

引用格式: 李力, 刘学谦, 刘静, 等. 1 kA 级高温超导电流引线的结构优化设计及制备研究[J]. 中国材料进展, 2026, 45(4): 351-357.

LI L, LIU X Q, LIU J, *et al.* Structural Optimization Design and Fabrication of 1 kA-Class High-Temperature Superconducting Current Leads[J]. Materials China, 2026, 45(4): 351-357.

1 kA 级高温超导电流引线的结构优化设计及制备研究

李力^{1,2}, 刘学谦³, 刘静³, 杨明臻^{1,2}, 冯建情³, 张胜楠³, 金利华³

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510062)

(2. 南方电网公司电力超导联合实验室, 广东 广州 510080)

(3. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 为解决中小型 1 kA 级高温超导电流引线在高通流条件下自场衰减严重、利用率低的问题, 在理论分析、数值仿真及实验验证基础上, 对传统堆叠密排式结构进行了结构优化设计。首先, 采用一维解析模型和 COMSOL 有限元仿真对换热器段的热传导性能进行系统分析, 确定最优长度截面比; 其次, 提出 10×2 阵列式分散排布结构设计, 基于 FR-4 材料构建外支撑骨架, 完成高温超导段样品制备; 最后, 在 77 K 液氮环境下对优化结构和传统结构进行通流测试, 结果表明优化结构的自激发场强度较传统堆叠密排式降低 60.8%, 对应临界电流保持率由 55% 提升至 80% (其中“临界电流保持率”指在运行磁场下超导带材保持的临界电流与无磁场下临界电流的比值); 同时, 该设计兼顾引线的紧凑体积(Φ44 mm×362 mm)、高效散热及易维护性, 展现出优异的电输运稳定性和高可靠性, 具有广泛应用前景。

关键词: 高温超导电流引线; 结构优化; 阵列式分散排布; 自场衰减

中图分类号: TM26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2026)04-0351-07

Structural Optimization Design and Fabrication of 1 kA-Class High-Temperature Superconducting Current Leads

LI Li^{1,2}, LIU Xueqian³, LIU Jing³, YANG Mingzhen^{1,2},
FENG Jianqing³, ZHANG Shengnan³, JIN Lihua³

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510062, China)

(2. Joint Laboratory on Power Superconducting Technology of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

(3. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: To address the severe self-field degradation and low utilization of compact 1 kA-class high-temperature superconducting current leads under high current-carrying conditions, this paper presents an optimized structural design of the conventional densely stacked configuration, based on theoretical analysis, numerical simulation and experimental validation. First, a one-dimensional analytical model and COMSOL finite-element simulation were used to systematically analyze the thermal performance of the heat-exchanger section and determine the optimal length-to-cross-section ratio. Second, a 10×2 distributed array layout was proposed, and the heat-exchanger section sample was fabricated on an FR-4 support skeleton. Finally, current-carrying tests were carried out at 77 K in a liquid-nitrogen environment for both the optimized and conventional structures. The results show that the optimized structural design reduces the self-induced field strength by 60.8% compared with the traditional densely stacked configuration, raising the critical current retention rate from 55% to 80% (where “critical current retention rate” is defined as the ratio of the critical current under the operating magnetic field to that under zero field). Moreover, the design maintains a compact footprint (Φ44 mm×362 mm), efficient heat dissipation and ease of maintenance, demonstrating excellent electrical transport stability and high reliability with broad application prospects.

收稿日期: 2024-09-26 修回日期: 2025-04-22

基金项目: 南方电网公司电力超导联合实验室开放基金资助项目
(GDDKY2022KF04)

第一作者: 李力, 男, 1988 年生, 高级工程师

通讯作者: 刘学谦, 男, 1992 年生, 副研究员,

Email: xueqianliu66@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202409028

Key words: high-temperature superconducting current leads; structural optimization; distributed array layout; self-field degradation

1 前言

电流引线是超导电力设备中至关重要的组件,作为电源馈线连接室温端电源以及低温端超导电力设备。传统的铜导体电流引线由焦耳热及传导引起的热损耗较大,在大电流输运下尤其明显。而超导电流引线因其在低温环境下热损耗低、无焦耳热等优势,逐渐成为替代传统铜导体的理想选择^[1]。近年来,以 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2223) 以及 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (REBCO) 为代表的高温超导材料制备的二元电流引线成功应用于聚变磁约束^[2, 3]、电网输电^[4-6]、超导磁储能^[7]、超导波荡器^[8] 等大型超导电力装置的馈线系统中。在材料与结构协同优化方面,研究者已从超导线形变协调控制及高温超导体高压制备等角度开展了系统研究,为超导带材提升性能及工程化应用奠定了基础^[9, 10]。

