

分离作用 RFQ 加速系统研究进展*

陈佳洱 郭之虞¹⁾ 陆元荣 高淑丽 朱昆 王智 颜学庆 彭士香
赵捷 郭菊芳 李纬国 于茂林 袁忠喜 方家驹

(北京大学重离子物理研究所, 核物理与核技术国家重点实验室 北京 100871)

摘要 介绍了 SFRFQ 加速系统的最新研究进展. 为验证 SFRFQ 结构的抗打火性能, 设计了一个高功率模型腔, 进行了高功率打火实验, 并最终证明了该结构的可行性. 为验证 SFRFQ 加速器的载束性能, 设计了一台长度仅为 1m 的 600keV O^+ SFRFQ 加速器, 它将把从 1MeV ISR RFQ 引出的 O^+ 离子加速到 1.6MeV. 为解决 1MeV ISR RFQ 引出束流与 SFRFQ 加速器的横向匹配问题, 在其间插入了一个三单元磁四极透镜. SFRFQ 加速器加工和 1MeV ISR RFQ 改造的进展顺利.

关键词 SFRFQ ISR RFQ 打火 匹配

1 引言

分离作用 RFQ (SFRFQ) 加速器是北京大学发展的一种新型离子加速器^[1]. 它采纳了传统 RFQ 加速器的横向聚焦、纵向聚束与粒子加速一体化的优点, 克服了 RFQ 的加速效率随着能量增加而显著下降的缺点, 将 DTL 的纵向加速特性引入 RFQ 加速结构中, 用 RFQ 的强聚焦特性弥补漂移管加速间隙的横向散焦特性. 因此 SFRFQ 加速器适合于用作 RFQ 和 DTL 的中间加速结构, 以缩短 RFQ 加速器的长度, 进而提高直线加速器的加速效率.

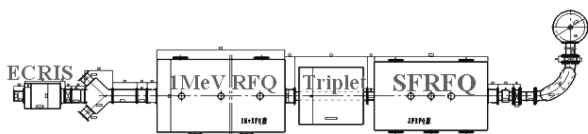


图 1 ISR RFQ-SFRFQ 组合加速系统示意图

为了证实分离作用加速结构的可行性, 在国家自然科学基金委的支持下, 我们计划建造一台 SFRFQ 样机, 这台样机将与 26MHz 1MeV O^+ 离子整体分离环 RFQ (ISR RFQ) 加速器^[2] 构成组合加速系统 (图 1), 将 mA 级 O^+ 离子加速到 1.6MeV. 为此开展了以下几个方面的研究工作: 1) ECR 强流氧离子源及 LEPT 系统研制. 以前的离子源只能提供数百 μA 的流强, 新研制的 ECR 源可产生数 mA 的氧离子束流^[3].

2) 1MeV O^+ ISR RFQ 加速器的升级. 为了进一步提高原 1MeV ISR RFQ 加速器的 O^+ 流强, 需对其真空、高频、控制等分系统进行改造^[4]. 3) 在 1MeV ISR RFQ 和 SFRFQ 之间插入一个匹配段, 用三单元四极透镜进行束流的横向匹配. 4) SFRFQ 加速腔的研制. 本文重点介绍后两项工作的研究进展.

2 SFRFQ 加速腔

2.1 打火功率实验腔及功率试验

前期模拟计算表明, 通过对结构进行优化设计, 在极间电压为 70kV 的情况下, 电极结构最大表面电场的 Kilpatrick 系数小于 2.1, 这从理论上证明了 70kV 的极间电压是可以实现的^[5, 6]. 在 26MHz 频率下, 根据 Kilpatrick 经验公式计算结果, 结构内部的最大电场不超过 15MV/m. 为了检验 SFRFQ 极间电压的可行性, 在建造正式的 SFRFQ 加速腔之前先建造了一台功率实验腔, 进行了高功率实验和极间电压测量. 根据对功率实验腔的模拟计算结果可以看出, 场强最大处在组成加速间隙的两个膜片的边缘部分 (见图 2), 其最大场强达到了 13.8MV/m.

功率实验腔建成后首先用小球微扰法测量其轴向电场分布, 测量在射频腔体冷测实验台上进行^[7]. 测量与模拟计算的结果如图 3 所示, 可以看出测量结果与模拟计算的结果能很好的吻合.

