

材料力学实验

张小凡 谢大吉 陈正新

清华大学出版社

14201-23
127

材料力学实验

张小凡 谢大吉 陈正新

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 提 要

本书为材料力学实验课教材,内容包括:配合理论教学的基本实验;着重于测试技术的力学性能实验以及综合性实验等共约 20 余个。书中还重点介绍了一些先进的实验设备和仪器。

该书反映了作者近年来教学实验改革的一系列成果,实验内容具有明确的工程背景,实验技术和设备体现了国内的最新水平,同时也照顾到传统实验技术和通用设备的使用。

本书除作教材外,还可供广大工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学实验/张小凡等编. —北京:清华大学出版社,1994
ISBN 7-302-01611-9

I. 材… I. 张… III. 材料力学实验—高等学校—教材 IV.
TB301-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 08852 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

印刷者:北京密云胶印厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:787×1092 1/32 印张:6.375 字数:142 千字

版 次:1994 年 11 月第 1 版 1994 年 11 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-01611-9/O·155

印 数:0001—3000

定 价:3.80 元

前 言

材料力学实验作为一门课程,是通过实验加强学生对材料力学理论概念的理解;并着重进行实验能力和操作技能的系统培养。为体现这一宗旨,本书集中了近十年来我们教学实验改革的一系列成果,在实验内容和测试技术上都有较大的突破。主要特点如下:

1. 实验目的主要侧重于引导学生用实验的方法去分析问题、解决问题,而不仅仅是单纯地验证理论。

2. 实验内容有明确的工程背景,理论概念具有典型意义,以及实验模型的抽象简化,使本课程更加理论联系实际。

3. 在实验技术、实验设备上都体现了目前在国内的最新水平;同时也照顾到传统实验技术和通用设备的使用,使本书不仅具有先进性也具有通用性。

4. 有关内容的实验方法和概念,既贯彻教学要求,又尽量与国家标准接轨。

本教材的实验内容包括以下几种类型:一类是配合理论教学的基本实验;一类是着重于测试技术的力学性能实验;一类是进行综合分析和训练的大实验。考虑电测技术的简便和在实际工程中应用的广泛性,上述各类实验的测试技术都以电测量为主。

为方便不同类型专业的需要,上述内容在编写时分成四大部分,以供选择。

第一部分应力及内力测量实验。通过应力、应变的测量,加深学生对基本理论和概念的认识和理解。要求学生用试验的方法寻求结论,而不是单纯的去验证理论。这些实验从内容到测试方法都是材料力学实验入门和配合理论教学所必不可少的。

第二部分力学性能的测试。这部分内容除了配合教学必不可少的力学性能基本实验外,在测试技术上有较大的突破,全面引进了大型电子万能试验机和自动记录曲线的先进测试技术,以适应科研、生产的需要,提高操作能力。

前三部分综合性实验。各实验都有明确的工程背景,是进行综合分析和设计的大实验,也是测试技术较复杂和内容较新的力学性能实验。目的是通过这些实验,培养学生独立进行和安排实验的能力。

第四部分附录。重点介绍大型、先进的电子万能试验机、数字式应变仪和各类记录设备。同时也重点介绍了一批传统的通用设备和仪器。

前三部分实验内容在安排上是循序渐进的,有利于系统培养并便于自学。指导思想是结合具体结构模型引导学生主动思考;最终目的是使学生学会如何用实验的方法去得到结论、解决问题。

本书主要供多学时材料力学的实验课和单独设材料力学实验课使用。并可供工程技术人员和从事力学教学和科研的有关人员参考。

近十年来,本书在使用过程中不断得以修改和充实,在校内使用取得了很好的效果,并对高等工科院校的材料力学教学实验改革起到了促进作用。在本教材正式出版之际,仅向为

材料力学实验改革做出努力的教师和技术人员、向支持我们改革的高校同行、特别向在新实验设计中做出贡献的谢志成、蒋智翔、戴福隆、范钦珊、郑秀媛、傅承诵等各位教授表示由衷地感谢。并希望读者提出宝贵的意见。

