

GSI 超导二极磁体的电磁分析

王树凯, 吴维越

(中科院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 主要介绍超导二极磁体的结构, 用有限元分析软件 ANSYS 对磁体在工作电流下进行了电磁分析, 结果符合物理设计要求, 同时为下一步的结构分析提供了电动力。

关键词: 超导磁体; 电感; 储能; 电动力

Analysis of magnetic field in superconducting dipole magnet for GSI accelerator

Wang Shukai, Wu Weiyue

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: The structure of superconducting dipole magnet is introduced. The magnetic field of superconducting dipole magnet has been analyzed with ANSYS at rated current intensity. The results are in accordance with the physical requirements. The electromagnetic force of the results will be used in the next structure analysis.

Keywords: Superconducting magnet, Inductance, Energy storage, Electromagnetic force

1 引言

在德国重离子研究中心建造的国际反质子与离子加速器是欧盟第六框架计划项目之一, 预计建设期为 10 年, 总投资超过 10 亿欧元。研究人员期望通过 FAIR 获取有关物质结构和宇宙演变的重要知识。中科院等离子体物理研究所负责设计和制造 FAIR 收集环 (Collector Ring - CR) 中的超导二极磁体部分。

收集环 - CR 的作用是对放射性离子束和反质子的随机冷却和在等时性模式下测量短寿命离子的质量。它是由 24 个超导磁体组成的一个环状结构, 每个二极超导磁体可以提供 0.15—1.6T 的磁场, 因而有必要对二极超导磁体进行电磁分析: 一方面基于物理设计的要求需要提供磁体准确的电磁参数; 另一方面, 磁体的结构设计尺寸是由准确的电磁参数决定的。此外, 电磁分析所得到的电感、储能和电动力等参数为磁体的失超保护和结构设计提供的依据。

2 超导二极磁体系统简介

GSI 磁体的 1/2 截面和三维结构如图 1、图 2 所示。磁体是由线圈绕组、线圈盒、冷屏、杜瓦以及支撑等部件组成。采用浸泡冷却方式, 线圈盒同时也是液氮容器。

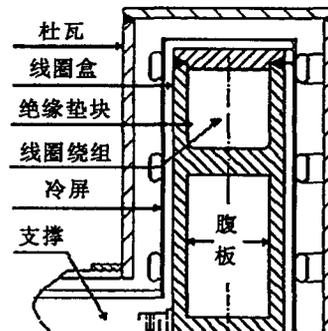


图 1 超导磁体 1/2 截面图

Fig. 1 1/2 cutaway view of the magnet

GSI 磁体线圈绕组采用梯形结构, 共有上、下 2 个线圈。线圈使用英国牛津公司生产的 NbTi 矩形超导线, 采用单根超导线连续筒式密绕技术绕制。绕包好的磁体线圈被放入模具内, 用低温环氧树脂进行真空压力浸渍, 即 VPI (Vacuum Pressure Impregnation) 技术。把浸渍完成后的磁体线圈放入线圈盒内, 焊接密封盒体。其中磁体与线圈盒间由垫块填充, 垫块采用绝缘复合材料 G10,

收稿日期: 2008-01-30

作者简介: 王树凯 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为机械设计及相关分析。

每个线圈有 32 个垫块。垫块中开有凹槽,以便液氮通过。上、下两线圈盒间由腹板连接为一体,以使两线圈间强大的斥力成为内力且相互平衡。线圈盒外设有冷屏,其作用是限制从外部热源到超导线圈上的热量,以维持超导绕组的低温环境。

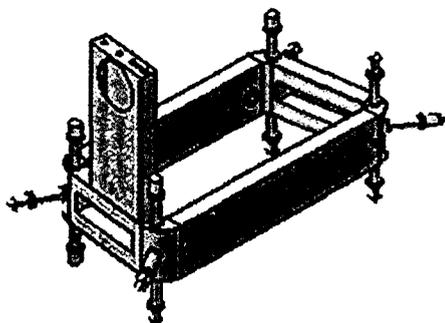


图2 磁体的三维结构图

Fig. 2 3D model of the magnet

整个系统最外一层是杜瓦,其作用是提供真空环境,同时作为超导磁体的定位和支撑平台,整个超导磁体的重力通过支撑被传递到杜瓦上,进而被传递到地面。束流通道是高能粒子运动区域,为一高真空分环境,其磁场均匀度将会对磁体性能产生巨大的影响,是本文分析的重点之一。在整个超导磁体外部还有一个二极磁铁,其作用是集中磁场,减少漏磁。该部分由中科院兰州近代物理研究所负责设计、制造。

