

RFQ 冷却聚束器的离子引出系统*

黄文学^{1;1)} 王 ■^{1,2} 徐珊珊¹ 孙志宇¹ 李占奎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 论述了 RFQ 冷却聚束器的两种离子引出系统——静电引出和小型 RFQ 方法的模拟结果,并通过流体力学方法计算了设计中的静电引出系统的氦气流量和系统可能获得的真空度. 研究表明:在较低氦气气压时,应该选用小型 RFQ 引出方法,以获得更好的束流品质,而在较高氦气气压时,只能选用静电引出方法. 另外,由于设计中的 RFQ 冷却聚束器经常工作于高氦气气压条件下,因此高纯度氦气的回收和再利用是必需的.

关键词 放射性束流 射频四极透镜 离子引出 流量

1 引言

由于 RFQ(射频四极透镜)冷却聚束器可以快速、高效地降低束流的能量和动量分散,从而减小束流的发射度和束斑,并可以产生脉冲化的束流,因此在越来越多的对奇异核的核反应和核结构的精细研究中起着越来越重要的作用^[1-3]. 为了能够满足新设计的超重核谱仪的要求,我们也正在设计一套 RFQ 冷却聚束器. 它的目的就是在短时间内显著提高经充气反冲质量谱仪分离后的反应产物形成的次级放射性束流品质. 束流轰击靶后产生的放射性产物经过充气反冲质量谱仪收集和初步分离,形成的束流的发射度和能量单色性都比较差. 比如,工作于 Dubna 的充气反冲质量谱仪束流斑点的典型值为 120mm × 40mm. 因此综合考虑实验的目的、效率和实现难度等诸多因素,同国际上其他同类设备相比,设计中的 RFQ 冷却聚束器具有 3 个最显著的特征——特征半径大、接收能量高、缓冲气体气压高,从而导致我们不得不克服在其他同类设备上不需要仔细考虑的,或者可以忽略的技术上的难题. 详细情

况请参见文献[4]. 在整个核心部件中,离子引出系统是最为关键和细致的部件之一. 它位于 RFQ 冷却聚束器的末端,经过冷却和存储的离子通过此引出系统引出和传输到后续的加速和分离装置中. 本文就此作一专门论述.

2 离子引出方法的模拟和选择

离子引出系统必须满足两个最基本且最主要的条件:一是能够把存储的离子高效率地引导出 RFQ 冷却聚束器;二是使氦气的流量尽可能小,从而一方面使系统的真空度在较短距离内达到高真空,另一方面减小氦气的使用量. 为了减少离子在 RFQ 冷却聚束器中由于与杂质的电荷中和引起的传输效率的损失,我们必须使用高纯度氦气,而其昂贵的价格使得氦气的使用量成为我们必须重点考虑的问题之一.

我们考虑了静电引导和小型 RFQ^[1,5]两种主要方法. 图 1 是这两种方法的电极结构示意图. 系统的长度和外径主要由 RFQ 冷却聚束器各个分系统之

2004-11-22 收稿

* 中国科学院百人计划项目,科技部重大项目前期研究专项基金(2001CCB01200),中国科学院知识创新工程重要方向项目(CKJXC2-SW-N04, CKJXC2-SW-N07)和国家重点基础研究发展规划项目(G2000077401)资助

