

高温超导叠制造工艺及试验方法

Manufacture technology and experimental method of high temperature
superconducting stack

2017 - 03 - 30 发布

2017 - 04 - 30 实施

前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本标准由中国科学院等离子体物理研究所提出。

本标准由安徽省核聚变工程技术及应用标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：中国科学院等离子体物理研究所、安徽省质量和标准化研究院。

本标准主要起草人：陆坤、宋云涛、郑金星、张文秋、丁昌东、刘承连、丁开忠、周挺志、黄雄一、陈洁鹤、邹春龙。

高温超导叠制造工艺及试验方法

1 范围

本标准规定了高温超导叠制造工艺及试验方法的术语和定义、焊接材料要求、超导叠焊接、超导叠测试和测试报告。

本标准适用于真空超导叠焊接制造及测试方法。

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，仅所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

3 术语和定义

GB/T 13811-2003 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电流引线 current lead

室温电源与低温磁体之间的电连接装置。电流引线低温端位于低温腔体内部，与 4K 超导母线连接，另外一端位于室温状态下，与室温电源总线连接。

具体结构如图1 所示。

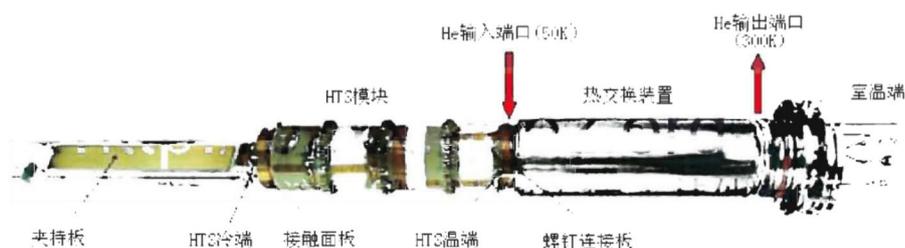


图1 高温超导电流引线结构

注：超导电流引线由工作在（4-78）K 温区的 HTS 超导段的部件，和工作在（78-300）K 温区的气冷铜电流引线部件组成。HTS 部件的冷端与超导母线相连，并由超导母线的超临界液氮冷却维持在 5K 左右，HTS 部件温端与铜引线的热交换装置连接，并通过该热交换装置使该端维持在（40-75）K。铜引线的热交换由引入 50K 氦气进行强制冷却，经过热交换后在铜引线的室温端输出大约 300K 的氦气。HTS 部件是由基材为 Bi-2223/Ag Au 或 YBCO 的合金超导带先钎焊成超导带叠，再将该带叠钎焊在具有较低热传导率的不锈钢支撑管上形成的。

3.2

超导叠 HTS stack

为了提高电流引线的载流能力，将电流引线中的高温超导带材并联连接在一起的，形成的叠状结构。

示例：TF 68KA 电流引线，一根电流引线共需要 1000 多根银金基 Bi-2223 高温超导带并联，这些高温超导带材共分为 90 叠，每叠由 12 层带组成。图 2 为 10kA 电流引线的 36 个超导叠。



