



中华人民共和国国家标准

GB/T 7704—2008
代替 GB/T 7704—1987

无损检测 X射线应力测定方法

Non-destructive testing—Practice for residual stress measurement by X-ray

2008-07-30 发布

2009-02-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 应力测定原理 1

5 系统 3

6 测定规程 4

7 应力测定误差及修正 4

8 报告 4

附录 A（规范性附录） X 射线应力测定常用的方法 5

附录 B（规范性附录） 确定衍射峰位置的方法 8

附录 C（规范性附录） 随机因素造成的误差计算方法 10

前 言

本标准代替 GB/T 7704—1987《X 射线应力测定方法》。

本标准与 GB/T 7704—1987 相比主要变化如下：

- 增加了部分术语和定义(见第 3 章)；
- 侧倾法中增加回摆法(见附录 A)；
- 确定衍射峰位置增加交相关定峰位置法(见附录 B)；
- 删除 1987 年版 3.4 和 4.4 条中的 $\sin^2\psi$ 计算表；
- 删除 1987 年版 6.2 测量装置示意图。

本标准的附录 A、附录 B 和附录 C 为规范性附录。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)归口。

本标准起草单位：上海材料研究所。

本标准主要起草人：巴发海、王滨。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 7704—1987。

无损检测 X 射线应力测定方法

1 范围

本标准规定了用 X 射线测定残余应力的方法总则。

本标准适用于在 X 射线下能得到连续德拜环的多晶金属材料试样(或工件)的应力测定。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

