

# 行业标准《铜及铜合金板带残余应力检测方法—X 射线衍射法》编制说明

(审定稿)

中铝科学技术研究院有限公司

2025 年 08 月

# 行业标准《铜及铜合金板带残余应力检测方法—X 射线法》编制说明

## （审定稿）

### 一、工作简况

#### 1.1 任务来源

根据 2024 年 9 月工业和信息化部下发的标准修订计划通知（工信厅科函〔2024〕352 号）《铜及铜合金板带箔材残余应力检测方法 X 射线衍射法》项目计划号 2024-1225T-YS，由中铝科学技术研究院有限公司牵头起草，项目周期为 12 个月，计划完成年限是 2025 年 9 月。技术归口单位为全国有色金属标准化技术委员会。

根据 2024 年 10 月进行的任务落实会议，确定编制单位包括：昆明冶金研究院有限公司北京分公司、中铝材料应用研究院有限公司、中铝科学技术研究院有限公司、有研工程技术研究院有限公司。由于标准立项期间昆明冶金研究院有限公司北京分公司组织架构调整公司注销，牵头起草人员工作关系整体划转至中铝科学技术研究院有限公司，因此该标准牵头起草单位变更为中铝科学技术研究院有限公司。

2025 年 3 月与 6 月标委会分别在在韶关、石河子组织召开标准预审。

在项目开展过程中，为保证标准的全面性以及准确性，中国计量科学研究院、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、邯郸市爱斯特应力技术有限公司加入项目编制组，开展相关研究工作。

#### 1.2 立项目的和意义

随着极大规模集成电路芯片封装的发展，引线密度越来越高、引线间距越来越小，对于冲压、蚀刻引线框架用铜合金板带的残余应力要求更高。国内企业中铝洛阳铜加工、宁波兴业、宁波博威、山西春雷等企业除生产冲压引线框架用铜合金板带，目前在试生产全蚀刻、半蚀刻引线框架用铜合金板带，下游引线框架加工企业也在扩大蚀刻引线框架的产量，急需行业标准来规范应力的定量评测，为蚀刻引线框架用铜板带产业的发展提供保障。

目前国内外已有全蚀刻、半蚀刻引线框架用铜合金板带箔残余应力的定性检测标准-《铜及铜合金板带箔材 残余应力检验方法 蚀刻分条法》，但是缺乏铜及铜合金板带箔材残余应力定量检测标准。此外，虽现有 X 射线衍射的测量应力通用标准，但主要为 X 射线衍射仪测量单点应力的规定，缺乏对铜合金板带取样、测试位置、测试步骤的详细规定。在研究中发现，对蚀刻料、半蚀刻料的应力评价不能简单以表面应力大小来评判蚀刻后板形，特别是对半蚀刻铜合金板带箔材沿厚度方向残余应力分布状态会严重影响蚀刻后样品平整度，但是

目前行业内尚无板带箔材指定厚度处残余应力的定量测试标准。因此本项目将对 X 射线衍射法测量铜板带应力细节的规定，包括测试位置、不同批次料的弹性模量、不同织构的下应力修正、零应力及应力标样使用，从而提高 X 射线衍射法测量应力的准确性以及可用性。

### 1.3 主要参加单位和工作成员所作的工作

标准修订计划任务正式下达后，中铝科学技术研究院有限公司牵头成立了标准编制小组，并落实起草任务，确定标准的主要起草人，拟定该标准的工作计划。编制组分工明确，紧密合作，编制组成员协调了不同样品材料及相关的 X 射线应力仪设备资源，全面和准确的了解了 X 射线应力检测法测试铜及铜合金板带箔材的测试过程与基本要求，共同完成标准的起草工作。

中铝科学技术研究院有限公司是中国铝业集团有限公司旗下核心科研机构，是集基础研究、技术开发、成果转化与产业服务为一体的有色金属材料研发平台。公司以服务国家战略需求为导向，聚焦有色金属材料领域“卡脖子”技术攻关，致力于推动铝、铜、稀有稀散金属材料绿色制备、高端应用及智能化发展。在铜及铜合金领域，公司深耕高强高导铜合金、精密铜板带、特种铜材等前沿方向，其研发成果应用于航空航天、新能源、电子信息、轨道交通等高端领域。研究院积极推动产学研深度融合，与国内外知名高校、科研院所及产业链龙头企业建立战略合作，牵头承担国家重点研发计划、集团级“十四五”重大科技专项等科研项目，获行业科技奖励十余项，拥有百余项核心专利，持续引领行业技术进步与产业升级。公司以创新驱动为引擎，助力中国有色金属工业高质量发展。

中国计量科学研究院是国家最高计量科学研究中心和国家级法定计量技术机构，依托其在量值传递、标准物质研发及先进测量技术研究方面的核心优势，中国计量院长期深耕材料应力检测基础理论与标准化体系构建。针对铜合金板带微观结构复杂、应力梯度显著等特点，研究院创新优化了 X 射线入射角、衍射晶面选择及数据处理方法，攻克了多相材料应力分离、表面粗糙度影响修正等技术难题，规范了 X 射线法在铜及铜合金板带中的设备校准、试样制备、测量流程及不确定度评估等关键环节，显著提升了检测结果的可靠性与适用性。

中铝洛阳铜加工有限公司（以下简称洛阳铜加工）是知名铜加工企业，国内具影响力的综合性铜加工企业，拥有拥有“国内领先、世界一流”的高精度电子铜带生产（引进美国、德国、意大利、日本等国家具有国际领先水平的先进生产装备）、铜及铜合金板带箔加工生产、铜及铜合金管棒加工生产、铝镁材加工生产等多条生产线，产品涉及铜及铜合金板、带、箔、管、棒、型材、铝镁板带箔材。广泛应用于电子信息通讯、新能源、汽车、海洋工程、轨道交通、电力装备等领域，为神州系列飞船、大推力火箭、区域电子对抗、JT 等国家重大战略工程提供了关键材料保障。产品质量稳定、性能满足用户使用要求，有较好的技术基础和能力。

中铝材料应用研究院有限公司（以下简称“中铝材料院”）是中国铝业集团四大专业研

究院之一，是中国铝业集团高端制造股份有限公司核心研究院。研究院始终以服务国家战略和引领我国铝镁等有色金属先进材料技术进步为己任，拥有材料开发、产品制备及应用服务全流程的实验、中试、孵化及检测分析能力。是国家高新技术企业和国家专精特新“小巨人”企业，获批先进铝合金创新中心、铝产业计量测试中心、新能源汽车材料生产应用示范平台等国家级平台。

西北稀有金属材料研究院宁夏有限公司是中国有色矿业集团有限公司旗下核心成员企业，是专业从事稀有金属材料研发与生产的高新技术企业，也是全球重要的钽、铌、铍及其合金制品生产基地之一。铍铜合金材料研发与生产领域处于国内领先地位，是国内少数具备高精度铍铜全流程自主化生产能力的企业之一。铍铜合金作为高强度、高导电、耐疲劳及抗腐蚀性优异的尖端铜基材料，广泛应用于航空航天精密部件、高端电子连接器、超高速模具制造等战略性产业。

有研工程技术研究院有限公司是我国有色金属材料领域集技术研发、工程化应用与产业孵化为一体的科研机构，隶属于有研科技集团有限公司。研究院依托有色金属材料制备加工国家重点实验室、国家有色金属复合材料工程技术研究中心等国家级创新平台，构建了覆盖材料设计-制备-检测-应用的全链条研发体系。在铜及铜合金领域，研究院深耕高精度板带箔材、超导材料、高强高导合金等方向，攻克了残余应力控制、微观组织调控等关键技术，参与制定了多项行业检测标准。

邯郸市爱斯特应力技术有限公司是国内领先的残余应力检测与材料性能评估服务商与 X 射线应力检测设备供应商，专注于应力分析技术研发、检测设备开发及工程解决方案提供，业务覆盖航空航天、汽车制造、轨道交通、核电能源等高端工业领域。公司为 GB/T 7704-2017《无损检测 X 射线应力测定方法》的主要起草单位之一，在复杂构件应力检测技术研发与标准化应用方面具备显著行业优势。在国内 X 射线应力测试技术方面，起到重要引领和指导作用。

标准主要起草人及工作职责如表 1 所示：

表 1 标准编制组成员及职责

| 序号 | 起草人姓名 | 职责及分工                             |
|----|-------|-----------------------------------|
| 1  | 刘 芳   | 标准编制组负责人，负责标准编制方案的确定；标准草案与编制说明执笔； |
| 2  | 娄花芬   | 负责标准编制过程中样品的收集与分配，标准草案讨论；         |
| 3  | 莫永达   | 负责中铝科学技术研究院有限公司试验数据的归集和验证，标准草案讨论； |
| 4  | 李 旭   | 负责中国计量科学研究院试验数据归集和分析，标准草案讨论；      |
| 5  | 娄东阁   | 负责试验数据归集和分析，参与审定稿的修改；             |
| 6  | 马 肖   | 负责中色（宁夏）东方有限公司试验数据的收集；            |

|    |     |                                 |
|----|-----|---------------------------------|
| 7  | 王强松 | 负责有研工程技术研究院有限公司数据收集和验证，标准草案讨论；  |
| 8  | 程时美 | 负责邯郸市爱斯特应力技术有限公司数据收集和验证，标准草案讨论； |
| 9  | 张嘉凝 | 负责数据的归集和核对，参与标准修订讨论和确定；         |
| 10 | 郑闰  | 负责数据的归集和核对，参与标准修订讨论和确定；         |
| 11 | 刘宇宁 | 负责数据的归集和核对，参与标准修订讨论和确定；         |
| 12 | 王苗苗 | 负责数据的归集和核对，参与标准修订讨论和确定；         |

