

电阻应变仪测试技术

天津大学材料力学教研室电测组 编著

科学出版社

1980

内 容 简 介

本书是在天津大学电阻应变仪测试技术短训班教学讲义的基础上补充、修改而成的。共分十四章,讲述了电阻应变片,电阻应变仪,记录仪器的基本原理,静态、动态应变测量的基本方法,以及在一些特殊条件下与应变测量有关的问题。

本书可供高等学校有关专业的师生、从事机械及结构强度工作的工程技术人员参考。

电阻应变仪测试技术

天津大学材料力学教研室电测组 编著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年11月第一版 开本:787×1092 1/16

1980年11月第一次印刷 印张:20 1/4 插页:1

印数:0001—6,700 字数:468,000

统一书号:13031·1340

本社书号:1863·13-2

定 价: 3.20 元

目 录

第一章 概论	1
第一节 电阻应变仪测试技术的基本原理	1
第二节 电测法的特点及其适用范围	2
第二章 电阻应变片	4
第一节 应变片的结构和工作原理	4
第二节 应变片的主要规格和工作特性	7
第三节 常用应变片的几种类型	11
第四节 常用的应变电阻合金	17
第五节 常用基底和粘结剂	19
第六节 应变片的选用	22
第七节 应变片的粘贴工艺	24
第八节 应变片灵敏系数 K 值的测定	30
第九节 应变片的横向效应及其修正	33
第三章 电阻应变仪	39
第一节 电阻应变仪的一般介绍	39
第二节 电桥的原理及分析	44
第三节 相敏检波器的原理	59
第四节 常用国产电阻应变仪介绍	62
第五节 其他电阻应变仪介绍	76
第六节 电阻应变仪性能校验	82
第四章 记录仪器	88
第一节 光线示波器	89
第二节 磁带记录器	118
第三节 笔描式记录仪简介	125
第五章 由测得的应变计算应力	128
第一节 用单元体表示点的应力状态	128
第二节 平面应力分析	132
第三节 主应力、主方向、最大剪应力	137
第四节 应力与应变的关系——虎克定律	139
第五节 平面应力状态主方向已知时的主应力测定	141
第六节 平面应力状态主方向未知时的主应力测定	142
第七节 应变花	145
第八节 由应变花数据求主应力的计算机程序	149
第六章 静态应变测量	151
第一节 温度补偿	151
第二节 杆件单一变形情况下的应变测量	153
第三节 杆件组合变形时对某种应变成分的测定	156

第四节	测点的选择以及布片与接桥的一般原则	160
第五节	多点测量及切换问题	165
第六节	使用不同灵敏系数的电阻应变片时读数的修正	169
第七章	动态应变测量	170
第一节	动应力概念	170
第二节	动态应变基本测量系统简介	172
第三节	动态应变仪-光线示波器组合系统的测试过程	174
第四节	随机应力波的分析方法	180
第八章	旋转件的应变测量	198
第一节	拉线式集流器	199
第二节	碳刷式集流器	200
第三节	水银式集流器	202
第四节	感应式集流器	204
第五节	集流器性能及其测试方法	205
第六节	应用集流器时的测量电路	206
第七节	温度补偿和导线的布设	208
第九章	高温下的应变测量	210
第一节	高温应变片的工作特性	210
第二节	高温应变片的电阻合金	213
第三节	高温应变片的安装方法	214
第四节	高温应变片	222
第五节	高温应变片的性能测定	231
第六节	高温应变测量中的一些技术问题	234
第十章	高压液下的应变测量	240
第一节	应变片及其防护	240
第二节	引线装置的结构和密封	244
第三节	高压液下应变测量时压力效应和温度效应的补偿	245
第四节	压力效应的测定和一些规律	248
第五节	由测得应变计算主应力	249
第十一章	应变近程遥测	250
第一节	概述	250
第二节	单通道遥测应变仪	251
第三节	多通道遥测装置的原理	263
第四节	应变遥测技术的有关问题	264
第十二章	应变片式传感器	266
第一节	概述	266
第二节	各种传感器介绍	268
第十三章	现场测试中的一些问题	277
第一节	现场测试的准备工作	277
第二节	电阻应变片粘贴的影响	280
第三节	温度补偿片的布置	282
第四节	湿度的影响	283

第五节	长导线的影响	284
第六节	远距离测量切换问题	286
第七节	扩大应变仪测量范围	287
第八节	实测中其他一些问题	288
第九节	现场测量实例	289
第十四章	电阻应变仪测试的误差分析和数据处理	300
第一节	应变仪测试中的实验误差	300
第二节	测量结果的误差估计	304
第三节	实验数据的曲线表示和方程表示	312

第一章 概 论

第一节 电阻应变仪测试技术的基本原理

设计各种机器、设备或工程结构,必须保证它们每一个组成构件的强度,这就要了解在工作条件下,构件中所产生的应力及其分布。理论计算,包括各种数值解法和近代发展起来的有限元法,可以解决许多这方面的问题。但是,一则,这些理论计算方法本身还存在各自的困难,二则,在计算中总要有一定的简化,从而需要相应的实验验证。所以,实验应力分析仍然是解决构件强度问题的一个不可缺少的途径。

