



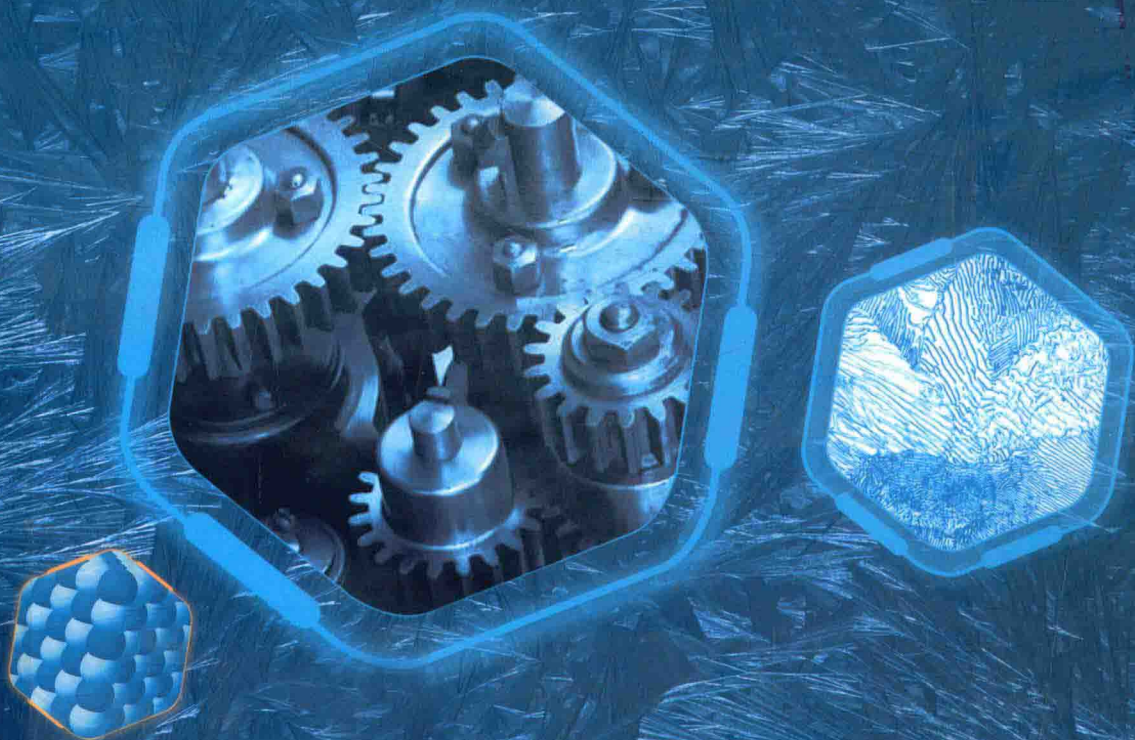
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等学校理工科材料类规划教材  
第六届全国高校出版社优秀畅销书二等奖

# 机械工程材料

MECHANICAL ENGINEERING MATERIALS

齐民 于永泗 主编

(第十版)



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



# 机械工程材料

MECHANICAL ENGINEERING MATERIALS

齐民 于永泗 主编

(第十版)



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 / 齐民, 于永泗主编. — 10 版. —  
大连: 大连理工大学出版社, 2017. 7  
ISBN 978-7-5685-0791-2

I. ①机… II. ①齐… ②于… III. ①机械制造材料  
—高等学校—教材 IV. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 103249 号

(第十策)

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 邮购: 0411-84708943 传真: 0411-84701466

E-mail: dutp@dutp.cn URL: http://dutp.dlut.edu.cn

大连力佳印务有限公司印刷

大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 185mm×260mm

印张: 15.75

1988 年 8 月第 1 版

2017 年 7 月第 1 次印刷

字数: 361 千字

2017 年 7 月第 10 版

责任编辑: 于建辉

责任校对: 薛蕾

封面设计: 奇景创意

ISBN 978-7-5685-0791-2

定 价: 32.00 元

本书如有印装质量问题, 请与我社发行部联系更换。



# 前 言

装备制造业以机械、汽车、船舶、航空航天为主,同时涉及冶金、能源、化工、信息等多种国民经济的重要行业。在装备设计与制造过程中,材料的选择与应用一直是需要考虑的基础和重要因素,特别是在尖端领域,材料的性能往往是整个装备实现高性能的限制性环节。