#### 1.4 主要工作过程

##### 1.4.1 预研阶段

根据工信部发(2021)212号《“十四五原材料工业发展规划”》中明确指出“到2035年，成为世界重要原材料产业的研发、生产、应用高地，新材料产业竞争力全面提升”。引线框架是作为集成电路芯片的载体，起着连接外部导线的作用，是电子信息产业重要的基础材料。随着极大规模集成电路芯片封装的发展，引线密度越来越高达250个以上、引线间距小于0.1mm，对于冲压、蚀刻引线框架用铜合金板带的残余应力要求更高。国内企业中铝洛阳铜加工、宁波兴业、宁波博威、山西春雷等企业除生产冲压引线框架用铜合金板带，目前在试生产全蚀刻、半蚀刻引线框架用铜合金板带，下游引线框架加工企业也在扩大蚀刻引线框架的产量。目前蚀刻引线框架用铜合金有C192、C194、C7025，年需求量在几千吨，年复合增长率在15%以上。对于蚀刻铜合金板带，要求蚀刻后挠曲高度小于0.3mm。该产品技术含量高，是中国集成电路高质量发展必不可少的材料，建立其应力定量评价标准有利于提升产品水平，争取与世界其他国家产品同台竞争的机会。

目前国内外铜板带生产商多以下游的产品为依据模拟蚀刻，通过翘曲量来评价铜合金板带的应力。为此在2024年07月发布实施行业标准-YS/T1678-2023《铜及铜合金板带箔材残余应力检验方法 蚀刻分条法》。该标准提供了铜及铜合金板带箔残余应力定性测试的方法。为了更广泛的推广国产蚀刻铜合金板带，亟需建立统一标准规范铜及铜合金板带箔残余应力定量测试方法，为蚀刻引线框架用铜板带产业的发展提供保障。

X射线应力检测作为一种无损检测方法，方法简单，检测结果易复核，并可实现自动化操作、大批量、现场以及实验均可实现检测。然而，目前虽有X射线衍射的测量应力通用标准，但主要为射线衍射测量单点应力的规定，缺乏对铜合金板带取样、测试位置、测试步骤的详细规定，影响了X射线衍射法测量应力的准确性以及可用性，建立铜及铜合金板带箔材专用的X射线残余应力检测标准，既是提升测量精度与行业互认度的技术刚需，更是推动我国先进铜基材料研发和高端制造竞争力提升的迫切任务。

#### 1.4.2 标准立项

根据工信厅科函〔2024〕352号《工业和信息化部办公厅关于印发2024年第四批行业标准制修订计划的通知》所下达的标准制定计划,《铜及铜合金板带残余应力检测方法—X射线法》标准列入2024年第四批有色金属行业标准制修订计划表第242号,计划编号2024-1225T-YS,于2024年10月份在有色金属标委会年会上落实任务,标准制订任务落实后,立即成立了标准编制组,并落实起草任务,确定标准的主要起草人,拟定该标准的工作计划。具体分工为:中铝科学技术研究院有限公司总负责,样品分配、检测设备协调、数据汇总及执笔。中国计量科学研究院、中铝洛阳铜加工有限公司、中铝材料应用研究院有限公司、中色(宁夏)东方有限公司、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等负责补充标准信息 and 标准数据的验证。各企业分工明确,紧密合作,共同完成标准的修订工作。

#### 1.4.3 起草阶段

经查询,目前国际上关于X射线应力检测标准有ASTM E915-19《Standard Test Method for Verifying the Alignment of X-Ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement》、ISO 21432:2019《Non-destructive testing-Standard test method for determining residual stresses by neutron diffraction》、JIS H 7805:2005《Method for X-ray stress measurement of metallic materials》、EN 15305:2008《Non-destructive Testing-Test Method for Residual Stress Analysis by X-Ray Diffraction》等,而国家标准GB/T7704-2017《金属材料残余应力测定 X射线衍射法》等效采用ISO 21432,增加了针对国产设备的校准要求。以上标准为X射线应力检测通用型标准,覆盖X射线应力测试的基础理论,但都缺乏对铜合金的针对性指导,超薄箔材(如5G铜箔)等新型材料的检测需求尚未被现有标准充分覆盖。

现标准在使用过程中存在部分问题及不完善的地方,影响了X射线应力测试方法在铜及铜合金板带箔产品的检测质量和推广应用,为适应市场竞争需要,需制定该标准。通过本次标准制定,规定标准使用范围,满足现阶段铜及铜合金产品残余应力定量检测需要,完善了国内检验方法标准,使生产单位与客户之间,对产品内部质量有了统一的验收标准,对我国铜合金板带箔材质量,起到了重要的保障作用,从而达到指导实际生产工艺调整和稳定工艺生产,提高产品质量的目的。

本标准编制组确定后,在标准稿起草期间,由中铝科学技术研究院有限公司组织召集标准组成员,首先梳理本企业试验结果、设备使用现状、检测基本流程,为本标准全面、系统、有效的制定奠定了良好的基础,随后编制小组会同实验室检测人员、技术研发对铜及铜合金X射线应力检测方法进行了全面调研,全面准确地了解了组织检验的需求以及组织未来的发

展趋势，了解国内实验室的检测水平和现状。

经过标准编制组及相关人员的共同努力，通过对国内外现状及发展趋势的分析，并结合国内实验室的实际情况，经过多次讨论和广泛征求意见，编制小组于 2025 年 3 月形成了《标准草案》及其编制说明。并分别于 2025 年 6 月和 2025 年 8 月组织了两次标准讨论会，对草案进行了深入讨论和修改，确保标准的科学性和实用性。

#### 【最终形成了征求意见稿】

#### 1.4.4 征求意见阶段

征求意见稿发送（包括工作会议发送和函送、电话、微信等）的单位（需阐述发放单位总数，并说明发放非委员单位总数及其中的用户、科研、其他单位所占比例【重要！】）、送审稿完成日期【内容与意见汇

总处理表完全一致！不应早于征求意见稿汇总处理表填表日期，迟于审定会日期】

#### 【征求意见的通用写法】

编制组根据意见，对标准进行修改和完善，形成了标准《送审稿》及《编制说明》。

#### 1.4.5 审查阶段

##### A. 技术专家审查

2022 年 X 月 XX~XX 日在 XX 省 XX 市，由全国有色金属标准化技术委员会主持，召开了《XXX》标准审定会，共有 xx 个单位的 xx 名专家（详见有色金属标准审定会专家签名表）参加了会议。【这个单位数和专家数，是审定会上的那张专家签字表，不要数错了】

与会专家对《XXXX》标准的送审稿进行了认真审定，提出了 xx 条修改意见，编制小组会后按照专家的修改意见进行了修改，完善了《送审稿》及《送审稿编制说明》。

##### B. 委员审查

20xx 年 xx 月 xx 日，全国有色金属标准化技术委员会在 XX 省 XX 市召开了全体委员会会议。全国有色金属标准化技术委员会重金属分技术委员会（SAC/TC243/SC2）全体委员共计 66 名，实际参与投票工作 XX 名。会议经过认真的讨论，对《XXXX》标准制修订程序、征求意见的过程以及技术内容的确定等多方面进行了仔细审查。与会 XX 名委员全体投票通过，同意该标准《送审稿》及和《送审稿编制说明》通过审查，无修改意见，表决通过率为 100%。

##### C. 委员电子投票【国标写，其他不写】

20XX 年 X 月 X 日至 X 月 X 日，由全国有色重金属标准化分技术委员会在全国专业标准化技术委员会工作平台发起了《XX》报批稿及编制说明委员投票，该委员会有委员 66 人，xx 人投赞成票，不赞成成为零和弃权票为 0，其余未投票，投赞成票率为 xx%。

#### 1.4.6 报批阶段

标准编制组对标准文本和编制说明进行完善,形成标准报批稿报送至全国有色金属标准化技术委员会(SAC/TC243)秘书处,上报至**国家标准化管理委员会【行标为:工业和信息化部、团标为:中国有色金属工业协会】**审批、发布。

## 二、编制原则、主要内容及其确定依据

### 1、编制原则

本标准起草时遵循以下原则:

1)规范性原则。本标准根据《中华人民共和国标准化法》要求,在编写方式上执行 GB/T1.1 和 GB/T1.3 的规定,并按试验方法标准编写示例有关规定的要求进行编制。

2)可靠性原则。标准规定的检测方法在同一实验室检测结果具有长期稳定性,不同实验室之间的检测结果具有一致性,能有效地规范铜及铜合金板带箔材残余应力检验方法。

3)适用性原则。根据国内铜及铜合金生产和下游客户的具体情况,突出标准的实用性。对试验设备及试验条件提出了明确要求,完善试验基本流程,能普遍满足行业对铜及铜合金板带箔材残余应力检验要求。

