

## 中国国际热核聚变实验堆计划采购包专项标准

HJB 1004—2017

---

### 铌三锡复合超导线扭距及扭转方向 测量方法

Measurement methods for twist pitch and twist direction of Nb<sub>3</sub>Sn composite  
superconducting wires

2017 - 01 - 23 发布

2017 - 02 - 23 实施

---

中国国际核聚变能源计划执行中心 发布



## 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 仪器设备 .....	2
6 试剂与材料 .....	2
7 样品制备 .....	2
8 测量步骤 .....	3
9 结果计算 .....	3
10 测试方法的不确定度 .....	3
11 测试报告 .....	3
附录 A（资料性附录） Nb <sub>3</sub> Sn 超导线扭距测量方法的不确定度评定 .....	4

## 前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由中国国际核聚变能源计划执行中心提出并归口。

本标准起草单位：中国科学院等离子体物理研究所。

本标准主要起草人：龙凤、武玉、刘方、刘勃、雷雷。

# 铌三锡复合超导线扭距及扭转方向测量方法

## 1 范围

本标准规定了Nb<sub>3</sub>Sn复合超导线扭距及扭转方向的测量方法。

本标准适用于ITER用Nb<sub>3</sub>Sn复合超导线扭距及扭转方向的测量。其他Nb<sub>3</sub>Sn复合超导线扭距及扭转方向的测量可参照本标准执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 13811 电工术语 超导电性

## 3 术语和定义

GB/T 13811 界定的术语和定义适用于本文件。

## 4 原理

样品扭距测量原理图如图1所示。

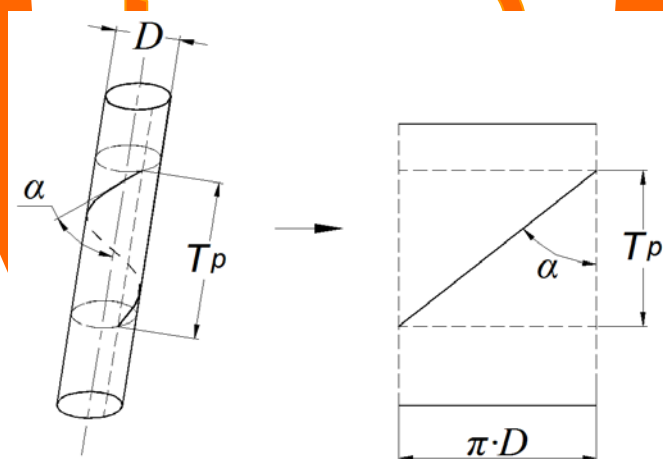


图1 扭距测量原理图

样品扭距( $T_p$ )由公式(1)计算得到。

$$T_p = \pi D \times \text{ctg} \alpha \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$D$ —超导线超导丝区域直径最大值;

$\alpha$ —超导丝螺旋角。

## 5 仪器设备

- 5.1 金相显微镜(放大倍数大于 400)。
- 5.2 扫描电镜。
- 5.3 图像分析软件。
- 5.4 抛光机。

## 6 试剂与材料

- 6.1 盐酸溶液（浓度约为 30%）。
- 6.2 硝酸溶液（浓度约为 50%）。
- 6.3 无水乙醇。

## 7 样品制备

### 7.1 直径测量样品制备

#### 7.1.1 镶样

切取约 2 cm 长度样品，镶样，然后抛光，为了方便在金相显微镜下观察，应采用一种合适的树脂材料镶样，在镶样时尽量保证样品的截面与抛光面平行。

#### 7.1.2 打磨抛光

样品用砂纸打磨并用研磨剂抛光，直至样品横截面在 400 倍光学显微镜下超导芯丝清晰可见，材料界面清晰可辨。

### 7.2 角度测量样品制备

#### 7.2.1 样品固定

切取约 5 cm 长度样品，样品中间约 2 cm 长度部位为样品测量段，样品两端用夹紧/压紧装置固定，防止测试过程中样品发生扭转。

取样、固定、测试等所有过程中应保证样品平直，不可弯曲受损。

#### 7.2.2 腐蚀

对于含铬镀层的铌三锡复合超导线，先用盐酸溶液（6.1）腐蚀样品测试部分的外部铬镀层，直至外部铜稳定体清晰可见。

使用硝酸溶液（6.2）腐蚀去除样品测试部位的外部铜稳定体，直至阻隔层清晰可见。

接触到盐酸溶液及硝酸溶液的样品测试区域应依次使用流动水、无水乙醇（6.3）进行清洗，清洗过后应用冷或热空气吹干样品。

## 8 测量步骤

- 8.1 利用可成像金相显微镜拍摄 7.1 规定的测试样品照片。
- 8.2 利用图像分析软件读取超导丝区域直径 (D)。
- 8.3 利用扫描电镜拍摄 7.2 规定的测试样品照片。
- 8.4 利用图像分析软件确定样品轴线做为基线, 在距离样品轴向中心线  $\pm 1/2D\sin(10\pi/180)$  宽度范围内, 依据超导丝痕迹描绘不少于 3 组的直线, 分别读取各组直线与基线间的夹角, 计算其算术平均值, 该平均值即为螺旋角  $\alpha$ 。