“机械工程材料”是高等学校装备设计与制造专业的技术基础课,其宗旨是使非材料专业的本科生能在约 50 学时的教学过程中建立起材料科学与工程的整体思维方式。不仅要掌握有关材料性能的基本概念,更重要的是建立一种性能与成分、组织结构以及加工工艺之间相互关联的理念,强化宏观与微观相互关联的观念,从而为其选择材料并使该材料达到最佳性能提供一个总体思路。

我国正经历由装备制造大国向装备制造强国转变的过渡期,装备制造业越来越精细化、信息化、国际化,相关的标准变化也很快。在信息技术的引领下,装备制造业正在发生革命性的变革。这些变革不仅影响工业,也在改变着人们的生活方式甚至思维方式。为适应这种变化,本书的内容也在不断调整。本次修订是在《机械工程材料》(第九版,大连理工大学出版社,2012 年)的基础上,根据装备制造业的发展对本科生的要求,参考国内外同类课程教学实践经验,为适应装备制造专业本科生对材料方面知识的要求进行的。

本书在编写及历次修订中注意保持及突出以下特色:

(1)既完善了材料科学与工程的基础理论部分,也拓展了现代工程实践,特别是高科技常用材料介绍的内容,保持科学性、系统性和实用性相结合。

(2)基础理论部分除了系统简要介绍材料科学与工程的基本概念外,更加重视材料的性能与成分、组织结构、加工工艺的关联,力求使学生将繁多的概念相互串联起来。

(3)工程中常用材料部分延续了基础理论部分的理念,介绍了工程中常用的金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料的加工特点、具体结构与性能,以及在装备制造领域的主要应用等。为使学生易于理解,每一类材料都介绍了一种典型零件(结构)。

(4)在每章开篇增加了一个经典案例,以增强学生的阅读兴趣和对内容的理解。

本次修订工作主要从以下几个方面进行:

(1)为适应装备制造业的发展对材料的新要求和教材的整体逻辑性,将第九版第3章“材料的凝固”改为“材料的平衡凝固及相变”。内容也集中在理想的平衡冷却过程上。原第5章“钢的热处理”改为“材料相变的动力学特征及非平衡相变”,将原3.4节“凝固组织及其控制”移到第5章。第5章在保留钢的热处理内容的基础上,增加了一般相变动力学规律(材料相变的动力学特征)、材料相变的微观过程、单相固溶体合金结晶时的成分偏析、过饱和固溶与析出、伪共析转变、非晶合金转变、金属焊缝的组织与力学性能等。尽可能包括机械工程领域所涉及材料的主要非平衡相变。

(2)考虑到材料表面处理越来越重要,将第九版第5章中“钢的表面热处理”部分进行扩展,并增加了目前广泛采用的多种材料的主要表面改性技术原理和方法,单独形成了“材料表面技术”一章(第6章)。

(3)考虑到新型材料发展迅速,内容更新较快,不适于作为教材内容,因而删掉了原“新型材料”一章,将非晶合金作为非平衡凝固过程的一部分加入第5章。

(4)根据我国向装备制造强国转变对材料的要求,对“工程用钢”部分进行了较大调整。增加了汽车工业面板常用的IF钢(无间隙原子钢)、马氏体时效钢、抗蠕变钢、低温用钢、沉淀硬化不锈钢、耐热钢等高技术用钢。简要介绍了以物理性能为主的钢和以工艺性能为主的钢。第8章“铸铁”增加了特殊性能铸铁。

(5)为使教材内容相对集中,删除原“零部件的失效与选材”一章,将其主要内容渗透到工程中常用材料介绍部分,作为典型案例来介绍,帮助学生理解从材料到器件的加工工艺及原则。

(6)考虑到我国工业标准在不断变化,为保持内容的相对稳定性,本次修订弱化标准的细节,重点从材料科学与工程规律性出发,以使建立材料的宏观性能与微观组织结构及加工工艺的联系为宗旨,为装备制造类学生在今后工作中设计器件,选择材料,以及制定合理工艺提供一种思路。

(7)本次修订一个重要的考虑是实用性,因而增加了一些与实验和工程实践相关的内容,如金属材料、陶瓷材料、高分子材料加工工艺、材料的结构表征方法、典型机械零件的热加工工艺,特别是热处理方面的内容等。

本书可作为高等学校机械、动力、汽车、船舶、航空航天等学科各专业本科或专科学生的教材,也可供有关工程技术人员参考。

作为“机械工程材料”课程的负责人,齐民教授在本次修订过程中负责教材

整体设计及主要内容调整。于永泗教授全程参与了教材内容的讨论及审核。王伟强、董旭峰副教授参与了部分章节的修订。本教材第1~4版由王焕庭教授、李茅华教授、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5~9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!

