

FECR 超导离子源 Nb₃Sn 磁体半长度样机的结构分析

朱丽^{1,2}, 吴巍², 孙良亭², 俞树荣¹, 陈玉泉², 吴北民², 梅恩铭²,
辛灿杰², 关明智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: 中国科学院近代物理研究所正在研制运行于 45 GHz 的世界首台第 4 代电子回旋共振离子源 (fourth electron cyclotron resonance, FECR)。该离子源磁体线圈全部采用 Nb₃Sn (铌三锡) 超导材料制作, 这一超导材料临界性能对应力敏感, 加之磁体中六极线圈和螺线管线圈之间的应力不平衡分布, 导致磁铁机械结构设计面临极大挑战。为了验证离子源磁铁结构设计的合理性和仿真结果的可信性, 为全尺寸真机的研制奠定技术基础, 设计了能够一定程度上反映离子源磁体机械结构的半长度样机。主要介绍了 FECR 半长度样机的三维机械结构分析, 借助 ANSYS 有限元软件分析了磁铁在室温组装、冷却降温 and 加电励磁时的应力分布和变化情况, 为磁体装配提供预应力参考。

关键词: FECR 离子源; Nb₃Sn; 六极线圈; 螺线管; ANSYS; 应力

中图分类号: TH142.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)09-3177-05

低能量强流离子加速器装置项目 (low energy heavy ion accelerator facility, LEAF) 是由中国科学院近代物理研究所承担, 受国家自然科学基金委重大科学仪器项目全额资助建设的多用途重离子实验研究装置平台。平台核心系统包括: 1 台强流高电荷态 ECR 离子源、低能量束流传输束运线、1 个 300 kV 高压平台、1 台 81.25 MHz 四翼型连续波 RFQ (radio frequency quadrupole) 加速器以及相应的实验物理终端等。为满足 LEAF 装置的高性能需要, 设计采用运行于 45 GHz 的第 4 代高电荷态 ECR 离子源, 称之为 FECR (the fourth generation ECR ion source), 该离子源采用最新的高场 Nb₃Sn 材料制作全部超导线圈来满足高场性能, 其研制成功将成为世界上首台第 4 代 ECR 离子源装置和全 Nb₃Sn 离子源高场磁体。

中科院近物所与美国劳伦斯-伯克利国家实验室 (LBNL) 共同合作完成了 FECR 超导离子源磁体的磁场和机械结构设计^[1,2]。结构设计采用壳基支撑结构^[3], 在室温装配中利用 Bladder-Key^[4-7] 技术对线圈进行精确预紧, 相比传统的 Collar 结构, 这种新型支撑结构能够利用最外层的铝壳分步对线圈施加预紧力, 从而避免室温装配后对线圈施加过大的预应力而导致 J_c 衰

减。FECR 超导离子源磁体主要有 6 个 Nb₃Sn 超导六极线圈、4 个 Nb₃Sn 超导螺线管线圈、各子单元间的机械连接件、线圈预紧结构、线圈引线结构等组成。为了顺利研制出 FECR 磁体, 设计了能够一定程度上反映磁体机械结构的半长度样机。样机与真机相比, 半径方向尺寸一致, 长度有接近一半的减少量。本研究主要详细介绍半长度样机的有限元机械结构模型、载荷加载和计算流程, 并对仿真结果进行分析。

1 电磁分析

FECR 半长度样机磁体的三维有限元磁场模型见图 1, 由 6 个六极线圈 (内径 200 mm, 厚度 38 mm, 长度 457.4 mm)、2 个螺线管 (内径 336 mm, 厚度 47 mm, 长度 60 mm)、衬垫 (Pads)、主要垫板 (Master plate)、铁轭 (Yoke) 和真空屏蔽层 (Vacuum shield) 组成。六极线圈的超导线均采用西部超导材料公司生产的内锡法铌三锡线材绕制而成。其裸线截面尺寸 $\Phi 1.3$ mm, S-glass 编织绝缘后截面尺寸 $\Phi 1.524$ mm, 铜超比 1.15~1.25, 扭矩 40~50 mm, 芯丝直径 120 μ m, RRR 值大于 100。六极线圈设计运行电流 523.2 A, 最大磁场 9.03 T; 螺线管线圈运行电流 553.6 A, 最大磁

