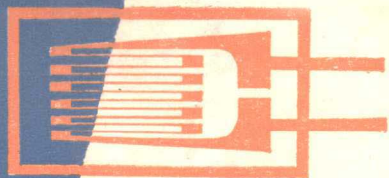


工程测试技术丛书

# 电阻应变片



人民铁道出版社

工程测试技术丛书

# 电阻应变片

铁道部科学研究院铁道建筑研究所编

人民铁道出版社

1977年·北京

## 内 容 简 介

电阻应变片是非电量电测法中一种常用的转换元件，它在工程测试技术中已得到广泛的应用。本书叙述的重点是如何使用电阻应变片进行应变测量。主要内容有：电阻应变片的工作原理及其特性，用于粘贴电阻应变片的粘接剂及粘贴工艺和使用电阻应变片测量技术中遇到的几个实际问题的解决方法。

本书可供工程测试有关人员参考。

工程测试技术丛书

### 电 阻 应 变 片

铁道部科学研究院铁道建筑研究所编

人民铁道出版社出版

(北京市东单三条14号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：4.125 字数：91 千

1977年9月 第1版

1977年9月 第1版 第1次印刷

印数：0001—10,000册 定价(科三)：0.34元

# 毛主席语录

抓革命，促生产，促工作，促战备。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

1

## 前 言

目前在铁路桥梁、隧道、房屋建筑等工程结构的研究、设计、建造和使用当中，为了验证设计理论，选定设计方案，鉴定工程质量和分析使用中产生的问题等等，往往需要对工程结构进行静态或动态试验。测试技术，特别是电测技术，乃是获得各种试验数据的基本手段。此外，电测技术在机车、车辆、飞机、船舶和各种机械设备的试验工作中，也得到了广泛的应用。

随着我国社会主义革命和社会主义建设事业的迅速发展，国防、工农业生产和科学研究部门，需要进行工程结构的试验日益增多，测试技术本身也相应地向前发展。为了便于有关从事工程结构测试人员初步掌握测试技术，并不断总结和提高测试技术水平，我们根据各兄弟单位的宝贵经验和有关资料，同时加上自己在实际工作中的粗浅体会，编写了这套工程测试技术丛书。主要内容有：电阻应变片，电阻应变仪，光线示波器和振动、压力等力学参数的测量，重点介绍测试技术中的基本知识，传感器及测量仪器的原理、使用方法和一般的维修技术。

由于我们水平所限，难免有错误和不当之处，请读者批评指正。

# 目 录

<b>第一章 概述</b> .....	1
第一节 电阻应变片的工作原理和构造.....	1
第二节 电阻应变片的种类和特点.....	8
<b>第二章 电阻应变片的特性</b> .....	22
第一节 电阻应变片的规格.....	22
第二节 电阻应变片的横向效应.....	31
第三节 电阻应变片的温度特性.....	37
第四节 电阻应变片的频率响应特性.....	39
第五节 电阻应变片的其他特性.....	43
<b>第三章 粘接剂和电阻应变片的粘贴工艺</b> .....	53
第一节 粘接剂的作用和对它的要求.....	53
第二节 粘接剂的种类.....	55
第三节 电阻应变片的粘贴工艺.....	66
第四节 电阻应变片粘贴方位的误差对测量 精度的影响.....	73
<b>第四章 电阻应变片测量技术中的几个问题</b> .....	76
第一节 选用电阻应变片的依据.....	76
第二节 电阻应变片的温度补偿.....	80
第三节 电阻应变片的防潮技术.....	89
第四节 测量电桥的组合方法.....	102
第五节 应力、应变的计算方法、应变花的 应用和应力片.....	116

# 第一章 概 述

## 第一节 电阻应变片的工作原理和构造

### 一、工作原理

电阻应变片，简称应变片，是非电量电测法中一种常用的转换元件。利用应变片及相应的电测仪器，测量出工程结构的应力分布情况进行应力分析，这对验证工程结构的设计理论，分析使用中产生破坏的原因，以及确定设计方案等都是非常必要的。

