



普通高等教育材料科学与工程专业规划教材

# 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



普通高等教育材料科学与工程专业规划教材

# 工程材料力学性能

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。

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. —北京:机械工业出版社,2003.7  
普通高等教育材料科学与工程专业规划教材  
ISBN 7-111-12037-X

I. 工... II. 束... III. 工程材料—力学性能—高等学校—教材  
N. TB301

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第029338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:张祖凤 董连仁 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:张静 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003年7月第1版第1次印刷

1000mm×1400mm B5·8.625印张·334千字

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

# 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,太原工业大学)、戴雅康(第二、六、八章,大连铁道学院)、罗启富(第九章,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型 (V型) 缺口冲击试样的冲击吸收功  
 $a_c$ ——临界裂纹长度  
 $a_r$ ——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  
 $E$ ——拉伸杨氏模量; 弹性模量  
 $E_b$ ——弯曲弹性模量  
 $E_c$ ——压缩杨氏模量; 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  
 $e_B$ ——均匀变形阶段真应变  
 $e_f$ ——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、基体的剪切模量  
 $G_I$ ——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  
HB (HBS、HBW) ——布氏硬度 (符号 S 表示压头为淬火钢球, W 表示压头为硬质合金球)  
HK——努氏硬度  
HV——维氏硬度  
 $J$ 、 $J_I$ —— $J$  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  
 $K_f$ ——疲劳缺口系数  
 $K_t$ ——理论应力集中系数  
 $K_{II}$ ——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、基体的体积分数  
 $V_{fc}, V_{fmin}$ ——纤维临界体积分数和最小体积分数  
 $Y$ ——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  
 $\delta_{gr}$ ——金属材料拉伸时产生的最大均匀塑性变形（工程应变）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形量表示的断裂韧度  
 $\epsilon$ ——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  
 $\sigma_s (\sigma_{su}, \sigma_{sl})$ ——屈服点（上屈服点、下屈服点）  
 $\sigma_{sc}$ ——不发生应力腐蚀的临界应力  
 $\sigma_{sh}$ ——应力松弛试验中的剩余应力  
 $\sigma'_{\delta/\tau}$ ——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  
 $\sigma'_c$ ——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

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、虎克定律 .....	3
三、弹性模量 .....	4
四、弹性比功 .....	5
五、滞弹性 .....	6
六、包申格 (Bauschinger) 效应 .....	7
第三节 塑性变形 .....	9
一、塑性变形方式及特点 .....	9
二、屈服现象和屈服点 (屈服强度) .....	10
三、影响屈服强度的因素 .....	13
四、应变硬化 (形变强化) .....	17
五、缩颈现象和抗拉强度 .....	20
六、塑性 .....	22
七、静力韧度 .....	24
第四节 金属的断裂 .....	24
一、断裂的类型 .....	24
二、解理断裂 .....	29
三、微孔聚集断裂 .....	34
四、断裂强度 .....	36
五、断裂理论的应用 .....	42
思考题与习题 .....	44

参考文献 .....

45

## 第二章 金属在其它静载荷下的力学性能 .....

46

第一节 应力状态软性系数 .....

46

第二节 压缩 .....

47

  一、压缩试验的特点 .....

47

  二、压缩试验 .....

48

第三节 弯曲 .....

48

  一、弯曲试验的特点 .....

48

  二、弯曲试验 .....

49

第四节 扭转 .....

50

  一、扭转试验的特点 .....

50

  二、扭转试验 .....

51

第五节 缺口试样静载荷试验 .....

52

  一、缺口效应 .....

52

  二、缺口试样静拉伸试验 .....

55

  三、缺口试样静弯曲试验 .....

57

第六节 硬度 .....

57

  一、金属硬度的意义及硬度试验的特点 .....

57

  二、硬度试验 .....

58

思考题与习题 .....

63

参考文献 .....

