

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

张镇华¹, 庄皓为¹, 贾文宝¹, 王泽亮¹, 张焱³, 程 璨^{1,2}

(1. 南京航空航天大学, 南京 211106;

2. 南京工业大学, 南京 211816;

3. 东华理工大学, 南昌 330013)

摘要: 在大多数反应堆中, 为了增加堆芯寿命和提高经济效益, 考虑在燃料棒中掺入一部分可燃中子毒物来增加其燃耗深度。铪(Er)是一种常见的可燃中子毒物, 为了解决这类燃料棒生产过程中 Er 元素含量的在线监测问题, 使用瞬发伽马活化分析技术(Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis, PGNA)对大体积样品进行了在线检测研究。利用镅铍(AmBe)同位素中子源和高纯锗搭建试验测量平台, 选用氧化铪(Er₂O₃)作为样品, 同时结合 MCNP 进行模拟计算。结果显示, 样品的质量和特征峰净面积在经过中子自屏蔽修正后成线性变化关系。该平台对铪元素的质量检测限为 24.2 g, 相对标准偏差为 3.65%, 相对误差为 3.47%; 准确度和精密度受数据统计涨落的影响, 后续将对设备进行优化, 以增加监测准确度和精密度。研究结果证明了利用该方法进行在线监测的可行性, 并为后续使用热中子测量铪元素含量和修正大体积样品中子自屏蔽效应奠定了基础。

关键词: 瞬发伽马活化分析; 同位素中子源; 镅铍源(AmBe); 质量检测限; 氧化铪; 中子自屏蔽校正

中图分类号: TL8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)04-0065-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.05.03

在核反应堆运行过程中, 一般通过增加核燃料的装载量来提高功率和延长使用寿命, 但这会使反应堆剩余反应性难以控制^[1]。中子可燃毒物因其具有较大的中子吸收截面, 在吸收中子后产物对中子“透明”或可以继续吸收中子, 常被添加至核燃料中, 用于控制反应堆的剩余反应性^[2]。可燃毒物在吸收中子后逐渐减少, 被其吸纳的反应性就会逐渐释放出来, 可加深燃料燃耗, 进而实现燃料的高效使用^[3-6]。

铪(Er)是一种常见的中子毒物, 被认为适合用于压水堆, 在核燃料内合理添加 Er₂O₃ 可以抑制燃料寿命初期的大残余反应性, 并在寿命结束时达到较长的燃尽深度^[7-8]。为保证反应堆的使

用安全, 在燃料生产过程中, 需要对核燃料中的 Er 含量进行在线测量。目前, 针对 Er 元素的检测方法主要有原子吸收光谱法(AAS)、电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)和质谱法(ICP-MS)^[9-11], 这些方法精度较高, 但通常需要在实验室环境下进行, 无法做到在线检测; 而且这些方法的穿透性较差, 只能进行样品表面的测量, 无法对燃料内部进行测量。因此, 对于燃料生产过程中的 Er 元素含量测量技术的研究十分重要。

瞬发 γ 射线中子活化分析(Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis, PGNA)技术, 利用中子源产生的中子流与待测样品核素通过热中子俘获和快中子非弹性散射反应, 在极短

收稿日期: 2024-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(12105143, 42374226), 国家重点研发计划(2023YFF0717003), 江西省自然科学基金项目(20232BAB201043, 20232BCJ23006), 江苏省市场监督管理局科技计划项目(KJ2024009, KJ2024044, KJ2023015)资助。

第一作者简介: 张镇华(2002—), 男, 江西南昌人, 在读硕士, 主要研究方向为核技术及应用。

通信作者简介: 程璨(1992—), 安徽合肥人, 博士, 工程师, 主要研究方向为核技术及应用;

