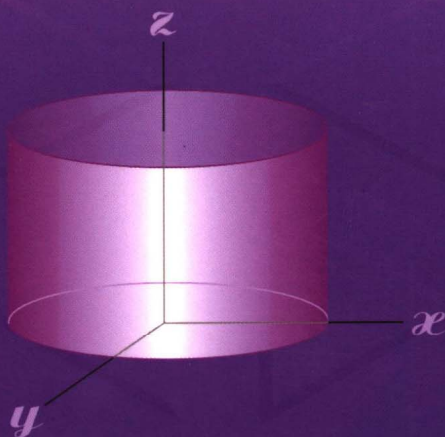


工程材料的

力学性能

(修订版)

姜伟之 赵时熙 王春生 张 峥 编著



北京航空航天大学出版社
<http://www.buaapress.cn.net>

工程材料的力学性能

(修订版)

姜伟之 赵时熙
王春生 张 峥 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书分两篇阐述了各向同性材料(以金属材料为主)和各向异性材料(以树脂基复合材料为主)在各种加载条件下的力学行为。第一篇以静拉伸、断裂韧性和疲劳等力学行为为重点,第二篇则着重介绍了组分性能与复合材料性能的关系及复合材料的结构特性。全书在适当阐述变形及断裂理论的基础上,力图使各种力学性能指标的物理意义明确,并使其测试原理易于理解。

本书为材料科学与工程类各专业的大学本科生教材,也可供有关专业学生及从事工程材料的研究与加工以及结构失效分析等专业的技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料的力学性能/姜伟之等编著.—2版(修订版)—北京:北京航空航天大学出版社,2000.7

ISBN 7-81012-558-3

I.工... II.姜... III.工程材料 力学性能
IV.TB302.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 29767 号

工程材料的力学性能

姜伟之 赵时熙 王春生 张 峥 编著

责任编辑 刘宝俊

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市学院路 37 号(100083) 发行部电话 82317024

<http://www.buaapress.cn.net>

E-mail: pressell@publica.bj.cninfo.net

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

开本: 787×1092 1/16 印张: 16.5 字数: 422 千字

2000 年 7 月第 1 版 2000 年 7 月第 1 次印刷 印数: 2000 册

ISBN 7-81012-558-3/TB·067 定价: 23.00 元

修订版序言

多年的教学实践表明,这本教材在适应大专业设置和拓宽学生知识结构方面都起了积极的作用,而且在适当强调宏观力学理论与力学性能试验的结合上也是一次有益的尝试。

不过,近年来,由于课程学时安排趋于压缩,这与教材中原先考虑给本科和研究生毕业论文提供参考而使篇幅偏大的矛盾相对突出。为此,这次修订主要是根据本科生的需要对上述有关内容加以删除而进行的。

为使此次修订更加切合教学实际,特请对本教材有丰富教学经验的王春生和张崢老师参加了工作,如由王春生老师改写了第一章有关金属拉伸曲线的导入部分;由张崢老师协调了原先第一章中应力、应变符号不够统一以及第八章有关磨损分类偏细的问题,并重新制作第一篇中有关断口金相的部分图片。所以,他们自然地成为教材(修订本)的编者新成员。

原版编者

1999.10

前 言

《工程材料的力学性能》是在教学改革中为适应“材料科学与工程”类专业(金属材料、高分子材料、复合材料和材料防护等)学生需要适当拓宽力学性能方面的知识结构而设置的课程。实际上,它还是新设置的大专业系列技术基础课之一。这个系列包括:《材料科学基础》、《材料工程基础》、《工程材料的力学性能》和《材料科学中的现代研究方法》,它们共同组成“材料科学与工程”大专业的主干课程。

《工程材料的力学性能》课的教学目的是使学生掌握工程材料力学性能的基本理论和评价工程材料的力学性能指标,在构件设计中正确选材,在生产过程中优化工艺并改善材料性能,掌握材料性能测试原理和方法等。

本书就是为满足上述要求而编写的。它由两篇组成,分别以金属材料和树脂基复合材料为主,相应讨论了均质各向同性(如金属、陶瓷和高分子材料)和非均质各向异性两类工程结构材料的基本力学行为。为了在应用本教材时可以按需要有所取舍,以及对力学性能中的新近发展有所了解,书中还选编了一些相关的内容,并在目录中以“*”号标出。它们一般不直接纳入课程的教学内容,但可作为在某一方面深入学习的入门,可望在学生进行“毕业论文”等教学环节的科研活动中发挥作用。