64

## 第三章 金属在冲击载荷下的力学性能 .....

65

第一节 冲击载荷下金属变形



和断裂的特点 .....	65	一、高压容器承载能力的计算 .....	98
第二节 冲击弯曲和冲击韧性 .....	66	二、高压壳体的材料选择 .....	98
第三节 低温脆性 .....	68	三、大型转轴断裂分析 .....	99
一、低温脆性现象 .....	68	第五节 弹性条件下金属断裂韧度的基本概念 .....	100
二、韧脆转变温度 .....	69	一、 $J$ 积分及断裂韧度 $J_{1c}$ .....	101
三、落锤试验和断裂分析图 .....	71	二、裂纹尖端张开位移及断裂韧度 $\delta_c$ .....	103
第四节 影响韧脆转变温度的冶金因素 .....	73	思考题与习题 .....	105
一、晶体结构 .....	73	参考文献 .....	106
二、化学成分 .....	73	第五章 金属的疲劳 .....	107
三、显微组织 .....	74	第一节 金属疲劳现象及特点 .....	107
思考题与习题 .....	75	一、变动载荷和循环应力 .....	107
参考文献 .....	76	二、疲劳现象及特点 .....	109
第四章 金属的断裂韧度 .....	77	三、疲劳宏观断口特征 .....	109
第一节 线弹性条件下的金属断裂韧度 .....	77	第二节 疲劳曲线及基本疲劳力学性能 .....	112
一、裂纹扩展的基本形式 .....	78	一、疲劳曲线和对称循环疲劳极限 .....	112
二、应力场强度因子 $K_I$ 及断裂韧度 $K_{Ic}$ .....	79	二、疲劳图和不对称循环疲劳极限 .....	115
三、裂纹扩展能量释放率 $G_I$ 及断裂韧度 $G_{Ic}$ .....	88	三、抗疲劳过载能力 .....	117
第二节 断裂韧度 $K_{Ic}$ 的测试 .....	90	四、疲劳缺口敏感度 .....	118
一、试样的形状、尺寸及制备 .....	90	第三节 疲劳裂纹扩展速率及疲劳门槛值 .....	119
二、测试方法 .....	91	一、疲劳裂纹扩展曲线 .....	119
三、试验结果的处理 .....	92	二、疲劳裂纹扩展速率 .....	120
第三节 影响断裂韧度 $K_{Ic}$ 的因素 .....	93	三、疲劳裂纹扩展寿命的估算 .....	126
一、断裂韧度 $K_{Ic}$ 与常规力学性能指标之间的关系 .....	93	第四节 疲劳过程及机理 .....	128
二、影响断裂韧度 $K_{Ic}$ 的因素 .....	95	一、疲劳裂纹萌生过程及机理 .....	128
第四节 断裂 $K$ 判据应用案例 .....	97	二、疲劳裂纹扩展过程及机理 .....	130
		第五节 影响疲劳强度的主要因素 .....	133
		一、表面状态的影响 .....	133
		二、残余应力及表面强化的	

影响 .....	134	三、腐蚀磨损 .....	170
三、材料成分及组织的影响 .....	136	第三节 磨损试验方法 .....	171
第六节 低周疲劳 .....	138	第四节 金属接触疲劳 .....	173
一、低周疲劳 .....	138	一、接触疲劳现象与接触应力 .....	173
二、热疲劳 .....	142	二、接触疲劳破坏机理 .....	177
三、冲击疲劳 .....	142	三、接触疲劳试验方法 .....	178
四、缺口机件疲劳寿命估算 .....	144	四、影响接触疲劳寿命的因素 .....	179
思考题与习题 .....	145	思考题与习题 .....	181
参考文献 .....	146	参考文献 .....	181
<b>第六章 金属的应力腐蚀</b>		<b>第八章 金属高温力学性</b>	
<b>和氢脆断裂</b> .....	147	<b>能</b> .....	182
第一节 应力腐蚀 .....	147	第一节 金属的蠕变现象 .....	183
一、应力腐蚀现象及其产生条		第二节 蠕变变形与蠕变断裂	
件 .....	147	机理 .....	184
二、应力腐蚀断裂机理及断口		一、蠕变变形机理 .....	184
形貌特征 .....	148	二、蠕变断裂机理 .....	186
三、应力腐蚀抗力指标 .....	150	第三节 金属高温力学性能指	
四、防止应力腐蚀的措施 .....	152	标及其影响因素 .....	187
第二节 氢脆 .....	153	一、蠕变极限 .....	187
一、氢在金属中的存在形式 .....	153	二、持久强度极限 .....	189
二、氢脆类型及其特征 .....	154	三、剩余应力 .....	190
三、钢的氢致延滞断裂机理 .....	156	四、影响金属高温力学性能的主要	
四、氢致延滞断裂与应力腐蚀的		因素 .....	191
关系 .....	157	思考题与习题 .....	193
五、防止氢脆的措施 .....	157	参考文献 .....	193
思考题与习题 .....	159	<b>第九章 聚合物材料的力</b>	
参考文献 .....	159	<b>学性能</b> .....	195
<b>第七章 金属磨损和接触</b>		第一节 聚合物材料的结构 .....	195
<b>疲劳</b> .....	160	一、高分子链的近程结构——	
第一节 磨损概念 .....	160	构型 .....	195
一、磨损 .....	160	二、高分子链的远程结构——	
二、耐磨性 .....	161	构象 .....	196
第二节 磨损模型 .....	161	三、聚合物聚集态结构——晶态、	
一、粘着磨损 .....	161	非晶态及取向 .....	197
二、磨粒磨损 .....	165	第二节 线型非晶态聚合物的	

