

144-149  
④

## 整体分离环 RFQ 加速器的研究\*

陆元荣 李纬国<sup>†</sup> 郭菊芳 任晓堂 于金祥 方家训 陈佳洱  
(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

TL56

**摘 要** 阐述了北京大学整体分离环高频四极场(ISR RFQ)加速器研究所取得的研究成果, 分别论述了 26 MHz 300 keV ISR RFQ 加速器结构、束流动力学设计、高频控制系统、束流试验装置及束流试验; 分析了其对  $N^+$ 、 $O^+$ 、 $O^-$  束流试验的研究结果; 简述了 26 MHz 1 MeV RFQ 加速器束流动力学、加速腔设计及目前的进展.

**关键词** 整体分离环 高频四极场 高频控制系统 束流试验  
**分类号** TL53

重离子加速器

### 1 引言

高频四极场(RFQ)加速器是 1970 年由前苏联科学家卡帕钦斯基首先提出的新型强流加速器<sup>[1]</sup>. 它具有体积小、使用方便、束流品质好、束流强度高、束流传输效率大于 90% 等众多优点. 近十多年来, 这种加速器得到了迅速发展, 并成为当前低能强流加速器发展的热点之一. 轻离子 RFQ 加速器已广泛的用作大加速器的注入器和强流中子源, 并在质子理疗上有较好的应用前景. 与此同时, MeV 级重离子 RFQ 加速器也得到迅速发展, 它在半导体器件的研究与生产、材料改性、惯性约束聚变等方面将发挥越来越重要的作用. 特别是近几年来, 性能优良的 RFQ 加速器更是“加速器驱动洁净核能源”系统方案中倍受青睐的低能段强流加速器之一.

北京大学于 1984 年首次提出“整体分离环型(ISR)高频四极场(RFQ)加速结构”的设想<sup>[2]</sup>. 1987 年以来对这种加速器结构进行了系统的研究, 建成了我国第一台整体分离环 RFQ 加速器, 成功地将  $N^+$ 、 $O^+$ 、 $O^-$  加速至 300 keV. 并由此开始了 MeV 级重离子 RFQ 加速器的研制.

### 2 300 keV ISR RFQ 加速腔结构

ISR RFQ 加速腔结构如图 1. 腔芯由 1 个底座、6 个交替排列的左旋臂、右旋臂、支撑环和四根电极杆组成. 采用自己研制的新型微翼电极, 它不仅加工方便, 且便于水冷, 真正发挥了四翼、四杆型电极之长处. 该腔芯结构具有机械强度高、模式间隔大和工作稳定等优点<sup>[3]</sup>. 表 1 给出了 ISR RFQ 加速腔的基本参数.

表 1 ISR RFQ 加速腔的基本参数

参数名称		取值大小
工作频率	$f$	26 MHz
荷质比	$q/m$	$\sim 1/14$
输入能量	$W_{in}$	1.4 keV/u
输出能量	$W_{out}$	21.4 keV/u
腔筒直径	$D$	50 cm
腔筒长度	$L$	90 cm
极间电压	$V$	75 kV
比分路电阻	$\rho$	204 k $\Omega$ ·m
品质因子	$Q$	1 300

采用短路片式变频结构, 可以改变旋臂

1998-04-06 收稿.

\* 国家自然科学基金(项目号 19335010 和 19775002)资助.

支撑长度  $s$ ，从而大范围地改变腔的谐振频率 (24~40 MHz)，可以使腔准确谐振在所需的工作频率。  $f$  (MHz) 与  $s$  (cm) 满足如下半经验公式： $f \times s = 1820 + 4.7 \times s$ 。此种结构可以方便地用于可变能量 RFQ 加速器的研制<sup>[4]</sup>。

