

高压击穿现象的实验研究和对 RFQ 冷却 聚束器 RFQ1L 的模拟*

黄文学^{1,1)} 王^{1,2} 朱志超^{1,2} 田玉林^{1,2} 徐珊珊¹ 孙志宇¹ 肖国青¹ 詹文龙¹

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 RFQ 冷却聚束器 RFQ1L 是正在研制的超重核研究谱仪的一个关键部分. 为了感性认识气体的高压击穿现象, 对电极间能够承受的电压进行了实验测试. 另外, 根据现有已知条件, 重新详细模拟了离子在 RFQ1L 中的冷却和存储情况, 为 RFQ1L 实际工作点的选择提供了很好的理论依据.

关键词 RFQ 冷却聚束器 超重 高压击穿 模拟

1 引言

现阶段, 超重核, 特别是超重元素的合成面临以下 3 个方面的困难^[1], 即: 合成截面极小、合成机制匮乏、鉴别手段不全面. 目前所采用的 α 衰变关联测量技术, 只适合于寿命在 0.1s 到分钟且具有 α 放射性核的鉴别. 而对于超重核稳定岛上的核素, 其寿命可能更长也未必一定具有 α 放射性. 因此, 寻找新的分离鉴别技术路线势在必行.

为了能够解决鉴别手段的困难, 我们提出了一个新的方案——建设一台新的超重核研究谱仪. 籍此, 我们希望能够对合成的超重核进行电荷数 Z 和质量数 A 的直接指定, 消除国际上目前通用的 α 衰变关联测量技术带来的不确定性. 为了能够让分析磁铁和激光直接指定 Z 和 A , 反应产物必须被高效率地分离和冷却, 其中初步分离通过充气反冲质量分离器完成, 而冷却通过 RFQ (射频四极透镜) 冷却聚束器 RFQ1L 实现. RFQ1L 的目的就是高效率地收集和冷却经充气反冲质量分离器分离后的次级束流, 使其具有非常小的发射度和能量分散, 并把冷却后的束流传输至后续设备进行进一步的分离和鉴别. 因此, RFQ1L 成为超重核研究谱仪的一个关键设备. RFQ1L 的原理、特征和难点请参见文献[2—4].

由于经充气反冲质量分离器分离和降能片降能

后的次级束流的动能和能量分散非常大, 因此 RFQ1L 不得不充满 100Pa 量级的氦气. 大量实验表明: 气体在此范围内非常容易击穿. 气体的高压击穿问题成为我们必须考虑的一个重要因素. 为了感性认识气体的高压击穿现象以及深入理解其对 RFQ1L 工作点选择的影响, 我们对其进行了实际测量.

2 高压击穿实验及结果

图 1 的内插图显示了实验所用的陶瓷加速管. 作为加速极的 3 个不锈钢园环的厚度和内外径分别为 0.5, 180 和 200mm. 陶瓷加速管被置于一个大真空室内, 其真空由一个 81/s 的机械泵提供. 当真空室被抽空至其极限真空度 (约为 0.4Pa) 后, 纯度为 98% 的氦气被充入其中. 调节真空室上针阀的开关程度和氦气流量大小, 我们可以对真空室的平衡气压进行控制.

在实验中陶瓷加速管的最下面两个加速极被连接在一起, 由高压电源 (型号为 EG&G ORTEC 710) 提供的电压被施加在中间极和另外一个加速极之间. 两加速极之间的最近距离为 17.8mm, 这与 RFQ1L 中电极间的距离基本相当. 当电流超过 20 μ A 时, 高压电源将处于自动保护状态, 因此认为此时电源的输出电压即为电极之间的击穿电压. 在实验过程中, 每个点都测量 3 次以上. 我们发现: 当电压增加速度比较缓慢

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJCX2-SW-N16, KJCX2-SW-N17)资助

1) E-mail: huangwx@impcas.ac.cn

的时候, 所测得的击穿电压的误差位于 $\pm 10V$ 以内。

图1显示了实验测量的击穿电压随真空室内平衡气压的变化曲线, 即帕邢曲线, 两条曲线分别对应于实验中两种不同的保持真空室内气压平衡的方法. 经仔细分析, 我们认为: 图中左边的部分为空气和氦气混合气体的击穿曲线. 这主要来源于客观存在的实验用真空室的漏气, 真空室内始终存在一定数量的空气. 当平衡气压很低时, 氦气的流量很小, 真空室内充满的是空气和氦气的混合气体. 随着平衡气压的升高, 氦气在真空室内的比重迅速增加, 因此图1中右边的部分应该为比较纯的氦气的击穿曲线. 从图1可以看出, 当氦气气压约为150Pa时, 氦气的击穿电压达到极小值, 约为450V. 虽然此值同文献[5,6]略有差别, 但是其变化趋势是完全一致的. 一个特定系统真实的击穿电压与诸如电极的材料、形状和气体的种类、纯度等诸多条件密切相关.

