

钇钡铜氧超导带材不均匀性对其过流特性的影响

周义刚, 肖立业, 张国民, 李晓航, 张志丰

(中国科学院电工研究所应用超导重点实验室, 北京市 海淀区 100190)

Influence of Inhomogeneous Superconducting Properties of YBCO HTS Tape on Over-current Characteristics

ZHOU Yi-gang, XIAO Li-ye, ZHANG Guo-min, LI Xiao-hang, ZHANG Zhi-feng

(Key Laboratory of Applied Superconductivity (Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences)

Haidian District, Beijing 100190, China)

ABSTRACT: The voltage and temperature in various sections of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO) tapes with or without stabilizer were measured at AC over-current with different amplitudes. A model considering the inhomogeneous critical current density distribution in the tape was proposed. Using this model, the over-current properties of the YBCO HTS tape was numerically simulated. Comparing the experiments with the numerical results, effects of inhomogeneous superconducting properties of YBCO HTS tape on the transient characteristics under over-current condition were obtained. The results are helpful for the design of superconducting electrical equipment.

KEY WORDS: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO) tape; inhomogeneous properties; over-current characteristics; heat transfer

摘要: 通过实验方式测量在各种不同幅值工频交流冲击下, 具有稳定层与没有稳定层的钇钡铜氧($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, YBCO)超导带材上不同区域的电压和温度。针对超导带材的临界电流分布不均匀的现象, 提出分析这种不均匀性的物理模型, 利用该模型对具有不均匀临界电流密度分布的 YBCO 超导带材的过电流冲击特性进行仿真计算分析。通过实验结果与仿真计算结果的对比, 分析了 YBCO 超导带材的不均匀性对其过流特性的影响, 研究结果可以为超导电力设备的设计提供有益的参考。

关键词: 钇钡铜氧超导带材; 不均匀性; 过流特性; 热传导

0 引言

目前, YBCO超导带材正被越来越多地应用在超导电力设备中, 在超导电缆、超导限流器和超导电机等领域具有广阔的应用前景^[1-4]。在超导电力应

用中, 超导材料会因短路故障而承受几十至数百毫秒交流冲击, 此时超导材料会因为电流明显超过其临界电流值而发生失超, 产生常态电阻和热量, 严重的情况下会破坏超导带材。

由于高温超导带材的工艺特点等因素影响, YBCO带材的临界电流在长度方向上存在不均匀性, 这种不均匀性会导致带材在过电流冲击条件下沿带材长度方向出现局部电场和温度的集中^[5-6], 从而导致超导带材局部性能的下落甚至烧毁^[7-8]。目前, 已有的文献中针对超导带材自身不均匀性对其过流特性的影响作用的研究还较少, 也没有展开针对不均匀超导带材在不同冲击条件下的过流特性进行分析的实验和理论研究^[9]。由此, 本文首先通过实验方式测量了各种工频交流冲击下, YBCO超导带材不同区域上出现的电压和温度信号, 然后, 提出分析这种不均匀性的模型, 利用该模型对具有不均匀临界电流密度分布的YBCO超导带材的过电流冲击特性进行仿真分析, 并对结果进行了对比, 实验结果与仿真结果较吻合。

1 实验

1.1 实验样品及方法

本文中采用的 YBCO 超导带材样品有 2 种, 分别为美国 Superpower 公司生产的 YBCO 超导带材及美国超导公司(AMSC)采用轧制辅助双轴结构化工艺生产的 YBCO 超导带材。2 种样品的具体参数如表 1 所示。

2 种样品宽度均为 4 mm, 如图 1 所示, 样品上引出 4 根电压引线, 最外侧 2 根引线间的距离为 10 cm, 中间 2 根引线以及外侧引线将该区域分为

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877076)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877076).

表 1 2 种 YBCO 样品的参数
Tab. 1 Parameters of two kinds of YBCO samples

参数	样品 1	样品 2
基底材料	哈氏合金(Hastelloy)	Ni-W 合金
稳定层	无	50 μm铜双面
临界电流/A	85~90	80~85
拟合指数 n	29~32	25~30
厚度/mm	0.07	0.16

