

文章编号: 1007-4627(2008)01-0044-04

# RFQ1L 系统压升率的理论与实验研究\*

田玉林<sup>1,2</sup>, 黄文学<sup>1</sup>, 王 玥<sup>1,2</sup>, 朱志超<sup>1,2</sup>, 涂小林<sup>1,2</sup>,  
李建新<sup>3</sup>, 杨晓天<sup>1</sup>, 徐珊珊<sup>1</sup>, 肖国青<sup>1</sup>, 詹文龙<sup>1</sup>

(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;

3 兰州真空设备有限责任公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 简单阐述了 RFQ 冷却聚束器对缓冲气体的要求, 从理论和实验两方面详细研究了 RFQ1L 系统的压升率。研究表明, RFQ1L 系统压升率的主要来源是真空室内材料表面的出气, 整个系统的压升率实测为  $(0.04 \pm 0.02)$  Pa/h。

**关键词:** 超重核; 冷却聚束器; 缓冲气体; 压升率

**中图分类号:** O571.6      **文献标识码:** A

## 1 引言

在实验研究远离  $\beta$  稳定线的核结构与核衰变、超重核及超重元素的过程中, 迫切地需要低能量、高品质的放射性束流。为了克服核反应产生的放射性束流的能量分散大、发射度大和束流斑点大等缺点, 必须使用一定的实验技术来减小束流的能量和动量分散。由于 RFQ (射频四极透镜) 冷却聚束器可以在非常短的时间内一次性地冷却所有核素形成的束流, 因此它成为众多实验技术中的首选。国际上针对放射性束流的冷却基本上都使用了此项技术。

对超重核的研究是国际上研究的一个热点和重点。为了解决超重核鉴别的困难, 我们正在建造一台新的超重核研究谱仪。通过这台超重核研究谱仪, 可以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  $\alpha$  衰变关联测量技术带来的不确定性。其中的一个关键技术就是要减小经过充气反冲质量分离器分离后束流的动量和能量分散, 以便于后续激光的电离。RFQ 冷却聚束器 RFQ1L 就是完成这项任务的一台装置。当然, 经过 RFQ1L 冷却后的束流还将不仅用于精细的粒子谱学研究, 而且为精确质量测量的 Penning 离子阱 LPT 提供合适束流。

图 1 给出了正在研制中的 RFQ1L 冷却聚束器的结构示意图。这台装置主要由入射离子的减速、约束、缓冲气体冷却、Paul 阱聚束和冷束流的提取 5 部分组成。文献[1—6]已经详细地介绍了各部分的工作原理和对 RFQ1L 的各方面研究情况, 此处不再赘述。

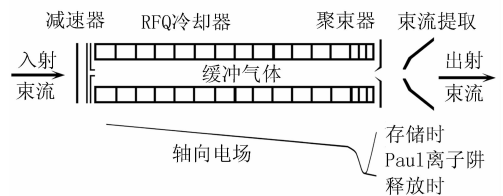


图 1 RFQ 冷却聚束器的结构示意图

为了与前级充气反冲同位素分离器提供的束流相匹配, RFQ1L 的缓冲气体的压强被设计为 100—1 000 Pa。为了达到既定的物理目标, 缓冲气体的选择非常重要。若缓冲气体分子的电离能偏低, 则会因为离子与分子相互作用, 缓冲气体分子被电离, 产生很多自由电子, 从而使被冷却的离子因获得电子中性化而损失, 降低 RFQ 冷却聚束器的传输效率。因此, 我们主要从下面两方面考虑:

(1) 选择不易被电离的气体。相对而言, 惰性

\* 收稿日期: 2007-07-03; 修改日期: 2007-07-20

\* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KJXC2-SW-N16, KJXC2-SW-N17); 国家自然科学基金资助项目 (10675147, 10627504)

作者简介: 田玉林(1982—), 男(土家族), 湖北长阳人, 硕士研究生, 从事原子核物理研究; E-mail: yltianok@impcas.ac.cn

气体比其它气体的第一电离能高很多, 惰性气体更不容易被电离, 因此一般选择惰性气体作为缓冲气体。氦原子的第一电离能最高, 达到 24.6 eV, 因此通常选择氦气。若需要更高的阻止本领, 也可以选择氙气和氩气。