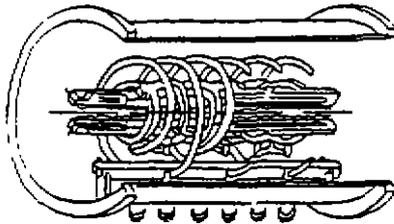


图1 ISR RFQ 加速腔结构示意图

### 3 束流动力学设计

在束流动力学设计研究方面，我们将国际上通用的 RFQ 粒子动力学设计计算程序 PARMTEQ 成功地移植到微机上；对微翼型电极的动力学特性进行了系统的研究；增加了程序的动态显示功能，将粒子进入每一个单元的径迹、相位、能散、相图及损失都及时显示在屏幕上；开发了优化参数设计的软件 OPTIMUM。极大地方便了 RFQ 加速器的粒子动力学设计计算。图 2 给出了 26 MHz 300 keV ISR RFQ 粒子动力学设计参数曲线。它可将  $N^+$  从 20 keV 加速到 300 keV 以上，且传输效率高达 95%。

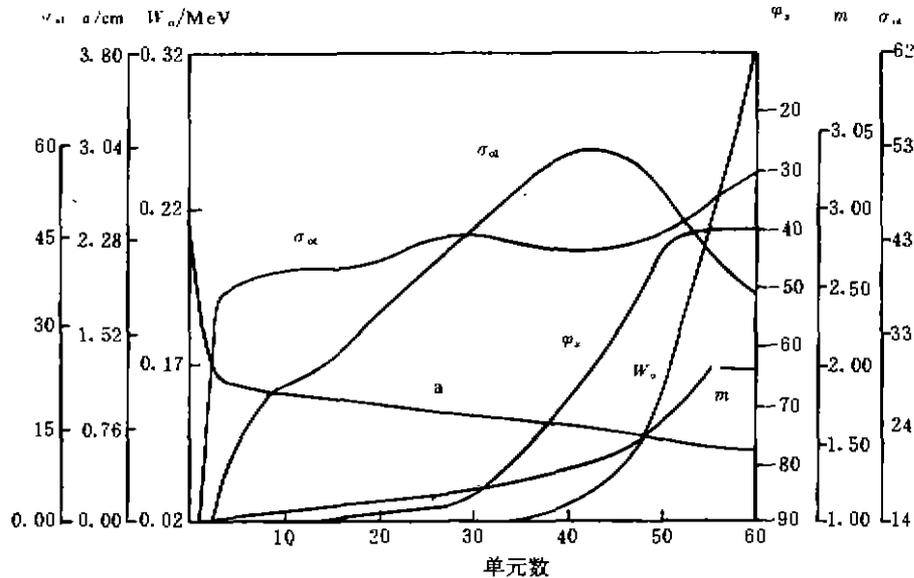


图2 300 keV ISR RFQ 粒子动力学参数

### 4 RFQ 加速器的高频控制系统

RFQ 加速器的高频控制系统<sup>[5]</sup>由高频幅度稳定系统和腔频率自动调谐系统组成。

稳幅电路主要由双平衡混合器流控衰减器、腔提取信号检波器、直流放大器、功率保护电路、冷却水温升保护、真空保护、脉冲调制放大器、高频机及高功率磁耦合结构

等组成。其中高频机为北京广播器材厂生产的 XFD-D5 型 3~30 MHz 30 kW (连续功率) 线性放大器。该系统开环带宽 5 kHz，增益裕量为 15 dB，相位裕量为 45°。对高频馈送的磁耦合结构进行了重点研究和改进。由于高功率磁耦合装置本身具有较多的感抗、缺乏容抗，为了克服腔输入电抗总是大于零或几

乎与电阻轴相切的问题，我们在磁耦合结构的内部增加了 1 个长为 93.0 mm 的中间金属圆筒，其内筒直径为 45.0 mm，与原馈管内导体相连，外筒直径 51.5 mm，这相当于在原馈送装置内增加了 1 个 38 pF 的分布电容。通过调整耦合环的方向以改变有效磁通面积，就很容易地实现高频机(75Ω)与 RFQ 加速腔的匹配。用 HP8405A 矢量伏特计可以方便地测量改进前、后的 RFQ 腔的输入阻抗，找到最佳的匹配位置。

