

第2章 电阻应变计的原理及使用

2.1 电阻应变计的工作原理

电阻应变计习惯称为电阻应变片，简称应变计或应变片。出现于第二次世界大战结束的前后，已经有六十多年的历史。电阻应变计的应用范围十分广泛，适用的结构包括航空、航天器、原子能反应堆、桥梁、道路、大坝以及各种机械设备、建筑物等；适用的材料包括钢铁、铝、木材、塑料、玻璃、土石、复合材料等各种金属及非金属材料。并且，它不仅适用于室内实验、模型实验，还可以在现场对实际结构或部件进行测量，这些特点是任何一种传感元件或传感器所不能比拟的。另外，它在对结构和设备的安全监测方面也有广泛的应用前景。

电阻应变计是一种用途广泛的高精度力学量传感元件，其基本任务就是把构件表面的变形量转变为电信号，输入相关的仪器仪表进行分析。在自然界中，除超导外的所有物体都有电阻，不同的物体导电能力不同。物体电阻的大小与物体的材料性能和几何形状有关，电阻应变计正是利用了导体电阻的这一特点。

电阻应变计的最主要组成部分是敏感栅。敏感栅可以看成为一根电阻丝，其材料性能和几何形状的改变会引起栅丝的阻值变化。

设一根金属电阻丝，其材料的电阻率为 ρ ，原始长度为 L 。不失一般性，假设其横截面是直径为 D 的圆形，面积为 A ，初始时该电阻丝的电阻值为 R ：

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

在外力作用下，电阻丝会产生变形。假设电阻丝沿轴向伸长，其横向尺寸会相应缩小，横截面的半径减少导致横截面面积发生变化。导线的横截面原面积为 $A = \frac{\pi D^2}{4}$ ，其相对变

化为

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = -2\mu \frac{dL}{L} \quad (2-2)$$

其中 μ 为金属丝材料的泊松比。 dL/L 为金属导线长度的相对变化，用应变表示，即：

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad (2-3)$$

在电阻丝伸长的过程中所产生的电阻值的变化成为：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\varepsilon \quad (2-4)$$

在式中，前一项是由金属丝变形后电阻率发生变化所引起的；后一项是由金属丝变形后几何尺寸发生变化所引起的。在常温下，许多金属材料在一定的应变范围内，电阻丝的相对电阻变化与丝的轴向长度的相对变化成正比。即：

$$\frac{dR}{R} = K_s \varepsilon \quad (2-5)$$

其中：

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

式中, K_S 为单根金属丝的灵敏系数。表示金属丝的电阻变化率与它的轴向应变成线性关系。根据这一规律, 采用能够较好地变形过程中产生电阻变化的材料, 制造将应变信号转换为电信号的电阻应变计。

2.2 电阻应变计的结构

电阻应变计主要由敏感栅、基底、覆盖层及引出线所组成, 敏感栅用粘合剂粘在基底和覆盖层之间。一种丝绕式应变计的典型结构如图 2-1 所示。

2.2.1 敏感栅

敏感栅是用合金丝或合金箔制成的栅。它能将被测构件表面的应变转换为电阻相对变化。由于它非常灵敏, 故称为敏感栅。它由纵栅与横栅两部分组成, 纵栅的中心线称为应变计的轴线。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 2-2。栅长尺寸一般为 0.2~100 毫米。

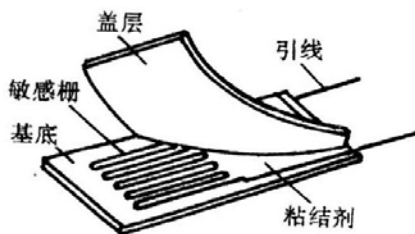


图 2-1 电阻应变计的结构

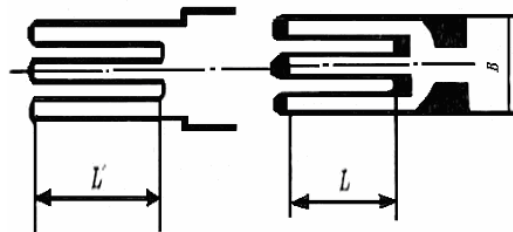


图 2-2 敏感栅的尺寸

敏感栅是电阻应变计的核心组成部分, 它的特性对于电阻应变计的性能有决定性的影响。为了改善电阻应变计的性能, 人们探索了多种材料的应变—电阻特性, 从而发展了敏感栅材料, 包括金属、半导体和金属氧化物等。目前常用的金属敏感栅材料主要有铜镍合金、镍铬合金、镍钼合金、铁基合金、铂基合金、钯基合金等。以金属材料为敏感栅的电阻应变计的灵敏系数大都在 2.0 ~4.0 间。硅、锗等半导体材料由于具有压阻效应, 所有也被人们用作敏感栅的材料, 以半导体材料为敏感栅的电阻应变计的灵敏系数大都在 150 左右, 远高于以金属材料为敏感栅的电阻应变计。

通常对制造应变计敏感栅的材料的要求主要是:

1. 灵敏系数 K_S 高, 而且在较大的应变范围内保持为常数。康铜丝在弹性状态和塑性状态下, K_S 值基本上是常数。
2. 敏感栅材料的弹性极限要高于被测构件材料的弹性极限, 以免在测试中因敏感栅先出现塑性变形而影响测试精度。
3. 电阻率 ρ 高, 分散度小, 随时间变化小。
4. 电阻温度系数小, 在宽的温度范围内保持不变; 分散度小, 对温度循环有完全的重复性; 有足够的稳定性, 以减小由温度变化而引起的测量误差。
5. 延伸率高, 耐腐蚀性好, 疲劳强度高。
6. 焊接性能好, 易熔焊和电焊; 对引线的热电势小。
7. 加工性能好, 以便制成细丝或箔片。

应变计常用金属材料的物理性能见表 2-1。表中的电阻温度系数为 20°C 以下、温度升高一度时材料的电阻变化率。

表 2-1 应变计常用金属材料的物理性能

材料名称	牌号或名称	成分		灵敏系数 K_s	电阻率 ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	电阻温度系数($10^{-6}/^\circ\text{C}$)
		元素	%			
铜镍合金	康 铜	Cu Ni	55 45	1.9~2.1	0.45~0.52	± 20
铁镍铬合金		Fe Ni Cr Mo	55.5 36 8 0.5	3.6	0.84	300
镍铬合金		Ni Cr	80 20	2.1~2.3	1.0~1.1	110~130
	6J22 (卡玛)	Ni Cr Al Fe	74 20 3 3	2.4~2.6	1.24~1.42	± 20
	6J23	Ni Cr Al Cu	75 20 3 2	2.4~2.6	1.24~1.42	± 20
铁铬铝合金		Fe Cr Al	70 25 5	2.8	1.3~1.5	30~40
贵金属合金	铂	Pt	100	4~6	0.09~0.11	3900
	铂 铱	Pt Ir	80 20	6.0	0.32	850
	铂 钨	Pt W	92 8	3.5	0.68	227

2.2.2 基底

基底是电阻应变计的一个组成部分。其作用是在应变计被安装到试件上之前，将敏感栅永久地或临时地安置于其上，同时还要使得敏感栅和粘贴应变计的试件之间相互绝缘。

对电阻应变计的基底材料，一般有下列一些要求：柔软并具有一定的机械强度，粘结性能和绝缘性能好，蠕变和滞后现象小，不吸潮，能在不同的温度下工作等。

常用的基底材料介绍如下：

1. 纸 用纸作为应变计基底的优点是柔软并易于粘贴，应变极限大和价格低廉。缺点是耐湿性和耐久性差。通常有厚纸基底和薄纸基底两种。

2. 胶膜 环氧树脂、酚醛树脂、聚酯树脂和聚酰亚胺等有机类粘结剂均可制成薄膜，用作应变计的基底。它们的特点是柔软，耐湿性和耐久性均比纸好。

3. 玻璃纤维布 无碱玻璃纤维布的耐湿性、机械强度和电绝缘性能都很好，并且耐化学药品、耐高温（400~450℃），多用作中温或高温应变计的基底。由它制成的应变计的刚度比胶膜基底要大。