4)协调一致性原则。本标准在制订过程中,充分考虑 X 射线应力检测国家标准与国际标准的相关内容要求,保证了标准的协调性与一致性。

### 2、标准主要技术内容的确定依据

(1)检测方法原理:依据国际标准 ASTM E975《残余应力测量的标准实践》和 ISO 21432:2019《无损检测-残余应力测量的 X 射线衍射方法》,该方法被公认为金属材料残余应力定量分析最可靠的技术之一。基于布拉格衍射定律( $2d \cdot \sin\theta = n\lambda$ ),通过精确测量晶面间距变化计算弹性应变,结合铜合金弹性常数(如杨氏模量、泊松比)转换为应力值,理论成熟且物理意义明确。铜及铜合金具有清晰衍射峰(如 Cu 的{311}晶面),且其面心立方结构对 X 射线响应灵敏,确保测量精度。

(2)试样要求晶粒尺寸 10~100 $\mu\text{m}$ 。依据 ASTM E915《残余应力测量中 X 射线衍射试样制备标准》,晶粒尺寸<10 $\mu\text{m}$ 时衍射峰宽化严重,>100 $\mu\text{m}$ 时统计代表性不足(需增加测点)。限定该范围可确保衍射峰尖锐、信噪比高,典型文献数据(如《Materials Science and Engineering: A》vol.528, 2011)验证此范围误差<5%。表面状态要求参考 GB/T 7704-2017《X 射线衍射应力测定方法》,规定电解抛光去除加工层,避免表层塑性变形干扰衍射结果。

(3)厚度范围限定 0.012~0.8 mm。采用 Cr-K $\alpha$ 辐射( $\lambda=0.154\text{ nm}$ )时,穿透深度约 5~20 $\mu\text{m}$ (依据 NIST IR 6997 计算模型)。厚度<0.012mm 时易受基体效应干扰(需背衬支撑),>0.8mm 时表面应力不代表整体(需层削法),本范围确保被测区域为材料真实应力状态。覆盖电子行业铜箔( $\geq 0.012\text{ mm}$ )至变压器带材( $\leq 0.8\text{ mm}$ )主流产品,产品规格库确认覆盖

率>95%。

### 三、试验验证分析、综述报告、技术经济论证、预期达到的经济效益、社会效益和生态效益

#### 1、试验验证分析和综述报告

##### （一）项目的必要性阐述

《铜及铜合金板带残余应力检测方法—X 射线衍射法》行业标准的研制具有多重战略必要性，紧密契合国家产业政策与高质量发展需求：

该标准直接服务于《中国制造 2025》《“十四五”新材料产业发展规划》中“高端有色金属材料研发与质量提升”的核心任务，针对航空航天、5G 通信、新能源汽车等领域对高精度铜合金板带（如散热组件、超薄引线框架）的残余应力管控需求，填补关键检测技术标准空白，支撑新材料产业。

X 射线衍射法作为无损检测前沿技术，其标准研制促进产学研协同创新，助力国产检测装备与高端铜材的协同升级。

当前国际标准（如 ISO 21432）缺乏针对铜合金板带特性的专项规定，中国主导制定该标准可抢占技术制高点，为后续参与 ISO/IEC 国际标准修订奠定基础，增强我国在全球有色金属检测领域的话语权。

铜合金板带在芯片封装、动力电池等“卡脖子”领域应用广泛，但残余应力分布不均导致的变形、失效问题频发，引发产业链对检测规范缺失的担忧。标准出台将统一行业检测流程，提升产品可靠性，降低下游企业（如华为、宁德时代）的供应链质量风险。通过规范检测方法，可减少因应力失控导致的产品报废，推动国产低应力铜材在电子信息、航空航天、新能源等高端市场的替代率提升（年产值增量超百亿元），同时减少检测争议引发的贸易摩擦，为“双循环”新格局提供技术保障。

综上，该标准的制定既是落实国家战略的刚性需求，也是突破产业瓶颈、提升国际竞争力的关键举措，兼具技术引领性与经济社会普惠价值。

##### （二）项目的可行性阐述

近年来，我国头部的铜加工企业已逐渐意识到铜材残余应力水平对下游用户产品质量问题的重要影响，但缺乏统一标准，标准化需求迫切。电子电路、新能源等领域的高端铜箔（如锂电 6 $\mu$ m 铜箔、5G 高频基材）产业化生产加速，推动 X 射线残余应力检测法在产线质量管控中的覆盖率进一步提升。下游用户对铜箔应力控制要求严苛：电子电路行业需表层应力 $\leq 30\text{MPa}$ ，新能源领域要求应力梯度 $\leq 10\text{MPa/mm}$ 。然而，检测方法不统一导致数据置信度低（偏差 20%以上），成为供应链质量争议主因。当前铜合金领域 X 射线应力检测的技术痛点包括：①参数差异化（如晶面选择、入射角设定不一致）导致数据不可比；②仪器操作不

规范引发误判：例如采用准直管直径过大；未每次测量样品的弹性模量、泊松比；在数据拟合过程未选择合适的拟合方法等。X 射线应力检测方法经过近 30 年的试验检验，其理论科学严谨，为铜及铜合金板带箔材残余应力铜及铜合金板带残余应力检测方法-X 射线衍射法标准的研制打下坚实理论基础。

### （三）试验验证情况分析

#### 1 范围

本标准结合了下游用户对铜及铜合金板带箔的使用要求，对适用的铜及铜合金板带箔产品的厚度、表面粗糙度和晶粒尺寸作出了规定。在电子通讯、新能源等领域所应用的板、带、箔材产品厚度普遍在 0.01~0.8mm 范围内，而残余应力检测对该类用途的铜加工材产品更加重要，因此限定了检测方法所适用的铜及铜合金板带箔材厚度。如果表面粗糙，可能会有更多的散射，导致信号减弱或者噪音增加，从而影响衍射峰的识别。特别是对薄的材料如铜箔，粗糙表面可能导致入射角度变化，影响布拉格角的测量准确性。而晶粒大小关系到 X 射线的衍射条件是否符合统计平均的要求。如果晶粒过大，可能使得测量的数据不具备代表性，因为测量的区域晶粒数量少，导致衍射峰的宽度变化，进而影响应力计算。结合 GB/T7704-2017《金属材料残余应力测定 X 射线衍射法》中对金属材料表面粗糙度和晶粒尺寸的规定，限定了产品表面粗糙度 Ra 不大于 10 $\mu$ m，晶粒尺寸 10~100 $\mu$ m。

#### 2 试样

对试样尺寸及取样要求做出了规定。

#### 3 试验步骤

在试验步骤中详细规定了测量位置，不仅规定了铜及铜合金板带箔材表面残余应力测试的取点位置，也规定了铜及铜合金板带箔材沿厚度方向的测试位置：在铜合金板带箔的宽度及厚度 1/2 位置取点测试，根据用户要求，也可增加宽度 1/4、3/4，厚度 1/4、3/4 位置点处测量应力。对铜及铜合金板带箔材，经过半蚀刻处理后，挠曲变形与表面应力无直接关系，而铜合金板带沿厚度的应力分布决定了其半蚀刻后的挠曲大小，只有保证铜合金板带箔沿厚度方向的应力分布的均匀，才能保证蚀刻过程中不发生挠曲。为了系统评判板带箔材残余应力水平，本标准对残余应力的测量位置作出了详细规定。

X 射线衍射测量方法的选择上，推荐使用  $4\psi$ - $\theta$  法，倾斜角  $\psi$  分别取  $0^\circ$ 、 $\pm 24.1^\circ$ 、 $\pm 35.3^\circ$  和  $\pm 45^\circ$ 。根据 GB/T7704-2017《金属材料残余应力测定 X 射线衍射法》中规定， $\Psi$  值的选择，宜在  $0^\circ$ ~ $45^\circ$  之间，个数宜选择 4 个或更多。选择若干个  $\Psi$  角的数值时，宜使  $\sin^2\Psi$  值间距近似相等。因此倾斜角  $\psi$  分别取  $0^\circ$ 、 $\pm 24.1^\circ$ 、 $\pm 35.3^\circ$  和  $\pm 45^\circ$ ， $\sin^2\Psi$  值间距在 0.166~0.167 之间。使用 Cr-K $\alpha$  辐射，扫描角度为  $146 \pm 15^\circ$ ，衍射晶面簇为 {311}。

