

电阻丝应变测量 原理及其应用

(冶金机械教材)

武汉钢铁学院冶金机械教研组

一九七五年一月

毛主席语录

教育必須为无产阶级政治服务，必須同生产劳动相結合。

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结經驗，有所发现，有所发明，有所創造，有所前进。

入門既不难，深造也是办得到的，只要有心，只要善于学习罢了。

读书是学习，使用也是学习，而且是更重要的学习。

前 言

毛主席教导我们说：“阶级斗争，生产斗争和科学实验，是建设社会主义强大国家的三大革命运动……”

随着批林批孔运动的不断普及、深入和持久地发展，一个社会主义建设的新高潮正在兴起，这就要求我们大力开展科学研究工作，迅速提高技术水平，促进工农业生产，为社会主义建设的新高潮作出贡献。

冶金厂机械设备的工作特点之一是设备负荷大、而且受很多因素影响。按照目前的理论发展水平，往往很难应用计算的方法来确定设备的负荷。但是，了解设备的实际负荷状况（包括外载荷和另件应力大小）以及一些主要工艺因素对设备负荷的影响，不仅是挖掘设备潜力、扩大品种、提高产品质量的重要依据，而且也设计新设备和进一步进行理论研究提供可靠资料。因此对现厂生产设备的工作情况的实际测定，并结合进行相应的理论分析是非常必要的。

对应变（应力）进行测量的方法很多，有机械法、光弹法、涂漆法、电测法（包括电阻、电容、电感、压电等）等等。和其它方法相比，应用电阻应变片的电测法有许多优点：

（1）电阻应变片尺寸小、重量轻、可用粘贴的办法固定于被测另件上，不会改变被测另件的工作性质；

（2）电子仪器放大率高，因而总的装置灵敏度高，可测量出1公斤/厘米²的应力变化；

（3）测量装置惯性小（即频率特性高），可以测量迅速变化的信号；

（4）输出信号和应变值成线性关系；

（5）便于进行多点同时测量和记录。

由于上述种种优点，采用电阻应变片的电测法目前得到了广泛的应用，因此这本讲义里只着重介绍这个方法（以下就简称为电测法）。

电测法的基本原理可简单表示如下：

应变（应力）变化 $\xrightarrow{\text{电阻片}}$ 电阻变化 $\xrightarrow{\text{电桥电路}}$ 电压（电流）变化 $\xrightarrow{\text{放大器}}$ 放大了的电流变化 $\xrightarrow{\text{记录器}}$ 应变（应力）变化曲线

讲义第一章至第四章将分别叙述以上各个转换环节。

电测法不仅可以测量试件的应变，而且可以通过测量各种弹性元件的变形，间接测量出各种机械参量，例如力、扭矩、弯矩、位移、速度、加速度、振动等等。对这些机械参量的测量是实现机械设备自动控制和远距离控制必不可少的环节。讲义第五章以后各章将分别叙述应用电测法对上述各种参量进行测量的方法，并对误差分析和测量数据整理作一简要介绍。

目 录

第一章 电阻丝应变片	(1)
§ 1 电阻片的构造和工作原理.....	(1)
§ 2 电阻片的技术特性.....	(2)
§ 3 电阻片的类型和规格.....	(4)
§ 4 电阻片的粘贴、引线和保护.....	(6)
第二章 测量电桥电路	(11)
§ 1 测量电桥电路的工作原理及平衡调节.....	(11)
§ 2 多臂工作电桥.....	(13)
§ 3 电桥电路的温度补偿.....	(15)
§ 4 电阻片的串、并联.....	(16)
§ 5 测量各种应力时电阻片的贴法和接线法.....	(17)
第三章 电阻应变仪	(20)
§ 1 应变仪的组成和工作原理.....	(20)
§ 2 应变仪的选用.....	(23)
§ 3 应变仪的正确使用.....	(24)
第四章 光栅示波器	(29)
§ 1 振动物的工作原理及其特性.....	(29)
§ 2 示波器的光学系统和传动系统.....	(34)
§ 3 磁系统与恒温控制.....	(35)
§ 4 示波器的辅助设备.....	(36)
§ 5 示波器的正确使用.....	(38)
第五章 压(拉)力的测量	(40)
§ 1 电阻片式压力传感器.....	(40)
§ 2 压磁式及电容式压力传感器.....	(45)
§ 3 利用机器零件作传感器.....	(46)
第六章 扭矩的测量	(49)
§ 1 扭矩的测量方法.....	(49)
§ 2 扭矩的标定.....	(50)
§ 3 扭矩转换器.....	(51)
§ 4 集流环.....	(52)
第七章 零件和构件上应力的测量	(54)

