



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

第2版

# 工程材料力学性能

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2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。全书共十一章，有关金属材料力学性能的内容分设八章，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一章。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。全书注意努力做到：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. 2版. —北京: 机械工业出版社, 2007.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-12037-7

I. 工… II. 束… III. 工程材料 - 材料力学性质 - 高等学校 - 教材  
IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 058533 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 冯春生 责任校对: 李秋荣

封面设计: 王伟光 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷 (北京双新装订有限公司装订)

2007 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15.75 印张 · 387 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-12037-7

定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

## 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重新编入用断裂韧度“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，书中涉及到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。

在这版教材成书过程中，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，对提高本书的质量作出了重要贡献。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）。陈九磅还负责全书插图、照片、名称符号、附录标准、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

2007年7月于合肥



# 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,共设八章,但几乎每一章的内容都作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作了简化处理;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作了删简和改写等。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,也有利于内容作适当充实。复合材料力学性能因材料结构特殊性,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作出了很大贡献,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

2003 年 2 月于合肥

## 本书主要符号

- $A_0$ ——试样原始截面积  
 $A_c$ 、 $A_f$ 、 $A_m$ ——复合材料、纤维、基体的横截面积  
 $A_{KU}$  ( $A_{KV}$ ) ——U形 (V形) 缺口冲击试样的冲击吸收功  
 $a_c$ ——临界裂纹长度  
 $a_e$ ——弹性比功  
 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；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  
 $E_r$ ——聚合物应力松弛模量  
 $e$ ——真应变  
 $e_B$ ——最大真实均匀塑性应变  
 $e_f$ ——断裂真应变  
 $ETT_n$ ——冲击吸收功-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  
 $G_1$ ——裂纹扩展能量释放率或裂纹扩展力  
 $G_{1c}$ ——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  
 HK——努氏硬度  
 HV——维氏硬度  
 $J$ 、 $J_1$ —— $J$  积分或裂纹尖端能量线积分  
 $J_{1c}$ ——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  
 $K_f$ ——疲劳缺口系数  
 $K_t$ ——理论应力集中系数  
 $K_I$ ——I型裂纹的应力场强度因子  
 $K_{Ic}$ ——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  
 $q_f$ ——疲劳缺口敏感度  
 $R$ ——陶瓷材料急冷急热下抗热震参数  
 $R'$ ——陶瓷材料缓慢加热和冷却下的抗热震参数  
 $r$ ——应力比  
 $S$ ——真正正应力  
 $t$ ——温度；真实切应力  
 $t_k$ ——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  
 $V_c$ 、 $V_f$ 、 $V_m$ ——复合材料、纤维、基体的体积分  
 $V_{fc}$ 、 $V_{fmin}$ ——纤维临界体积分和最小体积分  
 $Y$ ——裂纹形状系数  
 $\alpha$ ——应力状态软性系数  
 $\gamma$ ——条件切应变  
 $\gamma_c$ 、 $\gamma_f$ 、 $\gamma_m$ ——复合材料、纤维和基体的切应变  
 $\gamma_p$ ——裂纹扩展单位面积消耗塑性功  
 $\gamma_s$ ——裂纹表面能  
 $\Delta K_{th}$ ——疲劳裂纹扩展门槛值  
 $\Delta K_I$ ——应力场强度因子范围  
 $\delta_{gt}$ ——金属材料拉伸时最大力下的总伸长率 (最大均匀塑性变形量)  
 $\delta$ ——断后伸长率  
 $\delta_c$ ——裂纹尖端临界张开位移，在弹塑性状态下以