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

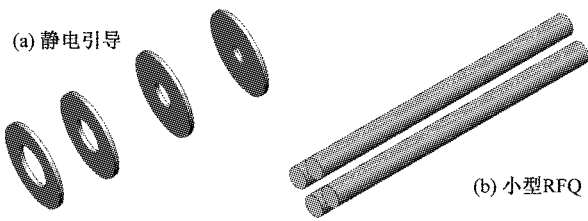


图 1 离子引出系统

间的耦合关系确定.利用 SIMION 程序^[6],我们对两种方法的性能分别进行了模拟.模拟中考虑了各个参数在实验上实现的可能性.引出系统引出的束流品质不但与引出方法,而且与束流进入引出系统前的品质密切相关.离子在 RFQ 冷却聚束器中冷却和存储的时间越长,形成的束流进入引出系统时的品质就越好,从而经过引出系统后的束流品质也就越好.图 2 显示了在其他条件相同,而在引出系统中存在不同气压的缓冲氦气下冷却后的离子经过上述两种不同方法的引出轨迹.为了能够更有效地引出冷却后的离子,我们使离子在进入引出系统前被加速,获得少许能量,以便穿过可能存在的位垒.从图 2 可以清楚地看到,在较低的氦气压强下,两种方法都能以 100% 的效率成功引导离子,把离子传输至后续系统.但是由于小型 RFQ 系统中引入了射频,离子在整个运动过程中都受到它的约束,因此最终引出束流的品质比静电方法更好;相反,在较高的氦气压强下,静电方法可以仍然以 100% 的效率成功引导离子,而小型 RFQ 方法却不行.随着氦气压强的增加,离子在传输过程中与氦原子的碰撞加剧,其能量将耗散于高密度氦气中.对于静电引出系统,离子在整个传输过程中都可以受到加速,因此离子可以在电场的引导下被传输到后续系统,而对于小型 RFQ 引出系统,离子得不到能量的补充,当其动能耗尽后,离子将不得不停滞于 RFQ 中做无规则热运动,

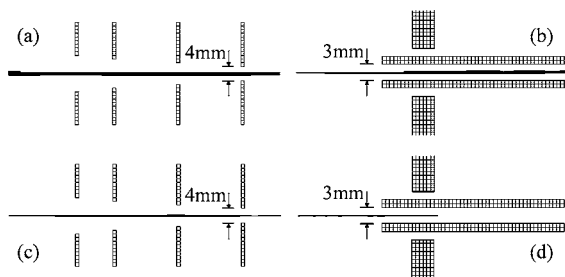


图 2 在不同气压下两种方法对离子引出的结果对比
模拟使用了 SIMION 程序.(a)静电引导,1Pa,
(b)小型 RFQ,1Pa,(c)静电引导,20Pa,
(d)小型 RFQ,20Pa.

从而不能被传输出系统.因此,我们认为:在较低氦气压时,应该选用小型 RFQ 引出方法,以获得更好的束流品质.而在较高氦气压时,只能选用静电引出方法.对于更高密度的氦气,可以增加静电引出系统的电场梯度,从而把冷却后的离子顺利引导出 RFQ 冷却聚束器,并传输到后续系统.在设计 RFQ 冷却聚束器中,我们选择了静电引出方法.

3 氦气流量及真空度计算

3.1 计算方法

为了简单起见,我们考虑了如图 3 所示的系统.此系统可以看作由两种方式组成:在等径毛细管中,气体受摩擦力的作用产生加速,此阶段可以看作一维的绝热近似;而在不同管径的变换过程中,气体的滞止特性并不发生变化,因此可以作等熵过程处理.虽然在不同管径之间将产生一些速度的损失,但是其并不严重,因此我们在此忽略.

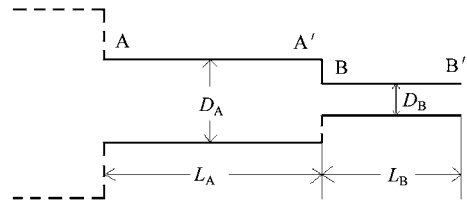


图 3 绝热等熵示意图

假设系统的初始滞止压强和温度分别为 P_0 和 T_0 ,入口处 A, A', B 点和出口处 B' 点的气体压强、温度和以马赫 (Mach) 数表示的流速分别为 P_x, T_x 和 M_x (x 代表 A, A', B 和 B'). AA' 段的长度 L_A , 直径 D_A ; BB' 段的长度 L_B , 直径 D_B .

在整个气体流动过程中,气体的流量恒定,因此

$$\dot{m} = \rho u A = \text{常数}, \quad (1)$$

其中 ρ 为气体密度, u 为速度, A 为管道的截面面积.对于 AA' 间的任何一点,气体的滞止特性虽然发生变化,但是都与入口处的特性相关^[7,8],即

$$\rho u = \sqrt{\frac{\gamma}{R_m}} \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \frac{M_A}{\left(1 + \frac{(\gamma - 1) M_A^2}{2}\right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}}, \quad (2)$$

其中 γ 为绝热指数(对于氦气,此值为 5/3),特殊气体常数 $R_m = 8.3145/m_{\text{mol}}$, m_{mol} 为气体的摩尔质量, M_A 为入口处 A 点气体流动的 Mach 数.对于 A'B 之

间,其滞止特性保持不变,即

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \rho u A = \sqrt{\frac{\gamma}{R_m}} \frac{P'_0}{\sqrt{T'_0}} \frac{M}{\left(1 + \frac{(\gamma-1)M^2}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} \cdot A \\ &= \frac{\pi D_A^2}{4} \rho_{A'} u_{A'} = \frac{\pi D_B^2}{4} \rho_B u_B, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 M 为该处气体流动的 Mach 数, P'_0 和 T'_0 为新的滞止压强和温度.

