

# F-3 电磁分离器磁垫片改进的 物理设计(II)

## ——垫片试验及离子光学参数的确定

茅乃丰 吕洪猷 廖少华

这是“F-3 分离器磁垫片改进的物理设计”一文的第二部分,内容包括垫片试验、调整,并最后确定离子光学参数。

### 一、垫片试验

#### 1. 问题的提出

如上文所述,用来改进 F-3 同位素电磁分离器聚焦性能的垫片初步设计是由中间平面上理论设计场的幂级数表达式,利用等位面方法得到的。这一设计既没有考虑磁铁材料的有限磁导率,也没有严格考虑由于极面宽度有限而导致的场的边缘效应。而且为了便于机械加工,垫片的外轮廓线又用了折线近似。为了检验这一设计是否可靠,以便修改设计,给出正式设计方案,我们预先作了一次垫片试验。

试验内容包括测量和计算垫片形成的场分布和离子源磁力线的分布,计算实际场中的离子聚焦束形,修改设计参数,并进行再测量,再计算,以及确定垫片正式设计方案等项目。

由于垫片对场的贡献为  $10^{-1}$ ,在场测量位置  $x = x_i$  上,一个间隙外的垫片对这个位置场分布的影响将下降到  $10^{-1} \times 10^{-3} = 10^{-4}$ 。因而,采用中心在  $x = x_i$ ,长度为两个间隙值(0.8米)的试验垫片,对测量  $x = x_i$  位置上场分布是足够精确的。据此,我们选试验垫片长 1 米。为了测量不同的  $x = x_i$  位置上的场分布,我们不将试验垫片固定在真空室盖板上,而是用螺杆将它们装配在一起,相对间隙可调,通过临时在下垫片底部垫细铜棒,使整个试验垫片能在真空室内移动。

众所周知,和垫片一起组成极面的真空室上、下盖板之间的间隙对场分布的影响是很大的。因而,真空室设计应保证在抽真空和受电磁吸力的条件下,室内间隙的变化在公差范围之内。很自然,在改进垫片初步设计阶段,我们就假定 F-3 分离器真空室设计是满足上述要求的,然而,实际情况是否如此?有必要在垫片试验之前,对间隙作一次测量。

我们利用穿过密封垫的弦丝,牵动放在真空室内的防磁百分表,测量 45 个点上的间隙值。结果表明,在气压约  $5 \times 10^{-1}$  毫米汞柱,磁感应强度约 2360 高斯的条件下,公称 400

毫米的间隙在室的边缘高到 400.2 毫米，而在室的中心部分却下降到 396.5 毫米，因此，整个间隙的变化量达 3.7 毫米(图10)。而且，由于真空室上、下盖板变形不一样以及上、下极靴厚度不一样，场对中间平面并不对称。于是，F-3 分离器的磁场就不再是严格的二

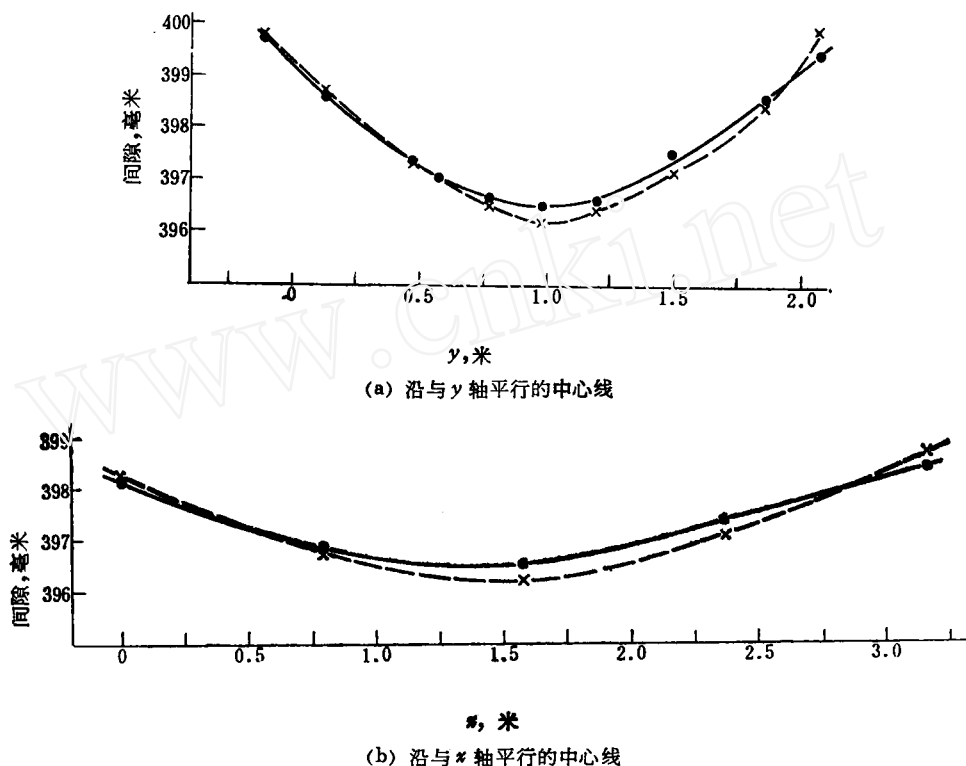


图 10\* 间隙沿真空室中心线的分布

实线为真空条件下测量结果，虚线为模拟真空条件下测量结果。

维平面对称场，而是一种准二维准平面对称场了。这充分暴露了真空室在结构设计上有问题。因而对垫片试验提出了新课题。

我们考虑，换垫片改进聚焦场是为了改善束聚焦，因此我们设想是否有可能采取一些措施，在真空室严重变形的情况下仍能获得较好的束聚焦？基于这种看法，我们开始了垫片试验。

## 2. 场分布测量和束形计算方法

垫片试验阶段，我们采用探测线圈电压-频率转换法对试验垫片场中间平面上  $z$  向分量的分布进行了数字化测量<sup>[3,4]</sup>。测量准确度好于  $1 \times 10^{-3}$ ，满足束聚焦分析的要求。全部测量工作都在模拟真空条件的大气中进行。即在抽真空后，将极靴和盖板间的 28 对楔形铜垫块打紧。这样，在放大气后，真空室形变仍能大体保持不变（均方根偏差 0.2 毫米，图 10）。考虑到场不具有严格的二维特性，即不仅沿  $y$  轴变化，也与  $x$  坐标有关，因此要求我们测量几个  $x$  位置上的场沿  $y$  轴的分布曲线。由于场沿  $x$  轴变化不大，而且可供测量支架安装用的真空室墙板的窗口也只有五对，我们确定一共测量等间隔的  $x=0, 0.79$  米， $\dots, 3.16$  米五个位置上的场分布曲线。分别称为 1, 2,  $\dots, 5$  号窗口场曲线。每一条分布

