

# 一种低能散 RFQ 加速器的物理设计\*

郭之虞<sup>1)</sup> 谢谊 刘克新 方家驹 颜学庆 陈佳洱

(北京大学重离子物理教育部重点实验室 北京 100871)

**摘要** 讨论了脉冲束注入、逐步增加同步相位、减小电极调制系数和极间电压等降低 RFQ 加速器能散的途径,并在此基础上设计了一台能散为 0.6% 的 RFQ 加速器. 该加速器用于加速器质谱对  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{12}\text{C}$  3 种离子的传输有很强的选择性,有利于降低测量本底、简化装置.

**关键词** RFQ 加速器 加速器质谱 低能散 束流动力学

## 1 引言

加速器质谱(AMS)已广泛应用于地球科学、考古学、生命科学、环境科学和材料科学等领域. 目前 AMS 装置中的加速器普遍采用串列静电加速器和串列高频高压加速器. 近年来国际上 AMS 小型化发展较快,端电压在 0.5—1.0MV 的小型串列加速器 AMS 装置已经商品化<sup>[1]</sup>. 串列加速器用于 AMS 的主要缺点是束载能力弱、干扰本底强,因此需要比较复杂的注入系统和高能分析系统,测量效率也比较低. 同时,串列加速器需要使用高气压容器和绝缘气体循环干燥装置,且其电子剥离器在高压电极内,维护与操作不便. RFQ 加速器有很强的束载能力和离子选择能力,用于 AMS 可以有效地简化装置、降低本底、提高效率,也无须使用高气压容器和绝缘气体,电子剥离器也可置于地电位. 但 RFQ 加速器输出束流的能散通常较大,用于 AMS 时须采取有效措施使其降低,否则会影响到粒子探测器的分辨率. 本文将讨论降低 RFQ 加速器输出束流能散的途径,并给出一台可用于 AMS 的低能散 RFQ 加速器的物理设计.

RFQ 的束流动力学模拟通常使用 PARMTEQ 程序进行,但该程序会根据粒子种类和运行参数的变化重新设计腔的结构. AMS 需要用同一台 RFQ 加速器同时加速不同的同位素离子,为此须使用北京大学在

PARMTEQ 基础上开发的 RFQDYN 程序,该程序可在给定的腔结构设计基础上改变注入参数,从而满足模拟 AMS 束流传输的需要<sup>[2]</sup>.

## 2 降低 RFQ 加速器能散的途径

### 2.1 脉冲束注入

通常 RFQ 加速器可以对注入的连续束进行绝热聚束以提高传输效率,但此聚束过程也产生了较大的能散. 通过预聚束实现脉冲束注入不但可以减小 RFQ 的长度<sup>[3]</sup>,还可以降低 RFQ 加速器输出束流的能散. 加拿大 TRIUMF 的放射性束加速器装置 ISAC 就在 RFQ 前采用了预聚束器,不但减小了长度,而且降低了 RFQ 输出束流的纵向发射度<sup>[4]</sup>.

对于加速能量为 600keV 的 RFQ,分别注入初始能散为 0.1% 的连续束和初始能散为 1%、相宽为 20° 的脉冲束,通过束流传输模拟得到的 RFQ 输出束流能散分别如图 1 和图 2 所示. 不同脉宽下输出束流能散的比较见表 1. 由表可见注入较窄的束流脉冲可得到较小的能散.

