

# 中华人民共和国有色金属行业标准

YS/T XXX-20XX

## 铜及铜合金板带箔材残余应力检测方法

### X 射线衍射法

Residual stress testing method for copper and copper alloy sheet, strip, and foil

X-ray diffraction test

(审定稿)

2025-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

# 前 言

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

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。

本文件由全国有色金属标准化技术委员会(SAC/TC243)提出并归口。

本文件起草单位：中铝科学技术研究院有限公司、中国计量科学研究院、有研工程技术研究院有限公司、邯郸市爱斯特应力技术有限公司、中铝洛阳铜加工有限公司、西北稀有金属材料研究院宁夏有限公司

本文件主要起草人员：刘芳、娄花芬、李旭、莫永达、程时美、李彤、马肖、王强松、向朝建、王旭、黄旭刚、张嘉凝、郑闰、刘宇宁

。

# 铜及铜合金板带箔材残余应力检测方法

## X 射线衍射法

### 1 范围

本文件描述了铜及铜合金板带箔残余应力的定量检测方法原理、试样要求、设备、测量过程以及结果处理。

本文件适用于厚度为 0.012~0.8 mm、晶粒尺寸在 10~100 $\mu\text{m}$  的铜及铜合金板带箔材残余应力的检测。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 7704 无损检测 X 射线应力测定方法

GB/T 30067 金相学术语

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**残余应力** Residual stress

在没有外力或者外力矩作用的条件下构件或材料内部存在并且自身保持平衡的宏观应力。

[来源：GB/T 7704-2017，3.1.1]

#### 3.2

**衍射峰** diffraction peak

在满足布拉格定律的条件下 X 射线衍射强度沿反射角的分布曲线。

[来源：GB/T 7704-2017，3.1.2]

#### 3.3

**入射角 $\theta$**  incident angle

入射 X 射线与衍射晶面的法向之夹角，即入射角。

[来源：GB/T 7704-2017，3.1.3，有修改]

### 3.4

衍射晶面方位角 $\psi$  Azimuth angle of diffraction crystal plane

衍射晶面法线与试样表面法线之夹角。

[来源：GB/T 7704-2017，3.1.5]

### 3.5

晶面族 family of crystal planes

在不考虑符号标记时，晶体中有相同密勒指数的所有平面。

[来源：GB/T 30067-2013，2.1.131]

## 4 方法原理

当铜及铜合金板带箔存在残余应力时，其晶格参数会因弹性应变发生微小畸变，导致特定晶面的晶面间距改变，进而使 X 射线衍射角产生偏移。通过测量多个晶向的衍射峰位移，结合材料弹性常数（如杨氏模量和泊松比），分析晶格应变的空间分布，并利用胡克定律将应变转化为残余应力值。

## 5 试样

经分剪的铜板带箔或者交付下游用户的全宽度铜板带箔产品。产品表面粗糙度 Ra 宜不大于  $10\mu\text{m}$ ，表面不允许有磕碰伤、弯折、裂纹、扭曲与油污，取样过程中应避免引入附加应力。

## 6 仪器设备

### 6.1 X 射线衍射应力仪

X 射线衍射应力测定仪器应满足 GB/T 7704 的规定，并具有如下配置：

——X 射线管高压系统，管压宜不低于 30kV，管流宜不低于 10mA；

——测角仪接收反射线的  $2\theta$  总范围：高角不小于  $167^\circ$ 、低角不大于  $143^\circ$ ，最小分辨率不大于  $0.05^\circ$ ， $\psi$  角设置精度应在  $\pm 0.5^\circ$  范围之内；

——设备应每自然年检定 1 次，设备的机械或者电子器件移动或者更换后，应对设备重新进行校准。

### 6.2 直尺

精度不低于 1mm。

### 6.3 板带箔电解腐蚀设备

电解腐蚀仪。

## 6.4 刻蚀深度测量设备

深度规，精度不低于 0.01mm。

## 7 测定程序

### 7.1 弹性模量与泊松比测量

在实验前，按照附录 A 的规定测量样品弹性模量与泊松比，获取材料弹性模量与泊松比数值。

### 7.2 仪器校正

X 射线应力仪每天开机后或者换靶后，在测量前需要使用零应力标样、应力标样对设备进行校准。

### 7.3 测量位置选择

对于铜及铜合金板带箔产品表面残余应力检测，应在铜合金板带箔的宽度 1/2 位置取点，并分别在产品上下两表面厚度方向同一位置处取点进行 X 射线应力检测。根据用户要求，也可增加宽度 1/4、3/4 位置点位处测量应力。

对半蚀刻用铜及铜合金板带箔残余应力的测量，除了测量样品上下表面应力，还应在厚度 1/2 位置处取点测量应力。根据用户要求，也可增加厚度的 1/4、3/4 位置点位处测量应力。

### 7.4 深度位置的点加工

对于深度位置点，应采用电解刻蚀方法腐蚀至指定深度。刻蚀前应测量当前刻蚀条件下刻蚀穿透试样的速度，从而计算出达到目标深度的 1/4、1/2、3/4 刻蚀时间，待刻蚀结束后使用深度规测量刻蚀深度，实际刻蚀深度与目标深度误差应不超过 10%。

