

ICS XXXXXX
CCS X XXX

团 体 标 准

T/CIECCPA XXX—20XX

在役状态下铁素体系铁基材料 X 射线应力 测量

X-ray stress measurement of metallic materials in service

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中 国 工 业 节 能 与 清 洁 生 产 协 会 发 布

目 次

前言2

引言 错误！未定义书签。

1 范围3

2 术语和定义3

3 一般事项5

 3.1 测定原理 5

 3.2 测定方法 7

 3.3 测定条件 8

 3.4 应力值算法 8

 3.5 测量装置 9

 3.6 测量步骤 10

4 铁素体系钢铁材料的标准测量方法 11

 4.1 测量对象11

 4.2 特性 X 射线与衍射面11

 4.3 X 射线弹性常数 12

 4.4 应力值的计算 12

图 1 $\cos\alpha$ 法 X 射线应力测定的原理图6

图 2 德拜环上 4 个衍射角测量示意图 6

图 3 $\epsilon\alpha 1-\cos\alpha$ 曲线图7

图 4 测定装置组成9

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口管理。

本文件起草单位：浙江省特种设备科学研究院……………。

本文件主要起草人：XX。

本文件为首次发布。

在役状态下铁素体系铁基材料 X 射线应力测量

1 范围

本文件规定了在役状态下铁素体系铁基材料 X 射线应力测量的一般事项和测量方法。

本文件适用于铁素体系钢铁材料的应力测定。本文件规定的 X 射线应力测定法是利用 X 射线衍射测定多晶体表面层应力的方法。本文件的 $\cos\alpha$ 法是通过斜入射 X 射线，用二维检测器获取衍射环（德拜环）变化，测量不同方位的晶格应变，非破坏性地检测计算工件表面层应力的方法。

2 术语和定义

2.1

铁素体系铁基材料 ferritic steel materials

指基体组织为铁素体的钢铁材料。

2.2

$\varepsilon_{\alpha 1}-\cos\alpha$ 线图 $\varepsilon_{\alpha 1}-\cos\alpha$ curve

单一入射 X 射线对工件进行照射，利用从工件上衍射的德拜环中提取的多个衍射角 α 和对称角 $-\alpha$ 的合计 4 面的衍射强度曲线和半幅值法等确定峰位置，计算应变参数 $\varepsilon_{\alpha 1}$ 。以 $\varepsilon_{\alpha 1}$ 为纵轴， $\cos\alpha$ 为横轴绘制线图，图中的斜率用于计算垂直方向的应力。

2.3

$\varepsilon_{\alpha 2}-\sin\alpha$ 线图 $\varepsilon_{\alpha 2}-\sin\alpha$ curve

单一入射 X 射线对工件进行照射，利用从工件上衍射的德拜环中提取的多个衍射角 α 和对称角 $-\alpha$ 的合计 4 面的衍射强度曲线和半幅值法等确定峰位置，计算应变参数 $\varepsilon_{\alpha 2}$ 。此 $\varepsilon_{\alpha 2}$ 绘制为纵轴， $\sin\alpha$ 为横轴的图，图中的斜率用于计算垂直方向的应力。

2.4

X 射线有效侵入深度 X-ray effective penetration depth

X 射线的强度在材料内通过光路径长度以指数函数形式衰减。入射 X 射线强度为 I_0 ，吸收系数为 μ 时，X 射线强度 I 表示为 $I = I_0 \exp(-\mu l)$ 。X 射线强度比 $I/I_0 = 1/e$ 时的光路径长度 $l=1/\mu$ 称为 X 射线有效侵入深度。在 X 射线衍射中，通过 X 射线的物质内部的光路径总长度称为 X 射线的有效侵入深度。

