



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



Mechanical Properties of Engineering Materials

工程材料力学性能

第3版

合肥工业大学 束德林 © 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程材料力学性能



第3版

主编 束德林
参编 陈九磅 凤 仪



机械工业出版社

本书主要介绍工程材料在各种载荷作用及服役条件下的力学性能。全书共 11 章,有关金属材料力学性能的内容分设 8 章,是全书的基础;聚合物材料力学性能、陶瓷材料力学性能、复合材料力学性能各立 1 章。书中分别阐述了工程材料在静载荷、冲击载荷和交变载荷及兼有环境介质作用下的力学性能,以及抗断裂、耐磨损等性能。全书努力做到:宏观规律与微观机理相结合,以阐述宏观规律为主;加强力学性能指标物理意义与工程应用的介绍,促进理论联系实际。

本书可作为高等工科院校材料科学与工程类专业本科生教材,也可供有关专业的大学生及工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料力学性能/束德林主编. —3 版. —北京:机械工业出版社, 2016. 4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-53095-4

I. ①工… II. ①束… 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 (2016) 第 039381 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:冯春生 责任编辑:冯春生 韩冰 张鑫

版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:张静 责任印制:李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2016 年 6 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16.75 印张 · 415 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-53095-4

定价:38.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第3版前言

工程用材料一般指金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料，其中金属材料产量最大，应用最广，在制造业中占比最高。随着国家社会经济的持续发展，新材料不断出现，工程领域对材料品种和数量的需求快速增加，对材料力学性能的要求越来越高。在不同工程领域，产品服役条件不尽相同，对材料力学性能的要求也不一样。因此，在编写《工程材料力学性能》新版教材时，编者希望，既要介绍材料力学性能的基本理论、基本知识、基本规律和试验技术，还要从以传统机械工程产品作为联系实际的对象，扩大到兼顾交通运输工程、建筑工程等领域，进一步提高教材的实用性。

机件因疲劳破坏而造成的失效事件占总失效事件的80%左右，一些关键机件的疲劳破坏常和表面的微细裂纹扩展有关。因此，有必要简单介绍“疲劳短裂纹”扩展的内容。

金属材料力学性能试验方法的国家标准化建设步伐不断加速，已先后颁布实施了新的《金属材料室温拉伸试验方法》《金属材料布氏硬度试验方法》《金属材料洛氏硬度试验方法》《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》等。新标准已逐渐被企业广泛采用，并在专业学术期刊上的应用面也日益扩大，读者已逐渐熟悉。对此，教材应积极贯彻新标准，将有关新标准内容以适当方式吸收入教材中。编者以为，贯彻新标准要考虑教材的任务和整体性以及标准的特点，还要与有关学科及工程技术领域的科学著作、教材和手册中力学性能的名称和符号相衔接。为此，编者在第一、二章中，采用了两种应力符号：一是“ R ”，也表征材料在拉伸或压缩载荷作用下对变形的抗力（或强度）（下角附特征点符号）；二是“ σ ”，既是工程力学中的基本符号，又是全书后续各章中的应力或强度符号（下角附特征点符号）。

本书此次修订时，浙江大学李志章教授、江苏大学罗启富教授、大连交通大学戴雅康教授、南昌大学杨平生教授曾对有关章节进行了审阅，他们提出了一些有价值的意见，编者谨向几位老教授致以诚挚的谢意。

