



普通高等院校“十三五”规划教材

现代力学测试 原理与方法

邹广平 张学义 主 编
薛启超 芦 颀 副主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

现代力学测试原理与方法

邹广平 张学义 主 编
薛启超 芦 颀 副主编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书在参考其他高校力学教材的同时,重点挖掘自身设备的优势,开展新型实验,给出很多实验中心的最新设备和实验室近些年所研究的成果,主要有材料力学性能测定、现代光学测试技术、无损检测技术、实验设备介绍等内容。

本书主要供工程力学、机械、结构及相关专业高年级本科生或研究生使用,也可以作为相关课程的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

现代力学测试原理与方法 / 邹广平, 张学义主编.

—北京:国防工业出版社,2015.9

ISBN 978-7-118-10096-9

I. ①现… II. ①邹… ②张… III. ①材料力学—
实验 IV. ①TB301-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 222185 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10½ 字数 236 千字

2015 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

解析法、实验法和计算机数值模拟法是解决工程实际问题的三种不同的途径,它们之间相互促进、相互补充而又各自保持着自己的特点。理论分析必须以实验现象为基础,同样,实验设计必须以理论分析为指导。实验以其可靠性、真实性,在建立力学模型和验证理论及数值计算结果的正确性方面起着根本性的作用。实验在解决复杂的工程实际问题中以其更直接、方便的特性及所得结果的可靠性在工程中得到了广泛的应用。实验也是探索新现象、发展新概念的源泉。

作为现代工程技术的主要基础学科之一,力学在航空航天技术、导弹和卫星技术、桥梁和结构工程、水利工程、运输工程等重大工程技术领域发挥着重要作用,解决了一系列关键技术问题。在现代化城市中,拔地而起的摩天大楼、延绵不断的高架大桥和密密麻麻的地铁隧道都离不开材料力学、结构力学和板壳力学的结构强度和稳定性分析。

现代工程技术离不开力学,更离不开力学实验。现代力学实验技术就是介绍光测技术、电测技术,动态测试技术等的应用,提供研究固体结构材料非线性的静、动态响应等的方法与原理。本书共分为六章:第一章为绪论,主要阐述这门课程的意义、学习要求以及注意事项;第二章为材料力学性能测定实验,主要介绍材料的疲劳、断裂和抗冲击性能测试;第三章为现代光测实验,包括光纤应变测量、现代光弹技术、激光全息测量、电子散斑测量、云纹法测试实验和数字相关技术等现代光测技术;第四章为无损检测实验,包括声发射技术、磁粉探伤技术、超声波技术等无损探伤手段;第五章为本书所涉及的实验原理和相关知识;第六章为本书所涉及的仪器设备介绍和仪器使用方法。本书包含了很多实验中心的最新设备和结合近年的研究成果开发的特色实验项目。

本书由邹广平和张学义担任主编,薛启超和芦颀担任副主编,夏培秀、唱忠良和吴国辉等参加编写。本书主要供工程力学、机械、结构及相关专业高年级本科生或研究生使用,也可以作为相关课程的参考教材。

编 者
2015 年 8 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课程简介	1
1.2 现代力学实验技术内容	1
1.3 现代力学实验技术教学内容	1
1.4 课堂注意事项	2
1.5 课程要求	2
第二章 实验基本原理及相关知识	3
2.1 金属单向拉伸力学性能	3
2.1.1 金属单向拉伸应力—应变曲线	3
2.1.2 金属单向拉伸的力学性能指标	4
2.1.3 脆性材料的拉伸性能	6
2.2 金属扭转性能	7
2.2.1 等截面直圆柱试件在扭矩作用下的应力和应变	7
2.2.2 扭矩——扭角图和金属扭转性能指标	8
2.3 金属材料的抗弯强度	9
2.3.1 弯曲实验	9
2.3.2 脆性材料的抗弯强度	9
2.4 金属单向压缩的力学性能	10
2.5 复合材料的静态力学性能	10
2.5.1 单向复合材料的弹性性能	11
2.5.2 单向复合材料的偏轴应力—应变关系	14
2.5.3 平面应力下单向复合材料的强度和破坏准则	16
2.5.4 单向连续纤维增强复合材料力学性能的细观分析	19
2.5.5 单向复合材料的强度	23
2.6 变动载荷(应力)和疲劳破坏的特性	26
2.6.1 变动载荷(应力)及其描述参量	26
2.6.2 疲劳破坏特征和断口	27
2.6.3 低周疲劳	28

