

# 第二代高温超导长带传输临界电流表征及其 对电压引线间距的依赖性

张永军<sup>1†</sup>, 胡宏伟<sup>1</sup>, 孙佳阳<sup>1</sup>, 刘志勇<sup>1,2,3</sup>, 陆齐<sup>1,3</sup>, 蔡传兵<sup>1,2,3†</sup>

1. 上海上创超导科技有限公司, 上海 201401;

2. 上海大学物理系, 上海 200444;

3. 上海市高温超导重点实验室, 上海 200444

收稿日期: 2022-01-29; 接收日期: 2022-02-28

**【摘要】** 传输法(或四引线法)测量可直观、准确的体现超导材料临界电流特性. 为表征第二代高温超导长带临界电流及其沿长度方向均匀性特征, 本文以四引线法为基础, 建立了动态传输法测量装置, 并对该装置的重复稳定性进行了评估, 同时, 表征了第二代高温超导长带临界电流对电压引线间距的依赖关系. 实验结果发现, 重复性测量不确定度为 0.74% (<1%), 该装置具有良好重复稳定性, 且测量速度达 200~300 m/h, 满足高温超导产业化测量需求; 随着电压引线间距增加, 第二代高温超导长带各测试段临界电流的最大值和最小值分别呈现逐渐减小和增加的趋势, 平均值变化不大, 保持稳定, 其中最大值和最小值向平均值收敛; 各测试段临界电流的标准偏差随电压引线间距的增加而减小, 通过线性拟合得, 标准偏差与电压引线间距关系为:  $s = 3.47 / L_0^{0.36}$ . 传输法测量装置的建立及其关键参数电压引线间距对临界电流表征的影响研究, 对推动第二代高温超导产业化进程具有重大意义.

**关键词:** 第二代高温超导, 传输法测量, 临界电流, 电压引线间距

**PACS:** 74.72.-h, 74.25.F-, 74.25.-q

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2022.03.009

## Characterization of Critical Current of the Second Generation High Temperature Superconductor Long Tape and Its Dependence on Voltage Lead Spacing

ZHANG Yongjun<sup>1†</sup>, HU Hongwei<sup>1</sup>, SUN Jiayang<sup>1</sup>,  
LIU Zhiyong<sup>1,2,3</sup>, LU Qi<sup>1,3</sup>, CAI Chuanbing<sup>1,2,3†</sup>

1. Shanghai Creative Superconductor Technologies Co., Ltd. (SCSC), Shanghai 201401;

2. Physics Department of Shanghai University, Shanghai 200444;

3. Shanghai Key Laboratory of High Temperature Superconductors, Shanghai 200444

Received date: 2022-01-29; accepted date: 2022-02-28

**【Abstract】** At present, the second generation high temperature superconductor has entered the initial stage of industrialization. Critical current and  $n$ -value are important performance indexes for evaluating superconducting tapes, which have an important impact on the safe operation, stability and efficiency of superconducting power devices. The measurement methods of critical current of superconducting tapes are mainly divided into two

<sup>†</sup> yjzhang0323@163.com; chuanbing\_cai@vip.163.com

categories: magnetic induction method and transport method (or Four-point method). Four-point method measurement can directly and accurately reflect the critical current characteristics of high temperature superconducting tapes. Based on the Four-point method, a dynamic transport method measurement device was established, and the repetitive stability of the device is evaluated. At the same time, the dependence of the critical current of the second generation high temperature superconducting short and long tapes on the voltage lead spacing is characterized. The experimental results show that: (1) the expanded uncertainty of repeatability measurement is 0.74% (<1%), which shows good repeatability stability of the device. The measurement speed is up to 200-300 m/h, which meets the requirements of high temperature superconducting industrialization. (2) For short tape sample, the fixed current lead spacing is 25 cm. With the increase of voltage lead spacing, the characteristic value of critical current under 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  criterion shows a trend of increasing first and then gradually constant. When the voltage lead spacing is further increased to 19 cm, the measured  $U$ - $I$  curve includes a resistive component, which shows a slope. When the voltage lead spacing is further increased, the slope increases, which is mainly caused by the smaller distance between the current lead and voltage lead. (3) For long tape samples, with the increase of voltage lead spacing, the maximum and minimum values of critical current in each test section gradually decrease and increase, respectively. While the average value is stable, and the maximum and minimum values converge to the average value. The standard deviation of critical current in each test section decreases with the increase of voltage lead spacing. Through linear fitting, the relationship between standard deviation and voltage lead spacing is  $s = 3.47/L_2^{0.36}$ . The establishment of transport measurement device and the research of the influence of voltage lead spacing (key parameter) on the characterization of critical current are of great significance to promote the industrialization of the second generation high temperature superconductor.

**Keywords:** The second generation high temperature superconductor, Transport measurement, Critical current  $I_c$ , Voltage lead spacing

**PACS:** 74.72.-h, 74.25.F-, 74.25.-q

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2022.03.009

**Reference method:** ZHANG Yongjun, HU Hongwei, SUN Jiayang, LIU Zhiyong, LU Qi, CAI Chuanbing, Low. Temp. Phys. Lett. **44**, 0229 (2022)

## 1 引言

自1987年Y-Ba-Cu-O (YBCO) 被发现以来的30多年里,由于其高临界转变温度( $T_c$ )、高临界电流密度( $J_c$ )和高上临界磁场( $B_{c2}$ )等优点<sup>[1-3]</sup>,RE-Ba-Cu-O (REBCO, RE=稀土元素) 超导体得到重大发展. 目前,第二代高温超导(2G-HTS)带材的单根长度制备能力达到百米,甚至千米量级,在世界各地已经实现了商业化生产,并逐步在许多场景中得到应用<sup>[4-6]</sup>.

