

兰州放射性束流线上速度选择器的 设计制造及初步调试*

黄天衡^{1,2;1)} 孙志宇¹ 徐珊珊¹ 詹文龙¹ 郑川^{1,2} 章学恒^{1,2} 胡正国^{1,2} 肖志刚¹
郭忠言¹ 肖国青¹ 张宏斌¹ 袁小华^{1,2} 李波^{1,2} 陈若富^{1,2} 樊瑞睿^{1,2} 徐治国¹
付芬^{1,2} 黄文学¹ 王玥^{1,2} 甘再国¹ 周小红¹ 张玉虎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 描述了一台在兰州放射性次级束流线(RIBLL)前端安装的速度选择器系统,该系统由2个三组合四极透镜组和1个正交的电磁场组成,将用于融合蒸发余核的研究.介绍了该设备的设计思路、基本参数和本底抑制能力、传输效率、角度接收度以及动量接收度的测量结果.结果表明该系统达到设计要求,进行适当改造后可用于 $Z \leq 110$ 的超重核素的研究和中重核区滴线核的研究.

关键词 RIBLL 超重核 反冲核分离器 速度选择器

1 引言

自20世纪80年代以来,随着核物理研究和加速器技术的发展,放射性次级束流(RIB)在极端同位旋自由度下核素的结构、性质等研究中得到了广泛的应用.作为这一研究工作的基础,放射性核素的产生、分离和鉴别技术也得到了快速的发展,世界上一些主要的核物理实验室先后建立起各具特色的放射性离子次级束流线装置,可以为核物理研究提供种类繁多的放射性炮弹,使实验研究能够拓广到中子滴线和质子滴线区域.同其他RIB产生方法相比较,弹核碎裂方法(PF)具有分离时间短等优点,特别适用于产生滴线区的短寿命核素,因而被普遍采用,如GANIL的LISE^[1],MSU的A1200^[2],RIKEN的RIPS^[3],GSI的FRS^[4]以及兰州重离子加速器国家实验室的RIBLL^[5].

兰州放射性次级束流线(RIBLL)自1998年1月正式投入运行以来,始终保持着稳定的工作状态,先后为大批实验研究项目提供了所需的多种次级束流,做

出了不少出色的工作并取得了一定的成绩.然而,受限于PF型束流的特点,单纯采用磁分离技术RIBLL的性能已不能满足不断拓展的重离子核物理研究的要求,特别是近年来,超重核素的合成和重核性质的研究逐渐成为当前重离子核物理研究热点之一,因而对束流本底抑制能力提出了更高的要求,迫切需要对现有束流线进行改进.

对超重核素合成和重核性质的研究工作主要是通过融合反应来进行的.由于反应运动学和动力学的特点,融合反应产物,特别是重核,具有较宽的能量分布和电荷分布,因而在不同反应道产物之间,以及产物与未发生反应的弹核之间,在磁刚度上具有很大的重叠.这种重叠导致单纯采用磁分离的PF方法难以实现很好的产物分离,所需要研究的稀少事件被淹没在大量的本底之中.实验表明,在重核融合反应中RIBLL对束流本底的抑制能力只有 10^6 — 10^7 ,远不能满足超重核实验测量高达 10^{10} — 10^{13} 的要求.

因此,为了满足核物理研究的需要,推动我国相关领域研究工作在RIBLL上的开展,更大限度地发

2006-10-26 收稿

* 国家自然科学基金(10221003, 10235020, 10305015),中国科学院知识创新工程重要方向项目(CKJCX2-SW-No18),中国科学院百人计划资助项目和科技部重大项目前期研究专项基金资助项目(2001CCB01200)资助

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

挥RIBLL能力,对RIBLL进行改进成为一个迫切的任务.

图1是改造前RIBLL结构简图,由于空间结构的紧凑,对于RIBLL现有的束流传输结构难以进行改动,因此,我们的改进方案着眼于通过附加的功能模块实现RIBLL功能的提升.这一提升要求在不影响RIBLL上次级束物理实验研究正常开展的前提下,使得RIBLL对熔合反应产生的重和超重核素具有好的分离能力及较高的传输效率,同时又具有较短的分离时间,使之可用于短寿命核素(寿命约 μs)测量.此外,还要求具有高的本底抑制能力,能够最大限度地减小束流粒子对测量的干扰.

