

孔洞对 Bi-2212 超导圆线电磁特性及交流损耗影响研究

汪旭¹ 罗俊鑫¹ 张梁浩² 张红² (通讯作者)

1 西南交通大学物理科学与技术学院, 四川成都, 610031;

2 西南交通大学电气工程学院, 四川成都, 611731;

摘要: 在 Bi-2212 超导圆线的制备过程中, 热处理工艺引发的内部气体释放往往会导致芯丝内出现不同程度的孔洞缺陷。这些孔洞不仅缩减了超导相的有效通流截面, 更通过改变局部电磁场分布对线材的交流损耗特性产生复杂影响。本文基于三维有限元方法, 采用 Kim 模型和幂律模型对 Bi-2212 超导圆线的交流损耗开展数值仿真研究。重点探究了孔洞尺度效应及径向分布不均匀性对传输损耗的影响机制。通过定量分析电流在超导域与银基质间的转移逻辑, 旨在从微观缺陷视角揭示 Bi-2212 超导圆线在交变电流环境下的电磁特性及能量耗散演变规律, 为优化高压热处理工艺以抑制损耗提供理论支撑。

关键词: Bi-2212 超导圆线; 孔洞; 传输损耗; 电磁特性

DOI: 10.69979/3060-8767.26.05.089

绪论

Bi-2212 超导圆线因其高载流能力而具有广泛的应用前景。然而, Bi-2212 圆线在经历热处理过程之后会形成大量孔洞, 先前研究表明, 孔洞是制约其载流性能的关键因素^[1]。Bi-2212 超导圆线在交变电磁场中会产生交流损耗, 会加大制冷系统的负载, 影响磁体的稳定运行。因此, 从 Bi-2212 的孔洞微观结构出发, 探究其与交流损耗之间的关系, 从而制备出低交流损耗的 Bi-2212 超导圆线具有重要现实意义。Xu 等人^[2]基于三维 H 方法建立了含椭圆孔洞与直径波动的数值模型, 用以探究局部缺陷与几何非均匀性对 Bi-2212 圆线交流损耗的影响。目前, 关于孔洞对交流损耗影响的研究较少, 导致对含孔洞的 Bi-2212 圆线在电磁特性与交流损耗方面的认识尚不充分。因此, 有必要针对该问题开展进一步深入研究。

1 仿真方法

H 法能够精确模拟 4.2K 下 Bi-2212 超导圆线的电磁特性与交流损耗, 该模型基于麦克斯韦方程组:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J} \quad (4)$$

E 为电场强度, J 为电流密度, μ 为磁导率(μ_0)。结合上述方程, 可导出以 H 为自变量的控制方程:

$$\nabla \times \rho(\nabla \times \mathbf{H}) + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

上述公式可以得到三维超导结构的电磁场, 同时求得以下方程:

$$\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} + \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = 0 \quad (6-a)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} - \frac{\partial E_z}{\partial x} + \frac{\partial E_x}{\partial z} = 0 \quad (6-b)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} + \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = 0 \quad (6-c)$$

E-J 幂律关系用来表征超导电磁特性:

$$\rho = \frac{E_c}{J_c(\mathbf{B})} \left| \frac{\mathbf{J}}{J_c(\mathbf{B})} \right|^{n-1} \quad (7)$$

其中

$$n=14, E_c=1 \mu \text{ V/cm}, \mathbf{B} = \sqrt{|B_x|^2 + |B_y|^2 + |B_z|^2}$$

$$J_c(\mathbf{B}) = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \frac{|\mathbf{B}|}{B_0}\right)^\alpha} \quad (8)$$

$$J_{c0} = 5 \times 10^9 \text{ A/m}^2, B_0 = 0.03 \text{ T}, \alpha = 0.245^{[3]}.$$

沿长度方向施加电流:

$$I_{ext}(t) = I_t \sin(2\pi ft) = \int_s J_z(t) ds \quad (9)$$

I_t 为电流幅值, f 为频率, s 为横截面

求解域在一个周期 T 内的损耗可通过域积分得到

$$Q_t = 2 \int_{\frac{T}{2}}^T \int (E_x J_x + E_y J_y + E_z J_z) dV dt \quad (10)$$

