

CCT 型超导磁体结构分析

周伦才^{1,2}, 赵荣珍¹, 陈玉泉², 梁羽², 辛灿杰²

(1. 兰州理工大学, 兰州 730050; 2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: CCT(Canted - Cosine - Theta) 型超导磁体为一种新型的磁体结构, 它的导体轨迹符合一定的空间曲线方程, 磁场则是由多层线圈组合而产生。超导线圈绕制在骨架的特定线槽中, 导线之间由骨架隔开, 以阻断电磁力的累积。利用磁体周期性轴向对称特点建立了有限元分析模型, 对磁体在降温 and 加载电磁力作用下进行了结构分析, 通过研制样机, 首次在磁体内部埋入光纤光栅传感器以监测线圈内部温度和形变。测试结果与分析结果相吻合。

关键词: CCT; 超导磁体; 光纤光栅传感器

中图分类号: TL503

文献标识码: A

DOI: 10.16711/j.1001-7100.2021.11.004

Structure analysis of CCT superconducting magnet

Zhou Luncai^{1,2}, Zhao Rongzhen¹, Chen Yuquan², Liang Yu², Xin Canjie²

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

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

Abstract: The magnetic field of CCT(Canted - Cosine - Theta) superconducting magnet is generated by the combination of multilayer innovation coils which trajectory conforms to a certain space curve equation. Each turn of the coils are embedded in a channel (skeleton) , and the wires are separated by ribs to prevent the accumulation of electromagnetic force. In this paper, the finite element analysis model was established based on the periodic axial symmetry of the magnet, and the structure analysis of the prototype was presented during cooling and operation. Through the development of prototype, the fiber bragg grating sensors were embedded in the magnet for the first time to monitor the temperature and deformation in the coils. The test results are consistent with the analysis results.

Keywords: Canted - Cosine - Theta, Superconducting magnet, Fiber bragg grating sensors

1 引言

有别于常规的超导线圈结构, CCT 型超导磁体由多层相对于孔轴倾斜的线圈组成, 通过控制线圈电流方向, 横向磁场在线圈轴向重合段叠加, 而轴向磁场被抵消, 从而获得所需磁场分布^[1]。相较于传统超导磁体, CCT 超导磁体具有较高的积分场均匀度、多极磁场灵活组合的特点; 在结构方面, CCT 超导磁体具有模块化、冷质量轻、好场区孔径大、线圈绕制工艺简单等优势。目前, 作为一种新型线圈结构, CCT 超导磁体技术受到了广泛关注, 美国 LBNL 已研制了多台 CCT 超导二极磁体样机^[2-4]; 欧洲 CERN 为 LHC 升级项目已研制了单孔和双孔 CCT 超导二极磁体样机^[5,6]; 为

减轻重量, 医用加速器领域正引入弯曲斜螺线管型磁体技术^[7,8]; 我国强流重离子加速器(HIAF) 中的放射性次级束流分离器(HFRS) 磁铁要求大磁刚度、大接受度、高动量分辨率, 也将采用 CCT 超导磁体技术作为主选方案^[9]。

超导体受电磁力和热应力作用产生的应变是引起磁体失超的主要原因之一^[10], 高温超导材料对应变非常敏感, 传统超导线圈励磁过程存在电磁力累积, 给高场高温超导磁体设计带来挑战, 从而限制了高温超导材料的大规模使用。与传统超导磁体相比, CCT 超导磁体结构最显著的优势是线圈具有更低的应力分布^[11], 目前, Bi 系和 Y 系超导材料已在 CCT 超导磁体中得到应用, 在 LBNL 研制的 CCT 超导组合二极磁体(18 T) 中,