在实际应用中,电流引线的设计不仅需要材料的超导性能,还要综合考虑传热效率、自场衰减、瞬态大电流冲击以及失超过热等综合服务情况下的环境因素^[11, 12]。传热问题直接影响到引线的稳定性和可靠性,而自激发场的存在则会导致超导临界电流的衰退,从而影响引线的整体通流能力。失超则会导致局部过热,使得相邻区域或相邻带材升温甚至烧毁。因此,优化电流引线的结构设计以减小漏热、自场衰减、失超烧毁等的影响,成为实现高效稳定超导电流引线的关键。

高温超导电流引线按结构可分为筒式与堆叠密排式^[13]。筒式电流引线采用多组堆叠环列排布在分流器骨架上。其环列排布可抵消堆叠性能随磁场方向各向异性,并且堆叠之间的较大间隔可以减轻大电流带来的自场衰减,但骨架热沉的传导损耗相对较高。筒式电流引线往往体积较大,多应用于大型电力装置中,其服役电流也往往较大^[14-16],而小型超导电力装置由于制冷机尺寸限制往往无法使用。堆叠密排式电流引线体积小、成本低,但在大电流工况下容易产生带材间自场叠加,导致严重的性能衰退,且其性能随磁场方向呈现高度各向异性,在服役时超导带材的性能利用率还有很大优化空间。

本研究通过理论分析、数值仿真和实验验证相结合的方式,对 1 kA 级中小型电流引线进行传热分析、结构优化与性能分析,通过将堆叠密排式改为阵列式分散排布,并引入绝缘绝热外骨架作为支撑结构,对电流引线结构进行了优化设计。采用西北有色金属研究院自主研发的 Bi-2223 高温超导带材制备了上述新结构电流引线,并完成通流测试。在此基础上,结合 COMSOL 有限元仿真模拟对堆叠密排及阵列分散 2 种结构电流引线在

不同通流情况下自激发场在空间的叠加分布进行了计算,并结合 Bi-2223 超导带材载流能力随磁场的变化关系,系统分析了不同工况下 Bi-2223 超导带材的性能衰减情况。

2 高温超导电流引线设计

对于二元电流引线中的换热器 (heat-exchanger, HEX) 段,采用一维模型进行电流引线的传热分析^[17-19],分别采用解析计算及 COMSOL 软件进行仿真计算。其中传热解析分析如式(1)所示:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda(T) S \frac{dT(x)}{dx} \right) + I^2 \frac{\rho(T)}{S} = 0 \quad (1)$$

式中, $\lambda(T)$ 为热导率, $\rho(T)$ 为电阻率, S 为横截面积, T 为温度, I 为电流, x 为沿 HEX 的微元的位置。

电流引线设计工作热端为 300 K, 高温超导 (high temperature superconductor, HTS) 段工作温度为 77 K, 工作电流为 1 kA。当忽略铜电阻率及热导率随温度变化的差异时, 电阻率设为 $1.67 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 热导率设定为 $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 可简化计算出解析值, 其漏热随长度截面积比 (L/S) 的关系如图 1a 所示, 当 $L/S = 3654 \text{ m}^{-1}$ 时, 漏热最小, 解析计算漏热达到 61.02 W, 对应仿真计算结果为 59 W, 二者计算结果接近。然而在实际情况下, 铜的电阻率及热导率随温度变化, 因此采用 COMSOL 软件进行仿真计算, 铜的电阻率及热导率设置如表 1 所示, 计算结果如图 1b 所示, 此时最优 $L/S = 3692 \text{ m}^{-1}$ 对应漏热为 42 W。HEX 段温场分布如图 1c 和 1d 所示, 其中 x/L 代表归一化距离, 定义 $x/L = 0$ 时为冷端 (77 K), $x/L = 1$ 时为室温端 (300 K)。温度随距离的降低并非线性, 而是接近室温段降温较平缓, 接近低温段降温梯度较大。当对铜的电阻率及热导率进行常数简化时, 解析求解与仿真计算的温场分布曲线基本一致; 而当设定电阻率及热导率随温度变化时, 其计算结果与简化的计算结果在低温段存在一定偏差, 这是由于低温下电阻率及热导率均与室温下存在较大差异。

