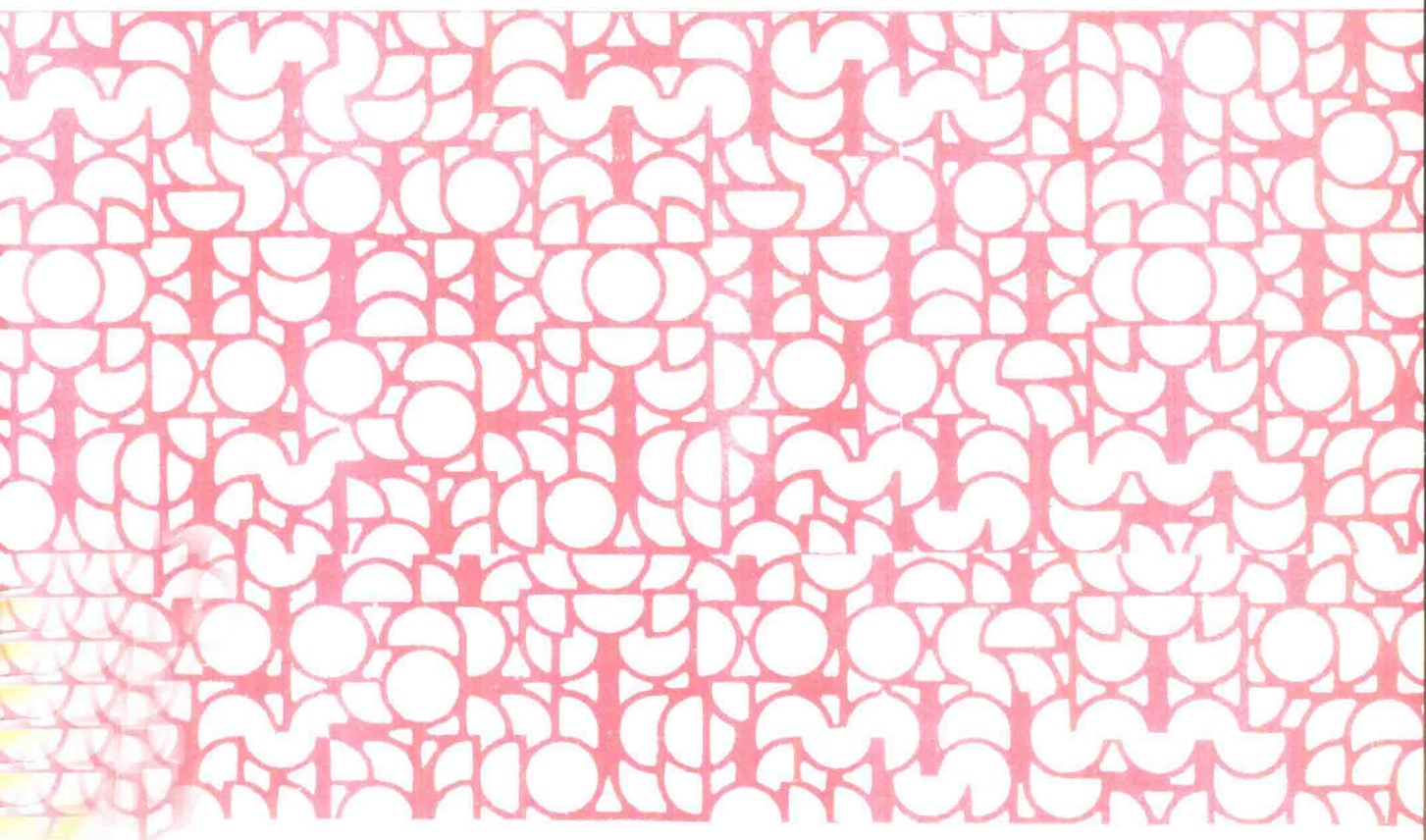


材 料 力 学 测试原理及实验

(第二版)

曹以柏 主编



航空工业出版社

内 容 简 介

本教材为材料力学实验用书。全书共5章：绪论、电阻应变测量原理及方法、光弹性实验原理及方法、金属材料力学性能测试和材料力学实验。本书共编入16个实验供教学选用。附录Ⅰ介绍了几种常用的试验设备，附录Ⅱ简要介绍实验中的误差分析和数据处理方法。各章均附有复习题。

本书可作为高等工业院校机械类专业材料力学实验课教材，也可供具有一定基础知识的学生自学，对从事力学测试技术工作的工程技术人员也有参考作用。

图书在版编目 (CIP) 数据

材料力学测试原理及实验/曹以柏等编. —2版. —北京：
航空工业出版社，1999. 7

ISBN 7-80134-450-2

I. 材… II. 曹… III. 材料力学-实验-高等学校-教材
IV. TB302

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 06002 号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

1999 年 7 月第 2 版

1999 年 7 月第 1 次印刷

开本：787×1092 1/16

印张：11.5 字数：270 千字

印数：1—4000

定价：17.50 元

前 言

本教材的第一版是于 1992 年为了满足材料力学实验单独设课而编写的。经过多年来的教学实践证明，基本上达到了教学要求。超出大纲要求的内容可根据具体专业和教学时数予以取舍，部分内容作为学生自学或参考。

第二版仍以电阻应变测量和光弹性测量为主要内容，内容和叙述上均在原版基础上作了适当取舍和修改。原版中误差分析和数据处理一章内容在附录Ⅱ中作简单介绍；金属材料力学性能测试一章则根据 1987 年后颁布的国标重新编写；实验部分舍去动应变测量，增加了压杆稳定。实验中有不少是采用南京航空航天大学设计制造的设备。通过这次再版修改希望能使教材更切合教学需要和学生自学要求。