\* 本文图号、公式编号、文献号均续上文。

曲线有 63 个测量点, 以 0.04 米的等间隔分布。测量结果按式 (1.2) 进行归一, 给出五条  $b_x(y, 0)$  曲线。归一点选在场变化平缓的  $x=1.58$  米,  $y=0.28$  米。测量时  $B_0$  值约 2360 高斯。

显然, 为了获得纵向会聚束, 要求离子源弧室位置磁力线在  $|z| \leq 0.1$  米左右的范围内近乎于  $yz$  平面上的一条平面曲线, 曲线上各点的曲率半径在 2.6 米左右。

对于二维平面对称场, 如果对称面 ( $z=0$  中间平面) 上场的  $z$  向分量用下列级数来表示

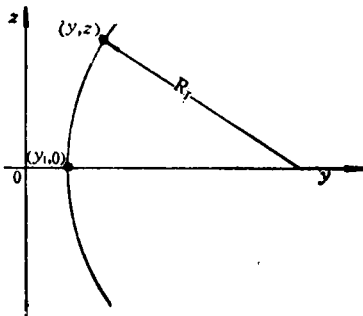
$$B_z = B_0 \left( 1 + \sum_{n=0}^{\infty} C_n y^n \right),$$

那么通过点  $(y_I, 0)$  的磁力线, 即通量函数相等的线 (图 11) 满足方程

$$\left. \begin{aligned} U(y, z) &= U(y_I, 0), \\ U(y, z) &= y + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_n}{n+1} (y^2 + z^2)^{(n+1)/2} \cos[(n+1) \arctg(z/y)]. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

由于磁力线对中间平面对称, 并且很接近于圆弧, 因此可以用一个曲率半径  $R_I$  来描写它

$$R_I = \frac{y - y_I}{2} + \frac{z^2}{2(y - y_I)}. \quad (24)$$



计算结果表明, 对于每一条磁力线上不同  $(y, z)$  的点,  $R_I$  值都很相近。因此, 对每一条磁力线可以用一个曲率半径范围来描写。

F-3 分离器磁场虽然不是严格的二维平面对称场, 但却是准二维准平面对称的, 因此可以用上述方法近似计算  $|z| \leq 0.1$  米区间磁力线的曲率半径范围。

众所周知, 对离子束聚焦特性的全面分析应以空间束形计算为基础。但当时我们对如何获得比较准确的准二维准平面对称磁场分布准备不足, 因此只能在测得的场分布基础上, 采用对中间平面束形作比较准确的计算, 对空间束形作比较粗糙计算的办法对场的聚焦特性进行分析。

在平面束形计算中, 我们直接利用中间平面上场的  $z$  分量的五条分布曲线, 并近似认为中间平面为对称面, 即在这个面上  $b_x = b_y = 0$ 。这样, 在这个平面上  $\beta_0 = 0$  的离子束仍将始终在这个平面上运动, 构成平面轨迹和平面束形。在用计算机计算时, 五条测量线上的测量数据逐个输入, 然后利用龙格-库塔方法对运动方程 (5) 进行积分。积分点上各个场分量用该点附近九个数据点的二元二次插值得到。很显然, 由于利用了五条场分布曲线, 因此平面轨迹将比较好的反映了场的准二维特点。

至于空间束形计算则和设计阶段空间束形的计算一样, 用幂级数 (取到 12 次) 逼近中间平面上场分布曲线, 然后利用式 (3) 得到场的空间分布, 便可对微分方程 (5) 进行积分了。值得注意的是, 虽然不同的  $x$  位置上场沿  $y$  轴的分布不同, 但是对束聚焦影响最大的是粒子偏转  $90^\circ$  左右位置场的分布, 即 3 号窗口场分布 (因为此处离子束在  $y$  方向散得最开)。所以, 用于逼近的曲线就选为 3 号窗口场分布曲线。很显然, 由于场分布的逼近表示式和实际场分布偏差比较大 (最大误差  $5 \times 10^{-3}$ , 均方根误差  $2 \times 10^{-3}$ ), 所以束形误差也

• 320 •

是比较大的。

按照上述计算方法所编写的平面轨迹和空间轨迹的计算机程序,如果不考虑计算中用的场分布的误差,当积分步长在0.02左右时,轨迹座标准确到 $1 \times 10^{-3}$ 毫米。

### 3. 设计位置场分布及问题讨论

图12是试验垫片场分布曲线,这时垫片在 $y$ 方向的位置取设计值。为了和下面将要提到的“位置移动后场分布”区别起见,我们就把它称为“设计位置场分布”。由图可见,五条曲线是离散的。对于相同的 $y$ 座标,它们之间的最大偏差达 $1 \times 10^{-2}$ 。显然这是真空室变形严重的后果。值得注意的是,由此造成的实际场和设计场间的偏差达 $\pm 5 \times 10^{-3}$ 。

其次,在边缘区,实际场分布曲线在设计曲线之下,最大偏差达 $10^{-2}$ 。很显然,这是场的边缘效应造成的。我们估算了边缘效应对束聚焦的影响,结果表明,在离子源、接收器侧,边缘区场畸变 $10^{-2}$ 是允许的,而对束背区的要求则相当严。因此,束背边缘区场偏低是一个严重的问题。

第三,关于离子源区磁力线曲率半径的问题。利用1号窗口场分布曲线和公式(24)计算结果表明,离子源弧室位置磁力线曲率半径大到7米到10米(表3),不符合设计要求。因此,为了使分离器能获得良好的聚焦束形,必须对这三个问题逐个进行分析、解决。

在聚焦场设计的时候,我们曾对2号和3号逼近场分布(图5)以及相应的束形(图7,8)做过比较。结果表明,3号逼近场较2号的峰高一些,中间平面象宽也要窄一些。但从空间束形来看,平行束束形就比2号的差多了。然而,若采用会聚束,象则仍然比较窄。当时,为了使得场既能适应会聚束又能适应欠会聚束运行,我们舍弃3号逼近场,而选2

表3 磁力线曲率半径 $R_I$ 的变化范围( $|z| \leq 0.1$ 米)

$y_I$ , 米	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	0	0.03	0.06
$R_I$ 变化范围, 米	1.9—2.2	2.6—3.1	3.6—4.6	5.1—6.8	7.1—10.0	11.0—15.3	14.5—17.1

号逼近场为设计场。现在,如果将对束聚焦影响较大的3号窗口场测量曲线和设计场曲线相比就会发现,它们之间的关系与3号逼近场和2号逼近场(即设计场)曲线间的关系类似。因此我们认为,实际场分布将给出比原设计更窄些的中间平面象。同时,如果采用纵向会聚束,空间象宽也不会有明显的增加。根据这一认识我们提出,加强形成离子束纵向会聚的措施,有可能在真空室严重变形的情况下获得满足要求的空间聚焦束形。这是我们对第一个问题讨论的结果。

