

高温超导 Bi2212 圆线材的热失超行为研究^{*}

江朝飞[†], 周鑫鑫, 王天格

力学与材料学院, 河海大学, 南京 210098

收稿日期: 2019-12-15; 接收日期: 2020-03-11

【摘要】 为了及时的发现和保护超导体在失超过程中由于局部温度的突然升高而导致的材料的不可逆破坏行为, 对于超导材料的失超行为深入地研究和定量地分析是必要的. 本文结合电场方程和热平衡方程, 建立了能够描述失超行为的热-电耦合方程, 并构建了能够表征多芯 Bi2212 圆线材结构的三维模型, 同时基于有限单元法进行数值计算, 研究其失超行为. 通过对比实验与研究结果验证模型的准确性和有效性, 继而研究了正常区传播速度 (NZPV) 和最小失超能 (MQE) 与运输电流之间的关系, 并给出了热失超过程中电流重分布过程.

关键词: Bi2212, 热失超, 正常区传播速度, 最小失超能

PACS: 74. 25. Bt, 74. 25. F-, 74. 25. fg

DOI: 10. 13380/j. ltpl. 2020. 01. 004

The Quench Behavior of High-temperature Superconductor Bi2212 Round Wire

JIANG Zhaofei[†], ZHOU Xinxin, WANG Tiange

College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098

Received date: 2019-12-15; accepted date: 2020-03-11

【Abstract】 In order to protect high-field superconducting magnets during a quench with rapidly rising hot spot temperatures, it is important to have a quantitative understanding of quench behaviors of superconducting wires at high magnetic fields. In this article, we developed a three-dimensional numerical model of quench initiation and propagation in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x/\text{Ag}/\text{Ag}$ alloy (Bi2212) multifilamentary composite round wires with the current conservation and the heat conduction equation. The model was verified by comparing the numerical and experimental results. The results show that the normal zone propagation velocity linearly increases, and the minimal quench energy decrease with applied current. And then we presented the current redistribution process on quench.

Keywords: Bi2212, Quench, NZPV, MQE, current redistribution

PACS: 74. 25. Bt, 74. 25. F-, 74. 25. fg

DOI: 10. 13380/j. ltpl. 2020. 01. 004

Reference method: JIANG Zhaofei, ZHOU Xinxin, WANG Tiange, Low. Temp. Phys. Lett. **42**, 0032 (2020)

^{*} 中央高校基本科研业务费专项资金资助(批准号:2017B658X14)和江苏省研究生科研与实践创新计划项目(批准号:KYCX17_0491)资助的课题.

[†] zf.jiang@hhu.edu.cn

1 引言

高温超导 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x/\text{Ag}/\text{Ag-Mg}$ 合金复合圆线材在高磁场下 ($> 25 \text{ T}$) 仍然能够保持较高的临界电流密度^[1] (超过 10^3 A/mm^2), 力学上为各向同性的材料, 并且作为圆线材, 在机械处理时易于绕制可以制成不同结构的磁体, 这些优异的特性使其被视为建造高场磁体的重要选择. 然而, 目前对于高温超导体在磁体中的应用仍然面临的一个关键问题是失超的发现和保护. 因为相对于低温超导体来说, 高温超导材料失超过程中正常区的传播速度 (Normal Zone Propagation Velocity, NZPV) 较小, 最小失超能 (Minimal Quench Energy, MQE) 较大, 导致其失超现象难以及时的发现从而使得局部温度走骤升导致超导出现不可逆的破坏. 因此, 全面和深入的研究热失超行为对于发展有效的失超监测手段是有现实意义的.