本书第一篇由姜伟之编写,第二篇由赵时熙编写。由于编者水平所限,加上时间仓促,错误之处在所难免,敬希读者批评指正。

编 者
1990.4

目 录

绪 论

第一篇 金属的力学性能

第一章 静拉伸下的力学性能

§ 1.1 拉伸曲线和应力—应变曲线	(4)
1.1.1 拉伸试样	(4)
1.1.2 拉伸曲线和应力—应变曲线	(4)
§ 1.2 弹性变形、Hooke 定律和弹性模量	(7)
1.2.1 弹性变形的 Hooke 定律和双原子模型	(7)
1.2.2 广义 Hooke 定律	(9)
1.2.3 常用弹性常数及弹性模量	(11)
§ 1.3 滞弹性变形	(13)
§ 1.4 连续屈服材料的变形和抗力	(14)
1.4.1 非比例变形	(14)
1.4.2 规定非比例伸长应力 σ_p	(15)
1.4.3 规定总伸长应力 σ_t	(16)
1.4.4 规定残余伸长应力 σ_r	(16)
§ 1.5 不连续(物理的、明显的)屈服材料的变形和抗力	(17)
1.5.1 不连续屈服变形	(17)
1.5.2 屈服点和屈服点伸长率	(18)
1.5.3 影响屈服应力的因素	(19)
§ 1.6 形变硬化	(21)
1.6.1 流变曲线和硬化指数	(21)
1.6.2 形变硬化的工程意义	(24)
§ 1.7 最大均匀塑性变形及断后变形和抗力	(24)
1.7.1 最大力下的总伸长率 δ_{gt} 和非比例伸长率 δ_g	(24)
1.7.2 抗拉强度	(26)
1.7.3 断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ	(26)
§ 1.8 颈缩处的应力分布	(27)
§ 1.9 实际断裂强度	(28)
§ 1.10 宏观断裂类型和力学状态图	(29)
§ 1.11 断裂的微观形貌特征	(31)
1.11.1 晶间断裂和穿晶断裂	(31)
1.11.2 解理断裂和微孔聚合剪切断裂	(32)
§ 1.12 断裂的力学理论简介	(36)
1.12.1 理论断裂强度	(36)
1.12.2 裂纹体的断裂强度	(37)
§ 1.13 高聚物的变形和断裂行为	(40)
习 题	(41)

第二章 其他静载下的力学性能

§ 2.1 扭 转	(43)
2.1.1 静扭转试验的特点	(43)
2.1.2 扭转试验测定的力学性能指标	(44)
§ 2.2 弯 曲	(46)
2.2.1 静弯曲试验的特点	(46)
2.2.2 弯曲试验测定的力学性能指标	(46)
§ 2.3 压 缩	(47)
§ 2.4 硬 度	(48)
2.4.1 布氏硬度	(49)
2.4.2 洛氏硬度	(52)
2.4.3 维氏硬度	(54)
§ 2.5 缺口对静加载下力学性能的影响	(55)
2.5.1 缺口效应	(55)
2.5.2 缺口静拉伸及斜拉伸试验	(57)
习 题	(59)
第三章 冲击韧性与冷脆转变	
§ 3.1 冲击试验和冲击吸收功	(60)
3.1.1 缺口试样的冲击试验	(60)
3.1.2 冲击吸收功的意义	(62)
3.1.3 冲击试验的应用	(62)
§ 3.2 低温脆性和冷脆转变温度	(63)
3.2.1 低温脆性现象	(63)
3.2.2 冷脆现象的断口观察	(64)
3.2.3 冷脆转变温度的评定和内在影响因素	(64)
习 题	(65)
第四章 断裂韧性	
§ 4.1 线弹性条件下的断裂韧性	(66)
4.1.1 三种断裂的类型	(66)
4.1.2 应力强度因子 K_I 和断裂韧性 K_{Ic}	(67)
4.1.3 线弹性断裂力学在理想弹塑性材料中的应用	(70)
4.1.4 小范围屈服对塑性区尺寸的限制	(74)
4.1.5 裂纹扩展能量释放率 G_I 和断裂韧性 G_{Ic}	(75)
§ 4.2 断裂韧性指标的测试	(79)
4.2.1 K_{Ic} 测试方法简述	(79)
4.2.2 临界载荷候选值 F_Q 的确定	(80)
4.2.3 K_Q 有效性的判断	(82)
§ 4.3 影响断裂韧性的因素	(84)
4.3.1 材料的组织和结构	(84)
4.3.2 温度和加载速度	(85)
§ 4.4 弹塑性条件下断裂韧性的概述	(86)
习 题	(86)
第五章 疲 劳	
§ 5.1 变动载荷(应力)和疲劳破坏的特征	(88)
5.1.1 变动载荷(应力)及其描述参量	(88)

