



材料力学教学参考丛书

实验应力分析

潘少川 刘耀乙 钱浩生

高等教育出版社

材料力学教学参考丛书

实验应力分析

潘少川 刘耀乙 钱浩生

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是材料力学教学参考丛书之一。本书对应力测试技术的基本原理和测试方法进行了系统的叙述,对国内外的新技术以及今后的发展动向也作了适当的介绍。本书可作为工科院校开设材料力学课的各专业师生及工程技术人员的参考书,也可作为工科机械类专业本科学士、研究生实验应力分析课程(40~60学时)的教材。

全书分两篇:第一篇介绍了应变片电测法的应变测量技术和在机械量测量中的应用,还介绍了脆性涂层法;第二篇介绍了光弹性法、光弹性贴片法、激光全息光弹性法、云纹法、散斑法等光测方法。附录中介绍了测量误差分析、随机信号的处理及偏振光理论基础。

(京)112号

材料力学教学参考丛书
实验应力分析
潘少川 刘耀乙 钱浩生

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
国防工业出版社印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张14.5 字数349,000

1988年10月第1版 1991年10月第2次印刷

印数2 602—4 011

ISBN 7-04-001129-8/TB·114

定价 5.20元

前 言

本书是1981年10月经高等学校工科材料力学编审小组评选,并在原《实验应力分析》讲义的基础上参考评选意见修改编写而成的。本书可作为工科院校开设材料力学课的各专业师生及工程技术人员参考书,也可作为工科机械类专业本科学生、研究生实验应力分析课程的教材(40~60学时)。

本书在编写时注意到系统性与实用性,并尽量做到少而精。对应力测试技术的基本原理和测试方法进行了系统叙述,对国内外的新技术以及今后的发展动向也作了适当介绍。内容由浅入深,便于自学。

全书分两篇:第一篇介绍了应变片电测法的应变测量技术及有关测试仪器,还介绍了脆性涂层法;第二篇介绍了光弹性法、光弹性贴片法、激光全息光弹性法、云纹法、散斑法等光测方法。附录中介绍了测量误差分析、随机信号的处理及偏振光理论基础。附录部分及带“*”号的章节作为选学内容。关于材料力学课程的教学实验内容,本书未编入,读者可参考天津大学贾有权主编的《材料力学实验》(第二版)。

本书的绪论及第一、二、三、六、八章由钱浩生编写,第四、五、七章及附录Ⅰ、Ⅱ由刘耀乙编写,第二篇各章及附录Ⅲ由潘少川编写。本书插图由王振勇描绘。

本书由天津大学贾有权、哈尔滨工业大学赵九江、高宗俊审阅,他们提出了不少宝贵意见。在编写过程中还得到了清华大学刘先龙、上海交通大学李邦义、711研究所张熹以及北京工业学院

于美文、王民草、王崇宇、刘济庆、陈棣华、臧修亮、杨存厚、孙锡环、程兆雄、牛圆满、王秉鉴、吴玉良等同志的大力帮助，特此表示感谢。

由于我们水平有限，缺少经验，书中一定还存在不少缺点和错误，我们真诚地希望读者批评指正。

作 者

目 录

绪论

第一篇 实验应力分析的应变片电测法.....	5
第一章 电阻应变片.....	6
§ 1-1 金属丝的电阻应变效应.....	6
§ 1-2 应变片的结构.....	8
§ 1-3 应变片的灵敏系数.....	10
§ 1-4 应变片的横向效应.....	13
§ 1-5 应变片的工作特性.....	19
§ 1-6 应变片的种类和选用.....	23
§ 1-7 应变片的粘贴工艺.....	27
习题.....	31
第二章 电阻应变仪.....	33
§ 2-1 直流电桥的基本特性.....	34
§ 2-2 交流电桥的基本特性.....	38
§ 2-3 双电桥的工作原理.....	46
§ 2-4 相敏检波器.....	48
§ 2-5 静态电阻应变仪.....	52
§ 2-6 动态电阻应变仪.....	59
习题.....	65
第三章 记录器.....	66
§ 3-1 光线记录示波器的工作原理.....	66
§ 3-2 振子的工作原理和它的静、动态特性.....	68