本书由清华大学材料力学实验室张小凡、谢大吉、陈正新合编。

谢大吉编写第一部分(§1—§5);第三部分的§14, §15, §19 实验1, §20;第四部分的§23。张小凡编写第二部分(§6—§13);第三部分的§16, §18, §21。陈正新编写第三部分的§17, §19 实验2;第四部分的§22, §24, §25, §26, §27。全书由张小凡整理完稿。

编 者

目 录

第一部分 应力及内力电测实验	1
§ 1 电测法的基本原理	1
§ 2 桥路与弯曲应力实验	22
§ 3 圆管在弯扭联合作用下应力与内力的测量	28
§ 4 偏拉(压)实验	32
§ 5 动态应变测量	35
第二部分 力学性能的测试	39
§ 6 概述	39
§ 7 常温、静荷拉伸破坏实验	42
§ 8 压缩实验	54
§ 9 扭转实验	58
§ 10 弹性模量 E 、泊桑比 μ 的测试	64
实验 1	65
实验 2	71
§ 11 条件屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 的测试	78
§ 12 冲击实验	85
§ 13 疲劳实验	90
第三部分 综合性实验	96
§ 14 组合梁应力分析实验	96
§ 15 框架实验	100
§ 16 压杆稳定实验	103
§ 17 大挠度稳定性实验	109
§ 18 真应力-真应变曲线的测试	114

§ 19	薄壁圆管弯扭联合作用下的破坏条件实验	120
	实验 1	120
	实验 2	125
§ 20	组合柱内力分析实验	129
§ 21	平面应变断裂韧性 K_{Ic} 的测试	133
第四部分	附录	144
§ 22	普通材料试验机	144
§ 23	电阻应变仪及记录仪器	150
§ 24	引伸仪、传感器和 X-Y 记录仪	169
§ 25	基本型电子万能材料试验机	178
§ 26	其它材料试验机简介	186
§ 27	实验数据的直线拟合	190

第一部分 应力及内力电测实验

§ 1 电测法的基本原理

电测应力应变实验方法(简称电测法)不仅用于验证材料力学的理论、测量材料的机械性能,而且作为一种重要的实验手段,为解决实际工程问题及从事研究工作提供良好的实验基础。因此,掌握这种实验方法,可增强解决实际问题的能力。

电测法就是将物理量、力学量、机械量等非电量通过敏感元件转换成电量来进行测量的一种实验方法,其原理框图如图 1-1 所示。

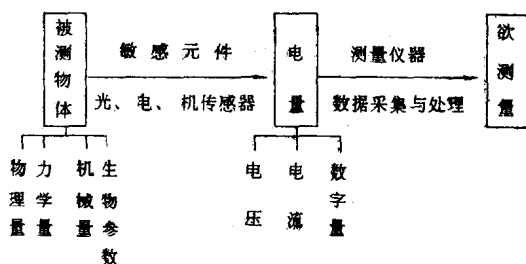


图 1-1 电测技术原理框图

电测法之所以得到广泛应用,是因为它具有如下诸方面的优点:

(1) 灵敏度高,测量范围广。例如应变测量范围为 $\pm 1-10^4 \mu$ 应变,力或重力的测量范围为 $10^{-2}-10^5 \text{N}$ 等。

(2) 能进行静、动态测量,频响范围为 $0-\pm 50 \text{kHz}$ 。

(3) 轻便灵活,适用于现场及野外等恶劣环境下进行测试。电阻应变片最小标距仅 0.2mm 。

(4) 能在高、低温及高压液下等特殊条件下进行测量。

(5) 便于与微机联结进行数据采集与处理,可广泛应用于生产管理的自动化及控制。

正因为电测法具有上述优点,因而被广泛应用于各个领域:

(1) 直接应用于工业生产的现场实测与控制。

(2) 生产新产品前的模型设计实验。

(3) 高技术、现代科学领域中的应用。如机器人工业、原子能反应堆、航空、航天等诸方面的参数测试。

(4) 应用于运动力学测试。如运动步态测力平台、足底压力分布测试、重心运动轨迹测试等。

(5) 应用于生物医学及康复事业,如患者行走步态测试,假肢参数测试等。

(6) 制造各种传感器,如力、位移、压力传感器等。

理论与实验是解决实际问题的两个方面,缺一不可。一个新理论的提出往往需要进行大量的实验,找出更切合实际的计算方法。当然,实验方案的拟定及实验结果的分析则必须用理论来指导,盲目的实验是不会得到正确结果的。我们在综合性大实验中,就是使这两者密切结合起来解决一个较为复杂的结构模型实验(如组合梁实验、框架实验、组合柱实验等)。

应力测量方法很多,除电测法外,还有光测弹性力学法、

脆性涂层法、云纹法等十余种。各种方法都有其特点和适用范围,但以电测法应用最为广泛。因此,本课程将着重介绍电测法的基本原理和熟练掌握其实验方法。

一、敏感元件的工作原理

当代是信息时代,其特点是随着科技进步信息的自动采集、处理与控制广泛应用于各个领域。信息的采集、储存与处理一般靠计算机来完成,信号的感受与转换的关键则靠传感器或称敏感元件。

敏感元件能感知外界的各种信息,按性质可分光敏、气敏、声敏、压敏等。按其工作原理则分电阻式、电容式、电感式、压电式、电磁式及其他特殊形式等。其中以电阻式结构最简单,应用最广泛。本课程中主要介绍电阻式敏感元件。

1. 电阻丝的应变-电性能

金属丝的电阻值随机械变形而发生变化的现象称为应变-电效应。电阻式敏感元件称电阻应变片(简称电阻片)。

电阻片分丝式电阻片(图 1-2)和箔式电阻片(图 1-3)两大类。

丝绕式应变片是用直径为 0.003mm—0.01mm 的合金丝绕成栅状而制成;箔式应变片则是用 0.003mm—0.01mm 厚的箔材经化学腐蚀成栅状。主体敏感栅是一个电阻,在感受被测物体的应变时,其电阻也同时发生变化。实验表明被测物体测量部位的应变 $\Delta l/l$ 与电阻变化率 $\Delta R/R$ 成正比关系。即

$$\frac{\Delta R}{R} = K, \frac{\Delta l}{l} \quad (1-1)$$

式中 K , 称为金属丝的电阻应变灵敏系数。

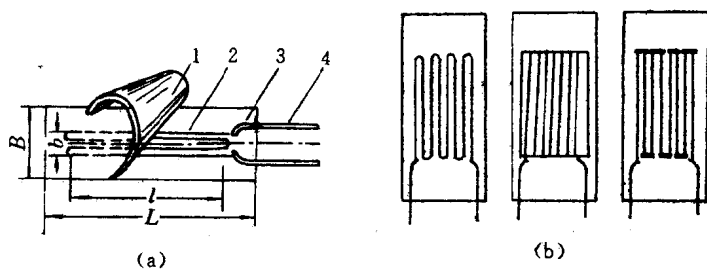


图 1-2 金属丝电阻片

纸基丝式电阻片构造

1. 覆盖层; 2. 敏感栅; 3. 基底; 4. 引线

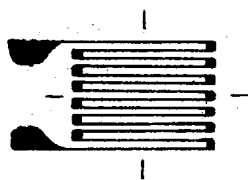


图 1-3 箔式片

上式也可由物理学基本公式导出: 电阻值 R 与电阻丝长度 l 及截面积 A 之间的关系为

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1-2)$$

系数 ρ 为金属丝的电阻率, 上式等号两边取对数再微分得到,

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1-3)$$

根据金属物理和材料力学理论得知 $\Delta A/A$ 、 $\Delta \rho/\rho$ 也与 $\Delta l/l$ 成线性关系, 由此得到:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= [(1 + 2\mu) + m(1 - 2\mu)] \Delta l/l \\ &= K_s \Delta l/l \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 μ ——金属丝材料的泊桑系数;

