

# 环氧浸渍材料厚度对高温超导体失超传播特性的影响研究<sup>\*</sup>

柴成栋<sup>1</sup>, 刘力源<sup>2</sup>, 罗荣华<sup>1</sup>, 张辉波<sup>3</sup>, 羊新胜<sup>1†</sup>, 赵勇<sup>1</sup>

1. 西南交通大学磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室, 超导与新能源研究开发中心, 成都 610031;

2. 成都大学高等研究院, 成都 610106;

3. 西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031

收稿日期: 2019-11-25; 接收日期: 2020-06-15

**【摘要】** 研究了不同环氧树脂厚度浸渍的 ReBCO 高温超导带材的最小失超能 (MQE) 和失超传播速度 (NZPV), 分析了不同环氧树脂厚度对 ReBCO 高温超导带材的最小失超能和失超传播速度随归一化传输电流的关系. 结果表明, ReBCO 高温超导带材的最小失超能随环氧树脂厚度的增加变化很小; ReBCO 高温超导带材的失超传播速度随着环氧树脂厚度的增加而增大.

**关键词:** ReBCO, 环氧树脂厚度, 最小失超能, 失超传播速度

**PACS:** 7460, 7490, 0290

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2020.01.002

## Effect of Epoxy Impregnated Material Thickness on Quench Propagation Characteristics of ReBCO Coated Conductor

CHAI Chengdong<sup>1</sup>, LIU Liyuan<sup>2</sup>, LUO Ronghua<sup>1</sup>,  
ZHANG Huibo<sup>3</sup>, YANG Xinsheng<sup>1†</sup>, ZHAO Yong<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Magnetic Levitation, Technologies and Maglev Trains (Ministry of Education), Superconductivity and New Energy R&D Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Institute for Advanced Study, Chengdu University, Chengdu 610106;

3. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Received date: 2019-11-25; accepted date: 2020-06-15

**【Abstract】** The minimum quench energy (MQE) and normal zone propagation velocity (NZPV) of ReBCO coated conductor under different thickness of epoxy have been measured under liquid nitrogen, and the influence of different thickness of epoxy for the MQE and NZPV of ReBCO between the normalized transmission current are investigated. The results show that the minimum quench energy of ReBCO changes little with the increase of the thickness of the epoxy, the normal zone propagation velocity of ReBCO increases with the increase of the thickness of the epoxy.

**Keywords:** ReBCO, thickness of epoxy, minimum quench energy, normal zone propagation velocity

**PACS:** 7460, 7490, 0290

<sup>\*</sup> 四川省应用基础研究项目((2018JY0003), 国际合作项目(2013DFA51050)资助的课题.

<sup>†</sup> xsyang@swjtu.edu.cn

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2020.01.002

**Reference method:** CHAI Chengdong, LIU Liyuan, LUO Ronghua, ZHANG Huibo, YANG Xincheng, ZHAO Yong,  
Low. Temp. Phys. Lett. **42**, 0017 (2020)

## 1 引言

近年来,随着二代 REBCO 高温超导带材性能的不断提升,高温超导带材在超导电机、超导储能以及粒子加速器磁体等超导电力设备中的应用也越来越广泛<sup>[1-3]</sup>.然而这些电力设备在系统中并网运行时,不可避免地会遇到各种突发故障如系统短路等,这有可能会引起高温超导带材失超,从而严重影响超导设备运行稳定性.在设计出有效的失超保护方案之前,需要对高温超导带材的失超传播特性进行深入了解.李金成等人对 YBCO 涂层导体的交、直流失超传播特性进行了研究<sup>[4]</sup>,刘大千等人对 YBCO 带材及其绕成的线圈进行了失超传播特性分析<sup>[5]</sup>,Fei Liang 等人研究了涂层导体的不均匀性对失超传播特性的影响<sup>[6]</sup>,Yang P 等人对非均匀性 ReBCO 涂层导体的失超传播特性进行了实验和数值仿真研究<sup>[7]</sup>,为失超检测和保护设计提供了理论依据,郑遥路等人建立了 YBCO 带材失超传播的二维计算模型,使失超传播过程在数值分析上更加直观地展现<sup>[8]</sup>,Liyuan Liu 等人在固氮冷却和传导冷却两种方式下对高温超导带材的失超传播速度和最小失超能进行了测量并进行了比较<sup>[9]</sup>.在这些研究中,高温超导带材的最小失超能(MQE)和失超传播速度(NZPV)是最重要的两个性能参数.这两个参数主要由工作温度、工作电流、工作磁场以及稳定层厚度的影响<sup>[10-12]</sup>.高温超导带材绕制成高温超导线圈的过程中,通常需要绝缘且需对其进行环氧树脂浸渍固化,以增强超导线圈的机械稳定性,并增加其在传导冷却过程中的冷却效率<sup>[13]</sup>.已有文献研究了不同环氧树脂材料对高温超导带材的失超传播特性的影响,结果表明热导率高的环氧材料能提高线圈热稳定性<sup>[14]</sup>.此外,虽有文献报道了环氧浸渍厚度对高温超导带材载流性能衰减的影响<sup>[15]</sup>,但环氧厚度对高温超导带材失超传播速度的影响少见报道.