图2 10kA 电流引线的 36 个超导叠

3.3

超导接头 superconducting joint

用于连接高温超导电流引线与低温超导馈线的部件。在电流引线中，超导接头通过钎焊完成。

3.4

接头电阻 joint resistance

因超导接头的引入而给系统带来的额外电阻。

3.5

临界电流 critical current

处于超导态的超导体通以直流电流增加到临界值时样品转入正常态时的电流。

3.6

真空钎焊 vacuum weld

在真空条件下，通过加热使焊剂熔化而形成的一种可有效地避免材料表面氧化的高质量连接工艺方法。

3.7

四引线法 four-probe method

为消除接触电势和接触电阻对测量电位的影响，采用四根引线测量样品电阻的方法。其中外侧两根为电流引线，内侧两根为电压引线。如图3 所示。

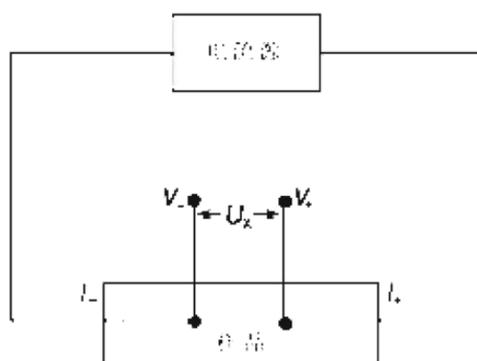


图3 四引线法示意图

4 焊接材料要求

4.1 超导带材

高温超导带材除具有 100A 以上的载流能力，还要具有较低的热导率，带材易焊接。

4.2 焊料

选择熔点 183℃ 的 Sn-40Pb 焊料和熔点为 217℃ 的 Sn-3.8Ag-0.7Cu 焊料。

4.3 焊接模具

4.3.1 焊接模具应满足如下条件：

- a) 为凹槽模具，采用不粘焊锡的材料；
- b) 具有一定的刚度；
- c) 有良好的导热率；

4.3.2 每个槽配有用于压紧超导叠的压紧块，超导叠上的平均压强应在 150g/cm² 左右。

5 超导叠焊接

5.1 焊接装置

超导叠通过真空钎焊方式将多根超导带焊接成叠。

焊接装置包括：

- 真空钎焊控制箱；
- 超导叠焊接模具；
- 加热器；
- 冷却系统；
- 温度采集控制系统；
- 数字真空计；
- 数据采集表；
- 真空泵；
- 超导叠储存箱（真空箱）等。