变形 .....	199	与增韧 .....	221
一、聚合物在玻璃态下的变形 .....	200	一、陶瓷材料的断裂韧度 .....	221
二、聚合物在高弹态下的变形 .....	200	二、陶瓷材料的增韧 .....	223
三、聚合物在粘流态下的变形 .....	201	第六节 陶瓷材料的疲劳 .....	224
第三节 结晶聚合物的变形 .....	202	一、陶瓷材料的疲劳类型 .....	224
第四节 聚合物的粘弹性 .....	204	二、陶瓷材料疲劳特性评价 .....	226
一、静态粘弹性——蠕变与应力 松弛 .....	204	第七节 陶瓷材料的抗热震 性 .....	226
二、动态粘弹性——内耗 .....	207	一、抗热震断裂 .....	227
第五节 聚合物的强度与断 裂 .....	207	二、抗热震损伤 .....	228
一、强度 .....	207	思考题与习题 .....	228
二、银纹与断裂过程 .....	207	参考文献 .....	228
三、硬度与耐磨性 .....	208	<b>第十一章 复合材料的力学         性能 .....</b>	230
第六节 聚合物的疲劳强度 .....	210	第一节 复合材料的定义和性 能特点 .....	230
思考题与习题 .....	211	一、复合材料的定义和分类 .....	230
参考文献 .....	212	二、复合材料的性能特点 .....	230
<b>第十章 陶瓷材料的力学         性能 .....</b>	213	第二节 单向复合材料的力学 性能 .....	232
第一节 陶瓷材料的结构 .....	213	一、单向复合材料的弹性性能 .....	233
一、陶瓷材料的组成与结合键 .....	213	二、单向复合材料的强度 .....	237
二、陶瓷材料的显微结构 .....	214	第三节 短纤维复合材料的力 学性能 .....	242
第二节 陶瓷材料的变形与 断裂 .....	214	一、基体与纤维间的应力传递 .....	242
一、陶瓷材料的弹性变形 .....	214	二、短纤维复合材料的弹性模 量 .....	244
二、陶瓷材料的塑性变形 .....	215	三、短纤维复合材料的强度 .....	245
三、陶瓷材料的断裂 .....	216	第四节 复合材料的断裂、冲 击和疲劳 .....	246
第三节 陶瓷材料的强度 .....	216	一、复合材料的断裂 .....	246
一、抗弯强度 .....	216	二、复合材料的冲击性能 .....	248
二、抗拉强度 .....	218	三、复合材料的疲劳性能 .....	250
三、抗压强度 .....	218	思考题与习题 .....	253
第四节 陶瓷材料的硬度与耐 磨性 .....	218	参考文献 .....	253
一、陶瓷材料的硬度 .....	218		
二、陶瓷材料的耐磨性 .....	219		
第五节 陶瓷材料的断裂韧度			