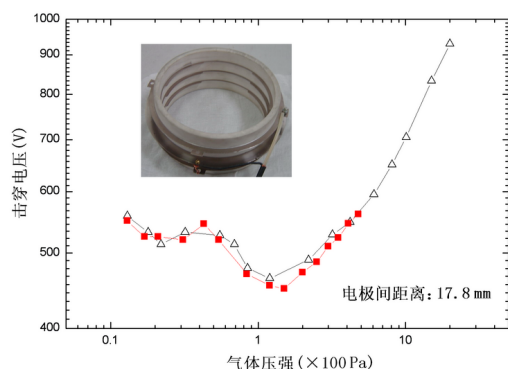


图1 实验测量的击穿电压随气体压强的变化曲线. 两条曲线分别对应于实验中两种不同的保持真空室内气压平衡的方法. 每个实验点的击穿电压误差小于符号的大小.

3 模拟

从图1可见, 在RFQ1L预定的工作区域, 氦气的击穿电压均处于帕邢曲线的极小值附近, 因此RFQ1L的各个电极允许施加的电压将受到很大的限制, 这给RFQ1L工作点的选择提出了新的挑战. 在这种情况下, 我们利用SIMION程序^[7]对RFQ1L进行了全新的模拟, 尽可能考虑到正常工作时的各个参数, 为RFQ1L工作点的选择提供依据.

RFQ1L的结构如文献[3,4]中所述. 我们对离子在RFQ1L中的冷却和聚束情况分开进行模拟, 主要由于以下两个原因: (1) RFQ1L本身可以工作在两种模式: 一为连续束模式, 即离子被收集和冷却后直接传输至后续设备进行进一步处理; 二为脉冲束模式, 即在离子被收集和冷却后, 还被存储起来, 经过一段时间后

再传输至后续设备; (2) 对于RFQ1L的结构, 我们只能采用三维建模, 模型占用的内存非常大, 因此受计算机硬件的限制也不得不如此.

为了优化电极之间的电压差, 在保证提供一定的轴向电场(冷却段约为 $0.4V/cm$)的情况下, 我们将施加到电极的电压值进行一定程度的平移. 为方便起见, 我们称之为平移电压. 所有模拟均基于以下3个条件: (1) 假设进入RFQ1L的离子具有的质量数为238, 电荷态为 $1+$; (2) 根据以上实验测量的击穿电压极小值以及RFQ1L特征半径60mm, 设定Mathieu方程的 q 参数为0.3, 射频频率为87kHz; (3) 假设整个RFQ1L工作于常温下. 需要说明的是, 在所有的模拟中, 并没有考虑由于氦气中的不纯物导致的离子中性化因素.

模拟结果见图2—6. 图2显示了在平移电压为 $-100V$ 时, 不同初始动能的离子在不同氦气气压下被RFQ1L冷却的情况. 从图2可以看出, 随着氦气气压的增加, 传输效率逐渐降低, 而出射束流斑点逐渐增大.

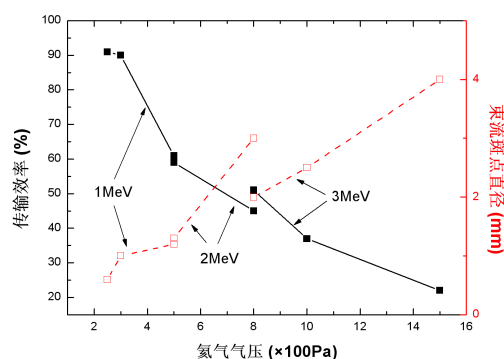


图2 模拟得到的在不同初始动能和氦气气压下离子经RFQ1L冷却的传输效率(■)和出射束流斑点直径(○). 1MeV, 2MeV和3MeV分别为进入RFQ1L的离子的初始动能.