张焱(1989—), 男, 湖北襄阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向为核技术及应用。

时间($<10^{-14}$ s)内产生特征 γ 射线,然后利用探测器接收到的 γ 射线特征峰的能量和计数,实现样品核素的定性和定量分析。相较于其他方法,如X荧光、激光(LIF)和NAA^[12-13],PGNAA技术可以对大体积样品进行在线、多元素的无损检测分析,近年来被广泛用于水泥质量检测、煤炭测量、冶金金属元素的构成和安全检查等方面^[14-18]。

目前,有关中子毒物的测量研究主要是通过热中子俘获反应对核素进行测量,多数元素的热中子俘获截面较大,这有利于试验的结果^[19-23]。本研究基于AmBe中子源,利用热中子与Er元素发生俘获反应,对 Er_2O_3 样品进行在线检测分析,旨在为基于PGNAA技术测量中子毒物Er提供依据。

1 试验部分

1.1 试验原理

利用PGNAA技术对Er元素的含量进行测量,产生瞬发伽马射线的反应主要有2种方式,即 $^{167}\text{Er}(n, \gamma)^{168}\text{Er}$ 的热中子俘获反应和 $^{168}\text{Er}(n, n'\gamma)^{168}\text{Er}$ 的快中子非弹性散射反应。在本工作中主要利用热中子(<0.5 eV)俘获反应进行测量,其会发射出多条特征伽马射线,其中反应截面最大的几条伽马射线信息见表1。

表1 $^{167}\text{Er}(n, \gamma)^{168}\text{Er}$ 热中子俘获反应
伽马射线能量及截面

伽马射线能量/keV	反应截面/b
184.3	56.0
198.3	29.9
284.6	13.7
815.9	42.5

由于在低能区间,伽马能谱的背景值较高,导致测量信号的信噪比低,不便于特征峰的分析,因此本工作选取815.9 keV的伽马射线进行分析。探测器测量到的伽马射线净面积大小可通过式(1)计算^[24]。

$$A = \phi \frac{m}{M} N_A \sigma \epsilon t, \quad (1)$$

式中: A —核素的特征峰净面积; ϕ —中子的通量, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; m —待测核素的质量, g; M —待测核素的原子量, g/mol; N_A —阿伏伽德罗常数, mol^{-1} ; σ —中子和核素反应产生该特征峰的截面, b; ϵ —探测器的探测效率; t —测量时间, s。

1.2 试验装置

基于AmBe中子源和高纯锗探测器搭建的试验装置见图1。一枚0.3 Ci的AmBe同位素中子源放置于石蜡屏蔽层内部,石蜡尺寸为 $85\text{ cm} \times 85\text{ cm} \times 85\text{ cm}$;中子源位于直径为10 cm的准直器内,并用一层铅进行包裹,通过滑杆进行前后调节以控制出口处的中子通量。根据前期工作,本试验的AmBe源在距离准直出口1 cm中心处的热中子通量为 $35.72\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;在距离5 cm中心处的热中子通量为 $25\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;在距离准直器超过5 cm后,热中子通量迅速降低^[25]。使用的探测器为Ortec公司的高纯锗探测器,工作温度保持在110~120 K,型号为trans-SPEC-N,其相对效率为50%,在1.33 MeV的分辨率为2.12 keV。

为了提高探测器的探测效率,试验期间未对探测器进行屏蔽。由于本试验使用的源较弱,实际最后能到达探测器的热中子较少,对探测器的中子损伤较低,故选择直接将探测器与AmBe源呈 180° 放置^[26]。

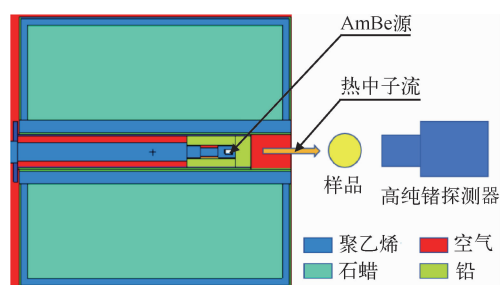


图1 基于AmBe中子源和高纯锗的测量装置
Fig. 1 Measurement device based on the AmBe neutron source and high-purity germanium