目前对于 $\text{Bi}2212$ 圆线材的失超研究主要采用实验手段, 采用数值研究来定量的分析失超行为的研究到目前为止还是有所欠缺的. 近几十年来, Iwasa 等人^[2] 给出在热绝缘条件下的超导材料的热失超行为的理论分析方法; D. Arbelaez 等人^[3] 提出了简单的一维模型来研究 $\text{Bi}2212$ 圆线材的失超行为, 具有明显的局限性. 为了研究复杂多芯 $\text{Bi}2212$ 圆线材的失超行为, 高保真的数值模型应该包含几个重要的因素: 首先需要准确描述超导材料的热力学及电学参数随着温度变化的关系; 其次, 模型能够准确的描述热失超过程的电-热耦合行为; 最后, 尽可能的体现出 $\text{Bi}2212$ 圆线材的复杂的几何结构.

在本文中, 通过耦合电流守恒方程和热平衡方程, 我们建立了能够表征 $\text{Bi}2212$ 圆线材结构的三维数值模型, 并采取有限单元法进行求解. 通过对比实验和数值结果验证了模型的有效性和准确性, 并且研究了 NZPV 和 MQE 随施加电流的变化, 并进一步直观的给出了失超过程发展阶段的电流的分流变化, 从而对失超过程进行了更加深入的理解.

2 模拟模型

2.1 热-电耦合模型

超导体的热失超行为的数值研究是基于以温度 T 为变量的热平衡方程:

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (k(T) \nabla T) = Q(T) \quad (1)$$

上式中 ρ , $C(T)$ 和 $k(T)$ 分别表示材料的密度, 热容和热导率, (T) 表示该参数为温度相关的. $Q(T)$ 表示在热失超过程中材料内部的热源, 具体为失超过程中电流由 $\text{Bi}2212$ 超导芯分流到金属基底 Ag 中所产生的焦耳热, 可以写为:

$$Q(T) = J(E, T) \cdot E \quad (2)$$

式(2)中 J 和 E 分别表示电流密度和电场, 对于电学部分可以由电流守恒定律得到, 具体地:

$$-\nabla \cdot \sigma(E, T) \nabla V = 0 \quad (3)$$

$$J = \sigma(E, T) E \quad (4)$$

$$E = -\nabla V \quad (5)$$

这里 V 表示电势, 对于一般的金属材料, 其 J 和 E 的关系可以表示为:

$$J = \sigma(T) E \quad (6)$$

这里 $\sigma(T)$ 表示电导率, 但是对于超导材料, 电阻为 0 意味着电导率无限大, 数值研究中通常采用特殊的非线性的 E - J 本构关系描述, 即:

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c(T)} \right)^n \quad (7)$$

这里 E_c 表示临界电场, 为 $E_c = 1 \times 10^{-4} \text{ V/m}$, 指数 n 一般通过实验数据拟合得到, 虽然 n 值是与温度有关的函数, 考虑到 n 值在热失超温度变化区间变化不大, 对结果影响较小, 在本文中研究中都假设 $n = 18$. $J_c(T)$ 表示材料的临界电流密度与温度的关系, 具体地^[4]:

$$J_c(T) = \begin{cases} J_{co} \left(\frac{T_c - T}{T_c - T_o} \right)^\beta, & T < T_c \\ 0, & T \geq T_c \end{cases} \quad (8)$$

上式中 $J_{co} = 3.5 \times 10^9 \text{ A/m}^2$ 表示在环境温度为 $T_o = 4.2 \text{ K}$ 时候的临界电流密度, $T_c = 82 \text{ K}$ 表示临界温度, 指数 $\beta = 1.73$ 无明确的物理意义, 可通过拟合实验的临界电流密度与温度关系获得.

考虑到超导材料的 E - J 本构关系在转变温度区域 (超导态转变到正常态温区) 的强非线性, 为了避免在数值计算时的不收敛性, 将超导体看作是由超导态和正常态的两部分并联组成, 将其电导率改写为:

$$\sigma_{sc} = \frac{J_c(T)}{E_c} \left(\frac{E}{E_c} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 + \sigma_{nc} \quad (9)$$

式中第一项表示超导态的贡献, 由 E - J 关系得到,

第二项表示超导体正常态的电导率, $\sigma_{NC} = 1.0 \times 10^5 \text{ S/m}$

这样基于热传导方程,由电流守恒关系计算热失超过程的焦耳热就建立可以描述超导材料热失超过程发展的热-电耦合方程.为了求解上述的偏微分方程,还需要合适的材料参数,边界条件和初始条件.

