

使用 α 粒子轰击天然靶制备 $^{178m^2}\text{Hf}$ 同质异能素及样品 γ 能谱分析*

屠小青¹⁾ 周荣^{1)†} 代飞¹⁾ 杨天丽²⁾ 杨朝文¹⁾

1)(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

2)(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2014年3月6日收到; 2014年4月22日收到修改稿)

$^{178m^2}\text{Hf}$ 是一种长半衰期($T_{1/2} = 31$ a)、高自旋态($I^\pi = 16^+$) 的 Hf 同质异能素。利用四川大学 CS-30 回旋加速器产生的 30 MeV, 100 μA 的 α 束流轰击天然 Yb 靶, 通过 ^{176}Yb (α , 2n) 反应制备 $^{178m^2}\text{Hf}$ 。采用高纯 Ge 探测器测量未提纯样品和放化分离后的样品的 γ 能谱, 选取 $^{178m^2}\text{Hf}$ 的 426, 495 和 574 keV 三个特征峰, 使用高斯双峰拟合方法解谱, 确定了未提纯样品中 $^{178m^2}\text{Hf}$ 的含量达到 10^{12} 量级, 提纯后的样品中 $^{178m^2}\text{Hf}$ 含量为 10^{11} 量级。还对靶中其他放射性杂质核素(^{175}Hf , ^{172}Lu , ^{172}Hf , ^{177}Lu , ^{173}Lu)的含量进行了分析。

关键词: 同质异能素, $^{178m^2}\text{Hf}$, γ 能谱分析, 回旋加速器

PACS: 23.20.Lv, 29.30.Kv, 25.20.Lj

DOI: [10.7498/aps.63.162303](https://doi.org/10.7498/aps.63.162303)

1 引言

$^{178m^2}\text{Hf}$ 是 ^{178}Hf 的同质异能素, 其自旋角动量及宇称为 16^+ , 它具有高达 2.446 MeV 的高激发能, 半衰期长达 31 a。美国德克萨斯大学的 Collins 和 Carroll^[1] 提出某些同质异能素会发生低能 X 射线辐照加速退激现象, 并于 1999 年用一束低能 X 射线照射 $^{178m^2}\text{Hf}$ 原子核, 成功激发出比入射 X 射线强 60 倍的射线辐射^[2]。这意味着这些同质异能素中储存的能量能够可控地释放出来, 在研究原子核与 X 射线作用机理方面具有重要的意义, 并且在很多方面可能有潜在的应用价值。但 Collins 研究组是目前唯一声称观测到这种现象的研究组。Ahmad 等^[3] 重复了 Collins 研究组的实验, 却没有观察到 Collins 研究组所宣称的结果。因此, 有必要对 $^{178m^2}\text{Hf}$ 进行进一步的研究。

为了研究同质异能素中储存的能量是否能

被加速释放, 一个关键的问题是需要有足够量的同质异能素。 $^{178m^2}\text{Hf}$ 并不是天然存在的, 所以最直接的问题是如何产生足够量的 $^{178m^2}\text{Hf}$ 。国外学者就如何制备足够量的 $^{178m^2}\text{Hf}$ 进行了大量的研究工作。利用反应堆(n, n') 和 (n, xn) 反应可以制备 $^{178m^2}\text{Hf}$ 。文献[4, 5] 使用中子通量在 $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的热中子辐照 100—200 mg 的天然 HfO_2 长达 2 a 时间, 最终得到了 10^{12} — 10^{13} 个 $^{178m^2}\text{Hf}$ 核素。反应堆运行的高功率、极大的辐照量和运行周期长等特点能够弥补反应截面小这一不足, 但是相对于处于基态的核素, 同质异能素所占比率仍然很低, 还会产生大量的副产物, 并且耗时过长。另一种方法是使用高能 γ 射线诱发核反应(如 ^{181}Ta (γ , p2n) 反应)产生 $^{178m^2}\text{Hf}$ 。文献[6] 使用这种方法分别制备出了 $^{178m^2}\text{Hf}$ 。但是用此方法制得的靶样品中有很强的杂质核素放射性, 即使在经过化学提纯后仍然会有很高的 γ 射线本底残留。此外, 高能高强度的 γ 射线源一般较难得到。

