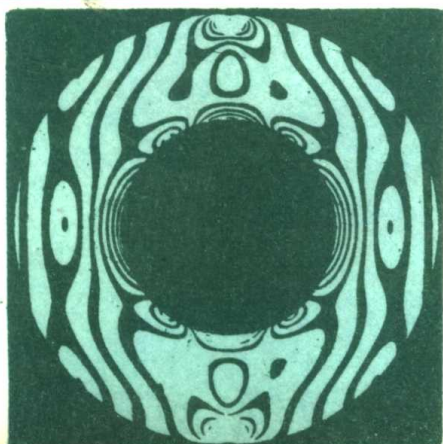
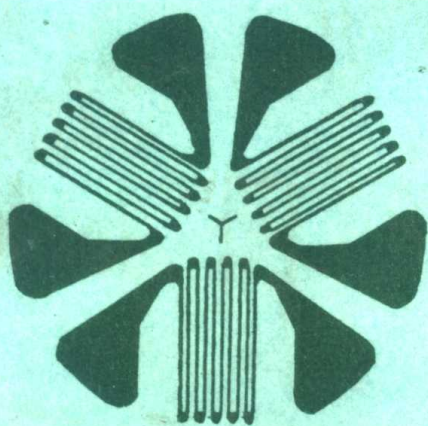


材料力学 实验原理及方法

潘信吉

何蕴增

主编



材料力学实验 原理及方法

主 编 潘信吉 何蕴增
副主编 张凤敏 夏兴有

哈尔滨工程大学出版社

(黑)新登字第9号

内 容 简 介

本书是根据国家教委1987年审定的高等工业学校“材料力学课程教学基本要求”编写的。其主要介绍了材料力学实验基本原理、方法及实验中使用的主要仪器和设备。书中编入了14个基本实验和6个选择实验,并在附录中介绍了误差分析和数据处理的有关知识。

本书可作为高等工业院校的本科生、专科生的材料力学实验课及实验独立设课的教材,也可供研究生和有关工程技术人员参考。

材料力学实验原理及方法

主 编 潘信吉 何蕴增

副主编 张凤敏 夏兴有

责任编辑 陈晓军

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

新华书店经销

哈尔滨毕升电脑排版有限公司排版

哈尔滨工程大学印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 7.25 字数 182 千字

1995年3月第1版 1995年3月第1次印刷

印数:1~4000册

ISBN 7-81007-488-1

O·28 定价:6.20元

前 言

本书是根据国家教委 1987 年审定的高等工业学校“材料力学课程教学基本要求”编写的,其在内容上着重突出如下特点:

1. 着重阐述实验中的力学基础、测试原理和方法,编入了 20 个典型教学实验(基本实验 14 个,选择实验 6 个)。

2. 鉴于力学测量是联系广泛的综合技术,因此在测试技术介绍中,除材料力学实验外,也适当涉及实验应力分析的某些内容。

3. 对于材料的力学性能分析,引用了金属学位错理论简化模型,从而由宏观与微、细观结合的角度解释材料的力学现象之物理本质。

4. 在脆性材料压缩试件破坏过程和扭转试验某些现象的分析中,介绍了我们自己的研究成果。

本书可用作高等工业院校本科生、专科生的材料力学实验课及实验独立设课的教材,也可供研究生和工程技术人员参考。

本书第一、二章及附录由何蕴增编写;第三章、第五章的第四至六节,第六章的第十一、十二节,第七章由潘信吉编写;第四章、第五章的第八节,第六章的第七至十节、第十三、十四节由张凤敏编写;第五章的第一至三节、第七节,第六章的第一至六节由夏兴有编写。全书由潘信吉、何蕴增主编,欧贵宝、张正国主审。

