

Bi-2223/AgAu 带材及应用进展

马小波, 张胜楠[†], 李成山, 冯建情, 李建峰

西北有色金属研究院, 西安 710016

收稿日期: 2022-03-31; 接收日期: 2022-04-21

【摘要】 Bi-2223/AgAu 高温超导带材因为较低的热导率和较高的载流性能, 被认为是制备高温超导电流引线的最佳材料之一. 这篇文章简单介绍了高温超导电流引线的工作特点和不同包套 Bi-2223 带材的热导率, 在此基础上详细介绍了目前 Bi-2223/AgAu 带材和高温超导电流引线国内外研究进展, 最后展望了 Bi-2223 带材的发展趋势.

关键词: Bi-2223/AgAu 带材, 热导率, 临界电流, 高温超导电流引线

PACS: 74.72.-h, 74.25.Sv

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.03.006

Progress of Bi-2223/AgAu Tapes and Its Application

MA Xiaobo, ZHANG Shengnan, LI Chengshan, FENG Jianqing, LI Jianfeng

Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016

Received date: 2022-03-31; accepted date: 2022-04-21

【Abstract】 Bi-2223/AgAu tape is considered to be one of the best materials for preparing high-temperature superconducting current leads, because of its low thermal conductivity and high current-carrying performance. A brief introduction to the characteristics of high-temperature superconducting current leads and the thermal conductivity of different sheathed Bi-2223 tapes are introduced in this paper. On this basis, the research progress of Bi-2223/AgAu tapes and high-temperature superconducting current leads at home and abroad is reviewed in detail, and finally the development trend of Bi-2223 tape is prospected.

Keywords: Bi-2223/AgAu tape, Thermal conductivity, Critical current, High-temperature superconducting current lead

PACS: 74.72.-h, 74.25.Sv

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.03.006

Reference method: MA Xiaobo, ZHANG Shengnan, LI Chengshan, FENG Jianqing, LI Jianfeng, Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0204 (2022)

[†] snzhang@c-nin.com

1 引言

目前,在避免使用高毒性汞和铊的前提下,从制备难易度、成本和载流性能等方面考虑,实用化高温超导材料包括 Bi-2223($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$)带材、YBCO($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)涂层导体以及 Bi-2212($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$)线材、 MgB_2 线材和 Fe 基超导体等几种.其中,使用粉末装管法(Powder in tube, PIT)制备的 Bi-2223 带材具有最高的临界温度和较高的临界电流密度,并且其制备技术最为成熟、稳定,可以保证大批量高均匀带材的制备,因此在电力和磁体领域都有明确的应用前景^[1-5].

电流引线是 Bi-2223 高温超导带材实际应用的重要领域之一.加速器及聚变堆等大科学装置的核心超导磁体需要在极低的温度下运行,而连接超导磁体与室温电源的关键部件就是电流引线.常规的电流引线是由高纯无氧铜制备,由于超导磁体的工作电流都比较大,沿铜电流引线会产生很大的焦耳热.同时铜的热导率较高,由电流引线两端温差引起的传热也较高,这两部分热量都会通过电流引流向低温系统.研究认为商用铜电流引线在设计工作电流下,从室温到 4.2 K 低温系统的漏热量占超导磁体全部热负荷的 70%~90%^[6],由此可见,由铜电流引线引入低温系统的热量是低温系统的主要热源,减少这部分热量,将很大程度上降低低温系统的制冷成本和保证低温系统的有效运行.

高温超导材料在液氮温区以下电阻为零,并且高温超导材料本身是热导率很低的陶瓷材料,使用高温超导材料制备的电流引线,替代低温段的铜引线,能使沿电流引线的漏热降为铜电流引线的 1/10^[7].因此,绝大多数超导磁体所使用的电流引线都是高温超导电流引线.高温超导电流引线主要包括纯陶瓷电流引线(YBCO、Bi-2223、Bi-2212 陶瓷棒或陶瓷管)和采用 Bi-2223 带材制备的电流引线两大类.与无金属稳定体的 Bi 系或 YBCO 管棒材制备的电流引线相比,使用 Bi-2223/AgAu 带材制备的电流引线具有较高的临界电流、稳定性、耐冲击并且与其他部件容易进行低电阻的焊接^[8].因此,采用 Bi-2223/AgAu 带材和铜引线制备的混合型电流引线已经成为目前研究和应用的重点.