5.2 材料准备

超导叠焊接需进行如下准备：

- a) 将带材裁剪成理论计算所需长度的超导带；
- b) 用无水酒精擦除带材上的污渍；
- c) 按超导带—焊料带—超导带的顺序交替装入模具中。

5.3 焊接模具温度控制

5.3.1 超导叠在真空钎焊时，应对焊接模具底板和侧板的温度实现同步控制，然后升高至焊接温度，保温预定时间后停止加热。

5.3.2 温度控制系统应能够迅速地实现对温度的控制调节，同时避免各部件温差大于 5℃的情况产生。

5.4 真空焊接

5.4.1 完成超导带和焊料带在模具中的装配后，将整体放入真空炉中。

5.4.2 将真空炉进行抽真空处理，达到 Pa 量级的真空度后，准备加热进行焊接。

5.4.3 焊接过程中，机械泵需要持续进行抽真空，保持真空度。

5.4.4 超导叠制造完成后应放入真空容器中进行性能测试前的保持。

6 超导叠测试

6.1 测试方法

超导叠的测试主要通过测量临界电流的方式进行，测试方法采用四引线法，超导叠临界电流测试电路示意图参见附录A.1。

6.2 测试准备

6.2.1 检查超导叠是否有损坏痕迹，标记是否完整。

6.2.2 检查液氮是否充足，不够应及时补充。

6.2.3 将测试样品架装配完成，测试样品架由环氧板、镀银铜块、不锈钢调节螺杆和弹簧电位触点组成。

6.2.4 准备好酒精、液氮槽、相关工装具等必备器械。

6.3 软硬件联调

将工控机与电源、万用表连接好后，打开超导叠测试软件，模拟超导叠测试过程进行软硬件联调，确保以下操作正常后才能装配超导叠进行临界电流测试：

- 电源在本地控制和远程控制都正常运行；
- 电流和电压信号采集和存储正常；
- 失超保护设置合理，能够动作正常。

6.4 测试装配

6.4.1 超导叠临界电流测试装置由环氧板、镀银铜块、不锈钢调节螺杆和弹簧电位触点组成，如图4所示。

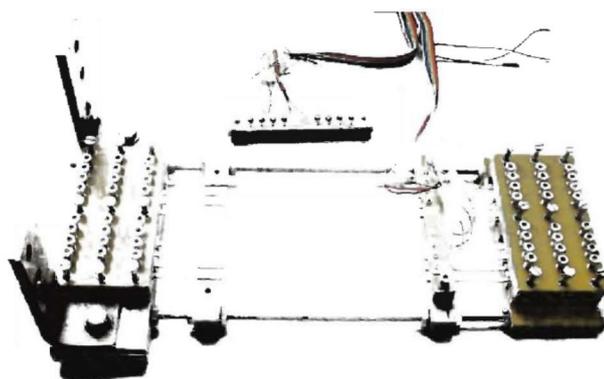


图4 超导叠临界电流测试装置

6.4.2 超导叠测试装配步骤:

- a) 调节两端环氧板距离,使两端铜块外间距与超导叠长度相同;调节超导叠上的电位触点,使其间距小于超导叠长度;
- b) 将测试架电源接头连接到测试用的直流电源上;
- c) 用无水酒精将超导叠和测试架清洗干净,去除表面的油渍;
- d) 将超导叠平放到测试架的槽中,记录各通道的超导叠编号,在超导叠两端上表面盖上镀银铜块,再装上两端压紧块。旋紧螺丝的旋紧力度满足浸泡式测量即可,不能过大以免压坏超导叠;
- e) 装紧电位触点排,使电位触点与超导叠接触良好;

注:电位线通过弹簧压紧的电位触点连到超导叠上,确保在液氮下电位触点能够很好地与超导叠之间的紧密接触。

- f) 装上超导叠的总电位保护,打开数据采集程序检查各电位是否接触正常。

6.5 液氮添加

测试应在液氮环境下进行,将超导叠按 6.4 装入测试装置后将其缓慢放入液氮槽中,液氮不可直接浇到叠上,确保整个装置浸泡在液氮中,液面高度淹没超导叠旋紧螺丝。在后续通电过程中应注意及时添加液氮,保持液面没过超导叠。

6.6 通电测试

6.6.1 加入液氮后,等待(约 5 min)超导叠完全冷却,表现为无连续气泡,电位数据稳定,可以通电流。确认软件电源控制复位,按附录 B 规定的步骤启动电源,开启电源远程控制开关,按选定的速率缓慢增大电流,并记录相应的电位。测试中,通常选取 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 的临界电流判据。

注:超导叠临界电流判据为 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$,电流最大值由各超导叠电位差保护阈值和总电位差保护阈值确定。

6.6.2 设置电流上升率为 $5 \text{ A}/\text{s}$ 、各超导叠电位差 $5 \mu\text{V}/\text{cm}$ 保护阈值和总电位差 10 mV 保护阈值后,开始升电流。通电电流由 0 开始逐渐增加,当各叠电位差超过 $5 \mu\text{V}/\text{cm}$ 阈值或总电位差超过 $10 \text{ mV}/\text{cm}$ 的阈值时,自动封锁电源输出,实验结束。

注:当各叠电位或总电位超过阈值时,均需要自动封锁电源输出,防止超导叠失超烧毁。

6.6.3 关闭电源,停止数据采集。

6.7 卸载超导叠

实验结束后,将测量装置取出液氮槽,并立即松开压紧超导叠上方的螺丝,用吹风机将超导叠上的水吹干,检查超导叠是否完好无损,将超导叠放回存储装置中。

6.8 数据整理

画出超导叠临界电流测试 I-V 关系曲线。超导叠临界电流判据为 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ，整理出各超导叠的临界电流。

