

文章编号: 1007-4627(2015)S1-0001-04

## BRISOL放射性核束鉴别装置的研制

马鹰俊, 崔保群, 晏明芳, 马瑞刚, 陈立华, 唐兵, 黄青华

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 中国原子能科学研究院已经建成一台“在线同位素分离器”(BRISOL), 在线产生并分离出需要的放射性离子束用于天体物理、核结构和材料科学等研究。其中研制的放射性核束鉴别装置, 用来测量并鉴别能量 $30 \sim 300$  keV、束流强度在 $10^4 \sim 10^{11}$  Particle/s放射性离子束(RIB)的种类。介绍了该装置的原理、组成及调试结果。该装置结构紧凑, 可在有限空间内完成核素的积累、转运和能谱测量。该装置已经用于“在线同位素分离器”的在线调试, 通过在线获取的射线能谱确认了产生的 $^{38}\text{K}^+$ 放射性同位素并给出放射性束流的强度。

**关键词:** 在线同位素分离器; 束流诊断; 放射性离子束

**中图分类号:** TL503      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.S1.1

### 1 引言

中国原子能科学研究院已经完成了北京放射性核束装置在线同位素分离器<sup>[1]</sup>(Beijing Radioactive Ion-beam Facilities Isotope Separator On-Line, BRISOL)的建设, 该装置利用 100 MeV/200  $\mu\text{A}$  回旋加速器产生的质子束流, 打靶产生中短寿命放射性核素, 在线将靶中产生的中性放射性核素原子转换成带电粒子, 通过磁分析器分选出要求的放射性核束, 注入到串列加速器中加速, 或将放射性核束传输至低能实验终端, 开展物理实验研究。目前在线同位素分离器靶源已经产生流强 $10^6$  particle/s 以上的 $^{38}\text{K}^+$ 放射性离子束。分离器采用两级分离, 共有大小两对分析磁铁, 其布局如图 1 所示, 设计质量分辨率 20 000。

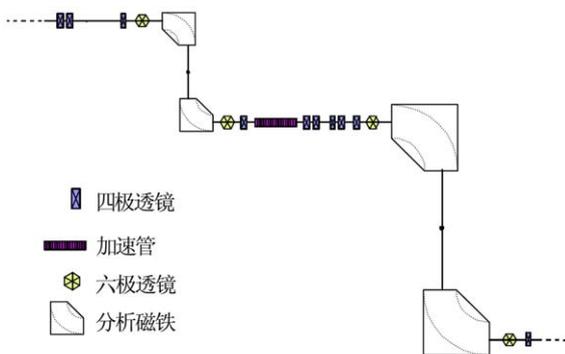


图 1 (在线彩图) 在线同位素分离器布局示意图

BRISOL 系统产生的放射性核束强度低、半衰期短, 为了及时获得放射性核产生及传输的情况, 在束流线上设置了两套束流鉴别仪, 分别位于第一块小分析磁铁像点和第二块大分析磁铁像点之后。它们通过对放射性核束的能谱测量来确定通过分析缝的核素种类。

### 2 工作原理

放射性束流鉴别仪的工作原理如图 2 所示。工作时首先将鉴别仪中的收集带垂直提升到束流传输路径上, RIB 轰击在此带上, 经过一段指定时间积累一定的放射性活度; 然后再经气缸驱动收集带下降到探测器所处高度, 电机驱动收集带, 根据 RIB 的衰变特征将收集到的样品转动到对应的探测器位置前, 测量收集到样品的能谱。通过能谱测量确定放射性核素的种类<sup>[2]</sup>, 由样品的活度和收集时间计算得到放射性离子束的流强。

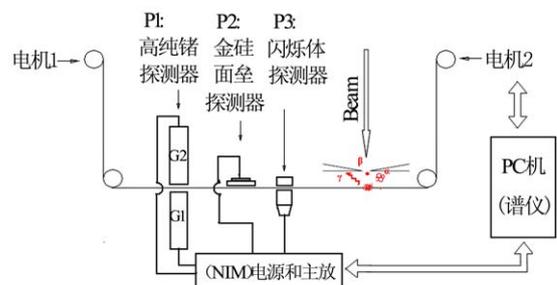


图 2 (在线彩图) 放射性核束鉴别装置工作原理图

收稿日期: 2014-09-09; 修改日期: 2015-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11475270)