变量表示的断裂韧度

- $\epsilon$ ——条件应变或条件伸长率
- $\epsilon_{cL}$ 、 $\epsilon_{cT}$ ——复合材料的纵向应变和横向应变
- $\epsilon_f$ 、 $\epsilon_m$ ——纤维和基体的应变
- $\dot{\epsilon}$ ——应变速率
- $\mu$ ——摩擦因数
- $\nu_{LT}$ 、 $\nu_{TL}$ ——纵泊松比和横泊松比
- $\nu$ ——泊松比
- $\sigma$ ——条件正应力
- $\sigma_{bb}$ ——抗弯强度
- $\sigma_b$ ——抗拉强度
- $\sigma_{bc}$ ——抗压强度
- $\sigma_{bn}$ ——缺口抗拉强度
- $\sigma_c$ ——裂纹体的名义断裂应力或实际断裂强度
- $\sigma_c$ 、 $\sigma_f$ 、 $\sigma_m$ ——复合材料、纤维、基体的应力
- $\sigma_{cL}$ 、 $\sigma_{cT}$ ——复合材料的纵向应力和横向应力
- $\sigma_{cu}$ 、 $\sigma_{fu}$ 、 $\sigma_{mu}$ ——复合材料、纤维、基体的强度
- $\sigma_m$ ——理论断裂强度，平均应力
- $\sigma_r$ ——规定残余伸长应力、剩余应力

- $\sigma_{re}$ ——松弛应力
- $\sigma_s$  ( $\sigma_{su}$ 、 $\sigma_{sl}$ )——屈服点 (上屈服点、下屈服点)
- $\sigma_{sec}$ ——不发生应力腐蚀的临界应力
- $\sigma'_{\delta/\tau}$ ——在规定温度  $t$  下和规定时间  $\tau$  内，以规定蠕变总伸长率  $\delta$  表示的蠕变极限
- $\sigma'_e$ ——在规定温度  $t$  下，以规定稳态蠕变速率  $\dot{\epsilon}$  表示的蠕变极限
- $\sigma'_\tau$ ——在规定温度  $t$  下，达到规定持续时间  $\tau$  而不发生断裂的持久强度极限
- $\sigma_{ys}$ ——有效屈服应力
- $\sigma_{0.2}$ ——屈服强度 (不规定测试方法)
- $\sigma_{-1}$ ——对称应力循环下的弯曲疲劳极限
- $\sigma_{-1N}$ ——缺口试样在对称应力循环下的疲劳极限
- $\tau$ ——条件切应力
- $\tau_b$ ——抗扭强度
- $\tau_c$ 、 $\tau_f$ 、 $\tau_m$ ——复合材料、纤维和基体的切应力
- $\tau_s$ ——扭转屈服点
- $\psi$ ——断面收缩率

# 目

# 录

第2版前言	
第1版前言	
本书主要符号	
<b>第一章 金属在单向静拉伸 载荷下的力学性能</b> ..... 1	
第一节 拉伸力-伸长曲线和 应力-应变曲线 ..... 1	
第二节 弹性变形 ..... 2	
一、弹性变形及其实质 ..... 2	
二、胡克定律 ..... 2	
三、弹性模量 ..... 3	
四、弹性比功 ..... 4	
五、滞弹性 ..... 5	
六、包申格 (Bauschinger) 效应 ..... 6	
第三节 塑性变形 ..... 8	
一、塑性变形方式及特点 ..... 8	
二、屈服现象和屈服点 (屈服强度) ..... 9	
三、影响屈服强度的因素 ..... 11	
四、应变硬化 (形变强化) ..... 15	
五、缩颈现象和抗拉强度 ..... 17	
六、塑性 ..... 19	
七、静力韧度 ..... 21	
第四节 金属的断裂 ..... 21	
一、断裂的类型 ..... 21	
二、解理断裂 ..... 25	
三、微孔聚集断裂 ..... 28	
四、断裂强度 ..... 30	
五、断裂理论的意义 ..... 35	
思考题与习题 ..... 37	
参考文献 ..... 37	
<b>第二章 金属在其他静载 荷下的力学性能</b> ..... 39	
第一节 应力状态软性系数 ..... 39	