收稿日期: 2021 - 06 - 16

基金项目: 中国科学院战略先导专项 B 类(Y815010) 资助。

作者简介: 周伦才(1981 -) 男, 高级工程师, 主要从事超导磁体技术研究。

内层线圈超导体采用 Bi2212 ,外层线圈超导体采用 Nb₃Sn ,由于线圈匝间电磁力被阻隔 ,使得磁体在励磁过程中超导体 Bi2212 和 Nb₃Sn 受到的最大应力小于 74 MPa 和 54 MPa^[11]; 在一项对比研究中 ,REBCO 带材 CCT 线圈比 Cos - theta 线圈具有更强的载流能力^[12]。目前 ,各型 CCT 超导磁体正引起研究人员的重视 ,但对磁体在励磁过程中内部结构应力应变情况的研究还处于理论分析阶段。本文首先对磁体进行有限元结构分析 ,并通过样机研制 ,首次在磁体内部埋入光纤光栅传感器以测试磁体内部温度和形变。

2 CCT 超导磁体结构

CCT 超导磁体通过将线圈固定在特定位置以获得所设计的磁场 ,线圈轨迹沿圆柱形表面呈螺旋状等节距周期性对称分布 ,导体中心点轨迹参数方程如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} x(\theta) = R\cos(\theta) \\ y(\theta) = R\sin(\theta) \\ z(\theta) = R\sin(N\theta)\cot(\alpha) + \frac{L\theta}{2\pi} \end{cases} \quad (1)$$

其中 , R 为线圈半径 , θ 为方位角 , L 代表线圈沿轴向方向的周期对称匝间距 , α 为线圈与水平面的夹角 , N 为磁极数。

图 1 所示为 $N=2$ 时 ,导体的轨迹与式 (1) 中的参量含义。

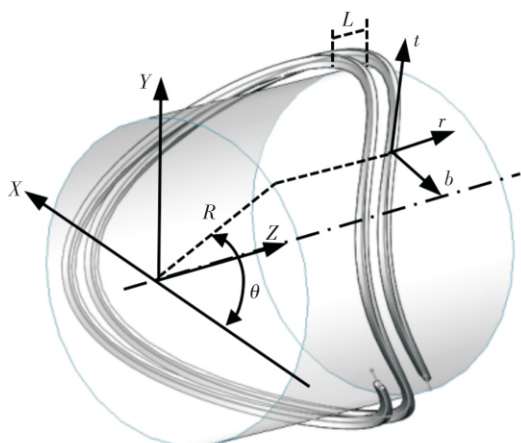


图 1 CCT 型四极磁体导体示意图

Fig. 1 Schematic of conductor for CCT quadrupole magnet

CCT 线圈结构最显著的优势是通过线槽之间的翅片对槽内单匝导体进行约束(如图 2 所示)。各匝导体上的电磁力均被约束在各自的线

槽内 ,导体之间不存在直接相互作用。为实现对导体的约束 ,在线圈匝间和层间均设置了间隙 ,将这些间隙进行实体填充 ,从而形成了导体支撑骨架(图 2)。

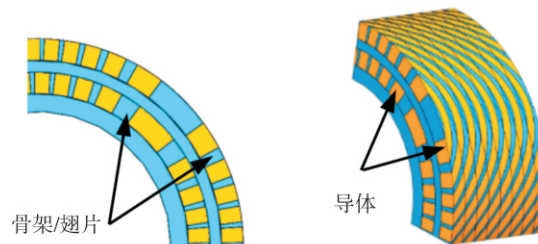


图 2 导体与骨架位置关系

Fig. 2 Spatial distribution of conductor and skeleton

在磁体制造过程中 ,首先在圆筒外表面按导体轨迹和截面尺寸加工线槽作为线圈骨架 ,导体沿线槽进行绕制 ,最后进行真空环氧浸渍使导体与骨架形成整体。四极磁体样机采用两层线圈 ,结构尺寸参数如表 1 所示。

表 1 磁体结构参数

Tab. 1 Parameters of the magnet structure

磁体结构	数值
内外骨架半径/mm	32 / 39
内外骨架厚度/mm	2.75 / 2.5
内外骨架间距/mm	0.2
最薄翅片/mm	0.3
线圈节距/mm	4
线圈倾斜角/deg	45
线槽/mm ²	2 × 4

