

文章编号: 1001-4322(2006)06-1007-04

# RF 离子源引出特性的研究\*

孙振武, 霍裕平, 李玉晓, 李 涛

(郑州大学 物理工程学院, 郑州 450052)

摘 要: 为了使 RF 离子源具有良好的引出特性, 测试了吸极几何参数、振荡器板压和引出电压对离子源聚焦度的影响, 对实验结果进行了分析。在其它参数不变的情况下, 吸极的外径  $D$  与内径  $d$  之比存在最佳值, 增加  $D/d$ , 有利于过聚焦的离子束恢复聚焦状态。吸极的长度为  $L$ , 石英套管比吸极长  $l$ 。当  $l/D$  增大时, 聚焦度上升, 引出束流下降。 $L/d$  之比减小时, 聚焦度增大。当  $L/d$  小于 4 时, 聚焦度增加趋势变缓。综合考虑聚焦度、引出束流和气压,  $D/d, l/D, L/d$  适宜的选择范围分别为  $1.6 \sim 2.1, 0.7 \sim 1.1, 4 \sim 7$ 。增加振荡器功率会使离子束呈弱聚焦, 而增加引出电压会使离子束呈过聚焦。振荡器功率和引出电压都存在最佳值。

关键词: 静电加速器; 离子源; 离子束; 聚焦度

中图分类号: TL503; O531 文献标识码: A

离子源是静电加速器的关键部件<sup>[1-2]</sup>, 其特性的好坏直接关系到静电加速器性能的优劣。为此, 在静电加速器的研制过程中, 对所用高频离子源(又叫 RF 离子源)的工作状态进行了研究。文献[3]讨论了影响 RF 离子源的起弧因素以及气压、引出电压和聚焦电压对引出束流和质子比的影响, 确保了离子源的束流品质可满足静电加速器的要求, 但没有考虑离子源是否处于最佳的引出状态, 没有涉及离子源的引出特性。离子源最佳的工作状态不但应具有足够大的束流和较高的质子比, 而且要有好的聚焦度。如果离子源的引出特性不佳, 引出离子的效率不高, 吸极在离子的轰击下会很快损坏, 无法保证加速器的稳定运行。因此, 本文对影响 RF 离子源引出特性的因素进行了研究, 以便选择合适的技术参数, 使离子源工作在最佳状态。

衡量离子源引出特性的主要指标是离子源的聚焦度  $\alpha$  和引出束流  $I_M$ 。 $\alpha$  定义为从吸极引出的离子流  $I_M$  与打到吸极上的离子流  $I_K$  之比。它与吸极的几何参数、引出电压、气压和高频振荡器功率有关<sup>[2,4]</sup>, 其中吸极的几何参数影响最甚。因为其它参数在运行中可随时调节, 而离子源一旦设计加工完成, 一般不会更换吸极尺寸。而且吸极尺寸对气压和引出电压都有一定影响。

由于吸极加工和更换比较困难, 因此在对吸极的几何参数的研究中, 大多运用离子光学和等等离子体理论进行计算和模拟<sup>[5-8]</sup>。本文从实验入手, 研究吸极的几何参数、高频振荡器功率和引出电压对离子源聚焦度  $\alpha$  和引出束流  $I_M$  的影响, 为 RF 离子源的吸极设计提供实验数据。

## 1 实验

吸极(见图 1)用硬铝制成, 内径分别为 1.0, 1.5 和 2.0 mm, 长度根据需要截取。实验在离子源桌上实验系统上进行<sup>[3]</sup>。原来安装在桌上实验系统上的法拉第桶距聚焦电极较远, 由于离子的散射和湮灭, 在没有聚焦电压时, 不能准确测量  $I_M$ ; 而在有聚焦电压的情况下, 测试  $I_K$  不方便。因此在聚焦电极的底座位置又安装一可移动的法拉第桶, 以便在没有聚焦电压的情况下能准确测试引出束流  $I_M$ 。