电阻应变仪测试技术(以下简称电测法)是实验应力分析中基本的重要的方法之一。从1938年首次出现金属电阻丝粘贴式传感元件到现在,已形成一种使用方便、适用性强、比较完备的测试手段。

按测试对象在工作条件下其应力是否随时间变动,电测法可分为静态应变测量和动态应变测量两种。在这里,我们仅就静态测量,简述电测法的基本原理。

电测法的测试对象是构件表面上指定点的应变,测试方法是通过一定的传感元件把所测的机械量(应变变化)转换成电量(电阻变化),再通过一定的仪器,转换为电压(或电流)的变化并加以放大,然后按机械量(应变)给出指示。这里所说的传感元件就是电阻应变片,仪器就是电阻应变仪。

电阻应变片,一般是由电阻合金丝(箔)栅、基底、引出线和粘结剂等组成,如图1-1(b)

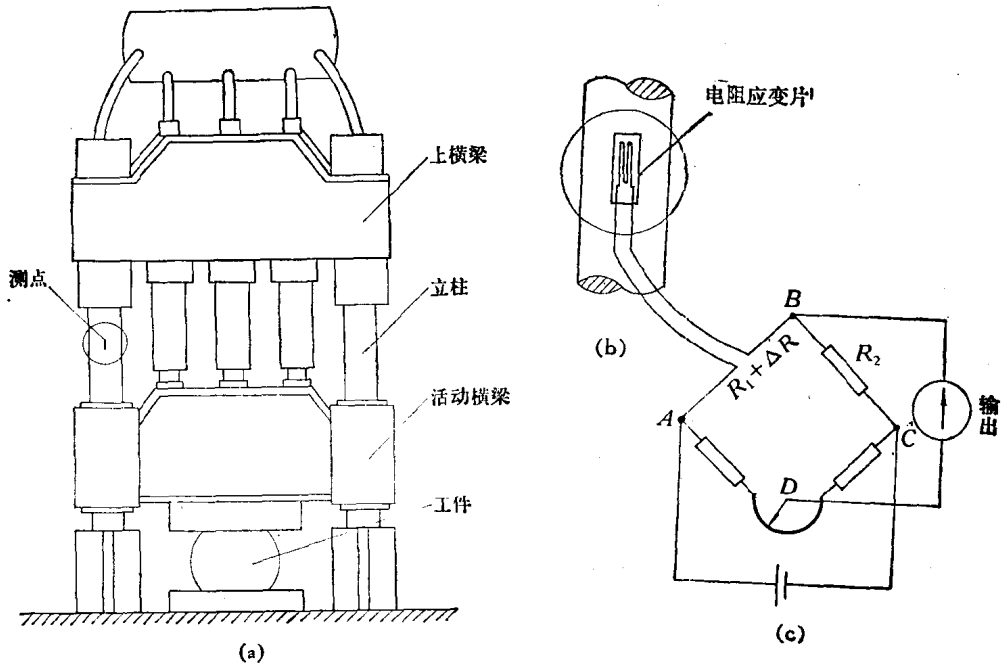


图 1-1 电测法基本原理示意图

所示。使用时,把它粘贴在被测构件表面选定测点的选定方向[图 1-1(a)所示为水压机立柱的轴向]上。设应变片丝栅的电阻值为 R ,当构件受力变形时[图 1-1(a)水压机立柱为拉伸],应变片一起变形,丝栅电阻也变化了 ΔR 。实验证明,当变形不超过一定范围,丝栅电阻的相对变化 $\Delta R/R$ 与被测应变成正比。

在机械强度测试中,应变引起的丝栅电阻相对变化是很小的量(一般在 6×10^{-3} 以下),如何把这样小的量准确地、较高精度地指示出来呢?这就是电阻应变仪的任务了。

电阻应变仪的作用,粗略说来,有三个方面:(1)将由应变片引进的相对电阻变化 $\Delta R/R$ 准确而又灵敏地转换为电压(或电流)信号;(2)把这个电压(或电流)信号放大;(3)将放大的信号按应变指示出来。其中关键的是第一个作用。它是通过惠斯通电桥来实现的。图 1-1(c)是这个电桥电路的原理图。电桥的 AB 桥臂接应变片,其余三个桥臂接相同的应变片或同阻值的电阻。这时,输出端 BD 的输出为零。当应变片有 ΔR 产生, BD 端即有与 $\Delta R/R$ 成正比的电压输出,再经放大和指示,即得被测应变。电阻应变仪的实际构造和工作过程要复杂一些,但其梗概原理就是如此。

第二节 电测法的特点及其适用范围

电测法的主要特点是:

1. 灵敏度高。例如用目前常用的应变片和应变仪可测得小到 5 个微应变 (5×10^{-6}),有的甚至可以精确到 1 个微应变。
 2. 应变片标距小。目前最小标距可达 0.2 毫米(电阻 120 欧),因此可粘贴到空间较小、一般机械式变形仪不能安置的部位,能够较好地测取局部应力。可以利用几个应变片组成应变花测量复杂应力状态下一点的主应力大小及方向。
 3. 不但能测静载荷下的应变,也能测动载荷下的应变。由于应变片的质量很小,测量运动件时,应变片本身的机械惯性可以忽略。可测量的应变频率范围很广,从零乃至几万赫以上。
 4. 不仅能对静止的结构进行测量,还能对旋转件和运动件进行应变测量。旋转速度可达 100000 转/分
 5. 可在高温、低温、高压、液下等比较复杂的环境下进行应变测量。例如,可测取高达 6000—10000 大气压下容器内壁的应变;目前,可在高达 1100°C 高温下进行静态测量;低温达 -269°C 。
 6. 可以进行遥测。在高速旋转件及其他运动件上进行应力电测时,可以运用无线电遥测技术进行应变测量。
 7. 由于以上特点,电测法非常适合于现场测试。
 8. 用途广泛。电测法除用于应变测量外,还可用于力、液压、位移、加速度及振动频率等其它机械参数的测量。除用于一般应力分析外,还可用于计量、生产过程控制等方面。
 9. 仪器、元件使用方便,测试方法较易掌握,便于普及推广。
- 但是,事物总是一分为二的。电测法也有一定的局限性。例如:
1. 只能测机械构件的表面应变。
 2. 测量整个构件或整体结构的应力分布时,往往需要设置较多的测点,工作量大。

3. 尽管应变片标距可以做得很小,但对应力集中的测量仍不够精确.

4. 测量系统用的仪器、导线较多,在某些现场测试中易受环境条件(如温度、电磁场等)的影响.

随着生产和科学技术的发展,不断提出新的问题和要求,并提供新的条件,促使电测技术本身日益改进和提高. 如高温应变测试技术、遥测以及测试过程自动化和数据快速处理的进展等.

作为实验应力分析的手段,除电测法外,尚有光弹性、脆性涂层、微网格等许多其他方法. 随着激光技术的发展,全息干涉技术在实验应力分析中的应用也逐步发展起来. 每一种测试方法都有它的优点和局限性. 我们要根据测试对象、要求和条件选择合适的方法,有时需要几种方法互相配合,取长补短,才能得到满意的结果.

第二章 电阻应变片

电阻应变片(简称应变片)是一种电阻式的传感器,是电测法中的关键性元件。它以本身电阻的变化来反映需要测量的机械应变,然后通过电子仪器以应变为刻度或以能代表应变大小的电信号显示出来。本章主要介绍在常温下使用的应变片的结构、简单工作原理、种类、特性以及粘贴和联线的工艺等,以便能够正确地选择和使用应变片。

第一节 应变片的结构和工作原理

以丝绕式应变片为例,其制作方法是用电阻合金丝绕成栅状,然后用粘结剂贴在上下两层薄纸(此纸称作基底)之间,在丝栅两端头焊接镀银或镀锡铜线(直径为 0.15—0.18 毫米)作为引出线。如图 2-1 所示。使用时,将它粘贴到被测构件的表面上。电阻丝栅又称敏感栅,它的任务是把机械应变转换成电阻变化。 b 为丝栅宽度,称为基宽。 l 为丝栅长度,称为基长(或标距)。基底的作用是支承、固定和保护丝栅,它与粘结剂一起把机械应变传递给丝栅,并使丝栅与被测构件之间保持一定的电绝缘。引出线用来与导线焊接,然后联到测量电路上。

应变片是利用电阻合金丝的应变效应这一物理现象而工作的。应变效应就是电阻丝的电阻值随着它本身的机械变形(伸长或缩短)而改变。例如,取一直径为 d 、长为 l 的电阻丝,设它在外力 P 作用下伸长 Δl (如图 2-2),则有线应变 $\varepsilon = \Delta l/l$ (ε 是个无量纲量,因其数值很小,常把 10^{-6} 作为一个单位,称之为微应变,用 $\mu\varepsilon$ 表示)。若丝的原始电阻值为 R (欧),变形后电阻值变化量为 ΔR (欧),由实验可知,当应变不超过一定范围时,电阻丝的电阻相对变化 $\Delta R/R$ 与其线应变 ε 成线性关系,用公式表示为

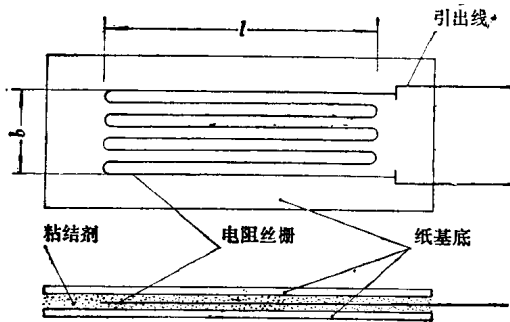


图 2-1 丝绕式电阻应变片

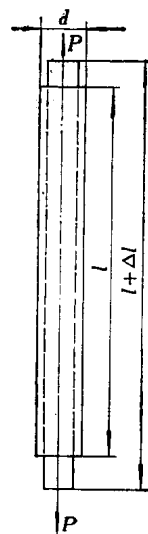


图 2-2 电阻丝受力变形情况

$$\frac{\Delta R}{R} = K, \varepsilon \quad (2-1)$$

式中, K , 为比例常数, 称为电阻丝应变灵敏系数, 随材料而异. 对于同样应变, K , 值越大, $\Delta R/R$ 也越大, 所以 K , 说明了电阻丝的应变效应的灵敏程度. 图 2-3(a), (b) 是用铜镍电阻合金丝(康铜丝)进行实验得到的应力 σ 、应变 ε 及电阻相对变化 $\Delta R/R$ 和应变 ε 的关系曲线. 由图 2-3(a) 中曲线可看出, 在 ε 高至 4500 微应变时, $\Delta R/R$ 与 ε 之间仍具有良好的线性关系. 而且在进行适当改善性能的热处理之后, 当电阻丝受力进入塑性阶段 $\varepsilon = 6000 \mu\varepsilon$, K , 仍然保持常数, 见图 2-3(b). 不同种类的合金丝, 其曲线可能有所不同.