因此,本文拟通过实验手段研究不同环氧浸渍厚度下高温超导带材的失超传播特性,并根据推导的失超传播速度与传输电流和环氧树脂厚度的关系式结构拟合出公式.实验中环氧浸渍厚度分别为 2, 4, 6, 8, 15 mm,首先测试不同环氧厚度环氧对高温超导带材载流性能的影响;其次研究了不同环氧厚度对高温超导带材的最小失超能(MQE)和失超传

播速度(NZPV)的影响.

## 2 理论推导

假设热参数与温度无关,根据文献[12]可知带材失超时的失超传播速度一般表达式:

$$v = J \sqrt{\frac{\rho_n k_n}{\gamma C_n \gamma C_s (T_c - T_b)}} \quad (1)$$

式中,  $\gamma C_n$ 、 $\gamma C_s$ 、 $k_n$ 、 $k_s$ 、 $T_n$ 、 $T_s$  分别是基底、超导层的体热容、热导率及温度,  $\rho_n$  为基底电阻率,  $J$  是传输电流密度. 在发生失超传播时,环氧浸渍下的带材其失超传播产生的热量耗散效率降低,导致带材温升所需的热量减少,相当于  $C_n$ 、 $C_s$  中引入了等效热容  $C_e$ , 因此,环氧浸渍下的带材失超传播速度表达式为:

$$v = J \sqrt{\frac{\rho_n k_n}{\gamma (C_n - C_e) \gamma (C_s - C_e) (T_c - T_b)}} \quad (2)$$

由上式可知,假设环氧浸渍下带材的热参数与温度无关,当等效热容  $C_e$  增大时,带材的失超传播速度增大;当传输电流密度增大时,带材的失超传播速度也增大.假设环氧树脂厚度与等效热容是线性关系,则失超传播速度与传输电流  $I$  和环氧树脂厚度  $d_{ex}$  有如下关系:

$$v = I \sqrt{\frac{A}{B d_{ex}^2 + C d_{ex} + D}} + E \quad (3)$$

其中 A、B、C、D、E 为关系式的系数.

根据文献[16]可知最小失超能的表达式为:

$$MQE = C_i \times \Delta T \times \sqrt{\frac{2k\Delta T}{J^2 \rho}} \quad (4)$$

式中  $C_i$  为超导体比热,  $k$  为超导体的热导率,  $\rho$  为超导体正常态电阻率,  $J$  是传输电流密度,  $\Delta T$  为初始失超温度与初始温度的差. 在未发生失超传播时,环氧浸渍的带材表面几乎无热量囤积,加热器产生的热量几乎都被带材吸收,因此对于等效比热容的引入可以忽略不计,最小失超能几乎不变.

## 3 实验

### 3.1 实验样品的选用

本实验所用的高温超导带材是 SuperPower 公司生产的型号为 SCS4050 的高温超导带材,所使用的环氧浸渍材料为 Stycast2850FT. 带材和环氧的具体参数如表 1 所示.