附录 .....	254	称 .....	258
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 .....	254	附录 C $\Phi^2$ 值表 .....	263
附录 B 与本书内容有关的部 分国外标准编号和名		附录 D 表面裂纹修正因子 ...	264
		1. 表面裂纹形状因子 $Q$ 值表 .....	264
		2. 自由表面修正因子 $M_r$ 与 裂纹厚度比 $a/B$ 的关系曲 线图 .....	264

# 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；还可以标定出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 为我们熟知的退火态低碳钢拉伸力-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，拉伸力比较小时，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，该过程为弹性变形阶段。当所加的拉伸力达到  $F_s$  后，试样产生塑性变形。最初，试样上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。

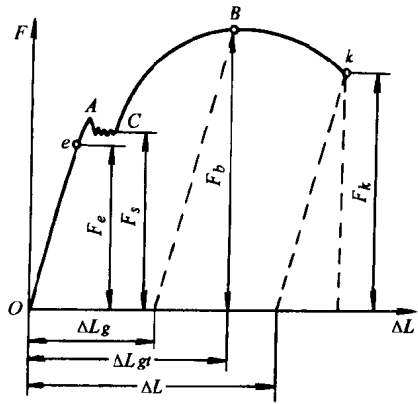


图 1-1 低碳钢的拉伸力-伸长曲线

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四个阶段。正火、退火、调质的各种碳素结构钢和一般合金结构钢，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）。因均系以一常数相除，故曲线形状不变。这样的曲线称为工程应力-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。

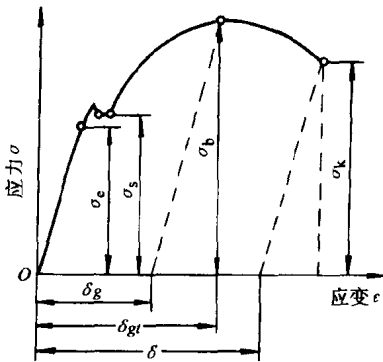


图 1-2 低碳钢的应力-应变曲线

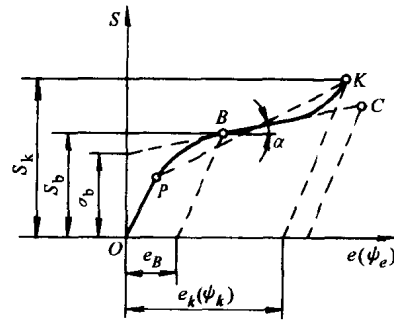


图 1-3 真实应力-应变曲线

## 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。由图 1-4，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）迭加而成。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

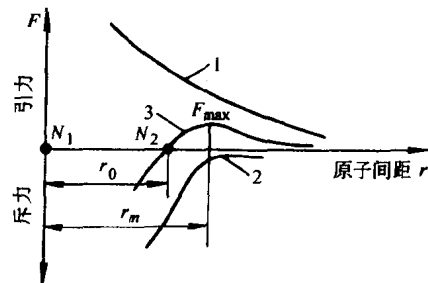


图 1-4 双原子模型

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。

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,即我们熟知的虎克定律。

弹性变形量比较小,一般不超过0.5%~1%。这是由于原子弹性位移量只相当于原子间距的几分之一,所以弹性变形量小于1%。

## 二、虎克定律

### (一) 简单应力状态的虎克定律

#### 1. 单向拉伸

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \quad (1-1)$$

$$\epsilon_x = \epsilon_z = -\nu\epsilon_y = -\nu \frac{\sigma_y}{E}$$

式中  $\epsilon_y$ ——纵向拉伸应变;

$\epsilon_x$ 、 $\epsilon_z$ ——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) 广义虎克定律

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,用广义虎克定律描述应力与应变的关系

⊙ 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。

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu (\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu (\sigma_3 + \sigma_1)] \\ \epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu (\sigma_1 + \sigma_2)] \end{cases} \quad (1-4)$$

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

$\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$ ——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。

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，桥式吊车梁应有足够的刚度，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致的，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其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\*号为  $\sigma_e$  值。