#### 4 精密度

本文件的精密度试验是由 4 个实验室，按照拟定的检测方法分别对多个标样，多个水平进行测定。每个实验室对每个水平多次测定，各实验室原始数据见表 2、3、4。

表 2 各标样表面轧向正应力原始数据汇总表/MPa

| 实验室 i                            | 水平 j |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                                  | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 4 | 水平 5 | 水平 6 | 水平 7 | 水平 8 | 水平 9 | 水平 10 |
| 1 中铝<br>科学技术<br>研究院有<br>限公司      | -99  | -26  | -110 | -193 | -88  | -225 | -146 | -135 | -77  | -94   |
|                                  | -95  | -19  | -102 | -197 | -83  | -222 | -161 | -127 | -80  | -97   |
|                                  | -108 | -21  | -116 | -191 | -78  | -215 | -162 | -137 | -80  | -96   |
|                                  | -101 | -29  | -114 | -192 | -85  | -222 | -157 | -136 | -75  | -96   |
|                                  | -106 | -26  | -106 | -190 | -85  | -214 | -156 | -128 | -79  | -96   |
|                                  | -106 | -24  | -106 | -194 | -83  | -218 | -148 | -137 | -72  | -95   |
| 2 中国<br>计量科<br>学研究<br>院          | -110 | -32  | -124 | -199 | -84  | -223 | -160 | -130 | -77  | -104  |
|                                  | -103 | -21  | -122 | -192 | -88  | -225 | -165 | -141 | -75  | -91   |
|                                  | -102 | -23  | -130 | -207 | -92  | -221 | -162 | -131 | -78  | -91   |
|                                  | -119 | -35  | -118 | -203 | -95  | -226 | -164 | -131 | -77  | -99   |
|                                  | -118 | -35  | -117 | -199 | -92  | -229 | -162 | -128 | -74  | -96   |
|                                  | -117 | -29  | -115 | -199 | -88  | -228 | -169 | -138 | -80  | -102  |
| 3 有研<br>工程技<br>术研究<br>院有限<br>公司  | -98  | -25  | -112 | -191 | -79  | -221 | -156 | -130 | -76  | -98   |
|                                  | -96  | -28  | -108 | -187 | -82  | -224 | -161 | -138 | -74  | -94   |
|                                  | -113 | -21  | -117 | -199 | -80  | -219 | -155 | -130 | -74  | -96   |
|                                  | -113 | -17  | -108 | -186 | -82  | -220 | -155 | -139 | -65  | -93   |
|                                  | -98  | -23  | -107 | -191 | -79  | -221 | -156 | -140 | -77  | -98   |
|                                  | -113 | -22  | -118 | -199 | -86  | -220 | -156 | -139 | -69  | -93   |
| 4 邯郸<br>市爱斯<br>特应力<br>技术有<br>限公司 | -110 | -27  | -123 | -198 | -88  | -221 | -171 | -137 | -68  | -93   |
|                                  | -108 | -38  | -113 | -197 | -91  | -220 | -165 | -136 | -67  | -104  |
|                                  | -116 | -32  | -127 | -195 | -81  | -219 | -169 | -142 | -78  | -88   |
|                                  | -106 | -30  | -118 | -203 | -90  | -215 | -167 | -140 | -63  | -91   |
|                                  | -121 | -30  | -121 | -204 | -91  | -223 | -171 | -136 | -63  | -92   |

|  |      |     |      |      |     |      |      |      |     |     |
|--|------|-----|------|------|-----|------|------|------|-----|-----|
|  | -106 | -31 | -110 | -199 | -91 | -225 | -166 | -137 | -77 | -98 |
|--|------|-----|------|------|-----|------|------|------|-----|-----|

(注：-表示压应力，+为拉应力，下同)

表3 各标样表面横向正应力原始数据汇总表/MPa

| 实验室 i                            | 水平 j |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                                  | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 4 | 水平 5 | 水平 6 | 水平 7 | 水平 8 | 水平 9 | 水平 10 |
| 1 中铝<br>科学技术<br>研究院有<br>限公司      | -24  | 6    | -100 | -72  | -25  | -87  | -41  | -85  | -48  | -32   |
|                                  | -25  | 6    | -99  | -78  | -25  | -80  | -41  | -84  | -36  | -38   |
|                                  | -30  | 17   | -101 | -67  | -32  | -85  | -38  | -84  | -42  | -39   |
|                                  | -29  | 15   | -93  | -68  | -28  | -89  | -49  | -79  | -43  | -31   |
|                                  | -20  | 15   | -94  | -65  | -22  | -78  | -44  | -86  | -35  | -35   |
|                                  | -28  | 19   | -95  | -74  | -30  | -87  | -43  | -76  | -37  | -34   |
| 2 中国<br>计量科<br>学研究<br>院          | -27  | 7    | -96  | -73  | -33  | -89  | -44  | -76  | -48  | -21   |
|                                  | -26  | 10   | -102 | -75  | -27  | -90  | -50  | -79  | -38  | -31   |
|                                  | -32  | 19   | -97  | -66  | -28  | -75  | -35  | -81  | -44  | -27   |
|                                  | -32  | 17   | -99  | -67  | -31  | -78  | -39  | -79  | -43  | -23   |
|                                  | -27  | 12   | -95  | -77  | -32  | -79  | -39  | -73  | -46  | -37   |
|                                  | -31  | 11   | -98  | -70  | -33  | -90  | -38  | -82  | -40  | -33   |
| 3 有研<br>工程技<br>术研究<br>院有限<br>公司  | -24  | 9    | -98  | -63  | -30  | -86  | -48  | -82  | -39  | -32   |
|                                  | -27  | 15   | -90  | -71  | -23  | -87  | -42  | -88  | -46  | -31   |
|                                  | -28  | 12   | -98  | -75  | -22  | -76  | -39  | -74  | -46  | -29   |
|                                  | -27  | 10   | -89  | -64  | -23  | -82  | -38  | -74  | -43  | -29   |
|                                  | -26  | 12   | -88  | -78  | -33  | -83  | -51  | -82  | -42  | -31   |
|                                  | -27  | 19   | -92  | -72  | -22  | -84  | -43  | -76  | -42  | -28   |
| 4 邯郸<br>市爱斯<br>特应力<br>技术有<br>限公司 | -20  | 10   | -98  | -72  | -31  | -78  | -50  | -77  | -46  | -28   |
|                                  | -29  | 16   | -98  | -78  | -27  | -86  | -40  | -80  | -39  | -36   |
|                                  | -28  | 17   | -99  | -69  | -28  | -74  | -38  | -80  | -46  | -31   |
|                                  | -30  | 5    | -101 | -68  | -32  | -82  | -45  | -75  | -41  | -27   |
|                                  | -21  | 11   | -95  | -76  | -28  | -74  | -42  | -76  | -45  | -35   |

|  |     |    |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|  | -29 | 15 | -96 | -78 | -27 | -77 | -38 | -77 | -39 | -37 |
|--|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

表 4 各标样厚度 1/2 处轧向正应力原始数据汇总表/MPa

| 实验室 i                            | 水平 j |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                                  | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 4 | 水平 5 | 水平 6 | 水平 7 | 水平 8 | 水平 9 | 水平 10 |
| 1 中铝<br>科学技术<br>研究院有<br>限公司      | -95  | -20  | -113 | -170 | -85  | -181 | -94  | -91  | -74  | -94   |
|                                  | -105 | -24  | -112 | -164 | -76  | -178 | -97  | -90  | -74  | -100  |
|                                  | -103 | -22  | -116 | -165 | -79  | -174 | -92  | -92  | -77  | -101  |
|                                  | -103 | -17  | -115 | -175 | -76  | -175 | -91  | -89  | -66  | -96   |
|                                  | -93  | -18  | -110 | -163 | -78  | -185 | -90  | -91  | -74  | -104  |
|                                  | -100 | -17  | -112 | -172 | -78  | -176 | -92  | -87  | -69  | -95   |
| 2 中国<br>计量科<br>学研究<br>院          | -99  | -19  | -115 | -173 | -82  | -179 | -90  | -88  | -70  | -99   |
|                                  | -100 | -20  | -115 | -173 | -80  | -179 | -95  | -86  | -78  | -106  |
|                                  | -101 | -19  | -124 | -165 | -82  | -186 | -98  | -90  | -75  | -98   |
|                                  | -99  | -20  | -113 | -172 | -86  | -186 | -94  | -83  | -78  | -98   |
|                                  | -102 | -20  | -113 | -166 | -78  | -187 | -92  | -85  | -65  | -106  |
|                                  | -101 | -23  | -113 | -173 | -78  | -180 | -95  | -88  | -77  | -106  |
| 3 有研<br>工程技<br>术研究<br>院有限<br>公司  | -102 | -21  | -122 | -164 | -85  | -181 | -92  | -84  | -77  | -91   |
|                                  | -100 | -20  | -118 | -168 | -79  | -178 | -94  | -89  | -79  | -92   |
|                                  | -99  | -22  | -120 | -170 | -84  | -179 | -98  | -84  | -76  | -96   |
|                                  | -98  | -24  | -119 | -167 | -83  | -178 | -90  | -91  | -79  | -95   |
|                                  | -102 | -25  | -120 | -164 | -85  | -178 | -98  | -91  | -76  | -95   |
|                                  | -99  | -21  | -116 | -169 | -79  | -182 | -95  | -80  | -73  | -96   |
| 4 邯鄲<br>市爱斯<br>特应力<br>技术有<br>限公司 | -103 | -26  | -125 | -172 | -83  | -186 | -97  | -83  | -72  | -100  |
|                                  | -98  | -26  | -116 | -168 | -81  | -182 | -94  | -84  | -72  | -95   |
|                                  | -99  | -27  | -123 | -175 | -83  | -186 | -98  | -87  | -75  | -96   |
|                                  | -104 | -26  | -122 | -173 | -77  | -180 | -90  | -84  | -72  | -95   |
|                                  | -100 | -21  | -117 | -170 | -76  | -181 | -91  | -89  | -78  | -105  |
|                                  | -97  | -21  | -124 | -173 | -81  | -181 | -97  | -89  | -73  | -95   |