* 国家自然科学基金(批准号: 11075142)资助的课题。

† 通讯作者。E-mail: zhourong@scu.edu.cn

1992年,在俄罗斯Dubna实验室的U-200回旋加速器上,Oganessian等^[7]用强度约为100 μA,能量约为35 MeV的α粒子轰击富集度为96%的Yb靶生产^{178m2}Hf,产额达到了 3×10^{14} 个^{178m2}Hf。随后,美国、德国、俄罗斯、乌克兰、比利时、法国、日本、英国和罗马尼亚9个国家约80位科学家在一个名为“Hf合作”的框架下开展^{178m2}Hf的制备工作。在研究了多种核反应(如¹⁷⁷Hf(n, γ), ¹⁷⁹Hf(n, 2n), ¹⁸¹Ta(p, α), ¹⁸¹Ta(p, 2p2n), ¹⁸¹Ta(γ, p2n)以及¹⁷⁶Yb(⁹Be, α 3n))后,Briancon^[8]最终使用浓缩的¹⁷⁶Yb制靶,采用¹⁷⁶Yb(α, 2n)^{178m2}Hf反应制备出 1.5×10^{15} 个^{178m2}Hf原子。

四川大学CS-30回旋加速器能够提供30 MeV,100 μA的α束流,是国内学者能够通过¹⁷⁶Yb(α, 2n)反应制备^{178m2}Hf的有效途径之一。但是纯的¹⁷⁶Yb同位素较贵,本文尝试使用天然Yb元素。天然Yb元素中含有多种Yb的同位素(¹⁶⁸Yb, ¹⁷⁰Yb, ¹⁷¹Yb, ¹⁷²Yb, ¹⁷³Yb, ¹⁷⁴Yb, ¹⁷⁶Yb)。在α粒子轰击天然Yb靶的过程中这些同位素会带来大量的反应副产物,从而降低^{178m2}Hf的相对活度,对样品测量产生影响。为此,本文研究了α粒子轰击天然Yb靶产生^{178m2}Hf的过程中面临的制靶、辐照、样品的γ能谱测量分析等问题,以期为^{178m2}Hf的制备和分析做前期的探索工作。

2 靶样品制备与辐照

本文使用磁控溅射法将天然Yb元素溅射到铜基底上,最终制备得到的Yb靶膜层厚度在200 μm左右,膜层面积为20 cm²。采用这种方法得到的膜层致密、附着性好并且具有良好的导热性,同时靶件基材选用耐高温、易导热的紫铜。

靶件的辐照过程是在四川大学CS-30回旋加速器上完成。此加速器能够提供能量为30 MeV左右、强度为100 μA左右的α束流,能够满足制靶要求。

辐照过程中,沉积在靶上的能量达到了数百瓦,所以我们在辐照的同时,使用高压冷却水进行冷却。

由于CS-30外靶系统未建立完善,辐照在回旋腔内进行,如图1所示。α束流在回旋腔内做圆周运动,靶件放置在最大回旋半径处,束流在此处

与靶相切,束流能量约为30 MeV、束流强度约为10—30 μA。经过50 h的轰击,制得最终样品。

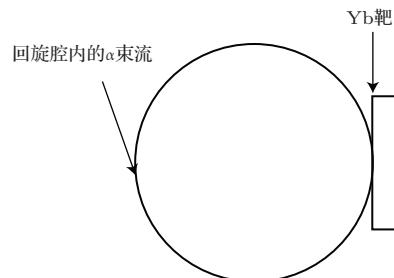


图1 靶件辐照过程示意图

为了减少短寿命、高放射性的反应副产物对测量分析的影响,样品经历了足够长时间的冷却,样品1从制靶完成到测量间隔了870 d,样品2间隔了630 d,样品3间隔了510 d。样品1经过放化分离提纯处理,样品2和样品3未经过提纯处理。

3 样品测量

本文使用美国Canberra公司生产的GC 12021型高纯Ge探测器探测γ能谱,此探测器相对于NaI探测器的探测效率为120%,探测器探头直径为102 mm。测量时,样品1与探测器的距离为1 cm,样品2和样品3与探测器距离均为55 cm。

图2所示为采用高纯Ge探测器测量得到的提纯后和未提纯的两种样品的γ能谱。从图2可以看出,无论是否经过提纯,γ能谱都很复杂,有很多杂质峰,γ能谱低能端有很高的康普顿坪,这给计算^{178m2}Hf含量时扣除本底带来了一定困难。

为了准确地确定能量和探测效率,我们选用¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu标准源做能量刻度,选用¹⁵²Eu标准源做效率刻度。将实验得到的能量刻度值和效率刻度值做多项式拟合以获得刻度曲线,结果如图3所示。