第二节 压缩 ..... 40	
一、压缩试验的特点 ..... 40	
二、压缩试验 ..... 41	
第三节 弯曲 ..... 41	
一、弯曲试验的特点 ..... 41	
二、弯曲试验 ..... 41	
第四节 扭转 ..... 42	
一、扭转试验的特点 ..... 42	
二、扭转试验 ..... 43	
第五节 缺口试样静载荷试验 ..... 44	
一、缺口效应 ..... 44	
二、缺口试样静拉伸试验 ..... 46	
三、缺口试样静弯曲试验 ..... 48	
第六节 硬度 ..... 49	
一、金属硬度的意义及硬度试验 的特点 ..... 49	
二、硬度试验 ..... 49	
思考题与习题 ..... 55	
参考文献 ..... 55	
<b>第三章 金属在冲击载荷下的 力学性能</b> ..... 56	
第一节 冲击载荷下金属变形 和断裂的特点 ..... 56	
第二节 冲击弯曲和冲击韧性 ..... 57	
第三节 低温脆性 ..... 59	
一、低温脆性现象 ..... 59	
二、韧脆转变温度 ..... 60	
三、落锤试验和断裂分析图 ..... 61	
第四节 影响韧脆转变温度的 冶金因素 ..... 63	
一、晶体结构 ..... 63	
二、化学成分 ..... 63	
三、显微组织 ..... 63	
思考题与习题 ..... 65	



参考文献 .....	65	第二节 疲劳曲线及基本疲劳 力学性能 .....	98
<b>第四章 金属的断裂韧度</b> .....	<b>66</b>	一、疲劳曲线和对称循环疲劳 极限 .....	98
第一节 线弹性条件下的金属 断裂韧度 .....	66	二、疲劳图和不对称循环疲劳 极限 .....	100
一、裂纹扩展的基本形式 .....	66	三、抗疲劳过载能力 .....	102
二、应力场强度因子 $K_I$ 及断裂 韧度 $K_{Ic}$ .....	67	四、疲劳缺口敏感度 .....	103
三、裂纹扩展能量释放率 $G_I$ 及 断裂韧度 $G_{Ic}$ .....	75	<b>第三节 疲劳裂纹扩展速率及 疲劳门槛值</b> .....	104
第二节 断裂韧度 $K_{Ic}$ 的测试 .....	77	一、疲劳裂纹扩展曲线 .....	104
一、试样的形状、尺寸及制备 .....	77	二、疲劳裂纹扩展速率 .....	105
二、测试方法 .....	78	三、疲劳裂纹扩展寿命的估算 .....	109
三、试验结果的处理 .....	79	<b>第四节 疲劳过程及机理</b> .....	111
第三节 影响断裂韧度 $K_{Ic}$ 的 因素 .....	80	一、疲劳裂纹萌生过程及机理 .....	111
一、断裂韧度 $K_{Ic}$ 与常规力学 性能指标之间的关系 .....	80	二、疲劳裂纹扩展过程及机理 .....	113
二、影响断裂韧度 $K_{Ic}$ 的因素 .....	81	<b>第五节 影响疲劳强度的主要 因素</b> .....	115
第四节 断裂韧度在金属材料 中的应用举例 .....	84	一、表面状态的影响 .....	116
一、高压容器承载能力的计算 .....	84	二、残余应力及表面强化的影响 .....	116
二、高压壳体的热处理工艺选 择 .....	84	三、材料成分及组织的影响 .....	118
三、高强钢容器水爆断裂失效 分析 .....	85	<b>第六节 低周疲劳</b> .....	120
四、大型转轴断裂分析 .....	86	一、低周疲劳 .....	120
五、评定钢铁材料的韧脆性 .....	87	二、缺口机件疲劳寿命估算 .....	123
第五节 弹塑性条件下金属断 裂韧度的基本概念 .....	88	三、低周冲击疲劳 .....	123
一、 $J$ 积分及断裂韧度 $J_{Ic}$ .....	89	四、热疲劳 .....	126
二、裂纹尖端张开位移及断裂 韧度 $\delta_c$ .....	90	<b>思考题与习题</b> .....	126
思考题与习题 .....	92	<b>参考文献</b> .....	127
参考文献 .....	93	<b>第六章 金属的应力腐蚀和氢 脆断裂</b> .....	128
<b>第五章 金属的疲劳</b> .....	<b>94</b>	第一节 应力腐蚀 .....	128
第一节 金属疲劳现象及特点 .....	94	一、应力腐蚀现象及其产生条件 .....	128
一、变动载荷和循环应力 .....	94	二、应力腐蚀断裂机理及断口 形貌特征 .....	129
二、疲劳现象及特点 .....	95	三、应力腐蚀抗力指标 .....	130
三、疲劳宏观断口特征 .....	96	四、防止应力腐蚀的措施 .....	132
第二节 疲劳曲线及基本疲劳 力学性能 .....	98	第二节 氢脆 .....	133
一、疲劳曲线和对称循环疲劳 极限 .....	98	一、氢在金属中的存在形式 .....	133
二、疲劳图和不对称循环疲劳 极限 .....	100	二、氢脆类型及其特征 .....	133
三、抗疲劳过载能力 .....	102	三、钢的氢致延滞断裂机理 .....	135
四、疲劳缺口敏感度 .....	103		
第三节 疲劳裂纹扩展速率及 疲劳门槛值 .....	104		
一、疲劳裂纹扩展曲线 .....	104		
二、疲劳裂纹扩展速率 .....	105		
三、疲劳裂纹扩展寿命的估算 .....	109		
第四节 疲劳过程及机理 .....	111		
一、疲劳裂纹萌生过程及机理 .....	111		
二、疲劳裂纹扩展过程及机理 .....	113		
第五节 影响疲劳强度的主要 因素 .....	115		
一、表面状态的影响 .....	116		
二、残余应力及表面强化的影响 .....	116		
三、材料成分及组织的影响 .....	118		
第六节 低周疲劳 .....	120		
一、低周疲劳 .....	120		
二、缺口机件疲劳寿命估算 .....	123		
三、低周冲击疲劳 .....	123		
四、热疲劳 .....	126		
思考题与习题 .....	126		
参考文献 .....	127		