临界电流( $I_c$ )和  $n$ -值是评估超导带材的重要性能指标,其对超导电力等装置的安全运行、稳定性、运行效率等具有重要的影响. 一方面,由于2G-HTS材料本身具有弱连接、微观缺陷、二次相等内禀特征,不可避免会导致2G-HTS长带临界电流沿长度方向存在不均匀性<sup>[7-9]</sup>;另一方面,2G-HTS材料属于氧化物陶瓷材料,机械性能比较脆弱,易受到损伤,导致局部超导膜缺陷,将限制整根带材的使用. 因此,对2G-HTS长带临界电流及其沿长度方向的均匀性进行表征对超导应用具有重要的实际意义.

超导带材临界电流的测量方法主要分为两类:磁感应法和传输法测量. 磁感应法(又称非接触法)是一种非破坏性测量方法,没有接触电阻引起的焦耳热、测量速度快以及非常适于表征临界电流沿长度方向的均匀性,主要代表设备为国内MCoDer<sup>[10-14]</sup>和德国TapeStar<sup>[15-18]</sup>等,其在过程管控,包括带材筛选、提升制备工艺和质量等方面具有重要的作用. 但磁感应法需要通过理论模型来计算,测量结果受线圈参数以及计算公式的影响,无法给出  $n$ -值,同时,磁感应法存在对带材某种缺陷(如沿长度方向线性缺陷等)不敏感现象,易导致测量出现误差等缺点. 而传输法(又称四引线法)具有简单、直观、准确的特点,是国际上超导材料临界电流测量的常规方法. 传统的低温超导线材采用四引线法测量,是在线材首、尾两端取短样进行测量. 由于2G-HTS带材存在临界电流沿长度方向分布不均匀的特性,采用传统的首、尾取样测量已不再合适,因为两端短样测量结果并不能代表长带整体性能. 因此,对2G-HTS长带临界电流及其沿长度方向的均匀性的连续测量是实现高温超导带材产业化应用的一个关键问题.

从客户(高温超导带材使用者)的角度来说,希望获得带材准确、详细的超导性能参数,而四引线法更接近于实际使用者的需求. 在2018年韩国釜山TC90会议上,对于2G-HTS带材临界电流的测量,达成了以四引线法为主导技术路线的国际共识. 本文一个重要研究内容是以四引线法测量为基础,引入卷对卷传动系统,建立了动态传输法测量装置,并对其重复稳定性进行了评估,实现了2G-HTS长带临界电流及其沿长度方向的均匀性的表征.

传输临界电流测量过程中,一方面,2G-HTS带材沿长度方向临界电流分布存在分散性,因此,临界电流的确定与所选取的电压引线间距<sup>[19]</sup>有关,因为电压引线间距直接影响电压测量的分辨率,进而影响了电压判据;另一方面,2G-HTS产业化进程中,测量效率(可降低成本)是企业一直关注的目标. 电压引线间距越小,分辨率越高,但测量效率越低;电压引线间距越大,测量效率越高,但分辨率降低. 因此,为了兼顾测量分辨率和效率,研究电压引线间距对2G-HTS带材(短带和长带材)临界电流及其沿长度方向均匀性表征的影响,以及选取合理的电压引线间距对促进高温超导带材应用具有实际价值.

## 2 实验方法

### 2.1 传输法测量装置建立

以四引线法测量为基础,采用步进测量模式,建立了动态传输法测试装置,其结构示意图如图1所示,主要包括四部分:

(1)卷对卷系统,是在恒张力的条件下,使带材可以连续、稳定的通过低温箱进行测量,并保证高温超导长带的连续性和完整性.

(2)低温系统,含低温箱以及冷却介质(液氮). 低温箱的内腔和外壳采用无磁不锈钢,内腔和外壳之间填充隔热层材料,使之具有保温效果好,液氮蒸发率低的特点. 通常,测量完成后,很少再将液氮收集起来循环使用,因此,低温箱底部或四周内壁设置辅助加热丝,使液氮快速挥发,并对低温箱进行烘干,保证下一次正常使用.

(3)测试系统,主要包括直流源、电压表(纳伏表),以及一些必要的前置放大器、过滤器和相关引线,以及电流引线电极、电压引线电极等(简称四引线组件). 此外,还包括获取数据、根据需要对数据进行处理、并将结果显示出来的数据采集系统,通常由

