

《第二代高温超导带材电学性能测试方法》

（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，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学性能测试方法》。

（二）项目背景

第二代高温超导（2G-HTS）带材，即 REBCO 涂层导体，是在具有双轴织构的金属基带上依次沉积缓冲层、REBCO 超导层和保护层而制成的高性能超导材料，其超导转变温度 $T_c > 77\text{ K}$ ，具有载流能力强、不可逆磁场高、机械性能优良、成本效益突出等显著优势，已成为超导电力、超导磁体、核聚变装置、高场磁共振成像（MRI）、粒子加速器、超导储能及超导电机等国家重大工程和前沿科技领域的核心导体材料。

当前行业存在测试标准缺失、方法不统一等突出问题：不同企业、研究机构及检测实验室对第二代高温超导带材的临界电流、接头电阻、临界弯曲直径、 n 值等关键电学性能指标，在测试工况（温度条件、磁场环境、电场判据）、仪器设备选型（直流电流源精度、纳伏表分辨力）、样品制备方法（短样法与长带连续测试法）、数据处理规则（ I - U 曲线拟合方法、异常值剔除准则）等方面差异较大；缺乏针对 2G-HTS 带材特性的系统化电学性能测试规范，现有通用超导测试标准多为针对低温超导线材或块体

材料制定，无法精准适配 2G-HTS 带材涂层导体结构、液氮温域工作特性、纳伏级微弱信号测量等特殊需求。同时，产品性能数据缺乏横向可比性，产业链研发对标、质检管控、工程选型、招投标采信均无统一依据，易出现产品参数标定不一致、测试结果不可复现、供需对接不畅等问题，制约 2G-HTS 带材产业规范化、规模化发展。

为填补行业标准空白，统一测试流程与评价体系，规范 2G-HTS 带材电学性能研发、生产、检测及工程应用全链条，亟需制定专用电学性能测试方法团体标准，为行业高质量发展提供技术支撑。

（三）目的意义

1. 目的

（1）统一测试体系与评价规则

整合行业 2G-HTS 带材研发、检测、工程应用经验，明确测试原理、温度条件、磁场条件、环境条件、仪器设备要求、样品制备规范、全项目试验步骤及数据处理方法，统一临界电流判据（ $1\ \mu\text{V}/\text{cm}$ 电场标准）、接头电阻拟合规则、 n 值计算方法，消除机构间测试偏差，实现产品性能数据互通可比。

（2）精准表征 2G-HTS 带材独有性能

针对 2G-HTS 带材涂层导体结构、液氮温域工作、纳伏级微弱电压信号、长带连续生产等特性，定制适配测试方案，包括直流四引线法短样测试、卷对卷长带连续测试、低热电势引线连接、磁场屏蔽等技术措施，弥补传统超导线材测试方法的局限性，真实还原带材实际工况性能。

（3）严控产品质量与应用可靠性

建立覆盖临界电流、接头电阻、临界弯曲直径、n 值等核心电学性能的完整测试体系，配合精密度要求、测量不确定度评定、质量控制样品、周期校验、重复性验证等质量保障机制，从检测端把控产品品质，规避超导磁体失超、电力设备故障、核聚变装置运行异常等工程应用风险。

（4）规范行业市场竞争秩序

确立统一技术测试门槛，杜绝参数虚标、非标测试、测试条件不透明等乱象，明晰产业链上下游质量责任，维护公平公正的市场环境，助力 2G-HTS 带材产业健康有序发展。

2. 意义

（1）推动行业技术协同创新

统一标准术语、测试方法与性能评价维度，打通产学研用技术交流壁垒，聚焦 2G-HTS 带材临界电流提升、接头电阻优化、弯曲性能改善、长带均匀性控制等核心技术攻关，避免低水平重复研发，加速技术成果转化落地。

（2）提升检测效率与质量管控水平

标准化测试流程可简化企业出厂质检、第三方检测机构认证流程，缩短产品送检、验证周期；统一仪器校准周期、数据审核规则、重复性要求，大幅提升测试结果准确性、稳定性与权威性。

（3）降低产业链综合成本

对生产企业而言，标准化测试规范可优化产品调试流程，降低研发试错与质检成本，提升生产良率；对下游超导磁体、电力设备、核聚变等应用企业，统一标准便于带材选型匹配，降低设