(2) 保证缓冲气体的纯度。若纯度偏低, 即使使用高电离能的缓冲气体, 被冷却的离子也会由于低电离能的杂质气体电离而中性化。因此一方面必须使用高纯度的缓冲气体(目前可以从公司定购到纯度达到 99.999 9% 的高纯氦气), 另一方面要尽量减少其他杂质气体的混入, 即减小真空系统的漏率和系统内部材料表面的出气速率。本文就针对这个问题作一专门论述。

## 2 RFQIL 的压升率

压升率是指整个真空室体不抽真空时单位时间内压强升高的差值, 可以定义为

$$M = \frac{\Delta p}{\Delta t}, \quad (1)$$

其中,  $M$  为压升率,  $\Delta p$  为  $\Delta t$  时间内压强的增加值。该物理量是反映真空系统性能的重要指标, 压升率过高, 意味着有大量的杂质气体进入系统。

### 2.1 理论估算

影响真空系统压升率的因素大致可以分为两类, 一类是外界气体由于各种原因而进入真空系统, 另一类是真空系统内部各种结构材料表面的出气。压升率可以表示为

$$M = M_0 + \sum_i M_i, \quad (2)$$

$M_0$  表示外界气体的影响,  $M_i$  代表真空系统内部不同材料表面出气造成压升率的增加。

#### 2.1.1 外界对 RFQIL 压升率的影响

外界气体进入真空系统主要经过 3 种方式, 包括真空室体壁、焊缝和法兰之间的密封圈。其中, RFQIL 系统使用的真空室体和法兰之间的密封圈均与兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)工程的真空系统中的相同, 考虑到 CSR 的真空度已经达到  $10^{-10}$  Pa, 因此在此可忽略这两项的影响。

描述焊缝漏气的物理量为漏率, 它表示在一定体积下单位时间内外界气体透过单位长度的焊缝进入真空室体引起的气体压强的增加量, 其单位为

(Pa·l)/(s·cm)。焊缝对系统压升率的影响可以表示为

$$M_0 = \frac{Ql}{V}, \quad (3)$$

$Q$  为焊缝的漏率,  $l$  为焊缝的长度,  $V$  为室内真空的体积。对于 RFQIL,  $Q = 1.7 \times 10^{-8}$  / (Pa·l)/(s·cm),  $l = 1750$  cm,  $V \approx 196$  l。因此, RFQIL 的焊缝漏气对系统压升率的影响为

$$M_0 \approx 5.5 \times 10^{-4} / \text{Pa/h}。 \quad (4)$$

#### 2.1.2 真空室内材料表面出气对 RFQIL 压升率的影响

描述材料表面出气特性的物理量是出气速率, 它表示在一定体积下由于材料表面在单位时间内和单位面积上放出气体引起的真空室体内压强的增加量, 单位为 (Pa·l)/(s·cm<sup>2</sup>), 其值的大小与材料的性质、制造工艺和贮存状况等因素有直接关系, 可以看作是温度的函数<sup>[7]</sup>:

$$q = q_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (5)$$

其中,  $q$  为出气速率,  $q_0$  为常数,  $E$  为出气活化能,  $R$  为摩尔气体常数,  $T$  为热力学温度。RFQIL 的环境温度较为稳定, 等式右边的其它量均可视为常数, 因此, 在相当长的时间内, 材料的出气速率也应该是稳定的。

各种不同材料的表面出气导致压升率的升高可以表示为

$$\sum_i M_i = \sum_i \frac{Kq_i A_i}{V}, \quad (6)$$

其中,  $K$  为校正系数, 一般情况下可取  $K \approx 1$ ,  $q_i$  为第  $i$  种材料的出气速率,  $A_i$  为第  $i$  种气体在真空中的暴露面积,  $V$  为室内真空的体积。

图 2 给出了 RFQIL 的设计装配图。其中, 位于真空室体中的内芯是 RFQ 的主体, 离子经过降能片后进入真空室体冷却聚束, 然后由引出系统引出。真空室体内装有不锈钢 V 形槽、楔形电极、双曲电极和陶瓷绝缘套等器件。在整个真空室体内, 不锈钢的表面积  $A_1 \approx 149300$  cm<sup>2</sup>, 陶瓷的表面积  $A_2 \approx 18600$  cm<sup>2</sup>, 除去不锈钢和陶瓷后真空室体的体积  $V \approx 196$  l。文献[7]给出, 在常温下抽真空 20 h 后, 静态测量方法下不锈钢和陶瓷的出气速率参考