计算机控制。

(4) 预热/烘干系统, 保证高温超导带材在进入液氮前和出液氮后, 表面保持干燥状态。

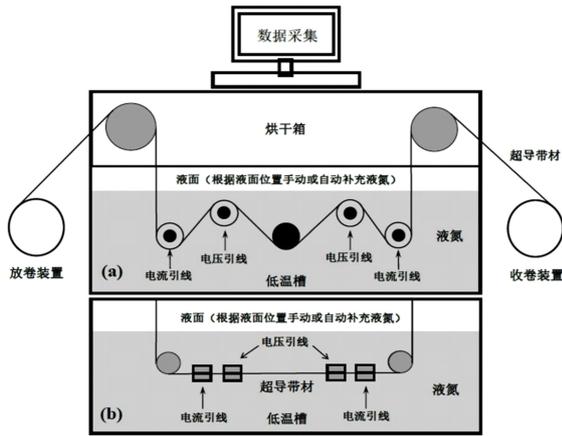
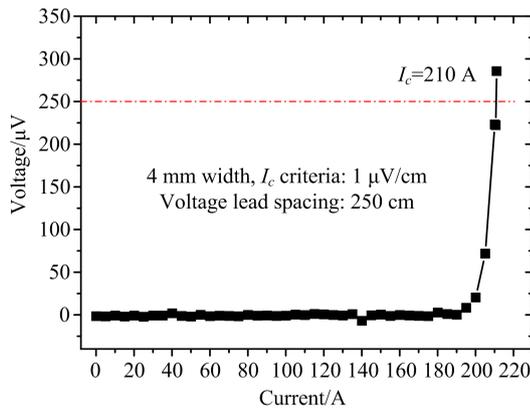
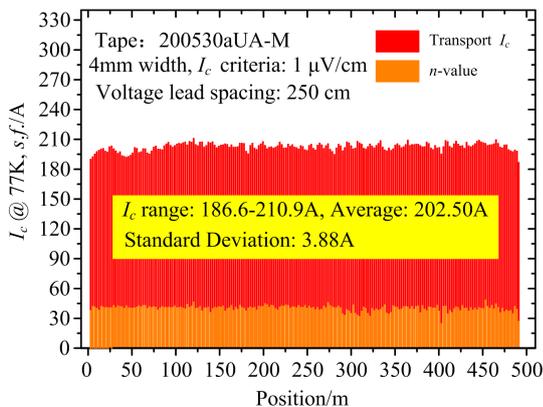


图1 传输法测量装置结构示意图: (a) 电流引线电极/电压引线电极采用滚轮形式, 与带材成曲面接触; (b) 电流引线电极/电压引线电极采用压块形式, 与带材成平面接触. 电流引线电极/电压引线电极均采用铜质材料。



(a) 单测试段  $U-I$  曲线及  $I_c$  值确定



(b)  $I_c$  和  $n$ -值沿长度方向分布

图2 2G-HTS 长带典型传输法测量结果

HTS 长带放置在放卷盘, 带材头部通过导向轮, 穿过四引线组件, 最后通过导向轮, 在收卷盘进行收卷. 接着将四引线组件浸入到液氮浴中, 使测试段冷却到液氮温度. 在待测带材两端施加直流电流, 并测量测试段的电压, 同时记录下对应的  $U-I$  关系. 在特定电压引线间距下, 达到电场判据 ( $E_c$ ) 对应的临界电压值 ( $U_c$ ) 时的电流值即为临界电流 ( $I_c$ ).

当完成一个测试段的测量后, 通过卷对卷系统走带一个步长, 进行下一个测试段的测量, 重复测量-走带-测量过程, 直至测量覆盖整个带材长度. 当整根长带完成测量后, 根据各测试段  $I_c$  值获得长带的临界电流及其沿长度方向的均匀性. 典型传输法测量数据结果如图 2 所示, 图 2(a) 为单测试段  $U-I$  曲线, 图 2(b) 为 2G-HTS 长带临界电流和  $n$ -值沿长度方向的分布。

上海上创超导科技有限公司(上创公司)自主设计研制的动态传输法测量装置经历了三代的发展, 如图 3 所示, 第一代: 图 3(a), 电流引线电极/电压引线电极采用压块形式, 与带材成平面接触, 电压引线间距: 0~1.8 m, 测量速度: 15~25 m/h; 第二代: 图 3(b), 电流引线电极/电压引线电极采用滚轮形式, 与带材成曲面接触, 电压引线间距: 0.5~2.6 m, 测量速度: 100~120 m/h; 第三代<sup>[20]</sup>: 图 3(c), 电流引线电极/电压引线电极采用滚轮形式, 与带材成曲面接触, 电压引线间距最大为 5.6 m, 步长可达 5.4 m, 测量速度为 200~300 m/h, 单次测量长度 > 1000 m (厚度为 0.38 mm), 满足 2G-HTS 带材产业化应用测量需求。



(a) 第一代测量装置 (b) 第二代测量装置 (c) 第三代测量装置<sup>[20]</sup>

图3 上创公司-动态传输法测量装置的发展历程

## 2.2 实验过程

### 2.2.1 传输法测量装置重复稳定性评估

实验采用上创公司生产的 2G-HTS 短带和长带材作为研究对象, 其规格参数如表 1 所示. 采用传输法测量装置(图 3(b)所示)对此两种带材进行重复性测量, 并对重复性测量不确定度进行了评定。

该传输法测量装置原理为, 将成卷待测 2G-

表1 传输法测量装置重复稳定性实验用2G-HTS短带和长带材的规格参数

样品	宽度/mm	厚度/mm	长度/m	$I_c/A$ /n-值	封装材料
样品-1	5.8	0.38	1.3	134 / 25	紫铜封装
样品-2	5	0.22	85	100 / 25	紫铜封装

对于2G-HTS短带材(样品-1)测量,电压引线间距为1 m,  $I_c$  判据为  $1 \mu V/cm$ ,当完成一次测量后,将测量带材移出液氮浴,待回复室温后,再浸入

表2 2G-HTS带材临界电流对电压引线间距依赖性实验用带材规格参数

样品	长度/m	厚度/mm	宽度/mm	$I_c/A$ /n-值	覆铜方式及 铜层厚度/ $\mu m$	电流/电压电极 与带材接触方式
样带-3	0.28	0.1	12	240 / 30	电镀铜/40	平面接触
样带-4	20	0.2	5	142 / 32	锡焊层压/100	平面接触
样带-5	100	0.38	4.8	140 / 31	锡焊层压/300	曲面接触

