

金属力学性能
(第2版)

普通高等教育机电类规划教材

金属力学性能

(第2版)

合肥工业大学 束德林 主编

机械工业出版社

113.22

机械工业出版社

TG113.22

S64

(2)

429386

普通高等教育机电类规划教材

金属力学性能

(第 2 版)

主 编 束德林
协 编 刘会亭 戴雅康 罗启富
主 审 李志章



00429386



机械工业出版社

本书主要介绍金属在各种载荷作用及服役条件下的力学性能。全书共分九章,分别阐述金属在单向静拉伸载荷下的力学性能;金属在其它静载荷下的力学性能;金属在冲击载荷下的力学性能;金属的断裂韧性;金属的疲劳;金属的应力腐蚀和氢脆断裂;金属磨损和接触疲劳;金属高温力学性能;以及根据社会经济发展需要增加的第九章“高分子材料与陶瓷材料的力学性能”。全书突出了金属变形和断裂的基本理论,以及各种力学性能指标的物理本质与应用,这些同时也是研究高分子材料与陶瓷材料力学性能的基础,本书还注意做到两个结合,即宏观现象与微观机理相结合,基础理论与生产实践相结合。本书文字叙述通俗易懂,每一章都有思考题与习题,另附参考文献,便于读者自学和深入学习有关内容。

本书为高等工科院校金属材料及热处理专业的教材,也可供有关专业的学生及从事金属材料、高分子材料、陶瓷材料研制和加工,金属机器零件和构件设计、失效分析等方面工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属力学性能/束德林主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 1999. 10

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-04625-0

I. 金… II. 束… III. 金属-力学性质-高等学校-教材
IV. TG113. 25

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第29005号

出版人 马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:常燕宾 版式设计:张世琴 责任校对:张 力

封面设计:郭景云 责任印制:王国光

成都新华印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999年5月第2版第9次印刷

787mm×1092mm/16·15.25印张·365千字

40 851--44 850册

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、68326677-2527

修 订 版 前 言

在我国高等工科院校金属材料及热处理专业的教学计划中,《金属力学性能》是一门必修的专业课程。学习和研究金属力学性能的目的是使学生能够从各种机器零件或构件最常见的服役条件和失效现象出发,了解失效现象的微观机理,提出衡量金属材料失效抗力的力学性能指标;掌握各种指标的物理概念、实用意义和测试方法;明确它们之间的相互关系;分析各种内在因素和外条件对力学性能指标的影响,为机械设计和制造过程中正确选择和合理使用金属材料提供依据,为研制新材料、改进和开发冷、热加工新工艺,充分发挥材料性能潜力指明方向,并为机器零件或构件的失效分析提供一定基础。

本书是在1987年版基础上修订的。这次修订是根据我国社会主义经济建设改革开放和高等教育发展、深化改革的需要,以及编者多年使用原版的教学实践,对全书内容作了如下充实和调整:①高分子材料和工程陶瓷是我国发展非常迅速的工程材料,人们迫切希望了解这类材料的各种性能,本书新增“高分子材料和陶瓷材料的力学性能”一章,介绍有关的基础知识。这样,全书就由原来的八章变为九章,其中,第一章“金属在单向静拉伸载荷下的力学性能”仍是本门课程的基础。第四章“金属的断裂韧性”、第五章“金属的疲劳”则是本书的重要内容。②在章节安排和内容上作了适当变动,如原书第三章内容分别调整到第二章“金属在其它静载荷下的力学性能”和第三章“金属在冲击载荷下的力学性能”中,以突出各自的主要特点;对于与先修课程重复或在实践中应用较少的内容,如应力应变状态、力学状态图等,以及对于本科学生在内容上显得过深的内容则作了压缩;删去了原书中各章的小结,这项工作留给大学生或其他读者自己去完成。三、全书力学性能名词术语、力学性能指标及其符号和测定方法,统一按国家现行标准叙述和书写。四、注意在保持第1版特色的基础上,进一步提高内容的科学性和严密性。编者希望,修订后的《金属力学性能》教材的质量较原书应有所提高。

