

## Bi2223/Ag 带 HTS 双饼线圈中的接头焊接

张京业 陈敬林 许爱霞 张勇 陈治友 王福堂 丁立人 高秉钧

(中国科学院等离子体物理研究所强磁场实验室,合肥,230031)

**摘要:**降低双饼线圈间的搭接电阻,可有效提高 HTS 磁体的稳定性并降低制冷费用。文中在分析影响搭接电阻因素的基础上,对双饼线圈间的焊接工艺和接头性能进行了实验研究,结果表明所用焊接技术满足磁体稳定运行的要求。

**关键词:**双饼线圈 HTS 磁体 焊接工艺 Bi2223/Ag 超导带

## 1 实验磁体

实验磁体参数见表 1。双饼线圈间的焊接工艺是 HTS 磁体研制过程中的一个关键,接头电阻的大小直接影响到磁体的稳定性和制冷费用<sup>[1]</sup>。在 HTS 实验磁体(参数见表 1)的组装过程中,双饼线圈间的连接采用简便可靠的有阻焊接技术<sup>[2,3]</sup>。所报导的两根超导带间的接头电阻在  $10^{-8}\Omega$  左右<sup>[3]</sup>,最好的可以达到  $10^{-9}\Omega$ <sup>[2]</sup>。本文介绍实验磁体的焊接工艺和接头电阻性能实验。

Bi2223/Ag 高温超导磁体参数:磁体内径(mm):70;磁体外径(mm):150.6(上),148(中),154(下);高(mm):84;匝数:3245;带长(m):1118;自感系数(H):0.68;运行温度(K):20;运行电流(A):96.5;中心场  $B_0$  (T):2.94;最大场  $B_{max}$  (T):3.34;最大径向场  $B_{Rmax}$  (T):1.19。

## 2 焊料的选择

Bi2223/Ag 超导带是在银(或银合金)基中嵌入脆性的陶瓷氧化物超导芯。陶瓷材料的热膨胀系数 $[\alpha=(7\sim300)\times 10^{-7}/K]$ 比金属材料的热膨胀系数 $[\alpha=(15\sim150)\times 10^{-5}/K]$ 低两个量级<sup>[4]</sup>,超导带中的多丝超导芯耐高温且热膨胀小,而银基体与超导芯相比不仅熔点低(964 C)且热膨胀大。当超导带处于高温或高温度

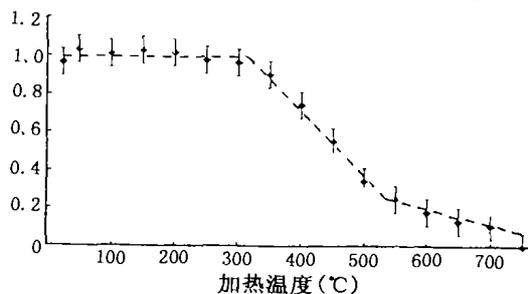


图 1 Bi 带的相对临界电流随加热温度的变化关系

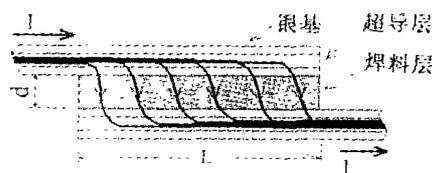


图 2 电流流过 Bi2223/Ag 带搭接焊层示意图

梯度的环境中时,基体与超导芯间的相互作用导致超导带载流能力的退化。图 1 给出了加热温度  $t$  与超导带临界电流间的关系<sup>[2]</sup>,由图可以看出,加热温度  $t$  在  $0\sim 300\text{C}$  的范围内不会引起超导带载流能力的退化,从  $350\text{C}$  超导带载流能力开始退化,到  $750\text{C}$  超导芯完全断裂。所以在焊接过程中超导带的温度不能高于  $350\text{C}$ ,并保证带面受热均匀以减小温度梯度。

为保证在焊接过程中超导带的温度不超过  $350\text{C}$ ,采用熔点为  $183\text{C}$ 、浸润能力好的 H1SnPb39 锡软焊料,它在焊接时不仅流动性好,而且冷凝后表面光亮、强度高<sup>[5]</sup>。