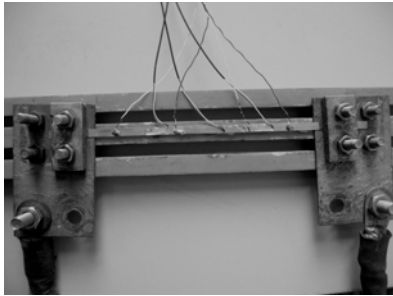


图 1 实验测量的超导带材样品

Fig. 1 YBCO sample in the experimental setup

长度相等的 3 段，每一段中间位置布置一个热电偶测量温度。

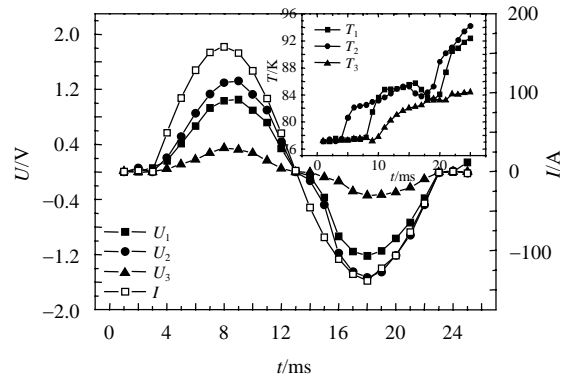
实验过程中，对 YBCO 超导带材样品通以交流冲击过电流，电流幅值为超导带材样品临界电流(I_C)的 2~6 倍，并监测不同冲击电流下，液氮浸泡环境中 YBCO 超导带材上不同区域的电流、电压及温度信号。

1.2 实验结果

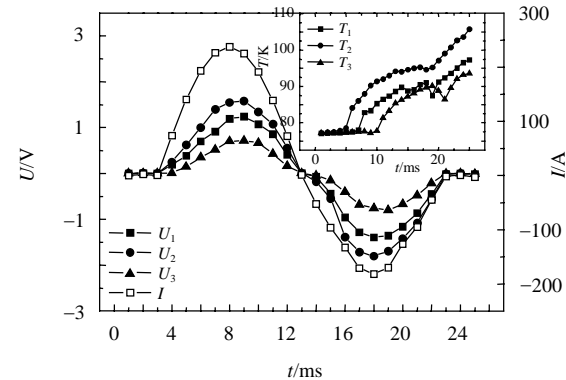
将 2 种 YBCO 超导带材样品通过幅值为其临界电流的 2、3、5 和 6 倍过电流时，样品 1、2 上不同区域的电压及温度信号分别如图 2、3 所示。图中 I 为带材上通过的电流， U_1 、 U_2 、 U_3 分别为第 1、2、3 段区域上的电压， T_1 、 T_2 和 T_3 分别为相应的温度。

在图 2、3 中右上方的嵌入曲线为各样品上 3 个热电偶所测量到的温度信号。由于样品 1 的电阻远大于样品 2，故样品 1 上的电压和温度也远高于样品 2。

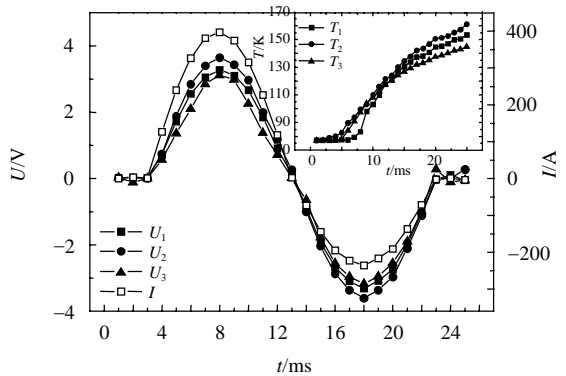
从图中可以看出，样品 1 和样品 2 在冲击电流峰值为其临界电流的 2~3 倍时，样品上不同区域的电压和温度升高的差别非常明显，电压的幅值也有很大差异，温升的相对差异 $(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}) / \Delta T_{\min}$ 均大于 1。而当样品 1 和样品 2 通过峰值为 5~6 倍 I_C 的过电流后，整个样品各区域的温升接近一致，各区域的失超过程也呈现均一化的趋势。温升的相对差异 $(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}) / \Delta T_{\min}$ 小于 0.1。在冲击电流的峰值为 6 倍 I_C 的情况下，样品各区域的温升差别可忽略。