关于第二个问题,为了克服束背边缘区实际场偏低,我们试验了在极面边缘加垫条的方法,并且获得了比较满意的结果。然而我们并没有采用这一方法。因为它既需要额外加工垫条,又会给内衬装卸带来不便。我们考虑,如果将离子源和垫片一起向负 $y$ 方向移动,束背区场分布受边缘效应的影响就会减小,从而使离子束在接近理想的场中运动。按照这一认识,我们进一步提出采用离子源和垫片一起朝负 $y$ 方向移动来改善束背区场分布的方法。

第三,从表3我们也可以看到,如果离子源朝负 $y$ 方向移动,弧室位置磁力线曲率半

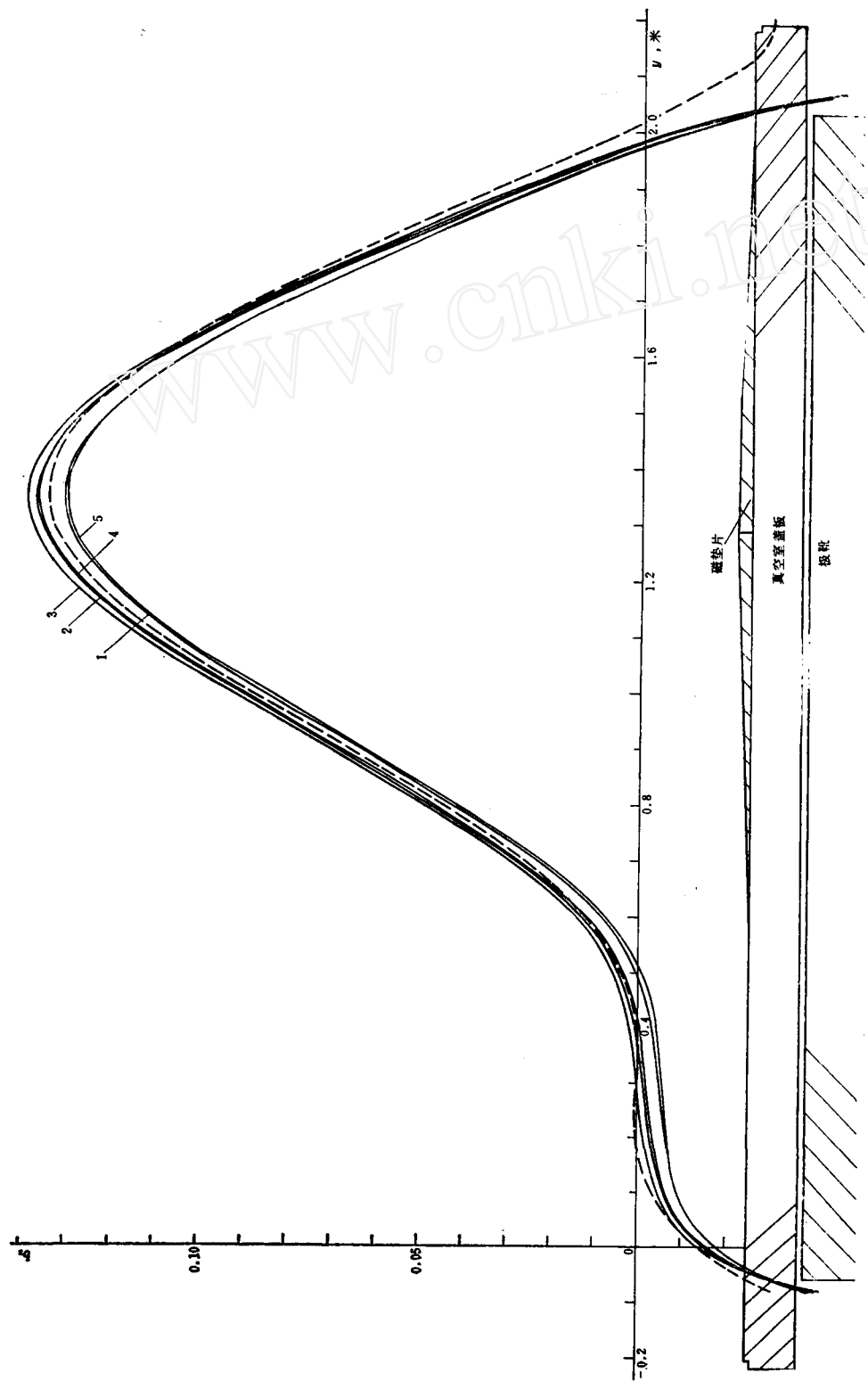


图 12 试验垫片在设计位置上中间平面场分布曲线  
1, 2, 3, 4, 5——1至5号窗口场分布曲线, 虚线为理论设计场分布曲线。

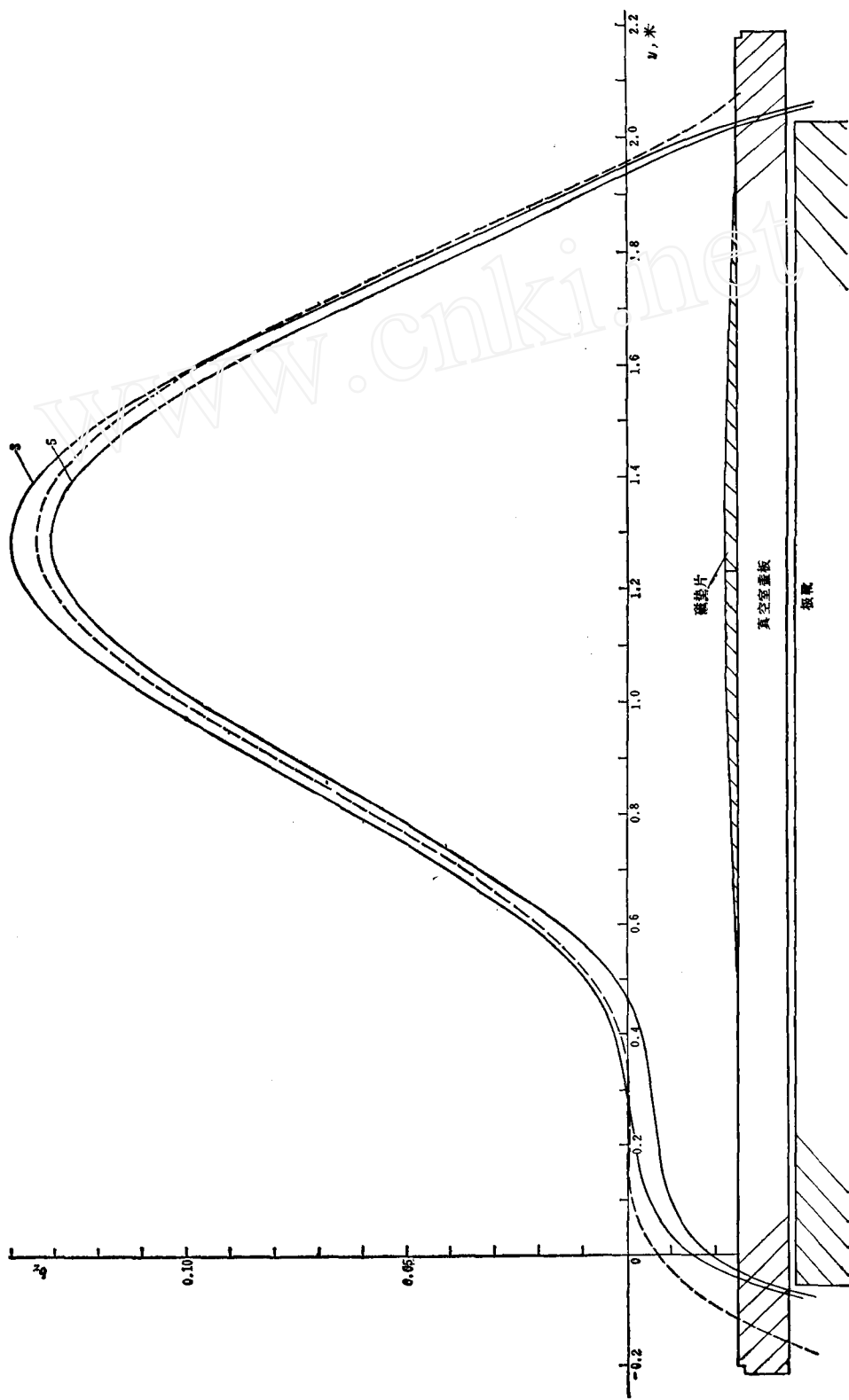


图 13 试验垫片位置移动 0.06 米时中间平面上场分布曲线  
3,5——3.5 号窗口场分布曲线, 虚线为理论设计场分布曲线。

径也将迅速减小,从而有可能获得满足要求的值。

总之,如果将离子源和垫片一起朝负  $y$  方向适当移动,并采用纵向会聚束,有可能获得良好的聚焦束形。

#### 4. 位置移动后场分布

我们测量了垫片位置朝负  $y$  方向移动 0.03 米和 0.06 米时中间平面上的场分布曲线。结果表明,当位置移动 0.06 米时束背区实际场分布(图 13,为清楚起见,这张图上只画了作为五条场曲线包络线的 3,5 号窗口场曲线)已经完全满足设计要求。