本次修订工作由束德林任主编，修订章节人员保持不变。陈九磅还负责了全书的插图、照片、名称符号、附录标准以及书稿的整理工作。

编者在本书修订中参考和引用了一些单位及作者的资料、研究成果、插图和图片，谨此致以谢意。

由于编者学术水平和条件所限，书中疏漏之处在所难免，敬希读者指正。

束德林
于合肥

第2版前言

本书体系是经多年实践逐步形成的，为了适应国家社会经济发展和高等学校本科教学改革的需要，编者对第1版中的部分内容进行了充实和更新，其中主要有：①新增高应变速率条件下的低周冲击疲劳，并将原“冲击疲劳”标题改为“低周冲击疲劳”，内含金属材料在低应变速率和高应变速率条件下的冲击疲劳行为；②重新编入用断裂韧性“评定钢铁材料的韧脆性”，增加“金属材料的冲蚀磨损”，聚合物和复合材料的韧性与增韧的有关内容，介绍聚合物材料的屈服和冷拉伸性能、摩擦学特性和磨损性能等，这些材料力学性能与使用性能、工艺性能相关的部分，进一步加强了理论与实际的联系；③简要介绍了非金属材料的一些力学性能试验方法和相应的力学性能指标，如聚合物和复合材料的冲击试验方法、冲击强度和断裂能等；④适应材料力学性能试验方法国家标准更新速度加快的要求，对书中涉及的力学性能试验方法及时进行了更新，如硬度试验等。但金属材料室温拉伸试验方法中，新旧标准指标、名称和符号差异颇大，目前在教材中将新标准介绍给读者，似乎尚不成熟。为了方便读者，编者采用了过渡方法，在书末附录部分列出了GB/T 228—2002《金属材料 室温拉伸试验方法》中力学性能指标名称和符号对照表，供读者查阅参考。

在此版教材成书过程中，我们得到了兄弟院校四位老教授的关心和支持。他们认真地审阅了有关章节的书稿，提出了不少有益的意见，对提高本书的质量做出了重要贡献。他们是：太原理工大学刘会亭教授（审第一、四、五章）；江苏大学罗启富教授（审第三、七、九、十章）；大连交通大学戴雅康教授（审第二、六、八、十一章）；南昌大学杨平生教授（审低周冲击疲劳）。编者谨向这几位老教授致以诚挚的谢意。

参加本书修订工作的有：合肥工业大学束德林（第一、二、四、五、六、八、九章）、陈九磅（第三、七、十章）、凤仪（第十一章）。陈九磅还负责了全书插图、照片、名称符号、附录标准以及书稿的整理工作。全书由束德林任主编。

作者在编写本书时曾参考和引用了一些单位及作者的资料、研究成果和图片，在此谨致谢意。

编者学术水平有限，时间又紧迫，书中错误之处，敬希读者不吝指正。

束德林
于合肥

第1版前言

本书是在原《金属力学性能》(第2版)教材基础上编写的。

编写的思路主要是:教材要为大学本科材料科学与工程类专业学生选材、变革冷热加工工艺、失效分析提供基础知识;篇幅不宜过大,但又要留有一定余地,以便读者自主选择;以金属材料力学性能知识为基础,作为介绍聚合物材料、陶瓷材料和复合材料力学性能的先导。金属材料力学性能的内容安排仍保留原来的体系,共设8章,但几乎每一章的内容都做了不同程度的压缩与调整:如第一章中解理断裂机理只保留了位错塞积与位错反应模型,微孔聚集断裂形核长大模型也做了简化处理;第四章关于弹塑性断裂力学只介绍了 J 积分与COD的基本概念,既压缩了篇幅,又突出了线弹性断裂力学的内容和基础地位;第五章中疲劳裂纹扩展过程仅叙述了塑性钝化模型;第七章磨损部分内容也做了删减和改写等。鉴于材料力学行为都与材料自身的结构有密切联系,本书将聚合物材料和陶瓷材料的力学性能分开立章,在简要叙述了它们的结构特点后再讨论其力学行为,可能有助于读者对这些材料力学性能的理解与掌握,也有利于对内容做适当充实。复合材料力学性能因材料结构的特殊性,且又涉及较多力学问题,本书只介绍了最基本的知识。

书中名词术语、力学性能指标及其符号和测定方法均按国家现行标准叙述和书写,但复合材料力学性能一章仍保留了复合材料科学的现有用法。

为了适应国家进一步改革开放的需要,书中附录还列出了有关国家部分材料力学性能试验标准编号和名称,供读者查阅参考。

参加1995年《金属力学性能》(第2版)教材编写工作的老师除束德林(第一、三、七章,原安徽工学院)外,尚有刘会亭(第四、五章,原太原工业大学)、戴雅康(第二、六、八章,原大连铁道学院)、罗启富(第九章,原江苏理工大学),由浙江大学李志章教授主审。他们为金属力学性能教材建设做出了很大贡献,没有他们的参与和打下的基础,第2版和本书不可能问世。在此次重新编写过程中,罗启富教授对有关章节进行了审阅并提了宝贵意见;戴雅康教授除对有关章节提出修改建议外,还为国内外材料力学性能试验标准的收集与整理做了大量工作。编者在向他们表示深切谢意的同时,还向《金属力学性能》(第1版)教材主审天津大学陈敏熊教授、编写者山东工业大学孙希泰教授致以由衷的感谢。