表 1 实验用带材和环氧参数

实验样品	ReBCO	环氧树脂	Stycast2850FT
生产公司	SuperPower	催化剂	24LV
带材宽度/mm	4	固化温度	室温
带材厚度/mm	0.1	固化时间/hr	8~16
铜层热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	401	热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	1.01
临界电流最小值/A	100	热收缩系数/(10 <sup>-6</sup> m/m/K)	-111.5

### 3.2 实验装置

实验所用装置原理图如图 1(a)所示,分别是为样品供电的直流电源,为加热器供电的直流电源,纳伏表,数据采集/切换单元,主机显示屏以及杜瓦,当直流源为样品供电时,纳伏表 1 将带材的电压数据传送到电脑终端,用于电压判断,使直流源及时断路保护样品,通过数据采集/切换单元和纳伏表 2 将样品各通道的电压数据传送到电脑终端,通过电脑终端对数据进行计算分析. 图 1(b)所示为样品原理图,图 1(c)为样品实际图,样品放置于环氧板上,并通过两个铜引出端与直流电源的供电引线相连,样品表面焊接五根电压引线用于电压数据的采集,其中 V<sub>1</sub> 与 V<sub>2</sub> 之间放置加热器,加热器为电阻丝(Ni-Cr)通过实验所用的环氧树脂(Stycast 2850 FT)一起固化在带材表面的装置,加热器的电阻约 3.36 欧

姆左右,环氧树脂固化长度为 3 cm,宽度为 0.8 cm,并在每次试验增加厚度的同时保持不变. V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub>, V<sub>4</sub>, V<sub>5</sub> 相邻两个电压引线之间的间距是 0.5 cm, V<sub>1</sub> 与 V<sub>2</sub> 之间的间距为 1 cm, V<sub>1</sub> 与 V<sub>2</sub> 的间距稍大是为了有充足的空间放置加热器,不让加热器与电压引线焊接点相触碰,因为加热器的热量可能会使焊锡融化导致电压引线不能有效接触带材,引起电压采集的误差. 实验将 V<sub>1</sub> 与 V<sub>5</sub> 之间的电压值作为失超的判据,当电压升高到预设的电压阈值时,判断为带材实验区域已经完全失超,为样品供电的直流电源自动切断供电. 实验样品放置于杜瓦中进行试验,每次试验在传输电流  $I_t = 0.6I_c, 0.7I_c, 0.8I_c, 0.9I_c$  进行失超数据的采集和记录,在一次试验结束之后,增加环氧树脂的厚度,重新采集和记录.