3 超导二极磁体的电磁分析^[1,2]

3.1 模型与材料属性

GSI 磁体结构复杂,在建模时做了一些合理的简化,主要简化有:

(1) 由于线圈盒、冷屏、杜瓦以及支撑等部件所用材料的相对磁导率均近似为 1,因此在分析中将它们视为空气,没有单独建模。

(2) 在对铁轭建模时,忽略了铁轭表面的细节结构。

分析模型(见图 3)主要包括超导线圈绕组、铁轭、空气层和束流通道四部分。束流通道实际也是空气层,因为是磁场分析的重点,所以单独建模,以便在分析时对其进行网格细分,从而提高计算精度。

分析中用到的材料参数主要为各材料的相对

磁导率。其中线圈绕组、空气层和束流通道部分的相对磁导率为 1,铁轭的相对磁导率为一非线性变量,图 4 是其 $B-H$ 曲线。

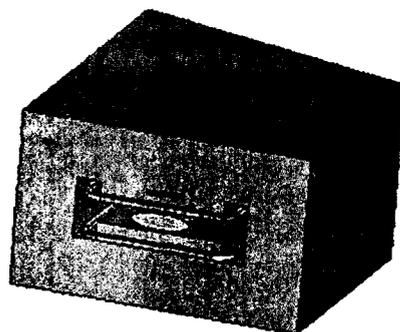


图3 磁体的有限元模型(空气层未画出)

Fig. 3 FEM model of magnet (without air)

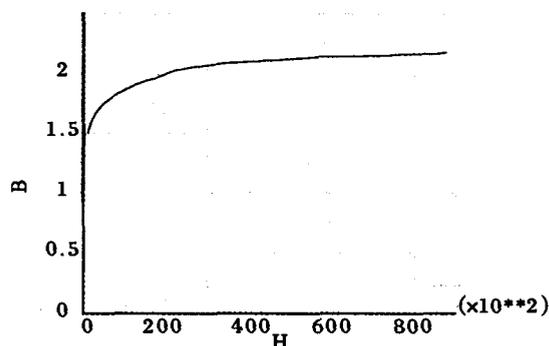


图4 铁轭的 $B-H$ 曲线

Fig. 4 $B-H$ curve of the yoke

3.2 载荷与边界条件

在分析中,线圈将通入正常运行电流强度 246A/匝,即 $64277715\text{A}/\text{m}^2$ 。同时,在空气层的边界加磁力线平行边界条件,以模拟磁场在远处的耗散过程。根据设计要求,磁体磁场要从 0.15—1.6T 可调,因此本文亦对磁体从 10A 到 350A 不同电流激励下的电磁参数进行了分析。

3.3 网格划分

由于模型中含有非线性材料铁轭,因此在分析时采用 ANSYS 的基于单元边的电磁分析方法,可以避免磁矢量位方法在分析含铁区域时所得出的不精确的解。模型采用 SOLID117 六面体单元进行网格划分。

