

《第二代高温超导带材电镀铜表面处理 技术规范》（征求意见稿） 编制说明

一、工作简况

（一）任务来源

本文件由中国技术市场协会提出并归口，经中国技术市场协会标准化工作委员会批准，正式列入 2026 年团体标准制修订计划，标准名称为《第二代高温超导带材电镀铜表面处理技术规范》。

（二）项目背景

第二代高温超导带材（2G HTS tape）是以稀土钡铜氧化物（ReBCO）为超导层、采用涂层导体技术制备的新型超导材料，具有高的上临界磁场和优异的载流能力，在超导电力电缆、超导磁体、超导电机、核聚变装置等领域具有广阔的应用前景。随着国内高温超导带材制备技术的快速进步，第二代高温超导带材的临界电流密度和带材长度不断提升，产业化进程显著加速。

电镀铜是第二代高温超导带材生产过程中的关键表面处理工序。铜镀层不仅为超导带材提供稳定的保护层和电/热稳定化功能，还直接影响带材的绕制加工性能、焊接性能和长期服役可靠性。当前，国内从事高温超导带材电镀铜处理的企业和研究机构逐渐增多，但各单位的工艺流程、电镀液配方、工艺参数控制范围、镀层质量验收标准不统一，不同企业之间的产品质量差异较大，上下游对接时缺乏统一的技术依据，制约了超导带材产业的规模化应用和健康发展。

现有国标和行标体系中，尚无专门针对第二代高温超导带材

电镀铜表面处理的技术规范。通用的金属电镀标准仅涉及镀层附着力、厚度测量等基础试验方法，未针对超导带材的特殊结构做出专项规定。行业亟需制定一部涵盖工艺流程、原材料要求、电镀液技术要求、工艺参数、镀层质量要求、超导性能保护要求及配套试验方法的综合性技术规范，填补细分领域标准空白。

为解决上述行业痛点，亟需制定团体标准，统一规定第二代高温超导带材电镀铜表面处理的技术要求和试验方法，为带材生产企业、下游应用单位、第三方检测机构提供统一技术依据，推动国内高温超导带材产业高质量发展。

（三）目的意义

1. 目的

（1）建立专项技术评价体系

针对第二代高温超导带材电镀铜表面处理的特殊需求，明确工艺流程与系统构成、原材料要求、电镀液技术指标、工艺参数窗口、镀层质量指标、超导性能保护要求及配套试验方法，统一行业评价标尺，使不同企业的产品质量具备可比性，引导企业优化电镀铜全流程管控，提升镀层质量和批次一致性。

（2）规范产业链质量管控秩序

为高温超导带材电镀铜表面处理的工艺设计、生产制造、质量检验、交付验收全流程提供技术依据，缓解当前各单位工艺标准各行其是、质量判定尺度不一的现状，降低上下游对接成本，提升供应链运行效率。

（3）支撑技术迭代与产业升级

以标准为抓手，推动行业在物理气相沉积-电化学镀铜复合

工艺、电镀液成分优化、镀层均匀性控制、超导性能保护等关键环节的技术提升，提升国产高温超导带材表面处理质量水平，增强国内超导材料供应链自主保障能力。

2. 意义

（1）促进行业整体技术进步

统一的专项技术规范有利于生产企业、应用单位、科研机构开展技术交流，减少低水平重复试产，推动物理气相沉积、高速电镀、精密温控、在线检测等技术迭代，降低镀层废品率，助力国内超导带材表面处理技术向高精度、高可靠性方向升级。

（2）提升超导带材产业链应用效率

标准规定明确的镀层质量指标、超导性能保护要求与检测手段，便于下游应用企业开展供应商准入、来料检验、产品验收，减少镀层质量波动带来的超导器件性能退化风险，缩短产品验证周期，推动国产高温超导带材大规模工程化应用。

