



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

主 编 王立军 胡满红  
副主编 黄晓斌 张春元 郭拉凤

# 航空工程材料 与成形工艺基础



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 航空工程材料 与成形工艺基础

主 编 王立军 胡满红  
副主编 黄晓斌 张春元 郭拉凤

北京航空航天大学出版社

## 内容简介

本书是中北大学飞行器制造工程专业教学组结合多年的教学经验编写的。本书由材料学基础及其改性和材料成形工艺基础两部分构成。材料学基础及其改性部分以铁合金材料为主,系统阐明了工程材料的基本理论,介绍了常用的工程材料及其应用,特别加入了一些应用于航空航天领域的特种钢材和非铁合金材料、陶瓷材料、复合材料和功能材料等材料。材料成形工艺基础部分介绍了常用机械工程材料的成形工艺理论,也加入了一些新工艺和航空材料的成形工艺。

本书所采用的名词术语、计量单位、工艺数据和材料编号等均符合最近颁布的国家标准。

本书可作为航空航天类和机械类专业的教材,教学学时数为40~56学时(含实验),也可供其他有关专业的师生和工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

航空工程材料与成形工艺基础/王立军,胡满红主编. —北京:  
北京航空航天大学出版社,2010.2  
ISBN 978-7-81124-948-4

I. 航… II. 王… III. 航空材料—成形—工艺 IV. V25

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第195935号

## 航空工程材料与成形工艺基础

主编 王立军 胡满红

副主编 黄晓斌 张春元 郭拉凤

责任编辑 史海文 杨波 李保国

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

http://www.buaapress.com.cn

E-mail:bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:23 字数:515千字

2010年2月第1版 2010年2月第1次印刷 印数:3 000册

ISBN 978-7-81124-948-4 定价:45.00元

# 前 言

《航空工程材料与成形工艺基础》是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是适应 21 世纪人才培养的需求,按照航空航天类专业的教学基本要求,结合近几年的实践教学经验编写的。

随着我国航空航天事业的飞速发展,对此类专业人才的需求越来越大,要求有相应的工程材料类教材。以往的金属工艺学偏重于传统材料和成形方法,对航空航天新材料及其成形工艺注重不够,因此本书从内容安排上既注重传统的碳钢、合金钢和铸铁等材料,又增加了非铁基材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料等其他航空航天材料的内容。在成形工艺上既注重传统常规的内容,又介绍了应用日益广泛的先进成形技术,以便更好地为航空航天技术的发展服务。

本书分为材料学基础及其改性和材料成形工艺基础两大部分。材料学基础及其改性部分首先介绍了材料的种类与性能、金属的组织与结构、铁合金材料的热处理及其改性等材料学基础知识,然后介绍了铁合金材料、非铁合金材料、非金属材料及其改性、复合材料、功能材料、零件失效及选材原则等;材料成形工艺基础部分介绍了铸造工艺基础、锻压工艺基础、焊接工艺基础、非金属材料成形工艺和复合材料成形工艺,并介绍了新材料、新技术和新工艺及其发展趋势。

本书可作为航空航天类专业本科教材,也可作为机械类或机电类本科教材,还可作为相关技术人员的参考资料。使用时,可结合各专业的具体情况进行取舍。

本书由王立军、胡满红担任主编,黄晓斌、张春元、郭拉凤担任副主编。参加本书编写的有中北大学的王立军(第 1,2 章)、黄晓斌(第 3 章)、胡满红(第 4 章)、张春元(第 5 章)、郭拉凤(第 6,11 章)、范国勇(第 7 章)、庞俊忠(第 9 章)、马长安(第 10 章)、刘彦臣(第 12 章)、吴耀金(第 14 章);太原科技大学的胡勇(第 8 章);太原工业学院的赵跃文(第 13 章)。

