

文章编号: 1007-4627(2003)04-0247-05

## 兰州重离子冷却储存环二极磁铁设计\*

马力祯, 袁平, 何源, 张斌, 刘维军, 韩少斐,  
熊慧, 何锐荣, 夏佳文, 詹文龙  
(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 介绍了兰州重离子冷却储存环主环(CSRm)的改进 W 型二极磁铁和实验环(CSRe)C 型二极磁铁的磁场计算和物理设计, 在降低了磁铁造价和运行费用的前提下设计参数达到或超过了物理要求. 根据样机的加工和检测结果来看, 所有的磁场计算和物理设计的结果是可靠的.

**关键词:** 二极磁铁; 主环; 实验环; 磁场分布

**中图分类号:** TL503.8      **文献标识码:** A

### 1 前言

兰州重离子冷却储存环(HIRFL-CSR)主环(CSRm)和实验环(CSRe)要求磁场变化范围大、好场区宽, 对磁铁本身的磁场质量和铁与铁之间磁场积分值的离散要求也很严格. 但 CSRm 和 CSRe 还是有差别的, 主环是一同步加速器, 加速离子束流从低能到高能, 由于先对注入的低能离子束流进行冷却、累积, 累积时间长达 10 s, 然后再加速到高能并引出, 因此对低磁场质量要求很高; 而实验环注入的是高能离子束流, 所以对高磁场质量要求很高. 由于原子物理实验需要将离子能量由高能减速到低能, 因而对其低磁场质量也有较高的要求. 为了增加实验环对放射性核束流的接收度, 还要考虑内靶装置对储存束流的散射, 这样就要求二极磁铁的好场区范围更大, 达到了  $\pm 110$  mm, 根据物理需要而选用 C 型. CSR 磁铁系统的设计必须全盘考虑, 在满足磁场质量物理要求的情况下, 尽量压缩磁铁孔径和减少磁铁规模以达到降低磁铁造价和运行费用的目的.

### 2 二极磁铁的物理参数

主环和实验环二极磁铁的物理参数见表 1. 由此可见, 储存环不仅对二极磁铁在好场区内的横向分布有较高的要求, 要满足  $\pm 1.5 \times 10^{-4}$ , 而且还要

求其积分场分布也要满足此要求, 并使其离散性满足  $\pm 2 \times 10^{-4}$  的要求, 同时磁场的变化范围较大.

表 1 CSRm 和 CSRe 二极磁铁的物理参数

参数名称	CSRm	CSRe
数量	16	16
磁场范围 /T	0.1—1.5	0.2—1.4
上升速率 /( $T \cdot s^{-1}$ )	0.1—0.4	0.1—0.4
偏转半径 /m	7.6	6.0
偏转角度 /( $^\circ$ )	22.5	22.5
有效长度(直线) /m	2.965	2.341
有效孔径 / $mm^2$	140×60	220×70
磁场均匀度 ( $\Delta B/B_0$ )	$\pm 1.5 \times 10^{-4}$	$\pm 1.5 \times 10^{-4}$
磁铁分散性 ( $\Delta BL/BL$ )	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 1.5 \times 10^{-4}$

### 3 CSRm 和 CSRe 二极磁铁设计

为了在磁场大范围内变化时能满足磁场质量的要求, 主环原采用改进 W 型二极磁铁, 这样既可减小磁铁的尺寸, 又可进一步提高好场区的磁场质量. 但是其三重马鞍型线圈结构的加工难度较大, 且加工质量和精度难以保证, 因此, 现在将主环二极磁铁选为 H 型铁芯和跑道型线圈. 为了解决磁场在大范围内(0.1—1.5 T)变化时, 磁场质量均能满足物理要求, 除去极面两端有铁垫补外, 受 Umezawa 在 H 型二极磁铁磁极上面开槽的启

收稿日期: 2003-04-15; 修改日期: 2003-05-15

\* 基金项目: 国家科学工程 HIRFL-CSR 项目资助课题

作者简介: 马力祯(1969-), 男(汉族), 甘肃皋兰人, 高级工程师, 从事电磁铁设计研究.

