

中等专业学校教学用书

轧钢测试技术

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书

轧钢测试技术

重庆钢铁专科学校 喻廷信 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北海沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 16 字数 382 千字

1986年11月第一版 1986年11月第一次印刷

印数00,001~5,000册

统一书号: 15062·4502 定价1.85元

前 言

本书系根据一九七八年冶金中等专业学校教材工作会议制订的轧钢专业教学计划编写的。初稿写成后曾在一些学校试用。在征求部分试用学校意见的基础上，于一九八五年在重庆召开审稿会议。根据审稿会议意见进行了修改。

本书共十章：第一章电阻应变片，第二章测量电路，第三章电阻应变仪，第四章记录仪器，第五章力参数测量，第六章板带钢尺寸测量，第七章其它参数测量，第八章轧钢设备的综合测定，第九章测量误差分析与数据处理，第十章超声波检测。

本书作为中专金属压力加工专业和轧钢专业测试技术课程教材，也可作为专科学校、职工大学和技工学校相应专业的教学参考书，也可供从事测试技术工作的工程技术人员和科研人员参考。

本书是参照国内有关资料及书籍，以及我们在教学和现场实际测试中的粗浅体会编写的，目的在于使学生能掌握有关测试技术的基本理论和方法，并通过实际操作培养学生具有一定的实验技能。

本书由重庆钢铁专科学校喻廷信主编。参加编写的有鞍山钢铁学校龙春样（编写第六、七和第九章）；上海冶金工业学校杨征宇（编写第五章）；重庆钢铁专科学校喻廷信（编写绪论、第一、二、三、四、八和第十章）。

本书由北京钢铁学院黎景全主审，参加审稿的还有重庆钢铁专科学校副教授刘国楷，重庆大学张德一，鞍山钢铁学院平鹏，上海冶金专科学校刘文泉，承蒙审阅的各位老师对初稿提出了很多宝贵意见，特在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，经验不足，加之时间仓促，因此书中错误和不当之处在所难免，希望读者批评指正。

编 者

一九八五年十月

目 录

绪论	1
第一章 电阻应变片	4
第一节 电阻应变片的工作原理及构造	4
第二节 电阻应变片的工作特性	7
第三节 电阻应变片的种类和选用	14
第四节 电阻应变片的粘贴	19
第五节 电阻应变片的防护	22
第二章 测量电路	24
第一节 直流电桥电路	24
第二节 电桥特性	33
第三节 交流电桥电路	38
第四节 双电桥电路	43
第五节 电位计式电路	44
第三章 电阻应变仪	46
第一节 电阻应变仪的组成及工作原理	49
第二节 电阻应变仪中的电桥调制及放大器	52
第三节 电阻应变仪的相敏检波器及滤波器	57
第四节 电阻应变仪的振荡器	61
第五节 电阻应变仪的使用	64
第六节 宽频带直流应变仪	71
第四章 记录仪器	74
第一节 光线示波器	74
第二节 磁带记录器	92
第三节 自动平衡记录仪	98
第五章 力参数测量	103
第一节 应力测量	103
第二节 测力传感器	110
第三节 轧制压力及轧制力矩测量	123
第四节 轧制力矩测量	137
第五节 轧件张力测量	148
第六节 拉拔力和挤压力测量	150
第六章 板带钢尺寸测量	152
第一节 厚度测量的基本原理	152

第二节	射线测厚仪表	153
第三节	轧件长度测量	159
第四节	轧件宽度测量	160
第五节	辊缝测量	162
第七章	其它参数测量	165
第一节	电参数测量	165
第二节	温度测量	171
第三节	转速测量	184
第八章	轧钢设备的综合测定	188
第一节	初轧机测定	188
第二节	型钢轧机测定	193
第三节	钢板轧机测定	195
第四节	钢管轧机测定	195
第五节	钢坯剪切机测定	196
第六节	辊式矫直机测定	198
第七节	现场综合测定的组织工作	202
第九章	测量误差分析与数据处理	204
第一节	误差的基本概念	204
第二节	有效数字与计算法则	206
第三节	系统误差的消除	207
第四节	随机误差	208
第五节	可疑数据的舍弃	209
第六节	实验数据表示方法	211
第十章	超声波检测	216
第一节	超声波检测的物理基础	216
第二节	超声波检测的基本原理及换能器	222
第三节	声参数的测量方法	224
第四节	超声波在轧钢生产中的应用	227
参考文献		250

绪 论

一、测试技术在科学技术和工业生产中的作用

“测试技术”是随科学技术的发展而发展起来的一门新兴的技术科学，迄今已发展成为一个相当宽广的科学领域。在工业、农业、国防和交通等各个生产和科学研究部门中，它作为一种揭示客观规律的有力技术手段而得到极其广泛的应用，并正起着愈来愈大的作用。在科学技术的发展过程中，一些研究成果，必须通过实验来验证它的可靠性和可行性，这就需要一定的测试手段来完成；在工业生产过程中，为了保证正常、高效率的生产，也要有一定的测试手段进行检查和监视；对生产的产品，也必须通过测试来鉴定。因此，不论科学技术的发展，还是工业生产水平的提高都与测试技术的发展密切相关，现代化测试手段的可能性（精确度、灵敏度以及测试范围等）在很大程度上决定了科学技术的发展水平。测试技术的水平愈高，则科学技术成就愈为深广，可以这么说，没有现代化的测试技术，要发展国民经济是困难的，甚至是不可能的。同时科学技术的发展又为测试技术的发展提供了新的前提和新的途径，也提出了新的课题。

