

内封光纤高温超导 CORC[®] 缆线电磁特性仿真研究^{*}

王恒, 金之俭, 洪智勇, 江俊杰[†]

上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240

收稿日期: 2021-11-28; 接收日期: 2021-12-24

【摘要】 内封光纤高温超导 CORC[®] (Conductor on Round Core) 缆线在传统 CORC[®] 缆线结构的基础上, 将光纤嵌于铜芯骨架内, 不仅能够保持原有集束缆线表面形貌的完整性, 还能通过外置分布式光纤传感解调设备, 实现对缆线失超的快速检测。然而, 改变缆线结构有可能引起缆线电磁特性发生变化, 继而影响高场磁体的设计与应用。本文以高温超导 CORC[®] 缆线为研究对象, 采用有限元仿真技术研究了直流供电的内封光纤 CORC[®] 缆线在正常运行工况下的电磁场分布特性, 通过对比普通 CORC[®] 缆线, 分析了内封光纤对 CORC[®] 缆线电磁性能产生的影响。研究结果表明, 两种缆线在正常运行工况下的电流密度及磁通密度分布特性较一致, 初步论证了内封光纤高温超导 CORC[®] 缆线在高场磁体应用的可行性。

关键词: 分布式光纤传感技术, 高温超导 CORC[®] 缆线, 失超检测, 有限元仿真

PACS: 07. 60. Vg, 47. 11. Fg, 84. 71. Fk

DOI: 10. 13380/j. ltpl. 2021. 06. 002

Electromagnetic Characteristics Simulation for Optical Fiber Encapsulated High Temperature Superconducting CORC[®] Cable

WANG Heng, JIN Zhijian, HONG Zhiyong, JIANG Junjie[†]

School of electronic information and electrical engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Received date: 2021-11-28; accepted date: 2021-12-24

【Abstract】 Optical fiber encapsulated high temperature superconducting (OFE-HTS) CORC[®] (Conductor on Round Core) cable embeds the optical fiber in the copper core framework based on the traditional cable structure, can not only maintain the integrity of original cable surface, but also realize the rapid quench detection through the external distributed optical fiber sensing and demodulation equipment. However, changing the cable structure may influence the electromagnetic characteristics of the cable, then affect the application of the high-field magnet. In this paper, electromagnetic field distribution characteristics under normal operating conditions of DC powered OFE-HTS CORC[®] cable are studied by using finite element simulation technology, and the effect of embedded optical fiber on CORC[®] cable electromagnetic performance is analyzed by comparing with ordinary CORC[®] cable. The result shows that the current density and magnetic flux density distribution characteristics of the two cables are consistent under normal operating conditions, and preliminarily demonstrates the OFE-HTS CORC[®] cable is feasible in the high-field magnet application.

Keywords: Distributed optical fiber sensor technology, High temperature superconducting CORC[®] cable, Quench

^{*} 上海市青年科技英才扬帆计划(批准号:21YF1419300)和上海交通大学新进教师启动计划基金(批准号:21X010500824)资助的课题。

[†] jiangjunjie@sjtu.edu.cn

detection, Finite element simulation

PACS: 07.60.Vg, 47.11.Fg, 84.71.Fk

DOI: 10.13380/j.ltpl.2021.06.002

Reference method: WANG Heng, JIN Zhijian, HONG Zhiyong, JIANG Junjie, Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0327 (2021)

1 引言

基于稀土钡铜氧 (ReBCO) 涂层的二代高温超导体具有高不可逆场和高临界电流密度的显著特点^[1], 在高场磁体领域显示出了令人可期的应用前景^[2]. 但是, 在高磁场环境下, 通过单根超导带材难以实现大电流的传输, 有限的面内弯曲能力也会对大型磁体的绕制造成影响. 为满足高场磁体对于大电流、低电导体的需求, 多种高温超导集束缆线, 如: TSTC (Twisted Stacked-Tape Cable) 缆线^[3,4]、CORC[®] (Conductor On Round Core) 缆线^[5,6] 和 Roebel (Roebel Cable) 缆线^[7,8] 等, 均得到了快速发展. 其中, CORC[®] 缆线是一种将 ReBCO 超导带材以螺旋方式缠绕于中心骨架上的圆柱形导体, 缆线相邻两层带材采用完全换位方式布置, 可有效降低缆线的各向异性. CORC[®] 缆线弯曲性能好、机械强度高、电流密度和载流能力大、交流损耗小, 是构建高场磁体的最佳导体选择之一^[9,10].

