

本标准适用于铁素体钢系和奥氏体钢系的 X 射线应力测量。

1 名词术语

1.1 测定方向平面

所测定应力的方向和测试部位表面法线所组成的平面。

1.2 扫描平面

入射 X 射线与被计数管所接收的衍射线所组成的平面。

1.3 同倾法

测定方向平面和扫描平面相重合的测定方法。

1.3.1 同倾固定 ψ_0 法

在同倾法中计数管扫描时,入射角 ψ_0 (入射 X 射线与测试部位表面法线的夹角)保持不变的测量方法。

衍射几何如图 1 所示。

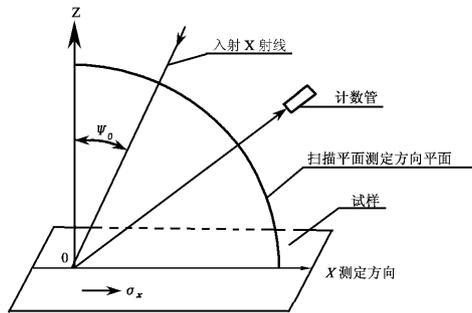


图 1

1.3.2 同倾回摆法

在同倾法中入射 X 射线和计数管在扫描平面内同步回摆的测量方法。衍射几何如图 2 所示。

1.3.3 同倾固定 ψ 法

在同倾法中计数管扫描时 ψ 角(试样法线和衍射晶面法线的夹角)保持不变的测量方法。衍射几何如图 3 所示。

1.4 侧倾法

测定方向平面和扫描平面相互垂直,衍射晶面法线位于测定方向平面内的测量方法。衍射几何如图 4 所示。图中 η 为入射 X 射线与衍射晶面法线的夹角。

2 测量方法

2.1 测量原理

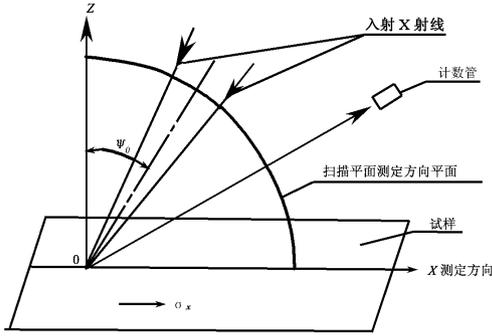


图 2

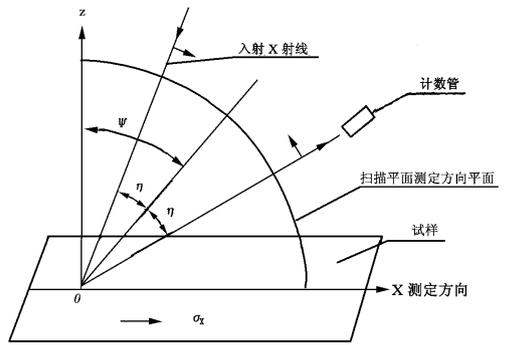


图 3

X 射线应力测定是根据 X 射线衍射测出的晶面间距的变化来计算材料应力的方法。X 射线应力测定的衍射几何如图 5 所示。

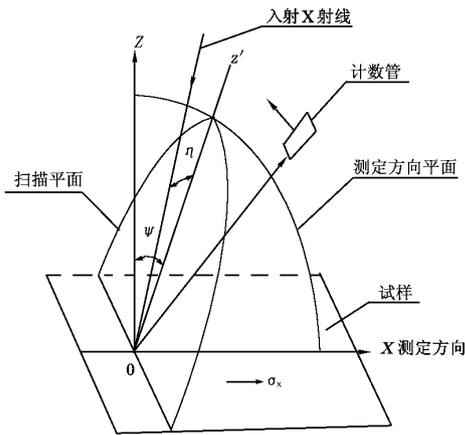


图 4

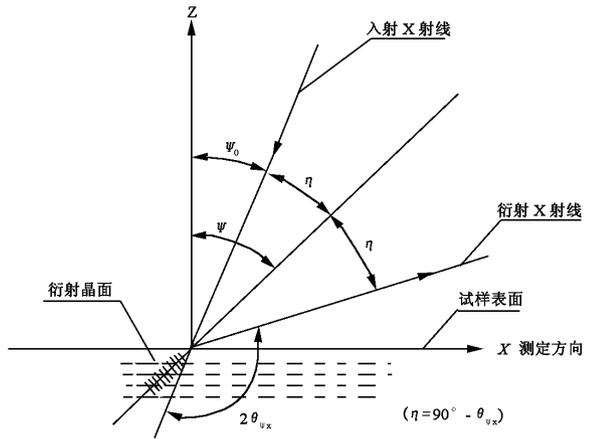


图 5

在二维应力情况下应力 σ_x 可由下式计算：

$$\sigma_x = -\frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \cot\theta_0 \frac{\partial(2\theta_{\psi x})}{\partial(\sin^2 \psi)} \cdot \frac{\pi}{180} = K \cdot M \dots \dots \dots (1)$$

式中： σ_x ——X 方向的应力，MPa；

K——应力常数，MPa/(°)；

$$K = -\frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cot\theta_0 \dots \dots \dots (2)$$

