

文章编号: 1007-4627(2007)04-0280-04

# 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, #</sup>, 何源<sup>1</sup>, 李青<sup>2</sup>, 吴巍<sup>2</sup>, 姚庆高<sup>2</sup>

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 介绍了 FAIR 项目 CR 超导二极铁的线圈结构。采用有限元分析方法, 对线圈的电磁力作用进行二维计算分析, 得到了线圈的二维位移变形和应力分布规律, 同时也分析计算了线圈、线圈盒的三维受力以及位移形变, 为线圈盒和支撑结构的优化设计提供了参考依据。

**关键词:** 超导磁铁; 有限元法; 应力; 电磁力

**中图分类号:** TM26<sup>+5</sup>      **文献标识码:** A

## 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 10 余个国家联合建造, 预计建设期 10 年, 总投资 10.017 亿欧元。该装置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) 及超导束运线的 50 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、强磁场和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, 就会导致超导线圈失超, 所以必须对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, 另一方面可为结构的进一步优化提供了依据。

本文主要对线圈受到的电磁力作用进行分析。

## 2 CR 超导二极磁铁结构

表 1 CR 磁铁设计参数

参数名称	参数指标
最高场/T	1.62
最低场/T	0.8
偏转角度/(°)	15
偏转半径/m	8.125
好场区/mm <sup>2</sup>	±225 × 70
均匀度	$3 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-4}$

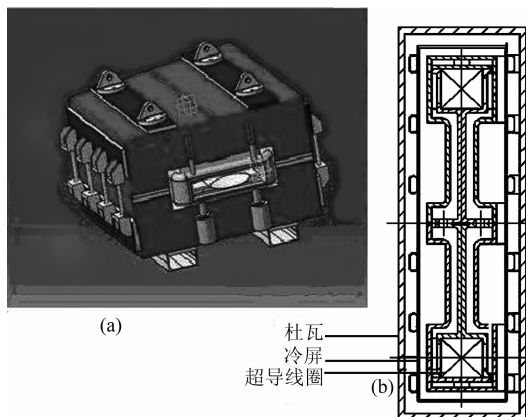


图 1 CR 超导磁体的结构

(a) CR 磁铁总装示意图, (b) 线圈截面。

\* 收稿日期: 2007 - 06 - 27; 修改日期: 2007 - 08 - 06

\* 基金项目: 中国科学院近代物理研究所所长基金资助项目(06150109EO); 中国科学院西部之光人才培养计划项目(0715060XLO)

作者简介: 卞文龙(1984-), 男(汉族), 山东日照人, 硕士研究生, 从事加速器磁铁设计与测量研究;

E-mail: bianwenlong@impcas.ac.cn

# 通讯联系人: 马力祯, E-mail: malz@impcas.ac.cn

CR 超导二极铁为 H 型铁, 采用温铁结构、超导线圈。主要设计参数见表 1。其中, 超导线圈结构由中国科学院等离子体物理研究所设计, 磁场计算以及铁芯结构的设计由中国科学院近代物理研究所完成, 最后总体装配在中国科学院近代物理研究所完成。磁场的总装示意图以及线圈杜瓦截面图见图 1<sup>[1]</sup>。

### 3 超导线圈模型

用于磁铁的超导线采用的是英国牛津仪器公司生产的铜超比为 14 的铜基 NbTi 超导线, 临界电流为 560 A@4T, 设计运行电流 246 A<sup>[1]</sup>, 仅为临界电流的 44% (560 A), 增加了超导线圈的稳定性。整个线圈最终结构为横向 28 匝和纵向 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 mm × 54.8 mm。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>。

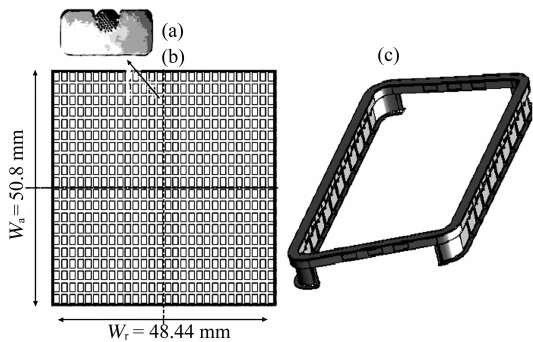


图 2 CR 超导线圈结构

(a) NbTi 超导线, (b) 超导线圈截面图, (c) 线圈与线圈盒装配图。

### 4 二维电磁力计算分析

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 4 363, 单元数为 4 159, 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 1.382 T。因此线圈所受到的磁场力也不是对称分布的。对应的电磁力见图 3, 最大电磁力分布为 85.486 N/m, 位于线圈的左下角。因此在线圈绕制过程中, 要对应力比较集中的左下角加强固定。

