

图 2-4 几种箔式应变计

(3) 薄膜式应变计

薄膜式应变计是采用真空溅射或真空沉积技术,在薄的绝缘基片上蒸镀金属电阻薄膜(厚度在零点几纳米到几百纳米),再加上保护层制成。其优点是灵敏度高,允许通过的电流密度大,工作温度范围广,可工作于 $-197\sim 317\text{ }^{\circ}\text{C}$,也可用于核辐射等特殊情况下。

常用的敏感元件材料是康铜(铜镍合金)、镍铬合金、铁铬铝合金、铁镍铬合金等。常温下使用的应变计多由康铜制成。

2.1.2 应变计的主要特性

应变计是一种重要的敏感元件。首先,它在实验应力分析中是测量应变和应力的主要传感元件;其次,某些其他类型的传感器,如膜片式压力传感器、加速度计、线位移传感器等,也经常使用应变计作为机电转换元件或敏感元件,广泛地应用于工程测量和科学实验中。应变计之所以成为重要的敏感元件,主要由于具有如下优点:

① 测量应变的灵敏度和精确度高。能测 $1\sim 2$ 微应变($1\times 10^{-6}\text{ mm/mm}$),误差一般可小于 1% ,精度可达 $0.015\%\text{FS}$ (普通精度可达 $0.05\%\text{FS}$)。

② 测量范围大。从弹性变形一直可测至塑性变形。变形范围从 $1\%\sim 20\%$ 。

③ 尺寸小(超小型应变计的敏感栅尺寸为 $0.2\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$),质量轻,对试件工作状态和应力分布影响很小。既可用于静态测量,又可用于动态测量,且具有良好的动态响应(可测几十甚至上百赫的动态过程)。

④ 能适应各种环境。可以在高温、超低压、高压、水下、强磁场以及辐射等恶劣环境下使用。

⑤ 价格低廉、品种多样,便于选择和大量使用。

应变计有如下缺点:在大应变下具有较大的非线性,半导体应变计的非线性更为明显;输出信号较微弱,故抗干扰能力较差。应变式传感器的性能在很大程度上取决于应变计的性能。

下面就来讨论应变计的主要特性:

1. 应变计的灵敏度系数

金属电阻丝的电阻相对变化与它所感受的应变之间具有线性关系,2.1.1节中已用灵

敏度系数 k_0 表示这种关系。金属丝做成应变计后,由于基片、粘合剂以及敏感栅的横向效应,电阻应变特性与单根金属丝将有所不同,必须重新用实验来测定。实验是按规定的统一标准进行的,电阻应变计贴在一维力作用下的试件上,例如受轴向拉压的直杆、纯弯梁等。

试件材料用泊松系数 $\mu = 0.285$ 的钢。用精密电阻电桥或其他仪器测出应变计相对电阻变化,再用其他测应变的仪器测定试件的应变,得出电阻应变计的电阻-应变特性。实验证明,电阻应变计的电阻相对变化 $\Delta R/R$ 与应变 $\Delta l/l = \epsilon$ 之间在很大范围内是线性的,即

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon \quad (2-7)$$

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (2-8)$$

式中: K 为电阻应变计的灵敏度系数。

因一般应变计粘贴到试件上后不能取下再用,只能在每批产品中提取一定百分比(如5%)的产品进行测定,取其平均值作为这一批产品的灵敏度系数。这就是产品包装盒上注明的灵敏度系数,或称“标称灵敏度系数”。

2. 横向效应

实验表明,应变计的灵敏度 k 恒小于金属线材的灵敏度系数 k_0 ,其原因除了粘合剂、基片传递变形失真外,主要是由于存在横向效应。

敏感栅由许多直线及圆角组成,如图 2-5 所示。拉伸被测试件时,粘贴在试件上的应变计,被沿应变计长度方向拉伸,产生纵向拉伸应变 ϵ_x ,应变计直线段电阻将增加。但是在圆弧段上,沿各微段(圆弧的切向)的应变并不是 ϵ_x ,与直线段上同样长的微段所产生的电阻变化不同。