5.1.2 疲劳破坏特征和断口分析·····	(89)
§ 5.2 高周疲劳·····	(90)
5.2.1 S—N 曲线和疲劳极限·····	(90)
5.2.2 循环应力特性对疲劳强度的影响·····	(96)
5.2.3 表面几何因素对高周疲劳特性的影响·····	(98)
5.2.4 应力变动和累积损伤·····	(99)
§ 5.3 低周疲劳·····	(100)
5.3.1 滞后回线·····	(100)
5.3.2 循环硬化和循环软化·····	(101)
5.3.3 循环应力—应变曲线·····	(102)
5.3.4 应变—寿命曲线·····	(103)
5.3.5 缺口零件的疲劳寿命预测·····	(105)
5.3.6 热疲劳·····	(106)
§ 5.4 疲劳裂纹扩展·····	(107)
5.4.1 应力、裂纹长度与疲劳裂纹扩展的关系·····	(107)
5.4.2 平均应力的影响·····	(109)
5.4.3 组织对疲劳裂纹扩展速率的影响·····	(111)
5.4.4 疲劳裂纹扩展寿命的估算·····	(112)
§ 5.5 疲劳裂纹的萌生和扩展机理·····	(113)
5.5.1 疲劳裂纹的萌生·····	(113)
5.5.2 疲劳裂纹扩展的方式和机理·····	(114)
§ 5.6 改善疲劳强度的方法·····	(118)
§ 5.7 工程塑料的疲劳·····	(119)
5.7.1 疲劳热破坏·····	(119)
5.7.2 疲劳裂纹扩展·····	(120)
习 题·····	(125)
第六章 蠕 变	
§ 6.1 蠕变现象和蠕变曲线·····	(126)
§ 6.2 蠕变极限与持久强度·····	(127)
6.2.1 蠕变极限·····	(127)
6.2.2 持久强度和塑性·····	(128)
§ 6.3 蠕变变形和断裂机理·····	(130)
6.3.1 蠕变变形·····	(130)
6.3.2 蠕变断裂·····	(132)
§ 6.4 影响蠕变极限和持久强度的主要因素·····	(133)
习 题·····	(133)
第七章 应力腐蚀与腐蚀疲劳	
§ 7.1 应力腐蚀·····	(134)
7.1.1 应力腐蚀裂纹扩展的特征·····	(134)
7.1.2 应力腐蚀抗力指标及测试方法·····	(135)
7.1.3 应力腐蚀的机理·····	(137)
7.1.4 防止应力腐蚀的措施和安全设计·····	(138)
§ 7.2 氢 脆·····	(139)
§ 7.3 腐蚀疲劳·····	(140)

7.3.1	腐蚀疲劳中的 S—N 曲线	(140)
7.3.2	腐蚀疲劳裂纹扩展	(141)
7.3.3	防止腐蚀疲劳的措施	(144)
	习 题	(144)
第八章 磨损、接触疲劳和微动损伤		
§ 8.1	磨 损	(145)
8.1.1	粘着磨损	(146)
8.1.2	磨粒磨损	(146)
8.1.3	腐蚀磨损	(146)
§ 8.2	接触疲劳	(147)
8.2.1	接触应力	(147)
8.2.2	接触疲劳的类型	(149)
8.2.3	影响接触疲劳抗力的因素	(150)
§ 8.3	微动损伤	(152)
	习 题	(155)
第二篇 复合材料的力学性能		
第九章 复合材料的一般特性、增强机理和分类		
§ 9.1	研究对象	(157)
§ 9.2	复合材料的一般特性	(157)
§ 9.3	增强机理及分类	(158)
	习 题	(160)
第十章 单向复合材料的静态力学性能		
§ 10.1	单向复合材料的对称性和基本性能指标	(161)
§ 10.2	组分对单向复合材料刚度的贡献	(167)
10.2.1	纵向刚度	(168)
10.2.2	横向刚度	(171)
10.2.3	面内切变模量和主泊松比	(173)
§ 10.3	失效模式和强度	(174)
10.3.1	在纵向拉伸载荷下的失效	(175)
10.3.2	在横向拉伸载荷下的失效	(178)
10.3.3	在纵向压缩载荷下的失效	(180)
10.3.4	在横向压缩载荷下的失效	(182)
10.3.5	在面内剪切载荷下的失效	(183)
§ 10.4*	环境条件对复合材料性能的影响	(183)
	习 题	(183)
第十一章 复合材料层合板的静态力学性能		
§ 11.1	单层板的正轴应力—应变关系	(184)
§ 11.2	单层板的偏轴应力—应变关系	(188)
11.2.1	应力和应变的转换	(189)
11.2.2	单层板的偏轴应力—应变特性	(192)
§ 11.3*	偏轴工程常数	(197)
§ 11.4*	层合板变形的基本特征	(202)
11.4.1	对称层合板的面内应力—应变关系	(203)

