

“十二五”普通高等教育本科规划教材

21世纪全国高等院校材料类**创新型**应用人才培养规划教材



MATERIALS

材料力学性能

(第2版)

主 编 时海芳 任 鑫

- 适应最新标准、规范的要求
- 系统全面介绍材料力学性能
- 强调理论与工程实际的结合



教材订购、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

“十二五”普通高等教育本科规划教材

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

材料力学性能(第 2 版)

主 编 时海芳 任 鑫

副主编 张 勇



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书主要介绍材料在外载荷作用下或载荷与环境因素(温度、介质、加载速度)联合作用下所表现的行为及其物理本质的评定方法,体现了加强基础、拓宽专业面、注重创新能力与素质培养的目标和原则。本书主要内容包括绪论、材料在单向静拉伸载荷下的力学性能、材料在其他静载荷下的力学性能、材料在冲击载荷下的力学性能、材料的断裂韧性、材料在变动载荷下的力学性能、材料在环境条件下的力学性能、材料在高温条件下的力学性能、材料的摩擦与磨损性能、纳米材料的力学性能。本书以阐述宏观规律为主,将宏观规律与微观机理相结合,同时强调理论与实际相联系。

本书可作为材料科学与工程专业和材料成形及控制工程专业本科生教材,也可作为近材料类和近机械类专业教学辅助参考书,还可作为有关科研人员和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学性能/时海芳,任鑫主编.—2版.—北京:北京大学出版社,2015.5

(21世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-25634-3

I. ①材… II. ①时…②任… III. ①工程材料—材料力学性质—高等学校—教材 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 065013 号

书 名 材料力学性能(第2版)

著作责任者 时海芳 任鑫 主编

策划编辑 童君鑫

责任编辑 黄红珍

标准书号 ISBN 978-7-301-25634-3

出版发行 北京大学出版社

地 址 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址 <http://www.pup.cn> 新浪微博:@北京大学出版社

电子信箱 pup_6@163.com

电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667

印刷者 北京富生印刷厂

经 销 者 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 428 千字

2010 年 8 月第 1 版

2015 年 5 月第 2 版 2015 年 5 月第 1 次印刷

定 价 40.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

编审指导与建设委员会

成员名单 (按拼音排序)

白培康 (中北大学)	陈华辉 (中国矿业大学)
崔占全 (燕山大学)	杜彦良 (石家庄铁道大学)
杜振民 (北京科技大学)	耿桂宏 (北方民族大学)
关绍康 (郑州大学)	胡志强 (大连工业大学)
李楠 (武汉科技大学)	梁金生 (河北工业大学)
林志东 (武汉工程大学)	刘爱民 (大连理工大学)
刘开平 (长安大学)	芦笙 (江苏科技大学)
裴坚 (北京大学)	时海芳 (辽宁工程技术大学)
孙凤莲 (哈尔滨理工大学)	孙玉福 (郑州大学)
万发荣 (北京科技大学)	王春青 (哈尔滨工业大学)
王峰 (北京化工大学)	王金淑 (北京工业大学)
王昆林 (清华大学)	卫英慧 (太原理工大学)
伍玉娇 (贵州大学)	夏华 (重庆理工大学)
徐鸿 (华北电力大学)	余心宏 (西北工业大学)
张朝晖 (北京理工大学)	张海涛 (安徽工程大学)
张敏刚 (太原科技大学)	张锐 (郑州航空工业管理学院)
张晓燕 (贵州大学)	赵惠忠 (武汉科技大学)
赵莉萍 (内蒙古科技大学)	赵玉涛 (江苏大学)

第2版前言

各种工程零部件在受力或力与其他环境因素综合作用时都会呈现出多样的、不同程度的损伤,严重时会造成零部件的失效。如果这些零部件位于设备中比较重要的位置,就会给国民经济及人身财产安全带来巨大损失,因此研究机件材料的力学性能显得尤为重要。本书是根据教育部最新颁布的课程教学基本要求和国家提出的创新型人才培养要求编写的。“材料力学性能”是高等院校材料类、机械类和近材料类、近机械类专业的一门重要的专业基础课。全书共分9章,系统地阐述了材料在静荷载、动荷载作用下的力学性能、材料的断裂和断裂韧性、材料的摩擦与磨损、高温下材料的力学性能以及纳米材料的力学性能,主要研究力或力与其他外界条件共同作用下的材料的变形和断裂的基本规律及其本质,分析各种内在因素和外在条件对材料力学性能的影响及机制,为正确选材和合理使用材料提供依据,为研制新材料、改进和开发冷热加工新工艺以及充分发挥材料力学性能潜力指明方向,并为机器零件或构件的失效分析奠定一定基础。

本书在第1版基础上对部分内容进行了更新,如原GB/T 228—2002《金属材料 室温拉伸试验方法》被新国标GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 室温试验方法》代替,对相应国标中规定的力学参数符号及曲线做了相应更新;增加了部分章节的例题和习题,尤其是对于涉及公式较多、难于理解的章节,增加了例题的数量,以便对知识更好地理解 and 掌握;鉴于纳米材料应用日趋广泛,并且具有不同于常规晶粒材料的力学性能,特增加了纳米材料的力学性能一章。