本书承蒙中北大学吴伏家教授主审,并提出了许多宝贵的意见,编者对此深表谢意。

由于编者水平有限,书中难免存在错误与不足,敬请读者批评指正。

编 者  
2009 年 8 月

# 目 录

## 第 1 篇 材料学基础及其改性

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第 1 章 材料的种类与性能</b> ..... | 1  |
| 1.1 材料的种类 .....             | 1  |
| 1.2 材料的性能 .....             | 3  |
| 1.2.1 静载荷作用下材料的力学性能 .....   | 3  |
| 1.2.2 动载荷作用下材料的力学性质 .....   | 7  |
| 1.2.3 材料高温和低温下的力学性能 .....   | 9  |
| 1.2.4 材料的物理性能 .....         | 9  |
| 1.2.5 材料的耐蚀性能.....          | 11 |
| 1.2.6 材料的工艺性能.....          | 11 |
| <b>第 2 章 金属的组织与结构</b> ..... | 12 |
| 2.1 金属的晶体和结晶.....           | 12 |
| 2.1.1 金属晶体结构.....           | 12 |
| 2.1.2 金属的结晶.....            | 13 |
| 2.2 实际金属组织及其缺陷.....         | 15 |
| 2.2.1 晶体缺陷类型.....           | 15 |
| 2.2.2 晶体缺陷和材料性能的关系.....     | 16 |
| 2.3 金属的合金、相和二元相图 .....      | 16 |
| 2.3.1 基本概念.....             | 16 |
| 2.3.2 匀晶相图.....             | 18 |
| 2.3.3 共晶相图.....             | 21 |
| 2.3.4 其他相图.....             | 25 |
| 2.3.5 合金相图与材料性能的关系.....     | 26 |
| 2.4 铁碳合金相图.....             | 28 |
| 2.4.1 铁碳合金相图中的基本相.....      | 28 |
| 2.4.2 铁碳合金相图分析.....         | 29 |

|            |                              |           |
|------------|------------------------------|-----------|
| 2.4.3      | 铁碳合金相变分析                     | 31        |
| 2.4.4      | 铁碳合金相图中的相和组织与合金的力学性能、工艺性能的关系 | 32        |
| <b>第3章</b> | <b>铁合金材料的热处理及其改性</b>         | <b>35</b> |
| 3.1        | 概 述                          | 35        |
| 3.2        | 钢加热时的组织变化                    | 35        |
| 3.2.1      | 加热温度                         | 35        |
| 3.2.2      | 钢加热时的组织转变——奥氏体化              | 36        |
| 3.3        | 钢冷却时的组织变化                    | 38        |
| 3.3.1      | 共析钢过冷奥氏体的等温转变曲线              | 38        |
| 3.3.2      | 过冷奥氏体等温转变产物                  | 39        |
| 3.3.3      | 影响等温转变曲线的因素                  | 43        |
| 3.3.4      | 过冷奥氏体的连续冷却转变曲线               | 44        |
| 3.4        | 钢的普通热处理                      | 45        |
| 3.4.1      | 钢的退火与正火                      | 45        |
| 3.4.2      | 钢的淬火                         | 47        |
| 3.4.3      | 钢的回火                         | 52        |
| 3.5        | 钢的表面热处理                      | 55        |
| 3.5.1      | 钢的表面淬火                       | 55        |
| 3.5.2      | 化学热处理                        | 57        |
| 3.5.3      | 表面复合热处理                      | 60        |
| 3.6        | 铸铁的热处理                       | 61        |
| 3.6.1      | 灰口铸铁的热处理                     | 61        |
| 3.6.2      | 球墨铸铁的热处理                     | 62        |
| <b>第4章</b> | <b>铁合金材料</b>                 | <b>64</b> |
| 4.1        | 碳 钢                          | 64        |
| 4.1.1      | 钢的分类                         | 64        |
| 4.1.2      | 碳钢中杂质元素的影响                   | 65        |
| 4.1.3      | 碳钢的编号和用途                     | 66        |
| 4.2        | 合金结构钢                        | 73        |
| 4.2.1      | 概 述                          | 74        |
| 4.2.2      | 合金结构钢                        | 77        |
| 4.2.3      | 工具钢                          | 88        |