### 7.5 X 射线衍射测量方法及参数的选择

应力测试方法可以采用同倾法、侧倾法或者摆动法。

推荐使用 Cr 靶，无需使用滤波片，选择  $K_{\beta}$  辐射，扫描角度为  $146 \pm 15^\circ$ ，衍射晶面族为 {311}；也可选择  $K_{\alpha}$  辐射，扫描角度为  $127 \pm 15^\circ$ ，衍射晶面族为 {220}。特别地，当样品为  $\beta$ -黄铜，推荐使用 Cr- $K_{\alpha}$  辐射，衍射晶面族为 {211}。

当衍射峰背比较低，衍射峰信号较差时，可采用 Mn 靶或 Co 靶：使用 Mn 靶时，需选择  $K_{\alpha}$  辐射，使用 Cr 滤波片，扫描角度为  $150 \pm 15^\circ$ ，衍射晶面族为 {311}；使用 Co 靶时，需选择  $K_{\alpha}$  辐射，使用 Fe 滤波片，扫描角度为  $164 \pm 15^\circ$ ，衍射晶面族为 {400}；

$\psi$ 分别取  $0^\circ$ 、 $\pm 24.1^\circ$ 、 $\pm 35.3^\circ$  和  $\pm 45^\circ$ ，若测定结果的重复性不满足要求，可增加  $\psi \pm 16.8^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 40.2^\circ$  的测试数值。

扫描最小步距首选  $0.1^\circ$ ，当衍射曲线平滑度较差时，可适当降低扫描步距。

准直管直径、狭缝尺寸通用选择范围为  $0.5\sim 5\text{mm}$ 。

采集时间以能够得到计数足够高、起伏波动相对较小的衍射峰，而又不过分消耗测试时间为目标，准直管直径、狭缝尺寸较大时，应适当延长采集时间，以获得较好的衍射峰质量。

## 7.6 测试点定位及数据处理

测试前，应将测试点中心置于仪器指示的测试点中心、X 射线光斑中心、测角仪回转中心三者重合的位置，待测应力方向平行于仪器应力平面（ $\psi$ 平面）。测试过程与结果处理一般由仪器按照实验人员选定的测试条件、定峰方法、拟合模型自动计算完成。

应力结果保留整数。

当对应于各个  $\psi$  角的衍射峰积分强度，其极值比（最大最小之比）大于 3，可判定织构较强，无法使用 X 射线衍射法测量。

## 8 精密度与不确定度

### 8.1 精密度

在重复性条件下，获得的两次单点应力独立测试结果的绝对值应不超过重复性限（ $r$ ） $12.0\text{MPa}$ ，超过重复性限（ $r$ ）的情况不超过 5%。

### 8.2 不确定度

正应力不确定度的评判标准：

衍射晶面族为  $\{311\}$  时，如果  $|\sigma| \geq 212.0\text{MPa}$ ，则应有  $\Delta\sigma \leq 53.0\text{MPa}$ ；如果  $|\sigma| < 212.0\text{MPa}$ ，则  $\Delta\sigma \leq \frac{1}{4}|\sigma|$ ；

衍射晶面族为  $\{400\}$  时，如果  $|\sigma| \geq 164.0\text{MPa}$ ，则应有  $\Delta\sigma \leq 41.0\text{MPa}$ ；如果  $|\sigma| < 164.0\text{MPa}$ ，则  $\Delta\sigma \leq \frac{1}{4}|\sigma|$ ；

衍射晶面族为{211}时, 如果 $|\sigma| \geq 165.6\text{MPa}$ , 则应有 $\Delta\sigma \leq 41.4\text{MPa}$ ; 如果 $|\sigma| < 165.6\text{MPa}$ , 则 $\Delta\sigma \leq \frac{1}{4} |\sigma|$ ;

衍射晶面族为{220}时, 如果 $|\sigma| \geq 256.7\text{MPa}$ , 则应有 $\Delta\sigma \leq 64.2\text{MPa}$ ; 如果 $|\sigma| < 256.7\text{MPa}$ , 则 $\Delta\sigma \leq \frac{1}{4} |\sigma|$ ;

切应力不确定度的评判标准:

衍射晶面族为{311}时,  $\Delta\tau < 8.5\text{MPa}$

衍射晶面族为{400}时,  $\Delta\tau < 6.6\text{MPa}$

衍射晶面族为{211}时,  $\Delta\tau < 6.6\text{MPa}$

衍射晶面族为{220}时,  $\Delta\tau < 10.3\text{MPa}$

式中 $\Delta\sigma$ 和 $\Delta\tau$ 分别是在置信概率为 0.75 的条件下, 应力值置信区间的半宽度。

## 9 试验报告

本章规定试验报告所包括的内容。至少应给出以下几个方面的内容:

- 铜板带箔编号、牌号;
- 样品宽度、厚度、测试点部位与应力方向;
- 标准号;
- 测定方法、定峰方法;
- $\psi$ 角、 $2\theta$  范围、扫描步距(分辨率)、采集时间(曝光时间)、准直管直径或入射狭缝尺寸、X 射线管电压电流;
- 测试结果: 应力值(带正负符号);
- 测定中观察到的异常现象;
- 实验操作者、审核者、批准者姓名、来样日期、检测日期、报告日期等。

附 录 A  
(资料性附录)

GB/T 22315 金属材料弹性模量和泊松比试验方法