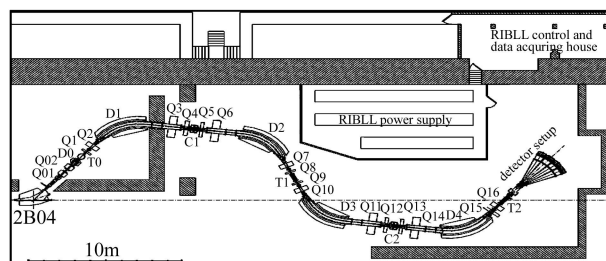


图1 改造前RIBLL结构简图

2 RIBLL速度选择器的设计制造

通过对目前国际上对重熔合产物的快速在线分离方法的充分调研和讨论,同时考虑到RIBLL的紧凑结构以及不能影响RIBLL在较高能区放射性束物理研究工作的开展,我们选择了正交电磁场分离方法作为RIBLL改进的基本方案.

速度选择器(Wien Filter)的基本原理是:以一定速度 v 运动的带电粒子在互相垂直的电磁场中同时受到电场力和磁场力作用: $\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$,在确定的电磁场方向和强度下,具有确定速度 $v = E/B$ 的垂直入射粒子,其所受电场力与磁场力可以互相抵消,运动轨迹将不受到电磁场的影响.基于这一原理制造的分选设备所选择的粒子具有确定的速度,而与粒子所带的电荷态无关.对于熔合反应,重熔合产物的速度相比初级束流粒子有较大的区别,如对反应 $^{40}\text{Ar} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{245}\text{Fm}$,在最佳入射能量下,穿过反应靶后 ^{40}Ar 离子速度为 3.03cm/ns ,而熔合产物 ^{245}Fm 只有 0.45cm/ns .因此,速度选择器对于熔合反应产物和束流间分离较好,能够得到高的本底抑制能力.基于这一原理的设备有SHIP^[6],LISEIII^[7,8]等.

2.1 束流传输系统

随着HIRFL改进工作的完成,终端束运系统进行了重新布局.为安装速度选择器,在RIBLL初级靶 T_0 前增加了一段约5m的直线空间,但空间仍旧紧张,速度选择器的安装只能通过对这段空间的合理布局来实现.

若在目前RIBLL入口的前方增加一个速度选择器段,相应地用于熔合反应实验研究的靶位(T_s)也要提前至该段之前.因此,在HIRFL后束线终端偏转磁铁与RIBLL原有靶位 T_0 之间必须建立一个新的束腰位置.这一位置要求尽可能远离 T_0 ,为新增加的部分预留足够的空间.与此同时RIBLL原有的束流光学特性必须保持,即 T_0 处也要保持束腰位置,因此除速度选择器外,还必须加入新的束流光学元件,以实现 T_s 同 T_0 间束流的腰到腰传输.

图2是改造后RIBLL前段的结构简图.安装在速度选择器前后的三组合四极透镜组除实现 T_s 到 T_0 的束流腰到腰传输外,设计中还需要考虑到为了减小速度选择器本身的设计和加工难度,要求束流在速度选择器内具有较小的束流包络和发散角.同时为了提高产物的接收效率,要求束流传输系统有较大的空间接收度.综合以上考虑,经过束流光学计算和优化,确定 T_s 与 T_0 间距4.35m,在速度选择器前后都采用三组合四极透镜聚焦系统,空间接收度为 $\pm 3^\circ$.由束流光学计算程序TRANSPORT计算得到的束流包络如图3(a)和(b)所示.

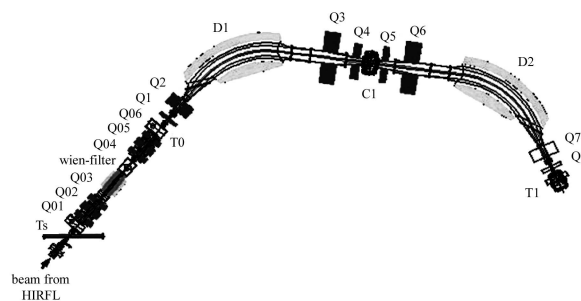


图2 改造后RIBLL前段结构简图

对于RIBLL通常的次级束物理实验,由于束流能量较高,磁钢度较大,此时新增加透镜组的极头场强已不能保证 T_s 与 T_0 间的腰到腰传输.因此需连同HIRFL后束线束流光学元件整体调节,以保证 T_0 的束腰特性(图3(c)).

