

FECR 超导离子源磁体六极模拟线圈的 Mirror 结构设计及测试

朱 丽^{1,2}, 吴 巍², 俞树荣¹, 杜卓越², 陈玉泉², 梅恩铭², 孙良亭²

(1. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050)

(2. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 为了测试单体六极线圈经过绕制、热处理、环氧浸渍等一系列工艺过程后, 电磁性能是否达到设计指标, 设计了能够一定程度上模拟六极磁场及其应力分布的 Mirror 测试结构。由于 Mirror 结构在室温装配过程中采用 Bladder-Key 技术对六极线圈施加预应力, 为了能够模拟从室温装配到冷却降温的操作流程、验证 ANSYS 有限元仿真方法与实验结果的一致性, 依据六极线圈外形尺寸加工了一个模拟线圈。实验结果表明, 铝壳和模拟线圈中心处的应变与 ANSYS 仿真计算结果基本一致, 最大误差均在 10% 以内, 验证了结构设计的合理性和仿真结果的可信性。

关键词: Mirror 结构; 模拟线圈; Nb₃Sn; ANSYS; 应变

中图分类号: TM27

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)12-4035-04

强流重离子加速器装置 (high intensity heavy ion accelerator facility, HIAF) 是由中国科学院近代物理研究所承担的“十二五”规划重大科技基础设施。其中 HIAF 离子源将采用最先进的超导磁铁技术, 研制具有原创结构的复合超导磁体用以产生最强的三维 ECR 等离子体约束磁场, 率先在国际上建成运行于 45 GHz 的第 1 台第 4 代 ECR 离子源装置 (the fourth generation ECR ion source, FECR) [1-3]。该离子源研制的核心技术之一是以 Nb₃Sn 超导线圈为主要技术特点的异型超导磁体, 该磁体系统主要由 6 个 Nb₃Sn 超导六极线圈组件、4 组 Nb₃Sn 超导螺线管线圈组件、径向预应力系统与轴向预应力系统组成 [4]。

室温下对超导磁体的常规预紧方式主要有: (1) 在线圈外, 通过控制紧固带 (不锈钢丝或铝丝) 绕制张力和厚度大小来约束磁体, 如螺线管 [5]; (2) 通过铝壳热套的方式, 如 SECRAL II [6]。Nb₃Sn 超导线材经过热处理之后变为脆性材料, 其性能对应变非常敏感, 当 Nb₃Sn 的应变超过 0.5% 时, 临界电流密度 J_c 下降 50% [7], 即过大的应变很容易使超导导线出现载流能力退化的现象; 过大的应变也会使线圈内的环氧填充物破裂或者线圈变形“位移”生热而引发磁铁失超 [8]。本研究在对单体 Nb₃Sn 六极线圈施加预应力的设计中, 选用了源于美国劳伦斯-伯克利国家实验室

(LBNL) 超导磁体组研发的 Bladder-Key 技术 [9], 该技术具有成本低, 在磁体组装过程中能准确控制线圈预应力的特点 [10]。

为了测试单饼 Nb₃Sn 六极线圈电磁性能是否达到设计指标, 设计了 Mirror [11-13] 测试结构。本研究采用 ANSYS 有限元分析软件, 基于多载荷步对模拟线圈的 Mirror 测试结构在 Bladder 打压、Load-keys 以及冷却降温 3 个阶段进行了三维模拟, 介绍了测试结构的装配流程, 并对实验结果进行了分析。

1 Nb₃Sn 六极线圈的 Mirror 测试结构

单体 Nb₃Sn 超导六极线圈的线材使用西部超导材料公司生产的高场铌三锡线材绕制, 表 1 为导线性能参数。Mirror 测试结构的磁场模拟计算模型见图 1, 由线圈和铁轭构成。其中六极线圈内径 100 mm, 外径 138 mm, 长度 428.5 mm。线圈最大磁场 10.2 T, 运行

表 1 导线性能参数

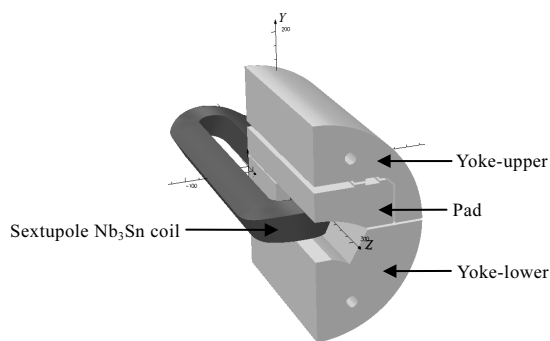
Table 1 Conductor parameters

Parameter	Value
Wire diameter/mm	1.3
Copper/non-copper ratio	1
RRR of the copper matrix	100
Insulation thickness/mm	0.12