本书中有八章内容是分别阐述金属材料在不同条件下的力学性能,因此,书名不作变动,仍称《金属力学性能》,不过,就整体内容而言,已超出金属材料的范畴。

本书为高等工科院校金属材料及热处理专业学生教材,也可作为有关专业的学生及从事金属材料研制和加工、金属机器零件或构件设计、失效分析等方面工作的工程技术人员的参考书。

参加本书编写工作的有:安徽工学院束德林(第一、三、七章)、太原工业大学刘会亭(第四、五章)、大连铁道学院戴雅康(第二、六、八章)、江苏理工大学罗启富(第九章)。全书由束德林主编,浙江大学李志章主审。

作者在编写本书时曾参考和引用了一些单位和同志的研究成果、资料和图片,在此谨致

谢意。作者也向曾为本书第1版作出重要贡献的主审天津大学陈敏熊教授、编者山东工业大学孙希泰教授致以谢意。

由于编者学识水平所限，书中缺点和错误在所难免，敬希读者批评指正。

束德林

1994年5月于合肥

本书主要符号

(按英文字母 A、B、C…、希腊字母 α 、 β 、 γ … 次序排列)

A_0 ——试样原始横截面积。

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_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 ——拉伸杨氏模量。

E_b ——弯曲弹性模量。

E_c ——压缩杨氏模量；聚合物蠕变模量。

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_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。

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。

HRA、HRB、HRC…——洛氏硬度 (符号 A、B、C ……表示标尺)。

HR15N…、HR15T…——表面洛氏硬度 (数字为总试验力, N、T 为标尺)。

HS——肖氏硬度。

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_1 ——I 型裂纹的应力场强度因子。

K_{1c} ——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_{1sc} ——应力腐蚀临界应力场强度因子 (应力腐蚀门槛值)。

K_{1HEC} ——氢致延滞断裂临界应力场强度因子 (氢致延滞断裂门槛值)。

m ——质量。

NDT——无塑性 (零塑性) 转变温度, 以下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 ——陶瓷材料急冷急热抗热振参数。

R' ——陶瓷材料缓慢加热和冷却下的抗热震参数。

R'' ——陶瓷材料抗热损伤参数。

r ——应力比。

S ——真实正应力。

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。

Y ——裂纹形状系数。

α ——应力状态软性系数。

γ ——条件切应变。

γ_p ——裂纹扩展单位面积消耗塑性功; 规定非比例切应变。

γ_s ——裂纹表面能。

ΔK_{Ia} ——疲劳裂纹扩展门槛值。

ΔK_I ——应力场强度因子幅度。

- $\bar{\delta}$ ——以自由振动振幅的平均对数衰减率表示的循环韧性。
- δ ——断后伸长率。
- 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。
- $\dot{\epsilon}$ ——应变速率。
- ϵ_p ——规定非比例伸长率。
- ϵ_{pb} ——规定非比例弯曲应变。
- ϵ_{pc} ——规定非比例压缩应变。
- μ ——摩擦系数。
- ν ——泊松比。
- σ ——条件正应力。
- σ_b ——抗拉强度。
- σ_{bb} ——抗弯强度。
- σ_{bc} ——抗压强度。
- σ_{bN} ——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。
- σ_m ——理论断裂强度；平均应力。
- σ_p ——规定非比例伸长应力。
- σ_{pb} ——规定非比例弯曲应力。
- σ_{pc} ——规定非比例压缩应力。
- σ_r ——规定残余伸长应力。
- σ_s (σ_{sl} 、 σ_{su})——屈服点（上屈服点、下屈服点）。
- σ_{sc} ——不发生应力腐蚀的下临界应力。
- σ_{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 τ 内，以规定蠕变总伸长率 δ 表示的蠕变极限。
- σ'_t ——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。
- σ'_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。
- σ_{ys} ——有效屈服应力。
- $\sigma_{0.2}$ ——屈服强度（不规定测试方法）。
- 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。
- τ ——条件切应力。
- τ_b ——抗扭强度。
- τ_p ——规定非比例扭转应力。
- τ_s ——扭转屈服点。
- ψ ——断面收缩率。

