

用于高场加速器磁体的新型高温超导 内插线圈概念设计^{*}

孔二帅^{1,2}, 王呈涛^{2,3}, 王琳¹, 王相蓁¹, 宁飞鹏^{2,3}, 刘旭洋^{2,3}, 成达^{2,3},
王莹哲^{2,3}, 彭全岭^{2,3}, 张展^{2,3}, 魏绍清^{2,3}, 张震^{2,3}, 徐庆金^{2,3+}

1. 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230026;

2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

收稿日期: 2019-10-29; 接收日期: 2019-12-21

【摘要】 中国科学院高能物理研究所正在进行环形正负电子对撞机-超级质子对撞机(CEPC-SPPC)的研究工作, 未来超级质子对撞机(SPPC)初期要求的主环二极磁体磁场强度为 12 T, 升级后的磁体场强需求为 20~24 T. 为了达到 15 T 及以上的场强, 高温超导线材制作的内插高场线圈是目前唯一选择. 本文对 YBCO 内插线圈做了相应的探究, 并提出的一种新的设计方案, 具有以下特点: 线圈结构采用 Common-coil 与 Block-type 混合的设计, 并解决了端部弯曲半径小的问题; 充分利用 YBCO 在高场下磁场与超导带材平行时临界电流密度是垂直情况下的数倍特性, 通过优化端部结构减小线材与磁场夹角; 计算了不同形状及弯曲半径组合下的线材弯曲情况, 综合考虑了端部长度与线材张力之间相互制约的问题, 并给出了最终结果; 试绕了两种端部的铜线圈, 以及 balloon-end 的高温超导 YBCO 线圈并进行了测试.

关键词: 高场; 高温超导; 二极磁体; 线圈结构

PACS: 7460, 7490, 0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.06.002

Design of a High Field YBCO Coil with a New End Structure

KONG Ershuai^{1,2}, WANG Chengtao^{2,3}, WANG Lin¹, WANG Xiangqi¹, NING Feipeng^{2,3},
LIU Xuyang^{2,3}, CHENG Da^{2,3}, WANG Yingzhe^{2,3}, PENG Quanling^{2,3}, ZHANG Zhan^{2,3},
WEI Shaoqing^{2,3}, ZHANG Zhen^{2,3}, XU Qingjin^{2,3}

1. *National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei;*

2. *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing*

Received date: 2019-10-29; accepted date: 2019-12-21

【Abstract】 IHEP (The Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences) is pursuing the pre-study of SPPC, which requires dipole magnets with 12 T in the first step and 20-24 T in the second step. To obtain 12 T

^{*} 中国科学院战略科技先导 B 类专项“下一代高场超导磁体关键科学与技术”(No. XDB25000000), 国家自然科学基金(No. 11675193, 11575214, 11604335)以及国家重点仪器研发项目(2016YFA0402001)资助的课题.

[†] xuqj@ihep.ac.cn

or higher field, high temperature superconductor (HTS) insert coil is the only choice now. Research on the new design of the insert coil with YBCO is reported in this paper, which has three characteristics. 1) A coil with both Common-coil and Block-type structure solves the problem of a small bending radius. 2) To take advantage of the high critical current in the YBCO tapes in parallel magnet field, which is 3-5 times of that in vertical field, an optimization of end structure is adopted. 3) With the calculation of the bending strain in different shapes and bending radius, a result was finally given out considering the total length of the end and the strain in the tape. 4) Two kinds of end were fabricated with copper and a balloon-end YBCO coil has been fabricated and tested.

Keywords: High field; HTS; Dipole Magnets; Coil Structure

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.06.002

Reference method: KONG Ershuai, WANG Chengtao, WANG Lin, WANG Xiangqi, NING Feipeng, LIU Xuyang, CHENG Da, WANG Yingzhe, PENG Quanling, ZHANG Zhan, WEI Shaoqing, ZHANG Zhen, XU Qingjin, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0384 (2019)

1 高场超导二极磁体 LPF1 及 YBCO 线材特性

国内首个高场强加速器二极磁体 LPF1 于 2018 年完成了测试,主场强达到了 10.2 T^[1-2]. 后续磁体基于 LPF1 进行升级,以达到 12~16 T 的场强. 基于最新设计的 LPF2 磁体,在线圈的中平面里插入 YBCO 线圈来提高场强,提出了 LPF2-P 的插入方案.