四、氢致延滞断裂与应力腐蚀的关系	136
五、防止氢脆的措施	136
思考题与习题	137
参考文献	138
<b>第七章 金属磨损和接触疲劳</b>	<b>139</b>
第一节 磨损概念	139
一、磨损	139
二、耐磨性	140
第二节 磨损模型	140
一、粘着磨损	140
二、磨粒磨损	143
三、冲蚀磨损	147
四、腐蚀磨损	150
五、微动磨损	151
第三节 磨损试验方法	152
第四节 金属接触疲劳	153
一、接触疲劳现象与接触应力	153
二、接触疲劳破坏机理	156
三、接触疲劳试验方法	157
四、影响接触疲劳寿命的因素	158
思考题与习题	160
参考文献	160
<b>第八章 金属高温力学性能</b>	<b>161</b>
第一节 金属的蠕变现象	162
第二节 蠕变变形与蠕变断裂机理	163
一、蠕变变形机理	163
二、蠕变断裂机理	164
第三节 金属高温力学性能指标及其影响因素	165
一、蠕变极限	165
二、持久强度极限	167
三、剩余应力	167
四、影响金属高温力学性能的主要因素	168
思考题与习题	170
参考文献	171

<b>第九章 聚合物材料的力学性能</b>	<b>172</b>
第一节 聚合物材料的结构	172
一、高分子链的近程结构——构型	172
二、高分子链的远程结构——构象	172
三、聚合物聚集态结构——晶态、非晶态及取向	174
第二节 线型非晶态聚合物的变形	176
一、非晶态聚合物在玻璃态下的变形	176
二、非晶态聚合物在高弹态下的变形	178
三、非晶态聚合物在粘流态下的变形	178
第三节 结晶态聚合物的变形	179
第四节 聚合物的粘弹性	180
一、静态粘弹性——蠕变与应力松弛	180
二、动态粘弹性——滞后和内耗	182
第五节 聚合物的强度与断裂	182
一、强度与硬度	182
二、银纹与断裂过程	184
三、韧性与增韧	185
四、摩擦与磨损	186
第六节 聚合物的疲劳强度	188
思考题与习题	189
参考文献	189
<b>第十章 陶瓷材料的力学性能</b>	<b>191</b>
第一节 陶瓷材料的结构	191
一、陶瓷材料的组成与结合键	191
二、陶瓷材料的显微结构	191
第二节 陶瓷材料的变形与断裂	192
一、陶瓷材料的弹性变形	192
二、陶瓷材料的塑性变形	193
三、陶瓷材料的断裂	193
第三节 陶瓷材料的强度	194
一、抗弯强度	194
二、抗拉强度	195
三、抗压强度	196