与此同时,弧室位置磁力线曲率半径也下降到 2.6—3.1 米,符合设计要求。

#### 5. 束形

利用上面提到的平面和空间轨迹的计算方法,计算了离子源和垫片处于三种不同位置

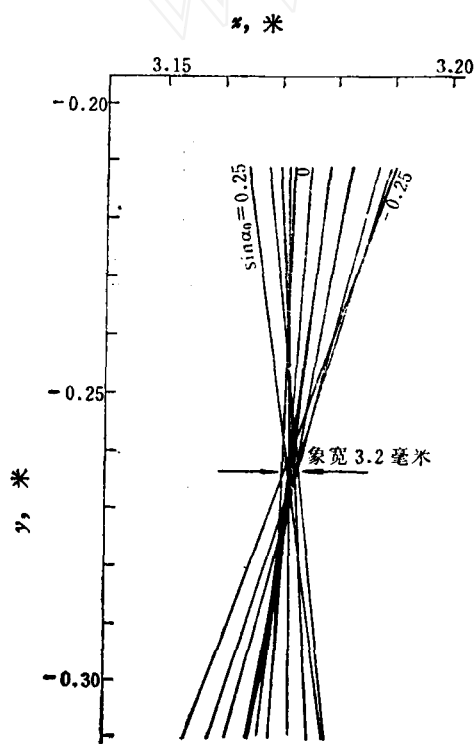


图 14 位置移动 0.06 米试验垫片场中间平面束形

时(设计位置、朝负  $y$  方向移动 0.03 米和 0.06 米)离子束的束形。图 14, 15 画的是位置移动 0.06 米后离子束的中间平面束形和空间束形。由于我们设场是平面对称的,因此空间束形只需要计算上半平面发射的束。计算中  $R_0=1.75$  米,初始条件为  $x_0=0, y_0=y_I + R_I - \sqrt{R_I^2 - z_0^2}, z_0=0(0.04375 \text{ 米})0.0875 \text{ 米}, \sin \alpha_0=-0.25(0.05)0.25, \sin \beta_0=-z_0/R_I$ 。其中  $y_I$  近似为离子源出口缝在中间平面上的  $y$  座标,对于三种不同位置,分别等于 0, -0.03 米和 -0.06 米。 $z_0$  所取的三个值是和设计时的归一化值一一对应的。对于平行束  $R_I \rightarrow \infty$ ,对于会聚束  $R_I$  取表 3 中与  $y_I$  对应的值(例如当  $y_I=-0.06$  米时,取  $R_I=2.6$  米)。

