

## GSI 加速器超导二极磁体的绝缘结构及其力学分析

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绝缘结构, 绝缘材料的特性, 绝缘结构的形成工艺 (VPI)。用有限元分析软件 ANSYS 对绝缘结构进行了力学分析。

**关键词:** 超导磁体; VPI; 绝缘层; 有限元分析

## Insulation system and its stress analysis of superconducting dipole magnet for GSI accelerator

Wang Shukai, Wu Weiyue

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

**Abstract:** The insulation system of superconducting dipole magnet is introduced, and the properties of insulation materials are analyzed. The VPI (Vacuum Pressure Impregnation) technology of the magnet coils is also introduced. The stress of insulation system has been analyzed with ANSYS.

**Keywords:** Superconducting magnet, VPI, Insulation layer, Finite element analysis

## 1 引言

国际反质子与离子加速器 (Facility for Anti-proton and Ion Research - FAIR) 是建在德国重离子研究中心 (Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH - GSI) 的大科学工程。研究人员可以借助于 FAIR 开展更深入的粒子研究, 并借以了解一些虽然在地球上未曾出现, 但却在宇宙中的其他地方存在过的粒子的过程。科学家期望通过 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。

本文主要介绍了超导二极磁体的绝缘结构、绝缘材料的特性以及绝缘结构的成形工艺, 并用有限元分析软件 ANSYS 对绝缘结构进行了力学分析, 以确定磁体的绝缘结构设计是否合理。

## 2 GSI 磁体的绝缘结构

GSI 磁体的 1/2 截面结构如图 1 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, 线圈盒同时也是液氦容器。

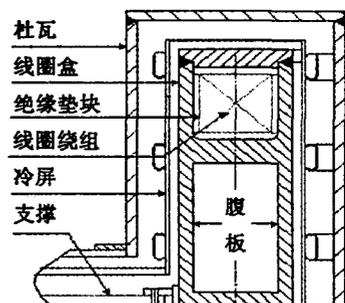


图 1 超导磁体 1/2 截面图

Fig. 1 1/2 cutaway view of the superconducting magnet

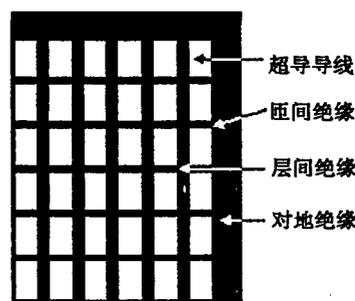


图 2 超导绕组截面局部放大图

Fig. 2 The amplificatory section of the coil winding

收稿日期: 2007-12-17

作者简介: 王树凯 (1982-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为结构设计与有限元分析。

线圈绕组(示意图参见图 2)是超导磁体的重要组成部分。GSI 磁体线圈使用的是由英国牛津公司生产的 NbTi 矩形超导线。导线的截面尺寸为  $1.93\text{mm} \times 1.17\text{mm}$ , 含绝缘套管的截面尺寸为  $2.24\text{mm} \times 1.43\text{mm}$ 。采用单根超导线连续筒式密绕技术绕制磁体线圈。线圈的工作电流是 246A, 每个线圈有  $28 \times 20 = 560$  匝, 共有两个线圈。线圈的匝间绝缘使用导线自带的化纤套管, 厚度约为  $0.155\text{mm}$ 。因此, 相邻的导线间形成  $0.31\text{mm}$  厚的匝间绝缘; 导线每绕制 20 圈形成一筒状结构, 称为一层。再在每一层外绕包  $0.3\text{mm}$  厚的玻璃纤维带, 28 层整齐套在一起, 如此, 相邻的层间将形成  $0.56\text{mm}$  厚的层间绝缘; 最后在整个线圈导体的外围绕包  $2\text{mm}$  厚的玻璃纤维带, 构成对地绝缘。在线圈的绕制过程中预留一匝的空间, 用于放置各种测量元件, 如: 温度传感器、应变片等。绕制完成后的线圈截面为  $48.14\text{mm} \times 44.8\text{mm}$ , 含对地绝缘的截面尺寸为  $52.14\text{mm} \times 48.8\text{mm}$ 。

绕包好的磁体线圈被放入模具内, 用低温环氧胶进行真空压力浸渍, 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, 每个线圈有 32 个垫块。垫块中开有凹槽, 以便液氮通过。

