

文章编号: 1007-4627(2012)03-0244-04

ADS 注入器 II 超导螺线管的初步测试

杨晓亮^{1,2}, 马力祯¹, 韩少斐^{1,3}, 关明智¹, 杨通军¹, 杜俊杰¹, 倪东升¹,
郑石钧¹, 吴巍¹, 杨文杰¹, 朱丽¹, 吴北民¹, 陈玉泉¹

(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;

3. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 介绍了加速器驱动次临界系统(ADS)注入器 II 束流聚焦单元超导螺线管的初步测试。该测试在高度 1 600 mm、直径 510 mm 的垂直杜瓦中, 利用型号为 cryogenic sms 的超导电源对磁体进行了励磁, 并利用霍尔探头测试了其轴向磁场分布情况和漏场情况, 其中中心磁场励磁后可达 8.20 T, 漏场分布和计算值的相对误差小于 10%。同时, 对励磁过程中骨架的应力应变状态做了测试。对测试结果的分析表明, 骨架结构设计合理, 应变状态变化平稳, 磁体低温稳定性能良好。

关键词: 超导螺线管; 加速器驱动次临界系统; 垂直测试; 磁场测量

中图分类号: TL503.8

文献标志码: A

1 引言

中国科学院先导科技专项“未来先进核裂变能——ADS 嬗变系统”注入器 II 是由中国科学院近代物理研究所承担研制的加速器驱动次临界系统(ADS)强流质子直线加速器项目。本文测试的磁体是为 ADS 注入器 II (即强流质子直线加速器中的一个 cryomodule 中)实际应用的超导螺线管预研的样机。通过测试和验证螺线管所提供的磁场在加速器物理束流动力学中能否实现对预定的粒子的磁场约束, 为将要建成的 ADS 项目后续的一系列相同特征的磁体提供技术支持和工艺积累。

作为 ADS 注入器 II 的关键设备之一, ADS 超导螺线管结构和性能对直线加速器中的束流影响很大, 在 cryomodule 的每两个超导 HWR 腔之间的狭小空间中需要实现对粒子束流的聚焦、弯转和闭轨校正等功能。相比四极磁体而言, 超导螺线管结构可以提供较高的聚焦梯度并占用较小的空间。对于强流加速器而言, 螺线管结构最显著的优点是对束流轨道不匹配度的容忍度较高^[1]。磁体设计的最大

难点是要求在狭小的空间产生高达 7 T 的磁场, 且在中心孔径较大的情况下, 还需要保证在磁体外部区域(主要是超导谐振腔区域)的漏场足够低, 从而使剩余电阻率保持较低的水平, 不影响腔体的品质因数^[2]。同时, 在此螺线管结构中, 还需要两个方向横向场积分量, 以实现束流的闭轨校正和调节功能。磁体的主要参数^[3]见表 1, 螺线管的主体磁体结构如图 1 所示。

表 1 ADS 注入器 II 超导螺线管主要设计参数

名称	指标
中心磁场/T	7
孔径/mm	44
轴向积分量/(T·mm)	1 000
有效长度/mm	150
漏场要求	有源屏蔽后距离磁体中心 280 mm 处的漏场低于 40 mT

本文对螺线管的主体部分(不包含校正线圈和无源屏蔽部分)进行了垂直测试、测试了励磁情况和有源屏蔽漏场情况和骨架的应力应变状态。

收稿日期: 2012-01-09; 修改日期: 2012-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NSF91026001)

作者简介: 杨晓亮(1986—), 男, 河南新县人, 硕士研究生, 从事超导磁体设计; E-mail: yxl@impcas.ac.cn

通信作者: 马力祯, E-mail: malz@impcas.ac.cn



图 1 磁体主体结构图

2 测试系统

测试采用定制的带温孔的杜瓦系统, 此杜瓦总体尺寸为直径 510 mm, 高度 1 600 mm, 各测量设备的摆放位置如图 2 所示。其中, 霍尔片 H1 至 H4 为磁场测量的主要设备, 实验中测试超导螺线管边缘场情况, H1 和 H2 在磁体外部, 测量漏场, H3 和 H4 在磁体边缘, 测试无源屏蔽层所在位置的磁场情况, 温度片 T1 至 T4 主要测试降温情况。