二、测试技术研究的内容

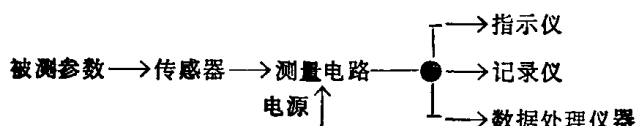
近二、三十年来，由于电子技术的飞速发展，对电量的测量技术相应地得到提高。可是，在科学技术和工程上所要测的参数大多是非电量（如拉压力、扭矩、张力、振动、位移和速度等）、热工量（温度、流量和物位等）、成分量和内部缺陷等，因而人们研究用电测的方法来测量非电量，这就形成了一门叫做非电量电测技术的测试技术，目前它是测试技术的组成部分之一，它包括电磁检测（电阻式、电感式、振频式等）、光学检测（光电式、激光式、红外式、光栅和光学纤维式等）、超声检测、微波检测和同位素检测等等。

非电量电测技术包括两方面的内容：一是研究用电测法测量非电量的仪器；另一个是研究如何正确地测得非电量的技术，也就是如何把非电量信号，如力信号，位移信号等通过传感器变换成电信号，而后对电信号进行各种中间变换来最后达到测量之目的。前者在电测技术中研究，后者是测试技术研究的主要内容。

非电量电测技术属于无损检测技术，具有测量精度高，响应速度快、能自动、连续地进行测量；也可进行遥测，便于自动记录；还可与电子计算机联接进行处理，采用微处理机做成智能仪器；适用范围广（如高温、高压、高速、具有放射性干扰等），所以很快地在各个科学技术部门得到广泛地应用。

三、测试系统

一个完善的测试系统，包括信息的获得、转换、显示和处理等几部分，具体地说，它包括传感器、测量电路、放大电路、指示器或记录器，有时还有数据处理仪器，它们间的关系如下：



传感器是一个把被测的非电量转换成电量的装置，因此是一种获得信息的手段，它在非电量电测系统中占有重要的位置，它获得信息的正确与否，关系到整个测量系统的精度，如果传感器的误差很大，后面的测量电路、放大器和指示仪的精度再高也难以提高测量系统的精度。传感器在超声检测仪器中又称换能器。

测量电路的作用是把传感器的输出变量变成电压或电流信号，以便能在指示仪上指示或记录仪中记录。测量电路的种类常由传感器的类型而定，如电阻式传感器需要采用一电桥电路把电阻值转换成电流或电压输出，所以它是属于信号的转换部分。由于测量电路的输出信号一般比较小，为了能使指示仪工作或记录机构运动，常常需要将信号放大，所以在测量电路中一般还带有放大器。

指示仪或记录仪的作用是显示测量数值。显示的方式有模拟显示、数字显示和图像显示。模拟显示就是利用指针对标尺的相对位置来表示读数，常用的有毫伏表，毫安表，微安表等指示仪表。数字显示是用数字形式来显示读数，实际是一只数字电压表，数字电流表或数字频率计。图像显示是用屏幕显示读数或者被测参数变化的曲线。在测量过程中，有时不仅要读出被测参数的数值，而且还要了解它的变化过程，特别是动态过程的变化，根本无法用显示仪表指示，那么就要把信号送至自动记录仪自动记录下来，现在常用的自动记录器有笔式记录仪，光线示波器和磁带记录器等。

四、设置本课程的目的和任务

设置本课程之目的在于使学生通过轧钢测试技术的基础理论学习和实验，初步掌握轧钢测试的方法和技能，为以后的生产实验和科学实验打下一定的基础。

轧钢测试技术的任务是：

（1）摸清现有设备的负荷水平，在保证设备安全运转条件下，充分发挥现有设备潜力，以达到高产、优质、低成本之目的；

（2）通过对现有设备和新安装设备主要部件的受力状态、运动规律的测试，从而判断该设备的性能是否符合设计要求；

（3）利用现代的测试手段研究和鉴别生产过程中发生的各种物理现象，以对现有工艺、设备、产品质量等进行剖析，明确进一步改进方向；

（4）通过对测试结果的综合分析，可为科研人员验证现有理论和建立新理论、设计人员确定最佳设计方案、工艺人员确定最佳工艺参数等提供科学依据；

（5）在自动化生产过程中，通过对力能参数的检测来调节和控制生产过程。

轧钢测试技术常测量以下参数：

- 1）力参数：力、力矩、张力等；
- 2）工艺参数：轧件宽度、厚度、长度和温度等；
- 3）电参数：电流、电压和电功率等；
- 4）运动参数：位移、速度、加速度和转角等；
- 5）检查产品缺陷位置、性质及几何尺寸等。