本书力求将材料力学行为的微观物理本质与力学行为的宏观规律有机结合,既强调材料力学性能的基本概念,又尽可能介绍与本学科相关的一些新成就,因此本书在内容的编排和设计上有所创新。每一章均采用知识框架、导入案例以及穿插相关阅读材料等编排形式,便于读者深入学习研究。本书语言简洁,信息量大,科学性和实用性强,内容新颖,引入新成果和新进展,有利于培养学生的创新意识,拓宽读者专业知识面,便于读者了解当前国内外材料力学性能研究动态和发展趋势。

本书由辽宁工程技术大学时海芳、任鑫主编,张勇副主编。其中绪论和第1章由时海芳编写,第2、3、7、8章由任鑫编写,第4、5、6、9章由张勇编写。

本书在编写过程中,参阅了大量的有关著作、教材和技术资料,在此谨对这些著作、教材和技术资料的编著者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2014年12月

目 录

绪论	1
----------	---

第 1 章 材料在单向静拉伸载荷下的力学性能	4
------------------------------	---

1.1 拉伸力-伸长曲线和应力-应变曲线	5
1.1.1 拉伸力-伸长曲线	6
1.1.2 应力-应变曲线	6
1.2 弹性变形	8
1.2.1 弹性变形及其实质	8
1.2.2 广义胡克定律	9
1.2.3 弹性性能	11
1.2.4 弹性性能的工程意义	13
1.2.5 弹性不完整性	15
1.3 塑性变形	19
1.3.1 塑性变形的方式与特点	19
1.3.2 屈服现象及其本质	20
1.3.3 影响屈服强度的因素	23
1.3.4 加工硬化(应变硬化、形变强化)	29
1.3.5 颈缩现象和抗拉强度	33
1.3.6 塑性	35
1.3.7 韧性的概念及静力韧度分析	39
1.4 聚合物材料的变形	40
1.4.1 聚合物拉伸过程中的载荷-伸长曲线	40
1.4.2 聚合物的弹性变形和弹性模量	40
1.4.3 聚合物的变形机制	42
1.5 陶瓷材料的变形	44
1.6 材料的断裂	46
1.6.1 金属材料的断裂	46
1.6.2 金属断裂强度	54