其中, Q_i 为总区域、超导或银基质的交流损耗

2 模型构建

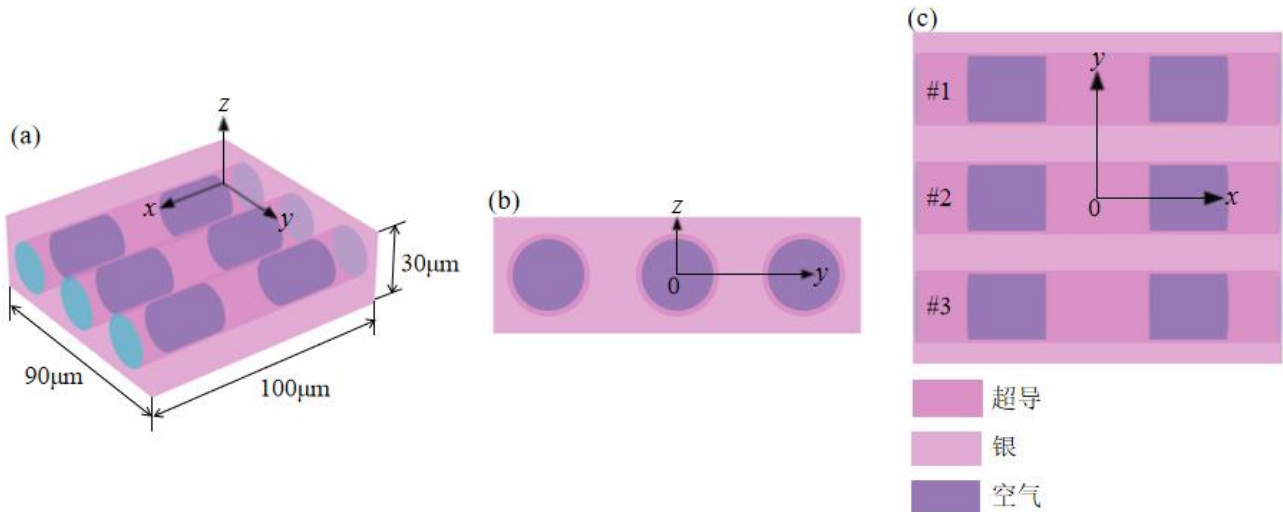


图 2.1 带有孔洞的三芯 Bi-2212 复合线的模型示意图(a)三维视图; (b)y-z 平面视图; (c)x-y 平面视图

为减小仿真计算时间,同时体现多芯复合线的基本结构,捕获孔洞结构的电磁行为,本研究仅对三根芯丝及其附近银域做数值计算。热处理之后的 Bi-2212 芯丝内会形成孔洞,孔洞的形状、尺寸大小不一。研究数据显示,此类孔洞的体积分数可占据超导相理论密度的 30%,相当于显著降低了有效的超导截面积。当孔洞的尺寸较小时,其形状接近球体;当多个孔洞熔融形成大孔洞使其直径与超导芯丝直径相当时,孔洞会沿轴向变长,其外形近似圆柱体^[4]。为系统探究多芯超导丝内孔洞缺陷对交流损耗的影响,图 2.1 展示了以圆柱形孔洞为例的三芯 Bi-2212 复合线三维模型及其在 y-z 和 x-y 平面上的二维视图,芯丝的半径为 10 μm,分析域长度为 100 μm。孔洞与芯丝同轴。模型设定为关于 y-z 平面对称,三根芯丝均被理想化为圆柱体,将三根芯丝分别命名为#1、#2、#3 芯丝。需要说明的是,图 2.1 仅作为模型构建的示意,仿真中孔洞的形貌(如球形、圆柱形)、数量及尺寸将依据具体的尺度效应研究需求进行动态参数化设置,且沿轴向保持等间距分布。

3 数值结果与讨论

3.1 孔洞尺寸对 Bi-2212 超导圆线传输损耗的影响

孔洞尺寸是表征 Bi-2212 芯丝微观结构的重要参数,其形态随尺寸变化:从小尺寸的近球形(直径小于芯丝直径)到大尺寸沿芯丝方向拉长的圆柱形(长度可达数十微米)。不同尺寸的孔洞对局域电磁场的扰动程度不同,对磁滞损耗和耦合损耗的贡献存在差异。为此,本文定量分析了从球形到拉长圆柱形孔洞的尺寸效应。