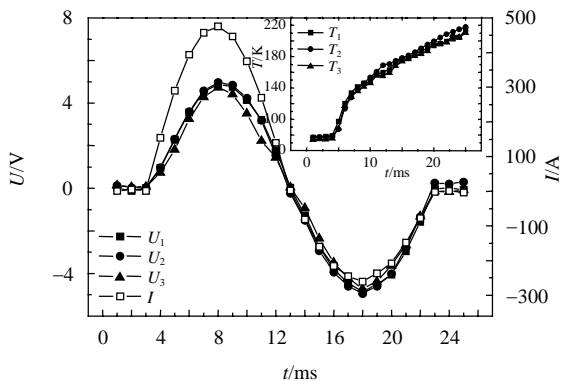
(a) 样品 1 通过峰值为 $2I_C$ 的过电流



(b) 样品 1 通过峰值为 $3I_C$ 的过电流



(c) 样品 1 通过峰值为 $5I_C$ 的过电流



(d) 样品 1 通过峰值为 $6I_C$ 的过电流

图 2 样品 1 上不同区域通过不同过电流的电压与温度
Fig. 2 Voltage and temperature signals at different areas on sample 1 at over-current with different amplitudes

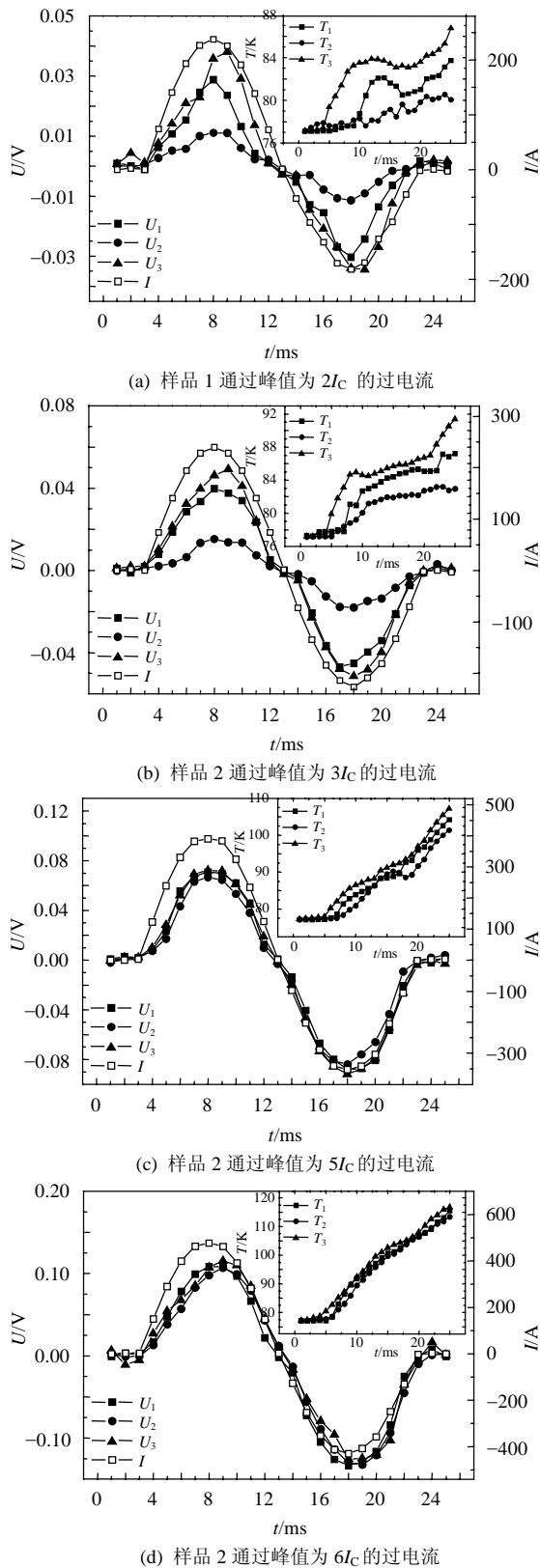


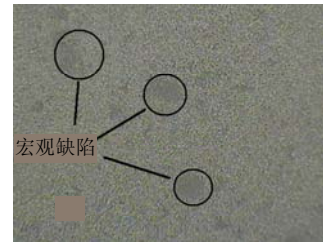
图3 样品2上不同区域通过不同过电流的电压与温度
Fig. 3 Voltage and temperature signals at different areas on sample 2 at over-current with different amplitudes