2.2 材料参数

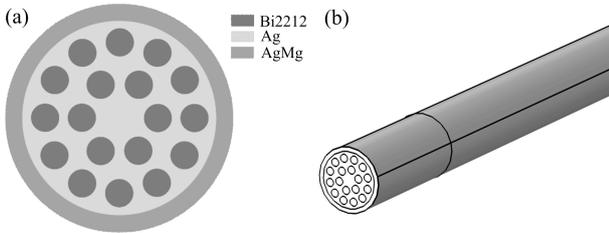
由于超导 Bi2212 复合圆线材中的组分,

表 1 Bi2212, Ag 和 AgMgAg 合金的热力学参数

参数	$\sigma_{Ag}(T)$	$k_{Ag}(T)$	$C_{Ag}(T)$	$k_{Bi2212}(T)$	$C_{Bi2212}(T)$	$\sigma_{AgMgAg}(T)$	$k_{AgMgAg}(T)$
值	文献 ^[5]	文献 ^[5]	文献 ^[6]	文献 ^[7]	文献 ^[8]	文献 ^[5]	文献 ^[5]

2.3 边界条件与初始条件

图 1 所示为本文建立的三维模型的几何结构,其中图 1(a)表示其横截面示意图,这里采用的是包含 37×18 排列形式的 Bi2212 圆线材,第一个数字表示每一束中超导芯的数量,第二个数代表束的数量.为了减少计算时间和空间,这里假设每一束中包含的 37 根超导芯组合成一个致密的圆柱体,不考虑每一束中间的复杂的排列方式,仅假设其包含 18 束超导芯,同时材料的组分 Ag/Bi2212/AgMg 合金保持 0.25/0.5/0.25 不变^[9],线材的半径为 0.6 mm,长度为 120 mm.此外,实验中将热源布置在线材的中心位置激发热失超,考虑到对称性,这里仅建立线材 1/2 长度(60 mm)模型,外部热源布置在模型的左侧 $0 \sim 5 \text{ mm}$ 长度处圆柱体的外表面,以输入热量激发失超.



(a)横截面示意图;(b)三维整体结构
图 1 数值计算模型的几何结构

电势和温度的探针以 10 mm 间距均匀布置在模型的外表面,用以监测热失超过程的电势和温度的变化规律.电流从右端流向左端,具体地,在右端截面 Bi2212 超导区域施加边界条件为:

$$-\sigma_{SC} \nabla V \cdot \vec{n} = J_e \quad (10)$$

式中 n 表示法向方向, J_e 表示施加的电流密度.模

Bi2212, Ag 和 AgMgAg 合金的电导率,热导率和热容随着温度升高出现较大的变化,特别是在其工作温度 4.2 K 和临界温度 82 K 这一温区内.因此,数值结果的准确性强烈的依赖于材料参数的数值表述.在表 1 详细的给出了本文数值计算时采用的与温度有关的热力学及电学的材料参数的来源,其中 AgMg 合金的热容假设与 Ag 是一样的.

型左端接地,边界条件为($V = 0$),其他外部边界条件都设置为电绝缘($\nabla V \cdot \vec{n} = 0$).

对于温度场的边界条件,在实验中 Bi2212 圆线材被浸润在 4.2 K 的液氮浴中,两端固定在铜块进行导流,因此样模型的右端假设为 4.2 K 的固定温度不变.考虑到线材表面将会与环境中液氮发生热交换的过程,因此模型的外表面热对流边界条件为:

$$k(T) \nabla T \cdot \vec{n} = h_{He}(T_{ext} - T) \quad (11)$$

这里 $T_{ext} = 4.2 \text{ K}$ 表示环境中液氮温度, T 表示接触面的实际温度. h_{He} 表示液氮的热对流系数,其是与温度相关的函数,具体可参考文献^[2].对于左侧外表面的热源区域,以功率 P 持续时间 t 向线材中输入热量 $Q = P \cdot t$ 用以升高局部温度使超导体脱离超导态.表 2 中详细的列出了模拟研究中采用的电学与热力学边界条件.