1.6.3 陶瓷材料的断裂	60
---------------------	----

1.6.4 高分子材料的断裂	63
----------------------	----

小结	64
----------	----

复习思考题	64
-------------	----

第 2 章 材料在其他静载荷下的力学性能	66
----------------------------	----

2.1 应力状态软性系数	67
--------------------	----

2.2 材料的压缩	70
-----------------	----

2.2.1 压缩试验的特点	70
---------------------	----

2.2.2 压缩试验	70
------------------	----

2.3 材料的弯曲	72
-----------------	----

2.3.1 弯曲试验的特点	72
---------------------	----

2.3.2 弯曲试验	72
------------------	----

2.4 材料的扭转	75
-----------------	----

2.4.1 应力-应变分析	75
---------------------	----

2.4.2 扭转试验及测定的力学性能	76
--------------------------	----

2.5 材料的硬度	78
-----------------	----

2.5.1 硬度的概念与分类	78
----------------------	----

2.5.2 布氏硬度	80
------------------	----

2.5.3 洛氏硬度	82
------------------	----

2.5.4 维氏硬度	85
------------------	----

2.5.5 显微硬度	86
------------------	----

2.5.6 肖氏硬度	87
------------------	----

2.6 缺口试样在静载荷下的力学性能	88
--------------------------	----

2.6.1 缺口效应	88
------------------	----

2.6.2 缺口试件的力学性能	90
-----------------------	----

小结	93
----------	----

复习思考题	93
-------------	----

第 3 章 材料在冲击载荷下的力学性能	95
---------------------------	----

3.1 冲击载荷下材料变形与断裂的	
-------------------	--



特点	97	4.10.1 试样及其制备	145
3.2 冲击弯曲和冲击韧性	99	4.10.2 测试方法	146
3.2.1 缺口韧性冲击试验	99	4.10.3 试验结果的处理	147
3.2.2 缺口冲击试验的应用	101	4.11 弹塑性条件下的断裂韧性	148
3.3 低温脆性	102	4.11.1 J 积分	148
3.3.1 低温脆性现象	103	4.11.2 裂纹尖端张开位移 (COD)法	150
3.3.2 低温脆性的本质	104	4.12 陶瓷材料的断裂韧性与 增韧途径	152
3.3.3 韧脆转变温度的测定	105	4.12.1 陶瓷材料的断裂韧性	152
3.3.4 落锤试验和断裂 分析图	107	4.12.2 陶瓷材料断裂韧性的 测定	152
3.3.5 低温脆性的评定	110	4.12.3 陶瓷材料的增韧途径	154
3.3.6 影响韧脆转变温度的 因素	111	小结	157
小结	114	复习思考题	158
复习思考题	114		
第4章 材料的断裂韧性	115	第5章 材料在变动载荷下的 力学性能	159
4.1 概述	116	5.1 金属疲劳现象及特点	161
4.2 裂纹尖端的应力场	118	5.1.1 变动载荷和循环应力	161
4.2.1 三种断裂类型	118	5.1.2 疲劳现象及特点	163
4.2.2 I型裂纹尖端的 应力场	119	5.1.3 疲劳宏观断口特征	163
4.2.3 应力强度因子 K_I	120	5.2 高周疲劳	166
4.3 断裂韧性和断裂判据	122	5.2.1 $S-N$ 曲线和疲劳极限	167
4.3.1 断裂韧性 K_{IC} 和 K_{IC}	122	5.2.2 不对称循环应力下的 疲劳极限和疲劳图	169
4.3.2 断裂判据	123	5.2.3 疲劳缺口敏感度 q	171
4.4 几种常见裂纹的应力强度 因子	125	5.3 疲劳裂纹扩展	173
4.5 裂纹尖端的塑性区	127	5.3.1 疲劳裂纹扩展曲线	173
4.6 塑性区及应力强度因子的修正	129	5.3.2 疲劳裂纹扩展速率	174
4.7 裂纹扩展的能量判据 G_I	134	5.3.3 疲劳裂纹扩展寿命 估算	178
4.8 G_I 和 K_I 的关系	135	5.4 疲劳过程及机理	181
4.9 影响断裂韧性的因素	137	5.4.1 疲劳裂纹的萌生	181
4.9.1 外部因素	137	5.4.2 疲劳裂纹的扩展	184
4.9.2 内部因素	138	5.5 低周疲劳	186
4.9.3 高强度金属材料的 裂纹敏感性	141	5.5.1 低周疲劳概述	186
4.9.4 断裂韧性与常规力学 性能指标间的关系	142	5.5.2 缺口机件疲劳 寿命估算	189
4.10 金属材料断裂韧性 K_{IC} 的 测定	145	5.5.3 低周冲击疲劳	190
		5.5.4 热疲劳	192

5.6 聚合物的疲劳	194	7.2 蠕变的宏观规律及蠕变机制	225
5.7 陶瓷材料的疲劳	196	7.2.1 金属蠕变的宏观规律	225
5.7.1 静态疲劳	196	7.2.2 金属蠕变变形机制	226
5.7.2 循环疲劳	197	7.2.3 蠕变断裂机理	228
5.7.3 陶瓷材料疲劳特性 评价	198	7.3 金属高温力学性能指标	229
小结	199	7.3.1 蠕变极限	229
复习思考题	199	7.3.2 持久强度	231
第6章 材料在环境条件下的 力学性能	201	7.3.3 松弛稳定性	233
6.1 应力腐蚀断裂	203	7.4 影响金属高温力学性能的 主要因素	233
6.1.1 应力腐蚀现象及产生 条件	203	7.4.1 化学成分	233
6.1.2 应力腐蚀断裂机理及 断口分析	204	7.4.2 冶炼工艺的影响	234
6.1.3 应力腐蚀断裂评价 指标	206	7.4.3 组织结构	234
6.1.4 防止应力腐蚀断裂的 措施	208	7.4.4 晶粒尺寸	234
6.2 氢脆	209	7.5 金属蠕变与疲劳的交互作用	236
6.2.1 金属中的氢	210	7.6 聚合物的黏弹性与蠕变	236
6.2.2 氢脆类型及特征	210	7.6.1 温度对聚合物力学性能的 影响	236
6.2.3 氢致延滞断裂机理	211	7.6.2 聚合物的力学 松弛——黏弹性	238
6.2.4 氢致延滞断裂与应力 腐蚀的关系	212	7.7 陶瓷材料的抗热震性能	240
6.2.5 防止氢脆的措施	214	7.7.1 陶瓷抗热震性的理论 基础	240
6.3 腐蚀疲劳	215	7.7.2 陶瓷涂层的热震寿命	241
6.3.1 腐蚀疲劳的特点	215	7.7.3 抗热震陶瓷的分类及 应用	242
6.3.2 影响腐蚀疲劳裂纹扩展的 因素	217	7.7.4 提高陶瓷抗热震性的 主要措施	242
6.3.3 腐蚀疲劳裂纹扩展 机制	217	小结	244
6.3.4 防止腐蚀疲劳的措施	219	复习思考题	244
小结	220	第8章 材料的摩擦与磨损性能	245
复习思考题	220	8.1 摩擦与磨损的基本概念	246
第7章 材料在高温条件下的 力学性能	222	8.1.1 摩擦	247
7.1 材料在高温下力学性能的 特点	223	8.1.2 磨损	248
		8.2 磨损模型	251
		8.2.1 黏着磨损	251
		8.2.2 磨料磨损	254
		8.2.3 冲蚀磨损	259
		8.2.4 腐蚀磨损	262