第四节 陶瓷材料的硬度与耐磨性	196
一、陶瓷材料的硬度	196
二、陶瓷材料的耐磨性	197
第五节 陶瓷材料的断裂韧度与增韧	198
一、陶瓷材料的断裂韧度	198
二、陶瓷材料的增韧	200
第六节 陶瓷材料的疲劳	201
一、陶瓷材料的疲劳类型	201
二、陶瓷材料疲劳特性评价	202
第七节 陶瓷材料的抗热震性	203
一、抗热震断裂	203
二、抗热震损伤	204
思考题与习题	205
参考文献	205

## 第十一章 复合材料的力学性能

第一节 复合材料的定义和性能特点	206
一、复合材料的定义和分类	206
二、复合材料的性能特点	206
第二节 单向复合材料的力学性能	208
一、单向复合材料的弹性性能	209
二、单向复合材料的强度	212
第三节 短纤维复合材料的力学性能	216

一、基体与纤维间的应力传递	216
二、短纤维复合材料的弹性模量	218
三、短纤维复合材料的强度	219
第四节 复合材料的断裂、冲击和疲劳	220
一、复合材料的断裂	220
二、复合材料的韧性	222
三、复合材料的冲击性能	223
四、复合材料的疲劳性能	224
思考题与习题	227
参考文献	227

## 附录

附录 A 与本书内容有关的材料力学性能试验方法国家标准及其适用范围	229
附录 B 与本书内容有关的部分国外标准编号和名称	233
附录 C $\Phi^2$ 值表	238
附录 D 表面裂纹修正因子	239
附录 E 力学性能指标名称和符号对照 (GB/T 228—2002《金属材料 室温拉伸试验方法》)	239
附录 F 不同条件下的试验力 (GB/T 231.1—2002《金属布氏硬度试验 第1部分:试验方法》)	240

# 第一章 金属在单向静拉伸载荷下的力学性能

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、应力状态和加载速率是确定的，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  $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度  $\sigma_b$ 、断后伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$ 。本章将介绍这些性能指标的物理概念与实用意义，并将讨论金属弹性变形、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。

## 第一节 拉伸力-伸长曲线和应力-应变曲线

拉伸力-伸长曲线是拉伸试验中记录的力对伸长的关系曲线。图 1-1 所示为我们熟知的退火低碳钢拉伸力-伸长曲线。

图 1-1 中曲线的纵坐标为力  $F$ ，横坐标是绝对伸长  $\Delta L$ 。由图可见，试样伸长随力增加而增加。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  $F_s$  后，试样开始塑性变形。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  $F_b$  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，在拉伸力  $F_k$  处，试样断裂。

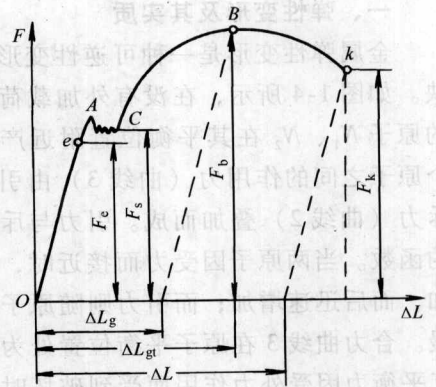


图 1-1 低碳钢的拉伸力-伸长曲线

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-伸长曲线，只是力的大小和变形量不同而已。但是，并非所有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-伸长曲线的纵、横坐标分别用拉伸试样的原始截面积  $A_0$  和原始标距长度  $L_0$  去除，则得到应力-应变曲线（图 1-2）。因均系以一相应常数相除，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）。根据该曲线便可建立金属材料在静拉伸条件下的力学性能指标。

