

# 真空盒对二极铁场均匀性影响的研究

唐兵<sup>1)</sup> 崔保群 马瑞刚 马鹰俊 姜冲 陈立华 蒋渭生

(中国原子能科学研究院 北京 102314)

**摘要** 通过计算机模拟计算与实验相结合, 讨论了真空盒磁导率对二极磁铁磁场分布的影响. 结果表明当真空盒磁导率  $\mu_r \neq 1$  时, 真空盒将影响磁铁磁场分布, 在磁场均匀性要求很高时, 必须考虑真空盒的材料与尺寸对磁场均匀性的影响.

**关键词** 二极磁铁 真空盒 场均匀性

## 1 引言

二极磁铁在加速器中应用非常广泛, 磁场均匀性是二极磁铁的重要参数, 不同用途的磁铁场均匀性要求不同. 开关磁铁或者偏转磁铁只是对束流进行导向, 场的均匀性要求较低, 一般情况下为0.1%左右. 但是对于高分辨率的分析磁铁, 场的均匀性就要求非常的高, 如中国原子能科学研究院正在建设的北京放射性核素装置, 在线同位素分离器 (ISOL) 的主分析磁铁要求好场区场均匀性好于0.001%, 偏转角度100°, 偏转半径2.5m. 现有的机加工能力与安装水平, 磁铁均匀性大约只能做到0.01%, 加工完成后还需要对磁铁进行细致的修正, 可以采用垫补<sup>[1]</sup>或者表面线圈<sup>[2]</sup>等方法. 因此, 要成功的建造均匀性要求如此高的二极磁铁难度是非常大的, 在设计中, 必须对影响场分布的每一个因素都予以考虑, 本文所讨论的就是低磁导率真空盒对磁场分布的影响.

## 2 实验布置

我们在现有的一个C型二极磁铁上开展了真空盒材料对磁场分布影响的研究. 磁铁基本尺寸如图1所示, 其偏转半径  $\rho_0 = 40\text{cm}$ , 偏转角度为60°, 气隙5cm,

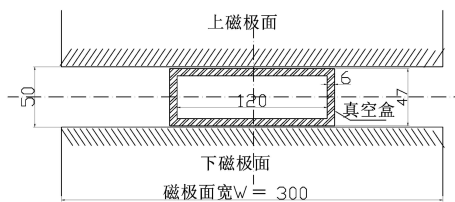


图1 磁铁以及真空盒尺寸

极面宽30cm; 磁场测量使用带温度补偿的高斯计, 最小分辨率为0.02Gs.

真空盒一般选用低磁导率的不锈钢, 如316L<sup>[3]</sup>和316L+N<sup>[4]</sup>. 本文选用316L和0NiCr14两种材料进行实验, 具体参数如表1所示.

表1 真空盒材料及尺寸

	材料	壁厚/mm	高/mm	宽/mm
真空盒一	316L	6	47	132
真空盒二	0NiCr14	4	47	157

## 3 磁场测量

实验关心的是真空盒对磁场分布的影响, 在同样励磁电流下, 分别测量有、无真空盒时场的分布, 每间隔0.5cm测量一个点, 测量结果如图2所示.

真空盒在不同的磁场强度下, 磁导率是不同的, 对场的影响也不一样. 图3给出了真空盒在不同磁场强度下对磁场的影响. 横坐标表示磁铁中平面径向坐标, 纵坐标为  $\frac{B_{\text{有真空盒}} - B_{\text{无真空盒}}}{B_{\text{中心场}}}$ , 为无量纲量, 它代表了真空盒对磁场均匀性的影响程度.