作者简介: 马鹰俊(1978-), 男(回族), 宁夏银川人, 副研究员, 硕士, 从事加速器技术及应用研究; E-mail: yjma@ciae.ac.cn。

探测系统采用高纯锗探测器探测放射性核素的 $\gamma$ 衰变；采用金硅面垒探测器探测核素的 $\alpha$ 衰变；采用闪烁体探测器探测 $\beta$ 衰变。三种探测器并不需要同时测量，实际操作时依据具体核素的放射性衰变种类选择要使用的探测器。

### 3 装置结构

鉴别装置的机械系统由传动系统(步进电机+气缸+传动带+传动导向轴)，收集系统(铝塑导电收集带)，微机控制系统组成，装置的结构及组成如图3所示<sup>[3]</sup>。鉴别装置的探测系统则由三类探测器和数据获取系统组成。

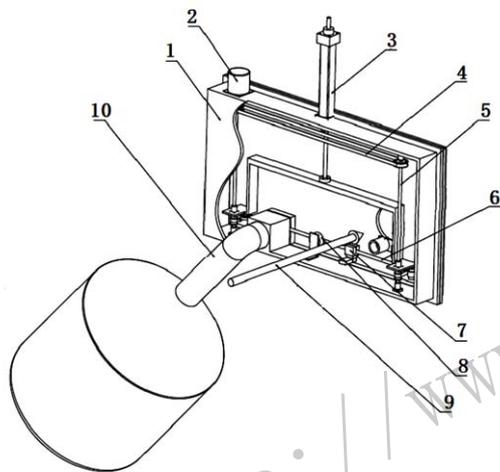


图3 放射性核束鉴别装置结构及组成示意图

1 真空室；2 步进电机；3 气缸；4 传动皮带；5 传动导向轴；6 收集带；7 闪烁体探测器；8 金硅面垒探测器；9 束流示意；10 高纯锗探测器。

在收集仪的真空室中安置有两个收集带盘，工作时一个释放收集带，另一个同步卷收收集带。当释放盘中带子完全释放完后，驱动电机改变转动方向，释放盘与卷带盘作用互换。如此反复，装置可长期使用。

换向机构如图4所示，图中左棘轮(1)带动传动导向轴(2)和转轮(4)顺时针转动时，图中(3)为卷带盘，另一侧(未画出的)为释放盘。卷带盘由主转轮(4)下的B棘轮(6)传动提供动力。当盘上卷带半径增大时，会引起盘上带子的线速度和驱动速度不同，此时卷带盘会在轴上滑动来保持线速度一定。释放盘则由收集带拖动转动。当改变方向时，动力由图中同步齿带(9)转移到右侧转轮上，左侧转轮(4)成为从动，图中(3)则成为释放盘，均由带子拖动。

收集带靠转轮(4)与压轮(5)之间压迫提供的摩擦力驱动。带子的运动速度和主转轮(4)的外部线速度

一致。带子的定位是根据外部步进电机的转速推算出带子的运动距离来确定的。收集仪采用三相混合式步进电机(3HB57-54)，步进角度 $1.2^\circ$ 。采用带有细分功能的YKA3606MA驱动器，步进电机转动一圈收集带移动距离为94.3 mm。理论上该系统的控制精度为0.079 mm。

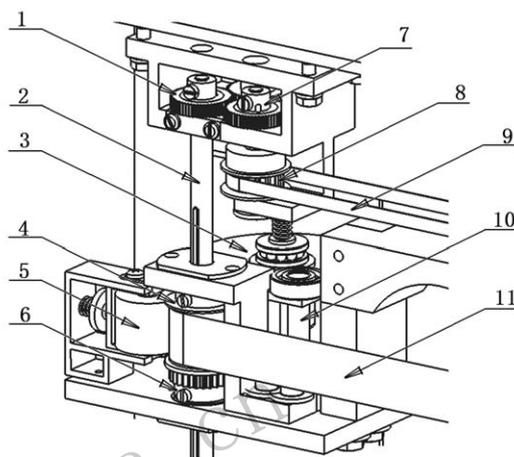


图4 传动系统结构图

1 左棘轮；2 传动导向轴；3 卷带盘；4 主(从)转轮；5 压轮；6 左B棘轮；7 右棘轮；8 同步带轮；9 同步齿带；10 绕带轮；11 (铝塑)收集带。

转轮和收集带盘安装在“几”字型横梁两边的安装平板上，构成一个整体结构，受气缸驱动可做升降运动，将收集带移动到束流中心进行收集，或将带子移动到探测器位置高度后再进行转动。两侧的传动轴兼顾导向作用，轴上开有键槽，与转轮中的长键相扣合，即可上下滑动，又能够带动转轮转动。