2.5

衍射 X 射线 diffracted x-rays

入射 X 射线按照布拉格条件（Bragg's law）衍射产生的 X 射线。

2.6

衍射角 diffraction angle

衍射面和入射 X 射线的夹角的 2 倍称为衍射角。

2.7

衍射环 diffraction ring

德拜-谢勒环（Debye-Scherrer ring）。

2.8

衍射强度曲线 diffraction intensity curve

衍射角对 X 射线计数变化的曲线。通过衍射强度曲线扣除背景强度后，确定衍射峰位置。

2.9

衍射面 diffraction plane

晶粒中满足布拉格条件的 X 射线衍射面。

2.10

衍射向量 diffraction vector

衍射面的法线方向的单位向量。

2.11

回转角 rotation angle

二维检测器上德拜环的中心作为原点的角度。

2.12

管电压 tube voltage

X 射线管阳极与阴极之间的电压。

2.13

管电流 tube current

阴极与阳极之间的电流。

2.14

倾斜角 tilt angle

入射 X 射线与工件表面的夹角。

2.15

Cr-K α 特性 X 射线 Cr-K α characteristic x-rays

对铬金属产生的 K α 特性 X 射线。

2.16

晶体晶面 crystallographic lattice plane

晶体是由构成其的原子按照规则排列形成的三维结构。晶体中密集的原子平面称为晶体晶面。这个平面用米勒指数 hkl 表示。

2.17

晶体取向 crystallographic orientation

指的是单个晶体中三个主轴的取向。

2.18

晶格应变 lattice strain

由于应力导致的衍射晶体面间隔发生的变化 Δd ，通常表示为无应力状态下的晶体面间隔 d_0 的比例。

2.19

cos α 法 cos α method

X 射线应力测量方法之一，通过单一入射 X 射线照射工件表面，测量从工件上衍射的 X 射线及二维检测器上德拜环图来求得晶体应变，以确定残余应力与负荷应力的非破坏测定方法。

2.20

准直器 collimator

限制入射 X 射线的发射角度及照射位置的装置，通常为限制 X 射线通过的小孔。

2.21

残余应力 residual stress

多晶体材料中的残余应力，根据其存在的领域大小分为：

- 第一种应力：长范围内的宏观应力（macro-stresses）
- 第二种应力：各个晶粒的平均应力（average micro-stress）
- 第三种应力：单个晶粒内的微观应力（micro-stresses）

2.22

织构 texture

多晶材料中的晶粒由于某些优先方向而排列成的状态称为织构。

2.23

多相材料 multi-phase material

由多种相组成的材料，如铁素体-奥氏体相的两相材料。

2.24

弹性异向性 elastic anisotropy

材料在不同方向上具有不同的弹性系数的特性。

2.25

特性 X 射线 characteristic X-rays

从 X 射线管的靶金属中产生的特性 X 射线，如 $K\alpha$ ， $K\beta$ 系列。

2.26

德拜-谢勒环 debye-Scherrer ring

德拜环，指多晶体样品中产生的衍射环。

2.27

二维检测器 two-dimensional detector

一种二维记录德拜环的检测装置。在 $\cos\alpha$ 法中使用的二维检测器，通常为成像板或计数型二维检测器、半导体二维检测器等。

2.28

滤波器 filter

通常，特性 X 射线中包含 $K\alpha$ 线和 $K\beta$ 线，两者同时出现会干扰。因此，为消除 $K\beta$ 线，使用滤波器仅通过 $K\alpha$ 线，常用的滤波器材料是钒（厚约 0.016mm）。

2.29

Bragg 角 bragg angle

衍射面与入射 X 射线的夹角，衍射角的一半。

2.30

晶粒取向 preferred orientation

晶粒的方位有特定方向的优先排列。

3 一般要求

3.1 测定原理

对于各向同性的工业材料，X 射线应力测定法利用材料中的晶体衍射现象测量衍射晶体群的平均应变，并根据弹性力学法则确定应力。

对于本文件中涉及的铁素体系钢铁材料，一般采用 Cr 靶产生的 $K\alpha$ 射线测量铁素体晶面（211）衍射的应变。本节描述了 $\cos\alpha$ 法应力测定的基本原理，利用斜入射 X 射线进行测量。

图 1 展示了 $\cos\alpha$ 法 X 射线应力测定的原理图。在测量时，测定应力的方向为 x 轴，与之垂直的方向为 y 轴，工件表面法线方向为 z 轴。X 射线以倾斜角 ψ_0 从 xz 面内的 z 轴斜入射，二维检测器垂直于入射 X 射线。这时，从照射区域内晶体群的衍射 X 射线在检测器上形成如图 2 所示的圆环，称为德拜-谢尔环或德拜环。