### 3 低温环氧胶 RAL230<sup>[1]</sup>

胶在低温超导磁体中具有多种用途, 实现多种目的, 包括连接、紧固、密封、填充、导热和绝缘。磁体选用低温环氧胶 RAL230。

#### 3.1 胶的组成

胶是由两种环氧树脂和一种固化剂组成, 即环氧树脂(双酚 F, DGEBF)、稀释增韧剂(一种小分子环氧树脂)和固化剂( DETD)。以上三组份按 60:40:21 混合。

#### 3.2 胶的低温性能

GSI 磁体工作在液氮温度下, 因此胶的低温性能是最重要的。环氧树脂从室温冷却到液氮温度下的热收缩率为 0.012。低温力学性能比室温下更优异, 如表 1 所示。

表 1 胶的低温与常温力学性能对比

Tab. 1 The mechanical properties contrast of the resin at cryogenic and room temperature

温区	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	抗弯强度 /MPa
常温	2.6	163	102
液氮(4.2K)	6.0	249	121

### 4 玻璃纤维带<sup>[2]</sup>

GSI 超导磁体中, 玻璃纤维在复合材料绝缘层中起增强作用, 是主要承力部分。绝缘层的性能在很大程度上取决于纤维的性能、含量及使用状态。根据 EAST 工程经验, 选用南京玻璃纤维研究设计院的耐辐照电绝缘玻璃纤维制品, 又称无碱无碱玻璃纤维。由于无碱纤维中碱金属离子少, 所以无碱玻璃纤维的电绝缘性能比有碱玻璃纤维优越得多(见表 2), 而且它的玻璃纤维采用 NOL 环, 其抗拉强度和弯曲度分别比普通 E 玻璃纤维提高 20% 和 14%。

表 2 三种材料电绝缘性能比较

Tab. 2 The insulating properties of three materials

绝缘材料	电缆绝缘电阻( $\Omega \cdot \text{m}$ )
耐辐照电绝缘玻璃纤维	$7.1 \times 10^9$
石英纤维	$4.9 \times 10^8$
聚酰亚胺	$9.7 \times 10^6$

### 5 GSI 线圈的 VPI 工艺

GSI 磁体受力复杂且磁体的尺寸比较大, 磁场的精度要求高, 所以磁体绝缘结构的成形工艺非常重要, 决定采用 VPI 工艺。线圈的 VPI 工艺流程如下:

(1) 将绕制好的线圈放入真空压力罐内, 对线圈进行加热以除去潮气, 控制温度不超过  $120^\circ\text{C}$ , 此过程大约持续 15 个小时。

(2) 对线圈降温、抽真空。此过程持续时间较长, 最终真空压力罐内的真空度应在  $2-3\text{Pa}$ 。

(3) 在 2 结束前开始配胶, 并置于混胶脱气罐中进行脱气, 同时准备浸渍。

(4) 进行真空压力浸渍。采用“呼吸法”(抽空、加压多次), 此过程大约持续 3 小时。

(5) 对线圈施加并保持 1 个大气压直到凝胶

过程结束。加压同时升高线圈的温度至 80℃,保温 15 小时。

(6) 升温至 130℃,对线圈进行固化。此过程约为 20 小时。

(7) 将线圈自然冷却至室温。

## 6 GSI 磁体绝缘结构的力学分析

GSI 磁体在运行时,要受到较大的电动力,液氮温度下由材料收缩引起的内应力以及热应力等作用,因而对磁体的机械强度有较高的要求。其中电动力对磁体的影响较大,因此本文主要对电动力作用下的绝缘结构进行力学分析。

### 6.1 GSI 磁体绝缘结构的三维力学分析

由于 GSI 磁体中各绝缘层相对较薄,为了划分有限元单元形状合理以保证计算精度,势必会产生大量的有限元单元,从而使得计算规模过于浩大。因此,只对对地绝缘层和绝缘垫块进行三维分析,而将匝间、层间绝缘和 NbTi 超导线等效成铜导线。超导绕组中大部分成分是铜,因

此这种等效是合理的。同时,由于绝缘结构已与超导线、线圈盒等固化为一体,因此建立了包括超导绕组、对地绝缘、垫块、线圈盒以及支撑在内的三维分析模型。图 3 是线圈、线圈盒及其支撑的结构图。