3 CCT 四极磁体有限元模型

3.1 几何模型

CCT 型线圈导体和骨架的翅片呈特定的空间分布 ,建立合理且简单的分析几何模型是结构有限元分析的关键技术之一。磁体模型沿轴向周期性对称 ,且最小周期为一个截距 ,可沿轴向取一个截距进行有限元分析。磁体样机每层线圈含两层超导线 ,每层超导线由两根 7 股 NbTi 线缆组成 ,截面如图 3 所示。磁体在完成真空浸渍后导体与骨架之间的缝隙被环氧填充。为了简化模型 ,将线圈每个线槽内的导体截面视为矩形 ,材料性质可由 4 根线缆和环氧复合得到。

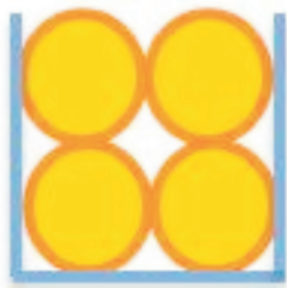


图 3 导体截面图

Fig. 3 Cross section of CCT coil

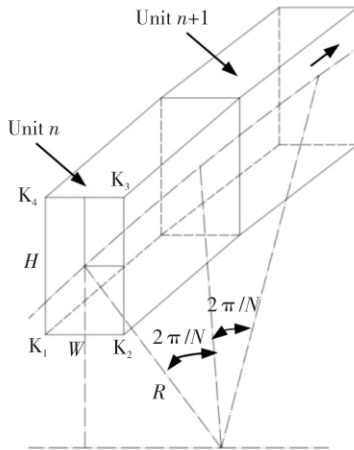


图 4 每个周期内第 n 个导体单元截面顶点坐标

Fig. 4 Section vertex coordinates of the n th conducting element in a period

CCT 型超导磁体导体线轨迹遵循式 (1) 所示的参数方程, 是一条周期性螺旋曲线, 沿轨迹线方向将每周期内导体分为 n 等份(图 4), 其中导体截面的半宽表示为 W , 半高表示为 H , 两匝之间沿轴向的截距表示为 L 。式 (3) 代表第 n 个导体块的顶点坐标。通过定义点、线、面, 最后形成体的方式自下而上进行实体建模, 而每个截面的相应顶点之间采用二次样条曲线进行连接, 以便光滑过渡。

$$\begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & y & z \\ A_1 - C_1 B_1 + C_2 P_z - D_1 \\ A_1 + C_1 B_1 - C_2 P_z + D_2 \\ A_2 + C_1 B_2 - C_2 P_z + D_2 \\ A_2 - C_1 B_2 + C_2 P_z - D_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中: $n = 1, 2, \dots, N; T = 2\pi/N;$
 $K = 1/2\pi R + \cot(\alpha) \cos(nT);$
 $B = (1 + (1/2\pi R + \cot(\alpha) \cos(nT))^2)^{-0.5};$
 $P_z = R \cot(\alpha) \sin(nT) + LT/2\pi;$

$$\begin{aligned} A_1 &= (R - W) \cos(nT); \\ A_2 &= (R + W) \cos(nT) \\ B_1 &= (R - W) \sin(nT); \\ B_2 &= (R + W) \sin(nT) \\ C_1 &= HK B \sin(nT); C_2 = HK B \cos(nT) \\ D_1 &= HB + L; D_2 = HB - L \end{aligned}$$

3.2 有限元模型

模型由导体和骨架体组成, 对于本样机磁体分析模型, 组合体数量为 154 个, 其中导体块数量为 72, 骨架体数量为 82, 每个体轮廓及位置均呈空间分布, 组合体轮廓复杂且网格数量较大, 分析模型采用对网格不规则性和密度不敏感的 SOLID186 单元和六面体网格。

为满足周期性对称模型分析条件, 将其中一个对称面上的网格使用 MSHCOPY 命令复制到相应的对称面上, 使两个对称面上的网格保持一致(图 5)。通过约束方程控制对称表面的位移和自由度实现模型的周期性条件。考虑骨架和线圈之间的接触状态, 采用接触分析模型使得计算结果更接近真实情况。

