



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等学校理工科材料类规划教材  
第六届全国高校出版社优秀畅销书二等奖

# 机械工程材料

MECHANICAL ENGINEERING MATERIALS

于永泗 齐民/主编

(第八版)



大连理工大学出版社  
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等学校理工科材料类规划教材  
第六届全国高校出版社优秀畅销书二等奖

# 机械工程材料

MECHANICAL ENGINEERING MATERIALS

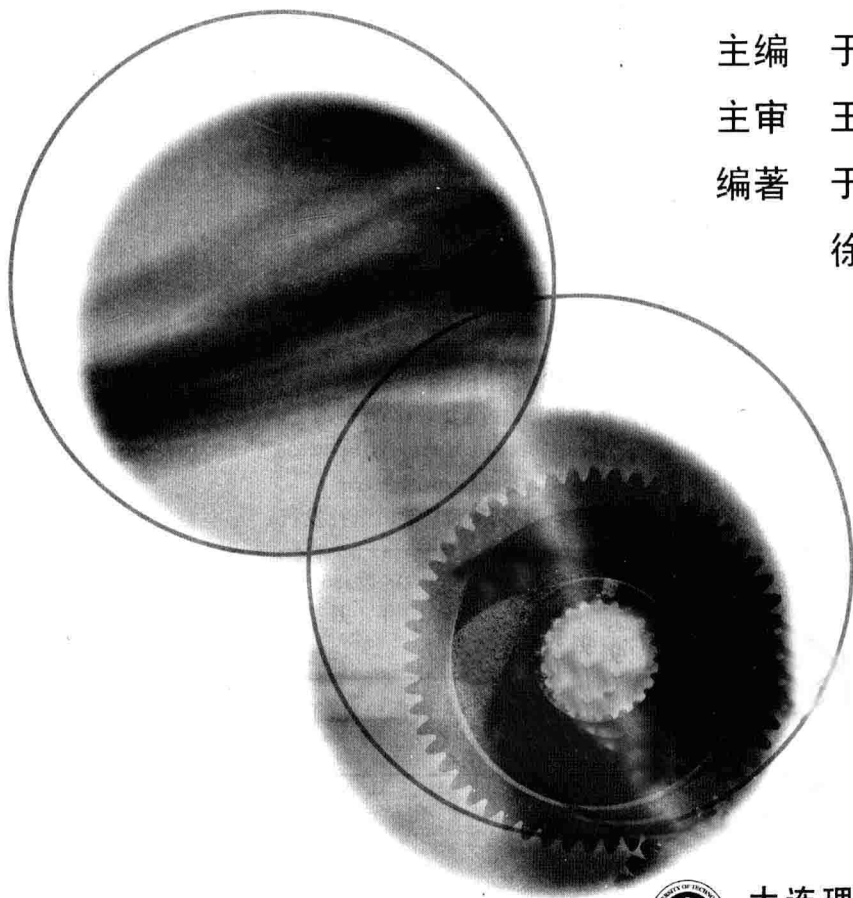
(第八版)

主编 于永泗 齐民

主审 王焕庭

编著 于永泗 齐民

徐善国 王来



大连理工大学出版社  
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料 / 于永泗,齐民主编. —8版. —大连:大连理工大学出版社, 2010.1(2011.2重印)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5611-0368-5

I. 机… II. ①于…②齐… III. ①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(2007)第 016540 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 传真:0411-84701466 邮购:0411-84703636

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连业发印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

---

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:15.75 字数:359千字

1988年8月第1版

2010年1月第8版

2011年2月第26次印刷

---

责任编辑:刘新彦 于建辉

责任校对:王辉

封面设计:宋蕾

---

ISBN 978-7-5611-0368-5

定 价:25.00 元

# 前 言

“机械工程材料”是高等学校机械类和近机械类各专业的技术基础课,该课程的教学目的是从机械工程的应用角度出发,阐明机械工程材料的基本理论,介绍常用的机械工程材料及其应用等基本知识,使学生了解材料的化学成分、加工工艺、微观组织结构及性能之间的关系。

本教材经过不断修订和逐步完善,特色日益凸显:

**1. 致力于科学性、系统性和实用性相结合,既体现教材的理论特点,又尽可能使其具有工程参考价值**

本书在理论知识的编写上吸收了国内外同类教材的优点,力求做到全面、科学、系统、准确;同时,密切结合工程设计的实际需要,列举了许多在实际生产过程中具有较大参考价值和借鉴意义的应用实例。

**2. 体系完整,结构合理**

本教材按照性能—结构—凝固—加工工艺(塑性变形、热处理)—常用工程材料—选材的顺序编排和讲解。包括材料科学与工程的基础理论知识(第1~5章)、各种常用工程材料的特点与应用(第6~12章)、零部件的失效(第13章)等内容。

**3. 编写精练,适合课时普遍减少条件下的教学要求**

本教材虽然字数不多,但内容体系是众多编者精心设计的,力求在尽可能少的学时里达到教学基本要求,努力拓展读者的知识面。

**4. 与前沿信息接轨,采用最新国家标准**

本教材中收集的数据和资料尽可能采用当前最新的信息,需要采用国家标准之处,按照目前最新的国家标准执行,以便于教师和学生掌握最新技术信息,也为工程技术人员查阅最新技术资料提供了方便。

本次修订,根据钢铁产品和铸铁牌号表示方法、碳素结构钢、低合金高强度结构钢、弹簧钢、碳素工具钢、高速工具钢、不锈钢和耐热钢、球墨铸铁、工业纯钛及钛合金、切削工具用硬质合金、变形铝合金状态代号、冲击性能、钢的退火与正火等标准的更新,对教材中的相应内容、图表和附录进行了修改、增删及调整。

增加了“镁及镁合金”一节。

本教材自 1988 年出版以来,先后经过 7 次再版修订。本教材于 2004 年获得第六届全国高校出版社优秀畅销书二等奖,2006 年入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本教材第 1~4 版由王焕庭教授、李芋华教授、徐善国教授等先后担任主编,崔朝令教授、于永泗教授、王来教授参加了部分章节的编写工作;第 5~8 版由王焕庭教授负责主审,于永泗教授、齐民教授担任主编;吕其瑜、徐卫平、程蓉娟等同志协助提供了插图和照片(第 1 版),在此一并表示衷心的感谢!