样品为 Er_2O_3 粉末,其具体参数见表2。将样品放置于不同大小的聚乙烯瓶中,放置在AmBe源与探测器中间,其中心与准直口和探测器探头距离均为5 cm。试验样品的单次测量时间为3 600 s。

表2 样品参数
Table 2 Parameters of the sample

样品编号	样品直径(cm)×高(cm)	铒(Er)元素质量/g
1	2.5×4.5	38
2	3.2×4.5	77
3	4.0×4.5	102
4	5.0×4.5	188

1.3 蒙特卡罗模拟

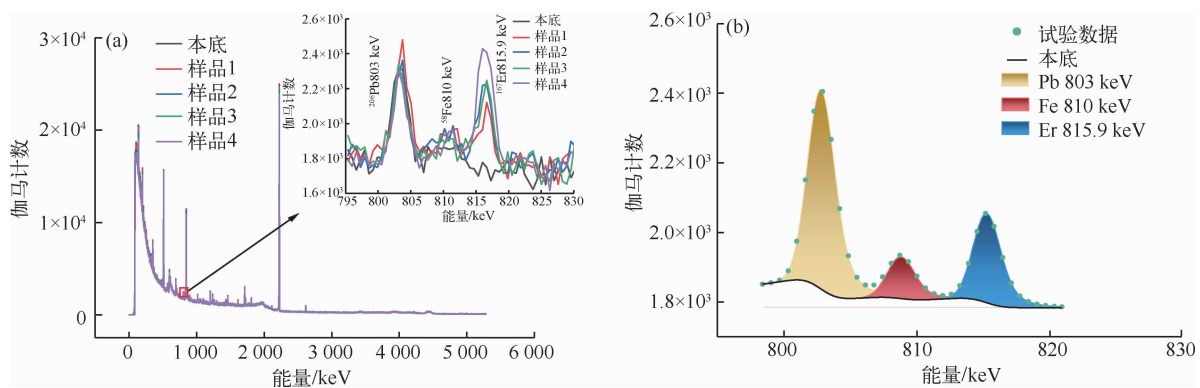
从式(1)可看出,在样品和测量时间确定后,影响 PGNA 测量结果的因素是样品内部的热中子通量以及探测效率。由于4个样品的尺寸不同,导致探测器对4个样品的探测效率不同。此外,由于中子自屏蔽效应,不同样品内部的中子通量也不一致^[27]。因此,需要对这些影响进行修正处理。本工作利用蒙特卡罗模拟软件 MCNP5 进行模拟计算,截面数据库为 ENDF/B-VII. 1,通过F4卡记录样品内部的中子能谱。对于探测

效率,将样品定义为815.9 keV的伽马体源,利用F8记录卡计算。

2 结果讨论

2.1 试验伽马能谱

样品与热中子反应产生的伽马能谱和环境本底能谱见图2(a)。通过其局部放大图可看出,在Er的特征峰(815 keV)附近,样品产生的峰强度随其质量增加而逐渐增加。在Er的特征峰附近有一个能量为803 keV的²⁰⁶Pb特征峰,其主要来自于试验装置中的准直体和HPGe探测器屏蔽防护材料;同时还有一个能量为810 keV的⁵⁶Fe特征峰,其主要来自于周围环境中的材料。利用GAMMFIT对特征峰进行拟合,以样品1为例,拟合结果见图2(b)。GAMMAFIT是一款由布达佩斯中子中心研发的专业能谱分析软件,可针对中心辐射俘获产生的瞬发伽马射线的特征峰进行较为精确的峰拟合^[28]。