§ 1	测量点的选择及其应力状态分析	(54)
§ 2	贴片方法和测量结果的计算	(56)
§ 3	剪应力的测量	(60)
第八章	运动参数的测量	(61)
§ 1	线位移的测量	(61)
§ 2	角位移的测量	(63)
§ 3	线速度的测量	(63)
§ 4	转速的测量	(64)
§ 5	加速度的测量	(65)
第九章	测量误差分析及试验数据处理	(72)
§ 1	概述	(72)
§ 2	电测中的误差	(72)
§ 3	测量结果及精度计算	(75)
§ 4	系统误差及测量的准确度	(77)
§ 5	间接测量的数据处理	(78)
§ 6	有效数字及其计算法则	(80)

第一章 电阻丝应变片

电阻丝应变片（简称电阻片）及其所组成的电桥是测量系统中的尖兵。通过它把被试另件的变形转变成电阻的变化。如果由它所组成的电桥处理得不好，就会影响测量的准确度甚至不能进行测量。因为贴片、焊接、组桥、保护等都是由实验者自己动手操作，所以对于电阻片的构造、工作原理及粘贴、引线和保护等一系列问题要有一个细致全面的了解，做到既弄懂道理又会实际操作，以保证测量工作的顺利进行。

§ 1 电阻片的构造和工作原理

常用的电阻片是由金属细丝或金属箔片绕成栅状组成。图 1—1 表示了金属栅丝式电阻片的构造。由金属细丝 5 绕成栅状，长度方向为 L，宽度为 a，在金属栅丝的上、下二面，必须盖以绝缘纸或胶膜 2 和 4，通常用考貝纸，电容器纸或高级卷烟纸，纸与金属丝之间还

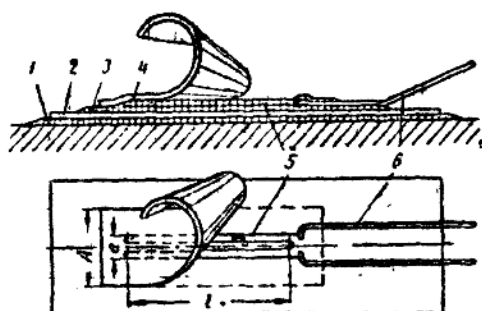


图 1—1 电阻丝应变片

必须用胶水粘牢，栅丝的两端要用比较粗的铜丝 6（0.2—0.3毫米）焊牢引出，使用时将电阻片用专门的胶水粘贴于被试另件上。

为了说明电阻片的工作原理，下面先说一下金属导线的应变效应。金属导线受力产生变形，导线的电阻值将发生变化。这种物理现象，称为金属导线的应变效应。电阻片就是根据这种应变效应实现从变形到电阻变化的转换。

金属导线的电阻可以表示为：

$$R = \rho \frac{L}{\pi r^2} \quad (\text{欧}) \quad (1-1)$$

式中 L ——导线长度（米），
 r ——导线横截面的半径（毫米），
 ρ ——导线材料的电阻率（欧·毫米²/米）。

由式（1—1）可知金属导线变形时，其电阻的变化不外乎二方面原因：

(1) 导线几何尺寸(即L和r)发生了改变;

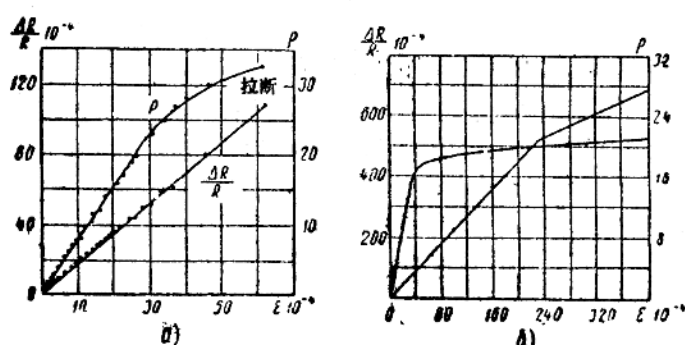
(2) 导线电阻率ρ的变化。

一般的金属导线电阻率的变化很小,故电阻片变形时电阻发生变化主要是由于几何尺寸的变化,但一些半导体的电阻率在变形时变化却很大,半导体电阻片就是根据这个原理制成的。

由实验知道:康铜丝或镍铬丝的长度相对变化值 $\frac{\Delta L}{L}$ 与电阻相对变化值 $\frac{\Delta R}{R}$ 在很大范围内是成线性正比关系如图1—2(这个特性给使用带来很大方便),即

$$\frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta L}{L} = K。$$

这个比例系数K,称作金属导线的灵敏系数。各种材料的实用的K值都是用实验的方法确定,表1—1中列出几种常用的金属导线及半导体材料的灵敏系数的实验数据。



a—未经退火的康铜丝 b—在真空中退火的康铜丝

图1—2 康铜丝变形和电阻变化的关系

表1—1 常用的金属导线及半导体材料的灵敏系数

材 料	灵 敏 系 数
镍铜(康铜)	1.9~2.1
镍铬合金	2.0~2.3
铬镍铁合金	2.5
二号铁铬铝	2.8~2.9
P—型硅	175
n—型硅	-133
P—型锗	102
n—型锗	-157

