

## 2.2 电阻应变片的主要特性

### 2.2.1 灵敏系数

由(2-8)式可知:金属应变丝的电阻相对变化与它所感受的轴向应变之间是线性正比关系,用灵敏系数  $K_s$  表示。当金属丝做成应变片后,其电阻—应变特性与金属单丝的情况不同。必须用实验的方法对应变片的电阻—应变特性重新进行测定。实验表明,金属应变片的电阻相对变化与轴向应变  $\epsilon$  在很宽的范围内均为线性关系,即

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon$$

或

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon} \quad (2-14)$$

式中:  $K$  为金属应变片的灵敏系数。

测量结果表明,应变片的灵敏系数  $K$  恒小于金属丝线材的灵敏系数  $K_s$ 。分析其原因主要是胶层传递变形失真及横向效应。

### 2.2.2 横向效应

由于金属应变片敏感栅的两端为半圆形的横栅,应变片受力时,不仅构件的轴向应变  $\epsilon$  使敏感栅电阻发生变化,而且其垂直于应变片轴向的横向应变  $\epsilon_r$  也将使敏感栅半圆弧部分的电阻发生变化。应变片的这种既受轴向应变影响又受横向应变影响而引起电阻变化的现象称为横向效应。

敏感栅端部具有半圆形横栅的丝绕应变片的横向效应尤为严重。图 2-5 所示为应变片敏感栅半圆弧部分的形状。设沿轴向的应变为  $\epsilon$ ,沿横向的应变为  $\epsilon_r$ 。

若敏感栅有  $n$  根纵栅,每根长为  $l$ ,半径为  $r$ ,在轴向应变  $\epsilon$  作用下,全部纵栅的变形视为  $\Delta L_1$ ,则  $\Delta L_1 = n\epsilon$ 。

半圆弧横栅同时受到  $\epsilon$  和  $\epsilon_r$  的作用,在任一微小段长度  $dl = r d\theta$  上的应变  $\epsilon_\theta$  可由材料力学公式求得

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{2}(\epsilon + \epsilon_r) + \frac{1}{2}(\epsilon - \epsilon_r)\cos 2\theta$$

每个圆弧形横栅的变形量  $\Delta l$  为

$$\Delta l = \int_0^\pi \epsilon_\theta dl = \int_0^\pi \epsilon_\theta r d\theta = \frac{\pi r}{2}(\epsilon + \epsilon_r)$$

纵栅为  $n$  根的应变片共有  $n-1$  个半圆弧横栅,全部横栅的变形量为

$$\Delta L_2 = \frac{(n-1)\pi r}{2}(\epsilon + \epsilon_r)$$

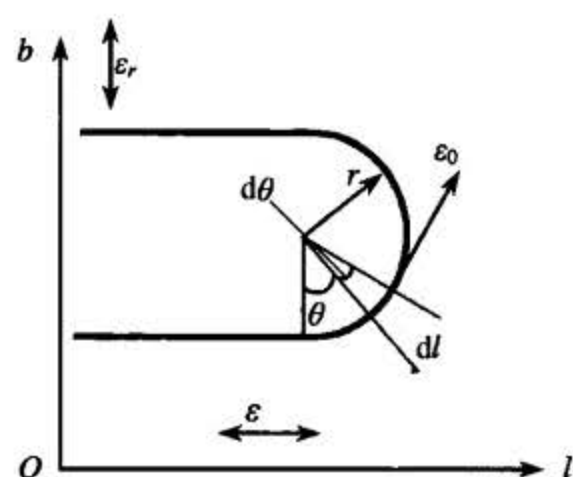


图 2-5 丝式应变片敏感栅半圆弧形部分

应变片敏感栅的总变形为

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = \frac{2nl + (n-1)\pi r}{2}\epsilon + \frac{(n-1)\pi r}{2}\epsilon_r$$

敏感栅栅丝的总长为  $L$ ，敏感栅的灵敏系数为  $K_s$ ，则电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \frac{\Delta L}{L} = \frac{2nl + (n-1)\pi r}{2L} K_s \epsilon + \frac{(n-1)\pi r}{2L} K_s \epsilon_r$$

令 
$$K_x = \frac{2nl + (n-1)\pi r}{2L} K_s$$

$$K_y = \frac{(n-1)\pi r}{2L} K_s$$

则 
$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \epsilon + K_y \epsilon_r \quad (2-15)$$