如果用真实应力  $S$  和真实应变  $e (\psi_e)$  绘制曲线，则得到真实应力-应变曲线，见图 1-3 中的  $OBK$  曲线。

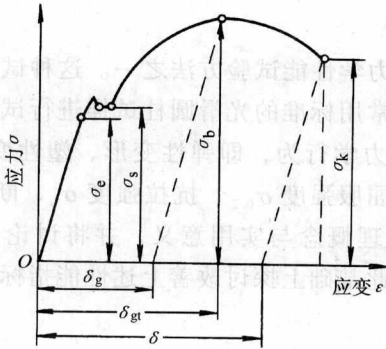


图 1-2 低碳钢的应力-应变曲线

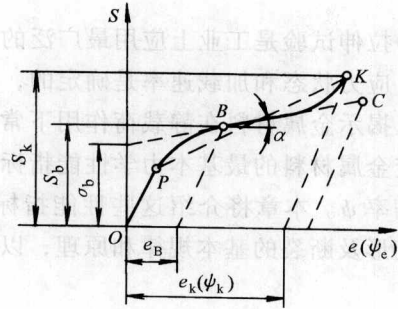


图 1-3 真实应力-应变曲线

## 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，它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，原子的位置必须作相应调整，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。

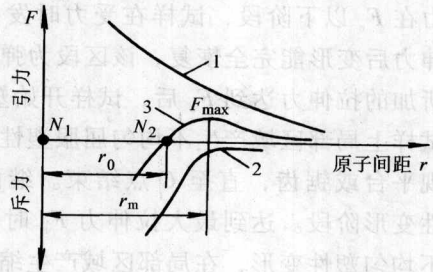


图 1-4 双原子模型

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，即服从我们熟知的胡克定律。

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  $\varepsilon_y$ ——纵向拉伸应变；

$\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_z$ ——横向收缩应变；

$E$ ——弹性模量<sup>⊙</sup>；

$\nu$ ——泊松比；

$\sigma_y$ ——拉应力。

## 2. 剪切和扭转

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

式中  $\tau$ ——切应力；

$G$ ——切变模量；

$\gamma$ ——切应变。

## 3. $E$ 、 $G$ 和 $\nu$ 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

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

式中  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ ——主应力；

$\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ ——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，负号则为缩短。

## 三、弹性模量

由式 (1-1) 可见，当应变为一个单位时，弹性模量即等于弹性应力，即弹性模量是产生 100% 弹性变形所需的应力。这个定义对金属而言是没有任何意义的，因为金属材料所能产生的弹性变形量是很小的。

一些金属材料在常温下的弹性模量见表 1-1。

⊙ 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。

表 1-1 几种金属材料在常温下的弹性模量

金属材料	$E/10^5 \text{ MPa}$
铁	2.17
铜	1.25
铝	0.72
铁及低碳钢	2.0
铸铁	1.7 ~ 1.9
低合金钢	2.0 ~ 2.1
奥氏体不锈钢	1.9 ~ 2.0

工程上弹性模量被称为材料的刚度，表征金属材料对弹性变形的抗力，其值越大，则在相同应力下产生的弹性变形就越小。机器零件或构件的刚度与材料刚度不同，前者除与材料刚度有关外，尚与其截面形状和尺寸以及载荷作用的方式有关。刚度是金属材料重要的力学性能指标之一。一些机件或构件在选材或设计时常要用到它。例如，桥式起重机梁应有足够的刚度，以免挠度偏大，在起吊重物时引起振动。精密机床和压力机等，对主轴、床身和工作台都有刚度要求，还要按刚度条件进行设计，以保证加工精度。内燃机、离心机和压气机等的主要构件如曲轴也要求有足够的刚度，以免工作时产生过大振动。

单晶体金属的弹性模量在不同晶体学方向上是不一样的，表现出弹性各向异性。多晶体金属的弹性模量为各晶粒弹性模量的统计平均值，呈现伪各向同性。

由于弹性变形是原子间距在外力作用下可逆变化的结果，应力与应变关系实际上是原子间作用力与原子间距的关系，所以弹性模量与原子间作用力有关，与原子间距也有一定关系。原子间作用力决定于金属原子本性和晶格类型，故弹性模量也主要决定于金属原子本性和晶格类型。