§ 2 电阻片的技术特性

(一) 电阻片的灵敏系数及横向效应

电阻片的灵敏系数 K ，就是电阻片的电阻值的相对变化量 $\frac{\Delta R}{R}$ 和电阻片的应变 ϵ 之间的比例系数，可用下式表示：

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad \text{或} \quad \frac{\Delta R}{R} = K\epsilon \quad (1-2)$$

各种电阻片的灵敏系数 K 在制造厂的产品说明书上均有说明（可参看表1—4）。

电阻片的灵敏系数和电阻丝的灵敏系数是不同的，从图1—1中弯曲式电阻片的构造可知，线栅是由纵向线丝（这是主要部分）和横向线丝（即转变的部分）组成，在电阻片受拉力时纵向线丝将被拉长，横向线丝将因被试件横向变形而缩短，两部分电阻变化值的符号正好相反，因此整个电阻片的灵敏系数 K 将比一根同样长度的直的电阻丝的灵敏系数 K_0 小一些。

$$\text{即} \quad K < K_0$$

这种现象叫做电阻片的横向效应。

电阻片的横向效应对测量是不利的，为了减小横向效应的影响，可采用标距（即 L ）长的电阻片（如 $L = 15 \sim 20 \text{ mm}$ ），或者采用短接式和箔式电阻片（详见§3）

(二) 电阻片的许可电流、许可应变、许可温度。

电阻片在实际使用时，是如图1—3接成电桥线路。增加电桥二端的电压，可以提高测量电桥的灵敏度。电压的增加会使通过电阻片的电流增加，由于受到片的散热能力的限制，将会使片的温度升高，胶剂软化，严重时烧坏纸基及胶水，使测量不能进行，所以电阻片的使用电流有一定的限制。

表1—2给出了对于用不同直径康铜丝作的电阻片的许可电流的试验数据。

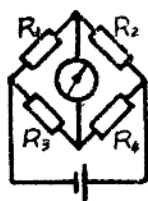


图1—3 测量电桥

在设计电桥电路时，根据电阻片的导线直径选取使用电流，例如以常用的康铜丝为例，其直径在 $0.01 \sim 0.02$ 毫米范围，供桥电压一般选 2 V ，在选用电阻值为 120Ω 康铜丝电阻片组成如图1—3电桥时，则每个电阻片上流过的电流可计算出

$$I = \frac{V}{R} = \frac{2}{120 + 120} = 0.0083 \text{ A} = 8.3 \text{ 毫安}$$

表1—2 电阻片许可电流

电阻丝直径（毫米）	电阻片许可电流（毫安）
0.05	97
0.025	34
0.012	9

计算结果说明电流值在允许范围内。

电阻片可测量的最小应变取决于电阻片的灵敏系数，测量仪器的灵敏度，以及外界干扰信号的大小。目前使用的仪器可以测量到 $1 \mu \epsilon$ （即 $\epsilon = 1/10^6$ ）。电阻片的最大允许应变受到电阻片应变效应的线性关系以及粘合剂质量的限制，一般不能超过 $\epsilon = 1.0\%$ 范围，为了增大电阻片的应用范围，可设计合适的弹性元件来放大或缩小被测的应变。

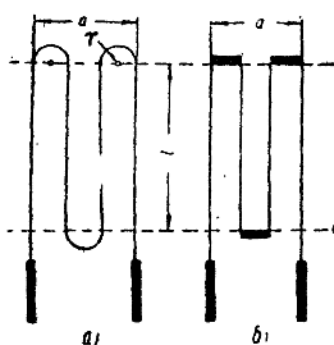
电阻片的允许使用的环境温度亦即被试零件的温度是有一定限制的，过高的温度将使电阻片内部所用的胶剂，以及电阻片的基底所用的材料产生软化，滑移。一般电阻片允许温度为 50°C 以内。某些胶基片可以在 $100^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 内使用（要配合使用耐高温的粘贴剂）。高温场合的测试应使用高温电阻片。

§ 3 电阻片的类型和规格

根据用途、被测对象的结构特点，可将电阻应变片制成各种型式。现将冶金机械测量常用的电阻片介绍如下：

(1) 金属栅丝式电阻片

这是常用的一种应变片，如图 1—4 (a)，应变丝一般用 $0.01\sim 0.03$ 毫米的金属细



a) 线绕式 b) 短接式

图 1—4 应变片丝栅

丝，根据丝的粗细及合金材料的性质绕成不同的根数。如上所述，这种片横向效应较大，因此目前生产一种短接式电阻片，如图 1—4 (b)，栅丝的转弯部分改用粗铜丝短接，这样就避免了横向效应。栅丝式电阻片的支承片的材料除纸基外也有用胶基的。胶基片的材料一般为聚合胶。纸基片价格较低，易于粘贴，粘贴的质量较容易检查。

