

文章编号: 1007-4627(2012)01-0067-05

5T 有源屏蔽式超导磁体结构设计

郭永超^{1,2}, 张小奇¹, 马力祯¹, 吴巍¹, 吴锡², 张晓鹰^{1,2}

(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 10049)

摘要: 介绍了为兰州 Penning 离子阱项目专门设计的 5T 有源屏蔽式超导磁体。为达到物理设计要求的场均匀度, 超导磁体有 3 层共计 6 个线包组成。同时为了确保线圈绕制的定位精度和在强磁场下的稳定性, 绕制骨架采用三筒体结构, 模拟计算表明线圈的绝缘和固定结构能够达到强磁场下的电气和机械性能要求。对 5T 有源屏蔽式超导磁体结构设计材料选择以及线圈的绕制工艺进行了详细的论述。

关键词: 有源屏蔽; 超导磁体; 结构设计

中图分类号: TM26+5 **文献标志码:** A

1 引言

LPT 是国内研制的第一台用于高精度质量测量的 Penning 离子阱^[1] (2007 年, 中国科学院近代物理研究所提出), 它采用的 7T 高均匀度超导磁体达到了核磁共振磁体的水平, 具有很高的研制难度。为了研制的顺利, 我们预研制了与 7T 有类似结构的 5T 超导磁体实验样机, 作为结构与加工的技术验证, 为 7T 超导磁体积累实际可行性经验。同时也为中国 3T 以上的强磁场超导磁体设计、加工和制造做出有益的探索。

5T 超导磁体是螺线管式结构, 线圈分内外 3 层共 6 个线包, 没有铁轭。作为一个 7T 预研磁体并没有单独做配套的杜瓦, 用的是实验杜瓦。采取液氮全浸泡式冷却方式, 磁体测试时吊装在杜瓦里面。5T 超导磁体结构设计主要部分是线圈和骨架机械结构设计。根据物理设计要求, 探讨了结构设计方案与线圈绕制工艺。

2 5T 超导线圈的物理设计要求与结构布局

2.1 5T 超导线圈物理设计要求

超导磁体的杂散场屏蔽目前常用的有两种办

法。一种是铁磁屏蔽, 即用铁磁物质把超导磁体封闭起来, 使杂散磁场通过铁磁物质形成闭合回路, 从而大大减小了铁屏以外空间的杂散磁场。这种方法的主要缺点是需要大量钢铁, 使装置变得非常笨重。

另一种是有源屏蔽, 它是在主线圈外面安置一个同轴的螺线管线圈(屏蔽线圈)。两个线圈产生的磁矩大小相等, 方向相反, 因而在离磁体较远处, 两个线圈产生的磁场基本上相互抵消, 从而起到了对杂散磁场的屏蔽作用。与铁磁屏蔽方法相比, 有源屏蔽可以减小装置的体积和重量。5T 超导线圈采用有源屏蔽方式。

5T 超导线圈的磁场模拟计算模型见图 1, 由 3 层共计 6 个线包组成。最里层是一个线包, 中间层 3 个线包, 最外层 2 个线包。由磁场模型优化确定了线包的绕制方案及 3 层筒体架构。

从物理设计指标的角度考虑, 要保证 $\phi 40$ mm 好场区(见图 1)内 1×10^{-4} 的场均匀度, 以及 5T 的强磁场, 6 个线包截面区域公差、对称度以及 6 个线包同轴度要求非常高。根据计算, 线包的加工和绕制公差只有控制在 0.08 mm, 物理设计指标才可以达到, 因此线圈的结构设计和绕制工艺是成功研制 5T 超导磁体的关键。

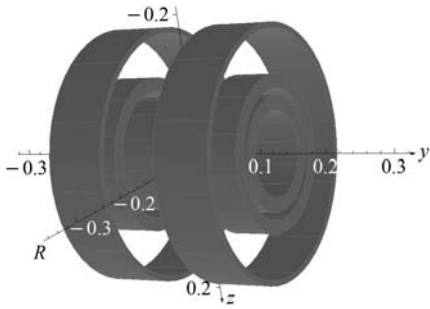


图 1 5T 场算模型

2.2 5T 超导线圈的骨架结构布局

超导磁体的骨架机械结构三维模型见图 2。线圈绕制在三筒体上，筒体为 5 mm 厚不锈钢卷筒。线包的固定由绝缘材料 G10 环和固定不锈钢环完成。G10 是一种玻璃纤维(10%)与树脂碾压复合材料。这种材料可以承受极大的压力而不会损坏和变形，不会被水气和液体所渗透，具有绝缘和耐酸碱的特性，密度较小。