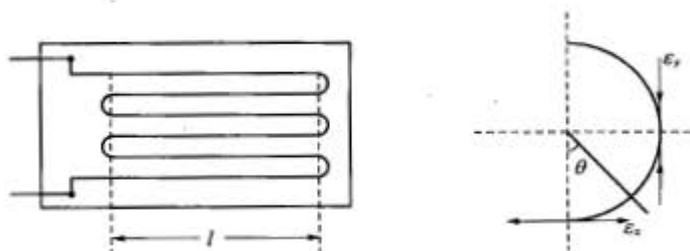


图 2-5 敏感栅的组成

最明显的是在 $\theta = \pi/2$ 垂直方向的微段,按泊松比关系产生压应变 $-\epsilon_y$ 。该微段电阻不仅不增加,反而减少。在圆弧的其他各微段上,感受的应变是由 $+\epsilon_x$ 变化到 $-\epsilon_y$ 的。这样,圆弧段的电阻变化,显然将小于同样长度沿 x 方向的直线段的电阻变化。

因此,将同样长的金属线材做成敏感栅后,对同样应变,应变计敏感栅的电阻变化较小,灵敏度有所降低。这种现象称为应变计的横向效应。

3. 应变计的动态特性

在测量频率较高的动态应变时,应考虑到它的动态响应特性。在动态情况下,应变以波动形式在材料中传播,传播速度为声速。钢材声速为 5 000 m/s,胶层声速为 1 000 m/s。应力波从试件通过胶层、基片传到敏感栅需要一定时间,沿应变计长度方向经过敏感栅需要更

长一些的时间。敏感栅电阻的变化是对某一瞬时作用于其上应力的平均值的反应。胶层和基片的总厚度约为 0.05 mm, 由试件经过胶层和基片传到敏感栅的时间约为 5×10^{-8} s, 可以忽略不计。然而, 应变波沿敏感栅长度方向传播的影响, 应加以考虑。

图 2-6(a) 的阶跃应变波沿敏感栅轴向传播时, 由于应变波通过敏感栅需要一定时间, 当阶跃波的跃起部分通过敏感栅全部长度后, 电阻变化才达到最大值。应变计的理论响应特性如图 2-6(b) 所示。由于应变计粘合层对应变中高次谐波的衰减作用, 实际波形如图 2-6(c) 所示。如以输出从最大值的 10% 上升到 90% 的这段时间为上升时间, 则 $t_k = 0.8 \frac{L}{v}$ 。可测频率 $f = \frac{0.35v}{t_k}$, 则

$$f = \frac{0.35v}{0.8L} = 0.44 \frac{v}{L} \quad (2-9)$$

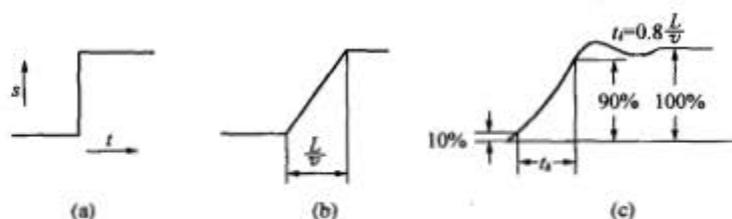


图 2-6 阶跃应变波通过敏感栅及其波形图

实际上 t_k 值是很小的。例如, 应变计基长 $L = 20$ mm, 波速 $v = 5000$ m/s 时, $t_k = 3.2 \times 10^{-6}$ s, $f = 110$ kHz。

当测量按正弦规律变化的应变波时, 由于应变计反映的应变波形, 是应变计线栅长度内所感受应变量的平均值, 因此应变计反应的波幅将低于真实应变波, 从而带来一定误差。显然, 这种误差将随应变计基长的增加而加大。当基片一定时将随频率的增加而加大。图 2-7 表示应变计正处于应变波达到最大值时的瞬时情况。应变波的波长为 λ , 应变计的基长为 L , 两端点的坐标为 x_1 和 x_2 , 而 $x_1 = \lambda/4 - L/2$, $x_2 = \lambda/4 + L/2$, 此时应变计在其基长 L 内测得的平均应变 $\bar{\epsilon}_p$ 达到最大值。