LPF2 是由 8 个跑道型线圈组成的 Common-coil 结构超导二极磁体,采用铌钛和铌三锡低温超导带材,基于卢瑟福缆结构绕制而成(图 1). 在 8 个跑道线圈的中平面有个 10 mm 的间隙(图 1 中彩色部分),基于这个间隙可以插入高温超导线圈,验证高温超导 YBCO 的高场性能以及新端部方案(图 1).

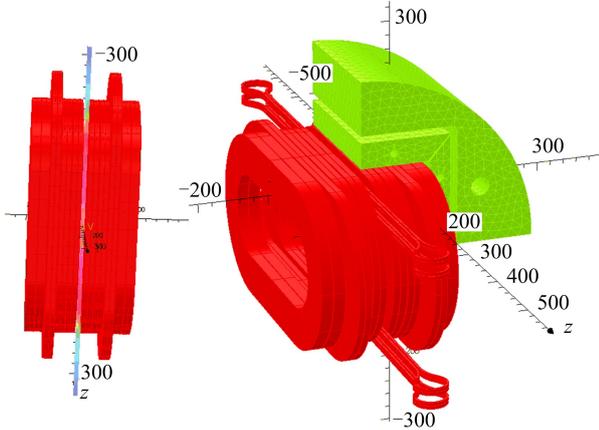


图 1 LPF2 10.2 T 超导二极磁体及 LPF2-P 插入磁体设计方案

大部分 YBCO 具有当磁场与线材宽边平行时(平行场)临界电流密度大于磁场与宽边垂直时(垂直场)的特性,尤其在大于 10 T 的高场下,平行场电流密度相对垂直场电流密度会有 5 倍甚至更高的提高^[3-4](图 2). 基于 YBCO 各向异性角度依赖关系^[5-6],依据上海超导公司提供的 YBCO 线材在 0~9 T 垂直场下的 I_c 数据,算出不同磁场和线材宽边角度(Tape field angle, TF 角)的依赖关系. 为插入线圈安全阈值的计算提供依据. 图 3 是上超带材在 4.2 K、12 T 背景场下 I_c 和 TF 角的依赖关系.

2 线圈端部设计

过小的弯曲半径会导致 YBCO 性能的衰减,为了在有限的空间内实现尽可能大的弯曲半径,在研究中设计高温超导线材 YBCO 在端部采用类

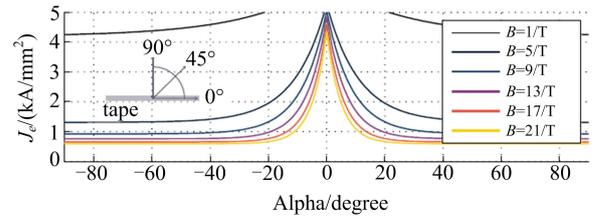


图 2 不同磁场下 YBCO 工程电流密度 J_e 和磁场与宽边夹角的关系^[3]

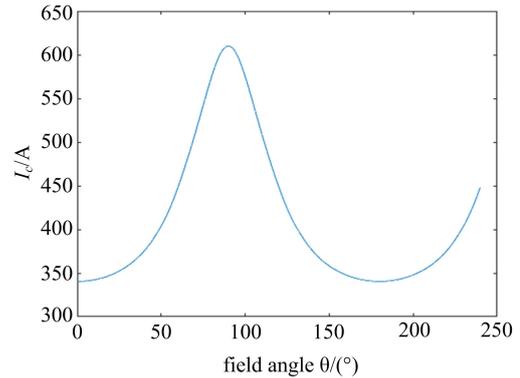


图 3 上海超导 YBCO 带材在 4.2 K、12 T 下 I_c 和 TF 夹角关系

似 C 型磁体的反角度圆弧;在圆上取两端光滑衔接的弧(0~45 度反角度弧和 90~225 度正角度弧),将其拼接起来作为端部的一部分(图 4),从而实现在满足最小弯曲半径的前提下实现端部线材的连续过渡,尽可能减少端部线材绕线所需要的张力. 根据插入位置的几何特征,选取不同半径的圆弧,采用不同的圆弧角,以便满足曲线闭合条件和曲线光滑条件(一阶导数连续),尽可能减小端部长度,减小 TF 角. 最终采用的反角度弧弯曲半径为 182.79 mm,对应的圆心角度为 25 度,正角度弧 20 mm,对应的角度为 25+90=115 度的方案. 该方案我们命名为“钥匙”方案(图 5).