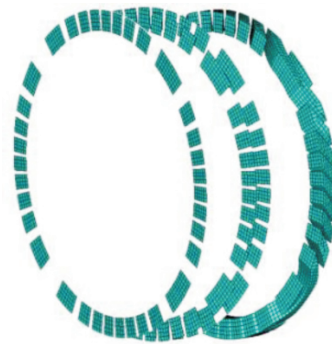


图 5 导体网格划分过程

Fig. 5 Conductor mesh generation process

3.3 边界条件

为满足周期性边界条件, 分析模型中周期性对称表面对应约束节点应具有相同的应力应变状态, 实际上, 磁体各部分被环氧粘接成一整体, 降温冷缩过程中, 对称表面约束节点轴向位移之间存在微小变化量 δ_z , 此时对称表面轴向节点合力为 0。通过假设两个不同的 δ_z 计算所对应的重合表面节点轴向合力, 利用插值法得出使合力为 0 的轴向微小变化量, 图 6 表示了获得 δ_z 值的插值过程。

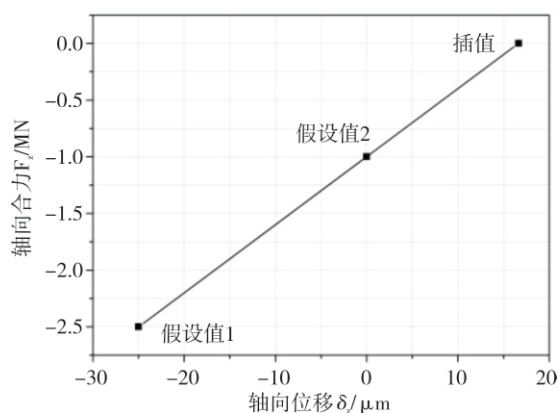


图 6 δ_z 值插值过程

Fig. 6 Interpolating process of zero net force for δ_z

4 计算结果与分析

4.1 ANSYS 计算

将载导体单元的质心坐标和体积从 ANSYS 分析模型中导出, 然后导入相应 Opera3D 全尺寸电磁计算模型中, 从电磁模型中导出对应单元的电流密度分量和磁场分量, 通过式 (3) 计算导体单元上的电磁力。表 2 为 CCT 四极磁体样机设计参数。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_y & J_z \\ J_z & J_x \\ J_x & J_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_z & B_x & B_y \\ -B_y & -B_z & -B_x \end{pmatrix} \times V \quad (3)$$

式中: J_x 、 J_y 、 J_z 为单元电流密度分量, B_x 、 B_y 、 B_z 为磁场分量, V 为单元体积。

表 2 磁体设计主要参数

Tab. 2 Main parameters of magnets

磁体参数	数值
磁场梯度/(T/m)	40
导体截面	2 × 2
线圈层数	2
各层线圈匝数	28
工作电流/A	292

线圈骨架材料为铝合金, 浸渍线圈包含 Nb-Ti/Cu 丝与环氧树脂, 对线圈进行均匀化处理, 采用等效杨氏模量, 线圈和芯轴的材料性能见表 3。以室温至 4.2 K 的冷收缩和洛伦兹力作为载荷进行结构计算。

表 3 材料参数表

Tab. 3 Material properties

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	热膨胀系数
NbTi 合金	80	0.3	10.5×10^{-6}
Al6061	70	0.3	14.3×10^{-6}

4.2 结果分析

为分析电磁力对磁体结构稳定性影响, 分析模型中只加载电磁力进行计算, 由于各匝线圈被单独约束在线槽之中, 计算结果显示各层导体中心位置的径向应力不足 1 MPa, 如图 7 所示, 电磁力在磁体极平面获得最大值, 该区域导体占比空间相比其它位置较低, 骨架占比空间较大, 有助于对电磁力的约束。导体中心位置径向位移小于 1 μm , 如图 8 所示, 反应线槽对各匝导体起到有效约束作用, 电磁力未形成累积。

