

## 6.3 — 24.6 MeV/u $^{40}\text{Ar} + {}^{\text{nat}}\text{W}$ 反应中 Hf 的生成研究

张翔 李文新 孙彤玉 尹新民 秦芝  
赵莉莉 吴定清 郑纪文 刘国兴

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-01-12 收稿

### 摘 要

用放射化学方法研究了 6.3 — 24.6 MeV/u  $^{40}\text{Ar} + {}^{\text{nat}}\text{W}$  反应中 Hf 的生成, 得到了 Hf 同位素的激发函数、反冲性质和同位素分布. 指出利用 HIRFL 能量的重离子和丰中子靶核作用, 能以一定的截面生成  $A > 170$  区丰中子新核素. 利用中能重离子的强穿透力特点, 使用厚靶, 可以明显地提高丰中子新核素的产额. 过高的入射能量对新核素生成无明显贡献.

**关键词**  $^{40}\text{Ar} + {}^{\text{nat}}\text{W}$ , 激发函数, 反冲性质, 同位素分布.

### 1 引 言

近年,  $A > 170$  区丰中子新核素的合成引起了人们的广泛兴趣, 利用很重的低能重离子和丰中子重靶之间的多核子转移反应已合成了若干个丰中子新核素<sup>[1-3]</sup>. 文献 [4] 利用核化学技术研究了 7.6 MeV/u  $^{40}\text{Ar}$ 、8.5 MeV/u  $^{84}\text{Kr}$  和 8.5 MeV/u  $^{136}\text{Xe}$  与  ${}^{\text{nat}}\text{W}/{}^{186}\text{W}$  反应中 Hf 和 Lu 的同位素分布, K. Alekett 等测定了 4.8 GeV 的  ${}^{12}\text{C}$  与重靶  ${}^{209}\text{Bi}$  相互作用的低靶产物 Au 的同位素分布<sup>[5]</sup>. 迄今, 尚未见到旨在合成丰中子新核素的中能重离子和重靶相互作用中余核生成研究的报道. 最近近物所的研究人员完成了 47 MeV/u  ${}^{12}\text{C}$  离子与重靶  ${}^{209}\text{Bi}$ <sup>[6]</sup> 和  ${}^{133}\text{Cs}$ <sup>[7]</sup> 反应时低靶产物的同位素分布, 并由此外推丰中子核素的截面值, 从而估计合成新的丰中子核素的可能性.

本工作报道 6.3 — 24.6 MeV/u  $^{40}\text{Ar} + {}^{\text{nat}}\text{W}$  反应中靶核削裂两个质子的产物 Hf 同位素的生成截面的测量结果. 这里选择  ${}^{\text{nat}}\text{W}$  做靶子是因为它有复杂的稳定同位素, 其中稳定同位素  ${}^{186}\text{W}$  (丰度 28.64%) 已伸入到丰中子核区, 具有较高的  $N/Z$  值, 是合成  $A > 170$  区高熔点重金属的丰中子新核素的理想靶材料.

## 2 实 验

### 2.1 靶子和照射

实验是在兰州重离子反应装置 HIRFL 上完成的, 用加速器提供的 25 MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  束流照射两组天然钨靶, 照射时的束流情况列在表 1 中. 两组天然钨靶有相同的结构, 分别由 6 片厚度为 6.5—9.8 mg/cm<sup>2</sup> 的金属钨及覆盖在其前后作为反冲收集箔的 Al 箔组成, 每两片钨靶中间插入一定厚度的 Al 箔作为降能片. 两组靶子的设计原则是使  $^{40}\text{Ar}$  离子到达化学分离靶组中的每片钨靶中心处的能量与其到达直接测量靶组中相应的钨靶中心处的能量近似相等. 束流经过 Al 箔和靶子, 到达每片靶子中心处的能量为: 24.6, 18.4, 14.7, 11.8, 8.5, 6.3 MeV/u.