|            |                |            |
|------------|----------------|------------|
| 4.2.4      | 特殊性能钢          | 95         |
| 4.3        | 铸 铁            | 104        |
| 4.3.1      | 铸铁的成分及性能       | 104        |
| 4.3.2      | 铸铁的石墨化及影响因素    | 105        |
| 4.3.3      | 铸铁的分类          | 107        |
| 4.3.4      | 灰铸铁            | 108        |
| 4.3.5      | 球墨铸铁           | 110        |
| 4.3.6      | 可锻铸铁           | 112        |
| 4.3.7      | 蠕墨铸铁           | 113        |
| 4.3.8      | 特殊性能铸铁         | 114        |
| 4.4        | 铁合金材料在航空航天中的应用 | 115        |
| 4.4.1      | 中碳调质钢在航空航天中的应用 | 115        |
| 4.4.2      | 其他钢种在航空航天中的应用  | 116        |
| <b>第5章</b> | <b>非铁合金材料</b>  | <b>117</b> |
| 5.1        | 铝及其合金          | 117        |
| 5.1.1      | 纯 铝            | 117        |
| 5.1.2      | 铝合金及其分类        | 118        |
| 5.1.3      | 形变铝合金          | 119        |
| 5.1.4      | 铸造铝合金          | 121        |
| 5.1.5      | 铝合金的热处理        | 124        |
| 5.1.6      | 铝合金在航空航天中的应用   | 126        |
| 5.2        | 钛及其合金          | 127        |
| 5.2.1      | 纯 钛            | 127        |
| 5.2.2      | 钛合金            | 127        |
| 5.2.3      | 钛及其合金的热处理      | 129        |
| 5.3        | 镁及镁合金          | 130        |
| 5.3.1      | 纯 镁            | 130        |
| 5.3.2      | 镁合金            | 130        |
| 5.3.3      | 变形镁合金          | 131        |
| 5.3.4      | 铸造镁合金          | 132        |
| 5.3.5      | 镁合金在航空航天中的应用   | 132        |
| 5.4        | 铜及其合金          | 133        |
| 5.4.1      | 纯 铜            | 133        |

|            |                   |            |
|------------|-------------------|------------|
| 5.4.2      | 铜合金               | 134        |
| 5.4.3      | 黄铜                | 137        |
| 5.4.4      | 青铜                | 138        |
| 5.5        | 镍及镍合金             | 139        |
| 5.5.1      | 镍的性质              | 139        |
| 5.5.2      | 镍合金的分类和用途         | 140        |
| <b>第6章</b> | <b>非金属材料及其改性</b>  | <b>144</b> |
| 6.1        | 非金属材料分类、结构和特点     | 144        |
| 6.1.1      | 高分子材料             | 144        |
| 6.1.2      | 陶瓷材料              | 158        |
| 6.2        | 非金属材料的改性及其强化      | 165        |
| 6.2.1      | 高分子材料的改性及强化       | 166        |
| 6.2.2      | 陶瓷的增韧强化           | 172        |
| 6.3        | 非金属材料在航空航天中的应用    | 173        |
| 6.3.1      | 塑料在航空航天中的应用       | 173        |
| 6.3.2      | 工程结构陶瓷材料在航空航天中的应用 | 174        |
| <b>第7章</b> | <b>复合材料</b>       | <b>175</b> |
| 7.1        | 复合材料的复合形式和强化机理    | 175        |
| 7.1.1      | 复合材料的分类           | 175        |
| 7.1.2      | 复合材料强化机理          | 175        |
| 7.1.3      | 复合材料的性能           | 176        |
| 7.2        | 常用的复合材料特点和性能      | 178        |
| 7.2.1      | 纤维增强复合材料(FRP)     | 178        |
| 7.2.2      | 层合复合材料            | 179        |
| 7.2.3      | 颗粒复合材料            | 180        |
| 7.2.4      | 骨架复合材料            | 180        |
| 7.3        | 复合材料的改性技术         | 180        |
| 7.3.1      | 复合材料的改性及强化机理      | 180        |
| 7.3.2      | 复合材料的界面设计原则       | 181        |
| 7.4        | 复合材料在航空航天中的应用     | 181        |
| 7.4.1      | 树脂基复合材料的应用        | 183        |
| 7.4.2      | 陶瓷基复合材料的应用        | 184        |