2.6.4	滞后曲线	28
2.6.5	循环硬化与循环软化	29
2.6.6	循环应力—应变曲线	30
2.6.7	应变—寿命曲线	31
2.7	高周疲劳	33
2.7.1	$S-N$ 曲线和疲劳极限	33
2.7.2	循环应力特性对 $S-N$ 曲线的影响	38
2.7.3	表面几何因素对高周疲劳特性的影响	39
2.7.4	应力变动和累计损伤	41
第三章	材料力学性能测定实验	42
3.1	复合材料拉伸	42
3.2	断裂韧性测定	43
3.3	低周疲劳实验	46
3.4	示波冲击原理及实验	47
3.5	材料动态性能测试	50
3.5.1	金属材料波速测量	50
3.5.2	材料动态力学性能测试	52
第四章	现代光测实验	55
4.1	光纤测应变实验	55
4.2	激光全息干涉实验	56
4.3	散斑干涉测面内位移实验	57
4.4	云纹干涉测材料弹性常数	59
4.5	剪切电子散斑干涉实验	61
第五章	无损检测实验	64
5.1	低碳钢试件拉伸时的声发射信号测试	64
5.2	构件表面裂纹的磁粉检测	65
5.3	超声波测厚	68
第六章	实验基本原理及相关知识	72
6.1	复合材料力学性能简介	72
6.1.1	玻璃纤维增强塑料压缩性能实验方法	72
6.1.2	玻璃纤维增强塑料弯曲性能实验方法	73
6.1.3	玻璃纤维增强塑料层间剪切强度实验方法	74

6.2	平面应变下 CT 试样的动态断裂韧性测研究	75
6.2.1	基于弹簧质量的模型紧凑拉伸试样动态应力强度因子求解	76
6.2.2	基于 CT 试样的动态断裂韧性测试的 SHPB 实验装置改造	77
6.2.3	利用转换夹具的静态断裂韧性 K_{IC} 的测试	77
6.2.4	动态断裂韧性测试	79
6.2.5	结论	82
6.3	高周疲劳与低周疲劳	82
6.3.1	材料的疲劳	82
6.3.2	低周疲劳实验方法介绍	83
6.3.3	电液伺服疲劳实验机原理	84
6.3.4	Instron FastTrack™8800 电液伺服疲劳实验机	85
6.4	SHPB 实验装置原理	85
6.5	利用光纤测量应变的原理	88
6.5.1	布拉格光栅光纤传感器原理	88
6.5.2	光纤布拉格光栅传感器温度补偿基本原理	89
6.6	现代光测技术原理	90
6.6.1	概述	90
6.6.2	光弹性方法简介	91
6.6.3	全息光弹和全息干涉测试技术	92
6.6.4	电子散斑干涉原理	96
6.6.5	云纹法测试原理	107
6.6.6	数字图像相关技术	110
6.7	声发射检测技术原理	114
6.7.1	声发射检测技术原理	114
6.7.2	声发射信号特性参数	115
6.7.3	缺陷(声发射源)位置的确定	117
6.8	磁粉检测技术测试原理	122
6.8.1	磁粉检测技术简介	122
6.8.2	铁磁性材料的磁性及磁化	124
6.8.3	磁粉检测材料	129
6.8.4	磁粉检测工艺	130
6.9	超声波检测技术原理	132
6.9.1	概述	132
6.9.2	超声波的分类	134
6.9.3	超声场及介质的声参量	136
6.9.4	超声波检测方法分类	140

第七章 实验设备介绍	144
7.1 电子万能实验机	144
7.1.1 Instron5500 电子万能材料实验机	144
7.1.2 WDW3100 微控电子万能实验机	145
7.2 疲劳实验机	151
7.2.1 PLG-200C 高频疲劳实验机	151
7.2.2 Instron 8801 电液伺服疲劳实验机	151
7.3 PKP450 示波冲击实验机	152
7.4 SHPB 实验装置	153
7.4.1 CS-1D 超动态电阻应变仪设备简介	153
7.4.2 波形存储器	154
7.5 TFBGD-9000 光纤光栅解调仪	155
参考文献	159

第一章 绪 论

1.1 课程简介

现代力学实验技术是固体力学和工程力学专业教学中的一个重要环节,是学生必须掌握的重要实践课程。本课程通过实验来加强学生对断裂力学、复合材料力学和实验力学等基本理论、基本概念和研究方法的理解和掌握,培养学生用实验的手段发现问题、分析问题和解决问题的能力,提高学生的实验技能和工作实践能力。