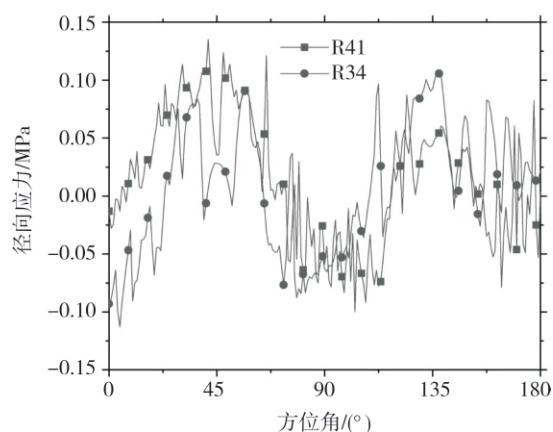


图 7 加载电磁力径向应力(无外结构)

Fig. 7 Radial stress for magnet without an external structure for Lorentz force

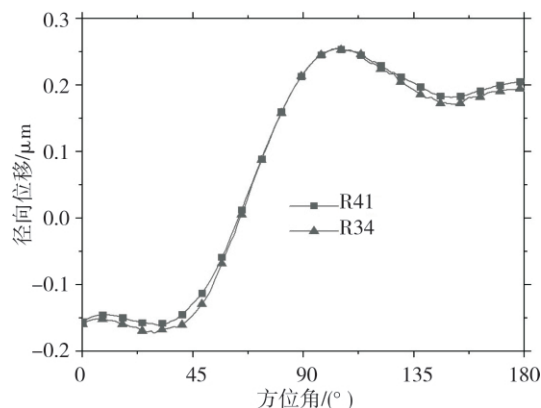


图 8 加载电磁力磁体径向位移(无外结构)

Fig. 8 Radial displacement for magnet without an external structure for Lorentz force

图 9 和图 10 所示为磁体在支撑外结构整体冷缩的作用下,外层线圈中心圆周上最大径向位移由 190 μm 减少到 170 μm ,最小值增加 30 μm ,最大值位置相差 $\pi/4$,范围由 90 μm 减少为 10 μm 。支撑外结构改变了磁体内部环向位移分布,变形值由 20 μm 减少到不足 2 μm (图 11 和图 12)。对比环向和径向位移,由于对磁体各层骨架及内外支撑结构进行了周向定位,使得环向位移远小于径向位移。

磁体内部应力分布如图 13 所示,支撑外结构对线圈骨架在 θ 为 $\pi/2$ 两侧的变形进行了有效约束,使得该处径向应力增加,环向应力减少,最大值均小于 100 MPa。

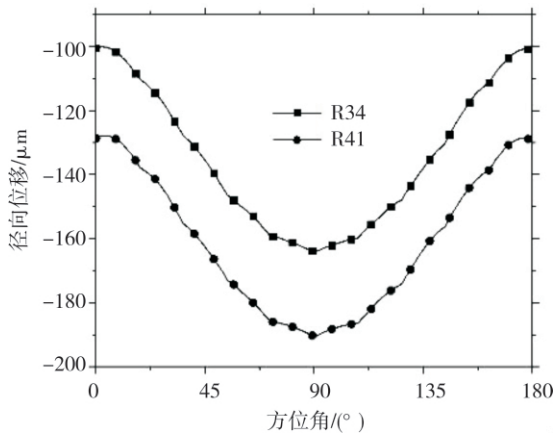


图 9 低温下励磁径向位移(无外结构)

Fig. 9 Radial displacement for magnet without an external structure for cooling and operation

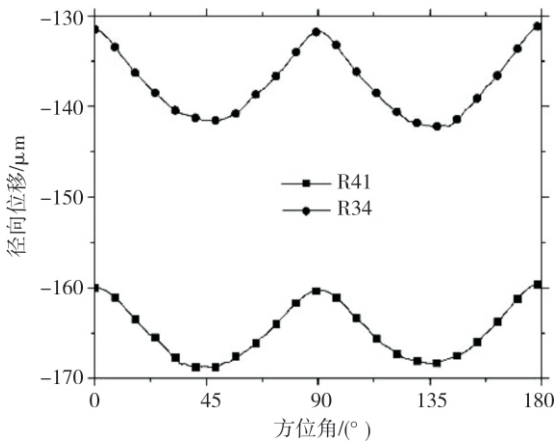


图 10 低温下励磁径向位移(有外结构)