由于钥匙方案全部采用宽边 easy-way 的弯曲方式,没有窄边(hard-way)的弯曲,因此绕线张力主要取决于弯曲半径^[7],对钥匙方案整个端部进行了曲率半径分析^[8]. 发现在两段圆弧(0~25 度 90~205 度)过渡的时候存在弯曲半径不连续的情况(图 6),可能会导致绕线困难. 尝试采用弯曲半径连续过渡的方案,用椭圆弧代替第一段反角度圆弧,形成一个类似气球的端部,称为“气球”方案(图 7).

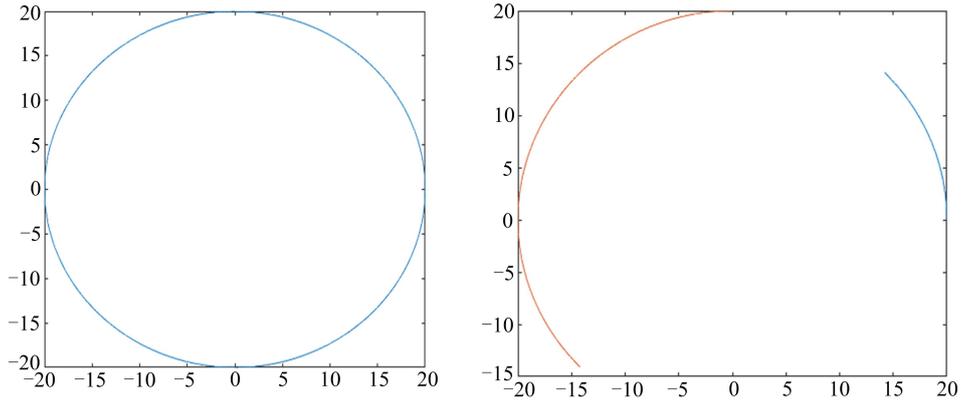


图 4 在 0~360 度圆上取 0~45 度和 90~225 度两段弧

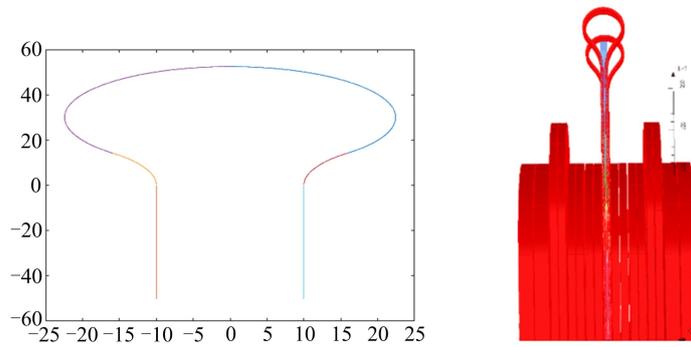


图 5 将两段半径不同的圆弧和直线段拼接起来组成新端部(“钥匙”方案)

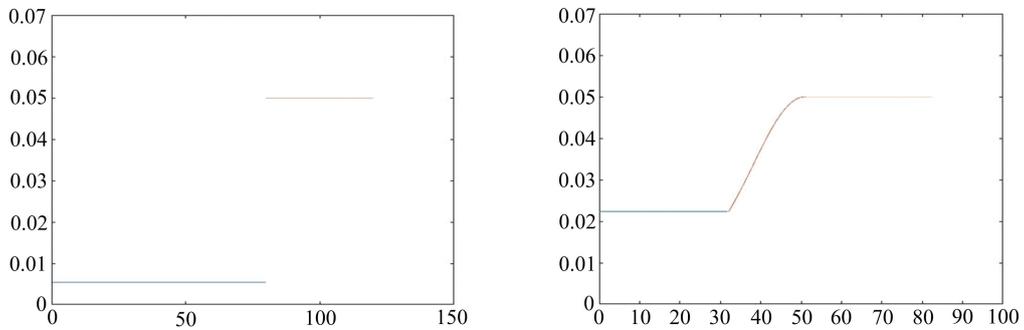


图 6 钥匙方案和气球方案在端部曲率半径的变化

(钥匙方案曲率从 $1/182.79$ 突然变化到 $1/20$, 气球方案从 $1/38.73$ 连续变化到 $1/20$)