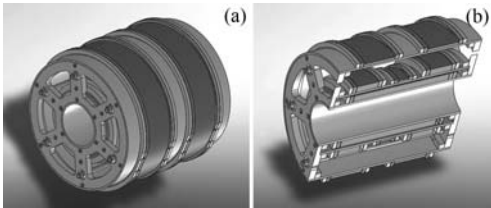


图 2 5T 三维模型

不锈钢环焊接在筒体上，内侧是 G10 垫板环。G10 环对线圈线包起保护作用，防止不锈钢环与线圈直接接触引起摩擦损伤。同时绕制线圈时进出线头可在 G10 垫板环上开槽完成，比较方便。每个线包的外层缠绕不锈钢丝一层，防止工作时轴向力过大。

3 层线圈筒体的固定由定位板来完成，三筒体端部均焊接法兰，定位板(黄色)与每层的端部法兰用螺钉联接，由此三筒体得到固定。

线包区域公差的保证由 G10 环的加工精度和现场调节完成，三筒体的同轴度由定位板的加工精度保证。因此定位板的加工要求比较高，特别是三台阶精度尤为重要。

根据以上设计方案确定的结构模型经 ADINA 软件进行力学分析，结果表明在低温工作状态时，此结构的受力、变形在容许范围内。

超导体磁体二维工艺总装图纸见图 3，其技术要求如下：

(1) 所有各层线圈骨架在绕制线圈前先进行预装配确认安装可靠，保证设计精度后再进行绕线等后序工艺。

(2) 线圈之间的电连接及线圈走线的固定形式等具体工艺确定后添加。

(3) 线圈外缠铝带，厚度与固定方式等具体工艺确定。

(4) 每一层上的线圈一线绕制，只有一个进线头和出线头，首尾线头应至少保留 800 mm。

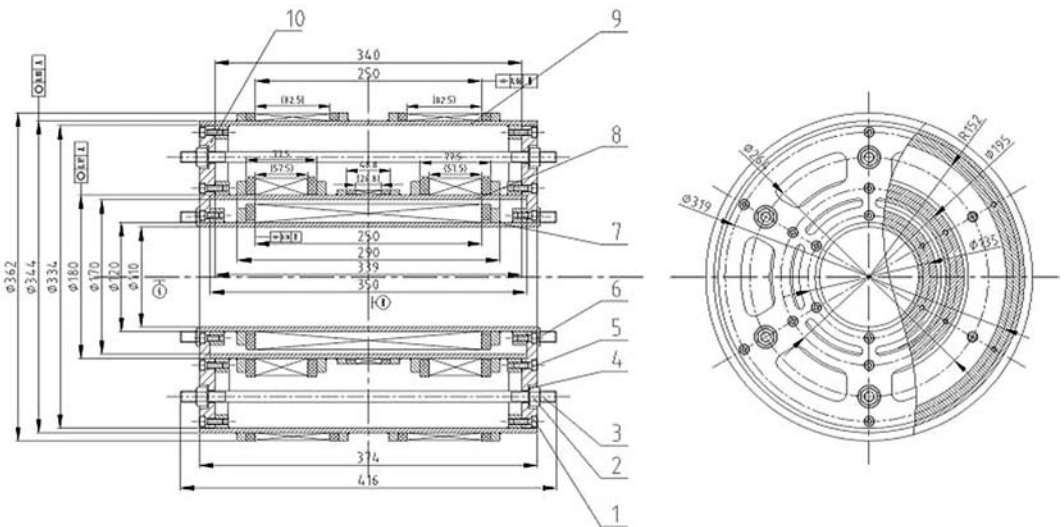


图 3 二维工艺总装图纸

- 1 内六角圆柱头螺钉 M6X20, 2 六角螺母 M12, 3 拉杆, 4 平垫圈 C 级 12, 5 内六角圆柱头螺钉 M6X20, 6 内六角圆柱头螺钉 M6X15, 7 第一层线圈体, 8 第二层线圈体, 9 第三层线圈体, 10 定位板。

3 各种材料的低温性能

5T 超导磁体所用的材料有, 316L 型不锈钢、G10 复合材料、超导 NbTi 线、聚酰亚胺、无碱玻璃

丝带, 另外还有固化环氧, 不锈钢丝。

骨架所用材料是 316L 型不锈钢。表 1 列出了 316L 的低温机械力学性能参数。

表 1 316L 的低温机械力学性能参数^{[2-3]*}

材料	屈服强度/MPa			极限强度/MPa			弹性模量/GPa	泊松比
	300 K	77 K	4 K	300 K	77 K	4 K	4 K	4 K
316L	310	607	815	552	1 069	1 362	207	0.282

* G10 复合材料在 4.2 K 时的低温机械特性见表 2 和表 3。

表 2 G10 复合材料在 4.2 K 时的低温特性^[3]

材料	弹性模量/GPa	泊松比
G10	36.2	0.212

表 3 3 种材料的低温特性^[2-3]