收稿日期: 2019-12-31

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铁技术室, 甘肃 兰州 730000, 电话: 0931-4969022, E-mail: zhuli@impcas.ac.cn

场 9.37 T。表 1 分别给出了六极线圈和螺线管线圈在 3 个方向上的电磁力分量。为了避免六极线圈之间、六极线圈与螺线管之间、2 个螺线管之间以及线圈与周边铁磁环境之间复杂电磁力导致的过大应力应变，设计了相应的三维机械约束结构。

2 机械结构分析

2.1 机械设计标准

Nb_3Sn 是具有脆性的 A15 晶体结构，材料超导性能易受应变的影响，因此要求 Nb_3Sn 线圈的等效应力在室温组装下小于 100 MPa，在冷却降温（4.3 K）和加电励磁下小于 150 MPa； Nb_3Sn 六极线圈、芯轴和端靴通过环氧真空浸渍成为一体，FECR 半长度样机

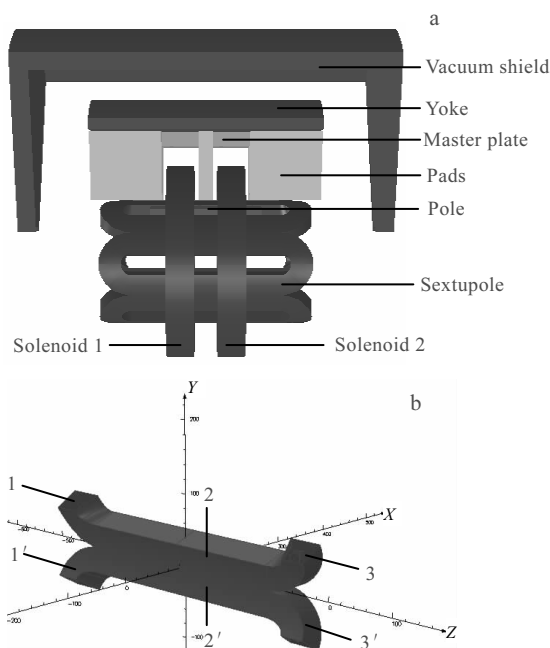


图 1 FECR 半长度样机的 OPERA 三维模型

Fig.1 OPERA 3D model: (a) components of a half-length prototype of the FECR magnet and (b) the sextupole coils

表 1 线圈上的电磁力

Table 1 Magnetic forces in magnet coils

Parameter	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN
Sextupole end 1	39.7	-8.5	-17.4
Sextupole end 1'	-1.2	71.4	-52.2
Sextupole straight 2	114.6	-293.2	-
Sextupole straight 2'	114.5	293.5	-
Sextupole end 3	-1.2	-70.9	52.3
Sextupole end 3'	39.6	8.3	17.3
Solenoid 1	-	-	1173.8
Solenoid 2	-	-	-1173.8

结构提供的环向应力和轴向应力要使线圈和芯轴之间始终保持接触压应力状态。

纯铁材料的铁素体为体心立方结构，低温下存在脆性，要求第一主应力在 4.3 K 环境下小于等于 200 MPa。铝合金 Al7075 的屈服应力室温时 480 MPa，4.3 K 时为 690 MPa；316LN 材料在室温时的屈服应力 286 MPa，在 4.3 K 的屈服应力 930 MPa；钛合金 Ti6Al4V 的屈服应力在室温和液氦温区下分别为 827 和 1654 MPa。