下面我们进一步分析 K , 和哪些因素有关. 由物理学可知, 金属导线(包括电阻丝)的电阻为

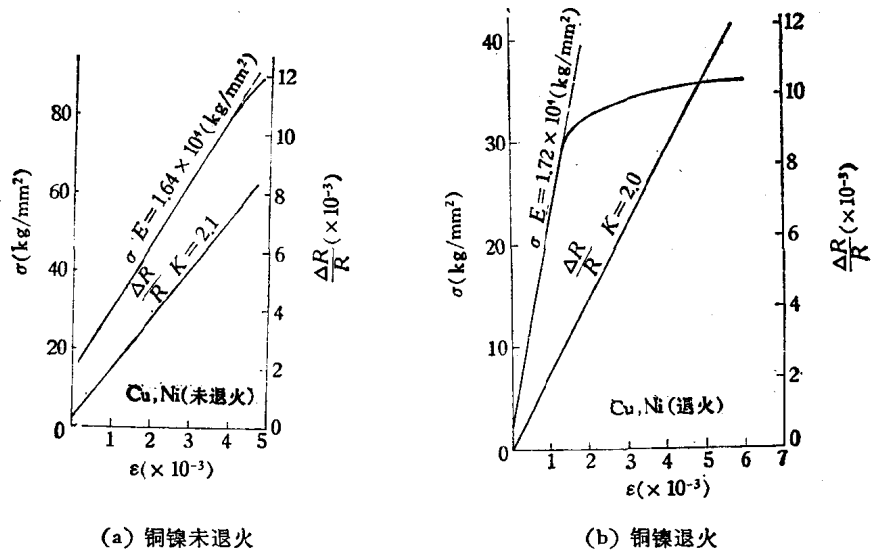


图 2-3 铜镍电阻合金丝应力和应变及电阻相对变化和应变的关系曲线

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

式中, R ——电阻丝原来(受力前)的电阻(欧); l ——电阻丝原来的长度(米); A ——电阻丝原来的截面积(毫米²); ρ ——电阻丝原来的电阻率(欧·毫米²/米).

当电阻丝受力变形后, 其长度、截面积和电阻率分别改变了 Δl , ΔA 和 $\Delta \rho$, 电阻值也要相应地改变 ΔR , 由数学分析可近似得到:

$$\Delta R = \frac{\rho}{A} \Delta l - \frac{\rho l}{A^2} \Delta A + \frac{l}{A} \Delta \rho$$

电阻相对变化(也称电阻变化率)则为

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

其中

$$\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$$

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\frac{1}{4} \pi d^2 - \frac{1}{4} \pi (d - \Delta d)^2}{\frac{1}{4} \pi d^2}$$

略去 Δd 二次项,有

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \frac{\Delta d}{d} = 2\varepsilon' = -2\mu\varepsilon$$

式中 ε' 为电阻丝的横向应变。由材料力学可知,在弹性范围内, $\varepsilon' = -\mu\varepsilon$, 其中 μ 为电阻丝的泊松比(或横向变形系数)。于是,式(a)化为

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon + 2\mu\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

或

$$K_s = \frac{\Delta R}{R} = 1 + 2\mu + \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2-3)$$

由上式可看出, K_s 与两个因素有关,式中前两项表示由于电阻丝的几何尺寸(长度和截面积)发生变化而引起的,第三项是材料的电阻率随应变发生变化而引起的。对电阻率变化规律目前还没有满意的解释。电阻丝灵敏系数一般都用实验方法确定。

应该指出,上述讨论是针对单根电阻丝的。而对于用电阻丝绕制成一定形状敏感栅,包括粘结剂、基底等组成的应变片,以及用粘结剂贴到构件上的应变片,仍然具有应变效应。但上述一些因素都会不同程度地影响灵敏系数,因此,粘贴好的应变片感受到的机械应变 ε 与其电阻相对变化 $\Delta R/R$ 保持另外一个比例关系:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (2-4)$$

K 称为应变片的应变灵敏系数,其值与电阻丝的灵敏系数并不相同。它不仅与敏感栅材料性质有关,而且与敏感栅的形式、几何尺寸甚至和基底及粘结剂有关。 K 值通常是在单向应力状态下用实验方法抽样确定的。由生产单位提供的应变片, K 值均已给出。