在本书编写过程中,得到了哈尔滨工程大学数学力学系、材料力学教研室、教材科和兄弟院校的许多同志的关心和帮助,出版社为本书付出了艰辛的劳动,谨致诚挚的谢意。

编 者

1994 年 6 月

PAGE 7/105

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 金属材料的力学行为.....	1
第二节 材料力学和材料力学实验.....	3
第三节 材料力学实验的测试方法.....	4
第四节 材料力学实验的内容.....	5
第二章 金属材料的力学性能	7
第一节 金属材料拉伸时的力学性能.....	7
第二节 金属材料压缩时的力学性能	23
第三节 金属材料扭转时的力学性能	28
第四节 金属材料弯曲时的力学性能	35
第三章 电测原理及测试方法	39
第一节 应变计的工作原理与构造	40
第二节 应变计的分类和工作特性	43
第三节 粘结剂及应变计的粘贴与防护	48
第四节 测量电路	51
第五节 电阻应变仪	56
第六节 温度效应的补偿	60
第七节 应变计接入电桥的方法	62
第八节 贴片方位及应变应力换算关系	66
第四章 光测原理及测试方法	74
第一节 光学的基本知识	74
第二节 平面应力—光学定律	79
第三节 平面偏振光场通过模型的光场效应	80
第四节 等倾线和等差线的区别	82
第五节 非整数级条纹级数的确定	84
第五章 实验设备	88

第一节	万能材料试验机	88
第二节	扭转试验机	102
第三节	纯弯曲对称循环疲劳试验机	107
第四节	电阻应变仪	109
第五节	Y6DL - 1 型动态电阻应变仪	117
第六节	X - Y 函数记录仪	123
第七节	引伸仪	125
第八节	408 - 1 型光测弹性仪	128
第六章	基本实验	130
第一节	试验机操作练习	130
第二节	拉伸试验	132
第三节	压缩试验	135
第四节	剪切试验	137
第五节	圆轴扭转试验	138
第六节	剪切弹性模量 G 的测定	141
第七节	用电测法测定低碳钢弹性模量 E 和泊松比 μ 值	144
第八节	梁在纯弯曲时正应力测定	148
第九节	梁弯曲变形测定	152
第十节	用应变花测悬臂铝管的应力状态	155
第十一节	纯弯曲对称循环疲劳试验	160
第十二节	测定大柔度压杆的临界载荷	163
第十三节	光弹性演示实验	167
第十四节	光弹性材料常温条纹值和应力集中 系数的测定	170
第七章	选择实验	177
第一节	用绘图法测定塑性材料的名义 屈服极限 $\sigma_{0.2}$	177
第二节	用杠杆引伸仪测定材料的弹性模量 E	181

第三节	真应力应变曲线的测定	183
第四节	电桥连接方法实验	187
第五节	测定静应力集中系数	190
第六节	薄壁圆筒在内压和扭转共同作用下 主应力的测定	192
附 录	误差分析及数据处理	197
第一节	误差和有效数字	197
第二节	直接测量中的误差	202
第三节	随机误差的性质和分析	206
第四节	间接测量中的误差	212
第五节	实验结果的表示方法	214
第六节	实验数据的最小二乘法曲线拟合	216

第一章 绪 论

第一节 金属材料的力学行为

金属材料被广泛地用于制造各类工程构件。在航天航空工程、船舶海洋工程、土建水利工程以及机械工程的各个领域,都大量使用钢、钢的合金和其它金属材料。

工程构件承受外力作用时,其材料内部将产生相应的力学响应。相邻的质点间将出现内力的相互作用;构件将发生变形。材料这种受力和变形的程度可以引用相应的力学量来描述。如杆件横截面内力;拉杆的伸长量;一点处的应力、应变;以及某些量对时间的变化率(如应变率)和描述受力变形综合效应的变形能等。这些量按各自的分布规律,在构件内形成相应的力学场。

在常温、静载下,各种金属材料表现出不同的力学性能。按照力学性能的不同,可以将材料分成两类:一类是塑性材料,另一类是脆性材料。两者的区别在于直到最终断裂之前积累发生塑性变形的大小。除了某些铸造成型的金属材料(如灰口铸铁)外,绝大多数工程金属材料都属于塑性材料。某些塑性材料在特定加载方式下,甚至不发生断裂现象。