五、本门课程的学习方法

“轧钢测试技术”其主要内容是介绍非电量电测技术问题，它是一门边缘科学，是利用电学、声学等的原理和方法去解决轧制中的问题，因此，它除与专业课密切相关外，还涉及到数学、力学、电学、光学和化学等方面的基础知识。在学习过程中，一定要注意复习基

基础知识。

“轧钢测试技术”是一门实践性非常强的科学，要掌握这门科学除学习基本理论外，还要做好实验，掌握熟练的测试技巧，因为试验的成功与否，不仅仅决定于对测试基本理论的掌握，也决定于测试过程中的操作是否正确。这就要求在实践工作中结合实际，亲自实践，理论联系实际，不断摸索，逐步提高操作水平。

测试的目的是为了探知未知量的确切数值，但测量值与真值之间总存在着一定的差别，即测量值总存在一定的误差，随着科学技术水平的发展，测试水平的不断提高，操作愈熟练、细心，误差值也就愈小，但永远不会使误差为零，即测量值永远不会等于真值。因此，测试结束后用一定的误差理论和数据分析手段，舍弃偶然误差，消除系统误差，可得出反映实际的最佳数据。

第一章 电阻应变片

第一节 电阻应变片的工作原理及构造

一、电阻应变片的工作原理

为了说明电阻应变片的工作原理，先介绍一段直的金属导线的应变——电阻效应。

由物理学知道，金属导线的电阻值 R 与其长度 L 成正比，与其横截面积 S 成反比，用公式表示为

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

式中 ρ ——金属导线的电阻率。

如果金属导线沿其轴线方向产生变形，则其电阻值也随之发生变化，这一物理现象称为金属导线的应变——电阻效应。为了说明产生这一效应的原因，可将式 (1-1) 取对数得

$$\ln R = \ln \rho + \ln L - \ln S \quad (1-2)$$

对式 (1-2) 微分得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} \quad (1-3)$$

式中 dL/L 为金属导线长度的相对变化率，用 ε 来表示，即

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad (1-4)$$

dS/S 为导线横截面积的相对变化率，当金属导线为圆形截面时，其直径为 D ，则

$$dS = d\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) = \frac{\pi}{2} D dD$$

$$dS/S = \frac{\pi}{2} D dD / \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{2dD}{D}$$

横向收缩和纵向伸长的关系用波松比 μ 表示有

$$\mu = -\frac{dD/D}{dL/L}$$

代入上式得

$$dS/S = -2\mu \frac{dL}{L} = -2\mu \varepsilon \quad (1-5)$$

当金属导线为矩形截面(金属箔)，宽度为 B ，厚度为 H 时，其横截面积变化率为

$$\frac{dS}{S} = \frac{dB}{B} + \frac{dH}{H} = -\mu \frac{dL}{L} - \mu \frac{dL}{L} = -2\mu \varepsilon$$

将式 (1-5) 和 (1-4) 代入式 (1-3) 得

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon - (-2\mu\varepsilon) + \frac{d\rho}{\rho} = \varepsilon(1+2\mu) + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-6)$$

由式(1-6)看出, 金属导线受力变形后, 由于其几何尺寸和电阻率发生变化, 从而使其电阻发生变化。可以设想, 如果将一根直径较细的金属丝粘贴在工程构件的表面上, 利用金属丝的应变—电阻效应把构件表面的应变直接变换成为电阻的相对变化, 这样就可以用电测的方法进行应变测量。电阻应变片就是利用这一原理制成传感元件的。

二、金属丝的灵敏系数

用一根直的金属丝通过基底粘贴到被测试件上。当被测试件受力产生的应变传递到金属丝之后, 金属丝的电阻发生变化, 金属丝电阻的相对变化与其所承受的应变直接有关, 由式(1-6)得

$$\frac{dR}{R} / \varepsilon = (1+2\mu) + \frac{d\rho}{\rho} / \varepsilon \quad (1-7)$$

令
$$K_0 = (1+2\mu) + \frac{d\rho}{\rho} / \varepsilon$$

代入式(1-7)得

$$\frac{dR}{R} / \varepsilon = K_0$$

或

$$\frac{dR}{R} = K_0 \varepsilon \quad (1-8)$$

K_0 是单根金属丝的灵敏系数, 它表示金属丝对所承受的应变量的灵敏程度。 K_0 的大小是受两个因素的影响: 一是由 $(1+2\mu)$ 表达几何尺寸改变引起的; 二是由金属丝受力后电阻率发生变化引起的, 即 $\frac{d\rho}{\rho} / \varepsilon$ 。这就从机理上对电阻应变效应作了一定的说明。

