

0~3.5 T 直流背景磁场下第二代高温超导带材临界电流各向异性测试与分析

张妍¹, 诸嘉慧², 陈盼盼², 王海洋¹, 秦汉阳³, 戴银明⁴

王晖⁴, 刘辉⁴, 方进¹

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 3. 北方工业大学电气工程与控制学院, 北京 100144; 4. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

摘要:为掌握第二代(2G)高温超导(HTS)带材在0~3.5 T 直流背景磁场下的临界电流(I_c)和 n 值变化趋势,构造和应用了一种新型分裂背场磁体系统,通过测试分析获得了背景磁场对 I_c 和 n 值的影响规律。采用 4.2 K 运行温度、两个同轴分裂的 NbTi 线圈构成的超导磁体和样品保持器来改变背景磁场的大小和角度(0~3.5 T、0~90°),2G HTS 带材置于液氮环境(77 K),设置电流源上升速率为 1 A/s,基于四引线法原理与直流失超判据(1 μ V/cm)获得 2G HTS 带材在高直流背景磁场下的 I_c 和 n 值,实验结果表明,2G HTS 带材的 I_c 和 n 值变化趋势一致,均随外界磁场强度 B 和带材表面与磁场夹角 θ 的增大而退化,在背景磁场为 1.4 T 时,2G HTS 带材在垂直场下的临界电流衰减了 84.6%,是平行场下临界电流衰减程度的 1.47 倍。

关键词: 分裂背场磁体; 临界电流; n 值; 高温超导带材; NbTi

DOI: 10.12067/ATEEE1908023 **文章编号:** 1003-3076(2020)07-0024-06 **中图分类号:** TM26

1 引言

高温超导体以其高载流性能^[1,2]吸引了高磁场应用^[3]和电力工程的用户^[4,5]。高温超导(High Temperature Superconductor, HTS)材料的临界电流是设计超导磁性器件^[6]、衡量超导载流特性及超导特性的重要参量。目前,常用的 BSCCO 和 ReBCO 涂覆超导体属于氧化物陶瓷材料,本身存在弱连接、晶粒、次相、缺陷等特征^[7],导致 HTS 导电性能具有明显各向异性,即在背景磁场强度大小和 HTS 带材表面与磁场夹角不同时,HTS 带材有不同的临界电流值。而且在实际应用中,超导电力装置的周围电磁环境较为复杂,HTS 带材的临界电流不可避免地会受到外界磁场的干扰,可能在运行的过程中失超,使得系统运行中断,严重情况下还可能破坏甚至烧毁系统。而 n 值也是超导体载流特性的重要参数,反映了超导体从超导态转变成正常态的快慢程度,

同样受外界磁场的影响而改变^[8]。因此研究背景磁场和方向对 HTS 带材临界电流和 n 值的影响,对交流损耗计算、矢量分析法进行磁体临界电流计算及失超检测阈值的设计是十分必要的。

目前 HTS 临界电流测试系统的主要问题有:

(1)普通有铁心的二级铜绕组电磁铁不能在 0~3.5 T 磁场环境下测量 HTS 临界电流。主要是因为普通电磁铁的铁心存在磁通饱和现象,不能在大空间内产生高至 3.5 T 磁场^[9]。

(2)单个超导螺线管磁体^[10,11]虽然可以测量 0~3.5 T 磁场下 HTS 带材临界电流,但是需要直接在磁体的孔内进行测量,测量 I_c 需要的带材长度大多数大于电磁铁孔径, I_c 测量时的超导带材样本长度受限于单个超导螺线管的孔径^[12]。

有鉴于此,本文构造和应用了一个可测量长 HTS 样品、磁场大小和夹角可调,最高可产生 3.5 T 磁场的低温背场磁体系统,考虑了背景磁场大小和

收稿日期: 2019-08-06

基金项目: 预研领域基金项目(6140721020406)