3.4 结果与讨论

3.4.1 磁体总的磁场分布

图 5 和图 6 分别为磁体总的磁场和磁力线分布图。从图中可以看到铁轭以外的空气层的磁感应强度很小,最大只有 0.003T,说明分析中所取

的空气层的大小是合理的;磁体的漏磁很小,磁场大部分集中在铁轭以内,符合设计要求;束流通道基本为一匀强磁场区域。

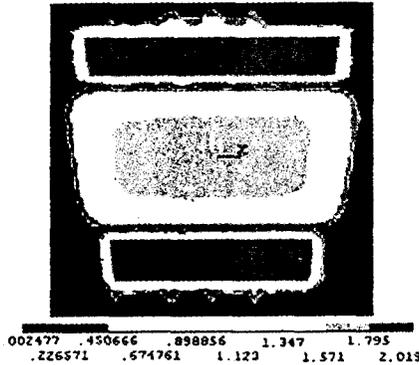


图 5 磁体 X-Y 对称面磁场分布云图

Fig. 5 Magnetic field distribution of magnet in X-Y symmetric plane

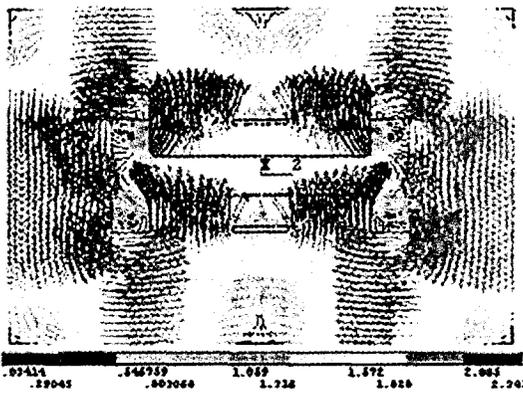


图 6 磁体 Y-Z 对称面磁力线矢量图

Fig. 6 Vector magnetic flux of magnet in Y-Z symmetry plane

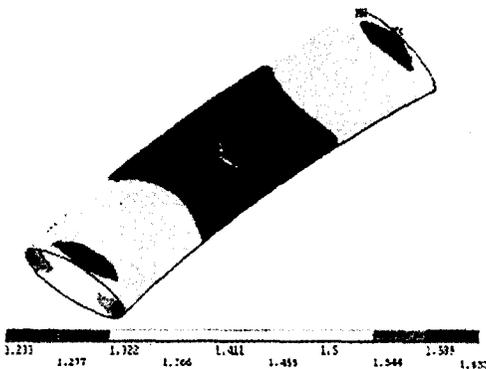


图 7 束流通道在额定电流下的磁场分布

Fig. 7 Magnetic field distribution of the channel at rated current intensity

3.4.2 束流通道的磁场分布

束流通道是超导二极磁体的关键部件,其磁

场分布情况将会直接影响磁体的性能。图 7 是额定电流下束流通道的磁场分布情况。可以看到,束流通道磁场大部分在 1.589—1.633T 之间,磁场分布均匀,达到了设计要求;线圈的激励电流从 10A 到 350A,束流通道的中心磁场将从 0.086T 上升到 1.79T(见图 8),可以满足中心磁场从 0.15—1.6T 可调的要求。

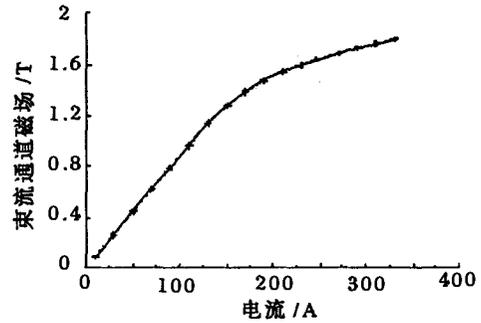


图 8 束流通道磁场最大值随电流的变化

Fig. 8 The max. of magnetic field in channel under different current intensity

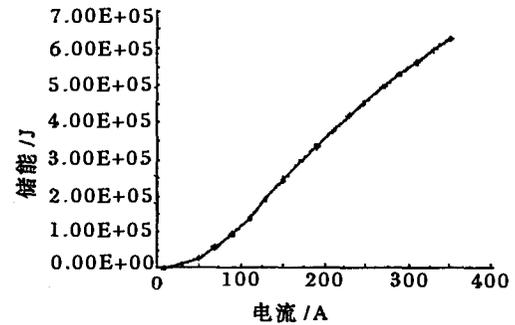


图 9 磁体储能随电流的变化

Fig. 9 Energy storage under different current intensity

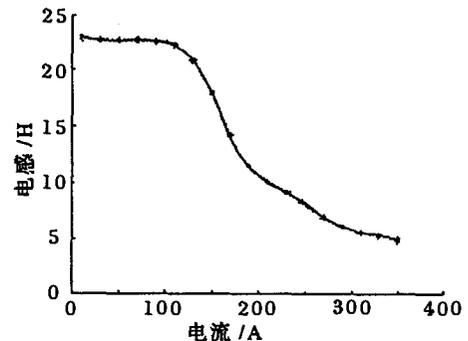


图 10 磁体电感随电流的变化

Fig. 10 Inductance under different current intensity

3.4.3 磁体的电感与储能

电感和储能等电磁参数是超导磁体失超保护的设计依据。经计算,在有铁轭的情况下 GSI 磁

体每个线圈的自感为 2.86H, 两线圈间的互感为 1.28H, 因此总的电感为 $(2.86 + 1.28) \times 2 = 8.28\text{H}$; 磁体总的储能为 440kJ。图 9 和图 10 分别为磁体储能和电感随电流的变化曲线。