参加第二版修改编写的有曹以柏（第 1、4 章）、施步洲（第 2 章、附录Ⅱ）、虞伟健（第 3 章）、罗文琳（第 5 章、附录Ⅰ）。曹以柏任主编，东南大学樊发兴教授对全书进行了认真审阅，并提出许多宝贵意见，特此致谢。

限于编者水平，书中难免有不妥、错误之处，恳请读者提出批评指正。

编 者

1998 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 测量基本概念	(1)
1.3 实验应力分析方法	(3)
第 2 章 电阻应变测量原理及方法	(5)
2.1 概述	(5)
2.2 电阻应变片	(6)
2.3 应变片的测量电路	(17)
2.4 电阻应变仪	(24)
2.5 应变片在构件上的布置和组桥	(27)
2.6 静态应变测量	(38)
复习题	(51)
第 3 章 光弹性实验原理及方法	(55)
3.1 概述	(55)
3.2 光学基础知识	(55)
3.3 平面应力-光学定律	(59)
3.4 平面偏振光通过受力模型后的光弹性效应	(60)
3.5 圆偏振光通过受力模型后的光弹性效应	(63)
3.6 白光下的等差线——等色线	(66)
3.7 等差线条纹级数的确定	(67)
3.8 等倾线的观测	(69)
3.9 平面光弹性应力计算	(71)
3.10 光弹性贴片法	(75)
复习题	(77)
第 4 章 金属材料力学性能测试	(79)
4.1 概述	(79)
4.2 金属材料拉伸时的力学性能	(79)
4.3 金属材料压缩时的力学性能	(90)
4.4 金属材料扭转时的力学性能	(93)
复习题	(96)
第 5 章 材料力学实验	(98)
5.1 电阻应变片的粘贴技术实验	(98)
5.2 桥路变换接线实验	(99)
5.3 应变片灵敏系数标定实验	(101)

5.4	纯弯曲正应力分布规律实验	(103)
5.5	弯扭组合变形薄壁筒应力测量实验	(106)
5.6	电测法测定材料弹性模量 E 和泊松比 μ 实验	(111)
5.7	用杠杆引伸仪测定材料弹性模量 E 实验	(114)
5.8	用绘图法测定金属材料的条件屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 实验	(117)
5.9	用杠杆引伸仪测定金属材料的规定残余伸长应力 $\sigma_{r0.2}$ 实验	(119)
5.10	光弹性实验方法观察实验	(121)
5.11	光弹性材料条纹值和应力集中系数的测定实验	(123)
5.12	框架的应力测定实验	(126)
5.13	拉伸实验	(127)
5.14	压缩实验	(131)
5.15	扭转实验	(133)
5.16	压杆稳定实验	(135)
附录 I	材料力学测试设备和仪器	(138)
一、	机械传动摆式万能试验机	(138)
二、	油压传动摆式万能试验机	(139)
三、	扭转试验机	(140)
四、	YJ-5 型静态电阻应变仪和 P20R-5 型预调平衡箱	(141)
五、	YD-15 型动态电阻应变仪	(143)
六、	x - y 函数记录仪	(145)
七、	YJR-5 型静态数字应变仪	(147)
附录 I	误差分析和数据处理	(152)
I-1	误差的基本概念	(152)
I-2	随机误差的性质与处理	(154)
I-3	系统误差的发现与消除	(159)
I-4	粗大误差的剔除	(162)
I-5	误差合成	(163)
I-6	测量数据处理及测量结果的表示	(165)
I-7	一元线性回归	(169)
I-8	逐级加载法中的线性增量最佳值	(173)
参考文献		(175)

第1章 绪 论

1.1 概 述

任何科学技术的发展都离不开测量和试验。客观世界以其固有的形式存在和不断运动着,人们为了认识和改造客观世界就要以测试工作为基础,来掌握表征物质特性和运动规律的数据。人类最早的测量是从长度、面积、重量、时间等开始的。随着科学技术的进步,人们研究的对象越来越广泛和复杂,对测量的要求也越来越高。可以认为,科学技术的发展、突破与测试技术的水平密切相关。力学测试仅仅是测试技术的一个方面,它主要测试力、力矩、位移、速度、加速度、应力、应变等。力学测试技术水平的提高为航空航天技术的发展提供了可靠的基础。

航空及机械结构中零构件的强度是每个工程设计人员必须解决的重要问题。研究强度问题可以有两种途径,即理论分析和实验应力分析。实验应力分析是用实验方法来分析和确定受力构件的应力、应变状态的一门科学,通过实验应力分析可以检验和提高设计质量、工程结构的安全性和可靠性,并且可以达到减少材料消耗、降低生产成本和节约能源的要求。它还可以为发展新理论、设计新型结构以及新材料的应用提供依据。实验应力分析不仅可以推动理论分析的发展,而且能有效地解决许多理论上尚不能解决的工程实际问题。因此它和应力分析理论一样,是解决工程强度问题的一个重要手段,在航空、机械、土木等工程领域得到广泛的应用。实验应力分析是力学测试的一个重要部分,也是本课程的主要研究内容。

实验应力分析的方法很多,有电测法、光测法、机械测量方法等。随着科学技术和工农业生产的高速发展,对应力和应变测试技术也提出了更高和更新的要求,目前测试技术正在向宏观测试和微观测试纵深发展,由静态向动态、瞬态发展。遥控、远距离和自动化测量等方法越来越广泛的应用。测试技术的水平越高则对科学成就的促进也越深广,反之科学技术领域的新成就也给测试技术提供了丰富的物质条件,这首先反映在测试方法和仪器设备的改进中。例如,半导体技术、激光、光导纤维、声学、遥感、计算机以及自动化技术等。此外,一大批精度高、灵敏度高、测量范围大的传感器的投入使用,促使测试技术得到迅速发展。可以预期,微电子技术和计算机技术的发展将使测试技术发生根本性的变化。