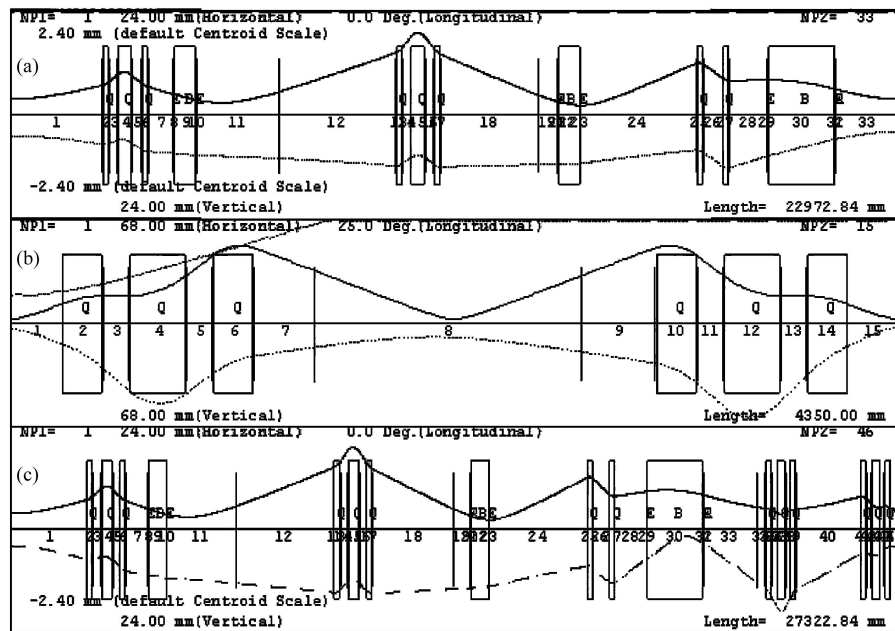


图 3 束流光学计算

2.2 速度选择器的设计

在正交电磁场中, 对于速度不等于参考速度 $v=E/B$ 的粒子, 当作用距离一定时, 电磁场越强, 粒子运动轨迹同参考轨迹的偏差越大. 因此高的电磁场有助于得到好的分辨能力和高的本底抑制能力. 但随着场强的提高, 一方面制造成本和技术难度都随之增大, 另一方面, 由于反应产物具有一个连续的能量分布, 高的分辨能力也意味着小的速度接收范围和低的接收效率. 由于粒子在经过速度选择器时, 总的分离能力取决于所受电磁场在路径上的积分. 因此加大速度选择器的有效长度, 可以在较低的场强下达到同样的分离能力. 综合以上考虑, 速度选择器的最大电场强度设计为 10kV/cm , 作用区域等效长度为 70cm .

由于熔合反应产物本身具有较低的动能, 所以整个电场系统必须工作在真空环境下. 根据束流光学计算得到的束流包络尺寸, 确定电极板间距 70mm , 宽度 80mm , 其中下极板采用拉丝结构, 以方便被偏转的初级束流粒子穿过. 上下极板加以大小相等、极性相反的电压, 保证束线中心处于零电位. 电场处于磁铁极头间隙内, 考虑到高压绝缘及真空系统的需要, 确定相应磁铁极头间距为 150mm , 对应极头最大磁场强度为 0.5T .

由于磁铁极头间隙远大于电场, 因此磁场分布的弥散宽度也宽于电场分布. 由于速度选择器对于电场和磁场的匹配有较高要求, 若分布形状不相符, 则在一定区域内, 带电粒子所受到的电场、磁场力不能互相抵消, 粒子运动轨迹将发生改变. 因此, 设计时需

要对空间电磁场分布进行精细的计算. 计算使用了通用的电磁场有限元计算程序 MAFIA. 为了消除边缘场的不利影响, 正负电极板间通过一系列均压环, 消除电极板边缘效应及绝缘电介质对场分布的影响, 在作用区内达到较好的电场均匀度. 同时沿束流方向, 在电极板的两端, 设立了一系列尺寸及电压差不等的均压环, 以加大电场弥散, 使其同磁场分布间有较好的配合. 这一设计的可靠性由基于欧洲核子中心 (CERN) 的 GEANT4^[9] 程序包的 Monte-Carlo 模拟得到了验证.

3 速度选择器的性能测试

速度选择器段安装完成后, 利用 ^{239}Pu α 源和在线束流对它的一些基本参数进行了初步测量, 并同设计进行了比较.