对于理想气体而言,在 AA' 段气体流过具有恒定截面的毛细管,采用绝热近似,运用能量、动量守恒定律,考虑到管道的摩擦力,并忽略重力的影响,气体的流动满足如下方程:

$$\frac{1}{\gamma} \left(\frac{1}{M_A^2} - \frac{1}{M_A'^2} \right) + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \ln \left(\frac{M_A'^2}{M_A^2} \frac{2 + (\gamma-1)M_A^2}{2 + (\gamma-1)M_A'^2} \right) = - \frac{4L_A \cdot \bar{f}}{D_A}, \quad (4)$$

\bar{f} 项是摩擦损失.对于亚声速层流的情况,

$$\bar{f} = \frac{16}{Re} = \frac{16\mu}{\rho u d},$$

式中 Re 指雷诺数, μ 是气体的黏滞系数.通常情况下,气体在整个流动过程中,温度变化并不很大,其黏滞系数的变化也不明显,因此利用气体滞止温度下的黏滞系数来代替其他所有情况就可以达到计算的精度.

在 A'B 段采用等熵近似,气体的滞止压强和温度保持不变,因此

$$\frac{M_B}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_B^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} = \frac{D_B^2}{D_A^2} \frac{M_A'}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_A'^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}. \quad (5)$$

在 BB' 段,采用如 AA' 段相同的计算过程.采用数值迭代的方法,将得到入口处的以 Mach 数表示的气体流速 M_A . 代入(2)和(1)式,就可以计算出气体的流量.考虑到真空泵的抽气能力,引出系统出口处的压强也就知道了.

3.2 计算结果

图 4 显示了设计中的 RFQ 冷却聚束器离子引出系统的结构示意图.表 1 列出了入口处不同的氦气压强下理论计算的结果,其中出口端的压强是在假设真空泵的抽速为 2000 l/s 的条件下计算得到的.事实上,入口处的氦气压强就是 RFQ 冷却聚束器的工作气压,其值的选择完全依赖于当时需要被冷却的离子种类和能量.图 5 显示了入口处与出口端的压强关系.图中清楚地显示,设计的离子引出系

统可以形成较好的差分系统,在 1000Pa 的工作气压下,使用 2000 l/s 抽速的真空泵就可以使出口端的压强小于 1Pa.工作气压越小,出口端可以获得的真空度越好.氦气的流量也是一个非常重要的设计参数.计算表明,对于 100Pa 的工作气压,持续工作 24h 需要消耗 3.6g 高纯度氦气,持续工作一年也仅消耗 1.3kg,因此对氦气的回收基本可以忽略;但是,对于 1000Pa 的工作气压,持续工作 24h 需要消耗 0.16kg 高纯度氦气,即每瓶氦气仅可以支撑 4—5d 的连续工作,因此氦气的回收和再利用变得非常重要.

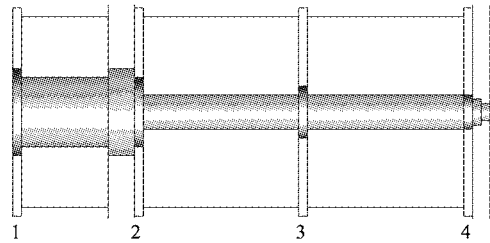


图 4 静电引出系统结构示意图
1, 2, 3, 4 分别为 4 个电极,其余为绝缘体.