目 录

修订版前言	
本书主要符号	
绪论	1
第一章 金属在单向静拉伸载荷下的力学性能	3
第一节 力-伸长曲线和应力应变曲线	3
第二节 弹性变形	4
一、弹性变形及其实质	4
二、弹性模量	5
三、比例极限与弹性极限	6
四、弹性比功	7
第三节 弹性不完整性	8
一、包申格 (Bauschinger) 效应	8
二、弹性后效	9
三、弹性滞后和循环韧性	10
第四节 塑性变形	11
一、塑性变形方式及特点	11
二、屈服现象和屈服点 (屈服强度)	12
三、影响屈服强度的因素	15
四、应变硬化 (形变强化)	20
五、缩颈现象	22
六、抗拉强度	24
七、塑性	24
第五节 金属的断裂	26
一、断裂的类型	26
二、解理断裂机理和微观断口特征	31
三、微孔聚集断裂机理和微观断口特征	37
四、断裂强度	39
五、断裂理论的应用	45
六、真实断裂强度和静力韧度	46
思考题与习题	47
参考文献	48
第二章 金属在其他静载荷下的力学性能	49
第一节 应力状态软性系数	49
第二节 压缩	50
一、压缩试验的特点	50
二、压缩试验	50
第三节 弯曲	52
一、弯曲试验的特点	52
二、弯曲试验	52
第四节 扭转	54
一、扭转试验的特点	54
二、扭转试验	55
第五节 缺口试样静载荷试验	56
一、缺口效应	56
二、缺口试样静拉伸试验	58
三、缺口试样静弯曲试验	60
第六节 硬度	61
一、金属硬度的意义及硬度试验的特点	61
二、硬度试验	62
思考题与习题	67
参考文献	68
第三章 金属在冲击载荷下的力学性能	69
第一节 冲击载荷下金属变形和断裂的特点	69
第二节 冲击弯曲和冲击韧性	70
第三节 低温脆性	72
一、低温脆性现象	72
二、韧脆转变温度	73
三、落锤试验和断裂分析图	75
第四节 影响冲击韧性和韧脆转变温度的因素	76
一、冶金因素	76
二、外部因素	78
思考题与习题	79
参考文献	79

第四章 金属的断裂韧性	81	一、疲劳裂纹扩展曲线	128
第一节 线弹性条件下的金属断裂		二、疲劳裂纹扩展门槛值	129
韧性	81	三、疲劳裂纹扩展的影响因素	130
一、裂纹扩展的基本形式	81	四、疲劳裂纹扩展速率表达式	133
二、应力场强度因子 K_I 及断裂韧性 K_{Ic}	82	五、疲劳裂纹扩展寿命的估算	134
三、裂纹扩展能量释放率 G_I 及断裂韧性 G_{Ic}	91	第四节 疲劳过程及机理	136
第二节 弹塑性条件下的金属断裂		一、疲劳裂纹萌生过程及机理	136
韧性	94	二、疲劳裂纹扩展过程及机理	138
一、 J 积分原理及断裂韧性 J_{Ic}	95	第五节 影响疲劳强度的因素	142
二、裂纹尖端张开位移 (COD) 及断裂韧性 δ_c	97	一、加载规范的影响	142
第三节 断裂韧性的测试	99	二、表面状态及尺寸因素的影响	145
一、断裂韧性 K_{Ic} 的测试	99	三、表面强化及残余应力的影响	146
二、断裂韧性 J_{Ic} 的测试	102	四、材料成分及组织的影响	148
三、断裂韧性 δ_c 的测试	103	第六节 低周疲劳	150
第四节 影响断裂韧性的因素	105	一、低周疲劳	150
一、断裂韧性与常规力学性能指标之间的关系	105	二、热疲劳	153
二、影响断裂韧性的因素	107	三、冲击疲劳	154
第五节 断裂韧性在工程中的应用	110	思考题与习题	156
一、高压容器承载能力的计算	110	参考文献	157
二、高压壳体的材料选择	111	第六章 金属的应力腐蚀和氢脆	
三、大型转轴断裂分析	112	断裂	158
四、钢铁材料的脆性评定	112	第一节 应力腐蚀	158
思考题与习题	114	一、应力腐蚀现象及其产生条件	158
参考文献	115	二、应力腐蚀断裂机理及断口形貌特征	159
第五章 金属的疲劳	116	三、应力腐蚀力学性能指标	161
第一节 金属疲劳现象及特点	116	四、防止应力腐蚀的措施	163
一、变动载荷和循环应力	116	第二节 氢脆	163
二、疲劳现象及特点	118	一、氢在金属中的存在形式	163
三、疲劳宏观断口特征	118	二、氢脆类型及其特征	164
第二节 疲劳曲线及疲劳抗力	121	三、钢的氢致延滞断裂机理	165
一、疲劳曲线	121	四、氢致延滞断裂与应力腐蚀的关系	167
二、疲劳极限	122	五、防止氢脆的措施	168
三、过载持久值及过载损伤界	126	思考题与习题	169
四、疲劳缺口敏感度	127	参考文献	169
第三节 疲劳裂纹扩展及疲劳门槛值	128	第七章 金属磨损和接触疲劳	170
		第一节 磨损现象和耐磨性	170
		一、磨损	170
		二、耐磨性	171
		第二节 磨损机理	171