(2) 金属箔片式电阻片 (如图 1—5)。

它是由很薄的（约 0.01 毫米左右）康铜或其他合金膜片经腐蚀方法制成，其支承片一般都用胶基。箔片式电阻片与栅丝式比较有

如下优点：

①由于线栅是扁平状，与胶基接触面积大些，粘牢固，传递变形更可靠；

②由于线栅是扁平的矩形，其散热面积大，故可通过较大的电流，这样供桥电压可以提高，电桥的输出信号大了不仅提高了测量的准确度，而且为简化测量装置（即用简单放大器或不用放大器，电桥输出信号直接用指示仪表显示）提供了有利条件。

③可以按不同的用途设计成各种不同形状，即所谓应变花，如图 1—6 所示。

④绝缘性能好

⑤线栅横向部分可作的较宽，以减小横向效应。

由于箔片片基都是胶膜，电阻片易呈现弯曲有弹力，粘贴时应当加压，故宜采用 502 快干胶或粘性较大的环氧树脂胶等。由于粘贴质量不易检查，故粘贴这种电阻片必须特别注意。

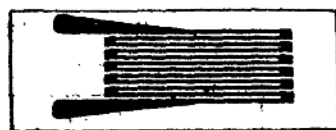


图 1—5 箔式电阻片

(3) 半导体电阻片，如图 1—7

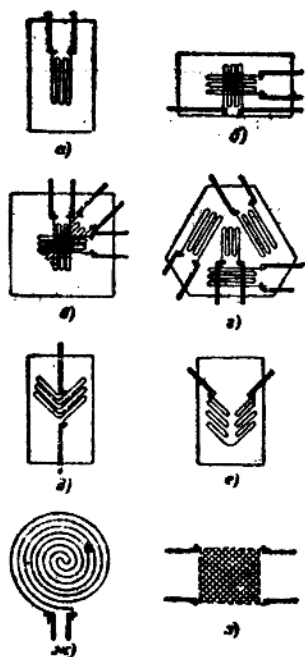


图 1-6 特殊用途应变片

- a) 测一个方向的变形,
 b) 测二个方向的变形
 b) 丁) 测主应变及其方向
 d) e) 消除横向变形影响, 测单向变形
 f) 测薄膜变形
 g) 测扭转变形

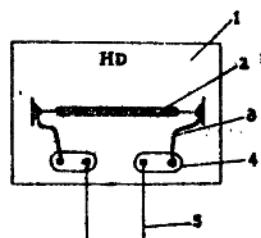


图 1-7 半导体电阻片

- 1—胶膜衬底;
 2—P-si 片;
 3、5—内、外引线,
 4—焊接电极

对半导体的某一轴向施加一定的压力时, 其电阻率就会产生很大的变化, 半导体应变片就是根据这种压阻效应的原理制成的。它的灵敏系数 K 可以达到 100 以上, 故可以省掉应变仪, 给测量带来很多方便, 是应变测量的发展方向之一。上海华东电子仪器厂生产的 P 型硅半导体应变片技术参数列于表 1-3 中。

半导体应变片现在还存在某些问题, 主要是灵敏系数随温度和变形量而变化, 使用时要对其特性有全面了解才行。

(4) 高温电阻片

冶金工厂中有些机械设备, 如烧结厂冷却用振动筛, 工作温度很高, 超过普通电阻片的允许温度, 因此要用高温电阻片进行测量。目前华东电子仪器厂生产的高温电阻片的金属栅丝是用温度系数很小的卡玛丝制成, 底基用金属薄板, 栅丝与底基之间用耐热的粘附剂粘结, 使用时用点焊机将片点焊在被试另件上, 所以在 400°C 的情况下仍然可以正确传递变形。这种电阻片用来进行动态测试时还存在一些待解决问题。

电阻片的规格可按丝栅的几何尺寸来区分。

按几何尺寸可分为三种,

表1—3

国产半导体应变片参数

参数名称	PBD 7—1 K型	PBD 6—350型	PBD 7—120型	PBD 7—60型
材 料	P—si 单晶	P—si 单晶	P—sj 单晶	P—si 单晶
几何尺寸(mm ³)	7×0.4×0.05	6×0.4×0.07	7×0.05×0.08	7×0.3×0.05
电 阻 值 (Ω)	1 K±10%	350±10%	120±10%	60±10%
灵 敏 系 数	140±5%	130±5%	120±5%	110±5%
电 阻 温 度 系 数 (1/°C)	<0.4%	<0.3%	<0.2%	<0.10%
灵敏度温度 特性 (1/°C)	<0.35%	<0.3%	<0.2%	<0.15%
极 限 工 作 温 度 (°C)	100	100	100	100
最 大 工 作 电 流 (mA)	15	15	25	25