频率自动调谐系统由腔调谐机构、步进电机驱动器、移相器、鉴相器和采样保持放大器等主要部件构成。移相器由铁氧体高频磁环制作的 90°窄带 3 dB 定向耦合器和加有反向可变电压的变容二极管组成。此种压控移相器具有移相范围宽(两个移相单元，移相超过 360°)、输入驻波比小、插入损耗变化小等优点。鉴相器由 3 dB 定向耦合器、平衡相位检波器及直流放大器组成。它的鉴相灵敏度为 0.15 V/(°)或 6.6° V<sup>-1</sup>，经计算机拟合，鉴相器输出的电压大小  $V$  与两路信号相位之差满足如下关系

$$V = 8.880[(1 + \sin\phi)^2 - (1 - \sin\phi)^2]$$

可见在零点附近的线性较好。整个系统开环带宽为 2.2 kHz，增益裕量为 11.6 dB，相位裕量为 43°。符合系统稳定性判据要求。闭环全线放大倍数超过 20 倍。

表 2 负载因子 1/6 高功率试验数据

功率 (kW)	电压 (kV)	频率 (MHz)	水温* (°C)	$\rho/(k\Omega \cdot m)$
19.66	62.3	25.739	16.5	158
24.62	66.9	25.737	18.0	155
29.70	71.6	25.737	19.0	147
39.57	78.5	25.732	22.0	132
44.36	81.7	25.728	23.0	128

\* 初始水温为 11.0 °C

RFQ 高频控制系统在 1992 年 300 keV ISR RFQ 高频结构样机建成后即投入了运行，在长期的高功率实验运行过程中，性能稳定可靠，输入驻波比好于 1.3。证明馈送结构匹配良好，RFQ 腔芯结构强度高、稳定性及电极水冷却效果较好<sup>[5]</sup>。表 2 给出了一组高功率试验数据(负载因子为 1/6，调制频率 166 Hz)。

### 5 RFQ 的连续束注入试验研究

北京大学 26 MHz ISR RFQ 加速器是在 ISR RFQ 满功率高频结构样机的基础上发展起来的。1994 年初，RFQ 加速器首次出束，并成功地将 N<sup>+</sup> 从 20 keV 加速到设计能量 300 keV，但加速的平均流强只有 1.7 μA。

为了进一步提高 RFQ 加速器的加速流强，改善束流的传输效率，证明 RFQ 加速器粒子动力学设计的准确性和整体分离环 RFQ 加速结构的优点，我们对 RFQ 加速器的束流输运线重新进行了设计和安装(见图 3)。

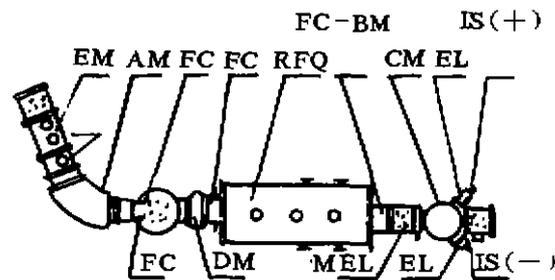


图 3 RFQ 束流试验装置布局示意图

详细说明见正文。

为了研究正负离子的加速，安装了两套离子源系统。边引出永磁潘宁离子源 IS(+) 产生 N<sup>+</sup>、O<sup>+</sup> 离子束，采用硼化镧(LaB<sub>6</sub>)作阴极；O<sup>-</sup> 离子束由溅射型潘宁源产生 IS(-)。正负离子束引出后分别经过一单透镜(EL)汇聚后，再由开关汇合磁铁(CM)分别偏转 ±45° 后与 RFQ 加速腔同轴。正负离子

束经分析后再由腔前 15 cm 处的匹配聚焦单透镜(MEL)聚焦后进入 RFQ 加速腔. 在腔前由法拉第杯(FC)测得入射束流强(BM), 加速后经一小偏转磁铁(DM)偏转掉未加速的 20 keV 的离子, 再由法拉第杯测量加速后的束流强度, 由大分析磁铁(AM)测量加速束能量. EM 为束流发射度测量仪.

为避免 RFQ 腔加速电极加工和安装偏差及高功率试验后产生的形变对束流传输效率的影响, 我们对腔芯电极进行了精确测量和重新安装. 为改善束流输出特性, 还在 RFQ 电极后增加了两个单元长度, 并将其过渡到没有调制的形状. 实验发现, 它可使腔后 10 cm 处束斑由原来长 3 cm 和宽 1 cm 的斜长椭圆变成近似的圆束斑, 明显地改善了腔加速束流的品质.

