

超重元素合成实验靶室及转靶装置

郭忠言, 肖国青, 徐瑚珊, 詹文龙, 孙志宇, 胡正国,
毛瑞士, 李加兴, 王金川, 李琛, 赵铁成, 沈汉良

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 文章介绍兰州重离子加速器放射性次级束流线(RIBLL)的超重元素合成实验靶室和转靶系统, 并对改进的真空密封磁耦合传动机械作简单描述。转靶系统采用可程序控制的无级变速电机、真空密封磁流体耦合和特殊皮带传动机构, 使得靶盘转速在 0~600 r/min 范围内可调, 靶盘边缘摆幅 <0.2 mm。

关键词: 超重元素合成; 靶室; 转靶装置

中图分类号: TL503.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2006)03-0275-05

Target Chamber and Rotating Target Wheel for Synthesis of Superheavy Elements at Radioactive Ion Beam Line of Lanzhou

GUO Zhong-yan, XIAO Guo-qing, XU Hu-shan, ZHAN Wen-long,
SUN Zhi-yu, HU Zheng-guo, MAO Rui-shi, LI Jia-xing, WANG Jin-chuan,
LI Chen, ZHAO Tie-cheng, SHEN Han-liang

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

Abstract: The target chamber and the rotating target wheel for synthesis of superheavy elements at Radioactive Ion Beam Line of Lanzhou(RIBLL) are described in the paper. The modified vacuum isolating magnetic coupling rotation device driven by step-motor is also shown. The rotating target wheel is composed of a programmable brushless motor, a vacuum sealing magnetic liquid feed-through and high torque-drive(HTD) strap. The rotation speed of the wheel can be turned from 0 to 600 r · min⁻¹. The vibration of the target wheel is <0.2 mm.

Key words: superheavy elements synthesis; target chamber; rotating target wheel

众所周知, 铀是人们在自然界中找到的电荷数 Z 最高的元素。 Z 更大的元素都是人工合

成的。第 1 个超铀元素是在反应堆中通过中子俘获、 β -衰变产生的。用这个方法可以合成

收稿日期: 2004-07-09; 修回日期: 2004-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10205019); 国家基础研究发展规划资助项目(G2000077401, G2000077404); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(10221003); 中科院百人计划资助项目; 科技部重大项目前期研究专项基金资助项目(2001CCB01200)

作者简介: 郭忠言(1940—), 男, 辽宁辽阳人, 研究员, 实验原子核物理专业

93—100号超铀元素。而 Z 超过100的超重元素都是在加速器上用融合-蒸发反应产生的。因此,寻找超重元素的研究工作集中在一些重离子加速器实验室,诸如GSI、Dubna、GANIL、RIKEN和Berkely。

实践证明,利用融合-蒸发反应产生超重核素,使用反冲-分离和延迟符合探测技术是成功鉴别超重元素的方法。目前,普遍使用的反冲-分离技术有充气式分离^[3,4]和Wien-filter式分离^[5,6]。

中国科学院近代物理研究所(IMP)和兰州重离子国家实验室(HIRFL)为开展超重元素合成实验研究,首先将兰州重离子加速器放射

性次级束流线(RIBLL)初级靶室(T_0)及其前面的部分束流线进行改造^[7]。在HIRFL后输运线 50° 偏转磁铁和RIBLL的 T_0 之间设置超重实验靶室(T_{00})和1个简单的Wien-filter式分离器。Wien-filter式分离器主要由2组聚焦透镜 Q_{01} - Q_{06} 、1台速度选择器 D_0/E_0 构成。图1为它的布局示意图。实验用HIRFL提供的 $5\sim 10$ MeV/u重离子束流在 T_{00} 轰击反应靶,出射的反应产物和炮弹经 Q_{01} - Q_{03} 聚焦, D_0/E_0 分离出需要的核素, Q_{04} - Q_{06} 聚焦后进入RIBLL。利用RIBLL离子光学设置、TOF测量和在 T_2 探测器进行的衰变特性符合测量鉴别粒子。