材料力学测试原理及实验是一门综合性基础课程,它涉及的知识面较广,学习者除必须具备应力分析理论外,还必须掌握有关电学、光学等方面的知识。此外,本课程具有很强的实践性,在学习上要密切联系实际,掌握实验方法的基本原理和操作技能。通过本课程学习,应初步达到能对简单零构件强度问题进行测试,并获得可分析处理测试中有关问题的能力。

1.2 测量基本概念

测量就是用一定的工具或仪器设备来确定一个未知量数值的过程。测量方法可分为直接测量和间接测量,直接测量是借助于测量工具或测量仪器把被测量与同性质的标准量进行比

较,例如测量物体的重量,可以通过天平秤将砝码与被测物进行比较。有时则无法将被测量与标准量直接比较,而要作一些变换后才能进行比较,例如用压力表测量容器中的压力时,必须将压力转换成压力表上指针的刻度,同时压力的标准量也被转换到压力表的刻度盘上,这样被测量与标准量都被转换成同性质的位移量(中间量),就可以比较了。以上两种测量方法都是直接测量,但是有许多被测的物理量、机械量,以及生物医药等参量无法用简单的直接测量方法得到,这就要用间接测量方法。间接测量法是对与被测量有确定函数关系的其它物理量(即原始参数)进行直接测量,然后根据函数关系计算出被测量,例如测量某飞行器起飞时的加速度,先将被测的加速度通过相应的传感器转变成电量(参数),并将该电量(参数)放大或转换,再送入显示器或记录仪,或送入计算机处理,从而得到被测的加速度,这就是间接测量。为了使测量结果得到确认,用来进行比较的标准必须准确并得到公认,此外所用的方法和仪器必须经过校验。

采用间接测量方法,要根据测量原理设计一套测量系统,一个完整的测量系统主要包括以下三部分:

1. 传感级:是系统的信息敏感部件,用来感受被测量,并将其转换成与被测量成一定函数关系(通常是线性关系)的另一种物理量(通常为电量)。
2. 中间级:是用来将传感器输出的信号转换成便于传输、显示、记录并进行放大的装置。
3. 终端级:是一个显示器、记录仪或某种形式的控制器,用来显示或记录被测量的大小或输出与被测量相应的控制信号,以供应用。

以上测量系统中,信息传输大都为电量,其缺点是容易受到干扰,影响测量精度。目前发展方向是将传感器信号转换成数字信息,其优点是抗干扰能力强,测量精度高,测量速度快。

当被测量不随时间变换,或随时间变换非常缓慢时,评价一个测量系统的品质主要以测量系统的静态特性来衡量。进行测量时,测量系统的输入和输出关系曲线称为静态特性曲线。测量系统的静态特性,即指静态特性曲线形状的一些性质,主要有以下几个方面:

一、线性度

对于静态特性为线性的测量系统,要求输出量与输入量的关系在理想情况下呈线性,但实际上往往并非如此。如图 1-1 中曲线 a 表示实际静态特性曲线,曲线 b 为曲线 a 的拟合直线。静态特性曲线与拟合直线之间的最大偏差 $|y_i - y_i'|_{\max}$ 与全量程输出范围 $y_{\max}$ 比值的百分数,称为测量系统的线性度,即

$$\text{线性度} = \frac{|y_i - y_i'|_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1-1)$$

线性度说明静态特性曲线与拟合直线的吻合程度。

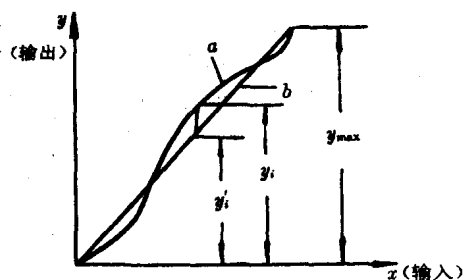


图 1-1 测量系统的线性度

二、灵敏度

灵敏度是指测量系统输出量的变化量 Δy 与输入量的变化量 Δx 的比值,即

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-2)$$

它代表静态特性曲线上相应点的斜率。若静态特性曲线为直线，则灵敏度为常数，若静态特性曲线不是直线，则灵敏度为变量，它随输入量的变化而变化。

三、滞后

滞后表示当测量系统的输入量由小增加到某一值和由大减小到某一值的两种情况下，对于同一输入量其输出量不相同，如图 1-2 所示，同一输入量时的输出量偏差 $|y_d - y_c|$ ，称为滞后偏差。最大滞后偏差 $|y_d - y_c|_{\max}$ 与全量程输出范围 $y_{\max}$ 比值的百分数，称为测量系统的滞后。即

$$\text{滞后} = \frac{|y_d - y_c|_{\max}}{y_{\max}} \times 100\%$$

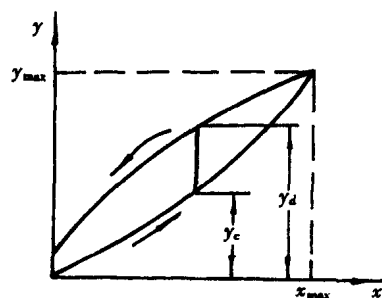


图 1-2 测量系统的滞后

四、灵敏限与分辨率

当输入量由零逐渐加大时，存在着某个最小值，在该值以下，系统不可能检测到输出，但这个最小值一般不易确定，为此规定一个最小输出值，而与它相应的输入值即为系统能够检测到输出的最小输入值，称为灵敏限。

如果输入量从任意非零值缓慢地变化，将会发现在输入量变化值没有超过某一数值之前，系统不可能检测到输出量变化，因此存在一个最小输入变化量。为了便于确定，规定了一个最小输出变化量，而与它相应的输入变化量即为系统能够检测到输出量变化的最小输入变化量，称为分辨率。一般指针式仪表的分辨率规定为最小刻度分格值的一半，数字式仪表的分辨率是最后一位的一个“字”。