一、粘着磨损	171	参考文献	204
二、磨粒磨损	174	第九章 高分子材料与陶瓷材料的力学性能	205
三、腐蚀磨损	178	第一节 高分子材料的变形与断裂	205
第三节 磨损试验方法	180	一、聚合物的结构与性能特点	205
第四节 提高耐磨性的途径	182	二、线型非晶态聚合物的变形	209
第五节 金属接触疲劳	183	三、结晶聚合物的变形	211
一、接触疲劳现象与接触应力	183	四、聚合物的粘弹性	212
二、接触疲劳破坏机理	186	五、聚合物的强度与断裂	214
三、接触疲劳试验方法	188	第二节 陶瓷材料的力学性能	216
四、影响接触疲劳抗力的因素	189	一、陶瓷材料的组成、结构	217
思考题与习题	191	二、陶瓷材料的变形与断裂	217
参考文献	192	三、陶瓷材料的断裂韧性	222
第八章 金属高温力学性能	193	四、陶瓷材料的疲劳强度	224
第一节 金属的蠕变现象	194	五、陶瓷材料的耐磨性	226
第二节 蠕变变形与断裂机理	195	六、陶瓷材料的抗热震性	227
一、蠕变变形机理	195	思考题与习题	228
二、蠕变断裂机理	196	参考文献	229
第三节 金属高温力学性能指标及其影响因素	197	附录	230
一、蠕变极限	197	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	230
二、持久强度极限	199	附录 B Φ^2 值表	233
三、剩余应力	200	附录 C 表面裂纹修正因子	234
四、影响金属高温力学性能的主要因素	201	1. 表面裂纹形状因子 Q 值表	234
第四节 其它高温力学性能	203	2. 自由表面修正因子 M_s 与裂纹厚度比 a/B 的关系曲线	234
一、高温短时拉伸性能	203		
二、高温硬度	203		
思考题与习题	203		

绪 论

金属材料具有各种不同的使用性能,在生产上得到广泛应用。研究金属材料的根本目的是改善和提高其使用性能,金属材料的使用性能包括物理性能、化学性能、工艺性能和力学性能,对于结构材料来说,其中最重要的是力学性能。

金属材料的力学性能是指金属在外加载荷(外力)作用下或载荷与环境因素(温度、介质和加载速率)联合作用下所表现的行为。这种行为又称为力学行为,显示与弹性和非弹性反应相关或涉及应力-应变的关系,宏观上一般即表现为金属的变形和断裂。国家标准^①定义金属力学性能是指“金属在力作用下所显示与弹性和非弹性反应相关或涉及应力-应变关系的性能”。

绝大多数机器零件或构件(简称机件)都是用金属材料制成的,并在不同的载荷与环境条件下服役。如果金属材料对变形和断裂的抗力与服役条件不相适应,便会使机件失去预定的效能,即产生所谓“失效现象”。常见的失效现象如过量弹性变形、过量塑性变形、断裂和磨损等。因此,金属材料的力学性能可以简单地理解为:金属抵抗外加载荷(外力)引起变形和断裂的能力或金属材料的失效抗力。