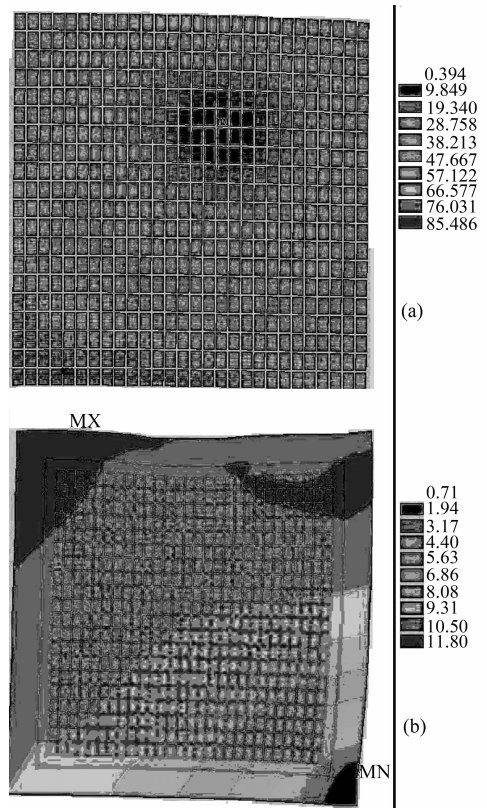


图 3 超导线圈二维计算结果

(a) 线圈的电磁力分布(N/m); (b) 线圈的位移变形( $\times 10^{-6}$  m)。

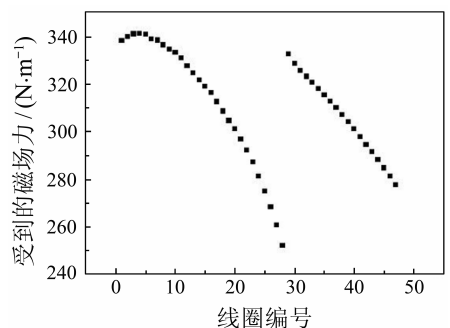


图 4 各个线圈的电磁力分布

图 4 给出了是第 1 层和第 2 层线圈受到的电磁力分布, 每层从左向右对线圈编号。从图上可以看出, 超导线从左向右受到的电磁力逐渐递减, 单根超导线所受到的最大磁场力为 341.236 N/m, 位置为第 1 列第 4 个超导线。由于外加支撑约束, 最大

位移并非由受力最大的线圈所产生，最大的位移形变为 0.011 8 mm。

## 5 三维电磁力计算分析

### 5.1 三维有限元建模

超导线的运行电流是 246 A，采用 OPERA 计算得到的线圈储能为 0.44 MJ，电感 21.4 H<sup>[1]</sup>。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（见图 5），考虑到对称性，仅对线圈建二分之一模型计算。

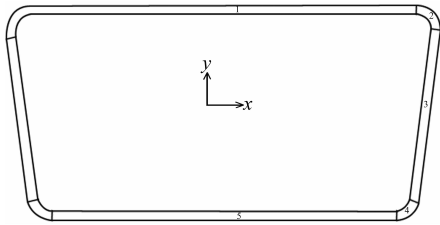


图 5 线圈各个部分编号

在有限元计算中，为了加载体电流密度，建立了 6 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 8 个单元进行电磁力计算。各个线圈的受力见表 2，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 24 365 个节点，88 814 个单元。分析时取 316LN 的杨氏模量为 207 GPa，泊松比为 0.282；超导线圈的弹性模量取 138 GPa，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 2 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		55 602.2	90 656.6
2	5 472	4 953.77	5 754.9
3	23 096	-3 040.7	24 909.5
4	3 932	-4 591	4 852.25
5		-48 436	81 316