11.4.2 对称层合板的弯曲行为·····	(204)
11.4.3 一般层合板的应力—应变关系·····	(206)
§ 11.5 层合板强度的基本概念·····	(208)
§ 11.6* 层间应力和自由边效应·····	(210)
习 题·····	(213)
第十二章 复合材料的断裂、疲劳和冲击	
§ 12.1 复合材料的断裂·····	(214)
§ 12.2 复合材料的疲劳·····	(216)
12.2.1 疲劳损伤及其对复合材料性能的影响·····	(217)
12.2.2 影响复合材料疲劳特性的因素·····	(220)
§ 12.3 复合材料的冲击·····	(226)
12.3.1 冲击试验的方法·····	(227)
12.3.2 材料和试验参数对复合材料冲击性能的影响·····	(229)
12.3.3 能量吸收机理·····	(231)
习 题·····	(233)
第十三章 短纤维复合材料的力学性能	
§ 13.1 应力传递理论·····	(234)
§ 13.2 短纤维复合材料的模量和强度·····	(236)
习 题·····	(239)
附 录	
§ A1 常用单位的换算·····	(240)
§ A2 常用应力强度因子 K_I ·····	(241)
§ A3 常用金属力学性能试验方法国家标准及其适用范围·····	(246)
参考资料 ·····	(250)

绪 论

1. 工程材料的力学性能在材料科学与工程中的地位

一般说来,力学性能是工程结构材料研究和应用中最关键性的问题。这是因为:

(1) 力学性能通常是工程结构或部件设计中最重要数据和依据。

(2) 力学性能通常是新材料能否由研制状态进入工程应用的基本考核指标,尤其是综合性能(包括强度和塑性)的优劣常常是决定性因素。

(3) 任何机械结构的失效(包括不能满足设计的工作能力或未达到预期的工作寿命而损坏)尽管形式多种多样,究其原因除设计不当外,一般都归因于在服役中的载荷形式和环境条件下未能达到要求的力学性能。所以,通常的失效分析在很大程度上也是围绕载荷和环境以及相关力学性能分析而展开的。

由此可见,在材料科学与工程中,材料的力学性能显然占有很重要的地位。

2. 工程材料力学性能研究的对象

一般说来,力学性能研究主要包括两个方面:一是建立适当的模型和给出定量的处理方法;二是借助微观分析,探讨材料力学性能的实质,以便能动地改造和提高材料的力学性能。所以,工程材料的力学性能应涉及的内容有:

(1) 工程材料在各种服役条件下的失效现象及微观机理。

(2) 各种力学性能指标的物理概念、实用意义以及它们之间可能的相互联系。

(3) 影响工程材料力学性能的因素以及提高力学性能的方向和途径。

(4) 各种力学性能的测试方法。

不过,应当指出,作为材料科学与工程类各专业的一门公共技术基础课程,它不可能在微观机理方面作深入的讨论,有关内容将留给相应专业课程去解决。

3. 工程材料力学性能的分类

工程材料力学性能首先当然和材料的本质有关,但在服役条件下,自然还和它所处的工作条件有很密切的联系。所以,其基本分类是由其主要服役条件所确定的。

(1) 按服役的温度分为低温、常温和高温力学性能,其中在概念上更宜以所处温度与材料的熔点(或其类似特征温度)的相对值为高、低温的分界,这样对其机理分析更方便、更确切。

(2) 按加载速度分为静载和动载力学性能,加载速度既可按应力速率($(N/mm^2)/s$),也可按应变速率($1/s$)给出。以应变速率为例,通常可考虑以 $10^{-1}/s$ 作为大致的分界: $10^{-1}/s$ 以下为静载; $10^{-1}/s$ 以上为动载。在动载力学性能中还包括单次加载(如冲击)和循环加载(如疲劳)两大类。

(3) 按非腐蚀和腐蚀环境分为普通和环境介质作用下的力学性能。前者通常指在干燥空气介质下的力学性能;而在其他更有腐蚀性的介质下则均被视为后者(如应力腐蚀、腐蚀疲劳等)。由此可见,两者本质上只是腐蚀作用轻重不同而已。不过,从实际应用的意义上说,考虑环境介质作用下的力学行为显然更接近于真实的服役状态,而且在许多情况下,介质的作用已构成材料力学性能的控制性因素。

(4) 材料在不同应力状态(或加载方式)下常常有不同的力学性能响应。这是因为,在不同加载方式中,受载物体的任何一点处的应力总可以分解为切应力 τ 和正应力 σ 两部分。一般切应力引起塑性变形,使材料发生韧性断裂;而正应力通常引起弹性变形,最终容易导致脆性断裂。所以,从宏观上说,至少可以利用不同应力状态中的最大切应力 τ_{\max} 与最大正应力 σ_{\max} 的比值来判断材料在所受加载方式下更趋向于哪种变形和断裂。按材料力学所给出的第二强度理论, $\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$; 按第三强度理论, $\sigma_{\max} = \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)$ 。式中: σ_1, σ_2 和 σ_3 是按大小顺序排列的三个主应力; ν 是泊松比。令 $\alpha = \tau_{\max}/\sigma_{\max}$ 为应力状态的软性系数,当 $\nu = 0.25$ 时,有 $\alpha = (\sigma_1 - \sigma_3)/[2\sigma_1 - 0.5(\sigma_2 + \sigma_3)]$ 。举例来说,单向拉伸加载时, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 则 $\sigma_{\max} = \sigma_1, \tau_{\max} = \frac{1}{2}\sigma_1$, 所以 $\alpha = 0.5$ 。显然 α 越大, τ_{\max} 越大,表示应力状态越“软”,越容易产生塑性变形和韧性断裂。反之, α 值越小,表示应力状态越“硬”,越容易产生脆性断裂。表 0.1 给出了常见的几种典型加载方式(应力状态)的软性系数值。由表中数据可见,三向不等拉伸和三向不等压缩是两种很极端的状态,而单向拉伸比较适中,这正是它在工程材料的力学试验研究中应用最广的原因。