2.2 机械结构模型

FECR 样机磁体系统为 6 个六极线圈沿环向均布而成，依据其结构对称性在 Mechanical APDL 界面中利用自底向上的建模方法对 1/6 样机进行了建模，建模时要求所有的零件均不能“Glue”（共用单元节点）在一起以实现接触分析。如图 2 所示，FECR 样机机械结构模型主要由超导六极线圈组件、超导螺线管线圈组件、径向预应力组件和轴向预应力组件构成。采用六面体 20 节点二次单元 Solid186 对 Nb_3Sn 线圈进行网格划分，其它零件采用六面体 8 节点线性单元 Solid185，此外，需通过目标单元 Target170 和接触单元 Conta174，在有限元模型上建立若干不同类型的接触对来实现接触分析。

2.2.1 六极线圈组件

六极线圈采用 Nb_3Sn 超导导线绕制在芯轴上，在线圈两端配上铝青铜合金端靴后，进行热处理和后续的环氧真空浸渍。线圈外置 6 个不锈钢 Collar，通过螺钉对线圈进行初步固定，见图 3。室温径向 Load-keys 装配时，通过径向预应力组件与 Collar 平面的接触实

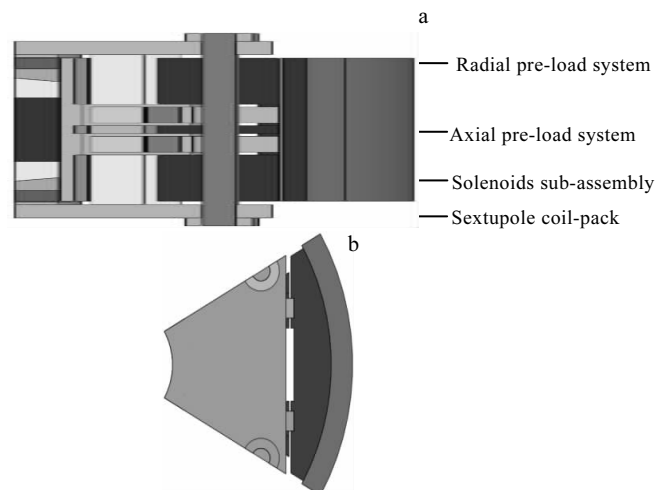


图 2 FECR 半长度样机的三维有限元分析模型

Fig.2 3D finite element model of a half-length prototype of the FECR magnet: (a) along the magnet length and (b) along the magnet hoop

现了对六极线圈的初步预紧；室温轴向 Piston（液压千斤顶）打压装配过程中，线圈轴向方向的预应力通过线圈端靴与轴向预应力组件 G10 垫板间的接触进行传递。冷却降温过程中，各部件由于热收缩系数的差异导致产生热应力载荷，进而完成对六极线圈的进一步径向预紧，达到最终的设计预应力要求。

2.2.2 超导螺线管线圈组件

螺线管线圈绕制完成后，在外层绑扎 2 mm 厚的不锈钢丝进行初步固定，其中不锈钢丝的绕制张力为 3 kg。然后对线圈进行热处理和真空浇注，待环氧浇注完成后使用应力 55 MPa 绕制铝合金带 30 mm 厚，对线圈施加径向预应力。FECR 样机在室温装配和冷却降温过程中，利用径向预紧装置 Master plate 和螺线管 Pad 的均匀接触，完成对线圈径向方向的全部预紧。连接件 1 和连接件 2 利用螺钉固定在螺线管骨架上，通过轴向预应力组件端板和连接件 1 的接触，实现对线圈的轴向预紧（图 4）。

2.2.3 径向预应力组件

模型包括外径 788 mm，长度 537 mm，厚 35 mm 的 7075 铝合金壳、纯铁 Yoke、不锈钢 Load-keys、纯铁 Master plate 和纯铁 Pad，见图 5 所示。径向预紧力组件利用 Bladder-Key 技术对 Nb₃Sn 六极线圈和螺线管进行径向预紧。