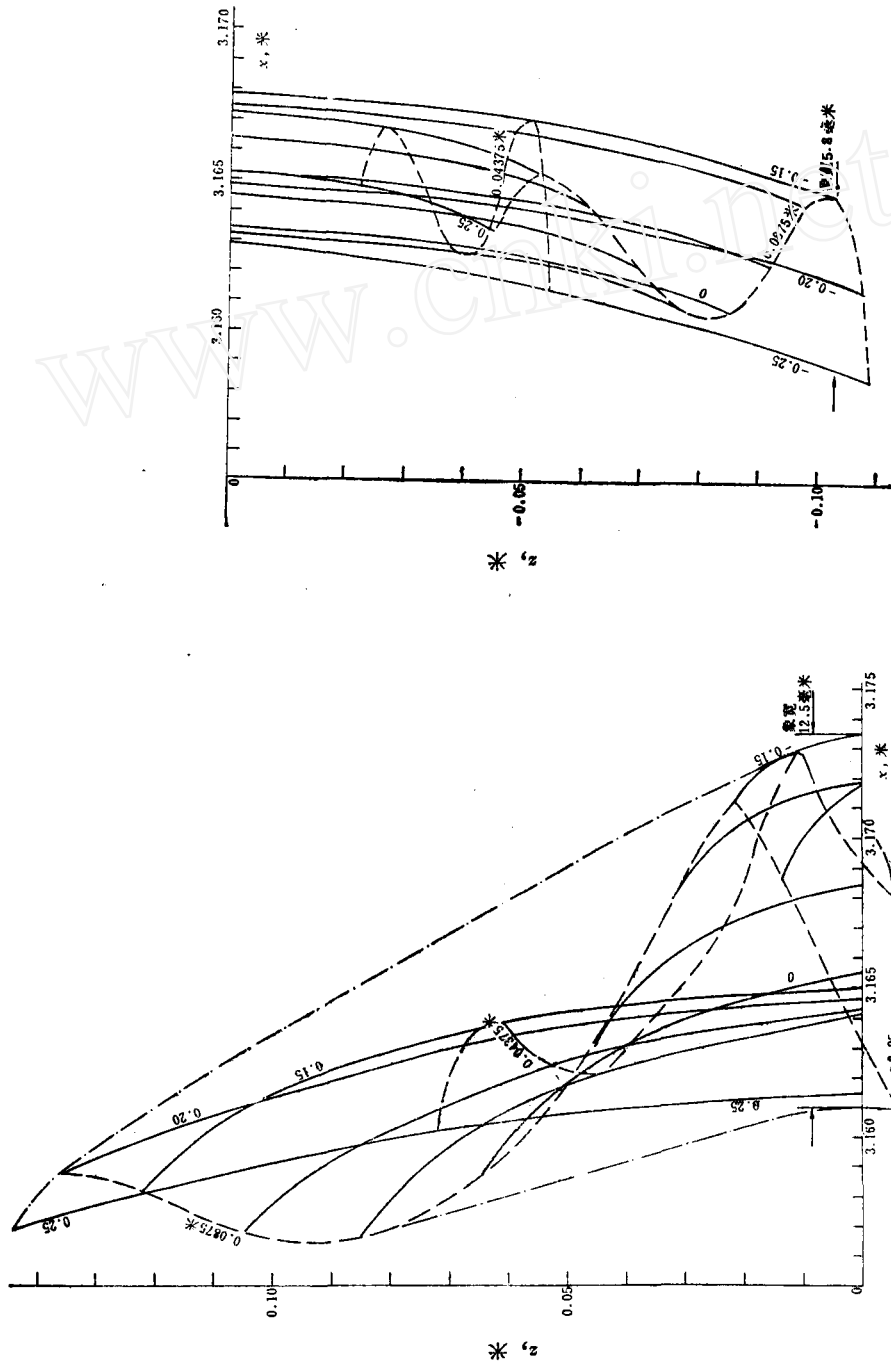
平面束形计算结果表明,随着位置移动,象宽从 18.2 毫米、7.4 毫米迅速下降到 3.2 毫米。显然,当位置移动 0.06 米时,象宽已完全满足设计要求。

而从位置移动 0.06 米后近似空间束形又可看到,对于会聚束,不同高度上的象宽和中间平面上的都很相近,但平行束则不然。这也证实了我们前面的认识:采用会聚束能够得到象宽和中间平面上相近的空间束形。

#### 6. 改进垫片正式设计方案

总之,通过对场分布和束形的测量和计算,发现了问题,也找到了在真空室严重变形情况下能够获得良好束聚焦的具体办法和措施。

如上所述,真空室严重变形情况下,场分布虽然与设计偏离较大,但只要采用合适的



(a) 平行束聚焦束形 ( $y = -0.220$  米截面) (b)  $R_I = 2.6$  米会聚束聚焦束形 ( $y = -0.243$  米截面)

图 15 位置移动 0.06 米试验垫片场空间束形

实线为等横向往张角 ( $\sin\alpha_0$ ) 线; 虚线为等高度 ( $z_0$ ) 线; 点划线为规整外形线。



会聚束, 完全有可能获得比原设计还要好的束聚焦。鉴于束背区实际场分布下降太快, 以及离子源区磁力线曲率半径偏大的问题, 通过位置朝负  $y$  方向移动 0.06 米都可以得到解决, 而磁力线曲率半径问题的解决也就为获得纵向会聚束在磁场方面创造了必要的条件。何况, 这一位置移动还使离子源过渡筒伸出在真空室外, 方便了离子源的装卸。因此, 我们最后确定真空室严重变形情况下改进垫片正式设计方案如下:

垫片形状和初步设计一样, 但安装位置较初步设计位置向负  $y$  方向移动 0.06 米。离子源也相应移动 0.06 米, 但出口缝中心的  $x$  座标仍等于零。离子束会聚半径  $R_I=2.6$  米。无扰半径  $R_0=1.75$  米。平面象宽 3.2 毫米。象的座标  $x=3.171$  米,  $y=-0.263$  米。接收面和  $xz$  平面的夹角约为  $48^\circ$  (根据中心束和旁束中间平面束形计算确定)。

机械设计中, 垫片加工和安装公差仍均取  $\pm 0.1$  毫米。但是, 为了便于安装接收器, 将离子源朝  $x$  方向移动了 0.05 米, 由于场沿  $x$  座标的变化不大, 因此象的  $x$  座标也将移动 0.05 米左右, 并保持象宽基本不变。

### 7. 关于垫片设计的准确度

垫片试验中我们还曾测量过真空室内加支撑柱时的间隙变化和场分布。结果表明, 加两根支撑柱时, 间隙变化量减到 1.7 毫米, 五条场曲线的最大离散也减到  $5 \times 10^{-3}$ 。相应的实际场分布和设计的偏差降到  $\pm 2.5 \times 10^{-3}$ 。由于这一偏差主要起因于真空室变形, 因此可以认为垫片设计的准确度是相当高的。设计中将材料的磁导率看作无穷大, 将垫片形状曲线用折线近似引起的场误差绝对值比  $2.5 \times 10^{-3}$  小得多。

## 二、改进垫片空间场分布和空间束形的最终结果

按照垫片试验阶段确定的正式设计方案, 完成全长 4.088 米改进垫片 (共分五段, 其中有一段为一米长的试验垫片, 图 1) 的加工和安装<sup>[5,6]</sup> 之后, 我们测量和计算了改进垫片的空间场分布和空间束形。并通过调整, 给出了聚焦性能更好的离子光学参数。

### 1. 场分布和束形计算方法的改进

在垫片试验阶段我们已经指出, F-3 分离器的磁场是准二维准平面对称的, 但当时由于准备不足, 我们没有能够比较准确地获得它在空间的分布, 算得的离子空间轨迹和空间束形也不准确。很显然, 在这种场中场的  $x$  分量出现了, 而且场的分布也随  $x$  座标变化。为了得到束空间场比较准确的分布, 我们采用了边值方法<sup>[7]</sup>。按照这种方法, 如果在几个  $x$  为常数的平面上, 给出包围全部离子束的封闭边界上场的  $y, z$  分量, 就可以通过求解下述方程组得到各个平面封闭边界域内的场分布。若准对称面  $z=z_s$ , 那么这组方程是

$$\left. \begin{aligned} B_x &\simeq (z - z_s) \left( \frac{\partial B_z}{\partial x} \right)_{z_s}, \\ \frac{\partial^2 B_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial z^2} &= -\frac{\partial^2 B_x}{\partial x \partial y}, \\ \frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} &= -\frac{\partial^2 B_x}{\partial x \partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