表 1 不同氦气压强下的理论计算结果

| 入口处 压强/Pa | 入口处 流速/Mach | 氦气流 量/(kg·s ⁻¹) | 负载 /(Pa·l·s ⁻¹) | 出口端 压强/Pa |
|--------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| 10 | 3.4×10^{-4} | 4.4×10^{-10} | 0.27 | 1.4×10^{-4} |
| 50 | 1.7×10^{-3} | 1.1×10^{-8} | 6.7 | 3.3×10^{-3} |
| 100 | 3.2×10^{-3} | 4.2×10^{-8} | 25.8 | 1.3×10^{-2} |
| 300 | 8.1×10^{-3} | 3.1×10^{-7} | 193 | 0.10 |
| 500 | 1.1×10^{-2} | 7.1×10^{-7} | 444 | 0.22 |
| 1000 | 1.5×10^{-2} | 1.9×10^{-6} | 1208 | 0.60 |
| 3000 | 1.9×10^{-2} | 7.5×10^{-6} | 4649 | 2.32 |

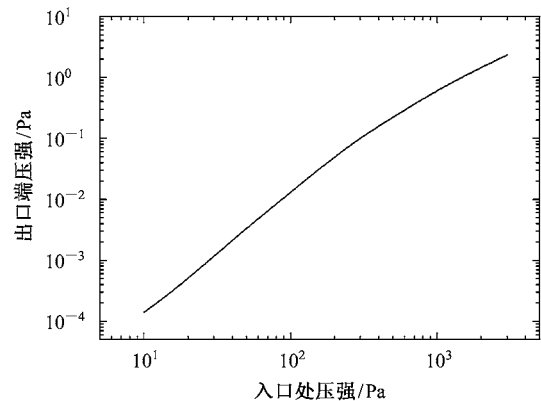


图 5 入口与出口端的压强关系

4 小结

为了能够把经 RFQ 冷却聚束器冷却后的放射性束流顺利、高效地引导到后续设备,考虑了两种离子引出方法——静电引导和小型 RFQ 方法.利用 SIMION 程序,我们对两种方法的性能分别进行了模拟.模拟表明:在较低氦气气压时,应该选用小型 RFQ 引出方法,以获得更好的束流品质.而在较高氦气气压时,只能选用静电引出方法.通过流体力学计

算,即对等径管道采用绝热近似,管径变化时采用等熵近似,我们还计算了设计中的静电引出系统的氦气流量以及可能获得的真空度.计算表明:在 1000Pa 的工作气压下,使用 2000 l/s 抽速的真空泵就可以使出口端的气压小于 1Pa.工作气压越小,出口端获得的真空度就越好.并且,系统工作在较低的氦气气压时,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.

参考文献 (References)

- Nieminen A, Huikari J, Jokinen A et al. Nucl. Instrum. Methods, 2001, **A469**: 244
- Herfurth F, Dilling J, Kellerbauer A et al. Nucl. Instrum. Methods, 2001, **A469**: 254
- LIU Y, LIANG J F, Alton G D et al. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **B187**: 117
- HUANG W X, WANG Y, XU H S et al. HEP & NP, 2004, **28**(Suppl.): 90(in Chinese)
- Kim T. Buffer Gas Cooling of Ions in a Radio Frequency Quadrupole Ion Guide. PhD Thesis. Canada: McGill University, Montreal, 1997
- Dahl D A, Delmore J E, Appelhans A D. Review of Scientific Instruments, 1990, **61**: 607
- Dautet H, Gujrathi S, Wieseahn W J et al. Nucl. Instrum. Methods, 1973, **107**: 49
- Massey B S. Mechanics of Fluids (Fifth Edition). UK: Van Nostrand Reinhold, 1983

Extraction System for RFQ Cooler and Buncher^{*}

HUANG Wen-Xue^{1,1)} WANG Yue^{1,2)} XU Hu-Shan¹⁾

SUN Zhi-Yu¹⁾ LI Zhan-Kui¹⁾ 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 Two different systems, static electric guide and miniature RFQ (Radiofrequency Quadrupole), for ion extraction from a RFQ cooler and buncher have been discussed. By fluid dynamics calculation, the mass flow rate and possibly available vacuum of the being designed static electric extraction system have also been evaluated. We have made conclusions that the miniature RFQ should be used for a low helium buffer gas pressure to obtain a good beam quality, but for a higher gas pressure the static electric guide must be used. In addition, because the being designed RFQ cooler and buncher will always work in a relatively high gas pressure, the recycling and reusing of the high purity helium gas must be considered.

Key words radioactive ion beam, radiofrequency quadrupole, ion extraction, mass flow rate

Received 22 November 2004

^{*} Supported by One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences, National Key Program for Basic Research, Ministry of Science and Technology(2001CCB01200), Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJ CX2-SW-N04, KJ CX2-SW-N07) and Major State Basic Research Development Program(G2000077401)

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