Fig. 10 Radial deformation for magnet with an external structure for cooling and operation

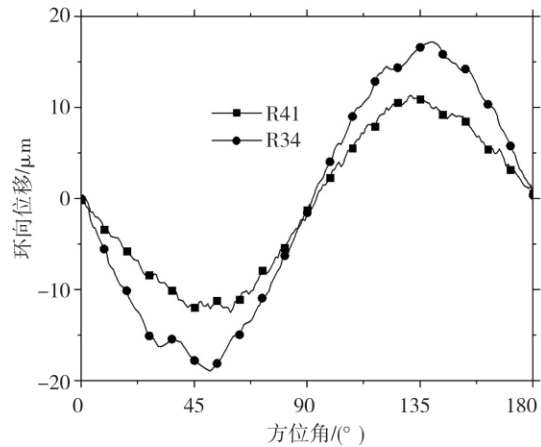


图 11 低温下励磁环向位移(无外结构)

Fig. 11 Hoop displacement for magnet without an external structure for cooling and operation

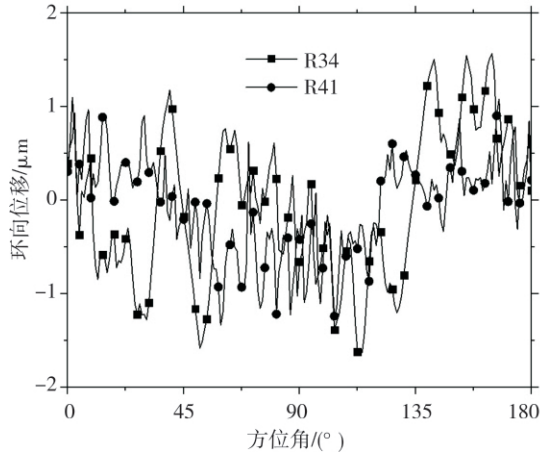


图 12 低温下励磁环向位移(有外结构)

Fig. 12 Hoop displacement for magnet with an external structure for cooling and operation

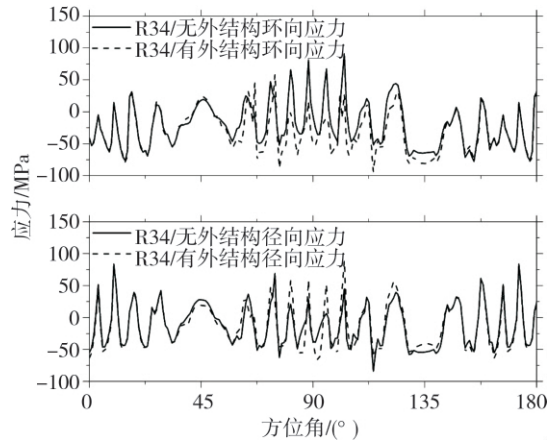


图 13 低温下励磁应力分布(有/无外结构)

Fig. 13 Hoop and radial stress for magnet without or with an external structure for cooling and operation

以上结果表明,导体与骨架被环氧浸渍固化

后,磁体在低温(4.2 K)下励磁过程中,由于磁体材料热收缩不一致,磁体冷缩量远大于电磁力引起的变形,虽然导体在 θ 为 $\pi/2$ 两侧的电磁力抵消了一部分热应力,但磁体应力应变仍主要受温度影响。在降温加载电流后磁体仍处于被压缩状态。CCT 四极磁体设计时应重点提高线圈骨架刚度,通过施加内外部支撑结构防止导体组发生弯曲变形。

