

文章编号: 1007-4627(2003)04-0252-03

内置垫补线圈的 C 型二极磁铁*

何 源^{1,2}, 袁 平¹, 马力祯^{1,2}, 张 斌^{1,2}, 刘维军^{1,2}, 韩少斐¹, 熊 慧², 王 玥¹,
王文进¹, 何锐荣¹, 宋明涛¹, 夏佳文¹, 詹文龙¹, 魏宝文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 100039)

摘 要: 对 HIRFL-CSR 的原形磁铁进行了试制和研究. 尝试了一种新的改善磁场分布的方法: 在不增大极头的条件下使用两根内置导线, 实践证明是可行的. 用 OPERA-2D 和 TOSCA-3D 软件分析了垫补电流对中、低场的影响, 同时也介绍了这块 C 型二极磁铁的制作工艺及磁场测量结果.

关键词: C 型二极磁铁; 内置垫补线圈; 磁场测量

中图分类号: TL503.9 **文献标识码:** A

1 引言

HIRFL-CSR 是我们正在建造的一个加速器, 由主环(CSR_m)和实验环(CSR_e)构成的一个多用途的冷却储存环系统^[1]. 主环的主要作用是对回旋加速器引出的重离子束团进行堆积、冷却并加速至 100—600 MeV/u, 然后引出产生放射性的离子束(RIB)或高电荷态的重离子; 实验环(CSR_e)是用次级束流(RIB 或高电荷态的重离子)做内靶实验或对束流冷却后进行高精度的质谱分析.

为了在 CSR_e 的真空管旁安装测量电荷交换效应的探测器, 将二极磁铁设计成 C 型, 好场区宽度为 220 mm. 选择从主回旋加速器(SSC)到 CSR_m 注入线上的弯曲磁铁作为 CSR_e 二极磁铁加工的预研样机.

2 特殊 C 型二极磁铁的计算及加工

2.1 设计计算

注入线上的 C 型二极磁铁的主要参数列于表 1. 在此 C 型磁铁中试验了一种获得好场区均匀度的方法, 该方法与 Halbach^[2] 在 H 型二极磁铁设计中提出的思路相似.

表 1 C 型二极磁铁的主要参数

参数名/单位	参数指标
最大磁场/T	1.53
弯曲半径/m	2.0
弯曲角度/(°)	60
有效长度/m	2.0
有效孔径/mm ²	100×55
气隙/mm	65.0
磁场均匀度	$\pm 1.0 \times 10^{-3}$
线圈匝数	36
电流值/A	1 250
电阻值/ Ω	0.025
电感值/H	0.058

由于磁通在 C 型磁铁中有不同的路径长度, 所以在有限的磁导率下会使得气隙外侧的磁场强度比内侧的低, 导致磁场的分布倾斜, 形成不需要的梯度. 然而, 如果在极头上冲两个狭槽, 每个槽内穿入一根垫补导线, 则可以通过调节垫补电流的大小来改善磁场的分布情况, 如图 1 所示.

图 2 比较了不同场水平下加垫补电流与没加垫补电流的磁场均匀度, 其改善效果是非常明显的. 用 OPERA-2D^[3] 计算后, 为了检验边缘场和磁铁端

收稿日期: 2003 - 04 - 21; 修改日期: 2003 - 07 - 09

* 基金项目: 国家大科学工程 HIRFL-CSR 资助项目

作者简介: 何 源(1973-), 男(汉族), 甘肃敦煌人, 博士研究生, 工程师, 从事加速器磁场测量研究.