7 测试报告

7.1 报告组成

测试报告包括超导叠焊接报告和超导叠测试报告。

7.2 超导叠焊接报告

超导叠焊接报告应撰写详细，方便现场实施，同时针对焊接现场可能出现的危急情况，有应急预案，报告内容包括但不限于：

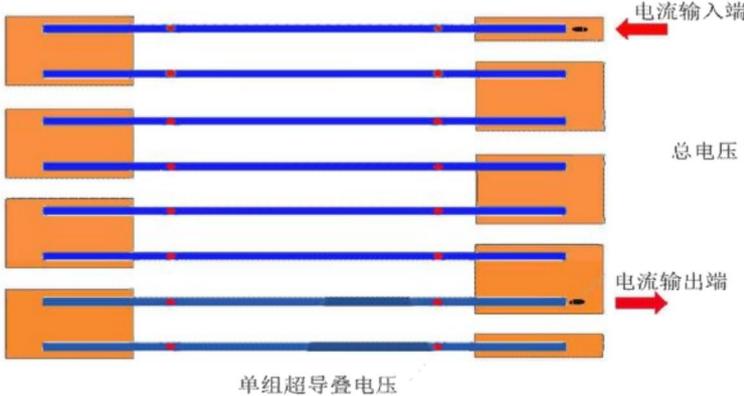
- a) 超导带材生产厂家、规格、尺寸、临界电流等基本信息；
- b) 焊接所选用焊料生产厂家，熔点，成分比等基本信息；
- c) 焊接所用其它装置的基本信息，如真空泵，模具，电源系统等；
- d) 焊接过程的详细操作报告；
- e) 焊接过程中应急处理预案；
- f) 焊接过程记录；
- g) 紧急情况处理办法；
- h) 特殊仪表操作说明；
- i) 参与人员，时间，地点等。

7.3 超导叠测试报告

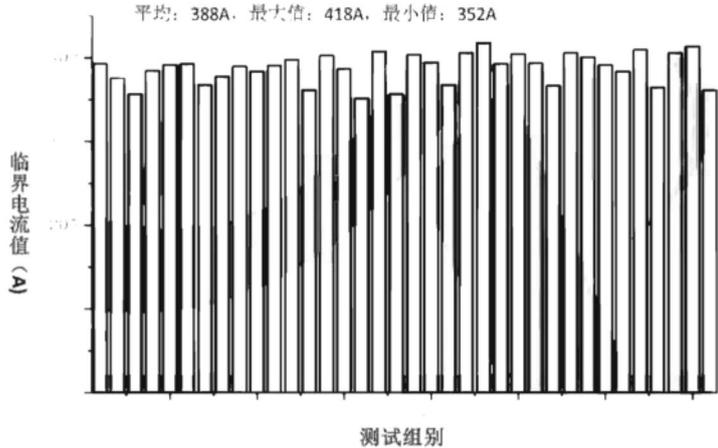
超导叠的测试主要为超导叠临界电流测试，测试报告应详细记录测试过程，并对测试结果进行比较。报告包括但不限于如下内容：

- a) 超导叠尺寸；
- b) 超导叠测试仪器使用说明；
- c) 测试过程详细记录；
- d) 测试数据分析报告，临界电流测试图，见附录图 A. 2；
- e) 测试人员，时间地点等。

附录 A
(资料性附录)
超导叠临界电流测试电路示意图



图A.1 超导叠临界电流测试电路示意图



图A.2 ITER 10KA 电流引线的 36 组超导叠临界电流 (测试条件为 77K, 自场)

附 录 B
(规范性附录)
直流电源启动步骤

B.1 直流电源启动步骤

直流电源的启动应严格按照步骤进行，如下：

- a) 检查电源控制线是否连接正确；
 - b) 检查实时电流线是否连接正确；
 - c) 将电源控制电压并入一个可以观察额万用表，实时观察当前 USB 输出的控制电压；
 - d) 将电源自身控制模式打到本控模式后，启动电源；
 - e) 等待电源进入状态，观察软件的实时电流值是否在 10 A 以下，若不是，重复 1~5 步骤；
 - f) 观察总电位是否在 2 mV 以下；
 - g) 输入一个诊断电流 50 A，设置合理的上升速率；
 - h) 调出失超保护设置界面，确认失超保护各数值的设置合理；
 - i) 观察输出电流状态和整个系统的电位状态，若一切正常，进入操作状态。
-