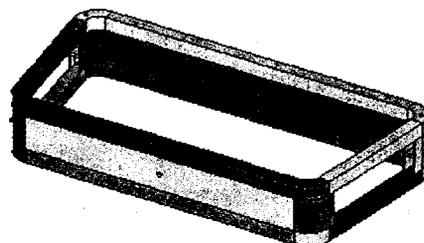


图 3 超导磁体结构图

Fig. 3 Structure of the superconducting magnet

绝缘结构的力学分析主要应用电磁分析所得到的电动力作为结构的载荷条件,边界条件为 14 个支撑的全约束。计算时采用纯铜材料特性来代替线圈绕组的材料特性,对地绝缘层采用树脂基玻璃纤维增强绝缘复合材料特性,绝缘垫块采用 G10 材料特性,线圈盒及其支撑采用 316LN 材料特性。各组分在 4.2K 下的材料特性见表 3<sup>[3-5]</sup>。

表 3 各组分在 4.2K 下的材料特性

Tab. 3 The properties of the materials at 4.2K

	弹性模量(Pa)			剪切模量(Pa)			泊松比		
	$E_x$	$E_y$	$E_z$	$E_{xy}$	$E_{yz}$	$E_{zx}$	$\mu_{xy}$	$\mu_{yz}$	$\mu_{zx}$
铜	1.38E11	1.38E11	1.38E11	\	\	\	0.338	0.338	0.338
复合材料	3.7E10	3.5E10	2.4E10	1.16E10	9.7E9	8.2E9	0.25	0.2	0.42
316LN	2.07E11	2.07E11	2.07E11	8.0E10	8.0E10	8.0E10	0.282	0.282	0.282
G10	3.62E10	3.62E10	3.62E10	\	\	\	0.212	0.212	0.212

注:表中的 x 方向为垂直玻璃布方向,y、z 为玻璃布内的两个方向

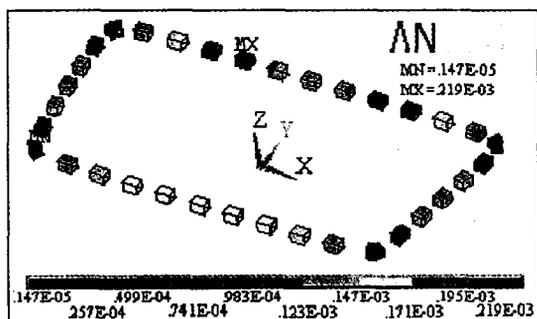


图 4 绝缘垫块的变形云图

Fig. 4 Distortion distribution of the insulating blocks

模型的分析结果为:垫块的最大位移为 0.219mm,发生在长直线段(见图 4);最大 Von Mises 应力为 11.6MPa,发生在弯道处(见图 5)。对

地绝缘层的最大位移为 0.225mm,发生在对地绝缘层的长直线段(见图 6);最大 Von Mises 应力为 8.56MPa,在对地绝缘层的弯道处(见图 7)。

### 6.2 GSI 磁体绝缘结构的二维力学分析

三维分析无法得到线圈绕组匝间、层间绝缘的真实应力分析情况,因此有必要根据线圈绕组的真实结构建立相应的二维模型,以分析线圈绕组内部实际的应力分布情况。根据三维分析的结果,在线圈绕组的最大 Von Mises 应力处取一厚度为 2mm 的小段建立起二维有限元模型(见图 8),采用 ANSYS 提供的子模型技术<sup>[6]</sup>对其进行分析。子模型方法又称为切割边界位移法。切割边界是子模型从整体模型中切割开的边界,整体

模型计算得到的在切割边界的位移值即是子模型的边界条件(通过插值实现)。由于所取截面的位置没有垫块,因此二维有限元模型包括超导线、匝间绝缘层间绝缘和对地绝缘,而没有垫块和线圈盒。分析时所用的材料属性同三维分析,约束条件即是切割边界位移。