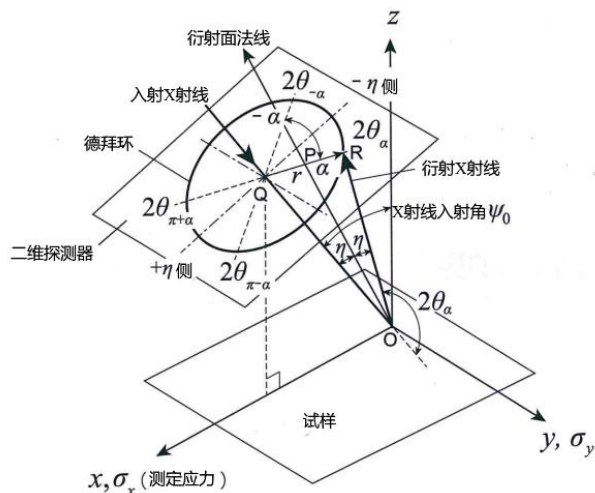


图 1 $\cos\alpha$ 法 X 射线应力测定的原理图

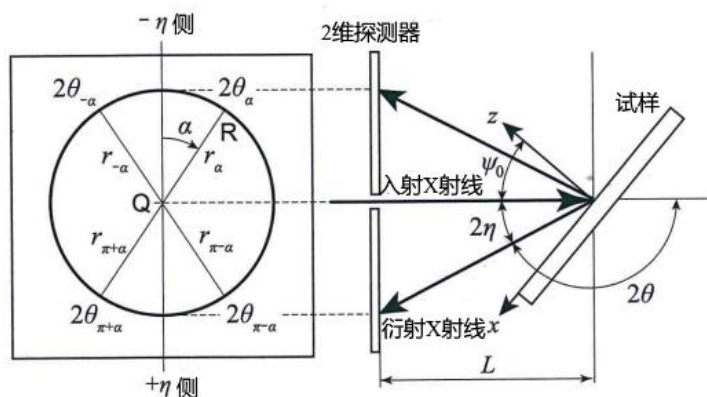


图 2 德拜环上 4 个衍射角测量示意图

从入射 X 射线侧观察，考虑以德拜环的中心 Q 为原点的极坐标，以德拜环的最上点的 η 侧为起点，定义向顺时针方向旋转角 α ，对应于旋转角 α 的德拜环（图 1，图 2 中 R 点）的半径 r_α 为，

$$r_\alpha = L \cdot \tan 2\eta_\alpha \quad (1)$$

这里， L 是工件与检测器的距离， $2\eta_\alpha$ 是衍射角 $2\theta_\alpha$ 的补角。

$$2\eta_\alpha = 180 - 2\theta_\alpha \text{ [deg]} \quad (2)$$

从半径 r_α 、式 (1)、式 (2) 中，衍射角 (diffraction angle) $2\theta_\alpha$ 由下式求得。

$$2\theta_\alpha = \left\{ \pi - \arctan \left(\frac{r_\alpha}{L} \right) \right\} \frac{180}{\pi} \text{ [deg]} \quad (3)$$

在这里，角度用 deg 表示，上式中的 $180/\pi$ 是用于从 rad 变换为 deg 的系数，如果确定衍射角 $2\theta_\alpha$ ，根据下式求出相对于旋转角 α 的晶格应变 (lattice strain) ε_α 。

$$\varepsilon_\alpha = -(\theta_\alpha - \theta_0) \frac{\pi}{180} \cot \theta_0 \quad (4)$$

为了计算应力值，除了相对于旋转角 α 的晶格应变 ε_α 之外，与其对角的晶格应变 $\varepsilon_{\alpha+\pi}$ ，求出旋转角 $-\alpha$