表 2 模型的电学与热学边界条件

(a)电学边界条件

边界	条件
左端	接地: $V = 0$
右端	电流流入: $-\sigma_{SC} \nabla V \cdot \vec{n} = J_e$
其他	电绝缘: $\nabla V \cdot \vec{n} = 0$

(b)热学边界条件

边界	条件
外侧	热对流: $k(T) \nabla T \cdot \vec{n} = h_{He}(T_{ext} - T)$
右端	固定温度: $T = 4.2 \text{ K}$
热源区域	热输入: $Q = P \cdot t$
其他	热绝缘: $\nabla T \cdot \vec{n} = 0$

3 结果与讨论

通过监测不同位置的电势和温度信号,图2给出了在温度4.2 K,运输电流 $I_t = 0.5I_c$ 时的电势和温度随着热失超发展过程(时间)的变化曲线,其

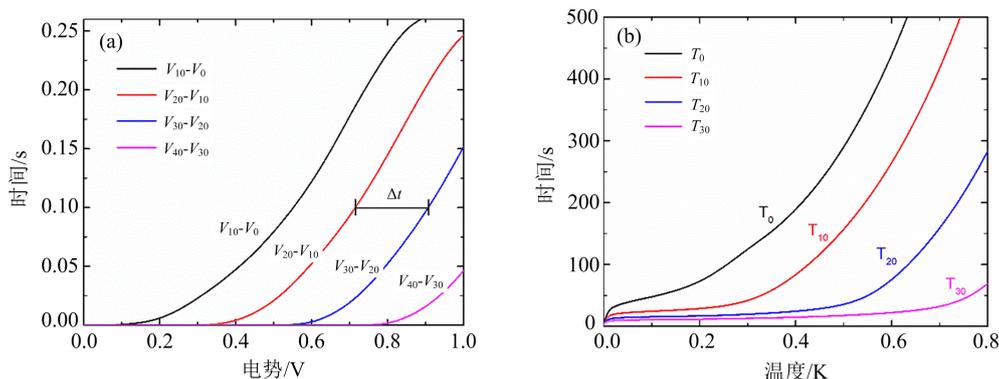


图2 运输电流 $I_t = 0.5I_c$ 时,热失超过程中(a)电势和(b)温度随着时间的变化.其中 T 和 V 的下标表示相应位置的温度和电势, Δt 表示图(a)中相邻段电势达到同一个参考电势的时间差

通过图2(a)中的电势变化曲线,可以获得热失超中正常区的传播速度(NZPV).具体地,选取一个固定的参考电势(如0.1 V),计算两相邻段电势差(如 V_{30-20} 和 V_{20-10})达到相同的参考电势所需的时间差 Δt ,那么热失超传播速度既可以表示为:

$$NZPV = L / \Delta t \quad (12)$$

式中 L 表示两相邻电势段中点之间的距离,这里为10 mm.

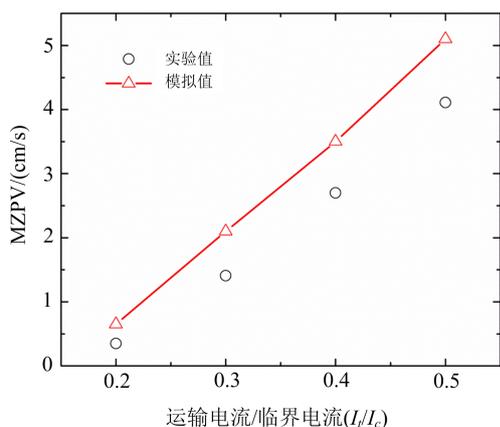


图3 对比热失超传播速度(NZPV,单位 cm/s)随着运输电流变化的数值模拟和实验^[9]结果, I_t/I_c 表示运输电流与临界电流的比值

通过不同的运输电流下的电势曲线可以计算得到相应的热失超传播速度,图3给出了热失超传播

中 $0 \sim 0.3$ s 为外部热源的热激励时间.温度 T 的下标表示监测的相应位置.电势 V 的下标表示两位置之间的电势差,例如 V_{30-20} 表示在图1中20 mm与30 mm 两处之间的电势差.

