

## 中国国际热核聚变实验堆计划采购包专项标准

HJB 1002—2017

---

### ITER 用铌三锡超导线直流 临界电流测试方法

Test methods of DC critical current for Nb<sub>3</sub>Sn composite superconducting wires  
of ITER

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 实验原理 .....	1
5 要求 .....	1
6 测试装置 .....	2
7 样品准备 .....	2
8 测试步骤 .....	2
9 结果计算 .....	3
10 测试方法的不确定度 .....	5
11 测试报告 .....	5
附录 A (资料性附录) Nb <sub>3</sub> Sn 超导线临界电流测试方法的不确定度评定 .....	7
附录 B (资料性附录) 液氦温度修正 .....	9

## 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：武玉、龙凤、刘方、刘华军、秦经刚、刘勃、雷雷。

# ITER 用铌三锡超导线直流临界电流测试方法

## 1 范围

本标准规定了ITER用Nb<sub>3</sub>Sn超导线直流临界电流测试的实验过程及方法。

本标准适用于ITER用Nb<sub>3</sub>Sn超导线的直流临界电流测试。其他类型Nb<sub>3</sub>Sn超导线直流临界电流测试可参照本标准执行。

## 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—2003 电工术语 超导电性

GB/T 28871—2012 铌三锡(Nb<sub>3</sub>Sn)复合超导体的直流临界电流测量

HJB 1005—2017 铌三锡超导线直流临界电流测试样品制备方法

## 3 术语和定义

GB/T 13811—2003及GB/T 28871—2012界定的术语和定义适用于本标准。

## 4 实验原理

通过测量一定外加静磁场强度(磁场)条件下,处于恒压、特定温度的液氮槽中ITER用Nb<sub>3</sub>Sn超导线样品的电压( $U$ )-电流( $I$ )特性来确定临界电流。为了获得 $U$ - $I$ 特性,给超导线样品通以直流电流,并测量沿一段超导线样品所产生的电压。电流从零开始逐渐增加,并记录所产生的 $U$ - $I$ 特性。达到设定的临界电场强度(电场)判据( $E_c$ )所对应通过的电流值即为临界电流值。对于任一具体的电压抽头间距,都有相对应的电压判据( $U_c$ )。

## 5 要求

### 5.1 安全要求

5.1.1 本标准的使用者有责任考虑并建立适当的、保证安全和健康的操作规程,并在使用前确定规程的适用性。

5.1.2 应采用适当的绝缘和隔离措施以防止电流引线短路。

5.1.3 为防止低温液体快速挥发甚至发生爆炸而使邻近区域出现缺氧状态,应增加通风设备。

5.1.4 防止皮肤与储液杜瓦容器、输液管或低温液体直接接触。

5.1.5 杜绝储液杜瓦的压力阀、安全阀出口堵塞。

5.1.6 超导线由于使用不当或其他原因失超时，立即停止实验。如果样品正处于通电状态，应立即关闭样品电源。关闭氦气回收系统阀门，并保持氦气安全排放回路通畅。实验人员应确保处于氧气充足的环境。

5.1.7 超导线失超后，应对磁体系统进行全面检查并恢复或修复磁体系统，确定磁体完好后，方可进行下一次实验。

## 5.2 实验要求

5.2.1 在本标准中，背景磁场应与测试样品骨架的轴向平行。样品电流和外加磁场的方向应使整个样品受到向内的洛伦兹力。

5.2.2 本标准未采用通用的电流转移修正，如果在测试中出现明显的电流转移信号，则该次测试应视为无效。

## 6 测试装置

### 6.1 实验用低温容器及磁体系统

6.1.1 低温容器内安装有超导螺线管磁体与支撑结构，为样品提供背景磁场。

6.1.2 液氮槽的温度应是接近在测试地点的典型大气压下正常沸点的液氮温度。样品温度可以认为和液氮温度相同。

6.1.3 在液氮温度下，磁体能提供的样品区域最大磁场不小于 12 T。

6.1.4 样品所处空间内磁场均匀度应优于  $\pm 0.02$  T。磁场最大的周期性及随机性偏移应小于  $\pm 0.02$  T。

### 6.2 样品杆

6.2.1 样品杆主要由电流引线、测量线、样品固定装置、支撑结构以及回气回路组成。

6.2.2 测量线分为传感器件测量线和样品电位测量线，一般采用扭绞双芯无氧铜漆包线。用于传感器件（诸如温度传感器，霍耳片等）的测量线也可采用扭绞的双芯或四芯绝缘线。

