

内/外部励磁方式下高温超导环的俘获场特性^{*}

乔玉凯^{1†}, 王银顺¹, 康强强¹, 袁茜², 皮伟²

1. 华北电力大学, 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 华北电力大学, 高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206

收稿日期: 2019-07-01; 接收日期: 2019-12-30

【摘要】 高温超导磁体在闭环运行时, 可以提供稳定磁场, 但是由于高温超导带材无法实现无阻焊接, 成为高温超导磁体闭环运行的技术瓶颈. 本文利用第二代高温超导带材制备闭环超导环, 采用内部励磁和外部励磁对超导环进行励磁, 在液氮温度中 (77 K) 测量超导环的中心俘获磁场. 结果表明超导环在内部励磁俘获的磁场值比外部励磁俘获的磁场值高; 外部励磁中, 超导环中插入铁芯柱能提高俘获场; 内部励磁中, 超导环在螺线管闭环运行俘获的磁场值比开环运行俘获的磁场值高. 结果对于高温超导闭环磁体励磁和高温超导带材磁通动力学研究具有很重要参考价值.

关键词: 超导环, 内部励磁, 外部励磁, 场冷, 零场冷

PACS: 7460, 7490, 0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.06.004

Trapped Field Characteristics of A High Temperature Superconducting Ring under Inner/Outer Excitation

QIAO Yukai^{1†}, WANG Yinshun¹, KANG QiangQiang¹, YUAN Xi², PI Wei²

1. State Key Laboratory of New Energy Renewable Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206;

2. Beijing Key Laboratory of HV and EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206

Received date: 2019-07-01; accepted date: 2019-12-30

【Abstract】 High temperature superconducting (HTS) magnets provide a stable magnetic field when operating in persistent current mode (PCM). However, due to immature joint technique without resistance, it becomes the technical bottleneck of HTS magnets to operate in PCM. In this paper, the second-generation HTS tape is used to prepare for the closed-loop superconducting ring. The superconducting ring is energized by inner excitation and outer excitation respectively. During outer excitation, two excitation methods, FC and ZFC excitation, were used to magnetize a superconducting ring. In order to further study characteristics of trapped field, an iron core was inserted into the superconducting ring. In terms of inner excitation, the coil section is a solenoid. A vertical solenoid and a closed-loop solenoid were used to magnetize the superconducting ring respectively. Meanwhile, the central trapped magnetic field of the superconducting ring is measured by a Gaussmeter at liquid nitrogen temperature (77 K). The results show that the trapped field of the superconducting ring in inner excitation is higher than that of the outer excitation. For the outer excitation, the insertion of an iron core in the superconducting ring can increase the trapped field. For the inner excitation, the trapped field magnetized by the closed-loop solenoid is higher than that of the

^{*} 国家自然科学基金(51977078)资助的课题.

[†] joevisit@163.com

trapped field magnetized by the vertical solenoid. The results have significant reference value for magnetizing HTS magnet and HTS flux dynamics.

Keywords: superconducting ring, inner excitation, outer excitation, field cooling (FC), zero field cooling (ZFC)

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.06.004

Reference method: QIAO Yukai, WANG Yinshun, KANG QiangQiang, YUAN Xi, PI Wei, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0395 (2019)

1 引言

超导磁体技术是超导应用最为广泛的领域,超导磁体主要应用于超导加速器、超导磁悬浮列车^[1]、常导磁悬浮列车^[2]、国际热核聚变实验反应堆 ITER、核磁共振 NMR、磁共振成像仪 MRI、超导储能 SMES 等项目^[3-4]. 1987 年美国发现的第二代超导体 (Re-Ba-Cu-O, Re = rare earth)^[5], 临界温度 (T_c) 达到了 90 K, 高于液氮沸腾点 (77 K, -196°C)^[6]. 第二代高温超导材料的上临界磁场 (B_c) 和高场临界磁场电流密度 (J_c) 等方面具有良好的表现, 目前生产速度可达到 120 m/h.

