

文章编号: 1007-4627(2006)04-0383-04

超重核研究谱仪的 RFQ 冷却聚束器 RFQ1L*

黄文学¹, 王 玥^{1,2}, 朱志超^{1,2}, 田玉林^{1,2},

徐瑚珊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, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 介绍了超重核研究谱仪中 RFQ 冷却聚束器 RFQ1L 的结构和运用 SIMION 程序对离子的冷却、聚束、引出和撇气过程的模拟情况。模拟显示: 通过仔细选择工作点就完全可以 把经过充气反冲质量分离器分离后的低品质束流转化为斑点小、发射度小和能量单一的高品质束流, 为紧接其后的磁铁和激光高效率分析提供条件。

关键词: 超重核; 射频四极透镜; 冷却; 聚束

中图分类号: O571.6; TL8 文献标识码: A

1 引言

超重核是指比²⁰⁸Pb 重的下一个双幻核附近的“超重核稳定岛”上的核素。虽然各种理论分析和预言的下一个双幻核的位置和寿命都各不相同, 但是均认为超重核是存在的。超重元素的合成和对其性质的研究, 是对现有原子核理论的重大检验。由于研究难度巨大, 对超重核研究的每一个成功都伴随着原子核理论和实验技术的突破, 因此, 一旦合成长寿的超重元素, 对能源、核物理、天体物理、化学以及武器研究, 都将产生极为重大的影响。目

前, 国际上只有德国、俄罗斯和日本等少数几个国家在向超重元素冲击。

目前超重核合成研究主要面临三个方面的问题^[1]: 第一, 就合成截面而言, 合成截面极小。人们正在通过改造加速器及其相关设备来提高束流加速的各个环节的效率, 以期合成截面更小的核素; 第二, 就合成机制来说, 无论是“冷融合”还是“热融合”, 现有能够使用的弹靶组合合成的蒸发余核的质子数可以达到稳定岛, 但中子数还缺近 10 个。不寻找新的机制或方法已找不到合适的弹靶组合, 寻找新的反应机制正在成为研究的热点; 第三, 就鉴

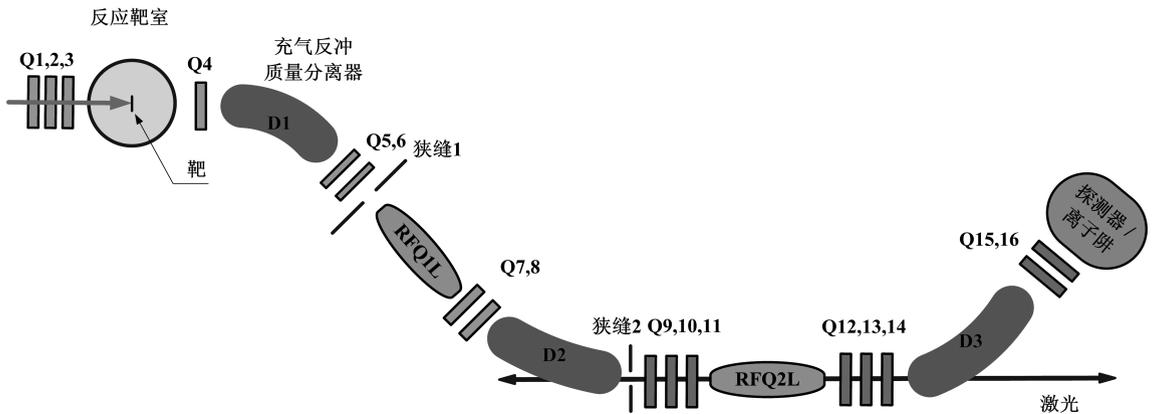


图 1 超重核研究谱仪示意图

* 收稿日期: 2005-06-19

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性资助项目(KJXC2-SW-No16, KJXC2-SW-No17)

作者简介: 黄文学(1969-), 男(汉族), 重庆忠县人, 副研究员, 从事原子核物理研究; E-mail: huangwx@impcas.ac.cn

别手段来说,目前所采用的 α 衰变关联测量技术,只适合于寿命在 0.1 s 到分钟且具有 α 放射性核的鉴别。而对于稳定岛上的核素,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。

正是基于上述原因,我们在跟踪国际上研究超重核的最新方法的同时,还就新的合成机制和鉴别方法提出独特的方案并开始进行研究。建设中的超重核研究谱仪就是针对鉴别方法的困难而提出的。图 1 显示了此超重核研究谱仪的结构示意图。通过超重核研究谱仪,我们希望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,其中通过充气反冲质量分离器 D1 完成初步分离,而冷却则通过 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 D1 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。