发<sup>[1]</sup>, 再在磁极中间位置开一圆孔来改善高场磁场分布的技术方案.

主环二极磁铁所需的好场区为 140 mm × 60 mm, 加上真空室壁厚及装配间隙, 磁铁气隙高度定为 80 mm. 选取主环二极磁铁的磁极宽度为 350 mm, 在磁极两端有铁垫补, 以便在有限磁极宽度条件下获得较宽的好场区; 磁极两端采用罗高斯基等 B 曲线形状, 可以在 1.4 T 情况下也能得到好的场分布. 极心内外侧边缘形状对称于极心轴线, 它们由平行段、铁垫补段、等 B 型段组成:

(1) 平行段

$$H_1 = \frac{g}{2}, \quad 0 \leq x \leq 108 \text{ mm} \quad (1)$$

(2) 铁垫补段

$$H_2 = H_1 - \Delta d, \quad 113 \text{ mm} \leq x \leq 135 \text{ mm} \quad (2)$$

(3) 等 B 型段(双曲余弦型)

$$H_3 = \frac{g[e^{2(x-135)/g} + e^{-2(x-135)/g}]}{4}, \quad 135 \text{ mm} \leq x \leq 175 \text{ mm} \quad (3)$$

其中,  $g$  为气隙高度,  $\Delta d$  为铁垫补厚度.

主环二极磁铁的磁极采用等 B 型段是为了降低极心内部的  $B$  值, 降低铁芯内部励磁安匝损耗, 提高励磁效率, 也为了使  $B_0 < 1.5 \text{ T}$  的各个不同  $B_0$  时, 磁场的相对分布  $\Delta B/B_0 = f(x)$  变化小. 图 1 中给出了主环二极磁铁的励磁曲线, 在最高场的励

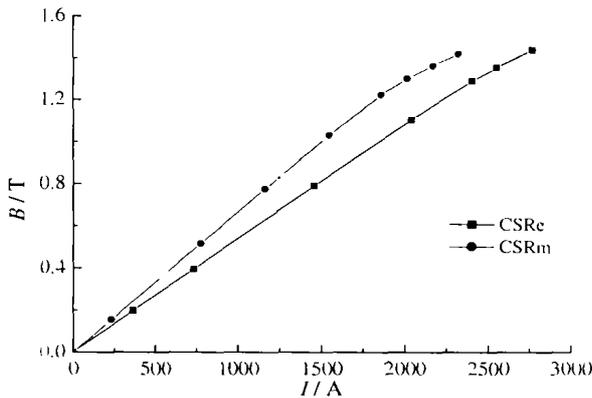


图 1 CSRm 和 CSRc 二极磁铁的励磁曲线

磁效率达到了 96%. 图 2 是主环二极磁铁的磁力线分布, 在磁极的中央区域增加一圆通孔可以明显改善好场区内磁力线的分布, 使好场区内的磁场分布在低场时接近于无圆通孔, 而在高场时明显优于无

圆通孔. 另外, 也可通过调节圆通孔的上下位置和孔径大小来优化磁场分布, 使在低场和高场的磁场质量都满足  $\pm 1.5 \times 10^{-4}$  的要求. 图 3 所示的是在好场区 140 mm × 60 mm 内的磁场分布, 纵坐标表示磁场均匀度, 横坐标表示在中心平面内的位置. 最上面的曲线是磁场约 0.14 T 的磁场分布, 最下面的曲线是磁场约 0.9 T 的磁场分布, 而磁场 1.45 T 的磁场分布则介于这两者之间, 同无圆通孔相比磁场的均匀度改善了 3 倍以上.