参加本书编写工作的老师有:合肥工业大学束德林(第一、二、四、五、六、八、九、十章)、陈九磅(第三、七章)、凤仪(第十一章)。陈九磅老师还负责了全书插

图、名词符号、附录标准的整理等工作。全书由束德林任主编。

作者在编写本书时曾参考和引用了一些单位及作者的资料、研究成果和图片，在此谨致谢意。

由于编者学术水平和客观条件所限，书中疏漏之处在所难免，敬希读者批评指正。

束德林

于合肥

本书主要符号

- A ——断后伸长率
 A_{gt} ——金属材料拉伸时最大力下的总延伸率
 A_c 、 A_f 、 A_m ——复合材料、纤维、基体的横截面积
 a_c ——临界裂纹长度
 COD——裂纹尖端张开位移
 da/dN ——疲劳裂纹扩展速率
 da/dt ——应力腐蚀或氢致延滞断裂裂纹扩展速率
 E ——弹性模量
 E_b ——弯曲弹性模量
 E_c ——压缩弹性模量
 $E_c(\tau)$ ——聚合物蠕变模量
 E_{cl} 、 E_{ct} ——复合材料纵向弹性模量、横向弹性模量
 E_f 、 E_m ——纤维和基体的弹性模量
 $E_r(\tau)$ ——聚合物应力松弛模量
 e ——延伸率
 ETT n ——冲击吸收能量-温度曲线的上平台与下平台之差规定百分数 n (例如 50%) 所对应的韧脆转变温度
 F ——试验力
 FATT n ——脆性断面率-温度曲线的上平台与下平台之差规定百分数 n (例如 50%) 所对应的韧脆转变温度
 f ——弯曲挠度
 G ——切变模量
 G_c 、 G_f 、 G_m ——复合材料、纤维、基体的切变模量
 G_I ——裂纹扩展能量释放率或裂纹扩展力
 G_{Ic} ——临界能量释放率或临界裂纹扩展力, 线弹性条件下以能量形式表示的断裂韧度
 HBW——布氏硬度
 HR——洛氏硬度
 HK——努氏硬度
 HV——维氏硬度
 HS——肖氏硬度
 HL——里氏硬度
 J 、 J_I —— J 积分或裂纹尖端能量线积分
 J_{Ic} ——I 型裂纹临界 J 积分、弹塑性状态下以能量形式表示的断裂韧度
 K ——冲击吸收能量
 KU 、 KV ——U 型缺口试样和 V 型缺口试样冲击吸收能量
 K_f ——疲劳缺口系数
 K_t ——理论应力集中系数
 K_I ——I 型裂纹应力(场)强度因子
 K_{Ic} ——临界应力(场)强度因子, 线弹性条件下以应力(场)强度因子表示的断裂韧度
 K_{Isc} ——应力腐蚀临界应力(场)强度因子(应力腐蚀门槛值)
 K_{IHEC} ——氢致延滞断裂临界应力(场)强度因子(氢致延滞断裂门槛值)
 NDT——无塑性(零塑性)转变温度, 以低阶能开始上升的温度定义的韧脆转变温度
 NSR——静拉伸缺口敏感度
 n ——应变硬化指数
 g_f ——疲劳缺口敏感度
 R ——应力; 陶瓷材料冷急热下抗热震断裂参数
 R' ——陶瓷材料缓慢加热和冷却下的抗热震断裂参数
 R_{eH} ——上屈服强度