3.4.4 线圈的电动力分布

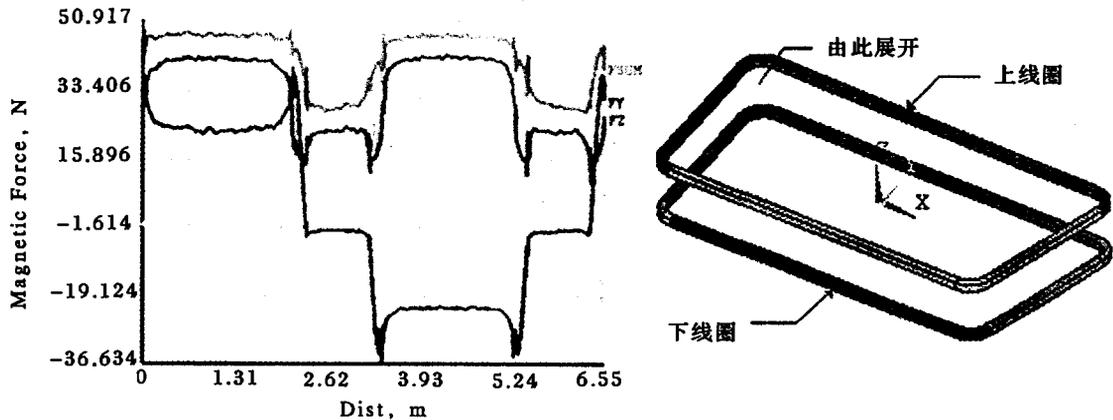


图 11 上线圈电动力 ($F_x, F_y, F_z, F_{\text{sum}}$) 沿线圈周长的展开

Fig. 11 Electromagnetic force distribution along upper coil perimeter

4 总结

本文对 GSI 超导二极磁体进行了电磁分析, 结果表明磁体的设计能够满足物理设计的要求。下一步的工作就是利用电磁分析所得到的电动力对磁体进行结构分析, 以检验磁体的力学性能是否满足设计要求。

参考文献

- [1] 阎照文, 等. ANSYS 10.0 工程电磁分析技术与实例详解 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [2] 孙明礼, 胡仁喜, 等. ANSYS 10.0 电磁学有限元分析实例指导教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] Hirsch J E. Hole superconductivity in MgB_2 : a high T_c cuprate without Cu [J]. Phys. Lett. A, 2001, 282: 392.
- [4] Schon J H, Kloc C H, Batlogg B. Nature, 2000, 408: 549.
- [5] Pradhan A K, Shi Z X, Tokunaga M, et al. Electrical transport and anisotropic superconducting properties in single crystalline [J]. Phys. Rev. B, 2001, 64(21): 212509.
- [6] Kim Heon Jung. Halleffectinc - axis - oriented MgB_2 thin films. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0105024>.
- [7] Takano Y, Togano K. Electrical transport and anisotropic super - conducting properties in single crystalline and dense polycrystalline MgB_2 . <http://prola.aps.org/pdf/PRB/v64/i21/e212509>.
- [8] Lee S, Yamamoto A, Tajima S. Peak Effect in Single Crystal MgB_2 Superconductor for $H//c$ - Axis. <http://prola.aps.org/pdf/PRL/v89/i9/e097002>.
- [9] Finnemore D K, Ostenson J E, Budko S L, et al. Thermodynamic and transport properties of superconducting MgB_2 [J]. Phys. Rev. Lett, 2001, 86:2420.
- [10] Chen X H, Wang Y S, Xue Y Y, et al. Unconventional magnetic properties of cuprates. http://prola.aps.org/pdf/PRB/v60/i6/p4245_1.
- [11] Gurvitch M. Universal disorder - induced transition in the resistivity behavior of strongly coupled metals. http://prola.aps.org/abstract/PRL/v56/i6/p647_1.
- [12] 张其瑞. 高温超导电性. 浙江: 浙江大学出版社, 1992, 181 - 212.

(上接 55 页)

Physics, 2007, 104(1): 51 - 61.