为探究孔洞尺寸对传输损耗的影响,在保持总孔隙率不变的条件下,通过改变孔洞数量来调整单个孔洞尺寸,即将大孔洞分解为多个小孔洞。考虑计算效率与特征尺寸的匹配性,本研究采用变长度计算域策略:当最大孔洞长度为 72.77 μm 时,为保持 30%孔隙率,分析域长度设为 200 μm;当最大孔洞长度减至 36.39 μm 时,分析域缩减至 100 μm。此外,为考察低孔隙率下的电磁响应,还构建了孔隙率 10%、分析域长度 100 μm 的对比模型。

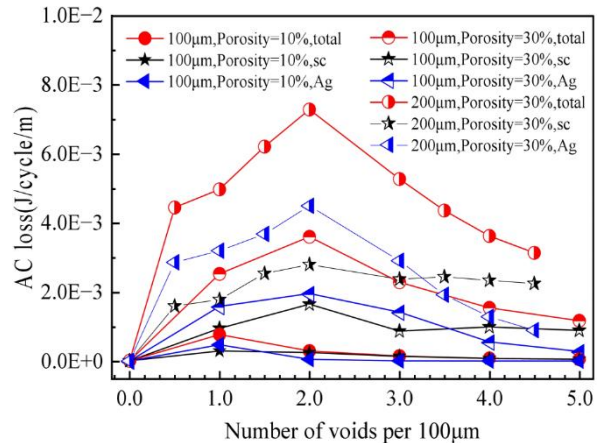


图 3.1 有孔洞与无孔洞的三芯 Bi-2212 复合线中,传输损耗随孔洞个数的变化

图 3.1 展示了孔隙率为 10%、30%与无孔洞条件下,长度为 200 μm、100 μm 的三芯 Bi-2212 复合线处于频率 $f=50\text{Hz}$, $0.9I_c$ 的传输电流幅值下,传输损耗随每 100 μm 内孔洞数量的变化趋势。在孔隙率固定的前提下,孔洞数量与单体尺寸互为约束,为便于直观呈现,本研究以孔洞数量作为自变量进行绘图。以“100 μ

m, Porosity=10%, total”为例, 其含义为分析域为 100 μm , 孔隙率为 10% 所对应的总损耗。由图 3.1 中的 “100 μm , Porosity=30%”、“200 μm , Porosity=30%” 数据可见, 无孔洞状态下的芯丝传输损耗最低。当孔洞的横向最大尺寸固定时, 传输损耗随轴向尺寸的减小而逐渐增大, 它们都在孔洞长度最短的时候具有最大损耗; 然而, 当孔洞尺寸进一步缩减并趋于球形化后, 随着孔洞半径的继续减小, 损耗值转而呈现下降趋势, 它们都在孔洞个数最大时具有最小损耗值。“100 μm , Porosity=10%” 中数据可见, 所有孔洞形状都为球形, 损耗值随着孔洞半径的减小而单调递减。