对于 F-3 分离器, 我们计算了  $x=0, 0.79$  米,  $\dots, 3.16$  米五个平面上的场分布。各个平面

上的封闭边界都由  $y = -0.14$  米,  $2.14$  米和  $z = -0.12$  米,  $0.12$  米四条线组成\*。在用超松弛有限差分法求解式 (25) 中的偏微分方程时, 网格都是  $0.04 \times 0.04$  米<sup>2</sup>的正方形。利用上述计算方法, 我们编写了计算机程序。程序的数值实验结果表明, 对于类似 F-3 分离器实际场分布的解析数学模型, 空间场分布计算的最大误差不超过  $1.5 \times 10^{-4}$ , 各平面上场分量的均方根误差不超过  $0.3 \times 10^{-4}$ , 完全满足束聚焦分析的要求。

很显然, 根据上述边值方法, 要求磁场测量给出五个平面封闭边界节点上场的  $y, z$  分量, 每一条边界上共有 126 个数据点。这些数据均用霍尔法测得, 测量准确度为  $1 \times 10^{-3}$  [8]。这样, 利用这套数据计算得到的空间场分布准确度相应地将下降到  $1 \times 10^{-3}$ , 但仍满足束聚焦分析要求。

至于轨迹计算和前面一样, 仍采用龙格-库塔方法对方程 (5) 进行数值积分, 积分点上的场值由该点附近的 27 个网络节点上场值的二元二次拉格朗日插值得到。积分步长  $\approx 0.02$ 。若不考虑场的边值误差, 轨迹将准确到 0.1 毫米。

总之, 通过方法改进, 我们解决了准二维准平面对称磁场的空间场分布和离子轨迹计算问题, 为 F-3 分离器束聚焦特性的准确分析创造了条件。

## 2. 场分布及其讨论

在利用霍尔方法测量五条封闭边界上场的  $y, z$  分量的同时, 为了直观地分析数据, 也测量了中间平面上场的  $y, z$  分量的分布 [8]。

将中间平面上该  $z$  分量测量结果和试验阶段的结果进行比较即可见到, 两者的偏差在  $\pm 0.001$  范围之内。这就直观地告诉我们, 改进垫片的最终场分布是理想的。和试验阶段一样, 我们利用 1 号窗口的中间平面上  $z$  分量分布曲线求得的弧室位置磁力线曲率半径在 2.6 米附近。显然, 也符合设计要求。

利用测得的边值求出的空间场分布表明, 在束空间  $|b_x|$  不大于  $2 \times 10^{-3}$ ;  $|b_y|$  和  $|b_z|$  沿  $x$  轴的变化约  $1 \times 10^{-2}$ ; 中间平面上, 除了半间隙宽的边缘区外,  $|b_y|$  不超过  $2 \times 10^{-3}$  (直接测量结果亦如此)。从而证实了对 F-3 分离器磁场准二维准平面对称性的分析。同时也说明, 若忽略场与理想二维平面对称的偏离将导致场分布  $10^{-2}$  的误差。

## 3. 设计参数下的束形

利用上述空间场分布, 计算了设计参数 ( $R_0 = 1.75$  米) 下离子束束形。初始条件  $x_0 = 0.05$  米,  $y_0 = R_T - \sqrt{R_T^2 - z_0^2}$ ,  $z_0 = -0.0875$  米 ( $0.04375$  米)  $0.0875$  米,  $\sin \alpha_0 = -0.25$  ( $0.05$ )  $0.25$ ,  $\sin \beta_0 = -z_0/R_T$ 。对于平行束  $R_T \rightarrow \infty$ , 会聚束  $R_T = 2.6$  米。很显然, 由于中间平面只是准对称平面, 因此需要计算整个空间束形。而且, 在中间平面上  $\beta_0 = 0$  水平出射的离子束也只是在中间平面附近运动, 和中间平面的偏离为几个毫米。为了便于直观分析, 我们就画它在中间平面上的投影图, 并仍称之为平面束形。平面束形和平行束、会聚束的空间束形计算结果表明, 正如垫片试验阶段所预期的那样, 平面束形和会聚束聚焦束形都是很理想的, 象宽分别为 3.8 毫米和 4.1 毫米。这充分说明, 采用合适的会聚束能够获得相当好的聚焦。而平行束则不然, 象宽达 15.3 毫米。

但细致分析束形计算结果发现, 束聚焦性能还有进一步改善的可能性。不同  $k$  值 ( $k =$

\* 在改进垫片场和束形最终结果的讨论中, 座标系统有所变化 (图 1)。

0.95—1.05) 离子束平面束形计算结果表明, 象宽随  $k$  的变化曲线的极值点不在  $k=1$ , 而在  $k=0.98$  附近 (图 16)。考虑到平面象宽大体上能反映会聚束空间象宽, 因此我们认为, 如果将  $R_0$  减小一些,  $k=1$  中心束的空间象将会更窄一些, 各旁束的最大象宽也能有所减小。按照这一认识, 我们对离子光学参数做了进一步调整。

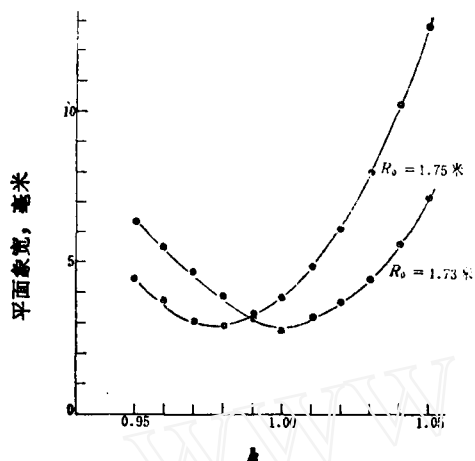


图 16 改进垫片场参数调整前 ( $R_0=1.75$  米) 和调整后的 ( $R_0=1.73$  米) 中间平面象宽随  $k$  的变化曲线

#### 4. 参数调整后最终束形和最终离子光学参数

参数调整结果表明, 当  $R_0=1.73$  米时, 束将获得更好的聚焦束形。图 17 和 18 分别是相应的中间平面束形 (包括  $k$  等于 0.97 和 1.03 的束形) 和平行束、会聚束的空间束形。至于平面束宽随  $k$  的变化曲线已经画在图 16 中了。计算中, 初始条件除取束高 0.16 米, 因而  $z_0=-0.08$  米