表 0.1 不同加载方式的应力状态软性系数

加载方式	主 应 力			软性系数 α
	σ_1	σ_2	σ_3	
三向不等拉伸	σ	$(8/9)\sigma$	$(8/9)\sigma$	0.1
单向拉伸	σ	0	0	0.5
扭转	σ	0	$-\sigma$	0.8
二向等压缩	0	$-\sigma$	$-\sigma$	1
单向压缩	0	0	$-\sigma$	2
三向不等压缩	$-\sigma$	$(-1/3)\sigma$	$(-1/3)\sigma$	4

由上述分析可见,的确有必要给出材料在相应应力状态下的力学性能,以满足各种实际受力状态的需要。在这方面不仅包括通常所指的拉伸、压缩、弯曲及扭转等加载方式的变化,而且还包括零件上存在缺口或裂纹所引起的应力状态的急剧改变,从而有必要去研究这些相关条件下的力学性能。譬如从 20 世纪 50 年代以来,对受载裂纹体的研究推出了断裂力学和随之发展的材料抗裂的断裂韧性,以及这类分析在材料疲劳裂纹扩展特性中的应用等,这些都是工程材料力学性能中最重要的进展。

4. 力学性能与材料科学的发展

以工程结构材料为例,早期是以低碳钢为代表的。这是因为它塑性好,强度低,在断裂前通常有明显变形,容易确保结构的安全。因此,它在一般机械工业中得到了广泛的应用。然而在力学性能的研究上,当时也只限于常温下的几种常规静载和动载性能。但是,随着工程结构设计上要求高效、紧凑,特别是像航空航天等高技术的发展,使高强度材料和高耐热材料得到迅速发展和应用。因前者的有限塑性而引入的脆断失效,促使前述的断裂力学以及材料断裂韧性和裂纹扩展特性的研究,这种力学性能的研究又反过来推动了人们对高强材料的认识,并指出了它应有的发展方向;后者则推动了高温力学性能(诸如蠕变和持久强度)的研究,其中特别是与高温部件服役条件更接近的力学性能——蠕变—疲劳的交互作用愈来愈受到人们更大

的关注。当然,在所有这些观察与研究中,大量的实验经验表明,环境介质在多数情况下都是一个影响材料力学性能的重要因素。所以,随着研究的深入,抗蚀力学性能和抗蚀材料同时得到了长足的发展。

长期以来,由于工程材料特别是金属结构用材料在多数情况下均为多晶体,在宏观上可视为均质的各向同性体,所以有关力学性能的研究也主要限于这种类型。它以金属为主,包括陶瓷以及少数用于结构的高分子材料。随着现代技术,特别是航空航天和海洋工程技术的发展,要求材料兼具高强度、高刚度、高韧度和低密度等更好的综合性能,而且还要求能经受住各种极端环境的考验。显然,不论是金属、陶瓷或高聚物等单一材料都是无法满足这种要求的,于是人们寄希望于两种或两种以上材料的复合。目前,作为结构用复合材料中最典型的有以聚酯或环氧树脂为基体的玻璃纤维增强材料和以环氧树脂为基体的碳纤维增强材料两大类。它们的问世,使力学性能也进入了一个新的领域,即由均质各向同性向各向异性过渡。基于这方面的原因,本书对这两类材料的力学行为是分别加以阐述的。

第一篇 金属的力学性能

金属作为宏观上均匀、各向同性的结构材料,其应用历史最悠久,因而对其力学行为和试验方法的研究也较为深入和完善,并成为对其他工程材料进行同类研究的主要借鉴。所以,本篇以结构用金属材料为主,兼顾陶瓷和高分子材料,讨论它们在各种加载方式和环境(即服役条件)作用下变形和断裂的物理实质、失效方式、抗力指标及主要影响因素。

第一章 静拉伸下的力学性能

正如绪论中指出,由于单轴拉伸应力状态的软性系数($\alpha = 0.5$)适中,所以只要材料固有的塑性较好,强度不是太高,利用这种试验方法就能够较全面地显示材料的力学响应,即既能显示弹性变形,又能充分显示塑性和最后断裂,因而相应可标定出一系列对应的基本力学性能(强度和塑性)指标,为结构部件的设计、选材以及制定材料的合理加工工艺提供必要的性能数据。因此,单轴拉伸是工程材料力学性能中最基本的试验方法。正因为它能全面地显示材料的力学响应,所以在这一章中将就材料的弹性变形、塑性变形和断裂进行较多的阐述和分析,作为材料在其他载荷和环境条件下的力学响应分析的一个初步基础。

