

FAIR 工程中 CR 二极超导磁体样机的结构分析

徐厚昌¹, 朱银锋², 吴维越³

(1. 合肥学院机械工程系, 合肥 230022;

2. 安徽建筑工业学院机械与电气工程学院, 合肥 230022;

3. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要:介绍了德国 FAIR(The Facility for Antiproton and Ion Research) 工程中收集环 CR(Collector Ring) 二极超导磁体的结构设计;用 CATIA 软件建立了 CR 二极超导磁体的三维模型,并用有限元分析软件 ANSYS 对建立的模型进行了磁场和电磁力的分析;基于磁场分析对线圈盒进行了位移和应力的分析;对磁体失超后液氦容器可能出现的最大位移和最大应力进行了分析,为正式磁体的制造提供了必要的参数。

关键词:收集环; 超导磁体; 有限元; 线圈盒

Structural analysis of CR superconducting dipole magnet in FAIR project

Xu Houchang¹, Zhu Yinfeng², Wu Weiyue³

(1. Department of Mechanical Engineering, Hefei University, Hefei 230022, China;

2. Anhui University of Architecture, Hefei 230022, China

3. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The engineering design of Collector Ring(CR) superconducting magnet of German FAIR(the Facility for Antiproton and Ion Research) project was introduced; 3D model of the magnet was made by CATIA, then the magnetic field of 1/4 magnet model was analysed with ANSYS. The displacement and stress of the coil case were analysed based on the analysis of magnetic field. The maximal displacement and maximal stress of the liquid helium case were analysed when quenching happens. The results of analysis and research are necessary parameters for manufacturing the experimental magnet.

Keywords: Collector Ring(CR), Superconducting magnet, Dewar, Coil case

1 引言

在德国国家重离子研究中心 GSI(The Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH) 建造的国际反质子和离子加速器 FAIR(The Facility for Antiproton and Ion Research) 大科学工程计划^[1], 是欧盟第六框架计划项目之一, 预计建设期 10 年, 总投资超过 10 亿美元。建成后, 为相关物理及应用研究提供世界上独一无二的研究平台, 使一些最前沿领域的研究成为可能^[2,3]。

储存环是 FAIR 加速器大科学工程装置中的一个重要组成部分, 它包括收集环 CR(Collector Ring), 新实验环 NESR(The New Experimental

Storage Ring), 累积和减速环 RESR(The Recycled Experimental Storage Ring), 和高能存储环 HESR(The High Energy Storage Ring)。其中的收集环 CR 除了用来快速冷却反质子和稀有同位素外, 还用来做寿命非常短的质量测量。中国科学院等离子体研究所负责样机磁体线圈、线圈支撑等部分的设计与制造等。

2 收集环 CR 超导磁体的介绍

收集环 CR 由 24 个二极超导磁体(如图 1 所示)和其它部件组成, 该磁体工作时要求的最大场为 0.8 T ~ 1.6 T, 磁场精度为 $\pm 1 \times 10^{-4}$ T。每个磁体含有相互平行的、相同形状的上下两个线

收稿日期: 2009-03-13

基金项目: 国际科技合作项目(MOU-GSI-ACC-2005-01) 和院内项目(08KY011ZR) 资助。

作者简介: 徐厚昌(1976-), 男, 助教, 硕士, 主要研究方向为机械设计。

圈(如图 2 所示),线圈最大工作电流为直流 246A,从线圈通电到达到工作电流的时间是 200 秒。磁体的线圈采用 NbTi 超导线绕制,为保证磁场的精度,线圈在绕制完成后进行了固化处理,并设计了 316LN 的线圈盒连接和支撑两个线圈,线圈工作过程中产生的电磁力作用在线圈盒上形成内力,以保证线圈工作过程中的位置精度,达到所需要的磁场位形。