本书适于作为高等学校机械、动力、船舶、化工机械等学科各专业本科或专科学生的教材,也可作为有关工程技术人员的参考书。

本教材一直得到广大师生的厚爱,国内众多高等学校将此书选做教学用书,我们也接到许多来自各高校师生的反馈。真诚地期待广大读者在继续支持我们的同时,能够提出宝贵的意见和建议,多多给予批评指正!

与本教材配套的教学课件和《机械工程材料 辅导·习题·实验》(第 3 版)已经出版,如有需要,请通过以下方式与大连理工大学出版社联系:

电话 0411-84707962 84708947

邮箱 jcyj@dutp.cn

编者  
2010 年 1 月

# 目 录

## 第0章 绪论 /1

- 0.1 材料与材料科学 /1
- 0.2 工程材料的分类及应用 /2
- 0.3 机械工程材料课程的目的、内容和  
学习要求 /3

## 第1章 材料的性能 /4

- 1.1 材料的力学性能 /4
  - 1.1.1 材料的应力-应变曲线 /4
  - 1.1.2 强度与塑性 /5
  - 1.1.3 硬度 /6
  - 1.1.4 冲击韧性 /8
  - 1.1.5 疲劳 /9
  - 1.1.6 断裂韧性 /10
  - 1.1.7 热疲劳 /11
- 1.2 材料的物理和化学性能 /11
  - 1.2.1 材料的物理性能 /11
  - 1.2.2 材料的化学性能 /12
- 1.3 材料的工艺性能 /12
  - 1.3.1 铸造性 /12
  - 1.3.2 可锻性 /12
  - 1.3.3 可焊性 /12
  - 1.3.4 切削加工性 /13

思考题 /13

## 第2章 材料的结构 /14

- 2.1 原子的结合方式 /14
  - 2.1.1 离子键 /14
  - 2.1.2 共价键 /14
  - 2.1.3 金属键 /15
  - 2.1.4 分子键 /15
- 2.2 晶体结构的基本概念 /16

- 2.2.1 晶体与非晶体 /16
- 2.2.2 晶格 /16
- 2.2.3 晶胞 /16
- 2.2.4 立方晶系的晶面和  
晶向表示方法 /17

### 2.3 金属的结构 /18

- 2.3.1 金属的晶态结构 /18
- 2.3.2 金属的非晶态结构 /26

### 2.4 陶瓷的结构 /26

- 2.4.1 晶相 /26
- 2.4.2 玻璃相 /28
- 2.4.3 气相 /28

### 2.5 高分子材料的结构 /28

- 2.5.1 高分子化合物的组成 /29
- 2.5.2 大分子链的结构 /29
- 2.5.3 高分子的聚集态结构 /30

### 2.6 扩散 /30

- 2.6.1 扩散的宏观规律 /30
- 2.6.2 扩散机制 /32
- 2.6.3 影响扩散的因素 /32

思考题 /33

## 第3章 材料的凝固 /34

- 3.1 纯金属的结晶 /34
  - 3.1.1 结晶的热力学条件 /34
  - 3.1.2 纯金属的结晶过程 /35
  - 3.1.3 同素异构转变 /36
- 3.2 合金的结晶 /37
  - 3.2.1 二元相图的建立 /37
  - 3.2.2 二元相图的基本类型与  
分析 /38
- 3.3 铁碳合金相图 /47

- 3.3.1 铁碳合金的组元和相 /47
  - 3.3.2 铁碳合金相图的分析 /48
  - 3.3.3 典型铁碳合金的平衡结晶过程 /50
  - 3.3.4 含碳量对铁碳合金组织和性能的影响 /57
  - 3.4 凝固组织及其控制 /58
    - 3.4.1 金属及合金结晶后的晶粒大小及其控制 /59
    - 3.4.2 铸锭的组织及其控制 /60
- 思考题 /61

#### 第4章 金属的塑性变形与再结晶 /62

- 4.1 金属的塑性变形 /62
  - 4.1.1 单晶体金属的塑性变形 /62
  - 4.1.2 多晶体金属的塑性变形 /65
- 4.2 合金的塑性变形与强化 /66
  - 4.2.1 单相固溶体合金的塑性变形与固溶强化 /66
  - 4.2.2 多相混合物合金的塑性变形与弥散强化 /66
- 4.3 塑性变形对金属组织和性能的影响 /67
  - 4.3.1 塑性变形对金属组织的影响 /67
  - 4.3.2 塑性变形对金属性能的影响 /68
  - 4.3.3 残余内应力 /68
- 4.4 回复与再结晶 /68
  - 4.4.1 冷变形金属在加热时的组织和性能变化 /68
  - 4.4.2 再结晶温度 /70
  - 4.4.3 再结晶退火后的晶粒度 /70
- 4.5 金属的热加工 /71
  - 4.5.1 冷加工与热加工的区别 /71
  - 4.5.2 热加工对金属组织和性能的影响 /71

