

基于 PGNA 技术的 Hf 元素测量研究

贾文宝¹, 崔昱萌¹, 王 宁², 王泽亮¹, 张镇华¹, 张 焱³, 程 璨⁴

- (1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 江苏 南京 211106;
2. 中国合格评定国家认可中心 校准实验室认可部, 北京 100062;
3. 东华理工大学 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 江西 南昌 330013;
4. 南京工业大学 电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 板状核燃料被广泛应用于小型模块化反应堆。在核燃料元件中引入中子毒物可以实现燃料的高效使用, Hf 是一种常见的中子毒物, 在该类核燃料组件中应用广泛。为保证核燃料在使用过程中的安全性, 对其内部中子毒物含量的精确检测十分重要。本研究利用瞬发伽马中子活化分析 (Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis, PGNA) 技术对 Hf 元素进行了测量分析, 基于 D-T 中子发生器和高纯锗探测器搭建的 PGNA 装置, 对 Hf 板材样品展开测量, 结果显示该系统对 Hf 元素的质量检测限为 3.89 g。同时, 建立了测量装置的蒙特卡罗模拟模型, 计算了中子激发产生的特征伽马射线, 计算结果与试验测量结果的偏差小于 10%, 验证了该模型的有效性。研究结果为将 PGNA 技术应用于核燃料元件中 Hf 元素含量的定量测量提供了依据。

关键词: 瞬发伽马射线中子活化分析 (PGNA); Hf 元素; D-T 中子发生器; 蒙特卡罗模拟; 中子毒物; 板状核燃料

中图分类号: TL27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)01-0115-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.06.11

近年来, 小型模块化反应堆因其灵活性与适用性, 引起了广泛关注^[1]。在各种核燃料元件中, 板状燃料元件具有传热面积大、传热效率高和结构紧凑等特点, 满足小型模块化反应堆的需求^[2]。由于核燃料元件具有较高的吸收截面, 通常会加入可燃中子毒物以捕获热中子, 从而使功率分布平坦化, 实现核燃料的高效利用并延长堆芯的运行周期^[3-4]。

铪 (Hf) 是一种常见的中子毒物, 具有较强的中子吸收能力, 通常作为可燃毒物被添加到核燃料芯块中或直接作为控制棒的材料, 已被广泛应用于轻水堆、动力堆和研究堆中^[5-6]。目前, 针对 Hf 元素的检测方法主要有加速器质谱法 (AMS)^[7]、电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICPAES)^[8] 以及电感耦合等离子体质谱法 (ICPMS)^[9-10]。这些方法尽管精度较高, 但通常需要在实验室环境下检测, 且无法对燃料内部进

行精确测量。因此, 在核燃料生产过程中, 准确、在线测量 Hf 含量十分重要。瞬发伽马射线中子活化分析 (Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis, PGNA) 是一种用于多元素分析的无损技术, 通过中子与被测样品中的核素发生辐射俘获或非弹性散射反应, 释放出具有特定能量的特征伽马射线, 通过处理伽马射线的能量和计数实现对样品中核素的定性分析和定量分析^[11]。目前 PGNA 技术已经在环境科学、危险材料检测, 以及工业材料检测等领域得到广泛应用^[12-15]。

在基于 PGNA 技术的中子毒物检测方面, 张镇华等利用 AmBe 中子源对 Er_2O_3 样品中的 Er 元素含量进行测量, 并对大体积样品检测过程中的中子自屏蔽效应进行了分析^[16]。Xie 等基于 AmBe 中子源对水溶液中的 Gd 元素含量进行了在线监测分析研究^[17]。随着中子发生器技术的

收稿日期: 2025-06-26; **修回日期:** 2025-07-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0717003); 国家自然科学基金 (42374226); 江苏省市场监督管理局科技计划项目 (KJ2024009)

通信作者: 张焱, 程璨

不断发展,对基于 D-D 和 D-T 中子发生器的 PG-NAA 也进行了大量研究。在前期工作中,利用基于 D-T 中子发生器,通过快中子激发产生的伽马射线对 Er_2O_3 样品进行了测量,结果显示其中子自屏蔽效应低、测量灵敏度较低^[18]。本研究基于前期搭建的 PGNAA 装置^[19],对 Hf 板状样品进行测量,对基于热中子俘获反应测量 Hf 元素的效果进行分析。同时,利用蒙特卡罗模拟软件搭建模型,并将测量结果与蒙特卡罗计算结果进行对比,以期后续装置的优化设计提供参考。