表 1  $^{40}\text{Ar} + \text{nat}\text{W}$  反应的束流

	积分流强 ( $\mu\text{C}$ )	平均流强 (粒子/min)	照射时间 (h)
化学分离靶组	672	$1.4 \times 10^{11}$	33.0
直接测量靶组	803	$4.3 \times 10^{11}$	12.9

### 2.2 化学分离

照射结束后, 对其中的一组钨靶及其前冲收集箔进行化学分离. 首先给照射过的靶子中加入 Hf 载体和浓 HF, 再滴加浓  $\text{HNO}_3$  溶解靶子. 待靶子完全溶解后, 加入 La 载体以沉淀稀土元素. 给溶液中加入  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  溶液, 放置 1 分钟, 离心分离, 得到  $\text{BaHfF}_6$  沉淀. 用饱和的  $\text{H}_3\text{BO}_3$  及  $\text{HNO}_3$  溶液溶解沉淀, 再加入  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  溶液和浓 HF 以沉淀 Hf, 重复上述操作一次, 最后得到  $\text{BaHfF}_6$  沉淀, 并做成测量样品. 对于从前冲收集箔 Al 中分离 Hf, 首先将 Zr 载体和 La 载体加入盛有 Al 收集箔的塑料离心管中, 然后, 加入过量的 NaOH 溶液, 使 Hf 和镧系元素水解形成沉淀, 离心分离后, 用  $\text{HNO}_3$  溶解沉淀, 再进行与靶子完全相同的化学分离操作.

### 2.3 $\gamma$ 活性测量

测量系统是由四台刻度过效率的高纯锗探测器, MCB (919) 数据获取系统和一台微机组成. 照射结束后约 15 分钟开始对靶子和收集箔做  $\gamma$  活性测量. 照射结束后约 2 小时开始对经过化学分离的样品进行测量, 测量持续了七十多天.  $\gamma$  能谱分析, 放射性核素鉴别及截面计算, 均按照标准的核化学方法进行<sup>[8]</sup>. 通过高斯电荷分布假设得到核素的独立产额. 计算截面使用的核数据引自文献 [9].

## 3 结果及讨论

### 3.1 Hf 同位素的激发函数

实验中鉴别了 Hf 的 8 个同位素. 缺中子同位素测到  $^{170}\text{Hf}$ , 丰中子同位素测到  $^{183}\text{Hf}$ ,

未观察到丰中子核素  $^{184}\text{Hf}$ , 图 1 是 6.3—24.6 MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{W}$  反应中 Hf 同位素的激发函数.

从激发函数可以看出,  $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{W}$  反应中 Hf 的缺中子同位素的生成截面随炮弹的能量变化很大, 当炮弹能量超过库仑位垒后, 缺中子同位素的生成截面随炮弹能量的增加而迅速增加. 当炮弹能量达到中能区以后, 缺中子同位素的生成截面仍保持增长趋势, 但这种趋势已有所缓和. 对于丰中子同位素, 它们的生成截面与炮弹能量的依赖关系并不很强烈, 截面随炮弹能量的增加而增加的趋势比缺中子同位素缓慢得多, 并且随着核素向更丰中子区的延伸, 截面随炮弹能量的增加而增加的趋势愈来愈缓慢, 更重的 Hf 的丰中子同位素的截面随炮弹能量的增加没有明显的变化. 缺中子同位素与丰中子同位素激发函数形状的不同, 反映了它们起源于不同的反应机制, 前者可能起源于非完全融合或类复合核反应, 后者可能起源于转移反应或直接相互作用.

由此可见, 在 HIRFL 能区用中能重离子与丰中子靶核作用能产生丰中子的远离核. 利用中能重离子具有较强的穿透力的特点, 增加靶子的厚度可以大大提高丰中子远离核的产额, 从而有利于丰中子新核素的合成和鉴别. 这在  $^{208}\text{Hg}$  丰中子新核素的合成中已得到证明<sup>[10]</sup>. 但是, 过高的炮弹能量对于远离核的生成贡献不大, 相反大大增加了 Hf 缺中子同位素的产额, 增加了鉴别丰中子新核素的困难.