2 Bi-2223/AgAu 带材

2.1 Bi-2223/AgAu 带材的热导率

从高温超导电流引线的工作特点分析,一方面电流引线需要具有较高的载流性能,能够承载大电流;另一方面,还需要降低电流引线本身的热导率,从而减少由于电流引线引起的系统漏热,降低制冷成本.因此,对于高温超导电流引线制备而言,Bi-2223 带材的载流性能和热导率是决定电流引线有效性和可靠性的关键.

对于 Bi-2223 带材而言,芯丝中粉末是陶瓷材料,其热导率较常规金属小 3 个数量级^[9],因此,银及银合金包套的热导率是决定带材热导率的关键^[10].从图 1 可以看出,纯银的热导率在 20 K 时达到了 4000 W/(m·K),从降低电流引线本身的热导率考虑,常规的 Bi-2223/Ag 带材不适宜制备高温超导电流引线.研究表明,通过在银包套中加入 Au、Mg、Sb 和 Pd 等合金元素能显著降低其热导率^[11,12].如图 1(a)所示,银镁合金的热导率在 20 K 为 80 W/(m·K),而银金合金只有 20 W/(m·K)左右,比纯银的热导率低两个数量级,仅为银镁合金的 1/4.并且如图 1(b)所示,随着金元素含量的提高热导率会进一步下降.另一方面,金元素非常稳定,在带材加工和热处理过程中不会与粉末中的元素发生反应,所以银金合金是非常理想的制造电流引线用 Bi-2223 带材的包套材料.从制备成本和热导率两个方面考虑,国际主流的带材供应商和研究机构均采用 Au 重量百分比为 5%左右的 Ag-Au 合金作为包套材料,如欧洲超导公司和美国超导公司分别采用 Ag-5.3 wt% Au 和 Ag-5 wt% Au 包套制备的 Bi-2223/AgAu 带材在 20 K 的热导率只有 Bi-2223/Ag 带材的 1/20,可以满足电流引线对于热导率的要求.

2.2 国内外 Bi-2223/AgAu 带材性能进展

在过去的二十年,欧洲高温超导公司(EHTS)、美国超导公司(AMSC)、日本住友电工(Sumitomo)、中国英纳超导公司均先后开发出了电流引线用 Bi-2223/AgAu 带材产业化制备技术,其中临界电流最高的带材是日本住友电工采用高压热处理技术(CT-OP)制备的 Type G DI-BSCCO 带材

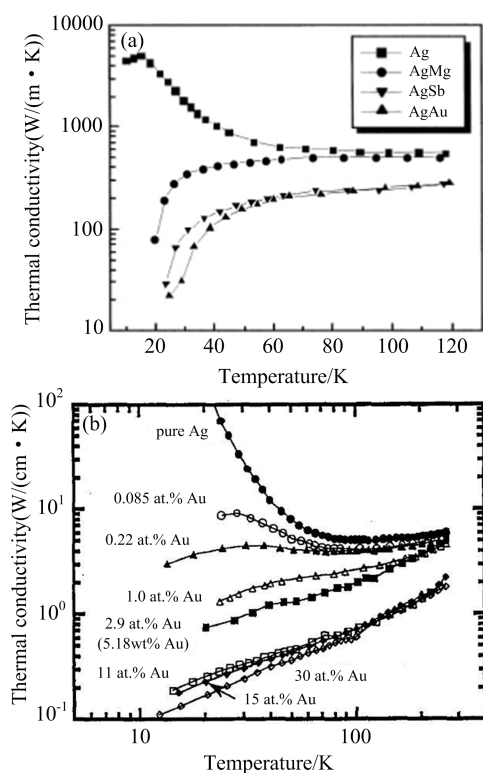


图1 各种包套材料(a)和不同金含量的 Ag-Au 合金(b)的热导率-温度曲线^[13,14]

(Bi-2223/Ag-5.4 wt% Au), 如图 2 所示. 尽管其预研的带材临界电流(77 K, 自场)已经达到了 223 A^[15], 但由于 AgAu 包套的特殊性, 其工业化批量生产的带材的临界电流仅为 140 A 左右. 美国超导公司生产的 CryBlock 超导带材(Bi-2223/Ag-5.3 wt% Au)临界电流(77 K, 自场)与住友电工的相当, 为 130 A 左右. 而欧洲高温超导公司生产的带材(Bi-2223/Ag-5 wt% Au)临界电流(77 K, 自场)为 120 A 左右, 但由于各种原因, 这两家公司于 2010 年以后放弃了 Bi-2223 带材的生产. 我国在电流引线用 Bi-2223/AgAu 带材的制备方面进展相对缓慢, 目前带材在 77 K、自场下临界电流大致在 70~110 A^[16], 带材的载流性能和机械性能与住友电工相比还有较大的差距, 主要是住友电工在制备高载流性能带材时采用了高压热处理技术. 高压热处理后的带材芯丝密度接近理论密度的 100%, 而常压热处理的带材一般仅能达到 70%, 同时高压热处理还可以降低残余第二相粒子含量, 大幅提高 Bi-2223 晶粒连接性. 因此, 相比于常压热处理, 高压热处理制备的带材的临界电流可提高 40%~70%. 但是由