1 试验装置及原理方法

1.1 PGNAA 系统

图 1 为 PGNAA 系统示意图。本试验所采用的 D-T 中子发生器由东北师范大学研制,高压设置为 75 kV,离子电流为 350 μA 。石墨反射器的尺寸为 40 cm $\times$ 40 cm $\times$ 25 cm,将 D-T 中子发生器装入石墨反射器中,并沿着反射器的内边界放置。选择的慢化材料为钨、铁和聚乙烯,其厚度分别为 4、6、5 cm。

本试验采用的探测器为 ORTEC 的 N 型 HPGe 探测器 (TRANSSPEC),其在 1 333 keV 处

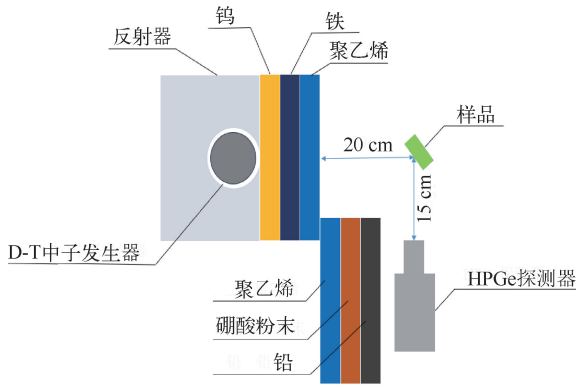


图 1 PGNAA 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the PGNAA system

提供 55% 的相对效率和 1.9 keV 的分辨率。探测器用 5 cm 厚的硼酸粉末和 5 cm 厚铅块屏蔽,将其放置在相对于水平轴 90° 的位置。板状 Hf 样品相对 HPGe 探测器轴成 45° 放置。从样品中心到聚乙烯和探测器的距离分别为 20、15 cm。

1.2 样品参数

从 Hf 发射的主要瞬发伽马射线及其他特征见表 1。Hf 含量主要通过 $^{177}\text{Hf}(n,\gamma)^{178}\text{Hf}$ 和 $^{178}\text{Hf}(n,\gamma)^{179}\text{Hf}$ 两种反应来确定^[20]。

表 1 Hf 样品的质量、尺寸、特征伽马射线及相应横截面

Table 1 Mass, size, characteristic gamma rays and associated cross sections of the hafnium sample

反应过程	样品质量/g	样品尺寸	特征伽马能量/MeV	反应截面/barn ^①
$^{177}\text{Hf}(n,\gamma)^{178}\text{Hf}$	5.44	1.18 cm $\times$ 3.50 cm $\times$ 0.10 cm	0.214	29.3 $\pm$ 0.7
$^{178}\text{Hf}(n,\gamma)^{179}\text{Hf}$				22.0 $\pm$ 0.9

注:①1 barn=10⁻²⁴ cm²。

由热中子俘获反应和超热中子俘获反应产生的能量为 E 的瞬发伽马射线的净计数为^[21]

$$A_E = \phi_{\text{thermal}} \left[1 + \left(0.44 + \frac{I}{\sigma} \right) f \right] \cdot \frac{m}{M} N_A \sigma_E \epsilon t, \quad (1)$$

式中: A_E —能量为 E 的瞬发伽马射线的净计数; ϕ_{thermal} —样品内的平均热中子通量, cm⁻² · s⁻¹; I —共振积分截面, cm²; σ —吸收截面, cm²; f —超热中子通量与热中子通量之比; m —核素的质量, g; M —摩尔质量, g/mol; N_A —阿伏伽德罗常数; σ_E —能量为 E 的伽马射线截面, cm²; ϵ —探测效