对于2G-HTS短带材(样品-3)测量,固定电流电极端间距250 mm不变,采用四引线法测量,判据为  $1 \mu V/cm$ ,研究不同电压引线间距(10~245 mm)对临界电流表征的影响,示意图如图4所示。

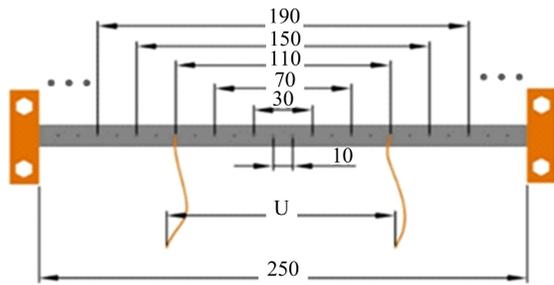


图4 采用四引线法测量2G-HTS短带时,不同引线间距测量示意图

在2G-HTS长带测量中,对于样品-4,电流引线电极/电压引线电极采用压块形式,与带材成平面接触,如图5b所示,分别采用25 cm、50 cm、100 cm和180 cm不同的电压引线间距,判据为  $1 \mu V/cm$ ,表征出20 m长紫铜封装2G-HTS长带的临界电流及其沿长度方向均匀性。

对于样品-5,电流引线电极/电压引线电极采用滚轮形式,与带材成曲面接触,如图5a所示,分别采用77 cm、154 cm、260 cm、425 cm和560 cm不同

液氮进行测量,测量位置保持一致,重复测量次数  $N=12$ 。

对于2G-HTS长带(样品-2)测量,电压引线间距为2.5 m,  $I_c$  判据为  $1 \mu V/cm$ ,测量装置张力为10~15 N,重复测量次数  $N=7$ ,相邻两次测量间隔  $\geq 1$  天,测量人员为同一个人。

2.2.2 2G-HTS带材临界电流及其均匀性对电压引线间距的依赖性实验

实验仍采用上创公司生产的2G-HTS短带和长带材作为研究对象,其规格参数如表2所示。

的电压引线间距,判据为  $1 \mu V/cm$ ,表征了百米级2G-HTS长带的临界电流及其沿长度方向均匀性。

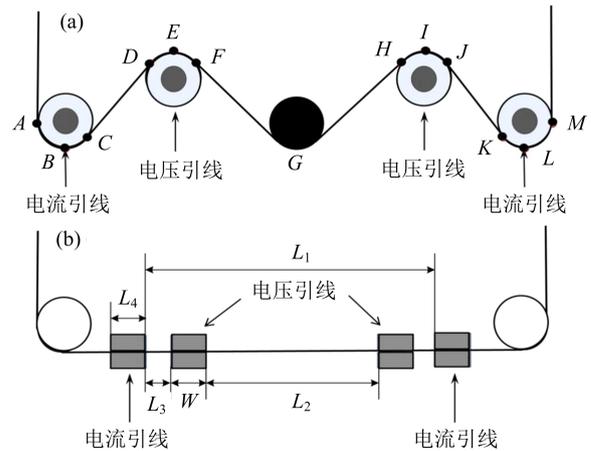


图5 四引线组件各段长度参数示意图

- (a) 电流/电压电极均为滚轮形式,与样带接触面为曲面;
- (b) 电流/电压电极采用平面形式,与带材接触面为平面

$L_1$ —电流引线间距,采用滚轮作为电流/电压电极时,电流引线间距为图5(a)中线段CGK的长度; $L_2$ —电压引线间距,即测试段长度,采用滚轮作为电流/电压电极时,电压引线间距为图5(a)中线段FGH的长度; $L_3$ —电流电极与电压电极间的最小距离,采用滚轮作为电流/电压电极时,表现为图5(a)中线段CD和线段JK的长度; $L_4$ —电流电极

与带材的接触长度,采用滚轮作为电流/电压电极时,表现为图 5(a)中曲线 ABC 和 KLM 的长度; W—电压引线的宽度,采用滚轮作为电流/电压电极时,表现为图 5(a)中曲线 DEF 和 HIJ 的长度.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 传输法测量装置重复性测量不确定度评定

##### 3.1.1 2G-HTS 短带材重复性测量 A 类不确定度评定

实验对样品-1 进行了 12 次重复性测量,测量结果如图 6 所示,平均值  $\bar{I}_c = 134.23$  A, 单次测量的实验标准差为:  $s(I_{ci}) = 0.27$  A, 假定为双侧情况, 即两端均可能有离群值, 根据格拉布斯准则, 给定置信概率为 99.5%, 查临界系数表<sup>[21]</sup> 可得  $G(0.005, 12) = 2.636$ , 而残差绝对值最大者为  $|v_1| = 0.47$  A; 由于

$$|v_1| < 2.636 \times 0.27 \text{ A} = 0.712 \text{ A}$$

因此测量结果中无离群值.

当测量次数  $N \geq 10$  时, 一般可以不加安全因子, 因此, 该传输法测试装置对样品-1 重复性测量的扩展不确定度(单次测量)为:

$$U(I_c) = 2 \times 0.27 \text{ A} = 0.54 \text{ A}, k = 2$$

相对扩展不确定度为 0.41% ( $k = 2$ ).