金属材料的力学性能包括强度、硬度、塑性、韧性、耐磨性和缺口敏感性等性能。因为金属机件的承载条件一般用各种力学参量(如应力、应变、应力场强度因子等)表示,因此,人们便将表征金属材料力学行为的力学参量的临界值或规定值称为金属力学性能指标或判据,如强度指标 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 、 σ_{-1} ,塑性指标 δ 、 ψ ,韧性指标 A_K 、 K_{IC} 等。金属力学性能指标具体数值的高低,表示金属抵抗变形和断裂能力的大小,是评定金属材料质量的主要依据,也是金属机件设计时选材和进行强度计算时的主要依据。

金属材料的力学性能决定于材料的化学成分、组织结构、冶金质量、残余应力及表面和内部缺陷等内在因素,但外在因素如载荷性质(静载荷、冲击载荷、交变载荷)、载荷谱、应力状态(拉、压、弯曲、扭转、剪切、接触应力及各种复合应力)、温度、环境介质等对金属的力学性能也有很大影响。例如,低碳钢试样在静拉伸载荷作用下,先产生弹性变形;当应力达到屈服点时便产生明显的塑性变形;在形成颈缩后产生韧性断裂,显示出良好的塑性特征。但当低碳钢试样承受交变载荷时,则在低于屈服点的应力下发生断裂,在断裂试样上看不到宏观塑性变形。如果低碳钢在较低的温度下服役,则即使承受静拉伸载荷,仍然表现出脆性的行为。显然,分析上述内外因素对金属力学性能的影响,掌握金属力学性能的变化规律,对于正确选择材料,明确提高金属力学性能的方向和途径,具有十分重要的意义。

金属力学性能的物理本质及宏观变化规律与金属在变形和断裂过程中位错的运动、增殖和交互作用(位错之间的交互作用、位错与点缺陷的交互作用)等微观过程有关。虽然研究金属力学行为的微观机理是金属物理学科的任务,但目前金属力学性能学科中已广泛引用了有关微观理论,从而使金属力学性能的研究工作进入了宏观规律与微观机理相结合的阶段。

① GB 10623—89 金属力学性能试验术语。

金属力学性能的研究是建立在实验基础上的,并且金属材料的各种力学性能指标也需通过实验来测定。因此,在金属力学性能研究中,必须重视金属力学性能指标的测试技术。

综上所述,《金属力学性能》课程的主要内容是:

- (1) 金属材料在各种服役条件下的变形和断裂现象及微观机理。
- (2) 金属力学性能指标的本质、物理概念、实用意义,以及各种力学性能指标间的相互关系。
- (3) 影响金属力学性能的因素,提高金属力学性能的方向和途径。
- (4) 金属力学性能指标的测试技术。

掌握金属材料力学性能的基本内容,可为理解高分子材料和陶瓷材料力学性能的特点打下一定基础。因为不同材料之间,一些力学性能的概念、理论、研究方法等是类似的,只是不同材料的结构有很大不同,因此它们的力学行为就有显著区别。

学习和研究金属力学性能的目的在于正确和合理使用金属材料,研制新材料,改进和开发冷热加工工艺,以充分发挥材料性能的潜力,并为机件失效分析提供一定基础。但应指出,避免或防止机件失效,并非是研究金属力学性能的唯一目的,因为在有些场合,金属材料的变形和断裂并不是失效现象,如金属压力加工中的塑性变形,金属切削加工中通过断裂过程切除多余金属等。可见,研究金属力学性能还能指导变形和加工的具体实践,因而具有广泛的实际意义。

《金属力学性能》课程与《金属工艺学》、《工程力学》、《金属学》、《金属热处理原理与工艺》及《金属材料学》等课程有密切的关系。这些课程为本门课程提供了金属化学成分与微观结构,各种金属材料的性能及其冷、热加工工艺方法,应力分析和材料宏观强度理论等方面的知识,而本门课程又为评定金属材料及其冷、热加工工艺提供了理论依据和方法。从工程上利用金属材料的角度看,它们实际上构成了相互关联的系统。