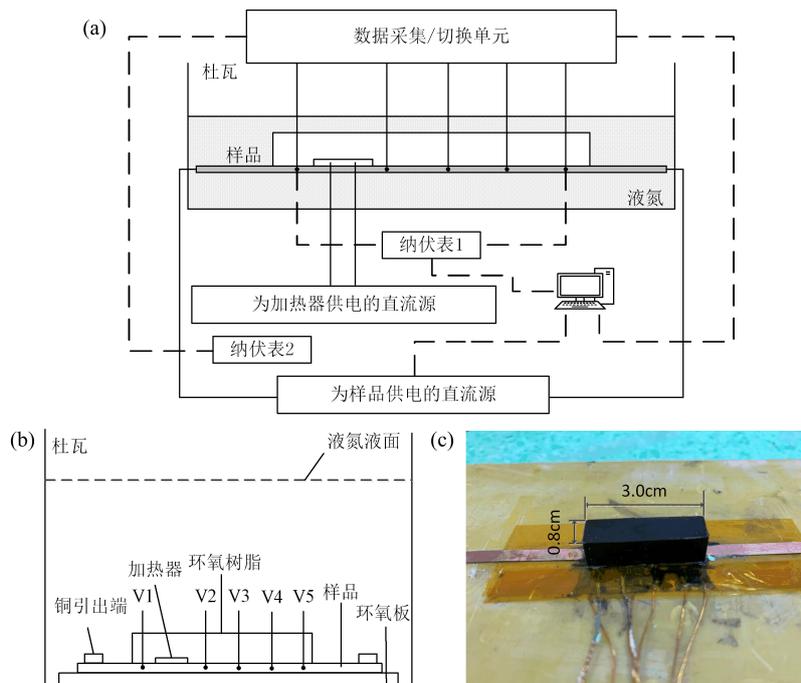


图 1 实验装置图

### 4 试验结果与分析

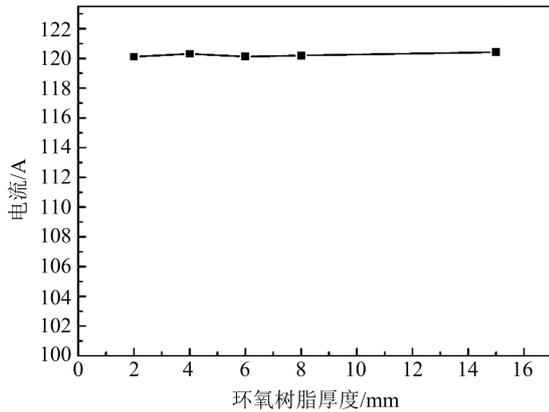


图 2 不同环氧树脂厚度下的带材临界电流

#### 4.1 环氧树脂厚度对临界电流的影响

在每次增加环氧厚度进行失超试验之前,首先对高温超导带材临界电流进行了测试,临界电流的判定阈值为  $V_{15} = 2.5 \mu V$ . 图 2 为不同环氧树脂厚度下的带材临界电流. 从图中可知,在不同环氧树脂厚度下,带材的临界电流都为维持在 120 A 左右,其最大误差在 0.42% 以内,说明环氧树脂厚度的增加对带材临界电流的影响可以忽略不计. 其原因是环氧降温时为自由热收缩,对带材产生的热应力较小,不会造成带材载流性能衰减. 这也保证了不同环氧

厚度下载流性能的一致性,从而提高了实验数据的可靠性.

#### 4.2 环氧厚度对高温超导最小失超能的影响

通过直流源设定电压输出对加热器施加脉冲,记录刚好使带材发生失超时的电压值  $U$ ,并通过公式(3~4)得到该次失超试验的最小失超能.

$$Q = \frac{U^2}{R} \quad (5)$$

图 3(a)为不同环氧树脂厚度下高温超导带材的 MQE 随归一化传输电流变化的关系. 由图可知,在环氧厚度为 2~15 mm 变化时,带材的 MQE 从 0.8815 J 到 0.4144 J 变化. 在同一环氧树脂厚度下, MQE 随归一化传输电流的增大而减小,其原因为当传输电流越接近临界电流时,其电流裕度越小,带材越不稳定,使其失超需要的能量越少. 图 3(b)为不同归一化传输电流下带材的 MQE 随环氧树脂厚度变化的关系. 在同一归一化传输电流下,随着环氧树脂厚度的增加, MQE 几乎不变. 其原因为高温超导带材的热导率远大于环氧树脂的热导率(如表 1 所示),加热器产生的热量绝大部分都被带材吸收,又因为环氧树脂厚度改变对临界电流的影响几乎可以忽略不计,因此 MQE 几乎不随着环氧树脂厚度的改变而改变.

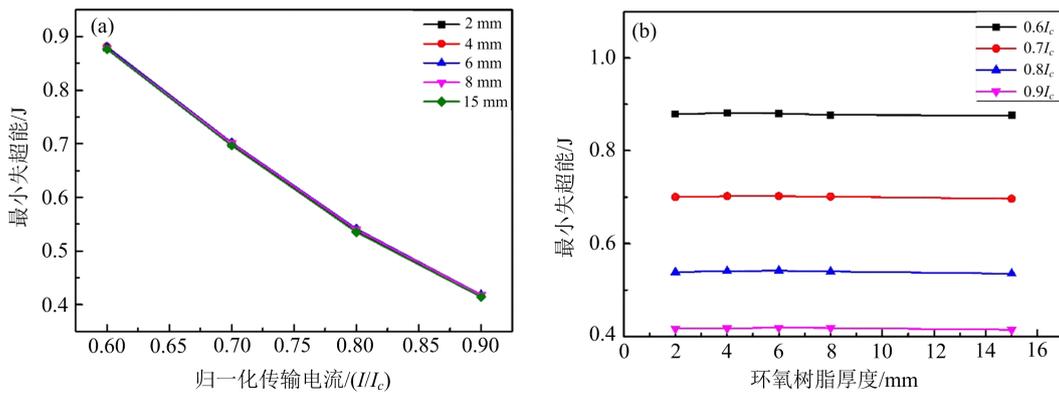


图 3 ReBCO 带材的最小失超能 (MQE)

#### 4.3 环氧厚度对高温超导失超传播速度的影响

图 4 为不同环氧树脂厚度下,带材电压随着失超传播的变化曲线(传输电流  $I_t = 0.6I_c$ ). 当电压引线  $V_1$  和  $V_5$  达到电压阈值  $V_m = 30 \text{ mV}$  时,直流源立即断电以防止温度过高对带材造成永久性损坏. 失超传播速度  $V$  为:

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (6)$$

其中  $L$  为两条电压曲线之间的距离,时间间隔  $\Delta t$  定义为失超后带材的正常区域从一条电压引线传播到临近的一条所需时间. 为了计算  $\Delta t$ ,需选择参考电压  $V_{ref}$ ,且需选择两条电压曲线相互平行的部分

