

团 体 标 准

T/TMAC ×××—202X

第二代高温超导带材电学性能测试方法

Test methods for electrical properties of second-
generation high-temperature
superconducting tapes

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

已授权的专利证明材料为专利证书复印件或扉页，已公开但尚未授权的专利申请证明材料为专利公开通知书复印件或扉页，未公开的专利申请的证明材料为专利申请号和申请日期。

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国技术市场协会 发布

中国技术市场协会（TMAC）是科技领域内国家一级社团，以宣传和促进科技创新，推动科技成果转移转化，规范交易行为，维护技术市场运行秩序为使命。为满足市场需要，做大做强科技服务业，依据《中华人民共和国标准化法》《团体标准管理规定》，中国技术市场协会有序开展标准化工作。本团体成员和相关领域组织及个人，均可提出修订 TMAC 标准的建议并参与有关工作。TMAC 标准按《中国技术市场协会团体标准管理办法》《中国技术市场协会团体标准工作程序》制定和管理。TMAC 标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议多数专家、成员的同意，方可予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料反馈至中国技术市场协会，以便修订时参考。

本作品著作权归中国技术市场协会所有。除了用于国家法律或事先得到中国技术市场协会正式授权或许可外，不许以任何形式复制本文件。第三方机构依据本文件开展认证、评价业务，须向中国技术市场协会提出申请并取得授权。

中国技术市场协会地址：北京市海淀区复兴路甲 23 号城乡华懋大厦 12 层 1217。

邮政编码：100036 电话：010-68270447 传真：010-68270453

网址：www.ctm.org.cn 电子信箱：136162004@qq.com

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 原理 1

5 试验条件 2

 5.1 温度条件 2

 5.2 磁场条件 2

 5.3 环境条件 2

6 试剂或材料 2

7 仪器设备 2

8 样品 3

 8.1 样品要求 3

 8.2 样品制备 3

 8.3 样品存放 3

 8.4 样品标识 3

9 试验步骤 3

 9.1 试验准备 3

 9.2 临界电流测量（短样法） 3

 9.3 临界电流测量（长带连续测试法） 4

 9.4 接头电阻测量 4

 9.5 临界弯曲直径测量 4

10 试验数据处理 5

 10.1 临界电流数据处理 5

 10.2 接头电阻数据处理 5

 10.3 n 值计算 5

11 精密度和测量不确定度 5

 11.1 精密度 5

 11.2 测量不确定度 5

12 质量保证和控制 6

 12.1 质量控制样品 6

 12.2 周期校验 6

 12.3 空白试验 6

 12.4 重复性验证 6

 12.5 期间核查 6

 12.6 异常数据处理 6

13 试验报告 6

参 考 文 献 8

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。

本文件由中国技术市场协会提出并归口。

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。

第二代高温超导带材电学性能测试方法

1 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。

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 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

3 术语和定义

GB/T 2900.100、GB/T 41640界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

第二代高温超导带材 second-generation high-temperature superconducting tapes (2G-HTS tape)

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（Ag层和Cu稳定层）而制成的涂层导体，其超导转变温度 $T_c > 77$ K，通常称为YBCO涂层导体或REBCO涂层导体。

3.2

接头电阻 joint resistance R_j

焊接接头区域在有阻焊接条件下呈现的电阻值，通常通过测量接头区域的U-I曲线，拟合线性部分的斜率获得。

3.3

临界弯曲半径 critical bending radius

超导带材在液氮温度下能够保持其临界电流不低于原始值90%的最小弯曲半径。

4 原理

本文件基于直流四引线法（传输法）的原理进行电学性能测试。该方法通过在样品两端通入直流电流，于样品中部两个电压测点之间测量电势差，以消除接触电阻和引线电阻对测量结果的影响。当样品处于超导态时，电压测点间的电势差接近为零；当通入的电流超过临界电流时，样品部分区域失超转为正常态，电压显著升高。通过恒定速率增加电流，记录电流—电压（I-U）特性曲线，在 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 电场判据下确定临界电流值。对于接头电阻测试，则拟合U-I曲线线性部分的斜率获得电阻数据。

5 试验条件

5.1 温度条件

试验应在液氮（LN₂）浴中进行，测试温度保持为77 K±0.5 K。温度监测点应设置在距离样品表面不超过5 mm的位置，使用经过校准的Pt-100铂电阻温度传感器或等效精度的测温元件（精度不低于±0.1 K）。温度波动应在±0.2 K范围内。