1.2 现代力学实验技术内容

在实验力学理论建立的过程中,要求研究材料的本构关系,并确定相关的材料参数。此外,还需要确定材料的其他力学性能参数。精确地测量上述力学参数,可对构件进行准确、可靠的力学分析和计算,从而正确做出力学预测和判断。

实验力学不是纯粹由严谨的逻辑推理建立起来的理论学科。在实验力学的研究中,引进了许多假设与简化,例如:材料的连续性、均匀性及各向同性;构件的小变形条件;材料弹性范围的线性关系;实验力学中为简化变形几何关系而引入的平面假设等。虽然这些假设简化了实验力学的理论,但是由这些假设推导出的材料力学理论的有效性、精确程度、应用范围如何呢?最简单易行的办法就是通过实验进行验证。从思维逻辑和理论的完整性来说,这样的验证对于实验力学这门实践性较强的学科是不可缺少的。

实验力学的实验研究也是力学研究,是解决实际问题极为重要的方法和手段。对于很多重要的工程构件或结构,由于数学方法上的困难,仅靠理论分析难于求得理论解析解。实验力学的实验研究正是求解这些较为复杂问题的有效而又可靠的方法。对于重要的实际问题,实验测试研究是不可缺少的,它可以与理论解、数值解相互佐证。力学实验与现代计算机相结合,还可以发展新理论、设计新型结构,为研制新材料提供充分、可靠的依据,有效地解决许多理论上尚不能解决的工程难题。

实验力学涉及力学、误差理论、电学、光学和金属学等多学科的知识,本书简要介绍了实验力学相关的测试原理和方法,以及实验仪器和设备,同时给出一定数量的基本实验和若干选择实验。

1.3 现代力学实验技术教学内容

本课程采用两种教学方式,即课堂授课和开放实验教学。本课程是一门理论和实验相结合的课程,主要学习现代实验力学领域的常规测试方法,内容包括材料的强度、冲击、断裂与疲劳的性能实验表征方法和技术,现代光测技术、光纤测量技术和无损检测技

术。学生通过理论学习,自主学习和设计并完成相应实验项目,可以全面了解以上常规测量技术,并为后续课题设计中涉及的实验研究奠定基础。

实验内容包括:

- (1) 复合材料拉伸实验;
- (2) 断裂韧性测定实验;
- (3) 低周疲劳实验;
- (4) 示波冲击实验;
- (5) 光纤测应变实验;
- (6) 云纹法实验;
- (7) 数字相关技术应用实验;
- (8) 无损检测实验。

1.4 课堂注意事项

现代力学实验技术所用的仪器设备多数属于大型仪器,为了保持良好的教学秩序,达到预期的教学目的,保护国家财产,避免实验事故发生,使学生养成科学严谨的工作作风,参加实验的学生必须遵守下述规则。

(1) 学生进入实验室之前要参加安全教育和培训,经院系、实验室培训考核后方可进入实验室工作。学生进入实验室必须遵守学校及实验室的各项规章制度和仪器设备的操作规程,做好安全防护。在实验室发生事故时要立即处置,及时上报。

(2) 实验课前必须认真预习,清楚实验的目的和内容,通过实验要测取哪些数据,初步了解掌握所用仪器和设备。

(3) 准时进入实验室,按照要求认真进行实验,未经指导教师同意,不得擅自动用与本次课程无关的设备。实验结果经指导教师审阅,签名后可以结束实验。实验结束时关闭电源,整理、清点实验物品,经指导教师同意方可离开实验室。

(4) 课后按时完成、上交实验报告。

1.5 课程要求

(1) 学生应在课堂授课和开放实验教学过程中提前进行预习。要认真阅读实验教材,积极参考网上实验学习辅导,必要时主动查阅相关资料,明确实验目的和要求,理解实验原理,掌握测量方案,初步了解仪器的构造原理和使用方法,在此基础上写好预习报告。

(2) 学生做实验之前需要熟悉仪器的使用方法,未经培训不可擅自动用仪器,以免发生危险。同时需要认真学习现代实验力学领域的常规测试方法,内容包括材料的强度、刚度、冲击、断裂与疲劳的性能实验表征方法和技术,现代光测技术、光纤测量技术和无损检测技术。积极发挥动手能力,切身体验实验中的实验原理和实验方法。