M—— $2\theta_{\psi x} - \sin^2 \psi$ 线的斜率；

$$M = \frac{\partial(2\theta_{\psi x})}{\partial(\sin^2 \psi)} \dots \dots \dots (3)$$

ψ_0 ——入射 X 射线和试样表面法线的夹角，(°)；

ψ ——试样表面法线和衍射晶面法线的夹角，(°)；

E——弹性模量，MPa；

μ ——泊松比；

θ_0 ——无应力状态下材料的 X 射线衍射角, (°);

$\theta_{\psi x}$ ——材料的 X 射线衍射角, (°)。

在实际应力测量中, 每个 ψ_0 角对应衍射角 $2\theta_{\psi x}$ 若干个 $2\theta_{\psi x}$ 和 $\sin^2 \psi$ 关系组成如图 6 所示 $2\theta_{\psi x} - \sin^2 \psi$ 线。理论上 $2\theta_{\psi x} - \sin^2 \psi$ 线是直线。根据测量的 $2\theta_{\psi x} - \sin^2 \psi$ 线的斜率 M , 可用(1)式计算应力 σ_x 。

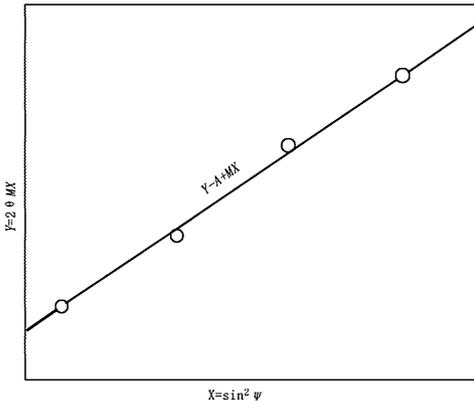


图 6

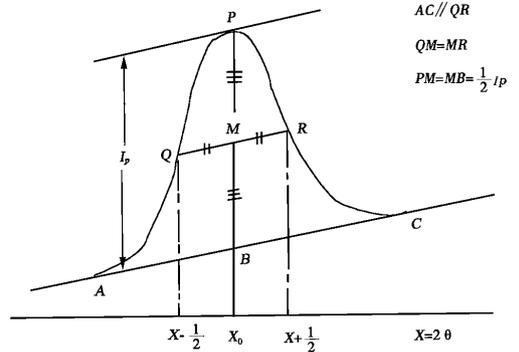


图 7

2.2 衍射线峰位置的确定

2.2.1 半高宽法

用半高宽法时, 峰位置 X_0 可用下式确定:

$$X_0 = \frac{1}{2}(X_{-\frac{1}{2}} + X_{+\frac{1}{2}})$$

这里 $X_{\pm \frac{1}{2}}$ 是净峰强度 I_p 一半处与背底平行线和衍射线之交点。如图 7 所示。

2.2.2 抛物线法

用抛物线法定峰时, 取净峰强度 85% 以上的衍射峰附近的间隔相同的 n 个点 ($2\theta, I$)。用最小二乘法进行抛物线拟合。以抛物线的顶点所对应的衍射角为峰位。计算公式如下:

$$2\theta = \frac{1}{2} \left[\frac{A \sum (2\theta)^4 + B \sum (2\theta)^3 + C \sum (2\theta)^2}{A \sum (2\theta)^3 + B \sum (2\theta)^2 + C \sum (2\theta)} \right] \dots \dots \dots (5)$$

