

# CR 超导二极磁铁线圈受力分析\*

卞文龙<sup>1,2</sup> 袁平<sup>1</sup> 马力祯<sup>1;1)</sup> 何源<sup>1</sup> 李青<sup>1,2</sup> 吴巍<sup>1,2</sup> 姚庆高<sup>1,2</sup>

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 采用有限元分析的方法,以CR超导二极铁为研究对象,对其进行受力分析,分别计算线圈所受到的电磁力以及在此力作用下线圈发生的应变,线圈和相邻部分降温速率不均匀引起的热应力的分布以及线圈发生的应变.最后利用所得到的数据来校对线圈和线圈盒的强度,为结构的优化设计提供依据,并为失超保护提供可参考的数据.

**关键词** 超导磁铁 有限元法 应力 电磁力 热应力

## 1 引言

由德国重离子研究中心(GSI)负责承建的大型科研装置反质子及离子研究装置(Facility for Antiproton and Ion Research,简称FAIR)的研建是一个大型的国际合作项目,由包括中国在内的十几个国家联合建造,预计建设期10年,总投资10.017亿欧元,建成后将成为世界上开展物质基本结构研究的中心,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.中国将负责同步加速器CR(Collecting Ring)环及超导束运线的五十余台二极磁铁的设计制造.

本文主要介绍的是CR超导二极铁线圈的受力分析.超导磁铁具有大电流密度,强磁场,超低温工作环境的特点,制造设计工艺非常复杂,在大的电磁力作用下,线圈的小位移移动有可能导致超导体内磁通跳跃;如果磁通产生热量的速度大于热量传播的速度,就会在超导体内出现正常区,导致超导线圈失超,所以需要超导线圈进行受力计算,分析它的受力分布、应力、形变.掌握超导磁体的力学状况一方面可以校对设计的结构和线圈盒的机械强度,从而了解其应力分布与变形的情况;另一方面为结构的进一步优化提供了依据.

## 2 CR 超导二极磁铁结构

CR超导二极铁为H型铁,采用温铁结构、超导线圈.最高中心磁场为1.62T,偏转角度为15D,好场区

为 $\pm 225 \times 70 \text{mm}^2$ ,均匀度 $3 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-4}$ .其中,超导线圈结构由合肥等离子体所设计,磁场计算以及铁芯结构的设计由近代物理所完成,最后总体装配在近物所完成.磁场的总装示意图以及线圈杜瓦截面图见下图1<sup>[1]</sup>.用于磁铁的超导线采用的是牛津生产的铜超比为14的铜基NbTi超导线,临界电流为560A@4T,设计运行电流246A<sup>[1]</sup>,仅为临界电流的44%(560A),增加超导线圈的稳定性.整个线圈最终结构为横向28匝,纵向20匝,层间采用玻璃丝带增强环氧树脂材料绝缘,整个绕组尺寸为 $52.44 \times 54.8 \text{mm}^2$ .线圈盒采用316LN不锈钢材料(在低温下有很高的强度),在盒体上开了24个槽,增加液氦与线圈的接触,便于线圈充分冷却以及线圈产生热量的充分吸收;线圈盒外侧采用加强筋支撑结构,共有96个加强筋支撑;在拐角处采用弹簧支撑,通过调节弹簧,可以调节线圈的位置.线圈布局见图2<sup>[1]</sup>.

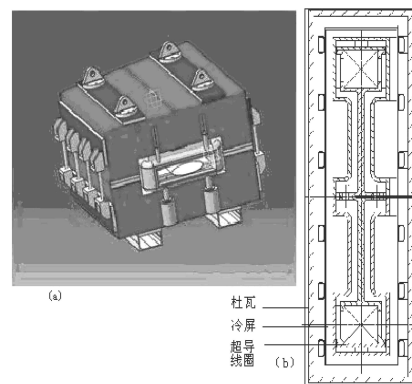


图1 CR超导磁体的结构CR磁铁总装示意

2008-01-07 收稿

\* 中国科学院所长基金(0615010SZO)和中国科学院西部之光基金(0715060XLO)资助

1) E-mail: malz@impcas.ac.cn

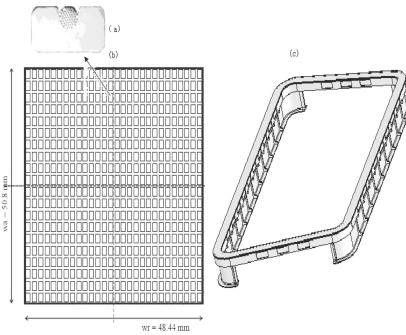


图2 CR超导线圈、线圈盒结构

### 3 电磁力计算分析

#### 3.1 二维电磁力计算

分析采用ANSYS二维电磁结构耦合的方法,考虑到非线性因素影响,直接将得到的电磁力加载到结构分析中.模型中节点数为4363,单元数为4159,为四边形板单元.根据支撑结构的设计,对线圈盒顶部和两侧的底端加以约束.