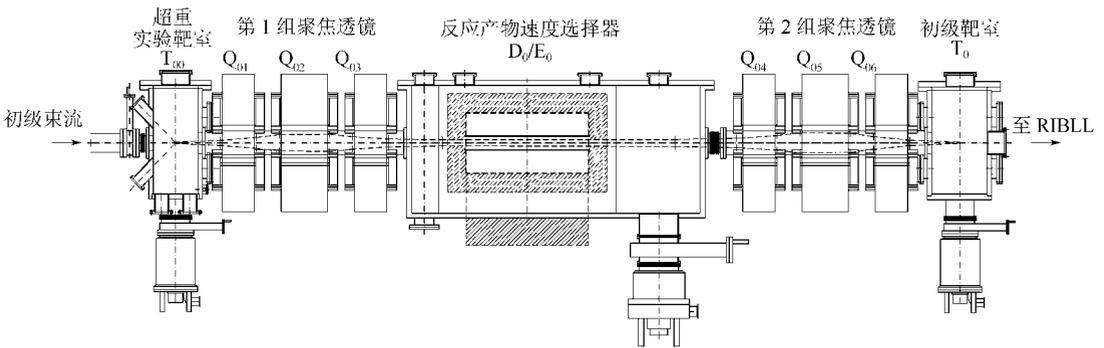


图1 超重实验靶室和速度选择器分布图

Fig. 1 Chamber and velocity selector for superheavy element investigations

1 超重实验靶室

超重元素合成实验靶室位于RIBLL的最前端,距离RIBLL初级靶室中心4.38 m(图2),主要包括靶室主体、转靶装置和靶架、真空密封磁耦合传动装置、信号引出法兰和观察窗。靶室前壁上设置初级束流入口,在入口的上、下各设置一 45° 管道,管道轴线通过靶心。其中,一根管道中安装束流监测探测器,以便实验中实时监测束流和反应靶的状态。摄像头被安装在另一管道中,供实验初始阶段观察加速器调整束流斑点大小和位置使用。

在靶室底壁沿着束流轴线设置2套真空密封磁耦合传动装置。靶前的1套传动装置控制荧光靶和检验靶的设置或移出。靶后1套控制法拉第筒和闪烁探测器的设置或移出,它们在实验初始阶段被频繁用于监测初级束流斑点尺寸、位置和强度。这里的真空密封传动装置是

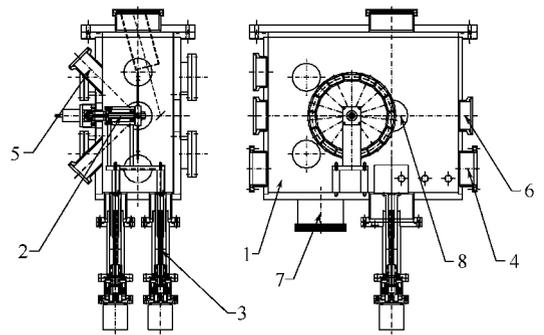


图2 超重实验靶室 T_{00}

Fig. 2 Chamber for superheavy element investigations

- 1——靶室主体; 2——靶室内转靶系统;
- 3——磁耦合步进电机控制装置; 4——信号引出法兰;
- 5—— 45° 管; 6——观察窗;
- 7——分子泵接口; 8——束流出口

新的改进型,简单结构示意图示于图3。步进

电机转轴与内磁转子连接,当计算机通过步进电机驱动器使步进电机转动时,与之构成磁耦合的真空室内磁转子带动从动轴转动,控制托架上下运动(原来的装置是主动轴直接带动托架运动)。当行程较长时,由于切向力明显增加的运动阻力,有时产生失步,造成行程误差。同时,主动轴伸出很长,也出现随机横向摆动和震动,引起横向位置偏差。改进的装置主要是增加一从动轴。从动轴与真空腔体内壁紧密滑动配合,不仅减小了切向力,同时有效抑制了横向摆动和颤动,从而改善了该装置的定位精度和运行可靠性。

靶室侧壁上设置4个信号引出法兰,为束流监测元件和实验测量探测器提供信号、高压和测量地的连接。靶室设置了5个观察窗,可从不同角度清楚观察靶室内部反应靶、诊断元件和探测器的位置与状态。靶室上壁可安装一向内延伸的薄壁管道,提高此处 γ 探头的探测效率。

靶室通过底壁上一直径200 mm接口与真空阀门和抽速 $600 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的分子泵连接。经测试,靶室系统可在30 min内达到 5×10^{-4} Pa,连续运行48 h,真空可达到 7.0×10^{-5} Pa。

2 转靶装置

超重元素合成实验是利用 $5 \sim 10 \text{ MeV/u}$ 重离子束流轰击重靶,如GSI的 $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{278}112^*$ 实验^[1]。重离子炮弹在反应靶中损失能量,产生大量热量,高流强时会引起靶融化。为避免融化发生,靶必须被恰当冷却。这里采用可程序控制电机,通过特殊设计传动机构带动靶盘高速转动,束流均匀照射15个反应靶,