率; t —采集时间, s。

1.3 钢活化片测量

由式(1)可看出,热中子通量和超热中子通量是计算过程中的重要参数,本工作利用钢(In)活化片进行通量测量。为了区分中子能谱组分,在两个钢片上分别覆盖厚度为 1 mm 的镉(Cd)和铝(Al)。由于其中 Cd 会吸收热中子,仅允许超热中子通过;而 Al 基本不吸收热中子,因此通过覆盖 Al 的钢片可得到总中子通量,然后通过差值计算得到热中子通量。将钢片放置在聚乙烯的中心处,钢片被辐照活化,在经过冷却期后,使用放置在铅屏蔽室内

的 HPGe 探测器对其进行分析。钢片反应速率(R)的计算公式为^{[22]S259}

$$R = \frac{NM e^{\lambda t_2}}{N_A m_{\text{In}} f_a f_\gamma \epsilon_\gamma t_3 (1 - e^{-\lambda t_1})}, \quad (2)$$

式中: N —缓发伽马射线的净计数; m_{In} —钢的质量,g; M —摩尔质量,g/mol; N_A —阿伏伽德罗常数; λ —衰变常数,1/s; f_a — ^{115}In 的丰度; f_γ —缓发伽马射线的发射几率; ϵ_γ —缓发伽马射线的探测效率; t_1 —照射时间,s; t_2 —冷却时间,s; t_3 —测量时间,s。其中, N 、 m_{In} 、 t_1 、 t_2 、 t_3 通过试验测量获得, ϵ_γ 由蒙特卡罗模拟获得。

热中子通量(ϕ_t)和超热中子通量(ϕ_e)的计算公式为^{[22]S260}

$$\phi_t = \frac{1}{G_{\text{th}} g \sigma_{\text{In}}} \left[R_{\text{Al}} - R_{\text{Cd}} \left(1 + \frac{g \sigma_{\text{In}}}{G_{\text{res}} I_{\text{In}}} f_1 + \frac{\sigma_{\text{In}} w'}{G_{\text{res}} I_{\text{In}}} \right) \right], \quad (3)$$

$$\phi_e = \frac{R_{\text{Cd}}}{I_{\text{In}}}, \quad (4)$$

式中: σ_{In} —In 的俘获截面, cm^2 ; I_{In} —俘获截面的共振积分, cm^2 ; R_{Al} —覆盖铝片的钢片反应速率,1/s; R_{Cd} —覆盖镉片的钢片反应速率,1/s; g —Westcott 因子; f_1 —超热中子区域中探测器对“ $1/v$ ”反应截面的积分响应; w' —在超热中子区域中探测器反应截面偏离“ $1/v$ ”趋势时对反应速率的修正因子; G_{th} —热中子的自屏蔽因子; G_{res} —超热中子的自屏蔽因子。其中钢片的反应速率可由公式(2)计算获得,其余参数由相关文献查阅获得^[23]。钢片的详细参数和测量时间见表 2。

1.4 蒙特卡罗模拟

GAMOS(Geant4-based Architecture for Medicine-oriented Simulations)是一个基于 Geant4 工具包的蒙特卡罗模拟框架,旨在通过用户友好的脚本接口简化复杂物理场中的粒子输运模拟^[24]。本研究使用 GAMOS 6.1.0 进行模拟。D-T 中子发生器

模型由壁厚为 0.5 cm 的铝圆筒组成,内部空间设置为真空。中子源设置为各向同性的点源,可发射出 14.1 MeV 的单能中子。HPGe 探测器模型基于制造商提供的规格参数进行创建。利用 QGSP_BIC_HP 物理表和 GENDL 4.5 截面数据库对中子在材料中的输运进行模拟。

表 2 钢片活化过程中的参数

Table 2 Parameters used in the activation of indium foils

参数	数值	
	钢片+镉片	钢片+铝片
$\sigma_{\text{In}}/\text{barn}$	166±1	
G_{th}	0.742	
G_{res}	0.128	
g	1.019 4	
I/barn	2 680±85	
f_1	0.468	
w'	0.295 3	
λ/s^{-1}	2.13×10^{-4}	
f_a	0.957	
m/g	0.84	0.90
t_1/s	7 200	
t_2/s	540	780
t_3/s	1 800	2 400