高温超导电流引线的 HTS 段长度设计为 260 mm, 采用西北有色金属研究院自主研发的 Bi-2223/不锈钢复合增强超导带材, 其 77 K 自场下的超导临界电流可以达到 150 A, 77 K 下不可逆拉伸应力可达到 300 MPa, 采用 20 根带材进行电流引线 HTS 部分装配, 设计工作电流为 1 kA。电流引线的排布采用 10×2 阵列式分散排布, 如图 2a 所示, 其中两端铜头采用无氧铜制备, 一端为外接测试或连接用的平板接头, 一端内刻多个凹槽。将 Bi-2223 超导带材平行嵌入凹槽中, 凹槽宽 0.5 mm, 相邻凹槽中心位置间隔 2.5 mm。采用 FR-4 环氧玻纤板作为引线的外支撑, 并通过螺丝固定的方式实现灵活拆卸, 以

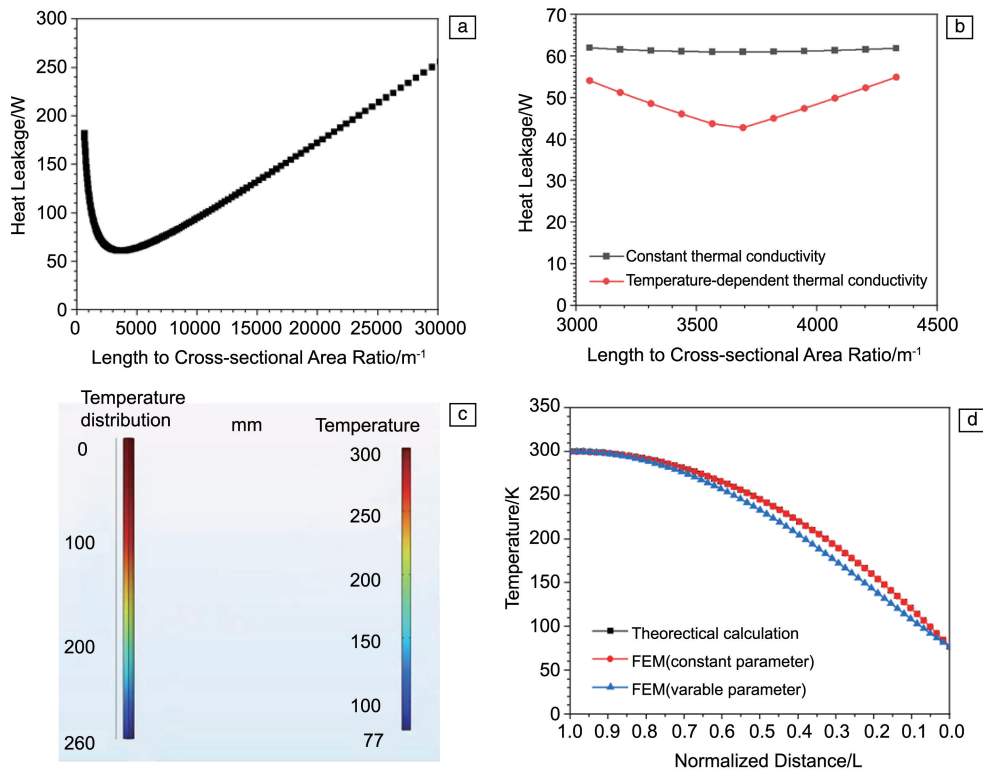


图 1 高温超导电流引线换热器段最优长度截面比(L/S)的解析分析(a)及仿真计算结果(b)，最优 L/S 下温场分布的仿真云图(c)及温度随距离变化曲线(d)

Fig. 1 Analytical analysis (a) and simulation results (b) of optimal length to cross-sectional area ratio (L/S), the contour map of temperature distribution (c) and temperature profile (d) at the optimal L/S of the heat-exchanger section in high-temperature superconducting current leads