JB/T 9394 X 射线应力测定仪 技术条件

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

应力方向 stress direction

所要测定的应力方向,在测定中定位等同于测定部位表面法线、衍射晶面法线所构成的平面与试样表面的交线方向。拉应力符号为正,压应力符号为负。

3.2

测定方向平面 direction plane for stress measurement

所测定应力的方向与测定部位表面法线所构成的平面。

3.3

扫描平面 scanning plane

入射 X 射线与被计数管所接收的衍射线所构成的平面。

3.4

入射角 incidence angle

ψ_0

入射 X 射线与试样表面法线之间的夹角。

3.5

衍射晶面方位角 azimuth angle of diffraction crystal plane

ϕ

试样表面法线与衍射晶面法线之间的夹角。

3.6

衍射角 diffraction angle

2θ

入射 X 射线与衍射 X 射线之间的夹角。

4 应力测定原理

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 1 所示。

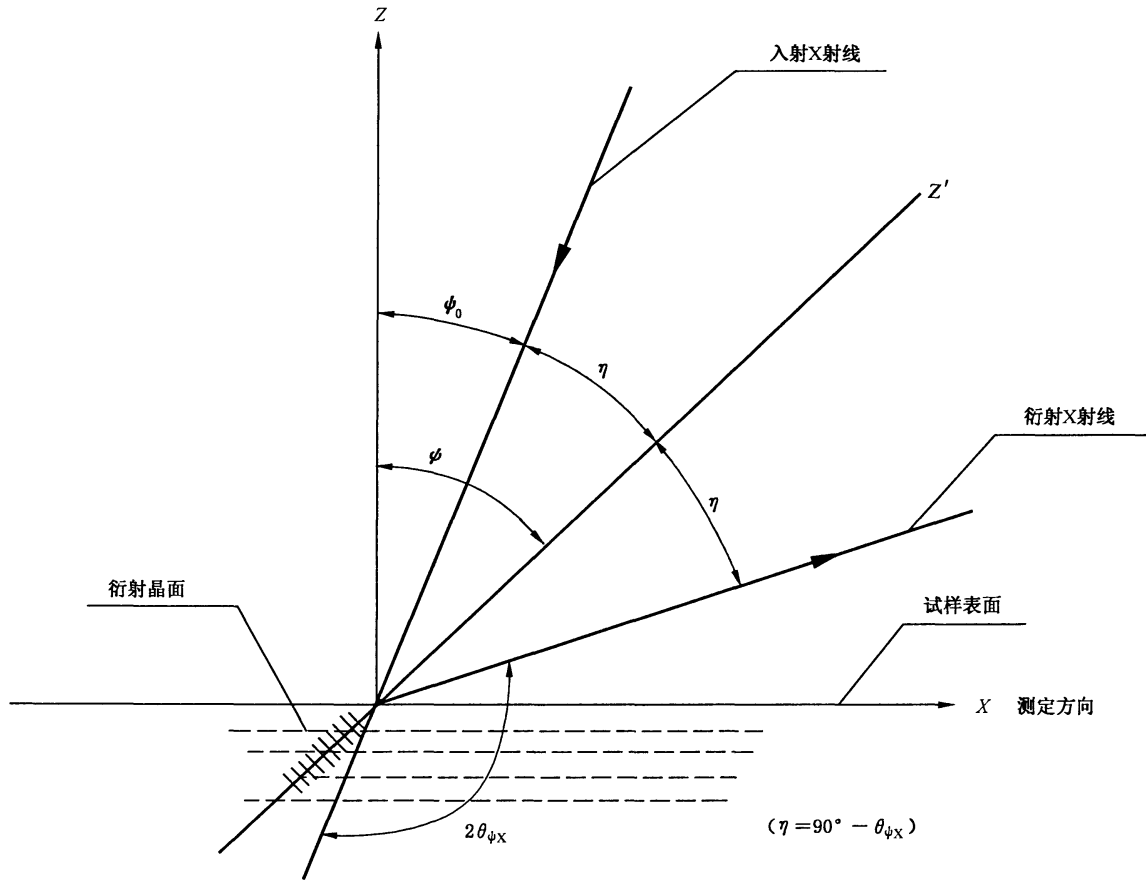


图 1 X 射线应力测定原理示意图

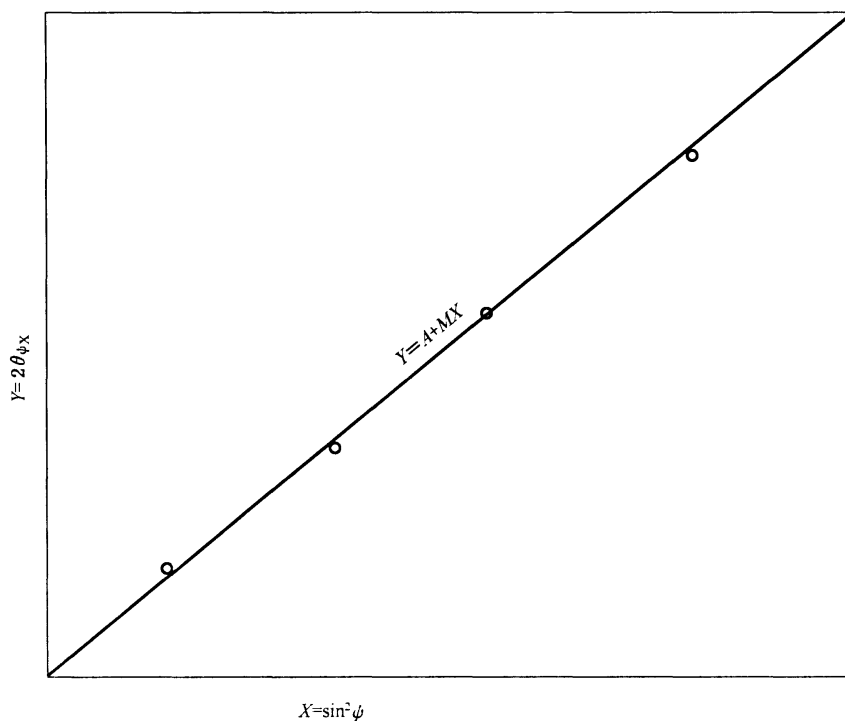
在二维应力情况下,试样表层对选定应力方向(X 方向)的应力可用式(1)计算。

$$\sigma_x = K \cdot M \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- σ_x ——X 方向的应力,单位为兆帕(MPa);
- K ——应力常数,单位为兆帕每度[MPa / (°)];
- M —— $2\theta_{\psi X} - \sin^2 \psi$ 线的斜率, $2\theta_{\psi X}$ 为测定过程中对于给定的 ψ 所测得的衍射角。