五、重复性

当进行多次重复测量时，同样是输入量由小到大或由大到小，对应于同一输入量其输出量亦不相同，这种偏差称为重复性误差。常用全量程中的最大重复性误差与满量程的百分数来表示测量系统的重复性指标。

六、零漂与温漂

当测量系统输入量不变，环境温度不变时，输出量随时间变化，称为零漂。由外界环境温度的变化引起的输出量变化，称为温漂。

当被测量随时间快速变化或具有瞬态现象时，测量系统输出量也随时间变化，这类测量过程称为动态测量。测量系统的品质以系统的动态特性来评价，如振幅响应、频率响应等。

1.3 实验应力分析方法

实验应力分析方法很多，下面简单介绍电测法、光测法及机械测量法。

一、电测法

有电阻、电容、电感测试等多种方法，其中以电阻应变测试方法应用较为普遍。电阻应变测试方法是用电阻应变片测定构件表面的应变，再根据应变-应力关系确定构件表面应力状态。工程中常用这种方法来测量模型或实物表面不同点的应力，它具有较高的灵敏度和精度，由于测量时输出的是电信号，因此易于实现测量数字化和自动化，并可进行遥测。电阻应变测量可以在高温、高压、高速旋转、强磁场、液下等特殊条件下进行，此外还可以对动应力进行测量。由于电阻应变片具有体积小、重量轻、价格便宜等优点，且电阻应变测试方法具有实时性、现场性，因此它已成为实验应力分析中应用最广的一种方法。它的主要缺点是，一个电阻应变片只能测量构件表面一个点在某一个方向的应变，不能进行全域性的测量。

二、光测法

包括光弹性法、全息干涉法、激光散斑干涉法、云纹法等，其中以光弹性法应用比较广泛，它是利用偏振光通过具有双折射效应的透明受力模型从而获得干涉条纹图，由于干涉条纹与模型内主应力的方向和大小有一定关系，因此可以直接观察到模型的全部应力分布情况，特别是能直接观察到应力集中部位，并可迅速确定应力集中系数。此外，光弹性法不仅可以测定模型的边界应力，而且可以测定模型的内部应力。这种方法的缺点是周期长，成本较高。

三、机械测试法

该方法是利用引伸仪测定试件的变形，从而得到其在载荷作用下的应变。由于变形一般都很小，所以要经过放大后才能指示。常用的放大机构有杠杆和齿轮两种，前者称为杠杆引伸仪，后者称为表式引伸仪。由于引伸仪体积大，重量较重，使用不方便，所以已逐渐为其它方法所代替。

第2章 电阻应变测量原理及方法

2.1 概 述

电阻应变测量技术是用电阻应变片测量构件的表面应变，再根据应力应变的关系式，确定构件表面应力状态的一种实验应力分析方法。

用电阻应变片测量应变的大致过程如下：将作为检测元件的电阻应变片粘贴或安装在被测构件表面上，然后接入测量线路（电桥或电位计式线路）。当构件变形时，电阻应变片的栅丝随之变形，导致其电阻值发生相应的变化，此变化是构件表面应变的函数。测量线路由于应变片电阻变化而产生的输出信号经放大线路放大后，由指示仪表或记录仪器指示或记录。这是一种将机械量转换为电量的方法，其转换过程如图 2-1 所示。测量线路的输出信号经放大后也可以送数据采集系统由计算机按预定的要求进行处理。电阻应变测量系统可看成由电阻应变片、电阻应变仪及记录器三部分组成。



图 2-1 电阻应变测量过程示意图

电阻应变片测量技术起源于 19 世纪。1856 年，W·汤姆逊 (W. Thomson) 对金属丝进行了拉伸试验，发现金属丝的应变和电阻的变化有一定的函数关系；惠斯登电桥可用来精确地测量这些电阻的变化。1938 年，E·西门斯 (E. Simmons) 和 A·鲁奇 (A. Ruge) 制出了第一批实用的纸基丝绕式电阻应变片。1953 年，P·杰克逊 (P. Jackson) 利用光刻技术，首次制成了箔式应变片，随着微光刻技术的进展，这种应变计的栅长可短到 0.178mm。1954 年，C·S·史密斯 (C. S. Smith) 发现半导体材料的压阻效应。1957 年，W·P·梅森 (W. P. Mason) 等研制出半导体应变片，其灵敏系数比金属丝应变片高 50 倍以上。现在已有用于不同环境和条件的各种类型的电阻应变片，还有用于测量残余应力和应力集中等的特殊应变片。各种不同规格、不同品种的电阻应变片已有二万多种。

自从电阻应变片问世以来，相继出现了专门的应变测量仪器。早期的电阻应变测量仪器，用直流电桥和检流计显示的方法测量应变，其灵敏度和精度都比较差，不能满足要求。到了 20 世纪 40 年代，出现了由可调节的测量电桥和放大器组成的电阻应变仪，使电阻应变测量技术在工程技术和科学实验领域内获得广泛的应用。为了克服直流放大器信息的漂移和线性精度差等缺点，传统的电阻应变仪都采用交流放大器，以载波放大方式传递信号，这种仪器的性能稳定，其精度能满足一般的测试要求，但它的工作频率受载波频率的限制，而且存在电容、电感影响测量精度等问题。60 年代，出现了采用直流放大器的电阻应变仪。继而电阻应变仪日益向数字化、自动化和多功能方向发展，现已有用于静态应变测量的数字应变仪和多点自动巡回检测的应变测量装置，以及用于动态应变测量的数据采集处理系统等产品。

电阻应变测量技术是实验应力分析中应用最广泛和适应性最强的手段之一，可用于进行

各种机械和工程结构的强度及寿命的诊断与评估。按被测构件所受载荷的特性,电阻应变测量技术可分为静态应变测量和动态应变测量两类。对永远恒定的载荷或短时稳定的载荷的测量,称为静态测量;对载荷在 2~1200Hz 范围内变化的测量,称为动态测量。不同的工作温度对电阻应变片和导线等有不同的要求,一般将应变测量按工作温度分为五个区段:

- (1) 常温应变测量:工作温度为 $-30\sim 60^{\circ}\text{C}$;
- (2) 中温应变测量:工作温度为 $60\sim 300^{\circ}\text{C}$;
- (3) 高温应变测量:工作温度在 300°C 以上;
- (4) 低温应变测量:工作温度为 $-30\sim -100^{\circ}\text{C}$;
- (5) 超低温应变测量:工作温度在 -100°C 以下。

本章主要介绍电阻应变片的工作原理、工作特性以及常规使用技术,着重讨论电阻应变测量电路及仪器的基本原理和测量技术,并讨论常温静态电阻应变测量技术,简单介绍应用电阻应变片作为敏感元件的传感器技术。

2.2 电阻应变片

一、电阻应变片的工作原理

应变片的工作原理需从一段直的金属丝说起。实验表明,绝大部分金属丝受到拉伸(或缩短)时,电阻值会增大(或减小),这种电阻值随变形发生变化的现象,叫做电阻应变效应。电阻应变片就是基于金属导体的电阻应变效应制成的。

现在对金属丝电阻与应变之间的关系作一简单分析。

由物理学可知,长度为 L 、横截面积为 A 和电阻率为 ρ 的均匀金属丝,其电阻值 R 由下式给出

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

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(2-1)的微分得到,对式(2-1)进行微分,并除以总电阻 R ,得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2-1(a))$$

式中: $\frac{dL}{L}$ ——为导线长度的相对变化,即应变 ϵ ; dA 为金属丝中横向应变所造成的横截面面积的改变。由于横向应变等于 $-\mu\epsilon$,如果把金属丝受轴向应变之前的直径记作 D ,那么受应变以后的直径为

$$D' = (1 - \mu\epsilon)D \quad (2-1(b))$$

式中: μ ——为金属丝材料的泊松比。由式(2-1(b))可得

$$\frac{dA}{A} = -2\mu\epsilon + (\mu\epsilon)^2 \approx -2\mu\epsilon \quad (2-1(c))$$

将上式代入式(2-1(a))得

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

令

$$K_s = \frac{\frac{dR}{R}}{\epsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\epsilon} \quad (2-3)$$

于是

$$\frac{dR}{R} = K_s \epsilon \quad (2-4)$$

K_s 称为单根金属丝的应变灵敏系数。式 (2-4) 表明了金属丝的电阻变化率与其轴向应变之间的关系, 如果 K_s 为常数, 则关系为线性的。应变片就是利用金属的这种电阻应变效应制成的。式 (2-3) 表明, 导体 (如金属丝) 的应变灵敏度由两个因素引起, 一个是导体尺寸的改变, 由 $(1+2\mu)$ 项来表示; 另一个是电阻率的改变, 由 $(d\rho/\rho)/\epsilon$ 项来表示。

在弹性范围内, 金属材料的 $(1+2\mu)$ 值一般在 1.4 和 1.8 之间, 从表 2-1 列出的几种常用金属材料的灵敏系数值, 可以看到, 金属导线变形后其电阻率发生了变化。

目前生产的电阻应变片大多数是用名为康铜的铜镍合金制成的。图 2-2 给出了一个典型曲线, 表明这种合金电阻改变量 $\Delta R/R$ 的百分率与应变之间的函数关系。

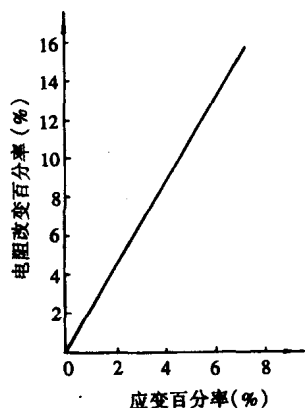


图 2-2 一种康铜合金的电阻变化率与应变百分率之间的关系

表 2-1 几种常用金属材料的灵敏系数

材料名称	主要成分 (%)	灵敏系数 K_s
康铜合金	Cu55, Ni40.1, Mn4.5	2.0~2.1
镍铬 V 合金	Ni80, Cr20	2.1~2.3
卡玛合金	Ni74, Cr20, Al3, Fe3	2.1~2.4
恒弹性合金	Fe55.5, Ni36, Cr8, Mo0.5	3.2
铁铬铝合金	Fe67, Cr25, Al5.4, V2.6	2.6~2.8
铂钨合金	Pt91.5, W8.5	3.2

康铜的电阻变化率与应变成线性关系的范围很宽 (甚至可延伸到该合金的塑性范围), 在一个很大的应变范围内, 应变灵敏系数 K_s 是一个常数。对大多数结构材料来说, 既可以用它来测量弹性应变, 又可以用它来测量塑性应变。因此康铜在应变片中应用非常广泛。

二、电阻应变片的构造

单用一根金属丝作为敏感元件以测量应变, 在理论上是可能的。然而, 为了防止电源超载, 并使金属丝中电流所产生的热量不要太大, 金属丝的电阻值不能太小, 对金属丝的阻值给定一个下限: 约为 100Ω 。于是若用直径为 0.025mm 且电阻为 $1000\Omega/\text{m}$ 的金属丝制造一个 100Ω 的应变计, 就要求单根丝长为 100mm 。应变测量时, 往往要求测量构件表面一点处的应变。把电阻丝做成栅状, 并可直接粘贴于构件表面的粘贴式应变片, 使电阻丝长度问题和应变片安装问题自然得到了解决。

电阻应变片主要由敏感栅、基底、引线、粘结剂和覆盖层五部分组成。一种丝绕式应变片的典型结构如图 2-3 所示。

1. 敏感栅是用金属丝 (或金属箔光刻) 制成的应变转换元件, 是构成电阻应变片的主要部分。为了使应变片有足够的电阻值, 把一定长度的金属丝做成栅状。常用的材料如表 2-1 所