作者简介: 张妍(1995-),女,陕西籍,硕士研究生,研究方向为超导电力技术;
诸嘉慧(1977-),女,江苏籍,教授级高级工程师,博士,研究方向为超导电力技术。

方向(0~3.5 T、0~90°)对 2G HTS 带材的影响, 测试 77 K 液氮环境下 HTS 带材的临界电流 I_c , 并计算了 2G HTS 超导带材 n 值, 获得了磁场对临界电流 I_c 、 n 值的影响规律。

2 低温背场磁体

低温背场磁体结构紧凑, 主要包括有超导磁体、制冷机、真空保温层、热屏蔽层、插入式杜瓦和样品保持器, 其具体结构如图 1 所示。

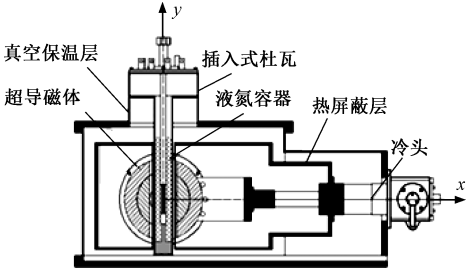


图 1 低温背场磁体结构图

Fig.1 Structure drawing of low temperature backfield magnets

低温背场磁体产生直流磁场来测量 HTS 样品临界电流。超导磁体在垂直于 xoy 平面的方向上产生最大 3.5 T 磁场, 系统其他部分按低磁体温度原则布置; 磁体采用两级传导冷却方式, 制冷机通过与冷水机相连, 为磁体提供冷却回路; 真空保温层通过保持高真空水平 (10^{-4} Pa) 来消除磁体与室温之间的热对流, 其中插入式杜瓦为液氮容器, 容量仅为 1.5 L, 需及时填充液氮; 热屏蔽层进行热隔离。

超导磁体采用分裂线圈结构, 方便 HTS 带材横向存取, 其具体结构如图 2 所示。磁体线圈包括 2 个低温超导线圈、铝间隔层和上、下法兰。两个低温超导线圈间裂口为 90 mm, 低温超导带材分别缠绕到两个内层铜骨架上构成内层超导线圈 A1 和 B1, 其内、外径分别为 90 mm 和 147 mm。然后加装外层铜骨架, 再将低温超导带材以同样方式缠绕到外层铜骨架上构成外层超导线圈 A2 和 B2, 其内、外径分别为 164 mm 和 220 mm。并使用由高导热材料环氧树脂制成的上、下法兰来固定分裂线圈, 设计直径为 80 mm 的横向孔方便带材存取, 测试区域的高度为 248 mm, 体积 $\Phi 20\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 圆柱体磁场均匀度可以达到 95%。

3 0~3.5 T 背场下临界电流的测试

3.1 测试样品

测量临界电流所用的 YBCO/Cu 带材基本参数

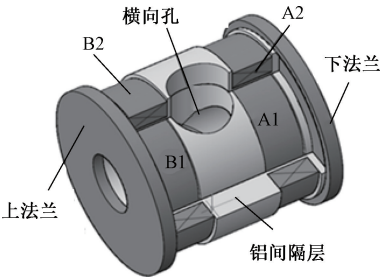


图 2 分裂线圈结构

Fig.2 Split coil structure

如表 1 所示。

表 1 高温超导 YBCO/Cu 带材的基本参数

Tab.1 Basic parameters of YBCO/Cu HTS tapes

参数	数值
生产厂家	韩国 SuNAM 公司
带材宽度/mm	4.15±0.10
带材厚度/μm	240±15
基底磁性	无磁性
临界温度/K	91
临界电流 I_{c0} /A	262(77 K, 0 T)