及其对角的晶格变形 $\varepsilon_{-\alpha}$ 和 $\varepsilon_{\pi-\alpha}$ 的合计 4 个晶格变形。求两个变形差 $(\varepsilon_{\alpha}-\varepsilon_{\alpha+\pi})$ 和 $(\varepsilon_{-\alpha}-\varepsilon_{\pi-\alpha})$ ，用下式定义其平均值作为变形参数 $\varepsilon_{\alpha l}$ 。

$$\varepsilon_{\alpha l} = \frac{(\varepsilon_{\alpha}-\varepsilon_{\alpha+\pi}) + (\varepsilon_{-\alpha}-\varepsilon_{\pi-\alpha})}{2} \quad (5)$$

工件表层的应力状态为平面应力时，测定应力 σ_x 与变形参数 $\varepsilon_{\alpha l}$ 有以下关系，

$$\sigma_x = -\frac{E_X}{1+\nu_X} \frac{l}{\sin 2\eta \sin 2\psi_0} \frac{\partial \varepsilon_{\alpha l}}{\partial \cos \alpha} \quad (6)$$

这里， E_X 是铁素体相的 X 射线弹性模量， ν_X 是 X 射线泊松比。上式是 $\cos \alpha$ 法中应力测定的基础公式。

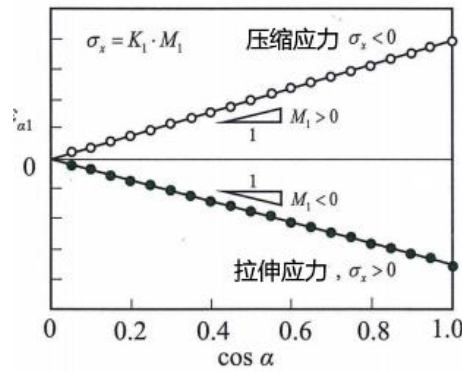


图 3 $\varepsilon_{\alpha l}$ - $\cos \alpha$ 曲线图

在实际的应力测量中，从单一的 X 射线入射角（X-ray incident angle） ψ_0 中测量的德拜环求出相对于多个旋转角 α 的变形参数 $\varepsilon_{\alpha l}$ ，横轴为 $\cos \alpha$ ，在纵轴上绘制 $\cos \alpha$ 和 $\varepsilon_{\alpha l}$ 的关系，如图 3 所示的直线。根据最小二乘法，决定近似直线的这样配 M_l ，用下式求出应力 σ_x 。

$$\sigma_x = K_l \cdot M_l [\text{MPa}] \quad (7)$$

这里， K_l 被称为应力常数（stress consistent）。

$$K_l = -\frac{E_X}{1+\nu_X} \frac{l}{\sin 2\theta_0 \sin 2\psi_0} [\text{MPa}] \quad (8)$$

另外， M_l 是 $\varepsilon_{\alpha l}$ - $\cos \alpha$ 曲线图的斜率。

$$M_l = \frac{\partial \varepsilon_{\alpha l}}{\partial \cos \alpha} \quad (9)$$

另外，由于式（6）的 2η 的 α 的变化很小，所以用无变形时的 $2\eta_0$ 置换，进而， $2\eta_0$ 为无变形的衍射角 $2\theta_0$ 的补角，可用式（8）求得。

$$2\eta_0 = 180 - 2\theta_0 [\text{deg}] \quad (10)$$

如果在式子（5）中代入 $\alpha = \pi/2$ ($\cos \alpha = 0$)，变形参数 $\varepsilon_{\alpha l}$ 为零。因此，图 3 的 $\varepsilon_{\alpha l}$ - $\cos \alpha$ 曲线图成为通过原点的直线，通过最小二乘法来确定直线的对应 M_l 。

3.2 测定方法

3.2.1 特性 X 射线与衍射面

本文件中，使用 Cr 靶产生的特性 X 射线（Cr-K α 线）测量铁素体（211）衍射。

3.2.2 衍射强度曲线的测量

将德拜环的中心设为二维检测器上的坐标原点，以回转角 α 为参数，求得衍射角方向的衍射强度变化，即衍射强度曲线。

3.3 测定条件

3.3.1 管电流与管电压

管电压应不低于 30kV，管电流越大越好。

3.3.2 入射准直器与照射面积

X 射线照射区域由入射准直器确定，准直器的截面形状应为圆形，照射面积不应大于 3mm^2 （直径不超过 2mm ）。照射形状依赖于准直器截面形状及 X 射线发散角与入射角。测量前应通过感光片确认照射位置与形状，并在报告中记录相关信息。