式中: $A = n \sum I_{2\theta} 2\theta - \sum I_{2\theta} \sum 2\theta$;

$B = \sum (2\theta)^2 \sum I_{2\theta} - n \sum (2\theta)^2 I_{2\theta}$ 。

$C = \sum (2\theta)^2 I_{2\theta} \sum (2\theta) - \sum (2\theta)^2 \sum I_{2\theta} 2\theta$

n 数据点的数目

2.3 应力测量误差

由各种随机因素造成的应力测量误差可由下式计算:

$$\Delta \sigma_x = K \cdot \Delta M \dots \dots \dots (6)$$

式中: $\Delta \sigma_x$ ——应力测量误差, MPa;

K ——应力常数, MPa/(°);

ΔM —— $2\theta \sim \sin^2 \psi$ 线斜率误差。

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2}$$

$$\Delta M = l(a, n-2) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - (A + Mx_i)]^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

式中: $x_i = \sin^2 \psi_i$;

$$y_i = 2\theta\psi, x;$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i;$$

$$A = \bar{y} - M \bar{x};$$

$t(a, n-2)$ 对应自由度 $(n-2)$, 可信度 $(1-a)$ 的 t 分布道;

n —— ψ 角的个数;

K ——应力常数。

3 铁素体钢系的测量方法

3.1 测量对象应满足下列条件

3.1.1 衍射线

试样应能得到连续的德拜环。

3.1.2 表面状态

试样表面必须没有污垢、油膜、厚氧化层和附加应力层等。表面粗糙度 R_a 应小于 $10\mu m$ 。

3.2 X 射线和衍射晶面

用 $C_{\gamma}K_{\alpha}$ 辐射线, 在接收光阑处可采用钒箔滤波片。衍射晶面取 (211) 。

3.3 X 射线弹性常数和应力常数

对于 $C_{\gamma}K_{\alpha}$ 辐射线 (211) 面的 X 射线弹性常数值为:

$$E = 227.5 GPa$$

$$\mu = 0.3$$

$$\frac{E}{1+\mu} = 175 GPa$$

晶格常数 $a_0 = 0.28664 nm$

$G_{\gamma}K_{\alpha}$ 线波长 $\lambda = 0.22909 nm$

衍射角 $2\theta = 156.40^\circ$

此时应力常数 K 为:

$$K = -318 MPa/(\circ)$$

3.4 同倾法和侧倾法所选取 $\sin^2 \psi$ 值

3.4.1 同倾固定 ψ_0 法的 $\sin^2 \psi$ 值

采用 $C_{\gamma}K_{\alpha}$ 辐射线, (221) 面测量时可采用的 $\sin^2 \psi$ 值(见表 1)。

表 1

ψ_0	0	15°	30°	45°
$\psi = \psi_0 + \eta$	11.80°	26.80	41.80°	56.80°
$\sin^2 \psi$	0.042	0.203	0.444	0.700