§ 3-3 振子的技术参数及选用	76
§ 3-4 磁带记录器	83
第四章 测量电路与静态测量	95
§ 4-1 测量电桥的组成及温度影响的补偿	95
§ 4-2 测点及方位的确定	106
§ 4-3 静态多点测量	110
§ 4-4 静态测量的实施	114
§ 4-5 测量结果的修正计算	118
习题	127
第五章 动态测量	129
§ 5-1 动态应变的分类及特点	129
§ 5-2 应变片的频率响应特性与动态测量的实施	134
§ 5-3 动态测量记录曲线的整理	142
§ 5-4 随机信号的特征参数	157
习题	167
第六章 特殊条件下的应变测量	168
§ 6-1 高(低)温条件下的应变测量	168
§ 6-2 运动构件的应变测量	180
§ 6-3 高压水作用下的应变测量	193
第七章 应变片电测法在机械量测量中的应用	201
§ 7-1 基本原理与要求	201
§ 7-2 力的测量	206
§ 7-3 扭矩测量	214
§ 7-4 压力测量	216
§ 7-5 位移测量	221
§ 7-6 振动测量	223
第八章 脆性涂层法	231

§ 8-1	脆性涂层法的基本原理	231
§ 8-2	脆性涂料	232
§ 8-3	脆性涂层法的试验技术	234
第二篇 实验应力分析的光测法		
第九章	人为双折射效应及应力光性定律	241
§ 9-1	人为双折射效应与点应力状态的关系	242
§ 9-2	应力光性定律	244
第十章	平面偏振场测等倾线	249
§ 10-1	平面偏振场	249
§ 10-2	等倾线的测量	251
§ 10-3	改善等倾线清晰度的一些措施及实例	257
§ 10-4	主应力迹线	259
第十一章	圆偏振场测等差线及光弹性仪的调整	262
§ 11-1	圆偏振场	262
§ 11-2	圆偏振场测等差线的原理	265
§ 11-3	等差线条纹级数的确定	268
§ 11-4	实例	271
§ 11-5	半整数级等差线条纹的确定	272
§ 11-6	非整数条纹级数的确定	274
§ 11-7	自由边界应力的测定	281
§ 11-8	普通光弹性仪	282
§ 11-9	偏振光系统的调整	284
第十二章	二维应力问题的主应力分离法	286
§ 12-1	剪应力差法	286
§ 12-2	迭代法	294
§ 12-3	斜射法	300
第十三章	三维光弹性实验	310

§ 13-1	应变冻结的原理	310
§ 13-2	三维模型切片的应力分析	312
§ 13-3	模型的实验结果与原型的关系	319
§ 13-4	散光法	323
第十四章	光弹性材料和模型的制造	330
§ 14-1	光弹性材料	330
§ 14-2	环氧树脂型塑料的制作	332
§ 14-3	光弹性材料的基本特性测试	336
第十五章	光弹性贴片法	341
§ 15-1	反射式光弹性仪	341
§ 15-2	光弹性贴片法的原理	343
§ 15-3	贴片材料条纹值的标定	345
§ 15-4	实验中的一些问题	346
第十六章	全息光弹性法	350
§ 16-1	全息照相	350
§ 16-2	全息照相的解析分析	354
§ 16-3	全息照相的三种基本方法	357
§ 16-4	全息光弹性法的基本方程(两次曝光法)	358
§ 16-5	等和线条纹与等差线条纹的分离方法	364
§ 16-6	实时法	367
§ 16-7	实验中的一些问题	367
第十七章	云纹法	369
§ 17-1	概述	369
§ 17-2	位移的云纹效应	371
§ 17-3	转角的云纹效应	374
§ 17-4	图解法求点的应变	375
§ 17-5	失配法及移纹法	377