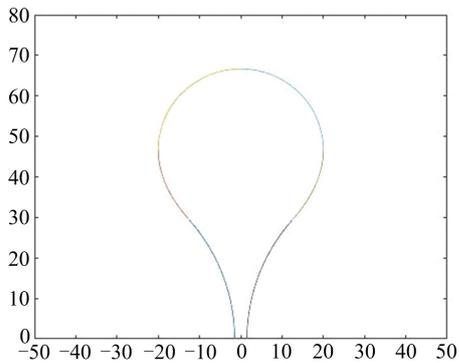


图 7 优化后的端部插入方案曲线(气球方案)

对不同的圆弧角度和椭圆参数进行了数值求解, 以便满足过渡点函数连续, 一阶导数连续, 弯曲半径连续的条件(表 1). 要求端部伸出长度尽可能小以便节省线材, 弯转角度尽可能弥补 Common-coil 线圈结构在端部 B_x 上升导致的磁场与宽边夹角的增加.

表 1 钥匙和气球插入方案参数求解情况

方案	椭圆短轴 长/mm	椭圆长轴 长/mm	第一段弧起始 半径/mm	圆弧角度 /°	端部伸出 长度/mm	端部 1/2 长度/mm
气球 1	80	320	44.09	41.38	66.36	82.14
气球 2	40	80	38.73	43.62	63.96	80.02
气球 3	20	20	20.00	57.45	53.75	71.31
气球 4	100	500	44.79	41.12	66.65	82.4072
钥匙	20	20	182.79	25	105.7	119.9

由于电磁有限元分析软件 opera 自带的导体块无法直接建立椭圆线圈,需要采用弧微元进行累积

来建立新的气球端部模型,通过平移和旋转操作完成建模操作(图 8).

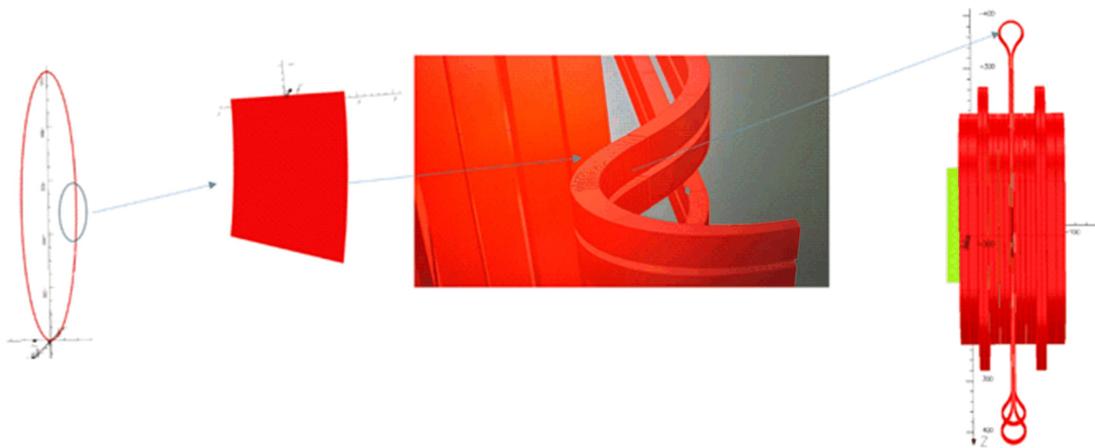


图 8 气球端部 opera 微元建模过程

综合张力优化与端部长度以及 Common-coil 端部角度情况,选取气球参数 2 作为设计参数. 实现了 YBCO 线材宽边在高场 (>10 T) 下与磁场夹角小于 4 度的设计(图 9),理论上 I_c 会相对 TF 角垂直情况下有至少 200% 的提高.