应当指出,在不特别指明的情况下,静拉伸力学性能通常是指在室温、应变速率 $\leq 10^{-1}/s$ 和非腐蚀(一般指干燥空气)环境中试验得到的力学性能。

§ 1.1 拉伸曲线和应力—应变曲线

1.1.1 拉伸试样

拉伸试验一般采用圆形试样或板状试样* (见图 1.1),其比例试样的原始标距为 l_0 。对板状试样:长形试样 $l_0 = 11.3 \sqrt{S_0}$;矩形试样 $l_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$, S_0 为试样原始截面积。对圆形试样:长形试样 $l_0 = 10d_0$;矩形试样 $l_0 = 5d_0$, d_0 为试样原始直径。

1.1.2 拉伸曲线和应力—应变曲线

拉伸试验通常是在应变速率 $\leq 10^{-1}/s$ 的情况下进行的,由于这种应变速率较低,所以俗称静拉伸试验。

拉伸试验机通常带有自动记录或绘图装置,可将作用在试样上的力 F 和所引起的伸长 Δl 自动记录绘出力—伸长曲线,称之为拉伸图或拉伸曲线。退火低碳钢的典型拉伸曲线示于图 1.2(a),力除以试样的原始截面积即得工程应力 σ , $\sigma = F/S_0$;伸长量除以原始标距长度即

* 有关拉伸乃至其他材料力学试验所用试样的详细要求可参阅本教材附录 A3 中列出的相应试验标准。

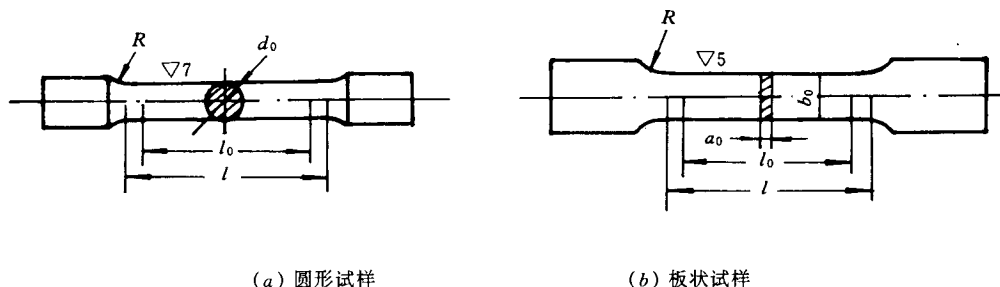


图 1.1 常用的拉伸试样

得工程应变 ϵ , $\epsilon = \Delta l / l_0$ 。图 1.2(b) 表示工程应力—应变曲线, 简称应力—应变曲线。比较图 1.2(a) 和图 1.2(b), 可以看出, 两者具有相同或相似的形状, 但坐标刻度不同, 意义不同。

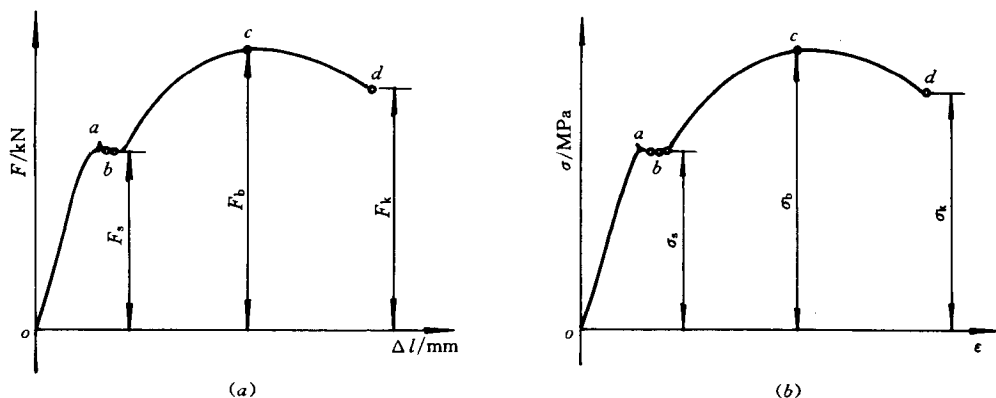


图 1.2 低碳钢的拉伸图(a)和应力—应变曲线(b)

从图 1.2 可见, 试样在拉伸过程中可分为四个阶段:

(1) 弹性变形阶段: 曲线的起始部分, 图中的 oa 段。多数是直线形式的, 符合虎克定律。
 (2) 屈服阶段: 超出弹性变形范围之后, 有的材料在塑性变形的初期产生明显的塑性流动。这时, 在力不增加或增加很小或略有降低的情况下, 继续产生变形, 拉伸图上出现平台或锯齿, 见图中的 ab 段。