值分别取  $3.2 \times 10^{-11} \times 133.3$  和  $8 \times 10^{-8} \times 133.3$  ( $\text{Pa} \cdot \text{l})/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。将以上参数带入到(4)式,得到由于材料表面出气对 RFQ1L 的压升率的影响为

$$\sum_i M_i \approx 3.6 \text{ Pa/h} . \quad (7)$$

对比(4)和(7)式可知,相对于真空室内材料的出气,外界对 RFQ1L 的压升率的影响完全可以忽略不计。因此,RFQ1L 系统压升率的理论估算值为

$$M \approx 3.6 \text{ Pa/h} . \quad (8)$$

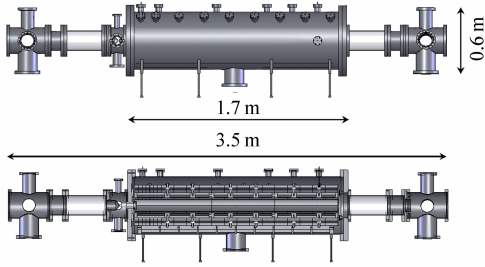


图 2 RFQ1L 设计装配图

### 2.2 实验测量

RFQ1L 的机械安装已经顺利完成。安装结束后,我们用对氮气抽速为 550 l/s 的 Turbo-V 551 型分子泵对系统进行了 87 h 的连续抽真空,其压强达到  $1.7 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。用 INFICON UL1000 型氦检漏仪(与 HIRFL-CSR 的检漏仪相同)检漏,结果达到了该仪器的最高精度,整个系统的漏率小于  $1.0 \times 10^{-10} (\text{Pa} \cdot \text{l/s})$ 。

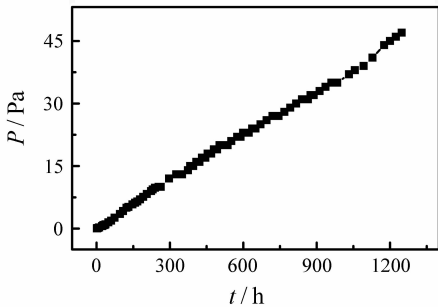


图 3 室内压强随时间的变化曲线

在测量系统压升率的过程中,我们采用定容测量法,即停止抽真空,封闭系统,然后不定时记录室体内部的压强。图 3 显示了真空室内压强随时间的变化曲线,其中实验误差小于图中符号的大小。图 4 显示了相应的压升率随时间的变化曲线。

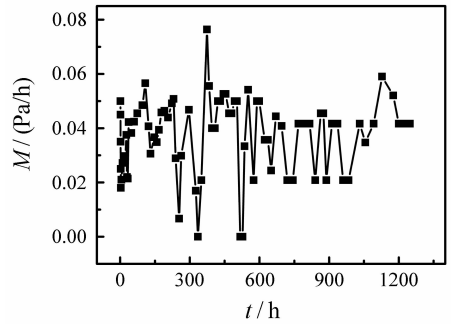


图 4 缓冲气体冷却系统的压升率

### 2.3 分析

首先,分析图 3 和图 4 可以看出:(1) RFQ1L 系统内部的压强随时间线性增加;(2)系统的压升率为  $(0.04 \pm 0.02) \text{ Pa/h}$ ,比较稳定,这与公式(5)的结果是一致的。

其次,分析理论估算值与实验测量结果,我们可以发现:(1)影响 RFQ1L 系统压升率的主要因素是室内材料表面的出气,而外界气体对压升率的影响可以忽略不计;(2)实验测得的压升率远小于理论估算的结果。我们认为这是由于室内材料表面出气速率实际的情况比估算时所取的值小得多而造成的。其主要原因在于 RFQ1L 室内使用的材料均经过了烘烤和除气等特殊工艺的处理。文献[8]曾详细比较了 HIRFL-CSR 系统中不锈钢元件进行真空炉高温除气处理前后材料出气率的变化。经过真空炉高温处理后不锈钢出气率好于  $2 \times 10^{-11} (\text{Pa} \cdot \text{l})/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ ,与文献[7]的结果相差 200 多倍。有关陶瓷的这方面细致研究还没见报道。另一个可能的原因就是,实际抽真空的时间较选取的出气速率参考值的抽真空时间更长一些。