于高压热处理需要 820~830 ℃ 热处理温度,并且在流通的含氧气氛下施加 30 MPa 的压力,国内目前还没有厂家可以制造相应的高压热处理设备并且住友电工对高压热处理设备和技术严格保密.因此,目前研究的重点是在常压热处理下提高带材的载流性能.

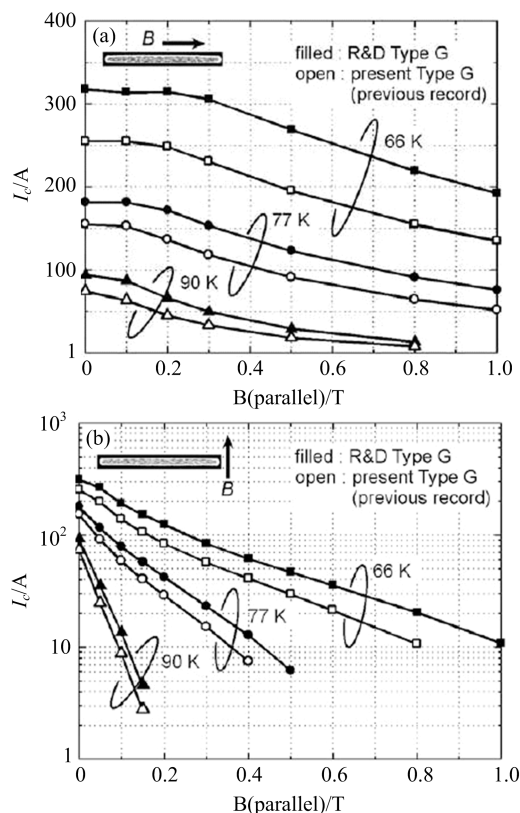


图 2 Type G 带材在磁场中的载流性能
(a) 磁场平行于带材表面; (b) 磁场垂直于带材表面 [17]

2.3 Bi-2223/AgAu 帶材的应用

通过提高 Bi-2223/AgAu 超导带材的临界电流和优化电流引线的结构, 电流引线的载流性能得以迅速提高, 同时漏热量逐渐减小, 因此, Bi-2223/AgAu 带材制备的高温超导电流引线在世界上越来越多的大型工程中得到发展和应用. 瑞士等离子体物理研究中心(CRPP)、德国 Karlsruhe 技术研究所(KIT)和日本原子力研究所(JAERI)承担了包括 International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)、Wendelstein 7-X、Large helical device (LHD)、JT-60SA 和 Large hadron collider (LHC) 等大科学工程高温超导电流引线的制备工作. 其制备的电流引线使用的都是高温超导组件和铜引线构

成的混合型电流引线,图 3 为 LHC 用 13 kA 高温超导电流引线高温超导组件. 这些工程中电流引线的参数如表 1 所示,可以看出,通过使用高温超导电流引线,制冷系统的电力消耗降低了 2/3 以上. 其中,值得一提的是 CRPP 和 KIT 采用美国超导公司生产的 Bi-2223/AgAu 带材制备了 ITER TF 线圈用 68 kA 电流引线,测试结果显示,该电流引线可以在接近设计电流极限的情况下稳定运行,最高可稳定运行至 80 kA.

此外,从上世纪九十年代开始,瑞士等离子体物理研究中心 CRPP 和 WEKA AG 公司合作开展了针对不同体系应用的工业级 Bi-2223 带材高温超导电流引线的研制,通过对各个组件的订制和组装,可以快速完成所需载流性能为 3~30 kA 范围内的电流引线的工业化制造^[19]. 2012 年,CRPP 又报道了用于混合磁体的 20 kA 电流引线的开发和设计方案.

通过改进 AgAuMg 包套的 Bi-2223 带材,并结合电流引线相关结构及加工工艺的系统性优化,该电流引线的漏热已减小到 1.4 W^[20].