由计算得到,磁场并不是对称分布的,最大值在线圈左下角,最大值为1.382T.因此线圈所受到的磁场力也不是对称分布的.最大电磁力分布为85.486N/m,位于线圈得左下角.因此在线圈绕制过程中,要对应力比较集中的左下脚加强固定.

#### 3.2 三维电磁力计算分析

为了对线圈整体的宏观特性有更加深入的了解,分析电磁力对线圈,线圈盒的受力特性,需要对CR线圈进行三维计算.对线圈以及线圈盒进行三维建模,考虑到对称性,仅对线圈建二分之一模计算.

在有限元计算中,为了加载体电流密度.建立了六个局部坐标系.其中每个拐角处采用局部柱坐标,其它坐标采用笛卡儿坐标,并把线圈分为八个单元进行电磁力计算.各个线圈的受力见表1,由于对称性,仅列其中一部分的线圈受力数值.将计算得到的

电磁力,加载到线圈模型上.线圈模型采用四面体单元划分,共有24365个节点,88814个单元.分析时取316LN的杨氏模量为207GPa,泊松比为0.282;超导线圈的弹性模量取138GPa,泊松比取0.338.考虑到线圈的支撑结构,对拐角处线圈进行位移约束.

表1 线圈各个部分受到的电磁力

线圈编号	$F_X/N$	$F_Y/N$	$F_Z/N$
1		55602.2	90656.6
2	5472	4953.77	5754.9
3	23096	-3040.7	24909.5
4	3932	-4591	4852.25
5		-48436	81316

#### 3.3 计算结果及分析

通过计算,得到线圈线圈盒的位移形变(图4)CR磁体结构的屈服判据采用“von-mises”应力校核<sup>[2]</sup>,基本的应力极限判据即: $S_m = \min(2/3\sigma_{0.2}, 1/2Su)$ .在此判据中: $S_m$ 代表该温度下的许用应力强度; $\sigma_{0.2}$ 为技术材料在该温度下的0.2%屈服应力; $S_u$ 代表该温度下其极限抗张强度.当材料的应力强度达到或超过屈服极限时,将在很大区域上发生屈服,致使塑性变形越来越大,最后导致破裂发生.计算得到的线圈的最大位移为0.561mm,发生在线圈2的中间处,最大的von-mises应力为46.4Mpa,发生在拐角线圈与其它线圈交接处;线圈盒的最大位移为0.561mm,最大von-mises应力为105Mpa.316LN材料在300K是的屈服应力 $\geq 350$ Mpa,在4.2K的屈服应力 $\geq 650$ Mpa;极限抗张强度 $\geq 650$ Mpa.由计算可知,线圈盒的结构设计满足强度要求.

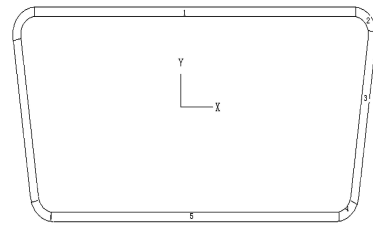


图3 线圈各个部分编号

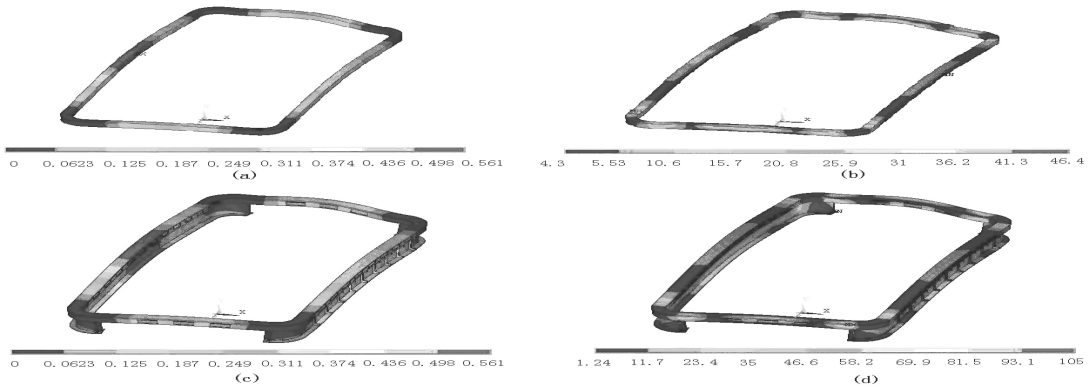


图4 线圈、线圈盒在电磁力作用下的位移形变和应力分布

## 4 线圈冷屏杜瓦结构的热分析

采用热结构耦合的方法对超导线圈杜瓦结构进行分析. 考虑到结构的对称性, 对模型进行简化, 仅建四分之一模. 由于支撑弹簧结构的约束, 对模型底部的位移自由度进行约束. CR 磁体线圈结构的主要载荷<sup>[3]</sup>有: 外界温度通过外杜瓦的传导热; 磁体将受到外杜瓦与外冷屏之间, 内外冷屏之间的辐射热载荷; 真空筒的外测与空气的对流换热.