3.2 实验原理

应用低温背场磁体的带材临界电流实验原理如图 3 所示。为了测试不同磁场下 2G HTS 带材的临界电流大小, 需要将 HTS 带材置于均匀的磁场环境下。低温背场磁体可以通过 NbTi 线圈与铜骨架产生均匀度极高的强磁场, 通过改变背场磁体的通流大小使磁体产生不同大小的磁场(0~3.5 T), 通过旋转手柄, 可使 HTS 带材得到一个稳定夹角可调的外磁场(0~90°)。电流源通过两根电流引线供电给带材, 纳伏表通过靠内侧的两根电压引线测量带材两端电压 U_x , HTS 带材出现明显漂移电压时的电流即为临界电流 I_c 。

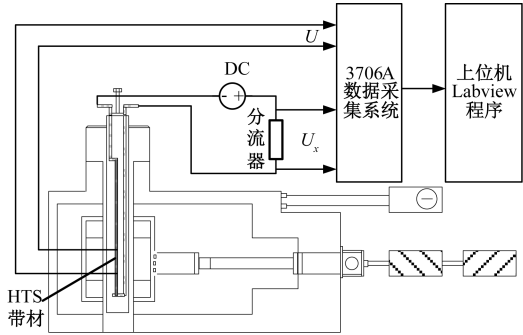


图 3 0~3.5 T 背场下带材临界电流测量系统

Fig.3 Strip critical current measurement system under

0~3.5 T back field

3.3 0~3.5 T 背场磁体系统

背景磁场和低温冷却的集成系统如图 4 所示。热屏蔽层安装于磁体外侧,真空保温层安装于热屏蔽层外侧;制冷机与磁体外层的真空保温层的接口相连,冷水机与制冷机相连,为其提供冷却回路;一级冷头与磁体相连,二级冷头与热屏蔽层相连。

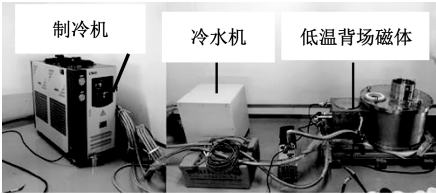


图 4 背景磁场和低温冷却系统
Fig.4 Background magnetic field and cryogenic cooling system

杜瓦未填充液氮时,将磁体从室温冷却到 4.0 K 低温环境需要约 50 h;真空保温层最终稳定在 4.0×10^{-4} Pa 下;当热屏蔽层温度约为 44 K 时,第一和第二阶段的冷头温度分别为 42 K 和 3.8 K;背景磁体的供电电流为 72 A 时,中心磁场高达 3.5 T,其磁场满足临界电流测试所需背景磁场。

样品保持器如图 5 所示。背场磁体为同轴分裂状态,可以为 HTS 带材骨架提供摆放和旋转的空间;通过调节超导磁体通流大小和旋转手柄,可以得到 0~3.5 T 磁场和 0~90°范围变化的背景磁场。

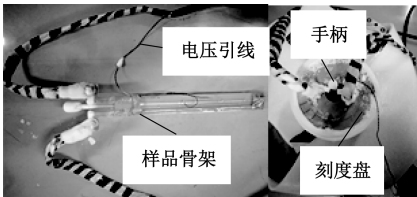


图 5 样品保持器
Fig.5 HTS sample holder

3.4 测试系统

临界电流特性测试设备的参数如表 2 所示。临界电流测试平台如图 6 所示,主要由低温背场磁体和临界电流测试装置组成。低温背场磁体产生大直流背场;3 kA 直流电源为带材和磁体系统供电;NI 数据采集系统采集纳伏表所测量分流器和带材上的电压降后,同电流信号一起送至上位机进行信号处理。

表 2 临界电流特性测量设备的参数

Tab.2 Critical current characteristic measuring device parameters		
项目	型号	参数
3 kA 直流电源	日本 MATSUADA	输出电压 0~20 V 输出电流 0~3 kA
分流器	FL-500 A/75 mV	精度±0.5%
纳伏表	Keithley 2128A	电压量程 10 mV~100 V
多通道切换仪器	Keithley 3706A	通道数 576