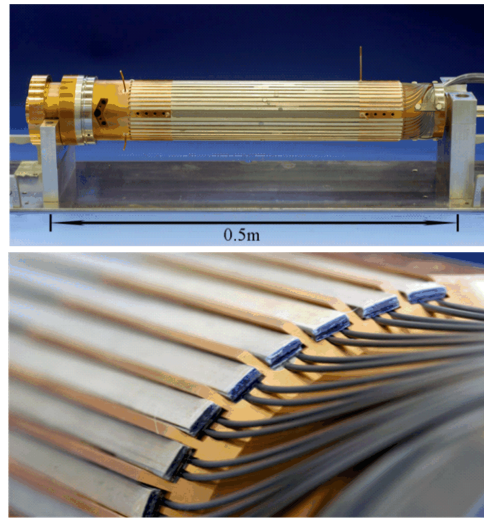


图 3 LHC 用 13 kA 高温超导电流引线高温超导组件^[18]

表 1 用于建设中的不同磁体系统的电流引线的主要参数

Table 1 Main parameters of current lead to be used in different magnet system being under construction

	Maximum conductor current/kA	Number of current leads	Electrical power consumption of the refrigerator for HTS lead/kW	Electrical power consumption of the refrigerator for conventional lead/kW	Reference
ITER	68(TF)	18	450	1750	[21]
LHD in phase	17.3(HC)	12	74	300	[21]
LHC	13	64	970	4850	[21]
ITER	60	20	660	2000	[7]
Wendelstein7-X	18.3	14	N. a.	N. a.	[22-24]
JT-60SA	30	6	N. a	N. a	[23]
LHD II exp.	31.3(PF)	6	74	270	[25]

在过去的十几年中,中科院等离子体物理研究所(ASIPP)同样对高温超导电流引线的制备进行了系统的研究. 通过 HTS 材料性能测试、优化等工作^[26],先后分别完成了 40 T 混合磁体用 16 kA 电流引线^[27]如图 4 所示,以及加速器磁体用 12 kA 电流引线设计、制备和测试^[28]. 其中,12 kA 电流引线的漏热值为 3.6 W,两个 16 kA 电流引线的漏热值分别为 3.4 和 3.6 W. 从 2012 年以来,中科院等离子体物理研究所为俄罗斯 JINR 研究所提供了 8 对

6 kA 和 8 对 12 kA 的电流引线用于加速器装置 NICA 的建设,其中 6 kA 的电流引线 5 K 冷端漏热 2.1~2.5 W,小于 JINR 研究所提出的 3 W 要求,12 kA 电流引线的漏热值仅为 3.6 W^[29],并且其它各项参数均满足 JINR 的设计要求. 中科院等离子体物理研究所采用美国超导公司生产的 CryoBlock Bi-2223/AgAu 带材制备的 EAST 全超导核聚变试验装置使用的 15 kA 高温超导电流引线的 4.5 K 冷端漏热仅为 2~2.5 W,13 对电流引线的全部热

负荷小于 100 W^[30],从而保证了 EAST 正常降温和运行. 高温超导电流引线在 EAST 装置的成功运行,为接下来 ITER 所需的 45、52 和 68 kA 高温超导电流引线设计和制造提供了非常丰富和有价值的经验^[31-37]. 如图 5 所示,ASIPP 采用日本住友电工生产的 Bi-2223/AgAu 带材制备的 68 kA 大电流引

线试验件的载流能力达到了 90 kA,冷端漏热仅为 13.6 W. 以上结果说明,我国已经具有了独立完成不同级别电流引线的设计、制备和测试工作的能力,这为后续中国聚变工程实验堆(CFETR)的电流引线制备奠定了坚实的基础.

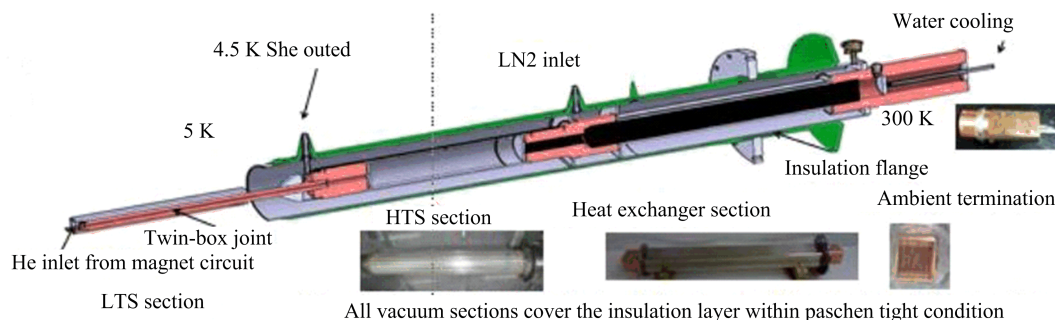


图 4 40 T 混合磁体用 16 kA HTS 电流引线结构示意图^[29]