(3) 完成实验报告时不可照本宣科,每进行一次实验内容时都需要将实验内容进行扩展阅读,分析并查阅相应的文献。了解相关实验的背景和进程情况,对自己的实验结果进行更多的比对,分析误差原因,总结经验,以待提高。

第二章 实验基本原理及相关知识

材料的力学性能是指材料在不同环境(温度、介质、湿度)下,承受各种外加载荷(拉伸、压缩、弯曲、扭转、冲击、交变应力等)时所表现出的力学特征。本节主要介绍金属材料和复合材料的力学表征方法。

2.1 金属单向拉伸力学性能

金属单向拉伸实验可以测定材料的弹性、塑性、强度和韧性等许多重要的力学性能指标。在工程应用中,拉伸性能是结构静强度设计的重要指标。

一般情形下,单向拉伸实验是在室温下采用光滑标准试件,在缓慢施加的单向拉伸载荷作用下进行的。固体材料在受力之后就要产生变形,从开始变形到断裂,大部分金属要经历四个变形阶段,即弹性变形阶段(图 2.1 中 OC 段)、屈服变形阶段(图 2.1 中 CDH 段)、均匀塑性变形阶段(图 2.1 中 HG 段)、不均匀塑性变形阶段(图 2.1 中 GF 段),直至最后断裂。

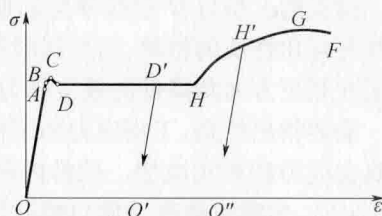


图 2.1 单向拉伸时的应力—应变曲线

根据材料在拉伸断裂前是否发生明显的塑性变形,可将材料分为脆性材料和塑性材料两大类。有些材料弹性阶段比较明显,而塑性阶段不明显,在弹性阶段后紧跟着就发生断裂,这类材料称为脆性材料。脆性材料是在拉伸断裂前不产生明显塑性变形的材料。拉伸断裂前有相当大的伸长并发生塑性变形的材料称为塑性材料或延性材料,大部分金属属于这类材料。这里所谓弹性变形,是指当试件除去外力后能立即恢复原状的变形,弹性变形是可逆的,而塑性变形则是指外力除去后不能消失而残留下来的那部分变形。

2.1.1 金属单向拉伸应力—应变曲线

图 2.1 所示为一个韧性较好的金属试件单向拉伸时的应力—应变曲线。图中工程应力 $\sigma = P/A_0$, 其中 P 为外载荷, A_0 为试件初始截面积; 工程应变 $\varepsilon = \Delta l/l_0$, 其中 l_0 为试件初始长度, Δl 为试件拉断后的伸长长度。

OA 段: 比例变形阶段, 在此阶段中, 应力和应变之间是线性关系, 即

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

式中: E 为材料的弹性模量。 A 点对应的应力称为比例极限。

AB 段: 由 A 点到 B 点, 虽然应力和应变之间已不满足线性关系, 但变形仍是弹性的, B 点对应的应力 σ_e 称为弹性极限。

CD 段: C 点和 D 点的应力分别称为上屈服极限和下屈服极限。应力到达 C 点时, 材料开始屈服。由于上屈服极限易受外界因素影响, 因而一般采用下屈服极限, 并记为 σ_s 。

DH 段:塑性流动阶段。在此阶段中,应力没有增加,应变却不断地增加。

HG 段:强化阶段。由 H 点开始,只有在应力增加时,试件内的应变才会增加。如果在 DH 阶段和 HG 阶段卸载,则卸载线($D'O'$ 、 $H'O''$)都平行于 AO ,卸载后试件不能完全恢复原状,而是有残余变形 OO' 和 OO'' 。如果由 O'' 点开始再加载,则加载沿 $O''H'$ 进行,直到 H' 点后材料才再次屈服。这种材料在外力作用下产生塑性变形,卸载后再加载,屈服应力有所提高的现象称为材料的强化现象,提高的屈服应力称为后继屈服应力或加载应力。在 HG 段,试件处于均匀的应变状态,到达 G 点后,试件开始出现颈缩现象。 G 点对应的工程应力达到极大值 σ_b ,称为抗拉强度(或强度极限)。