列, 丝的直径约为 $0.015\text{mm} \sim 0.05\text{mm}$, 以 0.025mm 直径最为常用。敏感栅由纵栅与横栅两部分组成, 纵栅的中心线称为应变片的轴线。敏感栅的尺寸用栅长 L (横栅为圆弧形时, 指两端圆弧内侧之间的距离; 横栅为直线形时, 则为两端横栅内侧之间的距离) 和栅宽 B (在与纵轴垂直的方向上, 敏感栅外侧之间的距离) 表示, 参见图 2-4。栅长一般在 $0.2 \sim 100\text{mm}$ 之间。

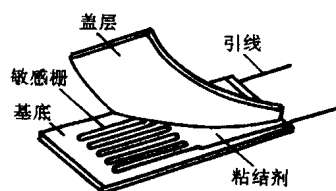


图 2-3 应变片的构造

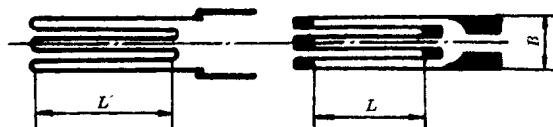


图 2-4 敏感栅的尺寸

2. 引线作为测量敏感栅电阻值时与外部导线连接之用, 一般采用直径 $0.15 \sim 0.3\text{mm}$ 的镀银、镀锡或镀合金的软铜丝。制片时先将其与敏感栅焊接在一起。因为敏感栅丝直径比引出线细得多, 焊接处容易折断, 使用时须特别小心。

3. 基底的作用是保持敏感栅的几何形状和相对位置, 而盖层是用来保护敏感栅的。基底必须能保证金属丝和被测试件之间绝缘, 并要求基底有一定的机械强度、热稳定性及易于粘贴。基底和盖层常用的材料有纸、有机树脂膜、复合材料及金属薄片等。

4. 粘结剂是用来将敏感栅固结在覆盖层和基底之间的, 粘结剂粘结强度要高, 绝缘性要好。常用的有环氧树脂类和酚醛树脂类粘结剂等。

三、电阻应变片的主要性能

不同工作条件下, 电阻应变片为满足正常工作要求而应具有的性能项目很多。下面仅叙述其中主要性能的含义、对应变测量的影响以及影响这些性能的因素。

(一) 应变片电阻 (R)

它是指应变片在未经安装也不受力的情况下, 于室温时测定的电阻值。应变片电阻值的选定主要根据测量对象和测量仪器的要求。由于电阻应变仪中测量电桥的桥臂电阻一般按 120Ω 设计, 故国产的应变片电阻值大多为 120Ω 左右。也有 60Ω 、 250Ω 、 300Ω 、 500Ω 、 1000Ω 等阻值的应变片。

制造厂对应变片的电阻值逐个测量, 并按阻值分装成包, 注明每包应变片电阻的平均值以及单个阻值与平均阻值的最大偏差。

(二) 灵敏系数 (K)

应变片的灵敏系数是指: 在应变片轴线方向的单向应力作用下, 应变片电阻值的相对变化 $\Delta R/R$ 与安装应变片的试件表面上沿应变片轴线方向的应变 ϵ 之比值, 即

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \epsilon \quad (2-5)$$

因此, K 是反映电阻应变片对构件表面单位应变所产生的电阻相对变化量。它的大小主要取决于敏感栅材料的灵敏系数 K_s , 但两者又不相等。这主要有两个原因: (1) 由于横栅的存在, 使制成敏感栅之后的灵敏系数 K 小于丝材的灵敏系数 K_s , 差别的大小与敏感栅的结构形式和几何尺寸有关。(2) 试件表面的变形是通过基底和粘结剂传递给敏感栅的, 如图 2-5 所示。

由图可以看出,即使电阻应变片下面试件的应变是均匀分布的,电阻丝各截面的应变也不是常数,由于端部过渡区的存在,又使应变片的灵敏系数小于敏感栅丝的灵敏系数,此差数不仅与基底和粘结剂的种类及其厚度有关,还受粘结剂的固化程度以及应变片安装质量的影响。因此应变片的灵敏系数 K 受到多种因素的影响,无法由理论得到。它由制造厂家经抽样在专门的设备上,进行标定,并于包装上注明其平均名义值和标准误差。

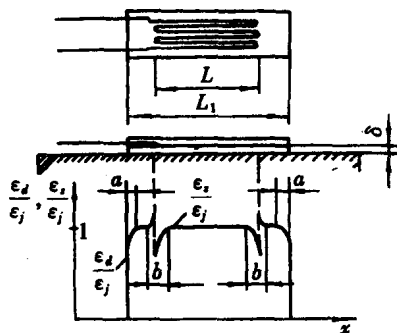


图 2-5 应变片的变形传递

(三) 横向效应系数 (H)

通常要求应变片的指示应变值只反映构件表面的应变片轴线方向的应变。然而,应变片的敏感栅中除了有纵栅外,还有圆弧形或直线形的横栅,横栅的电阻变化是由于构件表面轴向应变和横向应变共同作用的结果,因而应变片的指示应变中包含有横向应变的影响,这就是应变片的横向效应。应变片横向效应的大小用横向效应系数 H 来衡量。

将应变片贴于平面应变场中,若沿应变片轴线方向的应变记为 ϵ_x ,垂直于轴线方向的横向应变记为 ϵ_y ,剪应变记为 γ_{xy} ,则应变片敏感栅的电阻相对变化可表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \epsilon_x + K_y \epsilon_y + K_{xy} \gamma_{xy}$$

式中: K_x ——应变片对轴向应变的灵敏度;

K_y ——应变片对横向应变的灵敏度;

K_{xy} ——应变片对剪应变的灵敏度。

一般来说,应变片对剪应变的灵敏度是很小的,可以忽略。因此应变片的响应可表示成

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \epsilon_x + K_y \epsilon_y \quad (2-6)$$