5.2 磁场条件

临界电流测量应在零外磁场条件下进行。环境剩磁应小于1×10⁻⁴ T。如测试环境存在地磁场影响，应对测试区域进行磁屏蔽处理，使剩余磁场强度不大于5×10⁻⁵ T。

5.3 环境条件

测试应在相对湿度不大于65%，环境温度23℃±5℃的条件下进行。测试区域应避免气流扰动和机械振动。

6 试剂或材料

第二代高温超导带材电学性能测试需要的试剂或材料应符合表1规定。

表 1 试剂或材料

名称	技术指标	备注
液氮	纯度≥99.99%；带液位指示槽	完全浸没样品
导电银浆	电阻率≤5×10 ⁻⁵ Ω·cm（室温）；适用温度范围77 K～室温	用于电压引线粘接
低熔点钎料（钎装带材）	SnBi合金（熔点138℃）或InSn合金（熔点118℃）	用于电流引线焊接
SnPb钎料（电镀铜带材）	SnPb合金（熔点183℃）或低熔点合金钎料（熔点≤200℃）	用于电流引线焊接
铜片	纯度≥99.99%；厚度0.1 mm±0.02 mm；尺寸略大于电流电极接触面	用于压接方式
绝缘胶带或聚酰亚胺薄膜	击穿电压≥500 V；耐温范围77 K～150 K	用于电压引线间电气隔离

7 仪器设备

第二代高温超导带材电学性能测试需要的仪器设备应符合表2规定。

表 2 仪器设备

名称	技术指标	备注
直流电流源	输出范围：0 A～500 A（可选至1000 A、3000 A）；精度：±0.1% 读数 或±0.1 A（取大者）；稳定性：≤0.05%/h；纹波：≤0.1% RMS； 升流速率：0.1 A/s～10 A/s（推荐1 A/s～2 A/s）	恒流输出
纳伏表	电压范围：±100 μV～±100 mV；分辨率：≥1 nV；精度：±0.1% 读数±10 nV（1 μV量程）；输入阻抗：≥10 GΩ；采样率：≥10 S/s	电压测量
电压端子与引线	双绞铜线，线径0.1 mm～0.3 mm，长度≤500 mm；接触电阻≤0.1 Ω；温差电势通过极性反转补偿	低热电势连接
电极滚轮（卷对卷）	铜合金（黄铜或铍铜）；接触压力可调，接触电阻≤0.1 Ω；转速与采集速率同步	用于长度≥10 m长带连续测试
数据采集系统	采样频率≥10 Hz；A/D位数≥16 bit；同步记录电流（A）、电压（V）、温度（K）；具备I-U曲线实时绘制及I _c 自动判别功能	多通道同步采集
恒温容器（杜瓦瓶）	有效容积≥5 L，开口直径≥150 mm；带透光观察窗或液位计；底部有样品支架固定装置	液氮浴恒温
铂电阻温度传感器	Pt-100型；测量范围77 K～300 K；精度±0.1 K（77 K时）；响应时间≤5 s（液氮中）	温度监测
屏蔽电缆	双绞屏蔽电缆，屏蔽层单端接地	连接纳伏表与电压测点，抗工频干扰

8 样品

8.1 样品要求

8.1.1 第二代高温超导（2G-HTS）带材的宽度常见规格为 4 mm 和 12 mm。临界电流测试用样品长度应不小于 100 mm（若采用四引线短样法）或不小于 10 m（长带连续测试法）。

8.1.2 焊接接头样品中，焊接接头长度 L_5 应介于 10 mm~200 mm 之间。为防止电流转移效应的影响，电流引线电极与电压引线电极的最小间距（ $L_3+L_4+L_6$ ）不应小于 10 mm。

8.2 样品制备

8.2.1 临界电流测试用样品制备步骤如下：

- a) 从长带上切取待测长度样品，切割时避免机械损伤和热影响区；
- b) 去除样品两端超导层和缓冲层（约 5 mm 长度）露出金属基带，作为电流输入端；
- c) 在样品中部（电压测点处），用机械或化学方法去除覆盖的保护层，露出超导层表面（若用于电压测点引线焊接）；
- d) 在液氮环境中检查样品绝缘完好性。

8.2.2 焊接接头样品制备要求：焊接接头制作应采用面对面的对接方式。接头焊接宜采用助焊剂清洗待焊表面，焊接温度不应超过 200 °C（对于低熔点钎料）或 300 °C（对于 SnPb 钎料）。焊接完成后应在空气中自然冷却至室温，不应使用水冷强制冷却。