|                     |                        |            |
|---------------------|------------------------|------------|
| 7.4.3               | 金属基复合材料的应用 .....       | 184        |
| 7.4.4               | 层合复合材料及其应用 .....       | 185        |
| 7.4.5               | 功能复合材料 .....           | 185        |
| <b>第8章</b>          | <b>功能材料</b> .....      | <b>187</b> |
| 8.1                 | 功能材料的分类和特点 .....       | 187        |
| 8.1.1               | 功能材料的分类 .....          | 187        |
| 8.1.2               | 功能材料的特点 .....          | 188        |
| 8.2                 | 常用功能材料的介绍 .....        | 189        |
| 8.2.1               | 功能陶瓷 .....             | 189        |
| 8.2.2               | 隐身材料 .....             | 190        |
| 8.2.3               | 智能材料 .....             | 191        |
| 8.3                 | 功能材料在航空航天中的应用 .....    | 192        |
| <b>第9章</b>          | <b>零件失效及选材原则</b> ..... | <b>194</b> |
| 9.1                 | 失效分析 .....             | 194        |
| 9.1.1               | 零件的失效形式及原因 .....       | 194        |
| 9.1.2               | 零件失效分析的一般方法 .....      | 199        |
| 9.1.3               | 零部件失效分析实例 .....        | 200        |
| 9.2                 | 选材方法和原则 .....          | 201        |
| 9.2.1               | 选材的基本原则 .....          | 201        |
| 9.2.2               | 典型零部件选材及工艺分析 .....     | 204        |
| <b>第2篇 材料成形工艺基础</b> |                        |            |
| <b>第10章</b>         | <b>铸造工艺基础</b> .....    | <b>210</b> |
| 10.1                | 铸造理论基础 .....           | 210        |
| 10.1.1              | 液态合金的充型能力 .....        | 211        |
| 10.1.2              | 铸件的收缩 .....            | 213        |
| 10.1.3              | 铸件缺陷 .....             | 214        |
| 10.2                | 铸造成形工艺 .....           | 218        |
| 10.2.1              | 砂型铸造 .....             | 218        |
| 10.2.2              | 特种铸造 .....             | 231        |
| 10.2.3              | 各种铸造方法选择原则 .....       | 237        |



|               |                 |            |
|---------------|-----------------|------------|
| 10.2.4        | 铸件结构设计          | 239        |
| 10.2.5        | 常用合金铸造生产特点      | 246        |
| 10.3          | 现代铸造技术简介        | 250        |
| 10.3.1        | 实型铸造            | 250        |
| 10.3.2        | 陶瓷型铸造           | 251        |
| 10.3.3        | 连续铸造            | 253        |
| 10.3.4        | 磁型铸造            | 254        |
| 10.3.5        | 铸造技术的发展趋势       | 255        |
| <b>第 11 章</b> | <b>锻压工艺基础</b>   | <b>256</b> |
| 11.1          | 压力加工理论基础        | 257        |
| 11.1.1        | 金属塑性变形的实质       | 257        |
| 11.1.2        | 塑性变形对金属组织和性能的影响 | 258        |
| 11.2          | 锻造及其工艺基础        | 261        |
| 11.2.1        | 锻造加工理论基础        | 261        |
| 11.2.2        | 常用锻造方法          | 264        |
| 11.3          | 冲压及其工艺基础        | 277        |
| 11.3.1        | 板料冲压成形原理        | 277        |
| 11.3.2        | 板料冲压的工艺特点与应用    | 277        |
| 11.3.3        | 板料冲压的基本工序       | 278        |
| 11.3.4        | 冲压模具            | 280        |
| 11.4          | 现代压力加工技术与发展动向   | 281        |
| <b>第 12 章</b> | <b>焊接工艺基础</b>   | <b>287</b> |
| 12.1          | 焊接理论基础          | 287        |
| 12.1.1        | 焊接工艺方法的分类       | 287        |
| 12.1.2        | 焊接工艺的特点         | 287        |
| 12.1.3        | 焊接工艺的基本理论       | 288        |
| 12.1.4        | 焊接工艺的应用         | 296        |
| 12.2          | 常见的焊接工艺方法       | 296        |
| 12.2.1        | 熔 焊             | 296        |
| 12.2.2        | 压 焊             | 301        |
| 12.2.3        | 钎 焊             | 304        |
| 12.3          | 常用材料焊接和焊接件设计    | 305        |