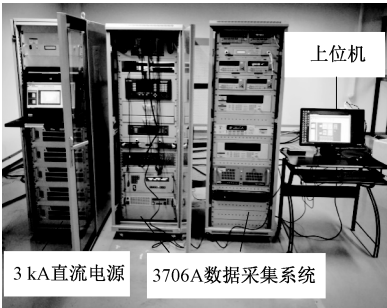


图 6 临界电流测试平台
Fig.6 Critical current test platform

测试时,待低温背场磁体的 NbTi 线圈和带材完全冷却后,固定带材表面与直流背景磁场的夹角 θ ,通过改变超导磁体通流大小改变低温背场磁体产生磁场 B 的大小,设置带材的供电电流源上升速率为 1 A/s。纳伏表分别测量带材和分流器的端电压 U 和 U_x ,采用 3706 多通道采集系统同时采集两路电压信号后,通过数据通信接口发送至 PC 端的 Lab-view 上位机程序,由上位机程序显示和保存相对应的电压 U 和电流值 I 。电压 U 达到直流失超判据 ($1\text{ }\mu\text{V}/\text{cm}$) 时对应的电流值即为 I_c ,然后旋转手柄及转盘改变夹角 θ ,重复上面的测试过程,最终测量得出 I_c 与磁场强度 B 和夹角 θ 的关系。

4 实验结果分析

应用低温背场磁体和临界电流测量平台对 2G HTS 带材在外加不同磁场强度、磁场方向等因素共同作用下测量 I_c 。并针对带材的 I - E 曲线,采用式 (1) 推导出与 I_c 对应的 n 值,如式 (2) 所示^[13]。

$$E = E_c (I/I_c)^n \tag{1}$$

$$n = \frac{\ln E}{\ln [E_c (I/I_c)]} \tag{2}$$

式中, E 为电场强度; I 为流过带材的电流; I_c 为临界电流 (A); n 为 0.1~1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 范围内电压-电流对数

坐标曲线($\ln V - \ln I$)的斜率; E_c 为 HTS 带材失超判据。

4.1 自场下临界电流特性

自场(77 K, 0 T)下带材的 $I-E$ 曲线如图 7 所示。由图 7 可知,YBCO/Cu 带材在自场下的临界电流 I_{c0} 为 262 A(77 K, 0 T),与表 1 中的数据一致,虽然 HTS 带材端电压在实验中存在大量干扰信号,但实验和计算得到的 $I-E$ 曲线重合度很高,所以 n 值模型公式可以高度拟合 HTS 带材的伏安特性,并且证明了本文采用的临界电流测试平台准确可靠。

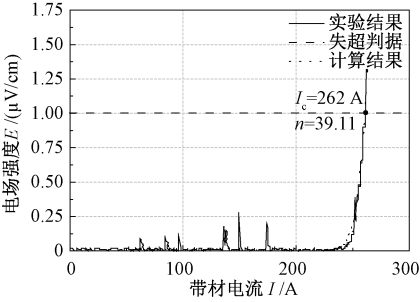


图 7 HTS 带材的 $I-E$ 曲线
Fig.7 $I-E$ curves of HTS tape

4.2 直流背景磁场下临界电流特性

实验测量 HTS 带材在不同磁场夹角 θ 下临界电流 I_c 随直流背景磁场强度 B 的变化曲线,如图 8 所示。HTS 带材在不同磁场强度 B 下临界电流 I_c 随磁场夹角 θ 的变化曲线如图 9 所示。

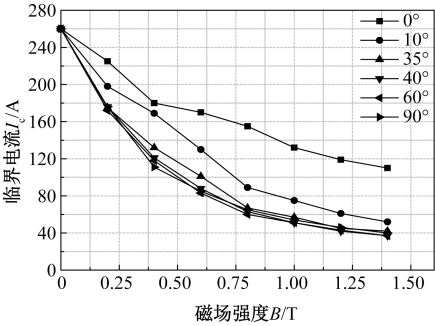


图 8 不同夹角 θ 下磁场强度 B 对临界电流 I_c 的影响
Fig.8 Influence of critical current I_c under different angle θ of magnetic field B