### (1) 各标样表面轧向正应力统计分析

由表 2 计算各实验室测试的各标样表面轧向正应力平均值，结果见表 5。

表 5 各标样表面轧向正应力分析结果平均值/MPa

| 实验室 i            | 水平 j   |       |        |        |       |        |         |        |       |       |
|------------------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|---------|--------|-------|-------|
|                  | 水平 1   | 水平 2  | 水平 3   | 水平 4   | 水平 5  | 水平 6   | 水平 7    | 水平 8   | 水平 9  | 水平 10 |
| 1 中铝科学技术研究院有限公司  | -102.5 | -24.2 | -109.0 | -192.8 | -83.7 | -219.3 | -155.0* | -133.3 | -77.2 | -95.7 |
| 2 中国计量科学研究院      | -111.5 | -29.2 | -121.0 | -199.8 | -89.8 | -225.3 | -163.7  | -133.2 | -76.8 | -97.2 |
| 3 有研工程技术研究院有限公司  | -105.2 | -22.7 | -111.7 | -192.2 | -81.3 | -220.8 | -156.5  | -136.0 | -72.5 | -95.3 |
| 4 邯郸市爱斯特应力技术有限公司 | -111.2 | -31.3 | -118.7 | -199.3 | -88.7 | -220.5 | -168.2  | -138.0 | -69.3 | -94.3 |

由表 2 计算各实验室内标准偏差，结果见表 6。

表 6 各标样表面轧向正应力分析结果标准偏差  $S_{ij}$

| 实验室 i            | 水平 j |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                  | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 4 | 水平 5 | 水平 6 | 水平 7 | 水平 8 | 水平 9 | 水平 10 |
| 1 中铝科学技术研究院有限公司  | 5.5  | 4.0  | 5.8  | 2.7  | 3.6  | 4.8  | 7.3* | 5.0  | 3.5  | 1.1   |
| 2 中国计量科学研究院      | 8.4  | 6.6  | 6.0  | 5.5  | 4.3  | 3.3  | 3.4  | 5.6  | 2.3  | 6.0   |
| 3 有研工程技术研究院有限公司  | 9.4  | 4.1  | 5.3  | 6.2  | 2.9  | 1.9  | 2.5  | 5.1  | 5.0  | 2.6   |
| 4 邯郸市爱斯特应力技术有限公司 | 6.7  | 4.0  | 7.0  | 3.8  | 4.3  | 3.8  | 2.8  | 2.7  | 7.3  | 6.3   |

|     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 限公司 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

基于表 2、5、6 数据进行各标样表面轧向正应力一致性检验。

### 1) Cochran 检验

实验室内数据变异的检验采用 Cochran 检验，Cochran 统计量 C 见表 7。

表 7 各标样表面轧向正应力的 Cochran 统计量

| 水平 j | 水平 1   | 水平 2   | 水平 3   | 水平 4   | 水平 5   | 水平 6   | 水平 7   | 水平 8   | 水平 9   | 水平 10  |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Smax | 9.4    | 6.6    | 7.0    | 6.2    | 4.3    | 4.8    | 7.3    | 5.6    | 7.3    | 6.3    |
| C    | 0.3805 | 0.4705 | 0.3286 | 0.4257 | 0.3159 | 0.4434 | 0.6714 | 0.3478 | 0.5526 | 0.4740 |

实验室数 P=4，测定次数 n=6，显著性水平为 5%和 1%时的 Cochran 统计量 C 的临界值分别为 0.590 和 0.676，结果表明仅实验室 1 的水平 7 的试验结果为歧离值（用单星号标出），应保留。

### 2) Grubbs 检验

实验室内数据变异的检验采用 Grubbs 检验，Grubbs 统计量见表 8。

表 8 各标样表面轧向正应力的 Grubbs 统计量

| 水平 j  | 单个低值   | 单个高值   | 两个低值   | 两个高值   |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 水平 1  | 1.1380 | 0.8768 | 0.0009 | 0.0594 |
| 水平 2  | 1.0189 | 1.1004 | 0.0468 | 0.0224 |
| 水平 3  | 1.0724 | 1.0431 | 0.0282 | 0.0368 |
| 水平 4  | 0.9443 | 0.9240 | 0.0025 | 0.0044 |
| 水平 5  | 1.1242 | 0.9798 | 0.0139 | 0.0556 |
| 水平 6  | 0.8222 | 1.4546 | 0.4860 | 0.0327 |
| 水平 7  | 0.9438 | 1.1864 | 0.0883 | 0.0098 |
| 水平 8  | 0.8460 | 1.2420 | 0.1244 | 0.0009 |
| 水平 9  | 1.2350 | 0.8567 | 0.0013 | 0.1192 |
| 水平 10 | 1.1006 | 1.3136 | 0.2723 | 0.1210 |

实验室数 P=4，单个低值或高值统计量上 1%点和上 5%点的临界值分别为 1.496 和 1.481，结果表明均为正确值。实验室数 P=4，两个低值或高值统计量下 1%点和下 5%点的临界值分别为 0.0000 和 0.0002，结果表明均为正确值。

### 3) 总平均值、方差及重复性限和再现性限计算

各水平的  $m_j$ 、 $S_{rj}$ 、 $S_{Rj}$  的计算结果见表 9。

表 9 各标样表面轧向正应力的  $m_j$ 、 $S_{rj}$ 、 $S_{Rj}$  及重复性限  $r$  和再现性限  $R/\%$

| 水平 j    | 水平 1   | 水平 2  | 水平 3   | 水平 4   | 水平 5  | 水平 6   | 水平 7   | 水平 8   | 水平 9  | 水平 10 |
|---------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| $m$     | -107.6 | -26.8 | -115.1 | -196.0 | -85.9 | -221.5 | -160.8 | -135.1 | -74.0 | -95.6 |
| $S_r^2$ | 58.48  | 23.06 | 36.76  | 22.67  | 14.69 | 12.90  | 19.66  | 22.57  | 24.03 | 20.93 |
| $S_L^2$ | 10.21  | 12.88 | 26.05  | 13.06  | 13.87 | 4.79   | 34.93  | 1.60   | 10.02 | 0.00  |
| $S_R^2$ | 68.69  | 35.94 | 62.81  | 35.73  | 28.56 | 17.69  | 54.59  | 24.17  | 34.05 | 20.93 |
| $S_r$   | 7.6    | 4.8   | 6.1    | 4.8    | 3.8   | 3.6    | 4.4    | 4.8    | 4.9   | 4.6   |
| $S_R$   | 8.3    | 6.0   | 7.9    | 6.0    | 5.3   | 4.2    | 7.4    | 4.9    | 5.8   | 4.6   |

## (2) 各标样表面横向正应力统计分析

由表 3 计算各实验室测试的各标样表面横向正应力平均值，结果见表 10。

表 10 各标样表面横向正应力分析结果平均值/MPa

| 实验室 i            | 水平 j       |       |            |       |       |       |       |       |            |       |
|------------------|------------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|
|                  | 水平 1       | 水平 2  | 水平 3       | 水平 4  | 水平 5  | 水平 6  | 水平 7  | 水平 8  | 水平 9       | 水平 10 |
| 1 中铝科学技术研究院有限公司  | -26.0      | 13.0  | -97.0<br>* | -70.7 | -27.0 | -84.3 | -42.7 | -82.3 | -40.2<br>* | -34.8 |
| 2 中国计量科学研究院      | -29.2<br>* | 12.7* | -97.8      | -71.3 | -30.7 | -83.5 | -40.8 | -78.3 | -43.2      | -28.7 |
| 3 有研工程技术研究院有限公司  | -26.5      | 12.8  | -92.5<br>* | -70.5 | -25.5 | -83.0 | -43.5 | -79.3 | -43.0      | -30.0 |
| 4 邯郸市爱斯特应力技术有限公司 | -26.2      | 12.3  | -97.8      | -73.5 | -28.8 | -78.5 | -42.2 | -77.5 | -42.7      | -32.3 |

由表 3 计算各实验室内标准偏差，结果见表 11。

表 11 各标样表面横向正应力分析结果标准偏差  $S_{ij}$

| 实验室 i            | 水平 j |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                  | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 4 | 水平 5 | 水平 6 | 水平 7 | 水平 8 | 水平 9 | 水平 10 |
| 1 中铝科学技术研究院有限公司  | 4.1  | 6.2  | 3.7* | 5.4  | 4.0  | 4.8  | 4.1  | 4.3  | 5.5* | 3.5   |
| 2 中国计量科学研究院      | 3.1* | 4.9  | 2.7  | 4.8  | 2.8  | 7.5  | 5.9  | 3.6  | 4.1  | 6.7   |
| 3 有研工程技术研究院有限公司  | 1.5  | 4.0  | 4.9* | 6.5  | 5.2  | 4.3  | 5.6  | 6.1  | 2.9  | 1.7   |
| 4 邯郸市爱斯特应力技术有限公司 | 4.9  | 5.0  | 2.3  | 4.9  | 2.3  | 5.2  | 5.1  | 2.3  | 3.7  | 4.7   |