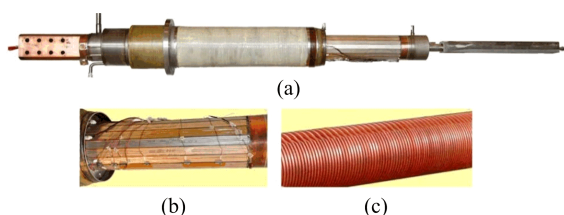


图 5 ITER 68 kA 高温超导电流引线试验件

(a)68 kA 电流引线;(b)高温超导组件和(c)铜质换热器^[37]

3 结论与展望

Bi-2223/AgAu 超导带材不但具有高 T_c 和 J_c 的优点,同时还拥有更小的热导率,是制备高温超导

电流引线的最佳材料之一. 但是目前其 J_c 离 Bi-2223 薄膜的理论值 $J_c = 10^6$ A/cm² 还有很大的差距,主要是超导芯中存在的孔洞、微裂纹、杂相、超导相晶粒排列和其他一些晶体缺陷等极大限制了超导芯中电流的传输. 如果能消除这些缺陷,带材性能将得到大幅度提高. 研究表明,在形变热处理阶段采用高压热处理技术,能有效地减少带材中的微观缺陷,热处理后芯丝密度接近 Bi-2223 的理论密度. 与常压热处理制备方法相比,采用高压热处理制备的超导带材载流性提高了 40%~70%. 因此,未来将重点开展高压热处理技术制备 Bi-2223/AgAu 带材及其相应机理研究.

参 考 文 献

- [1] B. Liu, R. Badcock, H. Shu, L. Tan, J. Fang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28**(2018), 5202405
- [2] S. Hanai, T. Tsuchihashi, S. Loka, K. Watanabe, S. Awaji, H. Oguro, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27**(2017), 4602406
- [3] W. S. Marshall, M. D. Bird, A. Godeke, D. C. Larbalestier, W. D. Markiewicz, J. M. White, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27**(2017), 4300905
- [4] Y. Yanagisawa, Y. Xu, S. Iguchi, M. Hamada, S. Matsumoto, G. Nishijima, H. Nakagome, T. Takao, H. Suematsu, Y. Oshima, *Supercond. Sci. Technol.*, **28**(2015), 125005
- [5] S. Iguchi, Y. Yanagisawa, M. Takahashi, T. Takao, K. Hashi, S. Ohki, G. Nishijima, S. Matsumoto, T. Noguchi, R. Tanaka, H. Suematsu, K. Saito, T. Shimizu, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26**(2016), 4303507
- [6] 李嘉, 饶荣水, 程德威, 王惠龄, 低温工程, **4**(2001), 18
- [7] T. Isono, K. Kawano, K. Hamada, K. Matsui, Y. Nunoya, E. Hara, T. Kato, T. Ando, K. Okuno, T. Bohno, A. Tomioka, Y. Sanuki, K. Sakaki, M. Konno, T. Uede, *Physica C*, **392**(2003), 1219
- [8] J. X. Jin, T. F. Xiang, L. H. Lei, J. Q. Li, *Physica C*, **28**(2015), 125005