思考题 /72

#### 第5章 钢的热处理 /73

- 5.1 概述 /73

- 5.2 钢在加热时的转变 /74
    - 5.2.1 奥氏体的形成过程 /74
    - 5.2.2 奥氏体的晶粒大小及其影响因素 /75
  - 5.3 钢在冷却时的转变 /75
    - 5.3.1 过冷奥氏体的转变产物及转变过程 /75
    - 5.3.2 过冷奥氏体转变图 /81
  - 5.4 钢的退火与正火 /83
    - 5.4.1 退火 /83
    - 5.4.2 正火 /84
  - 5.5 钢的淬火与回火 /85
    - 5.5.1 淬火 /85
    - 5.5.2 回火 /89
  - 5.6 钢的表面热处理 /92
    - 5.6.1 表面淬火 /92
    - 5.6.2 化学热处理 /93
  - 5.7 金属材料表面处理新技术 /96
    - 5.7.1 热喷涂技术 /96
    - 5.7.2 气相沉积技术 /97
    - 5.7.3 三束表面改性技术 /98
- 思考题 /99

#### 第6章 工业用钢 /101

- 6.1 钢的分类与编号 /101
  - 6.1.1 钢的分类 /101
  - 6.1.2 钢的编号 /102
- 6.2 钢中杂质与合金元素 /105
  - 6.2.1 钢中常存杂质元素对性能的影响 /105
  - 6.2.2 合金元素在钢中的主要作用 /106
- 6.3 结构钢 /109
  - 6.3.1 碳素结构钢 /109
  - 6.3.2 优质碳素结构钢 /110
  - 6.3.3 低合金高强度结构钢 /110
  - 6.3.4 渗碳钢 /113
  - 6.3.5 调质钢 /115
  - 6.3.6 弹簧钢 /117
  - 6.3.7 滚动轴承钢 /119

- 6.3.8 耐磨钢 /120
- 6.4 工具钢 /121
  - 6.4.1 刃具钢 /121
  - 6.4.2 模具钢 /128
  - 6.4.3 量具钢 /131
- 6.5 特殊性能钢 /131
  - 6.5.1 不锈钢 /131
  - 6.5.2 耐热钢和高温合金 /135
- 思考题 /141

## 第7章 铸铁 /142

- 7.1 概 述 /142
  - 7.1.1 铸铁的石墨化过程 /142
  - 7.1.2 铸铁的特点及分类 /144
- 7.2 常用铸铁 /145
  - 7.2.1 灰铸铁 /145
  - 7.2.2 可锻铸铁 /146
  - 7.2.3 球墨铸铁 /148
  - 7.2.4 蠕墨铸铁 /150
- 思考题 /151

## 第8章 有色金属及其合金 /153

- 8.1 铝及铝合金 /153
  - 8.1.1 铝合金的分类 /154
  - 8.1.2 铝合金的热处理 /154
  - 8.1.3 铝合金的牌号、性能及用途 /154
- 8.2 铜及铜合金 /159
  - 8.2.1 黄 铜 /159
  - 8.2.2 青 铜 /161
  - 8.2.3 白 铜 /164
- 8.3 钛及钛合金 /164
  - 8.3.1 钛 /164
  - 8.3.2 钛合金 /165
- 8.4 镁及镁合金 /167
  - 8.4.1 变形镁合金 /167
  - 8.4.2 铸造镁合金 /167
- 8.5 轴承合金 /169
  - 8.5.1 组织性能要求 /169
  - 8.5.2 常用轴承合金 /169

思考题 /171

## 第9章 高分子材料 /172

- 9.1 概 述 /172
  - 9.1.1 高分子材料的分类和命名 /172
  - 9.1.2 高分子材料的力学状态 /173
  - 9.1.3 常用高分子材料的化学反应 /174
- 9.2 常用高分子工程材料 /174
  - 9.2.1 工程塑料 /174
  - 9.2.2 合成橡胶 /178
- 思考题 /179

## 第10章 陶瓷材料 /180

- 10.1 概 述 /180
  - 10.1.1 陶瓷材料的特点 /180
  - 10.1.2 陶瓷材料的分类 /180
- 10.2 常用工业陶瓷 /181
  - 10.2.1 普通陶瓷 /181
  - 10.2.2 特种陶瓷 /181
- 思考题 /185

## 第11章 复合材料 /186

- 11.1 概 述 /186
  - 11.1.1 复合材料的分类和命名 /186
  - 11.1.2 复合材料的特点 /187
- 11.2 粒子增强复合材料 /187
- 11.3 层状复合材料 /189
- 11.4 纤维增强复合材料 /189
  - 11.4.1 纤维增强复合原则 /189
  - 11.4.2 纤维的种类和性能 /190
  - 11.4.3 纤维增强聚合物基复合材料 /191
  - 11.4.4 纤维增强金属基复合材料 /192
  - 11.4.5 纤维增强陶瓷基复合材料 /193
- 思考题 /194



**第 12 章 新型材料 /195**

- 12.1 形状记忆合金 /195
  - 12.1.1 形状记忆效应 /195
  - 12.1.2 形状记忆效应的机理 /195
  - 12.1.3 形状记忆合金的应用 /196
- 12.2 非晶态合金 /197
  - 12.2.1 非晶态合金的制备 /198
  - 12.2.2 非晶态合金的特性 /198
  - 12.2.3 非晶态合金的应用 /199
- 12.3 超塑性合金 /201
  - 12.3.1 超塑性现象 /201
  - 12.3.2 超塑性合金 /202
  - 12.3.3 超塑性合金的应用 /203
- 12.4 纳米材料 /204
  - 12.4.1 纳米材料的特性 /204
  - 12.4.2 纳米材料的分类 /205
  - 12.4.3 纳米材料的制备 /205
  - 12.4.4 纳米新材料 /206
  - 12.4.5 纳米复合材料 /206
  - 12.4.6 纳米材料的应用 /207