6.2.3 样品杆与样品连接方法通常有两种：一种是直接焊接法，即样品两端与电流引线两端分别利用焊锡进行焊接。另一种是机械紧固法，即样品两端与电流引线两端分别采用机械紧固的方法相连。

### 6.3 样品电源及数据采集系统

6.3.1 样品电源能够提供不小于 120 A/min 的电流变化速率。

6.3.2 数据采集系统应能连续同步记录电压、电流、温度等信号。电压测量应采用纳伏表；电流采用精度优于 0.5% 的霍尔传感器或分流器进行测量；液体温度可通过压力传感器或温度传感器测量，其测量精确度应达到  $\pm 0.02$  K。

## 7 样品准备

样品制备方法应符合 HJB 1005—2017 的要求。

## 8 测试步骤

### 8.1 实验前准备

8.1.1 检查实验用低温容器，确定其安全阀正常工作；检查磁体系统真空、电源回路、样品电源及数据采集系统，保证系统工作正常。

8.1.2 利用液氮对磁体进行预冷，使磁体浸泡于液氮中并维持不少于 2 h。

8.1.3 排出低温容器中的液氮，确保杜瓦底部不存在残留。

8.1.4 对低温容器内输送液氮，实时监测液面高度，液氮液面不低于最低安全工作液面，并且不超过磁体系统允许的最高高度。

## 8.2 测试过程

### 8.2.1 磁体励磁

8.2.1.1 待磁体浸没于液氮中，并且液面高度处于安全水平后，通过超导磁体电源对磁体励磁至需要的测试磁场。

8.2.1.2 励磁速率应严格遵照磁体使用手册或说明书等文件要求，禁止速率高于安全设定范围。通常，磁场越高时励磁速率越低。

### 8.2.2 样品放置

8.2.2.1 样品安装在样品杆上后，在室温下对传感器、电位线及电流引线进行检测，确保正常工作。

8.2.2.2 将样品杆缓慢放入磁体杜瓦防止液氮剧烈沸腾。放入或取出样品及测试实验过程中应监视并保证液氮液面高于安全运行水平，防止磁体失超。

### 8.2.3 测试

8.2.3.1 样品应浸没在液氮中测量。样品从室温冷却到液氮温度时间应不少于 5 min。

8.2.3.2 在测定每个临界电流 ( $I_c$ ) 时应测量液氮槽的温度。

8.2.3.3 当采用恒定速率升流法采样时，电流从零升到  $I_c$  的时间应大于 10 s，并且在电流高于  $0.9 I_c$  时，电流上升率应小于 60 A/min。

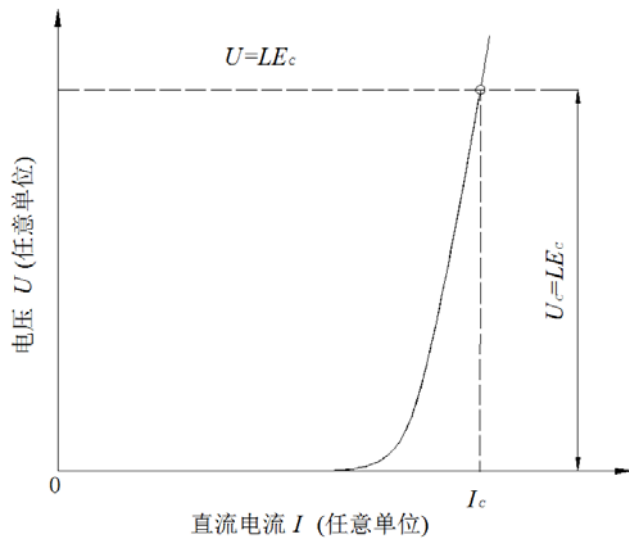
8.2.3.4 当采用升流-恒流-升流法采样时，在设定点之间的升流速率应低于相应地在 3 s 内将电流从零升到  $I_c$  所对应的速率。

8.2.3.5 采用恒定速率升流法采样时，基准电压应取电流在约  $0.1 I_c$  时所对应的平均电压，采用升流-恒流-升流法采样时， $U-I$  特性的基准电压应取零电流时所记录的电压。