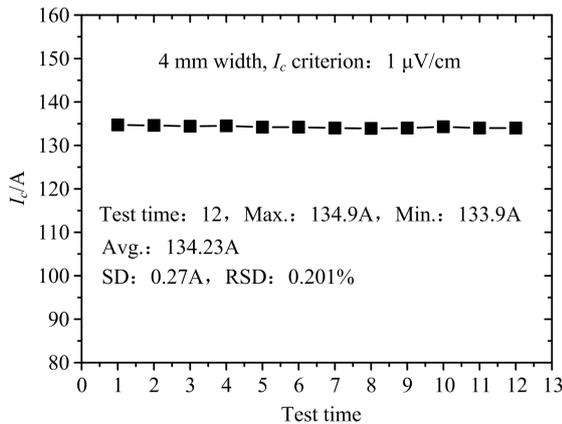


图 6 样品-1 重复性测量结果及其不确定度的评定

##### 3.1.2 2G-HTS 长带重复性测量不确定度评定

通过计算长带各测试段临界电流的平均值, 获得长带的临界电流, 采用如下公式(1)计算:

$$\bar{I}_c = \frac{\sum_{i=1}^N I_{ci}}{N} \quad (1)$$

式中,

$I_{ci}$ —第  $i$  测试段的临界电流值, 单位为 A;

$N$ —长带总的测试段数.

通过计算长带各测试段临界电流的标准偏差, 获得临界电流沿长度方向的均匀性特征, 采用如下公式(2)计算:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_{ci} - \bar{I}_c)^2} \quad (2)$$

式中,

$s$ —长带各测试段临界电流的标准偏差, 单位为 A;

$I_{ci}$ —第  $i$  测试段的临界电流值, 单位为 A;

$N$ —长带总的测试段数.

2G-HTS 长带样品-2 经过 7 次重复性测量, 结果如图 7 所示, 并对每一次测量的最大值、最小值、平均值和标准偏差进行了统计分析, 如表 3 所示.

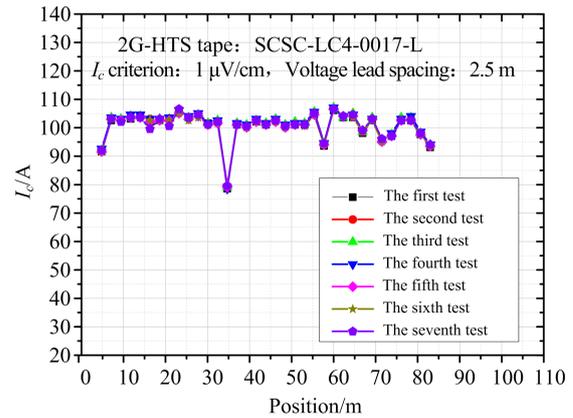


图 7 样品-2 传输临界电流重复性测量结果

表 3 样品-2 重复性测量结果及不确定度评定

测试次数	最大值/A	最小值/A	平均值/A	标准偏差/A	备注
1	106.1	78.6	100.54	5.14	
2	106.6	79.1	100.79	5.13	
3	107.1	79.1	101.10	5.14	
4	107.1	78.6	101.23	5.21	
5	106.6	79.1	100.54	5.04	
6	106.6	79.6	100.47	4.95	
7	106.6	79.6	100.69	4.96	
平均值/A			100.766	5.081	
标准偏差/A			0.295	0.0996	
相对标准偏差(%)			0.2928	1.9602	

通过图 7 和表 3 可以看到,经过 7 次重复性测量,样品-2 临界电流的平均值为 100.766 A,标准偏差为 0.295 A,相对标准偏差为 0.2928%;样带-2 临界电流沿长度方向均匀性的平均值为 5.081 A,标准偏差为 0.0996 A,相对标准偏差为 1.9602%.

由于规定取包含因子  $k=2$  和测量次数  $N=7$  时,由表<sup>[22]</sup>可得安全因子  $h=1.26$ ,于是得:

样品-2 临界电流重复性测量的标准不确定度为:

$$u = h \cdot s = 1.26 \times 0.295 = 0.372 \text{ A}$$

则测量的扩展不确定度为:

$$U = 2 \times 0.372 = 0.744 \text{ A}$$

相对扩展不确定度为:0.739%.

样品-2 临界电流沿长度方向均匀性重复性测量标准不确定度为:

$$u = h \cdot s = 1.26 \times 0.0996 = 0.126 \text{ A}$$

则测量的扩展不确定度为:

$$U = 2 \times 0.126 = 0.252 \text{ A}$$

相对扩展不确定度为:4.960%.

最后得到,样品-2 临界电流重复性测量的扩展不确定度为 0.75 A,相对扩展不确定度为 0.74%;样品-2 临界电流沿长度方向均匀性重复性测量扩展不确定度为 0.26 A,相对扩展不确定度为 4.96%.

### 3.2 电压引线间距对临界电流表征的影响

#### 3.2.1 2G-HTS 短带材测量中临界电流与电压引线间距的关系

采用 2G-HTS 短样带材(样品-3)作为研究对象,临界电流与电压引线间距的关系如图 8 所示,从图上可以看出,随着电压引线间距的增加,临界电流在  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  判据下表征值呈现先增加(电压引线间距为 1~3 cm)、后处于基本稳定的趋势(电压引线间距为 3~19 cm),当继续增加电压引线间距时,临界电流的表征值增加(电压引线间距为 21 cm 时),而后快速减小.可将这些变化分成 4 个区域,如图 8 所示,即 I 区、II 区、III 区和 IV 区.