### 3 Bi 系超导带间的搭接电阻

为减小超导带间的搭接电阻,深入了解影响搭接电阻的各因素,给出了电流流过超导带搭接部分的示意图(图 2)。电流在超导芯中的流动是无阻的;电流在两带搭接范围内逐渐从上侧的超导芯经过银基、焊料层和下侧超导带的银基,进入下侧带材的超导芯,这个过程是有阻的(搭接电阻)。所以搭接电阻包括三部分:银基电阻  $R_{Ag}$ 、料层电阻  $R_{Sn}$  和银基与焊料层间的接触电阻  $R_t$ 。

若两超导带间的有效搭接面积为  $S$ ,银层等效厚度  $d_{Ag}$ ,焊料层等效厚度  $d$ ,接触层等效厚度  $\delta$ ,则这三个电阻分别为:  $R_{Ag} = \rho_{Ag} \frac{d_{Ag}}{S}$ ,  $R_{Sn} = \rho_{Sn} \frac{d}{S}$ ,  $R_t = \rho \delta / S$ ,所以两超导带间的搭接电阻为:

$$R = 2R_{Ag} + R_{Sn} + 2R_t = (2\rho_{Ag}d_{Ag} + \rho_{Sn}d + 2\rho\delta)/S \quad (1)$$

在 80K 左右时银、焊料和接触层的电阻率量级分别为:  $\rho_{Ag} \sim 10^{-9}\Omega \cdot m$ 、 $\rho_{Sn} > 10^{-7}\Omega \cdot m$ 、 $\rho \sim 10^{-5} - 10^{-6}\Omega \cdot m$  量级。可见因电阻率  $\rho_{Ag}$  比焊料电阻率  $\rho_{Sn}$  和接触电阻率  $\rho$  小两个量级以上,所以银基电阻  $R_{Ag}$  与焊料层电阻  $R_{Sn}$  和接触电阻  $R_t$  相比可以忽略。若超导带的宽度为  $K$ (常数),搭接长度为  $L$ ,则超导带与焊料层间的有效接触面积  $S = \lambda KL$ (搭接面积,  $\lambda$  两者的比例系数),所以(1)式化为:

$$R = 2R_{Ag} + R_{Sn} + 2R_t \approx \frac{\rho_{Sn}d + 2\rho\delta}{\lambda KL} \quad (2)$$

可以看出,要减小搭接电阻  $R$ ,不仅要减小焊料层和接触层厚度  $d$  与  $\delta$ ,还要适当增大搭接长度  $L$ ,尽量增大有效接触面积  $S$  与  $KL$  之间的比例系数  $\lambda$ 。

### 4 Bi 带双饼线圈间的焊接

超导带搭接部分弯曲性能差,小角度的弯折就导致超导芯断裂。为避免该部分的弯折,先把各双饼线圈组装成磁体,然后焊接。在焊接过程中先定型后焊接,从而避免搭接部分焊接后的弯曲形变。此外,因超导芯是脆性陶瓷材料,在整个操作过程中避免超导带局部面积受压过大,绝对避免弯折、扭曲超导带。

考虑到上述因素,平头烙铁控温在  $250^\circ\text{C}$ ;为减小超导带上的温度梯度,保证带面受热均匀,在带面加热时烙铁端头平放在带面上来回拖动;两超导带间的搭接长度为  $10\text{cm} \sim 12\text{cm}$ 。在焊接过程中,严格按以下步骤进行:(1)清洁超导带面(双面):用 360 号砂纸轻轻擦拭掉带面的绝缘层,至表面光亮、平整为止,然后用浸有适量无水乙醇的棉纱擦拭。(2)超导带双面挂锡:把控温在  $250^\circ\text{C}$  的烙铁端沾少许松香,然后把铁端头轻轻平放在清洁过的带面上并来回拖动,待松香均匀润湿带面后以同样的方法涂上薄薄一层焊锡(搭接部分挂锡

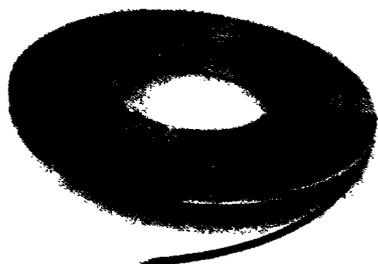


图 3 Bi2223/Ag 双饼线圈

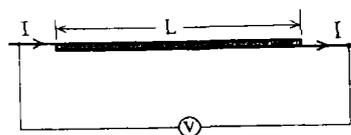


图 4 四引线法测 Bi 带焊接电阻示意图

后的双饼线圈如图 3 所示)。(3)定型:沿磁体外缘固定环氧板,并使环氧板的弯曲半径与磁体外半径相同,把挂锡超导带的两个端头沿环氧板重迭在一起,两端固定。(4)加热焊接:烙铁端头轻轻压在重叠部分的上侧,并缓缓拖动烙铁,待夹层中的锡熔融流出时,紧贴模具沿带的方向缓缓拉动带的一端,使两带面充分接触,当夹层中熔融的锡因积压而均匀流出时停止加热。