(3) 均匀变形阶段: 屈服后, 欲继续变形, 必须不断增加载荷, 此阶段的变形是均匀的。这种随塑性变形增大, 变形抗力不断增加的现象叫形变硬化。当曲线达到最高点 c 时, 均匀变形阶段结束。

(4) 局部变形阶段: 从试样承受最大应力的点 c 开始直到断裂点 d 为止。随着变形增大, 载荷下降, 产生大量不均匀变形, 且集中在颈缩处, 最后载荷达到 F_k 时, 试样断裂。不过, 应该注意到退火低碳钢作为一种高塑性金属材料, 在这一阶段尽管外观上出现了显著的局部变形, 但此时本质上是内部已开始出现孔洞以及它们的长大和聚合, 从而走向断裂。所以, 这一阶段是断裂的准备阶段, 将在本章的后续部分讨论。

在金属、陶瓷及高聚物材料中, 拉伸条件下的应力—应变曲线大致有五种类型(见图 1.3):

(1) 纯弹性型(见图 1.3(a)): 有这种 $\sigma - \epsilon$ 曲线的材料主要是大多数玻璃、陶瓷、岩石、横

向交联很好的聚合物以及一些低温下的金属。

(2) 弹性—均匀塑性型(见图 1.3(b)):有这种 $\sigma - \epsilon$ 曲线的材料主要是许多金属及合金、部分陶瓷和非晶态高聚物。应该指出,把部分非晶态高聚物归入此类只是按应力—应变曲线

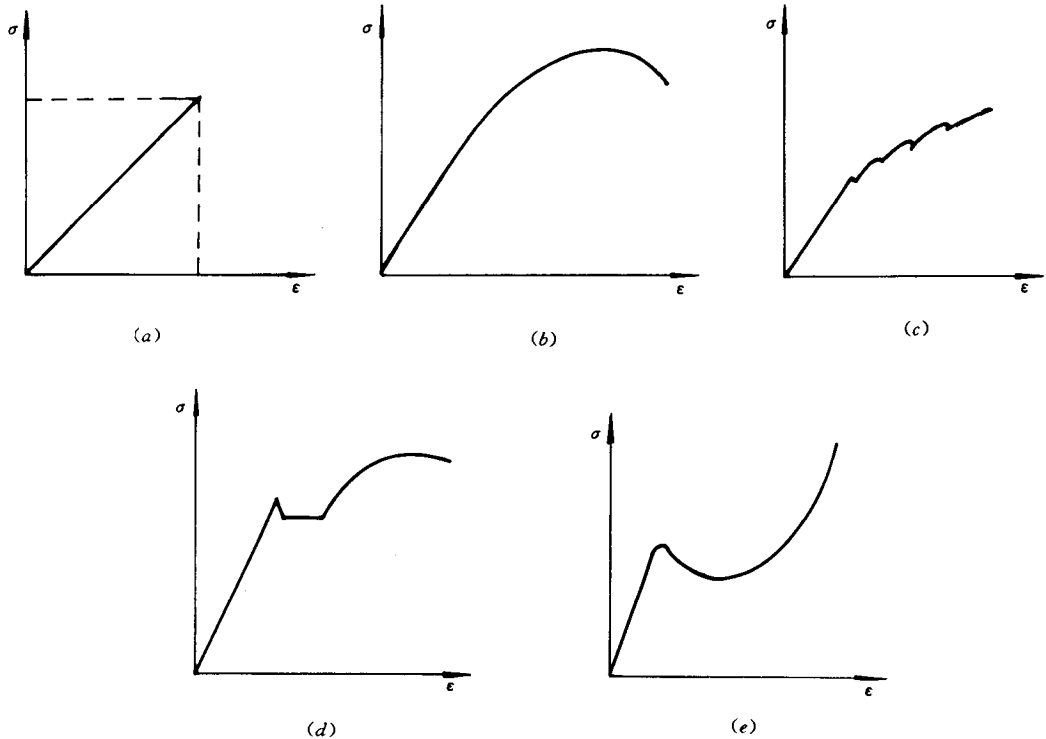


图 1.3 五种类型的标称应力—标称应变曲线

的形式划分的。对于高聚物,尽管表现弹性变形和塑性变形与金属有相仿的 $\sigma - \epsilon$ 曲线形式,但在变形本质上是有一定区别的。

(3) 弹性—不均匀塑性型(见图 1.3(c)):有这种 $\sigma - \epsilon$ 曲线的材料主要是低温和高应变速率下的面心立方金属,其塑性变形常常不是通过滑移而是孪生。当孪生应变速率超过试验机夹头运动速度时,负荷会突然松弛而呈现记录到的锯齿形 $\sigma - \epsilon$ 曲线。某些含碳原子的体心立方铁合金以及铝合金低溶质固溶体也有类似的 $\sigma - \epsilon$ 曲线。