3.1 接收立体角和传输效率

图 4 是利用 ^{239}Pu 源发射出的 α 粒子对系统的接收立体角测量的结果, 测量时 α 源由光阑限制为近似点源, 速度选择器的电磁场都设置为零. 图中的横坐标为 α 粒子从源中的出射张角, 是由在源前放置的一系列光阑来决定的. 纵坐标是对应的 α 粒子传输效率 ϵ . 从图中可看出, 在张角大于 3° 时, 系统仍有约 20% 的传输效率. 而对于张角大于 4° 的出射粒子, 传输效率趋近于 0 , 这与设计要求相符, 由此计算得到整个系统的接收立体角约为 1.5msr .

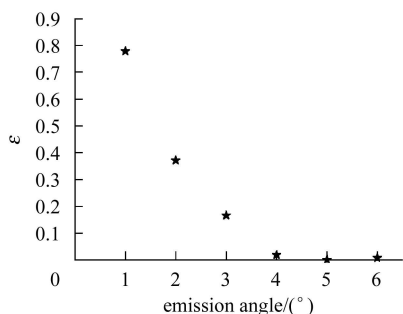


图4 利用 α 源对系统立体角测试的结果

在同样测试条件下, 限制进入系统的 α 粒子张角为小于 $\pm 3^\circ$, 得到系统的整体传输效率为44.6%. 对反应产物而言, 由于存在较大的动量分散, 系统的传输效率要小于上述值. 我们选择了反应道 $^{197}\text{Au}(^{14}\text{N}, 5n)^{206}\text{Rn}$ 来测量系统的传输效率, 入射 ^{14}N 束流能量为88MeV, 产生的反应产物 ^{206}Rn 通过测量其 α 衰变来指认. 图5为固定速度选择器电场强度($\pm 10\text{kV}$), 调节磁场以选择不同速度反应产物的测量结果. 从图中可以看出, 当系统选择的粒子速度 v 为0.198cm/ns时, 系统的传输效率 ε 达到最高. 这同理论计算经过半靶厚度修正后 ^{206}Rn 的速度符合得很好, 但此时系统传输效率也只有约22%, 小于 α 粒子测量结果.

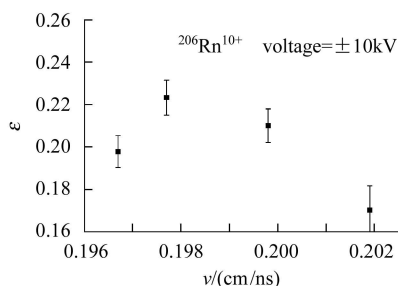


图5 固定速度选择器选择不同速度的 ^{206}Rn 粒子得到的系统传输效率 ε ($T_s - T_0$)

3.2 动量接收度

动量接收度是速度选择器的一个重要指标, 采用 α 源对此进行了测量. 选择 α 源主要是考虑到发射的 α 粒子具有较好的单色性, 通过在源前放置不同厚度的C膜, 可以得到不同能量的 α 粒子. 图6是在固定速度选择器所选择的粒子速度为1.554cm/ns的条件下, 得到的具有不同速度的 α 粒子的测试结果. 测量表明, 当固定速度选择器工作电压为 $\pm 10\text{kV}$ 时, 粒子速度 v 每减小0.01cm/ns, 系统的传输效率 ε 平均下降10.6%. 由此得到当 α 粒子的传输效率 ε 减小到一半时对应的速度, 从而得到系统可接收的粒子动量接收度为 $\pm 3\%$. 此外, 从图上亦可以看出, 当速度选择器的工作电压

升高时, 系统的整体传输效率略有下降, 但动量接收度基本不变.

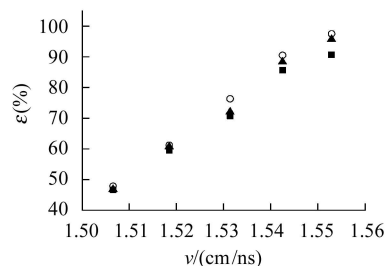


图6 利用 α 源测量系统的动量接收度

○, ▲和■分别代表速度选择器工作电压为 ± 5 , ± 10 和 $\pm 15\text{kV}$ 时的测量结果.

3.3 本底抑制能力

本底抑制能力是速度选择器的另一个关键指标, 对于反应截面很小的超重核素或滴线核合成实验至关重要. 由于系统的本底抑制能力与具体的实验反应道、弹靶组合相关, 对于不同的反应, 这一指标可能相差1—2量级. 我们针对 $7.09\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au}$ 反应进行了在束测量. 图7给出了固定所选粒子速度, 改变速度选择器工作电压 V 测量得到的本底抑制比 γ . 从图上可以看出, 当速度选择器的工作电压超过 $\pm 15\text{kV}$ 时, 系统的本底抑制能力已趋于饱和, 对这一反应道达到约 10^9 . 这一抑制能力已经达到了我们的设计要求.