高场磁体建造费用高昂, 为保障其安全稳定运行, 就需要对磁体内的集束缆线进行有效的失超检测. 相较于低温超导线材, 高温超导线材的失超传播速度较慢 ($\sim \text{cm/s}$), 传统的电压检测法不再适用于高温超导长线的失超检测^[11-12]. 近年来, 面向高温超导失超检测应用的分布式光纤传感技术得到了大量关注^[13-15], 被认为是最有希望解决当前高温超导失超检测应用难题的技术方案之一. 分布式光纤传感器可实现沿长度方向对超导线材的温度/应变量进行快速检测, 此外光纤的抗电磁干扰能力强、绝缘性能好、可柔性安装等特点也为高场磁体失超检测提供了应用基础.

测量光纤与高温超导集束缆线的物理接触是实现高场磁体失超检测的关键. 若将光纤直接贴敷于高温超导集束缆线表面, 不仅光纤只能获取缆线表面温度/应变信息, 还会影响缆线表面形貌结构的完整性, 不利于超导线圈的绕制. 而将光纤内封于超导集束缆线内, 一方面光纤可以感知集束缆线内部温度/应变变化, 另一方面, 缆线结构的完整性也能得到保障. 为了将光纤内封于高温超导集束缆线内部, 需要对缆线的结构进行相应的调整. 而对大型高场磁体而言, 缆线结构的不同会导致磁体性能出现明显差异. 因此, 在分布式光纤传感技术应用于高场磁体之前, 有必要对内封光纤的高温超导集束缆线电

磁特性进行探究. 本文以 CORC[®] 缆线作为应用对象, 采用有限元仿真方法, 对采用直流供电的普通 CORC[®] 缆线和内封光纤 CORC[®] 缆线在正常运行工况下的电磁场变化的差异性进行初步探索, 以期从仿真角度预先验证内封光纤 CORC[®] 缆线的应用可行性, 同时也为后续进一步开展失超检测研究提供基础.

2 仿真模型

2.1 CORC[®] 缆线物理模型

图 1(a) 为内封光纤 CORC[®] 缆线三维示意图, 图 1(b) 和其相应的放大图 (c) 呈现了缆线的横截面. 缆线整体为单层结构, 三根 YBCO 超导带材以螺旋管形式绕于一根中空的铜芯骨架之上, 铜芯骨架外表面沿其长度方向同样以螺旋状进行开槽处理, 凹槽始终位于其中一根超导带材的中间位置处, 凹槽内嵌光纤, 并通过 PbSn 焊锡进行填充和固定. 表 1 给出了内封光纤 CORC[®] 缆线的参数信息. 对比模型为普通 CORC[®] 缆线, 铜芯骨架未做开槽处理, 无光纤与焊锡, 其余结构参数以及带材的临界电流值与内封光纤 CORC[®] 缆线的相一致.

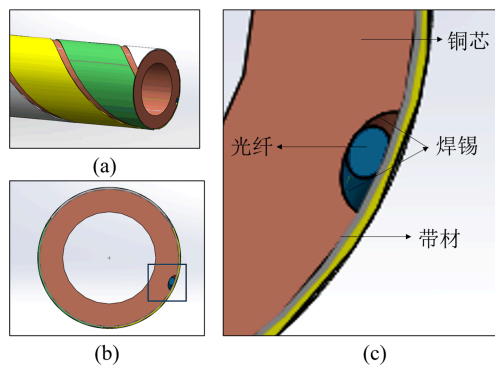


图 1 单层三带材内封光纤 CORC[®] 缆线结构模型图

表 1 内封光纤 CORC[®] 缆线规格参数

铜芯直径 (内径×外径)	4 mm×6 mm
YBCO 带材 (宽×厚)	4 mm×75 μm
绕制角度	45°
光纤直径 (直径)	170 μm
圆形槽半径	340 μm
临界电流 (单根带材, 自场, 77 K)	150 A

2.2 电磁场模型

为研究内封光纤 CORC[®] 缆线与普通 CORC[®] 缆线在稳态运行条件下的电流与电磁场分布特性, 分别建立了相应的二维有限元仿真模型. 图 2(a) 为内封光纤 CORC[®] 缆线二维仿真模型的网格剖分图, 图中 x - y 平面平行于缆线横截面, z 方向为缆线长度方向. 将图 2(a) 中红框区域进行放大后获得图 2(b).