GF 段:不均匀塑性变形阶段。从 G 点再继续拉伸,变形将集中在颈缩区。颈缩区的截面积逐渐缩小,试件很快在颈缩区被拉断。试件被拉断之前,往往产生较大的塑性变形。

图 2.2 所示为材料的包辛格效应。图中,自 O'' 点起继续卸载(即压缩或反向加载)时,反向加载时的屈服点应力 σ''_s 不但比 σ'_s 小,而且还比初始屈服极限 σ_s 小。这里的 σ''_s 是自 O'' 点拉伸至屈服时的屈服极限。这种具有强化性质的材料,当其屈服极限在一个方向上提高而在相反方向却降低的效应称为包辛格效应。

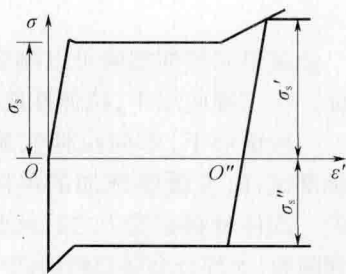


图 2.2 包辛格效应

需要指出的是,工程应力和工程应变并不是试件内的真实应力和真实应变。试件内的真应力 $\sigma_T = P/A = \sigma(1 + \varepsilon)$,为瞬时载荷 P 除以瞬时试件的实际截面积 A ,考虑到均匀塑性变形阶段,体积不可压缩假设,则有

$$\sigma_T = P/A = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.2)$$

设试件瞬时长为 L ,并增至 $L + dL$,则真应变增量为 $d\varepsilon_T = \frac{dL}{L}$ 试件由 L_0 变化到 L 时,总应变量为

$$\varepsilon_T = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (2.3)$$

工程应变 ε 与真应变 ε_T 之间的关系为

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.4)$$

2.1.2 金属单向拉伸的力学性能指标

1. 弹性性能指标

弹性是指材料在外力作用下发生变形,如果外力不超过某个限度,在外力卸除后恢复原状的性能。

(1) 弹性模量(杨氏模量) E :是材料在弹性变形阶段内,应力和应变的比值, $E = \sigma/\varepsilon$ 。它相当于引起单位应变所需的应力,表征材料对弹性变形的抗力。弹性模量取决于原子本性、晶格类型和晶格常数。

金属材料的弹性模量是一个对组织成分的微量变化不敏感的指标。借助于合金化、冷加工、热处理等手段可使铁基合金的强度明显提高,但弹性模量却变化不大。

(2) 泊松比 ν : 在单向拉伸时, 材料沿载荷方向产生伸长变形的同时, 在垂直于载荷的方向会产生缩短变形。垂直方向上的应变 ε_1 与载荷方向上的应变 ε 之比的负值称为泊松比, 即

$$\nu = -\varepsilon_1 / \varepsilon \quad (2.5)$$

(3) 比例极限 σ_A : 是应力与应变成正比例关系的最大应力。

(4) 弹性极限 σ_e : 试件卸载后能恢复原状的最大应力称为弹性极限。

若在应力超出 σ_e 后卸载, 试件中将出现残余变形。

2. 强度

强度是物体在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的抗力。常用的指标有屈服强度(屈服极限) σ_s 、抗拉强度(强度极限) σ_b 和断裂强度 σ_f , 是决定材料能否正常使用的关键的力学参数。

(1) 屈服强度 σ_s : 材料开始出现塑性变形时的应力称为屈服极限, 它代表材料对起始塑性变形的抗力。

对于拉伸时出现屈服平台的材料, 由于下屈服点再现性较好, 故以下屈服应力作为材料的屈服极限。

许多金属在拉伸实验时观察不到明显的屈服点, 因而人为地规定当试件产生一定残余塑性变形量时的应力作为条件屈服极限或条件屈服强度。对于金属, 通常规定当试件发生 0.2% 的残余变形量时的应力为条件屈服强度, 并用 $\sigma_{0.2}$ 表示。对于一些不允许有微残余变形的机械零件, 要采用 $\sigma_{0.01}$ (甚至 $\sigma_{0.001}$) 作为条件屈服强度。

(2) 抗拉强度 σ_b : 材料在受力过程中, 从开始加载至断裂时止, 所能承受的最大工程应力值定义为抗拉强度。

(3) 断裂强度 σ_f : 拉伸断裂时的真应力称为断裂强度。实验时测出断裂点的载荷 P_f , 试件的最小截面积 A_f , 则断裂强度 σ_f 可表示为

$$\sigma_f = P_f / A_f \quad (2.6)$$

拉伸断裂时的真应变 ε_f 称为断裂真应变。

3. 塑性性能指标

金属的塑性: 载荷卸除后不能消失的变形称为残余变形, 材料保持残余变形的能力称为塑性。常用的塑性性能指标有延伸率 δ (或 δ_k) 和断面收缩率 ψ (或 ψ_k)。