(2-15) 式说明敏感栅电阻的相对变化是  $\epsilon$  和  $\epsilon_r$  共同作用的结果。

当  $\epsilon_r = 0$  时，由 (2-15) 式可得

$$K_x = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon}$$

$K_x$  称为轴向灵敏系数。

同样，当  $\epsilon = 0$  时，由 (2-15) 式可得

$$K_y = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon_r}$$

$K_y$  称为横向灵敏系数。

横向灵敏系数与轴向灵敏系数的比值，称为横向效应系数  $H$ ，即

$$H = \frac{K_y}{K_x} = \frac{(n-1)\pi r}{2nl + (n-1)\pi r} \quad (2-16)$$

由 (2-16) 式不难看出， $r$  愈小、 $l$  愈大， $H$  则愈小。这就说明敏感栅越窄、基长越长的应变片其横向效应引起的误差越小。

### 2.2.3 机械滞后、零漂及蠕变

应变片粘贴在被测试件上以后，在一定温度下，作出应变片电阻相对变化  $\epsilon_i(\Delta R/R)$  (指示应变) 与试件机械应变  $\epsilon_R$  之间加载和卸载的特性曲线，如图 2-6 所示。实验发现这两条曲线并不重合，在同一机械应变下，卸载时的  $\epsilon_i(\Delta R/R)$  高于加载时的  $\epsilon_i(\Delta R/R)$ ，这种现象称为应变片的机械滞后。加载和卸载特性曲线之间的最大差值  $\Delta\epsilon$  称为滞后值。

机械滞后产生的原因主要是应变片在承受机械应变后，其内部会产生残余变形，使敏感栅电阻发生少量不可逆变化；另外，在制造或粘贴应变片时，如果敏感栅受到不适当的变形或者黏结剂固化不充分，也是造成机械滞后产生的原因。

机械滞后值还与应变片所承受的应变变量有关，加载时的机械应变愈大，卸载时的滞后也愈大。所以，通常在实验之前应将试件预先加、卸载若干

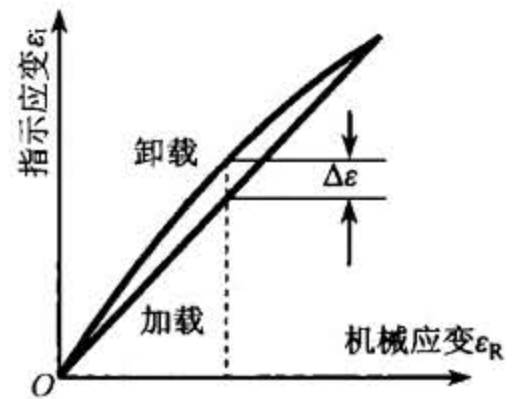


图 2-6 应变片的机械滞后

次,以减少因机械滞后所产生的实验误差。

对于粘贴好的应变片,当温度恒定、不承受应变时,其电阻值随时间增加而变化的特性,称为应变片的零点漂移,简称零漂。

零漂产生的原因主要有敏感栅通电后的温度效应、应变片的内应力逐渐变化、黏结剂固化不充分等。

如果在一定温度下,使应变片承受恒定的机械应变,其电阻值随时间增加而变化的特性称为蠕变。一般蠕变的方向与原应变量的方向相反。产生蠕变的原因是由于胶层之间发生“滑动”,使力传到敏感栅的应变量逐渐减少。

零漂和蠕变是衡量应变片特性对时间稳定性的重要指标,在长时间测量中其意义更为突出。

#### 2.2.4 应变极限

应变片电阻的相对变化与所承受的轴向应变成正比这一关系只在一定的范围内成立,当试件表面的应力超过某一数值时,这个关系将不再成立。

在图 2-7 中,纵坐标代表应变片的指示应变,横坐标代表试件表面的真实应变。所谓真实应变是指由于工作温度变化或承受机械载荷,在被测试件内产生应力(包括机械应力和热应力)时所引起的表面应变。当应变值不大时,应变片的指示应变值随试件表面的真实应变的增加而线性增加。如图 2-7 中实线所示,当应变值不断增加时,实线由直线逐渐变弯,产生了非线性误差。

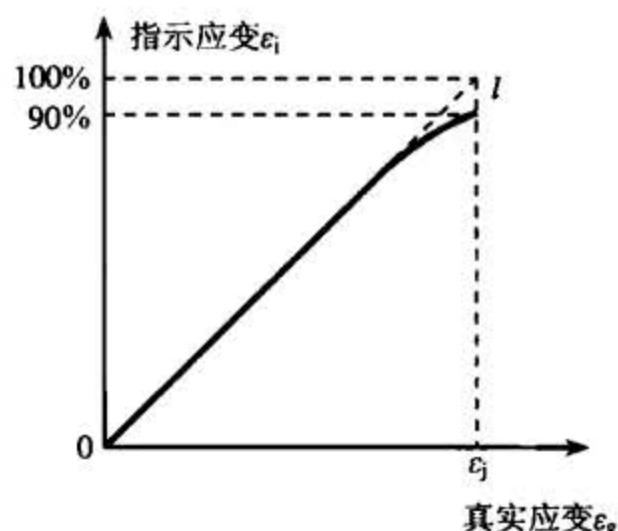


图 2-7 应变极限

应变片的应变极限就是指在一定温度下,应变片的指示应变  $\epsilon_i$  与试件的真实应变  $\epsilon_g$  的相对误差  $\delta$  达规定值(一般为 10%)时的真实应变值  $\epsilon_j$ 。此时,相对误差  $\delta$  可表示为