m ——常数; 与材料的种类有关。

(1-4) 式说明粘贴在构件上的电阻片, 其电阻变化率 $\Delta R/R$ 与其感受的应变值 $\Delta l/l$ 成正比, 比例系数为 K_s 。由于电阻片的敏感栅并不是一根直丝, 所以比例系数一般在标准应变梁上由抽样标定测得, 标定梁为纯弯梁或等强度钢梁。对于电阻片来说, 式(1-4)可写成

$$\frac{\Delta R}{R} = K \epsilon$$

2. 电阻片的温度效应

温度变化时, 金属丝的电阻值也随着产生变化, 称之为 $(\Delta R/R)_T$ 。该电阻变化是由两部分引起的, 一是电阻丝的电阻温度系数引起的

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)'_T = \alpha_T \Delta T$$

另一部分是由于金属丝与构件的材料膨胀系数不同而引起的:

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)''_T = K_s (\beta_2 - \beta_1) \Delta T$$

因而温度引起的电阻变化为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_T = [\alpha_T + K_1(\beta_2 - \beta_1)]\Delta T \quad (1-5)$$

式中 α_T ——金属丝(箔)材料的电阻温度系数;

β_1 ——金属丝(箔)材料的热膨胀系数;

β_2 ——构件材料的热膨胀系数。

要想准确地测量构件的应变,就要克服温度对电阻变化的影响。一种方法是使电阻片的系数 $[\alpha_T + K_1(\beta_2 - \beta_1)]$ 等于零,这种电阻片称为温度自补偿电阻片;另一种方法是利用测量电路——电桥的特性来克服的,这将在下面仔细阐述。

3. 电阻片的粘贴方法

粘贴电阻片是应变电测法的一个重要环节,它直接影响测量的精度。粘贴时,首先必须保证被测构件表面的清洁平整,无油污、无锈,其次要保证粘贴位置准确,第三要选用专用的粘接剂。粘贴的步骤如下:

(1) 打磨。测量部位的表面,经打磨后应平整光滑,无锈点。打磨可使用砂轮、砂纸等。

(2) 画线。测量点精确地用钢针画好十字交叉线以便定位。

(3) 清洗。用浸有丙酮的药棉清洗欲测部位表面,清除油污,保持清洁干净。

(4) 粘贴。在电阻片背面均匀地涂上一层粘接剂,胶层厚度要适中,然后对准十字交叉线粘贴在欲测部位。粘接剂有502快干胶及其他常温及高温固化胶。再用同样的方法粘贴引线端子。

(5) 焊线。将电阻片的两根引出线焊在引线端子上,再焊出两根导线。

二、测量电路——电桥的工作原理

测量电路的作用是将电阻片感受的电阻变化率 $\Delta R/R$ 转换成电压变化输出,再经放大电路放大。

测量电路有多种,最常用的是桥式测量电路,它有四个桥臂 R_1, R_2, R_3, R_4 顺序地接在 A, B, C, D 之间(图 1-4)。电桥的对角点 AC 接电源 E 。另一对角 BD 为电桥的输出端,其输出