2008 - 01 - 07 收稿

* 国家自然科学基金 (10455001, 10605003) 资助

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

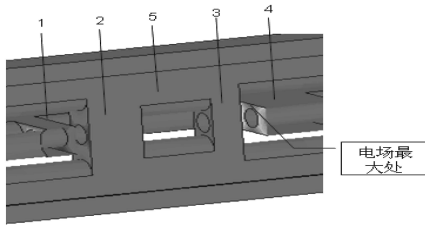


图 2 SFRFQ 电极中心部位及电场分布示意图 (1-2 与 3-4 为加速膜片电极对, 5 为四杆电极)

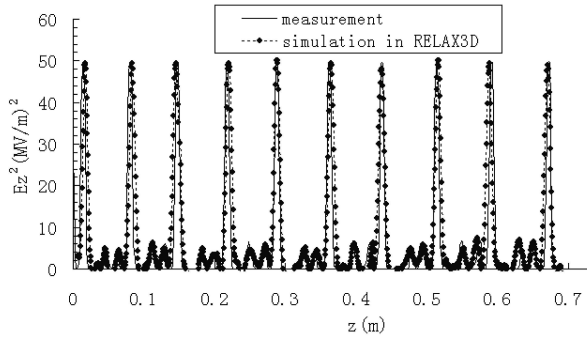


图 3 实验腔场分布测量结果和模拟计算的比较

为了测量可以达到的极间电压, 在安装好功率实验腔之后, 先进行低功率锻炼, 逐步馈入高频功率, 实验腔体经过反复锻炼后, 实际进腔功率已经可以达到 40kW.

极间电压是通过测量电极在高电压下发射的电子所产生的韧致辐射谱的最高能量来确定的. 韧致辐射的 X 射线由高纯锗平面探头测得, 讯号经过放大送入多道分析器, 从而得到韧致辐射的能谱. 高纯锗探头的校准是用 ¹³⁷Cs 和 ⁶⁰Co 完成的. 在校准工作完成后, 立即对功率实验腔进行脉冲功率实验, 射频电磁波的占空比近似为 5%, 实验开始时的真空为 4.0×10^{-4} Pa, 加功率约 5—6min 后, 功率达到最大值. 实验测得的扣除本底后的韧致辐射谱如图 4, 可以看出极间电压达到了 79.2kV, 从而证明该结构可以加载到 70kV 以上的极间电压.

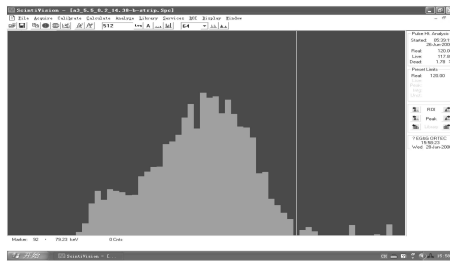


图 4 实验腔的韧致辐射谱

2.2 SFRFQ 加速腔束流动力学设计的优化

在顺利完成打火实验腔功率实验的基础上, 我们对 SFRFQ 结构的电极和膜片进行了进一步优化,

采用我们自己开发的模拟程序 SFRFQDYN^[8] 对该 SFRFQ 加速腔的束流动力学设计进行了模拟, 其传输效率为 94%, 半高宽能散低于 2%.

2.3 SFRFQ 腔射频结构与电磁场模拟计算

对所设计的 SFRFQ 加速腔进行了高频模拟计算, 其模型见图 5 所示. 初步确定了腔体的谐振频率、Q 值和比开路阻抗, 如表 1 所示.

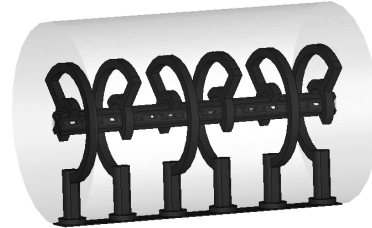


图 5 SFRFQ 腔高频计算模型

表 1 SFRFQ 腔高频参数的计算值

加速腔高频参数	计算值
谐振频率/ MHz	25.96
Q	4370
比开路阻抗/(kΩ·m)	474

3 匹配段的物理设计和加工

为了实现 1MeV ISR RFQ 加速器和后面的 SFRFQ 加速器之间的束流匹配, 需要在二者中间增加一段束流光学系统实现束流匹配功能. 该匹配段需要满足以下要求.

- A) 实现束流的横向匹配; B) 尽量缩短匹配段的长度, 以使束流纵向相宽在 SFRFQ 纵向相位接受度之内; C) 在匹配段的漂移空间中安装法拉第杯用于测量束流强度.