超导磁体实现闭环运行的另一大关键因素, 则是励磁电源. 一般励磁电源处于常温环境中, 如果采用电流引线连接电源和超导体, 对电源的要求比较高, 且电流引线两端分别处于低温和室温环境中, 会有大量的热量传入超导低温容器, 同时电流引线电阻以及电流引线和超导磁体之间的焊接电阻, 在通电时会产生焦耳热, 损耗功率, 提高冷却成本. 为了避免焊接电阻对闭环运行的影响, 目前可以采用场冷磁化、脉冲场磁化和磁通泵励磁技术对超导磁体励磁^[7].

本文将 REBCO 超导带材从中间划开得到闭合的超导带材, 将 3 根超导带材堆叠在一起组成了可以闭环运行的超导环^[8-9]. 分别采用内部、外部励磁方式给超导磁体励磁^[10-11], 研究超导环中心俘获磁场的性质; 对于内部励磁, 分为长直螺线管和闭合螺线管置于超导环中心两种情况进行场冷和零场冷实验; 对于外部励磁, 采用跑道型磁体作为背景磁场, 在超导环中分别插入铁芯柱和无铁芯柱进行场冷和零场冷实验.

2 实验装置

2.1 试样制备

本实验采用长 120 mm、宽 4 mm 的单根超导带材, 该超导带材为上海上创超导科技有限公司生产加工. 将超导带材从中间划开 90 mm, 两端距离各 15 mm; 将 3 根超导带材堆叠一起组成闭环运行的超导环. 为了固定超导环, 采用半径为 30 mm 的圆柱体泡沫插入超导带材中间, 形成“眼”状结构. 其中, REBCO 超导带材参数为表 1 所示, 图 1 (a) 所示单根超导带材示意图, 图 1 (b) 所示单根超导带

材实物图, 图 2 为超导环.

表 1 REBCO 超导带材主要参数

参数	数值
Cu 层/ μm	5
Ag 层/ μm	2
REBCO 层/ μm	1
基底层/ μm	50

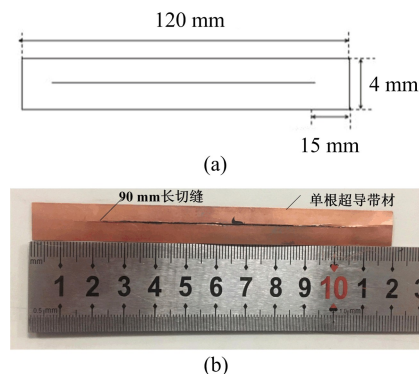


图 1 (a) 单根超导带材示意图和 (b) 单根超导带材实物图

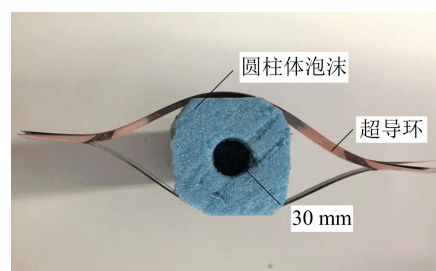


图 2 超导环

2.2 实验内容

外部励磁场冷实验, 是利用跑道型磁体外加电流源作为外部励磁系统, 其中跑道型磁体由多股铜线绕制而成, 跑道型磁体空心部分比超导环大, 可以将 3 根超导带材制成的超导环置于跑道型磁体中心. 将超导环中的圆柱泡沫体中心开孔, 高斯计垂直放入用于测量超导环俘获的中心磁场. 图 3 (a) 所示超导环中无铁芯的外部励磁示意图, 图 3 (b) 所示超导环中无铁芯的外部励磁实验图. 在室温中, 将外部电流源从 1 A 加至 5 A; 当外加电流源幅值为 5 A 时, 加入液氮对跑道型磁体和超导环进行冷却 20 min, 观察超导环中心磁场值的变化情况; 再以每 2 A/min 降电流, 逐步将电流降至为零; 断开电流源, 稳定 10 分