在实际应力测定中,每个 ψ_0 (或 ψ) 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 2 所示的 $2\theta_{\psi X} - \sin^2 \psi$ 函数曲线。理论上 $2\theta_{\psi X} - \sin^2 \psi$ 是直线。根据测定的 $2\theta_{\psi X} - \sin^2 \psi$ 线的斜率 M ,可用式 (1) 计算应力 σ_x 。

图 2 $2\theta_{\psi x} - \sin^2 \psi$ 曲线

5 系统

- 5.1 仪器应满足 JB/T 9394 的相关规定。
- 5.2 仪器应至少具有附录 B 所列确定衍射峰的功能。
- 5.3 零应力试样可采用真空退火态粒度在 $1\ \mu\text{m} \sim 45\ \mu\text{m}$ 的衍射峰尖锐的无应力 Fe 粉或采用退火态的 Cr 粉用松香加热黏结制备。
- 5.4 对零应力试样,在固定 ψ_0 的情况下,多次(不少于 5 次)重复测定其衍射角波动在 $\pm 0.025^\circ$ 。当 ψ 角旋转时,旋转中心偏差小于 $\pm 0.5\ \text{mm}$ 。
- 5.5 仪器的综合稳定度优于 1%。

注:本标准中仪器综合稳定度是指同一试验条件下对同一试样的同一衍射晶面,每隔 10 min 测定一次衍射强度,在 8 h 所测衍射强度值的相对标准偏差 σ_{-1} 。

$$\sigma_{-1} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{I} - I_i)^2}{n-1}}}{\bar{I}} \times 100\%$$

式中:

\bar{I} ——对某一衍射晶面 n 次测定的平均衍射强度;

I_i ——某一衍射晶面第 i 次测定的衍射强度。

- 5.6 定期用零应力试样对仪器进行检定或校准。
- 5.7 测定前用零应力试样对仪器进行校准。
- 5.8 对具有半高宽小于 3° 敏锐衍射峰的已知应力试样,用该仪器测定的应力(不少于 5 次)误差小于 $\pm 25\ \text{MPa}$,且其算术平均值和标准偏差在 $0\ \text{MPa} \sim 25\ \text{MPa}$ 范围内为合格。

6 测定规程

6.1 试样表面处理

待测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 Ra 应小于 $10\ \mu\text{m}$ 。当被测表面不满足上述要求时,必须对表面进行清理和电解抛光。

6.2 参数选择

根据所测材料的类型选用辐射线、滤波片和衍射晶面。对铁素体钢系,用 $C_{\gamma}K_{\alpha}$ 辐射线,接收光阑采用钒箔滤波片,衍射晶面取(211),此时应力常数 $K = -318\ \text{MPa}/(^{\circ})$ 。对奥氏体钢用 $C_{\gamma}K_{\beta}$ 辐射线,衍射晶面取(311),此时应力常数 $K = -366\ \text{MPa}/(^{\circ})$ 。其他幅射线,可作相应的选择。

6.3 对准

试样测定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 $\pm 1.0\ \text{mm}$ 。 θ 零位校正后其偏差要求小于 0.01° 。

6.4 测定条件选择

应根据获得好的衍射线型,使峰背比增高来选择测定条件。尽量采用峰高大于背底波动 4 倍且峰高约为半高宽 4 倍的衍射峰为宜。

固定 ψ_0 法或固定 ψ 法测定应力时, ψ_0 角或 ψ 角推荐采用 0° 、 15° 、 30° 和 45° 。为进一步提高准确度,也可适当增加 ψ_0 角或 ψ 角的个数。