在该匹配段中采用三单元四极透镜对束流进行聚焦, 匹配段长 944mm, SFRFQ 腔入口处的束流横向发射度及相图可以满足其对注入的要求. 用 Trace3D 程序计算的束流包络如图 6 所示.

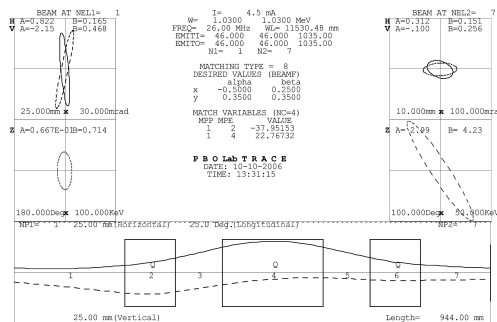


图 6 匹配段束流包络图

4 结论

分离作用 RFQ 加速系统的研究进展顺利. 打火试验表明, 所设计的 SFRFQ 结构可以可靠地加载 70kV 的极间电压. 在打火实验腔功率实验的基础上, 对 SFRFQ 结构的电极和膜片进行了进一步优化, 完成了

SFRFQ 加速腔的物理设计和机械设计, 并可在 2007 年底完成机械加工和安装. 为了准备载束实验, 对 1MeV ISR RFQ 进行了升级改造, 更换了新的 ECR 离子源和低能传输段, 试验表明 1MeV ISR RFQ 已经可以提供 2mA 的氧离子用于束流实验. 同时, 为了实现 ISR RFQ 和 SFRFQ 两个加速腔之间的束流匹配, 一个组三单元磁四极透镜正在加工当中也已加工完成.

参考文献(References)

- 1 CHEN Jia-Er et al. Progress in Natural Science, 2002, **12**(1): 23 (in Chinese)
(陈佳洱等. 自然科学进展, 2002, **12**(1): 23)
- 2 LU Y R et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A515**(3): 394—401
- 3 ZHANG Meng et al. Chinese Physics C (HEP & NP), 2008, **32**(Supp. I): 220 (in Chinese)
(张萌等. 中国物理C, 2008, **32**(增刊 I): 220)
- 4 ZHANG Meng, LU Yuan-Rong, PENG Shi-Xiang et al. Chinese Physics C (HEP & NP), 2008, **32**(Supp. I): 262(in Chinese)
(张萌, 陆元荣, 彭士香等. 中国物理C, 2008, **32**(增刊 I): 262)
- 5 YAN Xue-Qing et al. Nucl. Instrum. Methods, 2005, **A539**(3): 606—612
- 6 WANG Zhi. Acta Physica Sinica, 2006, **55**(11): 5575—5578 (in Chinese)
(王智等. 物理学报, 2006, **55**(11): 5575—5578)
- 7 SONG Xiang-Xiang et al. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, **42**(3): 339—342 (in Chinese)
(宋翔翔等. 北京大学学报(自然科学版), 2006, **42**(3): 339—342)
- 8 WANG Zhi et al. Nucl. Instrum. Methods, 2006, **A572**(2): 596—600

R&D Status of SFRFQ Accelerating System^{*}

CHEN Jia-Er GUO Zhi-Yu¹⁾ LU Yuan-Rong GAO Shu-Li ZHU Kun WANG Zhi
YAN Xue-Qing PENG Shi-Xiang ZHAO Jie GUO Ju-Fang LI Wei-Guo
YU Mao-Lin YUAN Zhong-Xi FANG Jia-Xun

(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract A new linear accelerating structure SFRFQ was proposed to transfer the RFQ inter-vane voltage to the inter-longitudinal accelerating gap voltage so as to improve the acceleration efficiency. A SFRFQ prototype is being constructed to explore its feasibilities, which will be installed behind the 1MeV ISR RFQ and accelerates the O⁺ beam from 1MeV to 1.6MeV. A high power SFRFQ model cavity was designed and tested, which has proved that an accelerating voltage higher than 70kV could be applied. A magnetic triplet matching section was designed to realize the beam matching between 1MeV ISR RFQ and SFRFQ. The upgrading of 1MeV ISR RFQ has been carried out smoothly, and its output beam current has reached 2mA.

Key words SFRFQ, ISR RFQ, sparking, matching

Received 7 January 2008

* Supported by NSFC (10455001, 10605003)

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