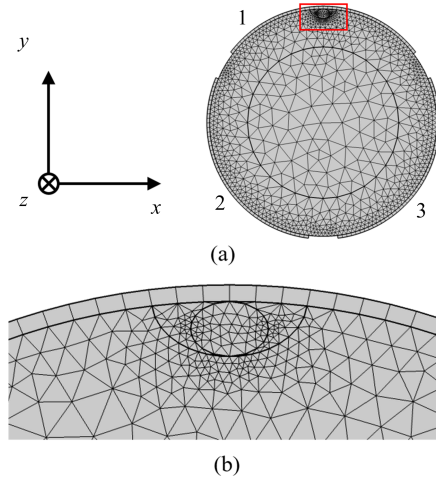


图 2 仿真网格剖分图

对于二维平面模型, 当缆线处于正常运行工况下, 其电流方向平行于沿缆线长度方向, 相应的磁场仅在 x 和 y 方向上存在分量. 获得缆线的二维电磁分布特性, 采用 H 方程进行计算^[16]:

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

$$\nabla \times H = J \quad (2)$$

其中 E 为电场, B 为磁感应强度, H 为磁场强度, J 为电流密度.

联立公式(1)、(2)可得电磁场分布, 即:

$$\mu_0 \mu_r \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \times (\rho \nabla \times H) = 0 \quad (3)$$

利用公式(4)和(5)给出的超导 E - J 特性方程, 对 YBCO 带材上的传导电流关系进行定义. 这里仅研究两种缆线在正常运行条件下的电磁特性差异, 因此在具体计算过程中可忽略磁场对临界电流衰减 $J_c(B)$ 的影响^[17]:

$$E = E_0 \times \left(\frac{\text{norm}J}{J_c} \right)^n \quad (4)$$

$$\text{norm}J = \sqrt{J_x^2 + J_y^2 + J_z^2} \quad (5)$$

式中, $\text{norm}J$ 为电流密度模, J_x 、 J_y 和 J_z 分别是 x 、 y 和 z 三个方向的电流密度, J_c 为单根带材临界电流密度, 大小为 $3.53 \times 10^8 \text{ A/m}^2$, n 为 21. 在仿真计算中, CORC[®] 缆线非超导材料的电阻率参数设置如表 2 所示.

表 2 材料电阻率参数^[18-19]

材料	电阻率参数/ $(\Omega \cdot \text{m})$
铜	2.10×10^{-9}
光纤	10
焊锡	2.96×10^{-8}
液氮	100
空气	100

3 结果与讨论

为便于研究内封光纤 CORC[®] 缆线和普通 CORC[®] 缆线的电磁特性差异, 所有仿真计算均只考虑自场、77 K 条件下的情况, 仿真工具为 COMSOL Multiphysics 5. 4. 普通 CORC[®] 缆线与内封光纤 CORC[®] 缆线注入的电流波形分别如图 3(a) 和 (b) 所示.

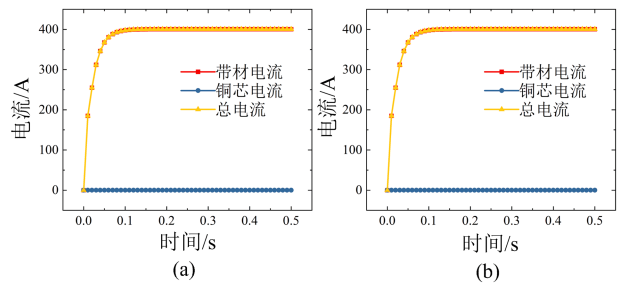


图 3 CORC[®] 缆线电流变化曲线图

(a) 普通 CORC[®] 缆线; (b) 内封光纤 CORC[®] 缆线

图 4 是在 0.5 s 时, 两种缆线电流密度分布计算结果. 受磁弛豫作用影响, 单根超导带材中间区域电流密度略小于带材两侧^[20]. 普通 CORC[®] 缆线与内封光纤 CORC[®] 缆线带材上平均电流密度均为 $3.1869 \times 10^8 \text{ A/m}^2$, 两种缆线带材上的电流分布相一致.