合金化、热处理（显微组织）、冷塑性变形对弹性模量的影响较小，所以，金属材料的弹性模量是一个对组织不敏感的力学性能指标。温度、加载速率等外在因素对其影响也不大。

#### 四、弹性比功

弹性比功又称弹性比能、应变比能，表示金属材料吸收弹性变形功的能力。一般用金属开始塑性变形前单位体积吸收的最大弹性变形功表示。金属拉伸时的弹性比功用图 1-2 应力-应变曲线上弹性变形阶段下的面积表示，即

$$a_e = \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e = \frac{\sigma_e^2}{2E} \quad (1-5)$$

式中  $a_e$ ——弹性比功；

$\sigma_e$ ——弹性极限；

$\varepsilon_e$ ——最大弹性应变。

弹性极限  $\sigma_e$  是材料由弹性变形过渡到弹-塑性变形时的应力，在工程上很难测出准确而唯一的数值，故国家标准中已将其删除。实际测量时是用规定残余伸长应力代替，如用规定残余伸长率为 0.01% 对应的应力为弹性极限。此时，弹性极限和下面将要介绍的屈服强度的概念是一致的，都表示材料对微量塑性变形的抗力，而且也都是对组织敏感的力学性能指标。

由式(1-5)可见, 金属材料的弹性比功决定于弹性模量和弹性极限。由于弹性模量是组织不敏感性能, 因此, 对于一般金属材料, 只有用提高弹性极限的方法才能提高弹性比功。

试样或实际机器零件的体积越大, 则其中可吸收的弹性功越多, 即可储备的弹性能越多。此点对于研究或理解大件的脆性断裂问题很有意义。

几种弹簧材料的弹性比功见表 1-2。

表 1-2 弹簧材料的弹性比功

材料	$E/\text{MPa}$	$\sigma_e/\text{MPa}$	$a_e/\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$
高碳弹簧钢	210000	965	0.228
65Mn	200000	1380*	4.761
55Si2Mn		1480*	5.476
50CrVA		1420*	5.041
不锈钢(冷轧)		1000*	2.5
铍青铜	120000	588	1.44
磷青铜	101000	450	1.0

注: 带\*号者为 $\sigma_e$ 值。

式(1-5)中的 $\epsilon_e$ 是表征材料弹性的重要参量,  $\epsilon_e$ 值越高, 材料的弹性越好, 越不易于发生塑性变形。

弹簧是典型的弹性零件, 其重要作用是减振和储能驱动, 还可控制运动和测力等。因此, 弹簧材料应具有较高的弹性比功和良好的弹性。生产上弹簧钢含碳量较高, 并加入 Si、Mn、Cr、V 等合金元素以强化铁素体基体和提高钢的淬透性, 经淬火加中温回火获得回火托氏体组织, 以及冷变形强化等, 可以有效地提高弹性极限, 使弹性比功和弹性增加, 满足各种钢制弹簧的技术性能要求。仪表弹簧因要求无磁性, 常用铍青铜或磷青铜等软弹簧材料制造。这类材料  $E$  值较低而 $\sigma_e$ 值较高, 故也有较高的弹性比功。

## 五、滞弹性

纯弹性体的弹性变形只与载荷大小有关, 而与加载方向和加载时间无关。但对实际金属材料而言, 其弹性变形不仅是应力的函数, 而且还是时间的函数。

试验发现, 当突然施加一低于弹性极限的应力 $\sigma_0$ 于拉伸试样时, 试样立即沿  $OA$  线(图 1-5)产生瞬时应变  $Oa$ , 它只是材料总弹性应变  $OH$  中的一部分, 而应变  $aH$  是在  $\sigma_0$  长期保持下逐渐产生的, 其随时间的增长变化如下图  $ab$  线所示。这样就产生应变落后于应力的现象。快速卸载时也有类似现象。这种在弹性范围内快速加载或卸载后, 随时间延长产生附加弹性应变的现象, 称为滞弹性。滞弹性应变量与材料成分、组织有关, 也与试验条件有关。材料组织越不均匀, 滞弹性越明显。钢经淬火或塑性变形后, 由于增加了组织不均匀性, 故滞弹性倾向增大。