近十几年我国装备制造业快速发展,涉及机械工程材料的参考书也是异彩纷呈。本次修订过程中我们也参考了不少同类教材和文章,在此向这些文献的作者及同行表示敬意。

由于编者学识、能力等方面的限制,教材中一定还存在很多不足甚至错误之处,请广大读者不吝赐教,我们将不胜感谢。

如果您有任何意见或建议,请通过以下方式与大连理工大学出版社联系:

邮箱 [jcjf@dutp.cn](mailto:jcjf@dutp.cn)

电话 0411-84708947

编者

2017年6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 /3
- 0.3 课程的目的、内容和学习要求 /3

## 第1章 材料的性能及表征 /5

- 1.1 材料及构件的常见失效形式 /5
- 1.2 材料的力学性能 /6
  - 1.2.1 拉伸试验 /7
  - 1.2.2 硬度试验 /9
  - 1.2.3 冲击试验 /11
  - 1.2.4 疲劳试验 /12
  - 1.2.5 断裂韧性 /13
  - 1.2.6 蠕变与松弛 /14
- 1.3 材料的化学性能 /15
  - 1.3.1 材料腐蚀及耐腐蚀性 /15
  - 1.3.2 材料氧化及抗氧化性 /15
- 1.4 材料的物理性能 /16
  - 1.4.1 密度 /16
  - 1.4.2 熔点 /16
  - 1.4.3 热膨胀性 /16
  - 1.4.4 导热性 /17
  - 1.4.5 导电性 /17
  - 1.4.6 磁性 /17
- 1.5 材料的工艺性能 /17
  - 1.5.1 金属材料的工艺性能 /18
  - 1.5.2 高分子材料的工艺性能 /18
  - 1.5.3 陶瓷材料的工艺性能 /19

扩展读物 /19

思考题 /19

## 第2章 材料的结构 /20

- 2.1 原子的结合方式 /20
  - 2.1.1 离子键 /20
  - 2.1.2 共价键 /21
  - 2.1.3 金属键 /21
  - 2.1.4 分子键 /22
- 2.2 晶体结构的基本概念 /22
  - 2.2.1 晶体与非晶体 /22
  - 2.2.2 晶格 /22
  - 2.2.3 晶胞 /22
  - 2.2.4 立方晶系的晶面和晶向表示方法 /23
- 2.3 金属材料的结构 /24
  - 2.3.1 晶态结构 /24
  - 2.3.2 非晶态结构 /31
- 2.4 陶瓷材料的结构 /32
  - 2.4.1 晶体相 /32
  - 2.4.2 玻璃相 /33
  - 2.4.3 气相 /34
- 2.5 高分子材料的结构 /34
  - 2.5.1 高分子化合物的组成 /34
  - 2.5.2 大分子链的结构 /35
  - 2.5.3 高分子的聚集态结构 /36
- 2.6 扩散 /36
  - 2.6.1 扩散的宏观规律 /36
  - 2.6.2 扩散的机制 /37
  - 2.6.3 影响扩散的因素 /38
- 2.7 材料的结构表征 /39
  - 2.7.1 金属材料的结构表征 /39

- 2.7.2 陶瓷材料的结构表征 /40
- 2.7.3 高分子材料的结构表征 /40

扩展读物 /41

思考题 /42

### 第3章 材料的平衡凝固及相变 /43

#### 3.1 纯金属的结晶 /43

- 3.1.1 结晶的热力学条件 /44
- 3.1.2 结晶的过程 /44
- 3.1.3 同素异构转变 /46

#### 3.2 合金的结晶 /47

- 3.2.1 二元相图的建立 /47
- 3.2.2 二元相图的基本类型与分析 /48

#### 3.3 铁-碳合金相图 /57

- 3.3.1 铁-碳合金的组元和相 /57
- 3.3.2 铁-碳合金相图的分析 /58
- 3.3.3 典型铁-碳合金的平衡结晶过程 /60
- 3.3.4 含碳量对铁-碳合金组织和性能的影响 /67