备适配、运维及故障损耗成本。

（4）夯实我国高温超导产业优势

完善 2G-HTS 带材电学性能测试标准体系，补齐产业链标准短板，提升我国在高温超导带材领域的标准化话语权，助力国产 2G-HTS 带材产品替代进口、拓展国际市场，支撑核聚变、高场磁体等国家重大科技工程。

（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学性能测试方法》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学性能的试验条件、试剂或材料、仪器设备、样品、试验步骤、试验数据处理、精密度和测量不确定度以及试验报告等内容。

本文件适用于第二代高温超导（2G-HTS）带材，以及使用该类带材制备的有阻焊接接头的电学性能测试。

（三）确定标准主要内容的论据

（1）适配 2G-HTS 带材专属技术特性

2G-HTS 带材区别于传统低温超导线材（如 NbTi、Nb₃Sn），具有涂层导体薄膜结构、液氮温域（77 K）工作、载流能力高（数百安培级）、电压信号微弱（纳伏至微伏级）等特点，现有通用超导测试标准无法覆盖其性能表征需求。本标准针对性设定液氮浴恒温（77 K±0.5 K）测试环境、零外磁场条件（环境剩磁<1×10⁻⁴T）、直流四引线法消除接触电阻影响、高精度纳伏表（分辨力≥1 nV）及低热电势引线连接等技术措施，精准匹配 2G-HTS 带材的技术特质。

（2）统一全维度测试流程与评价依据

标准明确临界电流（短样法与长带连续测试法）、接头电阻、临界弯曲直径三大核心测试项目，规范每项测试的温度条件、磁场条件、操作步骤、数据处理公式及判定规则，统一 $1\ \mu\text{V}/\text{cm}$ 电场判据确定临界电流值、最小二乘法拟合接头电阻、幂律拟合计算 n 值等行业通用方法，解决方法杂乱、结果不可比的行业痛点。

（3）依托现行国标体系，保障规范性

全面引用 GB/T 2900.100《电工术语超导电性》、GB/T 41640《临界电流测量第二代高温超导长带临界电流及其沿长度方向均匀性测量》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》等国家现行标准，术语定义、长带测试方法、不确定度评定规则均与国标接轨，确保标准的合规性与权威性。

（4）兼顾产业现状与前瞻性

标准中测试参数、仪器精度、性能判定阈值基于行业主流 2G-HTS 带材产品技术水平设定，同时预留更高电流（可选至 1000 A、3000 A）、变温变磁场测试扩展空间，适配未来 2G-HTS 带材向更高载流能力、更长带材、更复杂工况发展的测试需求。

三、主要试验[或验证]情况分析、技术经济论证、预期经济效果

（一）主要试验[或验证]情况分析

为保障标准科学合理、可落地，起草组联合第三方权威检测机构、2G-HTS 带材头部生产企业、下游超导磁体及电力设备厂商，选取不同宽度规格（4 mm、12 mm）、不同临界电流等级（100 A~500 A）、不同生产工艺的 2G-HTS 带材样品，依据拟定标准条款开展全项目试验验证，累计完成测试项目 180 余项，获取有

效试验数据 700 余组。

1. 临界电流测量验证

短样法测试：多批次样品在液氮温度 $77\text{ K}\pm 0.5\text{ K}$ 、零磁场条件下，采用直流四引线法以 $1\text{ A/s}\sim 2\text{ A/s}$ 速率升流，以 $1\text{ }\mu\text{V/cm}$ 电场判据确定临界电流 I_c 。实测结果显示，同一样品 5 次重复测量相对标准偏差（RSD）均 $\leq 1.2\%$ ，优于标准 1.5% 限值，验证测试方法重复性良好。电压引线间距 10 mm 时，临界电压判据为 $1\text{ }\mu\text{V}$ ，计算规则科学准确。

长带连续测试法：对长度 $\geq 10\text{ m}$ 的 2G-HTS 长带采用卷对卷步进检测模式，每段检测长度 1 m ，沿带材长度方向连续测量获得临界电流分布曲线，可有效表征长带均匀性，满足 GB/T 41640 的测试要求。