6.5 测定方法

根据试样和仪器情况,选择附录 A 所列或其他适当的应力测定方法。

6.6 测定记录

用计数法。

6.7 定峰方法

采用附录 B 所列或其他适当的方法确定衍射峰位置(2θ)。

6.8 应力计算

根据测定的 $2\theta_{\psi x} - \sin^2\psi$ 线的斜率 M ,用式(1)计算应力 σ_x 。

7 应力测定误差及修正

应力测定误差应按附录 C 进行计算。

为了准确测定应力值,可进行强度修正。对于铁素体钢系,可用下列简化公式修正:

$$\sigma_{\text{修}} = \sigma_{\text{测}} + 2.1B^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

$\sigma_{\text{修}}$ ——修正后的应力值,单位为兆帕(MPa);

$\sigma_{\text{测}}$ ——未经修正的测定应力值,单位为兆帕(MPa);

B ——零度入射衍射线的半高宽,单位为度($^{\circ}$)。

8 报告

8.1 报告内容应包含检测机构名称、检测人员信息和测定日期、材料类型和试样描述、应力大小和误差,以及所用仪器、电压、电流、靶、峰位信息等。

8.2 客户有要求时,还应给出应力测定的不确定度。

附录 A
(规范性附录)
X 射线应力测定常用的方法

A.1 同倾法

A.1.1 概述

测定方向平面和扫描平面相重合的应力测定方法。如图 A.1 所示。

A.1.2 同倾固定 ψ_0 法

在同倾法中计数管扫描时,入射角 ψ_0 保持不变的测定方法。衍射几何如图 A.1 所示。

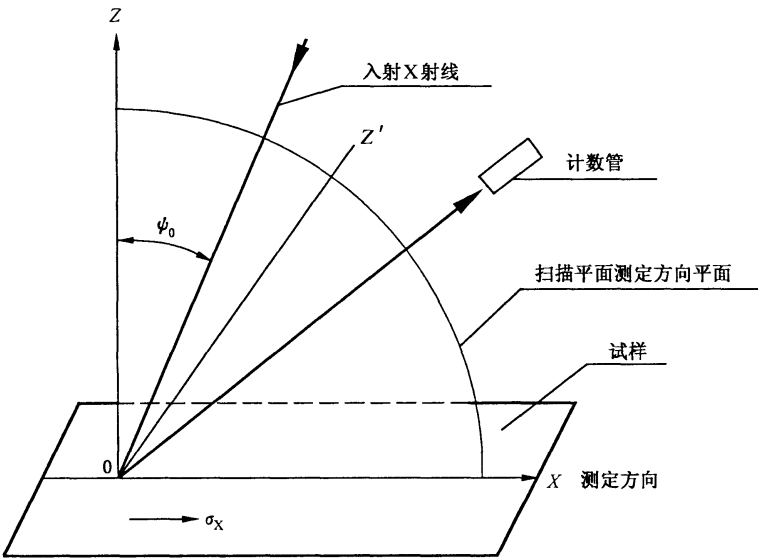


图 A.1 同倾固定 ψ_0 法

A.1.3 同倾回摆法

在同倾法中入射 X 射线和接收 X 射线的计数管在扫描平面内同步回摆的测定方法。衍射几何如图 A.2 所示。

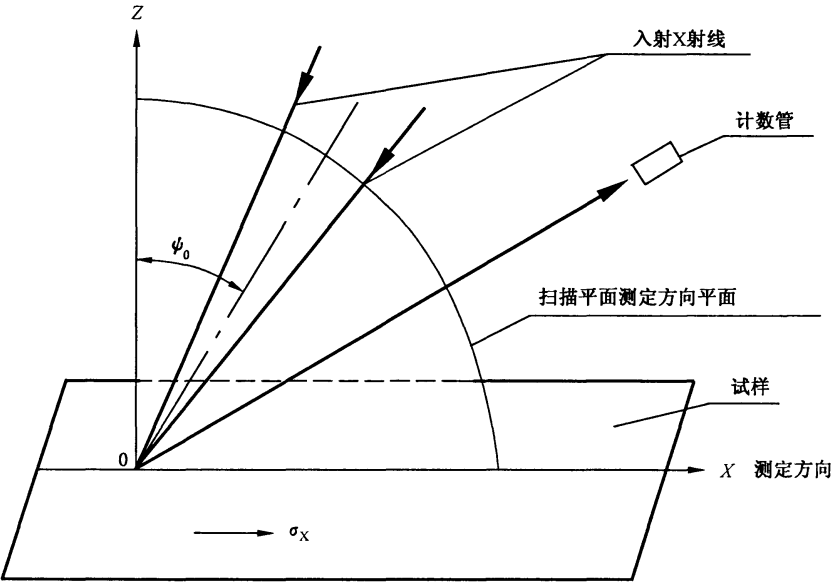
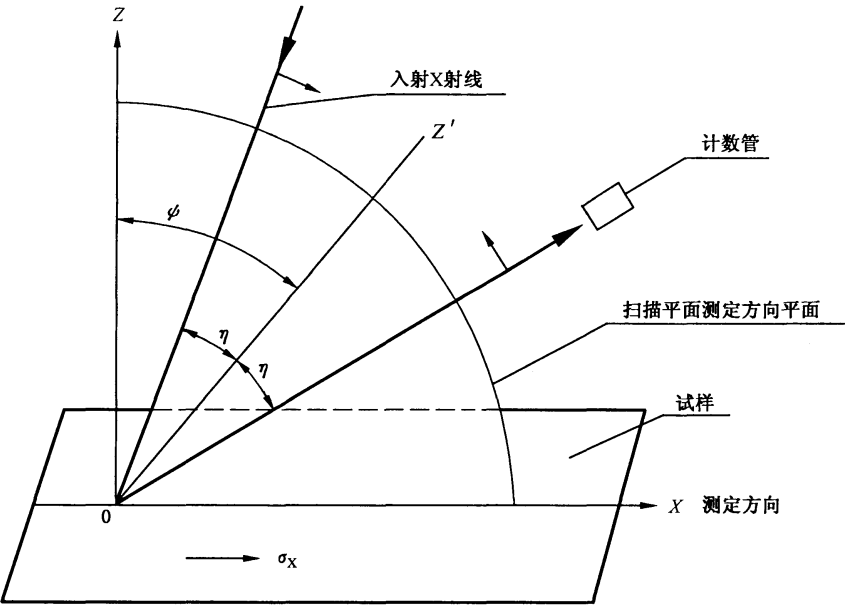