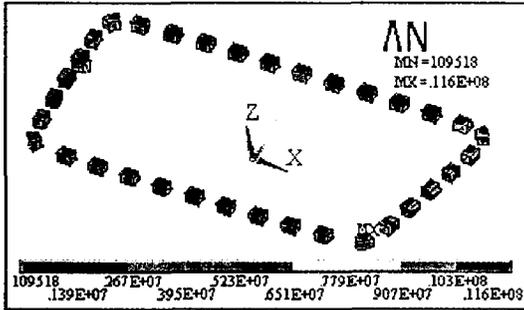


图 5 绝缘垫块的应力云图

Fig. 5 Von Mises stress distribution of the insulating blocks

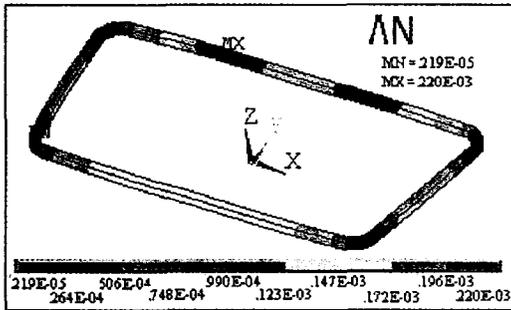


图 6 对地绝缘层的变形云图

Fig. 6 Distortion distribution of the ground insulation

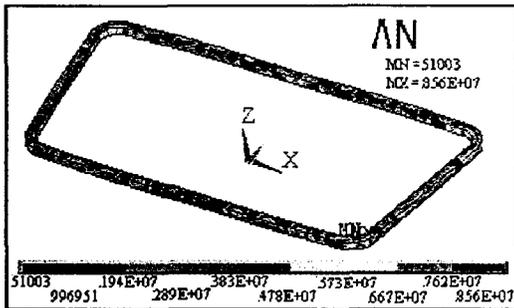


图 7 对地绝缘层的 Von Mises 应力云图

Fig. 7 Von Mises stress distribution of the ground insulation

模型的分析结果为:匝间与层间绝缘的最大位移是 0.017mm(见图 9),最大 Von Mises 应力为 16MPa(见图 10);对地绝缘层的最大位移是 0.0173mm(见图 9),受到的最大 Von Mises 应力为 14.1MPa(见图 10)。

### 6.3 结果讨论

由各绝缘层和垫块的变形云图可知:在电力作用下,线圈各边有背离中心运动的趋势。其中线圈两直线段的变形较其两斜线段的变形较大,但最大只有对地绝缘层的 0.225mm,因此磁体运行时线圈的变形将会很小,磁场位形的精度与稳定性将得到保证。

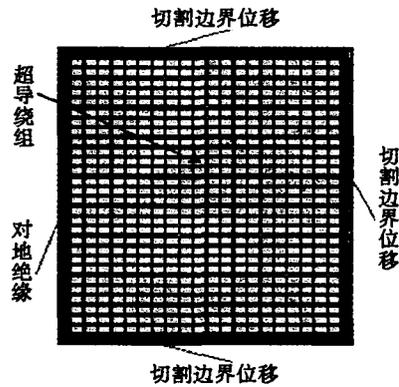


图 8 线圈的二维分析模型

Fig. 8 2D model of the coil

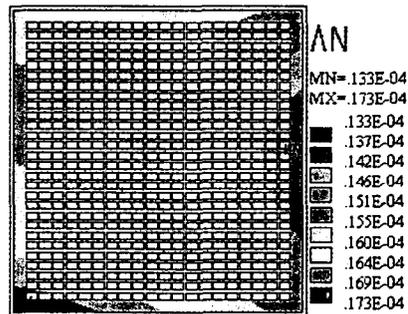


图 9 匝间、层间及对地绝缘的变形云图

Fig. 9 Distortion distribution of the insulating layers

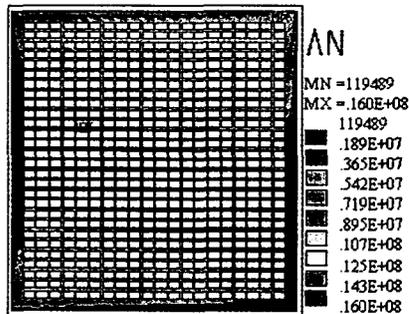


图 10 匝间、层间及对地绝缘的应力云图

Fig. 10 Von Mises stress distribution of the insulating layers

各绝缘层所承受的应力也较小,最大为匝间与层间绝缘的 16MPa。根据测试<sup>[2]</sup>,树脂基玻璃  
(下转 32 页)