## 9 结果计算

将 8.2 及 8.4 中所读取的数据代入公式 (1), 即可计算得到测试样品扭距值  $T_0$ 。

## 10 测试方法的不确定度

本方法不确定度受以下几个方面影响: 直径准确度, 角度准确度。本方法的相对合成标准不确定度应不超过 5% (包含因子  $k=1$ ), 参见附录 A。

## 11 测试报告

### 11.1 被测样品说明

应给出被测样品的如下信息:

- a) 样品的生产厂家;
- b) 类别和/或标号;
- c) 超导线的标识;
- d) 热处理状态;
- e) 名义扭距值及扭转方向。

### 11.2 扭距值及扭转方向

应给出扭距值及扭转方向。

### 11.3 测试方法说明

应说明样品制备方法 & 数据读取方法。

附录 A  
(资料性附录)  
Nb<sub>3</sub>Sn 超导线扭距测量方法的不确定度评定

A.1 数学模型

Nb<sub>3</sub>Sn 超导线扭距  $T_p$  可由公式 (A.1) 得到

$$T_p = \frac{\pi D}{\tan \alpha} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$$D=0.6 \text{ mm};$$

$$\alpha=7 \pi /180。$$

因此,  $T_p=15.35 \text{ mm}$ 。

A.2 不确定度灵敏度系数评定

超导线扭距  $T_p$  的合成标准不确定度  $u_{T_p}$  由公式 (A.2) 得到:

$$u_{T_p} = \sqrt{(c_1 u_D)^2 + (c_2 u_\alpha)^2} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$$C_1 = \frac{\partial T_p}{\partial D} = \frac{\pi}{\tan \alpha} = 25.59 ;$$

$$C_2 = \frac{\partial T_p}{\partial \alpha} = \frac{-\pi D}{(\sin \alpha)^2} = -126.91 \text{ mm}。$$

这里用于不确定度灵敏度系数评定的量仅适用于特定的实验。这些系数并非普遍适用的, 每次实验都会不同。

A.3 每个变量的合成标准不确定度



### A.3.1 D的合成不确定度

D的合成不确定度计算如下：

- a) 样品垂直度引起的实验标准不确定度， $u_{D1} = 0.00082\text{mm}$ ；
- b) 圆形轮廓辅助线引起的实验标准不确定度， $u_{D2} = 0.02\text{mm}$ ；
- c) D的合成标准不确定度： $u_D = \sqrt{(u_{D1})^2 + (u_{D2})^2} = 0.02\text{mm}$ 。

### A.3.2 $\alpha$ 的合成不确定度

$\alpha$ 的合成不确定度计算如下：

- a) 轴线基线偏差引起的实验标准不确定度， $u_{\alpha1} = 0.2\pi/180$ ；
- b) 测试区域内螺旋角最大理论偏差引起的实验标准不确定度， $u_{\alpha2} = 0.14\pi/180$ ；
- c) 芯丝描绘线角度偏差引起的实验标准不确定度， $u_{\alpha3} = 0.05\pi/180$ ；
- d)  $\alpha$ 的合成标准不确定度： $u_\alpha = \sqrt{(u_{\alpha1})^2 + (u_{\alpha2})^2 + (u_{\alpha3})^2} = 0.0043$ 。

### A.4 $T_p$ 的合成标准不确定度评定结果

$T_p$ 的合成标准不确定度评定结果计算如下：

- a)  $T_p$ 的合成标准不确定度： $u_{T_p} = \sqrt{(c_1 u_D)^2 + (c_2 u_\alpha)^2} = 0.75\text{mm}$ ；
- b) 相对合成标准不确定度为： $u = \frac{u_{T_p}}{T_p} = 4.9\%$ 。

### A.5 $T_p$ 的合成标准不确定度的循环比对实验

对  $T_p$ 的测试结果进行循环比对实验。一共得到 16 个结果，平均值是 15.9 mm，实验标准偏差为 1 mm，实验标准不确定度为 0.25 mm，相对合成标准不确定度为 1.57%。

因此，基于循环比对实验的目标相对合成不确定度，该方法的目标合成不确定度应不超过 5%（包含因子  $k=1$ ）。