2 结果讨论

2.1 中子通量测量结果

利用 $^{116\text{m}}\text{In}$ 的 0.417 MeV 缓发伽马射线特征峰来测量热中子通量和超热中子通量。测量过程中的重要参数及计算结果见表 3,其中 ϵ_γ 和 f_γ 如式(2)所述, $N_{\text{In+Al}}$ 为覆盖铝的钢片发射缓发伽马射线的净计数, $N_{\text{In+Cd}}$ 为覆盖镉的钢片发射缓发伽马射线的净计数,通过式(3)~式(4)计算 ϕ_t 和 ϕ_e 。其中的不确定度主要源于伽马射线计数的统计性误差、截面的不准确度及较低的探测效率,其他参数的贡献可以忽略。中子通量的总体不确定度可以通过标准程序来计算。

表 3 钢活化片测量得到的热中子通量和超热中子通量

Table 3 Thermal and epithermal neutron fluxes measured using indium activation foils

缓发伽马射线/MeV	ϵ_γ	f_γ	$N_{\text{In+Al}}$	$N_{\text{In+Cd}}$	$\phi_t/(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\phi_e/(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
0.417	0.077 8	0.272	17 604±132	6 163±78	185.3±6.0	7.0±0.2

D-T 中子源的产额也可以通过将试验结果与蒙特卡罗模拟相结合来计算^[25-26]。为了确定 D-T 中子发生器的产额,用 GAMOS 计算钢片内的中

子能谱,记录钢片中的中子通量,并以每个中子为基础进行归一化,结果为 $5.86 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2}$ 。然后,将平均测量的热中子通量除以模拟值,得到

D-T 中子发生器的中子产额为 $(3.28 \pm 0.10) \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 。

2.2 瞬发伽马射线计数的计算

通过模拟中子输运过程,计算得到在 Hf 样品内的中子能谱(图 2)。将中子能谱中的归一化计数乘以 D-T 中子发生器的中子产额即可得到实际的中子能谱。从能谱中提取出能量小于 0.5 eV 的热中子通量,计算 Hf 样品中的平均热中子通量,结果为 $(30.4 \pm 0.9) \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据表 3 可知,超热中子通量与热中子通量的比率为 0.035。

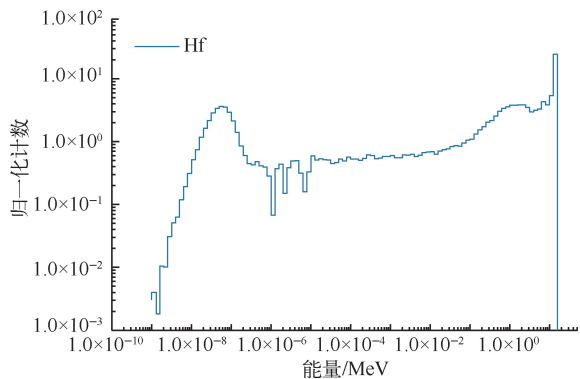


图 2 Hf 样品的中子能谱

Fig. 2 Neutron energy spectrum of Hf sample

通过 GAMOS 计算沉积在锗晶体中的能力来确定 0.214 MeV 伽马射线的探测效率。在模

拟中,样品被定义为发射概率 100%、各向同性,并发射 0.214 MeV 的伽马射线源。根据式(1)计算瞬发伽马射线的计数,结果见表 4,其中 A_{Ec} 代表瞬发伽马射线净计数。

表 4 计算得到的 Hf 样品 0.214 MeV 伽马射线计数
Table 4 Calculated 0.214 MeV gamma rays counts of Hf sample

参数	数值	
	$^{177}\text{Hf}(n,\gamma)^{178}\text{Hf}$	$^{178}\text{Hf}(n,\gamma)^{179}\text{Hf}$
E_γ/MeV	0.214	
$\Phi_{\text{thermal}} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	30.4 ± 0.9	
ϵ	4.60×10^{-3}	
σ/barn	373 ± 10	84 ± 4
I/barn	$7\,173 \pm 200$	$1\,950 \pm 120$
t/s	14\,400	
A_{Ec}	$1\,828 \pm 100$	$1\,485 \pm 138$