可惜, 电阻率 ρ 到底依什么规律随应变变化, 至今尚无圆满的解释。所以 K_0 无法从理论上求出, 而只能从实验中求得。

金属丝的变形在弹性区内, 波松比 $\mu=0.2\sim0.4$; 在塑性区内, $\mu=0.5$ 。假如导线变形后其电阻率不发生变化, 则各种金属丝的灵敏系数 $K_0=1.4\sim1.8$ (弹性区)或 $K_0\approx2.0$ (塑性区)。但是实验测得的几种不同材料金属丝的灵敏系数一般都超过2.0, 如表1-1所

表 1-1 几种不同材料金属丝的实测灵敏系数

材 料	主 要 成 分	灵 敏 系 数			
		硬 态		软 态	
		小应变	大应变	小应变	大应变
康铜	50~60Cu, 50~60Ni	2.2	2.1	2.2	2.2
镍铬	80Ni, 20Cr	2.4	1.9	—	—
镍	Ni	负值	2.7	负值	2.3
碳钢	99.5Fe, 0.5C	3.9	2.4	3.7	2.1
铂铱	90Pt, 10Ir	4.8	2.1	3.9	1.9
铂铑	90Pt, 10Rh	5.5	2.4	5.1	2.0
镍铬铁		2.6	2.3	2.5	1.8

示, 这说明金属丝变形后其电阻率发生了变化。

实验得知, 大多数金属丝的 K_0 近似为常数(特别是康铜丝), 其值随材料而异。可见金属丝在产生应变效应时, 应变 ε 与电阻变化率 dR/R 是成线性关系的, 如图1-1所示。因此, 当测得 dR/R 并已知 K_0 后, 由(1-8)式即可求得金属丝的应变值。

三、电阻应变片的构造

图1-2是目前常用的电阻丝式应变片的结构示意图。它由基底、粘结层、敏感栅、覆盖层和引线组成。下面分别叙述它们的作用、选用材料和性能等。

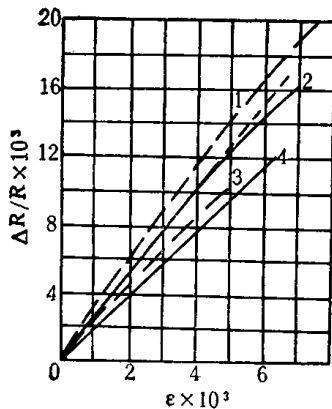


图 1-1 康铜和镍铬的 $\Delta R/R-\varepsilon$ 曲线
1—硬态镍铬; 2—软态镍铬; 3—硬态康铜;
4—软态康铜

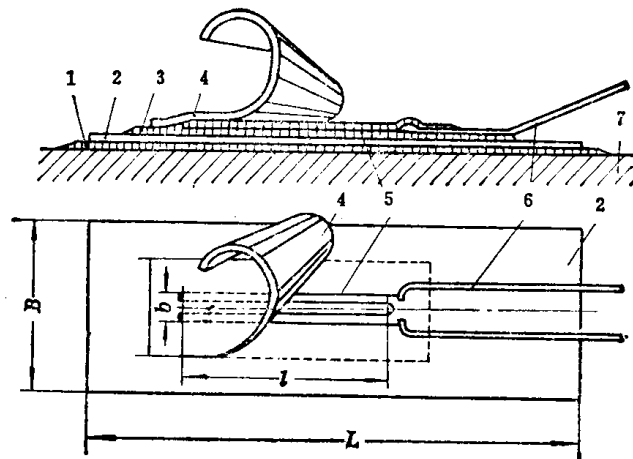


图 1-2 纸基金属丝应变片的构造
1、3—粘结层; 2—基底; 4—覆盖层; 5—敏感栅; 6—引线; 7—试件

1. 基底

基底用以保持敏感栅、引线的几何形状和相对位置; 当应变片粘贴在试件上后, 与粘结剂一起把试件的变形传给敏感栅; 使敏感栅与试件绝缘。

基底材料主要有纸和有机聚合物。用纸作基底的应变片称为纸基应变片, 这种应变片除了热稳定性和抗潮性稍差外, 其它性能都能满足使用要求, 故目前在 70°C 以下的测量中多使用它。用有机聚合物(如酚醛树脂、环氧树脂和聚酰亚胺等)作基底的应变片称为胶基应变片, 可用于工作温度较高、湿度很大(甚至水下)或长期测量中。在高温条件下工作的应变片, 多采用石棉、无碱玻璃布或金属薄片等作基底。

2. 敏感栅

它是应变片的核心部分, 其作用是感受试件的应变, 并将机械应变转换成电阻变化。敏感栅的材料应满足下列要求:

- (1) 灵敏系数大, 而且为常数, 能在较大的应变范围内保持线性;
- (2) 电阻率高, 以便制造小型应变片, 供测量应力集中时用;
- (3) 电阻温度系数小, 具有足够的热稳定性;
- (4) 加工和焊接性能好, 以利于制片;
- (5) 具有足够的机械强度, 以免制片时被拉断。

上述要求很难全部满足, 只能据使用条件挑选。一般说来, 当测量静态应变时, 应选用电阻温度系数较低的材料; 当测量动态应变时, 应选用灵敏系数较高的材料。目前, 国内外常用的敏感栅材料见表1-2和1-3。国产应变片的敏感栅材料多用康铜、镍铬合金和P型单晶硅等。