现在再简单地探讨一下应变片传递变形的工作情况。如图 2-4 所示,将应变片的基底用粘结剂牢固地贴到构件欲测变形的地方,设构件在外力 P 作用下,沿 x 方向发生应变 ε , 这个应变如何传递到敏感栅上去呢? 构件的变形带动粘结层以剪应力的形式传到基底上,图 2-4(a) 表示基底上剪应力分布的情况,两端部剪应力较大且方向相反,而中部为零。基底的变形又以剪应力的形式传到敏感栅,其分布规律与前者相同。剪应力的作用使敏感栅承受轴向力而产生应变,轴向力分布如图 2-4(b) 所示,两端为零,向中部过渡时按指数曲线形式上升到 ε 值。这种情况说明,即使贴片处具有均匀的应变,敏感栅各截面的应变也不会是均匀的,两端各有一小段不能很好地参加工作。因此敏感栅的电阻变化 ΔR , 以及电阻相对变化 $\Delta R/R$ 必然要减小一些,这就相当于降低了敏感栅感受变形的灵敏度。所以应变片的灵敏系数 K , 一般小于电阻丝的灵敏系数 K_s 。由上述分析可知,粘贴质量是很重要的,尤其是基底两端剪应力较大,一定要贴牢,不然会影响变形的传递。从传递变形方面考虑,虽然粘贴层中部作用不大,但使用时仍须贴好,否则会因存有空隙或气泡造成应变片输出信号不稳定。有实验表明,正确粘贴的应变片测得 $K = 1.98 \pm 0.02$, 而粘贴两端时 $K = 2.01$, 如果只贴中间直线部,则 $K = 1.64$ 。此种现象对于较小标距的应变片更为明显。此外,我们还应注意,使用应变片时不要随意裁剪基底,不然会影响变形的传递,使应变片已标定的一些性能数据,如 K 值等受到影响。假若应变片允许裁剪基底,生产单位就会提供基底的修整尺寸,即缩小基底长度和宽度使用时,不影响应变片

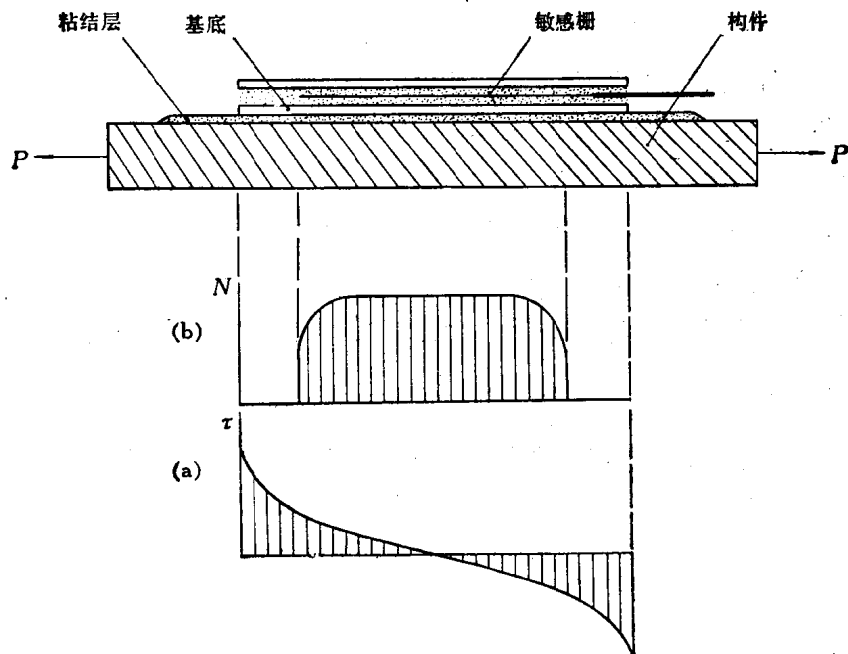


图 2-4 应变片传递应变的工作情况

工作特性的最小尺寸。

第二节 应变片的主要规格和工作特性

为了适应不同的测试需要,我国生产有各种类型、规格的电阻应变片。由于应变片各部分的材质、性能以及丝栅形式和工艺等方面的因素,应变片在工作中所表现的性质和特点(即工作特性)也有差别。因此,我们需对应变片的主要规格和特性有所了解,以便在不同条件下进行应变测量时,选择适当的应变片。

一、几何尺寸

它表明应变片敏感栅的有效工作面积 $b \cdot l$ 。 b, l 单位为毫米。 b 为基宽,指的是在与应变片轴线相垂直的方向上敏感栅外侧之间的距离。 l 为基长,是应变片敏感栅在其轴线方向的长度,对于带有圆弧端的敏感栅,就是指圆弧内侧之间的距离。应变片所测得之应变,是被测构件在基长内的平均应变值。目前应变片最小基长为 0.2 毫米,最长达 300 毫米。一般生产单位生产的应变片都有一个基长系列供我们选用。

二、电阻值 (R)

它是指应变片没有粘贴也不受力的情况下,在室温下测定的电阻值,单位为欧姆。为使应变片和测量电路(仪器)相适应,一般多设计为 120 欧(名义阻值)。应变片包装上标出的阻值,是检验若干个应变片所得实际阻值的平均值。并指明正、负公差,即单个应变片实际阻值与平均阻值之间的最大允许差值,用平均阻值的百分数表示。应变片阻值也有一定的系列,如 60 欧、120 欧、350 欧、600 欧和 1000 欧。

三、灵敏系数(K)