采用上述方法完成了磁体中各双饼线圈间的成功焊接。为便于搭接电阻和磁体性能测试,在搭接部分的

两端焊接一根电压测量线。为保护搭接部分不受损伤,把搭接部分装入绝缘套管中。

## 5 搭接电阻测试

磁体超导带搭接电阻的测试是在液氮温度进行的,把磁体的运行电流稳定在某个电流值  $I_{op}$  ( $I_{op} < I_c$ ),然后测接头两端电压,测试采用如图 4 所示的四引线法。每个双饼线圈两端的数据测量线焊接在离超导带接头约 2cm 处,把电压测量线接在  $\mu\text{V}$  电压表两端,磁体运行电流  $I_{op}$  稳定时测搭接部分两端的电压  $U$ 。搭接电阻一般小于  $10^{-6}\Omega$ ,所以接头两端的热电势  $\epsilon$  不可忽视,所以测试电压应该是这两部分之和:

$$U_1 = I_{op}R + \epsilon \quad (3)$$

若图 4 中电流反向后,即磁体运行电流反向后再测接头两端的电压,其中热电势方向不变,而电阻电压反向,即:

$$U_2 = I_{op}R - \epsilon \quad (4)$$

(3)、(4)两个方程的两端分别相加消掉热电势的影响,则搭接电阻为  $R = (U_1 + U_2')/2I_{op}$ 。表 1 列出了各双饼线圈之间搭接电阻的测试结果。

表 1 Bi 带双饼线圈间的搭接电阻测试值(1'~9' 双饼线圈序号,测试温度 77.3K)

接头位置	1'-2'	2'-3'	3'-4'	4'-5'	5'-6'	6'-7'	7'-8'	8'-9'
带宽 $K$ ( $10^{-3}\text{m}$ )	4.4	3.7	3.7	3.6	3.6	3.7	3.6	4.4
焊接长度 $L$ ( $10^{-2}\text{m}$ )	11	10	10	10	10	12	10	10
$I_{op}$ (A)	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4
$U_1$ ( $\mu\text{V}$ )	1.1	4.5	3.7	5.3	5.0	1.5	14.3	0.8
$U_2$ ( $\mu\text{V}$ )	0.35	2.4	4.0	3.2	3.6	1.0	15.9	1.4
$R$ ( $10^{-8}\Omega$ )	5.4	25.7	28.7	32	32	9.3	112.7	8.2

由表 1 可得,超导带间的搭接电阻的测试值多在  $10^{-7}\sim 10^{-8}\Omega$  之间,最小值为  $54\text{n}\Omega$ ,除 6'、7' 双饼线圈间的搭接电阻为  $1.127\mu\Omega$  外,其余都小于  $320\text{n}\Omega$ 。导致搭接电阻差异性的原因很多,根据式(2),对搭接电阻影响最明显的是超导带与焊料间的有效搭接面积  $\lambda KL$ 。1'-2' 及 8'-9' 双饼线圈间的搭接电阻比其它的小,可能是它们的搭接面积较大的缘故。7' 与 8' 双饼线圈间的搭接电阻比其它的搭接电阻大一个量级,可能是焊接前带面没有清洗干净,导致焊料与银表面没有充分接触,导致  $\lambda$  较小而接触层厚度  $\delta$  较大,即通常所说的“虚焊”。液氮温度磁体的总接头电阻为  $2.5\times 10^{-6}\Omega$ ,在磁体电流 13.4A 时,接头功耗小于  $5\times 10^{-4}\text{W}$ 。在 20K 磁体工作电流  $I_{op}=96\text{A}$  时的接头功耗小于  $2.3\times 10^{-2}\text{W}$ (20K 接头电阻小于 77K 的电阻)。这个功耗是很小的,不会影响磁体的稳定运行。