$$\delta = \frac{|\epsilon_g - \epsilon_i|}{\epsilon_g} \times 100\% = 10\%$$

满足上式的真实应变  $\epsilon_g$  就是应变片的应变极限,即图中的  $\epsilon_j$ 。

影响应变极限大小的主要因素是黏结剂和基片材料传递变形的性能及应变片的安装质量。制造与安装应变片时,应选用抗剪强度较高的黏结剂和基片材料。基片和黏结剂的厚度不宜过大,并应经过适当的固化处理,才能获得较高的应变极限。

#### 2.2.5 动态特性

当被测应变值随时间变化的频率很高时,应考虑应变片的动态特性。动态应变是以应变波的形式在试件中传播的。因应变片的基片和粘贴胶层很薄,构件的应变波传到应变片的时间很短(估计约  $0.2\mu\text{s}$ ),故实际应用时只需考虑应变沿应变片轴向传播时的动态响应即可。

设一频率为  $f$  的正弦应变波在构件中以速度  $v$  沿应变片轴向传播,在某一瞬时  $t$ ,应变波与应变片轴向应变量的关系如图 2-8 所示。应变波波长为  $\lambda$ ,应变片栅长为  $l$ ,应变片两端点的坐标是  $x_1$ 、 $x_2$ ,应变片中点的坐标是  $x_i$ 。



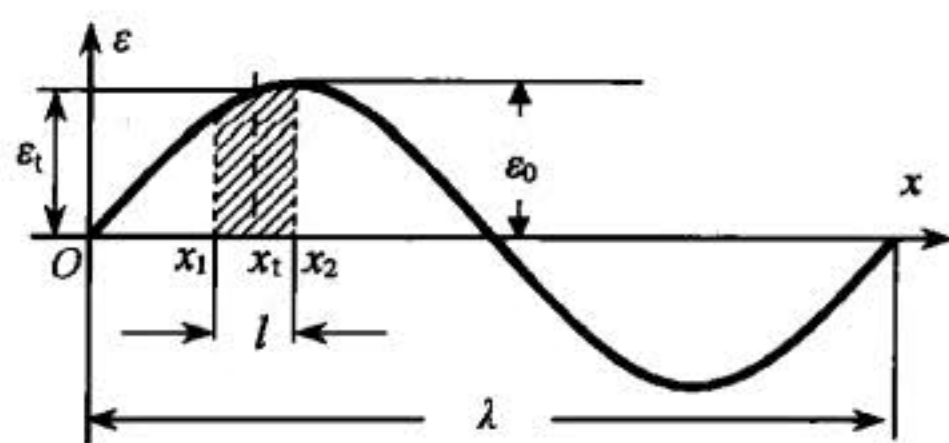


图 2-8 应变片对应变波的动态响应

应变波可表示为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t = \varepsilon_0 \sin 2\pi f t$$

而应变波沿应变片轴向在试件中传播时  $x = vt$ ,  $v = \lambda f$ , 所以上式可写作

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (2-17)$$

在  $x_1$  点的应变为

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x_1$$

应变片测得的应变为栅长  $l$  范围内的平均应变  $\varepsilon_m$ , 而不是  $x_1$  点的应变, 其数值等于  $l$  范围内应变波曲线下的面积除以  $l$ , 即

$$\varepsilon_m = \frac{1}{l} \int_{x_1 - \frac{l}{2}}^{x_1 + \frac{l}{2}} \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x dx = \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x_1 \cdot \frac{\sin \frac{\pi l}{\lambda}}{\frac{\pi l}{\lambda}}$$

平均应变  $\varepsilon_m$  与  $x_1$  点应变  $\varepsilon_t$  的相对误差  $\delta$  为

$$\delta = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_m}{\varepsilon_t} = 1 - \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_t} = 1 - \frac{\sin \frac{\pi l}{\lambda}}{\frac{\pi l}{\lambda}} \quad (2-18)$$

由 (2-18) 式可以看出, 相对误差  $\delta$  的大小只决定于  $l$  与  $\lambda$  的比值, 表 2-2 中给出了  $l$  和  $\lambda$  不同比值时  $\delta$  的数值。

由表 2-2 可知, 应变片栅长  $l$  与正弦应变波的波长  $\lambda$  之比愈小, 相对误差  $\delta$  愈小。若已知应变波在某材料内的传播速度  $v$ , 在选定  $l/\lambda$  后, 即可利用  $f = \frac{v}{\lambda}$  计算出粘贴在该材料上的应变片可测动态应变的频率。

 表 2-2  $l/\lambda$  不同时  $\delta$  的数值

$l/\lambda$	$\delta$
1/10	1.62%
1/20	0.52%