表 1 铜在不同温度的热导率及电阻率

Table 1 Thermal conductivity and resistivity of copper at different temperatures

Temperature/K	Thermal conductivity/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Resistivity/ ($10^{-8} \Omega \cdot m$)
500	431	3.19
400	415	2.49
300	399	1.73
250	404	1.39
200	411	1.06
150	424	0.72
125	434	0.54
100	471	0.36
90	498	0.29
80	543	0.22
70	625	0.15
60	783	0.098
55	911	0.076
50	1100	0.057

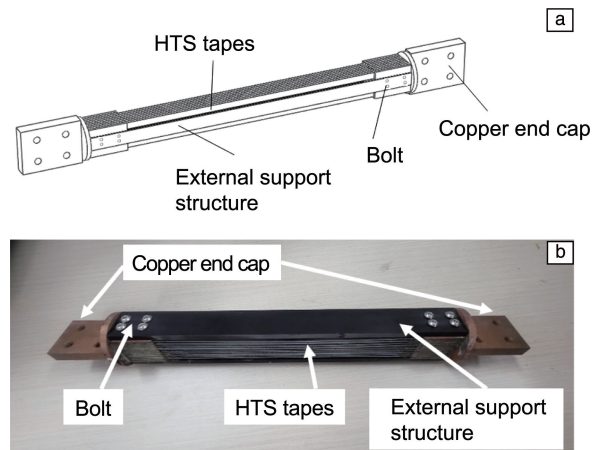


图 2 高温超导电流引线高温超导段的设计建模(a)和装配后实拍照片(b)

Fig. 2 Design model (a) and photograph after assembly (b) of the high-temperature superconducting current lead of the high temperature superconductor section

维持良好的低温力学强度以及良好的绝缘绝热。在装配时，采用真空低温钎焊实现 Bi-2223 超导带材与铜端头的焊接固定，装配后的 HTS 部件如图 2b 所示，铜端头最大截面尺寸为 $\Phi 44$ mm，总长度为 362 mm。

3 高温超导电流引线通流测试

对所装配的高温超导电流引线进行了通流测试, 测试电源量程 2400 A, 测试电源电流引线及电压引线均接在外侧铜头两端的平板处, 采用螺栓固定。固定好的待测电流引线在液氮下充分浸泡 30 min 后开始测试, 测试时升流速率为 $5 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$, 升流至 1 kA 后维持 5 min。由于电压引线接在两端铜头, 因此图 3a 中所测 $I-U$ 曲线存在斜率。所装配电流引线电阻较低, HTS 段 (含铜端头) 的整体电阻为 $36 \text{ n}\Omega$ 。在 1 kA 运行期间, 所测电流引线两端电压平稳, 电压波动的归一化标准偏差为 2%, 电压的

波动极差为平均值的 12%。该波动极差主要源于两方面: 一是测试电源在高电流 (1 kA) 状态下的稳压特性, 微小的输出电流扰动会在超低阻抗电路中放大为电压波动; 二是铜端头与电压引线接触面的微小接触电阻随温度和机械应力变化导致的瞬时电阻差异。为验证波动一致性, 对同一试件进行了 3 次循环通流测试, 结果表明各次测试的时间-电压曲线高度重合, 归一化标准偏差均控制在 2% 以内, 电压极差均在平均值的 10%~13%, 证明该波动具有可重复性, 不会影响整体运行稳定性。测试期间电流引线运行平稳, 无失超或烧毁, 循环重复测试无明显性能衰退。

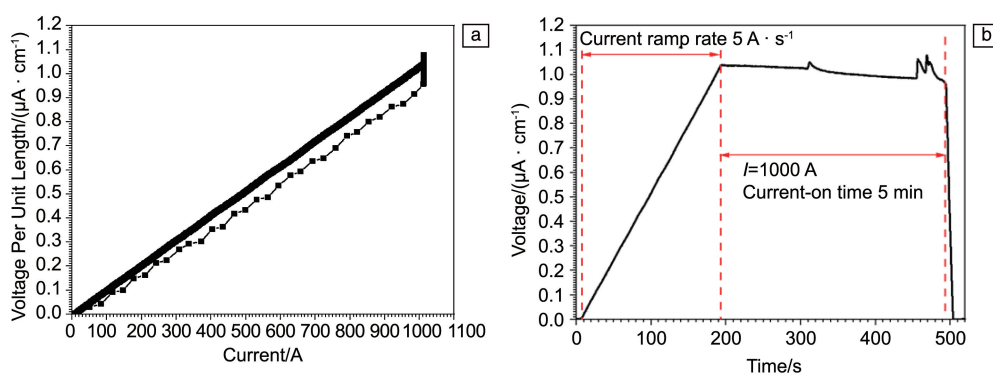


图 3 高温超导电流引线换热器组件通流测试: (a) $I-U$ 曲线, (b) 运行过程 $t-U$ 曲线

Fig. 3 Current testing of the heat-exchanger component in high-temperature superconducting current leads: (a) $I-U$ curve, (b) $t-U$ curve during operation