3.3.3 X 射线入射角与二维检测器的工件距离

X 射线入射角 ψ_0 由测量者根据工件状态与 X 射线有效入射深度选择，推荐值为 35° 。工件与二维检测器之间的距离 L 称为工件距离，应确保选定的衍射面能完整测量德拜环，并垂直于 X 射线入射方向安装二维检测器。

3.4 应力值计算法

3.4.1 衍射强度曲线的校正

测量得到的德拜环回转角 α 处的衍射强度记为 $\Phi_M(\psi_0, 2\theta, \alpha)$ ，实际衍射强度记为 $\Phi_M(\psi_0, 2\theta, \alpha)$ ，可通过以下公式进行强度校正：

$$\Phi(\psi_0, 2\theta, \alpha) = \frac{\Phi_M(\psi_0, 2\theta, \alpha)}{LP(2\theta) \cdot A(\psi_0, 2\theta, \alpha) \cdot GF(2\theta)} \quad (11)$$

其中， $LP(2\theta)$ 为罗伦兹偏振因子， $A(\psi_0, 2\theta, \alpha)$ 为吸收因子， $GF(2\theta)$ 为几何因子。

罗伦兹偏振因子可通过改进的罗伦兹偏振因子公式计算：

$$LP(2\theta) = \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta} \quad (12)$$

吸收因子可表示为：

$$A(\psi_0, 2\theta, \alpha) = \mu T(\psi_0, 2\theta, \alpha) \quad (13)$$

其中， μ 为线吸收系数， $T(\psi_0, 2\theta, \alpha)$ 为 X 射线有效入射深度。

$$T(\psi_0, 2\theta, \alpha) = \frac{1}{\mu} \left(\frac{1}{\cos \psi_0} + \frac{1}{\sin 2\theta \sin \psi_0 \cos \alpha - \cos 2\theta \cos \psi_0} \right)^{-1} \quad (14)$$

而且，由于 X 射线飞行距离之差引起的衰减之差变得显著，强度的校正是必要的，因为该衰减与距离的平方成正比，对测定的衍射强度进行以下几何因子 $GF(2\theta)$ 的修正。

$$GF(2\theta) = \left(\frac{\cos 2\theta}{\cos 2\theta_0} \right)^2 \quad (15)$$

3.4.2 衍射强度曲线的处理与衍射角的确定

在 $\cos\alpha$ 法中，工件距离较短，即使高角度衍射面， $K\alpha$ 线的衍射强度曲线通常不会分为 $K\alpha_1$ 和 $K\alpha_2$ 两个峰。因此，将衍射强度曲线视为单一峰，从其峰值位置确定衍射角 $2\theta_\alpha$ 。

3.4.3 $\varepsilon_{\alpha l} - \cos\alpha$ 线图的绘制

在应力测定中，从测得的德拜环中抽取多个回转角 α ，利用 2.2 中描述的方法求得衍射角，并计算四个晶格应变，绘制 $\varepsilon_{\alpha l} - \cos\alpha$ 线图，该线图应为过原点的直线。

3.4.4 应力计算公式

对 $\varepsilon_{\alpha l}-\cos\alpha$ 线图数据进行最小二乘法拟合，确定回归直线斜率 M_l ，从而计算测量方向应力 σ_x ：

$$\sigma_x = K_l \cdot M_l [\text{MPa}] \quad (16)$$

其中， K_l 为应力常数，可通过以下公式计算：

$$K_l = -\frac{E_X}{1+\nu_X} \frac{l}{\sin 2\theta_0 \sin 2\psi_0} [\text{MPa}] \quad (17)$$

另外，依据下式可以求出应力值的置信区间。

$$\sigma_x \pm \Delta\sigma_x = K_l (M_l \pm \Delta M_l) [\text{MPa}] \quad (18)$$

$$M_l = \frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{\alpha l})_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i} \quad (19)$$

$$\Delta M_l = t(n-1, \gamma) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{(\varepsilon_{\alpha l})_i - M_l (\cos \alpha_i)\}^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i}} \quad (20)$$