先用内径为 1.5 mm 的吸极, 分别测试了  $D/d, L/d$ 、振荡器板压  $V_a$ (高频振荡器功率由振荡器的板压决定)以及引出电压  $V_b$  与聚焦度  $\alpha$  的关系。图 2 表明,  $D/d$  和  $l/D$  对  $\alpha$  都有较大的影响。随着  $D/d$  的增加,  $\alpha$  有极大值。当  $l = 0.5D$  时, 出

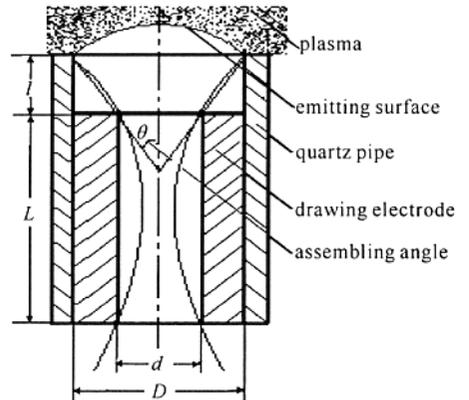
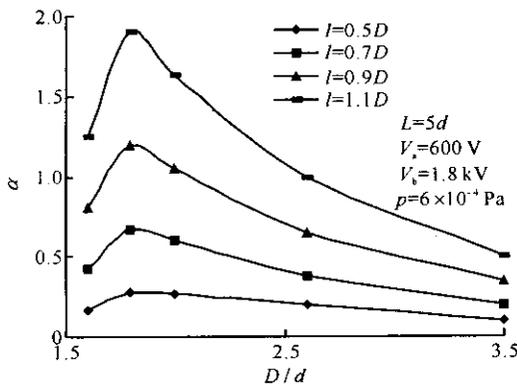
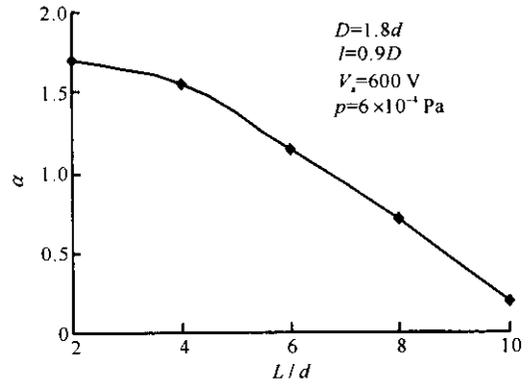


Fig. 1 Geometry parameters of drawing electrode

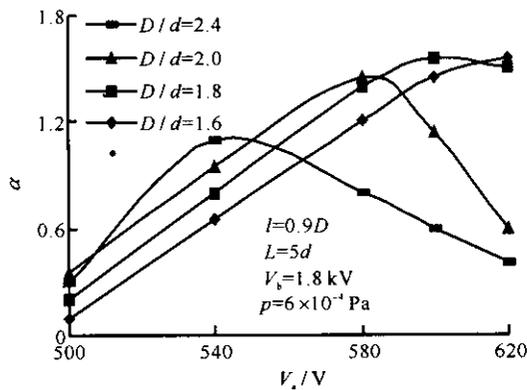
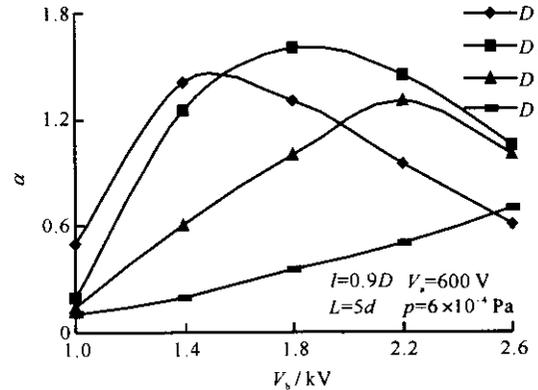
图 1 吸极的几何参数

\* 收稿日期: 2006-01-17; 修订日期: 2006-04-12  
作者简介: 孙振武(1967—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为加速器物理; sunzw@zzu.edu.cn.