扩展读物 /68

思考题 /69

### 第4章 金属的塑性变形与再结晶 /70

#### 4.1 纯金属的塑性变形 /70

- 4.1.1 单晶体的塑性变形 /70
- 4.1.2 多晶体的塑性变形 /73
- 4.1.3 形变强化和细晶强化 /73

#### 4.2 合金的塑性变形 /74

- 4.2.1 单相固溶体合金的塑性变形和固溶强化 /74
- 4.2.2 多相混合物合金的塑性变形和第二相强化 /74

#### 4.3 冷加工对金属及合金组织的影响 /75

#### 4.4 回复与再结晶 /75

- 4.4.1 冷塑性变形金属在加热过程中的组织与性能变化 /75

#### 4.4.2 回复与再结晶温度 /77

#### 4.4.3 再结晶退火后晶粒度 /78

#### 4.4.4 金属热加工及动态回复与再结晶 /79

扩展读物 /80

思考题 /80

### 第5章 材料相变的动力学特征及非平衡相变/81

#### 5.1 材料相变的动力学特征 /81

#### 5.2 材料相变的微观过程 /82

#### 5.3 凝固组织及其控制 /82

- 5.3.1 金属及合金结晶后的晶粒大小及其控制 /83
- 5.3.2 铸锭的组织及缺陷 /84

#### 5.4 单相固溶体合金结晶时的成分偏析 /85

#### 5.5 过饱和固溶与析出 /86

#### 5.6 伪共析转变 /87

#### 5.7 钢的非平衡转变 /88

- 5.7.1 钢在加热时的转变 /89
- 5.7.2 钢在冷却时的转变 /90
- 5.7.3 过冷奥氏体转变图 /95

#### 5.7.4 钢的退火 /98

#### 5.7.5 钢的正火 /99

#### 5.7.6 钢的淬火 /100

#### 5.7.7 钢的回火 /103

#### 5.8 非晶合金转变 /106

- 5.8.1 非晶合金的制备 /107
- 5.8.2 非晶合金的性能 /107

#### 5.9 金属焊缝的组织与力学性能特点 /108

扩展读物 /109

思考题 /109

### 第6章 材料表面技术 /110

#### 6.1 喷丸处理 /111

#### 6.2 表面淬火 /111

- 6.2.1 表面淬火用材及预备热处理 /111



6.2.2 表面淬火方式 /112

6.2.3 表面淬火后的回火及组织 /113

6.3 热喷涂 /114

6.3.1 热喷涂方法 /114

6.3.2 热喷涂工艺 /115

6.3.3 涂层的结构 /115

6.3.4 热喷涂的特点及应用 /115

6.4 表面氧化 /116

6.4.1 钢铁的化学氧化 /116

6.4.2 有色金属的阳极氧化 /116

6.5 表面渗镀 /117

6.5.1 钢的渗碳 /118

6.5.2 钢的渗氮 /119

6.5.3 钢的热浸镀 /120

6.5.4 离子镀(渗) /121

6.6 离子注入 /121

扩展读物 /122

思考题 /122

**第7章 工程用钢 /123**

7.1 钢的分类 /123

7.2 钢的编号方法 /125

7.2.1 标准钢号表示方法 /125

7.2.2 标准 ISC 表示方法 /126

7.3 钢中合金元素的作用 /126

7.3.1 提高淬透性 /126

7.3.2 固溶强化 /127

7.3.3 弥散强化 /127

7.3.4 提高耐蚀性 /127

7.3.5 奥氏体或铁素体稳定化 /127

7.4 典型工程用钢 /128

7.4.1 以力学性能为主的钢 /128

7.4.2 以化学性能为主的钢 /148

7.4.3 以物理性能为主的钢 /155

7.4.4 以工艺性能为主的钢 /157

扩展读物 /161

思考题 /161

**第8章 铸 铁 /163**

8.1 铁-石墨相图 /163

8.1.1 Fe-Fe<sub>3</sub>C 和 Fe-G 双重相图 /163

8.1.2 铸铁的石墨化过程 /164

8.1.3 影响铸铁石墨化的因素 /165

8.2 铸铁的特点及分类 /165

8.2.1 铸铁的特点 /165

8.2.2 铸铁的分类 /166

8.3 常用铸铁 /166

8.3.1 灰铸铁 /166