图 A. 2 同倾回摆法

A. 1. 4 同倾固定 ψ 法

在同倾法中计数管扫描时, ψ 角保持不变的测定方法。衍射几何如图 A. 3 所示。



η ——入射 X 射线与衍射晶面法线的夹角。

图 A. 3 同倾固定 ψ 法

A. 2 侧倾法

测定方向平面和 2θ 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定方法。如图 A. 4 所示。

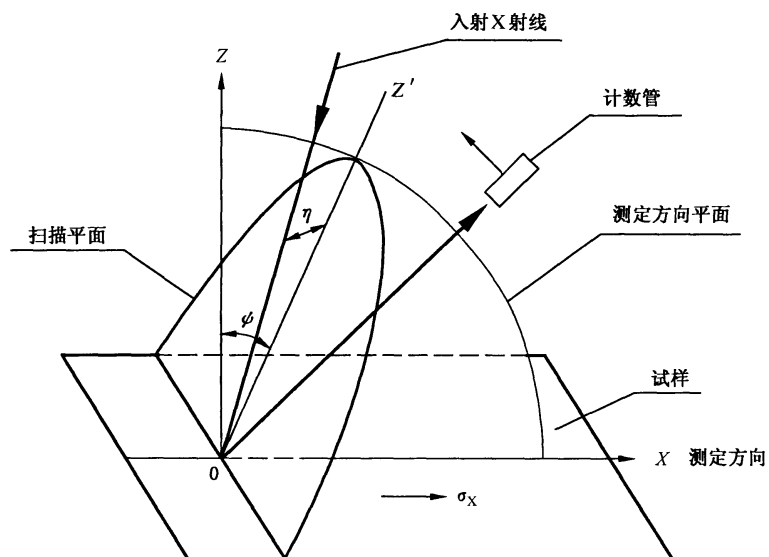


图 A.4 侧倾法

A.2.1 侧倾固定 ψ 法

在侧倾法中计数管扫描时, ψ 角保持不变的测定方法。

A.2.2 侧倾固定 ψ 回摆法

扫描过程中,在每一个 2θ 位置保持 2θ 不变,同时使扫描平面以指定的 ψ 为中心在 ψ 平面内摆动一定的角度($\Delta\psi$)的侧倾法。

附录 B

(规范性附录)

确定衍射峰位置的方法

B.1 半高宽法

对某一衍射峰,去除衍射曲线的背底后取衍射峰净高度(或净强度)的 $1/2$ 处连线的中点所对应的 2θ 作为衍射峰位置(图 B.1 中为半高宽连线 QR 的中点 M 对应的 X_0)。

$$X_0 = \frac{1}{2}(X_{-\frac{1}{2}} + X_{+\frac{1}{2}}) \quad \dots\dots\dots (\text{ B. 1 })$$

这里 $X_{\pm\frac{1}{2}}$ 分别是净峰强度 I_p (峰高度或最大衍射强度计数值) 一半处 (半高宽) 连线 QR 与衍射线之交点 Q 和 R 所对应的 2θ 。

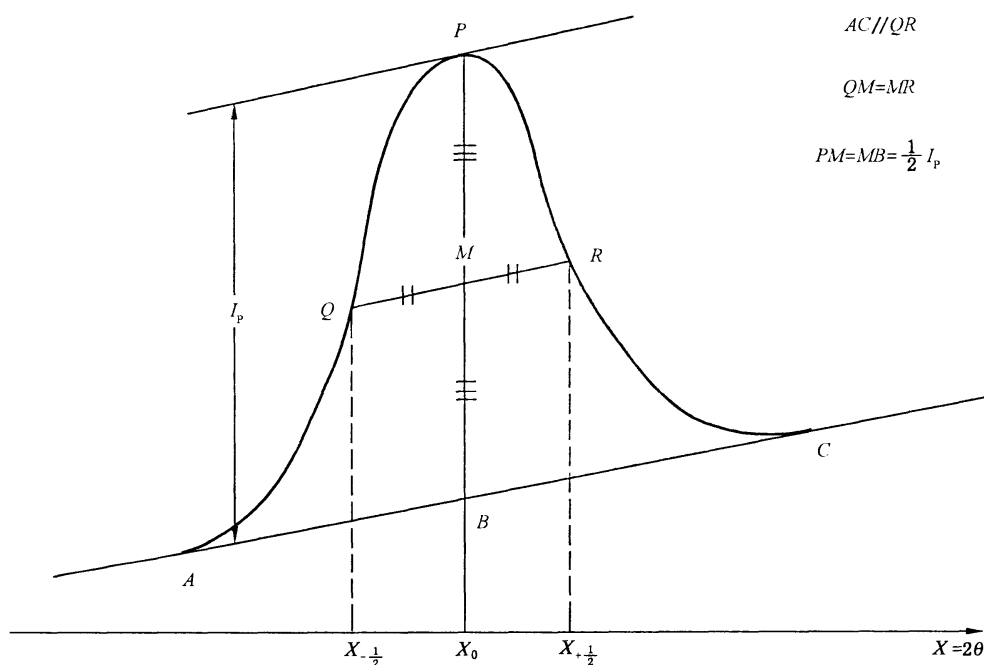


图 B.1 半高宽法

B.2 抛物线法

取净峰衍射强度 85% (计数值) 以上的衍射峰附近的间隔相同的 n 个点 ($2\theta_i, I_{2\theta_i}$) 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 2θ 。计算公式如下:

$$2\theta = \frac{\left[A \sum_{i=1}^n (2\theta_i)^4 + B \sum_{i=1}^n (2\theta_i)^3 + C \sum_{i=1}^n (2\theta_i)^2 \right]}{\left[A \sum_{i=1}^n (2\theta_i)^3 + B \sum_{i=1}^n (2\theta_i)^2 + C \sum_{i=1}^n (2\theta_i) \right]} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

$$A = n \sum_{i=1}^n I_{2\theta_i} (2\theta_i) - \sum_{i=1}^n I_{2\theta_i} \sum_{i=1}^n (2\theta_i);$$

$$B = \sum_{i=1}^n (2\theta_i)^2 \sum_{i=1}^n I_{2\theta_i} - n \sum_{i=1}^n (2\theta_i)^2 I_{2\theta_i};$$

$$C = \sum_{i=1}^n (2\theta_i)^2 I_{2\theta_i} \sum_{i=1}^n (2\theta_i) - \sum_{i=1}^n (2\theta_i)^2 \sum_{i=1}^n I_{2\theta_i} (2\theta_i);$$

n ——数据点的数目, $(2\theta_i, I_{2\theta_i})$ 为 n 个数据中的第 i 个数据坐标, 其中 $I_{2\theta_i}$ 为对应 $2\theta_i$ 的衍射强度。

B.3 交相关法

通过两个不同 ψ 角 (ψ_1, ψ_2) 下测定的衍射峰数据曲线 $[f_{\psi_1}(2\theta)$ 和 $f_{\psi_2}(2\theta)]$ 构造交相关函数 $F(2\theta)$ 曲线, 并以交相关曲线 $F(2\theta)$ 最大值点的横坐标作为两个衍射峰的峰位差 $\Delta 2\theta$ 的方法。计算原理如下:

$$F(2\theta_i) = \sum_{i=1}^n \{f_{\psi_1}(2\theta_i) f_{\psi_2}[2\theta_i + \Delta(2\theta_i)]\} \quad \dots\dots\dots (\text{B.3})$$

式中:

n ——测定的总步数;

$2\theta_i$ ——对应第 i 步的衍射角;

$\Delta(2\theta_i)$ ——第 i 步对应两个 ψ 角的衍射角之差。

附 录 C
(规范性附录)
随机因素造成的误差计算方法

应力测定误差可由下式计算：

$$\Delta\sigma_x = K \cdot \Delta M \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

$$M = \frac{n\overline{XY} - \sum_{i=1}^n X_i Y_i}{n\overline{X}^2 - \sum_{i=1}^n X_i^2} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

$$\Delta M = t(\alpha, n-2) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Y_i - (A + MX_i)]^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (X_i - \overline{X})^2}} \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

- $\Delta\sigma_x$ ——应力测定误差,单位为兆帕 MPa;
 - ΔM —— $2\theta_{\psi X} - \sin^2 \psi$ 线斜率误差;
 - $X_i = \sin^2 \psi_i$;
 - $Y_i = 2\theta_{\psi_i X}$;
 - $\overline{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$;
 - $\overline{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$;
 - $A = \overline{Y} - M\overline{X}$;
 - K ——应力常数;
 - $t(\alpha, n-2)$ ——对应自由度 $(n-2)$,置信度 $(1-\alpha)$ 的 t 分布值;
 - n —— ψ 角的个数。
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
无损检测 X 射线应力测定方法
GB/T 7704—2008

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街 16 号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

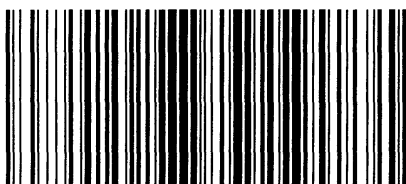
*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 20 千字
2008 年 11 月第一版 2008 年 11 月第一次印刷

*

书号: 155066 • 1-34150 定价 16.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533



GB/T 7704—2008