表 1-2 敏感栅常用金属材料性能

材料名称	成分	灵敏系数 K_0	电阻率 ρ (欧·毫米 ² /米)	电阻温度系数 ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	线膨胀系数 ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	最高使用温度 ($^{\circ}\text{C}$)
康铜	Cu55 Ni45	2.0	0.45~0.54	-20~20	14.9	+250 (静态) +400 (动态)
镍铬合金	Ni80 Cr20	2.1~2.3	1.0~1.1	110~130	14.0	+400 (静态) +800 (动态)
镍铬铝合金	Ni75 Cr20 Al 3—4	2.4~2.6	1.33	-20~20	13.3	+400 (静态) +800 (动态)
铂及铂合金	Cu 2 铂(Pt) 铂钨	4.8 3	0.1 0.74	3900 139	9 9	+1000 (静态) +700 (静态) +1000 (动态)

表 1-3 敏感栅常用半导体材料性能

材料名称	电阻率 ρ , 欧·厘米	弹性模数 E 10^{12} 达因/厘米 ²	灵敏系数 K	晶向
P型硅	7.8	1.87	175	[111]
N型硅	11.7	1.23	-133	[100]
P型锗	15.0	1.55	102	[111]
N型锗	16.6	1.55	-157	[111]

3. 引线

用以从敏感栅引出电信号的丝状或带状导线。引线的材料一般用低阻值的镀锡铜丝。高温应变片的引线用镍铬铝丝。

4. 覆盖层

覆盖层的作用是帮助基底维持敏感栅的几何形状，同时保护敏感栅不与外界金属物接触，以免形成短路或机械损伤。覆盖层的材料多用胶膜或浸含有机胶液(如环氧树脂、酚醛树脂等)的玻璃纤维布，也可在敏感栅上涂敷制片时所用的粘结剂作为保护层。

5. 粘结剂

粘结剂是具有一定电绝缘性能的粘结材料，用它将敏感栅固定在基底上，或将应变片的基底固定在被测试件的表面上，其材料在本章第四节中叙述。

第二节 电阻应变片的工作特性

一、电阻应变片的工作情况

图1-3为粘贴在试件上的应变片纵剖面示意图(为简化叙述，图中假定敏感栅为单根金属丝)。当试件受力变形时，由于试件1、粘结剂2、基底3、粘结剂4之间都是面接触，故试件的变形能有效地传递，而在粘结剂4与金属丝5之间，虽然金属丝很细，但它的表面积很大，例如直径为0.025毫米，长为10毫米的金属丝，其表面积相当于截面积的1600倍，故变形仍能有效地传递。同时，金属丝与试件表面间的距离很近，仅为0.06毫米或更近，所以金属丝的变形也基本上与试件变形一致。

当试件受力沿纵向(应变片轴线方向)变形时，该变形以剪切的形式依次传递到金属丝上。由于变形时应变片轴向基底两端的位移最大，故剪应力最大；正中截面处位移为零，

故剪应力为零；正中截面两侧的位移方向相反，故两侧的剪应力符号相反。同理，金属丝5所受到的剪应力的分布规律是相同的。

取图1-3中金属丝左半段的一部分为脱离体，然后放大为图1-4所示， τ 为剪应力，其长短表示剪应力的大小， N 为截面上所受到的轴向内力。显然，为保持脱离体的平衡，轴向内力 N 应等于该脱离体表面上沿轴向的剪应力之和。正中截面处的轴向力为整个左半段剪应力之和，故为最大；端部附近因剪应力所占比例最大，故轴向力按指数曲线迅速递增。右半段的轴向力分布规律与左半段对称。整个金属丝的轴向力分布见图1-3，轴向力在 A 、 A' 点时已接近最大值。显然，金属丝的应变分布也与轴向力的分布规律相同。