(1) 延伸率: 它用试件拉断后的总伸长与原始长度之比的百分率来度量塑性的大小。设实验前测得试件的标距为 l_0 , 拉伸断裂后测得标距为 l_k , 则延伸率为

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{\Delta l_k}{l_0} \times 100\% \quad (2.7)$$

设颈缩开始前, 试件发生均匀伸长的伸长量为 Δl_b ; 颈缩开始后, 由颈缩区集中的塑性变形而引起的伸长量为 Δl_n , 则总伸长为 $\Delta l_l = \Delta l_b + \Delta l_n$ 。相应地, 延伸率也是均匀伸长量 δ_b 和局部集中伸长率 δ_n 之和, 即

$$\delta = \frac{\Delta l_b + \Delta l_n}{l_0} = \delta_b + \delta_n \quad (2.8)$$

δ 值的大小与试件尺寸有关, 为了便于比较, 试件必须标准化, 对于圆截面试件, δ_5 或 δ_{10} 表示试件的长度 l_0 为其直径 d_0 的 5 倍或 10 倍。同一种材料, δ_5 为 δ_{10} 的 1.2 ~ 1.5 倍。

对于不同材料,只有 δ_5 和 δ_5 比较,或 δ_{10} 和 δ_{10} 比较才是正确的。

(2) 断面收缩率:断面收缩率是试件拉断后,断口面积的缩减与原始截面积之比值的百分数,即

$$\psi = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \quad (2.9)$$

式中: A_0 为试件原始截面积; A 为试件拉断后断口处的最小面积。

一般来说,塑性材料的 δ 和 ψ 较大,而脆性材料的 δ 和 ψ 很小。

4. 弹性功和韧性

(1) 弹性功 W_e :它是指金属材料吸收变形功而不发生永久变形的能力,它标志在开始塑性变形前金属单位体积所吸收的最大弹性变形功。

弹性功可用拉伸应力—应变曲线中阴影线所示的面积来度量(图 2.3),即

$$W_e = \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e = \frac{\sigma_e^2}{2E} \quad (2.10)$$

(2) 韧性 U_l :弹性功单位体积材料在断裂前所吸收的能量,即外力使材料断裂所做的功,称为材料的韧性或韧度。一般情况下,它包含三部分能量,即弹性变形能、塑性变形能和断裂能,通常根据拉伸图的面积来计算,即

$$U_l = \int_{l_0}^{l_l} \frac{P}{A} \frac{dl}{l} = \int_0^{\varepsilon_l} \sigma_T d\varepsilon_T \quad (2.11)$$

对于高塑性材料, U_l 主要由塑性变形功和断裂功所组成,因此,金属的韧性是与强度和塑性相关的综合性的力学性能指标。要提高材料的韧性,应使材料的强度和塑性达到最佳的配合。

2.1.3 脆性材料的拉伸性能

脆性材料,如淬火高碳钢和一些处于低温下的金属材料,在拉伸断裂前只发生弹性变形,而无明显塑性变形,其拉伸应力—应变曲线如图 2.4 所示。

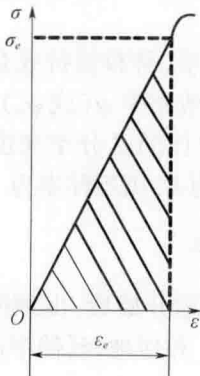


图 2.3 拉伸应力—应变曲线

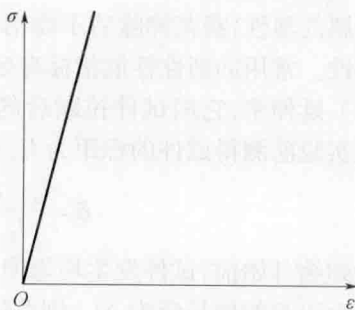


图 2.4 脆性材料的拉伸应力—应变曲线

在弹性变形阶段,应力—应变关系通常可以表示为

$$\sigma = E\varepsilon$$

表征脆性材料的力学性能参数有弹性模量 E 和脆性断裂强度 σ_f 。很多脆性材料的抗拉断裂强度较低,但抗压断裂强度高,因而在工程结构中可应用于承受压缩载荷的构件。

2.2 金属扭转性能

工程上许多机件在服役中承受扭转载荷作用,扭转载荷引起的应力状态与静拉伸不同,材料所表现的力学行为特点也不同,因此需要测定它们在扭转状态下的力学性能,如扭转比例极限、扭转屈服强度、抗扭强度以及剪切弹性模量 G 等。