### 5.2 计算结果及分析

通过计算，得到线圈线圈盒的位移形变如图 6

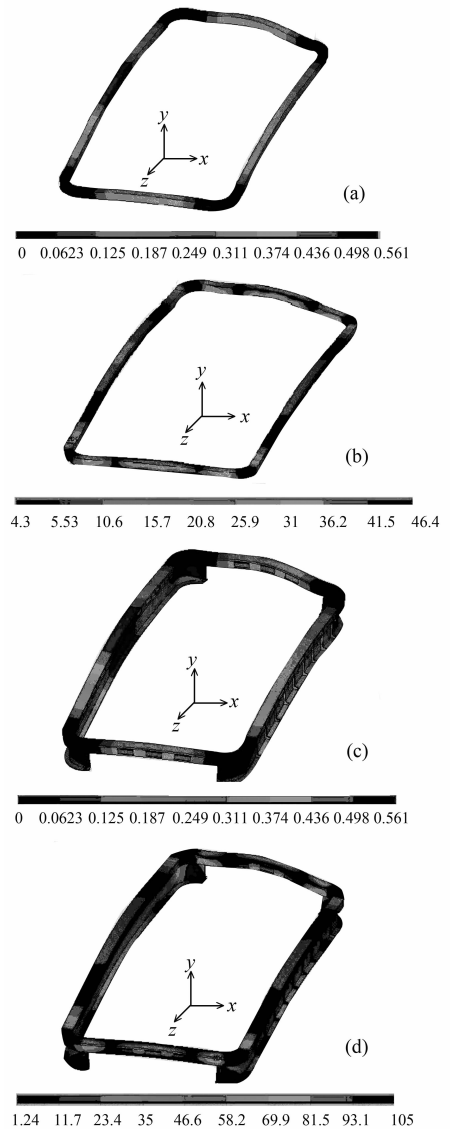


图 6 线圈、线圈盒在电磁力作用下的位移形变和应力分布 (a) 线圈位移形变(mm), (b) 线圈应力分布(Mpa), (c) 线圈盒位移形变(mm), (d) 线圈盒应力分布(Mpa)。

所示。CR 磁体结构的屈服判据采用“von-mises”应力校核<sup>[2]</sup>，基本应力极限判据为  $S_m = \min[(2/3)\sigma_{0.2}, (1/2)S_u]$ 。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 0.561 mm，发生在线圈 2 的中间处，最大的 von-mises 应力为 46.4 MPa，发生在拐角线圈与其它线圈交接处；线圈盒的最大位移为 0.561 mm，最大 von-mises 应力为 105 MPa。316LN 材料在 300 K 时的屈

服应力大于等于 350 MPa, 在 4.2 K 的屈服应力大于等于 650 MPa; 极限抗张强度大于等于 650 MPa。由计算可知, 线圈盒的结构设计满足强度要求。

## 6 结论

本文采用有限元分析法对其进行计算, 得到了二维超导线圈内部的磁场、电磁力的分布情况, 然后通过三维建模, 分析了线圈和线圈盒的受力, 计算了线圈和线圈盒的位移形变、应力分布。由计算结果可知, 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, 所以需要对盒体做进一步的分析, 对其应力集中的结构需要加强。

## 参考文献 (References):

- [1] Wu Weiyue. Preliminary Design for CR Dipole Coils. Hefei: Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, 5 April, 2007.
- [2] Chen Wenge. Structure Design and Test Analyzing of Toroidal Field Magnet System for Superconducting Tokamak. Hefei: Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, 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. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2002.)

## Stress Analysis of Coils for CR Dipole Magnet\*

BIAN Wen-long<sup>1,2</sup>, YUAN Ping<sup>1</sup>, MA Li-zhen<sup>1, #</sup>, HE Yuan<sup>1</sup>, LI Qing<sup>2</sup>, WU Wei<sup>2</sup>, YAO Qing-gao<sup>2</sup>

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

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Coil structure of CR superferic dipole for FAIR is presented in this paper. Finite Element Method (FEM) is used to calculate 2d magnetic force, displacement and stress distribution. 3d magnetic force and displacement of coil and coilcase are also analyzed, which shows that the design is fit for the desire result. Some results will be taken as a reference for further design.

**Key words:** superferic magnet; finite element method; stress; magnetic force

\* **Received date:** 6 Jun. 2007; **Revised date:** 6 Aug. 2007

\* **Foundation item:** Director Foundation of Inisittute of Modern Physics of Chinese Academy of Sciences(06150109EO); Western Light Talents Training Program of Chinese Academy of Sciences(0715060XLO)

# **Corresponding author:** Ma Lizhen, E-mail: malz@impcas.ac.cn