进行计算. 因此, 图 4(a)~(e)均选取第三和第四电压通道对应的  $V_{34}$  和  $V_{45}$  两条电压曲线, 参考电压  $V_{ref}=3\text{ mV}$ , 距离  $L=0.5\text{ cm}$ . 按如上步骤, 图 4 中

(a)~(e)所对应环氧树脂厚度下的 NZPV 分别为  $0.4219\text{ cm/s}$ ,  $0.5073\text{ cm/s}$ ,  $0.515\text{ cm/s}$ ,  $0.609\text{ cm/s}$ ,  $0.725\text{ cm/s}$ .

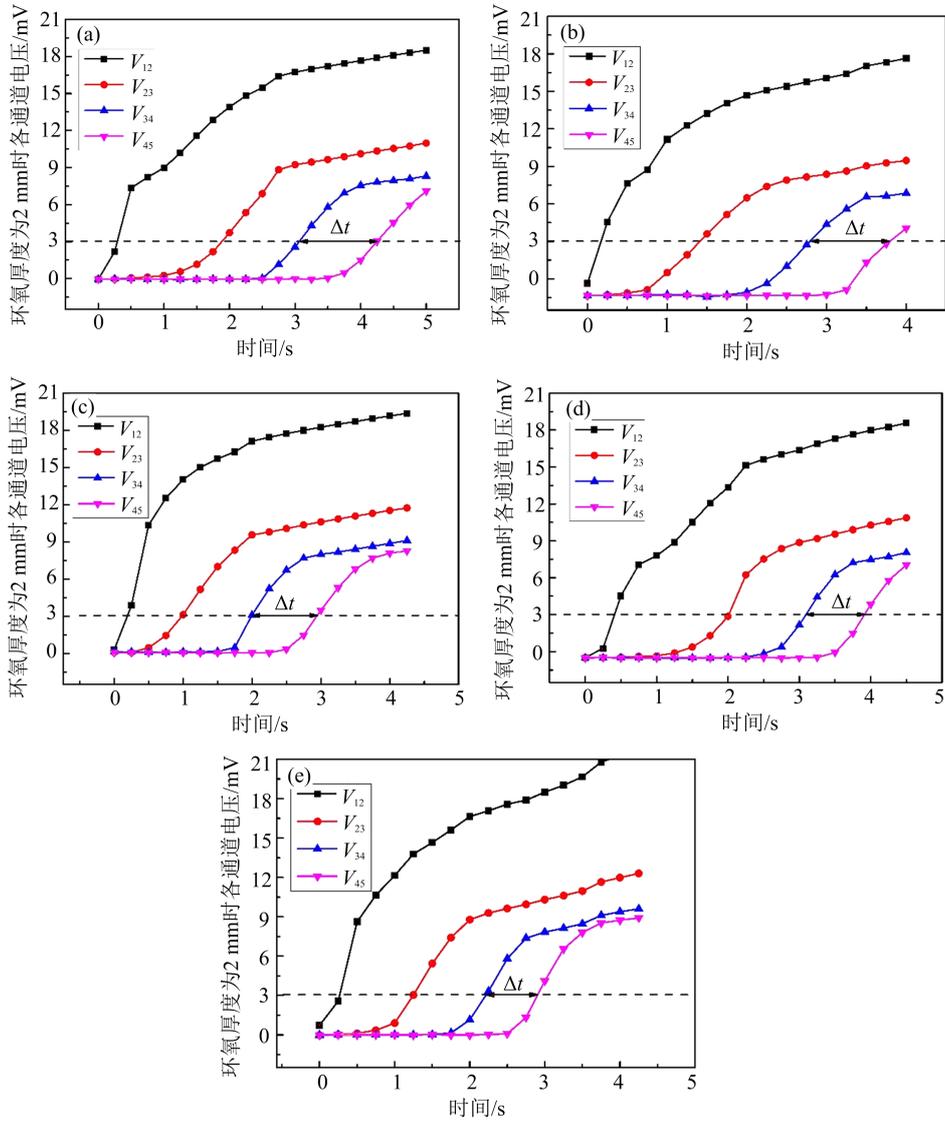


图 4  $0.6I_c$  下最小失超传播速度计算

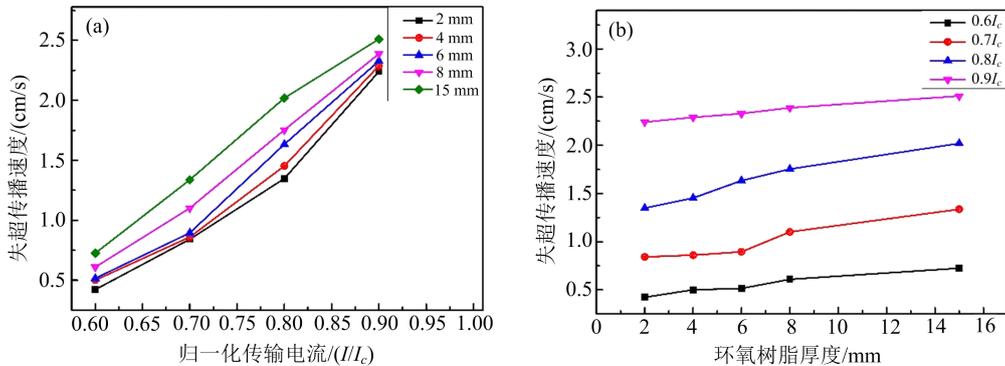


图 5 最小失超传播速度 (NZPV)

图 5(a)为不同环氧树脂厚度下高温超导带材的 NZPV 随归一化传输电流变化的关系. 由图可知,当环氧厚度在 2~15 mm 变化时,带材的 NZPV 从 0.4219 cm/s 到 2.512 cm/s 变化. 在同一环氧树脂厚度下,NZPV 随归一化传输电流的增大而增大. 图 5(b)为不同归一化传输电流下带材的 NZPV 随环氧树脂厚度变化的关系. 由图可知,在同一归一化传输电流下,随着环氧树脂厚度的增加,NZPV 也随之增大.