材料内部的受力、变形等各力学量,一般都随着外力的增大而增大。当构件内的应力达到一定的大小时,材料将发生破坏,即构件发生过大的塑性变形或脆性断裂。材料抵抗外力作用而不发生破坏的能力,称为材料的强度。抵抗破坏的能力可定义为两个指标,即屈服极限 σ_s (或名义屈服极限 $\sigma_{0.2}$) 和强度极限 σ_b 。脆性材料

只有 σ_s 一个强度指标。

构件承受不同大小载荷作用时,材料的变形规律也不相同。载荷较小时,多数金属材料具有良好的线性和完全弹性。为表示材料的弹性变形性能,定义三个材料弹性性能指标:拉压弹性模量 E 、横向变形系数(泊松比) μ 、剪切弹性模量 G 。还定义了材料线性和完全弹性的应力上限值:比例极限 σ_p 和弹性极限 σ_e 。当载荷较大时,材料除发生弹性变形外,还会发生塑性变形。为表示材料塑性性能的好坏,又定义了塑性指标:延伸率 δ 和截面收缩率 ψ 等等。这些材料特有的力学参数能定量表征材料的力学性能,因此,通常将它们称为材料的力学性能参数。同一金属材料在不同的外界环境和加载方式下,可能表现出不同的力学性能。如在高温、低温、腐蚀介质、长期原子辐射等物理、化学因素以及较高加载速率、交变应力等的加载条件下,都对材料的力学性能产生显著影响,甚至表现出不同的力学规律。

材料的力学性能是材料固有的属性。从本质上说是其内部物质结构所决定的。由材料的微、细观结构研究入手,建立合理的力学模型,定量地计算材料宏观的力学性能,应该是力学深入研究的一个方向。这要求将力学、金属学、材料科学、物理学和化学以及计算机科学等学科结合起来,将微观、宏观研究结合起来,深入研究金属材料的力学行为。这方面的探讨也是力学、金属学目前较为活跃的研究方向之一。但是,就目前的研究水平而言,尚不能完全通过理论分析直接推断材料的力学性能。关于材料力学性能参数的确定,当前的主要研究方法仍然是借助于各种测试技术,通过材料力学试验进行实际测量来获得。可见,理论研究总是离不开实验研究这个基础的;同时实验研究还是与理论研究并行的最有说服力的重要研究方法;新的理论思维常常是在实验研究结果或发现的启迪下产生的。理论研究和实验研究是相辅相成、共同深入的。可以断言,随着理论研究的深入,对实验研究的要求也会越来越高。

第二节 材料力学和材料力学实验

自然科学一般都是先从实践中得到感悟,然后上升为理论。随着实践和理论的发展积累,使得整个学科得到充实和完善。材料力学也不例外,从世界各个国家和地区的古建筑和古籍中来看,有很多人们进行力学实验研究的成果和文字记载。金字塔、古长城等古代人类文明奇迹就是很好的例证。我国东汉时期科学家郑玄(127~200)在对《考工记·弓人》的注释中,作了“每加物一石,则张一尺”的记载。通过对弓的张力标定实验的评述,他比虎克(1635~1703)早 1500 年提出了后来人们称为虎克定律的弹性材料受力和变形关系的力学规律。近代材料力学学科的形成,也是从伽利略时代由材料的力学实验研究开始的。

材料力学是密切联系工程实际的学科。其基本理论的建立,理论的有效性和应用范围的验证或确定,构件内部力学场的研究,都离不开材料力学实验。

材料力学研究问题,通常考虑力学关系(静力平衡或动力学关系)、变形几何关系和物理关系三方面的规律。而物理关系主要指材料的变形和受力(有时也考虑其它外加因素)之间的关系。这种关系常由应力-应变关系描述,也可称为材料的本构关系(如弹性阶段的虎克定律等)。它需要通过实验测量的方法加以确定。材料的各种力学性能参数是反映材料的重要物理特性,它需要由实验来测定。原先由于数学上的困难,我们只能采用简单的材料模型(如线性模型等)来分析、计算力学问题。随着现代计算机技术的迅速发展以及相关学科的进步,使得较为复杂的力学的分析、计算成为可能。因而,当前力学学科深入发展的关键之一就是更广泛、更确切地描述材料的本构关系。现代材料本构关系的研究,已经成为力学学科研究的一个热点。可见,迅速提高材料力学的测试技术,