收稿日期: 2019-06-11

基金项目: 国家自然科学基金国家重大科研仪器设备研制项目 (11427904); 国家自然科学基金面上项目 (11575266)

作者简介: 朱 丽, 女, 1984 年生, 博士生, 中国科学院近代物理研究所磁场机械技术室, 甘肃 兰州 730000, 电话: 0931-4969023, E-mail: zhuli@impcas.ac.cn

图 1 Nb₃Sn 六极线圈 OPERA 三维模型Fig.1 3D model of Nb₃Sn sextupole coil by OPERA

电流 800 A, 达到了负载线的 80%。线圈上电磁力合力沿 Y 方向, 大小为 67 kN。为了使线圈安全稳定地运行, 在 Mirror 机械结构设计上分别在径向和轴向方向上对线圈进行了预紧。

Mirror 测试结构外径 340 mm, 长度 623 mm。主要由 Nb₃Sn 六极线圈组件、不锈钢 Load-keys、铁轭组件 (Pad、上铁芯和下铁芯)、厚度 20 mm 的 7075 铝壳、直径 20 mm 的 4 组 7075 拉杆以及 30 mm 厚的 2 个不锈钢端板组成, 如图 2 所示。六极线圈绕制在由纯铁和钛合金组成的芯轴上, 线圈两端配上铝铜端靴后, 一起进行热处理和环氧真空浸渍。

在室温装配过程中, 利用 Bladder-Key 技术, 通过在结构中塞入 Load-keys 完成对六极线圈内部施加预应力的目的。采用液压千斤顶 PISTON 同时对 4 个

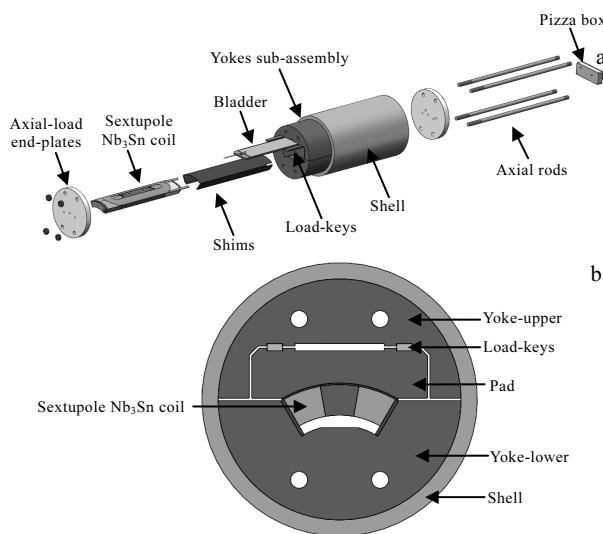


图 2 Mirror 三维模型

Fig.2 3D model of the Mirror structure: (a) exploded view and (b) cross-section along the magnet radial

拉杆进行预紧, 通过垫板的传递实现了对线圈轴向方向的预紧。待径向方向结构装配完成后, 才可进行轴向方向的装配。由于各部件热收缩系数的差异, Nb₃Sn 六极线圈在降温过程中又得到了进一步的预紧。

2 模拟线圈 Mirror 结构

2.1 机械结构分析

由于 Mirror 测试结构在径向方向左右对称, 针对 6061-T6 模拟线圈, 在 Mechanical APDL 界面中利用自底向上的建模方法对四分之一 Mirror 测试结构进行了建模, 模型包括模拟线圈、垫板组件、Load-keys、铁轭组件和铝壳。表 2 列出了测试结构中材料的低温特性。采用六面体 20 节点二次体单元 SOLID186 对模型进行网格划分, 共形成 190 844 个节点及 40 670 个单元, 网格划分如图 3 所示。为了反映实际接触状态, ANSYS 使用接触对完成接触计算。通过接触单元 (conta174 和 targe170) 建立的接触对实现各零部件之间的载荷传递。

基于多载荷步对模拟线圈施加预应力的 3 个过程进行了非线性仿真计算: (1) Bladder 打压: 分别在 2 个接触面上 (Bladder 和上铁芯、Bladder 和 Pad) 施加均布载荷用于模拟 Bladder 中高压水对测试结构的作用。上铁芯和 Pad 之间被“打开”一定间隙的同时铝壳受拉、线圈受压。“打开”间隙随 Bladder 压力大

表 2 有限元模型中各向同性参数

Material	Young's modulus/GPa		Thermal expansion/ $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Poisson's ratio
	293 K	77 K		
Al	70	79	18.0	0.34
DT4	213	224	8.79	0.28
SS 316 LN	193	210	13.0	0.28
G10	30	30	29.0	0.3