带材失超过程中产生的热量通过带材和环氧进

$$v = I \sqrt{\frac{2.89653 \times 10^{-4}}{5.6991 \times 10^5 d_{ex}^2 - 2.65418 \times 10^4 d_{ex} + 1.29724 \times 10^3}} - 0.03134 \quad (8)$$

式中失超传播速度的单位是 m/s,传输电流单位为 A,环氧树脂厚度单位为 m. 拟合曲线与实验数据对

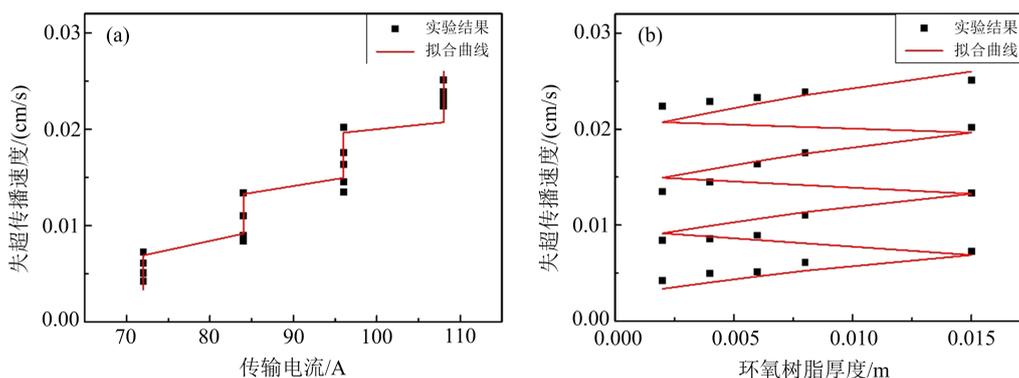


图 6 拟合曲线与实验数据对比图

行传导. 导热热阻公式为:

$$R = \frac{d}{k \times s} \quad (7)$$

其中  $d$  为材料厚度,  $s$  为材料截面积,  $k$  为材料热导率. 由公式可知,高温超导带材各参数不变,因此热阻不变;随着环氧树脂厚度  $d_{ex}$  增加,其热阻  $R_{ex}$  也增大,因此沿着带材传播的热量越多,其 NZPV 也越大.

根据式(3-3)的关系式结构,拟合得到失超传播速度与传输电流和环氧树脂厚度的关系式为:

比图如图 6 所示,由图可知,实验数据基本处于拟合曲线的附近,拟合效果较好.