4 高温超导电流引线自场衰减研究

在高温超导电流引线的实际运行过程中, 高温超导带材的通流会在其周围产生环向自激发场, 而随着总体通电流增加, 多根通流超导带材组成的电流引线整体的自激发场经过矢量叠加后, 其最大值的矢量模量显著增大, 因此电流引线中超导材料的临界电流也随着自场增大而显著降低。定义磁场下临界电流保持率 (η) 的计算如式(2)所示:

$$\eta = \frac{I_c(B)}{I_c(0)} \quad (2)$$

式中, $I_c(B)$ 和 $I_c(0)$ 分别指高温超导带材在磁场下和自场下的临界电流。

由于 Bi-2223 高温超导带材的几何结构存在各向异性, 其超导载流性能也与磁场方向相关。图 4 为 Bi-2223 超导带材归一化临界电流随垂直方向和平行方向磁场强度的退化关系。可以看出, 相同磁场强度下, Bi-2223 超导带材的性能在垂直场下更低, 且其超导临界电流在低场阶段 ($B < 0.2 \text{ T}$) 出现迅速衰退, 当垂直场在 0.05 T 时, 其临界电流仅为无磁场情况下的 50%, 在 0.1 T 时

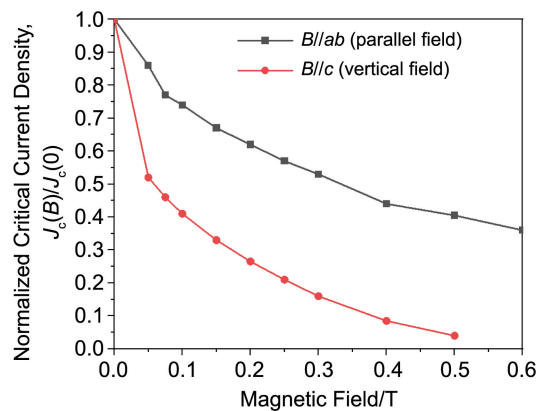


图 4 Bi-2223 超导带材在不同方向磁场下归一化临界电流密度

Fig. 4 Normalized critical current density of Bi-2223 superconducting tapes under magnetic fields in different directions

衰减至 40%, 在 0.2 T 时衰减至 25%。随着磁场进一步增加, 其临界电流衰退逐渐趋于平缓。而在 0.2 T 平行场下, Bi-2223 的临界电流仍能保持无磁场情况下的 65%。单根带材的自激发场对其性能影响可以忽略不计, 但在电流引线中, 多根带材在空间中排布后产生的自激

发场经过叠加后显著增加，因此会对其临界电流的衰减产生一定的影响，而其中自激发场在带材垂直方向分量的产生往往决定着超导带材的最大通流。

为了研究运行工况下自激发场对实际服役性能的影响，采用 COMSOL 软件对阵列式分散排布和堆叠密排式排布的高温超导电流引线的自场分布进行了仿真计算。其中模型简化为 x - y 平面二维分析，采用电流引线的横

截面作为阵列式分散排布电流引线的几何模型，其中带材尺寸设定厚度(x 方向)为 0.5 mm，宽度(y 方向)为 6 mm。在 x - y 空间呈现 10×2 的阵列式分散排布，相邻带材几何中心在 x 方向间隔为 2.5 mm， y 方向间隔为 21 mm。堆叠密排式结构模型设定带材间无间隔。运行整体电流为 1 kA，计算结果如图 5 所示。由于 Bi-2223 超导带材载流性能受垂直场影响更大，因此在实际工作时，磁场垂直