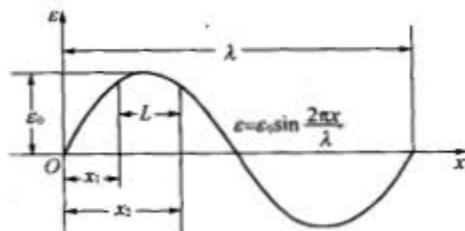


图 2-7 应变波达到最大值时的瞬时情况图

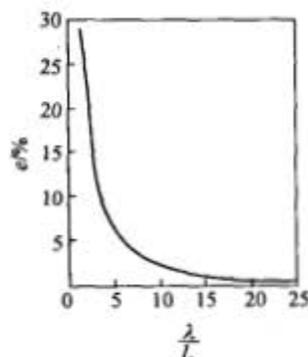


图 2-8 e 与 n 的关系曲线

对于钢材 $v = 5000$ m/s, 若要 $e = 1\%$ 时, 对 $L = 1$ mm 的应变计, 其允许的最高工作

频率为

$$f = \frac{5 \times 10^6}{\pi \times 1} \sqrt{6 \times 0.01} = 390(\text{kHz}) \quad (2-10)$$

由上式可知,测量误差 e 与应变波长对基长的相对比值 $n = \lambda/L$ 有关,其关系曲线如图 2-8 所示。 λ/L 愈大,误差 e 愈小。一般可取 $\lambda/L = 10 \sim 20$, 其误差 e 小于 $1.6\% \sim 0.4\%$ 。又有 $f = v/(nL)$, 即 n 愈大,工作频率愈高。

4. 其他特性参数

(1) 线性度

试件的应变 ϵ 和电阻的相对变化 $\Delta R/R$, 在理论上呈线性关系。但实际上,在大应变时,会出现非线性关系。应变计的非线性度一般要求在 0.05% 或 1% 以内。

(2) 应变极限

粘贴在试件上的应变计所能测量的最大应变值称为应变极限。在一定的温度(室温或极限使用温度)下,对试件缓慢地施加均匀的拉伸载荷,当应变计的指示应变值对真实应变值的相对误差大于 10% 时,就认为应变计已达到破坏状态,此时的真实应变值就作为该批应变计的应变极限。

(3) 机械滞后和热滞后

贴有应变计的试件进行加载和卸载时,其 $\Delta R/R \sim \epsilon$ 特性曲线不重合。把加载和卸载特性曲线的最大差值 δ , 称为应变计的机械滞后值,如图 2-9 所示。

(4) 零漂和蠕变

恒定温度下,粘贴在试件上的应变计,在不承受载荷的条件下,电阻随时间变化的特性称为应变计的零漂。零漂的主要原因是,敏感栅通过工作电流后的温度效应,应变计的内应力逐渐变化,粘结剂固化不充分等。

(5) 疲劳寿命

已安装的应变计,在恒定幅值的交变应力作用下,可以连续工作而不产生疲劳损坏的循环次数。所谓疲劳损坏是指应变计指示应变的变化超过规定误差,或者应变计的输出波形上出现毛刺,或者应变计完全损坏而无法工作。疲劳寿命反映应变计对动态应变的适应能力。应变计疲劳寿命的循环次数一般可达 10^6 次。

(6) 最大工作电流

最大工作电流是指允许通过应变计而不影响其工作的最大电流值。工作电流大,应变计输出信号就大,因而灵敏度高。但过大的工作电流会使应变计本身过热,使灵敏系数变化,零漂、蠕变增加,甚至烧坏应变计。工作电流的选取,要根据散热条件而定,主要取决于敏感栅的几何形状和尺寸、截面的形状和大小、基底的尺寸和材料、粘合剂的材料和厚度以及试件的散热性能等。通常允许电流值在静态测量时约取 25 mA 左右,动态测量时可高一些,箔式应变计可取更大些。在测量塑料、玻璃、陶瓷等导热性差的材料时,工作电流要取小些。