把横向应变灵敏度与轴向应变灵敏度的比值称为横向效应系数 H ,即

$$H = \frac{K_y}{K_x} \times 100\% \quad (2-7)$$

横向效应系数的大小表示了应变片横向效应的大小。横向效应的存在,可能导致应变测量中的误差。电阻应变片的横向效应与其敏感栅的结构形式和尺寸有关,它还与基底和粘结剂的材料泊松比、固化过程有关。因此,通常应变片横向效应系数 H 是在能产生单向应变的专用测试设备上,用实验方法测定的。

(四) 温度效应

当电阻应变片安装在无外力作用、无约束的构件表面上时,在温度变化的情况下,它的电阻会发生变化的现象,称为电阻应变片的温度效应。这是由于温度变化时,应变片敏感栅材料的电阻率会发生变化;并且,应变片和构件都会因温度变化而产生变形,从而使应变片的电阻值随温度变化而变化。这种温度效应将影响电阻应变片测量构件表面因受力而产生的应变的准确性。通常,将由温度效应产生的应变片的电阻相对变化所对应的应变值,称为热输出(又称视应变)。

设温度变化为 ΔT ,且应变片的灵敏系数 K 随温度变化可略去,则应变片的热输出 ϵ_t 为

$$\epsilon_t = \frac{1}{K} \alpha_T \Delta T + (\beta_e - \beta_g) \Delta T \quad (2-8)$$

式中: α_T ——敏感栅材料的电阻温度系数 ($\Omega/\Omega \cdot ^\circ\text{C}$);

β_g ——敏感栅材料的线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$);

β_c ——构件材料的线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$)。

由式 (2-8) 可见, 电阻应变片的温度效应主要取决于敏感栅和构件材料的性能和温度变化范围。但实际上, 它还与基底和粘结剂材料、应变片制造工艺和使用条件等有关。例如, 在高温下, 敏感栅材料不仅电阻率发生变化, 而且灵敏系数也随温度有明显变化。电阻应变片的热输出值是通过实验方法测定的。通过数据修正、线路补偿等方法可减少电阻应变片温度效应对应变测量结果的影响。

(五) 稳定性

电阻应变片的稳定性是指在工作条件恒定的情况下, 经历规定的时间后, 仍能保持原有性能参数的能力。它是反映电阻应变片长期静态工作能力的重要性能。通常, 电阻应变片的稳定性用应变片的电阻值漂移和蠕变大小来表示。

1. 应变片的电阻值漂移, 是指在工作温度恒定, 安装在未承受外力作用的构件表面的应变片电阻值随时间的变化。常温下产生漂移, 主要是由于敏感栅、基底和粘结剂等材料在应变片的制造或安装过程中, 内部形成的应力缓慢释放所致。所产生的电阻相对变化较小。在高温下, 漂移还会因应变片材料的性能变化或被氧化等影响而增大。

2. 应变片的蠕变, 是指在工作温度恒定, 安装在承受外力但变形恒定的构件表面的应变片电阻值随时间的变化。其原因主要是粘结剂和基底在传递应变时出现缓慢蠕动所致。

(六) 机械滞后 (Z_j)

在恒定温度下, 对安装有应变片的试件加载和卸载, 以试件的机械应变为横坐标, 应变片指示应变为纵坐标绘成曲线 (图 2-6), 加载与卸载曲线不相重合, 这种现象称为机械滞后。机械应变是指在机械载荷作用下试件产生的应变; 指示应变是指从电阻应变仪上读出的应变片的应变。机械滞后量, 以加载曲线与卸载曲线中两个指示应变的最大差值 Z_j 来表示。

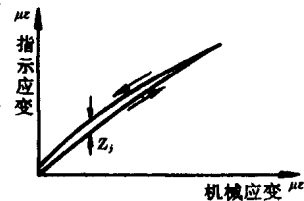


图 2-6 应变片的机械滞后

机械滞后现象总是存在的, 它是由于敏感栅、基底和粘结剂在承受机械应变后产生残余变形所致。为了减小机械滞后量, 可在正式测量前预先加、卸载若干次。

(七) 应变极限 (ϵ_{lim})

在恒定温度下, 对安装有应变片的试件逐渐加载, 直至应变片的指示应变与试件的机械应变的相对误差达到 10%, 此时的机械应变即作为该应变片的应变极限。在一批应变片中, 按一定百分率抽样测定应变片的应变极限, 取其中最小的应变极限作为该批应变片的应变极限。

(八) 绝缘电阻 (R_i)

应变片的绝缘电阻是指应变片的引线与被测试件之间的电阻值。绝缘电阻愈小, 由于分流作用, 使得流经敏感栅的电流愈小, 其中一部分电流会流经被测试件, 致使测量灵敏度降低。提高绝缘电阻的方法主要是选用绝缘性能好的粘结剂和基底材料。

(九) 疲劳寿命 (N)

在幅值恒定的交变应力作用下, 应变片连续工作, 直至产生疲劳损坏时的循环次数, 称为应变片的疲劳寿命。当应变片出现以下任何一种情况时, 即认为是疲劳损坏: 1. 敏感栅或

引线发生断路；2. 应变片输出幅值变化达 10%；3. 应变片输出波形上出现尖峰。疲劳寿命是反映应变片对动态应变适应能力的参数。

表 2-2 列出了不同质量等级的常温应变片各项工作性能。

表 2-2 常温应变片工作特性

工作特性	说 明	质量等级		
		A	B	C
应变片电阻	对标称值的偏差 (%)	1	3	6
	对平均值的公差 (%)	0.2	0.4	0.8
灵敏系数	对平均值的标准误差 (%)	1	2	3
机械滞后	室温下 ($\mu\epsilon$)	5	10	20
蠕变	室温下 ($\mu\epsilon/h$)	5	15	25
应变极限	室温下 ($\mu\epsilon$)	10000	8000	6000
绝缘电阻	室温下 ($M\Omega$)	1000	500	500
横向效应系数	%	1	2	4
疲劳寿命	循环次数	10^7	10^6	10^5