探测系统的三类探测器都安排在收集装置的底部位置。 $\gamma$ 射线穿透能力强，所以 $\gamma$ 探测器安置在真空室外。为了增大探测效率，设计了一个直径76 mm伸向真空室内的铝窗使高纯锗探头尽量靠近被测样品。铝窗端面厚度1 mm，距离收集带3 mm。另两种探测器安装在真空室内部，金硅面垒探测器直接靠近收集带附有放射性样品的一面，塑料闪烁体有一个劈裂缝供收集带穿过，形成一个近似 $4\pi$ 的探测立体角度，以提高探测效率。

NIM机箱与收集装置就近放置，预分析段的NIM机箱及探头都需要设置局部屏蔽来降低对设备的辐射损伤。多道分析器放置在辐射相对较弱的电源间，再通过光纤网络将多道分析器的数据从300 kV高电位传输到控制室的电脑中，由采集软件进行能谱分析。

### 4 调试结果

收集装置完成组装和真空检漏后，首先进行离线调

试, 以确认运动机构和 $\gamma$ 探测器及电子学插件均可正常工作。

在模拟测试过程中, 把位于装置底部的收集带提升到束流中心高度, 停顿一段时间, 再把收集带下降到装置底部探测器所在的高度, 计算机给出移动指令, 将标记的样品位置从束流正下方移动到探测器前。移动距离可在控制程序中设置, 也可按预设的参数选择自动运动到某个探测器前。

为测试带子在不同情况下的运动情况, 在卷带盘收带处于前段(25 m)、中段(50 m)和后段(75 m)三种情况下, 分别测试20次移动指令的执行情况, 将实测值的平均值以及单次偏移误差的分布范围列在表1中, 第1至第3行是3种情况下均移动100 mm的结果, 从第3至第5行是同一情况下移动不同距离的结果。表中数据显示, 平均控制精度小于0.6%, 说明卷带盘上卷带半径的变化对带子运动的线速度影响不大。第3到

第5行数据显示移动带子的单次误差累积, 而且是随机的, 经分析误差来源只与电机启动时的状态相关, 比如带子与转轮表面的接触情况, 齿轮组间的摩擦情况等。

表中最后一列数据是所有单次走带偏移误差的分布范围, 最大为 $-5.96 \sim 4.68$  mm, 说明重复性不理想。走带偏移虽然不会影响射线能量的测定, 但是会对探测效率产生影响。高纯锗探测器的晶体直径为 $\phi 52.6$  mm, 收集样品的最大直径约为 $\phi 5$  mm, 样品距探测晶体9 mm, 使用蒙卡程序计算, 该探测系统中圆面源对圆面探测器的平均立体角<sup>[4]</sup>为4.2413。当样品相对晶体轴心偏移6 mm时, 平均立体角减小比例为1.5%, 这样的影响在高纯锗探测器的测试中可以接受。可能影响重复性的因素很多, 传动设计中采用了齿轮、棘轮和同步带, 转带和收放带过程中均借助摩擦力来实现, 更有步进电机的起跳频率和加速曲线等, 这些均有改进的空间。

表 1 收集带运动重复性测试结果

序号	测试位置/m	设定距离/mm	实测平均值/(mm/20次)	平均控制精度/%	偏移误差分布范围
1	25	100	100.57	0.57	(-1.9, 3.08)
2	50	100	100.022	0.22	(-2.2, 2.4)
3	75	100	99.675	-0.34	(-3.82, 3.94)
4	75	150	149.197	-0.54	(-5.96, 4.68)
5	75	300	299.843	-0.05	(-4.6, 3.34)

对高纯锗探测器与电子学插件组成的谱仪进行了能量定标和效率刻度。谱仪采用ORTEC公司的N型高纯锗探测器, 型号GMX30-76-HJ-S, 相对探测效率大于30%。主放大器是ORTEC的672插件, 多道是Amptec公司的MCA8000A便携式多道。定标时将探头隔着铝窗距源3 mm, 对于 $^{60}\text{Co}$ 标准源的1332.5 keV能量 $\gamma$ 峰的能量分辨达到1.78 keV, 如图5的能谱中所示。对谱仪进行探测效率刻度, $^{60}\text{Co}$ 标准源1173.2 keV能量 $\gamma$ 射线的绝对探测效率达到1.77%,