4. 金属薄片 不锈钢及耐高温合金等薄片或金属网可作为焊接式应变计的基底。焊接式应变计安装后不需要经过一般应变计粘贴时所需要的加温固化处理，但若若要获得高的测量精度，在将应变计基底焊到试件上后需要进行热处理以消除由于焊接时在金属基底和试件上产

生的应力。金属薄片作基底的应变计刚度较大，会对试件产生增强效应，而金属网状基底的应变计增强效应则相对较小。

临时基底型应变计可用金属薄片或合成纤维（如涤纶）制作框架作为临时基底，也可以用乙烯基胶带作为临时基底。

2.2.3 引线

电阻应变计的引线是从敏感栅引出的丝状或带状金属导线。通常引线是在制造应变计时就和敏感栅连接好而成为应变计的一部分，也有某些箔式应变计在出厂时不带引线的。

引线应具有低和稳定的电阻率以及小的电阻温度系数。常温应变计的引线材料多用紫铜，为了便于焊接，可在紫铜引线的表面镀锡。中温应变计、高温应变计的引线可以在紫铜引线的表面镀银、镀镍、镀不锈钢，或者采用银、镍铬（或改良型）、镍、铁铬铝、铂或铂钨等。高疲劳寿命的应变计可采用铍青铜作引线。

四、盖层

电阻应变计的盖层是用来保护敏感栅使其避免受到机械损伤或防止高温下氧化。常用的是以制作基底的胶膜或浸含有机胶液（例如环氧树脂、酚醛树脂等）的玻璃纤维布作为盖层，也可以在敏感栅上涂敷制片时所用粘结剂作为保护层。盖层的材料包括纸、胶膜及玻璃纤维布等。

2.3 电阻应变计的分类

电阻应变计的种类很多，分类的方法也很多。

根据许用的工作温度范围可分为常温、中温、高温及低温应变计；

- 1) 高温应变计 350°C 以上；
- 2) 中温应变计 60~350°C；
- 3) 常温应变计 -30~60°C；
- 4) 低温应变计 -30°C 以下。

根据基底材料可分为：纸基、胶膜基底（缩醛胶基、酚醛基、环氧基、聚酯基、聚稀亚胺基等）、玻璃纤维增强基底、金属基底及临时基底等。

根据安装方式可分为粘贴式、焊接式和喷涂式三类。

根据敏感栅材料可分为金属、半导体及金属或金属氧化物浆料等三类：

- 1) 金属应变计 包括丝式（丝绕式、短接式）应变计、箔式应变计和薄膜应变计；
- 2) 半导体应变计 包括体型半导体应变计、扩散型半导体应变计和薄膜半导体应变计；
- 3) 金属或金属氧化物浆料主要是制作厚膜应变计。

下面介绍几种常用的电阻应变计

2.3.1 金属丝式应变计

金属丝式应变计的敏感栅一般是用直径 0.01~0.05 毫米的铜镍合金或镍铬合金的金属丝制成。可分为丝绕式和短接式两种。丝绕式应变计是用一根金属丝绕制而成（见图 2-3），短接式应变计是用数根金属丝按一定间距平行拉紧，然后按栅长大小在横向焊以较粗的镀银铜线，再将铜导线相间地切割开来而成（见图 2-4）。

1. 丝绕式应变计

丝绕式应变计的疲劳寿命和应变极限较高，可作为动态测试用传感器的应变转换元件。丝绕式应变计多用纸基底和纸盖层，其造价低，容易安装。但由于这种应变计敏感栅的横向部分是圆弧形，其横向效应较大，测量精度较差，而且其端部圆弧部分制造困难，形状不易保证相同，使应变计性能分散，故在常温应变测量中正逐步被其它片种代替。

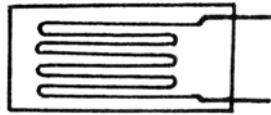


图 2-3 丝绕式应变计

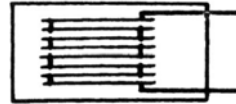


图 2-4 短接式应变计

2. 短接式应变计

短接式应变计也有纸基和胶基等种类。短接式应变计由于在横向用粗铜导线短接，因而横向效应系数很小 ($<0.1\%$)，这是短接式应变计的最大优点。另外，在制造过程中敏感栅的形状较易保证，故测量精度高。但由于它的焊点多，焊点处截面变化剧烈，因而这种应变计疲劳寿命短。

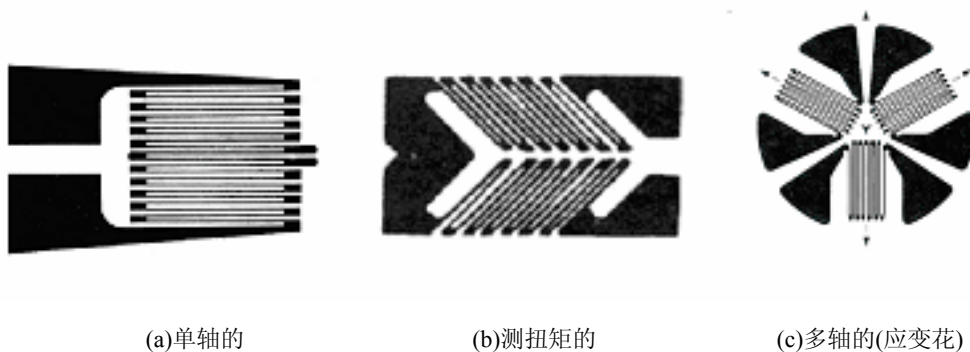
2.3.2 金属箔式应变计

箔式应变计的敏感栅是用厚度为 $0.002\sim 0.005$ 毫米的铜镍合金或镍铬合金的金属箔，采用刻图、制版、光刻及腐蚀等工艺过程而制成（见图 2-5）。基底是在箔的另一面涂上树脂胶，经过加温聚合而成，基底的厚度一般为 $0.03\sim 0.05\text{mm}$ 。

与丝绕式应变计相比，箔式应变计的优点是：

1. 敏感栅很薄，且箔材与粘合层的接触面积要比丝材的大，因而粘贴牢固，有利于变形传递，因而它所感受的应变状态与试件表面的应变状态更为接近，测量精度高；
2. 敏感栅薄而宽，在相同的横截面积条件下，箔栅的表面积比丝栅的要大，散热性好，故允许通过较大的电流，因而可以输出较强的信号，提高测量灵敏度；
3. 敏感栅的横向端部为较宽的栅条，故横向效应较小；
4. 箔式片能保证尺寸准确，线条均匀，故灵敏系数分散性小；
5. 箔式应变计的蠕变小、疲劳寿命长；
6. 加工性能好，能制成为各种形状和尺寸的应变计，尤其可以制造栅长很小的或敏感栅图案特殊的应变计；
7. 制造工艺自动化，可成批生产，生产效率高。

由于箔式应变计具有以上诸多优点，故在各个测量领域中得到广泛的应用。在常温的应变测量中有逐渐取代丝绕式应变计的趋势。



(a)单轴的

(b)测扭矩的

(c)多轴的(应变花)

图 2-5 金属箔式应变计

金属电阻应变计还可以按敏感栅的结构形状分为下述几类：

(1) 单轴应变计：单轴应变计一般是指具有一个敏感栅的应变计(见图 2-3、图 2-4)。这种应变计可用来测量单向应变。

(2) 单轴多栅应变计：把几个单轴敏感栅粘贴在同一个基底上，可构成平行轴多栅和同轴多栅，如图 2-6 所示。这种应变计可方便地测量构件表面的应变梯度。

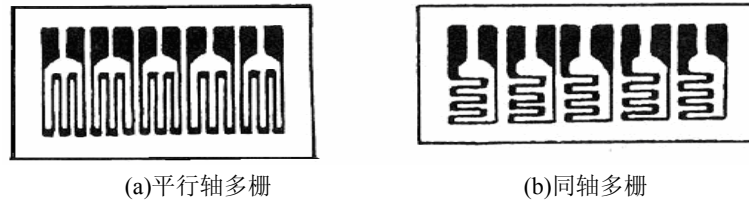


图 2-6 单轴多栅应变计

(3) 应变花 (多轴应变计): 具有两个或两个以上轴线相交成一定角度的敏感栅制成的应变计称为多轴应变计, 也称为应变花, 如图 2-7 所示。其敏感栅可由金属丝或金属箔制成。采用应变花可方便地测定平面应变状态下构件上某一点处的应变。