速度与 I_t/I_c 的数值模拟和实验结果.首先可以发现热失超传播速度随着运输电流的增加呈现出线性递增的关系,并且通过对比发现数值模拟结果的趋势能与相应的实验较好的吻合,这说明此模型对研究 Bi2212 圆线材的热失超行为是准确和有效的.值得指出的是数值模拟的热失超传播速度要略大于实验值,这可能是由于模拟的模型是一个各向同性的,均质的和完全致密的理想状态模型,而实际的 Bi2212 圆线材样品内部含有大量的孔洞,气泡,杂质和互相连接相邻超导芯的桥接^[10],这些都会对热传导产生负面的影响从而减缓热失超的传播速度.

当外部热源向超导体输入热量时,超导体可能出现两种情况:如图4(a)所示,在 $I_t = 0.5I_c$ 时,在当外部热源为0.6 J时,停止加热后,超导体的温度迅速下降恢复到正常状态,此时这个失超过程是可恢复的.这是因为虽然局部温度升高导致局部超导体脱离超导态,但是由于超导体可以与外部进行热交换并且超导体本身也可以吸收部分的热量,在外部热源停止后,材料内部产生的焦耳热不足以使温度继续升高.但当外部热源为0.675 J时,停止加热后超导体温度进一步迅速升高,失超区域逐渐扩大,此失超过程是不可恢复的.将能够激发失超的最小能量被称之为最小失超能(MQE).进一步地,图4(b)给出了最小失超能随着载流密度的变化,可以发现随着载流的增加,最小失超能也逐渐减小.值得

一提的是如图 4(b)中的插图所示,在仅 y 轴为对数坐标的坐标系内,最小失超能与随着运输电流增加

表现出线性的递减关系.

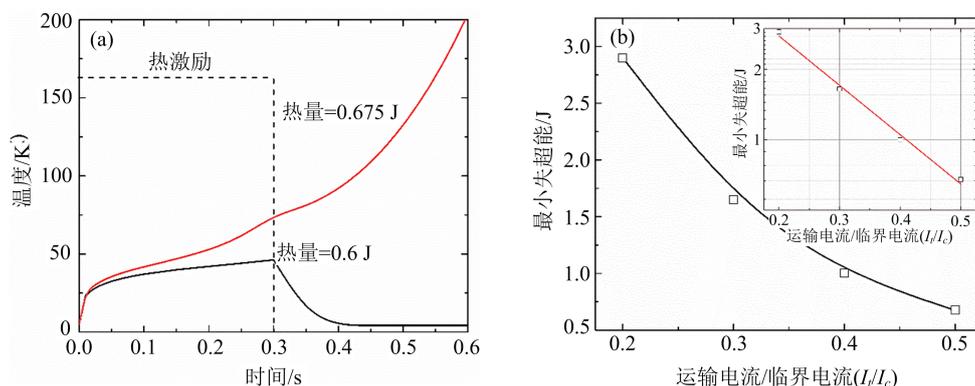


图 4 (a)可恢复和不可恢复的失超过程中温度随时间的变化,(b)最小失超能随着运输电流的变化

进一步地,将分析失超过程中的电流变化.失超的原因是由于超导体脱离超导态导致载流能力减弱,电流流入相邻的金属基底产生焦耳热使得温度升高.因此分析失超过程中的电流的分流对理解该过程是有帮助的,如图 5 所示为在 10 mm 处, Bi2212 复合圆线中不同组分在失超过程中载流的变化,为方便分析,其大致可以分为 3 个阶段:

温度,超导材料处于正常的载流状态, Bi2212 超导芯承载所有的电流;

阶段 B:失超阶段,温度进一步升高导致超导体的载流能力逐渐降低, Bi2212 中的电流逐渐分流到相邻的金属基底中;

阶段 C:完全失超之后,当温度超过材料的临界温度后,超导体变为正常态,电流全部流向金属基底和金属基底和金属鞘中.当前位置完全失超后,热量传播到下一个区域,失超区域进一步扩展.