对1332.5 keV能量 $\gamma$ 射线的绝对探测效率达到1.57%。

### 5 结论

该装置已被安装在BRISOL束流线系统中参与在线调试, 其运转精度和重复性可以满足工作的需要。在2015年4月22日首次引出放射性离子束的在线调试中, 成功获取到 $^{38}\text{K}^+$ 的放射性能谱。当初级质子束强度约 $1 \mu\text{A}$ 时, 所获取的能谱如图6所示, 经计算RIB束流强度约为 $2.3 \times 10^5$  Particle/s。目前放射性核素鉴别

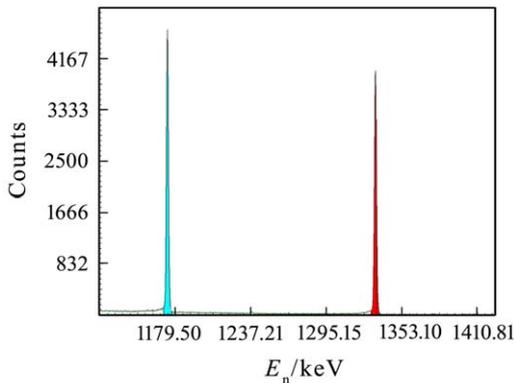


图 5 (在线彩图) 高纯锗谱仪能量分辨测量

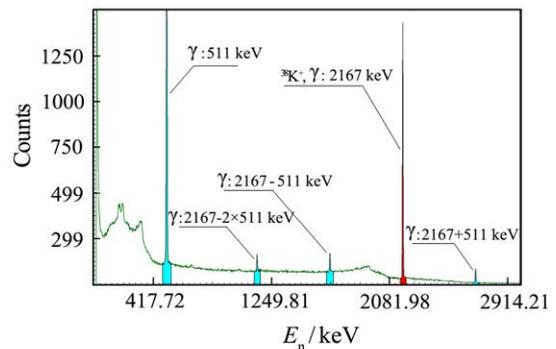


图 6 (在线彩图) 在线测量 $^{38}\text{K}^+$ 能谱图

仪工作正常, 在下面即将开展的闪烁体探测器和金硅面垒探测器的测试工作中, 将进一步改进运动机构提高卷带的精度和重复性。

#### 参考文献:

- [1] YANG Binfan, GUAN Xialin, CAO Xiaopin, *et al.* The status of the project of HI-13 tandem accelerator promotion[C]//Symposium on Charged Particle Sources and Beams, Wuhan, China, Oct. 14-19, 2006: 1. (in Chinese)  
(杨丙凡, 关遐令, 曹小平, 等. HI-13串列加速器升级工程进展与现状[C]//2006年全国荷电离子源、粒子束学术会议论文集. 武汉, 2006: 1.)
- [2] CUI Baoqun, LI Liqiang, MA Yingjun, *et al.* Review of Scientific Instruments, 2004, **75**(5): 1913.
- [3] MA Yingjun, CUI Baoqun, LI Liqiang, *et al.* Review of Scientific Instruments, 2014, **85**(2) Part 2 02A716: 3.
- [4] WU Zhihua, QI Huiquan, CHEN Jingui, *et al.* The Experimental Method of Nuclear Physics[M]. 3th ed. Beijing: Atomic Energy Press, 1997: 459. (in Chinese)  
(吴治华, 齐卉荃, 陈进贵, 等. 原子核物理实验方法[M]. 3版(修订本). 北京: 原子能出版社, 1997: 459.)

## Beam Identification Unit in BRISOL

MA Yingjun<sup>1)</sup>, CUI Baoqun, YAN Mingfang, MA Ruigang, CHEN Lihua, TANG Bing, HUANG Qinhua

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The beam identification unit are developed in China Institute of Atomic Energy for Beijing Radioactive Ion-beam Facilities Isotope Separator On-Line (BRISOL), that has been constructed with arming to generate short life radioactive ion beam (RIB) [ $30 \sim 300 \text{ keV}/10^4 \sim 10^{11} \text{ Particle/s}$ ] on-line to be used in science research about astrophysics, nuclear structures and materials after separated. The device could shift the radioactive spot from beam line to the position in front of detectors, and obtain the spectrum of radiation and the intensity of beam. The prototype of the unit has been tested and installed on the beam line. In the first commissioning the nuclide  $^{38}\text{K}^+$  has been identified with beam current about  $10^5 \text{ particle/s}$ .

**Key words:** Beijing Radioactive Ion-beam Facilities Isotope Separator On-Line; beam identification; radioactive ion beam

**Received date:** 9 Sep. 2014; **Revised date:** 25 Aug. 2015

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11475270)

1) E-mail: yjma@ciae.ac.cn.