钟,测量超导环中心俘获磁场值是否变化;再反接电流源,电流源从 -1 A 加至 -5 A ,每隔 1 A 纪录一组数据,稳定 10 min 后,再以每 2 A/min 减电流,直至为零;最后断开电源,记录 10 min 超导环中心俘获磁场值的变化情况.在室温中,将外部电流源从 1 A 加至 8 A ;当外加电流源幅值为 8 A 时,每 2 A/min 降电流,逐步将电流降至为零;断开电流源,稳定 10 min ,测量超导环中心俘获磁场值是否变化;再反接电流源,电流源从 -1 A 加至 -8 A ,每隔 1 A 纪录一组数据,稳定 10 min 后,再每 2 A/min 减电流,直至为零;最后断开电源,记录 10 min 超导环中心俘获磁场值的变化情况.外部励磁的零场冷实验则是先加入液氮,将跑道型磁体和超导环冷却至 77 K ,再将跑道型磁体连接电流源,将电流从 1 A 加至 5 A 或 8 A ,重复上述实验过程,测量超导环中心俘获的磁场值.

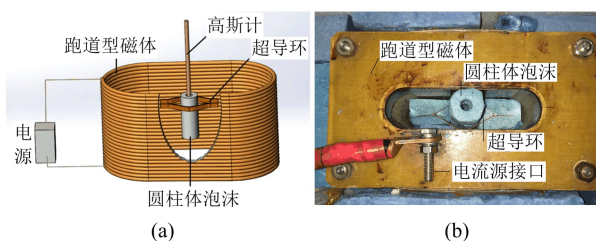


图3 (a)无铁芯的外部励磁示意图和
(b)无铁芯的外部励磁实验图

为提高超导环俘获磁场能力,在超导环中插入 10 根长 170 mm 、宽 2 mm 的铁芯柱,分别进行了电流源幅值为 5 A 和 8 A 场冷和零场冷实验.图4(a)所示超导环中含有铁芯柱的外部励磁示意图,图4(b)所示超导环中含有铁芯柱的外部励磁实验图.

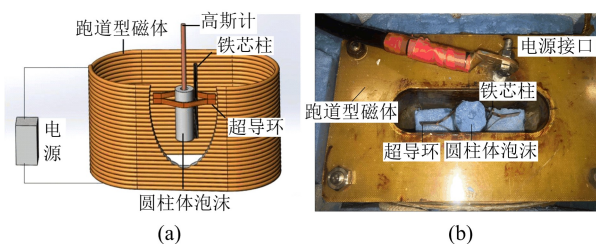


图4 (a)含铁芯柱的外部励磁示意图和
(b)含铁芯柱的外部励磁实验图

对于内部励磁实验,采用含铁芯柱的螺线管作为通电线圈插入超导环中心,其中铁芯柱由 5 根长 170 mm 、宽 2 mm 铁芯构成,螺线管用铜线双层缠绕,高斯计同样置于圆柱体泡沫中心测量磁场.图5

(a)所示长直螺线管内部励磁示意图,图5(b)所示长直螺线管内部励磁实验图.螺线管外加直流电流源,完成场冷实验和零场冷实验,实验过程如上述所示.

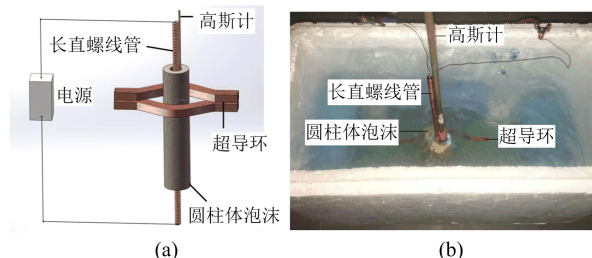


图5 (a)长直螺线管内部励磁示意图和
(b)长直螺线管内部励磁实验图

为探究长直螺线管、闭合螺线管对超导环俘获磁场能力影响,进行闭合螺线管内部励磁场冷和零场冷实验.图6(a)所示闭合螺线管内部励磁示意图,图6(b)所示闭合螺线管内部励磁实验图.