热量被传导和辐射,有效避免反应靶定点照射过热融化。但在超重实验中,为让融合反应产物反冲出反应靶和减少多次散射,反应靶必须很薄。靶盘高速转动时产生的震动和摆动可能使靶破裂。因此,转靶机构必须将震动和摆动降到尽可能小,以确保靶的安全。考虑上述要求,本课题组设计、研制了图4所示的转靶装置。

该转靶装置分靶室内部分(真空)和靶室外部分。靶室内部分包括反应靶、靶盘、转动机构和支架。靶盘外圆直径310 mm、厚5 mm。圆盘中心 $\phi 69 \text{ mm}$ 内厚度20 mm。如此设计可降低靶盘颤动。靶盘上可同时安装15个扇形反应靶,反应靶中心长度54 mm、宽度20 mm,靶中心位于 $\phi 280 \text{ mm}$ 圆上。靶中心之间距离58 mm。因此,实验期间束流辐照非靶区域的几率为6.9%。

为减小靶盘震动和摆动,设计转轴、靶盘的同心度和平行度 $< 0.035 \text{ mm}$ 。轴承与轴配合公差为 $\pm 0.006 \text{ mm}$ 。靶盘、转轴通过多连杆柔性联轴器与磁流体真空密封传动单元SFL-010-NN连接。SFL-010-NN扭矩承受能力为 $13.5 \text{ N} \cdot \text{m}$,最大转速 $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。转靶系统靶室内部分支架和壳体整体加工,并被牢固固定在靶室底板上。

转靶装置的靶室外部分主要是电机-皮带传动结构。电机选用CROUZET公司无电刷马达。该电机有如下特点:

- 1) 无电刷,因而无磨损,无机械和电气噪声,无火花或干扰;
- 2) 内置电动机转速控制电路,无需外部驱动电路;

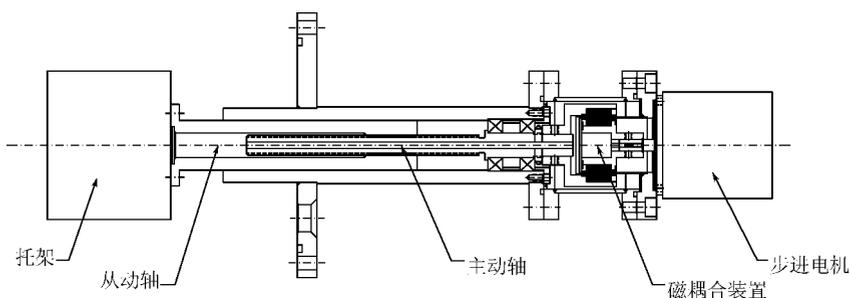


图3 真空密封磁耦合传动装置

Fig. 3 Sealed driver by coupling magnets

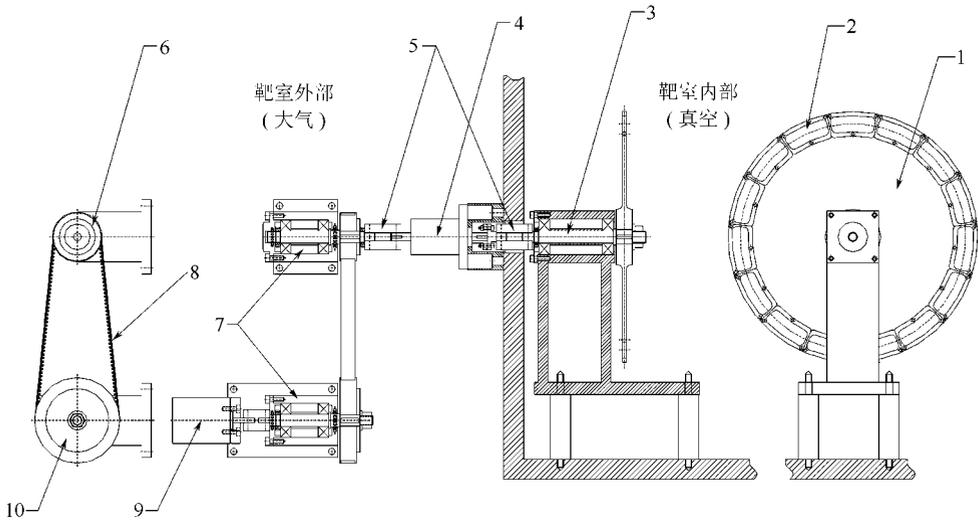


图4 超重实验靶室转靶装置

Fig. 4 Target wheel rotation setup

1——靶盘;2——反应靶;3——靶室内转动机构;4——磁流体真空传动;5——联轴器;
6——从动轮;7——靶室外传动机构;8——传动皮带;9——无级变速电机;10——主动轮