四、电阻应变片工作特性的标定

应变片的各项工作特性需在专门的设备上抽样标定。在有关的技术标准中，规定了应变片工作特性的标定设备和标定方法等。下面仅介绍应变片灵敏系数和横向效应系数的标定方法。

(一) 灵敏系数的标定

按照应变片灵敏系数的定义，在进行标定时，应采用一单向应力状态的试件，通常用纯弯曲梁，如图 2-7 (a) 所示。载荷 P 通过加载梁施加在标定梁的 C_1 、 C_2 两点，使得 C_1C_2 段为纯弯曲区，故沿该段长度方向为单向应力状态，其上下表面的应变大小相等，方向相反。将

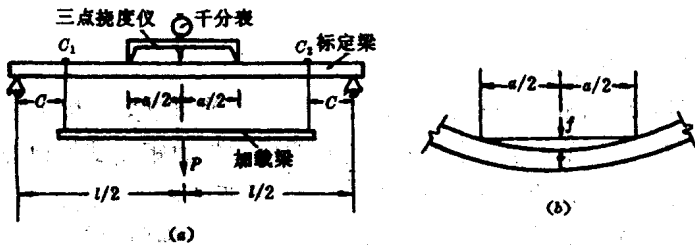


图 2-7 纯弯曲梁受力及变形图

被测应变片安装在梁纯弯曲区的上下表面，且其轴线与梁的轴线方向一致。在 C_1C_2 段中间安装一个三点挠度仪。当梁弯曲时，由挠度仪上的千分表可读出测量挠度 f (即梁在三点挠度仪长度 a 范围内的挠度)。由图 2-7 (b)，根据材料力学公式和几何关系，可求出纯弯曲区上下表面的轴向应变与测得挠度 f 的关系为

$$\epsilon = \frac{hf}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + f^2 + fh} \quad (2-9)$$

式中 h 为标定梁截面厚度。如果用惠斯登电桥直接测量出在该载荷作用下应变片的电阻值相对变化值 $\Delta R/R$ ，则可由式 (2-5) 计算得到应变片的灵敏系数。

$\Delta R/R$ 值的测定一般采用精度较高的电阻应变仪。若电阻应变仪的灵敏系数和读数应变

分别以 K_0 和 ϵ_d 表示, 则 $\Delta R/R$ 值可由下式求得

$$\Delta R/R = K_0 \epsilon_d \quad (2-10)$$

因此可得到应变片的灵敏系数为

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \epsilon = K_0 \epsilon_d / \epsilon \quad (2-11)$$

于是, 用应变片灵敏系数 K 将电阻值的相对变化与应变片轴向应变联系起来, 便有

$$\frac{\Delta R}{R} = K \epsilon \quad (2-12)$$

应当注意, 在上述标定中, 梁表面各点不仅有轴向应变 ϵ_x , 而且还存在横向应变 $\epsilon_y = -\mu_0 \epsilon_x$ (μ_0 为标定梁材料的泊松比, 一般用钢梁 $\mu_0 = 0.285$), 应变片感受到的是一平面应变场。电桥测量所得到的电阻变化应该包括对轴向应变和横向应变两部分响应的综合结果。由式 (2-6) 有

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \epsilon_x + K_y \epsilon_y = K_x \epsilon_x \left(1 + H \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \right) \quad (2-13)$$

将 $\epsilon_y = -\mu_0 \epsilon_x$ 代入式 (2-13), 并且注意到 ϵ_x 为梁的纵向应变 ϵ , 则

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x (1 - \mu_0 H) \epsilon \quad (2-14)$$

由式 (2-14) 可见, 这种标定方法实际上将横向应变对电阻变化的贡献包含于 K 的定义之中了。

由式 (2-12) 和式 (2-14) 可以看出, 应变片作为测量其轴线方向应变的敏感元件, 理想情况应该是只对沿其栅长方向应变敏感, 即要求横向效应系数 $H=0$ 。可惜, 各类应变片都不能做到 $H=0$, 因此, 应变片使用时, 用标定的灵敏度系数来描述电阻变化与其轴线方向应变关系的式 (2-12) 成立的条件是: (1) 被测构件处于单向应力状态; (2) 应变片的纵向与构件应力方向平行; (3) 被测构件的泊松比与标定梁的泊松比相等, 否则, 根据标定 K 值利用式 (2-12) 进行应变测量, 就会产生误差。

(二) 横向效应系数的标定

标定应变片横向效应系数时, 一般采用图 2-8 所示的单向应变场标定装置。其顶部工作区的试件厚度仅 6mm 左右, 而两边尺寸较大。若在两侧边加力矩使试件顶部产生弯曲变形时, 由于沿 x 轴方向较易变形, 而沿 y 轴方向应变很小, 接近于零, 因此可以认为顶部工作区为沿 x 轴方向的单向应变场。利用这种单向应变场试件, 可精确而简单地测定出应变片的横向效应系数。

将同一批中的几个应变片粘贴在试件顶部工作区表面, 使它们的轴线分别平行和垂直于单向应变方向。轴线为 x 方向的应变片, 其轴向应变以 ϵ_{x0} 表示, 横向应变为零; 而轴线为 y 方向的应变片, 其轴向应变为零, 横向应变则等于 ϵ_{x0} 。由式 (2-6), x 向和 y 向应变片的响应分别为

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_x &= K_x \epsilon_{x0} \\ \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_y &= K_y \epsilon_{x0} \end{aligned}$$

因此, 由式 (2-7) 及上两式可得到

$$H = \frac{(\Delta R/R)_y}{(\Delta R/R)_x} \times 100\% \quad (2-15)$$