(1) 短标距电阻片 $L = 2 \sim 7$ 毫米;

(2) 中标距电阻片 $L = 10 \sim 30$ 毫米;

(3) 长标距电阻片 $L > 30$ 毫米。

机械测量常用的是中标距, 测量混凝土构件采用长标距, 应力分布不均或另件尺寸小时则要用短标距。

电阻片的原始电阻一般在30~1000欧姆之间, 我国常用的为120欧姆。

目前我国生产的电阻片没有统一的规格, 部份厂生产的电阻片的技术数据列于表1—4中, 供使用选择。

§ 4 电阻片的粘贴、引线和保护。

电阻片粘贴质量的好坏, 对测量精度有极大的影响。现将电阻片粘贴的工艺过程和影响粘贴质量的因素, 分述如下:

(一) 选用粘胶剂

为了保证良好的粘贴质量, 对粘胶剂有如下的要求:

(1) 具有足够的强度和韧性, 在冲击或反复应力的作用下, 能正确传递变形, 更不应产生裂纹;

表 1—4

部份国产应变片技术数据

类 型	丝栅几何尺寸 $a \times L \text{ mm}^2$	原始电阻 (欧)	灵敏系数K	产 地	备 注
纸 基 丝 式	2.8×18	120	2.0~2.1	上 海	
	2×5	120	2.0~2.3	北 京	
	2×10	120	2.0~2.3	北 京	
	3×15	120	2.0~2.3	北 京	
	3×20	120	2.0~2.3	北 京	
	5×100	300	2.0~2.3	北 京	
胶 基 丝 式	3×12	60	1.9~2.1	上 海	
	5×13	120	1.9~2.1	上 海	
	9×12	200	1.9~2.1	上 海	
	11×11	320	1.9~2.1	上 海	
胶 基 短 接 式	2×6	120	2.0~2.3	北 京	
	3×10	120	2.0~2.3	北 京	
	3×15	120	2.0~2.3	北 京	
胶 基 箔 式	3×5	60~120	2.0~2.2	上 海	
	5×6	60~120	2.0~2.3	北 京	
	10×12	60~120	2.0~2.3	北 京	
应 变 花	2×10	120	2.0~2.3	北 京	二片或三片交叉成 45° 、 60° 、 90°
高温电阻片	2×7	120		上 海	金属底板焊接式

(2) 与金属表面有较强的粘附力;

(3) 良好的绝缘性能,在胶层很薄的情况下,也能保证绝缘电阻在 $200\text{M}\Omega$ 以上。

除了上述基本要求外,还希望粘胶剂具有使用方便、干燥快、不吸潮、能耐热、耐水、耐酸碱和有机溶剂,对金属无腐蚀等等性能。

虽然对粘胶剂有上述许多要求,但是它并不是什么神秘的东西,许多单位在实践中都发现和创造了各种各样新的粘胶剂。下面将几种目前常用的粘胶剂的成份、性能、固化条件等列于表 1—5 中。

表 1—5 中介绍的各种粘胶剂各有其优缺点,必须根据使用时的具体条件进行选朋。总的说,加温固化胶,粘贴效果较好,但使用手续麻烦,只适用于能在实验室粘贴的小零件或专用的压力传感器(如轧机的压头)等,而常温聚合胶或挥发胶使用方便,适合于现场对大机件测试时使用。根据我们经验,对大多数冶金机械的测量,只要注意防水防潮,使用 502 胶能得到比较满意的结果。

