件屈服强度等在本质上都是一样的，都是材料开始产生微量塑性变形时的应力值，只不过根据生产实际对它们所规定的微量塑性变形量不同，以满足不同的工程设计要求。

屈服强度是工程上最重要的力学性能指标之一。其工程意义在于：①绝大多数零件，如紧固螺栓、汽车连杆、机床丝杠等，在工作时都不允许产生明显的塑性变形，否则将丧失其自身精度或与其他零件的相对配合受影响，因此屈服强度（一般为下屈服强度）是防止材料因过量塑性变形而导致机件失效的设计和选材依据；②根据屈服强度与抗拉强度之比（屈强比）的大小，衡量材料进一步产生塑性变形的倾向，作为金属材料冷塑性变形加工和确定机件缓解应力集中防止脆性断裂的参考依据。因为提高材料的屈服强度，虽然可以减轻机件质量，不易使机件产生塑性变形失效，但如果材料屈服强度与抗拉强度的比值增大，则不利于某些应力集中部位通过局部塑性变形使应力重新分布、缓解应力集中，从而可能导致脆性断裂。因此，对于具体机件，应根据其形状、尺寸及服役条件而定，不宜一味追求高的屈服强度。

(2) 抗拉强度 (R_m)

抗拉强度是指材料在拉伸过程中，相应最大力的应力。即：

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

式中 F_m ——试样在屈服阶段之后所能抵抗的最大力，对于无明显屈服（连续屈服）的金属材料，为试验期间的最大力，N；

S_0 ——试样原始截面积， mm^2 。

抗拉强度是工程上最重要的力学性能指标之一。对塑性较好的材料， R_m 表示了材料对最大均匀变形的抗力；而对塑性较差的材料，一旦达到最大载荷，材料迅即发生断裂，故 R_m 也是其断裂抗力（断裂强度）指标。不论何种材料， R_m 均是标志其在承受拉伸载荷时的实际承载能力，是高分子材料和陶瓷材料选材的重要依据。对塑性变形要求不严而仅要求不发生断裂的金属零件如钢丝绳、建筑结构件等，为减轻自重， R_m 也常作为其设计与选材依据。此外，因 R_m 易于测定，适于作为产品规格说明或质量控制指标，广泛出现在标准、合同、质量证明等文件资料中。

1.1.1.3 塑性

塑性是指材料在外力作用下能够产生永久变形而不破坏的能力。常用的塑性指标有断后伸长率和断面收缩率。

(1) 断后伸长率 (A)

断后伸长率是指断后试样标距与原始标距之比的百分率。即：