8.3.2 可锻铸铁 /168

8.3.3 球墨铸铁 /170

8.3.4 蠕墨铸铁 /172

8.4 特殊性能铸铁 /173

8.4.1 耐磨铸铁 /173

8.4.2 耐热铸铁 /174

8.4.3 耐腐蚀铸铁 /175

扩展读物 /177

思考题 /177

**第9章 有色金属及合金 /178**

9.1 铝及铝合金 /179

9.1.1 铝及铝合金的特点 /179

9.1.2 铝合金的分类及热处理 /179

9.1.3 常用铝合金 /181

9.2 铜及铜合金 /183

9.2.1 铜及铜合金的特点 /183

9.2.2 黄 铜 /183

9.2.3 白 铜 /185

9.2.4 青 铜 /185

9.3 钛及钛合金 /186

9.3.1 钛及钛合金的特点 /186

9.3.2 钛合金的分类 /187

9.4 镁及镁合金 /189

9.4.1 镁及镁合金的特点 /189

9.4.2 镁合金的分类 /189

9.5 镍及镍合金 /190

9.6 钴及钴合金 /192

9.7 难熔金属及合金 /193

扩展读物 /194

思考题 /194

## 第10章 陶瓷材料 /195

10.1 陶瓷材料的概况 /195

10.2 陶瓷材料的结构 /196

10.3 陶瓷材料的制备 /197

10.3.1 坯料制备 /197

10.3.2 成型 /197

10.3.3 烧结 /198

10.4 常用工程陶瓷 /198

10.4.1 普通陶瓷 /199

10.4.2 特种陶瓷 /200

扩展读物 /203

思考题 /203

## 第11章 高分子材料 /204

11.1 高分子材料的概况 /205

11.1.1 高分子材料的分类 /205

11.1.2 高分子材料的命名 /207

11.2 高分子材料的性能 /207

11.2.1 高分子材料的力学状态 /207

11.2.2 高分子材料的力学性能 /209

11.3 高分子材料的加工 /209

11.3.1 高分子的聚合 /209

11.3.2 高分子材料的成型 /210

11.4 常用高分子材料 /211

11.4.1 工程塑料 /211

11.4.2 合成橡胶 /215

11.4.3 合成纤维 /217

扩展读物 /217

思考题 /217

## 第12章 复合材料 /218

12.1 概述 /218

12.2 复合材料的分类 /220

12.2.1 按基体材料分类 /220

12.2.2 按增强体种类分类 /220

12.2.3 按增强体形态分类 /221

12.2.4 按用途分类 /222

12.3 复合材料的成型工艺 /222

12.3.1 聚合物基复合材料的

成型工艺 /222

12.3.2 金属基复合材料的

成型工艺 /223

12.3.3 陶瓷基复合材料的

成型工艺 /223

12.4 典型复合材料 /223

12.4.1 纤维增强聚合物基

复合材料 /223

12.4.2 纤维增强金属基

复合材料 /225

12.4.3 纤维增强陶瓷基

复合材料 /226

12.4.3 粒子增强金属基

复合材料 /227

扩展读物 /229

思考题 /229

## 附录 /230

附录1 常用钢种的临界温度 /230

附录2 金属热处理工艺分类及代号 /231

附录3 变形铝及铝合金的状态代号 /232

附录4 有色金属的铸造方法及合金

状态代号 /233

附录5 力学性能新旧符号对照表 /233

附录6 国内外部分钢号对照 /234

附录7 化学元素周期表 /235

附录8 关键词汉英对照及索引 /236

参考文献 /241

## 绪 论

### 0.1 材料与材料科学

材料是用来制造有用器件的物质,是人类生产和生活所必需的物质基础。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,都是用各种材料制造而成或由其加工的零件组装而成的。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,就不可能有现代的光纤通信。21世纪的重点领域如能源、环境、信息、生命以及空间技术等,都与材料有密切关系。