基于表 3、10、11 数据进行各标样表面横向正应力一致性检验。

#### 1) Cochran 检验

实验室内数据变异的检验采用 Cochran 检验，Cochran 统计量 C 见表 12。

表 12 各标样表面横向正应力的 Cochran 统计量

| 水平 j | 水平 1   | 水平 2   | 水平 3   | 水平 4   | 水平 5   | 水平 6   | 水平 7   | 水平 8   | 水平 9   | 水平 10  |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Smax | 4.9    | 6.2    | 4.9    | 6.5    | 5.2    | 7.5    | 5.9    | 6.1    | 5.5    | 6.7    |
| C    | 0.4551 | 0.3679 | 0.4712 | 0.3596 | 0.4776 | 0.4564 | 0.3171 | 0.5051 | 0.4389 | 0.5486 |

实验室数 P=4，测定次数 n=6，显著性水平为 5%和 1%时的 Cochran 统计量 C 的临界值分别为 0.590 和 0.676，结果表明均为正确值。

#### 2) Grubbs 检验

实验室内数据变异的检验采用 Grubbs 检验，Grubbs 统计量见表 13。

表 13 各标样表面横向正应力的 Grubbs 统计量

| 水平 j  | 单个低值   | 单个高值   | 两个低值   | 两个高值   |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 水平 1  | 0.6446 | 1.4853 | 0.5361 | 0.0021 |
| 水平 2  | 1.0247 | 1.3175 | 0.2286 | 0.0571 |
| 水平 3  | 1.4822 | 0.6027 | 0.0000 | 0.5157 |
| 水平 4  | 0.7241 | 1.4481 | 0.4102 | 0.0024 |
| 水平 5  | 1.1160 | 1.1904 | 0.1116 | 0.0747 |
| 水平 6  | 1.4664 | 0.7651 | 0.0169 | 0.4939 |
| 水平 7  | 1.3056 | 1.0818 | 0.0928 | 0.2375 |
| 水平 8  | 0.8887 | 1.4022 | 0.3370 | 0.0260 |
| 水平 9  | 1.4835 | 0.6527 | 0.0023 | 0.5282 |
| 水平 10 | 1.0291 | 1.2441 | 0.1416 | 0.0403 |

实验室数  $P=4$ , 单个低值或高值统计量上 1%点和上 5%点的临界值分别为 1.496 和 1.481, 结果表明实验室 1 水平 9, 实验室 2 水平 1, 实验室 3 水平 3 为歧离值, 应保留参与后续计算, 其余均为正确值。实验室数  $P=4$ , 两个低值或高值统计量下 1%点和下 5%点的临界值分别为 0.0000 和 0.0002, 结果表明实验室 1 水平 3 为歧离值, 应保留, 其余均为正确值。

### 3) 总平均值、方差及重复性限和再现性限计算

各水平的  $m_j$ 、 $S_{Tj}$ 、 $S_{Rj}$  的计算结果见表 14。

表 14 各标样表面横向正应力的  $m_j$ 、 $S_{Tj}$ 、 $S_{Rj}$ 

| 水平 j    | 水平 1  | 水平 2  | 水平 3  | 水平 4  | 水平 5  | 水平 6  | 水平 7  | 水平 8  | 水平 9  | 水平 10 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $m$     | -27.0 | 12.7  | -96.3 | -71.5 | -28.0 | -82.3 | -42.3 | -79.4 | -42.3 | -31.5 |
| $S_r^2$ | 13.03 | 25.77 | 12.67 | 29.62 | 14.26 | 31.22 | 27.03 | 18.69 | 17.34 | 20.49 |
| $S_L^2$ | 0.04  | 0.00  | 4.43  | 0.00  | 2.64  | 1.63  | 0.00  | 1.34  | 0.00  | 0.00  |
| $S_R^2$ | 13.07 | 25.77 | 17.10 | 29.62 | 16.90 | 32.85 | 27.03 | 20.03 | 17.34 | 20.49 |
| $S_r$   | 3.6   | 5.1   | 3.6   | 5.4   | 3.8   | 5.6   | 5.2   | 4.3   | 4.2   | 4.5   |
| $S_R$   | 3.6   | 5.1   | 4.1   | 5.4   | 4.1   | 5.7   | 5.2   | 4.5   | 4.2   | 4.5   |

### (3) 各标样 1/2 厚度处轧向正应力统计分析

由表 4 计算各实验室测试的各标样 1/2 厚度处轧向正应力平均值, 结果见表 15。

表 15 各标样 1/2 厚度处轧向正应力分析结果平均值/MPa

| 实验室 i            | 水平 j   |       |        |        |       |        |        |        |       |        |
|------------------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
|                  | 水平 1   | 水平 2  | 水平 3   | 水平 4   | 水平 5  | 水平 6   | 水平 7   | 水平 8   | 水平 9  | 水平 10  |
| 1 中铝科学技术研究院有限公司  | -99.8* | -19.7 | -113.0 | -168.2 | -78.7 | -178.2 | -92.7* | -90.0* | -72.3 | -98.3  |
| 2 中国计量科学研究院      | -100.3 | -20.2 | -115.5 | -170.3 | -81.0 | -182.8 | -94.0* | -86.7  | -73.8 | -102.2 |
| 3 有研工程技术研究院有限公司  | -100.0 | -22.2 | -119.2 | -167.0 | -82.5 | -179.3 | -94.5  | -86.5  | -76.7 | -94.2  |
| 4 邯郸市爱斯特应力技术有限公司 | -100.2 | -24.5 | -121.2 | -171.8 | -80.2 | -182.7 | -94.5  | -86.0  | -73.7 | -97.7  |

由表 4 计算各实验室内标准偏差，结果见表 16。

表 16 各标样 1/2 厚度处轧向正应力分析结果标准偏差  $S_{ij}$ 

| 实验室 i            | 水平 j |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                  | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 4 | 水平 5 | 水平 6 | 水平 7 | 水平 8 | 水平 9 | 水平 10 |
| 1 中铝科学技术研究院有限公司  | 5.3* | 3.1  | 2.4  | 5.3  | 3.6  | 4.6  | 2.7* | 2.0* | 4.4  | 4.3   |
| 2 中国计量科学研究院      | 1.3  | 1.6  | 4.7  | 4.1  | 3.3  | 4.2  | 3.0* | 2.7  | 5.8  | 4.6   |
| 3 有研工程技术研究院有限公司  | 1.8  | 2.1  | 2.2  | 2.8  | 3.1  | 1.9  | 3.5  | 4.9  | 2.5  | 2.3   |
| 4 邯郸市爱斯特应力技术有限公司 | 3.1  | 3.0  | 4.1  | 2.7  | 3.3  | 2.9  | 3.7  | 2.9  | 2.7  | 4.5   |

基于表 4、15、16 数据进行各标样 1/2 厚度处轧向正应力一致性检验。

#### 1) Cochran 检验

实验室内数据变异的检验采用 Cochran 检验，Cochran 统计量 C 见表 17。

表 17 各标样 1/2 厚度处轧向正应力的 Cochran 统计量

| 水平 j             | 水平 1   | 水平 2   | 水平 3   | 水平 4   | 水平 5   | 水平 6   | 水平 7   | 水平 8   | 水平 9   | 水平 10  |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S <sub>max</sub> | 5.3    | 3.1    | 4.7    | 5.3    | 3.6    | 4.6    | 3.7    | 4.9    | 5.8    | 4.6    |
| C                | 0.6601 | 0.3810 | 0.4417 | 0.4697 | 0.2980 | 0.4089 | 0.3224 | 0.5491 | 0.5052 | 0.3262 |

实验室数 P=4，测定次数 n=6，显著性水平为 5%和 1%时的 Cochran 统计量 C 的临界值分别为 0.590 和 0.676，结果表明仅实验室 1 的水平 1 的试验结果为歧离值（用单星号标出），应保留。

#### 2) Grubbs 检验

实验室内数据变异的检验采用 Grubbs 检验，Grubbs 统计量见表 18。

表 18 各标样 1/2 厚度处轧向正应力的 Grubbs 统计量

| 水平 j  | 单个低值   | 单个高值   | 两个低值   | 两个高值   |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 水平 1  | 1.1619 | 1.1619 | 0.1000 | 0.1000 |
| 水平 2  | 0.8901 | 1.3068 | 0.1875 | 0.0086 |
| 水平 3  | 1.1506 | 1.0823 | 0.0498 | 0.0779 |
| 水平 4  | 1.0780 | 1.1550 | 0.0800 | 0.0484 |
| 水平 5  | 1.1968 | 1.1968 | 0.1462 | 0.1462 |
| 水平 6  | 1.0951 | 0.8831 | 0.0008 | 0.0408 |
| 水平 7  | 1.4434 | 0.6736 | 0.0000 | 0.3951 |
| 水平 8  | 0.7067 | 1.4819 | 0.5544 | 0.0125 |
| 水平 9  | 0.9830 | 1.3946 | 0.4028 | 0.0892 |
| 水平 10 | 1.1006 | 1.3136 | 0.2723 | 0.1210 |