由图 8 和图 9 可知,2G HTS 带材 I_c 不仅与背景磁场大小 B 有关,还与磁场夹角 θ 有关。 θ 为 0° 时,随着 B 增大 I_c 大幅衰减,且 I_c 随 θ 的增大而衰减,但 θ 大于 40° 后,随着磁场的增大, I_c 衰减趋于平缓且一致。可以看出,YBCO/Cu 带材的各向异性在磁场角度大于 40° 时,不同磁场下临界电流的差异很

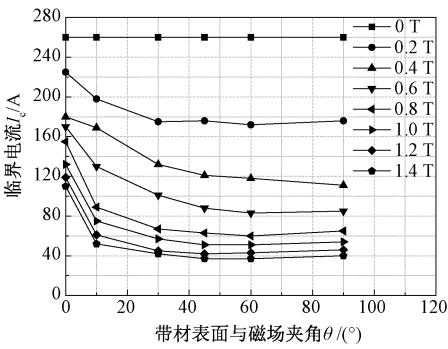


图 9 不同磁场强度 B 下夹角 θ 对临界电流 I_c 的影响
Fig.9 Influence of critical current I_c under different magnetic field B of angle θ

小,几乎可以忽略,各向异性主要体现在 $0\sim40^\circ$ 范围内,但是磁场夹角引起临界电流的退化程度相较于磁场大小引起的退化要小很多。

4.3 直流背景磁场下 n 值特性

根据实验所测 I_c ,通过式 (2) 得到的不同磁场强度 B 下夹角 θ 对 n 值的影响曲线,如图 10 所示。由图 10 可知, n 值随带材表面与磁场夹角 θ 的增大而减小,而且 θ 小于 40° 时的衰减程度大于 θ 大于 40° 时的衰减程度,与 I_c 衰减趋势一致,即带材各向异性的差异主要体现在 $0\sim40^\circ$ 范围内。当磁场大小和夹角愈大时,临界电流和 n 值衰减愈大,导致超导带材载流极限愈小,严重影响超导电力设备稳定性。

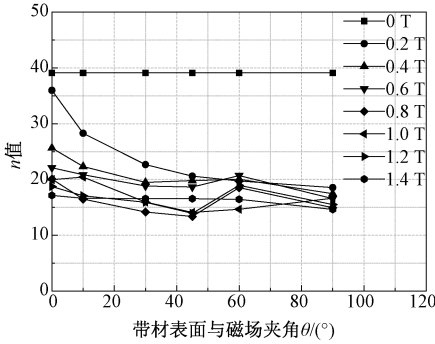


图 10 不同磁场强度 B 下夹角 θ 对 n 值的影响
Fig.10 Influence of angle θ on value n under different magnetic field B

4.4 临界电流与磁场关系特性

为表示 2G HTS 带材 I_c 随 B 的衰减程度,定义 HTS 带材在背景磁场下的临界电流退化率 $k = (I_c / I_{c0}) \times 100\%$ 。通过数据拟合后可以得到一定夹角时任一磁场强度下的临界电流退化率,后续可以简化测试条件。本文通过拟合平行场 ($\theta = 0^\circ$) 和垂直场 ($\theta = 90^\circ$) 下的临界电流退化率 k ,以确定背景磁场下临界

电流的变化范围。通过多次拟合试验后,确定采用拟合精度较高的 4 次二项式函数进行数据拟合,拟合公式如式(3)(平行场)和式(4)(垂直场)所示,实验和拟合结果比较如图 11 和表 3 所示。

$$y = 1 - 1.042x + 1.160x^2 - 0.851x^3 + 0.244x^4$$

(3)

$$y = 1 - 2.087x + 2.097x^2 - 0.963x^3 + 0.157x^4$$

(4)