(二) 打磨清洗

粘贴电阻片的金属表面必须用手提砂轮或刮刀、锉刀等打磨到一定的光洁度(▽6~8)左

右)，并用细砂纸打成很细的交叉纹路，有些机器表面太粗糙及位置狭小不能达到上述光洁度要求，也要尽可能打磨得平一些，不得有麻点。

表 1—5 常用粘胶剂成份、性能、特点

名称 型号	成 份	固化温度 和 时 间	固化压力	使用 温度	特 点	备 注
丙酮赛璐路胶	赛璐路8~12克 丙酮100克	常温自然挥发 12~24小时	不 需	50°C	使用方便， 易吸收水份 变质	
环氧树脂胶1#	环氧树脂634# 或6101#*100克， 邻苯二甲酸二丁 脂20克，乙二胺 6~7克	常温固化 12~24小时	接 触 压 力	60°C	粘附力强， 耐溶剂、化 学药品、油 类、水能力 强	用，不能保存 胶后需立即使 加固化剂乙二
环氧树脂胶5#	643#或6101# 100克，磷酸三 苯脂20克，顺丁 烯二酸酐30克， 氧化铝粉50克	180°C 二小时	1公斤/厘米 ²		耐热性良 好，强度高	
502 快干胶	α 氰基丙烯酸 乙脂等	常温吸收空 气中微量水 份聚合固化	不 需	70°C	使用方便干 燥快，粘附 力大，抗酸 碱能力差， 耐水性差	有成品购买 存3~6个月， 室温下只能保
1720高强度漆	聚乙烯醇缩甲 醛等	160°C 二小时	1公斤/厘米 ²	110°C	强度高，耐 热性良好， 耐油，耐水 性好	
JSF—2 (66—2)	聚乙烯醇缩丁 醛酚醛树脂	160°C 三小时	1公斤/厘米 ²	100°C	耐热、耐 水、耐化学 药品，贴片 工艺麻烦	
聚酰亚胺耐 高温 胶	芳香族二元胺、 生克酐含有酰胺 键的二元胺溶于 二甲基乙酰胺溶 剂	200°C 一小时 280°C 二小时	1~3 公斤/厘米 ²	250°C	耐 高 温	

清洗这一关必须要耐心、细致、反复多次，清洗范围要适当扩大，这样才能确保贴片处真正清洁。清洗一般是用脱脂棉浸以丙酮或四氯化碳或航空汽油进行擦拭。清洗完毕要立即贴片，以免污染。

(三) 电阻片的粘贴

贴片前先在实验室中对电阻片进行挑选，栅丝不整齐、有霉、锈斑点、胶底或纸基不完整等缺陷的片都不能使用。同时用惠斯顿电桥逐片测量其精确电阻值，并将阻值相差 $0.2 \sim 0.3\Omega$ 范围的电阻片编成一组；粘贴时，一个电桥，要用同一组的电阻片以便于调节电桥平衡。

贴片的操作方法要根据所用粘胶剂而定，一般要求胶要涂均匀，胶水适量，胶多弄得到处都是会造成不好下手，胶少，会使部份地方没有粘上。下面举三种胶为例说明操作过程。

丙酮赛璐珞胶的粘贴：我们采用把电阻片浸到胶水中，二秒钟取出放置到待贴的位置，根据事先画好的线或纸样，找正位置，再用一张薄腊纸（废电容器纸）盖上，轻轻加压，待稍微干后再用手指轻轻排出多余的胶水（胶层过厚将不能真实反映另件表面变形情况，引起测量误差），并逐渐增加压力，直到粘牢为止。丙酮赛璐珞胶过干时不好贴片，可加丙酮稀释之。

502 胶的粘贴：从胶水瓶挤出一滴胶水放在片的背面，涂均后马上放置在待贴的位置，上面用一张薄腊纸盖上先轻轻加压，后逐渐加重，挤出多余的胶水（胶厚 0.1mm 左右为好），待粘牢为止，再移开手指，特别引起注意的是在胶水快凝结之时不可错动片的位置。

JSF-2 胶的贴法：将试件表面均匀地刷涂一层胶液，在室温下放置 20 分钟，再于 $50^\circ \sim 60^\circ\text{C}$ 下放 15 分钟，然后升温到 $85^\circ \sim 95^\circ\text{C}$ 保持 1 小时，使胶中的乙醇完全挥发掉。这时再将电阻片涂胶液贴在试件上并加一定的压力（1 公斤/厘米²），逐步升温到 $140^\circ \sim 160^\circ\text{C}$ 并保持 2 小时即可牢固粘合。

(四) 电阻片的干燥

在使用高温聚合胶时，当高温聚合工作完成以后，电阻片也就完成了干燥的过程。

常温固化胶或挥发胶依靠自然干燥，需时较长，为了不影响生产而需缩短其干燥时间，则可对贴片处适当加热；例如，丙酮赛璐珞胶常温下自然干燥约需 12~24 小时，为了加快其干燥过程，在贴好片后自然干燥 1~2 小时，即可用红外线灯泡照射或电吹风吹烤 2~4 小时，待绝缘电阻达到 $200\text{M}\Omega$ 以上就可以了。

502 快干胶，粘贴后，自然干燥 1~2 小时即可，环境潮湿时，可稍加烘烤。

(五) 焊接引线（参看图 1—8）

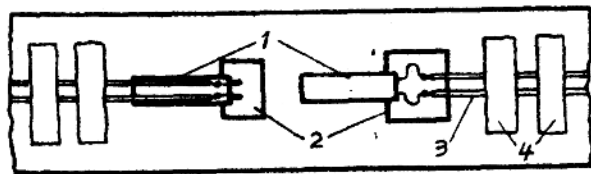


图 1—8 电阻片的焊接引线

首先将单芯胶质线 3 放好位置，并用白胶布或塑料胶布 4 粘好固定下来；再将电阻片 1 的二根引出线打一个弯或往回倒与单芯胶线铜芯绞合在一起，用电烙铁焊牢并使焊点光滑，剪掉多余的引线。在引出线及焊点下面要垫以足够的绝缘物 2，如塑料胶布，黄腊绸等。上