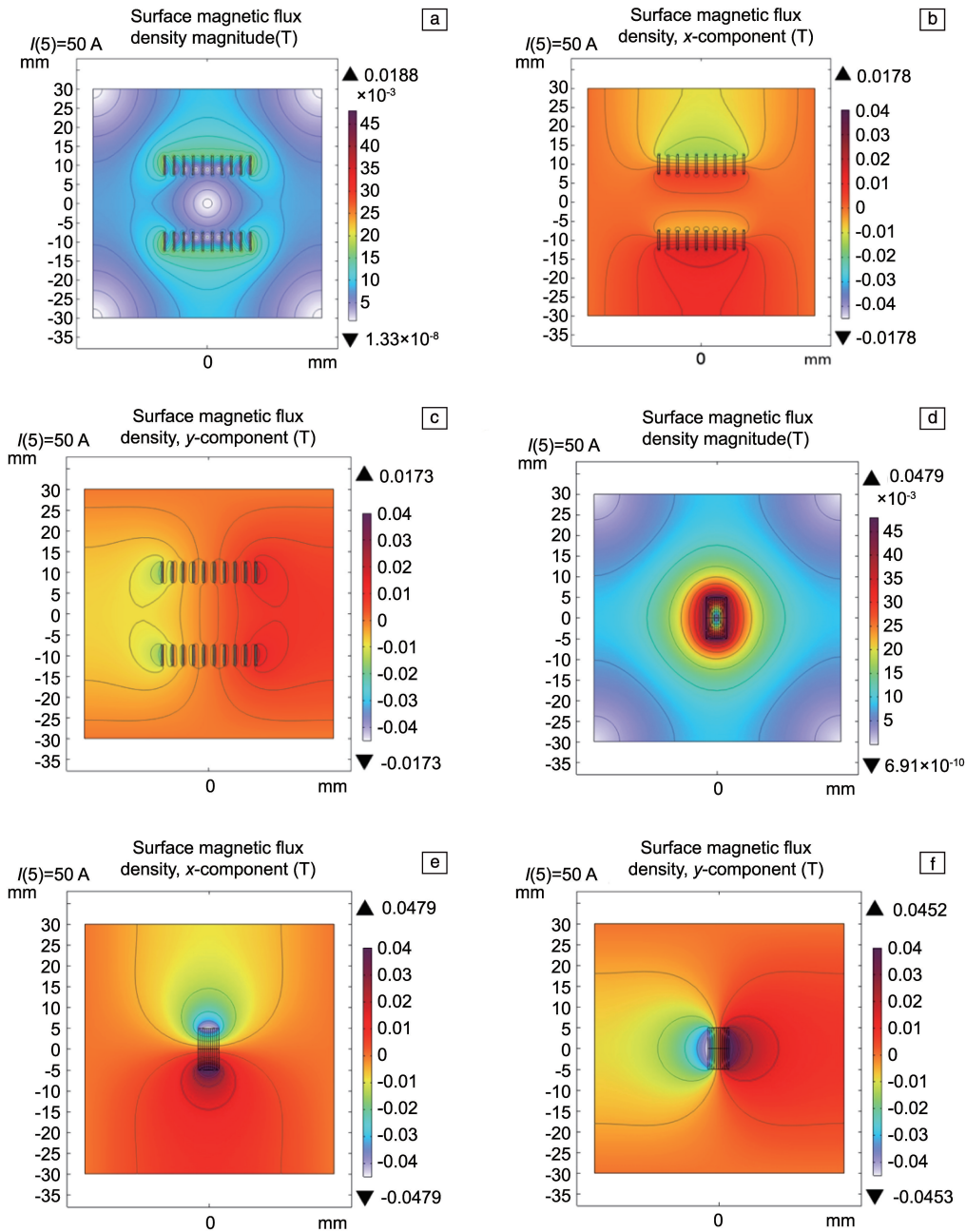


图 5 总通流 1 kA 条件下阵列式分散排布电流引线自激发场的模量(a)，x 方向分量(b)，y 方向分量(c)的空间分布；总通流 1 kA 条件下堆叠密排式电流引线自激发场的模量(d)，x 方向分量(e)，y 方向分量(f)的空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of the magnitude (a), x-component (b), y-component (c) of the self-induced field in the distributed array layout current lead under a total current of 1 kA; the spatial distribution of the magnitude (d), x-component (e), y-component (f) of the self-induced field in densely stacked configuration under a total current of 1 kA