思考题 /209

**第 13 章 零部件的失效与选材 /210**

- 13.1 零部件的失效 /210

- 13.1.1 失效形式 /210
  - 13.1.2 失效原因 /212
  - 13.1.3 失效分析 /213
  - 13.2 零部件的选材 /215
    - 13.2.1 选材的基本原则 /215
    - 13.2.2 典型零部件选材及工艺分析 /217
    - 13.2.3 典型设备及装置选材 /223
- 思考题 /229

**附 录 /231**

- 附录 1 常用钢种的临界温度 /231
- 附录 2 金属热处理工艺分类及代号 /232
- 附录 3 变形铝及铝合金状态代号 /234
- 附录 4 新旧 GB 700 标准牌号对照 /234
- 附录 5 国内外部分钢号对照 /235
- 附录 6 化学元素周期表 /236
- 附录 7 关键词汉英对照及索引 /237

参考文献 /242

# 绪 论

## 0.1 材料与材料科学

材料是用来制作有用器件的物质,是人类生产和生活所必须的物质基础。从日常生活用的器具到高技术产品,从简单的手工工具到复杂的航天器、机器人,都是用各种材料制作而成或由其加工的零件组装而成。纵观人类历史,每当一种新材料出现并得以利用,都会给社会生产和人类生活带来巨大的变化。历史学家按照人类所使用材料的种类将人类历史划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代。材料的发展水平和利用程度已成为人类文明进步的标志之一:没有半导体材料的工业化生产,就不可能有目前的计算机技术;没有高温高强度的结构材料,就不可能有今天的航空航天工业;没有光导纤维,也就没有现代的光纤通讯。20世纪70年代,人们把材料与能源、信息并列,称为现代文明的三大支柱,而材料又是后两者的基础。

中华民族在人类历史上为材料的发展和应用作出过重大贡献。早在公元前6000~公元前5000年的新石器时代,我们的先人就能用黏土烧制陶器,到东汉时期又出现了瓷器,并流传海外。4000年前的夏朝时期,我们的祖先已经能够炼铜,到殷、商时期,我国的青铜冶炼和铸造技术已达到很高水平。从河南安阳晚商遗址出土的司母戊鼎(图0-1)质量达875 kg,且饰纹优美。从湖北江陵楚墓中发掘出的两把越王勾践的宝剑(图0-2),长55.6 cm,至今锋利异常,是我国青铜器的杰作。我国从春秋战国时期(公元前770~公元前221年)便开始大量使用铁器,明朝科学家宋应星在其所著的《天工开物》一书中就记载了古代的渗碳热处理等工艺。这说明早在欧洲工业革命之前,我国在金属材料及热处理方面就已经有了较高的成就。中华人民共和国成立后,我国先后建起了鞍山、攀枝花、宝钢等大型钢铁基地,钢产量由1949年的15.8万吨上升到2005年的3.52亿吨,成为世界上产钢大国之一。原子弹、氢弹的爆炸,卫星、飞船的上天等都说明我国在材料的开发、研究及应用等方面有了飞跃性的发展。

从简单地利用天然材料、冶铜炼铁到使用热处理工艺,人类对材料的认识是逐步深入的。18世纪欧洲工业革命后,人们对材料的质量和数量的要求越来越高,促进了材料科学的进一步发展。1863年,光学显微镜首次应用于金属研究,诞生了金相学,使人们步入了材料的微观世界,能够将材料的宏观性能与微观组织联系起来,标志着材料研究从经验走向科学。1912年,X射线对晶体的作用被发现,并在随后用于晶体衍射分析,使人们对固体材料

微观结构的认识从最初的假想到科学的现实。19世纪末,晶体的230种空间群被确定,至此人们已经可以完全用数学的方法来描述晶体的几何特征。1932年,电子显微镜的发明把人们带到了微观世界的更深层次( $10^{-7}\text{m}$ )。1934年位错理论的提出,解决了晶体理论计算强度与实验测得的实际强度之间存在巨大差别的问题,对于人们认识材料的力学性能及设计高强度材料具有划时代的意义。一些与材料有关的基础学科(如固体物理、量子力学、化学等)的发展,有力地促进了材料研究的深化。

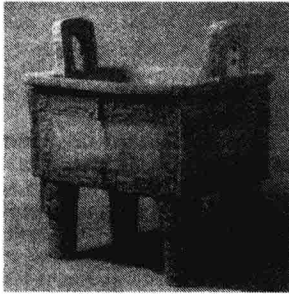


图 0-1 司母戊鼎

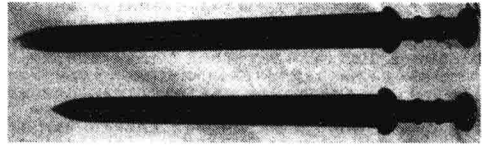


图 0-2 越王勾践的宝剑

材料科学是以材料为研究对象的一门科学,它以凝聚态物理和物理化学、晶体学为理论基础,结合冶金、机械、化工等领域的研究成果,探讨材料的成分、工艺、组织结构及性能之间的内在规律,并联系具体器件或构件的使用功能要求,力求用经济合理的办法制备出有效的器件或构件。因此,材料科学是现代机械工程、电子技术和高技术工业发展的基础。材料科学的研究内容包括:材料的化学组成、组织结构与性能之间的关系,材料的形成机理和制取方法,材料物理性能的测试方法和技术,材料的损坏机理,材料的合理加工方法和最佳使用方案等。特别是材料的组织结构与性能之间的关系,是材料科学研究的重点。