2.3 瞬发伽马射线能谱分析

图 3 展示了 Hf 和本底的瞬发伽马射线谱。本底能谱表示在不存在 Hf 的情况下由 HPGe 探测器记录的伽马射线谱。可以看出,热中子会与锗晶体发生相互作用, $^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{77m}\text{Ge}$ 反应(半衰期 52.9 s)和 $^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{77}\text{Ge}$ 反应分别会产生 0.211 MeV 和 0.215 MeV 峰。它们会与 Hf 的 0.214 MeV 特征峰发生干扰。

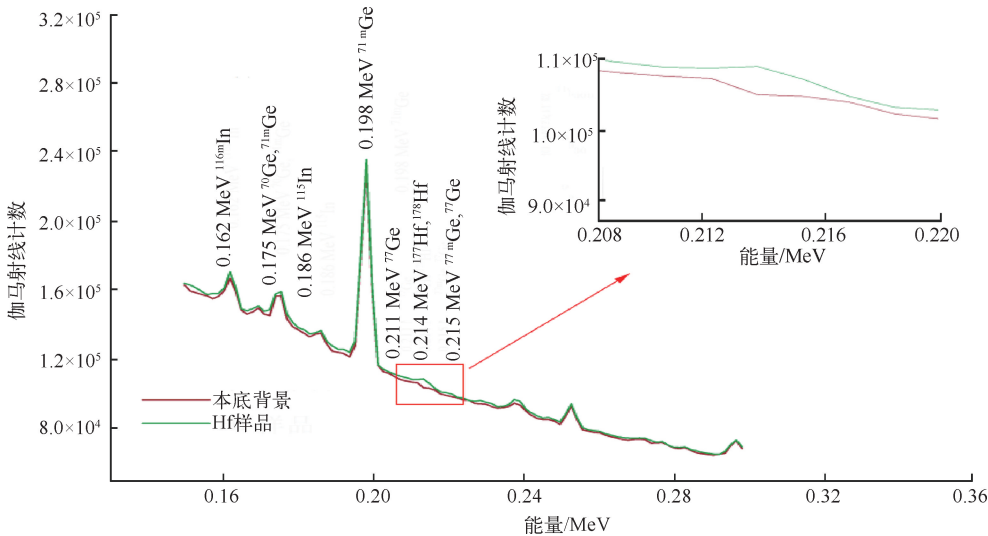


图 3 Hf 和空白样品的瞬发伽马能谱

Fig. 3 Prompt gamma-ray energy spectra of Hf and blank samples

采用 Origin 软件中的高斯 (Gaussian) 函数对 Hf 的特征峰进行拟合分析,其具体形式为^[27]

$$y = y_0 e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

式中: x —能量值, MeV; y —在能量值为 x 处

的计数; y_0 —峰中心处的计数; μ —峰中心位置的能量值, MeV; σ —标准差, MeV。选择能量范围为 0.206~0.225 MeV, 利用线性基线模型^[28]确定基线, 结果见图 4(a); 为了获得更清晰的对比, 扣除基线后的拟合见图 4(b)。