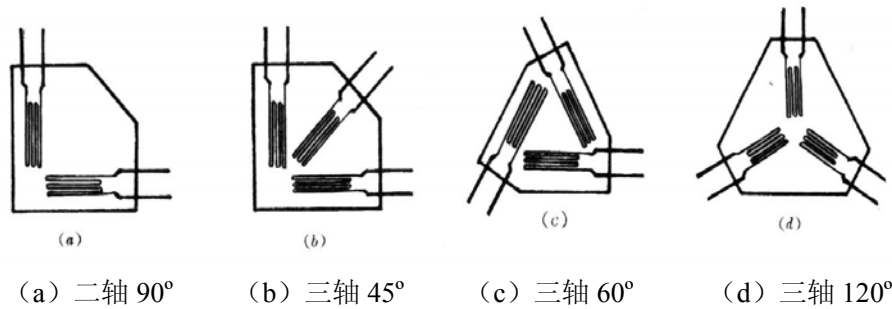


图 2-7 应变花

2.3.3 薄膜应变计

薄膜应变计的“薄膜”不是指用机械压延法所得到的薄膜, 而是用诸如真空蒸发、溅射、等离子化学气相淀积等薄膜技术得到的薄膜。它是通过物理方法或化学/电化学反应, 以原子, 分子或离子颗粒形式受控地凝结于一个固态支撑物 (即基底) 上所形成的薄膜固体材料。其厚度约在数十埃至数微米之间。薄膜若按其厚度可分为非连续金属膜、半连续膜和连续膜。

薄膜应变计的制造主要是成膜工艺, 如溅射、蒸发、光刻、腐蚀等。其工艺环节少, 工艺周期较短, 成品率高, 因而获得广泛的应用。

2.3.4 半导体应变计

半导体应变计是利用硅、锗、铍化钢、磷化镓等半导体材料制成的。当半导体材料沿晶轴方向受到机械应力作用时, 其电阻率发生变化, 这种性质称为压阻效应。电阻率的相对变化为

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_L \sigma \quad (2-7)$$

式中: π_L ——压阻系数; σ ——机械应力。

若以 $\sigma = E\varepsilon$ (E 为晶体材料的弹性模量, ε 为应变) 代入式 (2-6) 得灵敏系数

$$K_s = 1 + 2\mu + \pi_L E \quad (2-8)$$

由于压阻效应 $\pi_L E$ 远大于几何尺寸改变 ($1 + 2\mu$) 的影响, 故半导体应变计的灵敏系数可简化为

$$K_s = \pi_L E \quad (2-9)$$

K_s 值取决于半导体材料的类型、杂质浓度、晶轴方向和温度等。同一种材料其灵敏系数

随掺入的杂质(如硼、铝、锑、钢等)浓度及晶轴方向而不同。

半导体应变计的优点是:

1. 灵敏系数大, 比丝栅式、箔片式大几十倍, 因而输出的信号大;
2. 横向效应系数小;
3. 机械滞后小;
4. 本身的体积小, 便于制作小型传感器。

半导体应变计的缺点是:

1. 电阻值和灵敏系数的温度稳定性差;
2. 压阻系数离散, 故灵敏系数的离散度较大, 而且拉伸和压缩时的灵敏系数也不相同;
3. 在大应变作用下, 灵敏系数的非线性大。

研制的温度自补偿应变计 (见图 2-8), 有助于消除温度变化的影响及提高抗干扰性。

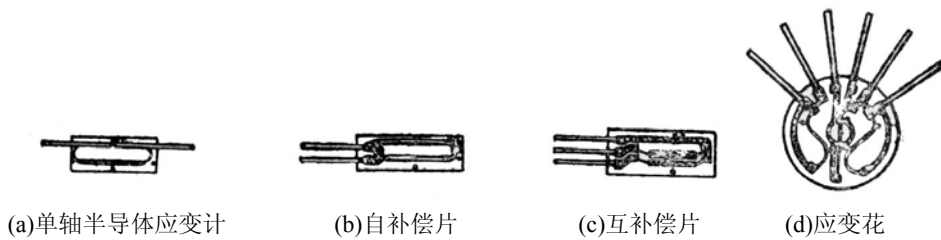


图 2-8 半导体应变计

2.3.5 几种特殊的应变计

为了适应工程实际和某些力学实验的需求, 还有一些特殊形状的应变计, 主要有以下几种形式:

1. 裂纹扩展应变计

裂纹扩展应变计的敏感栅是由平行栅条组成。用于断裂力学实验时, 检测构件在载荷作用下裂纹扩展的过程及扩展的速率 (如图 2-9)。实验时粘贴在构件裂纹尖端处, 随着裂纹的扩展, 栅条依次被拉断, 应变计的电阻逐级增加。根据事先作出的断裂顺序与电阻变化曲线, 可推断裂纹的扩展情况。若同时记录各栅条断裂时间, 即可算出裂纹的扩展速率。



图 2-9 裂纹扩展应变计 (单位 mm)

2. 疲劳寿命计

疲劳寿命计的敏感栅是由经过退火处理的康铜箔制成, 夹在两层浸过环氧树脂的玻璃纤维布中间形成。当应变计粘贴在承受交变载荷的构件上时, 应变计丝栅在交变载荷作用下发生冷作硬化, 而使电阻发生变化, 电阻变化值与交变应力的大小、循环次数成比例, 通常可用实验方法来建立经验公式。使用时可由电阻变化来推算交变应变的大小及循环次数, 从而预测构件的疲劳寿命。

3. 大应变箔式应变计

用于量测 5~20% 大应变或超弹性范围应变用的, 如图 2-10。为避免丝栅与粗引线间的应力集中, 中间采用细引线过渡。箔式应变计的引线应弯成弧形, 然后再焊接, 敏感栅是由经过获得大变形及退火处理的康铜制成, 基底可用浸过增塑剂的纸(应变 5~12%)或聚醚亚胺(应变 20%), 粘结剂可用环氧树脂, 聚氨脂填加增塑剂制成。这种应变计受压时敏感栅会

发生轴向屈曲，故承受的拉应变远大于压应变。因此，当用于交变应变测量时，量测范围不应超过容许的压应变界限。

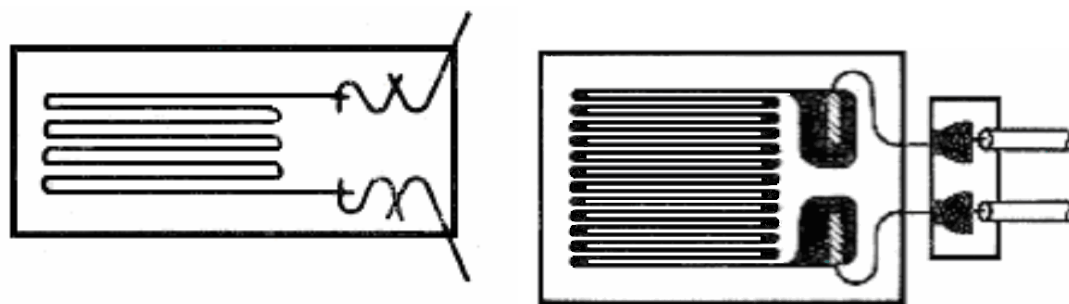


图 2-10 大应变变量应变计

4. 双层应变计

在进行薄壳、薄板应变的测量时，需要在壳和板的内、外表面对称贴片。而对于体积小或密封的结构在内表面贴片几乎是无法进行的，双层应变计为解决这些问题提供了条件。在不太厚的塑料上、下表面粘贴应变计，并在应变计表面涂环氧树脂保护层。使用时将此双层应变计粘贴在被测构件的外表面，利用弯曲应变线性分布及轴向应变均匀分布特点，同时测出弯曲及轴向应变。