表 1 RFQ 输出束流能散与注入脉冲宽度的关系

注入脉宽	180°	90°	60°	30°	20°	10°
出口能散	3.0%	1.9%	1.5%	0.9%	0.6%	0.2%

\* 国家自然科学基金(10275004)和教育部博士点基金(20020001028)资助

1) E-mail: zhyguo@pku.edu.cn

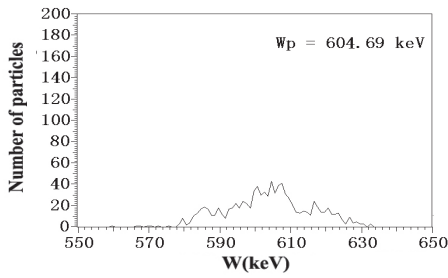


图 1 连续束注入时的 RFQ 输出束流能谱

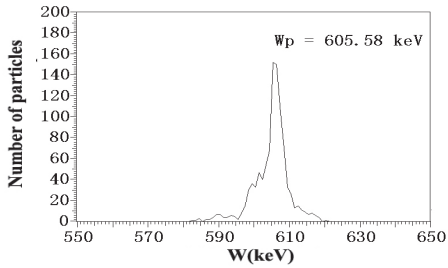


图 2 20° 脉冲束注入时的 RFQ 输出束流能谱

### 2.2 逐步增加同步相位

传统的 RFQ 动力学设计通常在粒子注入后到加速段之前将同步粒子的相位从  $-90^\circ$  逐步增加到  $-30^\circ$ ，然后在加速段将同步粒子的相位保持在  $-30^\circ$ 。实际上束流的能散

$$\frac{\Delta W}{W_s} \propto (AV_0 \sin|\varphi_s|)^{1/4}. \quad (1)$$

若在加速段继续逐步增加同步粒子的相位，则有可能进一步降低束流的能散。表 2 给出了不同最终相位下 RFQ 输出束流能散的变化。由表可知，选用较小的最终相位可以降低束流的能散，从纵向相图上看其效果相当于退聚束效应。

表 2 RFQ 输出束流能散与最终同步相位的关系

同步相位	$-30^\circ$	$-25^\circ$	$-20^\circ$	$-15^\circ$	$-10^\circ$	$-5^\circ$
出口能散	1.3%	1.1%	0.9%	0.7%	0.6%	0.6%

### 2.3 减小电极调制系数和极间电压

由(1)式可知，减小加速系数  $A$  和极间电压  $V_0$  也有助于减小能散。加速系数  $A$  取决于 RFQ 的电极调制系数  $m$ ，较高的  $m$  可以产生较高的轴向电场，从而得到较高的  $A$ 。传统的 RFQ 动力学设计通常在粒子注入后将  $m$  从 1 开始逐渐增大，在加速段则一般将  $m$  保持在 2 左右，以得到较高的加速效率。束流传输模拟表明，将加速段的  $m$  值降低到 1.3 左右可以显著降低输出束流的能散。为提高加速梯度 RFQ 的极间电压可以高达 80kV 甚至更高，但适当降低极间电压不但可以降低能

散，还可以节省射频功率。上述降低  $m$  值和极间电压引起的加速效率的降低可由于  $\varphi_s$  的增加而得到一定程度的补偿。

## 3 低能散 RFQ 的物理设计

研究表明  $^{14}\text{C}$  离子在 0.4MeV 能量下 1+ 电荷态的剥离产额可大于 50%<sup>[5]</sup>，故我们可取 RFQ 加速器的输出能量为 0.4MeV。在此能量下加速腔的长度不会太长，故可取较低的极间电压 50kV。对于重离子 RFQ 加速器，较低的工作频率有利于横向聚焦，较高的工作频率则能显著减小 RFQ 加速器的长度，为此选取 104MHz 作为工作频率。使用负离子可以有效地消除  $^{14}\text{C}$  的同量异位素  $^{14}\text{N}$  的干扰，故离子源选用铯溅射负离子源，其引出电压一般为 20kV。在 RFQ 的注入系统中插入预聚束器以实现脉冲束注入，脉宽控制在  $\pm 10^\circ$  之内。

从以上参数出发，使用 RFQDYN 程序，按照低能散原则进行了 RFQ 加速腔的束流动力学设计。RFQ 的结构参数根据  $^{14}\text{C}$  传输效率最大化的原则进行了优化。主要设计参数见表 3，RFQ 加速器结构参数随纵向单元的变化示于图 3。RFQ 出口处  $^{14}\text{C}$  离子的能散为 0.6%，可满足 AMS 的要求。

表 3 AMS-RFQ 主要设计参数

加速离子	$^{14}\text{C}$	$^{13}\text{C}$	$^{12}\text{C}$
离子电荷数 $q$		1	
工作频率 $f/\text{MHz}$		104	
极间电压 $V/\text{kV}$		50	
入口能量 $W_i/\text{keV}$		20	
出口能量 $W_o/\text{keV}$	405.5	90—100	20—30
调制系数 $m$		1.0—1.3	
聚焦强度 $B$		6.0	
Kilpatrick 参数		2.1	
平均孔径 $r_0/\text{mm}$		2.8	
加速段同步相位 $\varphi_s/(\circ)$		$-30$ — $-2$	
腔长 $L/\text{cm}$		76.4	
单元数 $N_{\text{cell}}$		169	
传输效率 $T(\%)$	100	0	0