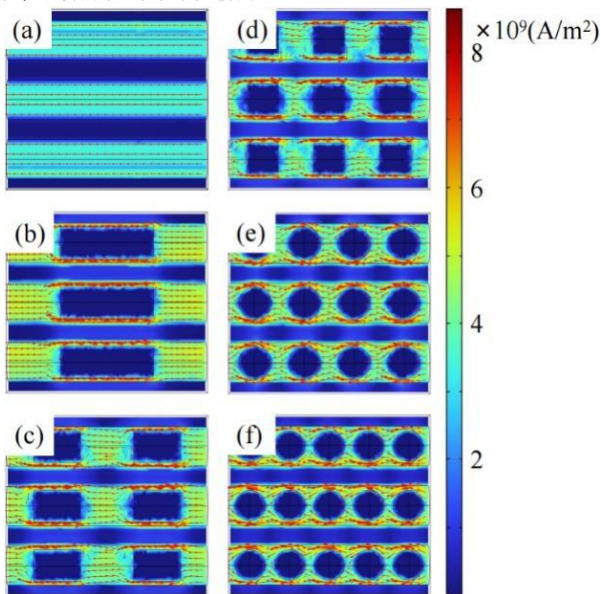


图 3.2 $t=3/4$ 周期时刻, x-y 平面的电流密度分布(a)-(f)孔洞个数为 0、1、2、3、4、5

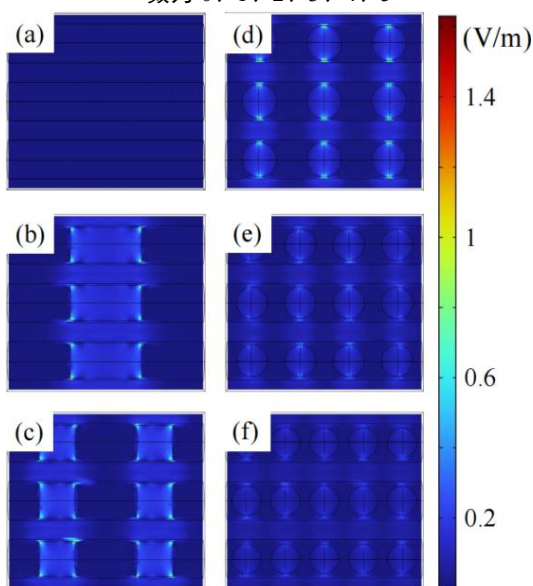


图 3.3 $t=3/4$ 周期时刻, x-y 平面的电场强度分布(a)-(f)的孔洞个数为 0、1、2、3、4、5

图 3.2 和图 3.3 给出了 $t=3/4$ 周期时刻, 孔隙率为 30%, 分析域对应长度为 100 μm 时, 不同形状和尺寸的孔洞的三芯 Bi-2212 复合线的电流密度分布和电场强度分布。从图 3.2(b)、(c)可以看出, 当孔洞径向最大尺寸相同时, 交流损耗的变化主要与孔洞附近狭窄导电通道中的局部电流集中有关。两种孔洞模型的最大电流密度差异不明显, 并且单个圆柱形孔洞与多个圆柱形孔洞在轴向方向上具有等效尺寸。然而, 当仅存在单个孔洞时, 电流只需在孔洞附近发生一次绕行; 而在多孔结构中, 孔洞分布更加密集, 电流在传输过程中需要多次改变流动方向以通过小孔洞之间的间隙, 从而形成类似“S形”的绕行路径, 这种频繁的绕行使电流的有效传输路径长度增加。由于交流损耗与电流路径的弯曲程度及局部电流密度密切相关, 因此, 在孔洞径向尺寸相同的条件下, 孔洞数量的增加会导致电流传输路径变长, 从而导致交流损耗进一步增加。如图 3.2(d)、(f)及图 3.3(d)、(f)所示, 当孔洞形貌呈球形时, 随着孔径尺寸的进一步减小, 孔洞邻域内的高电流密度分布形态基本保持一致, 未见显著差异。然而, 孔洞周围的高电场强度区域发生了明显收缩与数值下降。由于交流损耗与电场分布直接相关, 局部电场的弱化有效抑制了能量耗散, 使得总损耗随球形孔洞尺寸的减小而呈现出递减的趋势。预计随着孔洞尺寸的进一步减小, 局部高电流密度和高电场强度会被进一步弱化, 从而导致孔洞引起的附加交流损耗逐步降低。

3.2 孔洞径向不均匀分布对 Bi-2212 圆线传输损耗的影响

热处理后的 Bi-2212 超导圆线中, 孔洞在芯丝横截面上可能呈现出不均匀分布的特征。例如, 中心束芯丝中往往存在数量更多、尺寸更大的气泡, 而外层束芯丝中的气泡数量相对较少且尺寸较小。虽然经过旋锻工艺处理后的圆线致密度能够得到一定程度的提高, 使孔洞在径向方向上的分布趋于均匀^[5], 但孔洞径向分布不均匀性对交流损耗的影响仍缺乏系统研究。为深入研究孔洞径向分布不均匀性对交流损耗的影响, 本小节将孔洞在横截面上的非均匀分布简化为一种典型极端情形: 即在三芯模型中, 仅在特定芯丝内设置孔洞, 而其余芯丝保持无缺陷状态。通过这种差异化的孔洞配置, 可以极大地放大因空间分布不均引发的电磁扰动。因为#1、#3 芯丝具有对称性, 孔洞仅在#1、#2 芯丝中存在, 孔