5 磁体测试

为了真实反应磁体在降温和励磁过程中的结构稳定性,本文采用光纤光栅传感器对磁体变形进行监测,传感器埋入内外骨架外表面圆周方向 θ 为 $\pi/2$ 附近。在磁体低温性能测试过程中,首先使用冷氮气对磁体预冷至 80 K,然后使用液氦对磁体冷却至 4.2 K,使磁体达到超导态。当磁体达超导态后形变趋于稳定(图 14),内骨架外表面变形值稳定在 $-120 \mu\text{m}$ (计算结果为 $-130 \mu\text{m}$),外骨架外表面变形值稳定在 $-140 \mu\text{m}$ (计算结果为 $160 \mu\text{m}$),计算表明,磁体环向位移对比径向极小,磁体圆周上的形变主要由磁体冷缩引起,测试结果与计算值基本一致。

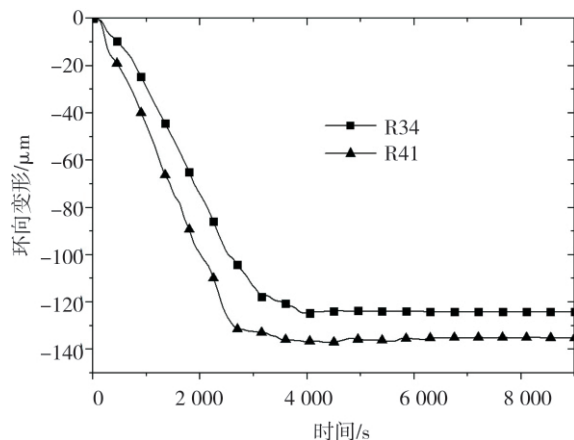


图 14 降温过程内外骨架外表面形变
Fig. 14 Circumferential deformation of outer surface of inner and outer skeleton during cooling

当磁体处于超导态后进行加电励磁,磁体变形值如图 15 所示,当磁体运行电流达设计值时,内外骨架变形与只加载电磁力作用下计算值基本一致,并趋于稳定,在励磁过程中出现了失超情况,失超时磁体形变虽有突变,但突变值依然极

小,磁体结构稳定磁体性能不受影响。

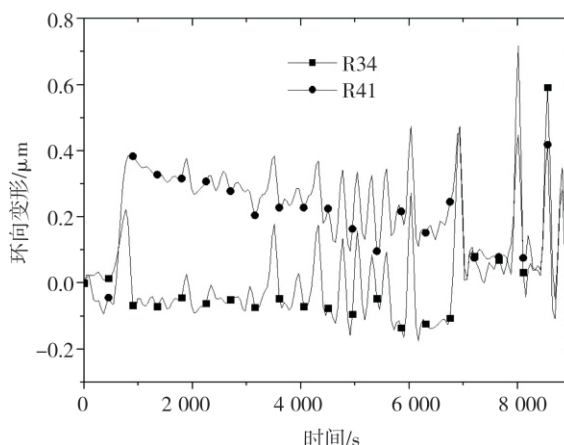


图 15 励磁及失超过程内外骨架外表面变形
Fig. 15 Circumferential deformation of outer surface of inner and outer skeleton during cooling and operation

6 结论

CCT 超导磁体各匝线圈被约束于骨架线槽中,各匝导体上电磁力被隔开,未形成累积。周期性对称模型法适用于其它 CCT 型多极或多极组合超导磁体结构分析。在低温下励磁时,磁体冷缩量远大于电磁力引起的变形,当磁体处于正常工作状态时,磁体形变稳定,且磁体失超时仍能保持结构稳定,不致破坏。通过施加支撑外结构和骨架周向定位可降低磁体形变,该结构形式也适用于 CCT 型其它多极或多极组合磁体。

参考文献

- [1] Meyer D I, Flasck R. A new configuration for a dipole magnet for use in high energy physics applications [J]. Nuclear Instruments and Methods, 1970, 80(2): 339-341.
- [2] Caspi S, Brouwer L N, Lipton T, et al. Test results of CCT1—A 2.4T canted-cosine-theta dipole magnet [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 25(3): 1-4.
- [3] Caspi S, Borgnolutti F, Brouwer L, et al. Canted-Cosine-Theta magnet (CCT)—A concept for high field accelerator magnets [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 24(3): 1-4.