2.2.4 轴向预应力组件

由 50 mm 厚的不锈钢端板、直径 30 mm 的六根 7075 铝杆、螺母、不锈钢及 G10 垫板组成，如图 6 所示。轴向预应力组件采用液压千斤顶 Piston 技术对线圈轴向方向进行预紧。

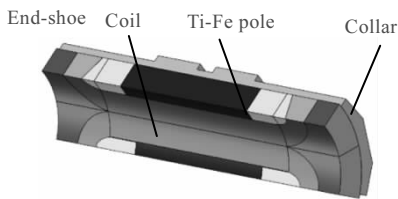


图 3 Nb₃Sn 六极线圈组件
Fig.3 Nb₃Sn sextupole coil-pack

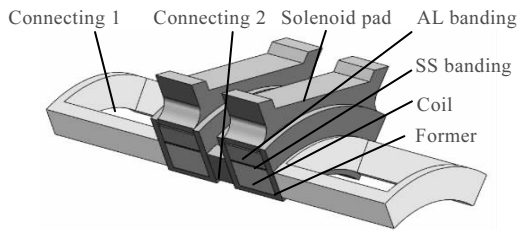


图 4 Nb₃Sn 超导螺线管线圈组件
Fig.4 Nb₃Sn solenoids sub-assembly

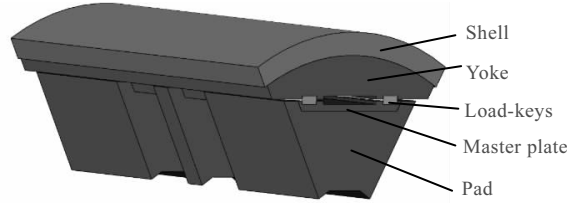


图 5 径向预应力组件
Fig.5 Radial pre-load system

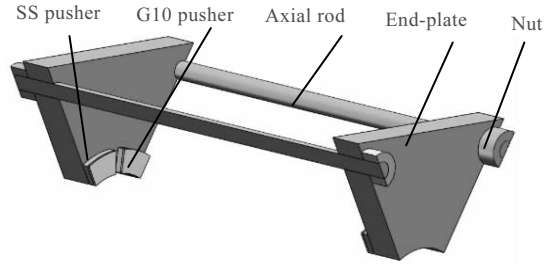


图 6 轴向预应力组件
Fig.6 Axial pre-load system

2.3 边界条件及载荷

在 FECR 样机模型的对称面上，通过命令 Dsymm 施加对称边界条件。基于单元生死技术和多载荷步对有限元模型在室温组装、冷却和加电励磁过程进行非线性仿真计算：

(1) Bladder 打压：为了模拟 Bladder 中高压水对 FECR 样机的作用，分别在 Yoke 和 Master plate 平面上施加均布压应力载荷，与此同时 Yoke 和 Load-keys 间出现一个间隙。

(2) 径向预应力：过盈接触对设置于 Load-keys 和 Yoke 之间，通过改变过盈接触对中的偏移量来控制线圈上的预应力，从而模拟室温径向装配时 Bladder-Key 的预紧操作。

(3) 轴向预应力：在径向方向预紧完成的基础上，为了模拟液压千斤顶 Piston 对线圈的轴向预紧，分别设置了不锈钢垫板与端板、螺母与端板、连接件 1 与端板间的过盈接触对。

(4) 冷却降温 4.3 K：保持室温装配力学分析中施加的载荷不变，在此基础上，设置参考温度（Tref）为 293 K，通过 Bfunif 命令给整个模型施加温度载荷 4.3 K。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，线圈将被进一步预紧。