为了更好地耦合经 D1 分离后的次级束流,相对于国际上其它同类设备而言,RFQ1L 要设计得非常大。RFQ1L 至少具有特征半径最大、允许入射的离子能量最高和缓冲气体气压最高的特点^[2-4],通过这种方法,我们希望把 RIA^[5]和 SHIPTRAP^[6]具有的气体室和冷却聚束器的两级或多级结构转化为一二级结构,从而提高整个系统的总效率。当然,正是由于以上的特点,我们不得不面对更多的难题,比如高压击穿、氦气纯度、机械加工和精确装配等困难^[2]。

2 RFQ 冷却聚束器的结构和详细研究情况

图 2 给出了典型的 RFQ 冷却聚束器结构示意图,也是 RFQ1L 采用的结构。它主要由 5 部分组成:(1)入射离子的减速;(2)RFQ 约束;(3)缓冲气体冷却;(4)Paul 离子阱聚束;(5)冷束流提取。文献^[2-4]详细地介绍了各部分的工作原理和所起作用,不再赘述。

对整个系统的模拟、设计和优化所使用的程序是 SIMION^[7]。模拟中假设了进入 RFQ 冷却聚

束器的离子为 $^{238}\text{U}^{1+}$,RFQ 冷却聚束器的特征半径为 60 mm,总长度约为 1.6 m。离子进入 RFQ1L 的时间呈随机分布。根据工作于 DUBNA 的充气反冲质量分离器的束流斑点情况,我们选择进入 RFQ1L 的束流斑点为 80 mm \times 40 mm。根据物理要求,我们模拟了离子随入射离子的能量、作为缓冲气体的氦气气压、轴向电场和射频频率的变化在 RFQ1L 中的传输情况。

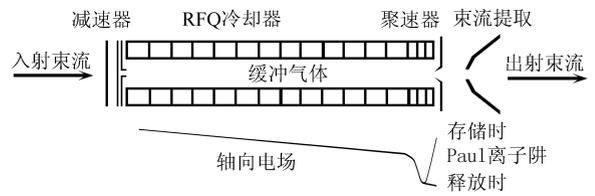


图 2 RFQ 冷却聚束器结构示意图

下端显示的是其轴向电场的结构。

图 3 显示了一种典型的束流冷却情况。大量的模拟表明:在合适的参数条件下,RFQ1L 可以把离子高效率地收集和冷却。当离子能量较高时,离子的运动速度很快,而射频的变化相对较慢,因此,交变的射频对离子的运动影响甚微,离子的运动轨迹基本上呈直线;在作为缓冲气体的氦气的降能作用下,离子速度很快降低,射频对离子的聚焦作用越来越明显,最终被约束于 RFQ1L 的中心。

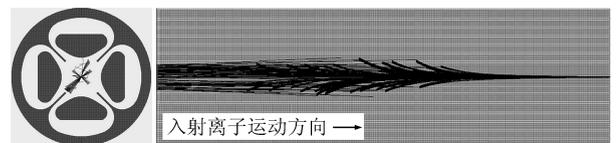


图 3 离子在 RFQ1L 中冷却情况

当离子被冷却传输至 RFQ1L 末端时,离子的动能与其热运动动能基本相当,束流发散非常小,束流可以被直接传输到后续设备进行进一步的操作,这就是所谓的连续束工作模式。另一种工作模式叫做脉冲束工作模式,即把离子先存储在 RFQ1L 中,经过一段时间后才被释放出去,以更好地匹配和满足后续设备工作的要求。为了清楚地显示离子的存储过程,图 4 显示了离子在 RFQ1L 末端的运动情况,其中所充氦气的气压为 1 Pa,存储时间为 4 ms。离子在纵向被轴向电场约束的同时还在横向受到射频的约束,因此离子最终被存储起来。因为氦气原子的无规则运动,所以离子受到

氦气碰撞所形成的轨迹也无规则, 显示为具有一定的振幅。当气压升高后, 离子所受的阻力也增大, 离子在三维势阱中的振幅也小得多, 但是高压带来的害处就是使离子从存储点传输出聚束器的时间变长, 脉冲束的长度增加。气压越高, 离子被传输出聚束器的时间越长。

离子引出系统的设计也是一个需要仔细考虑的问题, 文献[8]中已经详细论述。经过详细计算和比较后, 我们选定了静电方法作为 RFQ1L 的引出模式, 以满足高压时可以提供一定的电场梯度来缩短离子引出的时间和脉冲束流的长度的要求。通

过流体力学方法, 我们还计算了 RFQ1L 静电引出系统的氦气流量和系统可能获得的真空度。计算表明: 即使在 1 000 Pa 的高工作气压下, 使用 2 000 L/s 抽速的真空泵就可以使出口端的气压小于 1 Pa。工作气压越小, 出口端可以获得的真空度越好。并且, 在系统工作于较低的氦气气压时, 我们可以忽略氦气的回收和再利用, 而在较高的工作气压时, 由于氦气消耗速度的迅速增加, 对氦气的回收和再利用非常重要。因此, 在 RFQ1L 的建造和工作时, 设计一个氦气回收装置是必要的。