部磁场饱和影响引起的磁场均匀度变化, 在磁铁其它尺寸不变的情况下, 仅调节磁极面垫补段的尺寸, 用 TOSCA-3D^[3] 计算这种特殊的 C 型二极磁铁, 优化了边缘垫补的尺寸。

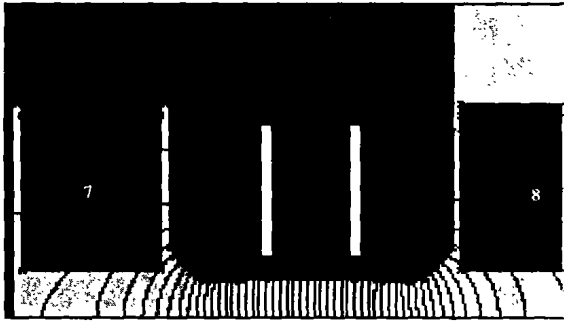


图 1 C 型二极磁铁磁极上的磁通量分布
白色窄条是内置和外置垫补导线。

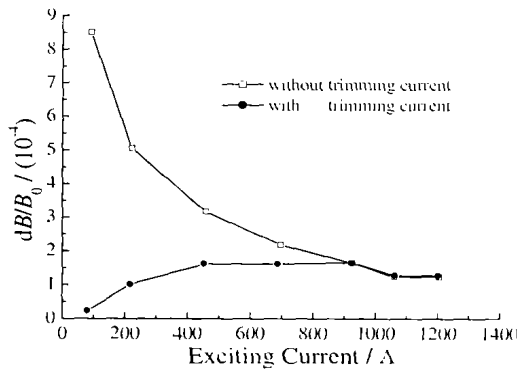


图 2 加上垫补电流与没加垫补电流的区别

2.2 磁铁制作

磁铁的铁芯是由 0.5 mm 厚冷轧无取向硅钢片 J23-50(由武汉钢铁公司制造)叠压而成的。线圈选用 T2 铜管, 匝间绝缘和对地绝缘为聚酰亚胺粘带和聚酰亚胺三合一带, 线圈采用热压固化定型。

C 型二极磁铁开口侧的弧面作为叠装时的弧面定位基准面, 同时将插入气隙处的芯板作为定位导向和磁极面的定位基准。为了提高铁芯的机械强度, 在铁芯的两端各有一块 200 mm 长的粘结端板。由于此二极磁铁的弯曲角度较大, 而其弯曲半径又较小, 因此很难在叠压时保证铁芯弧面与基准面的弧度一致, 因此将两端板和铁芯未粘接部分放在同一胎具上叠压。

在保压情况下将铁芯的冲片与后侧的压板和两块上板、两块下板焊接在一起。焊接时从铁芯中部

开始成螺旋状行进到铁芯两端, 铁芯脱模后再将两块前侧压板用同样方式焊接。

3 磁场测量结果

C 型二极磁铁中心励磁曲线的测量结果与计算结果符合得很好。

图 3 显示了磁场的径向分布, 测量值较低的曲线, 是内置导线没有垫补电流的情况; 较高的曲线是在外内置导线上加了 2 A 的垫补电流。

为了测量好场区内的积分场分布, 我们使用环氧玻璃布板加工了一个长的弯曲积分线圈, 用 0.1 mm 的漆包铜导线绕制, 弯曲半径 2 m, 有效长度 3.1 m。图 4 显示了磁场为 0.785 T 时的测量结果,