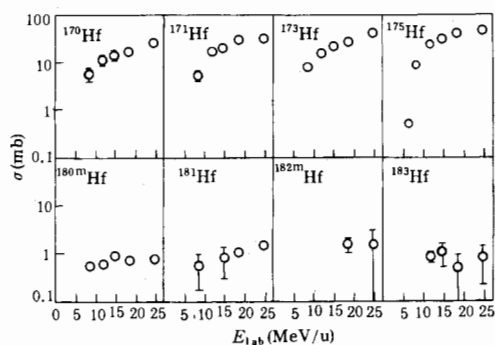


图 1 6.3—24.6 MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{W}$  反应中 Hf 同位素的激发函数

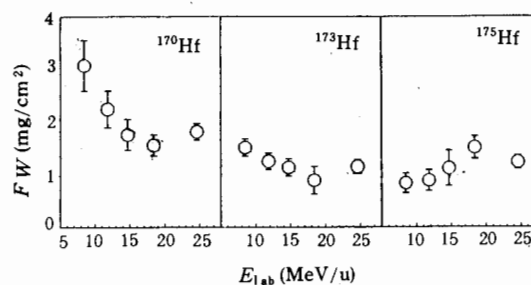


图 2  $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{W}$  反应中 Hf 同位素的 FW 值与炮弹能量的关系

### 3.2 反冲性质

放射化学技术研究反应中余核的反冲性质主要是通过对产物的截面进行测量, 计算平均前向射程  $FW$  值来进行的.  $FW$  值是指前冲收集箔中某核素的活性占该核素总活性的份数与靶厚的乘积. 图 2 给出了 Hf 同位素的  $FW$  值与炮弹能量的关系.

从图中可以看出,  $^{170}\text{Hf}$ 、 $^{173}\text{Hf}$  的  $FW$  值随炮弹能量的增加而降低, 但  $^{170}\text{Hf}$  的曲线斜率要比  $^{173}\text{Hf}$  的曲线斜率大, 而  $^{175}\text{Hf}$  的  $FW$  值却随着炮弹能量的增加而增加, 这种  $FW - E$  的依赖关系随 Hf 同位素质量数的逐渐演化过程预示着反应机制的变化, 即缺中子同位素和丰中子同位素的生成机制发生变化. 如果说激发函数可把缺中子同位素和丰中子同位素生成机制分为两大类, 那么核素的反冲性质是对反应机制区分的更为灵敏

的判据。由于束流强度的限制，本工作中没能得到更重的 Hf 同位素的反冲性质数据，但是，根据  $FW-E$  的依赖关系随 Hf 同位素质量数的逐渐演化趋势，丰中子核素的  $FW$  可能随炮弹能量的增加而增加。

在远离核分离和鉴别中，常用 He-jet 系统将反应产物很快地从靶室输送到实验室，He-jet 系统首先将反冲原子热化，再通过毛细管用 He 气将产物输送到实验室进行测量。本文得到的 Hf 同位素的反冲射程对于同类工作的 He-jet 系统设计和运行具有相当的参考意义。

分析实验数据，可以预期在较低的能区内更重的 Hf 的丰中子同位素的  $FW$  值小于缺中子同位素的  $FW$  值，因此，在合成  $A > 170$  区丰中子新核素中用 He-jet 系统进行传输时，应当采用薄靶或多层靶，使反应产生的大部分丰中子核素能够反冲出来，提高靶子的利用率。另外，气体的压力不应太强，He-jet 应尽量靠近靶子，这样，可以使  $FW$  较低的丰中子同位素被 He 气载带，而部分抑制缺中子同位素的载带，从而降低样品的放射性本底，提高探测灵敏度。