从表 2 看出, RFQ 腔的工作频率并不是准确的 26.0 MHz, 这正是整体分离环 RFQ 腔设计的一个难点, 因此要采用本文第 2 部分所述的变频结构, 使 RFQ 腔准确工作在 26.0 MHz. 在高功率试验初期, 变频结构中的短路片完全采用紫铜制作. 在初期的几次试验中, 它能保证与螺旋支臂的接触, 然而随着试验的进行, 由于热膨胀效应使其发生形变. 而紫铜较软, 弹性不足, 因而无法恢复到原来的形状, 导致短路片不能与螺旋支臂很好接触, 引起高频打火现象而将短路片烧毁. 在高频打火期间, 高频功率出现不匹配, 高频机也因此多次发生驻波比跳闸保护; 腔的谐振频率也发生变化, 频率变化的大小与烧毁的短路片的个数以及短路片的新的位置有关. 改进后的短路片在原紫铜片外侧加焊一段黄铜片, 在保证高频接触的同时, 增加了短路片的强度, 调节 6 个短路片的位置, 可准确得到工作频率 26.0 MHz.

经过以上各项改进及大量较长时间束流试验研究, RFQ 加速段的束流传输效率有了

非常明显的改善, 从以前的约 50% 上升至现在的 75% 以上. 图 4 给出了负载因子 1/6, 脉冲峰值功率 40 kW 下加速 N<sup>+</sup> 束能谱曲线. 这一试验结果是在离子源弧压 600 V、弧流 70 mA、离子源聚焦电压 15 000 V、引出电压 20 000 V 和腔口单透镜电压 11 000 V 下测得的.

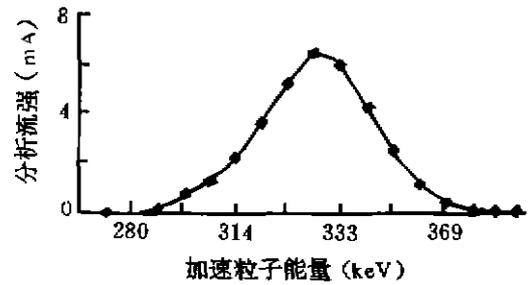


图 4 加速 N<sup>+</sup> 离子能谱曲线

表 3 N<sup>+</sup>、O<sup>+</sup>、O<sup>-</sup> 束流试验测量结果

离子种类	弧流 (mA)	弧压 (V)	V <sub>聚焦</sub> (kV)	功率 (kW)	I <sub>加速</sub> (μA)	η
N <sup>+</sup>	70	500	20.0	37.8	17.3	76%
N <sup>+</sup>	100	600	20.0	40.0	15.0	75%
N <sup>+</sup>	120	500	18.3	35.0	14.0	61%*
O <sup>+</sup>	70	300	20.0	40.0	15.8	43%*
O <sup>+</sup>	90	270	20.0	30.0	17.5	19%*
O <sup>-</sup>	80	350	18.0	35.0	14.0	48%*
O <sup>-</sup>	80	350	18.0	30.0	13.0	45%*

\* 为系统未改进前的实验结果, 参见文献[7, 8]

表 3 给出了不同功率、加速不同粒子的几组束流实验的工作参数和测量结果. 连续束流注入试验研究结果如下: 在负载因子 1/6 和脉冲峰值功率 30 kW 下, 成功地将 N<sup>+</sup>、O<sup>+</sup>、O<sup>-</sup> 加速到 300 keV 能量, 且 N<sup>+</sup> 平均流强达 24 μA, 氧离子平均流强可达 17.5 μA, 即宏脉冲峰值流强均超过 100 μA, RFQ 加速段束流传输效率好于 75%. 束流传输效率 η 的计算由下式得到

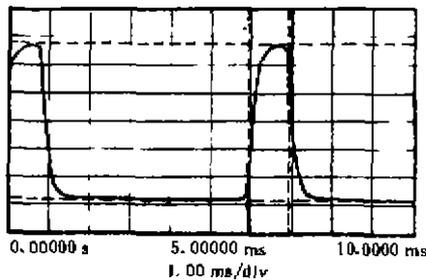
$$\eta = I_a \times 6 / I_m, \text{ 其中 } I_a \text{ 为加速束流强度,}$$

$I_{in}$  为入射束流强度.