材料世界不仅是人类科技与文化的展现,更是人类的一部分。人类最早是利用有限的天然材料如石头、木头、黏土等。普遍认为,石器时代始于250万年前,早在公元前6000~公元前5000年的新石器时代,中国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。公元前3000年左右,埃及人就学会了在陶器表面上釉,大大改善了陶器的密封性,称为瓷。而中国人在公元前200年左右把这种工艺发挥到了非常高的高度,因而英文中“china(瓷)”一词与“中国(China)”相对应。金属的使用历史可以追溯到公元前3000年的中东,青铜具有高的弹性、强度、延展性,无论作为生活用具还是作为武器,都比石头或陶器有极大的优势。而铁器时代则可以追溯到公元前770年左右。

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世纪中期以纺织机和蒸汽机为代表的欧洲工业革命后,人们对材料的质量和数量的要求越来越高,促进了材料科学的快速发展。1863年,光学显微镜首次应用于金属研究,由此诞生了金相学,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发展到科学的现实。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( $10^{-7}$  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。

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。到 20 世纪中期,形成了一门系统的学科——材料科学与工程。

材料科学与工程是一门以材料为研究对象的学科,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、加工工艺、组织结构及性能之间的内在规律,如图 0-1 所示。

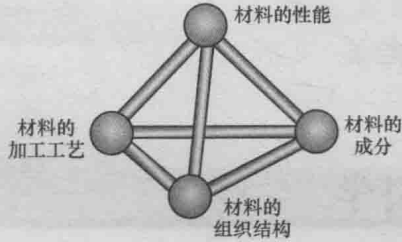


图 0-1 表征材料科学与工程的四面体

材料的性能与材料的成分、原子排布及微观组织有关,还与加工工艺相关。在实际工作中,还需联系具体器件或构件的使用要求,力求用经济合理的办法制造出有效的器件或构件。

材料的性能是与材料的成分、组织结构以及加工工艺密切相关的,材料科学与工程这一学科的研究内容包括:材料的化学组成、结构与性能之间的关系,材料的形成机理和制取方法,材料物理性能测试的方法和技术,材料的损坏机理,材料的合理加工方法和最佳使用方案等。

材料的化学组成是指构成材料的基本组元及数量配比。

材料的结构包含以下几个层次:

- (1) 宏观结构(macro-structure),肉眼可见, $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m}$ ;
- (2) 细观结构(meso-structure),借助放大镜可见, $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ m}$ ;
- (3) 微观结构(micro-structure),借助光学显微镜可见, $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{ m}$ ;
- (4) 纳观结构(nano-structure),借助电子显微镜可见, $10^{-9} \sim 10^{-7} \text{ m}$ ;
- (5) 原子排列(atom arrangement),借助高分辨电子显微镜可见,或通过 X 射线衍射间接分析, $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{ m}$ ;
- (6) 原子结构(atom structure),原子的核外电子分布,决定材料的内禀性质。

材料科学与工程所关注的结构层次主要为层次(2)~层次(5)。特别是层次(3),有一个专门的中文名词叫微观组织,它表明了材料在光学显微镜下所观察到的形貌,如同用显微镜观察细胞一样。微观组织与材料的力学性能密切相关,19 世纪末期一直到 20 世纪中期,微观组织的概念对于建立钢的宏观力学性能与加工工艺之间的联系起着重要的桥梁作用,直到今天仍然发挥着巨大的作用。

加工工艺是指材料在做成零件过程中采取的手段,如金属零件可能需要经过液态凝固成型(铸造)、固态变形(轧制、拉拔、挤压等)、热处理等。这些过程都会改变材料的微观组织,进而影响材料的性能。



## 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,具有金属光泽和良好的导电性、导热性、延展性,是目前用量最大、应用范围最广的工程材料。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。2015年全球粗钢产量超过16亿吨,在机械产品中的用量占全部材料用量的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,主要用作建筑材料;特种陶瓷又称精细陶瓷,是以人工合成材料为原料的陶瓷,常用作工程上的耐热、耐腐蚀、耐磨零件;金属陶瓷是金属与各种化合物粉末的烧结体,主要用作工具和模具。

高分子材料是以分子键和共价键结合为主的材料,具有优良的塑性、耐腐蚀性、电绝缘性、减振性及密度小等特点。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、轮船等制造工业和化学、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,它们具有密度小、弹性好、强度高等优点。