- 460**(2007), 1487
- [9] 张宏杰, 宗军, 励庆孚, 低温与超导, **412**(2006), 23
- [10] M. Putti, E. Bellingeri, C. Ferdeghini, G. Grasso, S. Roncallo, D. Mazzone, G. Zanichchi, M. O. Rikel, *Physica C*, **372**(2002), 1835
- [11] H. S. Park, B. K. Ji, J. H. Lim, J. Joo, S. Jung, W. Nah, J. Yoo, J. Ko, H. Kim, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11**(2001), 3277
- [12] A. V. Gavrillin, V. E. Keilin, I. A. Kovalev, S. L. Kruglov, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **9**(1999), 531
- [13] S. H. Jang, J. H. Lim, J. H. Kim, B. K. Ji, J. Joo, W. Nah, J. S. Volf, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13**(2003), 2956
- [14] H. Fujishiro, R. Ikebe, I. Noto, M. Matsukawa, T. Sasooka, K. Nomura, J. Sato, S. Kuma, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **30**(1994), 1645
- [15] T. Naito, H. Fujishiro, Y. Yamada, *Cryogenics*, **49**(2009), 429
- [16] K. P. Weiss, M. Schwarz, A. Lampe, R. Heller, W. H. Fietz, A. Nyilas, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**(2007), 3079
- [17] T. Nakashima, S. Kobayashi, T. Kagiya, K. Yamazaki, M. Kikuchi, S. Yamade, K. Hayashi, K. Sato, G. Osabe, *Physica C*, **471**(2012), 1086
- [18] A. Ballarino, L. Martini, S. Mathot, T. Taylor, R. Brambilla, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**(2007), 3121
- [19] R. Wesche, M. Börsch, P. Bruzzone, F. Holdener, E. Iten, N. Maggini, S. March, D. Oertig, H. Quack, M. Vogel, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **22**(2012), 1
- [20] R. Wesche, P. Bruzzone, S. March, M. Vogel, H. Ehmler, P. Smeibidl, *Physics Procedia*, **36**(2012), 927
- [21] R. Heller, G. Friesinger, A. M. Fuchs, T. Mito, S. Satoh, K. Takahata, M. Tasca, M. Vogel, *Cryogenics*, **41**(2001), 539
- [22] R. Heller, W. H. Fietz, A. Kienzler, R. Lietzow, *Fusion Eng. Des.*, **86**(2011), 1422
- [23] R. Heller, A. Class, A. Batta, R. Lietzow, H. Neumann, M. Tischmacher, *Cryogenics*, **50**(2010), 223
- [24] T. Rummel, F. Schauer, T. Moennich, K. Buscher, W. H. Fietz, R. Heller, *IEEE Trans. Plas. Sci.*, **42**(2014), 2146
- [25] T. Mito, K. Takahata, R. Heller, A. Iwamoto, H. Tamura, Y. Yamada, S. Nishimura, N. Yanagi, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11**(2001), 2611
- [26] H. Wu, Y. Bi, Y. Song, *Advances in Cryogenic Engineering*, **1574**(2014), 252
- [27] Y. Bi, K. Ding, H. Feng, C. Liu, X. Liu, K. Lu, H. Wu, Y. Song, C. Xu, *Journal of Physics: Conference Series*, **507**(2014), 032013
- [28] Y. Bi, K. Ding, H. Feng, G. Shen, Y. Song, P. Bauer, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **23**(2013), 4800404
- [29] 刘承连, 丁开忠, 周挺志, 冯汉升, 刘翔, 许昌军, 经凯明, 陆坤, 宋云涛, 低温工程, **3**(2015), 18
- [30] Bi Y F, *Physics Procedia*, **2**(2005), 1074
- [31] T. Z. Zhou, Y. F. Bi, K. Z. Ding, H. S. Feng, X. Y. Huang, C. L. Liu, Y. T. Song, *Atomic Energy Science and Technology*, **47**(2013), 141
- [32] C. Liu, Y. Bi, K. Ding, H. Feng, T. Zhou, G. Shen, Y. Song, P. Bauer, C. Gung, A. Devred, N. Mitchell, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **22**(2012), 4800204
- [33] A. Ballarino, P. Bauer, Y. F. Bi, A. Devred, K. Z. Ding, A. Foussat, N. Mitchell, G. Shen, Y. T. Song, T. Taylor, Y. F. Yang, T. Z. Zhou, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **22**(2012), 4800304
- [34] P. Bauer, Y. F. Bi, A. Devred, K. Z. Ding, H. S. Feng, X. Y. Huang, C. L. Liu, N. Mitchell, G. Shen, Y. T. Song, K. Z. Ding, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **21**(2011), 1074
- [35] P. Bauer, Y. Bi, A. Cheng, Y. Cheng, A. Devred, K. Ding, X. Huang, C. Liu, X. Lin, N. Mitchell, A. Sahu, G. Shen, Y. Song, Z. Wang, H. Zhang, J. Yu, T. Zhou, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **20**(2010), 1718
- [36] X. Huang, Y. Bi, Y. Cheng, K. Lu, C. Wang, G. Shen, Y. Song, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **20**(2010), 1722
- [37] K. Ding, Y. Bi, J. Yu, T. Zhou, C. Liu, X. Lin, G. Shen, Y. Song, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **20**(2010), 1729