电阻应变片测量试件应变的原理，主要是借试件的变形，引起粘贴在试件表面上的电阻应变片电阻值的变化，如果电阻值的变化率 $\Delta R/R$ 与应变 $\Delta l/l$ 二者之间建立如下关系

$$\Delta R/R = K \cdot \Delta l/l \quad (1-1)$$

则式(1-1)就是电阻应变片测量试件应变原理的表达式。式中 $K$ 称为电阻应变片的灵敏系数。

单根电阻丝的灵敏系数—— $K_0$ 值的理论推导和分析如下：

由物理学得知，一根电阻丝（金属丝）的电阻为：

$$R = \rho \cdot l / F \quad (1-2)$$

式中  $R$ ——电阻（欧姆）

$\rho$ ——电阻系数或电阻率（欧·毫米<sup>2</sup>/米）

$l$ ——电阻丝长度（米）

$F$ ——电阻丝截面积（毫米<sup>2</sup>）

$$F = \pi \cdot r^2$$

$r$  ——电阻丝的半径

当电阻丝受到拉伸后，不但它的几何尺寸发生变化，见图（1-1），而且电阻值  $R$  也将发生变化。

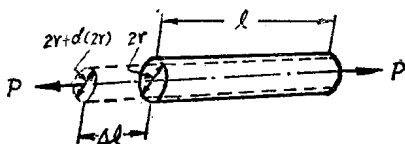


图1-1 电阻丝受拉伸后几何尺寸的变化

对（1-2）式微分得：

$$dR = \rho/F dl - \rho \cdot l/F^2 dF + l/F d\rho \quad (1-3)$$

$$dR/R = dl/l - dF/F + d\rho/\rho \quad (1-4)$$

$$\text{又 } dF = 2\pi r dr$$

$$dF/F = 2dr/r \quad (1-5)$$

$dl/l = \epsilon_x$  ——电阻丝轴向相对变形

$dr/r = \epsilon_y$  ——电阻丝径向相对变形

当电阻丝沿轴向伸长时，沿径向则缩小。二者之间关系为

$$\epsilon_y = -\mu \epsilon_x \quad (1-6)$$

式中  $\mu$  ——电阻丝材料的泊桑比

将（1-5），（1-6）式代入（1-4）式

$$\begin{aligned} dR/R &= \epsilon_x - 2\epsilon_y + d\rho/\rho \\ &= \epsilon_x + 2\mu \epsilon_x + d\rho/\rho \\ &= (1 + 2\mu)\epsilon_x + d\rho/\rho \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } K_0 &= \frac{dR/R}{\epsilon_x} \\ &= 1 + 2\mu + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_x} \end{aligned} \quad (1-8)$$



$K_0$ ——电阻丝的应变灵敏系数

显然,  $K_0$  受两个因素影响, 第一个因素是  $1 + 2\mu$ , 它是由电阻丝几何尺寸改变所引起的, 是个常数, 一般在 1.6 左右。第二个因素是  $\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_x}$ , 它是由电阻丝的电阻系数随应变的改变所引起的, 对大多数电阻丝而言, 其数值也是个常数, 故  $K_0$  为常数。现将 (1-8) 式写成

$$dR/R = K_0 dl/l \quad (1-9)$$

(1-9) 式所表达的电阻丝电阻变化率与应变成线性关系, 见图 (1-2), 这就是电阻应变片测量应变的理论基础。

由实验得知, 大多数金属丝  $K_0$  在  $-12 \sim 4.0$  之间, 但到塑性阶段都趋向于 2.0, 见图 (1-3), 而常用于制造电阻应变片的电阻丝的  $K_0$  值多在  $1.7 \sim 3.6$  之间, 故它主要是受电阻丝的几何尺寸改变的影响。