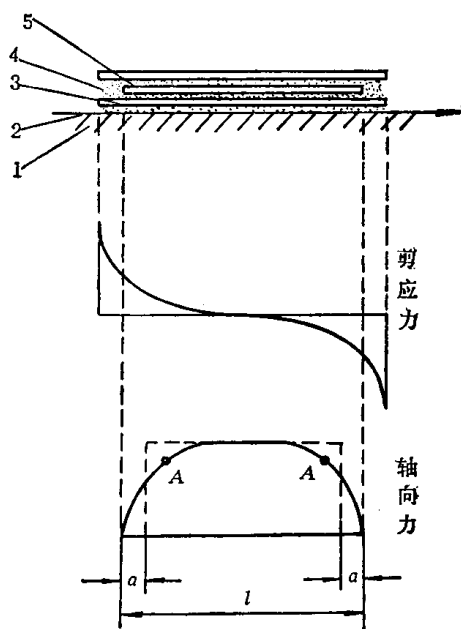


图 1-3 试件上应变片应力分布示意图
1—试件；2、4—粘结剂；3—基底；5—金属丝

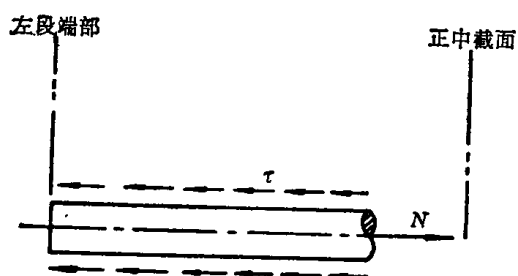


图 1-4 应变片剪应力和轴向力的分布

由以上分析可见，即使在试件应变分布均匀的情况下，敏感栅的应变分布也是不均匀的。图1-3用虚线绘出其等效的应变分布曲线，此时可看成敏感栅的应变是均匀分布的，但其参加变形的长度却比原来缩短了 $2a$ ，即敏感栅参加变形的有效长度为 $l-2a$ 。这样电阻变化 ΔR 势必减小，而敏感栅的原始电阻 R 并未改变，所以其电阻变化率 $\Delta R/R$ 相应地变小，应变片的灵敏度也随之降低。

金属丝的有效长度的减小量 $2a$ 与丝材直径、基底厚度、粘结剂的性能和粘贴质量（粘结剂胶层的厚度和固化程度等）有关。所以在使用应变片时，应选用性能良好的粘结剂，注意全部贴牢，特别是应变片两端，因为两端剪应力所占比例最大。这样，试件的应变能有效地传递给应变片。

二、应变片的灵敏系数

应变片的灵敏系数是指：当应变片粘贴在试件上之后，在沿应变片轴向方向的单向载荷作用下，应变片的电阻变化率与被敏感栅覆盖下的试件表面上轴向应变的比值称为应变片的灵敏系数，用 K 表示。

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \epsilon = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta L}{L} \quad (1-8)$$

式中 ε ——试件表面上应变片安装区的轴向应变；

$\frac{\Delta R}{R}$ ——由 ε 所引起的应变片电阻的相对变化。

应变片的灵敏系数主要取决于敏感栅材料的灵敏系数，但两者又不相等，其原因有二：以丝式应变片为例，由于横栅的存在，使制成敏感栅之后的灵敏系数小于丝材的灵敏系数，差别的大小与敏感栅的结构型式和几何尺寸有关；另方面试件表面的变形是通过基底和粘结剂传递给敏感栅，由于端部过渡区的影响又使应变片的灵敏系数小于敏感栅的灵敏系数，此差数不仅与基底和粘结剂的种类有关，还受粘结剂的固化程度以及应变片安装质量的影响。因此，应变片的灵敏系数是受多种因素影响的综合性指标，目前还不能通过理论计算得到，而是在专门的设备上进行标定试验来确定的。

三、应变片的横向效应

丝式电阻应变片由于敏感栅的端头都有一半圆弧形横栅，测量应变时，构件的轴向应变 ε_x 使敏感栅的电阻发生变化，其横向应变 ε_y 也将使敏感栅的半圆弧部分（除了 ε_x 起作用外）电阻发生变化，应变片的这种既受轴向应变影响，又受横向应变影响而引起电阻变化的现象称为横向效应。应变片的横向效应用横向效应系数 H 表示，下面说明其意义。

电阻应变片受轴向应变 ε_x 和横向应变 ε_y 引起电阻总变化一般可用下式表示

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \varepsilon_x + K_y \varepsilon_y \quad (1-9)$$

式中 K_x ——轴向灵敏系数；

K_y ——横向灵敏系数。

K_x 、 K_y 表示单位轴向应变和单位横向应变引起的电阻变化。如果试件只有轴向应变 ε_x ($\varepsilon_y = 0$)，应变片沿试件的轴向粘贴，则所引起的电阻变化用下式表示

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_x = K_x \varepsilon_x$$

如果试件只有横向应变 ε_y (这时轴向应变 $\varepsilon_x = 0$)，应变片仍沿试件轴向粘贴，则所引起的电阻变化用下式表示

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_y = K_y \varepsilon_y$$

横向效应系数 H 即为应变片横向灵敏系数与轴向灵敏系数之比，用百分数表示，即

$$H = \frac{K_y}{K_x} \times 100\%$$

它表示应变片的横向效应大小，对于丝式电阻应变片可以从敏感栅的尺寸形状推导出计算 H 的公式。图 1-5 表示应变片敏感栅半圆弧部分的形状。沿轴向有应变 ε_x ，沿横向有应变 ε_y 。敏感栅有 n 根纵栅，每根长 l ，圆弧半径为 r ，在轴向应变 ε 作用下全部纵栅的变形量为 ΔL_1 ：