（3）保障超导材料供应链安全可控

立足国内高温超导带材产业实际工况制定团体标准，补充细分领域标准短板，减少对国外企业技术规范的依赖，提升国产超导带材表面处理的可靠性和一致性，支撑国内超导电力、超导磁体、核聚变等战略领域的稳定发展。

（四）起草单位及起草人名单

本文件起草单位：中国科学院赣江创新研究院、东莞市迈斯纳材料科技有限公司、北京中研博采技术服务有限公司。

本文件主要起草人：黄丰、惠杨蜀秦、乐志斌、夏卫彬。

（五）主要起草过程

1. 文本调研

2026 年 2 月启动了文本的调研工作，并于 2026 年 3 月完成了相关资料的收集和分析工作。

2. 标准立项

2026 年 6 月向中国技术市场协会标准化委员会提出申请，于 2026 年 6 月 12 日获得中国技术市场协会标准化工作委员会批准立项。

3. 形成标准草案

2026 年 6 月，起草组对资料收集情况进行汇总处理，确定了标准框架和主要内容。2026 年 7 月 6 日，《第二代高温超导带材电镀铜表面处理技术规范》形成标准初稿。

4. 形成征求意见稿

2026 年 7 月 16 日至 2026 年 8 月 24 日，起草组根据反馈的意见和建议，对草案内容进行了修改和调整，形成标准征求意见稿。

二、确定标准主要内容的论据

（一）编制原则

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》以及《中国技术市场协会团体标准工作程序》的规定起草。

（二）标准主要内容及适用范围

本文件规定了第二代高温超导带材电镀铜表面处理技术的工艺流程与系统构成、技术要求、试验方法等内容。

本文件适用于以稀土钡铜氧化物（ReBCO）为超导层的第二

代高温超导带材的电镀铜表面处理，其他类型高温超导带材的电镀铜处理可参照执行。

（三）确定标准主要内容的论据

1. 解决行业关键工艺技术指标不统一的核心痛点

当前行业对第二代高温超导带材电镀铜表面处理的工艺路线差异显著，部分企业直接采用电化学镀铜，导致电镀液通过银层表面缺陷腐蚀超导层，造成临界电流严重退化。本规范明确了“物理气相沉积+电化学镀铜”的复合工艺路线，要求在电化学镀铜前先通过物理气相沉积形成 $0.5\ \mu\text{m}\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 致密铜层，封闭银层原有缺陷，避免电镀液腐蚀超导层。同时，针对镀层厚度均匀性、结合力、孔隙率、临界电流保持率等核心指标明确了量化要求和统一的测试方法，旨在解决因标准缺失导致的产品性能无法客观比较、质量纠纷频发的行业难题。

2. 满足下游超导装备制造对电镀铜层的严苛应用需求

超导装备制造对电镀铜层的要求不仅在于其本征性能，更在于其对绕制工艺和最终器件性能的影响。本规范的技术要求紧密围绕应用需求设定：规定不同镀层厚度满足不同规格带材需求；规定宽度方向厚度差 $\leq 5\ \mu\text{m}$ 、任意 10mm 范围内纵向极差 $\leq 3\ \mu\text{m}$ 、两侧端部厚度差 $\leq 1\ \mu\text{m}$ 以保证绕制时线圈尺寸精度；规定划格法和弯折法结合力无剥落以确保绕制弯折时不分层；规定最大孔径 $\leq 2\ \mu\text{m}$ 且无贯穿性孔洞以防止后续浸渍或使用中发生电化学腐蚀；规定弯曲直径 $\leq 6\text{mm}$ 以适配超导线圈的小弯曲半径绕制需求；规定沙面铜层粗糙度 $50\text{nm}<\text{Ra}\leq 200\text{nm}$ 以保证绕制线圈时层间具有适当的摩擦系数，防止饼体出现轴向滑动偏移。这些指标