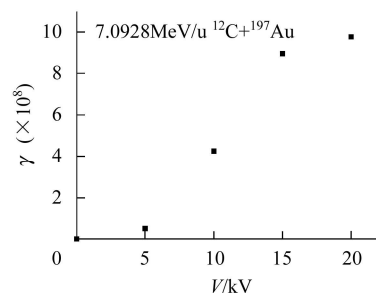


图7 系统本底抑制比

4 结果与讨论

本文介绍了一台安装于RIBLL前端的电磁反冲核分离器速度选择器的设计建造及其性能初步测试的结果. 结果表明系统的本底抑制能力为 $10^8 - 10^9$, 对于 $88\text{MeV } ^{14}\text{N} + ^{197}\text{Au} \rightarrow ^{206}\text{Rn} + 5n$ 反应, 系统的传输效率在20%左右. 该系统可用于具有 α 衰变性、寿命在 μs 量级以上且生成截面大于几个pb的熔合蒸发余核的研究. 初步测试表明, 速度选择器的本底抑制能力和传输效率均达到了设计的要求. 但就目前的整体构型而言, 如结合后续RIBLL的分析磁铁, 本底抑

制能力将会提高 10^3 以上, 但传输效率会由于 RIBLL 二级磁铁的色散太大而大幅度下降. 为此, 我们在不久的将来, 计划将速度选择器段移至一个新的束流线位置, 在其后增加一个约 7° 偏转的二级磁铁, 组成一

个独立的反冲核分离器. 届时, 该系统将不仅可用于 $Z \leq 110$ 的超重核素的研究, 而且也可用于中重核区滴线核的研究.

参考文献(References)

- 1 Anne R, Bazin D, Mueller A C et al. Nucl. Instrum. Methods, 1987, **A257**: 215—232
- 2 Sherrill B M, Morrissey D J, Nolen J A et al. Nucl. Instrum. Methods, 1991, **B56/57**: 1106—1110
- 3 Kubo T, Ishihara M, Inabe N et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **B70**: 309—319
- 4 Geissel H, Armbruster P, Behr K H et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **B70**: 286—297
- 5 SUN Zhi-Yu, ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A503**: 496—503
- 6 Münzenberg G, Faust W, Hofmann S et al. Nucl. Instrum. Methods, 1979, **161**: 65—82
- 7 Péter J. the FULIS Collaboration. LPCC, 2001, 01-13
- 8 Grévy S. the FULIS Collaboration. LPCC, 2002, 02-01
- 9 Agostinelli S, Allison J, Amako K et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A506**: 250—303

Construction and Test of Wien-Filter Combined with RIBLL*

HUANG Tian-Heng^{1,2;1)} SUN Zhi-Yu¹ XU Hu-Shan¹ ZHAN Wen-Long¹ ZHENG Chuan^{1,2}
 ZHANG Xue-Heng^{1,2} HU Zheng-Guo^{1,2} XIAO Zhi-Gang¹ GUO Zhong-Yan¹
 XIAO Guo-Qing¹ ZHANG Hong-Bin¹ YUAN Xiao-Hua^{1,2} LI Bo^{1,2}
 CHEN Ruo-Fu^{1,2} FAN Rui-Rui^{1,2} XU Zhi-Guo¹ FU Fen^{1,2}
 HUANG Wen-Xue¹ WANG Yue^{1,2} GAN Zai-Guo¹
 ZHOU Xiao-Hong¹ ZHANG Yu-Hu¹

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

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

Abstract A recoil separator Wien-filter which was developed for the Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL) as an extension is described. It consists of 2 quadruple triplets and a standard Wien-filter. It was designed for study of the fusion-evaporation reactions. The overall design, background suppression, the transmission efficiency, the angular acceptance and the momentum acceptance have been described. All the performances fulfil the designed requirements. Based on the test results, with some modifications the investigations of the nuclei with $Z \leq 110$ and the drip-line nuclei in the medium-heavy mass region can be carried out with this facility.

Key words RIBLL, supper-heavy nucleus, recoil separator, Wien-filter

Received 26 October 2006

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10221003, 10235020, 10305015), Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (CKJXC2-SW-No18), One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences and National Key Program for Basic Research of the Ministry of Science and Technology (2001CCB01200)

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