8.2.5 微动磨损	264
8.3 磨损试验方法	265
8.3.1 磨损试验的类型	265
8.3.2 试样试验常用的磨损 试验机	265
8.3.3 材料耐磨性能的 评定方法	267
8.4 摩擦磨损的控制	267
8.4.1 减轻黏着磨损的 主要措施	268
8.4.2 改善磨料磨损耐磨性的 措施	268
小结	269

复习思考题	270
-------------	-----

第9章 纳米材料的力学性能

9.1 纳米材料简介	274
9.2 纳米材料力学性能	276
9.2.1 霍尔-配奇关系	277
9.2.2 模量	278
9.2.3 塑性与韧性	280
9.2.4 超塑性	282
小结	283
复习思考题	283

参考文献	284
------------	-----

绪论

材料是人类赖以生存和发展、征服自然和改造自然的物质基础与先导，是人类社会进步的里程碑。历史学家曾用材料来划分时代，如石器时代、陶器时代、青铜器时代、铁器时代，以及聚合物时代、半导体时代、复合材料时代等，可见材料对人类文明发展的重要作用。按 1986 年英国《材料科学与工程百科全书》提出的定义：材料科学与工程是研究有关材料组成(成分、组织与结构)、性能、生产流程(工艺)和使用效能以及它们之间关系的学科。据此，材料科学与工程的组成要素如图 0.1 所示。

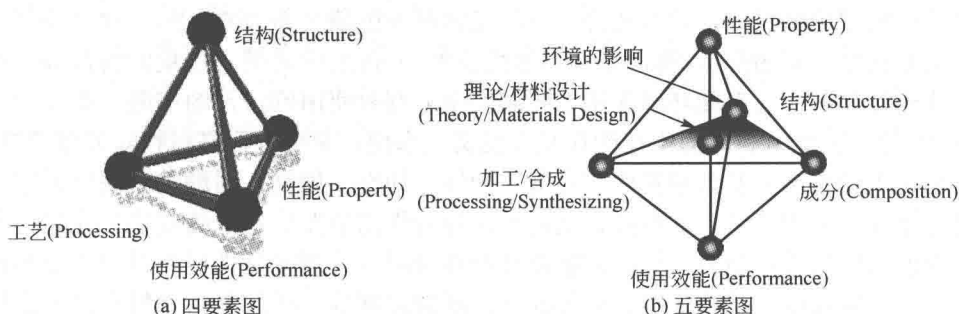


图 0.1 材料科学与工程的基本要素

由图 0.1 可以看出，材料科学与工程学科由四方面的基本要素组成：成分/结构(Composition/Structure)、制备合成/加工工艺(Synthesis/Processing)、性能(Property)和使用效能(Performance)。

(1) 材料的成分/结构是指材料的原子类型和排列方式，其包含四个层次：原子结构、结合键、原子排列方式(晶体与非晶体)和组织。材料的性能取决于材料的成分及其组织类型。

(2) 制备合成/加工工艺是指实现特定原子排列的演变过程，相对性能的影响随材料种类的不同而不同。

(3) 材料的性能是指对材料功能特性和效用(如电、磁、光、热、力学等性质)、化学性能(如抗氧化和抗腐蚀、聚合物的降解)和力学性能(如强度、塑性、韧性)的定量度量 and 描述。

(4) 使用效能是指材料性能在使用条件(如受力状态、气氛、介质与温度)下的表现。它把材料的固有性能和产品设计、工程应用能力联系了起来。度量使用性能的指标有：寿命、速度、能量利用率、安全可靠程度、利用成本等，在利用物理性能时包括能量转换效率、灵敏度等。

材料的性能是一种参量，用于表征材料在给定外界条件下的行为。性能必须参量化，即材料的性能需要定量地加以表述。多数的性能都有单位，通过对单位的分析(量纲分



析),可以加深对性能的理解。在不同的外界条件(应力、温度、化学介质、磁场、电场、辐照)下,同一材料也会有不同的性能。

材料力学性能是关于材料强度的一门学科,即是关于材料在外加载荷(外力)作用下或载荷和环境因素(温度、介质和加载速率)联合作用下表现的变形、损伤与断裂的行为规律,及其物理本质和评定方法的学科。

材料的力学性能常用材料的力学性能指标来表述。材料的力学性能指标是材料在载荷和环境因素作用下所发生的力学行为的量化因子,是评定材料质量的主要依据和结构设计时选材的根据。材料的力学性能指标作为表征材料力学行为特征的参量,其反映的是材料的某种力学行为发生的能力或材料对某种力学行为发生的抗力的大小。力学行为是指材料在外加载荷、环境条件或二者的综合作用下所表现出的现象和特征。材料的力学行为有变形和断裂两种情况,材料力学性能指标是材料在载荷和环境因素作用下抵抗变形与断裂的量化因子。机械零件(构件)在不同的载荷和环境条件下服役,如果其所使用材料对变形和断裂的抗力不足,不能与服役条件的要求相适应,则零件(构件)就会无法实现预定的效能而失效。材料常见的失效形式有两种:一种是材料发生断裂而失效;另一种是非断裂性失效,它主要包括过量的变形(弹性变形和塑性变形)、过量的磨损、过量的腐蚀等。寿命是指材料或构件在外加应力和环境作用下能够安全、有效使用(运行)的期限,如疲劳裂纹扩展寿命 N_f 等。因此材料的力学性能在某种意义上来说,又可以称作材料对失效的抗力。