实验室数 P=4，单个低值或高值统计量上 1%点和上 5%点的临界值分别为 1.496 和 1.481，结果表明实验室 1 水平 8 为歧离值，其余均为正确值。实验室数 P=4，两个低值或高值统计量下 1%点和下 5%点的临界值分别为 0.0000 和 0.0002，结果表明实验室 1 水平 8、实验室 1 水平 8、实验室 2 水平 8、为歧离值，其余均为正确值。

#### 3) 总平均值、方差及重复性限和再现性限计算

各水平的  $m_j$ 、 $S_{rj}$ 、 $S_{Rj}$  的计算结果见表 19。

表 19 各标样 1/2 厚度处轧向正应力的  $m_j$ 、 $S_{rj}$ 、 $S_{Rj}$

| 水平 j    | 水平 1   | 水平 2  | 水平 3   | 水平 4   | 水平 5  | 水平 6   | 水平 7  | 水平 8  | 水平 9  | 水平 10 |
|---------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| m       | -100.1 | -21.6 | -117.2 | -169.3 | -80.6 | -180.8 | -93.9 | -87.3 | -74.1 | -95.6 |
| $S_r^2$ | 10.62  | 6.51  | 12.43  | 15.18  | 11.14 | 12.74  | 10.70 | 11.09 | 16.49 | 20.93 |
| $S_L^2$ | 0.00   | 3.76  | 11.31  | 2.16   | 0.71  | 3.44   | 0.00  | 1.49  | 0.57  | 0.00  |
| $S_R^2$ | 10.62  | 10.27 | 23.74  | 17.34  | 11.85 | 16.18  | 10.70 | 12.58 | 17.06 | 20.93 |
| $S_r$   | 3.3    | 2.6   | 3.5    | 3.9    | 3.3   | 3.6    | 3.3   | 3.3   | 4.1   | 4.6   |
| $S_R$   | 3.3    | 3.2   | 4.9    | 4.2    | 3.4   | 4.0    | 3.3   | 3.5   | 4.1   | 4.6   |

对表 9、14、19 中的数据进行检查,没有显示出  $S_r$ 、 $S_R$  与  $m$  有明显的依赖关系。因而可以将表 9、14、19 的  $S_r$  与  $S_R$  分别求取平均值作为测量方法精密度,引述如下:

重复性标准差:  $S_r=4.3\text{MPa}$

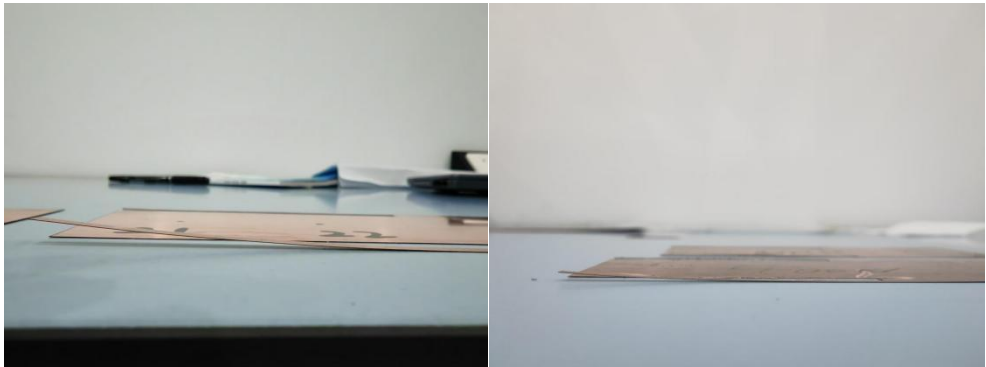
再现性标准差:  $S_R=4.8\text{MPa}$ 。

重复性按照 2.8 倍重复性标准差、再现性按照 2.8 倍再现性标准差计算,

重复性:  $r=12.0\text{MPa}$

再现性:  $R=13.4\text{MPa}$ 。

根据 2025 年 03 月 24 日标准预审会的会议要求,采用 YS / T 1678-2023 《铜及铜合金板带箔材 残余应力检验方法 蚀刻分条法》对进行 X 射线应力测试的样品进行挠曲高度测试。此次挠曲测试,采用了水平 1、2、4~6 进行蚀刻分条后测试其挠曲高度。其结果挠曲情况如图 1 所示,经影像测量仪测试其挠曲高度如表 20 所示。



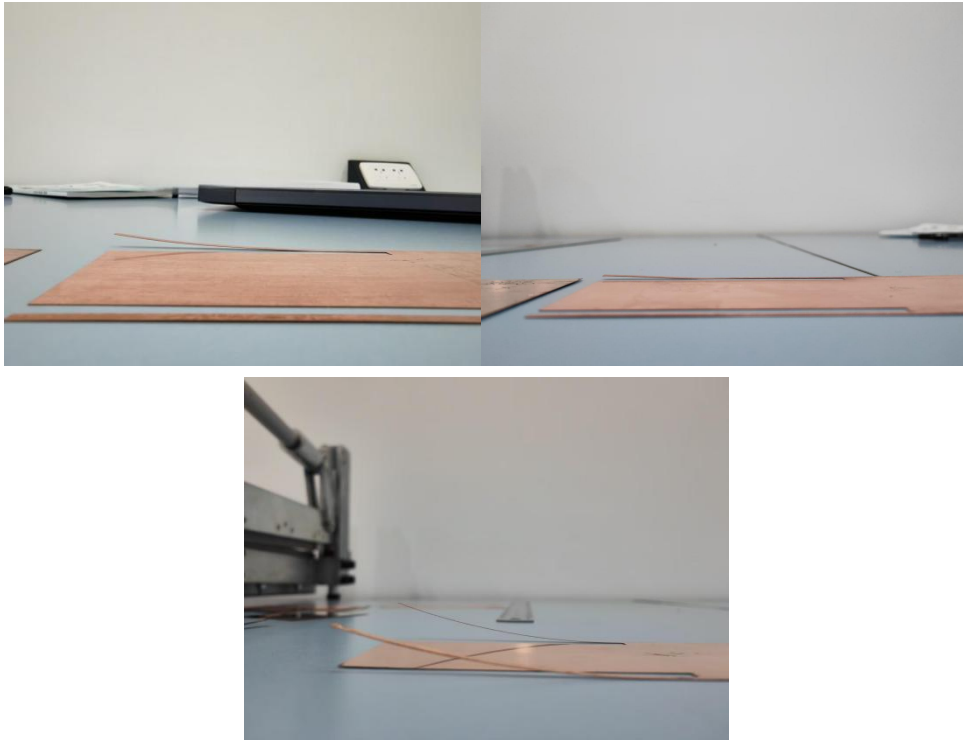


表 20 各标样情况及挠曲高度测试图

表 20 各标样情况及挠曲高度统计

| 水平 j                | 水平 1              | 水平 2              | 水平 3              | 水平 4              | 水平 5              | 水平 6          | 水平 7      | 水平 8 | 水平 9       | 水平 10      |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|-----------|------|------------|------------|
| 材料类型                | 冲制型<br>C1940<br>0 | 蚀刻型<br>C1940<br>0 | 冲制型<br>C1940<br>0 | 冲制型<br>C7025<br>0 | 蚀刻型<br>C7025<br>0 | 冲制型<br>C70350 | Cu-Cr-Zr  | T2   | C1100<br>0 | C1100<br>0 |
| 生产厂家                | 洛铜                | 洛铜                | 维兰德               | 博威                | 维兰德               | 博威            | 中铝<br>科学院 | 未知   | 华中铜        | 华中铜        |
| 厚度<br>/mm           | 0.3               | 0.3               | 0.3               | 0.152             | 0.152             | 0.152         | 0.152     | 0.8  | 0.012      | 0.035      |
| 表面轧<br>向正应<br>力/MPa | -102.5            | -24.2             | /                 | -192.8            | -83.7             | -219.3        | /         | /    | /          | /          |
| 表面横<br>向正应<br>力/MPa | -26.0             | 13.0              | /                 | -70.7             | -27.0             | -84.3         | /         | /    | /          | /          |
| 1/2 厚               | -99.8             | -19.7             | /                 | -168.2            | -78.7             | -178.2        | /         | /    | /          | /          |

|                               |      |     |   |      |     |      |   |   |   |   |
|-------------------------------|------|-----|---|------|-----|------|---|---|---|---|
| 度处<br>应力<br>/MPa              |      |     |   |      |     |      |   |   |   |   |
| 挠曲高<br>度 $\delta$ (平<br>均)/mm | 18.8 | 5.5 | / | 10.7 | 5.2 | 53.1 | / | / | / | / |

由表 20 数据可知，通过 X 射线应力测试方法检测材料单点应力值与材料蚀刻挠曲高度总体展现的趋势是一致的，具体表现为：通过 X 射线法测得的蚀刻型铜合金带箔材残余应力较低，其挠曲高度也普遍较低；冲制型铜合金单点残余应力水平较高，其挠曲高度也较高；蚀刻型带材应力水平要低于冲制型带材，其挠曲高度也显著低于冲制型带材。该标准与 YS/T 1678-2023 《铜及铜合金板带箔材 残余应力检验方法 蚀刻分条法》相互协调，互不冲突。