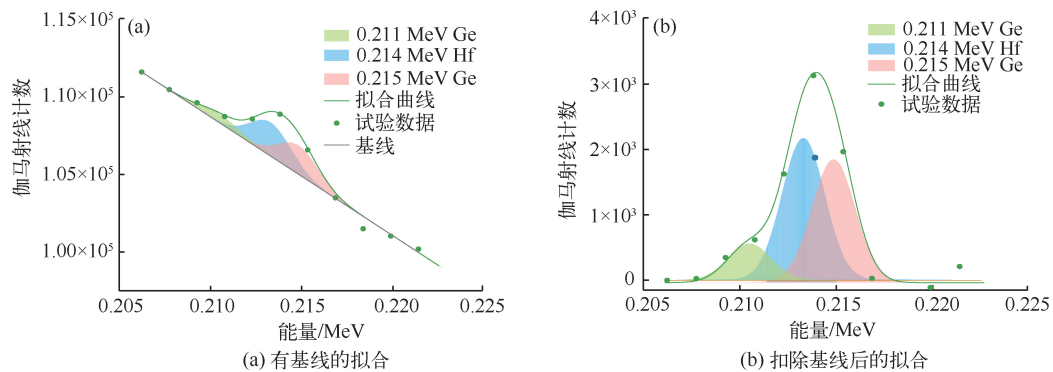


图 4 Hf 在 0.214 MeV 处的拟合峰

Fig. 4 Curve-fitted peak of Hf observed at 0.214 MeV

图 4(b) 中的主要参数见表 5。对于 Hf 的 0.214 MeV 特征峰, 通过峰面积计算得到瞬发伽马射线的计数 A_{Ec} 为 $3\,668 \pm 61$ 。与表 4 中计算得到的 A_{Ec} 相比, 试验测得的 0.214 MeV 瞬发伽马射线净计数与模拟结果吻合良好, 两者的偏差在 10% 以内。对比结果表明, 所建立的 GAMOS 模拟计算模型可以应用于计算热中子激发产生的 Hf 的伽马射线, 能够为后续装置的优化设计提供指导。

表 5 峰拟合过程中的重要参数

Table 5 Important parameters in peak fitting process

特征峰能量/MeV	y_0	μ/MeV	σ/MeV	A_{Ec}
0.211	600.429	0.210	0.013	1 023
0.214	2 153.836	0.213	0.013	3 668
0.215	1 792.286	0.215	0.013	3 053

由于本试验所采用的 Hf 样品很小, 因此本次可以忽略样品引起的散射干扰^[29]。在以后的研究中对较大的试验样品进行分析时, 应当考虑样品散射对探测器中的中子的影响。此外, 优化 HPGe 探测器的屏蔽设计应作为未来工作的重点研究方向之一, 可以考虑通过加入吸收热中子的材料或改进 PGNA 系统的几何配置来实现。其中, 热中子屏蔽材料可以

使用富锂化合物来制造, 例如 LiF 和 Li_2CO_3 粉末 (富含 95% 的 ^6Li 和 5% 的 ^7Li), 3 cm 厚度的富锂化合物足以屏蔽 HPGe 探测器免受热中子引起的活化^[30]。

2.4 质量检测限

为了评估该 PGNA 系统用于测量 Hf 的极限, 使用式 (5) 确定其质量检测限 (Mass Detection Limit, MDL)^[31]:

$$m_{\text{MDL}} = \frac{k^2 + 2k\sqrt{B}}{P/m_{\text{Hf}}}, \quad (5)$$

式中: k —系数 (对于 95% 置信水平, $k=1.645$); B —本底计数; m_{Hf} —Hf 样品的质量, g; P —瞬发伽马射线净计数。经过计算, Hf 的质量检测限为 3.89 g。

从式 (5) 可看出, m_{MDL} 受到瞬发伽马射线计数、本底计数和测量时间的共同影响。其中, 测量时间是相对容易控制的参数, 然而在现场应用中, 单纯延长测量时间一般难以显著改善 m_{MDL} 。因此, 更有效的途径是提高瞬发伽马射线净计数或降低感兴趣区域的本底。

在以后工作中, 可以尝试使用最大产额为 9×10^8 n/s 的 D-D 中子发生器来建造新 PGNA 系统, 本研究设计的 GAMOS 模型可用于设计和完

善该 PGNAA 系统。从热中子通量、探测效率和伽马射线净计数的角度,对慢化剂、样品定位和探测器屏蔽进行优化。此外,可以使用算法来辅助,例如采用能量加权算法可以减少康普顿连续谱的干扰,以观察到更明显的特征峰。

3 结论

利用由 D-T 中子发生器和 HPGe 探测器组成的 PGNAA 系统对 Hf 样品进行测量,通过试验和 GAMOS 模拟对该系统的性能进行了评估。通过 In 活化片测量和 GAMOS 模拟,计算得到了 D-T 中子发生器的产额为 $(3.28 \pm 0.10) \times 10^6$ n/s。试验得到的瞬发伽马射线谱表明,Hf 样品中 0.214 MeV 的瞬发伽马射线为主要特征峰。在测量时间 1.44×10^4 s 的情况下,该 PGNAA 装置对 Hf 的质量检测限为 3.89 g。同时,GAMOS 模拟计算得到的 0.214 MeV 瞬发伽马射线计数与试验测量值的偏差在 10% 以内。