8.3 样品存放

测试前样品应存放于干燥环境中（相对湿度不大于 30%），并应避免阳光直射和高温（超过 40 °C）环境。

8.4 样品标识

每根样品应有唯一标识，标明带材生产商、批号、宽度、长度和原始临界电流标称值等信息。

9 试验步骤

9.1 试验准备

9.1.1 仪器校准：直流电流源和纳伏表应在校准有效期内，校准周期不得超过 12 个月。测试前应进行预热，预热时间不小于 30 min。

9.1.2 样品安装：将样品安装在杜瓦瓶内的样品架上。对于短样测试，采用四引线法连接：电流引线分别连接样品两端，电压引线在样品中部进行焊接或压接。电流引线和电压引线之间的间距应不小于样品宽度的 10 倍。

9.1.3 引线连接检查：用万用表检查电路导通性，确认电流环路电阻不超过 0.5 Ω ，电压测点与引线间的接触电阻不超过 0.1 Ω 。

9.1.4 液氮预冷：将液氮缓慢注入杜瓦瓶，使样品完全浸没。保持液氮液位高于样品顶部至少 20 mm。待液氮沸腾平息后（约 3 min~5 min），系统达到热平衡，温度稳定至 77 K $\pm$ 0.5 K。

9.1.5 绝缘检查：对于绝缘带材，在液氮中施加 500 V DC 电压，漏电流应小于 10 μ A。

9.2 临界电流测量（短样法）

9.2.1 样品参数记录：记录带材宽度 W (mm)、超导层厚度 d (μ m)、Ag 层厚度 (μ m)、Cu 层厚度 (μ m)、电压引线间距 L_v (mm)。

9.2.2 电流扫描：启动直流电流源，设置升流速率 $\Delta I / \Delta t$ 为 1 A/s~2 A/s。从零电流开始，以恒定速率线性增加电流直至电压达到预定的限值（通常为 100 μ V~500 μ V）。同步记录每一时刻的电流值 I (A) 和电压值 U (μ V)。

9.2.3 数据记录：在升流过程中，采集数据点不少于 100 个。数据记录应包括从零电流开始到终止电

流的全部 I-U 对应值。

9.2.4 临界电流确定：在获得的 I-U 特性曲线上，以 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 的电场判据确定临界电流 I_c 。当电压引线间距 $L_V=10 \text{ mm}$ 时，对应的电压判据按公式（1）计算：

$$U_C = 1 \mu\text{V}/\text{cm} \times L_V \dots\dots\dots (1)$$

式中：

U_C ——临界电压判据，单位为微伏（ μV ）；

L_V ——电压引线间距，单位为厘米（cm）。

9.2.5 重复测试：对于同一样品，应进行不少于 3 次重复测量。每次测量之间应将样品升温至室温并重新浸入液氮，确保热循环完全。取 5 次测量值的算术平均值作为最终结果。

9.2.6 质量控制措施：在临界电流测量过程中，如发现因电流过大（ $>500 \text{ A}$ ）以及电流端接触电阻过大而出现带材局部过热现象，应立即终止测试。电流端接触电阻应在测试前通过四端法予以测定，不应大于 0.1Ω 。

9.3 临界电流测量（长带连续测试法）

9.3.1 本方法适用于单根长度不小于 10 m 的 2G-HTS 长带。

9.3.2 采用卷对卷测量装置，以步进检测模式建立动态传输法测试装备。每段检测长度宜设置为 1 m ，每个检测点对应一个临界电流值。

9.3.3 沿带材长度方向连续测量，绘制临界电流随长度的分布曲线。

9.4 接头电阻测量

9.4.1 将包含焊接接头的样品完全浸没于液氮浴中，待温度稳定至 $77 \text{ K} \pm 0.5 \text{ K}$ 。

9.4.2 采用四引线法，电流回路应覆盖整个焊接接头区域，电压测点应布置在接头两侧各不小于 5 mm 处，确保电压测量段完全包含焊接接头区域。

9.4.3 以 $0.5 \text{ A/s} \sim 1 \text{ A/s}$ 的速率扫描电流 I ，从零电流升至不超过接头两侧带材临界电流最小值（ $\min I_{c1}, I_{c2}$ ）的 50%，记录 U-I 曲线。

9.4.4 在 U-I 曲线上，取线性区段（一般为 $I=0.1 \times \min I_c$ 至 $0.5 \times \min I_c$ 区间），采用最小二乘法拟合直线，其斜率即为接头电阻，按公式（2）计算。

$$R_j = \frac{\Delta U}{\Delta I} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