超导磁体最薄弱的环节为磁体超导线圈, 为了分析线圈由常温降至低温的受力情况, 进行线圈(盒)三维建模分析. 热-结构耦合分析采用直接法, 分析得到的热载荷直接加载到结构分析中, 网格划分采用 smart 划分和拐角处规定划分相结合的方法, 得到 53461 个单元, 共 97639 个节点. 得到模型的位移分布

云图和等效应力分布云图. 分析结果表明: 最大变形为 11.6mm, 出现在拐线圈拐角处.

对于降温过程中, 由于热膨胀系数不同引起的热应力属于二次应力<sup>[4]</sup>, 当它达到屈服极限时, 只引起局部屈服屈服, 大部分仍处于弹性状态. 这类应力是由于变形受到某种限制引起的, 因此, 当应力达到屈服极限时, 变形变得较为自由, 所受到的限制大为减小. 所以, 局部地区的应力和变形在屈服之后不会继续增加, 而是得到一定程度的缓和, 因此也成为自限应力. 根据美国 ASME 评定标准<sup>[5]</sup>, 要求热应力不能超过三倍材料的许用应力. 从分析结果看出应力整体分布均匀. 线圈盒最大应力为 61.3MPa, 316 LN 材料在 300K 是的屈服应力  $\geq 350\text{Mpa}$ , 在 4.2K 的屈服应力  $\geq 650\text{Mpa}$ ; 极限抗张强度  $\geq 650\text{Mpa}$ . 由计算可知, 线圈盒的结构设计满足强度要求.

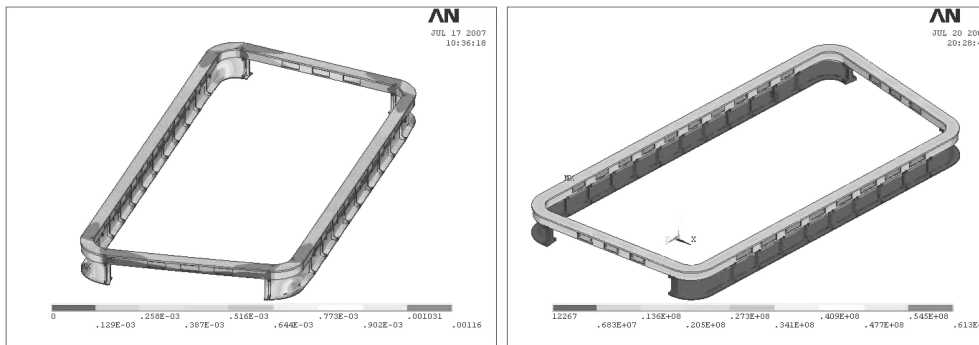


图 5 线圈盒的位移形变和热应力分布

## 5 结论

本文通过有限元计算得到, 线圈盒的结构设计能够满足强度要求, 并为以后的设计提供了有价值的分

析数据. 结果显示最大的应力出现在拐角线圈处, 由于有加强筋的支撑, 最大应力没有超过材料的屈服极限. 但是由于线圈盒的结构复杂, 盒体上有很多窗口槽, 而且窗口处应力也很大, 所以需要盒体受力做进一步的分析, 对应力集中的地方的结构需要加强.

## 参考文献(References)

- 1 WU Wei-Yue. Preliminary Design for CR Dipole Coils, IPP. April 5, 2007
- 2 CHEN Wen-Ge. Structure Design and Test Analyzing of Toroidal Field Magnet System for Superconducting Tokamak HT-7U. IPP2002 (in Chinese)  
(陈文革. HT-7U 超导托克马克核聚变装置纵场磁体结构的设计分析与磁体实验研究, 中国科学院等离子体物理研究所, 2002)
- 3 CHEN Wen-Ge. Journal of Hefei University of Technology, 2001, **24** 517—522 (in Chinese)  
(陈文革. 合肥工业大学学报, 2001, **24**: 517—522)
- 4 XIE Han. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2005, **25**: 133—138 (in Chinese)  
(谢韩. 核聚变与等离子体物理, 2005, **25**: 133—138)
- 5 CHENG Ya-Li. Atomic Energy Science and Technology, 2006, **5**: 595—597 (in Chinese)  
(程亚丽. 原子能科学技术, 2006, **5**: 595—597)

## Stress Analysis of CR Superferric Magnet<sup>\*</sup>

BIAN Wen-Long<sup>1,2</sup> YUAN Ping<sup>1</sup> MA Li-Zhen<sup>1;1)</sup> HE Yuan<sup>1</sup>  
LI Qing<sup>1,2</sup> WU Wei<sup>1,2</sup> YAO Qing-Gao<sup>1,2</sup>

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

2(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Finite Element Method is used in this article to analyze the stress of CR superferric magnet. Magnetic force and the stress caused by this force are calculated. The thermal stress and strain of the coil caused by cooling down is also analyzed. The result will be taken as a check for the design of the coil and coilcase, and also as a reference for the optimization of further design and quench protection.

**Key words** superferric magnet, finite element method, stress, magnetic force, thermal stress

---

Received 7 January 2008

<sup>\*</sup> Supported by Director Foundation of Institute of Modern Physics of CAS (0615010SZO) and Western Light Talents Training Program of CAS (0715060XLO)

1) E-mail: malz@impcas.ac.cn