研究结果验证了基于 D-T 中子源的 PGNAA 技术测量 Hf 的可行性,并建立了可靠的蒙特卡罗模型。所建立的模型可以用于进一步优化 PGNAA 装置,包括增强 HPGe 探测器的屏蔽以及提高信噪比。

参考文献:

- [1] XU S K, YU T, XIE J S, et al. Selection of burnable poison in plate fuel assembly for small modular marine reactors[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2022, 54(4): 1526-1533.
- [2] FENG Z Y, GUO W L, ZHANG W W, et al. Conceptual design and analysis of a new plate-type fuel element for flattening of reactor power distribution[J]. Annals of Nuclear Energy, 2024, 208: 110811.
- [3] TERBISH J, SAMBUU O. Geometrical shape and self-shielding effect of burnable poison particles on pin-in block type HTGR neutronic performance[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2024, 56(6): 2388-2394.
- [4] 姚磊. 可燃毒物对小型长寿期压水堆反应性及功率分布控制的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2022.
- [5] REDA S M, MUSTAFA S S, ELKHAWAS N A. Investigating the performance and safety features of pressurized water reactors using the burnable poisons[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 141: 107354.
- [6] RISOVANIY V D, ZAHAROV A V, KLOCHKOV E P, et al. Dysprosium and hafnium base absorbers for advanced WWER control rods[J]. International Atomic Energy Agency Vienna, 2000.
- [7] 拓飞. 发展¹⁸²Hf 的加速器质谱测量技术[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [8] SHARIATI S, YAMINI Y, ZANJANI K M. Simultaneous preconcentration and determination of U(VI), Th(IV), Zr(IV) and Hf(IV) ions in aqueous samples using micelle-mediated extraction coupled to inductively coupled plasma-optical emission spectrometry[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 156(1/3): 583-590.
- [9] YANG X J, PIN C. Determination of niobium, tantalum, zirconium and hafnium in geological materials by extraction chromatography and inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Analytica Chimica Acta, 2002, 458(2): 375-386.
- [10] LIU Y X, LI Q X, MA N, et al. Application of the Zr/Hf ratio in the determination of hafnium in geochemical samples by high-resolution inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(23): 11570-11577.
- [11] 蔡平坤. 紧凑型结构 PGNAA 元素成份在线分析仪的关键技术及方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- [12] YAN M F, WAKABAYASHI Y, TAKAMURA M, et al. Optimization study of chlorine detection sensitivity in concrete based on prompt gamma analysis using ²⁵²Cf neutron source[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2022, 188: 110393.
- [13] LI J T, JIA W B, HEI D Q, et al. Research on the luggage detection system for hidden explosive identification based on PGNAA technology[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2022, 331(2): 1-13.
- [14] ZHAO L, XU X, LU J B, et al. Optimization of PGNAA device and algorithm for testing basicity index of sinter mixture[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, 32(1): 48-59.
- [15] ISLAMI RAD S Z, GHOLIPOUR PEYVANDI R. An optimal experimental: Monte Carlo combined model for analyzing of the cement raw by prompt gamma neutron activation[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2018, 54(6): 448-454.
- [16] 张镇华, 庄皓为, 贾文宝, 等. 基于瞬发伽马活化分析技术对大体积样品 Er 元素的测量研究[J]. 铀矿冶, 2024, 43(4): 65-71.