材料的力学性能主要包括弹性、强度、塑性、韧性、硬度、耐磨性、缺口敏感性、裂纹扩展速率和寿命等。其中,弹性是指材料在外力作用下发生一定的变形,在外力去除后恢复固有形状的尺寸的能力,如比例极限和弹性极限等;强度是指材料对塑性变形和断裂的抗力,如屈服强度、抗拉强度、疲劳强度、断裂强度等;塑性是指材料在外力作用下发生不可逆的永久变形的能力,如断后伸长率 A 、断面收缩率 Z 等;韧性是指材料在断裂前吸收塑性变形功和断裂功的能力,如静力韧性、冲击韧性、断裂韧性等;硬度是指材料的软硬程度,如布氏硬度 HB 、洛氏硬度 HRC 、维氏硬度 HV 、努氏硬度 HK 、莫氏硬度等;耐磨性是指材料抵抗磨损的能力,如线(质量、体积)磨损量、相对耐磨性等;缺口敏感性是指材料对缺口(截面变化)的力学响应,如应力集中系数 K_t 、静拉伸缺口敏感性 NSR 、疲劳缺口系数 K_f 、疲劳缺口敏感系数 q_f 等;裂纹扩展速率是表征裂纹试样在外力和环境作用下演化行为的参量,如应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt 、疲劳裂纹扩展速率 da/dN 等。材料力学性能的优劣就是用这些力学性能指标的具体数值来表示的。

材料的力学性能取决于材料的化学成分、组织结构、残余应力、表面和内部的缺陷等因素,但如果外在的因素,如载荷的性质、应力状态、工作温度、环境介质等条件发生变化,也会极大地影响材料力学性能。例如,退火态低碳钢在单向静拉伸载荷条件作用下,随着载荷的增加首先产生弹性变形,当应力达到屈服应力后开始塑性变形,到载荷达到最高值后材料经过颈缩后发生断裂,材料显示出良好的塑性特征;但当低碳钢承受交变载荷作用时,在应力低于屈服极限的条件下同样会发生断裂,而且在试样上观察不到明显的塑性变形的痕迹;如果低碳钢在很低的温度下工作,同样也会产生脆性断裂。所以,综合分析各种内在和外在因素对材料力学性能的影响,掌握各种因素对材料力学性能影响的规律,对于正确选择材料,提出改善材料力学性能的措施,制定和改进材料的加工工艺,提高零件(构件)的使用寿命具有重要的意义。

材料的力学性能是建立在试验的基础之上的,各种力学性能指标需要根据相应的国家

标准通过试验来测定,所以在材料力学性能研究过程中,必须高度重视力学性能指标的测试技术。

综上所述,材料力学性能课程的主要内容包括:

- (1) 各种服役条件下材料的力学行为及其微观机理。
- (2) 各种力学性能指标的本质、物理概念、应用意义及各种力学性能指标间的关系。
- (3) 影响力学性能的因素,提高材料力学性能的方法和途径。
- (4) 力学性能指标的测试技术及方法。

材料力学性能与材料科学基础(金属学与热处理)、工程力学、材料力学、工程材料学及材料加工制备工艺等课程密切相关。这些课程为材料力学性能研究提供了材料的化学成分与微观组织结构、材料的各种性能与加工制备方法、应力分析和材料宏观强度理论等方面的知识,本课程为评定材料及其加工制备方法提供了理论依据。它们之间构成了相互关联的系统。

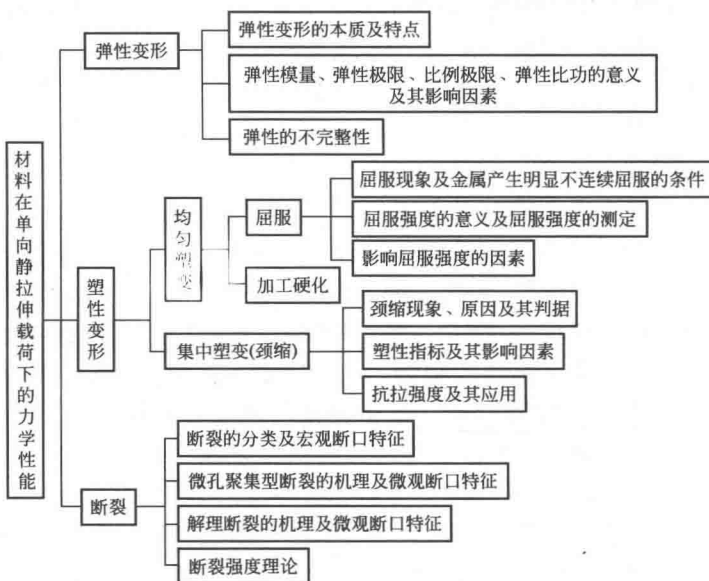
材料的力学性能与工程应用密切联系,各种零件(构件)的失效是在不同服役条件下产生的。因此,学习本课程必须密切联系实际,注重与相关课程之间的联系,要充分利用相关课程的知识,理解、掌握本课程的理论,又要从具体的服役条件出发,分析具体的零件(构件)的失效原因,从而从材料成分、组织及材料的加工制备工艺等方面提出避免和防止零件(构件)产生早期失效的措施和方法。