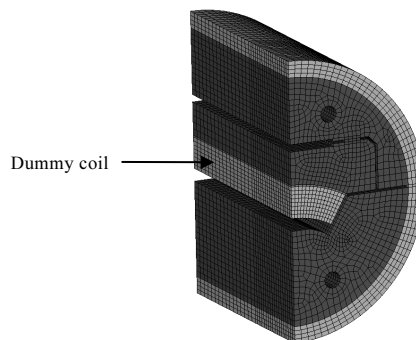


图 3 三维有限元分析模型

Fig.3 3D finite element model

小呈线性关系。(2) 塞入 Load-keys: 在 Bladder 压力作用下, 依据线圈应变大小, 通过上铁芯和 key 之间的接触关系给出我们所需的 Load-keys, 最后泄去 Bladder 压力。(3) 77 K 冷却降温: 测试结构由 300 K 降到 77 K 时, 各部件由于热收缩系数差异导致的相互约束而产生的热应力载荷, 线圈进一步受压。

Mirror 测试结构在室温装配过程中, Bladder 打压 20 MPa, 模拟线圈最大等效应力 76.7 MPa。当插入 Load-keys 后, 等效应力减小为 32.8 MPa, 见图 4。在冷却降温时, 线圈等效应力又增大到 112 MPa。从室温到降温过程中, 模拟线圈环向应力始终小于 0, 处于压应力状态。仿真结果表明, 在对 Nb_3Sn 超导六极线圈进行室温预紧、降温和励磁计算中, 依据六极线圈电磁力大小, 对线圈在室温和低温中加载适当的预紧力后, 在加载电磁力时, Mirror 测试结构中的六极线圈仍然保持径向压缩。

2.2 实验结果分析

利用辅助工装将模拟线圈、Pad、Key、上下铁芯和铝壳安装好后, 将 110 mm×500 mm 的 Bladder 及其垫板插入 Mirror 结构中, 利用高压增压系统将 20 MPa 的水压注入 Bladder, Key 位置上会产生一个间隙, 监控模拟线圈和铝壳中心处的应变值, 塞入给定的 Load-keys, 卸压 Bladder, 见图 5a。在将 Bladder 和垫板从测试结构取出的过程中, 模拟线圈和铝壳的应变值基本保持稳定, 波动范围 ($\pm 5 \mu\epsilon$), 说明 Load-keys 已经将测试结构完全预紧了。将预紧好的 Mirror 结构放入液氮槽, 缓慢注入液氮, 直至模拟线圈和铝壳的应变值不再发生变化 (测试结构完全浸泡在了液氮里), 见图 5b。至此完成了 Mirror 测试结构对模拟线圈的全部预紧。

利用电阻应变片技术对模拟线圈和铝壳表面中心位置进行了实时应变监测, 贴片位置见图 6。Bladder



图 5 室温预紧和降温预紧现场照片

Fig.5 Photos of the scene: (a) the room temperature pre-load and (b) the cool-down preload



图 6 应变片布置示意图

Fig.6 Schematic of strain gauge layout

打压及 Load-keys 过程中, 通过 Mirror 测试结构对模拟线圈施加了均布压应力; 随着温度的降低, 铝壳的环向拉应变逐渐增大, 相应地线圈压应变也随之增大。模型线圈加载预应力 3 个过程中线圈和铝壳中心处理论应变和实验应变的比较, 见图 7。由于手动控制高

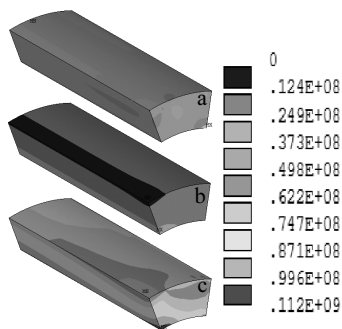


图 4 线圈等效应力

Fig.4 Von Mises stress in the dummy coil: (a) bladder operation, (b) load-keys, and (c) cool-down

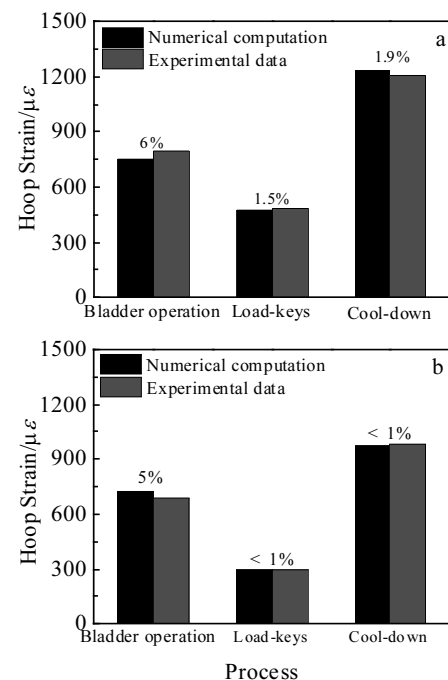


图 7 模拟线圈和铝壳的应变

Fig.7 Strain of dummy coil (a) and shell (b)