材料的化学成分是指组成材料各元素在材料中的浓度,简称成分。材料的组织是指用肉眼或借助于不同放大倍数的显微镜所观察到的金属内部的情景。习惯上把用肉眼或几十倍放大镜观察到的组织称为低倍组织或宏观组织,放大100~2000倍观察到的组织称为高倍组织或显微组织,在电子显微镜下放大几千到几十万倍观察到的组织称为精细组织或电镜组织。材料的结构是指材料中各原子的具体组合状态,一般借助X射线或透射电子显微镜来研究。

## 0.2 工程材料的分类及应用

工程材料是指在机械、船舶、化工、建筑、车辆、仪表、航空航天等工程领域中用于制造工程构件和机械零件的材料。按照材料的组成、结合键的特点,可将工程材料分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料四大类。

金属材料是以金属键结合为主的材料,具有良好的导电性、导热性、延展性和金属光泽,是目前用量最大、应用最广泛的工程材料。金属材料分为黑色金属和有色金属两类。铁及铁合金称为黑色金属,即钢铁材料,2005年其世界年产量已达10亿吨,在机械产品中的用量占全部用材的60%以上。黑色金属之外的所有金属及其合金称为有色金属,有色金属的种类很多,根据其特性的不同又可分为轻金属、重金属、贵金属、稀有金属等。

陶瓷材料是以共价键和离子键结合为主的材料,其性能特点是熔点高、硬度高、耐腐蚀、脆性大。陶瓷材料分为传统陶瓷、特种陶瓷和金属陶瓷三类。传统陶瓷又称普通陶瓷,是以天然材料(如黏土、石英、长石等)为原料的陶瓷,主要用做建筑材料;特种陶瓷又称精细陶瓷,是以人工合成材料为原料的陶瓷,常用做工程上的耐热、耐蚀、耐磨零件;金属陶瓷是金属与各种化合物粉末的烧结体,主要用做工具和模具。

高分子材料是以分子键和共价键结合为主的材料,具有塑性、耐蚀性、电绝缘性、减振性好及密度小等特点。工程上使用的高分子材料主要包括塑料、橡胶及合成纤维等,在机械、电气、纺织、汽车、飞机、轮船等制造业和化学、交通运输、航空航天等工业中有广泛应用。

复合材料是把两种或两种以上不同性质或不同结构的材料以微观或宏观的形式组合在一起而形成的材料,通过这种组合可达到进一步提高材料性能的目的。复合材料分为金属基复合材料、陶瓷基复合材料和聚合物基复合材料。如现代航空发动机燃烧室中承受温度最高的材料就是通过粉末冶金法制备的氧化物粒子弥散强化的镍基合金复合材料。很多高级游艇、赛艇及体育器械等是由碳纤维复合材料制成的,它们具有密度低、弹性好、强度高等优点。

### 0.3 机械工程材料课程的目的、内容和学习要求

随着经济的飞速发展和科学技术的进步,对材料的要求越来越苛刻,工程材料向高比强、高刚度、高韧性、耐高温、耐腐蚀、抗辐照和多功能的方向发展,新材料也在不断地涌现。

机械工业是材料应用的重要领域。无论是制造机床,还是建造轮船、石油化工设备,都要求产品技术先进、质量高、寿命长、造价低。因此,随着机械工业的发展,在产品设计与制造过程中,会遇到越来越多的材料及材料加工方面的问题。这就要求机械工程技术掌握必要的材料科学与材料工程知识,具备正确选择材料和加工方法、合理安排加工工艺路线的能力。“机械工程材料”课程正是为实现这一目标而设置的。

机械工程材料课程是机械类和近机类各专业的重要技术基础课,课程的目的是使学生获得工程材料的基本理论知识,掌握材料的化学成分、组织结构、加工工艺与性能之间的关系,了解常用材料的应用范围和加工工艺,初步具备合理选用材料、正确确定加工方法、妥善安排加工工艺路线的能力。

机械工程材料课程的内容包括:①材料科学与工程的基础理论知识(第1~5章);②各种常用工程材料的特点与应用(第6~12章);③零部件的失效与选材(第13章)。按照性能—结构—凝固—加工工艺(塑性变形、热处理)—常用工程材料—选材的顺序编排和讲解。

机械工程材料课程是一门理论性和实践性都很强的课程,基本概念多,与实际联系密切。因此,在学习时应注意联系物理、化学、工程力学及金属工艺学等课程的相关内容,以加深对本课程内容的理解;结合生产与应用的实际,注重分析、理解和运用,强调前后知识的整体联系和综合应用。

# 材料的性能

我们在选用材料时,首先必须考虑材料的有关性能,使之与构件的使用要求相匹配。材料的性能一般分为使用性能和工艺性能两大类。使用性能是指材料在使用过程中所表现的性能,包括力学性能、物理性能和化学性能。工艺性能是指材料在加工过程中所表现的性能,包括铸造、锻压、焊接、热处理和切削加工性能等。