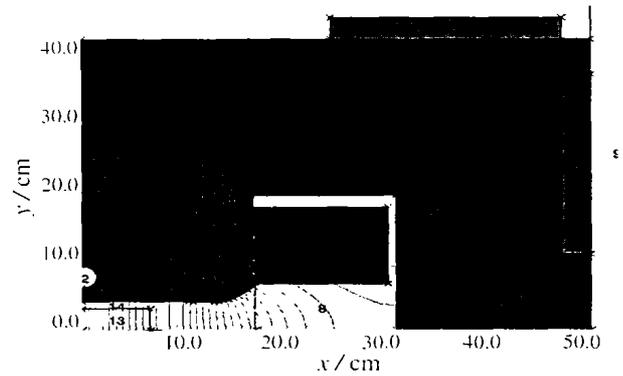


图 2 CSRm 二极磁铁的二维磁力线分布图

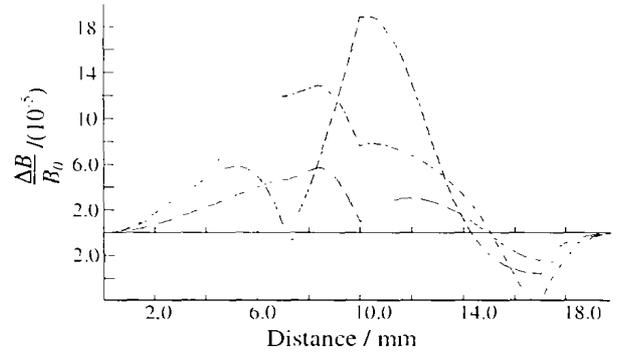


图 3 CSRm 二极磁铁好场区内的磁场分布  
详细说明见正文.

我们在 OPERA-2D 二维计算的基础上, 又用 TOSCA 对磁铁的三维形状进行了验算<sup>[2, 3]</sup>, 发现尽管由于二极磁铁端部的饱和影响而使磁场的三维分布与二维磁场分布略有不同, 但磁极面上圆通孔对磁场的影响规律与二维磁场一致, 在微调磁极的铁垫补宽度后可以得到在不同磁场水平都满足磁场物理要求的磁场分布. 图 4 则表示了好场区内的磁场三维分布, 纵坐标表示磁场均匀度, 横坐标表示在中心平面内的位置. 三维磁场的积分分布可通过活极头的削斜调节, 以达到物理要求的磁场质量.

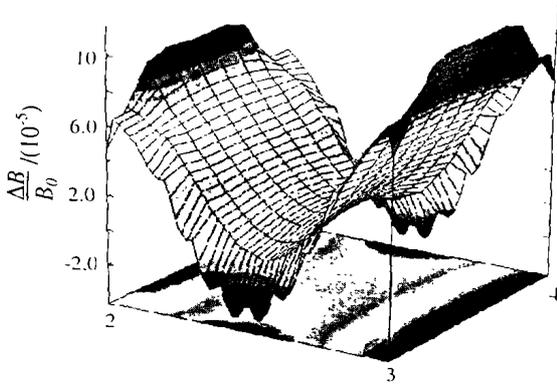


图 4 CSRm 二极磁铁磁场在好场区内的三维分布

实验环二极磁铁需要的好场区宽度为 220mm, 高度为 70 mm, 由于真空室的跨距大而采用厚壁结构, 所以选定气隙高度为 96 mm. 在好场区磁场均匀度要求好于  $\pm 1.5 \times 10^{-4}$ . 受最大冲片宽度不超过 1 250 mm 的限制, 将磁极宽度压缩为 480 mm, 这样就只有气隙高度的 5 倍, 同时磁轭的宽度为 530 mm. 磁极两端仍采用罗高斯基等 B 曲线形状, 极心内外侧边缘形状对称于极心轴线, 它们由平行段、铁垫补段和等 B 型段组成:

(1) 平行段

$$H_1 = \frac{g}{2}, \quad 0 \leq x \leq 135 \text{ mm} \quad (4)$$

(2) 铁垫补段

$$H_2 = H_1 - \Delta d, \quad 135 \text{ mm} \leq x \leq 180 \text{ mm} \quad (5)$$

(3) 等 B 型段(双曲余弦型)

$$H_3 = \frac{g[e^{2(x-200)/g} + e^{-2(x-200)/g}]}{4}, \quad 200 \text{ mm} \leq x \leq 240 \text{ mm} \quad (6)$$

图 1 也给出了实验环二极磁铁的励磁曲线, 在最高场的励磁效率为 91%. 按物理要求, 磁场分布的优化以 1.2 T 为主, 如图 5 所示, 纵坐标表示磁场均匀度, 横坐标表示在中心平面内的位置. 此时在好场区磁场分布能满足  $\pm 1.5 \times 10^{-4}$  的要求, 但对于低磁场由于四极量的增加和高磁场六极量的增加而使磁场质量达不到物理要求, 而且国产硅钢片的最大宽度又限制了磁极宽度的增加, 所以要考虑线圈垫补方案. 参考 Halbach<sup>[4]</sup>在 H 型二极磁铁中采用内置导线改进磁场分布, 在 C 型冲片二极磁铁预研样机的磁极上增加两个空气狭缝, 并在狭缝里安装微调内置线圈, 该电流可以促使极身内磁力线的重新分布, 从而改善气隙中磁场分布的不均匀性. 通过对该样机磁铁的霍耳片点测量和长的弯线圈积分测量证明该微调内置线圈对磁场分布的调节作用很明显<sup>[5]</sup>, 所以在实验环二极磁铁的进一步优化设计中将采用这种方案.

主环和实验环二极磁铁的主要设计参数见表 2.

表 2 CSRm H 型二极铁和 CSRc C 型二极磁铁的主要参数

类型	CSRm H 型	CSRc C 型	类型	CSRm H 型	CSRc C 型
数量	16	16	电感/ mH	31.3	36.5
偏转角度/ (°)	22.5	22.5	互感/ mH	24.3	27.4
偏转半径/ mm	7 600	6 000	平均功耗/ kW	26.5	72.0
磁场范围/ T	0.1—1.5	0.2—1.4	总功率/ kW	428.0	1 163.2
等效长度(中心轨道)/ mm	2 985	2 356	每极线圈匝数	20	24
磁铁长度(直线)/ mm	2 920	2 288	主线圈导线尺寸/ mm <sup>2</sup>	25×25	25×25
长/ mm	3 235	2 650	主线圈导线通水孔径/ mm	φ11	φ11
外形尺寸			辅助线圈导线尺寸/ mm <sup>2</sup>	7×7	8×8
宽/ mm	1 184	1 346	最大电流密度/( A · mm <sup>-2</sup> )	5.0	4.6
高/ mm	8 60	1 456	冷却水回路数量	2	4
好场区宽度/ mm	140	220	冷却水流量/( l · s <sup>-1</sup> )	0.28	0.76
气隙/ mm	80	96	冷却水压降/( kg · cm <sup>-2</sup> )	5.0	5.0
极面宽度/ mm	350	480	温升/ °C	23.0	22.7
主线圈电流(最小值)/ A	150	150	磁场上升速率/( T · s <sup>-1</sup> )	0.1—0.4	0.1—0.4
主线圈电流(最大值)/ A	2 600	2 440	时间常数/ s	2.7	3.0
辅助线圈电流/ A	100	100	单台铁芯重量/ ton	16.9	29.8
主线圈电阻/ mΩ	11.5	12.1	单台线圈重量/ kg	1 359/105	1 430/127
辅助线圈电阻/ mΩ	106.2	74.7			