在 I 区, $U-I$  曲线的特征如图 9(a)所示,由于电压表信号等噪音(波动)的存在,当电压引线间距较小时,电压判据  $U_c$  受到电压表信号等噪音的影响,采用  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  作为判据时,无法准确表征出临界电流值.在本文中,此时表征值体现的结果是偏小.

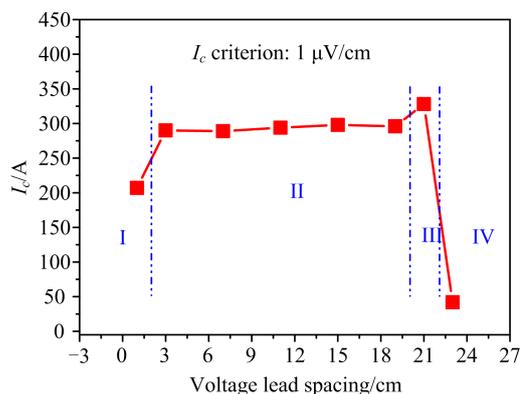


图 8 2G-HTS 短样带材测试中,  $I_c$  与电压引线间距的关系

在 II 区,即电压引线间距在 3~19 cm 范围时,当电压引线间距增加值 19 cm 时, $U-I$  曲线出现线性“爬坡”,如图 9(b)所示,斜率为  $1.05\text{E}-8$ ,采用  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  作为判据时,表征出的临界电流值没有发生明显变化.

在 III 区,当电压引线间距为 21 cm 时, $U-I$  曲线也出现线性“爬坡”现象,如图 9(c)所示,斜率为  $3.06\text{E}-8$ ,采用  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  作为判据时,表征出的临界电流值明显增加.

当电压引线间距继续增加至 IV 区时,如图 9(d)所示, $U-I$  曲线仍然出现线性“爬坡”,且斜率不断增大,为  $8.04\text{E}-7$ ,此时,电压判据与  $U-I$  曲线的线性爬坡部分相交,由此表征的临界电流显然不能体现超导材料的特性.

根据  $U-I$  曲线特征,主要可以分为两类:一是无线性“爬坡”的  $U-I$  曲线(电压引线间距为 1~15 cm 时),在低电流区没有出现线性爬坡现象,如图 9(a)所示;二是出现线性“爬坡”的  $U-I$  曲线,如图 9(b-d)所示,这主要是由于电压引线距离电流端比较近,引起电流出现分流造成的<sup>[23]</sup>.随着电流端与电压引线电极距离的缩短,即电压引线间距的增加,斜率(即为电阻)逐渐增大.当线性斜率  $< 0.3U_c/I_c$ <sup>[24]</sup>,即当电压引线间距为 19 cm 时,表征的临界电流没有发生明显变化;当线性斜率  $> 0.3U_c/I_c$  时,即当电压引线间距为 21 cm 时,如图 9(d)所示,此时已不能表征超导带材的临界电流,需要及时调整测量参数来进行表征.

#### 3.2.2 2G-HTS 长带测量中临界电流与电压引线间距的关系

对于 2G-HTS 长带,包括样品-4 和样品-5,采

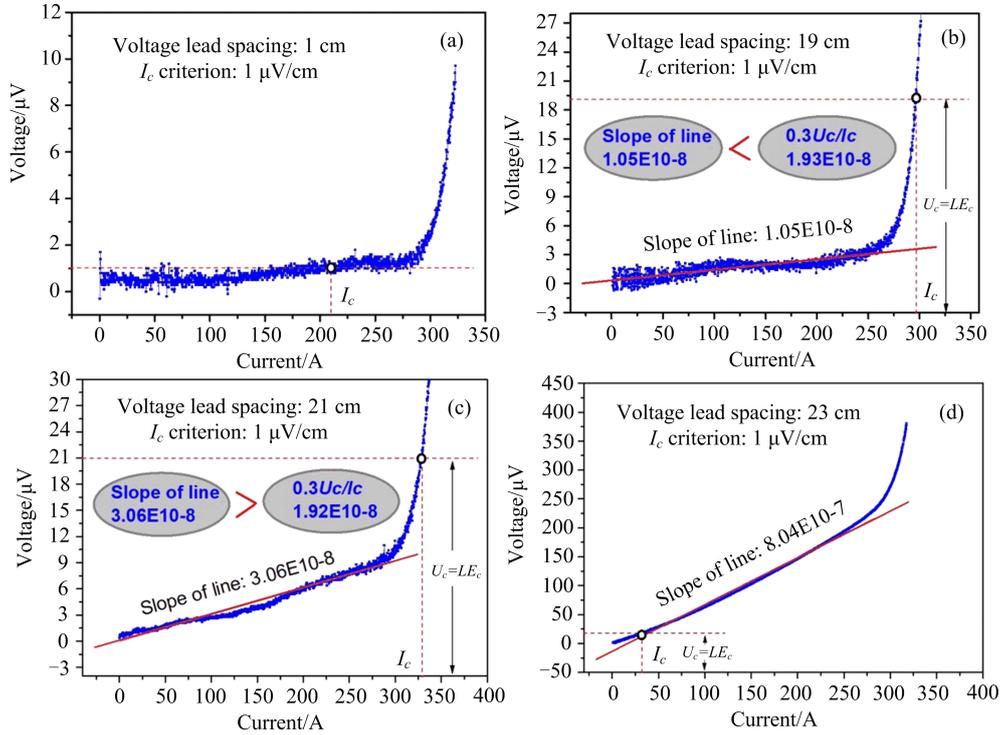


图 9 不同区域内  $U-I$  曲线的特征以及临界电流的表征

用不同电压引线间距进行测量, 表征的临界电流及其沿长度方向均匀性, 分别如图 10 和 13 所示; 各测试段临界电流的最大值、最小值、平均值及标准偏差与电压引线间距的关系, 分别如图 11 和 13 所示, 从图上可以看出, 随着电压引线间距增加, 最大值和最小值分别呈现逐渐减小和增加的趋势, 而平均值变化不大, 最大值和最小值向平均值收敛. 电流/电压电极与带材呈平面和曲面接触时, 呈现同样的变化规律.