5. 防水应变计

在潮湿环境或水下，特别在高水压作用下，应采用防水应变计。常温短期水下应变测量可在箔式应变计表面涂防护层（如水下环氧树脂）。长期量测可用热塑方法将应变计夹在两块薄塑料板中间，或采用防水、防霉、防腐蚀的特种胶材料作为应变计的基底和覆盖层制成防水应变计。

6. 屏蔽式应变计

屏蔽式应变计的上、下两面均有铜箔构成屏蔽层，常用于电流变化幅度大的环境中的应变测量，如在电焊机旁或电气化机车轨道应变的量测。在强磁场中，若采用镍铬敏感材料，可减小磁致效应。

2.4 电阻应变计的工作特性

表达电阻应变计的性能及其特点的数据或曲线，称为应变计的工作特性。常温应变计的主要工作特性包括：应变计的电阻值、灵敏系数、横向效应系数、机械滞后、零漂、蠕变、应变极限、疲劳寿命、绝缘电阻和温度特性。

2.4.1 应变计的电阻值

应变计的电阻是指应变计在室温环境、未经安装且不受力的情况下，测定的电阻值。

应变计电阻值的选定主要根据测量对象和测量仪器的要求。推荐的应变计电阻的系列为 60Ω 、 120Ω 、 200Ω 、 350Ω 、 500Ω 、 1000Ω 。在允许通过同样工作电流的情况下，选用较大的应变计电阻，就可以提高应变计的工作电压，以达到较高的测量灵敏度。由于电阻应变计和其他常用应变测量仪器测量电桥的桥臂电阻习惯上按 120Ω 设计，故 120Ω 的应变计为最常用。

对于生产出来的每一批应变计都需要逐个地测量其电阻值，然后按电阻值的大小分类包装。每包的包装单上标明该包应变计的平均名义电阻值（即各片电阻值的平均值），以及各片电阻值与平均名义电阻值的最大偏差值。

2.4.2 应变计的灵敏系数

应变计的灵敏系数是指：当应变计粘贴在处于单向应力状态的试件表面上，且其纵向（敏

感栅纵线方向)与应力方向平行时,应变计的电阻变化率与试件表面贴片处沿应力方向的应变(即沿应变计纵向的应变)的比值,即

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon \quad (2-10)$$

式中, K 为应变计的灵敏系数; ε 为试件表面测点处与应变计敏感栅纵线方向平行的应变; $\Delta R/R$ 为由 ε 所引起的应变计电阻的相对变化。

应变计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,这主要有两个原因:以丝式应变计为例,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;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计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及其厚度有关,还受粘结剂的固化程度以及应变计安装质量的影响。因此,应变计的灵敏系数是受多种因素影响的综合性指标,它不能通过理论计算得到,而是由生产厂家经抽样在专门的设备上上进行标定试验来确定的。并于包装上注明其平均名义值和标准误差。常用的应变计灵敏系数为 2.0~2.4。

2.4.3 应变计的横向效应系数

应变计的敏感栅中除了有纵向丝栅以外,还有圆弧形或直线形的横栅。横栅既对应变计轴线方向的应变敏感,又对垂直于轴线方向的横向应变敏感。对于沿试件轴向粘贴的应变计,其敏感栅的纵向部分由于试件轴向伸长而引起电阻值增加,其敏感栅的横向部分由于试件横向缩短而引起电阻值减小。从而,将一根直的金属丝绕成敏感栅后,虽然长度不变,粘贴处的应变状态亦相同,但应变计敏感栅的电阻值变化比单根金属丝的电阻值变化要小。因此,应变计的灵敏系数 K 比单根金属丝的灵敏系数 K_s 要小。这种由于敏感栅感受横向应变而使应变计灵敏系数减小的现象,称为应变计的横向效应。

应变计处在平面应变状态下,沿其轴线方向的应变为 ε_x ,垂直于轴向方向的应变为 ε_y 。

它的电阻变化率是由应变计感受的纵向应变 ε_x 和横向应变 ε_y 共同引起的,其电阻变化率可表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \varepsilon_x + K_y \varepsilon_y \quad (2-11)$$

式中,敏感栅电阻的相对变化包含两个部分,它们分别是 ε_x 和 ε_y 作用的结果。当 $\varepsilon_y = 0$ 时,可得轴向灵敏系数

$$K_x = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{\varepsilon_y=0} / \varepsilon_x \quad (2-12)$$

同样,当 $\varepsilon_x = 0$ 时,可得横向灵敏系数

$$K_y = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{\varepsilon_x=0} / \varepsilon_y \quad (2-13)$$

横向灵敏系数与轴向灵敏系数的比值,被称为横向效应系数 H ,可用它来衡量应变计横向效应的大小。由式(2-12)和(2-13)可得应变计敏感栅横向效应系数的计算公式

$$H = \frac{K_y}{K_x} \quad (2-14)$$

横向效应系数的大小除主要取决于敏感栅的型式和几何尺寸，还与应变计的基底、粘结剂以及制片时的工艺质量有关，用式（2-14）计算所得的结果与应变计的实际横向效应系数略有差别。

不同种类的应变计，其横向效应的影响也不同，丝绕式应变计的横向效应系数最大，箔式应变计次之，短接式应变计的 H 值最小，常在 0.1% 以下。一般应变计的 H 值在 0.1~5% 之间。

2.4.4 应变计的机械滞后

在恒定温度下，对安装应变计的试件加载和卸载，其加载曲线和卸载曲线不重合，这种现象称为应变计的机械滞后。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读出的应变计的应变。应变计的机械滞后量，用在加载和卸载两过程中指示应变值之差的最大值 Z_j 来表示（图 2-11）。

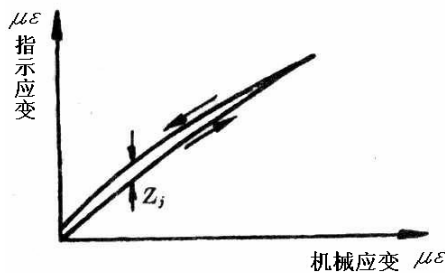


图 2-11 应变计机械滞后

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。制造或安装应变计时，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。应变计在较高的温度下工作时，机械滞后也会显著地增大

造成应变计机械滞后的主要原因有：

1. 粘合剂受潮变质，或过期失效，或固化处理不良；
2. 粘贴技术不佳，比如部分脱落或粘合层太厚；
3. 基底材料性能差；
4. 试件的残余应力以及应变计敏感栅在制造和粘贴过程中产生的残余应力。

机械滞后的大小与应变计所承受的应变变量有关，加载时的机械应变愈大，卸载过程中的机械滞后就愈大。尤其是新安装的应变计，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，通常在正式试验之前都预先加卸载若干次，以减少机械滞后对测量数据的影响。

2.4.5 应变计的零点漂移和蠕变

在温度恒定的条件下，即使被测构件未承受应力，应变计的指示应变也会随时间的增加而逐渐变化，这一变化即称为零点漂移，或简称零漂。如果温度恒定，且应变计承受恒定的机械应变，这时指示应变随时间的变化则称为蠕变。

零漂和蠕变所反映的是应变计的性能随时间的变化规律，只有当应变计用于较长时间测量时才起作用。实际上，零漂和蠕变是同时存在的，在蠕变值中包含着同一时间内的零漂值。

应变计在常温下使用时,产生零漂的主要原因是敏感栅通以工作电流之后产生的温度效应、在制造和安装应变计过程中所造成的内应力、以及粘结剂固化不充分等。随着工作温度的增加,零漂的产生则主要是敏感栅材料的逐渐氧化、粘结剂和基底材料性能的变化等因素所致。尤其是高温下工作的应变计,敏感栅材料氧化的速度迅速增加,并出现合金中某些元素挥发的现象,材料的电阻率发生变化,会使应变计产生很大的零漂。