带材方向分量的模量决定了带材的工作电流上限。计算结果表明,采用阵列式分散排布电流引线自激发场的强度显著低于堆叠密排式结构电流引线。在总通流 1 kA 的情景下,阵列式分散排布电流引线的自激发场在中心处抵消,在带材外侧最大,其最大模量 ($|B|_{\max}$) 为 0.0188 T, x 方向分量(垂直场)最大模量 ($|B_x|_{\max}$) 为 0.0172 T, y 方向分量(平行场)最大模量 ($|B_y|_{\max}$) 为

0.0173 T。而堆叠密排式电流引线在相同通流大小下,其自激发场在带材周围最高, $|B|_{\max}$ 为 0.0479 T, $|B_x|_{\max}$ 为 0.0479 T, $|B_y|_{\max}$ 为 0.0452 T, 其自激发场强度是阵列式分散排布的 2.55 倍。采用不同通流大小进行仿真计算,计算结果如表 2 所示。计算结果表明, $|B|_{\max}$ 、 $|B_x|_{\max}$ 与 $|B_y|_{\max}$ 与通流电流大小成正比,随着总体运行电流增加,其自激发场间的差异也逐渐增加。

表 2 不同通流条件下阵列式分散排布及堆叠密排式排布的电流引线的自激发场及 x 、 y 方向分量最大模量

Table 2 Maximum magnitudes of the self-induced field and x , y components for distributed array layout and densely stacked configuration current leads under different current conditions

Total current/A	Distributed array layout			Densely stacked configuration		
	$ B _{\max}/T$	$ B_x _{\max}/T$	$ B_y _{\max}/T$	$ B _{\max}/T$	$ B_x _{\max}/T$	$ B_y _{\max}/T$
0	0	0	0	0	0	0
200	0.0038	0.0034	0.0035	0.0096	0.0096	0.0090
400	0.0075	0.0069	0.0069	0.0192	0.0192	0.0181
600	0.0113	0.0103	0.0104	0.0288	0.0288	0.0271
800	0.0150	0.0138	0.0138	0.0384	0.0384	0.0362
1000	0.0188	0.0172	0.0173	0.0479	0.0479	0.0452
1200	0.0225	0.0207	0.0207	0.0575	0.0575	0.0543
1400	0.0263	0.0241	0.0242	0.0671	0.0671	0.0633
1600	0.0300	0.0276	0.0276	0.0767	0.0767	0.0724
1800	0.0338	0.0310	0.0311	0.0863	0.0863	0.0814
2000	0.0376	0.0345	0.0346	0.0959	0.0959	0.0905

结合上述 Bi-2223 超导带材性能随磁场衰退的规律可知,堆叠密排式结构下,带材通流产生的自激发场会对带材服役性能产生严重影响,在 1 kA 通流下,其最大垂直场分量可以达到 0.0479 T,其临界电流衰退至无磁场条件下(~ 150 A)的 55%。相比之下,阵列式分散排布结构下,其自激发场垂直分量最大仅为 0.0172 T,其临界电流可以保留至无磁场条件下的近 80%。此外,本文中电流引线的尺寸远小于筒式电流引线,因此可以维持较好的便利性与紧凑性,同时由于无金属热沉,也减小了电流引线的传导漏热。由于阵列式结构电流引线带材间并非紧密排列,在发生失超时也便于更换局部带材,而无需更换整根引线,因此降低了维修的成本。另一方面,阵列式分散排布带材以及多槽结构的铜端头能够有效增大超导带材与铜端头的接触面积,通过均匀焊接可实现电阻降低以及电阻均匀性提升,有效防止了带材通流时层间短路的不利影响,增加了超导电流引线的可靠性。

5 结 论

本工作对高温超导电流引线进行了结构优化,针对

中小型堆叠结构超导电流引线中超导带材自场衰减导致的利用率低的问题,提出紧凑型电流引线阵列式分散排布的新型结构设计,并采用西北有色金属研究院制备的 Bi-2223 超导增强带材进行制备,成功实现电流引线高温超导段 1 kA 稳定通流。并采用 COMSOL 进行磁场分布计算,结果显示,阵列式分散排布电流引线的最大自激发场强度较堆叠密排电流引线降低了约 60.8%,对应的临界电流保持率从 55%提高至 80%。此外,优化后的引线结构不仅体积小($\Phi 44$ mm \times 362 mm)、结构稳定,还通过增大超导带材与铜端头的接触面积,显著减少了局部过热及层间短路的风险,提高了引线的整体可靠性与可维护性,也减小了局部失超对相邻带材的损害,并能够实现失超单根带材的灵活装配更换。在未来的研究中,可以进一步优化引线的几何设计,并结合不同超导材料的特性,探索更加高效的电流引线结构,以适应更高电流和更复杂工况下的超导应用需求。

参考文献 References

- [1] 王军,刘承连,董育军,等. 低温与超导[J], 2019, 47(8): 24-27.

