



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 44003—2024

## 力学性能测量 REBCO 涂层 导体(镀铜)脱层强度测试方法

Mechanical property measurement—Delamination strength test for  
REBCO coated conductors (copper-plated)

2024-04-25 发布

2024-11-01 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

前言 .....	III
引言 .....	IV
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 原理 .....	2
5 装置 .....	2
5.1 试验机 .....	2
5.2 拉伸夹具 .....	2
5.3 砧头 .....	3
5.4 焊接夹具 .....	3
5.5 焊接加热台 .....	3
6 测试连接体制备 .....	3
6.1 测试样品 .....	3
6.2 砧头 .....	3
6.3 砧头与测试样品焊接 .....	4
6.3.1 涂抹焊锡 .....	4
6.3.2 加热焊接 .....	4
7 测试步骤 .....	4
7.1 连接体装配 .....	4
7.2 室温测试 .....	4
7.3 液氮温区测试 .....	4
7.4 测试数据采集 .....	4
8 数据处理 .....	5
8.1 脱层强度 .....	5
8.2 三参数威布尔分布 .....	5
8.3 99%可靠度判据下的脱层强度 .....	6
8.4 不确定度 .....	6
9 测试报告 .....	6
9.1 样品 .....	6
9.2 测试条件 .....	6
9.3 结果 .....	6
附录 A (资料性) 夹具参考信息与装配注意事项 .....	7

A.1	总则	7
A.2	拉伸夹具(底座)	7
A.3	砧头	7
A.4	垂直焊接	8
A.5	焊接夹具	9
附录 B (资料性)	威布尔分布及可靠度	10
B.1	概述	10
B.2	三参数威布尔分布	10
B.2.1	$\gamma$ 的计算	10
B.2.2	$\alpha$ 和 $\beta$ 的计算	11
B.3	可靠度函数	11
B.4	样本容量	11
附录 C (资料性)	不确定度	12
C.1	单次脱层强度测量标准不确定度	12
C.1.1	$\sigma_d$ 合成标准不确定度	12
C.1.2	$F$ 标准不确定度	12
C.1.3	$a$ 和 $b$ 标准不确定度	13
C.1.4	算例	13
C.2	99%可靠度判据下的脱层强度 $\sigma_{99}$ 不确定度	14
附录 D (资料性)	循环比对试验主要结果	16
D.1	循环比对试验使用样品参数	16
D.2	循环比对试验结果	16
参考文献		17
图 1	装配图示意图	2
图 2	REBCO 涂层导体样品结构示意图	3
图 3	拉力-位移曲线	5
图 A.1	拉伸夹具(底座)	7
图 A.2	上砧头	7
图 A.3	下砧头	8
图 A.4	连接体示意图	8
图 A.5	焊接夹具	9
表 C.1	单次脱层强度测试数据	14
表 C.2	单次脱层强度测试相关不确定度结果	14
表 D.1	循环比对试验使用样品的基本参数	16
表 D.2	循环比对试验结果	16

## 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。

本文件由中国科学院提出。

本文件由全国超导标准化技术委员会(SAC/TC 265)归口。

本文件起草单位：兰州大学、上海交通大学、上海超导科技股份有限公司、苏州新材料研究所有限公司、上海上创超导科技有限公司、中国科学院等离子体物理研究所、上海大学、中国船舶集团有限公司第七一二研究所、云南电网有限责任公司电力科学研究院。

本文件主要起草人：张兴义、刘聪、王玉山、朱佳敏、陈思侃、刘华军、刘方、陶书、蔡传兵、李敏娟、周勇、黑颖顿。

## 引 言

REBCO(RE指Y,Gd,Dy等稀土元素)涂层导体,也称第二代高温超导带材,具有高的不可逆磁场和高场下优异的载流能力,在超导磁体、超导电缆和超导电机等领域具有重要的应用前景。

REBCO涂层导体是一种多层复合材料,由铜稳定层、银层、超导层、缓冲层和基底层构成,其中超导层和缓冲层属于陶瓷材料,其他层是金属或合金材料。REBCO涂层导体在应用过程中由于电磁力和热应力的作用会出现脱层现象,一旦出现脱层将导致材料的载流能力下降,给超导装置的运行带来安全隐患。因此,有必要建立标准的测试方法以准确测量REBCO涂层导体的脱层强度。

砧拉法是一种原理简单、易实现室温及液氮温度下复合层状材料脱层强度的测试方法,该方法也适用于REBCO涂层导体(镀铜)。因此,本文件采用砧拉法对REBCO涂层导体(镀铜)在室温和液氮温度下进行脱层强度测试。

在使用砧拉法测试REBCO涂层导体(镀铜)脱层强度过程中,由于陶瓷材料的断裂韧性远低于金属和合金材料,导致脱层均发生在超导层及缓冲层;而陶瓷材料的脆性使得脱层强度测试数据离散,直接得到的数据难以对材料制备和工程设计提供指导性建议,因而需要特殊的数据分析方法进行数据处理。本文件采用三参数威布尔分布数据分析方法对脱层强度的测试数据进行处理。在获得威布尔分布拟合参数的基础上,基于可靠度判据可直接给出脱层强度。

室温脱层强度测试表征REBCO涂层导体出厂时的脱层强度,同时作为液氮温度下脱层强度的参照,液氮温度下脱层强度测试则用于表征REBCO涂层导体低温下的脱层强度。室温和液氮温度下的脱层强度均可用于REBCO涂层导体的制备工艺评价,并作为应用该导体制备超导装置设计的依据。

# 力学性能测量 REBCO 涂层 导体(镀铜)脱层强度测试方法

## 1 范围

本文件描述了 REBCO 涂层导体在室温以及液氮温度下脱层强度的测试及数据处理的方法。

本文件适用于铜层厚度范围为 5 μm~20 μm 的 REBCO 涂层导体(镀铜)。铜层厚度超过范围的 REBCO 涂层导体可参考本文件。

本文件不适用于采用不锈钢或其他金属进行加强,或外表面经过涂覆/包裹绝缘材料的 REBCO 涂层导体。

## 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 13634—2019 金属材料 单轴试验机检验用标准测力仪的校准

GB/T 16825.1—2022 金属材料 静力单轴试验机的检验与校准 第 1 部分:拉力和(或)压力试验机 测力系统的检验与校准

GB/T 34987—2017 威布尔分析

## 3 术语和定义

GB/T 2900.100 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### 砧头 anvil

脱层强度测试中与样品接触面积为矩形的连接样品表面与夹头的部件。

### 3.2

#### 连接体 union body

砧头与样品焊接构成的整体。

### 3.3

#### 横向拉伸应力 transverse tensile stress

脱层强度测试期间任一时刻的拉力除以上砧头和样品的接触面积。

### 3.4

#### 脱层强度 delamination strength

$\sigma_d$

样品发生破坏时的横向拉伸应力。

注:样品破坏指在载荷作用下,发生层间分离的现象,表现为载荷达到最大值,然后突然下降为 0。