(a) 中子激发瞬发伽马能谱; (b) 特征峰拟合。

图2 样品瞬发伽马能谱及其拟合结果

Fig. 2 Instantaneous gamma spectra and fitting peaks of the sample

2.2 样品内的中子能谱

利用 MCNP 对样品内部的中子能谱进行模拟计算,以样品1为例,其内部中子能谱见图3(a)。 $^{168}\text{Er}(n, n'\gamma)^{168}\text{Er}$ 反应也能够产生815.9 keV的特征伽马射线,该反应中子的阈值能量为895.7 keV。两种反应的截面见图3(b)(截面数据库为 ENDF/B-VII. 1)。根据样品内部中子能谱,计算不同反应的平均反应截面;使用反应截面和中子通量,计算不同反应的反应率,计算公式为^[29]

$$R = \sum_i \sigma(E_i) \cdot \phi(E_i), \quad (2)$$

式中: R —反应率,中子与介质原子核发生作用的总次数; $\sigma(E_i)$ —不同能量下的核素反应截面, b ; $\phi(E_i)$ —不同能量下的中子通量, cm^{-2} 。

同样以样品1为例,MCNP模拟计算得到的样品内部中子能谱为归一化计数,对其通量进行统计。根据式(2)计算得到2种反应的反应率,结果见表3。尽管快中子的通量比热中子通量稍高,但Er元素的俘获截面比非弹反应截面高,俘

获反应的反应率是非弹性散射的反应率的756倍,因此试验测量得到的815.9 keV特征射线主要来自于热中子俘获反应。

表3 Er元素在不同反应下的中子通量和反应率

Table 3 Neutron fluxes and reaction rates of the Er under different reactions

反应类型	中子通量/cm ⁻²	反应率
热中子俘获反应	4.52×10^{-5}	1.9×10^{-27}
快中子非弹性散射反应	1.72×10^{-4}	2.53×10^{-30}

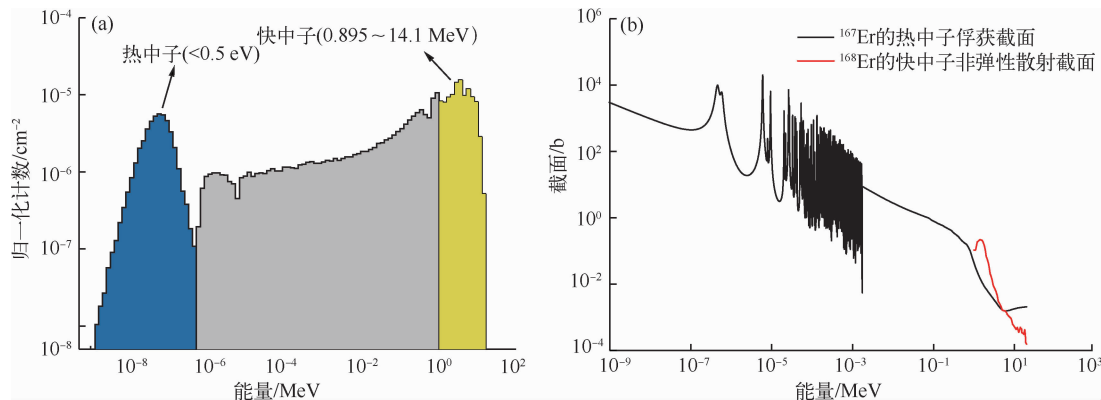
2.3 校准曲线

利用GAMMAFIT获取不同样品的特征峰

净面积;同时对中子自屏蔽效应和探测效率进行修正,利用MCNP计算得到不同样品内部的热中子通量以及探测器对不同样品的探测效率,结果见表4。将所有样品的热中子通量和探测效率归一化到样品1的结果上,修正后的峰面积计算公式为

$$A_{jc} = A_j \frac{\phi_1 \epsilon_1}{\phi_j \epsilon_j}, \quad (3)$$

式中: A_{jc} —第 j 个样品($j=2,3,4$)校正后的特征峰面积; A_j —第 j 个样品($j=2,3,4$)的特征峰面积; ϕ_1 —样品1的热中子通量,cm⁻²; ϵ_1 —样品1的探测效率; ϕ_j —样品 j 的热中子通量,cm⁻²; ϵ_j —样品 j 的探测效率。