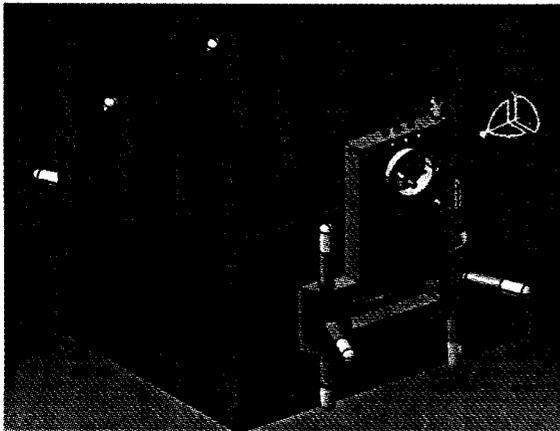


图 1 CR 二极超导磁体 3D 图

Fig. 1 3D model of CR dipole superconducting magnet



图 2 线圈 3D 示意图

Fig. 2 3D model of coil

3 CR 二极超导磁体的介绍

CR 二极超导磁体的结构设计包括铁轭的设计、外杜瓦的设计、冷屏的设计、液氮容器的设计、线圈和线圈盒的设计等^[3]。

带有电流引线系统的外杜瓦 3D 图如图 3 所示,外杜瓦外部的 12 个支撑用于支撑杜瓦内部部件和调节磁体的位置。外杜瓦除提供磁体工作时的真空环境外,还是磁体线圈等在铁轭上进行装配的定位基准,其精度直接影响磁体的磁场位形。冷屏介于线圈盒外面的液氮容器和外杜瓦之间,能有效减少外杜瓦对液氮容器的辐射热。

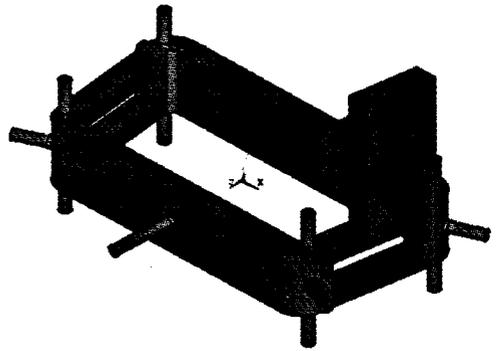


图 3 CR 二极超导磁体杜瓦 3D 图

Fig. 3 3D model of dewar of CR dipole superconducting magnet

3.1 超导线的选择

CR 二极超导磁体线圈截面尺寸较小,超导线圈采用液氮浸泡方式冷却,当磁体失超后线圈内储存的电能将转化为焦耳热,由于线圈内部没有冷却介质直接冷却,产生的焦耳热很难及时转移到磁体外部,为了保证磁体失超后的安全,及时转移线圈中储存的能量,用于制作 CR 二极磁体线圈的 NbTi 超导线有较高的铜超比,超导线的截面如图 4 所示。当超导线的工作温度为 4.2K 时,温度裕度为 2.8K。导体的部分测试结果如表 1 所示^[4]。

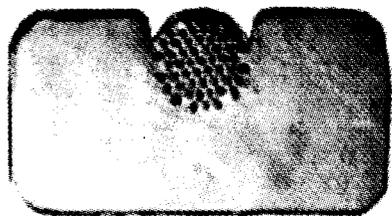


图 4 导体截面照片

Fig. 4 Cross section photograph of the CR conductor

表 1 线圈导体测试结果

Tab. 1 The testing results of conductor

超导线	NbTi
临界温度(K)	7
铜超比	11
<i>n</i> 值	100
超导丝平均直径(μm)	66
超导丝数量	55
<i>I_c</i> (1.6T, 4.2 K) (A)	813

3.2 外杜瓦的结构分析

外杜瓦提供了 CR 二极超导磁体内部的真空,同时也是线圈、线圈盒、冷屏等的支撑和定位部件。除要满足机械性能方面的要求外,还要求

外杜瓦具有好的抗磁性能。综合考虑成本等因素,采用厚度为8mm的316L不锈钢板制作。

外杜瓦工作时的载荷为自身重力,内外压力差,内部冷质部件的重力、预紧力,作用在中间支撑上的电磁力。约束为外杜瓦外部4个定位凸台全约束,外杜瓦下平面在垂直方面的位移约束为0。分析结果显示工况下杜瓦的最大变形约为0.7mm(如图5所示),位置在外杜瓦的内侧面,小于外杜瓦允许的最大变形1mm;最大冯·米赛斯应力约为186MPa(如图6所示),小于316L不锈钢常温需用应力197MPa^[4]。