蠕变的产生,主要是胶层在传递应变的开始阶段出现“滑动”所造成的,胶层愈厚,弹性模量愈小,机械应变量愈大,“滑动”现象就愈甚,产生的蠕变也愈大。

2.4.6 应变计的应变极限

应变计的应变极限是指在温度恒定的条件下,对安装有应变计的试件逐渐加载,指示应变与被测构件真实应变的相对误差(通常规定为10%)不超过一定数值时的真实应变值。实际上,应变极限是表示应变计在不超过规定的非线性误差时,所能够工作的最大真实应变值。

大多数敏感栅材料的灵敏系数在弹性范围内变化很小,故在一般情况下,决定应变极限大小的主要因素是:

1. 粘结剂和基底材料传递应变的性能;
2. 引线与敏感栅焊点的布置形式;
3. 应变计的安装质量。

选用抗剪强度较高的粘结剂和基底材料、制造和安装应变计时控制基底和粘结剂层不要太厚、适当的固化处理等;都有助于获得较高的应变极限。

工作温度升高,会使应变极限明显地下降,中温和高温应变计在极限工作温度下的应变极限均低于常温应变计。

2.4.7 应变计的疲劳寿命

应变计的疲劳寿命是指:在恒定幅值的交变应力作用下,应变计连续工作,直至产生疲劳损坏时的循环次数。当应变计出现以下三种情形之一者,即可认为是疲劳损坏:(1)敏感栅或引线发生断路;(2)应变计输出幅值变化10%;(3)应变计输出波形上出现穗状尖峰。

疲劳损坏的原因是,在动态应力测量时,应变计在交变应变的作用下,经过若干循环次数之后,其灵敏系数将随应变循环次数的增加而有所改变。这主要是由于敏感栅的缺陷(栅条上的针孔和裂隙)、内焊点接触电阻的变化、粘结剂强度下降以及应变计安装质量不好等因素所造成。要提高应变计的疲劳寿命,须特别注意引线与敏感栅之间的连接方式和焊点质量。

2.4.8 应变计的绝缘电阻

应变计的绝缘电阻是指敏感栅及引线与被测试件之间的电阻值。

绝缘电阻过低,会造成应变计与试件之间漏电而产生测量误差。当安装在试件上的应变计通入工作电流以后,绝缘电阻可认为是每段栅丝与“地”之间许多小电阻的并联值。由于并联电路的分流作用,使通过敏感栅的电流变小。绝缘电阻越低,分流作用就越大,通过敏感栅上的电流就越小,致使测量灵敏度降低,直接影响测量结果。

绝缘电阻下降,将使应变计的指示应变比实际的应变值减少。但从对测量精度的影响来看,对绝缘电阻的要求并不很高,只有在低于 $0.01M\Omega$ 之后,测量误差才急剧增加。

绝缘电阻下降,将使一部分电流分流到试件,引起的另一个不良后果是零点漂移。

提高绝缘电阻的途径方法是:选用电绝缘性能良好的粘结剂和基底材料,并使其经过充分的固化处理。使得提高应变计的绝缘电阻的同时,不增加蠕变和机械滞后。

2.4.9 应变计的温度特性

应变计的温度特性分:热输出和热滞后。

1. 热输出

当应变计安装在可以自由膨胀的试件上，且试件不受外力作用。若环境温度不变，则应变计的应变为零。若环境温度变化，则应变计产生应变输出。这种由于温度变化而引起的应变输出，称为应变计的热输出。

产生应变计热输出的原因主要是：

- (1) 应变计敏感栅材料本身的电阻温度系数引起的；
- (2) 由于敏感栅材料与试件材料的线膨胀系数不同，使敏感栅产生了附加变形。

当环境温度变化 Δt °C 时，应变计的电阻变化量为

$$\Delta R_t = R[\alpha + K_s(\beta_m - \beta_s)]\Delta t \quad (2-15)$$

温度改变引起的应变计的电阻变化率为

$$\frac{\Delta R_t}{R} = [\alpha + K_s(\beta_m - \beta_s)]\Delta t \quad (2-16)$$

式中： α 为敏感栅材料的电阻温度系数（1/°C）； β_m 为试件材料的线膨胀系数（1/°C）； β_s 为敏感栅材料的线膨胀系数（1/°C）； K_s 为敏感栅丝的灵敏系数； R 为应变计的电阻值（ Ω ）。

温度改变产生的热输出为

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{1}{K} \left(\frac{\Delta R_t}{R} \right) \\ &= \frac{1}{K} [\alpha + K_s(\beta_m - \beta_s)]\Delta t \end{aligned} \quad (2-17)$$

式中： K 为应变计的灵敏系数。应变计的热输出一般用温度每变化 1°C 时的输出应变值来表示。

2. 热滞后

如果应变计是在升温和降温情况下循环工作，则发现在室温和极限工作温度之间增加或减少温度时，应变计的升温热输出曲线和降温热输出曲线并不重合。即在某一温度下，升温的曲线和降温的曲线之间有一个差值，此差值即为应变计的热滞后。

2.4.10 最大工作电流

应变计接入测量线路，敏感栅中便通过一定的电流，一部分能量转换为热能而使应变计产生温升。增加工作电流，虽然能够增大应变计的输出信号而提高测量灵敏度，但如果由此产生太大的温升，不仅会使应变计的灵敏系数发生变化，零漂和蠕变值明显地增加，有时还会将应变计烧坏。应变计的最大工作电流是指允许通过其敏感栅而不影响工作特性的最大电流值。

国产常温应变计的工作特性指标见表 2-2。

表 2-2 常温应变计的工作特性指标

工作特性	说明	质量等级		
		A	B	C
应变计电阻	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

横向效应系数	(%)	1	2	4
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
疲劳寿命	循环次数 (次)	10^7	10^6	10^5
绝缘电阻	室温下 ($M\Omega$)	1000	500	500

2.5 电阻应变计的工作特性的标定

制造厂家在电阻应变计生产出来以后,要按照它们的工作特性指标来定等级。而这些指标性能的确,需在专门的设备上抽样标定。在有关的技术标准中,详细地规定了应变计工作特性的质量等级、抽样率、标定设备和标定方法等。本节仅介绍标定的基本原理、主要设备和标定时应注意的问题。

2.5.1 灵敏系数、机械滞后及蠕变的标定

1. 灵敏系数的标定

在标定应变计灵敏系数时,试件应处于单向应力状态,通常采用的有等截面纯弯曲梁、等强度悬臂梁和拉压试件三种方式。拉压试件方式的优点是不需要专门的设备,可以直接在材料试验机上进行标定,但它需用机械的或光学的引伸计测量试件表面的机械应变,操作比较费事,故大量标定时均不采用。现以纯弯曲梁(如图 2-12)为例说明标定方法。