3) 无电刷设计超过了欧洲电磁兼容性指导性文件(EN550011, EN550022)的要求, 无需外部滤波器;

4) 包括转速控制, 通过简单的数字或模拟信号进行控制和无需编码器的闭环回路工作调整;

5) 内部转子系统, 加速迅速;

6) 启动扭矩 $100 \text{ mN} \cdot \text{m}$, 转速最大可达 $8\,300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$;

7) 过流、过热、过负载保护;

8) 脉冲信号输出, 每周 12 个输出脉冲, 用于监测电机转速。

因为无电刷设计, 该电机工作寿命长, 工作时无机械和电气噪声, 无火花或干扰, 运行可靠。

皮带传动机构采用 Martin Sprocker & Ger 公司的 HTD 皮带轮和 RS 公司同步传动皮带。主动轮 64 齿, 从动轮 32 齿, 齿距 5 mm, 变比为 2:1。皮带宽 15 mm。长度 700 mm, 齿距与皮带轮很好拟合。这种皮带传动机构不打滑, 运行平稳、可靠、安全。

电机、主动轴、主动皮带轮同心度和平行度 $< 0.05 \text{ mm}$, 从动皮带轮、从动轴同心度和平行度 $< 0.035 \text{ mm}$, 从动轴通过 RS 柔性联轴器与磁流体传动部件外端连接, 缓冲皮带传动机构

的震动影响。

该转靶装置已于 2004 年初超重实验的检验实验中进行过初步测试。靶盘装上 Pb 靶, 用模拟信号控制电机转速至 $1\,200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 靶盘转速 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 运转平稳, 靶盘摆幅 $< 0.2 \text{ mm}$ 。所有 Pb 靶完好。

3 结果与讨论

超重实验靶室和转靶系统安装后, 经过 1 次超重检验实验的检验, 初级靶室真空可达到 $7.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。真空密封磁耦合传动系统定位精度 0.25 mm 。通过调整直流电压控制转靶装置转动速率, 靶盘转速可达到 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 靶盘摆幅 $< 0.2 \text{ mm}$ 。在强度约为 10 nA 、能量 114 MeV ^{22}Ne 束流辐照下, 厚度 $300 \sim 500 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 Pb 靶未融化, 没有破裂。基本达到设计指标和检验实验要求。

考虑到合成超重元素反应截面为 pb (10^{-40} m^2) 量级, 计划将转靶系统做进一步改进。

1) 靶盘双轮夹层设计。反应靶与 C 箔构成 sandwich 结构, 改进电荷态剥离状态, 从而提高反冲-分离器的分析能力。

2) 反应靶与脉冲束流同步。为此, 修改靶盘设计, 设置测量反应靶扫过束流时间间隔探

测器,用该信号与加速器脉冲束流同步,避免束流辐照靶盘上 6.9% 的非靶区域,降低实验本底。

3) 电机程序控制。CROUZET 电机可用模拟信号控制转速,也可用脉冲信号控制。在超重实验的初步检验实验中使用模拟信号控制发现,因模拟信号电压幅度涨落引起电机转速出现一定涨落,这增加了反应靶与脉冲束流同步的难度。因此,拟改为脉冲信号驱动,提高电机转速的稳定性。

参考文献:

- [1] MUNZENBERG G. Superheavy elements—Discoveries and challenges[J]. Nucl Phys, 2001, A690:175c-183c.
- [2] OGANESSIAN Y, UTYONKOV V K, LOBANOV Y V, et al. Observation of the decay of $^{292}116$ [J]. Phys Rev, 2000, C63:011301(R).
- [3] GHIORSO A, YASHITA S, LEINO M E, et al. Sassy, a gas-filled magnetic separator for the study of fusion reaction products[J]. Nucl Instrum Methods, 1988, A269:192-201.
- [4] MIYATAKE H, NOMURA T, KAWAKAMI H, et al. S gas-filled recoil isotope separator[J]. Nucl Instrum Methods, 1987, B26:309-313.
- [5] MBNZENBERG G, FAUST W, HOFMANN S, et al. The velocity filter SHIP: A separator of unslowed heavy ion products[J]. Nucl Instrum Methods, 1979, 161:65-82.
- [6] YEREMIN A V, ANDREYEV A N, BOGDANOV D D. et al. The vassilissa facility for electrostatic separation and study of complete fusion reaction products[J]. Nucl Instrum Methods, 1989, A274:528-532.
- [7] ZHAN Wenlong, GUO Zhongyan, LIU Guanhua, et al. Radioactive ion beam line in Lanzhou [J]. Science in China, 1999, A42(5):528-536.