^{178m2}Hf衰变时会放射出88, 213, 216, 426, 495, 535, 574 keV等多条γ射线,但是由于其中一些特征峰的衰变分支比过小或受到样品中其他杂质放射出的γ射线的干扰,我们仅能清晰地辨识出样品中426, 495, 574 keV三个^{178m2}Hf特征峰(图4)。因此,选取这三个特征峰来计算^{178m2}Hf的含量。

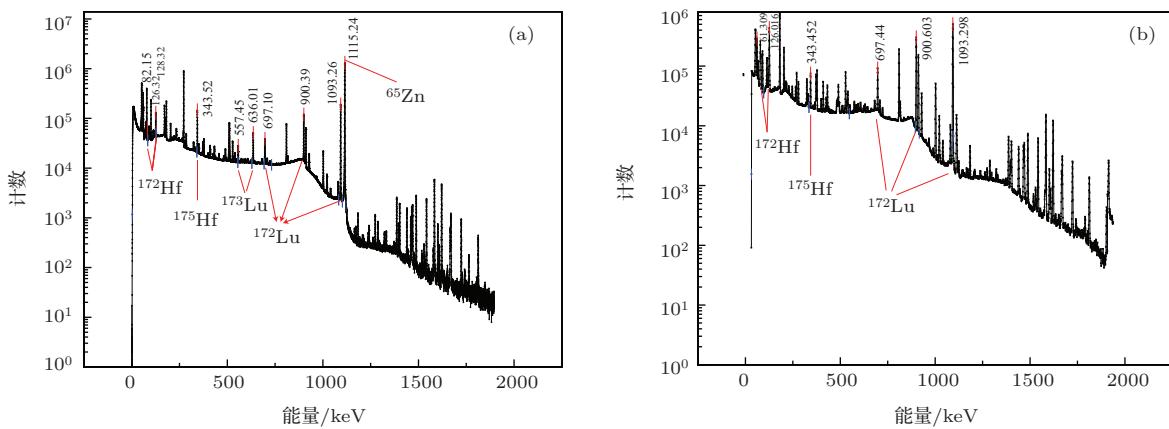
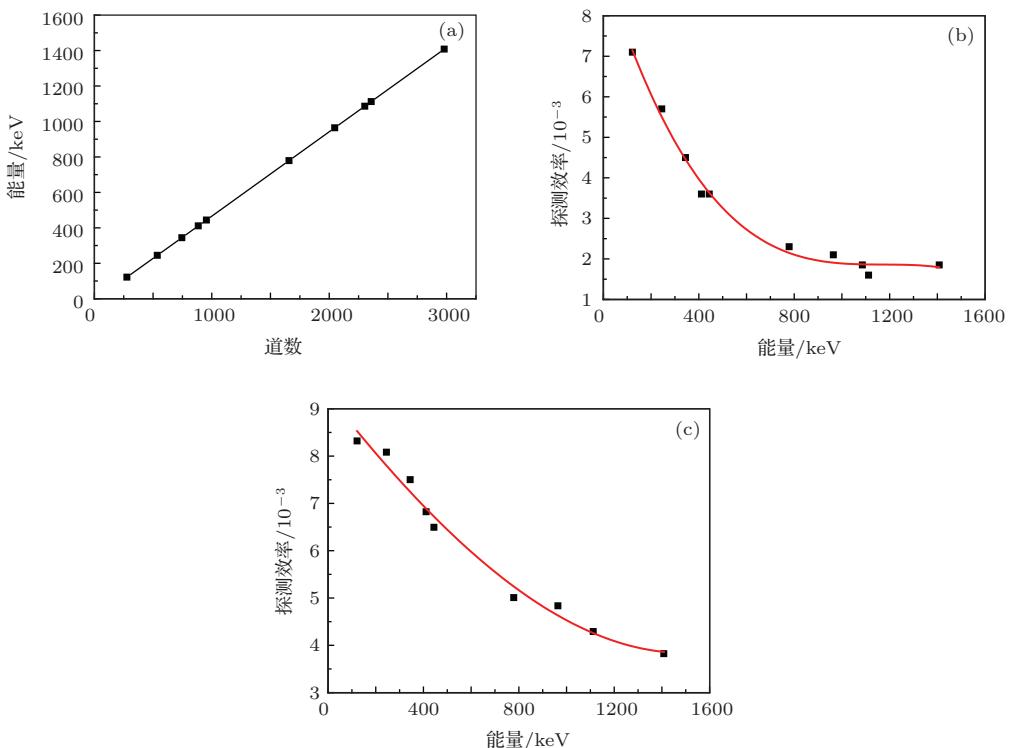
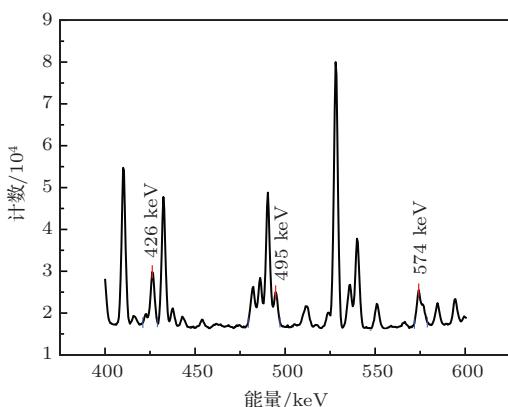
图2 未提纯和提纯的两种样品的 γ 能谱 (a) 未提纯样品; (b) 提纯样品