通过试验发现,束流传输效率最高,加速流强不一定最大,这是由腔入口处的束流品质决定的,即与离子源阴极使用时间长短及其工作状态关系很大;束流传输效率与 RFQ 腔工作频率关系很大,这与粒子动力学设计相符合;束流传输效率高也需要较好的真空和合适的加速电压.图 3 中小偏转磁铁(DM)的加入成功地解决了对平均加速束流流强的测量,但对测量加速束的能谱有一定的影响.

### 6 RFQ 脉冲束注入研究进展

首先采用高频调制用的脉冲信号,经过 360°的调制延时后作为离子源脉冲调制的触发脉冲,使用上海核子所 3 kW 脉冲电源作为离子源的脉冲弧压电源,触发脉冲频率 166 Hz,脉宽 1 ms.通过脉冲电源的宽度调

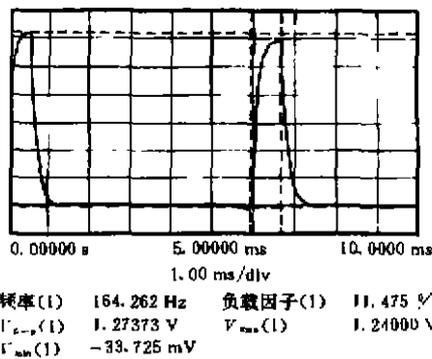


平均电压(1)	192.171 mV	$V_{p-p}$ (1)	1.40392 V
负载因子(1)	15.737 %	$V_{max}$ (1)	1.36995 V
$\Gamma_{in}$ (1)	-33.968 mV	频率(1)	164.262 Hz

图 5 RFQ 腔后加速束流波形

节,可改变引出束的脉冲宽度.改变触发脉冲的可调延时,可以将离子源引出束脉冲放置于高频调制信号脉冲内或部分甚至全部移出高频脉冲外,这就可以看出全部、部分及完全不加速的引出束束流波形.图 5 给出了最近一次  $O^+$ 束流实验测得的 45 kW 时加速束流波形,电流取样电阻为 5 k $\Omega$ .由此可知加速峰值脉冲流强为 281  $\mu A$ ,而此时输入脉

冲峰值流强为 1.66275 V/5 k $\Omega$ ,即 332  $\mu A$ ,因此 RFQ 加速段束流传输效率为 84.4%.为了便于观测超前或落后于高频调制脉冲信号的束流在 RFQ 中的行为,图 6 给出了 45 kW 下 70%的束被加速的波形,而超前于功率脉冲的 30%束流未对粒子加速产生任何影响.脉冲束流试验中还比较了不同 RFQ 腔注入功率对 RFQ 加速段传输效率的影响及在同一高频功率下不同真空状态对传输效率的影响.结果表明,高频功率越接近设计值,束流传输效率就越好;同一高频功率下,系统真空越好,束传输效率就越高.45 kW 下试验测得的最高的束流传输效率为 86%.



频率(1)	164.262 Hz	负载因子(1)	11.475 %
$\Gamma_{in}$ (1)	1.27373 V	$V_{max}$ (1)	1.24000 V
$\Gamma_{out}$ (1)	-33.725 mV		

图 6 70%的束流加速波形

### 7 26 MHz 1 MeV RFQ 最新进展

目前,北京大学 26 MHz 1 MeV RFQ 的粒子动力学设计已经完成,图 7 给出了粒子动力学参数变化图.高功率实验腔已经加工完毕,该腔采用可敞开结构,便于加速电极的安装、校准与调试,高真空已达  $3.33 \times 10^{-4}$  Pa.由于 1 MeV RFQ 加速腔需要 90 kW 脉冲峰值功率,故选用两台现有峰值功率可达 45 kW 的高频机并馈一腔的高功率试验方案,该系统正在准备中.目前,RFQ 加速电极正在加工,下半年将进行 RFQ 电极安装及其腔的高功率试验和束流实验.