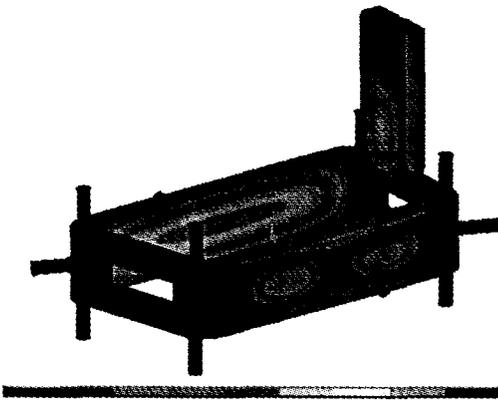


图5 外杜瓦的变形示意图
Fig.5 Deformation distribution of dewar

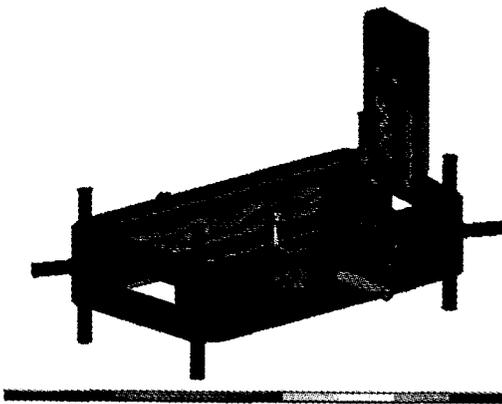


图6 外杜瓦的应力示意图
Fig.6 Stress distribution of Dewar

3.3 线圈盒的结构分析^[5]

考虑到线圈实际加工时的难易程度,CR 二极超导磁体的线圈在工程设计时被设计成梯行,线圈截面为矩形,梯形线圈的四个直线段采用圆弧结构连接。上下两个线圈通过线圈盒相联结,图7是CR 二极超导磁体线圈盒3D示意图。

在进行线圈盒的结构分析前得到磁体线圈工作过程中产生的电磁力,在进行结构分析时把电磁力载荷导入,再施加正确的约束就可分析得到线圈盒的变形和应力,根据得到的结果可以对线圈盒作进一步的改进和优化。图8是磁场分布矢量图,图9是束流通道上的磁场分布云图,从图上可知,束流通道上的磁场均匀度较好,只是在靠近端部边缘部位磁场均匀度稍差,在直流246A工作电流下,束流通道上除端部外磁场强度基本为1.6T,满足设计要求,通过调节线圈电流可得到所需的磁场。

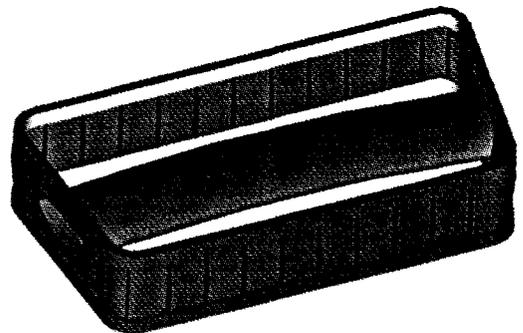


图7 线圈盒3D示意图
Fig.7 Schematic diagram of coil case

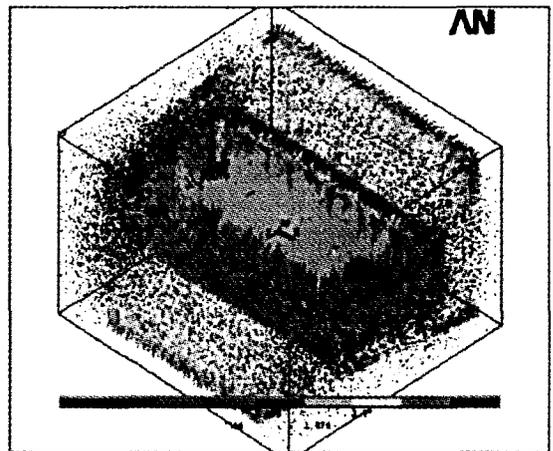


图8 CR 二极超导磁体磁场分布矢量图
Fig.8 Magnetic field vector distribution of CR dipole superconducting magnet

从Ansys 分析结果可知单个线圈在Y方向(重力方向)的电磁力约为21吨,在X方向和Z方向的合力基本为零,但在每一段线圈上并不为零,电磁力的水平分量引起线圈直边向外扩张。因此线圈盒的设计应该保证在Y方向具有对称性,在水平方向也应该设置加强筋等结构用于增