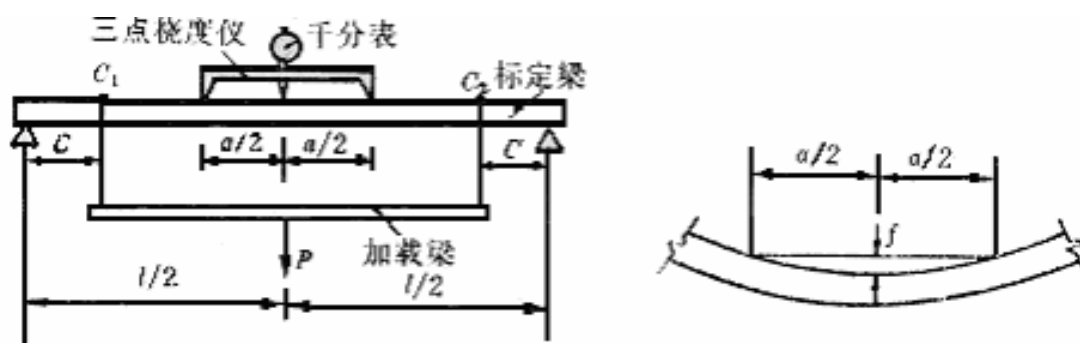


图 2-12 纯弯曲梁标定装置

当梁受载后,由于梁的两加载点之间呈纯弯曲状态,各截面弯矩相等,且为单向应力状态,上、下表面的应变大小相等,符号相反。由材料力学可知,在小挠度情况下,梁上下表面的应变值与中点挠度及几何尺寸的关系如下

$$\epsilon = \frac{12h}{3l^2 - 4c^2} f_c \quad (2-18)$$

式中, h 为标定梁的高度; l 为两支座间的距离; c 为支座与加载点间的距离; f_c 为梁的中点挠

度，可用千分表来测量。

利用 (2-18) 式计算梁的表面应变，要求精确测量工作段的长度 l 及梁的固定端具有很高的安装刚度。为了消除支座松动、接触不良的影响，目前采用在纯弯曲梁上安装三点挠度仪，测出相对挠度 f ，然后用以下公式计算应变

$$\varepsilon = \frac{h}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + f^2 + hf} f \quad (2-19)$$

在推导 (2-18) 式时，采用了梁的平截面假设和小挠度假设；但在推导 (2-19) 式时仅采用了梁的平截面假设。为此，(2-19) 式比较精确，它表示相对挠度 f 与表面应变 ε 呈非线性关系。

由于挠度 f 与 a 、 h 相比是一个微量，在分母中可略去，上式简化为

$$\varepsilon = \frac{4h}{a^2} f \quad (2-20)$$

上式表明，根据梁高 h 、挠度仪支点间距 a 和千分表的读数 f ，即可得到应变值 ε 。

由于应变计粘贴后不能撕下来再用，所以采用抽样测定法来标定应变计的灵敏系数 K 。一般规定从相同的一批应变计中抽出 5% 作为样片（每次标定不少于 6 片），将样片逐个地粘在标定梁上，并使样片的纵向与标定梁的轴向平行。然后用一定的加载方式，使标定梁表面产生一个已知的轴向应变 ε ；由仪器测得各个样片的电阻变化率 $\frac{\Delta R}{R}$ 。一般要使用精度较高，经过校准的电阻应变仪。若应变计的灵敏系数为 K ；应变仪的灵敏系数（一般为应变仪灵敏系数旋钮的指示值）为 K_o ；应变仪的读数应变为 ε_d ，则应变计的电阻相对变化值

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon = K_o\varepsilon_d \quad (2-21)$$

实验应加、卸载荷三次，取平均值，作为单个应变计的实验值，于是

$$K_i = \frac{K_o \Delta \varepsilon_d}{\varepsilon} \quad (2-22)$$

式中， K_i 为第 i 片灵敏系数标定值； $\Delta \varepsilon_d$ 为加载与卸载时应变仪读数差的三次平均值。该批应变计灵敏系数标定值为

$$\bar{K} = \frac{\sum K_i}{n} \quad (2-23)$$

上式中 n 为抽样片数。灵敏系数的分散度，可用标准误差 σ 或相对标准误差 C 来表示

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (K_i - \bar{K})^2} \quad (2-24)$$

$$C = \frac{\sigma}{\bar{K}} \times 100\% \quad (2-25)$$

应变计的灵敏系数一般表示为

$$K = \bar{K} \pm C \quad (2-26)$$

应变计出厂时,标注的相对标准误差有三级,分别为 A 级(1%), B 级(2%)和 C 级(3%)。

必须注意的是,应变计灵敏系数 K 值的标定,实际上是在下述三个条件下进行的:(1)标定梁处于单向应力状态;(2)应变计的纵向与标定梁的应力方向平行;(3)标定梁材料的泊松比为 μ_0 (一般为 0.285 左右)。

2. 机械滞后的标定

机械滞后可以与灵敏系数在同一试验中进行标定,可采用载荷回零时的滞后值,即相邻两次载荷为零时指示应变之差,以其中绝对值最大者作为该批应变计的机械滞后值。

3. 蠕变的标定

蠕变的标定是在温度恒定的条件下,保持应变计承受恒定的机械应变,记录指示应变随时间的变化规律。标定应变计的蠕变,允许采用标定灵敏系数的试件,试验可以在标定灵敏系数之前,也可以在其之后进行,但标定蠕变前必须保证应变计在 4 小时内未曾承受机械应变。

2.5.2 横向效应系数的标定

1. 横向效应系数的标定

应变计的横向效应系数的标定装置如图 2-13 所示,顶部为工作区,试件的中间薄壁部分的厚度只有 5 毫米左右,两侧边用许多螺钉与侧板牢固连接。摇动加载手柄可使两侧板的下端相互接近,试件的薄壁部分即产生弯曲变形。由于试件长度方向的刚度很大,当 χ 方向产生很大的应变时, y 方向的应变接近于零(通常要求 χ 方向的应变达到 1000 ± 50 微应变时, y 方向的应变小于 2 微应变),可以认为是单向应变场。

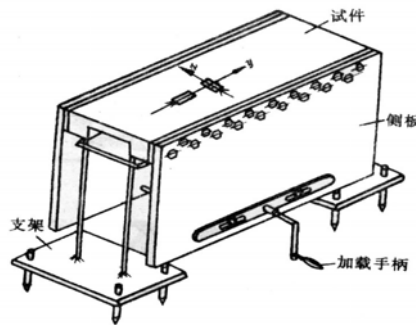


图 2-13 横向效应系数标定装置

将同一批中的几个被测应变计安装在顶部试件薄壁部分的工作表面上,使它们的轴线垂直于单向应变方向,它们的应变为 ε_y 。将同一批中的另几个应变计也安装在顶部试件薄壁部分的工作表面上,但平行于单向应变方向,其应变为 ε_χ 。根据(2-12)、(2-13)和(2-21)式,有

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{\varepsilon_x=0} = K_y \varepsilon_y = K_o \varepsilon_{yd} \quad (2-27)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\varepsilon_y=0} = K_x \varepsilon_x = K_o \varepsilon_{xd} \quad (2-28)$$

式中, K_o 为应变仪的灵敏系数(一般等于 2.0); ε_{yd} 为由应变仪读出的轴线沿y方向的应变计的应变值; ε_{xd} 为由应变仪读出的轴线沿 x方向的应变计的应变值。

根据(2-14)式, 每个被测应变计的横向效应系数即为

$$H_i = \frac{\varepsilon_{iyd}}{\varepsilon_{ixd}} \times 100\% \quad (2-29)$$

将单个应变计的横向效应系数之和除以抽样数, 即得该型号应变计的横向效应系数。

2. 应变计的横向效应对应变测量的影响

在一般情况下, 应变计是处在平面应变状态下, 它的电阻变化率是由应变计感受的纵向应变 ε_x 和横向应变 ε_y 共同引起的, 根据(2-11)和(2-14)式, 其电阻变化率可表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \varepsilon_x + K_y \varepsilon_y = K_x \left(1 + H \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}\right) \varepsilon_x \quad (2-30)$$

而在灵敏系数标定时所用的公式(2-21), 为

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon \quad (2-31)$$

两者相比, 有

(1) 式(2-30)适用于应变计处在平面应变状态下的各种情况;

(2) 式(2-31)仅当灵敏系数标定的三个条件均满足时, 才能使用。因为此时标定梁处于单向应力状态, 应变计感受的横向应变 $\varepsilon_y = -\mu_0 \varepsilon_x$, 且 ε_x 就是梁的纵向应变 ε , 则有

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x (1 - \mu_0 H) \varepsilon \quad (2-32)$$

比较(2-28)和(2-29)

$$K = K_x (1 - \mu_0 H) \quad (2-33)$$

由此可见, 当 $\varepsilon_y = -\mu_0 \varepsilon_x$ 时, 灵敏系数的标定已将横向效应的影响包含在 K 的定义中,

(2-31) 是 (2-30) 的一个特例。

(3) 若 $\varepsilon_y \neq -\mu_0 \varepsilon_x$, 根据(2-31)式, 用标定的灵敏系数 K 进行计算, 其结果将存在误差。