另外对比图2和图3可以发现,由于稳定层能够起到促进热传输的作用,因此相同电流下,具有

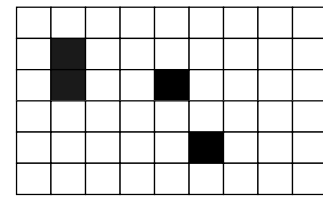
稳定层的样品电压与温升的非均匀度较小。

2 理论分析

YBCO 超导带材由于其制造工艺困难,带材表面常常会分布各种微观及宏观缺陷,典型的宏观缺陷包括微裂纹、微孔洞等,如图4(a)所示,这些缺陷会对 YBCO 的载流性能造成影响。在本文的仿真分析中,将所有类型的宏观缺陷都简化为坏点,这样,图4(a)中的 YBCO 超导带材表面状况能够简化为图4(b)中的网格形状,分布有坏点区域和正常点区域。



(a) 光学显微镜下的带材表面



(b) 简化形式

图4 一非均匀超导带材的表面及其简化形式

Fig. 4 An inhomogeneous HTS tape and its simplified form

为了与实际状况接近,这些坏点的尺寸必须足够小,由此会带来十分密集的网格分布,使计算量急剧增加。为了避免这一问题,根据文献[10-11],在仿真分析中采用了一种比例缩放的方法,将样品本身的维度按照比例在某个方向上缩放,对应于该方向上的各种物理量也按照缩放比例进行调整,这样可以减少网格划分,简化计算。由此可得:

$$\sigma_2 = \sigma_1 \begin{bmatrix} n_x / (n_y n_z) & 0 & 0 \\ 0 & n_y / (n_x n_z) & 0 \\ 0 & 0 & n_z / (n_x n_y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$k_2 = k_1 \begin{bmatrix} (n_y n_z) / n_x & 0 & 0 \\ 0 & (n_x n_z) / n_y & 0 \\ 0 & 0 & (n_x n_y) / n_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C_2 = C_1 / (n_x n_y n_z) \quad (3)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 k_1 、 k_2 、 C_1 、 C_2 分别为比例调整前后的电导率、热导率和热容; n_x 、 n_y 、 n_z 分别为x、y、

z 方向上的比例调整因子。

将 10 cm 超导带材样品在长度方向(x 方向)上乘以比例因子 $n_x=0.1$, 则 σ 、 k 和 C 分别按比例因子进行调整。这样, 一根长 10 cm 的超导带材样品转换为长度方向上为 1 cm 的样品, 按 x 方向上 1 mm/格, 而宽度方向(y 方向)上 4/3 mm/格来划分, 则样品可划分为 3×10 格。并在带材表面所划分的网格上随机分布一定数量的坏点, 例如, 在 3×10 格上分布 10 个坏点, 如图 5 所示。如果在样品宽度方向上某一系列网格没有出现坏点, 则该列所对应的样品区域临界电流密度(J_c)为 $3 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$, 而如果该列出现 1、2 或 3 个坏点, 则该列所对应的样品区域 J_c 分别为 $2 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 、 $1 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 或 0, 这样图 5 所示的样品沿长度方向的临界电流密度分布为 2×10^8 、 2×10^8 、0、 3×10^8 、 1×10^8 、 2×10^8 、 3×10^8 、 2×10^8 、 2×10^8 和 $3 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 。而样品的平均临界电流密度为 $2 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$, I_c 为 80 A。

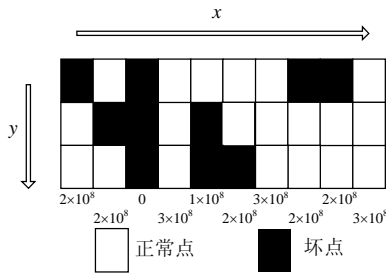


图 5 一随机分布坏点的超导带材样品

Fig. 5 A HTS tape sample with random bad point distribution

将该样品通以峰值为其临界电流的 2、3、5 和 6 倍的过电流, 并对其进行瞬态热传分析, 其一维热传导方程^[12-13]为

$$\rho_m C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (-k \nabla T) = EJ \quad (4)$$