Fig. 2 Effect of  $D/d$  on focusing degree  $\alpha$ 图 2  $D/d$  对聚焦度  $\alpha$  的影响Fig. 3 Effect of  $L/d$  on focusing degree  $\alpha$ 图 3  $L/d$  对聚焦度  $\alpha$  的影响

现聚焦迹象。 $l/D$  增大时,  $\alpha$  迅速上升。同时实验中还观察到, 随着  $l/D$  的增大, 引出束流  $I_M$  很快下降, 最佳引出电压上升。图 3 表明, 随着  $L/d$  的减少,  $\alpha$  基本呈线性上升; 当  $L/d$  小于 4 时, 上升趋势减缓。

图 4 和图 5 表明, 对于聚焦度  $\alpha$ , 存在最佳振荡器板压和引出电压; 最佳振荡器板压随  $D/d$  的增加而减小, 而最佳引出电压随  $D/d$  的增加而增加。实验中还观察到气压具有同振荡器板压类似的性质。

Fig. 4 Effect of oscillator voltage  $V_a$  on focusing degree  $\alpha$ 图 4 振荡器板压  $V_a$  对聚焦度  $\alpha$  的影响Fig. 5 Effect of extraction voltage  $V_b$  on focusing degree  $\alpha$ 图 5 引出电压  $V_b$  对聚焦度  $\alpha$  的影响

然后, 选择不同的吸极内径, 调节其它参数, 测试吸极内径  $d$  对聚焦度  $\alpha$  和引出束流  $I_M$  的影响。从表 1 可见, 最大聚焦度基本不随吸极内径的变化而变化, 而引出束流大致与吸极内径的二次方成正比。

## 2 结果分析

由于电势差的作用, 离子源内等离子体在吸极附近边界呈凹状, 形成发射面 (见图 1)。离子源的引出效率取决于发射面的形状。发射面弯曲的电场使离子束在进入吸极以前得到会聚, 会聚角为  $\theta$ 。束的外形大体上呈圆锥形。由于吸极入口以及空间电荷的发散作用, 离子束在吸极内出现束腰。束腰距吸极上端的距离由发射面的形状以及吸极的几何参数  $d, D, l$  和  $L$  决定。最佳的发射面应使离子束束腰的位置在吸极通道的中间, 以使

离子束的边缘在吸极的入口和出口处刚好擦着边缘通过 (图 6(b))。显然此时打到吸极内壁的离子最少, 聚焦度最大, 离子束对吸极的轰击最轻, 离子的引出效率最高, 此时  $D/d$  处于最佳值。增加  $l$ , 可减少从发射面引出的离子打到吸极上表面的几率, 从而使聚焦度增加; 但同时使发射面与吸极之间的电场减小, 吸极对离子的引出能力减弱, 从而使引出束流明显减小。在除  $L$  外其它参数不变的情况下, 束腰距吸极上端位置不变, 减小  $L$  等于仅减小束腰距吸极下端的距离, 这样, 发散后的离子打到吸极内壁下端的几率减小, 因此随着  $L/d$  的下降,  $\alpha$  呈线性上升。但随着  $L/d$  的减小, 吸极的气阻减小, 放电管内的气压降低, 离子密度减小, 从而使发射面的曲率半径减小, 增加了离子束过聚焦的趋势。因此当  $L/d$  小于一定值时,  $\alpha$  上升趋势减缓。

表 1 吸极内径  $d$  对引出束流  $I_M$  和聚焦度  $\alpha$  的影响

Table 1 Effects of inner diameter  $d$  on extraction beam intensity  $I_M$  and focusing degree  $\alpha$   
( $D=1.8d, l=0.9D, L=5d, V_a=600\text{ V}, V_b=1.8\text{ kV}, p=6\times 10^{-4}\text{ Pa}$ )