2.5.3 疲劳寿命的标定

标定应变计的疲劳寿命多采用等强度悬臂梁装置。梁承受交变的单向应力, 被测应变计安装在标定梁的上下表面, 它们的轴线与单向应力方向平行。用电压表记录应变计的输出电平, 并用示波器观察输出波形的变化。疲劳寿命的大小除了取决于应变计的性能外, 还与标定试验时交变应变的幅值和频率有很大关系, 通常规定梁表面应变的幅值为(1000 ± 50)微应

变，振动频率在 20~50 周/s 之间。当标定条件需要改变时，应作特别的说明。

2.5.4 热输出与热滞后的标定

标定热输出应在均匀温度场内进行，温度的不均匀度不大于 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。试件尺寸通常取宽度约为 50mm，长度约为 100mm，厚度为 2~3mm。试件如太薄，升温时易变形，试件太大则易造成温度不均匀。安装试件时，试件应能够自由膨胀，不致产生附加的应力。

应变计与测量仪器的连接，要注意消除导线对热输出的影响。测量温度的热电偶要与试件表面紧密接触。

如无特殊说明，对于高温和中温应变计，热输出的标定只在升温过程中进行，升温速率为 $3\sim 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。热滞后的标定则在升温与降温过程中连续进行。

2.6 电阻应变计的粘结剂

电阻应变计的粘结剂，也就是应变胶粘剂，简称应变胶。是用于制作电阻应变计基底（胶膜或厚纸、玻璃纤维用）材料、覆盖层和粘贴应变计所用的各种胶粘剂的总称。作用是：（1）在制造应变计时将敏感栅粘结到基底上；（2）在使用应变计时将基底粘在被测试件上；（3）有的可以用于制造基底和覆盖层。在性能要求方面与一般工业用结构胶和日用粘合剂有所不同，它是直接影响电阻应变测试精度的关键材料之一。

电阻应变计诞生的初期，是用赛珞珞胶（即硝酸纤维素）把细丝粘结在纸基底上，再在上面覆盖 1mm 厚的毡，其作用是防止外部机械损伤和防潮。1951 年美国研制出用于高温应变计的无机系胶粘剂，1955 年 Eastman 公司发明了划时代的氰基丙烯酸酯系胶粘剂（即现今常用的瞬态快干胶），不仅简化了应变计的安装方法，而且也适用于多种基底和被粘结构。60 年代末到 70 年代，随着电阻应变计在称重传感器方面的应用不断扩大，人们对用于传感器用应变计的基底和粘合剂进行了研究和改进，出现了更为优良的酚醛胶、环氧胶、环氧-酚醛胶以及聚酰亚胺胶等。

使用应变计进行测试时，试件（或弹性体）的变形是借助于各种应变胶粘剂传递到应变计敏感栅上的，应变胶的传递性能将直接影响测量精度和传递信号的稳定性。因此，必须根据具体要求，谨慎地加以选择。

应变计的粘结剂（应变胶粘剂）是应变计制造和使用中的一个重要组成部分。应具有以下的性能：

- （1） 强度高；
- （2） 切变模量高；
- （3） 塑性变形小；
- （4） 蠕变小；
- （5） 滞后现象小；
- （6） 在温度、水分和其它物质作用下稳定性好，在温、湿度变动下体积稳定；
- （7） 耐老化性好；
- （8） 长期动应变测量时，具有良好的耐疲劳性；
- （9） 对试件（或弹性体）和敏感栅没有腐蚀性；
- （10） 在各种条件下具有高绝缘电阻；
- （11） 对各种试件（或弹性体）材料都具有良好粘结力，且固化内应力小；
- （12） 粘贴操作方便，固化迅速，固化温度低；
- （13） 对使用者没有毒害或毒害小。

但是,任何一种应变胶都不可能完全满足上述全部要求,因此,在研制、选择应变胶时,必须根据具体的要求和温度范围,有重点地加以选择。

应变胶粘剂就其在应变计中的应用分为三种情况:基底材料、表面覆盖层材料和贴片用。有些胶粘剂如酚醛-缩醛胶、环氧胶等可完成上述三种功能,而有些胶粘剂如 α -氰基丙烯酸酯系和磷酸盐水泥胶等则只能做贴片胶。

若以固化形式分类可分为溶剂挥发型、化学作用固化型和热固型等;以使用环境分类可分为低温(-60~-269°C)、常温(-40~+80°C)、中温(80~350°C)、高温(350°C以上)、水下、核辐射、强磁场及真空等环境。表2将应变胶分为有机系和无机系两大类。

表2 应变胶粘剂分类一览表

种类	胶粘剂名称	用途
有机系应变胶粘剂	硝酸纤维素	制作纸基应变计
	氰基丙烯酸酯系	粘贴应变计(常温、应力测试)
	聚酯系	制作纸基应变计和箔式片基底
	聚氨酯系	粘贴应变计(+40°C~-196°C, 应力测试)
	酚醛-缩醛系	制作箔式应变计基底(常温, 应力测试及一般传感器)
	酚醛系	箔式片基底胶及(常温)粘贴应变计(应力传感器用)
	环氧树脂	箔式应变计基底及粘贴应变计(测试及传感器用)
	有机硅树脂系	制片及贴片用(中、高温应力测试)
	聚酰亚胺系	箔式片基底(中温、低温下应力测试及高精度传感器)
	合成橡胶系	粘贴应变计(大应变测试)
无机系应变胶粘剂	硅酸盐系	粘贴应变计(应力测试、高温、400°C以上)
	磷酸盐系	粘贴应变计(高温应力测试, 400~900°C)
	金属氧化物	粘贴高温应变计(喷涂) (高温应力测试, 动态 1000°C)

2.7 电阻应变计的常规使用技术

在应变测量时,只有正确选用和安装使用应变计,才能保证测量精度和可靠性,达到预期的测试目的。

2.7.1 电阻应变计的选择

应变计的种类繁多,选用时应根据测试的环境条件、被测构件的应变状态、被测构件的材料性质、应变计的尺寸和电阻值及测量精度等因素来决定。

一般的选用原则是:

1. 根据测试的环境条件

(1) 环境温度 测量时应根据构件的温度选择合适的应变计,使得在给定的试验温度范围内,应变计能正常工作。

(2) 环境湿度 潮湿对应变计性能影响极大,会出现绝缘电阻降低、粘结强度下降等现象,严重时则无法进行测量。为此,在潮湿环境中,应选用防潮性能好的胶膜应变计,如酚醛-缩醛、聚脂胶膜应变计等,并采取恰当的防潮措施。

(3) 磁场环境 应变计在强磁场作用下,敏感栅会伸长或缩短,使应变计产生输出。因此,敏感栅材料应采用磁致伸缩效应小的镍铬合金或铂钨合金。

2. 根据被测构件的应变状态

(1) 应变分布梯度 应变计测出的应变值是应变计栅长范围内的平均应变值。因此当应变沿试件轴向为均匀分布时,可以选用任意栅长的应变计,而对测试精度无直接影响。栅长大的应变计,其横向效应系数小,且粘贴也比较容易。如果是对应变梯度大的构件进行测试,则应视具体情况选用栅长小的应变计。

(2) 应变性质 对于静态应变测量,温度变化是产生误差的重要原因,如有条件,可针对具体试件材料选用温度自补偿应变计。

对于动态应变测量,应选用疲劳寿命高的应变计,如箔式应变计。

3. 根据被测构件的材料性质

(1) 若被测构件的材料为弹性模量较高的均质材料(如金属材料),则对应变计无特殊要求。

(2) 若被测构件的材料为非均质材料(如木材、混凝土等),则应选用栅长较大的应变计,以消除因材料不均匀而带来的影响。用于混凝土表面应变测量的应变计,其栅长一般应比颗粒的直径大四倍以上。