共同构成了面向应用的质量评价体系，能够有效指导下游用户进行科学选型与质量验收。

3. 强化超导性能保护，筑牢工艺安全底线

超导性能（临界电流 I_c ）的保持是电镀铜表面处理工艺的生命线。本规范基于行业工艺实践和失效案例分析，首次系统性地提出了超导性能保护要求：一是临界电流保持率要求，宽带（ $\geq 10\text{mm}$ ） $\geq 97\%$ ，窄带（ $< 10\text{mm}$ ） $\geq 95\%$ ；二是过程温度限制，电镀过程中带材本体最高温度 $\leq 80^\circ\text{C}$ ，防止 REBCO 层热退化；三是氢脆风险控制，要求避免使用强还原性、强络合性或高析氢倾向的工艺，通过维持适量的氯离子和有机添加剂抑制吸附氢的产生。这些要求的提出，为行业在产品性能和工艺效率之间设定了清晰的安全边界。

4. 推动制备工艺标准化与产业链协同发展

第二代高温超导带材电镀铜表面处理涉及材料、表面工程、装备制造等多个领域。本规范通过统一工艺流程、电镀液组成、工艺参数和试验方法，为不同技术路线和装备条件的企业提供了公平的比较平台和明确的提升方向。这有助于上游带材供应商、电镀加工企业、超导设备集成商围绕统一目标进行协同开发，加速形成规模化和标准化供应能力，为我国超导产业的快速规模化奠定工艺基础。

三、主要试验[或验证]情况分析、技术经济论证、预期经济效果

起草工作组联合国内超导带材生产企业、应用单位及第三方检测机构，选取不同工艺条件（PVD+电镀复合工艺）的超导带材

样品开展多批次验证试验，累计完成试验项目 80 余项，获取有效试验数据 500 余组，验证标准各项指标的合理性。

1. PVD 铜层质量验证

对物理气相沉积铜层开展致密度、厚度和附着力验证：在真空度 $\leq 5 \times 10^{-3}$ Pa、温度 $\leq 150^{\circ}\text{C}$ 条件下沉积的 PVD 铜层，厚度稳定在 $0.5\ \mu\text{m} \sim 1.5\ \mu\text{m}$ 范围内，可有效封闭银层表面孔径 $\leq 5\ \mu\text{m}$ 的针孔缺陷；PVD 铜层与银层的附着力优良，划格试验无剥落；沉积温度超过 150°C 时，超导带材 I_c 保持率出现明显下降趋势，验证了温度上限 150°C 的合理性。

2. 电镀工艺参数验证

对预镀铜、光亮铜、沙面铜三个电镀步骤开展工艺参数优化验证：预镀铜电流密度低于 $6\ \text{A}/\text{dm}^2$ 时，种子层致密度不足，后续镀层均匀性下降；光亮铜电流密度超过 $3.5\ \text{A}/\text{dm}^2$ 时，镀层表面粗糙度显著增大，出现烧焦缺陷；沙面铜的粗糙度随电流密度和添加剂浓度的变化呈现规律性变化，在 $3 \sim 8\ \text{A}/\text{dm}^2$ 范围内可获得 $R_a=50\text{nm} \sim 200\text{nm}$ 的可控沙面结构。上述验证结果支持了标准中工艺参数范围的设定。

3. 镀层质量指标验证

对标准规定的镀层厚度、均匀性、粗糙度、纯度、结合力、孔隙率、弯曲性能和抗高温氧化性指标开展系统验证：标准参数条件下制备的镀铜带材，总铜层厚度（单面）可稳定控制在 $15\ \mu\text{m} \pm 3\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m} \pm 5\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m} \pm 8\ \mu\text{m}$ 三个等级范围内；同截面厚度差 $\leq 5\ \mu\text{m}$ 、纵向极差 $\leq 3\ \mu\text{m}$ 、两侧端部差 $\leq 1\ \mu\text{m}$ 的均匀性指标可重复达成；镀层铜含量稳定 $\geq 99.9\%$ ；划格法和弯折法结合