## 0.3 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,工程材料向着高强度、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,还是制造轮船、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人員掌握必要的材料科学与材料工程知识,具备正确选择材料及其加工方法、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,初步具备合理选择材料、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1~6章);
- (2)各种常用工程材料的特点与应用(第7~12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,涉及的概念多,实践性强。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;同时要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。

## 材料的性能及表征

### “泰坦尼克号”轮船——材料表征技术不足的牺牲品

“泰坦尼克号”(RMS Titanic)轮船,长约269米,质量约46 000吨,其设计达到两个世纪更替期轮船设计的顶峰,整船按一流标准制造。1912年4月,在其处女航中,“泰坦尼克号”轮船载客2 000多人,从英国南安普敦出发,途经法国瑟堡-奥克斯维尔以及爱尔兰昆士敦,最后穿越北大西洋向美国纽约进发。4月14日夜,“泰坦尼克号”轮船撞上冰山,并于次日凌晨裂成两半后沉入大海。“泰坦尼克号”轮船海难为和平时期的死伤最惨重的海难之一,同时也是最为人所知的海上事故之一。长期以来,其沉没原因众说纷纭。1991年,科学家将“泰坦尼克号”轮船残骸上的金属部件与现代造船钢材做对比实验,发现钢板的低温脆性较大。当时的造船工程师只考虑到要增加钢的强度,而没有想到要增加其韧性。在“泰坦尼克号”轮船沉没处的水温(约 $-2^{\circ}\text{C}$ )条件下,现代造船钢材在受到撞击时,断裂前会经历一定的变形,弯成V形,而残骸上的金属部件则因韧性不够而很快断裂。由此发现了钢材的冷脆性,即在 $-40\sim 0^{\circ}\text{C}$ ,钢材的力学行为由韧性变成脆性,从而导致脆性断裂。而用现代技术炼的钢要在 $-70\sim -60^{\circ}\text{C}$ 才会变脆。如果当时采用冲击试验,了解到材料的低温脆性问题,就可以改进材料,避免灾难的发生。

### 1.1 材料及构件的常见失效形式

工程构件(如房屋、桥梁、船舶等)与机械零件(如轴、齿轮、紧固件、轴承等)在服役条件下要受到力学负荷、热负荷或环境介质的作用,有时只受到一种负荷作用,更多的时候将受到两种或两种以上负荷的同时作用。在这些负荷的单独或共同作用下,因材料冶金质量或设计、加工、装配方面的原因,零件可能会在使用期限内发生失效问题。如,在力学负荷作用下,零件将产生变形,甚至出现断裂等;在热负荷作用下,零件将产生热胀冷缩,导致尺寸和体积的改变,并产生热应力,同时随温度的升高,零件的承载能力下降,随温度降低,零件脆化等;环境介质的作用主要表现为环境对零件表面造成的化学腐蚀、电化学腐蚀及磨损等。

表1-1列出了典型机械零件的服役工况、常见失效形式及材料选用的主要指标。

表 1-1 典型机械零件的服役工况、常见失效形式及材料选用的主要指标

零件类型	服役工况	常见失效形式	材料选用的主要指标
紧固螺栓	负荷种类:静载、疲劳 应力状态:拉、弯、切	过量变形,塑性断裂, 脆性断裂,疲劳,腐蚀,咬蚀	疲劳、屈服及剪切强度
轴类零件	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:弯、扭 其他因素:磨损	脆性断裂,疲劳,咬蚀, 表面局部变化	弯扭复合疲劳强度
齿轮	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:压、弯、接触 其他因素:磨损	脆性断裂,疲劳,咬蚀, 表面局部变化,尺寸变化	弯曲和接触疲劳强度, 耐磨性,心部屈服强度
螺旋弹簧	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:弯、扭 其他因素:磨损	过量变形,脆性断裂, 疲劳,腐蚀	扭转疲劳强度,弹性极限
板弹簧	负荷种类:疲劳、动载荷 应力状态:弯 其他因素:磨损	过量变形,脆性断裂, 疲劳,腐蚀	弯曲疲劳强度,弹性极限
滚动轴承	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:压、接触 其他因素:磨损、温度、介质	脆性断裂,表面变化, 尺寸变化,疲劳,腐蚀	接触疲劳强度, 耐磨性,耐腐蚀性
曲轴	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:弯、扭 其他因素:磨损、振动	脆性断裂,表面变化, 尺寸变化,疲劳,咬蚀	扭转、弯曲疲劳强度, 耐磨性,循环韧度
连杆	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:拉、压 其他因素:磨损	脆性断裂	拉压疲劳强度