(a)样品内的热中子能谱;(b)Er元素在各能量下的反应截面。

图3 样品内的中子能谱和各能量下的反应截面

Fig. 3 Thermal neutron spectra at the sample and reaction cross-section of the Er element

表4 样品测量特征峰面积和热中子通量

Table 4 Characteristic peak area and thermal neutron fluxes

样品编号	初始特征峰面积	热中子通量/cm ⁻²	探测效率	修正后的特征峰面积
1	0.84×10^3	4.52×10^{-5}	8.26×10^{-3}	0.84×10^3
2	1.64×10^3	3.93×10^{-5}	7.93×10^{-3}	1.97×10^3
3	1.61×10^3	3.51×10^{-5}	7.65×10^{-3}	2.24×10^3
4	2.85×10^3	3.22×10^{-5}	7.43×10^{-3}	4.45×10^3

根据表4得到样品质量和其修正后的特征峰面积的关系图(图4)。图中误差棒代表的试验误差主要来源于测量数据的统计误差。从图中可看出,修正后的特征峰面积与Er的质量成线性变化关系,线性相关系数为0.995。试验装置对Er元素的灵敏度(也就是修正后校正曲线的斜率)为

23.57g^{-1} 。

PGNAA方法能检出的最低限制样品质量,也就是样品的质量检测限(MDL)计算公式为^[30]

$$MDL = \frac{k^2 + 2 \times k \times \sqrt{B}}{s}, \quad (4)$$

式中: k —置信度因子,对于95%置信区间, $k =$

1.645; s —灵敏度, g^{-1} ; B —核素特征峰区域内本底面积。计算可知,该测量装置在3600 s下测量 Er_2O_3 的质量检测限为24.2 g。

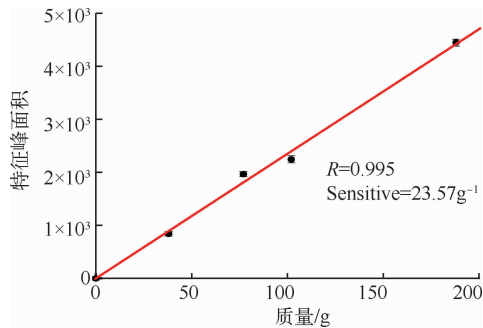


图4 修正后特征峰面积与样品质量关系

Fig. 4 Relationship between modified characteristic peak area and sample mass

为获得更佳的检测限,可以使用高产额中子发生器激发更多特征伽马射线,进而提升装置的灵敏度。此外,考虑选择 $LaBr_3$ 或 BGO 等探测效率高的闪烁体探测器获得更高的伽马计数,进而提升测量结果的灵敏度;但由于闪烁体探测器的

分辨能力不及高纯锗探测器,因此需要进一步研究特征峰的信息分析方法。同时,对测量装置的布局 and 探测器的屏蔽防护进行优化设计,降低入射到探测器内部的中子和本底伽马射线的数量,以降低本底伽马射线计数,进一步提高测量效果。

2.4 精密度与准确度

选取150 g的样品作为未知样进行测量,样品置于聚乙烯瓶中,保持高度为4.5 cm,此时样品的直径为4.5 cm。对该样品进行了5次测量,结果见表5。5次测量的相对标准偏差(RSD)为3.65%。按照上述试验方法,利用MCNP程序对该样品的探测效率和中子通量进行计算,对5次测量结果取平均值,经过式(3)修正后,通过校准曲线计算。推测的样品值也在表5中列出,相对误差为3.47%。

由于特征峰的统计误差较大,影响了精密度和准确度。后续工作中,将对测量装置进行优化设计,以降低本底计数;使用更高产额的中子发生器和闪烁体探测器进行测量,提高特征峰计数,进而得到更好的检测限;同时结合蒙特卡罗模拟计算为实际的检测应用提供判断依据。