- R_{el} ——下屈服强度
 R_p ——规定塑性延伸强度
 R_r ——规定残余延伸强度
 R_m ——抗拉强度
 R_t ——规定总延伸强度
 R_{eHe} ——上压缩屈服强度
 R_{eLe} ——下压缩屈服强度
 R_{mc} ——抗压强度
 r ——应力比
 S_0 ——试样原始截面积
 T, t ——温度
 T_t ——韧脆转变温度
 U_e ——弹性应变能
 V ——裂纹嘴张开位移; 体积磨损量
 V_e, V_f, V_m ——复合材料、纤维、基体的体积分数
 V_{fcr}, V_{fmin} ——纤维临界体积分数和最小体积分
 W_e ——弹性比功
 Y ——裂纹形状系数
 Z ——断面收缩率
 α ——应力状态软性系数
 γ ——条件切应变
 $\gamma_e, \gamma_f, \gamma_m$ ——复合材料、纤维、基体的切应变
 γ_p ——裂纹扩展单位面积消耗塑性功
 γ_s ——裂纹表面能
 ΔK_{th} ——疲劳裂纹扩展门槛值
 ΔK_I ——应力(场)强度因子范围
 δ ——裂纹尖端张开位移; 断后伸长率; 伸长率
 δ_c ——裂纹尖端临界张开位移, 在弹塑性状态下以变形量表示的断裂韧度
 ε ——条件应变或条件伸长率; 冲蚀率
 $\varepsilon_{eL}, \varepsilon_{eT}$ ——复合材料的纵向应变和横向应变
 $\varepsilon_f, \varepsilon_m$ ——纤维、基体的应变
 $\dot{\varepsilon}$ ——应变速率
 $\varepsilon_{sh}, \varepsilon_{shB}$ ——真应变、最大真实均匀塑性应变
 ε_{shf} ——断裂真应变
 μ ——摩擦因数
 ν ——泊松比
 ν_{LT}, ν_{TL} ——纵泊松比、横泊松比
 σ ——条件正应力
 σ_b ——抗拉强度
 σ_{bb} ——抗弯强度
 σ_{lm} ——缺口抗拉强度
 σ_c ——裂纹体的名义断裂应力或实际断裂强度
 $\sigma_e, \sigma_f, \sigma_m$ ——复合材料、纤维、基体的应力
 σ_{eL}, σ_{eT} ——复合材料的纵向应力、横向应力
 $\sigma_{em}, \sigma_{fm}, \sigma_{mm}$ ——复合材料、纤维、基体的强度
 σ_m ——理论断裂强度; 平均应力
 σ_r ——规定残余伸长应力; 剩余应力
 σ_{re} ——松弛应力
 σ_s ——屈服强度
 σ_{sec} ——不发生应力腐蚀的临界应力
 $\sigma_{\delta/\tau}^t$ ——在规定温度 t 下和规定时间 τ 内, 以规定蠕变总伸长率 δ 表示的蠕变极限
 $\sigma_{\dot{\varepsilon}}^t$ ——在规定温度 t 下, 以规定稳态蠕变速率 $\dot{\varepsilon}$ 表示的蠕变极限
 σ_{τ}^t ——在规定温度 t 下, 达到规定持续时间 τ 而不发生断裂的持久强度极限
 $\sigma_{0.2}$ ——屈服强度
 σ_{-1} ——对称应力循环下的弯曲疲劳极限
 σ_{-1N} ——缺口试样在对称应力循环下的疲劳极限
 σ_{sh} ——真应力
 σ_{shB} ——真实抗拉强度
 σ_{shf} ——断裂真应力
 τ ——条件切应力
 τ_e, τ_f, τ_m ——复合材料、纤维、基体的切应力
 τ_m ——抗扭强度
 τ_{sh}, τ_{shL} ——扭转上屈服强度、扭转下屈服强度

目 录

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
本书主要符号	
第一章 金属在单向静拉伸载荷下的力学性能	1
第一节 拉伸力-伸长(延伸)曲线和应力-应变曲线	2
第二节 弹性变形	3
一、弹性变形及其实质	3
二、胡克定律	4
三、弹性模量	5
四、弹性比功	5
五、滞弹性	6
六、包申格(Bauschinger)效应	8
第三节 塑性变形	9
一、塑性变形方式及特点	9
二、屈服现象和屈服强度	10
三、影响屈服强度的因素	14
四、应变硬化(形变强化)	17
五、缩颈现象和抗拉强度	19
六、塑性	21
七、屈强比	23
八、静力韧度(强塑积)	24
第四节 金属的断裂	24
一、断裂的类型	24
二、解理断裂	28
三、微孔聚集断裂	32
四、断裂强度	34
五、断裂理论的意义	39
思考题与习题	40
第二章 金属在其他静载荷下的力学性能	42
第一节 应力状态软性系数	43
第二节 压缩	44
一、压缩试验的特点	44
二、压缩试验	44
第三节 弯曲	45
一、弯曲试验的特点	45
二、弯曲试验	45
第四节 扭转	46
一、扭转试验的特点	46
二、扭转试验	47
第五节 缺口试样静载荷试验	48
一、缺口效应	48
二、缺口试样静拉伸试验	51
三、缺口试样静弯曲试验	52
第六节 硬度	53
一、金属硬度的意义及硬度试验的特点	53
二、硬度试验	53
思考题与习题	60
第三章 金属在冲击载荷下的力学性能	61
第一节 冲击载荷下金属变形和断裂的特点	62
第二节 冲击弯曲和冲击韧性	62
第三节 低温脆性	64
一、低温脆性现象	64
二、韧脆转变温度	65
三、落锤试验和断裂分析图	67
第四节 影响韧脆转变温度的冶金因素	69
一、晶体结构	69
二、化学成分	69
三、显微组织	69