它是在单向应力状态下的标准标定装置(如钢制纯弯曲梁或等强度悬臂梁,钢材的泊松比 $\mu = 0.285$)上用实验方法确定的。应变片敏感栅的纵向轴线必须沿装置的应力方向粘贴。当装置受力后,应变片的电阻相对变化 $\Delta R/R$ 与贴片处相应的表面应变 ε 之比,即是应变片的灵敏系数 ($K = \frac{\Delta R}{R}/\varepsilon$)。生产单位在每批产品中要按一定比例抽样检定。在应变片包装上标明的是这批产品由抽样测得的平均 K 值,并指出其正、负公差,即单个应变片的 K 值与平均 K 值间的最大允许差值,以平均值的百分数表示。

四、横向灵敏度(H)

丝绕式应变片的敏感栅直线端头都有一个半圆形迴弯,测量时被测构件的轴向应变 ε_x 使敏感栅的电阻发生变化;构件的横向应变 $\varepsilon_y = -\mu\varepsilon_x$,也要被迴弯段感受,如图 2-5,而使敏感栅的电阻发生变化,但二者符号相反,后者对轴向应变形成的电阻改变有一定的抵消作用,相当于降低了应变片对轴向应变的敏感程度。这种现象叫做横向效应。使用丝绕式应变片时,如与标定 K 值时的条件(单向应力状态,钢材 $\mu = 0.285$,应变片轴线与应力方向一致)不同,由于横向效应的关系, K 值就要改变。如仍按原来 K 值进行测量,在某些情况下,便会带来较大的误差。对于精度要求较高的应变测量,需要考虑修正问题(参阅本章第九节)。

我们用横向灵敏度 H 这个量来表明横向效应的影响程度,它可以用实验方法确定。

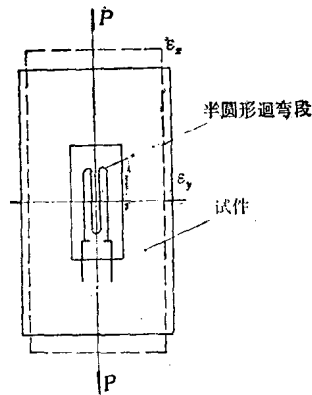


图 2-5

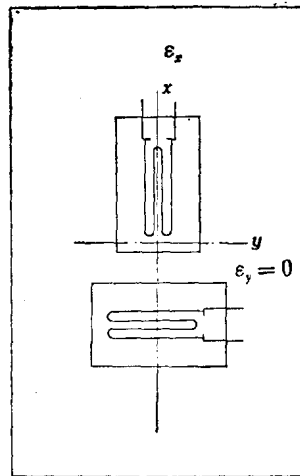


图 2-6

图 2-6 是一个单向应变场: $\varepsilon_x \neq 0, \varepsilon_y = 0$ 。沿 x 轴方向及与 x 轴相垂直的 y 方向(横向)粘贴同样的应变片各一个,发生应变 ε_x 后,测得轴向应变片的电阻相对变化 $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_x$,除以 ε_x ,得到

$$K_x = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_x}{\varepsilon_x} \quad (2-5)$$

式中 K_x ——轴向灵敏系数。(要注意,此值是在单向应变场中测得的,与在单向应力状态下标定装置上测得的应变片灵敏系数 K 值不同。)

同时,将测得的 y 方向(横向)应变片的电阻相对变化 $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_y$,也除以 ε_x ,得到

$$K_y = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_y}{\varepsilon_x} \quad (2-6)$$

因为横向根本没有应变,而横向应变片的电阻变化,完全是在轴向应变 ε_x 的作用下,由于应变片的横向效应而产生的。因此, K_y 表明当应变片只在横向承受单位应变时的电阻变化,也称为横向灵敏系数。

K_y 与 K_x 的比值,以百分数表示之,称为横向灵敏度 H 。即

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

将式(2-5)和式(2-6)代入式(2-7),得到

$$H = \frac{K_y}{K_x} \times 100\% = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_y}{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_x} \times 100\% = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_y / K}{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_x / K} \times 100\% = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \times 100\% \quad (2-8)$$

式中, K ——应变片的灵敏系数。由于 x, y 方向粘贴同一种应变片,所以其 K 值是一样的; ε_x ——轴向应变片的指示应变。指示应变即将应变片的输出信号由指示仪器显示出来; ε_y ——横向应变片的指示应变。

因此,横向灵敏度 H 实际就是粘贴在单向应变场的零应变方向的应变片的指示应变,与粘贴在平行于单向应变方向的同样应变片的指示应变之比值。在一般情况下 H 都小于 2%。在很不利情况下,例如丝绕式应变片基长很短、基宽很大时,也不超过 5%。

由于丝绕式应变片横向效应的存在,在进行应变测量时,应变片所处的应变场不同,所测构件材料的横向变形系数 (μ) 与标定应变片的装置所用材料的横向变形系数 (μ_0) 不同时,都将使测量产生误差。误差 e 可用下式计算:

$$e = \frac{H}{1 - \mu_0 H} \left(\mu_0 + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right) \times 100\% \quad (2-9)$$

式中 $\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$ 表示测点的应变状态。当误差较大时,则需进行修正。有关式(2-9)的来源及误差修正问题,可参考本章第九节。

五、应变极限 (ε_j)

应变片所能测量的应变范围是有一定限度的,这个限度称为应变极限。一般应变极限规定为,在室温条件下,其指示应变降到试件的机械应变(即试件因承受施加的机械载荷而产生的应变)的 90% 时的机械应变值。用 ε_j 表示。此时认为应变片已经开始失去了工作能力。