材料	弹性模量/GPa		热收缩率 ($\times 10^{-3}$ m/m)	泊松比
	293 K	4.2 K		
聚酰亚胺	6	9~11	~5	
NbTi		82		
铜	130	138	3.1	0.338

超导导线采用西部超导公司生产的 NbTi 线绕制而成, 其截面尺寸 1.25×0.8 mm, 裸线截面尺寸 1.19×0.74 mm。线编号 C36-1.25 \times 0.8, 芯数 36, 铜超比 4.33:1。由于铜超比较大, 其温度线性膨胀系数可按铜来估算。

线圈的绝缘结构是无碱玻璃丝带 0.05×20 mm 半叠绕两层, 筒体表面用聚酰亚胺薄膜带 0.05×20 mm 半叠绕两层作为线包与筒体的绝缘。玻璃纤维在 4.2 K 时的低温特性见表 4。

表 4 玻璃纤维 4.2 K 时的低温力学特性^{[3]*}

材料	弹性模量/GPa			剪切模量/GPa			泊松比		
	E_x	E_y	E_z	E_{xy}	E_{yz}	E_{zx}	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{zx}
玻璃纤维	37	35	24	11.6	9.7	8.2	0.25	0.2	0.42

* 表中的 x 方向为垂直玻璃布方向, y 和 z 为玻璃布内的两个方向。

4 力学校核与变形分析

4.1 模型建立

为了获得可靠性比较好的分析结果, 分别用 ADINA 程序^[4]和 ANSYS 程序对超导磁体进行了模拟计算。两者建立的线圈模型划分相同数量的网格数, 模型采用各向同性材料分析。由于选用的铌钛超导导线铜超比约为 4:1, 计算时选用铜的材料性质进行分析, 弹性模量为 102 GPa, 泊松比为 0.33。由于 ADINA 不能做电磁耦合分析, 因此需要将 Tosca 计算的磁力导出作为载荷加载到 ADINA 程序中。

结合 FAIR 收集环超导二极磁体支撑设计与热负荷分析^[5]与 CR 超导二极磁铁线圈受力分析^[6]的模拟流程, 对整体结构进行应力分析。

4.2 整体结构分析及结果

超导线圈加上骨架支撑结构后的有限元模型见图 4。

支撑骨架包括 3 个绕线筒, 线圈两侧的挡环, 线圈外的不锈钢丝以及连接各绕线筒的边法兰。支撑结构均用不锈钢材料制成。分析结果见图 5。

结果显示, 整体结构最大形变发生在最内层线圈的中间, 为 0.038 mm。最大应力为 55 MPa, 发生在最内层线圈的两侧, 均在骨架所能承受的应力范围内。

综上所述, 5T 超导体结构设计选用部件材料及骨架结构完全可以承受工作时应力应变的最大幅度, 机械结构设计是合理的。

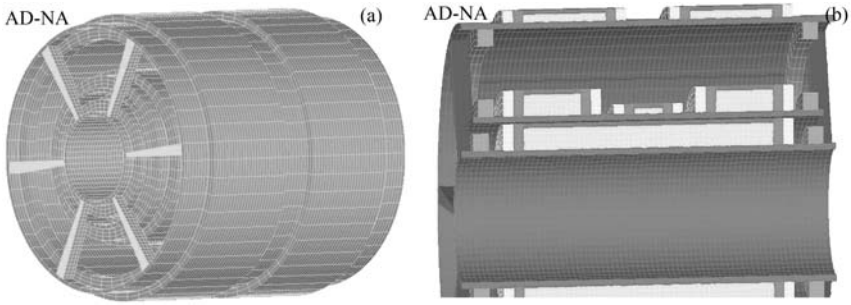


图 4 5T 超导线圈有限元模型

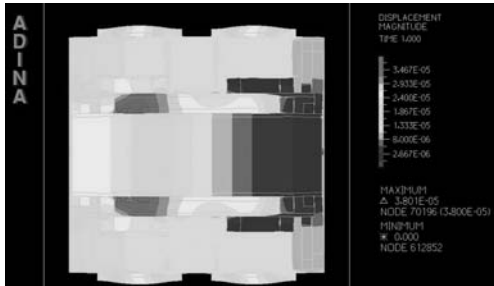


图 5 5T 超导线圈有限元分析

5 线圈线包绝缘结构及绕线工艺

5.1 线圈绝缘结构

超导磁体线圈共有 6 个线包。第 1 层筒体的线规绕组为线包 1，相应匝数理论要求 200×25 匝；第 2 层筒体中间的线规绕组为线包 2，相应匝数理论要求 23×7 匝，两端各一个线规绕组分别为线包 3 与线包 4，两线包匝数布局相同，相应匝数理论要求 46×23 匝；第 3 层筒体上两个线规绕组分别为线包 5 和线包 6，两线包匝数布局相同，相应匝数理论要求 66×10 匝。