图3 能量刻度及效率刻度曲线 (a) 能量刻度; (b) 样品距探测器1 cm时的效率刻度; (c) 样品距探测器55 cm时的效率刻度

图4 样品1中 $^{178m^2}\text{Hf}$ 的特征峰

虽然这三个特征峰在能谱中能够被辨识，但是

它们仍然与其他核素的特征峰有大面积的重叠。下面采用两种方法分离重叠峰。第一种方法是采用传统方法直接按梯形面积扣除本底，结果如图5所示。表1列出了基于不同的特征峰(图5)计算得到的样品1中 $^{178m^2}\text{Hf}$ 的含量。

从表1可以明显地看出，基于三个特征峰计算得到的结果相差较大，说明这种扣除本底的方法并不能准确地得到特征峰的峰面积。为了得到更准确的结果，需要对重叠峰进行分离。鉴于放射性核素 γ 能峰一般服从高斯分布，首先采用高斯双峰拟合法从重叠峰中提取出特征峰，再进行计算得到每个特征峰的峰面积。

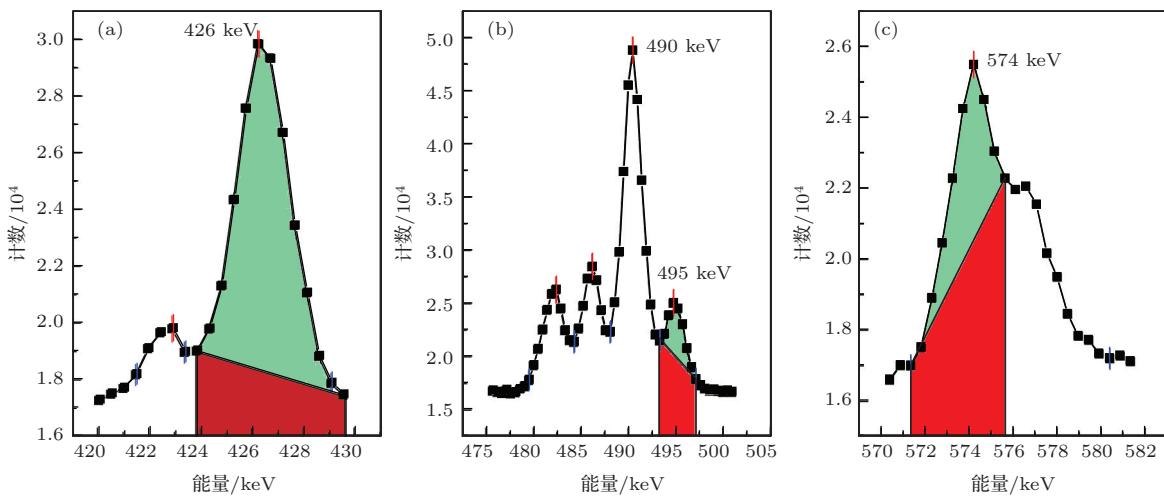


图5 用梯形面积法扣除特征峰本底示意图 (a) 426 keV 特征峰; (b) 495 keV 特征峰; (c) 574 keV 特征峰

表1 按梯形面积法扣除特征峰本底后计算得到的 $^{178m^2}\text{Hf}$ 含量

峰中心/keV	特征峰净面积	核素含量/ 10^{11}
426.4	53428	2.96
494.8	13233	1.14
574.1	12712	1.02

高斯双峰拟合方程为

$$C = C_0 + \frac{N_{\text{Hf}}}{\sigma_1 \sqrt{\pi/2}} e^{-2 \frac{(E_i - E_1)^2}{\sigma_1^2}} + \frac{N_O}{\sigma_2 \sqrt{\pi/2}} e^{-2 \frac{(E_i - E_2)^2}{\sigma_2^2}}, \quad (1)$$

其中, C_0 为基线高度; σ_1 , σ_2 为均方差; E_i 为道数; E_1 , E_2 为峰中心道数; N_{Hf} 为 $^{178m^2}\text{Hf}$ 的特征峰

净计数; N_O 为杂质峰净计数, C 为道数 E_i 对应的计数.