R_j ——接头电阻，单位为纳欧（ $\text{n}\Omega$ ）；

ΔU ——电压变化量，单位为纳伏（ nV ）；

ΔI ——电流变化量，单位为安培（A）。

9.4.5 对于电阻值在 $0 \text{ n}\Omega \sim 100 \text{ n}\Omega$ 范围内的接头，重复测量不少于 5 次，取算术平均值作为最终结果。

9.4.6 测试完成后应立即记录最大电流值，防止超导带材因电流过大而损坏。

9.5 临界弯曲直径测量

9.5.1 将样品环绕在不同直径 D 的圆柱形模具上，弯曲角度不小于 180° 。

9.5.2 将弯曲后的样品完全浸没于液氮中，按照 9.2 步骤测量弯曲后的临界电流值 $I_{c,bend}$ 。

9.5.3 临界电流保持率按公式（3）计算：

$$R_C = \frac{I_{c,bend}}{I_{c,0}} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中：

R_C ——临界电流保持率；

$I_{c,bend}$ ——弯曲后临界电流，单位为安培（A）；

$I_{c,0}$ ——未弯曲原始临界电流，单位为安培（A）。

9.5.4 临界弯曲直径定义为满足 $R_C \geq 90\%$ 的最小弯曲直径 D_b （mm）。

10 试验数据处理

10.1 临界电流数据处理

10.1.1 对采集的数据点进行滤波处理，去除由电磁干扰产生的异常噪声点。当连续 3 个数据点偏离拟合曲线超过 $\pm 5\%$ 时，应分析原因并剔除异常值。

10.1.2 在 I-U 曲线上确定临界电流 I_c 的方法如下：

- 归一化处理：将电压值 U 转换为电场强度 $E=U/L_v$ ($\mu V/cm$)；
- 以 $E=1 \mu V/cm$ 作为超导态与正常态的分界判据，对应电流值为 I_c ；
- 若 I-U 曲线在 $1 \mu V/cm$ 附近有平缓过渡，宜采用切线交点法确定 I_c 值。

10.1.3 临界电流密度按公式 (4) 计算：

$$J_c = \frac{I_c}{A} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

J_c ——临界电流密度，单位为安培每平方毫米 (A/mm^2)；

I_c ——临界电流，单位为安培 (A)；

A ——带材超导层的横截面积，单位为平方毫米 (mm^2)。

10.2 接头电阻数据处理

10.2.1 对 U-I 曲线中线性部分的离散数据点进行最小二乘拟合，线性相关系数 R^2 应不小于 0.990。若 $R^2 < 0.990$ ，应重新测试。

10.2.2 测量得到的电阻值应取多次测量的算术平均值，按公式 (5) 计算：

$$\bar{R}_j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m R_{j,k} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$\bar{R}_j$ ——接头电阻平均值，单位为纳欧 ($n\Omega$)；

m ——重复测量次数；

$R_{j,k}$ ——第 k 次测量的接头电阻值，单位为纳欧 ($n\Omega$)。

10.3 n 值计算

10.3.1 对临界电流附近的数据点进行幂律拟合。建议拟合范围为 I_c 的 10% 至 100% (即 $0.1I_c$ 至 I_c)。拟合时，应将 I-U 数据同时取对数，拟合直线。

10.3.2 n 值按公式 (6) 计算：

$$n = \frac{\lg(U_2/U_1)}{\lg(I_2/I_1)} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

n ——超导转变陡峭程度指数；

U_2 、 U_1 ——幂律区间内的两点电压，单位为微伏 (μV)；

I_2 、 I_1 ——幂律区间内的两点电流，单位为安培 (A)。

11 精密度和测量不确定度

11.1 精密度

11.1.1 临界电流测量：在液氮温度 $77 K \pm 0.5 K$ 和零磁场条件下，使用经校准的同一测试系统对同一超导带材样品进行重复性测量 (不少于 5 次)，临界电流的相对标准偏差 (RSD) 应不大于 1.5%。不同实验室间的复现性相对标准偏差应不大于 3.0%，RSD 超过 3% 测试无效。

11.1.2 接头电阻测量：对接头电阻值在 $10 n\Omega \sim 100 n\Omega$ 范围内的样品，重复性测量的扩展不确定度应小于 $1 n\Omega$ ；相对扩展不确定度不大于 8.5%。当电阻值小于 $10 n\Omega$ 时，相对扩展不确定度相应增加。