表5 精密度与准确度试验结果

Table 5 Results of precision and accuracy

编号	特征峰面积	推测的样品值/g	相对标准偏差/%	相对误差/%
1	2 338			
2	2 526			
3	2 328	155.2	3.65	3.47
4	2 470			
5	2 472			

3 结论

基于瞬发伽马活化分析技术测量铈元素含量,利用 $AmBe$ 中子源和 $HPGe$ 探测器搭建了测量平台,结合MCNP模拟计算,获得线性较高的校正曲线,同时计算出该套装置下质量检测限。建立的装置在测量铈元素上具有可行性,研究结果为热中子测量大体积含铈样品奠定了基础。

参考文献:

[1] ROOT M A, MENLOVE H O, LANZA R C, et al. Using the time-correlated induced fission method

to simultaneously measure the ^{235}U content and the burnable poison content in LWR fuel assemblies[J]. Nuclear Technology, 2018,203(1):34-47.

[2] 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.

[3] 李满仓,刘仕倡,秦冬,等. FCM燃料压水堆弥散可燃毒物中子学分析[J]. 原子能科学技术,2019,53(7):1188-1194.

[4] 童吉,曲玲怡,谢金森,等. 基于长寿期压水堆的新型可燃毒物材料组合研究[J]. 核动力工程,2024,45(2):35-41.

[5] 夏羿. 长寿期商用压水堆可燃毒物中子学设计与分析[D]. 衡阳:南华大学,2021.

- [6] XIAO H X, LONG C S, WANG X M, et al. Microstructure and thermophysical properties of Er_2O_3 -doped UO_2 ceramic pellets. [J]. *Journal of Nuclear Materials: Materials Aspects of Fission and Fusion*, 2020, 534(1).
- [7] YAMANAKA S, KUROSAKI K, KATAYAMA M, et al. Thermal and mechanical properties of $(\text{U}, \text{Er})\text{O}_2$ [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 389(1):115-118.
- [8] XU S, YU T, YAO L, et al. Burnable poison selection and neutronics analysis of plate fuel assemblies [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9:729552.
- [9] DVORETSKOV R M, BARANOVSKAYA V B, KARACHEVTSEV F N, et al. Determination of rare-earth metals in magnesium alloys by atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma [J]. *Measurement Techniques*, 2019, 62(4):371-376.
- [10] AVILA W B, CÍCERO N P, NUNES C A, et al. Determination of rare earth elements in natural water samples by rapid sequential high-resolution continuum source flame atomic absorption spectrometry (HR CS FAAS) and inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) [J]. *Analytical Letters*, 2019, 52(13):2057-2068.
- [11] 王晓红, 杜亚静, 程星华, 等. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定钛铁合金中 16 种杂质元素的含量 [J]. *理化检验: 化学分册*, 2023, 59(9):1094-1099.
- [12] 姚杰祖, 张鑫, 宋茂生, 等. 激光荧光法测定五氧化二钒中的微量铀 [J]. *铀矿冶*, 2021, 40(4):309-312.
- [13] 赵金芳, 毛凤英, 赵爱霞. 液体激光荧光法测定外排水中铀浓度的方法优化 [J]. *铀矿冶*, 2020, 39(3):222-226.
- [14] RAD S Z, ISLAMI, R GHOLIPOUR PEYVANDI. 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.
- [15] NAQVI A A, MASLEHUDDIN M, GARWAN M A, et al. Estimation of minimum detectable concentration of chlorine in the blast furnace slag cement concrete [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2011, 269(1):1-6.
- [16] LI J, JIA W B, YAO Z, 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.
- [17] YAN M, WAKABAYASHI Y, TAKAMURA M, et al. Optimization study of chlorine detection sensitivity in concrete based on prompt gamma analysis using ^{252}Cf neutron source [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2022, 188:110393.
- [18] ZHAO L, XU X, LU J, et al. Optimization of PGNAA device and algorithm for testing basicity index of sinter mixture [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2021, 32(1):6.
- [19] LING Y, CHEN J, CAI P, et al. Determining rare-earth elements in aqueous solutions using PGNAA technology [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2022, 331(2):1101-1108.
- [20] UDUPI A, SHETTY P K, PANIKKATH P, et al. Comparison of transportable neutron sources for quantitative elemental analysis using prompt gamma neutron activation technique [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, 180:109243.
- [21] GRÄFE J L, CHETTLE D R, MCNEILL F E. In vivo detection of samarium by prompt gamma neutron activation analysis: a comparison between experiment and Monte-Carlo simulation [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2015, 30(12):2441-2448.
- [22] GRÄFE J L, MCNEILL F E, CHETTLE D R, et al. Characteristic X ray emission in gadolinium following neutron capture as an improved method of in vivo measurement: A comparison between feasibility experiment and Monte-Carlo simulation [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2012, 281:21-25.
- [23] GRÄFE J L, MCNEILL F E, BYUN S H, et al. The feasibility of in vivo detection of gadolinium by prompt gamma neutron activation analysis following gadolinium-based contrast-enhanced MRI [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2011, 69(1):105-111.
- [24] RÉVAY Z. Determining elemental composition using prompt γ activation analysis [J]. *Analytical chemistry*, 2009, 81(16):6851-6859.