- ZHANG Zhenhua, ZHUANG Haowei, JIA Wenbao, et al. Study of erbium determination in large sample based on PGNA technique[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(4): 65-71.
- [17] XIE Y, CHENG C, ZHANG W, et al. Feasibility study of on-line monitoring gadolinium based on neutron induced gamma activation[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2023, 197: 110817.
- [18] 程臻, 贾文宝, 顾加雨, 等. 基于快中子激发 γ 射线活化的铈元素测量研究[J]. 核技术, 2024, 47(10): 29-36.
- CHENG Can, JIA Wenbao, GU Jiayu, et al. Determination of erbium by using fast neutron induced gamma-ray activation analysis[J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(10): 29-36.
- [19] CHENG C, WEI Z Y, HEI D Q, et al. Design of a PGNA facility using D-T neutron generator for bulk samples analysis[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2019, 452: 30-35.
- [20] LANDSBERGER S. Handbook of prompt gamma activation analysis with neutron beams[M]. London: Kluwer, 2004.
- [21] MAUERHOFER E, HAVENITH A, KETTLER J. Prompt gamma neutron activation analysis of a 200 L steel drum homogeneously filled with concrete[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2016, 309: 273-278.
- [22] WILLIAMS J G, GILLIAM D M. Thermal neutron standards[J]. Metrologia, 2011, 48(6): S254-S262.
- [23] LIANG X, ZHAO D, JIA W, et al. Characterization of thermal neutron distribution of an Am-Be neutron source setup by CdZnTe detector[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2023, 196: 110778.
- [24] ARCE P, LAGARES J I, HARKNESS L, et al. GAMOS: A framework to do Geant4 simulations in different physics fields with an user-friendly interface[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, 735: 304-313.
- [25] PROKOPOWICZ R, BIENKOWSKA B, DROZDOWICZ K, et al. Measurements of neutrons at JET by means of the activation methods[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, 637(1): 119-127.
- [26] CHENG C, WEI Z Y, HEI D Q, et al. MCNP benchmark of a ^{252}Cf source-based PGNA system for bulk sample analysis[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2020, 158: 109045.
- [27] 马英杰, 周靖, 洪旭, 等. 核能谱单能峰快速高精度高斯函数拟合算法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2373-2377.
- MA Yingjie, ZHOU Jing, HONG Xu, et al. Study on the high speed and precision Gaussian function fitting algorithm for nuclear single spectral peak[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(8): 2373-2377.
- [28] 甘霖, 李进, 曹舟, 等. 溴化镉探测器 γ 能谱本底扣除方法探讨[J]. 科技创新与应用, 2019(29): 139-140.
- GAN Lin, LI Jin, CAO Zhou, et al. Discussion on background subtraction method of γ energy spectrum for lanthanum bromide detector[J]. Technology Innovation and Application, 2019(29): 139-140.
- [29] CHENG C, XIA X R, GU J Y, et al. Optimization of an inelastic neutron scattering facility and its application on bulk metallic materials measurement[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2023, 194: 110687.
- [30] NICOL T, MAUERHOFER E, CARASCO C, et al. HPGe-detector shielding optimization with MCNP for the MEDINA neutron activation cell[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2016, 310: 865-874.
- [31] CHENG C, HEI D, JIA W, et al. Metallic materials analysis by DT neutron generator-based inelastic neutron scattering system: Measurement and Monte Carlo simulation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2022, 515: 31-36.

Study on the Measurement of Hafnium Using Prompt Gamma Neutron Activation Analysis Technology

JIA Wenbao¹, CUI Yumeng¹, WANG Ning², WANG Zeliang¹,
ZHANG Zhenhua¹, ZHANG Yan³, CHENG Can⁴

(1. School of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Department for Calibration Laboratory Accreditation, China National Accreditation Service for Conformity Assessment, Beijing 100062, China; 3. National Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Nuclear Remote Sensing, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 4. School of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Plate-type nuclear fuel is extensively employed in small modular reactors, where the incorporation of neutron poisons into fuel elements enhances fuel utilization efficiency. Hafnium(Hf), a commonly used neutron poison, is widely applied in nuclear fuel assemblies. To ensure the operational safety, the accurate quantification of neutron poison content is of great significance. In this study, the detection of Hf was investigated using Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis(PGNAA). A PGNA A system comprising a D-T neutron generator and a high-purity germanium detector was established to measure Hf plate samples. The system achieved a mass detection limit of 3.89 g for Hf. Furthermore, a Monte Carlo simulation model of the measurement system was developed to calculate the characteristic gamma rays induced by neutron excitation. The calculated results deviate from the experimental measurements by less than 10%, thereby validating the model's reliability. These findings provide both experimental and theoretical support for the application of PGNA A technology in measuring Hf content in nuclear fuel elements.

Key words: Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis(PGNA A); hafnium; D-T neutron generator; Monte Carlo simulations; neutron poisons; plate-type nuclear fuel