|               |                    |            |
|---------------|--------------------|------------|
| 12.3.1        | 金属材料的焊接性           | 305        |
| 12.3.2        | 钢的焊接               | 306        |
| 12.3.3        | 铸铁的补焊              | 308        |
| 12.3.4        | 常用非铁合金材料的焊接        | 309        |
| 12.3.5        | 焊接件设计              | 311        |
| 12.4          | 焊接新技术和发展趋势         | 314        |
| 12.4.1        | 焊接新技术              | 314        |
| 12.4.2        | 其他先进焊接方法简介         | 319        |
| 12.4.3        | 焊接技术的发展趋势          | 320        |
| <b>第 13 章</b> | <b>非金属材料成形工艺</b>   | <b>323</b> |
| 13.1          | 陶瓷件成形工艺            | 323        |
| 13.1.1        | 配 料                | 323        |
| 13.1.2        | 成 形                | 324        |
| 13.1.3        | 烧 结                | 328        |
| 13.2          | 塑料件成形工艺            | 329        |
| 13.2.1        | 塑料的可加工性及其注意点       | 330        |
| 13.2.2        | 常用塑料成形工艺           | 330        |
| <b>第 14 章</b> | <b>复合材料成形工艺</b>    | <b>336</b> |
| 14.1          | 制备复合材料的通用方法        | 336        |
| 14.1.1        | 颗粒、晶须、短纤维增强复合材料    | 336        |
| 14.1.2        | 纤维增强体增强复合材料        | 336        |
| 14.2          | 树脂基复合材料成形          | 338        |
| 14.2.1        | 热固性树脂基复合材料(RMC)的成形 | 338        |
| 14.2.2        | 热塑性树脂基复合材料的成形      | 343        |
| 14.3          | 金属基复合材料成形          | 343        |
| 14.3.1        | 液态金属浸润法            | 343        |
| 14.3.2        | 扩散黏结法              | 345        |
| 14.3.3        | 粉末冶金法              | 345        |
| 14.3.4        | 喷雾共沉淀法             | 349        |
| 14.4          | 陶瓷基复合材料成形方法        | 349        |
| 14.4.1        | 浆体浸渗工艺             | 349        |
| 14.4.2        | 气-液反应工艺            | 350        |

---

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 14.4.3 化学气相渗透法·····            | 350        |
| 14.4.4 纳米复合技术·····             | 351        |
| 14.5 碳/碳复合材料(C/C)成形方法·····     | 351        |
| 14.5.1 增强剂碳纤维预成形工艺·····        | 351        |
| 14.5.2 基体碳和预成形的碳纤维的溶合致密工艺····· | 351        |
| <b>参考文献</b> ·····              | <b>352</b> |

# 第 1 篇

## 材料学基础及其改性

### 第 1 章 材料的种类与性能

#### 1.1 材料的种类

早期人类的历史,是以当时人们使用的材料来划分的,如石器时代(陶器)、青铜器时代和铁器时代等,这说明材料的制作和应用对人类文明和发展有多么重要。当今社会,材料科学、电子信息、生命科学和能源科学并称为四大基础学科,带领着其他学科蓬勃发展。

社会上使用的材料种类很多,这里要介绍的材料是指工程材料。所谓工程是指机械工程和建筑工程,工程材料的极大部分并不是大自然直接提供使用的,而是经人工提炼、制造而成的,而且均指固体材料。工程材料有不同分类方法,这里按通常的以其组织成分进行分类,如图 1-1 所示。

航空航天工程材料是用来制造飞行器的,所以减轻质量尤为重要,在这一点上,不论是民航飞机还是宇航飞船,不论是近地卫星还是同步轨道卫星,轻质都是其首要问题。其次的要求是高强度、高刚度(弹性模量)、高韧性、耐冲击、耐高温和低温,抗氧化和抗腐蚀等,所以铝合金在民用飞机上的占用量为 70%~80%,军用飞机上的占用量为 40%~60%。钛合金密度比铝高 1.69 倍,强度比铝高( $\frac{1}{600} \times 100 = 1.83$ ),故钛合金的比强度高于铝合金。随着时间的推移,航空航天材料正在由目前的铝合金占主要地位逐渐向以钛合金为主的方向转移。