普通 CORC[®] 缆线与内封光纤 CORC[®] 缆线磁通密度分布计算结果如图 5 所示. 两种缆线磁通密度分布相同, 最大的磁通密度均为 0.03 T. 为进一步分析两种缆线在磁通密度分布上的差异性, 按图

5(a)和(b)所示,计算了两种 CORC[®] 缆线沿对称轴的磁通密度,相应的计算结果如图 6 所示,颜色梯度分别代表 0~0.5 s 内间隔 0.01 s 的不同时间.在

0.5 s 时,两种 CORC[®] 缆线对称轴上磁通密度分布如图 7 所示.计算结果表明,整体上两种缆线的磁通密度分布一致性较高.

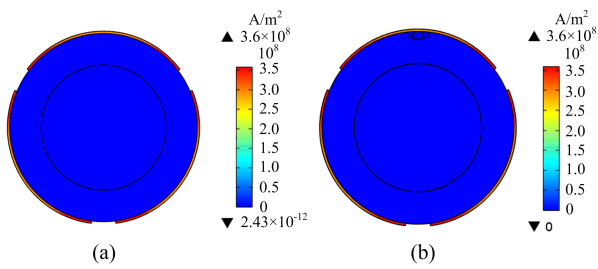


图 4 CORC[®] 缆线电流密度分布图

(a) 普通 CORC[®] 缆线; (b) 内封光纤 CORC[®] 缆线

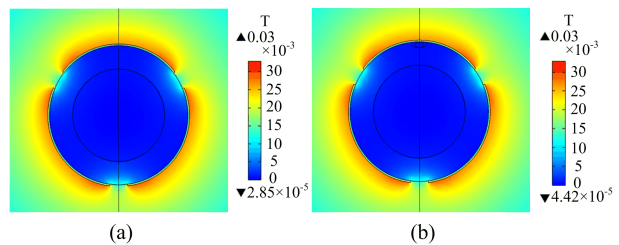
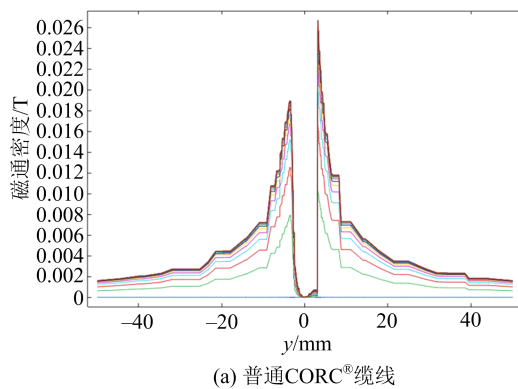
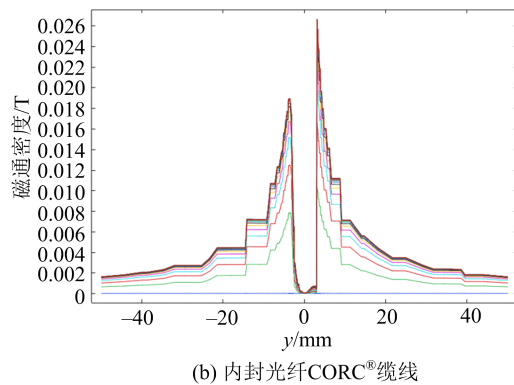


图 5 CORC[®] 缆线磁通密度分布图

(a) 普通 CORC[®] 缆线; (b) 内封光纤 CORC[®] 缆线



(a) 普通CORC[®]缆线



(b) 内封光纤CORC[®]缆线

图 6 CORC[®] 缆线磁通密度沿截线方向分布图: (a) 普通 CORC[®] 缆线; (b) 内封光纤 CORC[®] 缆线.

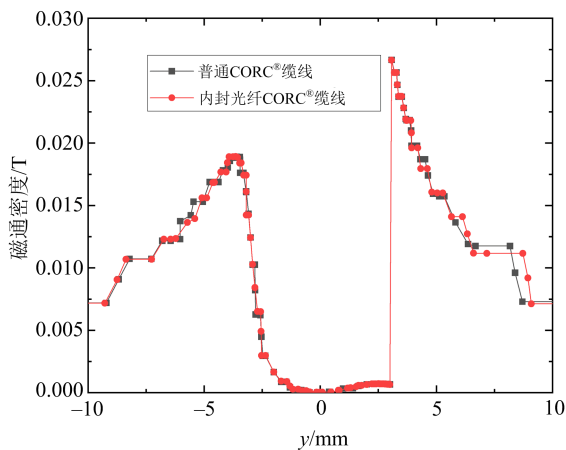


图 7 CORC[®] 缆线 0.5 s 磁通密度沿截线方向分布图

4 总 结

本文采用有限元仿真技术对普通高温超导 CORC[®] 缆线与内封光纤高温超导 CORC[®] 缆线的二维电流密度和电磁密度特性进行仿真研究,研究结果表明通以直流电的两种缆线在正常运行工况下的电磁场变化一致,内封光纤不会对 CORC[®] 缆线电磁性能产生影响.