思考题与习题	71	性能	107
第四章 金属的断裂韧性	72	一、疲劳曲线和对称循环疲劳 极限	107
第一节 线弹性条件下的金属断裂 韧性	73	二、疲劳图和不对称循环疲劳 极限	109
一、裂纹扩展的基本形式	73	三、抗疲劳过载能力	111
二、应力场强度因子 K_I 及断裂 韧性 K_{IC}	74	四、疲劳缺口敏感度	112
三、裂纹扩展能量释放率 G_I 及 断裂韧性 G_{IC}	82	第三节 疲劳裂纹扩展速率及疲劳 门槛值	114
第二节 断裂韧性 K_{IC} 的测试	84	一、疲劳裂纹扩展曲线	114
一、试样的形状、尺寸及制备	84	二、疲劳裂纹扩展速率	115
二、测试方法	85	三、疲劳裂纹扩展寿命的估算	120
三、试验结果的处理	86	第四节 疲劳过程及机理	121
第三节 影响断裂韧性 K_{IC} 的因素	87	一、疲劳裂纹萌生过程及机理	121
一、断裂韧性 K_{IC} 与常规力学 性能指标之间的关系	87	二、疲劳裂纹扩展过程及机理	123
二、影响断裂韧性 K_{IC} 的因素	88	第五节 影响疲劳强度的主要 因素	125
第四节 断裂韧性在金属材料中的 应用举例	91	一、表面状态的影响	126
一、高压容器承载能力的计算	91	二、残余应力及表面强化的 影响	126
二、高压壳体的热处理工艺选 择	92	三、材料成分及组织的影响	129
三、高强度钢容器水爆断裂失效 分析	93	第六节 常见疲劳断裂	130
四、大型转轴断裂分析	93	一、低周疲劳	130
五、评定钢铁材料的韧脆性	94	二、缺口机件疲劳寿命估算	134
第五节 弹塑性条件下金属断裂韧度的 基本概念	96	三、低周冲击疲劳	135
一、 J 积分及断裂韧性 J_{IC}	97	四、热疲劳	137
二、裂纹尖端张开位移及断裂 韧性 δ_c	98	第七节 疲劳短裂纹扩展简介	138
思考题与习题	100	思考题与习题	139
第五章 金属的疲劳	102	第六章 金属的应力腐蚀和氢 脆断裂	141
第一节 金属疲劳现象及特点	103	第一节 应力腐蚀	142
一、变动载荷和循环应力	103	一、应力腐蚀现象及其产生 条件	142
二、疲劳现象及特点	104	二、应力腐蚀断裂机理及断口 形貌特征	143
三、疲劳宏观断口特征	105	三、应力腐蚀抗力指标	144
第二节 疲劳曲线及基本疲劳力学 性能	107	四、防止应力腐蚀的措施	147
		第二节 氢脆	147

一、氢在金属中的存在形式·····	147	第九章 聚合物材料的力学	
二、氢脆类型及其特征·····	148	性能·····	187
三、钢的氢致延滞断裂机理·····	149	第一节 聚合物材料的结构·····	188
四、氢致延滞断裂与应力腐蚀的		一、高分子链的近程结构——	
关系·····	150	构型·····	188
五、防止氢脆的措施·····	151	二、高分子链的远程结构——	
思考题与习题·····	152	构象·····	188
第七章 金属磨损和接触疲劳·····	153	三、聚合物聚集态结构——晶态、	
第一节 磨损概念·····	154	非晶态及取向·····	189
一、磨损·····	154	第二节 线型非晶态聚合物的	
二、耐磨性·····	155	变形·····	191
第二节 磨损模型·····	155	一、非晶态聚合物在玻璃态下的	
一、黏着磨损·····	155	变形·····	192
二、磨粒磨损·····	158	二、非晶态聚合物在高弹态下的	
三、冲蚀磨损·····	162	变形·····	193
四、腐蚀磨损·····	165	三、非晶态聚合物在黏流态下的	
五、微动磨损·····	166	变形·····	194
第三节 磨损试验方法·····	167	第三节 结晶态聚合物的变形·····	195
第四节 金属接触疲劳·····	168	第四节 聚合物的黏弹性·····	196
一、接触疲劳现象与接触应力·····	168	一、静态黏弹性——蠕变与应力	
二、接触疲劳破坏机理·····	171	松弛·····	196
三、接触疲劳试验方法·····	173	二、动态黏弹性——滞后和	
四、影响接触疲劳寿命的因素·····	173	内耗·····	198
思考题与习题·····	175	第五节 聚合物的强度与断裂·····	199
第八章 金属高温力学性能·····	176	一、强度与硬度·····	199
第一节 金属的蠕变现象·····	177	二、银纹与断裂过程·····	200
第二节 蠕变变形与蠕变断裂		三、韧性与增韧·····	201
机理·····	178	四、摩擦与磨损·····	202
一、蠕变变形机理·····	178	第六节 聚合物的疲劳强度·····	204
二、蠕变断裂机理·····	179	思考题与习题·····	206
第三节 金属高温力学性能指标及其		第十章 陶瓷材料的力学性能·····	207
影响因素·····	180	第一节 陶瓷材料的结构·····	208
一、蠕变极限·····	180	一、陶瓷材料的组成与结合键·····	208
二、持久强度极限·····	181	二、陶瓷材料的显微结构·····	208
三、剩余应力·····	183	第二节 陶瓷材料的变形与断裂·····	208
四、影响金属高温力学性能的主要		一、陶瓷材料的弹性变形·····	208
因素·····	184	二、陶瓷材料的塑性变形·····	209
思考题与习题·····	185	三、陶瓷材料的断裂·····	209