第 1 章

材料在单向静拉伸载荷下的力学性能



本章知识框架



本章教学目标与要求

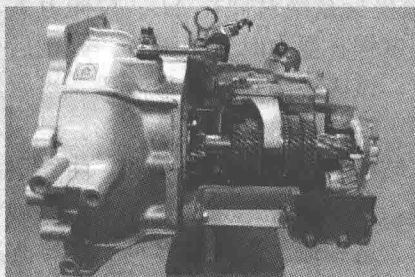
1. 掌握金属在单向静拉伸载荷下的力学行为。
2. 理解弹性模量、屈服强度及塑性等性能指标的含义及其主要影响因素；掌握弹性变形、塑性变形的本质和特点及相应的力学性能指标的测试方法；了解有关弹性不完整性的表现及其机理。
3. 掌握金属断裂的过程及不同类型断裂的特点及其机理；了解有关断裂强度的理论和应用。
4. 熟悉高分子材料及无机非金属材料的拉伸变形特点。



导入案例

一般机械零件和构件在工作过程中处于弹性状态，工作过程中不允许发生塑性变形或过大的弹性变形。所以，在机械设计中，常以屈服强度作为设计和选材的依据。同时考虑到节能、环保等方面的要求，所选用的材料应具有较高的比强度和比刚度，这样可以使零件或构件自身的质量轻、体积小、承载能力强。

镁、铝合金具有密度小、比强度高、阻尼性及切削加工性好、导热性好、减振性好、无毒、无磁性，而且易于回收等优点。与最轻的塑料相比，镁合金密度虽为塑料的1.5倍，但塑料的刚度仅为镁合金的1/10，同时其散热性以及可回收方面均不及镁合金；镁合金的刚性与铝合金、锌合金相近，其密度仅为金属铝的2/3，是所有结构用合金中最轻的材料。在汽车工业上用镁合金代替钢、铸铁可以使零件的质量降低65%~75%，可以有效地达到节能、减排的目的，如图1.1所示。



(a) 镁合金汽车变速器壳



(b) 镁合金轮毂

图 1.1 镁合金

静载拉伸试验是最基本的、应用最广泛的力学性能试验方法。静载拉伸试验可以揭示材料的基本力学行为规律，并且得到材料弹性、强度、塑性和韧性等许多重要的力学性能指标。由静载拉伸试验测定的力学性能指标，可以作为工程设计、评定材料和优选工艺的依据，可以作为预测材料的其他力学性能的参量(如抗疲劳、断裂性能)的基础数据，具有重要的工程实际意义。

1.1 拉伸力-伸长曲线和应力-应变曲线

根据 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 室温试验方法》的规定：静载拉伸试样一般为光滑圆柱试样或板状试样。若采用光滑圆柱试样，试样工作长度(标长) $l_0 = 5d_0$ 或 $l_0 = 10d_0$ ，试样的形状如图1.2所示。静拉伸试验，通常是在室温(10~35℃)和轴向加载条件下进行的，其特点是计算机控制拉伸试验机加载，静拉轴线与试样轴线重合，载荷缓慢施加，应变与应力同步，试样在屈服以前应变速率建议控制在 $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0.0025s^{-1}$ ，相对误差±20%；屈服阶段及屈服后根据试样平行长度估计的应变速率建议分别控制为 $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0.0025s^{-1}$ 和 $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0.0067s^{-1}$ ，相对误差±20%。