## 二、构 造

电阻应变片主要由三部分组成。见图 (1-4)。图中  $l$  为线栅长度,  $a$  为线栅宽度。

(一) 电阻丝是电阻应变片的敏感元件。

(二) 基片和覆盖片, 起定位和保护电阻丝的作用, 并使电阻丝和被测试件之间绝缘。

(三) 引出线, 连接测量导线用。

## 三、对制造电阻应变片所用材料的要求

(一) 对电阻丝材料的要求

1. 电阻丝的应变灵敏系数  $K_0$  值尽量要大, 而且能在较大的应变范围内保持直线性。

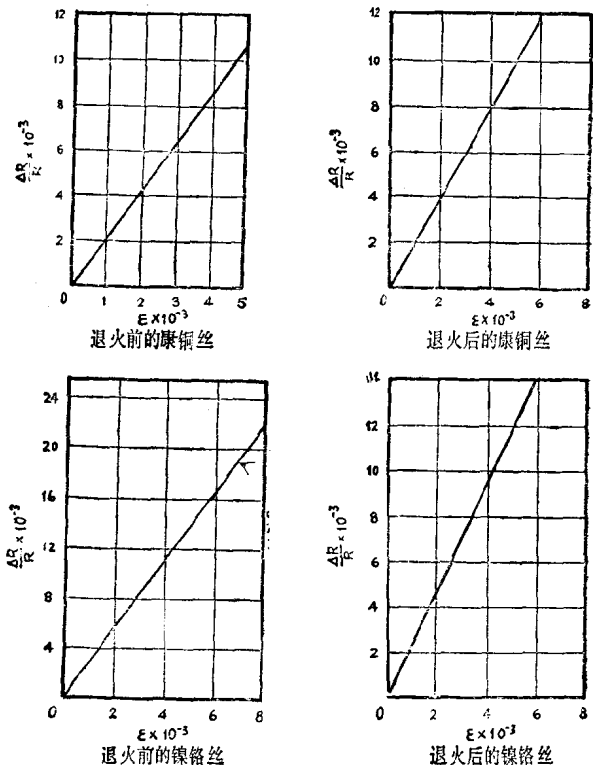


图 1—2 电阻丝电阻相对变化  $\frac{\Delta R}{R}$  与相对伸长率  $\epsilon$  的关系

2. 电阻系数  $\rho$  值尽量要大, 以便于制造小型的应变片, 而且要有较好的稳定性。

3. 电阻温度系数要小, 而且要有足够的稳定性。

4. 电阻丝的横截面积要均匀, 以保持单位长度电阻值的一致性。

5. 拉伸的延伸率要大, 耐疲劳性能要好。

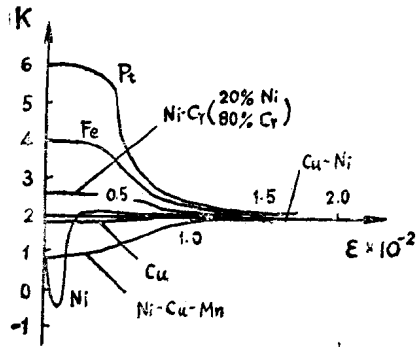


图 1-3 几种金属材料  $K$  与  $\epsilon$  的关系

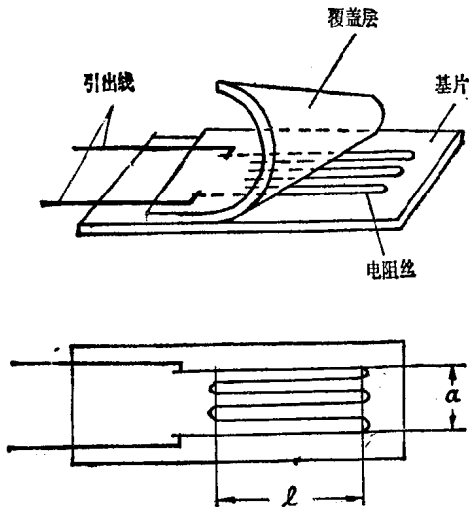


图 1-4 电阻应变片的构造示意图

6. 对高温、氧化、腐蚀等较为恶劣的环境，具有较好的适应性。

7. 易于加工，易于焊接，而且要价格低廉。

常用的几种电阻丝材料见表（1—1）。

最常用于制造电阻应变片的电阻丝材料是康铜丝，因为它的应变灵敏系数比较稳定，能在弹性范围和塑性范围内保持不变，且数值多为2.0。它还具有电阻系数较高，电阻温度系数较低的特点。另外，它易于加工，价格也较低廉。