第三节 陶瓷材料的强度·····	210	第三节 短纤维复合材料的力学性能·····	235
一、弯曲强度·····	211	一、基体与纤维间的应力传递·····	235
二、拉伸强度·····	212	二、短纤维复合材料的弹性模量·····	237
三、压缩强度·····	213	三、短纤维复合材料的强度·····	238
第四节 陶瓷材料的硬度与耐磨性·····	213	第四节 复合材料的断裂、冲击和疲劳·····	239
一、陶瓷材料的硬度·····	213	一、复合材料的断裂·····	239
二、陶瓷材料的耐磨性·····	214	二、复合材料的韧性·····	241
第五节 陶瓷材料的断裂韧度与增韧·····	215	三、复合材料的冲击性能·····	242
一、陶瓷材料的断裂韧度·····	215	四、复合材料的疲劳性能·····	244
二、陶瓷材料的增韧·····	217	思考题与习题·····	247
第六节 陶瓷材料的疲劳·····	218	附录·····	248
一、陶瓷材料的疲劳类型·····	218	附录 A 与本书内容有关的材料力学性能试验方法标准及其适用范围·····	248
二、陶瓷材料疲劳特性评价·····	220	附录 B Φ^2 值表·····	251
第七节 陶瓷材料的抗热震性·····	220	附录 C 表面裂纹修正因子·····	252
一、抗热震断裂·····	220	附录 D 金属材料室温拉伸试验方法国家标准力学性能指标名称和符号对照·····	252
二、抗热震损伤·····	221	附录 E 不同条件下的试验力(GB/T 231.1—2009《金属材料布氏硬度试验 第1部分:试验方法》)·····	253
思考题与习题·····	222	参考文献·····	254
第十一章 复合材料的力学性能·····	223		
第一节 复合材料的定义和性能特点·····	224		
一、复合材料的定义和分类·····	224		
二、复合材料的性能特点·····	224		
第二节 单向复合材料的力学性能·····	226		
一、单向复合材料的弹性性能·····	227		
二、单向复合材料的强度·····	231		

金属在单向静拉伸载荷 下的力学性能

第一章

单向静拉伸试验是工业上应用最广泛的金属力学性能试验方法之一。这种试验方法的特点是温度（一般为室温）、应力状态（单向拉伸）和加载速率（ $1 \sim 10 \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ）是确定的，并且常用标准的光滑圆柱试样进行试验。通过拉伸试验可以揭示金属材料在静载荷作用下常见的力学行为，即弹性变形、塑性变形和断裂；还可以测定金属材料的最基本力学性能指标，如屈服强度 R_{eL} 、抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 。本章将介绍这些性能指标的物理概念与实用意义，并讨论金属弹性变形、塑性变形及断裂的基本规律和原理，以便在此基础上探讨改善上述性能指标的途径和方向。