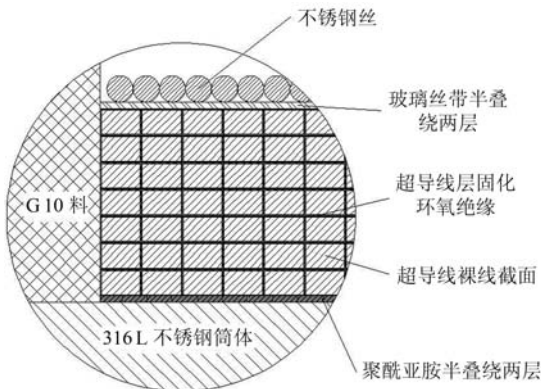


图 6 线包绝缘结构

5.2 绕线工艺流程

3 个筒体分立单独绕制，绕制环境尽量保持洁净，防止灰尘侵染。

线圈区域筒体表面半叠绕聚酰亚胺薄膜带两层。每一层线规绕制完后，做清洁处理，再涂刷低温环氧。绕制过程中，需控制线规张紧力。对张紧力的控制是一个很重要的因素，它对绕制完后匝数的多少有着直接的影响。如果张紧力过小，在相同空间范围内，匝数有可能达不到理论要求值。

最外层绕制完毕涂刷环氧，再进行缠绕半叠绕玻璃丝带，最后绕制不锈钢丝。

合理布置线包之间的走线，尽量避免弯折。以第二层筒体线包为例，进线头从骨架一侧筒体挡环及环氧垫块底部预留走线槽进入，左端线包绕线完后，从另一侧高端引出。引出后沿过渡块上线槽平滑走线至中间线包的进线槽，中间线包绕完后，引线沿过渡块上线槽平滑走线至右端线包进线槽，进线头由中间线包的引出线充当，绕线完毕后从右侧高端引出。

所有工序完毕后，打电压检查绝缘情况。

6 结论

超导磁体的结构稳定性是超导磁体设计过程中的最基本要求，本文根据其物理要求做出了合理的骨架结构布局与线圈线包绝缘结构。运用 ADINA 软件计算了其受力及位移情况，均在承受范围之内。给出了线包的绝缘结构和详细的绕线工艺流程，而且在设计过程中仔细考虑了绕线骨架的加工误差、线圈绕制张紧力以及层间绝缘的均匀性等，最终能够确保 5T 超导磁体的电磁和机械性能。

参考文献 (References):

- [1] HUANG Wenxue, XIAO Guoqing, WANG Yue, *et al.* Chinese Physics C, 2008, **32**(Sup. II): 197.
(黄文学, 肖国青, 王玥, 等. 中国物理 C, 2008, **32**(增刊 II): 197.)
- [2] WANG Qiuliang. Superconducting Magnets and High Magnetic Field Science. Beijing: Science Press, 2008, 435(in Chinese).
(王秋良. 高磁场超导磁体科学. 北京: 科学出版社, 2008, 435.)
- [3] WANG Shukai, WU Weiyue. Cryogenics and Superconductivity, 2008, **36**(3): 19(in Chinese).
(王树凯, 吴维越. 低温超导, 2008, **36**(3): 19.)
- [4] The ADINA System [EB/OL]. [2011-03-03]. <http://www.adina.com/products.shtml>.
- [5] ZHU Yinfeng, WU Songtao, WU Weiyue. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2008, **28**(3): 218(in Chinese).
(朱银锋, 武松涛, 吴维越. 核聚变与等离子体物理, 2008, **28**(3): 218.)
- [6] BIAN Wenlong, YUAN Ping, MA Lizhen. Nuclear Physics Review, 2007, **24**(4): 280(in Chinese).
(卞文龙, 袁平, 马力祯. 原子核物理评论, 2007, **24**(4): 280.)

Structure Design of 5T Actively Shielded Superconducting Magnet

GUO Yong-chao^{1, 2, 1)}, ZHANG Xiao-qi¹, MA Li-zhen¹, WU Wei¹, WU Xi², ZHANG Xiao-ying^{1, 2}

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

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

Abstract: A 5T actively shielded superconducting magnet was designed for Lanzhou Penning Trap project. In order to achieve homogeneity of physical requirements, superconducting magnet was made up of six coils, which were wound on framework of three layers. Meanwhile, three framework structure can ensure the precision of coil winding and the mechanical stability under intense magnetic field. The results of simulation show that the insulation and fixed structure of the coil can satisfy the electrical and mechanical requirements under intense magnetic field. At last, properties of the used materials and coil fabrication have been presented.

Key words: active shielding; superconducting magnet; structure; design