传统工业是以金属材料为主,特别是铁合金材料,即钢和铸铁,占了主导地位。但在航空航天工程中铁合金的用量却不多,大概只占总量的 10%左右,而且主要指超高强度钢( $\sigma_s > 1380 \text{ MPa}$ )的应用,一般强度的钢和铸铁基本不用。

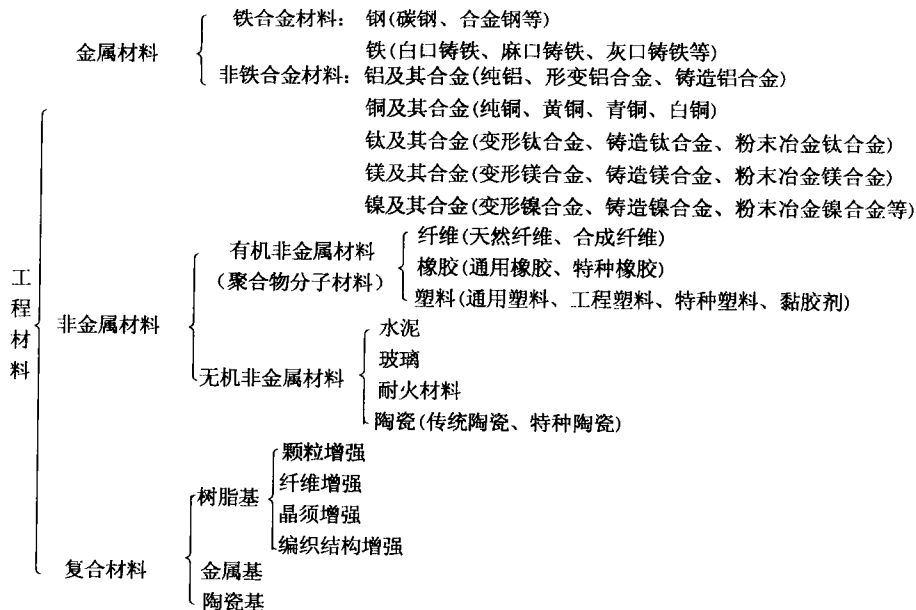


图 1-1 工程材料分类

非金属材料包括有机非金属材料 and 无机非金属材料。有机非金属材料也称聚合物分子材料或高分子材料, 主要指塑料; 无机非金属材料主要指陶瓷。在航空航天工程中, 非金属材料大多是以复合材料中基体材料或增强材料或既是基体材料又是增强材料出现的, 很少单独使用。

复合材料在航空航天工程中具有举足轻重的地位。在飞行器结构中, 常用复合材料来减轻质量, 例如在先进歼击机上, 为减轻飞机的质量提高飞机的机动性, 树脂基复合材料的使用占了整机质量的 24%; 卫星、远程导弹和固体火箭发动机上的关键零部件材料, 大多也采用了复合材料。未来航空发动机关键结构材料将由高温树脂复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料、碳/碳复合材料占主导地位。

材料的分类, 除了以组织成分划分外, 还常常以用途来划分——结构材料和功能材料两类。结构材料用于制造实现运动和传递动力的零件, 它是以强度、硬度、刚性、塑性、韧性、疲劳强度和耐磨性等力学性能为主要的性能指标, 主要有以上所述的金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料等; 功能材料是以声、光、电、磁、热等物理性能为主要性能指标, 利用物质的各种物理特性及其对外部环境的敏感反应, 实现对各种信息的处理和能量的转换。例如, 高分子基复合材料中有对电磁波具有特殊性能的材料, 可用于透波雷达罩材料和吸波隐身材料。功能材料主要包括大规模集成电路材料、信息记录材料、光学材料、超导材料和形状记忆材料等, 在通信、计算机、电子、航空航天工程等领域扮演着极其重要的角色。