4. 根据应变计的尺寸

应变计尺寸的选择,是根据试件的材料和应力状态,以及允许粘贴应变计的面积而定。例如,对于混凝土、铸铁、木材等表面粗糙、不匀的材料,选用栅长较大的应变计。对于表面光滑、均匀的材料,选用栅长较小的应变计。对于试件表面应力分布均匀或变化不大,且允许粘贴面积较大的情况下,选用栅长较大的应变计。若在试件的应力集中区域,或允许粘贴面积很小的情况下,选用栅长 $\leq 1\text{mm}$ 的应变计。对于塑料等导热性差的材料,一般选用栅长大的应变计。应变计的尺寸越小,则对粘贴质量的要求越高。因此,在确保测量精度和有足够安装面积的前提下,选用栅长较大的应变计为宜。

如果应变计用于动态应变测量,则选择应变计的栅长时,还应考虑应变计对频率的响应等要求。

5. 根据应变计的电阻值

应变计电阻值的选择,一般根据测试仪器对应变电阻值和测量应变灵敏度的要求,以及测试条件等而定。例如,应力分析测试常用的电阻应变计通常是按应变计电阻值为 $120\pm 5\ \Omega$ 进行设计的,因此,应力分析测试时,普遍选用电阻值为 $120\ \Omega$ 的应变计。而传感器上通常选用高电阻值(如 $350\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 、 $1000\ \Omega$,甚至 $5000\ \Omega$)的应变计,因为这样可以提高其稳定性或输出灵敏度。有时为了减少应变计引线和连接导线的电阻对应变计应变灵敏度的衰减作用,或为了提高动态应变测量的信噪比,也选用高电阻值的应变计。

6. 根据测试精度

一般认为以胶膜为基底、以铜镍合金和镍铬合金材料为敏感栅的应变计性能较好,它具有精度高、长时间稳定性好以及防潮性能好等优点。

2.4.2 电阻应变计的粘贴

常温应变计的安装通常采用粘贴法。因此,粘结工艺是应变测试中非常重要的环节。应变计粘结得好坏,直接影响到构件表面的应变能否正确、可靠地传递到敏感栅,影响到测试的精度。下面将应变计粘贴的操作过程作简单介绍。

1. 检查和分选应变计

贴片前应对应变计进行外观检查和阻值测量。检查应变计的敏感栅有无锈斑、基底和盖层有无破损、引线是否牢固等。阻值测量的目的是检查应变计是否有断路、短路情况,并按阻值进行分选,以保证使用同一温度补偿片的一组应变计的阻值相差不超过 $0.1\ \Omega$ 。

2. 粘贴表面的准备

首先除去构件粘贴表面的油污、漆、锈斑、电镀层等,用砂布交叉打磨出细纹以增加粘结力,接着用浸有酒精(或丙酮)的纱布片或脱脂棉球擦洗,并用钢画针画出贴片定位线。

最后，再进行一次擦洗，直至纱布片或棉球上不见污迹为止。

3. 贴片

在应变计的底面和处理过的粘贴表面上，各涂一层薄而均匀的胶，用镊子将应变计放上并调好位置，然后盖上氟塑料薄膜，用手指揉和滚压，挤出多余的胶，并排除应变计下面的气泡，使应变计和试件完全贴合。适当时间后，由应变计无引线的一端开始向有引线的一端揭掉氟塑料薄膜，用力方向尽力与粘结表面平行。

4. 固化

贴片时最常用的是氰基丙烯酸酯粘结剂（如 502 胶水、501 胶水粘结剂）。用它贴片后，只要在室温下放置数小时即可充分固化，而具有较强的粘结能力。对于需要加温固化的粘结剂，应严格按照规范进行。一般是用红外线灯烘烤，但加温速度不能太快，以免产生气泡。

5. 测量导线的焊接与固定

待粘结剂初步固化以后，即可焊接导线。常温静态应变测量时，导线可采用 $\phi 0.1\sim 0.3\text{mm}$ 的单丝纱包铜线或多股铜芯塑料软线。

导线与应变计引线之间最好使用接线端子片，如图 2-14 所示。它是用敷铜板腐蚀而成。接线端子片应粘贴在应变计附近，将导线与应变计引线都焊在端子片上。常温应变计均用锡焊。为了防止虚焊，必须除尽焊接端的氧化皮、绝缘物，再用酒精、丙酮等溶剂清洗，焊接要准确迅速。

已焊好的导线应在试件上沿途固定。固定的方法有用胶布粘、用胶粘（如用 502 胶粘）等。

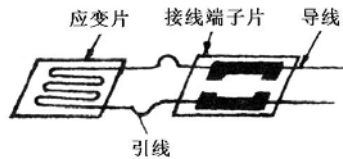


图 2-14 接线端子片固定导线示意图

6. 检查

对已充分固化并已接好导线的应变计，在正式使用前必须进行质量检查。除对应变计作外观检查外，还应检查应变计是否粘贴良好、贴片方位是否正确、有无短路和断路、绝缘电阻是否符合要求（一般不低于 $100\text{M}\Omega$ ）等。

2.7.3 电阻应变计的防护

对安装后的应变计，应采取恰当的防潮措施。防护方法的选择取决于应变计的工作条件、工作期限及所要求的测量精度。对于常温应变计，常采用硅橡胶密封剂防护方法。这种方法是用硅橡胶直接涂在经一般清洁处理的应变计周围，在室温下经 12~24 小时即可粘合固化，放置时间越长，粘合效果越好。硅橡胶使用方便、防潮性能好、附着力强、储存期长、耐高低温、对应变计无腐蚀作用，但强度较低。另外，环氧树脂、石蜡或凡士林也可做防潮保护材料。

2.8 习题

- 2-1 试述电阻应变计的工作原理。
- 2-2 什么是应变计的灵敏系数？怎样进行标定？
- 2-3 用加长或增加栅线数的方法改变应变计敏感栅的电阻值，是否能改变应变计的灵

敏系数？为什么？

2-4 什么是应变计的横向效应？怎样标定应变计的横向效应系数？

2-5 应变计测量的应变是下述三种情况中的哪一种？

- (1) 应变计栅长中心点处的应变；
- (2) 应变计栅长长度内的平均应变；
- (3) 应变计栅长两端点处的平均应变。

2-6 试述丝绕式、短接式和箔式应变计的优缺点。

2-7 有一粘贴在简单拉伸试件上的应变计，其阻值为 120Ω ，灵敏系数 $K = 2.145$ 。

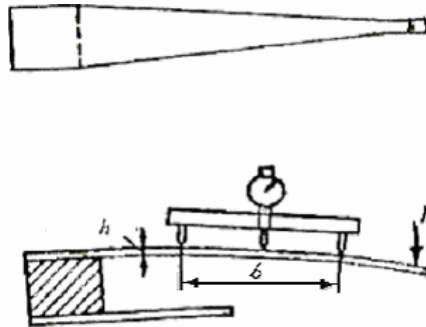
问试件上应变为 $1000\mu\varepsilon$ 时，应变计的阻值是多少？

2-8 用等强度梁挠度法标定应变计灵敏系数的装置如图所示。等强度梁表面的应变计算公式为

$$\varepsilon = \frac{4h}{b^2 - 4f^2} \cdot f$$

式中： h 为梁的高度； b 为三点式挠度仪两支点的距离； f 为挠度仪千分表的读数。

若加载后从千分表读出的挠度为 1.25mm 时，粘贴在梁表面上的应变计的电阻用精密电桥测出为 120.857Ω （加载前应变计电阻值为 120.6Ω ），求该应变计的灵敏系数。



题 2-8 图

2-9 将康铜丝制造的应变计（电阻值 120Ω ，灵敏系数 2.130，线膨胀系数 $15 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，电阻温度系数 $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）和镍铬丝制造的应变计（电阻值 120Ω ，灵敏系数 2.130，线膨胀系数 $14 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，电阻温度系数 $120 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）粘贴在线膨胀系数为 $11 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 的结构钢上。问温度变化 1°C 时，它们的电阻变化分别相应多大应变产生的电阻变化。