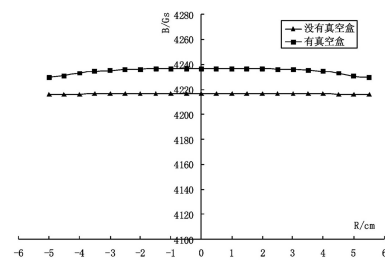


图2 磁场分布

2008 - 01 - 07 收稿

1) E-mail: tangb364@ciae.ac.cn

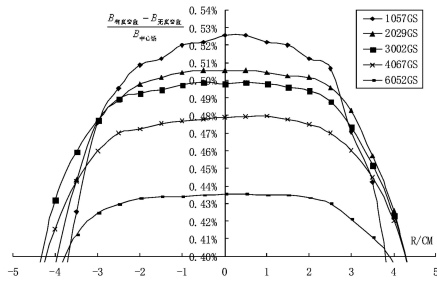


图3 不同磁场对磁场的影响

表2 不同磁场下真空盒对磁场的影响

B/Gs	1057	2029	3002	4067	6052
<0.01%的宽度/cm	3.5	4.5	5	5	5.5

## 4 实验结果与分析

(1) 如图2所示, 在相同励磁电流下, 加上真空盒后, 真空盒内部区域磁场整体增大大约20Gs. 这是因为磁铁气隙中加上真空盒后, 气隙内总磁阻减小, 而磁动势NI不变, 磁感应强度增大. 如图4所示, 选取一闭合回路abcdea, 由安培环路定理可以得到

$$\oint \mathbf{H} dl = \sum I,$$

即

$$NI = \int \mathbf{H}_1 dl_1 + \int \mathbf{H}_2 dl_2 + \int \mathbf{H}_3 dl_3,$$

其中

$$\int \mathbf{H}_3 dl_3 = 0, \quad \int \mathbf{H}_1 dl_1 \ll \int \mathbf{H}_2 dl_2,$$

于是可以得到  $NI \approx \int \mathbf{H}_2 dl_2$ .

无真空盒时  $\int \mathbf{H}_2 dl_2 = \frac{B_0}{\mu_0} \times gap$ , 放入真空盒后, 因为真空盒为弱磁导率材料, 可以认为真空盒内磁感应强度与气隙内磁感应强度相同, 即

$$\int \mathbf{H}_2 dl_2 \approx \frac{B'_0}{\mu_0} \times (gap - 2d) + \frac{B'_0}{\mu_0 \mu_r} \times 2d,$$

其中  $B_0$  是无真空盒时气隙中心的磁感应强度;  $B'_0$  是有真空盒时气隙中心的磁感应强度. 如果励磁电流相等, 可以得到

$$\frac{B_0}{\mu_0} \times gap = \frac{B'_0}{\mu_0} \times (gap - 2d) + \frac{B'_0}{\mu_0 \mu_r} \times 2d,$$

因为  $\mu_r > 1$ ,  $B'_0 > B_0$ , 即加上真空盒后, 磁铁气隙内的磁感应强度增大, 其增量的大小与真空盒的磁导率以及真空盒的壁厚  $d$  有关.

分别测量有、无真空盒的磁场大小, 可以估算出真空盒的相对磁导率, 即

$$\frac{B_0}{\mu_0} \times gap \approx \frac{B'_0}{\mu_0} \times (gap - 2d) + \frac{B'_0}{\mu_0 \mu_r} \times 2d,$$

对于图2中真空盒一的场分布,

$$\frac{4216.62}{\mu_0} \times 50 \approx \frac{4236.92}{\mu_0} \times (50 - 12) + \frac{4236.92}{\mu_0 \mu_r} \times 12,$$

$$\mu_r \approx 1.02 \mu_0 = 1.02.$$

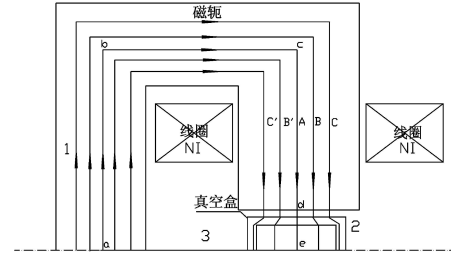


图4 磁力线分布图示

(2) 如图2所示, 加上真空盒后, 场均匀性明显变差, 这主要是由真空盒侧壁引起的. 为了验证这一点, 我们将真空盒二有意不做焊接, 分别做了水平板与侧壁对场影响的实验, 真空盒结构以及实验结果如图5所示.

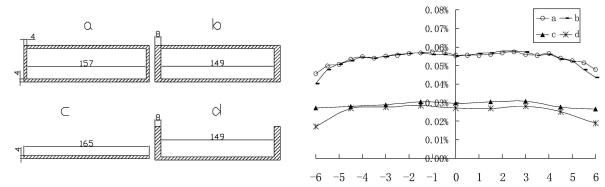


图5 材料二真空盒及实验结果

实验结果表明, 无侧壁、只有平板时, 磁场增大, 但是场的分布基本不变; 当加上侧壁后, 场不仅增大, 场均匀性也变差, 靠近侧壁的地方场强明显下降, 而且侧壁越厚, 对场的影响越大. 所以侧壁材料的选择尤为重要, 对于尺寸较大的真空盒, 找到合适的材料是很困难的<sup>[3]</sup>. 因此, 真空盒侧壁采用无磁或者磁导率非常低的材料, 而水平板的材料可以放宽一些.