面再复盖好保护层。注意引线焊接处对电阻片的绝缘有很大的关系，如果处理不好，潮气进入同样会降低绝缘。焊接引线仅仅用胶布粘紧还是不可靠的，所以在焊接之后，必须再用白布带反复扎紧，或用常温聚合的环氧树脂胶或用薄金属片点焊，将线牢牢固定在金属试件上，在快速运动的另件上贴片时，这一工作更要注意。

(六) 电阻片的防潮、防水保护

冶金机械的很多机器，是在喷水的情况下工作的，即使不喷水，现场条件也很潮湿，所以必须采取有力措施防潮防水。

许多东西都可以用来做防潮剂，应根据测定的要求和具体环境条件来选择，例如氯丁橡胶、三元共聚乙丙橡胶、硅橡胶、环氧树脂等等，密封效果均很好，可作永久压头的密封，而石腊、沥青、高压电缆胶等则是现场短期测定中使用方便，效果较好的防潮剂。

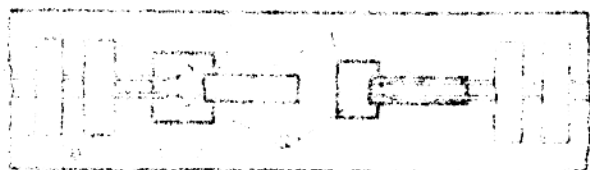
石腊防潮剂的配方有许多，根据我们经验，下述配方较好：石腊45%，松香35%，松节油10%，白凡士林10%。混合加热溶解后，降温至50°C使用。这种密封的另件，浸入水中一个月后，电阻片绝缘仍然良好。

采用沥青密封时，事先应将沥青加热，使其中水份蒸发，用万用表测量其溶液的电阻值达到200MΩ以上为止。在现场测试时，有时因另件温度高，沥青会软化流动（尤其是在垂直的面上），这时可用环氧树脂涂布于沥青外，形成保护壳，效果很好。

防潮效果和操作认真细心很有关系，要求金属表面干净无油脂，涂布防潮剂时，温度要高，涂布面积要足够大，特别要注意边沿地带的粘合质量，以确保防潮剂与金属面接合严密，水汽透不进去。为了防潮效果更好，也可以采取将上述各种防潮剂多层交叉使用，例如先将石腊混合物涂一层，上面再放一些粉末状硅胶，（用以吸收潮气），外面再涂一层沥青或环氧树脂保护层。

有人对压头的防水采取用高强度漆包线漆粘贴并高温聚合，外面再涂以氯丁橡胶或乙丙橡胶保护，可以达到长期的防水效果。

最后有一个问题必须引起大家的注意，从电阻片的粘贴，经干燥、焊接、包扎、防潮防水保护，每一个环节都可能将电阻丝弄断或将绝缘损坏，所以每做完一个环节都要进行一次测量，用万用表检查绝缘及片丝的通断情况。如果不小心损坏可以及时重新补贴，以免最后发现就费工费时了。



第二章 测量电桥电路

电阻片贴在受力的试件上，跟随试件变形时电阻值的变化是很小的。一般在百分之几到万分之几。例如：设电阻片的原始电阻 $R = 120\Omega$ ，电阻片灵敏系数 $K = 2.0$ ，试件受载时应力 $\sigma = 10^8/\text{cm}^2$ ，试件弹性模数 $E = 2.1 \times 10^{10} \text{ kg/cm}^2$ ，则试件应变为：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{1}{2.1 \times 10^6} = 4.8 \times 10^{-7}$$

根据公式 (1—2)： $\Delta R = R \cdot \varepsilon \cdot K = 120 \times 4.8 \times 10^{-7} \times 2.0 = 0.00012\Omega$ 。

显然这样小的电阻变化用普通的测量电阻的仪表是不能直接测量出来的。因此必须通过电桥电路把电阻的微小变化转变成电压（或电流）的变化，再用电子放大器（应变仪）放大几万倍后，用仪表显示或用示波器记录。

此外，采用电桥线路还可以对电阻片的温度效应进行补偿，还可以在被试另件受力复杂情况下，排除非测量应力对所测量的应力的干扰。这些都将在本章内一一介绍。

§ 1 测量电桥电路的工作原理及平衡调节

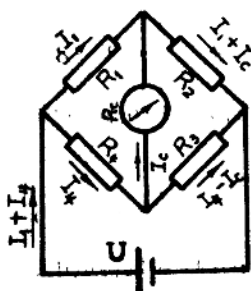


图 2—1 直流电桥

在测量中使用最广的是简单的四臂电桥，通常称为惠斯顿电桥，它是由四个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 （称为电桥的四个桥臂）联接起来形成一环路如图 2—1。其中有二个对角线端：一个对角线端接电源称电源对角线端，另一个对角线端叫做测量对角线，接指示仪表（在应变仪电路中测量端就接放大器输入端）。