## 6 结论

实验研究了 Bi2223/Ag 带 HTS 双饼线圈内的接头技术。结果表明 Bi2223/Ag 带双饼线圈间采用铅—锡软焊技术,焊接长度在 200mm 内,接头电阻可以控制在  $10^{-7}\sim 10^{-8}\Omega$ ,满足磁体设计和稳定运行要求。接头制作中,必须保证每个接头的焊接质量,使其性能稳定可靠。

### 参 考 文 献

- [1] Wei Tong, IEEE transactions on applied superconductivity, 7(2):977-980
- [2] <http://www.nst.com>
- [3] Kazufumi Tanaka, IEEE transactions on applied superconductivity, 2001,11(1):3002~3005

(下转第 47 页后)

## 7 讨论和结果

从试验结果看, 我们的设计是比较保守的, 主要在于大液氮筒的设计余量过大。根据用户的使用要求, 如液氮筒容积选为 15 升左右, 采用厚 415mm 的“竖饼式”、室温孔偏心总体结构, 可免除目前大、小液氮筒总体结构连接的复杂, 同时相应的低温漏热减少 60% 以上, 可以获得接近液氮“零蒸发”的结果。

制冷机冷却型超导磁体杜瓦, 经过中国电子科技集团公司第五研究所专家和用户的现场实际检测, 其正常工作时, 液氮日蒸发量为 0.69 升/天(20 天内), 磁场强度大于 3T, 完全满足合同指标。

**【致谢】**作者特别感谢陈登科、杨润元同志的细致指导和卓有成效的组织协调以及杨武军、李顶、付连福等同志认真、细致的工作。

### 参 考 文 献

- [1] 徐烈, 朱卫东, 汤晓英. 低温绝热与贮运技术, 北京: 机械工业出版社, 1999. 5
- [2] 施锦. 低温与超导, 1997, 25(1): 7~12
- [3] 张宝凤. 近代低温技术, 上海: 同济大学出版社, 1989
- [4] 张开达, 张长贵. 低温技术, 北京: 计量出版社, 1985

### Development of Superconductor Magnet Dewar with G—M Refrigerator Cooling

Li Wei, Shi Jin, Ding Huaikuang, Yan Shancang

(China Electronics Technology Group Corporation No. 16th Research Institute,  
Anhui Vacre Technologies Co., Ltd., Hefei, 230043)

**Abstract:** Recently, the liquid helium dewar with the G—M refrigerator cooling for superconductor magnet is successfully developed. The Dewar has two cooling—shields and provided by the G—M refrigerator which the first stage is 31W at 40K and second stage is 1.1W at 6K. The room temperature bore is  $\Phi 75\text{mm}$ , length is 415mm. The design, structure, manufacture and experiment results of tests and experiments are introduced in this paper. The performances are vapor rate of liquid helium is 0.69 liter/day around in 20 days, temperature of the first cooling—shield is 35K and second one is 7.0K, magnetic field strength is up to 3T. It will meet user's requires very well.

**Keywords:** Dewar, Liquid helium, Refrigerator, Cooling—shield, Superconductor Magnet

作者简介: 李炜, 男, 1968 年生。工程师。主要从事真空、低温技术研究。

(上接第 38 页后)

- [4] 郑明新. 工程材料(第二版). 北京: 清华大学出版社, 1998, 260
- [5] 阎守胜, 陆果. 低温物理实验的原理与方法, 北京: 科学出版社, 1985, 374—382

### The Welded Splice between Bi2223/Ag Tape Double—pancakes

Zhang Jingye, Chen Jinglin, Xu Aixia, Zhang Yong, Chen Zhiyou, Wang Futang, Ding Liren, Gao Bingjun  
(High Magnetic Field Laboratory, Institute of Plasma Physics, Chinses Academy of Sciences, Hefei, 230031)

**Abstract:** The techniques of welding between the Bi2223/Ag double—pancakes have been introduced in this paper. The low resistance between the double—pancake coils can decrease the Joule heat generation and can lead to HTS magnet stability and low cooling cost. In this paper, the factors influencing the resistance in the joints was analysed, then the techniques and performance of the welded splices between the double—pancake coils of the HTS magnet were experimentally investigated. The results showed that the soldering technics can lead to the highly stability of the HTS magnet and low cooling cost.

**Keywords:** Double—pancake, HTS magnet, Soldering technics, Bi2223/Ag tape

作者简介: 张京业, 男, 1976 年生。中国科学院等离子体物理研究所强磁场工程与技术专业硕士研究生。主要从事高温超导磁体技术等方面的研究。