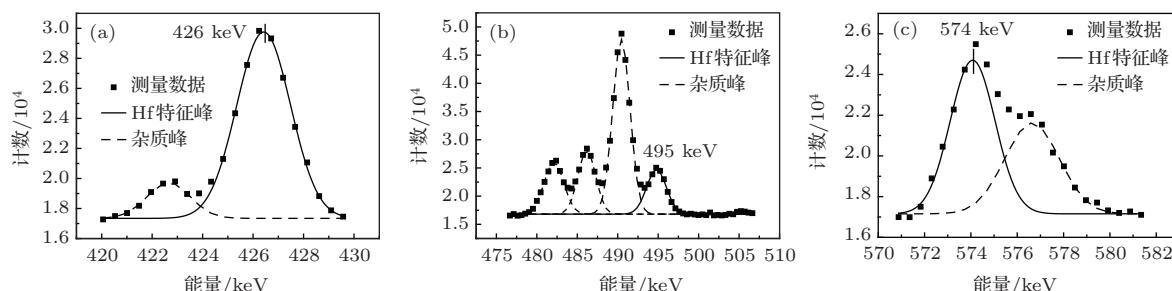
图6给出了采用高斯双峰拟合法得到的426, 495, 574 keV特征峰的拟合结果.

由于 $^{178m^2}\text{Hf}$ 半衰期为31 a, 在测量时间内可以不考虑活度的变化, $^{178m^2}\text{Hf}$ 含量可由下式计算得到:

$$N = N_{\text{Hf}} / (\lambda t \varepsilon \eta) = N_{\text{Hf}} T_{1/2} / (0.693 t \varepsilon \eta), \quad (2)$$

其中, $T_{1/2}$ 为 $^{178m^2}\text{Hf}$ 的半衰期, λ 为衰变常量, ε 为探测效率, t 为有效测量时间, η 为射线的衰变分支比.

样品1的测量时间 $t = 69735$ s. 表2列出了样品1中 $^{178m^2}\text{Hf}$ 含量的计算结果.

图6 采用高斯双峰拟合法得到的样品1中 $^{178m^2}\text{Hf}$ 特征峰的拟合结果 (a) 426 keV 特征峰; (b) 495 keV 特征峰; (c) 574 keV 特征峰表2 采用高斯双峰拟合法拟合得到的样品1中 $^{178m^2}\text{Hf}$ 特征峰数据及计算得到的 $^{178m^2}\text{Hf}$ 核素含量

峰中心/keV	峰左边界/keV	峰右边界/keV	特征峰半高全宽/keV	峰净计数	$^{178m^2}\text{Hf}$ 核素含量/ 10^{11}
426.3	423.4	428.6	2.51	32545	1.81
494.5	491.4	498.1	2.80	22747	1.85
573.8	571.3	576.6	2.32	18265	1.47

对^{178m2}Hf含量的计算结果做误差分析.
178m2Hf含量N的平均值

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2 + \cdots + N_n}{n}, \quad (3)$$

其中, N_1, N_2, N_3 分别为基于不同能量的^{178m2}Hf特征峰计算得到的样品中^{178m2}Hf核素的含量, n

是用于平均的值的个数. 根据(3)式计算得到样品1中^{178m2}Hf含量的平均值

$$\bar{N} = \frac{1.81 + 1.85 + 1.47}{3} \times 10^{11} = 1.71 \times 10^{11}.$$

不确定度

$$S(\bar{N}) = \sqrt{\frac{(N_1 - \bar{N})^2 + (N_2 - \bar{N})^2 + \cdots + (N_n - \bar{N})^2}{n(n-1)}}, \quad (4)$$

根据(4)式计算得到样品1中^{178m2}Hf含量的不确定度

$$S(\bar{N}) = \frac{\sqrt{(1.81 - 1.71)^2 + (1.85 - 1.71)^2 + (1.47 - 1.71)^2}}{3 \times 2} \times 10^{11} = 0.05 \times 10^{11}.$$

因此, 样品1中^{178m2}Hf的含量为 $(1.71 \pm 0.05) \times 10^{11}$.

由表2可知, 基于高斯双峰拟合法, 计算得到的^{178m2}Hf核素含量相差不大, 说明此方法可以较好地解析出复杂能谱中特征峰的面积, 从而准确得到相应核素含量.