- [25] LIANG X, ZHAO D, JIA W H, 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.
- [26] SEABURY E H, WHARTON C J, CAFFREY A J, et al. Neutron damage in mechanically-cooled high-purity germanium detectors for field-portable prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) systems[C]// IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference. IEEE, 2013.
- [27] AKKAYA G. The calculation of self-shielding correction factors for large samples in ^{241}Am -Be isotopic neutron source[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2022, 179: 109990.
- [28] SZENTMIKLOSI L. Fitting special peak shapes of prompt gamma spectra[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2018, 315(3): 663-670.
- [29] ILIC Z, MAUERHOFER E, STIEGHORST C, et al. Prompt gamma rays induced by inelastic scattering of fission neutrons on iron[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020, 325: 641-655.
- [30] YAKUBOVA G, KAVETSKIY A, PRIOR S A, et al. Applying Monte-Carlo simulations to optimize an inelastic neutron scattering system for soil carbon analysis[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2017, 128: 237-248.

Study of Erbium Determination in Large Sample Based on PGNAA Technique

ZHANG Zhenhua¹, ZHUANG Haowei¹, JIA Wenbao¹, WANG Zeliang¹,
ZHANG Yan³, CHENG Can^{1,2}

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

3. East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In the majority of reactors, a proportion of the combustible neutron poisons is incorporated into the fuel rods with the intention of increasing their burnup depth, thereby extending the operational lifespan of the core and enhancing the economic efficiency of the process. Erbium (Er) is a common combustible neutron poison, and in order to address the issue of on-line monitoring of the Er elemental content during the production of such fuel rods, a solution must be found. A novel approach, namely Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis (PGNAA), is employed, which is well-suited to large-volume samples and can be detected online. Utilising the americium-beryllium (AmBe) isotope neutron source and high-purity germanium to establish an experimental measurement platform, with erbium oxide (Er_2O_3) selected as the sample. This is also combined with the MCNP to perform simulation calculations. The results demonstrate that the mass and the net area of the characteristic peaks of the sample exhibit a linear variation after correction for neutron self-shielding. The mass detection limit of the platform for erbium was 24.2 g, with a relative standard deviation of 3.65% and a relative error of 3.47%. The accuracy and precision were affected by the statistical fluctuations inherent to the data set. Subsequent optimisation of the equipment will enhance the accuracy and precision. The results demonstrate the feasibility of this method for online monitoring and establish a foundation for the subsequent use of thermal neutrons to measure the elemental content of erbium and to correct the neutron self-shielding effect of large-volume samples.

Key words: Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis(PGNAA); isotopic neutron source; americium-beryllium source; mass detection limit; erbium oxide; neutron self-shielding correction