- WANG J, LIU C L, DONG Y J, *et al.* *Cryogenics & Superconductivity* [J], 2019, 47(8): 24–27.
- [2] FRY V, ZHUKOVSKY A, WOLF M J, *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2024, 34(2): 1–18.
- [3] LIU C, DING K, ZHOU T, *et al.* *IEEE Transactions on Plasma Science*[J], 2018, 46(9): 3219–3222.
- [4] MOZYZYKH M, GORBUNOVA D, USTYUZHANIN P, *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2021, 31(5): 1–7.
- [5] 余洪, 梁臣, 吴通华, 等. 广东电力[J], 2021, 34(7): 71–80.
YU H, LIANG C, WU T H, *et al.* *Guangdong Electric Power* [J], 2021, 34(7): 71–80.
- [6] 宋萌, 王作帅, 任丽, 等. 低温与超导[J], 2014, 42(12): 36–40.
SONG M, WANG Z S, REN L, *et al.* *Cryogenics & Superconductivity* [J], 2014, 42(12): 36–40.
- [7] 刘洋, 唐跃进, 石晶, 等. 南方电网技术[J], 2015, 9(12): 59–64.
LIU Y, TANG Y J, SHI J, *et al.* *Southern Power System Technology* [J], 2015, 9(12): 59–64.
- [8] 杨啸辰, 张祥镇, 徐妙富, 等. 低温工程[J], 2020(1): 25–29.
YANG X C, ZHANG X Z, XU M F, *et al.* *Cryogenics*[J], 2020(1): 25–29.
- [9] 侯弘历, 胡乐, 张胜楠, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2026, 55(3): 830–840.
HOU H L, HU L, ZHANG S N, *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2026, 55(3): 830–840.
- [10] 胡乐, 杨芳, 侯弘历, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2026, 55(1): 278–284.
HU L, YANG F, HOU H L, *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2026, 55(1): 278–284.
- [11] 赵天翔, 张谢天, 雪付, 等. 舰船科学技术[J], 2018, 40(10): 122–125.
ZHAO T X, ZHANG X T, XUE F, *et al.* *Ship Science and Technology*[J], 2018, 40(10): 122–125.
- [12] ZUBKO V V, FETISOV S S, ZANEGIN S Y, *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2018, 28(3): 1–5.
- [13] 杨紫含, 何杰, 胡刚, 等. 低温与超导[J], 2021, 50(2): 17–23.
YANG Z H, HE J, HU G, *et al.* *Cryogenics & Superconductivity*[J], 2021, 50(2): 17–23.
- [14] 刘承连, 毕延芳, 丁开忠, 等. 原子能科学技术[J], 2012, 46(3): 355–359.
LIU C L, BI Y F, DING K Z, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*[J], 2012, 46(3): 355–359.
- [15] DU Q, LIU C, DING K, *et al.* *IEEE Transactions on Plasma Science* [J], 2020, 48(6): 1428–1431.
- [16] 毕延芳. 低温物理学报[J], 2005, 27(5): 1074–1079.
BI Y F. *Chinese Journal of Low Temperature Physics*[J], 2005, 27(5): 1074–1079.
- [17] 李力, 宋萌, 刘学谦, 等. 低温物理学报[J], 2023, 45(2): 71–76.
LI L, SONG M, LIU X Q, *et al.* *Chinese Journal of Low Temperature Physics*[J], 2023, 45(2): 71–76.
- [18] 马红军, 刘华军, 刘方, 等. 低温与超导[J], 2017, 46(3): 28–31.
MA H J, LIU H J, LIU F, *et al.* *Cryogenics & Superconductivity*[J], 2017, 46(3): 28–31.
- [19] 田军涛, 诸嘉慧, 丘明, 等. 低温与超导[J], 2008, 36(5): 47–51.
TIAN J T, ZHU J H, QIU M, *et al.* *Cryogenics & Superconductivity* [J], 2008, 36(5): 47–51.