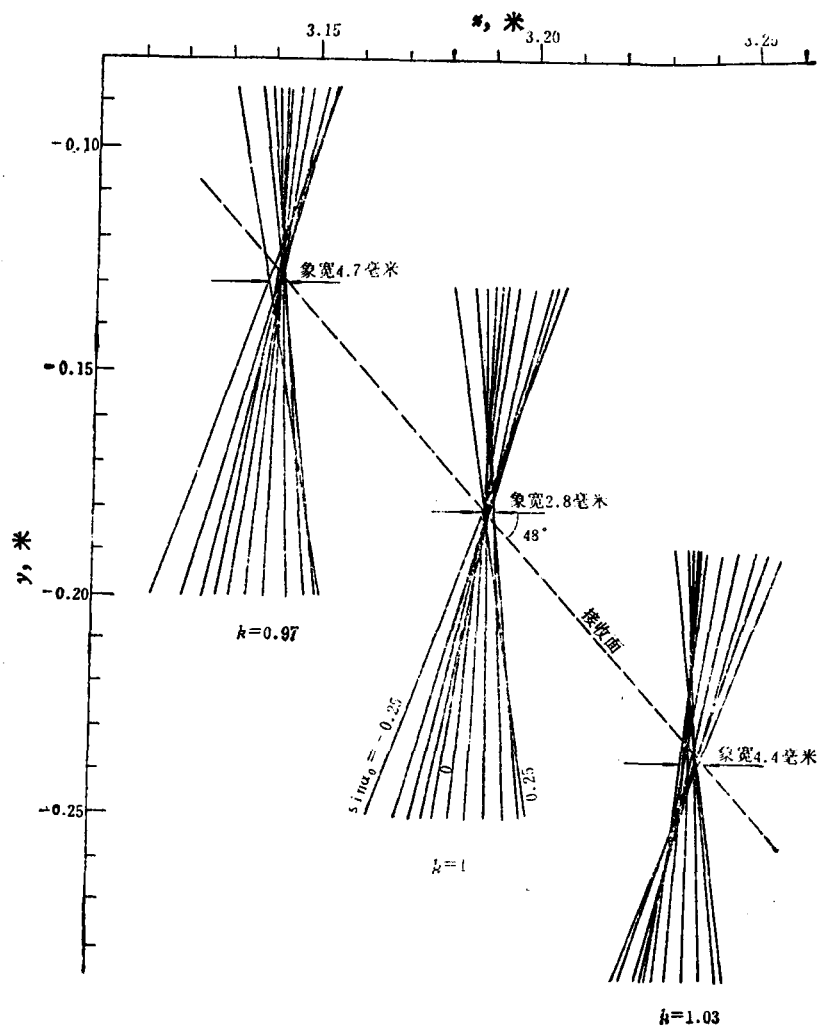
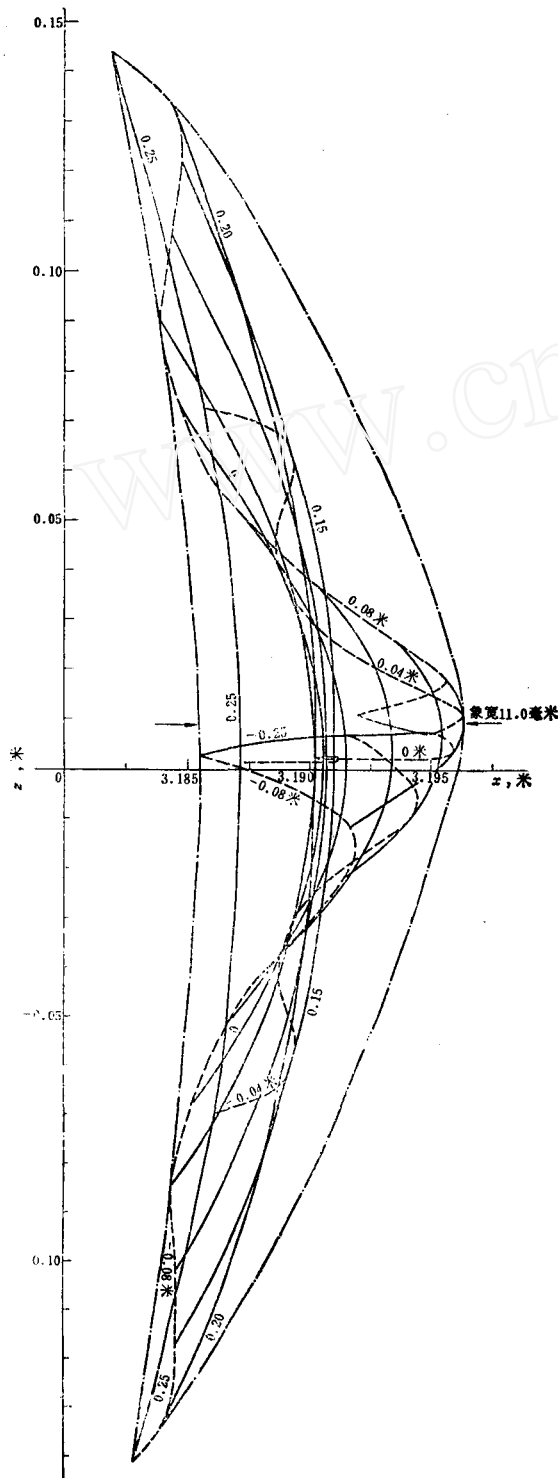
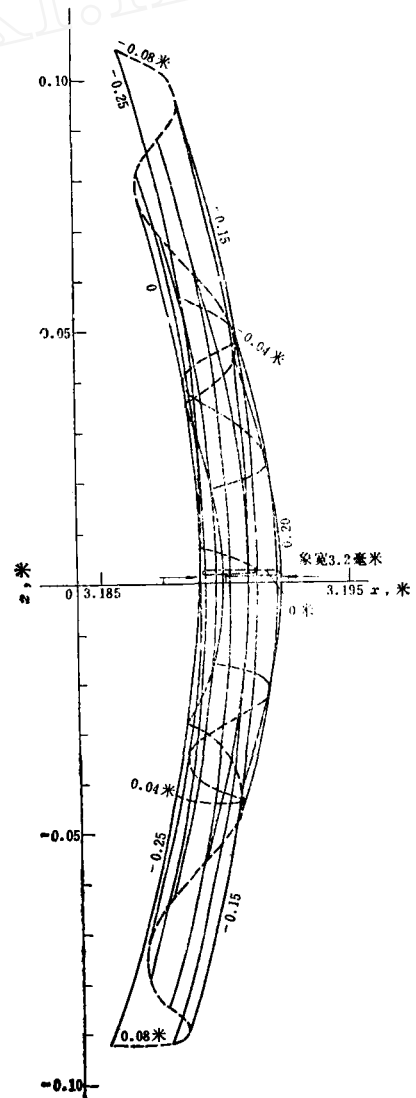


图 17 改进垫片场参数调整后 ( $R_0=1.73$  米) 中心束和旁束最终中间平面束形



(a) 平行束聚焦束形 ( $y = -0.165$  米截面)



(b)  $R_I = 2.6$  米会聚束聚焦束形 ( $y = -0.182$  米截面)

图 18 改进垫片场参数调整后 ( $R_0 = 1.73$  米) 最终空间束形  
 实线——等横向张角 ( $\sin\alpha_0$ ) 线; 虚线——等高度 ( $z_0$ ) 线; 点划线——规整外形线。