力试验均满足要求；弯曲直径 6mm 条件下镀层无开裂；150℃保温 30min 抗高温氧化性试验合格。

4. 超导性能保护验证

对电镀铜前后的超导带材开展临界电流对比测试：采用标准规定的 PVD+电镀复合工艺，宽度 $\geq 10\text{mm}$ 的宽带材 I_c 保持率稳定在 97%以上（典型值 98%~99%）；宽度 $< 10\text{mm}$ 的窄带 I_c 保持率在 95%以上（典型值 96%~98%）。过程温度监控显示，在标准规定的工艺参数范围内，带材本体最高温度可控制在 80℃以下。上述结果验证了超导性能保护要求的合理性和可达性。

5. 检测方法验证

对金相显微镜法、X 射线光谱法测厚、ICP-MS 纯度分析、划格法/弯折法结合力测试、触针式轮廓仪粗糙度测量等试验方法开展比对验证，证明标准选用的试验方法可复现，不同实验室之间检测结果偏差在允许范围内，仲裁方案可行。

（二）技术经济论证

本标准实施将从产业链、企业、产业经济层面产生显著价值：

1. 产业链层面

上游原材料和设备端：标准明确了铜阳极、硫酸铜、硫酸、添加剂等原材料的纯度要求以及电镀设备的性能指标，倒逼上游原辅材料和设备供应商提升产品质量，推动国产高纯铜靶材、精密整流电源、在线检测装备等配套产业的升级。

中游带材生产企业：统一技术条件减少供需双方因验收标准不一致产生的返工、复检、退货损失；标准化工艺窗口有利于企业优化工艺参数，降低试错成本，预计行业镀铜一次合格率可提

升 3%~5%，降低废品损耗。

下游超导应用企业：统一验收依据，减少超导带材采购技术协议编制工作量，降低入厂检验判定争议，缩短超导器件开发验证周期，降低供应链质量风险。

2. 企业层面

企业为达到标准指标需要完善 PVD 设备、电镀过程监控、超导性能检测等能力建设，短期会带来一定的设备与检测投入；但良品率提升、质量纠纷减少可以带来收益，多数企业可在 1~2 个生产周期消化投入；符合标准的高质量镀铜带材更便于进入超导应用企业供应商体系，提升企业市场竞争力。

3. 产业经济层面

高温超导带材是超导电力、超导磁体、核聚变等国家战略性新兴产业的关键基础材料。标准推动国内超导带材电镀铜表面处理质量提升，减少因镀层质量缺陷造成的带材报废和超导器件失效，降低全产业链资源浪费，助力超导产业降本增效。

（三）预期经济效果

1. 产业规模效益

标准实施后，引导国内高温超导带材电镀铜行业向高精度、高可靠性方向发展，助力国产超导带材扩大在超导电缆、超导磁体、超导限流器等工程领域的配套比例，推动超导带材表面处理行业专业化分工，培育一批高质量的配套企业。

2. 成本降低效益

通过统一技术指标和检验方法，减少供需双方的质量争议与重复检测成本；提升镀铜良品率，降低原材料、能源消耗，助力

超导带材降本增效，加速超导技术的商业化推广。

3. 技术创新效益

标准引导企业聚焦 PVD-电镀复合工艺优化、电镀液成分设计、镀层均匀性控制、超导性能保护等核心技术研发，促进行业研发投入，推动第二代高温超导带材表面处理技术的持续创新。

四、采用国际标准和国内外先进标准的程度

本文件不涉及国际国外标准的采标情况。

五、重大分歧意见处理经过及依据

本文件在制定过程中未出现重大分歧意见。

六、与现行相关法律、法规及相关标准的协调性

与现行相关法律、法规及相关标准相协调。

七、知识产权情况说明

本文件不涉及必要专利等知识产权情况。

八、其他应予说明的事项

无。

《第二代高温超导带材电镀铜表面处理技术规范》

团体标准工作组

2026 年 9 月 3 日