§ 17-6 条纹级数的确定和应变的符号	379
• § 17-7 光栅的数学描述	381
• § 17-8 光学滤波和图象处理	383
§ 17-9 实验中的一些问题	388
第十八章 散斑法	390
§ 18-1 散斑场的形成及其性质	390
§ 18-2 散斑照相术	393
§ 18-3 散斑干涉术	400
附录 I 测量误差分析	404
§ I-1 测量误差与精度	404
§ I-2 随机误差的分布与标准误差的计算	408
§ I-3 含粗差数据的剔除	416
§ I-4 系统误差的发现与消除	418
§ I-5 误差的传递	421
§ I-6 误差的合成	423
习题	428
附录 II 动态应变测量中随机信号的处理	429
习题	445
附录 III 偏振光的琼斯矢量表示法	446
§ III-1 椭圆偏振光的一般表示法	446
§ III-2 琼斯矢量	447
参考文献	452

绪 论

实验应力分析，是利用实验手段来测定构件的应变和应力的一门实验科学。

在固体力学中，理论分析和实验分析是紧密相联的两部分，都是解决工程实际问题的重要手段。任何固体力学理论的建立，都需要实验为其提供依据，例如，理论分析所采用的力学模型及一些假设，必须由实验提供依据；一些力学参数，也必须借助于实验来获得。另外，理论计算的结果是否正确，也要由实验加以验证。反过来，实验也只有理论指导下，才能抓住主要矛盾，合理地简化次要因素，使实验结果更可靠。还有，力学理论的发展或新理论的提出，在客观上要求实验必须随之发展以适应新的要求。显然可见，理论分析和实验分析是相辅相成的，是互相促进的。

实验应力分析在工程实际中得到了广泛的应用。例如，在设计大型工程结构或重要机械设备时，一般都需要用实验应力分析的方法对模型进行应变、应力测定，或者测定某些必要的参数，为改进设计方案提供依据；又如，在新产品（如飞机、车辆、重型机械设备等）正式投产以前，需要用实验方法测定样机在实际工作条件下的应变、应力，对样机进行工作可靠性鉴定；再如，有些复杂工程的强度问题很难用材料力学、结构力学或弹性力学求得理论解，即使采用有限元法计算也是很困难的，而利用实验应力分析的方法，常常能既经济又方便地得到解答。

随着科学技术的发展，实验应力分析的方法也日益增多。目

前主要有：应变电测法、光测法、脆性涂层法、应变机械测量法等。其中，应用最广泛的要属应变电测法和光测法，这两类方法也就是本书要详细介绍的内容。

一、应变电测法

应变电测法主要有：电阻应变片电测法、电容应变计电测法和电感应变计电测法等。前一种电测法应用较广泛，后两种电测法应用较少。

电阻应变片电测法，通常简称为应变片电测法。这种方法，是将用金属丝制成的电阻应变片（即应变转换元件）粘贴在构件的表面测点上，通过电阻应变片将构件表面的应变转换为电阻值的变化，然后由电子仪器测得其电阻值的变化，根据一定的比例关系，即可得到构件的应变值。

应变片电测法的优点主要有：

1. 测量灵敏度和精度高，应变最小读数可达一个微应变（ $1\mu\varepsilon=10^{-6}$ ），常温下静态应变测量精度可达1%。
2. 测量范围大，一般可达1~20000微应变。
3. 电阻应变片的尺寸和质量小，便于安装，同时又不影响欲测构件的静、动态力学特性。
4. 对应变的响应迅速，不仅能测量静态应变，而且能测量动态以至冲击应变。
5. 对环境的适应性强，可在低温、高温及高压液体中进行测量，也可进行远距离测量和无线电遥测。

应变片电测法如同其它实验方法一样，也有其局限性，例如，利用一片电阻应变片只能测量构件表面某一点处某一方向上的应变；电阻应变片测得的应变值只是电阻应变片长度内的平均值。

二、光测法

光测法主要有：光弹性法、光弹性贴片法、激光全息光弹性法、云纹法、散斑法等。其中，光弹性法是目前光测中比较成熟的方法。这种方法是用具有特殊光学性能的透明塑料做成构件模型，将其放在偏振光场中，当模型受力时，产生干涉条纹，根据干涉条纹来确定模型各点处的主应力大小及其方向，再根据模型相似理论，换算成实际构件中的应力。