端部方案(钥匙/气球)都可以绕线成功(图 10),气球端部方案绕线难度远远低于钥匙方案,验证了张力分析结果中气球方案优于钥匙方案的结论.

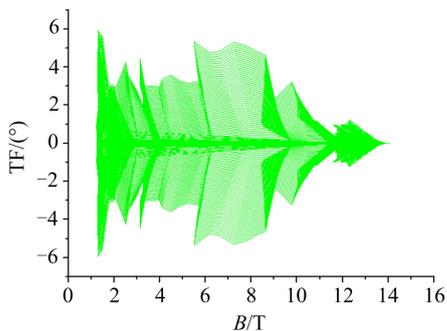


图 9 LPF2-P 插入线圈 TF 角度计算结果

3 线圈绕制

采用不锈钢带和铜带模拟绕线情况,两种新型



图 10 钥匙端部和气球端部模拟线圈绕制



图 11 气球端部高温超导线圈

绕制了按照气球参数 1 设计的高温超导线圈, 所用线材为上海超导公司 4.8 mm 铠装 YBCO 带材, 线材厚度为 0.45 mm, 采用 kapton 绝缘. 直线段长度为 100 mm, 线圈为 11 匝, 77 K 条件下临界电流为 110 A. 在液氮环境下进行了测试, 以 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 作为失超判据, 达到了 110 A 的设计电流. 说明气球方案对线材损伤很小. 基于气球插入方案, 可以将此方案进一步推广到任意空隙的磁体中, 从而利用有限的空间插入更多大弯曲半径线圈, 同时利用高温超导带材的各向异性, 充分利用平行场, 用有限的线材提供尽可能高的磁场.

高温超导线圈的高背景场(10 T)下的测试将在 LPF2 的测试完成后进行. 后续计划在 LPF 系列带孔径的 12 T 高场磁体中进行高温超导线圈的插入,

提供更高的磁场.

4 总 结

基于国内首个高场超导二极磁体的高温超导插入线圈 LPF2-P 已经完成了概念设计及线圈模拟绕制工作. 提出了反角度弧和正角度圆弧光滑拼接的方案, 在 10 mm 的空隙里通过伸出线圈外实现了 20 mm 的弯曲半径. 将第一段反角度弧基于张力原理进行优化, 采用曲率半径连续的椭圆弧, 从而显著减少了绕线时所需张力. 对不同的椭圆参数和圆弧半径进行优化和数值求解, 从而显著减少了线材用量和端部长度, 又充分利用了 YBCO 的平行场特性. 进行了短线圈绕制并且性能测试达到了设计指标.

参 考 文 献

- [1] Chengtao Wang, Da Cheng, Kai Zhang, Yingzhe Wang, Ershuai Kong et al, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, **29** (2019), 4003807.
- [2] Chengtao Wang, Ershuai Kong, Da Cheng, Yingzhe Wang, Kai Zhang, Qingjin Xu, *International Journal of Modern Physics A*, **32** (2017), 1746008.
- [3] G. A. Kirby, J. van Nugteren, A. Ballarino, L. Bottura et al, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, **25** (2015), 4000805.
- [4] J. van Nugteren, G. A. Kirby, G. de Rijk, L. Rossi, H. H. J. ten Kate, and M. M. J. Dhallé, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, **25** (2015), 4000705.
- [5] A Xu, J J Jaroszynski, F Kametani, Z Chen, D C Larbalestier, Y LViouchkov, Y Chen, Y Xie and V Selvamanickam, *Supercond. Sci. Technol.*, **23** (2010), 014003.
- [6] Carmine Senatore, Christian Barth, Marco Bonura, Miloslav Kulich and Giorgio Mondonico, *Sci. Technol.*, **29** (2016), 014002.
- [7] WD Markiewicz1, C A Swenson, *Sci. Technol.*, **23** (2010), 045017.
- [8] Xiaorong Wang, Diego Arbelaez, Shlomo Caspi, Soren O. Prestemon, GianLuca Sabbi, and Tengming Shen, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, **27** (2017)6604010.