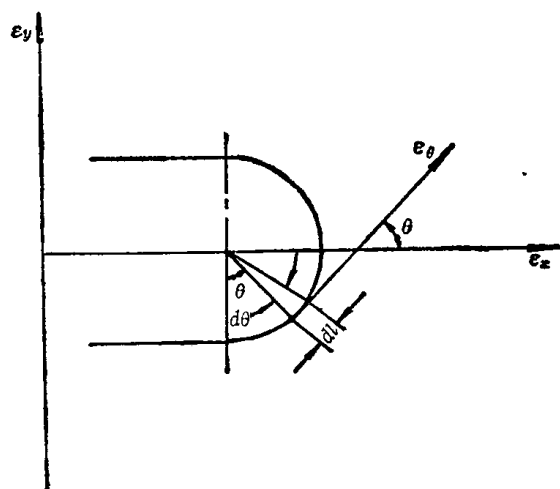


图 1-5 横向效应原理图

$$\Delta L_1 = nl e_x \quad (1-10)$$

半圆弧横栅同时受到 e_x 和 e_y 的作用，若圆弧的半径为 r ，在任一微分小段长度 $dl = r d\theta$ ，其应变 ε_θ 可按式求得：

$$\begin{aligned} \varepsilon_\theta &= \frac{1}{2}(e_x + e_y) + \frac{1}{2}(e_x - e_y)\cos 2\theta \\ &\quad + \frac{1}{2}r_{xy}\sin 2\theta \end{aligned} \quad (1-11)$$

每个半圆弧形横栅的变形量 Δl 为：

$$\Delta l = \int_0^{\pi r} \varepsilon_\theta dl = \int_0^\pi \varepsilon_\theta r d\theta = \frac{\pi r}{2}(e_x + e_y) \quad (1-12)$$

圆弧栅的个数为 $n-1$ ，则全部横栅的变形量为：

$$\Delta L_2 = \frac{(n-1)\pi r}{2}(e_x + e_y) \quad (1-13)$$

将式 (1-10) 和 (1-13) 相加，可得应变片敏感栅的变形总和：

$$\begin{aligned} \Delta L &= \Delta L_1 + \Delta L_2 \\ &= \frac{2nl + (n-1)\pi r}{2} e_x + \frac{(n-1)\pi r}{2} e_y \end{aligned} \quad (1-14)$$

敏感栅栅丝的总长度为 L ，敏感栅的灵敏系数为 K_s ，则电阻相对变化量为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= K_s \frac{\Delta L}{L} \\ &= \frac{2nl + (n-1)\pi r}{2L} K_s e_x + \frac{(n-1)\pi r}{2L} K_s e_y \end{aligned} \quad (1-15)$$

令

$$K_x = \frac{2nl + (n-1)\pi r}{2L} K_s \quad (1-16)$$

$$K_y = \frac{(n-1)\pi r}{2L} K_s \quad (1-17)$$

则

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x e_x + K_y e_y \quad (1-18)$$

式 (1-18) 说明，敏感栅电阻的相对变化包含两个部分，它们分别是 e_x 和 e_y 作用的结果。当 $e_y = 0$ 时，可得轴向灵敏系数

$$K_x = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_x / e_x \quad (1-19)$$

同样，当 $e_x = 0$ 时，可得横向灵敏系数

$$K_y = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_y / e_y \quad (1-20)$$

横向灵敏系数与轴向灵敏系数的比值称为横向效应系数，可用它来衡量应变片横向效应的大小。由式 (1-19) 和 (1-20) 可得丝式应变片敏感栅横向效应系数计算公式

$$H = \frac{(n-1)\pi r}{2nl + (n-1)\pi r} \quad (1-21)$$

从上式可看出，丝式应变片的栅长 l 愈小， r 保持不变，则 H 愈大。又由式 (1-21) 知，由于圆弧部分的存在，从而降低了应变片的灵敏度。为了提高丝式应变片的灵敏度，可采用直角敏感栅或箔式应变片。

四、机械滞后

应变片粘贴在被测构件上之后，在温度恒定时，应变片的指示应变与构件表面的机械应变之间应当是一个确定的关系，不论加载或卸载过程都应当如此。然而试验表明，如图 1-6 所示，在增加或减少机械应变过程中，对于同一机械应变量，应变片的指示应变有一个差值 $\Delta\epsilon_i$ ，此差值即为机械滞后。

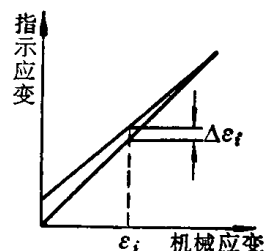


图 1-6 应变片的机械滞后

在新安装的应变片，第一次承受应变载荷时，常常产生较大的机械滞后，经历几次加卸载循环之后，机械滞后便明显地减少。所以，在正式测试之前都预先加卸载若干次，至少三至五次，以减少机械滞后对测量数据的影响。

机械滞后的产生主要是敏感栅、基底和粘结剂在承受机械应变之后留下的残余变形所致。制造或安装应变片时，如果敏感栅受到不适当的变形，或粘结剂固化不充分，都会使机械滞后增加。应变片在较高的温度下工作时，机械滞后也会显著地增加。