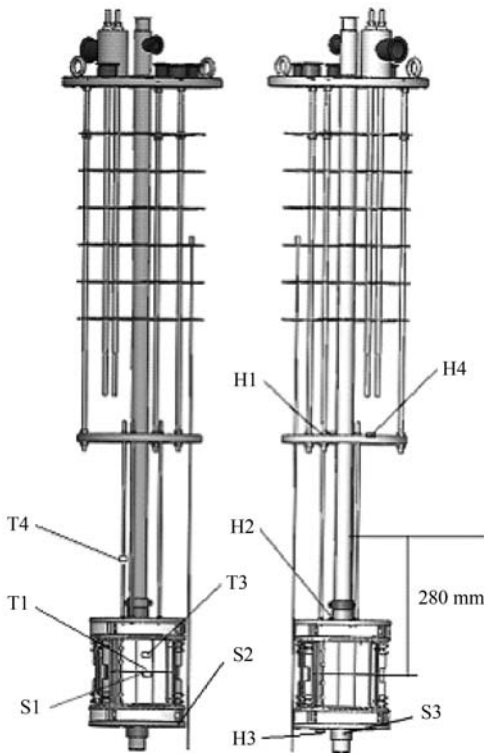


图 2 霍尔片、温度片和应变片测试位置示意图

H1~H4 为霍尔片, T1~T4 为温度片, S1~S3 为应变片。

应力应变测量是采用环境补偿和无线接收结合的方式, 主要测试线圈骨架的形变情况, 应变片 S1 测线圈外侧骨架; 应变片 S2 测支撑环的外侧; 应变

片 S3 测量线圈主轴外侧。用一个暴露在低温和磁场环境中的哑片, 检测低温应变片在极端条件下的响应变化, 最终用来补偿计算环境对测试的影响。

3 测试结果及分析

3.1 励磁及边缘场

图 3 给出了匀速励磁的 $I-B$ 曲线, 纵轴是磁场变化, 横轴是电流。以 0.5 A/s 的速度匀速励磁到临界电流 202 A 时磁感应强度达到 8.20 T。由于磁体储能较小, 没有经历失超锻炼效应, 一次励磁直接达到临界电流。这说明磁场设计合理, 超导接头、电流引线、失超保护和进出线槽绝缘等部件都设计合理, 且安全系数较高。

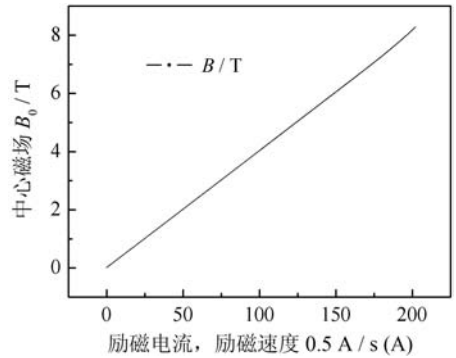


图 3 $I-B$ 曲线

用霍尔探头对磁体的轴线磁场进行了测量, 测量结果如图 4 所示, 磁体具有较高的中心磁场, 轴向测试时每隔 10 mm 取一个采样点, 一共测量了 30 个点。

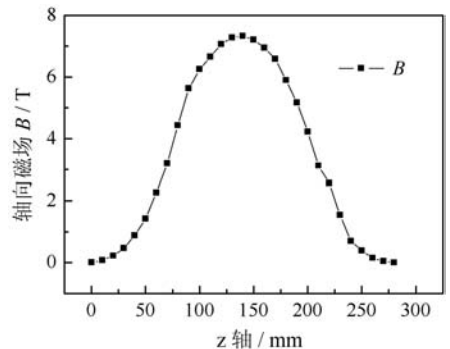


图 4 轴向磁场分布

从图 4 可看出, 磁体正常工作时最高中心场 7.321 T, 计算得到有效长度为 134 mm。虽然总积分量 982 T·mm 小于预期值 1 000 T·mm, 但

可通过提高电流来达到加速器物理的轴向积分量。同时，在 280 mm 腔体的平面处用高斯计进行漏场测量，如图 5 所示。超导腔体所在平面处沿径向分布的测量值和计算值做了比较，绝对误差约 0.000 5 T，相对误差小于 10%。线性规划有源屏蔽^[4]后，腔体处漏场从 0.079 T 降低至 0.004 5 T 左右，屏蔽系数为 17.6，有源屏蔽可屏蔽大部分漏场。

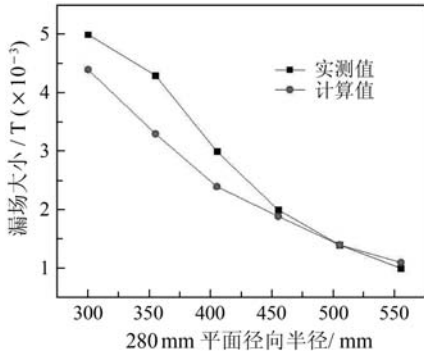


图 5 漏场测量情况

同时对螺线管骨架边缘位置进行了磁场测量，H1 至 H4 霍尔片探测输出值不超过 0.5 T，此漏磁

小于低温软磁材料的一般饱和磁场 0.9 T^[5]，为下一步无源屏蔽的利用提供了有利条件。腔体内所处位置的磁场可由 G10 板上霍尔片反映，实测值 0.001 82 T 和计算值 0.001 69 T 相当接近，考虑到误差效应，计算值和实测值相吻合，远小于麦森纳屏蔽经验阈值 0.18 T。

3.2 应力应变

哑片结构用于检测低温应变片在极端条件下的工作情况，其输出应变情况如图 6 所示。从图 6(a) 中可以看出，在前 500 s 时，由于补充液氮，对应变片影响明显，当液氮稳定，低温应变片也处于稳定状态，且在励磁时磁场对其输出结果影响极小，说明了运用低温应变片测量系统的稳定性和准确性。