(4) 弹性—不均匀塑性—均匀塑性型(见图 1.3(d)):有这种 $\sigma - \epsilon$ 曲线的材料主要是一些体心立方的铁基合金和若干有色合金。它与图 1.1(b)的不同仅在于中间增加了一段不均匀塑性屈服区(应变值大致为 1%~3%)。

(5) 弹性—不均匀塑性—均匀塑性型(见图 1.3(e)):有这类 $\sigma - \epsilon$ 曲线的材料主要是一些结晶态高聚物和未经拉伸的线形非晶态高聚物。受拉结晶高聚物出现这种情况是因为有两个因素相互制约的结果。开始变形时,结晶高聚物中原有的结晶结构被破坏,随之发生细颈*屈服,从而载荷下降,继续增加应变可促使变形最剧烈的区域重新组合成新的、方向性好和强

* 这里的细颈与金属材料中的颈缩在形式上相似,但实质上有所区别,所以暂用不同术语加以区别。

度高的结晶结构。随着这种新结构的增多,应力—应变曲线再次上升,直至断裂。线形非晶态高聚物受拉伸在形式上呈现与此十分相似的 $\sigma - \epsilon$ 曲线,但细颈的发生是由于线形大分子链段的取向而不是结晶结构的变化。

应当指出,上述应力—应变曲线只是在弹性及小塑性变形范围内才近似真实地反映了材料对外加负荷的响应,而其不真实性随塑性变形量的增大而增大,一旦由宏观均匀塑性变形过渡到局部集中塑性变形(如在金属材料中的颈缩和高聚物中的细颈)现象后,则尤其不真实了。所以,用真应力—真应变曲线($\sigma_{\text{真}} - \epsilon_{\text{真}}$)来表征材料对外力的响应才更加合理。

从应力上说,真应力 $\sigma_{\text{真}}$ 要用真实瞬间截面积 S 除相应的载荷 F , 即

$$\sigma_{\text{真}} = F/S \quad (1.1)$$

而 $\epsilon_{\text{真}}$ 则应为各瞬时应变的总和, 即

$$\epsilon_{\text{真}} = \sum \left(\frac{l_1 - l_0}{l_0} + \frac{l_2 - l_1}{l_1} + \dots \right) = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1.2)$$

由真应力 $\sigma_{\text{真}}$ 和真应变 $\epsilon_{\text{真}}$ 表示的应力—应变曲线则称为真应力—真应变曲线($\sigma_{\text{真}} - \epsilon_{\text{真}}$) (见图 1.4)。所以,相对而言, $\sigma - \epsilon$ 曲线则为一种标称(条件)的应力—应变曲线。不过,在小应变范围内(如 $\epsilon_{\text{真}} \leq 0.1$), 二者的区别很小,可以混用。只有在试样标距长度的某处出现颈缩,承力达到最大值以后的局部集中变形阶段,真应力 $\sigma_{\text{真}}$ 和标称(条件)应力 σ 的差别才明显变大。

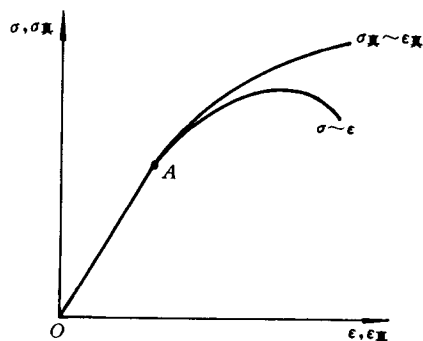


图 1.4 真应力—真应变曲线

§ 1.2 弹性变形、Hooke 定律和弹性模量

任何材料在外力作用下,开始总会有弹性变形,而且绝大多数工程构件在正常服役条件下也都处于弹性状态。所以,材料的弹性行为对工程构件的服役性能有重要影响。

材料的弹性变形一般是原子系统在外力作用下离开平衡位置达到新的平衡状态的过程,所以要了解弹性变形的规律,有必要从原子模型入手;另外,由于工程结构和零件实际上或多或少是在二向或三向受力状态下工作的,其弹性变形还必需服从广义 Hooke 定律和受诸多弹性常数(除弹性模量外,还有泊松比、体积模量等)所制约。这些就是本节要讨论的主要问题。

1.2.1 弹性变形的 Hooke 定律和双原子模型

Hooke 最早研究了金属的弹性变形规律,通过试验他得到以下的比例关系:

$$l - l_0 = \text{常数} \cdot l_0 F / S_0$$

式中: l 是试样在负荷 F 作用下的长度; l_0 和 S_0 分别为试样的原始长度和截面积。改写上式有

$$\begin{aligned} F/S_0 &= \text{常数} \cdot (l - l_0)/l_0 \\ \sigma &= E\epsilon \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中的比例因子 E 就叫做单轴拉伸下的弹性模量。它表征应力随应变增长的强度,即图 1.4