《金属力学性能》是密切联系生产实际的课程。各种机件的失效现象都是具体的,是在特定服役条件下产生的。因此,学习《金属力学性能》课,必须贯彻理论联系实际的原则,既要充分运用相关课程的基础知识,掌握金属力学性能的基本理论,又要从具体零件的失效现象出发,学会正确确定金属力学性能指标及其测试方法,分析各种内外因素对金属力学性能的影响,以便能从材料和工艺角度提出避免或防止机件失效、延长机件寿命的技术措施。

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三种失效形式，即过量弹性变形、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 σ_b 、断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。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变革上述性能指标的途径和方向。

第一节 力-伸长曲线和应力应变曲线

力-伸长曲线是拉伸试验中记录的拉伸力对伸长的关系曲线。图 1-1 为我们所熟知的退火低碳钢拉伸力-伸长（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 ΔL 。由图可见，拉伸力比较小时，试样伸长随力增加而增加。当拉伸力超过 F_P 后，力-伸长曲线开始偏离直线。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_A 后，试样便产生塑性变形，即不可逆永久变形。最初，试样上局部区域产生不均匀屈服塑性变形，力-伸长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。

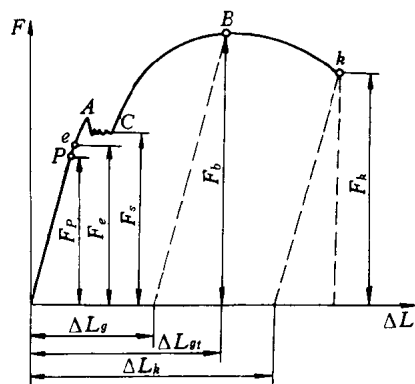


图 1-1 低碳钢的力-伸长曲线

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。不仅退火低碳钢如此，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力-伸长曲线。正如我们在绪论中所指出的那样，不同材料以及同一材料环境不同时，具有不同的力学行为，反映在力-伸长曲线上也有所区别。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，它们的力-伸长曲线上只有弹性变形阶段。冷拉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等。

将图 1-1 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。

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

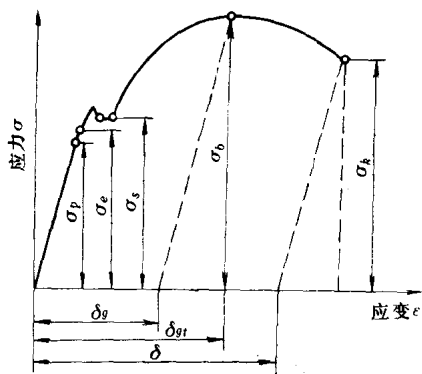


图 1-2 低碳钢的应力-应变曲线

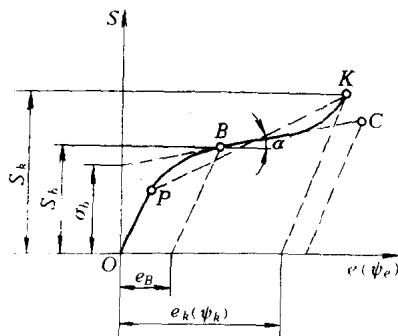


图 1-3 真实应力-应变曲线

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。金属在一定外力作用下, 先产生弹性变形, 当外力去除后, 变形随即消失而恢复原状, 表现为弹性变形可逆性特点。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, 且弹性变形量比较小, 一般不超过 0.5%~1%。

金属材料弹性变形是其晶格中原子自平衡位置产生可逆位移的反映, 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%。

金属材料的弹性变形过程可以用双原子模型来解释。在没有外加载荷作用时, 金属中的原子在其平衡位置附近产生振动。相邻两个原子之间的作用力由引力与斥力迭加而成。一般认为, 引力是由金属正离子和自由电子间的库仑力所产生, 而斥力是由离子之间因电子壳层产生应变所致。引力与斥力都是原子间距的函数 (图 1-4)。由图 1-4 可见。当原子因受力而接近时, 斥力开始缓慢增加, 而后, 当电子壳层重叠时, 斥力迅速增加。引力则随原子间距增加逐渐下降。合力曲线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。原子位移的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, 从而表现了弹性变形的可逆性。