常用的几种电阻丝材料物理性能 表1—1

材料名称	成分		灵敏系数 $K_s$	电阻系数 $\rho$ 欧·毫米 <sup>2</sup> / 米	电阻温度系数 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	线膨胀系数 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
	元素	%				
康铜	Cu	57	2.0	0.49	-20~20	14.9
	Ni	43				
镍铬合金	Ni	80	2.1~2.5	0.9~1.1	110~150	14.0
	Cr	20				
镍铬铝合金	Ni	73	2.4	1.33	-10~10	13.3
	Cr	20				
	Al	3~4				
	Fe	余量				

## （二）对基片和覆盖片材料的要求

基片和覆盖片的材料主要是薄纸和有机聚合物，特殊的电阻应变片也有用石棉、云母、无碱玻璃布和氧化镁等作基片的。对基片和覆盖片的要求是：

1. 绝缘性能好。
2. 线膨胀系数要小，而且要稳定。
3. 抗潮湿性能好。
4. 易于粘贴，并有一定的机械强度。

### (三) 对引出线材料的要求

引出线一般多是直径为 0.15~0.3 毫米的镀锡软铜线。由于引出线和很细的电阻丝的强度相差较大，很容易使电阻丝折断，因此在制造和使用应变片时，都应给以足够的重视。

## 四、使用电阻应变片测量应变及其他物理量的优点

使用电阻应变片为转换元件进行各种物理量的测量有如下的优点：

(一) 测量应变的灵敏度高，最小可测出 1 个微应变的量值。

(二) 因为应变片的尺寸小，重量轻，可以认为它没有惰性，故它不但能用于静态测量，而且也能用于动态测量，以及冲击试验和模型试验中的测量。

(三) 便于多点测量，易于集中。

(四) 测量数据便于记录，且能远距离传送。

(五) 测量应变的范围大，不仅可以测量材料弹性范围内的应变，也可以测量材料塑性范围内的应变。

(六) 可以测量狭小部位上的应变，如测量孔眼边缘等应力集中地方的应变。

(七) 测量精度高，在常温常压条件下，如操作技术正确，测量误差可在 1% 以下。

(八) 测量环境的适应性较强，可在高压、高温、水中等恶劣环境中使用。

(九) 既能测量材料的表面应变，也能测量材料（如混凝土）的内部应变。

(十) 利用应变片及其相应元件，可以制造出多种传感器，供测量力、压力、位移、速度、加速度、振幅等力学参数及其他物理量时使用。

## 第二节 电阻应变片的种类和特点

电阻应变片种类繁多，分类方法各异，现将几种常见的电阻应变片及其特点介绍如下。

### 一、电阻丝式应变片

电阻丝式应变片的敏感元件是丝栅状的金属丝，其中可以制成U型、V型和H型等多种形状。见图（1—5）。

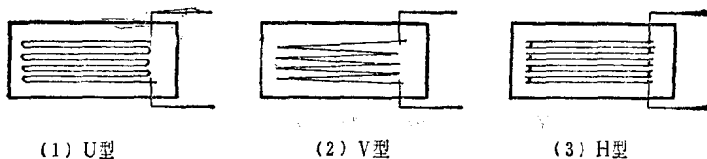


图1—5 几种常见的电阻丝式应变片

电阻丝式应变片从它的基片材质又可以分为，纸基的，纸浸胶基的和胶基的等种类。

纸基应变片，制造简单，价格便宜，易于粘贴，但耐热性和耐潮湿性不好。一般多在短期的室内试验中使用，在其他恶劣环境中使用，要采取有效的防护措施。使用温度一般在 $70^{\circ}\text{C}$ 以下。如用酚醛树脂、聚脂树脂等胶液将纸进行渗透、硬化等处理后，可使纸基应变片的特性得到改善，使用温度可提高到 $180^{\circ}\text{C}$ ，抗潮湿性也较好，可以长期使用。但粘贴时应注意将应变片粘贴牢固，防止翘曲。

应变片的基片也可以用环氧树脂、酚醛树脂和聚脂树脂等有机聚合物的薄片直接制成，其性能基本上和纸浸胶基的应变片相同。

## 二、箔式电阻应变片

箔式电阻应变片的工作原理基本上和电阻丝式应变片相同。它的电阻敏感元件不是金属丝栅，而是通过光刻技术、腐蚀等工序制成的一种很薄金属箔栅，故称箔式电阻应变片，见图（1—6）。金属箔的厚度一般在0.003~0.010毫米之间，它的基片和覆盖片多为胶质膜，基片厚度多在0.03~0.05毫米之间。