等截面直圆柱受扭矩时,在横截面上无正应力,只有切应力作用。因此,常用扭转实验来测定材料在纯剪作用下的力学性质。

2.2.1 等截面直圆柱试件在扭矩作用下的应力和应变

在扭矩 M 作用下(图 2.5)扭转试件横截面内的应力、应变分布如图 2.6 所示。在横截面上无正应力,只有切应力作用。在弹性变形阶段,横截面上各点的切应力与半径方向垂直,其大小与该点距中心的距离成正比。根据材料力学的知识,圆柱横截面内任一点处的切应力为

$$\tau(\rho) = \frac{M_n \rho}{I_p} \quad (2.12)$$

式中: M_n 为圆柱截面上的扭矩,可用截面法及平衡条件从扭矩 M 求得; ρ 为该点至圆心的距离; I_p 为圆柱横截面的极惯性矩,对于实心圆柱, $I_p = \pi d_0^4/32$, d_0 为圆柱直径。

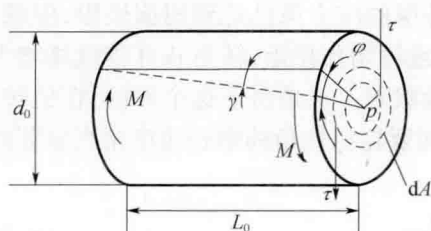


图 2.5 等截面直圆柱杆在扭矩 M 作用下的变形

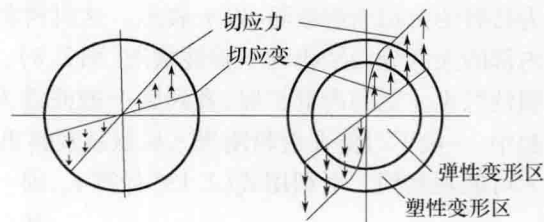


图 2.6 扭转试件中的应力与应变

由式(2.12)可知,中心处切应力为 0,表面处切应力最大,其值为

$$\tau(\rho) \Big|_{\rho=d_0/2} = M/W \quad (2.13)$$

式中: W 为截面抗扭模量,对于实心圆柱, $W = \pi d_0^3/16$ 。

当切应力不超过剪切比例极限时,切应力 τ 与切应变 γ 成正比,即 $\gamma = \tau/G$ 。因此,因切应力作用在圆柱表面产生的切应变为

$$\gamma(\rho) \Big|_{\rho=d_0/2} = \tan \alpha = \frac{\phi d_0}{2l_0} = \frac{M}{GW} \quad (2.14)$$

式中: α 为圆柱表面任一平行于轴线的直线因 M 的作用而转动的角度(图 2.5); ϕ 为扭转角; l_0 为圆柱的长度。

2.2.2 扭矩——扭角图和金属扭转性能指标

在扭转实验中,当扭矩 M 由零开始逐渐增大时,试件两端截面不断产生相对转动,使扭转角 ϕ 增大。逐次测出相应的 M 和扭转角 ϕ 的数值,可得到扭转时的 $M-\phi$ 关系曲线。低碳钢的扭矩—扭角图如图 2.7 所示,它和拉伸图一样,有弹性阶段、屈服阶段和强化阶段。

线弹性(OP)段:P点以下载荷与变形成正比,扭矩 M 和扭转角 ϕ 之间的关系可表示为

$$M = \frac{\pi d_0^4}{32 l_0} G \phi \quad (2.15)$$

根据扭矩—扭角图和式(2.13)、式(2.15)可确定材料的剪切模量 G 和扭转比例极限 τ_p ,即

$$\begin{cases} G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{32 l_0 M}{\pi d_0^4 \phi} \\ \tau_p = M_p / W \end{cases} \quad (2.16)$$