由于力学性能是结构件选材的主要依据,因此本章主要介绍材料的力学性能,对材料的物理和化学性能及工艺性能做简单介绍。

## 1.1 材料的力学性能

材料在加工和使用过程中,总要受到外力作用。材料受外力作用时所表现的性能称为力学性能(又称机械性能),如强度、塑性、硬度、韧性及疲劳强度等。材料在外力作用下将发生形状和尺寸变化,称为变形。外力去除后能够恢复的变形称为弹性变形,不能够恢复的变形称为塑性变形。

### 1.1.1 材料的应力-应变曲线

评价材料的力学性能最简单有效的方法就是测定材料的拉伸曲线。将标准试样(图 1-1)施加一单轴拉伸载荷,使之发生变形,直至断裂,便可得到试样应变  $\epsilon$  随应力  $\sigma$  变化的关系曲线,称为应力-应变曲线(其中,  $\epsilon$  为试样原始标距的增量  $\Delta l = l - l_0$  与原始标距  $l_0$  之比,  $l$  为试验期间任一时刻的标距,  $\sigma$  为外力  $P$  与试样原始横截面积  $F$  之比)。图 1-2 为低碳钢的应力-应变曲线。

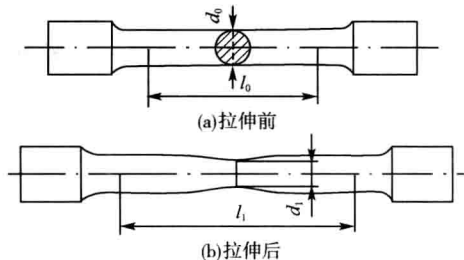


图 1-1 圆形标准拉伸试样

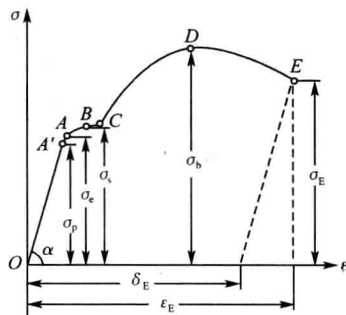


图 1-2 低碳钢的应力-应变曲线

在应力-应变曲线中,OA段为弹性变形阶段,此时卸掉载荷,试样可恢复到原来尺寸。A点所对应的应力为材料承受最大弹性变形时的应力,称为弹性极限,用 $\sigma_e$ 表示。OA'部分为一斜直线,应力与应变呈比例关系,A'点所对应的应力为保持这种比例关系的最大应力,称为比例极限,用 $\sigma_p$ 表示。由于大多数材料的A点和A'点几乎重合,一般不做区分。

低于比例极限的应力与相应应变的比值称为弹性模量 $E$ 。 $E$ 实际上是线段OA的斜率: $E = \tan \alpha = \sigma/\epsilon$ (单位:MPa),其物理意义是产生单位弹性变形时所需应力的大小。弹性模量是材料最稳定的性质之一,它的大小主要取决于材料的本性,除随温度升高而逐渐降低外,其他强化材料的手段如热处理、冷热加工、合金化等对弹性模量的影响很小。材料受力时抵抗弹性变形的能力称为刚度,其指标即为弹性模量。一般可以通过增加横截面积或改变截面形状的方法来提高零件的刚度。

## 1.1.2 强度与塑性

### 1. 强度

材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力称为强度。根据外力加载方式不同,强度指标有许多种,如屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度、抗扭强度等。其中以拉伸试验测得的屈服强度和抗拉强度两个指标应用最多。

#### (1) 屈服强度

在图1-2中,应力超过B点后,材料将发生塑性变形。在BC段,塑性变形发生而应力不增加,这种现象称为屈服。B点所对应的应力称为屈服强度,用 $\sigma_s$ 表示。屈服强度反映材料抵抗永久变形的能力,是最重要的零件设计指标之一。实际上多数材料的屈服强度不很明显,因此规定拉伸时产生0.2%残余变形所对应的应力为条件屈服强度,记为 $\sigma_{p0.2}$ ( $R_{p0.2}$ ),如图1-3所示。

(注:括号内为GB/T 228—2002中的符号,下同。)

#### (2) 抗拉强度

图1-2中,CD段为均匀塑性变形阶段。在这一阶段,应力随应变增加而增加,产生应变强化。变形超过D点后,试样开始发生局部塑性变形,即出现颈缩,随应变增加,应力明显下降,并在E点迅速断裂。D点所对应的应力为材料断裂前所承受的最大应力,称为抗拉强度,用 $\sigma_b$ ( $R_m$ )表示。抗拉强度反映材料抵抗断裂破坏的能力,也是零件设计和材料评价的重要指标。

### 2. 塑性

塑性是指材料受力破坏前承受最大塑性变形的能力,指标为伸长率和断面收缩率。

试样被拉断后,标距部分的残余伸长与原始标距之比的百分率称为伸长率 $\delta(A)$ 。

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

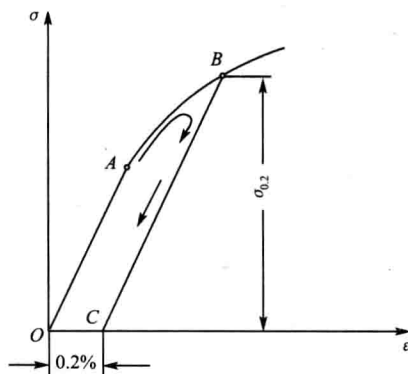


图1-3 条件屈服强度的确定

式中,  $l_0(L_0)$  为原始标距,  $l_1(L_1)$  为断后标距。

试样断裂后, 横截面积最大缩减量与原始横截面积之比的百分率称为断面收缩率  $\psi(Z)$ 。

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中,  $F_0(S_0)$  为原始横截面积,  $F_1(S_1)$  为断后最小横截面积。