(下转第 102 页)

5 结论

(1) 选用双混合制冷剂三级预冷及布雷顿循环深冷的氢液化工艺, 结合了两级正 - 仲态氢绝热转化, 实现满足仲氢浓度的液氢产品低耗高效的生产模拟。

(2) 使用粒子群算法对液化流程进行全局优化, 进一步改善性能, 优化后比能耗为 $6.981 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kgLH}_2$, 焓效率为 28.32% , 系统性能明显提升, 优于在运行的和部分概念性液化系统。

(3) 对优化前后的工艺进行换热性能分析和焓分析, 换热器最小温差降至 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近, 复合曲线吻合更优。换热器、水冷器和转化反应器是焓损失主要来源, 提出改善深冷循环, 使用吸收式制冷, 优化转化节点等进一步的改进建议。

参考文献

- [1] 吕翠, 王金阵, 朱伟平, 等. 氢液化技术研究进展及能耗分析[J]. 低温与超导, 2019, 47(07): 11 - 18.
- [2] Krasae - in S, Stang J H, Neksa P. Development of large - scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009 [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(10): 4524 - 4533.
- [3] Liang Y, Ju Y L. Process optimization and analysis of a novel hydrogen liquefaction cycle [J]. International Journal of Refrigeration, 2020(110): 219 - 230.
- [4] Staats W L. Analysis of a supercritical hydrogen liquefaction cycle [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [5] Cardella U, Decker L, Sundberg J, et al. Process optimization for large - scale hydrogen liquefaction [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017(42): 12339 - 12354.
- [6] 殷靓, 巨永林. 氢液化流程设计和优化方法研究进展[J]. 制冷学报, 2020, 41(03): 1 - 10.
- [7] Sadaghiani M S, Mehrpooya M. Introducing and energy analysis of a novel cryogenic hydrogen liquefaction process configuration [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017(42): 6033 - 6050.
- [8] Asadnia M, Mehrpooya M. A novel hydrogen liquefaction process configuration with combined mixed refrigerant systems [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(23): 15564 - 15585.
- [4] Caspi S, Arbelaez D, Brouwer L, et al. Design of a canted - cosine - theta superconducting dipole magnet for future colliders [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 27(4): 1 - 5.
- [5] Caspi S, Arbelaez D, Brouwer L, et al. Design of a canted - cosine - theta superconducting dipole magnet for future colliders [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 27(4): 1 - 5.
- [6] Kirby G A, Gentini L, Mazet J, et al. Hi - lumi LHC twin aperture orbit correctors 0.5 - m model magnet development and cold test [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2017, 28(3): 1 - 5.
- [7] Caspi S, Arbelaez D, Brouwer L, et al. Progress in the design of a curved superconducting dipole for a therapy gantry [J]. Proceedings of IPAC, New Orleans, Louisiana, 2012: 4097 - 4099.
- [8] Brouwer L, Caspi S, Hafalia R, et al. Design of an achromatic superconducting magnet for a proton therapy gantry [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 27(4): 1 - 6.
- [9] Wu W, Liang Y, Zhou L C, et al. Multipole magnets for the HIAF fragment separator using the Canted - Cosine - Theta (CCT) geometry [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020(1401): 012015.
- [10] Fu M, Pan Z, Jiao Z, et al. Quench characteristics and normal zone propagation of an MgB_2 superconducting coil [J]. Superconductor Science and Technology, 2003, 17(1): 160.
- [11] Ortwein R, Blocki J, Kirby G, et al. Mechanical design of a nested 4 - layer Canted Cosine Theta (CCT) dipole [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1559(1): 012073.
- [12] Wang X, Caspi S, Dietderich D R, et al. A viable dipole magnet concept with REBCO CORC ® wires and further development needs for high - field magnet applications [J]. Superconductor Science and Technology, 2018, 31(4): 045007.

(上接第 24 页)