洞的形状为圆柱形,其半径为 $5\ \mu\text{m}$,沿轴向的宽度为 $20\ \mu\text{m}$,每 $125\ \mu\text{m}$ 内存在一个孔洞。

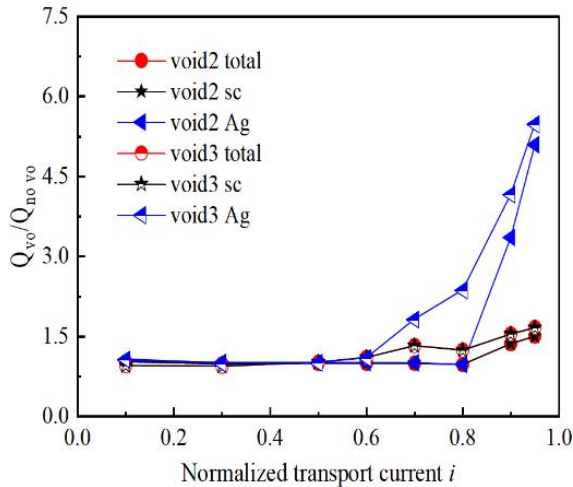


图 3.4 有无孔洞三芯 Bi-2212 复合线中, 归一化损耗随 i 的变化关系

图 3.4 展示了在传输频率 $f=50\ \text{Hz}$ 的交变电流条件下, 三芯 Bi-2212 复合线在无孔洞及含非均匀孔洞两种模型下的归一化交流损耗特性。图中纵坐标为归一化损耗 $Q_{vo}/Q_{no\ vo}$, void2 与 void3 分别表示孔洞位于 #2 与 #3 超导芯丝内的情形, $i=I_t/I_c$, no vo 则对应不存在任何孔洞结构的理想导体。

从图 3.4 中可以看出, 银域的归一化损耗与桥接结构对银域损耗的影响类似, 其归一化损耗随电流出现明显的增长趋势, 远大于超导域的增势。对于孔洞存在于 #3 芯丝的模式, 在低交变传输电流幅值区间 ($i<0.6$) 内, 存在孔洞与不存在孔洞的三芯 Bi-2212 复合线之间的交流损耗差异较小。当归一化传输电流交变传输电流幅值增大至 $i>0.6$ 时, 损耗差异开始放大, 在电流值接近临界电流时差异达到最大。当孔洞存在于 #2 芯丝时, 归一化传输损耗 $i>0.8$ 时, 损耗差异才逐渐变大。且孔洞在 #3 芯丝时, 归一化损耗都大于孔洞在 #2 芯丝的情况, 即孔洞存在于内层芯丝比外层芯丝更好。

为分析图 3.4 所示的传输损耗差异行为, 图 3.5 展示了 $t=3/4$ 周期时刻, 不同归一化交变传输电流幅值 ($i=0.3, 0.5, 0.7, 0.95$) 下, 孔洞在 #3 芯丝和无孔洞的三芯 Bi-2212 复合线两种模型, $x-y$ 平面的电流密度分布。如图 3.5(a)、(e)所示, 在低电流时 (例如 $i=0.3$), 电流优先分布在芯丝外侧, 这时电流还未渗透到孔洞, 因此, 归一化损耗在 1 左右, 有孔洞时的损耗与无孔洞时的损耗并无明显差异。随着电流增大至 $i=0.7$ 时, #3 芯丝已经全区域分布了电流, 此时孔洞影响了整体电流密度分