原子间相互作用力 F 与原子间距 r 的关系为

$$F = \frac{A}{r^2} - \frac{Ar_0^2}{r^4} \quad (1-1)$$

式中 A 、 r_0 ——与原子本性或晶体、晶格类型有关的常数。

上式中第一项为引力，第二项为斥力。由式(1-1)可见，原子间相互作用力与原子间距离的关系并非如虎克定律所示的直线关系，而是抛物线关系。但若外力较小时，原子偏离平衡位置不远，合力曲线的起始阶段可视为直线，则虎克定律表示的外力-位移（原子间相互作用力-原子间距离）线性关系近似是正确的。

由图 1-4，当 $r=r_m$ 时，斥力接近为零，与外力平衡的原子间作用力只有引力，合力曲线上出现极大值 F_{max} 。 F_{max} 是拉伸时两原子间的最大结合力。如外力达到 F_{max} ，就可以克服两原子间的引力而使它们分开。因此， F_{max} 也就是金属材料在弹性状态下的断裂载荷（断裂抗力），相应的原子位移量 r_m-r_0 ，即弹性变形量也最大，接近 23%。实际上，它们都是理论值，因为实际金属材料中不可避免地存在各种缺陷甚至裂纹，因而断裂载荷不可能达到 F_{max} ，而且也不可能产生那样大的弹性变形量，因为在这之前金属就可能已产生塑性变形或断裂了。

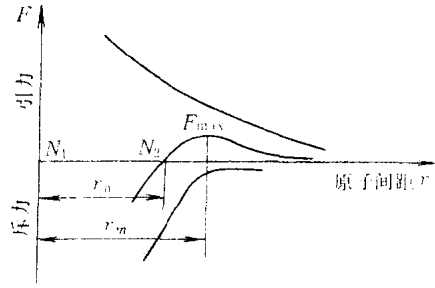


图 1-4 双原子模型

二、弹性模量

在弹性变形阶段，大多数金属的应力与应变之间符合虎克定律所示的正比关系，如拉伸时 $\sigma=E\epsilon$ ，剪切时 $\tau=G\gamma$ ， E 和 G 分别为拉伸杨氏模量和切变模量。由此可知，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如表 1-1 所示。

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}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，其值愈大，则在相同应力下产生的弹性变形就愈小。机器零件或构件的刚度与材料刚度不同，前者用其截面积 A 与所用材料的刚度 E 的乘积，即 AE 表示。可见，欲提高机器零件的刚度，在不能增大截面积的情况下，应选用 E 值比较高的材料；如钢铁材料。

为了计算梁与其它构件的挠度，以及为了防止机器零件因过量弹性变形而造成失效，我们需要知道材料的弹性模量，因此，弹性模量是金属材料重要的力学性能指标之一。

单晶体金属的弹性模量在不同晶体学方向上是不一致的，在原子间距较小的晶体学方向上弹性模量较大，反之则较小，因此，单晶体金属表现为弹性各向异性。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, 因而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与晶格类型。

溶质元素虽可改变合金的晶格常数, 但对于常用钢铁材料而言, 合金元素对其晶格常数改变不大, 因而对弹性模量影响很小。合金钢和碳钢的弹性模量数值相当接近, 差值不大于12%。所以若仅考虑机件刚度要求, 选用碳钢即可。

热处理(显微组织)对弹性模量的影响不大, 如晶粒大小对 E 值无影响; 第二相大小和分布对 E 值影响也很小; 淬火后 E 值虽稍有下降, 但回火后又恢复到退火状态的数值。灰铸铁例外, 其 E 值与组织有关。如具有片状石墨的灰铸铁, $E \approx 135 \times 10^3 \text{MPa}$ 。球铁因其石墨紧密度增加, 故 E 值较高, 其值为 $175 \times 10^3 \text{MPa}$ 。这是由于片状石墨边缘有应力集中, 并产生局部塑性变形, 在石墨紧密度增加时其影响将有所减弱。