由于实际金属材料具有滞弹性, 因此在弹性区内单向快速加载、卸载时, 加载线与卸载线不重合, 形成一封闭回线, 即

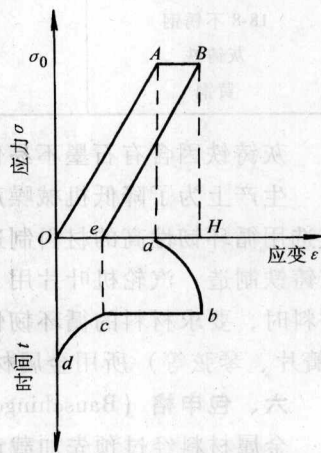


图 1-5 滞弹性示意图



弹性滞后环（图 1-6a）。如果施加交变载荷，且最大应力低于宏观弹性极限，加载速率比较大，则也得到弹性滞后环（图 1-6b）。若交变载荷中最大应力超过宏观弹性极限，则得到塑性滞后环（图 1-6c）。存在滞后环现象，说明加载时消耗于金属的变形功大于卸载时金属恢复变形放出的变形功，有一部分变形功为金属所吸收，其大小用滞后环面积度量。

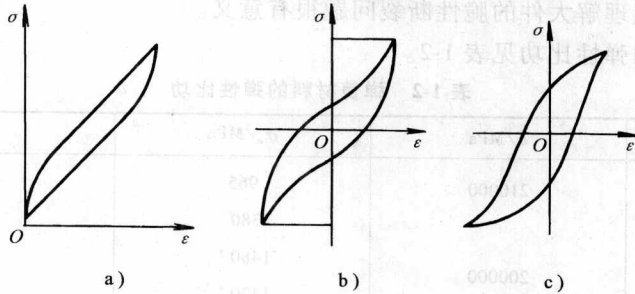


图 1-6 滞后环的类型

- a) 单向加载弹性滞后环 b) 交变加载弹性滞后环  
c) 交变加载塑性滞后环

金属材料在交变载荷（振动）下吸收不可逆变形功的能力，称为金属的循环韧性，也叫金属的内耗。严格说来，循环韧性与内耗是有区别的：前者指金属在塑性区内加载时吸收不可逆变形功的能力；后者是指金属在弹性区内加载时吸收不可逆变形功的能力。不过，这两个名词有时是混用的。

循环韧性也是金属材料的力学性能，因为它表示材料吸收不可逆变形功的能力，故又称为消振性。目前尚无统一评定循环韧性的指标。某些金属材料的循环韧性值见表 1-3。

表 1-3 一些金属材料的比循环韧性

材 料	在不同应力水平下的比循环韧性		
	31.5MPa	46.23MPa	77.28MPa
碳钢 ( $w(C) = 0.1\%$ )	2.28	2.78	4.16
镍铬淬火回火钢	0.38	0.49	0.70
1Cr13 不锈钢	8.0	8.0	8.0
18-8 不锈钢	0.76	1.16	3.8
灰铸铁	28.0	40.0	
黄铜	0.50	0.86	

灰铸铁因含有石墨不易传递弹性机械振动，故具有很高的循环韧性。

生产上为了降低机械噪声，抑制高速机械的振动，防止共振导致疲劳断裂，对有些机件应选用循环韧性高的材料制造，以保证机器稳定运转。如机床床身、发动机缸体、底座选用灰铸铁制造，汽轮机叶片用 1Cr13 钢制造等。但对仪表和精密机械，在选用重要传感元件的材料时，要求材料的循环韧性（滞弹性）低，以保证仪表具有足够的精度和灵敏度。乐器（簧片、琴弦等）所用金属材料的循环韧性越小，其音质越佳。

## 六、包申格 (Bauschinger) 效应

金属材料经过预先加载产生少量塑性变形（残余应变为 1% ~ 4%），卸载后再同向加载，规定残余伸长应力（弹性极限或屈服强度）增加；反向加载，规定残余伸长应力降低