## 9 结果计算

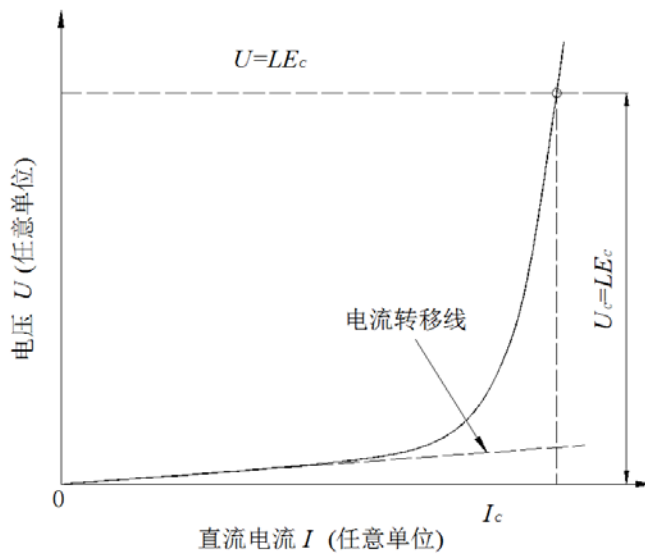
### 9.1 临界电流判据

临界电流 ( $I_c$ ) 由电场强度判据 ( $E_c$ ) 来确定，见图1和图2。



注：采用图1方法确定临界电流。

图1 本征  $U-I$  特性曲线



注：在低电流区域呈现线性电流转移分量的 $U-I$ 特性曲线上采用图2方法来确定临界电流。

图2 具有电流转移分量的  $U-I$  特性曲线

采用电场强度判据时，两个  $I_c$  值应分别由  $10 \mu\text{V}/\text{m}$  和  $100 \mu\text{V}/\text{m}$  判据确定。

$I_c$  应由  $U-I$  曲线上电压为  $U_c$  的点所对应的电流值确定， $U_c$  是相对基线电压的测量电压（见图1与图2）。 $U_c$  的计算见公式（1）：

$$U_c = LE_c \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$U_c$  ——电压判据，单位为微伏 ( $\mu\text{V}$ )；

$L$  ——电压抽头间距，单位为米 (m)；



$E_C$ ——电场强度判据，单位为微伏每米( $\mu\text{V}/\text{m}$ )。

应在基线电压和约 $0.7 I_c$ 对应的平均电压两点间画一直线(见图1和图2)。这条直线可能由于存在电流转移而呈现一定的倾斜，但其斜率应小于 $0.3 U_0/I_c$ ，这样确定出的 $I_c$ 才能视为有效，其中 $U_0$ 和 $I_c$ 的值是由 $10 \mu\text{V}/\text{m}$ 判据确定。

## 9.2 n 值

n值应通过确定 $I_c$ 值的区域内的 $\log U$ 对 $\log I$ 图线的斜率来计算，或者用9.1中的判据所得出的两个 $I_c$ 值来计算。

超导体的 $U-I$ 特性通常可以通过经验幂次方程近似表述，见公式(2)：

$$U = U_0(I/I_0)^n \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$U$ ——样品电压，单位为微伏( $\mu\text{V}$ )；

$U_0$ ——参考电压，单位为微伏( $\mu\text{V}$ )；

$I$ ——样品电流，单位为安培(A)；

$I_0$ ——参考电流，单位为安培(A)；

n值——无量纲，反映了 $U-I$ 曲线的一般形状。

即使在接近临界电流判据 $E$ 为 $10 \mu\text{V}/\text{m}$ 附近的电流范围内， $\log U$ 对 $\log I$ 的图形并不总是线性的，因而需要指明用于确定n值的判据范围。典型范围是 $10 \mu\text{V}/\text{m} \sim 100 \mu\text{V}/\text{m}$ 。

在确定n值时，其分散程度的变化系数可能高达20%，因此，在目前方法中，确定n值的做法是选择性的。

## 10 测试方法的不确定度

本测试方法的不确定度受电流准确度、电压准确度、电压抽头间距准确度等的影响。本测试方法的相对合成标准不确定度应不超过2.5% (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) 样品编号；
- c) 样品几何尺寸。

### 11.2 $I_c$ 值报告

应将 $I_c$ 值及相应的判据写入报告。当测试温度不等于4.22 K时可参照附录B进行 $I_c$ 值修正。

### 11.3 测试条件报告

测试报告中应包含如下测试条件：

- a) 测试磁场及磁场的均匀性和精确度；

- b) 测试温度及其精确度；
- c) 被测样品线圈的匝数；
- d) 电压抽头间距和样品的总长度；
- e) 电流引线固定环与电压抽头间的最短距离；
- f) 电流引线固定环上的焊接长度；
- g) 样品骨架材料及结构；
- h) 超导线反应热处理条件。

附 录 A  
(资料性附录)