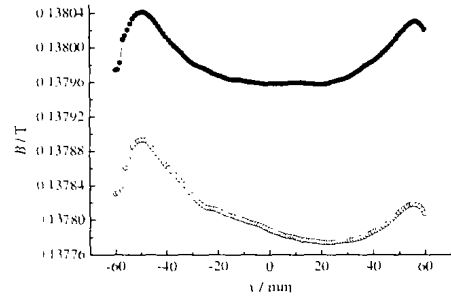


图 3 在 0.17 T 时的磁场径向分布

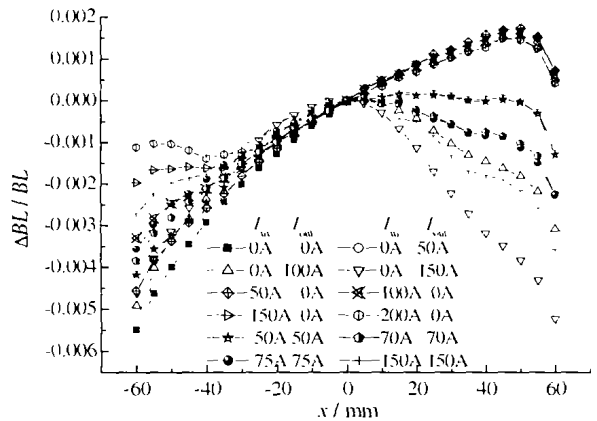


图 4 0.785 T 时垫补电流对积分场分布的影响

其中横轴表示线圈在 -60—60 mm 的好场区内移动到的位置坐标, 纵坐标表示径向不同位置处与中心轨道处积分磁场 BL 的相对偏差量。图中显示了不同的内、外垫补电流对积分磁场分布的影响。随着所加垫补电流从小到大逐次变化, 外部的峰值被削减, 内部的场强增加, 垫补效果十分明显, 而且外垫补电流越大对强磁场区的削弱效果越好, 内垫

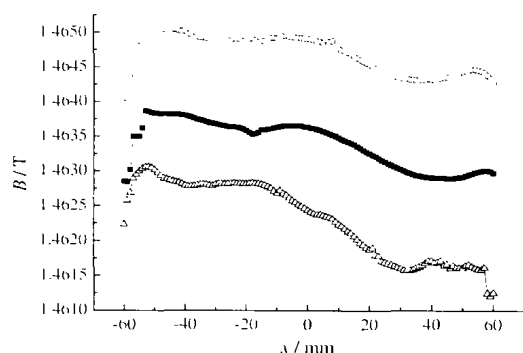


图 5 在 1.46 T 下内置导体垫补电流场分布的改善

补电流越大则对弱磁场区的增强效果越好,同时加内、外垫补电流会更好改善磁场分布情况。在中低场区,测量了不同的主电流时为了达到较为理想的磁场分布所需要的内置垫补电流的值。实验表明主电流与垫补电流表现出线性对应关系,不需要很

大的垫补电流就可以实现对磁场均匀度的调整。

对于高场,我们用霍耳片点测量法沿着磁铁中截面的径向进行了测量。此时,垫补电流的作用也很明显,在图 5 中,最底下的那条曲线是没有加垫补电流的,中间的那条是在内置导线上加了 100 A 的垫补电流的曲线,最高的那条则是将内置导线垫补电流升至 200 A 时的曲线。

4 小结

磁铁极头内置垫补线圈能够有效地调节磁铁径向磁场分布,可以在不增加磁铁体积的条件下增加磁铁的均匀区宽度。此方法不存在额外的加工难度,对垫补电源的要求不高,可以考虑在今后的磁铁设计中采用。

参 考 文 献:

- [1] Xia J W, Zhan W L, Wei B W, *et al.* The Heavy Ion Cooler-storage-ring Project (HIRFL-CSR) at Lanzhou[J]. Nucl Instr and Meth (in Physics Research), 2002, **488**: 11.
- [2] Halbach K. Field Correction Windings for Iron Magnets[J]. Nucl Instr and Meth (in Physics Research), 1973, **107**: 515.
- [3] Vector Fields Limited England. OPERA Reference Manual [M]. Oxford: Vector Fields Limited, 2001, Verison 8.0.

A C-type Dipole with Imbedded Conductors*

HE Yuan^{1,2}, YUAN Ping¹, MA Li-zhen^{1,2}, ZHANG Bin^{1,2}, LIU Wei-jun^{1,2}, HAN Shao-fei¹, XIONG Hui²,
WANG Yue¹, WANG Wen-jin¹, HE Rui-rong¹, SONG Ming-tao¹,
XIA Jia-wen¹, ZHAN Wen-long¹, WEI Bao-wen¹

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

2 The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The C-type dipole prototypes in the injection beam line from a Separate Sector Cyclotron (SSC) to Cooling Storage Ring (CSR) are selected as R & D for CSR magnets fabrication, because they have large bending angle and small radius, and are very difficult to stack and fabricate. A method to obtain good field homogeneity has been attempted in the C-type dipole prototype. This method is not the enlarged dipole pole but two imbedded conductors and two small power supplies. This is easy operating and lower cost. It is proved that this is a good way to improve the quality of dipoles. The fabrication technic and measured results are also involved in this article.

Key words: C-type dipole; imbedded trimming conductors; magnetic measurement

* Foundation item: National Scientific Project HIRFL-CSR