保证实验结果的精确度和可靠性,是学科发展的当务之急。因而,学习材料力学,必须注重材料力学实验。

第三节 材料力学实验的测试方法

原则上说,任何与材料受力、变形伴随发生并且与受力、变形有确定的数量关系的可测量的物理量,都能够用来直接或间接地对有关的力学量进行测量。目前,在材料力学实验中,采用最多、最有效的方法是机测法、电测法和光测法。

一、机测法

机测法多数是直接测量。如采用刻度尺测量长度、直角尺测直角,用游标卡尺、螺旋测微仪、千分表、杠杆引伸仪等只经过简单机械转换的仪器度量位移,用标准砝码加载,用弹簧秤测力,以及由这些仪器、工具所组合而成的专用加载测量装置。上述简单的仪表、设备只适用于精度要求不高、受力不很大的简单测量。而直接使用各种专用的万能材料试验机、扭转试验机、疲劳试验机……进行力学测试,尽管不同机型对各类力学量或非力学量之间所作的转换、传递的方式各异,但是通常都可以将它们归为机测法的范畴。

机测法常用于采用标准试件测定材料的力学性能参数;标定材料的物理关系;对小型构件或加载方式较简单的小尺寸结构模型,模拟实际受力进行实验测量。

机测方法具有简单、实用、价格低、测试效率高的优点。

二、电测法

构件在受力变形时,使有关电路或电场中的电阻、电容、电感、场强等参数发生改变,由此产生电信号。电测法就是利用这种性质、使用专用仪器,对上述信号加以放大、处理和显示,来间接测量力学量的方法。最常用的是用电阻应变计和电阻应变仪来测量构

件表面的应变,通过分析可以间接获得应力、位移等力学量。

这种方法的优点是测量精度高,应用范围广泛,价格低,便于遥控及动态、高温测量,便于信息采集、传输、处理等。

三、光测法

光测法是近 30 年发展较快的一种测量方法。现有光弹性测量,激光全息干涉法、散斑干涉法、贴片法、云纹法等。它的原理是利用光波在某些透明介质材料制成的受力模型中所产生的暂时双折射光波干涉条纹图或光波反射产生的干涉条纹图来分析、确定各测量点的应力。

光测法的优点是能够测量整个应力场的应力分布。它不仅能测量构件表面的应力,而且也能采用冻结、切片技术测定试件内部测量点的应力。

第四节 材料力学实验的内容

在材料力学理论建立的过程中,要求研究材料的本构关系,并确定有关材料参数(如 E 、 μ 、 σ_p 等)。此外还需要确定材料的其它力学性能参数(如 σ_s 、 σ_b 等)。精确地测量上述力学量,是对构件进行准确可靠的力学分析和计算,最后正确作出力学预测和判断的前提。

另外,材料力学不是纯粹由严谨的逻辑推理建立起来的理论学科。在材料力学的研究中,引进了许多假设与简化。如关于材料的连续性、均匀性及各向同性的假设;关于构件的小变形条件;实际上材料弹性范围的线性关系也不是严格的;尤其是材料力学中引入了平面假设等来简化变形几何关系。虽然这些假设简化了材料力学的理论,但是由这些假设出发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?……最简便易行的方法,就是通过实验进行验证。这样的验证,对于材料力学这种实践性较强学

科,从思维逻辑和理论的完整性来说,是不可缺少的。

材料力学的实验研究也是材料力学研究、解决问题极为重要的方法和手段。目前,对于很多重要的工程构件或结构,由于数学上的困难,仅靠理论分析,难于求得理论解析解。采用级数法、差分法、有限元法等数值方法,也要求对载荷和边界条件进行合理的简化,但是对有些实际问题是不容易作得精确的。而材料力学的实验研究,正是求解这些较为复杂的问题的有效而又可靠的方法。对重要的实际问题,实验测试研究是不可缺少的,它可以与理论解、数值解互相佐证。大型结构的理论分析、数值计算是信息量很大的浩繁工程,为避免疏失、错误,通过实验方法来研究是非常必要的。