(5) 加电励磁：在上述载荷的基础上，把 OPERA 三维有限元磁场模型计算出的六极线圈和螺线管的磁力导入到 ANSYS 机械模型的单元节点上，完成励磁。

2.4 材料属性

FECR 样机磁体所用的材料有超导 Nb₃Sn 超导线、钛合金、铝铜、纯铁、铝合金、另外还有 316L 型不锈钢、G10 复合材料，各材料的力学性能见表 2。

2.5 有限元计算结果

2.5.1 Bladder 打压

图 7 所示当 6 个 Bladder 同时打压到 18 MPa 时所对应的 Load-keys 间隙，其中最小间隙 271 μm。由于边界对称性，FECR 样机机械结构模型只能模拟所有 Bladder 同时作用的工况。而在实际打压操作过程中，由于同时打压会在磁体组件中产生更大的应力和变形，所以这种打压方式只在最初 Load-keys 时使用。当 Load-keys 接近目标过盈量 150 μm 时，同一时间内只对一个 Bladder 进行打压，进而完成对线圈的室温径向预紧。

2.5.2 六极线圈

机械结构分析的目的在于不断优化线圈上的预应力以保证在励磁过程中，线圈始终处于压缩状态。图 8 所示为六极线圈在室温组装（径向目标过盈量 Load-keys 为 150 μm，拉杆轴向预应力 73.9 MPa）、降温至 4.3 K 和励磁到设计电流时 Von-Mises 的应力分布。为了便于观察整个过程中线圈的应力变化，图 8a, 8b, 8c 中的应力云图均采用相同的尺度。降温后，铝壳和轴向拉杆提供的预紧力进一步增加，线圈的应力水平也相应增加；励磁后，由于施加了足够的预紧力，

表 2 有限元模型中各向同性参数

Table 2 Isotropic material properties in the FE-model

Material	Young's modulus/GPa		Thermal expansion/ × 10 ⁻⁶ K ⁻¹	Poisson's ratio
	293 K	4.3 K		
Coil	41	41	11.6	0.3
Ti 6Al 4V	130	130	6.03	0.3
C51000	110	120	10.8	0.3
Iron	213	224	6.82	0.28
Al 7075	70	79	14.5	0.34
SS 316 LN	193	210	9.83	0.28
G10	30	30	24.4	0.3



图 7 Bladder 同时打压 18 MPa 时对应的 Load-keys 间隙
Fig.7 Load-keys gap opened with all bladders pressurized at the same time up to 18 MPa

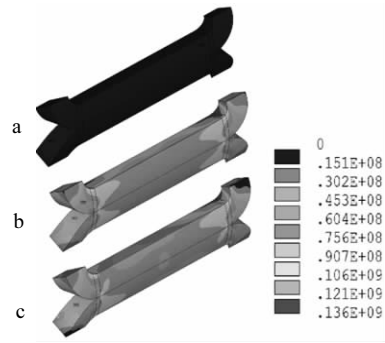


图 8 六极线圈 Von-Mises 应力

Fig.8 Von Mises stress in the sextupole coil: (a) assembly, (b) cool-down, and (c) magnetic excitation

线圈的应变水平几乎保持不变。线圈上的最大应力依次为 14.6, 135, 136 MPa。

六极线圈、芯轴和端靴是通过 CTD-101 环氧真空浸渍成为一个整体。图 9 显示在电磁力作用下，线圈、芯轴和端靴之间的接触压力。线圈经过室温装配、液氮降温 and 加电励磁后，在 FECR 样机径向预应力组件和轴向预紧结构的作用下，六极线圈和芯轴之间始终保持接触压应力状态。

2.5.3 螺线管线圈

螺线管线圈径向方向的预应力由 30 mm 厚的预紧铝带及 FECR 径向预紧结构提供。螺线管线圈在室温装配后，最大 Von-Mises 应力为 26.5 MPa。经过 4.3 K 降温后，应力增大到 71.3 MPa。在加电励磁时，线圈上的最大应力基本不变，为 75.5 MPa（图 10 所示），表明降温后施加给线圈上的预应力是足够的。分析结果表明：当加电励磁时，线圈保持径向压缩并且线圈内径表面与骨架之间基本处于接触状态。