$d/\text{mm}$	1	1.5	2
$I_M/\mu\text{A}$	55	132	229
$\alpha$	1.47	1.62	1.54

在吸极几何参数比例不变的情况下,发射面的形状及束腰在吸极内的相对位置没有变化。增加或减少  $d$ ,  $I_K$  和  $I_M$  同时增加或减小,因此聚焦度基本不随吸极内径变化而变化。但由于增加  $d$  等于增加了束流的通过面积,因此  $I_M$  随  $d$  大致呈二次方比例增加。

当离子束处于最佳聚焦状态时,继续增加高频振荡器的功率和气压,放电管内离子密度增加,发射面曲率半径变大,离子束束腰下移(图6(a)),使离子束呈弱聚焦,打到吸极上部的离子数增加;反之,会使离子源呈过聚焦。在最佳的聚焦状态下增加引出电压,发射面的曲率半径减小,离子束呈过聚焦;反之则会使离子束呈弱聚焦,因此存在最佳高频振荡器的功率和引出电压。从实验结果看,增大  $D/d$  有利于离子束从过聚焦转向最佳聚焦状态,而减小  $D/d$  可使离子束从弱聚焦转向最佳聚焦状态。

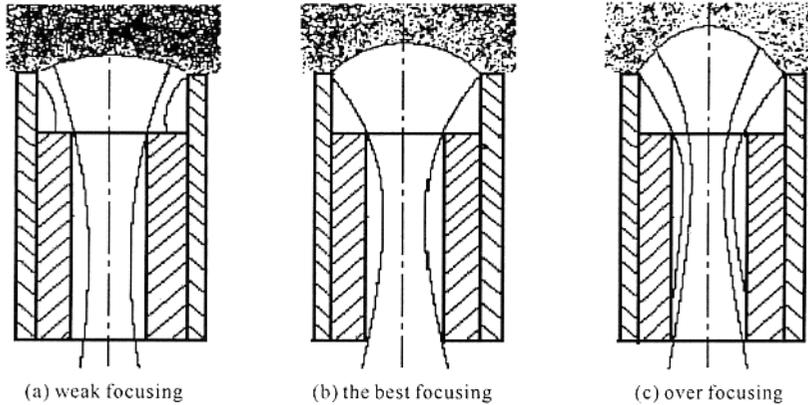


Fig. 6 Three focusing states of ion beam

图6 离子束的三种聚焦状态

根据同心球面电极的发射公式,可求得离子通过发射面发射的总电流为<sup>[2]</sup>

$$I_b = \frac{2}{9} \left( \frac{2e}{m_{\text{ion}}} \right)^{1/2} V_b^{3/2} \frac{1 - \cos\theta}{(-\beta)^2} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为发射面的半会聚角(见图1); $\beta$ 是 $r/r_0$ 的函数, $r_0$ 是发射面的曲率半径, $r$ 是从发射面的曲率中心量起到吸极顶面边缘的距离; $m_{\text{ion}}$ 为离子的质量。由此可见,从发射面发射的总束流与引出电压的 $3/2$ 次方成正比。在较低引出电压下,随着引出电压的增加,由于聚焦度的增大和总束流的增加,引出束流剧增;而在较高的引出电压下,随着引出电压的增加,虽然总束流与引出电压仍呈 $3/2$ 次方的正比关系,但此时聚焦度逐渐变小,此时引出束流虽然仍呈增加趋势,但增加趋势变缓,这在实验中得到了验证。由此分析,当引出束流增加趋势变缓时,靠增加引出电压来加大引出束流对离子源已没有好处,反而会明显降低吸极的寿命。