材料力学实验,涉及到力学、误差理论、电学、光学、金属学等多学科的知识。本书只是简要地介绍了材料力学实验的力学基础,有关的测试原理和方法以及实验测试仪器和设备。给出一定数量的基本实验和若干选择实验。最后,介绍了测量中的数据采集、处理以及有关误差分析方面的基础知识。

第二章 金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是由其内部微观结构决定的。但是,应用微、细观模型直接定量地计算材料的力学性能参数,目前还做不到。因此,无论是力学的理论研究还是材料工程应用中所用到的材料力学性能参数,都还要依靠材料的力学实验来测定。由实验测定材料的这些力学性能,是建立和验证材料力学理论的基本手段,也是材料力学有关力学场研究、分析的重要方法。本章将分别讨论杆件承受拉(压)、扭、弯各种基本变形时的力学行为及力学性能参数的测定。

第一节 金属材料拉伸时的力学性能

由于各种金属材料的内部构造不同,受力时的力学行为也不同。各种金属材料按照其构成和力学行为,可以分为以低碳钢为典型材料的塑性材料和以灰口铸铁为典型材料的脆性材料两大类。

一、金属材料拉伸试验

金属材料的拉伸试验,可参考国家标准 GB288 — 87 的有关指导。

(一) 试件

为排除尺寸因素对测试结果的影响。各种金属材料的拉伸试件均制成形状规范的标准试件。试件中间变形、受力均匀的部分为试验观测段,其长度称为标距,记作 l_0 。标距内的加工尺寸、精度都有一定要求。标准试件有圆截面和矩形截面两种。常用的是圆截面试件,其形状见图 2-1。横截面直径 d_0 应按 $l_0=10d_0$ 或 $l_0=5d_0$ 。

选取。最常用的标准试件为 $l_0=100\text{mm}$, $d_0=10\text{mm}$ 的圆截面试件。为了保证试件与试验机夹具间的有效连接,夹持部分直径和长度也有一定的要求。为减小夹持段和试验段截面改变引起的应力集中,过渡圆弧半径也有一定要求。这样,将使试件标距内部分在加载时产生均匀的受力和变形。

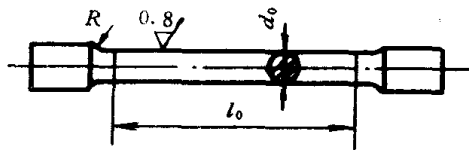


图 2-1 拉伸试件示意图

矩形截面试件或非标准试件也能用来测试材料的力学性能。但所得到的测量结果,可能略有系统差异。一般说来,非标准试件仅适于受取样、加工周期等因素限制,不便采用标准试件的场合。测量结果仅供工程应用参考。

(二) 试验机及加载

通常用游标卡尺度量试件的几何初始尺寸,在万能材料试验机上加载、读数。

缓慢加载进行材料拉伸试验。材料屈服前,应使应力增加的速率约为 10MPa/s (对低碳钢 $l_0=10\text{mm}$ 的标准试件,横梁位移速率约为 0.03mm/min)。材料屈服以后,为了提高试验效率,可适当加快加载速率,但是横梁位移速率不应超过 $0.5l_0/\text{min}$ 。

(三) 材料的应力应变曲线

在常温下,将试件装夹在试验机上,缓慢加载。记录加载过程中标距内的材料沿杆长方向的伸长 Δl 与载荷 P 之间的关系。可以由试验机的自动记录绘图装置绘制连续的曲线,也可用专用测试仪器测量出对应的点列 $\{(\Delta l_i, P_i) | i=1, 2, \dots, n\}$, 将这些点顺序光滑连接绘出 P 随 Δl 变化的函数曲线。 $P - \Delta l$ 曲线称为试件的拉伸曲线(或拉伸图)。