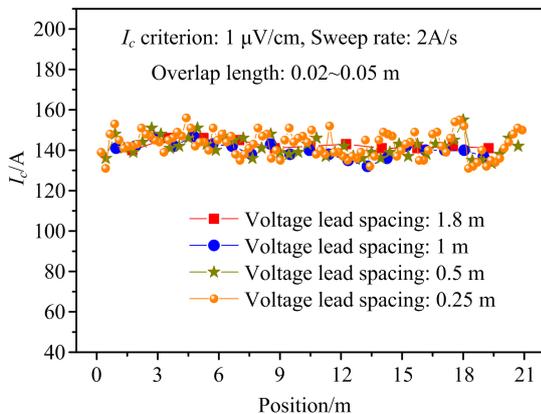


图 10 样带-4 采用不同电压引线间距测量时临界电流沿长度方向的分布

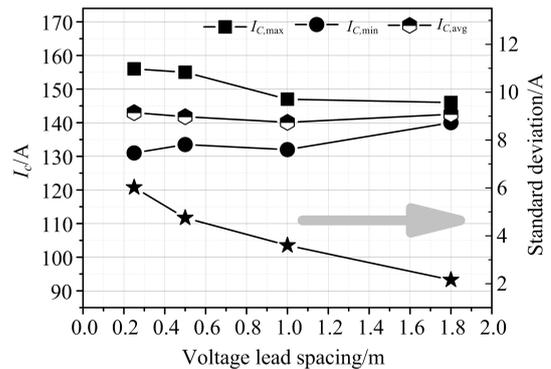


图 11 样带-4 各测试段临界电流的最大值、最小值、平均值及标准偏差与电压引线间距的关系, 电流/电压电极与带材呈平面接触

2G-HTS 长带临界电流沿长度方向的均匀性 (采用各测试段的标准偏差表征), 随着电压引线间距的增加而减小. 采用电压引线间距不同, 步长不同, 同一长度带材测试段落数量不同, 因此, 各测试段的标准偏差受电压引线间距 (或步长) 的影响. 2G-HTS 长带临界电流沿长度方向的均匀性与电压引线间距的关系如图 14 所示, 对横纵坐标取对数, 呈线性关系, 通过拟合可得:  $s = 3.47 / L_2^{0.36}$ , 其中,  $L_2$  为电压引线间距.

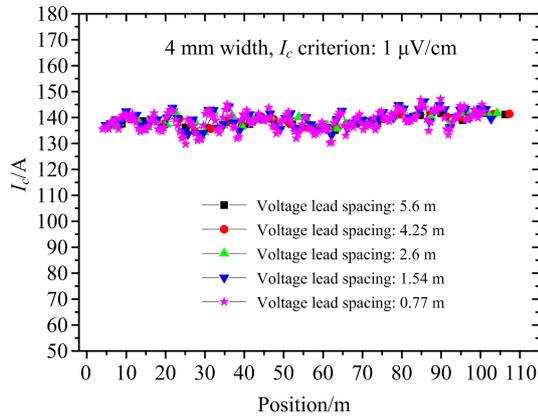


图 12 样带-5 采用不同电压引线间距测量时临界电流沿长度方向的分布

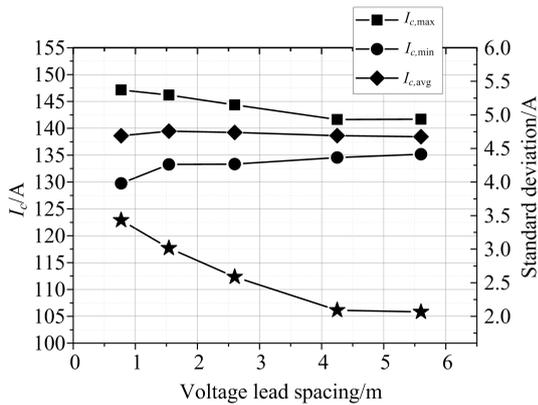


图 13 样带-5 各测试段临界电流的最大值、最小值、平均值及标准偏差与电压引线间距的关系, 电流/电压电极与带材呈曲面接触

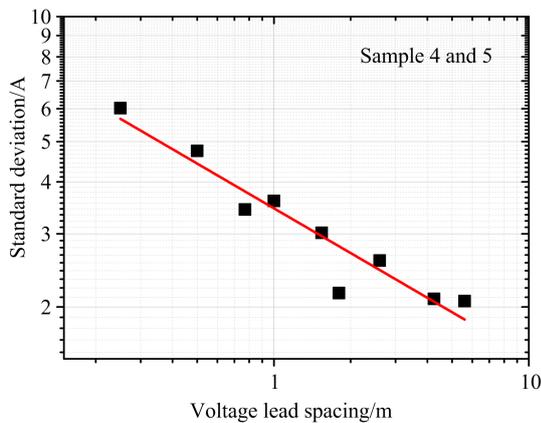


图 14 2G-HTS 长带各测试段的标准偏差与电压引线间距的关系

## 4 结 论

本文以四引线法测量为基础,建立了动态传输法测量装置,并对其重复稳定性进行了评估,同时,详细研究了电压引线间距对 2G-HTS 短带和长带临界电流及其均匀性表征的影响,可得到如下结论:

(1)采用动态传输法测量装置,对临界电流重复性测量的扩展不确定度为 0.744 A,相对扩展不确定度为 0.74% (<1%);对临界电流沿长度方向均匀性重复性测量扩展不确定度为 0.26 A,相对扩展不确定度为 4.96%;该测量装置具有良好的重复稳定性,且测量速度达 200 m/h~300 m/h,满足产业化需求,为 2G-HTS 带材产业化发展具有显著的促进作用。

(2)采用不同电压引线间距对 2G-HTS 长带临界电流及其沿长度方向均匀性进行表征时,发现随着电压引线间距的增加,沿带材长度方向,各测试段临界电流的最大值和最小值分别呈现减小和增加的趋势,平均值变化不大,且最大值和最小值向平均值收敛;而标准偏差随着电压引线间距的增大而逐渐减小,通过线性拟合可得标准偏差与电压引线间距的关系为: $s = 3.47 / L_2^{0.36}$ 。

(3)采用不同电压引线间距对 2G-HTS 短带材临界电流进行表征时发现,当电压引线间距 < 1 cm 时,由于受到电压表信号等噪音(波动)的影响,无法准确表征出临界电流值;当电压引线间距增加值 19 cm 时,  $U-I$  曲线出现线性“爬坡”,线性斜率随着电压引线间距的增加而增大,这主要是由于电流端和电压引线距离太小,引起分流造成的。

(4)对于出现线性“爬坡”的  $U-I$  曲线,当线性斜率  $< 0.3U_c/I_c$ , 即当电压引线间距为 19 cm 时,表征的临界电流没有发生明显变化;当线性斜率  $> 0.3U_c/I_c$  时,即当电压引线间距为 21 cm 时,此时已不能准确表征超导带材的临界电流,需要及时调整测量参数来进行表征。

目前,国内外还未对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进行规范化,本文为其标准化和规范化提供理论和实验支持,对于推动第二代高温超导产业化进程具有重大意义。

参 考 文 献

- [1] 蔡传兵,杨召和郭艳群,物理, **49**(2020),747
- [2] 蔡传兵,池长鑫,李敏娟,刘志勇,鲁玉明,郭艳群,白传易,陆齐和豆文芝,科学通报, **64**(2019),827
- [3] Judith L. MacManus-Driscoll and StuartC. Wimbush, *NATURE REVIEWS: MATERIALS*, (2021), <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00290-3>
- [4] 郑健,宗曦华和韩云武,低温与超导: 超导技术, **48**(2020),27
- [5] 张东,肖立业和林良真,电工电能新技术, **39**(2020),45
- [6] 周睿,吴涛,中国科学: 物理学 力学 天文学, **51**(2021),047408
- [7] F. Gömöry, J. Šouc, M. Adámek, A. Ghabeli, M. Solovyov, and M. Vojen iak, *Supercond. Sci. Technol.* **32**(2019), 124001
- [8] 陆岩,许熙等,低温物理学报, **25**(2003),25
- [9] 孟宪东,2008 硕士学位论文(北京:中国科学院电工研究所)
- [10] C. Gu, T. M. Qu, S. N. Zou, and Z. H. Han, *Rev. Sci. Instrum.*, **81**(2010), 045101-5
- [11] C. Gu, T. M. Qu, S. N. Zou, and Z. H. Han, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **21**(2011), 3413
- [12] S. N. Zou, C. Gu, T. M. Qu, S. W. Chen, X. H. Li, and Z. H. Han, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **25**(2015), 9000904
- [13] S. N. Zou, C. Gu, T. M. Qu, and Z. N. Han, *Rev. Sci. Instrum.*, **84**(2013), 105106
- [14] S. N. Zou, C. Gu, T. M. Qu, and Z. H. Han, *Rare. Metal. Mat. Eng.*, **44**(2015), 429
- [15] G. Grimaldi, M. Bauer, and H. Kinder, *Appl. Phys. Lett.*, **79**(2001), 4390
- [16] K. Higashikawa, K. Shiohara, M. Inoue, T. Kiss, T. Machi, N. Chikumoto, S. Lee, K. Tanabe, T. Izumi, and H. Okamoto, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **22**(2012), 9500704
- [17] S. Furtner, R. Nemetschek, R. Semerad, G. Sigl, and W. Prusseit, *Supercond. Sci. and Technol.*, **17**(2004), 281
- [18] H. S. Kim, S. S. Oh, N. J. Lee, S. K. Baik, D. W. Ha, R. K. Ko, H. S. Ha, T. H. Kim, D. J. Youm, S. H. Moon, and C. Park, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **20**(2010), 1537
- [19] 张正臣,周义刚,孔令启,李晓航和肖立业,稀有金属材料与工程, 2008,**37**(2008), 416
- [20] 张永军,蔡传兵,陆齐,孙佳阳和胡宏伟,中国专利, 10925263 [2020-07-07]
- [21] 倪育才,2016 实用测量不确定度评定(北京:中国质检出版社)第 148 页
- [22] 倪育才,2016 实用测量不确定度评定(北京:中国质检出版社)第 135 页
- [23] J. W. Ekin, *J. Appl. Phys.*, **49**(1978), 3406
- [24] GB/T 18502-2018, 第 6 页