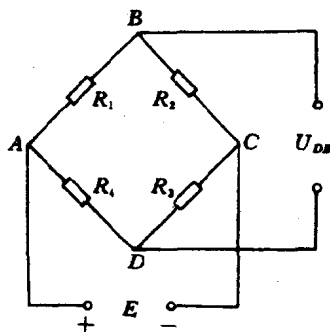


图 1-4 桥式测量电路

电压为 U_{DB} 。可以证明输出电压

$$U_{DB} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) E \quad (1-6)$$

若电桥的四个桥臂与四枚粘贴在构件上的电阻片连接。当构件变形时,其电阻值的变化分别为: $R_1 + \Delta R_1; R_2 + \Delta R_2; R_3 + \Delta R_3; R_4 + \Delta R_4$, 此时,电桥的输出电压即为:

$$U_{DB} + \Delta U_{DB} = \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_2} \right)$$

$$- \left(\frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + R_4 + \Delta R_3 + \Delta R_4} \right) E \quad (1-7)$$

由式(1-7)和(1-6)可以解出电桥电压的变化量 ΔU_{DB} 。当 $\Delta R/R \ll 1$, ΔU_{DB} 可以简化为

$$\begin{aligned} \Delta U_{DB} = & \frac{a}{(1+a)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) E \\ & - \frac{b}{(1+b)^2} \left(\frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) E \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中 $a = R_2/R_1$, $b = R_3/R_4$ 。当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 时, (1-8) 式又可进一步简化成

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) E \quad (1-9)$$

上式表明, 电桥输出电压的变化量 ΔU_{DB} 与四个桥臂的电阻变化率成线性关系。需要注意的是该式成立的必要条件是:

(1) 小应变, $\frac{\Delta R}{R} \ll 1$;

(2) 等桥臂, 即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 。

当四枚电阻片的灵敏系数 K 相等时, (1-9) 式可以写成

$$\Delta U_{DB} = \frac{EK}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (1-10)$$

(1-10) 式中, $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ 分别代表电阻片 R_1, R_2, R_3, R_4 感受的应变值。上式表明, 电压变化量 ΔU_{DB} 与四个桥臂电阻片对应的应变值 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ 成线性关系。应当注意, 式中的 ϵ 是代数值, 其符号由变形方向决定。通常拉应变为正, 压应变为负。可以看出, 相邻两臂的 ϵ (例如, ϵ_1, ϵ_2 或 ϵ_3, ϵ_4) 符号一致时, 根据(1-10)式二应变相抵消。如符号相反, 则二应变绝对值相加。而相对两臂的 ϵ (例如 ϵ_1 和 ϵ_3) 符号一致时, 其绝对值相

加,否则二者相互抵消。显然,不同符号的应变按照不同的顺序组桥,会产生不同的测量效果。因此,灵活地运用(1-10)式,正确地布片和组桥,可提高测量的灵敏度并减少误差。这种作用称为电桥的加减特性。下面讨论几种常用的组桥方式。

1. 组桥方式

(1) 单臂测量。电桥中只有一个桥臂(常用 AB 臂)是参与机械变形的电阻片,其他三个桥臂的电阻片都不参与机械变形。这时,电桥的输出电压为:

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \Delta R_1 / R_1 = \frac{EK}{4} \epsilon_1 \quad (1-11)$$

(2) 半桥测量。电桥中相邻两个桥臂(常用 AB, BC 桥臂)参与机械变形的电阻片,其它两个桥臂是不参与机械变形的固定电阻。这时电桥的输出电压为

$$\begin{aligned} \Delta U_{DB} &= \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \\ &= \frac{EK}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \end{aligned} \quad (1-12)$$

(3) 对臂测量。电桥中相对的两个桥臂(常用 AB, CD 桥臂)是参与机械变形的电阻片,其他两个桥臂是固定电阻。这时电桥的输出电压为

$$\begin{aligned} \Delta U_{DB} &= \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) \\ &= \frac{EK}{4} (\epsilon_1 + \epsilon_3) \end{aligned} \quad (1-13)$$

(4) 全桥测量。电桥中四个桥臂都是参与机械变形的电阻片。这时电桥的输出电压与公式(1-9)及(1-10)相同。

另外,还有串联组桥方式,即两枚参与机械变形的电阻片