RFQ1L 的工作气压为 100 Pa 量级, 而经过静

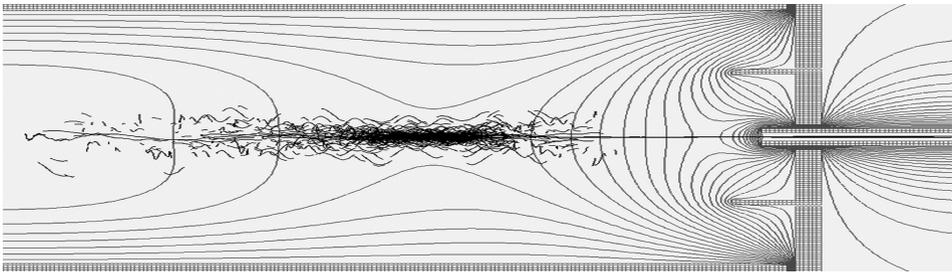


图 4 离子在 RFQ1L 末端的存储情况

氦气气压为 1 Pa, 存储时间 4 ms。

电引出系统后的气压也只能达到 1 Pa 量级, 为了能够达到后续设备工作所需的真空度(约 10^{-3} Pa 量级), 我们必须使用撇气装置把氦气丢弃, 形成差分抽气系统。撇气装置的大小和长度必须进行优化。图 5 显示了离子在优化后的撇气装置中的运动情况。经过优化后, 出射束流的斑点和发射度可以达到很小, 完全满足紧接的二极分析磁铁 D2 高效率、高精度分析的要求。

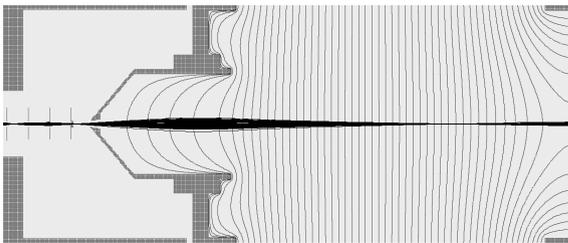


图 5 离子在撇气装置部分的运动情况

总之, 利用 SIMION 程序我们详细模拟了离子在 RFQ1L 中冷却、聚束、引出和撇气过程。通过仔细选择工作点, 我们完全可以把经过充气反冲质量分离器 D1 分离后的低品质束流转化为斑点小、发

射度小、能量单一的高品质束流, 为紧接其后的磁铁和激光的高效率分析提供条件。

3 研究进展

RFQ1L 的机械设计早已完成, 图 6 显示了设计装配图。在设计过程中, 我们根据物理要求, 考

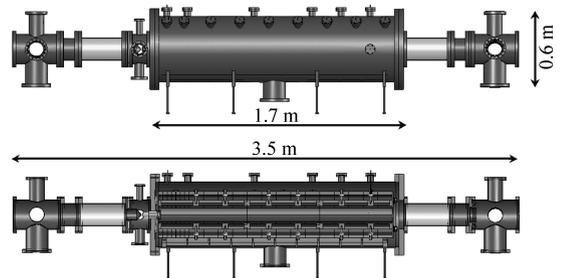


图 6 RFQ1L 设计装配图

虑了部件之间的固定、绝缘、匹配、加工工艺、装配流程和工作流程等因素。由于种种原因, 设备的机械加工进度有一定程度的推迟。不久以后将进入安装调试阶段。设备所需的电子学和控制系統也正在研制中。

参 考 文 献:

- [1] 徐瑚珊, 周小红, 肖国青等. 原子核物理评论, 2003, **20**: 76.
- [2] 黄文学, 王 玥, 徐瑚珊等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 90.
- [3] 黄文学, 王 玥, 徐瑚珊等. 原子核物理评论, 2005, **22**: 254.
- [4] 黄文学, 王 玥, 徐瑚珊等. 原子核物理评论, 2005, **22**: 81.
- [5] Sherrill B M. Nucl Instr and Meth, 2003, **B204**: 765.
- [6] Sikler G, Ackermann D, Attallah F, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2003, **B204**: 482.
- [7] Dahl D A. SIMION 3D v7. Ion Source Software. Idaho National Engineering Laboratory, 2000.
- [8] 黄文学, 王 玥, 徐瑚珊等. 高能物理与核物理, 2005, **29**: 802.

RFQ Cooler and Buncher RFQ1L in Super-heavy Nuclide Research Spectrometer^{*}

HUANG Wen-xue¹, 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 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The structure and the simulation results about the cooling, bunching, extraction and skimming of the RFQ cooler and buncher RFQ1L, which is an important part of the being-built super-heavy nuclide research spectrometer, have been introduced. It shows that, by careful choice of its working point, we can obtain an ion beam with small beam spot, small emittance and mono energy, which can satisfy the requirements of the successive analyses by dipole and laser with high efficiencies.

Key words: super-heavy nuclide; radiofrequency quadrupole; cooling; bunching