在仿真计算中,本文仅考虑了电磁场之间的作用,为进一步论证内封光纤高温超导 CORC[®] 缆线在高场磁体中应用的可行性,后续将对失超状态下的缆线电磁特性、交流损耗特性等开展研究工作.

参 考 文 献

[1] M. A. Diaz, A. R. Nisay, H. Shin, G. Kim, S. Oh, and H. Ha, *J. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **31** (2021), 8400204

[2] Y. Shia, H. J. Liua, F. Liua, Y. F. Tana, H. Jina, M. Yua, L. Leia, L. Guoa, and Z. Y. Hongb, *J. Physica C: Supercond.*, **550** (2018), 10.

- [3] M. Takayasu, L. Chiesa, L. Bromberg, and J. V Minervini, *J. Supercond. Sci. Technol.*, **25** (2012), 014011.
- [4] L. Chiesa, N. C. Allen, and M. Takayasu, *J. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **24** (2014), 6600405.
- [5] D. C. van der Laan, *J. Supercond. Sci. Technol.*, **22** (2009), 065013.
- [6] D. C. van der Laan, K. Radcliff, V. A. Anvar, K. Wang, A. Nijhuis, and J. D. Weiss, *J. Supercond. Sci. Technol.*, **34** (2021), 10LT01.
- [7] R. A. Badcock, N. J. Long, M. Mulholland, S. Hellmann, A. Wright, and K. A. Hamilton, *J. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19** (2009), 10782230.
- [8] Y. Yan, P. Song, S. Jiang, J. Zhu, H. Zhang, Y. Zhu, R. Liu, Y. Li, F. Feng, M. Zhang, and T. Qu, *J. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **29** (2019), 8201005.
- [9] J. D. Weiss, T. Mulde, H. J. ten Kate, and D. C. van der Laan, *J. Supercond. Sci. Technol.*, **30** (2017), 014002.
- [10] D. C. van der Laan, J. D. Weiss, and D. M. McRae, *J. Supercond. Sci. Technol.*, **32** (2019), 033001.
- [11] D. C. van der Laan, J. D. Weiss, F. Scurti, and J. Schwartz, *J. Supercond. Sci. Technol.*, **33** (2020), 085010.
- [12] J. Jiang, Y. Zhao, Z. Hong, J. Zhang, Z. Li, D. Hu, D. Qiu, A. Zhao, K. Ryu, and Z. Jin, *J. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28** (2018), 4702105.
- [13] J. Jiang, Z. Jin, Z. Li, Z. Hong, M. Song, and X. Duan, *J. Supercond. Sci. Technol.*, **34** (2021), 085014.
- [14] B. Chen, J. Li, Y. Hu, H. Ma, T. Wang, C. Zhou, and H. Liu, *J. Fusion Eng. Des.*, **156** (2020), 111569.
- [15] F. Scurti, J. D. Weiss, D. C. van der Laan, and J. Schwartz, *J. Supercond. Sci. Technol.*, **34** (2021), 035026.
- [16] B. Shen, X. Chen, L. Fu, and M. Zhang, *J. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **31** (2021), 4803405.
- [17] F. Grilli, R. Brambilla, F. Siroi, A. Stenvall, and S. Memiaghe, *J. Cryogenics (Guildf)*, **53** (2013), 143.
- [18] M. Casali, M. Breschi, and P. L. Ribani, *J. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **25** (2015), 6600112.
- [19] G. D. Brittles, T. Mousavi, C. R. M. Grovenor, C. Aksoy, and S. C. Speller, *J. Supercond. Sci. Technol.*, **28** (2015), 093001.
- [20] G. G. Sotelo, M. Carrera, J. Lopez-Lopez, and X. Granados, *J. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **8** (2016), 6603510.