五、零点漂移和蠕变

粘贴在试件上的应变片，在不承受载荷的条件下，并在恒定的温度环境中，其指示应变值随时间变化的特性称为应变片的零漂。

粘贴在试件上的应变片，保持温度恒定，在某一恒定的机械应变长期作用下，指示应变随时间变化的特性称为应变片的蠕变。

零漂和蠕变所反映的是应变片的性能随时间变化的规律，只有当应变片用于较长时间测量才起作用。实际上零漂和蠕变是同时存在的，在蠕变中包含着同一时间内的零漂值。有时可以用同一批的两个应变片组成半桥（其中一片不承受机械应变）进行测量，或者另外测出零漂值加以扣除，以得到“纯蠕变”，但由于应变片的零漂存在着分散性，同一应变片在不同的时间内的零漂也不尽相同，所得到的“纯蠕变”只能是一个大概值。

为了说明产生蠕变的原因，我们先看一下应变片在承受机械应变之后的受力状态和指示应变的变化趋势。如图 1-3 所示，构件表面的机械应变以剪应力的形式传递给胶层和敏感栅，愈接近端部剪应力 τ 愈大。应变片在开始承受一恒定机械应变的瞬间，胶层和敏感栅都随即变形，此时指示应变有一个最大值，然后在一个比较短的时间内（几分钟），不同的胶层之间在剪应力作用下发生“滑动”，端部的剪应力最大，滑动也最甚，使指示应变迅速地朝绝对值减少的方向变化。随着时间的增加，指示应变的变化速度减缓，时间增加至一定值后，“滑动”停止，指示应变也基本上不再变化。

由上可知，蠕变的产生，主要是粘结层在传递应变的开始阶段出现“滑动”所造成的，粘结层愈厚，弹性模量愈小，机械应变量愈大，粘结层因受潮膨胀，粘结力下降愈多，滑动现象就愈甚，产生的蠕变也愈大。

产生零点漂移的主要原因，是由于应变片的绝缘电阻过低或通过的电流产生热电势造

成的。

六、应变片的温度效应

电阻应变片是利用金属细丝的应变电阻效应测量应变的，由于环境温度变化也会引起金属丝的电阻变化，这样就在测量应变的结果中引进附加的影响。由温度变化引起应变片的电阻变化，称为电阻应变片的温度效应。这里暂不考虑温度对电阻应变片的灵敏系数、机械滞后等各项特性的影响。应用应变片测量被测试件的应变时，应避免或消除因温度变化而引起的虚假应变。下面分析温度效应的来源。

设环境温度变化 Δt ($^{\circ}\text{C}$)，未粘贴在被测试件上的应变片由于电阻温度系数 α_t （电阻温度系数 α_t 是温度变化 1°C 时单位电阻的变化量，单位是 $1/^{\circ}\text{C}$ ）的影响，则应变片产生的电阻相对变化为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \alpha_t \Delta t \quad (1-22)$$

同时，由于 Δt 存在，敏感栅材料和被测构件材料之间线膨胀系数的不同引起应变片的附加应变（非受外力引起的），其值为

$$\varepsilon_{2t} = (\beta_m - \beta_g) \Delta t$$

式中 β_m 是被测试件的线膨胀系数， β_g 是敏感栅材料的线膨胀系数，单位是 $1/^{\circ}\text{C}$ 。与 ε_{2t} 相应的电阻相对变化为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2 = K(\beta_m - \beta_g) \Delta t \quad (1-23)$$

因此，由温度变化形成的总电阻相对变化为

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t &= \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2 \\ &= [\alpha_t + K(\beta_m - \beta_g)] \Delta t \end{aligned} \quad (1-24)$$

相应的虚假应变 ε_t 为

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t / K = \left[\frac{\alpha_t}{K} + (\beta_m - \beta_g) \right] \Delta t \quad (1-25)$$

这是把应变片安装在被测试件表面上，当试件不受外力作用，而温度变化 Δt 时，应变片的温度效应，用应变形式表现出来，称之为热输出。式（1-25）表明应变片热输出的大小不但与应变片敏感栅材料的性能（ α_t 、 β_g ）有关，而且与被测试件材料的线膨胀系数（如 β_m ）有关，即相同的应变片用在线膨胀系数不同的材料上，热输出的大小是不同的。

七、应变片的应变极限

粘贴在试件上的应变片，在一定温度下所能测量的最大应变值称为应变片的应变极限。由粘结剂、基底和敏感栅材料等因素的限制，目前所能测量的应变大小尚局限在一定的范围内。一般说来，当应变 $\varepsilon > 1.5 \sim 2.0\%$ 时，基底和敏感栅之间容易发生滑脱现象。而且也只有 $\varepsilon < 1.5\%$ 时， $\frac{\Delta R}{R}$ 与 ε 才能保持线性。实际上，当 $\varepsilon = 0.5\%$ 时，由于滞后引起的误差可达百分之几，这是不允许的。因而，为了保证测量精度，应变极限应小于 0.5% ，通常取 $0.2 \sim 0.3\%$ （2000~3000微应变）。

能测量的最小应变量取决于应变片的灵敏系数、仪器灵敏度以及抗干扰信号能力的大