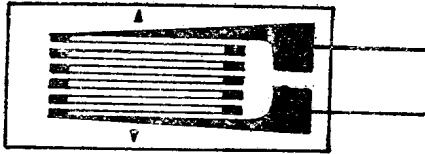


图 1—6 箔式电阻应变片

### （一）箔式应变片制造工艺

#### 1. 应变片图形设计

图形设计主要依据应变片所需要的几何尺寸、电阻值的大小和箔材的特性（厚度）计算而确定的。

#### 2. 照相制版

应变片图形底版的制造，直接关系到应变片的质量，所以必须有严格的精度要求，制成后要注意保护。

#### 3. 制片

- （1）处理箔材，防止起皱。
- （2）在暗室中将感光胶涂在处理过的箔材上。
- （3）曝光、显影、着色。
- （4）使应变片图形的感光部分耐酸。
- （5）涂基片胶。基片材料多为酚醛树脂，环氧树脂和

聚脂树脂等。

(6) 涂焊点保护层。

(7) 将应变片图形以外未感光部分的箔材腐蚀掉。

(8) 焊接引出线。

(9) 为使应变片达到设计的电阻值，对不合格的，需要再进行一次细腐蚀。

(10) 表面处理，用稀盐酸溶液除去感光胶，洗净干燥后，在箔栅表面均匀涂一层和基片相同的胶层作为覆盖片。

(11) 对制成的应变片进行外观和电阻值的检查。

## (二) 箔式应变片的特点

箔式应变片和电阻丝式应变片相比较，有如下的特点。

1. 金属箔栅很薄，因而它所感受的应力状态与试件表面的应力状态更为接近。其次，当箔材和丝材具有同样的截面积时，箔材与粘接层的接触面积要比丝材为大，使它能更好的和试件共同工作。第三，箔栅的端部较宽，横向效应相应的较小，因而提高了应变测量的精度。

2. 箔材表面积大，散热条件好，故允许通过较大的电流，因而可以输出较强的信号，提高了测量灵敏度。

3. 箔栅的尺寸准确、均匀且能制成任意形状，特别是为制造应变花和小标距应变片提供了条件，从而扩大了应变片的使用范围。

4. 便于成批生产。

5. 箔式应变片的缺点是，生产工序较为复杂。引出线的焊点采用锡焊，不适用于高温环境下测量，另外价格较贵。

## (三) 箔式应变片特性一例

1. 标距：25毫米

2. 使用面积： $6 \times 5$  (毫米<sup>2</sup>)



3. 电阻值：120欧姆
4. 灵敏系数： $2.1 \pm 1\%$
5. 蠕变： $-0.1 \sim 0.15\%$
6. 温度系数： $-(3.5 \pm 0.1) \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$
7. 机械滞后：在3000微应变下 $< 10$ 微应变。
8. 绝缘电阻： $> 30000$ 兆欧
9. 空载零漂： $< 2$ 微应变/1小时。

### 三、半导体应变片

#### (一) 半导体应变片的工作原理

一块半导体的某一轴向受到一定的作用力时，电阻率就会发生一定的变化，这种变化能够反应应变大小的现象，称为压阻效应，是制造半导体应变片的理论根据。半导体应变片见图（1-7）。

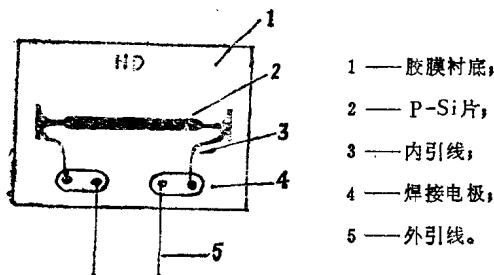


图 1-7 半导体应变片

当半导体应变片受到力的作用时，其电阻变化为：

$$\Delta R/R = (1 + 2\mu) \varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (1-10)$$

式中  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  为半导体应变片中一小条半导体受到力的作用时的电阻变化率，其值与沿半导体小条的纵向轴所受的应力之