图3显示了初始动能为3MeV的离子在不同氦气气压和不同平移电压(但保持轴向电场不变)的条件下被RFQ1L冷却的情况. 从图3可以看出, 随平移电压的变化, 传输效率和出射束流斑点大小的变化非常明显, 当平移电压在 $-100V \sim -200V$ 时, 传输效率和出射束流斑点达到最佳, 这主要得益于降低了各个电极之间的电压差, 减小了对理想交变电场形成的电势面的偏离.

图4显示了离子经RFQ1L聚束段存储50ms后出射的传输效率随不同氦气气压和平移电压的变化. 图5显示了对应的出射束流横向发射度. 从图4和图5可以看出, 当氦气气压较低时, 出射束流的性能很好, 但

是随着氦气的增加, 性能迅速变差. 令人高兴的是, 当平移电压约为 -150V 时, 虽然传输效率降低, 出射束流横向发射度增加, 但是其变化的速度相对来说要缓得多.

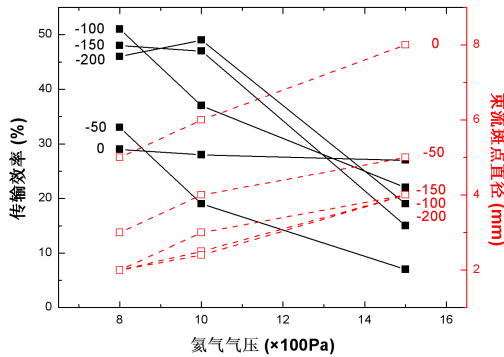


图 3 模拟得到的初始动能为 3MeV 的离子在不同氦气气压和平移电压条件下经 RFQ1L 冷却的传输效率 (■) 和出射束流斑点直径 (□) 图内的数值为对应折线的平移电压(单位为 V).