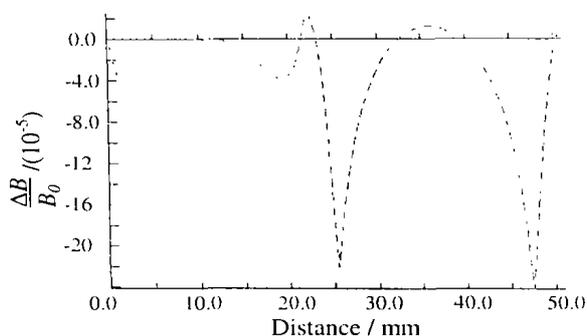


图 5 CSRe 二极磁铁好场区内的磁场分布

#### 4 二极磁铁的加工

在 OPERA 模拟计算的基础上, 我们对储存环的二极磁铁进行了机械结构设计和加工工艺的探讨. 主环二极磁铁的冲片材料选用武钢生产的 J23-50 型号的超低碳低硅纯铁板, 碳含量  $\leq 0.002\%$ , 冲片要带有半有机或无机绝缘层; 实验环需要的硅钢片采用宝山钢铁公司生产的 1 250 mm 宽的硅钢片材料. 磁铁线圈为水冷结构, 铜线采用外方内圆的 T2 空心铜管.

主环二极磁铁采用 H 型, 主环磁铁极心与磁轭是相连的, 在立柱中心平面处分为上下对称两部分铁芯, 它们由同一冲模冲出的硅钢片叠装而成, 上下铁芯用螺栓和定位梢进行连接. 冲片对磁极的平行度、平面度和中心对称度要求很高, 以此保证磁铁的叠装精度. 在叠装磁铁半铁芯时, 以 H 型二极磁铁的磁轭中平面和内外弧面为基准参考面. 为尽量降低冲片可能存在的厚度不一致性和由于硅钢片材料化学成分差异而造成的磁性能不一致性和机械不对称性, 要对冲片进行掺合和反片叠装. 两端各有一块端板, 是由在叠片上涂以环氧胶, 加热半固化后再叠装, 最后叠片经加压和加热固化形成 300 mm 厚的端板. 为了保证铁芯结构的紧固, 在两端板上又增加了两块 20 mm 厚压板. 半铁芯周边有 4 块 30 mm 厚的结构钢板作为边板. 叠片铁芯的工艺是在冲片叠装后对其加压、保压, 并在压力状态下进行焊接. 采用氩弧焊方法将端板、边板、压板与叠片固定成整体, 这种结构和工艺方法的最大难点在于要求有小的焊接变形, 保证铁芯  $\pm 0.05$  mm 的叠装精度. 束流进口和出口的端部磁极形状是由一片片不同极心高度的硅钢片叠装而成, 为了减少加工难度, 用三折线近似替代抗饱和等 B 型曲

线. 为了以后能够在测磁过程中对磁铁等效长度进行调节, 降低 16 台磁铁间的离散性而采用活极头结构, 可以在活极头内增加或减少 0.5 mm 的硅钢片来调节磁铁的等效长度. 此外, 在活极头上进行削斜可以调节积分场的分布, 使其达到物理要求, 削斜形状根据 TOSCA 的三维计算和测磁结果确定.

主环二极磁铁励磁线圈由主线圈和辅助线圈组成, 16 台二极磁铁主线圈串联在一起由一台电源供电, 每台磁铁的辅助线圈用单独的电源供电. 辅助线圈可以提供  $\pm 0.015$  T 水平方向的闭轨校正场和 0.045 T 的引出凸轨场. 主线圈采用上下两个跑道型线圈, 线圈为水冷结构, 每个线圈由两饼组成, 每饼为 10 匝, 铜线为 25 mm  $\times$  25 mm /  $\phi 11$  mm 的外方内圆 T2 铜管. 因为毛坯材料长度达不到每饼线圈的长度要求, 所以允许每饼有一个接头, 但应在线圈的外侧直线段. 采用内套管结构无熔剂银铜焊, 以确保无冷却水的渗漏. 磁铁线圈的匝间绝缘用 0.025  $\times$  25 聚酰亚胺粘带半叠包一层, 用 0.14  $\times$  25 玻璃纤维带半叠包 1 层和 G10 材料板衬垫到要求的匝间绝缘厚度; 对地绝缘用 0.14  $\times$  25 玻璃纤维带半叠包 2 层, 线圈整体进行真空环氧浇铸; 浇铸的环氧不加填充剂, 保证有较好透明度, 达到美观和容易检查线圈内部浇铸情况的目的. 导线绕制前用 90% 通水孔径的钢珠通过检验, 绕制后用 60% 通水孔径的钢珠通过检验, 此外还要进行匝间和对地的电气耐压试验.