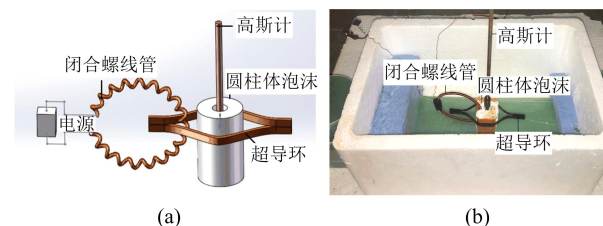


图6 (a)闭合螺线管内部励磁示意图和
(b)闭合螺线管内部励磁实验图

3 实验结果与分析

3.1 外部励磁

超导环在内部励磁和外部励磁情况下,分别进行了场冷实验和零场冷实验.图7(a)所示场冷实验的励磁过程;图7(b)所示零场冷实验的励磁过程.图8所示 5 A 外部励磁实验数据对比;图9所示 8 A 外部励磁实验数据对比.由图8和图9得出,在超导环中无铁芯的场冷实验中,无论电流源幅值是 5 A 或 8 A ,超导环中心俘获的磁场值在 0.05 mT ;在超导环中无铁芯的零场冷实验中,无论电流源幅值是 5 A 或 8 A ,超导环中心俘获的磁场值为 0.03 mT .原因如下:实验性质的不同,场冷实验属于磁通钉扎,零场冷实验属于剩磁的测量;由于超导环仅由 3 根超导带材构成,感应的电流较小,从而俘获的磁场值也较小.在超导环中含有铁芯柱的外部

励磁中,无论场冷实验和零场冷实验,超导环中心俘获的磁场值均约为 1.5 mT. 原因可能如下:由于跑道型磁体连接电流源会提供一个背景磁场,铁芯柱置于超导环中会增大超导环中的背景磁场,增大超导环中磁通量,超导环感应电流增大,从而超导环俘获的磁场值也增大.

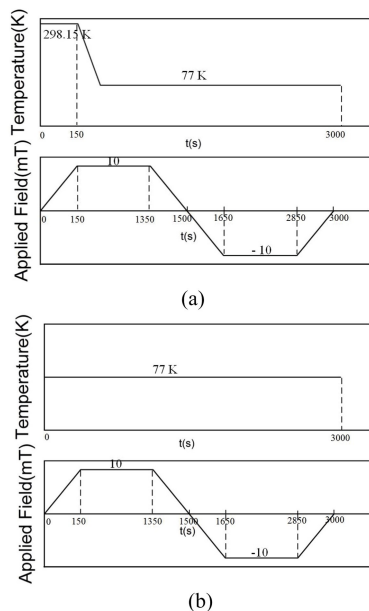


图 7 (a)场冷励磁过程和(b)零场冷励磁过程

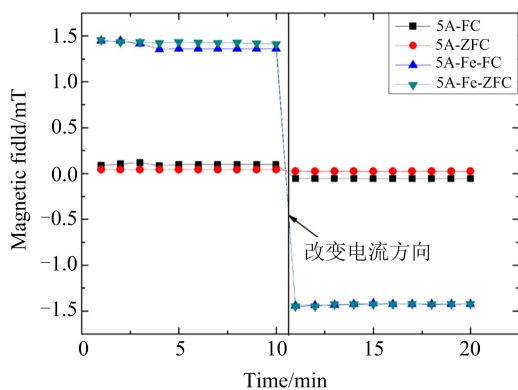


图 8 5 A 外部励磁实验数据对比

3.2 内部励磁

对于内部励磁,采用长直螺线管和闭合螺线管作为内部通电线圈进行了场冷和零场冷实验. 图 10 所示长直螺线管内部励磁实验数据对比;图 11 所示闭合螺线管内部励磁实验数据对比. 可以得出,长直螺线管插入超导环的场冷实验中,超导环中心俘获的磁场值为 0.12 mT;长直螺线管插入超导环的零场冷实验中,超导环中心俘获的磁场值为 0.10