样品2和样品3的能谱更为复杂, 含有更高的计数和更多的杂质峰. 下面用同样的方法对它们进行分析.

表3和表4分别列出了采用高斯双峰拟合法得到的样品2和样品3中^{178m2}Hf核素含量的计算结果. 根据(3), (4)式得到样品2和样品3中^{178m2}Hf核素含量分别为 $(1.39 \pm 0.06) \times 10^{12}$ 和 $(1.83 \pm 0.08) \times 10^{12}$.

由表3和表4可知, 高斯双峰拟合法可以较好地解析出复杂能谱中特征峰的面积, 从而准确得到相应核素含量. 对于本文实验测量的样品, 未提

纯的样品2和样品3中^{178m2}Hf的含量为 10^{12} 数量级, 经过提纯的样品1中^{178m2}Hf的含量为 10^{11} 数量级, 这为开展^{178m2}Hf核素相关实验的研究打下了一定的基础.

4 放射性杂质核素分析

本实验所用的靶是天然Yb靶, 由于天然Yb靶中含有多种Yb同位素, 也可能含有少量的杂质, 因此, 在束流照射下会产生放射性副产物. 铜基底材料也可能受到辐射而产生放射性副产物. 为了更全面地对样品进行分析, 有必要对样品中的其他放射性杂质核素进行研究. 表5和表6列出了在不同能量 α 束流照射下Yb同位素产生具有较长寿命核素的反应道. 表中, E_γ 为核素特征峰能量, I_γ 为特征峰的衰变分支比.

表3 采用高斯双峰拟合法拟合得到的样品2中^{178m2}Hf特征峰数据及计算得到的^{178m2}Hf核素含量

峰中心/keV	特征峰半高全宽/keV	峰净计数	^{178m2} Hf核素含量/ 10^{12}
426.3	1.53	6053	1.69
494.5	1.44	3149	1.26
573.8	1.53	3565	1.23

表4 采用高斯双峰拟合法拟合得到的样品3中^{178m2}Hf特征峰数据及计算得到的^{178m2}Hf核素含量

峰中心/keV	特征峰半高全宽/keV	峰净计数	^{178m2} Hf核素含量/ 10^{12}
426.3	1.69	5644	2.22
494.5	1.66	3022	1.70
573.7	1.50	3235	1.57

我们将 α 粒子与天然Yb反应产生的长寿命核素的特征峰与测量得到的能谱中的杂质峰进行对比, 确定了靶中含量较高的几种放射性杂质核素。选择对应核素的特征峰, 利用高斯多峰拟合方法计算相应的放射性杂质核素的含量, 计算结果列于表7。

表7所列的核素含量是通过分别计算各个核素的多个特征峰求得含量后再取其平均值得到的。由于只能观测到 ^{175}Hf 和 ^{65}Zn 两种核素的一个明显的特征峰, 所以没有给出测量不确定度。

未提纯样品中主要含有 ^{172}Lu , ^{175}Hf , ^{172}Hf , ^{173}Lu 和 ^{65}Zn , 其中, ^{175}Hf , ^{172}Hf , ^{173}Lu 是由 α 粒子与天然Yb同位素反应生成的; ^{172}Lu 是 ^{172}Hf 衰变得到的, ^{172}Lu 的半衰期短, 如果没有其他来源, 将与 ^{172}Hf 构成长期平衡, 所以本文仅计算了 ^{172}Lu 的活度, 计算得到样品1中 ^{172}Lu 的活度为 $(1.82 \pm 0.07) \times 10^4 \text{ Bq}$, 样品2中 ^{172}Lu 的活度为 $(1.73 \pm 0.008) \times 10^5 \text{ Bq}$, 样品3中 ^{172}Lu 的活度为 $(2.57 \pm 0.004) \times 10^5 \text{ Bq}$; ^{65}Zn 是由 α 粒子与铜反应生成的。