## 1.2 材料的性能

材料的性能包括两大类：一是它的使用性能，二是它的工艺性能。使用性能主要是指它的力学性能，有时也要关注它的物理性能、化学性能。工艺性能是指材料的加工性，加工性包括：切割加工性、铸造、锻造、冲压、焊接和热处理的加工性等。作为工程用的材料，一般都要经过加工，在达到规定的形状和尺寸以及某些力学指标等后才能在工程上应用。

### 1.2.1 静载荷作用下材料的力学性能

材料表现的力学性能与材料的受力载荷形式有关。载荷有静态和动态两种形式，前者称静载，后者称动载。静载是指给材料缓慢的加载，动载又可分为冲击载荷、交变载荷和摩擦载荷。静载条件下材料的力学性质包括强度、硬度和塑性。

#### 1. 强度

强度是指材料在受载作用下，抵抗变形和断裂的能力。

强度通常由拉伸试验来测定。一般将材料先加工成试样，试样断面是圆形，按一定规则确定其直径和长度；然后将试样卡在拉伸机上，缓慢加载而拉伸。随着拉伸力  $F$  的加大，试样产生轴向伸长量  $\Delta l$ ，直到试样被拉断，记下拉伸过程中  $F$  和  $\Delta l$  的对应值。取平面坐标系：原点为  $O$ ， $F$  和  $\Delta l$  分别为纵坐标和横坐标，得  $F - \Delta l$  拉伸曲线，如图 1-2(a) 所示。将拉力  $F$  除以试样初始截面积  $S_0$ ，得单位面积上拉力，称拉应力，用  $\sigma$  表示（单位是 MPa），即

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

将轴向伸长量  $\Delta l$  除以试样原始长度  $l_0$ ，得单位长度上的伸长量，称应变，用  $\epsilon$  表示（单位是无量纲），即

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

若以  $\sigma$  为纵坐标， $\epsilon$  为横坐标， $O$  为坐标原点建立坐标系，将  $\sigma$  和  $\epsilon$  一一对应值描绘出曲线来，如图 1-2(b) 所示，则得拉伸曲线(b)。拉伸曲线(a)受试样尺寸的影响，而拉伸曲线(b)不受试样尺寸的影响，所以常用图 1-2(b) 所示的拉伸应力-应变曲线来表示材料力学性能。

#### (1) 弹性极限 $\sigma_e$ 和弹性模量 $E$

在  $\sigma - \epsilon$  曲线上， $oe$  段是直线，即  $\sigma$  与  $\epsilon$  成正比，这种应力下的应变称弹性变形，即应力逐渐消失时， $\epsilon$  也相应逐渐退到 0。而  $e$  点是弹性变形阶段的最大应力和应变的对应点，习惯上称该点的纵坐标值为弹性极限，符号为  $\sigma_e$ ，单位是 MPa (1 MPa =  $10^6$  Pa)，工程上一些弹性元件常以  $\sigma_e$  为主要力学指标。

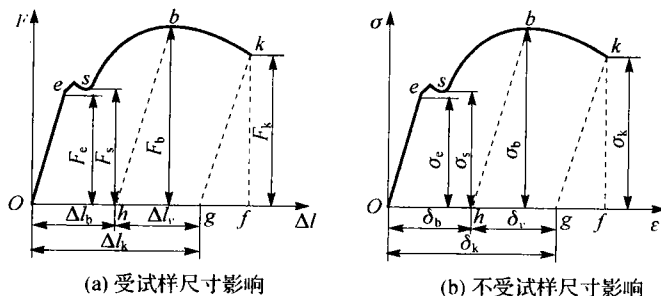


图 1-2 退火低碳钢的拉伸曲线和应力-应变曲线

$oe$  直线上任意一点的应力和应变之比,称弹性模量,用  $E$  表示,即

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1-1)$$

$E$  的单位是  $\text{GPa}$  ( $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$ ),弹性模量大,即  $oe$  线和水平坐标之夹角  $\alpha$  大,则表示该材料产生一定量的弹性应变  $\epsilon$  所用的应力要大,即弹性变形不易,在工程上常用刚度大来表示弹性变形不易;反之,刚度小,即易产生弹性变形。因此  $E$  也称为材料的刚度。