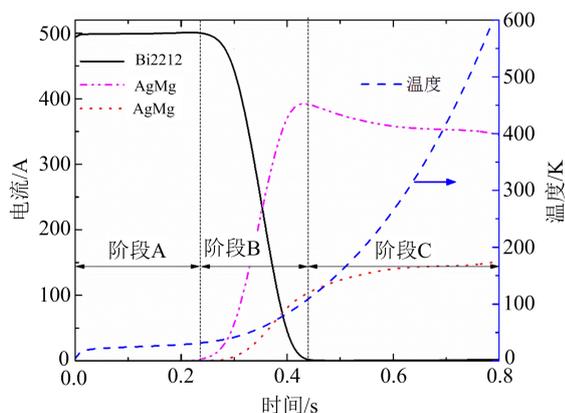


图 5 热失超过程中在 10 mm 处不同区域电流随时间的变化

阶段 A:未失超阶段,此时超导体温度小于分流

4 结 论

本文基于电流守恒方程和热平衡方程建立了能够描述热失超行为的电-热耦合模型,并采用有限元方式进行求解.首先通过对比正常区传播速度的实验值和模拟值验证了模型的正确性,并发现正常区传播速度与载流密度呈现处线性的关系.进一步的给出了最小失超能与载流之间的关系,发现在仅 y 轴坐标系下,最小失超能随着载流增加线性的递减.进一步地,给出了失超过程中的电流的分流变化.

参 考 文 献

- [1] LARBALESTIER D C, JIANG J, TROCIWITZ U A, et al. Isotropic round-wire multifilament cuprate superconductor for generation of magnetic fields above 30 T [J]. *Nature materials*, 2014, 13(4): 375.
- [2] IWASA Y. Case studies in superconducting magnets: design and operational issues [M]. Springer Science & Business Media, 2009.
- [3] ARBELAEZ D, PRESTEMON S, DIETDERICH D, et al. Numerical Investigation of the Quench Behavior of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ Wire [J]. *IEEE transactions on applied su-*

- perconductivity*, 2010, **21**(3): 2787-90.
- [4] CHAN W-K, MASSON P J, LUONGO C A, et al. Influence of Inter-Layer Contact Resistances on Quench Propagation in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ Coated Conductors [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, **19**(3): 2490-5.
- [5] LI P, YE L, JIANG J, et al. RRR and thermal conductivity of Ag and Ag-0.2 wt. % Mg alloy in Ag/Bi-2212 wires; proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, F, 2015 [C]. IOP Publishing.
- [6] SMITH D R, FICKETT F. Low-temperature properties of silver [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1995, **100**(2): 119.
- [7] ANDO Y, TAKEYA J, ABE Y, et al. Temperature- and magnetic-field-dependent thermal conductivity of pure and Zn-doped $\text{Bi}_2\text{SrCaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ single crystals [J]. *Physical Review B*, 2000, **62**(1): 626.
- [8] ZHENG D, YANG H, CHEN Z, et al. Study on the specific heat of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ single crystal [J]. *Modern Physics Letters B*, 1989, **3**(02): 163-6.
- [9] SHEN T, YE L, TURRIONI D, et al. High-field quench behavior and dependence of hot spot temperature on quench detection voltage threshold in a $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ coil [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2015, **28**(7): 075014.
- [10] SHEN T, JIANG J, KAMETANI F, et al. Filament to filament bridging and its influence on developing high critical current density in multifilamentary $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ round wires [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2009, **23**(2): 025009.