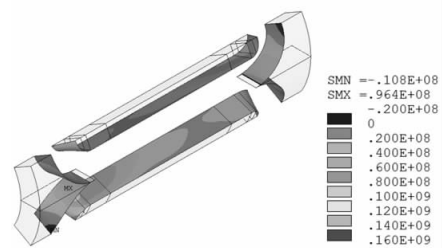


图 9 励磁时六极线圈、芯轴和端靴之间的接触应力

Fig.9 Contact pressure between the sextupole coil and pole/end-shoe when magnetic forces is applied to the coil

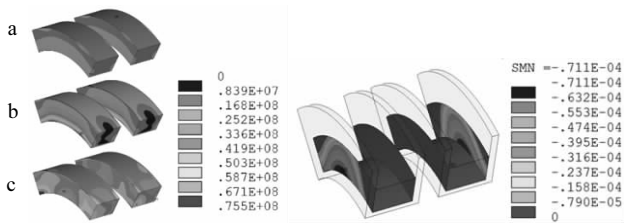


图 10 螺线管线圈 Von-Mises 应力; 励磁时线圈和骨架间的接触间隙

Fig.10 Von Mises stress distribution in the solenoid coils (left): (a) assembly, (b) cool-down, and (c) magnetic excitation; contact gap between solenoid coils and their formers when magnetic forces are applied (right)

3 结 论

1) 基于 Nb₃Sn 线圈及其它零部件的设计准则, 通过有限元分析软件 ANSYS 对 FE CR 半长度样机在室温组装、降温至 4.3 K 和励磁到设计电流进行了全过程的仿真计算。励磁后, 六极线圈的最大等效应力是 136 MPa, 螺线管线圈的最大等效应力为 75.5 MPa。

2) 目前, 所有样机的零部件已全部加工完成、6

个 Nb₃Sn 六极线圈和 2 个 Nb₃Sn 螺线管线圈也基本就绪, 等待最终的组装测试。

致 谢: 作者感谢西部超导材料科技股份有限公司李超和马鹏给予的宝贵建议。

参考文献 References

- [1] 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
- [2] Juchno M, Hafalia A, Lu W *et al.* *IEEE Trans Appl Supercon* [J], 2018, 28(3): 4 602 806
- [3] Zhang Kai(张 恺). *Thesis for Doctorate(博士论文)*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018
- [4] Caspi S, Gourlay S, Hafalia R *et al.* *IEEE Trans Appl Supercon*[J], 2001, 11(1): 2272
- [5] Ferracin P, Bartlett S, Caspi S *et al.* *IEEE Trans Appl Supercon*[J], 2005, 15(2): 1132
- [6] Bartlett S, Caspi S, Dietderich D *et al.* *IEEE Trans Appl Supercon*[J], 2005, 15(2): 1136
- [7] Caspi S, Ambrosio G, Andreev N *et al.* *IEEE Trans Appl Supercon*[J], 2006, 16(2): 358

Mechanical Design of the Half-length Prototype for a Superconducting FE CR Ion Source

Zhu Li^{1,2}, Wu Wei², Sun Liangting², Yu Shurong¹, Chen Yuquan², Wu Beimin², Mei Enming², Xin Canjie²,
Guan Mingzhi²

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

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

Abstract: The new Nb₃Sn superconducting magnet system for the fourth-generation 45 GHz ECR source (FE CR) is under developing in the Institute of Modern Physics (IMP). Because the magnet is made from Nb₃Sn which is sensitive to the strain and there are strong Lorentz forces between the solenoids and sextupole coils, the mechanical structure design is a big challenge. In order to verify the reasonability and feasibility of the structure design and its simulation results, a half-length prototype of the FE CR magnet was developed. This paper presented the detailed design of the magnet structure. The stress distribution and variation of the prototype during assembly, cooling down and charging have been got with the three-dimensional finite-element model and are presented in the paper. The results will be used as reference of the room-temperature magnet assembly.

Key words: FE CR ion source; Nb₃Sn; sextupole; solenoid; ANSYS; stress

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