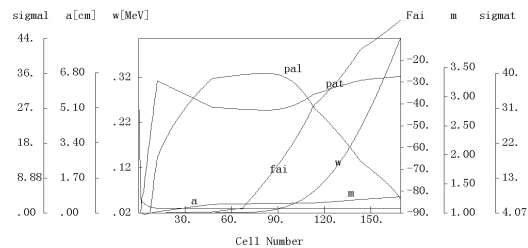


图 3 AMS-RFQ 的主要结构参数

## 4 RFQ的离子选择特性

注入到RFQ加速器中的离子的速度不同,其相位滑移的过程也不同,最后得到的能量可以有很大的差异,其传输效率也可以有显著的差别.传输模拟显示, $^{13}\text{C}$ , $^{12}\text{C}$ 离子从加速腔中段开始逐渐偏离出相稳定区,不能得到持续地加速,即在纵向丢失.虽然其中有些粒子可以一直漂移至RFQ出口,但其能量明显偏低.由RFQDYN的输出文件和束流传输包络图可知, $^{13}\text{C}$ 离子在136—141个cell处纵向丢失,在RFQ加速器出口处能量为0.09—0.1MeV, $^{12}\text{C}$ 离子则从第29个cell处即开始纵向丢失,到第111个cell完全丢失,在RFQ

加速器出口处其能量为0.02—0.03MeV.RFQ的这种离子选择特性对于AMS抑制 $^{12}\text{C}$ , $^{13}\text{C}$ 离子的强峰拖尾干扰、降低本底、提高测量灵敏度是十分有利的.

## 5 结论

通过变参量RFQ动力学模拟程序RFQDYN的计算表明,能散在0.6%左右、长度小于1m、功耗低、应用于加速器质谱的RFQ加速器是可以实现的.该RFQ加速器对于 $^{14}\text{C}$ , $^{12}\text{C}$ , $^{13}\text{C}$ 3种离子的传输有很强的选择性,有利于降低AMS的本底,因此有可能简化AMS结构,进一步降低其成本.

## 参考文献(References)

- 1 Synal H A, Jacob S, Suter M. Nucl. Instr. and Meth., 2000, **B172**: 1—7
- 2 ZHANG Hong-Lin. Master Thesis, Peking University. 2001 (in Chinese)  
(张宏林. 北京大学硕士研究生学位论文, 2001)
- 3 GUO Zhi-Yu, FANG Jia-Xun, ZHANG Chuan et al. Preliminary Design of a RFQ Accelerator with Pre-Buncher. In: Proceedings of the 8th National Conference on Accelerator Physics. Mianyang, Sichuan, August 2002 (in Chinese) (郭之虞, 方家驯, 张川等. 采用预聚束器的RFQ加速器的初步设计. 见: 第八届全国加速器物理交流会论文集. 四川绵阳, 2002年8月)
- 4 Koscielniak S, Laxdal R E, Lee R et al. Beam Dynamics Studies on the ISAC RFQ at TRIUMF, Proc. PAC'97, 1997, 1102—1104
- 5 Suter M. Nucl. Instr. and Meth., 1998, **B139**: 150—157

# Physical Design of a Low-Energy-Spread RFQ Accelerator<sup>\*</sup>

GUO Zhi-Yu<sup>1)</sup> XIE Yi LIU Ke-Xin FANG Jia-Xun YAN Xue-Qing CHEN Jia-Er

(Key Laboratory of Heavy Ion Physics at Peking University, Ministry of Education, Beijing 100871, China)

**Abstract** Beam dynamics design of an RFQ with low energy spread is introduced. The energy spread of the output  $^{14}\text{C}$  beam is about 0.6%, which shows the feasibility to use RFQ in the AMS facility instead of tandem accelerators. The RFQ is also compact with low power dissipation. The isotopes  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  and  $^{12}\text{C}$  can be fully separated in the RFQ, so the AMS background could be reduced and the whole system may be simple.

**Key words** RFQ accelerator, accelerator mass spectrometry, low energy spread, beam dynamics

<sup>\*</sup>Supported by National Natural Science Foundation of China (10275004) and Doctoral Funds of Ministry of Education, China (20020001028)

1) E-mail: zhyguo@pku.edu.cn