式中: M_p 为扭转曲线开始偏离直线(P点)时的扭矩。

PS段:由于受扭试件中的应力沿截面呈线性分布(图 2.6),因此,在扭转过程中,随着扭矩不断增大,材料的表面层最先进入屈服状态,这时表面剪应力所达到的数值就称为材料的抗扭屈服极限,以 τ 表示。这时材料最外层的应力虽已达到屈服极限,但截面内部的大部分区域仍处于弹性状态(图 2.8),只有继续增加扭矩,转角 ϕ 才能继续增大,塑性区也才能向内部扩展,直到整个截面进入塑性状态。正是由于这个原因,在扭转实验中,一般不可能在材料刚进入屈服就观察出来,而要在扭转角的增长速度相当显著时,才可能观察到。可利用式(2.13)计算 τ_s ,即

$$\tau_s = \frac{M_s}{W} = \frac{16 M_s}{\pi d_0^3} \quad (2.17)$$

式中: M_s 为当扭矩增加很慢而扭转角突然很快增加时所对应的扭矩值。

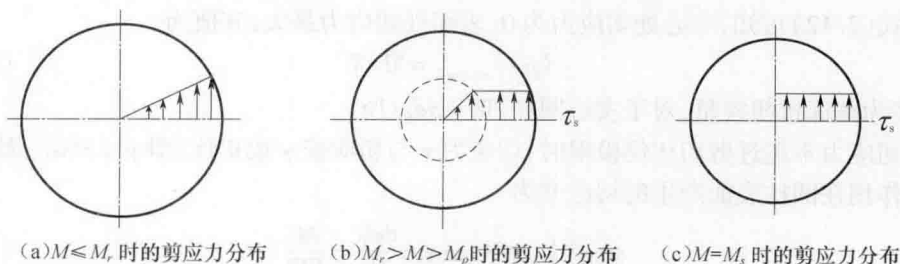


图 2.8 剪应力分布

如果扭矩—扭角图上没有明显的屈服点,可人为规定当试件表面残余扭转切应变达

到某一规定值时的扭转切应力为扭转屈服强度。通常这个规定值取为 0.3%, 相应的扭转屈服强度记作 $\tau_{0.3}$, 并由式 (2.13) 进行计算, 即

$$\tau_{0.3} = M_{0.3} / W \quad (2.18)$$

式中: $M_{0.3}$ 为残余扭转切应变为 0.3% 时的扭矩。

屈服阶段之后, 材料进入强化阶段, 扭矩又继续增加, 直到试件破坏为止。用 M_b 表示试件扭断前的最大扭矩, 利用式 (2.13) 来确定断裂时表面的名义抗扭强度 τ_b , 即

$$\tau_b = \frac{M_b}{W} = \frac{16M_b}{\pi d_0^3} \quad (2.19)$$

需要指出的是, τ_b 是按弹性公式计算的, 由于它没有塑性变形的影响, 因而不能代表试件扭断前的真实切应力。为了求得真实抗扭强度 t_k , 应考虑塑性变形的影响, 采用塑性状态下的公式来进行计算。

2.3 金属材料的抗弯强度

2.3.1 弯曲实验

一般采用静弯曲实验测定脆性材料的抗弯强度。弯曲实验通常采用矩形或圆柱形试件, 按其加载方式可分为三点弯曲 (集中载荷) 和四点弯曲 (二等值载荷) 两种, 如图 2.9 所示。

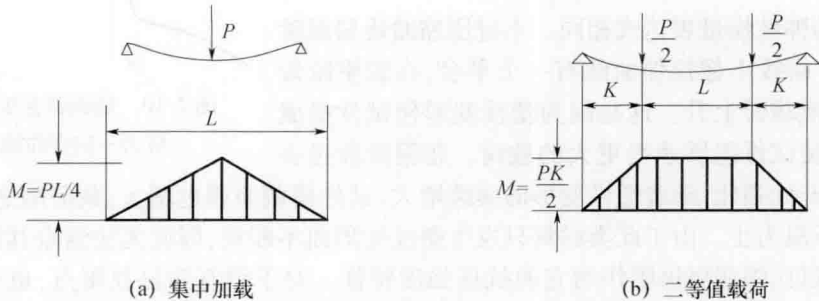


图 2.9 弯曲实验加载方式及弯矩图

四点弯曲时, 在两加载点之间弯矩相等, 断裂通常在该长度内具有组织缺陷之处发生。三点弯曲时, 断裂一般在集中载荷作用点处发生。

2.3.2 脆性材料的抗弯强度

根据材料力学的基本理论, 对于脆性材料, 其抗弯强度 σ_{bb} 可由下式确定

$$\sigma_{bb} = M_b / W \quad (2.20)$$

式中: M_b 为试件断裂时的弯矩, 可根据弯曲图上的最大载荷 P_b 按下式求得:

对于三点弯曲试件 (图 2.9(a)), 有

$$M_b = P_b L / 4$$

对于四点弯曲试件 (图 2.9(b)), 有

$$M_b = P_b K / 2$$