压增压系统压力、机械加工、装配误差、实验测量误差以及物性参数等不可避免因素的存在,使得理论和实验数据存在一定的差异,但最大误差均在 10%以内。说明在考虑实际装配流程和接触分析后,对模拟线圈施加预应力仿真计算的可行性。

3 结 论

1) 介绍了 Nb₃Sn 六极线圈 Mirror 测试结构的组成。为了能够在线圈上准确施加预应力,依据线圈外形尺寸,一比一制作了单饼模拟六极线圈。

2) 运用 ANSYS 有限元软件分析了模拟线圈 Mirror 测试结构在室温预紧和冷却降温过程中的应力应变,并与实验测试结果进行了对比与分析,所得结果吻合良好,验证了结构设计的合理性和仿真结果的可信性。能够为 Mirror 测试结构中单体 Nb₃Sn 六极线圈在 Bladder 打压、Load-keys、冷却和励磁过程中施加预应力提供指导和预测。

参考文献 References

- [1] Yang J C, Xia J W, Xiao G Q *et al. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B*[J], 2013, 317: 263
- [2] Zhao H W, Sun L T, Guo J W *et al. 16th International Conference on Ion Sources*[C]. New York: ThuPS26, 2015
- [3] Sabbi G S, Hafalia A, Juchno M *et al. Design of the Nb₃Sn Superconducting Magnet System for the 45GHz ECR Ion Source at IMP LBNL Report*, 2001036[R]. San Francisco: LBNL, 2017
- [4] Juchno M, Hafalia A, Lu W *et al. IEEE Trans Appl Supercon* [J], 2018, 28(3): 4 602 806
- [5] Yang Tongjun, Yuan Ping, Zhou Luncai *et al. IEEE Trans Appl Supercon*[J], 2016, 26(4): 4 004 105
- [6] Guan Mingzhi, Hu Qiang, Gao Peifeng *et al. Chin Phys Lett*[J], 2016, 33(5): 058 502
- [7] Wang Qiuliang(王秋良). *High Magnetic Field Superconducting Magnet Science*(高磁场超导磁体科学)[M]. Beijing: Science Press, 2007: 13
- [8] Pan Heng(潘 衡), Wang Li(王 莉), Wu Hong(吴 红) *et al. Journal of Harbin Institute of Technology*(哈尔滨工业大学学报)[J], 2011, 43(7): 107
- [9] Caspi S, Gourlay S, Hafalia R *et al. IEEE Trans Appl Supercon*[J], 2001, 11(1): 2272
- [10] Caspi S, Bartlett S E, Dietderich D R *et al. IEEE Trans Appl Supercon*[J], 2004, 14(2): 235
- [11] Chichili D R, Ambrosio G, Andreev N *et al. AIP Conference Proceedings*[J], 2004, 710: 775
- [12] Zlobin A V, Andreev N, Barzi E *et al. AIP Conference Proceedings*[J], 2010, 1218: 1031
- [13] Andreev N, Barzi E, Bossert R *et al. IEEE Trans Appl Supercon*[J], 2010, 20(3): 288

Mechanical Design and Testing of the Magnet Mirror Structure for Dummy Coil of a Superconducting FECR Ion Source

Zhu Li^{1,2}, Wu Wei², Yu Shurong¹, Du Zhuoyue², Chen Yuquan², Mei Enming², Sun Liangting²

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To test the performance of the individual sextupole coil after the process of winding, heat treatment and vacuum-impregnation, a Mirror structure based on a Bladder and Key technology during the magnet assembly was devised. In order to simulate the assembly procedure from bladder and key pre-stress at room temperature through cool-down and verify the proposed method with ANSYS, a dummy coil according to the size of the sextupole Nb₃Sn coil was got. Test results of the strain in the middle of shell and dummy coil exhibit a very good agreement with expected results calculated with the structural analysis program ANSYS, and the maximum error is less than 10%. The result verifies the rationality of the Mirror structure design and the credibility of simulation results.

Key words: Mirror structure; dummy coil; Nb₃Sn; ANSYS; strain

Corresponding author: Wu Wei, Ph. D., Professor, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China, Tel: 0086-931-4969022, E-mail: wuwei@impcas.ac.cn