在产品设计时,是否充分考查零件的服役条件,并找出容易引起失效的主要矛盾,从而选择具有合适性能参数的制备材料是零件能否安全应用的关键。这里所提的材料性能,广义上讲应包括使用性能和工艺性能。使用性能是指材料在使用过程中所表现出来的性能,包括力学性能、物理性能和化学性能。金属材料使用性能的好坏,决定了它的使用范围与使用寿命。工艺性能指机械零件在加工制造过程中,金属材料在所定的冷热加工条件下表现出来的性能。金属材料工艺性能的好坏,决定了它在制造过程中加工成型的适应能力。加工条件不同,要求的工艺性能也就不同,如铸造性能、可焊性、可锻性、热处理性能、切削加工性等。

## 1.2 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出来的性能称为力学性能(又称机械性能)。材料的力学性能是零件在设计 and 选材时的主要依据。外加载荷性质(例如拉伸、压缩、扭转、冲击、循环载荷等)不同,对金属材料的力学性能要求也将不同。常用的力学性能包括:强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳极限等。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。



## 1.2.1 拉伸试验

评价材料的力学性能最简单有效的方法就是利用拉伸试验测定材料的拉伸曲线。向标准试样[图 1-1(a)]施加一个单轴拉伸载荷,使之发生变形,直至断裂[图 1-1(b)],便可得到试样应变  $e$  随应力  $R$  变化的关系曲线,称为应力-应变曲线(其中,  $e$  为试样原始标距的伸长量与原始标距  $L_0$  之比的百分率,  $R$  为试验期间任一时刻的力除以试样原始截面面积  $S_0$  之商)。图 1-2 为低碳钢的应力-应变曲线。

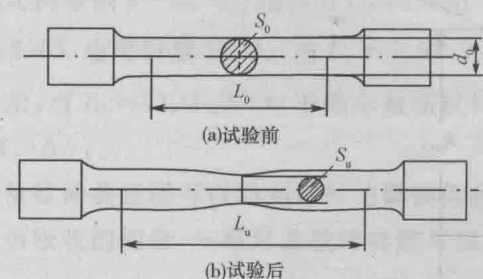


图 1-1 圆形横截面标准拉伸试样

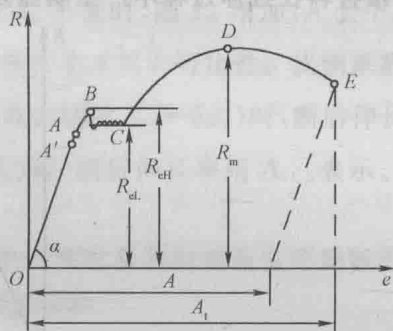


图 1-2 低碳钢的应力-应变曲线

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在应力完全释放时能够保持没有永久应变的最大应力,称为**弹性极限**。其中  $OA'$  部分为一斜直线,应力与应变成正比,  $A'$  点所对应的应力为材料能够承受的没有偏离应力-应变比例特性的最大应力,称为**比例极限**。由于大多数材料的  $A$  点和  $A'$  点几乎重合在一起,所以一般不做区分。

低于比例极限的应力与相应应变的比值称为材料的**弹性模量**,用  $E$  (单位:  $\text{MPa}$ ) 表示。 $E$  实际上是线段  $OA$  的斜率:

$$E = \tan \alpha = R/e$$

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材料的**刚度**,其指标即为弹性模量。同样的材料,可以通过增加截面面积或改变截面形状来提高零件的刚度。

### 1. 强度

材料在外力作用下抵抗变形和破坏的最大能力称为**强度**。根据加载方式不同,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,当应力超过  $B$  点进入  $BC$  段后,应力虽然不再增加,但试样仍发生明显的塑性变形,这种现象称为**屈服**,即材料承受外力到一定程度时,其变形不再与外力成正比而产生明显的塑性变形。材料产生屈服时对应的应力称为**屈服强度**,用  $R_e$  ( $\sigma_s$ ) 表示。屈服强