表5 在不同能量的 α 束流照射下Yb同位素产生具有较长寿命核素 ^{173}Lu 和 ^{175}Hf 的反应道

反应道	反应阈能/MeV	放射性核素	半衰期	E_γ/keV	$I_\gamma/\%$
$^{170}\text{Yb}(\alpha, n)^{173}\text{Hf}$	10.8		500 d	272.1	12.5
$^{171}\text{Yb}(\alpha, 2n)^{173}\text{Hf}$	17.6		—	557.4	0.33
$^{172}\text{Yb}(\alpha, 3n)^{173}\text{Hf}$	25.8	^{173}Lu	—	636.0	0.96
$^{173}\text{Yb}(\alpha, 4n)^{173}\text{Hf}$	32.3	$^{173}\text{Hf} \xrightarrow{\text{EC}+\beta^+, 23.6 \text{ h}} ^{173}\text{Lu}$	—	—	—
$^{174}\text{Yb}(\alpha, 5n)^{173}\text{Hf}$	40.0		—	—	—
$^{171}\text{Yb}(\alpha, \gamma)^{175}\text{Hf}$	2.5		70 d	343.4	84
$^{172}\text{Yb}(\alpha, n)^{175}\text{Hf}$	10.7		—	—	—
$^{173}\text{Yb}(\alpha, 2n)^{175}\text{Hf}$	17.2	^{175}Hf	—	—	—
$^{174}\text{Yb}(\alpha, 3n)^{175}\text{Hf}$	24.8		—	—	—
$^{176}\text{Yb}(\alpha, 5n)^{175}\text{Hf}$	37.8		—	—	—

表6 在不同能量的 α 束流照射下Yb同位素产生具有较长寿命核素 ^{172}Lu 和 $^{177\text{m}}\text{Lu}$ 的反应道

反应道	反应阈能/MeV	放射性核素	半衰期	E_γ/keV	$I_\gamma/\%$
$^{170}\text{Yb}(\alpha, d)^{172}\text{Hf}$	15.1		1.87 a	810.1	16.63
$^{171}\text{Yb}(\alpha, t)^{172}\text{Hf}$	15.4		—	900.7	29.8
$^{172}\text{Yb}(\alpha, tn)^{172}\text{Hf}$	23.7	^{172}Lu	—	1093.7	62.5
$^{173}\text{Yb}(\alpha, t2n)^{172}\text{Hf}$	30.2	$^{172}\text{Hf} \xrightarrow{\text{EC}+\beta^+, 1.87 \text{ a}} ^{172}\text{Lu}$	—	—	—
$^{174}\text{Yb}(\alpha, t3n)^{172}\text{Hf}$	37.8		—	—	—
$^{174}\text{Yb}(\alpha, p)^{177\text{m}}\text{Lu}$	9.6	$^{177\text{m}}\text{Lu}$	161 d	208.4	11
$^{176}\text{Yb}(\alpha, t)^{177\text{m}}\text{Lu}$	13.9	$^{177}\text{Tm} \xrightarrow{\beta^-, 23.6 \text{ h}} ^{177}\text{Yb}$	—	—	—
$^{176}\text{Yb}(\alpha, 3p)^{177}\text{Tm}$	25.3	$^{177}\text{Yb} \xrightarrow{\beta^+, 1.9 \text{ h}} ^{177\text{m}}\text{Lu}$	—	—	—

表7 靶中各杂质核素的含量

杂质核素种类	样品1	样品2	样品3
^{175}Hf	4.35×10^9	3.3×10^{11}	1.79×10^{12}
^{172}Hf	$(1.52 \pm 0.14) \times 10^{12}$	$(1.25 \pm 0.02) \times 10^{13}$	$(1.22 \pm 0.01) \times 10^{13}$
^{173}Lu	无	$(6.47 \pm 0.19) \times 10^{13}$	$(9.52 \pm 0.14) \times 10^{13}$
^{65}Zn	无	4.74×10^{13}	6.01×10^{13}

由表 7 还可知, 样品 2 和样品 3 中 ^{172}Hf , ^{172}Lu 和 ^{65}Zn 的含量都达到了 10^{13} , 比 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 含量高出一个数量级, ^{172}Lu 的活度也很高。样品 1 中不含 ^{65}Zn 和 ^{173}Lu , 与样品 2 和样品 3 相比, 除 ^{175}Hf 外, 其他杂质核素都减少了一个数量级以上, 这说明样品的分离提纯对减少杂质核素有很好的效果, 但代价是减少了 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 含量。

通过分析样品 1 发现, 其中 ^{172}Hf 与 ^{172}Lu 构成长期平衡, 二者活度相等。但未提纯的样品 2 和样品 3 中, ^{172}Lu 活度都大于 ^{172}Hf 活度。因此可以判断, ^{172}Lu 不仅来源于 ^{172}Hf 的衰变, 在 α 粒子与天然 Yb 反应中存在直接生成 ^{172}Lu 的反应。

利用 ^{175}Hf 核素含量、 ^{172}Hf 核素含量推算得到最初样品中 ^{175}Hf 核素含量 $N_{^{175}\text{Hf}}$ 、 ^{172}Hf 核素含量 $N_{^{172}\text{Hf}}$, 并与 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 核素含量 N 做比较, 所得结果列于表 8。