600nm, 超导薄膜的表面均匀性非常好,  $J_c$  的均值可以达到  $2.8\text{--}3.0\text{mA}/\text{cm}^2$ 。  $R_s$  优于  $0.5\text{m}\Omega$ 。滤波器的实际测试结果如图 5 所示, 中心频率  $f_0 = 912\text{MHz}$ , 通带宽度  $BW = 6.3\text{MHz}$ , 带外抑制  $SS \geq 80\text{dB}$ , 低端频率选择性为  $80\text{dB}/2.0\text{MHz}$ , 高端频率选择性为  $80\text{dB}/2.7\text{MHz}$ , 插入损耗  $I_L \leq 0.1\text{dB}$ , 回波损耗  $R_L = 18\text{dB}$ , 输入、输出阻抗为  $50\Omega$ 。滤波器的工作温度为  $75\text{K}$ 。

## 5 结论

分析了中国联通 GSM900 移动通信系统的技术要求, 给出了基于切比雪夫原型的 12 节滤波器理论结果, 利用 Sonnet 分析软件进行模拟仿真, 设计了基于  $\text{MgO}$  基片的高温超导滤波器微带电路, 实际制作的高温超导滤波器可以满足中国联通 GSM900 移动通信系统的技术要求。

(上接 22 页)

纤维增强绝缘复合材料低温下的弯曲强度可超过  $560\text{MPa}$ , 拉伸强度沿纤维方向为  $615\text{MPa}$ , 垂直于纤维方向为  $321\text{MPa}$ , 因此所用绝缘复合材料可以满足设计要求。绝缘垫块所承受的最大应力为  $11.6\text{MPa}$ , 而 G10 材料至少可以承受  $85\text{MPa}$ <sup>[3]</sup> 的应力, 所以绝缘垫块所用 G10 材料是可以满足力学要求的。同时各绝缘层应力较小, 而线圈盒则承受较大的应力, 说明大部分的载荷被有效地传递到线圈盒上, 因此线圈的绝缘结构设计是合理的。

## 7 总结

超导磁体的绝缘系统对磁体性能和稳定性运行等起关键性的作用。本文对 GSI 超导二极磁体的各绝缘层进行了有限元分析, 认为其绝缘结构的设计是合理的, 所用绝缘材料能够满足力学要求。但本文只是对电动力载荷进行了分析, 对于多种载荷同时作用的情况还需要进一步分析; 将超导绕组等效为铜导线, 对分析精度的影响还有

## 参考文献

- [1] 靳晓嘉, 宋俊德. 无线网络优化的现状及发展方向 [C]. 首届全国移动网络优化应用与服务研讨会, 北京: 2002.
- [2] 季来运, 等. CDMA 移动通信系统用高温超导滤波器的研制 [J]. 低温物理学报, 2005, 27(4): 365 - 370.
- [3] 美国 STI 公司网站资料 [S]; <http://www.suptech.com>.
- [4] Hong Jiasheng, Lancaster M J. Theory and experiment of Novel Microstrip Slow - Wave Open - Loop Resonator Filters [J]. IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques, 1997, 45(12): 2358 - 2365.
- [5] Makimoto M, Yamashita S 著, 赵宏锦译. 无线通信中的微波谐振器与滤波器 [M]. 国防工业出版社, 2002.
- [6] 甘本祯, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与与设计 [M]. 科学技术出版社, 1973.
- [7] Hong Jiasheng, Lancaster M J. Microstrip Filter for RF/Microwave Application [M]. A Wiley - Interscience Publication, 2001.

待于分析。

## 参考文献

- [1] 崔益民, 潘皖江, 等. 托卡马克 HT - 7U 低温超导磁体的绝缘系统 [J]. 核科学与工程, 2002, 22(2): 140 - 144.
- [2] 崔益民. HT - 7U 超导磁体绝缘结构及其工艺的研究 [D]. 中科院等离子体物理研究所博士论文, 2003, 2.
- [3] 秦织. 有限元分析在超导磁体设计中的应用 [D]. 中科院等离子体物理研究所硕士论文, 2007, 5.
- [4] 曹云露. 大型超导 Tokamak 装置极向场线圈的设计研究 [D]. 中科院等离子体物理研究所博士论文, 2001, 5.
- [5] 潘皖江. 高性能氮气密低温复合材料绝缘子工艺研究 [D]. 中科院入队等离子体物理研究所博士论文, 2006, 3.
- [6] 阙国华, 谭长建, 等. ANSYS 高级工程应用实例分析与二次开发 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.