显然,  $\delta$  与  $\psi$  值越大, 材料的塑性越好。两者相比, 用  $\psi$  表示塑性比用  $\delta$  表示更接近于真实应变。当  $\delta > \psi$  时, 试样无颈缩, 是脆性材料的表征; 反之,  $\delta < \psi$  时, 试样有颈缩, 是塑性材料的表征。试样  $d_0(d)$  不变时, 随  $l_0$  增加,  $\delta$  下降, 只有当  $l_0/d_0$  为常数时, 不同材料的伸长率才有可比性。当  $l_0 = 10d_0 (L_0 = 11.3 \sqrt{S_0})$  时, 伸长率用  $\delta_{10}(A_{11.3})$  表示; 当  $l_0 = 5d_0 (L_0 = 5.65 \sqrt{S_0})$  时, 伸长率用  $\delta_5(A)$  表示。很明显  $\delta_5 > \delta_{10}$ 。

从拉伸曲线还可以得到材料的韧性信息。所谓材料的韧性是指材料从变形到断裂整个过程所吸收的能量, 即拉伸曲线与横坐标所包围的面积。

### 1.1.3 硬度

硬度是指材料抵抗局部塑性变形的能力, 现在多用压入法测定。根据测量方法不同, 常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。用各种方法所测得的硬度值不能直接比较, 可通过硬度对照表换算。

#### 1. 布氏硬度

布氏硬度的试验原理如图 1-4 所示。对一定直径  $D$  的硬质合金球施加试验力  $F$  压入试样表面, 经规定保持时间  $t$  后, 卸除试验力, 测量试样表面压痕的直径。试验力除以压痕表面积所得的商即为布氏硬度值。

$$\begin{aligned} \text{布氏硬度} &= \text{常数} \times \frac{\text{试验力}}{\text{压痕表面积}} = 0.102 \times \frac{F}{\pi Dh} \\ &= 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \end{aligned}$$

式中,  $F$  为试验力, N;  $D$  为硬质合金球直径, mm;  $h$  为压痕深度, mm;  $d$  为在两相互垂直方向测量的压痕平均直径, mm。

实际测量时, 可由测出的压痕平均直径  $d$  直接查表得到布氏硬度值。

布氏硬度用符号 HBW 表示, 符号 HBW 的前面为硬度值数字, 符号后面是按  $D/F/t$  顺序表示的试验条件的指标, 如 600HBW1/30/20 表示用直径 1 mm 的硬质合金球在 294.2 N 试验力下保持 20 s 测定的布氏硬度值为 600。

布氏硬度的优点是测量误差小, 数据稳定; 缺点是压痕大, 不能用于太薄件(试样厚度至少应为压痕深度的 8 倍)、成品件及硬度大于 650HBW 的材料。可用于硬度较低的退火钢、正火钢、调质钢、铸铁及有色金属的原料和半成品的硬度测量。

某些材料, 如钢、黄铜和铸铁等, 其抗拉强度与布氏硬度之间存在着大致的比例关系。

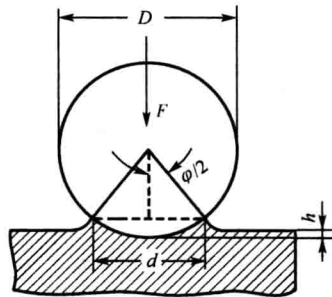


图 1-4 布氏硬度的试验原理

对于钢,  $\sigma_b$  与 HBW 之间的经验关系为

$$\sigma_b (\text{MPa}) \approx 3.55 \times \text{HBW} (\leq 175 \text{HBW})$$

$$\sigma_b (\text{MPa}) \approx 3.38 \times \text{HBW} (> 175 \text{HBW})$$

## 2. 洛氏硬度

洛氏硬度的试验原理如图 1-5 所示。将压头(金刚石圆锥、硬质合金球)分两个步骤压入试样表面, 经规定保持时间后, 卸除主试验力, 测量在初试验力下的残余压痕深度  $h$ 。

$$\text{洛氏硬度} = \frac{\text{常数} - h}{S} = N - \frac{h}{S}$$

式中,  $h$  为卸除主试验力后, 在初试验力下压痕残留的深度, 即残余压痕深度, mm;  $S$  为给定标尺的硬度单位, mm;  $N$  为给定标尺的硬度数。

实际测量时, 硬度值可从洛氏硬度计的表盘上直接读出。

洛氏硬度用符号 HR 表示, 根据压头和主试验力不同, 分为 11 个标尺, 最常用的标尺是 A、B、C, 见表 1-1。符号 HR 的前面为硬度值数字, 符号后面为使用的标尺字母, 如 59HRC 表示用 C 标尺测得的洛氏硬度值为 59。使用钢球压头的标尺, 在硬度符号后面加“S”; 使用硬质合金球压头的标尺, 在硬度符号后面加“W”。如 60HRBW 表示用硬质合金球压头在 B 标尺上测得的洛氏硬度值为 60。

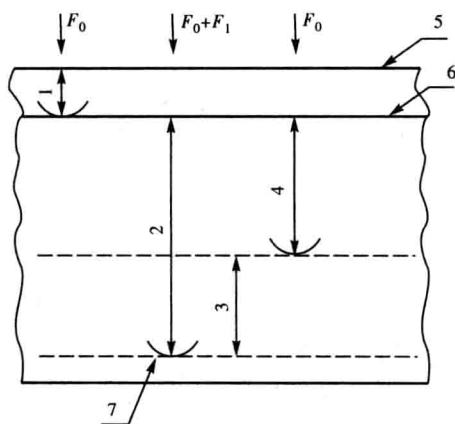


图 1-5 洛氏硬度的试验原理

1—在初试验力  $F_0$  下的压入深度; 2—由主试验力  $F_1$  引起的压入深度; 3—卸除主试验力  $F_1$  后的弹性回复深度; 4—残余压入深度  $h$ ; 5—试样表面; 6—测量基准面; 7—压头位置