最后,我们可以很粗略地估算杂质气体对 RFQ1L 系统内缓冲气体纯度的影响。假设在 RFQ1L 中充入纯度为 100% 和压强为 100 Pa 的缓冲气体,密封 1 h 后,考虑到实验测得的压升率为  $0.04 \pm 0.02 \text{ Pa/h}$ ,则进入真空系统的杂质气体的百分比为  $(0.04 \pm 0.02)\%$ 。对于实际工作状态下的 RFQ1L 而言,情况比这还要好得多。一方面 RFQ1L 内的气体处于流动状态,另一方面那时的内部结构将更有利于系统内杂质气体的减少。

### 3 结论

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,也是 Penning 离子阱的

前级设备。由于物理要求特殊,对 RFQIL 内缓冲气体有着严格的要求,其中系统的压升率很大程度上决定了整个系统内气体的纯度,直接影响了束流的传输效率。对 RFQIL 系统的理论和实验研究表明:真空室体内部材料表面出气是影响 RFQIL 的压升率的主要因素,经过烘烤和除气等特殊工艺处理后的材料出气率也会大大降低。实验测得整个系统的压升率为  $(0.04 \pm 0.02)$  Pa/h,达到了系统的设计要求,可以保证系统的正常运行。

## 参考文献 (References):

- [1] Huang W X, Wang Y, Xu H S, *et al.* HEP & NP, 2004, **28**: 90 (in Chinese).  
(黄文学,王 玥,徐珊珊等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 90.)
- [2] Huang W X, Wang Y, Xu H S, *et al.* HEP & NP, 2005, **29**: 802 (in Chinese).  
(黄文学,王 玥,徐珊珊等. 高能物理与核物理, 2005, **29**: 802.)
- [3] Huang Wenxue, Wang Yue, Xu Hushan, *et al.* Nuclear Physics Review, 2005, **22**: 81 (in Chinese).  
(黄文学,王 玥,徐珊珊等. 原子核物理评论, 2005, **22**: 81.)
- [4] Huang Wenxue, Wang Yue, Xu Hushan, *et al.* Nuclear Physics Review, 2005, **22**: 254 (in Chinese).  
(黄文学,王 玥,徐珊珊等. 原子核物理评论, 2005, **22**: 254.)
- [5] Huang Wenxue, Wang Yue, Zhu Zhichao, *et al.* Nuclear Physics Review, 2006, **23**: 383 (in Chinese).  
(黄文学,王 玥,朱志超等. 原子核物理评论, 2006, **23**: 383.)
- [6] Huang W X, Wang Y, Zhu Z C, *et al.* HEP & NP, 2006, **30**: 261 (in Chinese).  
(黄文学,王 玥,朱志超等. 高能物理与核物理, 2006, **30**: 261.)
- [7] Da D A. Handbook of Vacuum Design. 3rd ed. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2004, 1 331 (in Chinese).  
(达道安. 真空设计手册. 第 3 版. 北京: 国防工业出版社, 2004, 1 331.)
- [8] Yang X T, Meng J, Zhang J H, *et al.* Vacuum, 2004, **41**: 24 (in Chinese).  
(杨晓天,蒙 峻,张军辉等. 真空, 2004, **41**: 24.)

## Theoretical and Experimental Study on Pressure Rise Rate in RFQIL\*

TIAN Yu-lin<sup>1, 2, 1)</sup>, HUANG Wen-xue<sup>1</sup>, WANG Yue<sup>1, 2</sup>, ZHU Zhi-chao<sup>1, 2</sup>, TU Xiao-lin<sup>1, 2</sup>,  
LI Jian-xin<sup>3</sup>, YANG Xiao-tian<sup>1</sup>, XU Hu-shan<sup>1</sup>, XIAO Guo-qing<sup>1</sup>, ZHAN Wen-long<sup>1</sup>  
(1 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;  
2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3 Lanzhou Vacuum Equipment Co., Ltd, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The requirement of the buffer gas in a RFQ (Radiofrequency Quadrupole) cooler and buncher has been introduced briefly. The pressure rise rate of RFQIL has been studied theoretically and experimentally in detail. It shows that the pressure rise rate of RFQIL is mainly due to the outgassing of the different materials in the vacuum chamber. The experiments indicated that the pressure rise rate of RFQIL was  $(0.04 \pm 0.02)$  Pa/h.

**Key words:** super-heavy nuclide; RFQ cooler and buncher; buffer gas; pressure rise rate

\* Received date: 3 Jul. 2007; Revised date: 20 Jul. 2007

\* Foundation item: Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-No16, KJCX2-SW-No17); National Natural Science Foundation of China (10675147, 10627504)

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