Nb<sub>3</sub>Sn 超导线临界电流测试方法的不确定度评定

A.1 数学模型

Nb<sub>3</sub>Sn超导线临界电流 $I_C$ 可由公式(A.1)得到:

$$I_C = I \left( \frac{E_C L}{U} \right)^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$E_C = 0.1 \mu V/cm$ ;

$n = 20$ ;

$L = 50 \text{ cm}$ ;

$I = 250 \text{ A}$ ;

$U = 5 \mu V$ 。

因此,  $I_C = I \left( \frac{E_C L}{U} \right)^{\frac{1}{n}} = 250 \text{ A}$ 。

A.2 不确定度灵敏度系数评定

$I_C$ 的合成标准不确定度 $u_{I_C}$ 可由公式(A.2)得到:

$$u_{I_C} = \sqrt{(c_1 u_I)^2 + (c_2 u_L)^2 + (c_3 u_U)^2} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$$c_1 = \frac{\partial I_C}{\partial I} = \left( \frac{E_C L}{U} \right)^{\frac{1}{n}} = 1;$$

$$c_2 = \frac{\partial I_C}{\partial L} = \frac{1}{nL} \left( \frac{E_C L}{U} \right)^{\frac{1}{n}} = 0.25 \text{ A/cm};$$

$$c_3 = \frac{\partial I_C}{\partial U} = \frac{1}{nU} \left( \frac{E_C L}{U} \right)^{\frac{1}{n}} = -2.5 \text{ A}/\mu V。$$

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 L的合成不确定度

L的合成不确定度计算如下：

- 焊点引起的实验标准不确定度， $u_{L1}=0.5\text{ cm}$ ；
- 测量工具引起的实验标准不确定度， $u_{L2}=0.05\text{ cm}$ ；
- 骨架尺寸引起的实验标准不确定度， $u_{L3}=0.2\text{ cm}$ ；
- L的合成标准不确定度：

$$u_L = \sqrt{(u_{L1})^2 + (u_{L2})^2 + (u_{L3})^2} = 0.541\text{cm}。$$

### A.3.2 I的合成不确定度

I的合成不确定度计算如下：

- 霍尔传感器引起的实验标准不确定度， $u_{I1}=1.25\text{ A}$ ；
- 采集卡温度漂移引起的实验标准不确定度， $u_{I2}=0.7\text{ A}$ ；
- 电源数字量控制输出引起的实验标准不确定度， $u_{I3}=0.2\text{ A}$ ；
- I的合成标准不确定度：

$$u_I = \sqrt{(u_{I1})^2 + (u_{I2})^2 + (u_{I3})^2} = 1.447\text{A}。$$

### A.3.3 U的合成不确定度

U的合成不确定度计算如下：

- 热电势引起的实验标准不确定度， $u_{U1}=0.2\text{ }\mu\text{V}$ ；
- U的合成标准不确定度：

$$u_U = \sqrt{(u_{U1})^2} = 0.2\mu\text{V}。$$

### A.4 I<sub>c</sub>的合成标准不确定度评定结果

I<sub>c</sub>的合成标准不确定度评定结果：

$$u_{I_c} = \sqrt{(c_1 u_I)^2 + (c_2 u_L)^2 + (c_3 u_U)^2} = 1.537\text{A}。$$

I<sub>c</sub>的相对合成标准不确定度：

$$u = \frac{U_{Ic}}{I_C} = \frac{1.537}{250} = 0.61\%。$$

### A.5 I<sub>c</sub>的合成标准不确定度的循环比对实验

对I<sub>c</sub>的测试结果进行循环比对实验。一共得到45个结果，平均值是334.9 A，实验标准偏差为12 A，实验标准不确定度为1.78 A，相对合成标准不确定度为0.53%。

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2.5%（包含因子k=1）。

附 录 B  
(资料性附录)  
液氮温度修正

对于ITER用Nb<sub>3</sub>Sn超导线临界电流测试,当液氮温度即样品温度 $T_m$ 不等于4.22K时,可根据公式(B.1)对临界电流测试结果进行修正,得到温度为4.22 K下的临界电流 $I_c$ :

$$\frac{I_c}{I_m} = 1 + C \times (T_m - 4.22) \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

$I_c$ ——4.22 K下的临界电流;

$I_m$ ——温度 $T_m$ 下的临界电流;

$C$ ——与背景磁场 $B$ 相关的常数,  $B$ 为11.5 T时 $C$ 等于0.11270;  $B$ 为12 T时 $C$ 等于0.11834。