光弹性法的优点主要有：

1. 它是一种全场性的实验方法，直观性强，从干涉条纹中，能看出主应力方向及主应力差值的变化。尤其对形状复杂的构件进行局部应力测定特别有效。

2. 它不仅能确定构件模型表面的应力分布，而且也能确定模型内部各截面上的应力分布。

光弹性法也有其不足之处，例如，该实验的准备工作程序多，工艺复杂；对于动应力、热应力的分析，虽然已作了不少研究，但在技术上还存在一些问题，有待进一步解决。

近二十年来，由于激光全息和信息处理技术在实验应力分析中的应用，使光测技术得到迅速发展，出现了激光全息光弹性法、激光散斑法等许多新的光测方法，为实验应力分析提供了更精确的测量手段。

由以上介绍可知，实验应力分析这门实验科学涉及的内容比较广泛，它是以材料力学、弹性力学、物理光学及电子学等学科为基础的。因此，随着这些学科及有关技术的发展，将会出现更多、更理想的实验应力分析方法。近几年来，随着电子计算机的普及和应用，实验应力分析技术向着自动化、数字化方向发展，试验数据可由计算机自动处理，自动打印出结果或自动绘出曲线，也

可以由计算机确定实验曲线的方程。这样就进一步提高了测量精度并可缩短试验周期。

在我们社会主义四个现代化的建设中，实验应力分析技术将会发挥更大的作用，并将得到更加迅速的发展。

第一篇 实验应力分析的 应变片电测法

应变片电测法，在工程上广泛地用来测量构件的应变。它的量系统主要由电阻应变片、电阻应变仪和记录器三部分组成。电阻应变片将被测构件的应变转换为电阻的变化，电阻应变仪将此电阻变化转换为应变读数或转换为电压(或电流)的变化，然后由记录器记录下来，经过换算得到应变值。

在本篇各章内，将分别介绍电阻应变片、电阻应变仪、记录器、测量电路与静态测量、动态测量、特殊条件下的应变测量、应变片电测法在机械量测量中的应用及脆性涂层法等内容。

第一章 电阻应变片

电阻应变片通常简称为应变片。它是应变片电测法中使用的应变转换元件。本章主要介绍应变片的工作原理、结构、种类、工作特性及其粘贴工艺。

§ 1-1 金属丝的电阻应变效应

应变片的工作原理是基于金属丝的电阻应变效应，即金属丝的电阻值随其机械变形而发生改变的物理现象。

设有一根长度为 L 、横截面积为 A 、电阻率为 ρ 的金属丝，其初始电阻值为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (a)$$

当金属丝受到轴向拉伸(或压缩)作用时，其电阻值 R 的变化，可由式(a)微分得

$$dR = \frac{\rho}{A} dL + \frac{L}{A} d\rho - \frac{\rho L}{A^2} dA \quad (b)$$

该金属丝的电阻变化率为

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dA}{A} \quad (c)$$

上式中 dA 为金属丝横截面积的变化，是由金属丝的轴向应变 ϵ 引起的。金属丝的直径由 D 变为 D' ，两者关系为

$$D' = (1 - \mu\epsilon) D \quad (d)$$

其中 μ 为金属丝材料的泊松比。由式(d)得到

$$\frac{dA}{A} = -2\mu\varepsilon + (\mu\varepsilon)^2 \approx -2\mu\varepsilon \quad (e)$$

将式(e)代入式(c)得

$$\frac{dR}{R} = (1+2\mu)\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-1)$$

令

$$K_s = \frac{dR}{R} = 1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-2)$$

K_s 称为单根金属丝的应变灵敏系数。式(1-2)表明, K_s 值由 $(1+2\mu)$ 和 $(\frac{d\rho}{\rho})$ 两项所决定。前一项是由金属丝变形后几何尺寸发生变化所引起的;后一项是由金属丝变形后电阻率发生变化所引起的。在常温下,许多金属材料在一定的应变范围内,其 K_s 基本上是一个常数。于是式(1-1)可表示为

$$\frac{dR}{R} = K_s \varepsilon \quad (1-3)$$

式(1-3)表示金属丝的电阻变化率与它的轴向应变成线性关系。应变片就是利用金属的这种线性的电阻应变效应制成的。

§ 1-2 应变片的结构

应变片主要由敏感栅、基底、覆盖层及引出线所组成,敏感栅用粘合剂粘在基底和覆盖层之间。一种丝绕式应变片的典型结构如图1-1所示。