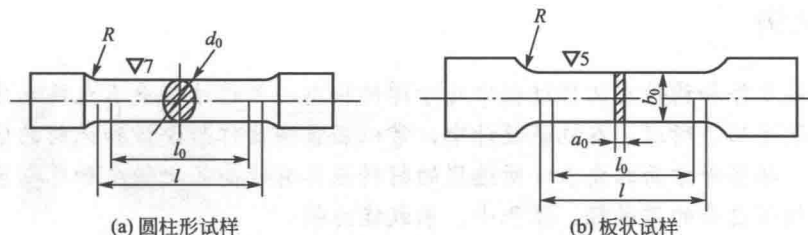


图 1.2 拉伸试样的形状

1.1.1 拉伸力-伸长曲线

拉伸力-伸长曲线是拉伸试验中记录的拉伸力和伸长量的关系曲线。图 1.3 所示为退火低碳钢拉伸力-伸长曲线。

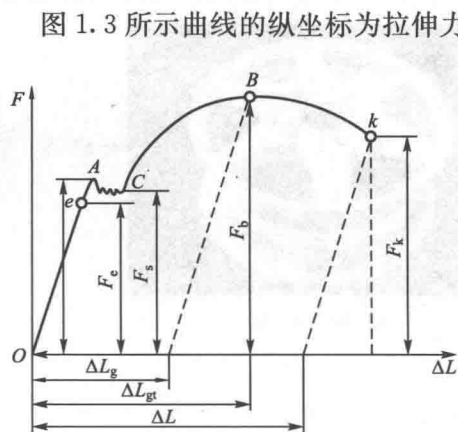


图 1.3 退火低碳钢拉伸力-伸长曲线

图 1.3 所示曲线的纵坐标为拉伸力 F ，横坐标是绝对伸长 ΔL 。拉伸力 F 在 e 以下阶段，试样在受力时发生形变，卸载后变形能完全恢复，该区段为弹性变形阶段。当所加的拉伸力达到 e 后，试样开始塑性变形。最初，试样上局部区域产生不均匀塑性变形，曲线上出现平台或锯齿，直至 C 点结束。继而，进入均匀塑性变形阶段。达到最大拉伸力 B 时，试样再次产生不均匀塑性变形，在局部产生颈缩。最后，在拉伸力 k 处，试样发生断裂。

由此可知，退火低碳钢在拉伸力作用下的力学行为可分为弹性变形、不均匀屈服塑性变形、均匀塑性变形、不均匀集中塑性变形和断裂几个阶段。

1.1.2 应力-应变曲线

将图 1.3 拉伸力-伸长曲线的纵、横坐标分别用拉伸试样的原始截面积 S_0 ，原始标距长度 L_0 去除，就得到应力-应变曲线(图 1.4)。因均系以一相应常数相除，故应力-应变曲线形状与拉伸力-伸长曲线相似。这样的曲线为工程(条件)应力-应变曲线(简称应力-应变曲线)。根据该曲线便可以建立金属材料在拉伸条件下的力学性能指标。一般条件应力用 R 表示和条件应变用 e 表示，则有

$$R = F/S_0 \quad (1-1)$$

$$e = \Delta L/L_0 \quad (1-2)$$

式中， F 为载荷； ΔL 为试样伸长量； $\Delta L = L - L_0$ ； L_0 为试样原始标长； L 为与 F 相对应的标长部分的长度； S_0 为原始部分的截面积。

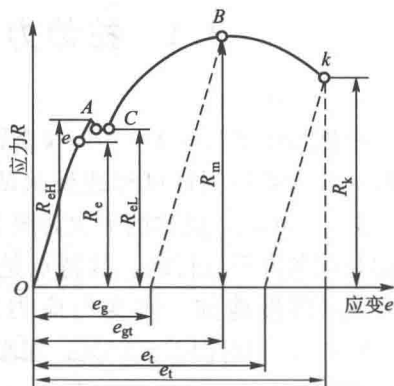


图 1.4 退火低碳钢应力-应变曲线

如果用真实应力 S 和真实应变 $\epsilon(\Psi_e)$ 绘制曲线, 则得到真应力-真应变曲线, 如图 1.5 所示。相应计算公式为

$$S = \frac{F}{A} \quad (1-3)$$

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln(1 + e) \quad (1-4)$$

$$\Psi_e = \int_{F_0}^F \frac{dA}{A} = \ln \frac{A}{A_0} = \ln \frac{A_0 - \Delta A}{A_0} = \ln(1 + Z) \quad (1-5)$$

正火、退火碳素结构钢和一般低合金结构钢, 也都具有类似的应力-应变曲线, 只是力的大小和变形量不同。但是并非所有的金属材料或同一材料在不同条件下都具有相同类型的应力-应变曲线。

图 1.6 所示为脆性材料退火低碳钢的应力-应变曲线。其行为特点是应变与应力单值对应, 成直线比例关系, 只发生弹性变形, 不发生塑性变形, 在最高载荷点处断裂, 形成平断口, 断口平面与拉力轴线垂直。应力-应变曲线与横轴夹角的大小表示材料对弹性变形的抗力, 用弹性模量 E 表示, 即