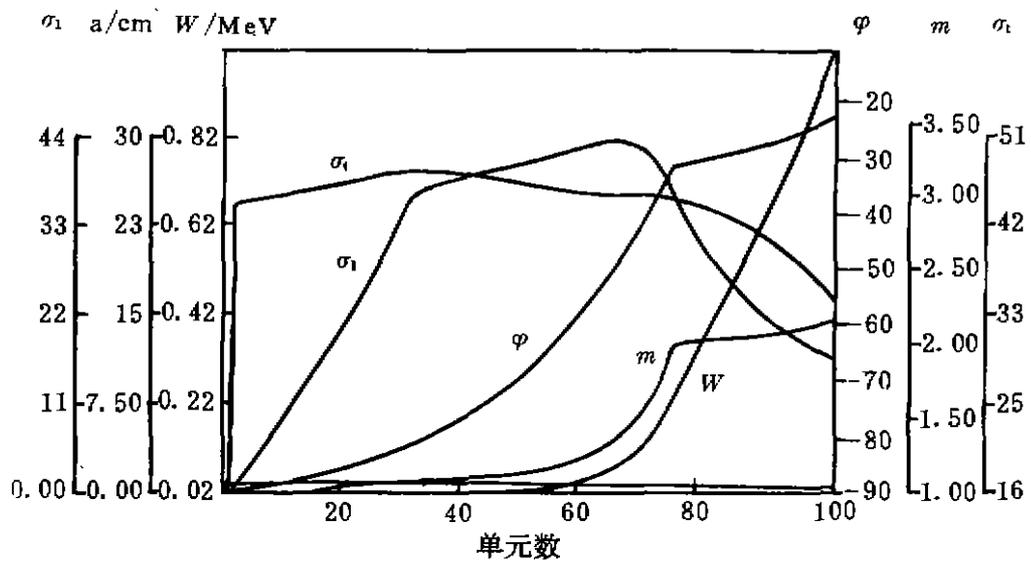


图7 1 MeV RFQ 粒子动力学参数

### 8 结论

经过长时间的束流试验研究, 充分证实了北京大学 ISR RFQ 加速器工作稳定可靠、频率调节方便、水冷却效果好, 适于加速重离子. 现已成功地将  $N^+$ 、 $O^+$ 、 $O^-$  等多种离子加速到设计能量 300 keV, 束流传输效率可达 80% 以上, 宏脉冲峰值流强超过 250  $\mu A$ , 同时也积累了丰富的 RFQ 束流试验的经验. 300 keV RFQ 束流试验所取得的成功经验为 MeV 级加速器的顺利建成打下了坚实的基础.

致谢 作者最后特别感谢吕建钦副教授、赵菱教授对 RFQ 脉冲束流试验的支持, 感谢于茂林师傅在加工工艺和安装等工程技术上的支持.

### 参 考 文 献

1 Kapchinskij I M, Teplyakov V A. Prib Tech Eksp,

1970, 4, 19

2 Xie Jialin. Proc of 1984 Linear Accelerator Conf, Gesells  
 3 陈佳洱, 方家训, 李纬国等. 关于重离子整体分离环 RFQ 加速技术的研究. 自然科学进展, 1994  
 4 李纬国, 陆元荣等. 重离子整体分离环 RFQ 加速器的研究. 核物理动态, 1996, 13(2): 31~33  
 5 Chen Chia-erh, Fang Jiaxun, Li Weiguo *et al.* Layout and High Power Test of a 26 MHz Spiral RFQ. EPAC, Berlin, 1992, 1328~1330  
 6 陆元荣. 整体分离环 RFQ 的高频控制系统及其高功率试验. 陆元荣硕士论文, 1993  
 7 Chen C E, Fang J X, Guo J F *et al.* Experimental Studies on the Acceleration of Positive and Negative Ions with a Heavy Ion ISR RFQ. Proc of 1996 European Particle Accelerator Conference, Barcelona, 1996  
 8 Chen C E, Li W G, Yu J X *et al.* Study of ISR Heavy Ion RFQ Accelerators at Peking University. China-Japan Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, Chengdu, China, 1996, 58~61

(下转第 180 页)