(7) 绝缘电阻

绝缘电阻是指应变计的引线与被测试件之间的电阻值,一般以兆欧计。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。

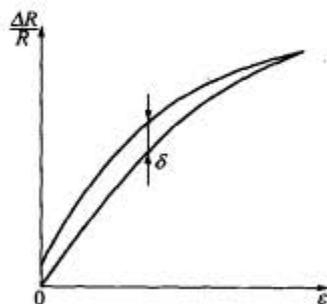


图 2-9 应变计的机械滞后

(8) 应变计电阻

应变计电阻是应变计在未安装也不受外力的情况下,在室温时测得的电阻值。这是使用应变计时应知道的一个参数。国内应变计系列习惯上选用 $120\ \Omega$ 、 $175\ \Omega$ 、 $350\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 、 $1\ 000\ \Omega$ 、 $1\ 500\ \Omega$ 。

(9) 几何尺寸

圆弧敏感栅应变计敏感栅基长 L 从圆弧顶部算起,箔式应变计则从横向粗线的内沿算起。通常应变计 L 约为 $2\sim 30\ \text{mm}$,箔式应变计最小可达 $0.2\ \text{mm}$,长的达 $100\ \text{mm}$ 或更长。

2.1.3 温度误差及其补偿

1. 温度误差产生的原因

把应变计安装在自由膨胀的试件上,即使试件不受任何外力作用,如果环境温度发生变化,应变计的电阻也将发生变化,这种变化叠加在测量结果中将产生很大误差。这种由于环境温度改变而带来的误差,称为应变计的温度误差。产生温度误差的主要原因有:

(1) 电阻温度系数的影响

敏感栅金属丝电阻本身随温度发生变化的关系可用下式表示:

$$R_t = R_0(1 + \alpha_0 \Delta t) \quad (2-11)$$

式中: R_t 为温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值; R_0 为温度为 $t_0^\circ\text{C}$ 时的电阻值; α_0 为金属丝的电阻温度系数; Δt 为温度变化值, $\Delta t = t - t_0$ 。

当温度变化 Δt 时,电阻丝的电阻的变化值为

$$\Delta R_t = R_t - R_0 = R_0 \alpha_0 \Delta t \quad (2-12)$$

(2) 试件材料与应变丝材料膨胀系数的影响

试件材料与应变丝材料线膨胀系数不一,使应变丝产生附加变形而造成电阻变化。

当试件与电阻丝材料的线膨胀系数相同时,不论环境温度如何变化,电阻丝的变形仍和自由状态一样,不会产生附加变形。但是当试件与电阻丝材料的线膨胀系数不同时,由于环境温度的变化,电阻丝会产生附加变形,从而产生附加电阻。

2. 温度补偿方法

(1) 电桥补偿法

这是一种常用和效果较好的补偿法。在被测试件上安装一工作应变计,另外一个与被测试件的材料相同,但不受力的补偿件上安装一补偿应变计。补偿件与被测试件处于完全相同的温度场内。测量时,使两者接入电桥的相邻臂上,如图 2-10 所示。由于补偿片 R_B 是与工作片 R_1 完全相同的,且都贴在同样材料的试件上,并处于同样温度下,这样,由于温度变化使工作片产生的电阻变化 ΔR_{1t} 与补偿片的电阻变化 ΔR_{Bt} 相等,因此,电桥输出 U_{sc} 与温度无关,从而补偿了应变计的温度误差。

有时根据被测试件的应变情况,亦可不专门设补偿件,而将补偿片亦贴在被测试件上,使其既能起到温度补偿作用,又能提高灵敏度。例如,构件作纯弯曲形变时,构件面上部的应变为拉应变,下部为压应变,且两者绝对值相等符号相反。测量时可将 R_B 贴在被测试件的下面(如图 2-11 所示),接入图 2-10 的电桥中。由于在外力矩 M 作用下, R_B 与 R_1 的变