## 5 结 论

本文实验测试了不同环氧树脂厚度下 YBCO 高温超导带材的失超传播特性,并通过拟合,初步得到了失超传播速度与传输电流和环氧树脂厚度的关系式. 结果表明:

(1)不同环氧树脂厚度对 ReBCO 高温超导带材的最小失超能(MQE)没有影响,因为 ReBCO 高温超导带材的热导率远大于环氧树脂,加热器的热量几乎都被带材吸收,且临界电流不变,因此最小失超能也不变.

(2)不同环氧树脂厚度对最小失超传播速度(NZPV)有影响,随着环氧树脂厚度增加,同一带材在同一传输电流下的最小失超传播速度(NZPV)增大,这是因为带材表面热量的散热途径上的热阻随着环氧树脂厚度的增加而增大,带材热量散发效率减小,加剧带材的不稳定性,NZPV 增大.

随着环氧厚度增加,其热阻也增加,环氧浸渍下带材的热稳定性随之降低. 因此,高温超导线圈环氧浸渍过程中,在保证其机械稳定性的同时,尽量减少浸渍过程中环氧的厚度,以保证线圈足够的热稳定性.

参 考 文 献

- [ 1 ] Koyanagi K, Takayama S, Tasaki K, et al. Design and Experimental Study of a Model Magnet for Spiral-Sector FFAG Accelerators. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, **26**(3):4402705.
- [ 2 ] Yang Y, Duan S, Ren Y, et al. Design and Development of a Cryogen-Free Superconducting Prototype Generator With YBCO Field Windings. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, **26**(4):5200205.
- [ 3 ] Morandi A, Gholizad B, Fabbri M. Design and performance of a 1 MW-5 s high temperature superconductor magnetic energy storage system. *Supercond. Sci. Technol.*, 2016, **29**(1):015014.
- [ 4 ] 李金成, 张国民, 靖立伟, 刘琦, 余卉. 高温超导带材 YBCO 涂层导体的失超传播特性研究. *低温与超导*, 2013, **41**(05):13-17.
- [ 5 ] 刘大千, 张志丰, 郭腾炫, 邱清泉, 张国民, 戴少涛. 一种 YBCO 带材及其单饼线圈的失超传播特性分析. *低温与超导*, 2015, **43**(03):28-32, 80.
- [ 6 ] Liang F, Yuan W, Zhang M, et al. The Impact of Critical Current Inhomogeneity in HTS Coated Conductors on the Quench Process for SFCL Application. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, **26**(3):5600605.
- [ 7 ] Yang P, Wang Y, Sheng J, et al. Experimental and Numerical Study of Quench Characteristics of Nonuniform REBCO-Coated Conductors. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2017, **27**(4):6602406.
- [ 8 ] 郑遥路, 阴达, 蒋东辉, 陈志友, 陈文革, 匡光力, 谭云飞. YBCO 带材失超传播二维计算模型与结果分析. *低温与超导*, 2018, **46**(12):22-26.
- [ 9 ] Liu L, Chen Y, Zhang H, et al. Quench Behavior Comparison Between Solid Nitrogen and Conduction Cooled REBCO Coated Conductor[J]. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2018, **28**(8):6602905.
- [10] Bonura M, Senatore C. Temperature and Field Dependence of the Quench Propagation Velocity in Industrial REBCO Coated Conductors. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2017, **27**(4):6600705.
- [11] Bae J H, Eom B Y, Sim K D, et al. Minimum Quench Energy Characteristic of YBCO Coated Conductor With Different Stabilizer Thickness. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2013, **23**(3):4600404.
- [12] 瞿青云, 马媛媛, 刘华军, 陈敬林, 陈环宇. YBCO 高温超导带材失超传播特性研究. *低温与超导*, 2014, **42**(09):38-43.
- [13] Ariyama T, Matsuda N, Matsuo R, et al. Study on Heat Transfer Characteristics HTS Tapes of Epoxy-Impregnated Conduction-Cooled Coils Using Winding Pack Model. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2017, **27**(4):8800106.
- [14] 杨艳芳, 张宏杰, 耿国丽, 诸嘉慧, 方进. 新型树脂基复合材料对超导线圈性能的影响研究. *低温与超导*, 2018, **46**(12):27-30, 59.
- [15] Kesgin I, Hasse Q, Ivanyushenkov Y, et al. Performance of 2G-HTS REBCO Undulator Coils Impregnated Epoxies Mixed With Different Fillers. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2017, **27**(4):4100104.
- [16] 刘力源. 高温超导带材和线圈力学及固氮冷却下热稳定性研究. 西南交通大学, 2018.