下面讨论一下桥臂电阻的变化和电桥输出之间的关系，假设电源电压为 U ，电表内阻为 R_c ，流经 R_1 、 R_4 、 R_c 的电流分别为 I_1 、 I_4 和 I_c 。

按克希荷夫第二定律可写出下列闭合电路的电动势方程式：

$$\text{对 } U、R_1 \text{ 和 } R_2 \text{ 闭合电路来说：} R_1 I_1 + R_2 (I_1 + I_c) = U \quad (2-1)$$

$$\text{对 } U、R_3 \text{ 和 } R_4 \text{ 闭合电路来说：} R_4 I_4 + R_3 (I_4 - I_c) = U \quad (2-2)$$

$$\text{对 } R_1、R_c \text{ 和 } R_4 \text{ 闭合电路来说：} R_4 I_4 + R_c I_c = R_1 I_1 \quad (2-3)$$

联解上述三式可得：

$$I_c = \frac{U(R_3 R_2 - R_1 R_4)}{R_c(R_3 + R_4)(R_1 + R_2) + R_3 R_4(R_1 + R_2) + R_1 R_2(R_3 + R_4)} \quad (2-4)$$

当电桥测量对角线所接的不是电流表而是电子放大器的输入端时， R_c 就是放大器的输入阻抗，它比电桥电阻大许多倍，这时要用电压 U_c 的大小来表示电桥的输出，故可将 (2—4) 式改写为电压降的公式：

$$U_c = I_c R_c = \frac{U(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_2) + \frac{1}{R_c}[R_3 R_4(R_1 + R_2) + R_1 R_2(R_3 + R_4)]}$$

由于 R_c 很大, 分母中的第二项可以忽略不计, 故上式可改写为:

$$U_c = I_c R_c = \frac{(R_1 R_3 - R_2 R_4)U}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2-5)$$

由 (2-4) 或 (2-5) 式可以看出:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (2-6)$$

是电桥平衡条件, 这时电桥没有信号输出。由此可得电桥性质的一个重要结论: 电桥两对边电阻值的乘积相等是电桥平衡的条件。

进行应变测量时, 贴于试件上的电阻片即相当于电桥中的一个桥臂 (假设为 R_1), 另件变形时, 电阻片阻值发生变化 (变为 $R_1 + \Delta R$), 电桥的平衡被破坏, 测量对角线就有电压或电流输出。今假设电桥为等臂电桥, 即: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, 而且 $R_c = R$ (即输出阻抗与负荷阻抗匹配, 电桥输出电流最大)。那么以 $R_1 + \Delta R$ 代替 R_1 代入公式 (2-4) 中就可求得电桥的输出为:

$$\begin{aligned} I_c &= U \frac{(R_1 + \Delta R) R_3 - R_2 R_4}{R_c (R_3 + R_4) (R_1 + \Delta R + R_2) + R_3 R_4 (R_1 + \Delta R + R_2) + (R_1 + \Delta R) R_2 (R_3 + R_4)} \\ &= U \frac{\Delta R}{8R^2 + 5R \cdot \Delta R} \end{aligned} \quad (2-7)$$

由 (2-7) 式可见 I_c 和 ΔR 并不是严格的线性关系, 但是在实际测量中, 往往 $\Delta R < 0.01R$, 因此在测量误差允许范围内可将分母中带有 ΔR 项忽略掉。于是 (2-7) 式可改写成:

$$I_c = \frac{U}{8R} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

由于通过电阻片的电流为 $I = \frac{U}{2R}$, 所以可以得出电桥输出的电流 I_c 和流过电阻片的电流 I 的关系为:

$$I_c = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot I \quad (2-9)$$

如果将 $R_1 + \Delta R$ 代入 (2-5) 式中, 就可以得出电桥输出电压 U_c 和供桥电压 U 的关系式为:

$$U_c = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot U \quad (2-10)$$

由第一章公式 (1-2) 可知

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (K \text{—电阻片灵敏系数})$$

故可将 (2-9) (2-10) 改写为:

$$I_c = \frac{1}{4} I K \varepsilon \quad (2-11)$$

$$U_c = \frac{1}{4} U K \varepsilon \quad (2-12)$$

因此通过电桥输出电流或电压值的测量即可知另件应变值 ε 的大小, 这种方法叫“偏位法”。动态电阻应变仪就是利用这个原理来测量应变。