3.4.2 同倾固定 ψ 法和侧倾法的 $\sin^2 \psi$ 值

采用 $C_{\gamma}K_{\alpha}$ 辐射线, (211)面测量时可采用的 $\sin^2 \psi$ 值(见表 2)。

表 2

ψ	0°	10°	20°	30°	40°	45°
$\sin^2 \psi$	0	0.030	0.117	0.250	0.413	0.500

4 奥氏体钢系的测定方法

4.1 测量对象应满足下列条件

4.1.1 衍射线

同 3.1.1

4.1.2 表面状态

同 3.1.2

4.2 X 射线和衍射晶面

用 $C_{\gamma}K_{\beta}$ 辐射线, 衍射晶面取(311)。

4.3 X 射线弹性常数和应力常数

对于 $C_{\gamma}K_{\beta}$ 辐射线(311)面的 X 射线弹性常数值为:

$$E = 193.3 \text{ GPa}$$

$$\mu = 0.3$$

$$\frac{E}{1+\mu} = 149 \text{ GPa}$$

$$\text{晶格常数 } a_0 = 0.3592 \text{ nm}$$

$$C_{\gamma}K_{\beta} \text{ 线波长 } \lambda = 0.20848 \text{ nm}$$

$$\text{衍角角 } 2\theta_0 = 148.52^\circ$$

此时应力常数 K 为: $K = -336 \text{ MPa}/(^{\circ})$

4.4 同倾法和侧倾法所选取的 $\sin^2 \psi$ 值4.4.1 同倾固定 ψ_0 法的 $\sin^2 \psi$ 值

采用 $C_{\gamma}K_{\beta}$ 辐射线, (311)面测量时可采用的 $\sin^2 \psi$ 值(见表 3)。

表 3

ψ_0	0°	15°	30°	45°
$\psi_0 + \eta$	15.74°	30.74°	45.74°	60.74
$\sin^2 \psi$	0.074	0.261	0.513	0.761

4.4.2 同倾固定 ψ 法和侧倾法的 $\sin^2 \psi$ 值

采用 $C_{\gamma}K_{\beta}$ 辐射线, (331)面测量时可采用的 $\sin^2 \psi$ 值(见表 4)。

5. 测量程序

5.1 表面处理

当被测表面不满足 3.1.2 要求时,必须对表面进行清理和电解抛光。

表 4

ψ_0	0°	15°	30°	45°
$\sin^2 \psi$	0	0.067	0.250	0.500

5.2 衍射线

满足 3.1.1 的要求。

5.3 试样设置

试样测量表面应准确地设置在测角仪的旋转中心。沿表面法线试样设置误差,平行光束法为 $\pm 2.0\text{mm}$; 准聚焦法为 $\pm 1.0\text{mm}$ 。

5.4 测量条件选择

应根据获得好的衍射线型,使峰背比增高来选择测量条件。

5.5 应力计算

按 2.1 计算应力。

为了准确测定应力值,可进行强度修正。对于铁素体钢系,可用下列简化公式:

$$\sigma_{\text{修}} = \sigma_{\text{测}} + 2.1^{B^2} \text{MPa}$$

式中: $\sigma_{\text{修}}$ —— 修正后的应力值, MPa ;

$\sigma_{\text{测}}$ —— 未经修正的测量应力值, MPa ;

B —— 零度入射衍射线的半高宽, $(^\circ)$ 。

5.6 校准装置

用零应力粉末定期对装置进行校准。

6 测量装置

6.1 测量装置应满足下列要求:

6.1.1 对零应力粉末,在固定 ψ_0 的情况下,多次(不少于 5 次)重复测量其衍射角波动在 $\pm 0.025^\circ$ 范围内。

6.1.2 当 ψ 角旋转时,旋转中心偏差小于 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

6.1.3 对具有敏锐衍射峰(半高宽小于 3°)的已知应力试样,用该测量装置测量的应力误差小于 $\pm 25\text{MPa}$ 。

6.2 测量装置

测量装置方框图如图 8 所示。

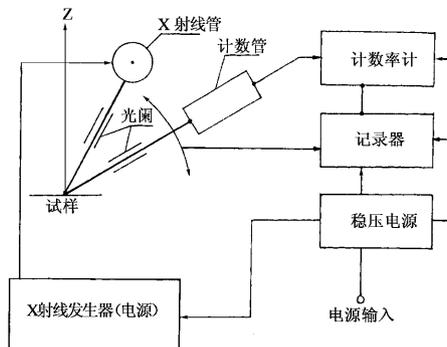


图 8