(0.04 米) 0.08 米外, 其余都和  $R_0=1.75$  米时的相同。

从这些结果可以看到, 会聚束象宽从 4.1 毫米降到 3.2 毫米, 象也比较平直, 在聚焦平面上象的曲率半径为 1.1—1.2 米 (用类似计算磁力线曲率半径的方法得到)。旁束最大平面象宽也从 12.8 毫米降到 7.2 毫米。而由图 17 还可以求出接收面与  $xz$  平面的夹角约为  $48^\circ$ 。

此外, 我们还对离子源位置沿  $y$  轴移动时, 平面象宽的变化进行了计算。结果表明, 当位移在  $\pm 0.06$  米范围内时, 中心束象宽均不超过 5.2 毫米。

上述结果都是比较理想的。

表 4 列出了  $R_0=1.73$  米时会聚束的初始参数和象参数。这套参数就作为 F-3 分离器垫片改进后最终离子光学参数。

表 4 F-3 分离器改进垫片场离子光学参数表

无扰半径 $R_0=1.73$ 米	
离子束初始参数	(1) 离子源出口缝在中间平面上的位置 $x_0=0.05$ 米, $y_0=0$ (在第一窗口中心线以西 0.05 米, 北墙内侧以南 0.152 米处)。 (2) 横向平面张角 $ \alpha_0  \leq 14.5^\circ$ ( $ \sin\alpha_0  \leq 0.25$ )。 (3) 纵向会聚半径 $R_T=2.6$ 米。 (4) 纵向高度 0.16 米。
* 离子束象参数	(1) 中心束象的位置 $x=3.190$ 米, $y=-0.132$ 米 ( $x$ 方向和离子源出口缝相距 3.140 米, $y$ 方向在北墙内侧以北 0.03 米处), 接收器中心线实际位置 $x=3.225$ 米 (在象以西 0.035 米处)。 (2) 中心束象宽 3.2 毫米。 (3) 象高 0.19 米 (为初始高度的 1.2 倍左右)。 (4) 象的曲率半径 1.1—1.2 米。 (5) 相对质量差 0.01 的质量色散为 14.8—16.3 毫米。 (6) 旁束平面象宽 $\leq 7.2$ 毫米。 (7) 接收面和 $xz$ 平面的夹角为 $48^\circ$ 左右, 实际值取 $45^\circ$ 。

\* 象宽、象的曲率半径和色散均指聚焦平面上的值。(5)–(7) 项  $k$  值变化范围在 0.95—1.05。

### 三、结 束 语

F-3 分离器条形磁垫片的改进, 在设计、试验、调整并最后确定离子光学参数之后, 进行了离子束谱线宽度测量<sup>[9]</sup>。对  $^{64}\text{Zn}$  离子束谱线测量结果表明, 改进垫片场的谱线宽度一般只有旧垫片场的  $1/3$  至  $1/4$ 。由此可见, 改进垫片场的聚焦性能要比旧垫片场的好得多, 改进是成功的。

F-3 分离器垫片改进的全过程说明, 1965 年我们提出的分离器磁场设计方法<sup>[1]</sup>是比较有效的。这次改进中, 利用这套方法得到的理论设计场对于会聚半径 2.6 米 ( $\approx 1.48 R_0$ ) 的会聚束, 象宽只有  $0.00335 R_0$ , 比旧垫片场的象宽  $0.024$  米  $= 0.014 R_0$  (按  $R_0=1.70$  米折算) 小几倍。

然而, 更多的工作还在垫片的试验和调整上, 因为只有通过这些工作才使得垫片改进的设计更加切合实际, 更加完善。例如, 针对真空室在抽真空后发生严重变形的问题, 我们通过形变测量和数据分析明确提出分离器采用合适的会聚束运行的方案, 保证了离子束很好聚焦。为了克服束背边缘区场偏低和离子源区磁力线曲率半径偏大的困难, 通过磁场

测量和束形分析,我们又确定将离子源和垫片在真空室中的位置一起向负  $y$  方向移动 0.06 米。这样,不仅解决了问题,还为离子源装卸带来了方便。即使在改进垫片正式加工安装完后,我们仍然再一次调整了离子光学参数,将无扰半径  $R_0$  从 1.75 米减到 1.73 米,使象宽从 4.1 毫米 ( $0.0023 R_0$ ) 下降到 3.2 毫米 ( $0.0019 R_0$ )。总之,通过垫片改进的试验和调整过程,我们不断发现问题,又不断解决问题,使设计更加完善,获得了比初步设计要好的离子束聚焦。

另外,为了计算真空室变形条件下空间场分布和束形,我们做了准二维准平面对称磁场的空间场分布和离子轨迹计算方面的工作。解决了实践提出的新问题。

但是,我们的工作还是初步的。譬如,在垫片改进的设计、试验和调整过程中,束形计算都以单粒子运动为基础,不考虑离子束的自身空间电荷场的作用。因此,实际象宽往往要比计算值大。而且随着束流强度提高,特别是当空间电荷欠补偿时,这一作用就更为显著。因此,要提高离子束聚焦设计的水平,还需要进一步考虑空间电荷效应。

屈成厚同志在垫片试验阶段参加了机械测量和机械安装,李淑琴同志参加了束形计算的数据处理工作。

### 参 考 文 献

- [1] 方守贤、魏开煜、茅乃丰、吕洪猷、孙亲仁,  $180^\circ$  同位素电磁分离器磁场设计, 内部资料(1965)。
- [2] R. K. Wakerling and A. Guthrie (Ed.), USAEC Report TID-5217 (1949), Chap.3.
- [3] 孙亲仁、林树棧, 原子能科学技术, 3, 270 (1975)。
- [4] 孙亲仁、林树棧, F-3 分离器磁场测量, 内部资料 (1975)。
- [5] 胡礼夫等, 原子能科学技术, 4, 345 (1976)。
- [6] 胡金泉等, 原子能科学技术, 4, 348 (1976)。
- [7] 茅乃丰, 原子能科学技术, 4, 332 (1976)。
- [8] 孙亲仁等, 原子能科学技术, 4, 350 (1976)。
- [9] F-3 电磁分离器磁场改进组, 原子能科学技术, 4, 360 (1976)。

(上接 301 页)

我们在分离器磁场改进工作中按毛主席的教导做了一点工作,但仅仅是初步的,有些还是很不自觉的,还存在着不足之处。我们决心继承毛主席的遗志,最紧密地团结在以华国锋主席为首的党中央周围,坚持以阶级斗争为纲,坚持党的基本路线,坚持无产阶级专政下的继续革命,揭发和批判王张江姚反党集团篡党夺权的罪行,抓革命、促生产、促工作、促战备,努力搞好科研领域的社会主义革命,发展大好形势,把毛主席开创的无产阶级革命事业进行到底!