在研究工程小变形下材料局部受力和变形时,定义下面两个量:

工程应力

$$\sigma = P/A_0 \quad (2.1)$$

工程应变

$$\epsilon = \Delta l/l_0 \quad (2.2)$$

式中, l_0 、 A_0 分别为变形前试件的标距和横截面积。 σ 与 ϵ 间的函数关系曲线称为工程应力应变曲线(简称应力应变曲线)。 $\sigma - \epsilon$ 曲线可以由 $P - \Delta l$ 曲线进行简单相似变换(横轴和纵轴按一定比例变化一下单位)来获得。我们可以通过分析 $\sigma - \epsilon$ 曲线,对照发生的力学现象来研究材料在受力过程中的各种力学行为。

在加载过程中,由于标距内杆长不断伸长,同时横截面面积逐渐缩小,因此,工程应变不能严格描述各时刻试件的轴向相对伸长,工程应力也不能准确表示单位面积上材料受力的大小。深入研究时,有时也引入材料的真实应变

$$\epsilon_t = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \epsilon_0) \quad (2.3)$$

真实应力

$$\sigma_t = \frac{P}{A} \quad (2.4)$$

式中, l 、 A 为加载过程中任一时刻标距内的真实长度和横截面的真实面积。 ϵ_t 、 σ_t 也只适用于对试件发生严重的局部变形(见二段)之前的应变和应力的描述。

二、塑性材料拉伸时的力学性能

(一) 低碳钢的拉伸

低碳钢拉伸时的 $\sigma - \epsilon$ 曲线如图 2-2 所示。按其力学行为可以分为四个阶段。

1. 弹性阶段(图 2-2 oe 段)

在这一阶段, σ 与 ϵ 间满足比例关系

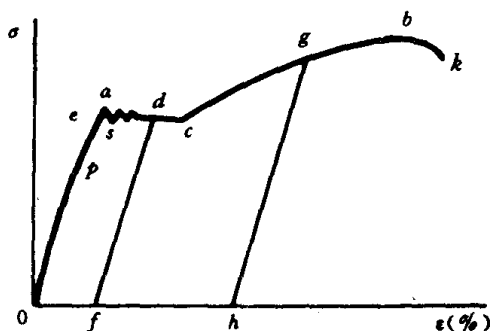


图 2-2 低碳钢拉伸应力应变曲线

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.5)$$

式中比例系数 E , 称为材料的弹性模量, 其常用单位为 GPa 或 MPa。它是材料发生弹性变形的性能参数。由于工程材料在实际载荷作用下通常只发生人们观察不到的小变形, 因而金属材料的 E 值都很大。如各种钢 $E \approx 200 \text{ GPa}$ 。此外, 材料在发生杆的轴向应变 ϵ 的同时还发生横向变形。反映横向相对变形的横向应变 ϵ' 与 ϵ 之比, 在弹性范围内近似为一个负的常数, 其绝对值 μ 称为材料的泊松比。它是弹性变形的另一个性能参数。

在此阶段卸载, 变形为完全弹性的。当载荷全部卸除后, 变形也完全消失。卸载过程和重复加载时, σ 与 ϵ 之间仍保持 (2.5) 式的线性关系, 加载和卸载曲线重合。

在此阶段还能测定材料的两个极限应力值: 材料的比例极限 σ_p 和材料的弹性极限 σ_e 。它们分别表示在相应的规范规定的严格的精度要求下, 使 (2.5) 式的线性关系成立的最大应力和使材料保持完全弹性的最大应力。它们取值分别为图 2-2 中点 p 及点 e 所对应的应力值。规范规定在应力应变曲线的 oe 段, 切线的斜率减小为初始斜率的 $2/3$ 时, 所对应的应力为 σ_p ; 使试件产生 0.01% 的残余应变的应力值为 σ_e 。几何意义见图 2-3。

2. 屈服阶段(图 2-2 ec 段)