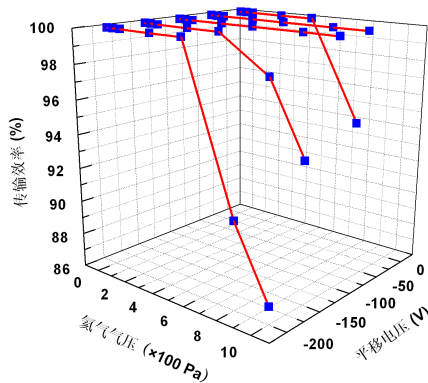


图 4 模拟得到的在不同氦气气压和平移电压条件下离子经 RFQ1L 聚束段存储 50ms 后出射的传输效率

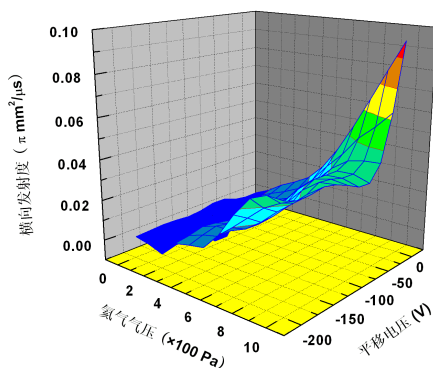


图 5 模拟得到的在不同氦气气压和平移电压条件下离子经 RFQ1L 聚束段存储 50ms 后出射束流的横向发射度

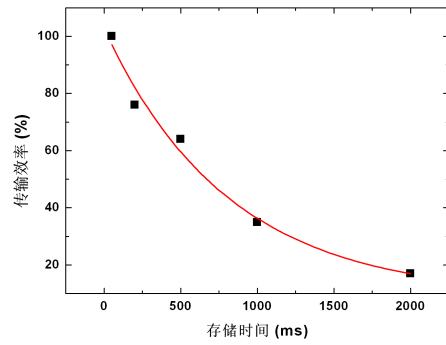


图 6 模拟得到的在氦气气压 1000Pa 和平移电压 -50V 的条件下离子经 RFQ1L 聚束段存储不同时间后被释放的传输效率

离子在 RFQ 冷却聚束器中的行为由以下 3 个因素共同作用而决定. 这 3 种因素分别为: 交变电场对离子的约束作用、处于无规则热运动的氦原子对离子的随机碰撞和轴向电场对离子的导引作用. 对于一个稳定工作的系统, 交变电场保持不变, 对离子的约束能力也保持不变. 通过改变轴向电场的形状, 我们可以实现对离子的存储. 从本质上讲, 离子的存储只不过是让离子停留在一定区域内进行更长时间的冷却, 因此当氦气气压较低时, 氦原子对离子的碰撞较弱, 离子可以被长时间存储于 Paul 离子阱中. 随着氦气气压的增加, 离子受到的碰撞越来越强, 如果碰撞足够强的话, 离子就会被碰撞出 Paul 离子阱, 造成离子的损失. 氦气气压越高, 碰撞越强烈; 存储时间越长, 离子被碰撞出 Paul 离子阱的可能性就越大. 因此, 在高氦气气压条件下, 离子的长时间存储是不可能的. 图 6 显示了在氦气气压 1000Pa 和平移电压 -50V 的条件下离子经 RFQ1L 聚束段存储不同时间后被释放的传输效率. 当存储时间从 50ms 增加到 2s 后, 传输效率从 100% 降低到了 17% .

4 小结

由于 RFQ 冷却聚束器 RFQ1L 内必须充满 100Pa 量级的氦气作为缓冲气体, 而气体在这一区域最容易被击穿, 因此为了感性认识氦气的高压击穿现象, 我们对电极间能够承受的电压进行了实验测试. 测试结果与文献相比, 虽然击穿电压的绝对值稍有不同, 但是其变化趋势是一致的.

根据以上高压击穿实验结果和其他已知相关知识, 我们重新详细模拟了在不同的初始动能、不同的氦气气压和不同的平移电压(保持轴向电场不变)条件下离子在 RFQ1L 中冷却和聚束的情况. 大量而费时的计算表明: 在较低的氦气气压条件下, 离子可以

被很好地冷却和存储;但是随着氦气气压的增加,离子被冷却和存储的效果明显变差.当平移电压约为

-150V时,离子被冷却和存储的效果最好.这为我们选择RFQ1L的实际工作点提供了较好的理论依据.

参考文献(References)

- 1 XU Hu-Shan, ZHOU Xiao-Hong, XIAO Guo-Qing et al. Nucl. Phys. Rev., 2003, **20**: 76—90 (in Chinese)
(徐珊珊, 周小红, 肖国青等. 原子核物理评论, 2003, **20**: 76—90)
- 2 HUANG Wen-Xue, WANG Yue, XU Hu-Shan et al. Nucl. Phys. Rev., 2005, **22**: 254—260 (in Chinese)
(黄文学, 王玥, 徐珊珊等. 原子核物理评论, 2005, **22**: 254—260)
- 3 HUANG Wen-Xue, WANG Yue, XU Hu-Shan et al. HEP & NP, 2004, **28**(Suppl.): 90—92 (in Chinese)
(黄文学, 王玥, 徐珊珊等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(增刊): 90—92)
- 4 HUANG Wen-Xue, WANG Yue, XU Hu-Shan et al. Nucl. Phys. Rev., 2005, **22**: 81—83 (in Chinese)
(黄文学, 王玥, 徐珊珊等. 原子核物理评论, 2005, **22**: 81—83)
- 5 Raizer Y P. Gas Discharge Physics. Berlin: Springer-Verlag, 1991
- 6 XU Xue-Ji, ZHU Ding-Chang. Gas Discharge Physics. Shanghai: Fudan University Publisher, 1996 (in Chinese)
(徐学基, 诸定昌. 气体放电物理. 上海: 复旦大学出版社, 1996)
- 7 Dahl D A, SIMION 3D v7, Ion source Software, Idaho National Engineering Laboratory, 2000

Experimental Study of the High-Voltage Breakdown and Simulations for the RFQ Cooler and Buncher RFQ1L*

HUANG Wen-Xue^{1;1)} WANG Yue^{1;2} ZHU Zhi-Chao^{1;2} TIAN Yu-Lin^{1;2}
XU Hu-Shan¹ SUN Zhi-Yu¹ XIAO Guo-Qing¹ ZHAN Wen-Long¹

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The RFQ cooler and buncher RFQ1L is one of the key parts of the being-built super-heavy nuclide research spectrometer. In order to understand the high-voltage breakdown phenomenon, the voltages between electrodes have been measured. In addition, more extensive simulations have been performed for better understanding and optimizing the RFQ1L work points.

Key words RFQ cooler and buncher, super heavy, high-voltage breakdown, simulation

* Supported by Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-N16, KJCX2-SW-N17)

1) E-mail: huangwx@impcas.ac.cn