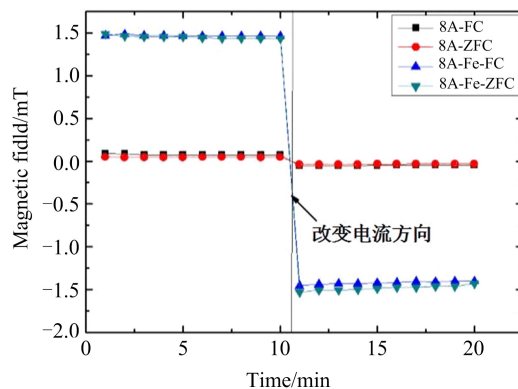


图 9 8 A 外部励磁实验数据对比

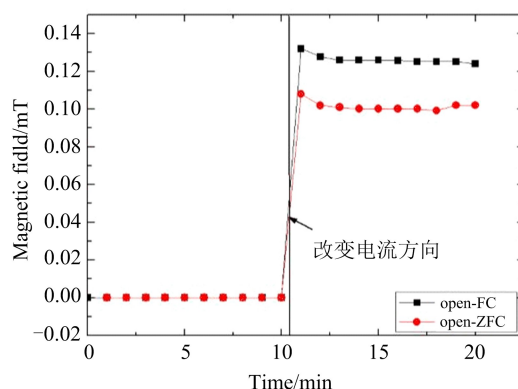


图 10 长直螺线管内部励磁实验数据对比

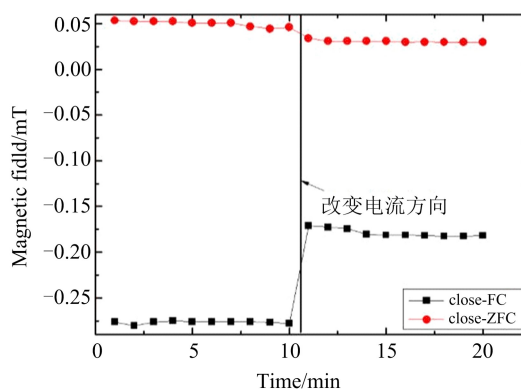


图 11 闭合螺线管内部励磁实验数据对比

mT,两者几乎无差别,却是外部励磁无铁芯实验中超导环俘获磁场值的 2 倍. 原因可能在于内部励磁时,螺线管长度为 170 mm,远超过超导环的高度 12 mm,磁泄露可以忽略;螺线管内部含有铁芯,会增大超导环的背景磁场,而且螺线管位于超导环中心,也会将磁场集中在超导环,增大超导环中感应电流,从而超导环中心俘获的磁场值也增大. 螺线管闭合运行的场冷实验中,超导环中心俘获的磁场为

0.18 mT;螺线管闭合运行的零场冷实验中,超导环捕获的磁场为 0.05 mT. 原因如下:闭环螺线管产生的磁场会集中在螺线管环内,相对于长直螺线管磁场更加集中于超导环内,故超导环中心俘获的磁场值也更大.

4 结 论

本文采用第二代高温超导带材 REBCO 制成的

超导环进行场冷实验和零场冷实验,并采用内部励磁和外部励磁对超导环进行励磁. 实验研究发现如下:超导环在场冷实验中,其中心俘获的磁场值比零场冷实验中俘获的磁场值高;内部励磁中螺线管闭环运行,能提高超导环中心俘获的磁场值,这对闭环运行高温超导磁体的应用和高温超导磁通动力学研究具有重要参考价值,这对工业磁化技术具有指导意义.

参 考 文 献

- [1] 陈伟,徐颖,石晶,任丽,唐跃进,低温与超导, **46** (2018), 20.
- [2] 罗芳,张昆仑,机车电传动, **1**(2002), 27.
- [3] 杨文晖,物理, **48**(2019), 227.
- [4] 陈星莺,刘孟觉,单渊达,中国电机工程学报, **21**(2001), 63.
- [5] 王岳,材料开发与应用, **28**(2013), 1.
- [6] 洪全,西南师范大学学报(自然科学版), **26**(2001), 83.
- [7] 焦开洲,戴银明,王秋良,胡新宁,唐文举,陆锦焱,低温与超导, **45**(2017), 47.
- [8] T. Oka, E. Hirayama, T. Kanai, J. Ogawa, S. Fukui, T. Sato, K. Yokoyama. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **24**(2013), 1.
- [9] Y. Xi, Y. S. Wang, Y. B. Hou, C. T. Kan, C. B. Cai, M. J. Sun. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **28**(2018), 3.
- [10] X. Yuan, Y. S. Wang, Y. D. Hu, H. Chen, M. C. Liu, W. Pi, C. B. Cai. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **29**(2019), 3.
- [11] Y. D. Hu, Y. S. Wang, X. Yuan, H. Chen, M. C. Liu, M. H. Wang, C. Peng, W. Pi. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **29**(2019), 5.