大线圈盒的强度和稳定性,确保线圈的位置精度小于±0.5mm。

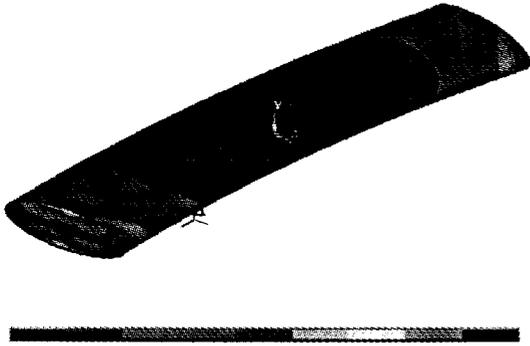


图9 束流通道磁场分布

Fig.9 Magnetic field distribution of beam tunnel

3.4 CR 二极超导磁体的结构分析^[6,7]

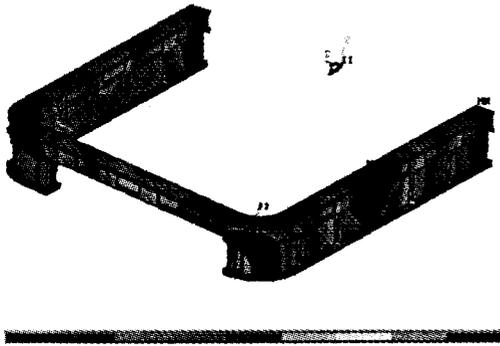


图10 线圈盒变形分布云图

Fig.10 Deformation distribution of coil case

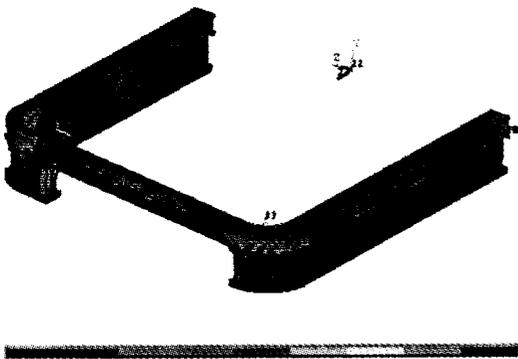


图11 线圈盒应力分布云图

Fig.11 Stress distribution of coil case

316LN 由于在液氮温度下具有较小的热膨胀系数和较高的许用应力,同时具有较好的抗磁性

能,被用来制作 CR 二极超导磁体的线圈盒。为减小运算量和提高运算速度,线圈盒结构分析时取 1/4 模型,载荷为 1/4 模型的电磁力,约束为线圈盒中间部位支撑和线圈盒端部四个定位支撑全约束,线圈盒底面在垂直方向的位移约束为 0,分析结果显示线圈盒的最大变形约为 0.22mm(如图 10 所示),小于线圈盒的变形 ±0.5mm 的要求;最大冯·米赛斯应力 112MPa(如图 11 所示),小于 4.2K 温度下 316LN 的许用应力 1000MPa。

4 结束语

CR 二极超导磁体工程设计涉及超导、电磁、低温、真空、计算机辅助设计与分析、机械设计与制造、材料、焊接、测量等多种学科,通过 3D 绘图软件和有限元分析软件的使用大大缩短了工程设计的周期,提高了工程设计的可靠性,减少了原材料的浪费。

参考文献

- [1] Zeller A F, et al. Construction and Testing of Superferic Dipoles for the A1900 Fragment Separator[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11: 1 725.
- [2] FAIR - facility for Antiproton and Ion Research [EB/OL]. www.gsi.de.
- [3] 秦织,吴维越,陈文革,等. 欧洲 FAIR 中二极超导磁体样机的初步设计与分析[J]. 低温与超导, 2007, 35:312.
- [4] 朱银锋,吴维越,武松涛,等. 反质子和离子加速器收集环的超导二极磁体设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2008:163.
- [5] 张远斌. ITER 极向场磁体馈线系统设计与分析 [D]. 北京:中国科学院研究生院博士学位论文, 2006,30-31;75-77;81-83.
- [6] 姚卫超,武玉,刘华军,等. GSI 收集环二极磁体稳定性分析[J]. 低温物理学报, 2007, 29:226.
- [7] 陈长琦,徐厚昌,姚达毛,等. EAST 真空室内部部件安装的基准环设计与分析[J]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(4).