### 3 结 论

吸极几何参数、引出电压、高频振荡器功率以及气压是影响离子源引出特性的几个因素,它们相互牵制。几何参数的变化不但影响吸极本身的聚焦能力,而且影响放电管内的气压以及引出电压的分布。在其他参数不变的情况下,存在最佳的 $D/d$ ;增加 $D/d$ ,有利于离子束从过聚焦向最佳聚焦状态过渡。增加 $l/D$ ,可增加聚焦度,但引出束流会明显减小。减小 $L/d$ ,可提高聚焦度,但气压会明显减小。当 $L/d$ 小于4时,聚焦度增加趋势变缓。综合考虑聚焦度、引出束流和气压, $D/d$ ,  $l/D$ ,  $L/d$  适宜的选择范围分别为1.6~2.1, 0.7~1.1, 4~7。增加振荡器功率和气压会使离子束呈弱聚焦,而增加引出电压使离子束呈过聚焦。

### 参考文献:

- [1] 孙振武,李玉晓,姜胜南,等. 4 MV 静电加速器调试中出现的问题及解决方案[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(7):1117-1120. (Sun Z W, Li Y X, Jiang S N, et al. Debugging of 4 MV electrostatic accelerator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(7):1117-1120)
- [2] 叶铭汉,陈监璞. 静电加速器[M]. 北京:科学出版社,1965. (Ye M H, Chen J P. Electrostatic accelerator. Beijing: Science Press, 1965)
- [3] 孙振武,郑世全,李涛,等. 高频离子源物理参数对离子束性能的影响[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2005, 42(5):974-977. (Sun Z W, Zheng S Q, Li T, et al. Effects of physical factors of RF ion source on quality of ion beam. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2005, 42(5):974-977)
- [4] Langbein C. Plasma beam ion source[J]. *Nucl Instr Meth*, 1989, 278(1):228-232.
- [5] Arzt T. Numerical simulation of the RF ion source[J]. *J Phys D*, 1988, 21(2):278-285.

- [6] 卢超, 余增亮, 詹福如. 静电加速器高频离子源引出电极的光学设计[J]. 真空科学与技术, 2002, **22**(3):173-177. (Lu C, Yu Z L, Zhan F R. Optical design extraction electrode of RF ion source in electrostatic accelerator. *Vacuu Sci Technol*, 2002, **22**(3):173-177)
- [7] Bandyopadhyay M, Tanga A, Falter H D, et al. Analysis of plasma dynamics of a negative ion source based in probe measurements[J]. *J Appl Phys*, 2004, **96**:4107-4113.
- [8] Wutte D, Freedman S, Gough R, et al. Development of an RF driven multicusp ion source for nuclear science experiments[J]. *Nucl Instr Meth B*, 1998, **142**(3):409-416.

## Extraction property of RF ion source

SUN Zhen-wu, HUO Yu-ping, LI Yu-xiao, LI Tao

(School of Physics Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Effects of the geometry parameters of drawing electrode, oscillator plate voltage and extraction voltage on the focusing degree of ion source are measured and the experimental results are analyzed to ensure the quality extraction of the RF ion source. On the condition that the other parameters keep unchanged, the ratio of the outer diameter  $D$  to its inner diameter  $d$  of the drawing electrode has an optimum value. The increase of  $D/d$  is beneficial to the re-focusing of over-focusing ion beam. The length of the drawing electrode is  $L$  and the quartz pipe is  $l$  longer than the drawing electrode. The increase of  $l/D$  leads to the increase of focusing degree and the decrease of extraction beam intensity. Focusing degree rises with the decrease of  $L/d$  and the rising tendency slows down when  $L/d$  is smaller than 4. The suitable ranges of  $D/d$ ,  $l/D$  and  $L/d$  are respectively 1.6~2.1, 0.7~1.1 and 4~7 on the comprehensive consideration about focusing degree, extraction beam intensity and pressure. Increasing oscillator power can make ion beam weakly focus and increasing extraction voltage can make ion beam over focus.

**Key words:** Electrostatic accelerator; Ion source; Ion beam; Focusing degree