其中， $\Delta\sigma_x$ 是测定应力的置信区间， ΔM_l 是 $\varepsilon_{\alpha l}-\cos\alpha$ 线图的斜率 M_l 的置信区间， n 是 $\varepsilon_{\alpha l}-\cos\alpha$ 线图中使用的数据数， $t(n-1, \gamma)$ 为自由度为 $n-1$ 且置信率为 $1-\gamma$ 的 t 分布值。

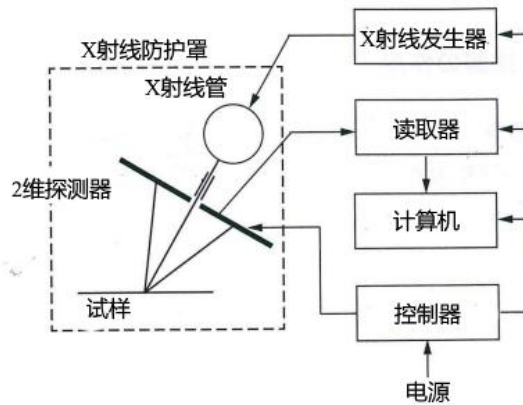


图4 测定装置组成

线图理论上总是经过原点。因此，数据列的点数 n 是除 $\varepsilon_{\alpha l}-\cos\alpha$ 线图的原点 $(0, 0)$ 的数目。本文采用置信率 $1-\gamma=0.683$ 。当 $n=20$ ， t 值为 $t(19, 0.317)=1.0277$ 。

3.4.5 X射线弹性常数

应力常数 K_l 包含的 $\frac{E_X}{1+\nu_X}$ 称为X射线弹性常数，取决于衍射面。

3.5 测量装置

测量装置的总体构成如图4所示。

3.5.1 X射线发生装置

a) X射线管：

T/CIECCPA XXX—20XX

电压应不低于 30kV，焦点面积应不超过 $2 \times 2 \text{mm}^2$ 或直径不超过 2mm。

b) X 射线发生装置（电源）：

能够产生足够衍射强度的 X 射线，管电压与管电流波动应尽可能小。

——输出：检测器应能产生可用于应力评价的衍射强度的 X 线；

——稳定度：管电压或管电流的变动应尽量小，最好具有能够维持所设定的测量时间内的 X 线强度再现性的反馈控制回路；

——保护回路：应具有如过负荷继电器等保护装置；

——冷却机构：应具有水冷或空气冷却等冷却装置。

c) X 射线防护屏或屏障：保护人体免受直接或间接 X 射线辐射。

3.5.2 衍射装置

a) 入射准直器：在入射侧设置针孔准直器以限制 X 射线照射区域，减小误差；

b) X 射线入射角度范围：X 射线入射角 ψ_0 应在不干涉二维检测器的前提下尽可能大范围可调；

c) X 射线入射角设置精度：应达到 $\pm 0.4^\circ$ 以内；

d) 滤波器：使用钒滤波器吸收 Cr-K β 线。

3.5.3 检测器及读取器

a) 检测器：

X 射线的探测器使用二维探测器。二维探测器包括成像板（IP）、计数型二维探测器、半导体二维探测器等。二维探测器在出货时由装置厂家保证其在 X 射线入射方向上正确垂直排列。此外，准直器装置应对入射 X 射线的照射中心、二维探测器的原点偏移和其照射方向具有微调功能。

b) 读取器：

无间隙的铁素体（211）衍射的衍射角为 $2\theta = 156.4^\circ$ 。因此，以峰值位置的角度为中心在 $\pm 12^\circ$ 以上的测角范围内，测量到覆盖整个德拜环的高 S/N 比的衍射强度曲线。读取器应具有 512 分割的角度分解能，即分解能 $\Delta 2\theta = 24^\circ / 512 \approx 0.05^\circ$ 的读取为基准。

在上述测角范围和角度分解能以外进行读取时，应在报告书中明确记载读取条件。

3.6 测量步骤

3.6.1 表面状态

测定的工件表面应平滑。铁素体系铁钢材料的铁素体相的（211）衍射的 X 射线有效侵入深度小于 $10 \mu\text{m}$ ，因此表面粗糙度会对表面凹凸部分的结晶粒子产生多次衍射。