### (2) 屈服强度 $\sigma_s$

在  $\sigma-\epsilon$  曲线上,在  $s$  点有一小段水平线,表明应力不再增加,但应变会不断加大,如果此时将外力撤去,试样应变虽然随之缩小,但不会变成 0,而有残余的应变存在。这种不可恢复的残余变形称为材料的塑性变形。 $s$  点是开始塑变的最小应力值,工程上称为屈服极限或屈服强度,用符号  $\sigma_s$  表示,单位是  $\text{MPa}$ 。

图 1-2 所示是退火的低碳钢拉伸曲线,这种钢塑性好,所以在  $s$  点有明显的水平线段。但一些脆性材料,其  $\sigma-\epsilon$  曲线没有或没有明显的  $s$  点(屈服点),最后部分存在很少非线性曲线,即塑性变形,如图 1-3 所示。

若试样拉断时,塑性应变为  $100\% = 1$ (单位是无量纲),则规定在产生 0.2% 的塑性应变时,其对应的纵坐标值即是材料的条件屈服极限值,符号为  $\sigma_{0.2}$ ,以便和  $\sigma_s$  有区别。

工程中很大一部分材料是塑性材料,但塑性材料制成的绝大部分机件只允许在弹性范围内工作,所以  $\sigma_s$  和  $\sigma_{0.2}$  是材料强度设计时的主要依据,即实际材料允许的应力  $\sigma$  应小于  $\sigma_s$  是安全的。

### (3) 抗拉强度 $\sigma_b$

在图 1-2(b)中的  $\sigma-\epsilon$  曲线上,有一个最大应力值点,即  $b$  点。而  $\sigma_b$  就是材料的抗拉强度,但拉断点在  $k$ ,且  $\sigma_k < \sigma_b$ 。有些材料属于脆性材料,塑性很低,刚过弹性变形稍有塑性变形就拉断,如图 1-4 所示,最大应力处  $\sigma_b$  也是拉断应力处  $\sigma_k$ ,两点合二为一,所以常用  $\sigma_b$  作为脆性材料的力学设计指标。



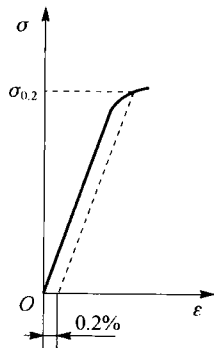


图 1-3 脆性材料的拉伸曲线

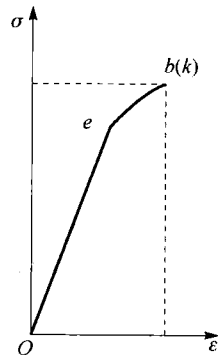


图 1-4 脆性材料的拉伸曲线

## 2. 塑性

材料塑性变形的能力称塑性,塑性是可以度量的,通常以延伸率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  来表示。

设试样拉伸断裂的长度为  $l_k$ ,试样原始长度为  $l_0$ ,则延伸率(单位无量纲)为

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

设试样拉断处横截面积为  $S_k$ ,试样原始截面积为  $S_0$ ,则断面收缩率(单位无量纲)为

$$\psi = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

应当注意,试样通常有两种尺寸:一种  $l_0 = 5d_0$ ;另一种  $l_0 = 10d_0$ 。两种试样测量延伸率  $\delta$  时,数值不同。所以,用  $\delta_5$  和  $\delta_{10}$  分别表示两种试样的  $\delta$  值。不言而喻,对不同材料延伸率的比较,要用同一种试样类型进行比较。

## 3. 硬度

硬度是指材料的软硬程度。硬的物质可以刻划或压入比其软的物质,这是材料很重要的一种力学性质。

硬度可以在专门的硬度试验机上测量,不同的试验机以及不同的测头会得出不同的硬度值,所以要比较不同材料的硬度,应该用同一种指标体系测量值进行比较。按不同试验机及其测头将硬度指标体系分成:布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度和肖氏硬度等。

### (1) 布氏硬度

将直径为  $D$  的淬火钢球压入被测材料的表面,压力为  $F$ ,持续一段时间后,会压出一个球