图 6(b) 是线圈外部环向应变的测试情况，即应变片 1 的测试情况。将励磁电流以 0.5 A/s 的速度从 0 加到 180 A，再以 0.5 A/s 的速度由 180 A 降到 0。可以看出，在此过程中最大的环向应变为 70 多个微应变，说明磁体在强电磁场作用下稳定变化，也表明铝带稳定线圈的作用很明显。另外，从图 6(b) 还可以看出，这种变形在励磁过程中完全处于弹性范围，变形的恢复性良好。

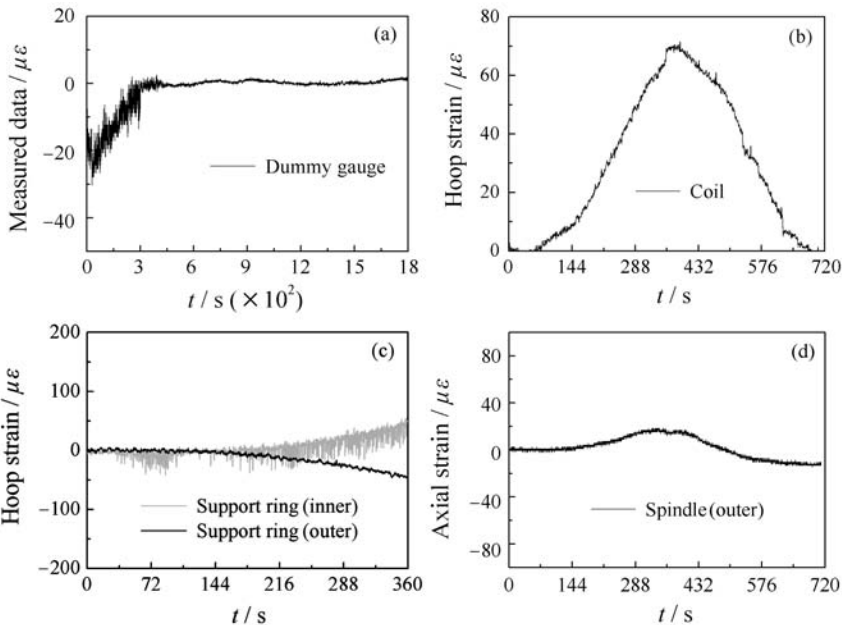


图 6 输出应变

(a) 哑片输出, (b) 应变片 S1 输出, (c) 应变片 S2 输出, (d) 应变片 S3 输出。

同理，从图 6(c) 可以看出，支撑内外两侧应变随着励磁时间的推移变形开始增加。当励磁电流较

小时，环向应变变化不大，表明电流小时，轴向位移很小。当电流逐渐增大时，应变逐渐增大，且内

外侧应变变化成对称性,这符合于实际工况条件。从图 6(d)可以看出,当电流励磁时,主轴外侧轴向应变受线圈轴向变形的影响,轴向应变有增大的趋势,而随着电流的减小,相应的轴向应变随着减小。从图中还可以看出,主轴外侧在电流减小为 0 时,产生了一定的残余应变。

4 结论

经初步测试表明,ADS 超导螺线管样机中心磁场励磁后可达 8.20 T,漏场情况和计算值相对偏差小于 10%。同时,对励磁过程中骨架的应力应变状态的测试和分析结果表明,骨架结构设计合理,应变状态变化平稳,磁体低温稳定性能良好。

参考文献 (References):

- [1] WANG Zhijun, HE Yuan, LIU Yong, *et al.* Chinese Physics C, 2012, in press.
- [2] SUN Hong, ZHAO Shengchu, GE Mingqi, *et al.* Chinese Physics C, 2005, **29**(10): 989.
- [3] YANG Xiaoliang, MA Lizhen, Wu Wei, *et al.* Chinese Physics C, 2012.
- [4] WU Wei, HE Yuan, MA Lizhen, *et al.* Chinese Physics C, 2010, **34**(7): 978.
- [5] Cryoperm Specifications[EB/OL]. [2012-01-05]. <http://www.cryopermshielding.com/cryoperm-specifications.html>.

Preliminary Test of SC Solenoid for ADS Injector II

YANG Xiao-liang^{1,2}, MA Li-zhen¹, HAN Shao-fei^{1,3}, GUAN Ming-zhi¹, YANG Tong-jun¹, DU Jun-jie¹, NI Dong-sheng¹, ZHENG Shi-jun¹, WU Wei¹, YANG Wen-jie¹, ZHU Li¹, WU Bei-min¹, CHEN Yu-quan¹

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*)

Abstract: The preliminary test of the superconducting solenoid for ADS injector II has been carried out in order to measure its performances. A vertical dewar with height 1 600 mm and outer diameter 510 mm was employed for this test. The magnet was energized by a cryogenic sms superconducting magnet current source. The axial magnetic distribution and leakage field were also tested through hall probes. The center field can be excited up to 8.20 T and the relative deviation between the measured value and the calculated value of the stray and leakage field is less than 10%. The measurements of the strain and stress status of the magnet skeleton show that the distortion is small and the mechanical performance is robust.

Key words: SC solenoid; accelerator driven sub-critical system; vertical test; magnetic field measurement