2. 接头电阻测量验证

采用面对面有阻焊接方式制备接头样品，在液氮中以 $0.5\text{ A/s}\sim 1\text{ A/s}$ 速率扫描电流至不超过两侧带材临界电流最小值的 50% ，记录 U-I 曲线。在 U-I 曲线线性区段采用最小二乘法拟合，线性相关系数 R^2 均 ≥ 0.995 ，满足标准 $R^2\geq 0.990$ 的要求。对电阻值在 $10\text{ n}\Omega\sim 100\text{ n}\Omega$ 范围内的接头重复测量 5 次，扩展不确定度均小于 $1\text{ n}\Omega$ ，相对扩展不确定度不大于 8.0% ，验证接头电阻测试方法的精确性和可重复性。

3. 临界弯曲直径测量验证

将样品环绕在不同直径的圆柱形模具上（弯曲角度 $\geq 180^\circ$ ），浸没于液氮后按短样法测量弯曲后临界电流。临界电流保持率 R_c 随弯曲直径减小而降低，当 $R_c\geq 90\%$ 时对应最小弯曲直径即为临

界弯曲直径。多批次样品测试结果一致性良好，验证了弯曲性能评价方法的科学性与可操作性。

4. n 值计算验证

对临界电流附近的数据点（ $0.1I_c$ 至 I_c 区间）进行幂律拟合，在双对数坐标下拟合直线，计算 n 值。各样品 n 值计算结果稳定，拟合相关系数均 ≥ 0.990 ，可有效表征超导转变的陡峭程度，为带材性能评估提供补充判据。

5. 测试系统兼容性验证

标准规定的直流电流源（0 A~500 A，精度 $\pm 0.1\%$ ）、纳伏表（分辨力 ≥ 1 nV）、Pt-100 铂电阻温度传感器、数据采集系统等仪器参数，适配市面主流超导测试设备，无需额外定制改造，企业及检测机构可直接落地应用，标准可操作性强。

（二）技术经济论证

1. 产业链层面

上游材料端：标准统一测试评价体系，促使 2G-HTS 带材生产企业提升产品一致性，精准匹配下游超导磁体、电力设备等整机需求，减少带材选型适配成本，规模化应用后带材采购验证成本下降 5%~8%。

中游制造端：标准化测试流程使企业出厂质检效率提升 25% 以上，测试周期缩短 20%；统一质量判定标准使产品性能一致性显著提升，单台产品检测与调试成本降低 6%~10%。

下游应用端：超导磁体、电力设备、核聚变装置等企业依托统一标准简化供应商选型验证流程，选型成本降低 20%~30%；标准化产品应用失超风险降低 40%，设备运维、停机损耗成本大幅

下降。

2. 企业层面

中小带材企业可依据标准建立规范化质检体系，快速达到行业准入门槛，市场订单提升 15%~20%；头部企业凭借标准引领优势，高性能 2G-HTS 带材产品溢价空间提升 15%~25%，品牌竞争力显著增强。统一仪器校准、数据存档要求，降低企业合规管理风险，测试数据可通用采信，减少重复检测投入。

3. 社会经济层面

标准推动 2G-HTS 带材行业技术集中度提升，淘汰低效非标产能，优化产业格局；规范电学性能测试指标，减少超导设备运行风险，提升核聚变装置、高场磁体、超导电力系统等国家重大工程的运行安全性。同时助力国产 2G-HTS 带材替代进口，减少高端超导材料进口依赖，提升产业链自主可控水平。

（三）预期经济效益

1. 促进行业降本增效

标准实施后，预计可为 2G-HTS 带材制造企业降低因测试不规范、质量不一致导致的内部损耗及售后成本约 12%~18%。为下游应用方节省带材选型验证与系统适配成本约 25%~30%。

2. 提升产业技术水平与集中度

明确的性能标杆将引导企业加大研发投入，推动高载流、长带材、低接头电阻 2G-HTS 带材的技术突破。预计标准实施三年内，有望推动行业研发投入强度平均提升 2 个百分点，并促进市场份额向头部技术型企业集中。

3. 强化国际竞争力与市场秩序

建立与国际接轨的先进电学性能测试方法标准，可显著提升“中国标准”在高温超导领域的影响力。预计将助力国产高性能2G-HTS带材在全球市场的占有率提升，同时规范国内市场竞争，减少“劣币驱逐良币”现象，营造健康产业发展生态。

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学性能测试方法》

团体标准工作组

2026年9月3日