式中: E 为电场强度; T 为温度; C 为热容; J 为电流密度; ρ_m 为材料密度。考虑液氮的沸腾传热, 则在分析中加入沸腾传热项:

$$\mathbf{n} \cdot (k \nabla T) = h(T - T_{op}) \quad (5)$$

式中: \mathbf{n} 为法向量; T_{op} 为工作温度; k 为热导率; h 为液氮的热系数。可以根据文献[14], 利用式(6)对图 6 中的曲线进行分段拟合:

$$h = \alpha \Delta T^\beta + \gamma \quad (6)$$

式中: α 、 β 和 γ 均为对图 6 中的曲线的拟合参数。图 6 中 T_{sat} 为工作环境温度。超导带材的电阻率 ρ 与 T 和 J 有关^[14]:

$$\rho = [(\rho_{pl1} + \rho_{pl2} + \rho_0) \rho_{sat}] / [(\rho_{pl1} + \rho_{pl2} + \rho_0) + \rho_{sat}] \quad (7)$$

$$\rho_{pl1} = \begin{cases} 0, & J < J_c(T) \\ E_0 [J / J_c(T) - 1]^{n_1} / J, & J > J_c(T) \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho_{pl2} = \begin{cases} 0, & J < \gamma J_c(T) \\ E_0 [J / J_c(T) - 2]^{n_2} / J, & J > \gamma J_c(T) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $J_c(T) = J_{c0} [(T_c - T) / (T_c - T_{op})]^{1.5}$, T_c 为临界温度^[15]; 非线性指数 n_1 和 n_2 , 第 1 和第 2 等效电阻率 ρ_{pl1} 、 ρ_{pl2} 以及 ρ_0 是文献[14]中针对 YBCO 非线性 $U-I$ 关系拟合出的参数, n_1 、 n_2 分别取值 2.8 和 30, ρ_0 是为避免除零错误而设置的参数, 取值为 $1 \times 10^{-14} \Omega \cdot \text{cm}$; ρ_{sat} 为稳定层电阻率; E_0 为临界电场强度。

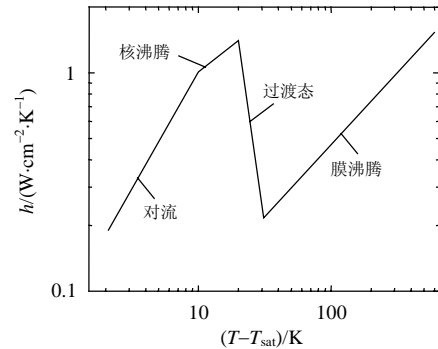


图 6 不同温差下的液氮热传输系数

Fig. 6 Heat transfer coefficient as a function of temperature difference ΔT

综合式(4)~(9), 热传导方程(4)可以得到数值解。图 7 为仿真得出的通以不同的过电流 1 个周波后, 2 种不同结构样品沿长度方向上的温度分布。

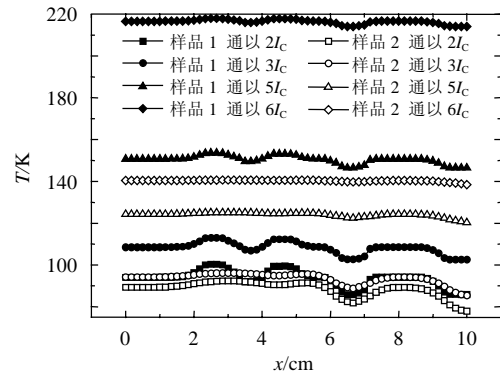


图 7 过电流冲击后样品沿长度方向上的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution along the length direction after passing over-currents

从图 7 的仿真结果可以看出, 当冲击电流峰值为 I_c 的 2~3 倍时, 沿样品长度温度分布差别很大, 温升的相对差异大于 1, 而当冲击电流峰值为 I_c 的 5~6 倍时, 沿样品长度温度分布差异明显减小, 这与图 2、3 中的实验数据相吻合, 反映出了相同的规律: 样品不均匀性对其瞬态过流特性产生影响作用, 表现在沿带材长度方向上的温度与电压的不均匀分布; 另外, 过电流越大, 则样品的不均匀性对

于其瞬态过流特性的影响作用越不明显,当过电流峰值超过带材临界电流的5~6倍以后时,样品的不均匀性对于其瞬态过流特性的影响作用可以不予考虑。

3 结论

实验研究了液氮浸泡条件下 YBCO 超导带材样品在不同幅值工频过电流冲击条件下的温度与电压特性。另外,利用临界电流密度二维网格划分以及超导带材几何比例缩减的方法,对具有不均匀临界电流密度分布的 YBCO 超导带材的过电流冲击特性进行了仿真计算分析,仿真结果与实验数据相吻合,得到了如下结论:

1) YBCO 超导带材的非均匀性对于其瞬态过流特性造成了一定的影响,导致了超导带材上的温升与电压分布的不均匀,临界电流密度小的区域温升大,且具有较高的电压降。

2) YBCO 超导带材的非均匀性对于其瞬态过流特性造成的影响作用随冲击过电流的增大而减小,当过电流峰值超过带材临界电流的5~6倍以后时,超导样品的非均匀性对于其瞬态过流特性的影响作用可以不予考虑。

3) 表面覆盖有稳定层的 YBCO 超导带材样品的非均匀性对于其瞬态过流特性造成的影响作用,比没有稳定层的 YBCO 超导带材样品小。

4) 通过二维坏点分布的非均匀带材模型来模拟 YBCO 超导带材不均匀性,能够取得与实际状况相符合的结果。

参考文献

- [1] Malozemoff A P, Fleshler S, Rupich M, et al. Progress in high temperature superconductor coated conductors and their applications [J]. Superconductor Science and Technology, 2008, 21(3): 1-7.
- [2] Yang J, Liu H Z, Qu F, et al. Continuous deposition of buffer layers for YBCO coated conductor using reactive magnetron sputtering [J]. Materials Science Forum, 2007, 546-549(4): 1871-1876.
- [3] Mbaruku A L, Trociewitz U P, Wang X, et al. Relationships between conductor damage, quenching and electromechanical behavior of YBCO coated conductors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(3): 3044-3049.
- [4] 古宏伟, 杨坚, 刘慧州, 等. 10 m 钇钡铜氧高温超导带材的研究 [J]. 科技导报, 2008, 26(1): 32-37.
Gu Hongwei, Yang Jian, Liu Huizhou, et al. Study on YBCO superconducting tape of 10 m in length[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(1): 32-37(in Chinese).
- [5] Sokolovsky V, Meerovich V, Gladstein M, et al. Behavior of an inhomogeneous HTS film in the regime of a resistive current

- limiter[J]. Physic C: Superconductivity, 2002, 372-376: 1649-1652.
- [6] Yota Ichiki, Hiroyuki Ohsaki. Influence of inhomogeneous superconducting properties of YBCO thin film on current limiting characteristics[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1811-1814.
- [7] 王银顺, 戴少涛, 肖立业, 等. YBCO 涂层导体工频下过电流失超特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 63-67.
Wang Yinshun, Dai Shaotao, Xiao Liye, et al. Quench behavior of YBCO coated-conductor with over-current at power frequency [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 63-67(in Chinese).
- [8] George A L, Paul N B. The normal zone in $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ coated-conductors[J]. Superconductor Science and Technology, 2007, 20(12): 1101-1107.
- [9] Meerovich V, Sokolovsky V, Gladstein M, et al. Quench development in thin inhomogeneous HTS film on sapphire substrate[J]. Physic C, 2002(366): 291-298.
- [10] Velichko A V, Coombs T A. High aspect ratio problem in simulation of a fault current limiter based on superconducting tapes [J]. Superconductor Science and Technology, 2006, 19(6): 629-634.
- [11] Duron J, Antognazza L, Decroux M, et al. 3-D finite element simulations of strip lines in a YBCO/Au fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1998-2001.
- [12] Roy F, Dutoit B, Grilli F, et al. Magneto-thermal of second-generation HTS for resistive fault current limiter design purposes[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18(1): 29-35.
- [13] Kim W S, Trillaud F, Ahn, M C, et al. Normal zone propagation in 2-Dimensional YBCO winding pack models[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18(2): 1249-1252.
- [14] Duron J, Grilli F, Antognazza L, et al. Finite element modeling of YBCO fault current limiter with temperature dependent parameters [J]. Superconductor Science and Technology, 2007, 20(3): 338-344.
- [15] Zhang G M, Knoll D J, Doan N, et al. Quench behavior of $YBa_2Cu_3O_7$ coated conductor with AC transport current[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(4): 3874-3879.



周义刚

收稿日期: 2009-09-06。

作者简介:

周义刚(1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为超导电力技术, zhouyg@mail.iee.ac.cn;

肖立业(1966—), 男, 博士生导师, 研究员, 主要从事电工理论与新技术研究及应用超导技术研究;

张国民(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高温超导体的交流损耗、稳定性分析等超导应用基础研究;

李晓航(1971—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事高温超导磁体稳定性、高温超导体交流损耗和交流特性研究;

张志丰(1967—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事输电网的高温超导限流器的研究和超导储能及其电网补偿和限流的研究。

(编辑 李婧妍)