11.2 测量不确定度

- 11.2.1 测量不确定度的主要来源包括：电流测量误差、电压测量噪声与分辨力、温度波动影响、电压引线间距测量误差、接触电势影响以及随机误差。
- 11.2.2 在 95%置信水平（包含因子 $k=2$ ）下，临界电流测量的相对扩展不确定度 $U_{rel}(I_c)$ 应不大于 3.0%。
- 11.2.3 对于接头电阻测量，在 95%置信水平下，扩展不确定度 $U(R_j)$ 应不大于 $0.5\text{ n}\Omega + 3\% \times R_j$ （当 $R_j \geq 10\text{ n}\Omega$ 时），或不大于 $1.0\text{ n}\Omega$ （当 $R_j < 10\text{ n}\Omega$ 时）。
- 11.2.4 不确定度评定应遵循 JJF 1059.1 规定的方法，区分 A 类评定（统计方法）和 B 类评定（非统计方法）。

12 质量保证和控制

12.1 质量控制样品

- 12.1.1 质量控制样品（QCP）应采用在液氮温度下临界电流保持稳定的 2G-HTS 带材制备。每个批次的临界电流应在 100 A~300 A 之间。质量控制样品的有效期不应超过 12 个月。
- 12.1.2 质量控制样品的制备应采用与常规样品完全一致的工艺，其临界电流和接头电阻应作为控制指标，分别控制在标称值的 $\pm 2\%$ 和 $\pm 5\%$ 范围内。

12.2 周期校验

- 12.2.1 测试系统应每 3 个月进行一次系统校验，包括：电流源准确度验证（至少检查 3 个电流水平）、纳伏表噪声水平检测（在输入端短路时，噪声电平应低于 10 nV RMS）、Pt-100 温度传感器 77 K 点误差校验（误差不应超过 $\pm 0.1\text{ K}$ ）。
- 12.2.2 仪器设备的校准有效期应参照表 3 的规定执行。

表 3 仪器校准周期

仪器设备名称	校准周期
直流电流源	12个月
纳伏表	12个月
Pt-100温度传感器	6个月
数据采集系统	12个月
千分尺/游标卡尺（用于 L_v 测量）	12个月

12.3 空白试验

- 12.3.1 空白试验：在电流回路断开情况下，测量纳伏表输入端在液氮温度下的噪声电压，应不大于 10 nV RMS。
- 12.3.2 测试系统背景电压（在零电流条件下，两端子间的电势差）应不大于 50 nV，若超过此值，应检查电压引线热电势或化学电势影响并消除。

12.4 重复性验证

- 12.4.1 每个工作日开始测试前，应采用质量控制样品进行 1 次重复性验证测试。测量结果应满足：平均临界电流值与标称值偏差不超过 $\pm 2\%$ 。
- 12.4.2 若重复性验证结果超出允许偏差，应立即停止测试，检查仪器状态和测试条件（包括液氮纯度、浸没深度和温度稳定性），直至重新验证合格后方可继续测试。

12.5 期间核查

- 12.5.1 若测试系统连续 7 个工作日未使用，应重新进行 12.4 条款的全套重复性验证流程。
- 12.5.2 如发现系统升级、部件更换或环境条件异常变化，应立即重新进行系统校验和质量控制样品测试。

12.6 异常数据处理

若测试过程中出现电压跳变（非样品失超引起），该数据点应标记为异常，并在报告中说明。

13 试验报告

试验报告至少应包括以下内容：

- a) 报告编号、日期和签发人；
- b) 委托方信息和样品信息：生产商、批号、宽度、长度、绝缘类型等；
- c) 测试条件：温度($77\text{K} \pm 0.5\text{K}$)、判据($1\mu\text{V}/\text{cm}$ 或 $10\mu\text{V}/\text{m}$)、是否磁屏蔽；
- d) 所使用的测试方法（如变温、变磁场测试应注明）；
- e) 测试结果，包括短样结果、长带结果、接头结果等；
- f) 测量不确定度；
- g) 观察到的异常现象；
- h) 试验日期和环境条件。

参 考 文 献

- [1] GB/T 21227-2021 交流损耗测量 多丝复合超导材料磁滞损耗的磁强计测量法
 - [2] GB/T 22586-2018 电子学特性测量 超导体在微波频率下的表面电阻
 - [3] GB/T 39843-2021 电子学特性测量 大面积超导膜的局域临界电流密度及其分布
 - [4] IEC 61788-7 超导性—第7部分：电子特性测量—超导体在微波频率下的表面电阻
(Superconductivity - Part 7: Electronic characteristic measurements - Surface resistance
of superconductors at microwave frequencies)
-