$$E = \tan \alpha \quad (1-6)$$

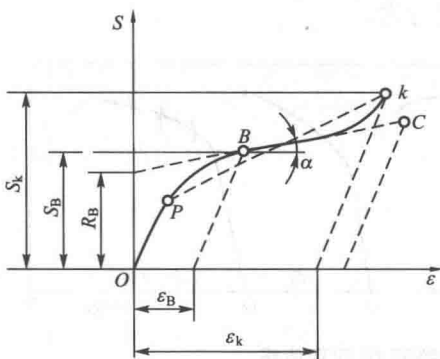


图 1.5 真应力-真应变曲线

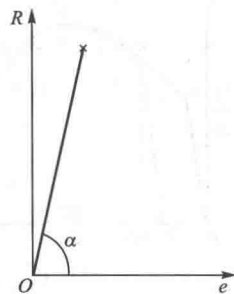


图 1.6 脆性材料退火低碳钢
应力-应变曲线

工程上大多数玻璃、陶瓷、岩石、横向交联很好的聚合物、淬火状态的高碳钢和普通灰铸铁等均具有此类应力-应变曲线。

图 1.7 所示为工程塑性材料应力-应变曲线的几种形式。图 1.7(a) 为最常见的金属材料应力-应变曲线, Oa 为弹性变形阶段, 其行为特点与图 1.4 相同。在 a 点偏离直线关系, 进入弹-塑性阶段, 开始发生塑性变形, 过程沿 abk 进行。开始发生塑性变形的应力称为屈服点。屈服以后的变形包括弹性变形和塑性变形, 如在 m 点卸载, 应力沿 mn 降至零, m 点所对应的应变 Om' 为总应变, 在卸载后恢复的部分 $m'n$ 为弹性应变, 残留部分 nO 为塑性应变。如果重新加载, 继续拉伸试验, 应力-应变曲线沿 nm 上升, 至 m 点后沿 mbk 进行。 nm 与 Oa 平行, 属于弹性变形阶段, 塑性变形在 m 点开始, 其相应的应力值高于首次加载时塑性变形开始的应力值, 这表明材料经历一定的塑性变形后, 其屈服应力升高了, 这种现象称为应变强化或加工硬化。 b 点为应力-应变曲线的最高点, b 点之



前, 曲线是上升的, 与 ab 段曲线相对应的试样变形是整个工作长度内的均匀变形, 即在试样各处截面均匀缩小。从 b 点开始, 试样的变形便集中于某局部地方, 即试样开始集中变形, 出现“缩颈”。材料经均匀变形后出现集中变形的现象称为颈缩。试样的颈缩在 b 点开始, 颈缩开始后, 试样的变形只发生在颈部的有限长度上, 试样的承载能力迅速降低, 按式(1-1)计算的工程应力值也降低, 应力-应变曲线沿 bk 下降, 最后在 k 点断裂, 形成杯状断口。工程上很多金属材料, 如调质钢和一些轻合金都具有此类应力-应变行为。

图 1.7(b)所示为具有明显屈服点材料的应力-应变曲线, 与图 1.7(a)相比, 不同之处在于, 出现了明显屈服点 aa' 。这种屈服点在应力-应变曲线上有时呈屈服平台状, 有时呈齿状, 相应的应变量为 $1\% \sim 3\%$ 。退火低碳钢和某些有色金属具有此类应力-应变行为。

图 1.7(c)所示为拉伸时不出现颈缩的应力-应变曲线, 只有弹性变形和均匀塑性变形的阶段。某些塑性较低的金属(如铝青铜)就是在未出现颈缩前的均匀变形过程中断裂的, 其具有此类应力-应变曲线。还有些形变强化能力特别强的金属, 如 ZGMn13 等高锰钢也具有此类应力-应变行为, 不但塑性大, 而且形变强化潜力大。

图 1.7(d)所示为拉伸不稳定型材料的应力-应变曲线。其变形特点是在形变强化过程中出现多次局部失稳, 原因是孪生变形机制的参与。当孪生应变速率超过试验机夹头运动速度时, 导致局部应力松弛, 在应力-应变曲线上相应出现齿形特征。某些低溶质固溶体铝合金及含杂质的铁合金具有此类应力-应变行为。

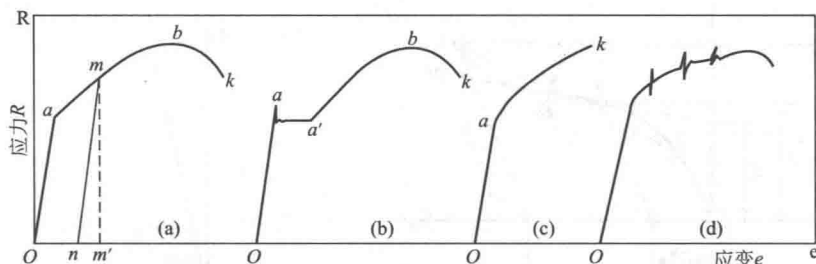


图 1.7 塑性材料应力-应变曲线

综上所述, 根据拉伸试验可以判断材料呈宏观脆性还是塑性, 以及塑性的大小、对弹性变形和塑性变形的抗力以及形变强化能力的大小等。此外, 还可以反映断裂过程的某些特点。在工程上, 拉伸试验被广泛用来测定材料的常规力学性能指标, 为合理评定、鉴别和选用材料提供依据。

1.2 弹性变形

1.2.1 弹性变形及其实质

材料受外力作用发生尺寸和形状的变化, 称为变形。外力去除后, 随之消失的变形为弹性变形, 剩余的(即永久性的)变形为塑性变形。

弹性变形的重要特征是其可逆性, 即受力作用后产生变形, 卸除载荷后, 变形消失。