表 1-1

常用洛氏硬度标尺(摘自 GB/T 230.1—2009)

洛氏硬度标尺	硬度符号	压头类型	硬度数 $N$	硬度单位 $S/\text{mm}$	初试验力 $F_0/\text{N}$	主试验力 $F_1/\text{N}$	总试验力 $F/\text{N}$	适用范围	表盘刻度颜色	典型应用
A	HRA	金刚石圆锥	100	0.002	98.07	490.3	588.4	20HRA ~ 88HRA	黑	硬质合金、渗碳层、表面淬火层
B	HRB	直径1.587 5 mm 球	130	0.002	98.07	882.6	980.7	20HRB ~ 100HRB	红	铜合金、铝合金, 软钢、可锻铸铁
C	HRC	金刚石圆锥	100	0.002	98.07	1 373	1 471.1	20HRC ~ 70HRC	黑	淬火低温回火钢、钛合金

洛氏硬度的优点是操作简便、压痕小、适用范围广, 可用于成品件的检验; 缺点是测量结果分散度大, 重复性差, 各标尺的洛氏硬度值不能互相比较。

## 3. 维氏硬度

维氏硬度的试验原理如图 1-6 所示。将顶部两相对面具有规定角度( $136^\circ$ )的正四棱锥体金刚石压头用试验力  $F$  压入试样表面, 保持规定时间后, 卸除试验力, 测量试样表面压痕对角线长度。试验力除以压痕表面积所得的商即为维氏硬度。



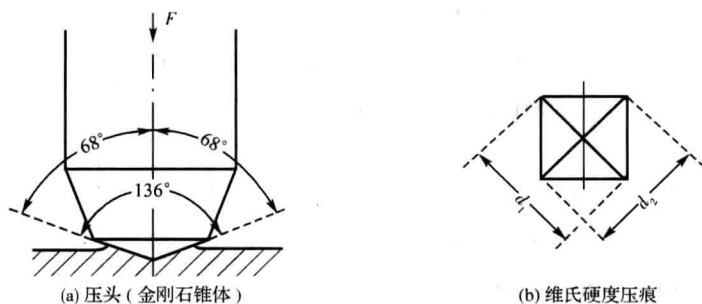


图 1-6 维氏硬度的试验原理

$$\text{维氏硬度} = \text{常数} \times \frac{\text{试验力}}{\text{压痕表面积}} = 0.102 \times \frac{2F \sin(136^\circ/2)}{d^2} \approx 0.1891 \times \frac{F}{d^2}$$

式中,  $F$  为试验力, N;  $d$  为压痕两对角线长度  $d_1$ 、 $d_2$  的算术平均值, mm。

实际测量时, 维氏硬度值可通过测量压痕对角线的平均长度  $d$  查表得到。

维氏硬度用符号 HV 表示, 符号 HV 的前面为硬度值数字, 符号后面的数字按顺序分别表示试验力及试验力保持时间(10~15 s 不标注)。如 640HV30/20 表示在 294.2 N 试验力下保持 20 s 测定的维氏硬度值为 640。根据施加的试验力范围不同, 规定了 3 种维氏硬度的测定方法, 见表 1-2。

表 1-2 维氏硬度的测定方法及试验力的选用(摘自 GB/T 4340.1—2009)

维氏硬度试验		小力值维氏硬度试验		显微维氏硬度试验	
硬度符号	试验力 $F/N$	硬度符号	试验力 $F/N$	硬度符号	试验力 $F/N$
HV5	49.03	HV0.2	1.961	HV0.01	0.098 07
HV10	98.07	HV0.3	2.942	HV0.015	0.147 1
HV20	196.1	HV0.5	4.903	HV0.02	0.196 1
HV30	294.2	HV1	9.807	HV0.025	0.245 2
HV50	490.3	HV2	19.61	HV0.05	0.490 3
HV100	980.7	HV3	29.42	HV0.1	0.980 7

维氏硬度保留了布氏硬度和洛氏硬度的优点, 既可测量由极软到极硬材料的硬度, 又能互相比较。既可测量大块材料、表面硬化层的硬度, 又可测量金相组织中不同相的硬度。缺点是需要在显微镜下测量压痕尺寸, 操作不如洛氏硬度法简便。

### 1.1.4 冲击韧性

许多机械零件、构件或工具在服役时, 会受到冲击载荷的作用, 如活塞销、冲模和锻模等。材料抵抗冲击载荷作用而不破坏的能力称为冲击韧性。在如图 1-7 所示的摆锤式冲击试验机上用规定高度的摆锤对处于简支梁状态的缺口试样进行一次冲断, 摆锤冲断试样前后的势能差称为冲击吸收能量(单位: J), 用  $K$  表示(V 型和 U 型缺口试样的冲击吸收能量分别用  $KV$  和  $KU$  表示)。冲击吸收能量即为冲击韧性的度量。冲击试验所用试样为标准夏比缺口试样, 如图 1-8 所示。

实践表明, 冲击韧性对材料的一些缺陷很敏感, 能够灵敏地反映出材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化, 因而是生产上用来检验冶炼、热加工得到的半成品和成品质量