冷塑性变形使 E 值稍有降低, 一般降低4%~6%, 此与出现残余应力有关。当塑性变形量很大时, 因产生变形织构而使 E 值出现各向异性, 沿变形方向 E 值最大。

温度升高原子间距增大, E 值降低。碳钢加热时每升高 100°C , E 值下降3%~5%。但在 $-50 \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内, 钢的 E 值变化不大, 可以不考虑温度的影响。

弹性变形的速率和声速一样快, 远超过实际加载速率, 故加载速率对弹性模量也无大的影响。

综上所述可见, 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, 外在因素的变化对它的影响也比较小。

三、比例极限与弹性极限

比例极限与弹性极限有明确的物理意义。

比例极限 σ_p 是应力与应变成正比关系的最大应力, 即在拉伸应力-应变曲线上开始偏离直线时的应力。

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_0} \quad (1-2)$$

式中 F_p ——比例极限对应的试验力;

A_0 ——试样的原始截面积。

弹性极限 σ_e 是材料由弹性变形过渡到弹-塑性变形时的应力。应力超过弹性极限以后, 材料便开始发生塑性变形。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (1-3)$$

式中 F_e ——弹性极限对应的试验力;

A_0 ——试样的原始截面积。

σ_p 、 σ_e 的实际意义是: 对于要求在服役时其应力应变关系维持严格直线关系的机件, 如测力计弹簧是依靠弹性变形的应力正比于应变的关系显示载荷大小的, 则选择制造这类机件的材料应以比例极限为依据; 若服役条件要求不允许产生微量塑性变形的机件, 则设计时应按弹性极限来选材。

必须指出,上述两个力学性能指标虽有明确的物理意义,但对于多晶体金属材料来说,由于晶粒具有各向异性,以及各晶粒在外力作用下开始产生塑性变形的不同时性,用工程方法很难测出准确而唯一的比例极限和弹性极限数值。因此,一般用试样产生规定的微量塑性伸长时的应力来表征。从这个定义来说,比例极限和弹性极限与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,而且影响金属比例极限与弹性极限的因素和影响屈服强度的因素也相同,故将其列入屈服强度中一并讨论。

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。一般可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 1-5 应力-应变曲线下影线面积表示,且

$$a_e = \frac{1}{2} \sigma_e \epsilon_e = \frac{\sigma_e^2}{2E} \quad (1-4)$$

式中 a_e ——弹性比功;

σ_e ——弹性极限;

ϵ_e ——最大弹性应变。

由式 (1-4) 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。因为弹性比功是用单位体积材料吸收的最大弹性变形功表示的,故试样或实际机器零件的体积愈大,则其中可吸收的弹性功愈大,亦即可储备的弹性能愈大。此点对于研究或理解大件的脆性断裂问题很有意义。

几种金属材料的弹性比功如表 1-2 所示。

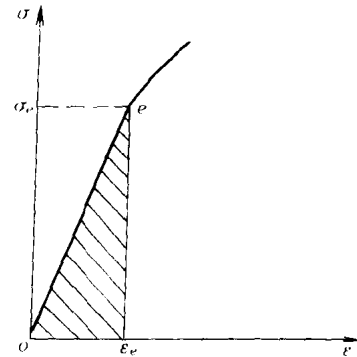


图 1-5 金属拉伸应力-应变曲线（弹性阶段）

表 1-2 几种金属材料的弹性比功

材 料	E (MPa)	σ_e (MPa)	a_e (MPa)
中 碳 钢	210000	310	0.228
高碳弹簧钢	210000	965	2.217
硬 铝	72400	125	0.108
铜	110000	27.5	3.44×10^{-3}
铍 青 铜	120000	588	1.44
磷 青 铜	101000	450	1.0

弹簧是典型的弹性零件,其重要作用是减振和储能驱动。因此,弹簧材料应具有较高的弹性比功。生产上选用含碳较高的钢,加入 Si、Mn 等合金元素以强化铁素体基体,并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,使弹性比功增加。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 σ_e 值较高,故其弹性比功也比较大。