式中, y 为临界电流; x 为磁场强度。

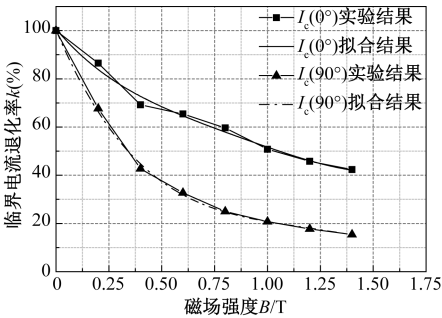


图 11 k - B - θ 拟合曲线
Fig.11 k - B - θ curve fitting

表 3 $(1-k)$ - B - θ 实验结果

Tab.3 Experimental result of $(1-k)$ - B - θ		
$\theta/(^{\circ})$	B/T	$(1-k)(\%)$
0	0.5	33.6
	1	49.2
	1.4	57.7
90	0.5	58.3
	1	79.2
	1.4	84.6

平行场和垂直场下拟合函数与实验数据的拟合相关度高达 0.997,相关系数愈趋于 1 则说明拟合误差愈小,所以,该 4 次二项式函数拟合程度较高,通过式(3)和式(4)可以得到任一磁场强度下的 2G HTS 带材临界电流值。

由图 11 可知,相比于平行场,垂直场下的 2G HTS 带材临界电流衰减程度更大。将带材置于低温背场磁体产生的直流外场的临界电流退化率如表 3 所示,当 θ 一定时, k 随着磁场大小的增大退化现象越明显,而且 θ 愈大, k 愈小,完全符合 HTS 的各向异性变化趋势。可以看出, I_c 和 n 值随磁场强度和夹角的增大而衰减,并且在磁场较小时的临界电流衰减程度大于在磁场较大时的临界电流衰减程度, I_c 的各向异性主要体现在 $0\sim 40^{\circ}$ 范围内,直流背场夹角变化对 2G HTS 带材稳定性影响较大。

5 结论

本文设计并构造了 2G HTS 带材临界电流 I_c 测试的低温背场磁体测试系统,它具有传导冷却超导磁体和插入式液氮杜瓦,可产生 $0\sim 3.5$ T 可调磁场,HTS 样品表面与磁场方向夹角为 $0\sim 90^{\circ}$ 。基于四引线法原理,应用低温背场磁体产生的背景磁场,获得 2G HTS 带材 I_c 和 n 值随磁场影响的变化规律。测试结果表明,2G HTS 带材 I_c 和 n 值不仅与背场强度 B 有关,还与磁场夹角 θ 有关,带材的 I_c 和 n 值随 θ 的增大而减小,而且 θ 小于 40° 时的衰减程度大于 θ 大于 40° 时的衰减程度,即带材各向异性的差异主要体现在 $0\sim 40^{\circ}$ 范围内。另外,在 0.5 T 的平行场下,临界电流衰减了 33.6%;而在垂直场下临界电流衰减了 58.3%;在 1.4 T 的平行场下,临界电流衰减了 57.7%,在垂直场下,临界电流衰减了 84.6%。因此磁场大小和夹角愈大时,临界电流愈低,临界电流衰减程度愈大。

参考文献 (References):

[1] 梁爽,张东,陈彪,等 (Liang Shuang, Zhang Dong, Chen Biao, et al.). 500 kW 高温超导发电机负载三相断路故障运行分析 (Three-phase load breaking fault analysis of 500 kW high-temperature superconducting generator) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (1): 79-84.

[2] 高晓晶,胡元潮,段志强,等 (Gao Xiaojing, Hu Yuanchao, Duan Zhiqiang, et al.). 连续脉冲电源用超导脉冲变压器设计与试验研究 (Design and test research of HTS pulsed power transformer for repetitive pulse power supply) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (3): 85-91.

[3] Hazelton D W, Selvamanickam V. Superpower's YBCO coated high-temperature superconducting (HTS) wire and magnet applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97 (11): 1831-1836.