实验环 C 型二极磁铁铁芯的加工除了叠装工艺与主环 H 型二极磁铁不同外, 其它像端板、活极头及磁铁铁芯的焊接工艺基本一样. 因为 C 型二极磁铁的冲片是一整体, 而且一边是开口的, 所以铁芯叠装的参考面选用磁极气隙和侧弧面, 在铁芯叠装压胎具上有一导向芯板, 在铁芯叠装时将冲片开口向下沿导向芯板插放到参考侧弧面上. 实验环二极磁铁励磁线圈也由主线圈和辅助线圈组成, 16 台二极磁铁主线圈串联在一起由一台电源供电, 每台磁铁的辅助线圈用单独的电源供电. 辅助线圈可以提供  $\pm 0.02$  T 水平方向的闭轨校正场和 -0.045 T 的引出凸轨场. 二极磁铁线圈采用上下两个跑道型线圈, 线圈为水冷结构, 每个线圈由两饼组成, 每饼为 12 匝. 线圈的制造工艺和要求与主环基本一致.

## 5 结束语

目前,HIRFL-CSR主环改进型H二极磁铁的物理设计已完成,预研样机和冲模正在工厂加工;

实验环C型二极磁铁预研样机已加工完毕并进行了测磁,得到较好的内置线圈对磁场分布的调节结果<sup>[5]</sup>.

### 参 考 文 献:

- [1] Masumi Umezawa. A New Dipole Bending Magnet with Improved Magnetic Field Distribution [A]. Proceedings of the 11th Symposium on Accelerator Science and Technology[C]. Harima Science Garden City, Hyogo, Japan, 1997, 380.
- [2] OPERA-2D and OPERA-3D Reference Manual and User Guide of Vector Field Limited[M]. Oxford: Oxford Press, 1999, VF-03-98-D4.
- [3] 袁平,丁俊章,马力祯等. 三维程序TOSCA在磁场计算中的应用[A]. 圆形加速器及其应用学术交流会[C]. 兰州:中国科学院近代物理研究所, 2000, 99.
- [4] Halbach K. Field Correction Windings for Iron Magnets[J]. Nucl Instr and Meth in Physics Research, 1973, **107**: 515.
- [5] Yuan P, He Y, Ma L Z, *et al.* A C Type Dipole with Imbedded Windings to Improve the Field Distribution[A]. International Conference on Cyclotrons and Their Applications[C]. May 12-17, 2000, MSU, East Lansing, MI, USA.

## Dipoles of HIRFL-CSR Project\*

MA Li-zhen, YUAN Ping, HE Yuan, ZHANG Bin, LIU Wei-jun, HAN Shao-fei,

XIONG Hui, HE Rui-rong, XIA Jia-wen, ZHAN Wen-long

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

**Abstract:** Magnetic field calculation and design of CSRm modified W-type dipoles and of CSRe C-type dipoles are presented in this paper. Under the condition of lower cost, all of the designed parameters are better than required values. Now the prototype has been fabricated and also the magnetic field measurement has been done. According to the measured results, all the calculation and design are very reliable.

**Key words:** dipole; CSRm; CSRe; magnetic field distribution

\* **Foundation item:** National Sciences Project HIRFL-CSR