- 拉伸力-伸长（延伸）曲线和应力-应变曲线
- 弹性变形
- 塑性变形
- 金属的断裂

第一节 拉伸力-伸长（延伸）曲线和应力-应变曲线

拉伸力-伸长（延伸）曲线是拉伸试验中记录的力对伸长（延伸）的关系曲线。图 1-1 所示为人们熟知的退火低碳钢拉伸力-伸长（延伸）曲线。

图 1-1 中曲线的纵坐标为力 F ，横坐标是绝对伸长 ΔL （延伸 ΔL_e ）。由图可见，试样的伸长随着力的增加而增加。拉伸力在 F_e 以下阶段，试样在受力时发生变形，卸除拉伸力后变形能完全恢复，该区段为弹性变形阶段。当所加的拉伸力达到 F_a 后，试样开始发生塑性变形。最初，试样上局部区域产生不均匀屈服塑性变形，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 F_m (F_b) 时，试样再次产生不均匀塑性变形，在局部区域产生缩颈。最后当拉伸力达到 F_k 时，试样断裂。

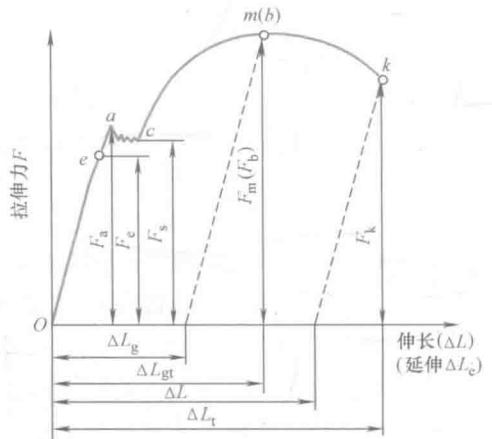


图 1-1 低碳钢拉伸力-伸长（延伸）曲线

由此可知，退火低碳钢在拉伸力作用下的变形过程可分为弹性变形、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。正火、退火碳素结构钢和一般低合金结构钢，也都具有类似的拉伸力-伸长（延伸）曲线，只是力的大小和变形量不同而已。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拉伸力-伸长（延伸）曲线。例如，退火低碳钢在低温下拉伸，普通灰铸铁或淬火高碳钢在室温下拉伸，它们的拉伸力-伸长（延伸）曲线上只有弹性变形阶段。冷拔钢只有弹性变形和不均匀集中塑性变形阶段。面心立方金属在低温和高应变速率下拉伸时，其拉伸力-伸长（延伸）曲线上只看到弹性变形和不均匀屈服塑性变形两个阶段等。

将图 1-1 拉伸力-伸长（延伸）曲线的纵、横坐标分别用拉伸试样的原始截面积 S_0 和原始标距长度 L_0 去除，则得到应力-应变（应力-伸长率）曲线（图 1-2）。因均为以一相应常数相除，故曲线形状相似。这样的曲线称为工程（条件）应力-应变曲线（简称应力-应变曲线、 σ - ε 曲线）。如将图 1-1 中横坐标延伸 ΔL_e 除以引伸计标距 L_e ，纵坐标应力符号改为 R ，则得到相同形状的应力-延伸率曲线，即 R - e 曲线。根据 σ - ε 曲线或 R - e 曲线便可建立金属材料在静拉伸条件下的力学性能指标。

伸长率和延伸率都表示拉伸试验时试样的应变，但两者定义不同。伸长率是试样原始标距的伸长与原始标距之比的百分率，而延伸率是用引伸计标距 (L_e) 表示的延伸（引伸计标距的伸长）百分率。这种定义上的不同并不表示两者有本质区别，因为两者意义相近，而且实践中完全可以通过测定延伸方法来测定伸长。有文献明确指出，延伸率用条件伸长率与真实伸长率两种方法表示（图 1-2 中符号 δ 即为条件伸长率[⊙]）。据此，拉伸图和应力-应

⊙ 也为原拉伸试验国家标准中断后伸长率 δ_5 和 δ_{10} 的符号。

变曲线横坐标可以同时适用两个含义相近的名称和符号，而曲线形状不变。

如果用真实应力 σ_{zh} （试样真实瞬间截面积除相应载荷）和真实应变 ε_{zh} （瞬时应变的总和）绘制曲线，则得到真实应力-应变曲线，如图 1-3 中的 $Om(b)k$ 曲线。自 $m(b)$ 点作曲线的切线与纵坐标相交得一交点，其纵坐标为条件应力 σ_m 或将要介绍的材料抗拉强度 σ_b 。