测定表面如果形成了氧化层等，需要通过用砂纸或氧化铝悬浮液进行机械抛光来去除表面形成的物质。此外，通过抛光除去的表面，可能会形成新的加工硬化层或残余应力。在这种情况下，需要通过电解抛光等方法精细地去除影响层。

3.6.2 工件、装置的设置调整

工件、装置的安装调整确保满足以下条件：

a) 工件与检测器之间的垂直距离 L 正确设置。

b) 二维检测器垂直于入射 X 射线。

c) X 射线入射角 ψ_0 精确设置。

测定者应确认上述三项是否精确设置并在测定中维持。如发现偏移，则修正至适当值。

3.6.3 测量条件的确定

在进行测定之前，通过测试曝光等排除衍射强度曲线中的背景，确认能获得高 S/N 比的衍射强度曲线的条件，并决定本测定的测定条件。

3.6.4 测量与应力值计算

在单一倾斜角度下入射测定的德拜环中，求出对应的无缝参数 ϵ_{al} ，并绘制 $\epsilon_{al}-\cos\alpha$ 线图。回转角 α 在 $0 < \cos\alpha \leq 1.0$ 的范围内均匀抽取。本标准建议在 $\cos\alpha$ 为0.05的均匀间隔下取 $n=20$ 个数据点数的无缝参数来作图。

接下来，进行通过原点的直线拟合，求出直线的斜率 M_I 和置信区间 δM_I ，根据式（19）和式（20）算出其置信区间，并根据式（18）计算出应力值。注意，如果采用的数据列数目不是 $n=20$ ，应在报告中明确记载数据列数目。

3.6.5 测量设备的校准

定期对测定器各部分进行期间核查，作为综合检定，应使用无缝状态的粉末试样进行零应力的检定，测定值 $\leq \pm 5\text{MPa}$ 。

在改变二维探测器与试样之间的距离及 X 线入射角度后，应使用粉末试样测定德拜环，确认：

- a) 近似德拜环的真圆度；
- b) 德拜环中心与探测器的原点（中心）一致。
- c) 使用粉末试样测定德拜环所测得的应力值 $\pm 5\text{MPa}$ 内。

4 测量方法

4.1 测量对象

测量对象为铁素体系钢铁材料，应满足以下条件：

4.1.1 晶粒

被测定材料在 X 线照射范围内的回转角 α 下的衍射面法线垂直方向上的晶粒数量应尽可能多。如果德拜环连续测量得到的结果中，明显没有覆盖整个范围的强度变化，则应认为晶粒数量不足。

4.1.2 组织

被测定材料应没有显著的优先晶粒取向。如果存在强的晶粒取向，德拜环的衍射强度会因取向偏差导致 $\cos\alpha$ 线图出现扭曲。这种情况下，标准假设的均质体材料无法成立，测定结果的误差会增大。

4.1.3 热处理状态

应明确工件热处理状态，热处理会影响表面应力状态，如消应力热处理工件与未热处理工件相比，所测得应力会明显降低。

4.1.4 表面状态

被测定材料的表面粗糙度等表面状态会影响测定结果，测定点的表面状态应平滑，不应有氧化膜或附着物，打磨或研磨等有形变加工可在工件表面产生加工硬化层，导致测定结果的误差会增大。

4.2 特性 X 射线与衍射面

使用 Cr-K α 特性 X 射线测量铁素体（211）衍射。

4.3 X 射线弹性常数

X 射线弹性常数为:

$$\frac{E_X}{1+\nu_X}=175[\text{GPa}]=1.75\times 10^5[\text{MPa}] \cdots \cdots (21)$$

4.4 应力值的计算

应力值计算按照第 3.4 的方法进行。Cr-K α 特性 X 射线的铁素体 (211) 衍射角为 156.4°, 应力常数为:

$$K_I=-\frac{4.37\times 10^5}{\sin 2\psi_0}[\text{MPa}] \cdots \cdots (22)$$

对于推荐的 X 射线入射角 $\psi_0=35^\circ$, 应力常数为:

$$K_I=-4.65\times 10^5[\text{MPa}] \cdots \cdots (23)$$