布。如图 3.5(c)、(g)对比看出, 孔洞的存在使其芯丝附近的超导域载流面积缩减, 无孔洞的部分其电流密度还有所下降, 电流经过孔洞附近时出现局部热点。同时 #3 芯丝的存在还使另外两根无孔洞芯丝的电流密度变大, 从图 3.5(d)、(h)可以看出, 这种电流密度分布差异进一步扩大。所以随着交变传输电流幅值的增大, 孔洞的存在导致孔洞附近局部热点以及无孔洞芯丝的电流密度升高是造成损耗增大的原因。当孔洞位于 #2 芯丝时, 归一化交变传输电流幅值值需要达到较高水平 ($i>0.8$), 损耗才开始显著上升。其主要原因在于, 只有当电流分布扩展到孔洞附近区域时, 孔洞才会对电流分布产生实质性影响。

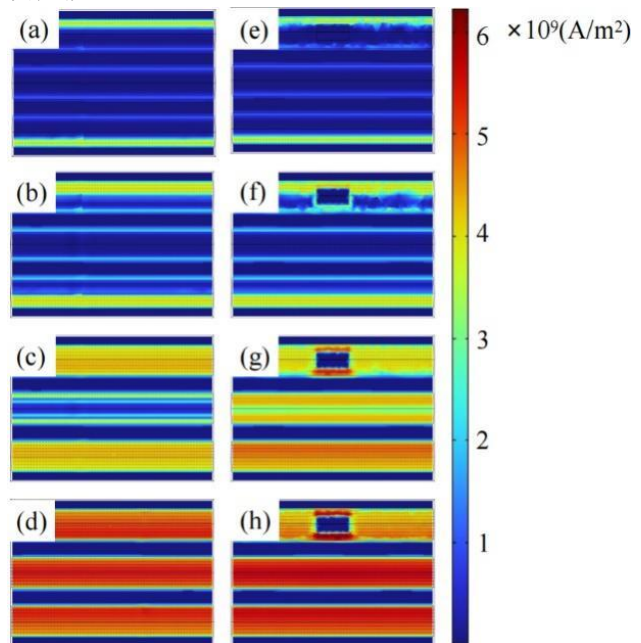


图 3.5 $t=3/4$ 周期时刻, $x-y$ 平面的电流密度分布(a)-(d)、(e)-(h) 分别表示无孔洞与有孔洞 (#3) 复合线在 $i=0.3, 0.5, 0.7, 0.95$ 条件下的电流密度分布

4 总结

本论文以 Bi-2212 超导圆线研究对象, 用有限元仿真方法, 系统研究了热处理过程中形成的孔洞缺陷对超导圆线传输损耗的影响机制, 发现:

孔洞尺寸与形貌对损耗表现出明显的尺度效应。在总孔隙率固定的前提下, 当孔洞径向尺寸接近芯丝直径时, 分散的小尺寸孔洞会引发更频繁的“S形”电流绕行, 增加有效路径长度, 导致交流损耗随孔洞数量增加 (尺寸减小) 而增大; 然而, 当孔洞进一步缩减至微小球形尺度时, 孔洞邻域的高电场强度区域显著收缩, 使得总损耗转而随尺寸减小而降低。

孔洞的径向分布不均匀性表现出强烈的电流依赖性特征。在低交变传输电流幅值下,电流优先分布于芯丝外层,内层芯丝的孔洞对损耗影响极小;随着电流增大至穿透孔洞区域,损耗急剧升高。孔洞的存在导致的局部热点以及电流重新分布是造成损耗增长的两个原因。

参考文献

- [1]Jiang J, Miao H, Huang Y, et al. Reduction of gas bubbles and improved critical current density in Bi-2212 round wire by swaging[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 6400206.
- [2]Xu M, Chen W, Shen B, et al. Modeling of transport loss in Bi-2212 round wires: effects of local defects and non-uniformity[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 6400703.
- [3]Chen W, Yang X, Shen B, et al. AC loss of Bi-2212 round wire at wide frequency ranges up to 500 kHz[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(1): 6400110.
- [4]Zhou X, Xue F, Gou X, et al. Statistical study of the void structure of Bi2212 multifilamentary superconducting wires and its effect on the critical current density[J]. Engineering Computations, 2019, 36(8): 2714-2725.
- [5]Kametani F, Lee E G, Shen T, et al. An explanation of how split melt processing can enhance the critical current density of Bi2212 round wires based on examination of bubble size and density formed in the melt[J]. Superconductor Science and Technology, 2014, 27(5): 055004.