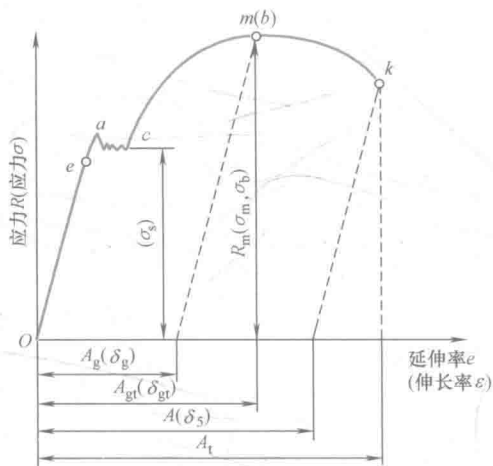


图 1-2 低碳钢应力-应变曲线

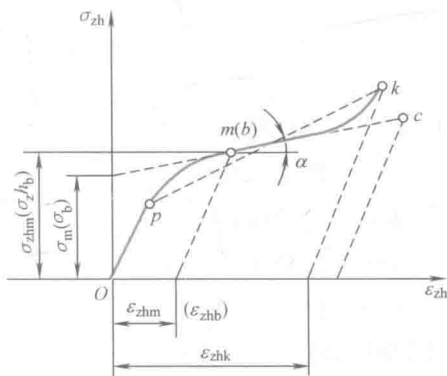


图 1-3 真实应力-应变曲线

第二节 弹性变形

一、弹性变形及其实质

金属弹性变形是一种可逆性变形，是金属晶格中原子自平衡位置产生可逆位移的反映。如图 1-4 所示，在没有外加载荷作用时，金属中的原子 N_1 、 N_2 在其平衡位置附近产生振动。相邻两个原子之间的作用力（曲线 3）由引力（曲线 1）与斥力（曲线 2）叠加而成。引力与斥力都是原子间距的函数。当两原子因受力而接近时，斥力开始缓慢增加，而后迅速增加；而引力则随原子间距减小增加缓慢。合力曲线 3 在原子平衡位置处为零。当原子间相互平衡力因受外力作用而受到破坏时，原子的位置必须做相应调整，即产生位移，以期外力、引力和斥力三者达到新的平衡。原子的位移总和在宏观上就表现为变形。外力去除后，原子依靠彼此之间的作用力又回到原来的平衡位置，位移消失，宏观上变形也就消失。这就是弹性变形的可逆性。

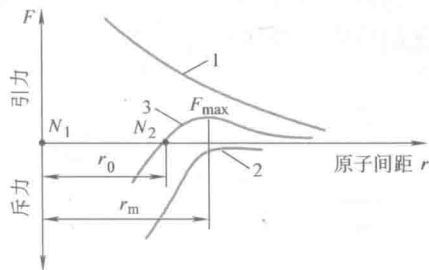


图 1-4 双原子模型

在弹性变形过程中，不论是在加载期还是卸载期内，应力与应变之间都保持单值线性关系，即服从人们熟知的胡克定律。

金属弹性变形量比较小，一般不超过 0.5%~1%。这是因为原子弹性位移量只有原子间距的几百分之一，所以弹性变形量总是小于 1%。

二、胡克定律

(一) 简单应力状态的胡克定律

1. 单向拉伸

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} \\ \varepsilon_x = \varepsilon_z &= -\nu\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_y}{E} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 ε_y ——纵向拉伸应变；

ε_x 、 ε_z ——横向收缩应变；

E ——弹性模量[⊙]；

ν ——泊松比；

σ_y ——拉应力。

2. 剪切和扭转

$$\tau = G\gamma \quad (1-2)$$

式中 τ ——切应力；

G ——切变模量；

γ ——切应变。

3. E 、 G 和 ν 的关系

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1-3)$$

(二) 广义胡克定律

实际上机件的受力状态都比较复杂，应力往往是两向或三向的。在复杂应力状态下，用广义胡克定律描述应力与应变的关系为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——主应力；

ε_1 、 ε_2 、 ε_3 ——主应变。

如果主应力中有压应力时，其前方应冠以负号。求得的应变为正号时表示伸长，负号则表示缩短。

⊙ 我国有关标准中，列有两个名词：弹性模量和拉伸杨氏模量。它们描述材料在弹性范围内应力和应变之比，都用符号 E 表示，是材料的力学性能指标。但前者是一般性术语，后者特指在拉伸加载方式下，轴向拉伸应力与轴向拉伸应变之比。习惯上，两个名词常常混用，本书统一用弹性模量。