六、绝缘电阻 (R_m)

它是指应变片引出线与粘贴应变片的构件之间的电阻。一般要求在 50—100 兆欧以上,这样才能保证应变测量的正常进行和测量的精度。它也是检查应变片粘贴质量、粘结剂是否完全干燥或固化的重要标志。测量绝缘电阻只能用直流电压不超过 25 伏的高阻表,否则易将敏感栅烧毁。

七、机械滞后 (C_j)

对已粘贴在试件上的应变片,在一定的温度条件下,在零和某一指定的应变之间加载和卸载。以这个过程中试件的机械应变 ϵ_s 为横坐标,应变片相应的指示应变 ϵ_i 为纵坐标,绘成曲线,如图 2-7 所示。由图可见,加载和卸载曲线不相重合,这种现象称作机械滞后。在同一机械应变时,加载与卸载所得的指示应变之差值 C_j ,即为此时的机械滞后量。它表明应变片不能迅速反映机械应变的情况。造成机械滞后的原因很多,有的是由于加载过程中应变片基底和粘结剂有滞后;也有的是由于敏感栅的几何形状变化和组织变化达到塑性变形而产生的永久的电阻改变造成滞后。由图 2-7 的曲线还可看到应变片工作从线性到非线性的情况。滞后和非线性对测量都会带来一定的误差。一般对于新贴好的应变片,最好在正式测试前,对构件进行三次以上的反复加、卸载荷,以减小应变片的滞后和非线性。

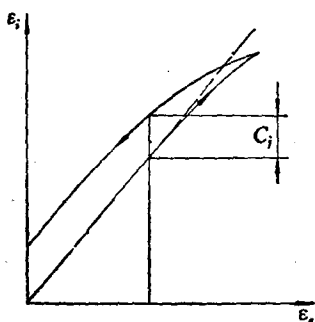


图 2-7 机械滞后

八、最大工作电流 (I_{max})

当应变片接入测量电路中,因为通过电流,应变片将会产生热效应,从而引起应变仪指针的漂移。因此,需要规定允许通过应变片敏感栅而不影响其工作特性的最大电流,一般定为 25 毫安。电阻应变仪的电桥电压一般都设计在 3 伏左右,有的甚至为 1 伏,因此在使用电阻应变仪测量时,应变片的工作电流是可以不考虑的。最大工作电流在很大程度上还取决于被测构件的导热性能,因此,在一些传热不良的材料(如有机玻璃、陶瓷等)上测量应变,或使用低阻值应变片,以及自行设计测量线路时都要考虑最大工作电流,最大工作电流的确定一般以应变仪的零漂不超过允许值为依据。

九、零点漂移 (P) 和蠕变 (θ)

零漂是指贴在试件上的应变片,在温度保持恒定、试件没有机械应变的情况下,应变片的指示应变(是一项虚假应变)随时间变化的数值,用 $\mu\epsilon$ /时间表示。造成零漂的主要原因是:由于应变片受潮使电容发生变化;绝缘电阻逐渐降低从而产生漏电;电阻应变片通过电流使自身温度逐渐升高以及热电势等。

贴好在试件上的应变片,当温度保持恒定时,在某一恒定的机械应变(一般为 1000 $\mu\epsilon$)长时间作用下,应变片的指示应变随着时间而发生变化,这种现象称为蠕变。一般来说,蠕变的方向是与原来应变量变化的方向相反的。这主要是由于在敏感栅回弹力的作

用下,应变片基底、粘结材料发生松弛现象,应变片反映试件机械应变的能力降低而造成的。我们用每小时所发生的最大虚假应变来说明蠕变程度,也有人用每小时虚假应变与初始应变值之比的百分数表示。

零漂和蠕变对测量结果、尤其是长时间测量结果将带来一定的误差,必要时需考虑修正。

十、温度效应

粘贴到试件上的应变片,除了感受机械应变而使电阻相对变化外,当环境温度变化时,也要引起电阻相对变化,这种现象称为温度效应。前者是我们要测量的,后者是一种虚假应变,必须在测量中予以消除。

由于温度变化而引起的电阻变化包括两个方面:

(1) 当环境温度变化 $\Delta t^{\circ}\text{C}$ 时,由于电阻丝材料的电阻温度系数 $\alpha_{\text{栅}}$ (即每一欧姆的电阻值当温度变化 1°C 时的改变量)而产生的电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R_1}{R} = \alpha_{\text{栅}} \Delta t$$

(2) 当环境温度变化 $\Delta t^{\circ}\text{C}$ 时,敏感栅材料和被测试件材料的膨胀系数不同,应变片被迫拉长(或缩短),而产生一定的附加应变(见图 2-8)。其值为

$$\varepsilon_{\text{附}} = \beta_{\text{试}} \Delta t - \beta_{\text{栅}} \Delta t$$

式中, $\beta_{\text{试}}$ ——构件材料的线膨胀系数, $\frac{m}{m^{\circ}\text{C}}$; $\beta_{\text{栅}}$ ——敏感栅材料的线膨胀系数, $\frac{m}{m^{\circ}\text{C}}$ 。

相应的电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R_2}{R} = K(\beta_{\text{试}} - \beta_{\text{栅}}) \Delta t$$