[4] Morandi A, Gholizad B, Stieneker M, et al. Technical and economical evaluation of DC high-temperature superconductor solutions for the grid connection of offshore wind parks [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (6): 1-10.

[5] Jeong J S, An D K, Hong J P, et al. Design of a 10-MW-class HTS homopolar generator for wind turbines [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017,

- 27 (4): 1-4.
- [6] Wimbush S C, Strickland N M, Long N J. Low-temperature scaling of the critical current in 1G HTS wires [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25 (3): 1-5.
- [7] 姚露, 杨文将, 张涛, 等 (Yao Lu, Yang Wenjiang, Zhang Tao, et al.). 磁等离子发动机超导附加线圈的电磁特性分析 (Electromagnetic properties analysis on superconducting magnet coil for magnetoplasmadynamic thruster) [J]. 中国空间科学技术 (Chinese Space Science and Technology), 2017, 37 (5): 1-8.
- [8] 陈鑫, 诸嘉慧, 周卓楠, 等 (Chen Xin, Zhu Jiahui, Zhou Zhuonan, et al.). 外界磁场对两种 YBCO 超导带材临界电流及 n 值影响分析 (Influence of background magnetic field on critical current and n value of two kinds of YBCO types) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (10): 3-5.
- [9] 王秋良 (Wang Qiuliang). 高场超导磁体科学技术与应用 (High field superconducting magnet: Science, technology and applications) [J]. 物理学进展 (Progress in Physics), 2013, 33 (1): 1-23.
- [10] Tsuchiya K, Kikuchi A, Terashima A, et al. Critical current measurement of commercial REBCO conductors at 4.2 K [J]. Cryogenics, 2017, 85: 1-7.
- [11] Friend C M, Wellstood C, Vazquez D, et al. Variable-temperature critical current measurements on YBaCuO coated conductors [J]. Superconductor Science & Technology, 2003, 16 (1): 7065-7070.
- [12] Weijers H W, Markiewicz W D, Gavrillin A V, et al. Progress in the development and construction of a 32-T superconducting magnet [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (4): 1-7.
- [13] 诸嘉慧, 栗会峰, 陈晓宇, 等 (Zhu Jiahui, Li Huifeng, Chen Xiaoyu, et al.). 高温超导电缆交直流伏安特性测试与分析 (Test and analysis on the DC and AC I-V characteristics of high temperature superconducting cable) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (24): 120-125.

Test and analysis of critical current anisotropy of second generation superconducting tape under 0~3.5 T DC background magnetic field

ZHANG Yan¹, ZHU Jia-hui², CHEN Pan-pan², WANG Hai-yang¹, QIN Han-yang³,
DAI Yin-ming⁴, WANG Hui⁴, LIU Hui⁴, FANG Jin¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

4. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to master the trend of critical current (I_c) and value n of second generation (2G) high temperature superconducting (HTS) tape under 0~3.5 T DC background magnetic field, a new type of split back field magnet system was constructed and utilized. The law of influence of the background magnetic field on I_c and value n was obtained by test analysis. Superconducting magnets and sample holders with 4.2 K operating temperature and two coaxially split NbTi coils are used to change the magnitude and angle of the background magnetic field (0~3.5 T, 0~90°). 2G HTS tape was placed in a liquid nitrogen environment (77 K), and the current source rise rate was set to 1 A/s. Based on the four-lead method principle and the criterion of loss of DC superconductance (1 μ V/cm), I_c and n of the 2G HTS tape under DC background magnetic field were obtained. The experimental results show that the I_c and n values of 2G HTS tape show the same trend, which are degraded with the external magnetic field strength B and the increase of the angle θ between the tape surface and the magnetic field. When the background magnetic field is 1.4 T, the 2G HTS tape is vertical, I_c under the field is attenuated by 84.6%, which is 1.47 times the degree of parallel field critical current attenuation.

Key words: split back field magnet; critical current; value n ; high temperature superconducting tape; NbTi