(3) 从图3可以发现, 磁铁磁场强度越大, 同一真空盒对场的影响越小. 这主要是因为材料是非线性的. 材料在不同大小的磁感应强度对应的磁导率是不同的.

(4) 真空盒磁导率越大, 对磁铁场均匀性的影响越大.

## 5 计算机模拟计算

本文磁场计算使用国内外通用的电磁场数值计算程序—Poisson程序. 考虑到磁铁本身的对称性, 只计算磁铁二分之一区域, 基本模型及场分布如图6所示. 真空盒内其磁力线分布与前文分析的结论一致.

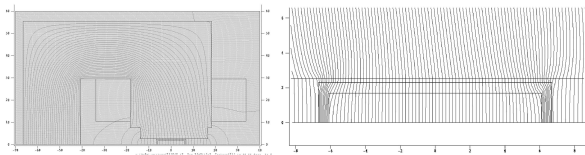


图 6 磁铁磁力线分布

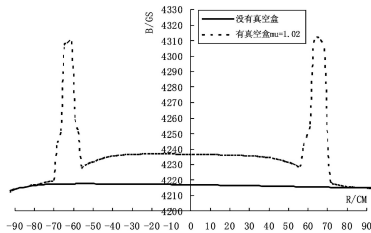


图 7 模拟计算磁场分布

图7给出了相同励磁电流下有、无真空盒时磁场分布情况. 真空盒内区域, 有真空盒时磁感应强度大于没有真空盒时的磁感应强度, 并且均匀性明显变差, 与实验数据相符. 在 $\pm 60\text{mm}$ 处磁场有两个高峰, 这是真空盒侧壁内的磁感应强度. 图8给出了不同真空盒对磁场的影响, 相对磁导率较小的真空盒对磁场的影响区域也较小. 模拟计算与实验结果基本一致, 当 $\mu_r = 1.02$ 时, 真空盒引起的场的变化小于0.01%的区

域宽6cm, 对于具体的设计可以通过模拟计算的方法给出需要的真空盒的宽度.

总的来说, 计算机模拟与实验结果符合得很好的. 设计可以使用计算机模拟来评估, 为工程设计带来了极大的方便.

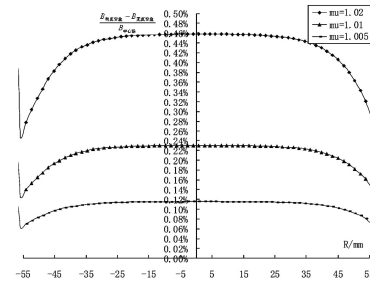


图 8 不同磁导率对磁场的影响

## 6 结论

本文系统分析了真空盒对二极磁铁场分布的影响. 实验与计算机模拟表明, 弱磁真空盒不仅增大真空盒区域磁场, 还会影响磁场的均匀性, 当磁场均匀性要求较高时, 必须考虑真空盒的材料与尺寸对磁场均匀性的影响.

## 参考文献(References)

- 1 Battocletti J H. IEEE-MAG-81, 1985, 5: 1874—1876
- 2 CZOK U et al. Nucl. Instrum. Methods, 1977, 140: 39—45
- 3 ZHANG Shu-Xiu. Nuclear Physics Review, 1987, 2: 36—41 (in Chinese)  
(张恕修等. 原子核物理评论, 1987, 2: 36—41)
- 4 PAN Hui-Bao et al. Journal of Vacuum Science and Technology, 1981, 1: 54—62 (in Chinese)  
(潘惠宝等. 真空科学与技术学报, 1981, 1: 54—62)

## Analysis of the Effect of Field Distribution of Chamber in Dipole

TANG Bing<sup>1)</sup> CUI Bao-Qun MA Rui-Gang MA Ying-Jun  
JIANG Chong CHEN Li-Hua JIANG Wei-Sheng  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** With the calculation and measuring experiment methods, the effect of vacuum chamber materials' magnetic permeability on field distribution in a dipole magnet is discussed. The results show that when the relative magnetic permeability of chamber material  $\mu_r \neq 1$ , it will affect the field uniformity. Once the high field uniformity is required, the material property and size of vacuum chamber in a dipole magnet have to be taken into account carefully.

**Key words** dipole, chamber, magnetic field uniformity