因此,由温度变化形成的总的电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R_t}{R} = \alpha_{\text{栅}} \Delta t + K(\beta_{\text{试}} - \beta_{\text{栅}}) \Delta t$$

对应的应变

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta R_t}{R} / K = \frac{1}{K} \alpha_{\text{栅}} \Delta t + (\beta_{\text{试}} - \beta_{\text{栅}}) \Delta t \quad (2-10)$$

这个虚假应变是相当大的,有时甚至超过被测机械应变值。测量时一般采取补偿的方法予以消除,叫做温度补偿。常用的补偿方法有两种:一种是桥路补偿法,用于常温下测量(见第六章);一种是用温度自补偿应变片,用于高温下测量(见第九章)。

以上所述是应变片在室温静载下的主要工作特性。在动态测量和高温测量时,另有附加要求,以后在有关章节中再予介绍。

第三节 常用应变片的几种类型

随着科学技术的发展,为了适应不同的要求,目前有很多类型的应变片。本节仅对

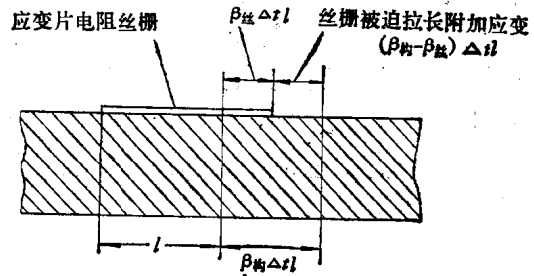


图 2-8

常温下经常使用的几种类型及其特点作一简介。高温下使用的应变片，将在第九章中介绍。

一、丝绕式应变片

其结构如图 2-1 所示，是一种较常见的形式。它的制造设备和技术都较为简单，价格便宜。多用纸作基底，质地柔软，粘贴、使用方便，并广泛地应用在一般测试中。但敏感栅端部的半圆形迴弯段使应变片具有横向效应，给测量带来一定的误差，有时需要修正。

二、短接丝式应变片

如图 2-9。它是用特别夹具，使若干条电阻合金丝相互平行、等距拉紧，并按一定的距离在横向焊上较粗的铜线，在铜线适当的位置上切断，这就形成敏感栅的横向联接线和引出线。然后涂敷粘结剂（如环氧树脂等），聚合固化后形成基底。一个这样的塑料带中有十个左右敏感栅，剪开即得到单个的短接丝式应变片。这种应变片敏感栅的各线段间的横向是用截面积较大的铜导线组成，电阻很小，由于横向效应形成的电阻相对变化也很小，也就是横向效应小，一般可以忽略不计。传递变形的过程仍如第一节所述，构件的变形通过剪应力传递到基底上，最后敏感栅承受轴向力而产生应变，如图 2-9(a)，(b)。因为

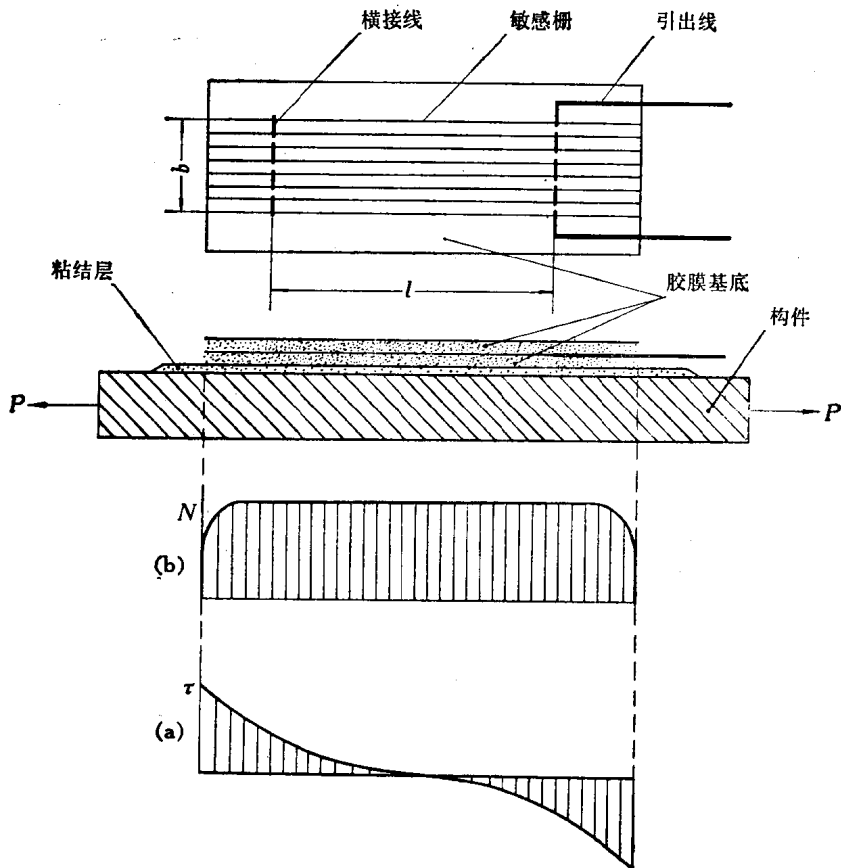


图 2-9 短接丝式应变片