表 8 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 与其他 Hf 同位素的含量比

	样品 1	样品 2	样品 3
$N/N_{^{175}\text{Hf}}$	7.1×10^{-3}	7.5×10^{-3}	6.6×10^{-3}
$N/N_{^{172}\text{Hf}}$	0.0465	0.0568	0.087

由表 8 可知, 三个样品中 ^{175}Hf 与 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 的含量比基本一致, 这是合理的结果。但是, 样品 3 的 ^{172}Hf 含量明显较另外两个样品的 ^{172}Hf 含量少, 具体原因还需要做进一步的研究。

5 结 论

本文使用天然 Yb 元素制靶, 在 CS-30 回旋加速器上, 基于 ^{176}Yb (α , 2n) 反应制备 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 同质

异能核素。对三个样品中 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 同质异能核素及其他杂质核素的含量进行了测量和分析。用高斯多峰拟合方法扣除本底, 相较于传统的梯形面积法, 此方法大幅度降低了结果的相对误差。测量得到的未经提纯的样品中 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 含量皆为 10^{12} 数量级, 经提纯处理后的样品中 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 的含量较未提纯样品中 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 的含量降低了一个数量级, 提纯后的样品中杂质元素的种类及含量都大幅度减少。这些结果对 $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ 的生产具有重要的参考价值。

感谢四川大学核工程与核技术实验室吴丽萍副教授的指导帮助。

参 考 文 献

- [1] Collins C B, Carroll J J 1997 *Hyperfine Interact.* **107** 3
- [2] Collins C B 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 695
- [3] Ahmad I, Banar J C, Becker J A, Gemmell D S, Kraemer A, Mashayekhi A, McNabb D P, Miller G G, Moore E F, Pangault L N, Rundberg R S, Schiffer J P, Shastri S D, Wang T F, Wilhelmy J B 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 072503
- [4] Helmer R 1968 *Nucl. Phys. A* **114** 649
- [5] Helmer R G, Reich C W 1973 *Nucl. Phys. A* **211** 1
- [6] Kutschera W, Ahmad I, Childs W J, Janssens R V F, Pardo R C 1989 *Proceeding of the First International Conference on Radioactive Nuclear Beams* (Singapore : World Scientific) pp1–11
- [7] Oganessian Yu Ts, Karamian S A, Gangrski Y P, Gorski B, Markov B N, Szeglowski Z, Briancon Ch, Ledut D, Meunier R, Hussonnois M, Constantinescu O, Subhotin M I 1992 *Nucl. Part. Phys.* **18** 393
- [8] Briancon C 1994 *Proceedings of the 8th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics* (Singapore: World Scientific) pp192–206

Isomer $^{178m^2}\text{Hf}$ prepared by using α particles to bombard a natural ytterbium target and analysis of high purity Ge γ spectrum*

Tu Xiao-Qing¹⁾ Zhou Rong^{1)†} Dai Fei¹⁾ Yang Tian-Li²⁾ Yang Chao-Wen¹⁾

1) (College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

2) (Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 6 March 2014; revised manuscript received 22 April 2014)

Abstract

$^{178m^2}\text{Hf}$ isomer is of great importance in science and application. Using natural ytterbium bombarded by α particles to produce $^{178m^2}\text{Hf}$ through $^{176}\text{Yb}(\alpha, 2n) ^{178m^2}\text{Hf}$ nuclear reaction may be a low-cost way. Three natural ytterbium targets of about 200 μm in thickness are fabricated by magnetron sputtering of natural Yb onto copper substrates, and then irradiated with 30 MeV, 50 μA α beam in the CS-30 cyclotron for about 50 hours. After cooling, Hf is isolated from one target through chemical isolation. Gamma spectra of two targets and the isolated Hf sample are measured with high purity Ge detector. Overlapping peaks of the complex spectrum are separated by using Gaussian multi-peak fitting. The content of $^{178m^2}\text{Hf}$ nuclide is identified to be 10^{12} orders of magnitude in each target, and 10^{11} orders of magnitude in the purified sample from chemical isolation. The content values of other radioactive nuclides (^{175}Hf , ^{172}Lu , ^{172}Hf , ^{177}Lu , ^{173}Lu) in targets are also measured.

Keywords: isomer, $^{178m^2}\text{Hf}$, γ energy spectra analysis, cyclotron

PACS: 23.20.Lv, 29.30.Kv, 25.20.Lj

DOI: [10.7498/aps.63.162303](https://doi.org/10.7498/aps.63.162303)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11075142).

† Corresponding author. E-mail: zhourong@scu.edu.cn