但与此同时通过 X 射线应力测试方法测得的材料单点应力值与材料蚀刻挠曲高度并非完全对应。例如水平 2 蚀刻型 C19400 其表面点位轧/横向正应力、1/2 厚度处应力水平均低于水平 5 蚀刻型 C70250，但其挠曲高度与后者相当；水平 4 冲制型 C70250 应力水平与冲制型 C70350 应力水平相当，但其挠曲高度差距明显。这也说明了虽然这两个行业标准虽然都针对铜及铜合金板带残余应力的检测，但它们在基本原理、操作方式、适用范围、精度、破坏性以及优缺点上存在显著区别。

| 特征   | X 射线衍射法                   | 蚀刻分条法                                 |
|------|---------------------------|---------------------------------------|
| 基本原理 | 物理衍射原理：测量晶面间距变化（晶格应变）计算应力 | 机械释放原理：通过局部去除材料释放应变，测量变形计算应力          |
| 检测对象 | 微观晶格应变                    | 宏观弹性应变释放                              |
| 测量方式 | 非接触式测量（X 射线照射）            | 接触式测量（直尺、塞尺、光学影像测量仪）                  |
| 破坏性  | 非破坏性 - 可测成品或关键部位          | 破坏性- 必须切割样品条，样品被破坏                    |
| 测量位置 | 点测量：可精确定位到微小区域（毫米级）       | 区域平均：测量的是整个分条宽度上的平均残余应力               |
| 应力类型 | 可区分表面法向、主应力方向及其大小         | 通常测量垂直于切割方向的残余应力（单轴近似）                |
| 深度信息 | 主要测量表面/近表面应力（几微米到几十微米深度）  | 测量的是贯穿板厚方向的平均残余应力（但反映的是切割释放区域的整体应力状态） |
| 样品要求 | 表面需较平整、洁净（无油污、厚           | 需有足够尺寸切割出直条；材料需满足弹性假设                 |

| 特征   | X 射线衍射法                         | 蚀刻分条法                                 |
|------|---------------------------------|---------------------------------------|
|      | 氧化层)                            |                                       |
| 主要优势 | 非破坏、高精度、可测点应力、可测应力梯度（浅层）、可测多轴应力 | 设备简单、成本低、可测量厚度方向宏观平均应力、原理直观           |
| 主要局限 | 设备昂贵、对表面状态敏感、测量深度浅、受材料织构影响      | 破坏性、受材料各向异性影响大、操作步骤多易引入误差、只能测特定方向平均应力 |

两种测试方法之间原理差异是根本：X 射线衍射法是基于微观物理原理的现代、高精度、非破坏性点测量方法，尤其擅长表面应力分析。蚀刻分条法则是基于宏观力学原理的经典、相对低成本、破坏性的平均应力测量方法，主要用于测量厚度方向宏观应力。选择哪种方法取决于具体的检测目的、精度要求、预算、样品状态（是否允许破坏）以及所需的信息（点应力 vs 平均应力，表面应力 vs 厚度应力）。

如果需要无损检测、测量表面/近表面点应力、需要高精度、需要明确应力方向或多轴应力状态、预算充足可优先选择 X 射线衍射法。如果允许破坏样品、需要测量整个厚度方向的平均残余应力、预算有限、样品是平板状且易于切割的条件下可以采用蚀刻分条法。

#### （四）标准的先进性、创新性、标准实施后预期产生的经济效益和社会效益

该行业标准通过规范利用 X 射线衍射法测试铜及铜合金板带箔材残余应力时的样品规格、测量位置及测量方法等内容，填补了国内铜合金产品残余应力定量检测的标准空白。该标准实施后，对降低国产蚀刻型铜材应力水平，实现高端引线框架等领域产品进口替代，满足高端制造业对高一致性基础原材料的需求，消化国内铜加工领域部分过剩产能，促进新能源汽车及电子信息产业健康发展和规范精密铜材检测市场秩序将发挥关键作用，同时也可降低产业链质量损耗成本，提升国产高端铜材市场占有率，为“制造强国”战略提供重要检测技术支撑。

#### 四、与国际标准和国外先进标准技术内容的对比

目前国际上广泛采用的主要 X 射线应力检测标准涵盖材料测试方法、设备校准及数据分析规范，以下为具有代表性的标准及其适用范围。

| 序号 | 标准类型 | 标准名称                                                                                                                     | 适用范围                                                                     |
|----|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 国际标准 | ISO 21432:2019<br>Non-destructive testing- Standard test method for determining residual stresses by neutron diffraction | 规定了 X 射线衍射法测量残余应力的基本原理、设备要求、试样准备及数据评估方法。<br>适用于金属材料（如钢、铝合金、钛合金等）的宏观应力分析。 |

|   |      |                                                                                                                                       |                                                                            |
|---|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|   |      |                                                                                                                                       | 强调应力计算模型（如 $\sin^2\psi$ 法）和晶格应变测量的标准化流程                                    |
| 2 |      | ASTM E915-19<br>Standard Test Method for Verifying the Alignment of X-Ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement | 聚焦 X 射线衍射设备的校准与验证，确保仪器光路、探测器角度等参数的精确性。<br>适用于实验室及工业现场设备的定期校验，保障测量结果的可重复性。  |
| 3 |      | ASTM E2860-20<br>Standard Test Method for Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction for Bearing Steels                         | 针对轴承钢等高强度材料的残余应力检测，细化 X 射线法在复杂应力状态（如多轴应力）下的应用。提供表面处理（如电解抛光）对测量结果影响的修正方法。   |
| 4 |      | SAE J784a<br>Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction                                                                         | 美国汽车工程师协会（SAE）制定的行业标准，侧重汽车零部件（如齿轮、曲轴）的应力检测。包含试样定位、数据采集频率及应力梯度分析的特殊要求。      |
| 5 |      | EN 15305:2008<br>Non-destructive Testing-Test Method for Residual Stress Analysis by X-Ray Diffraction                                | 欧洲标准，规范 X 射线法在金属焊接件、铸造件及涂层材料中的应力检测流程。<br>强调多相材料（如复合材料）的应力分离技术与不确定度评估。      |
| 6 |      | ISO/TR 18230:2016<br>Non-destructive testing - Guidelines for residual stress measurement by X-ray diffraction                        | 技术报告性质，提供 X 射线法在工业应用中的实践指导，包括设备选型、数据解释及误差来源分析。适用于航空航天、能源装备等领域的复杂构件检测。      |
| 7 |      | JIS H 7805:2005<br>Method for X-ray stress measurement of metallic materials                                                          | 日本工业标准（JIS），针对金属材料的 X 射线应力测量方法，尤其关注薄板、线材等轻量化材料的测试规范。<br>包含晶面选择、入射角优化等细节要求。 |
| 8 | 国内标准 | GB/T 7704-2017<br>《金属材料残余应力测定 X 射线衍射法》                                                                                                | 中国国家标准，等效采用 ISO 21432，但增加了针对国产设备的校准要求。                                     |
| 9 |      | HB 6623-2019<br>《航空金属材料残余应力测试方法》                                                                                                      | 航空行业标准，细化高温合金、钛合金的 X 射线检测流程。                                               |

## 五、以国际标准为基础的起草情况以及是否合规采用国际国外标准、未采用国际标准的原因

当前国际标准体系以 ISO 和 ASTM 为核心，以通用性标准或者行业专用标准为主，但

针对铜及铜合金板带箔材的专项标准仍存在空白，亟需结合材料特性制定更细化的取样、测试及数据解释规范，使得企业在铜及铜合金板带箔材测试中有标准可以依循，测试数据更加科学规范。

## 六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

本标准属于检测方法标准制订。没有现行的法律、法规、规章制度等对其要求，本领域没有强制性标准，与现行法律、法规相协调、无冲突。

该标准与行业标准 YS / T 1678-2023 《铜及铜合金板带箔材 残余应力检验方法 蚀刻分条法》无冲突，这两个标准代表了残余应力检测中两种截然不同的技术路线。两者相协调不冲突。

该标准与国家标准 GB/T 7704-2017《金属材料残余应力测定 X 射线衍射法》相辅相成，其基本原理相同，但针对铜及铜合金板带箔材检测的具体应用场景和参数设定进行了优化，细化了铜及铜合金板带箔材领域应力检测标准，统一了测试参数，提升测试精度，助力企业质量控制，推动行业技术进步。

## 七、重大分歧意见的处理经过和依据

暂无。

## 八、涉及专利的有关说明

本标准不涉及专利问题。

## 九、作为强制性或推荐性国家标准的建议

本标准建议不作为强制性标准，而建议作为推荐性标准。

## 九、实施国家标准的要求以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议

本标准建议作为**推荐性**【行业标准】发布。

### 贯彻标准的要求和措施建议

为使标准能更好地发挥作用，提高铜及铜合金生产企业的产品应力控制水平，建议针对本标准制订切实可行的贯彻措施，做好宣传培训工作，使各相关单位充分掌握标准中所规定的检测方法，并加强示范推广，让标准在铜及铜合金的生产和使用过程中得以广泛应用。同时，对标准执行情况进行跟踪调查，及时发现标准执行中的问题，不断修改完善，提升标准水平，提高标准的科学性、合理性、协调性和可操作性。

十、其他应当说明的事项。

无。

《铜及铜合金板带残余应力检测方法

X 射线衍射法》编制组

2025 年 08 月 11 日