### 3.3 同位素分布

图 3 给出了不同能量的  $^{40}\text{Ar}$  离子与  $^{183}\text{W}$  相互作用中 Hf 的同位素分布。

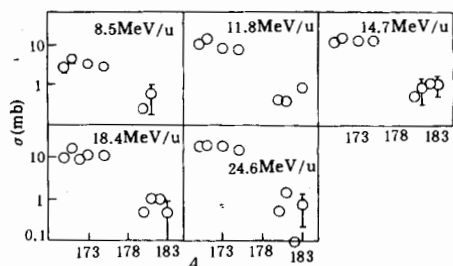


图 3  $^{40}\text{Ar} + ^{183}\text{W}$  反应中 Hf 的同位素分布

基于前面的讨论，缺中子同位素和丰中子同位素起源于不同的反应机制。根据反应机制，起源于同一反应机制的同位素可以用同一高斯函数拟合，因此，Hf 的缺中子同位素的独立产额可以用高斯函数来描述。由于本工作采用天然钨靶，它有五个稳定同位素，这样 Hf 的缺中子同位素的产额应当是多个高斯曲线的迭加，依然可以近似地用高斯函数再现。但是，本工作中只测得了不多几个基本上处于峰位的 Hf 的缺中子同位素，因此用高斯函数拟合并外推到丰中子远离核处是不合理的。另一方面，正如从图中看到的将丰中子同位素和缺中子同位素用单一高斯拟合<sup>[6,7]</sup>不仅理论上缺乏根据（起源于不同的反应机制），而且用这样的高斯曲线外推预言丰中子新核素产额将大大偏离实际值。

由此可见，由于 Hf 丰中子同位素产额相当低，在目前可采用的较弱束流条件下，要得到丰中子 Hf 同位素的更完整的数据仍有相当的困难，因此，尚不能可靠地给出远离稳定线新核素生成截面的预言值。但是，进一步提高束流强度以得到比较完整的丰中子同位素的数据，用同位素分布曲线外推丰中子核素的截面是可能的。

感谢赵之正、靳根明等在实验中给予的帮助及 HIRFL 加速器运行室和 VAX 中心提供了本工作所需要的条件。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] R. Kirchner *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A 378** (1982) 549.
- [ 2 ] K. Rykaczewski *et al.*, *Z. Phys.*, **A309** (1983) 273.
- [ 3 ] K. Rykaczewski *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A499** (1989) 529.
- [ 4 ] I. Zychor *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A414** (1984) 301.
- [ 5 ] K. Aleklett *et al.*, *Phys. Rev.*, **C23** (1981) 1044.
- [ 6 ] 杨维凡等, 高能物理与核物理, **17** (1993) 873.
- [ 7 ] 李宗伟等, 核化学与放射化学, **16** (1994) 178.
- [ 8 ] 李文新等, 原子能科学技术, **24** (1990) 60.
- [ 9 ] U. Reus *et al.*, *At. Data and Nucl. Data Table*, **29** (1983).
- [ 10 ] Zhang Li *et al.*, *Phys. Rev.*, **C49** (1994) 592.

### Production of Hafnium Isotopes From Interactions of $^{\text{nat}}\text{W}$ With 6.3—24.6 MeV/u $^{40}\text{Ar}$ Ions

Zhang Xiang   Li Wenxin   Sun Tongyu   Yin Xinmin  
Qin Zhi   Zhao Lili   Wu Dingqing   Zheng Jiwen   Liu Guoxing

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

Received 12 January 1995

#### Abstract

The yields of known hafnium isotopes produced in 6.3—24.6 MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{W}$  reactions were determined by  $\gamma$ -ray spectroscopy following radiochemical separations. The excitation functions,  $FW$  values and isotope distributions of hafnium were obtained. It is indicated that synthesis of new heavy neutron-rich isotopes is possible through the reactions induced by heavy ions at HIRFL energy region. The thick target is favorable for increasing the yields of neutron-rich nuclides far from the  $\beta$ -stability. However, further increasing incident energy is not always helpful to synthesize neutron-rich isotopes.

**Key words**  $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{W}$  reaction, excitation function,  $FW$  value, isotope distribution.