

基于中子位置灵敏探测器对点源的 三维定位方法研究

梁庆雷 李井怀 刘国荣 王斌 周浩 田园

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 使用中子法对密封容器内的放射源进行定位具有重要的现实意义。本研究使用 4 根矩形分布的中子位置灵敏探测器对探测空间内 AmLi 源进行定位,首先使用蒙特卡罗方法设计了探测器的慢化屏蔽体;然后设计了延迟电路加到探测器的一端,根据探测器两端探测到中子信号的时间差来确定源 y 轴(探测器轴向)的位置坐标,并对每个探测器的轴向位置函数进行了刻度;利用探测器围绕密封容器搭建测量空间,使用相邻探测器探测到中子计数率的比值来确定 x 轴和 z 轴(另两个方向)的位置坐标并进行了函数刻度。测量时,首先选择计数率最大的探测器来确定源的轴向坐标,再根据与此探测器相邻两根探测器计数率的比值来确定源的另两个方向的坐标,实现了对源的定位。使用该方法测量了点源在探测器空间内的 5 个不同位置,每个坐标轴上的定位偏差均在 1.5 cm 之内,并对造成偏差的原因进行了分析。该方法验证了使用中子位置灵敏探测器对放射源进行定位的可行性,并为进一步测量核设施工艺设备内核材料的位置打下了良好的基础。

关键词 定位, 位置灵敏, 点源

中图分类号 TL816⁺.5

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030404

Three-dimensional point-source localization method based on position-sensitive neutron detectors

LIANG Qinglei LI Jinghuai LIU Guorong WANG Bin ZHOU Hao TIAN Yuan

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract [Background] The use of neutron-based methods to locate radioactive sources within sealed containers holds great practical significance. [Purpose] This study aims to locate an AmLi source within the detection space of four position-sensitive neutron detectors. [Methods] First of all, the Monte Carlo method was applied to designing the moderating shield of the detector. Then, a delay circuit was added to one end of the detector hence the position coordinate of the source y-axis (detector axis) was determined according to the time difference between the two ends of the detector to detect the source neutron signal, and the axial position function of each detector was calibrated. Finally, the detector was used to build a measurement space around sealed container, and the position coordinates of the x-axis and z-axis (the other two directions) were determined by the ratio of the neutron count rate of the two adjacent detectors, so was the function calibration. During the measurement of neutron point-source 3D coordinates, the detector with the largest count rate was first selected to determine the axial coordinates of the source, and then the coordinates of the other two directions of the source were determined according to the ratio of the count rate of the two adjacent detectors to the detector, so as to realize the location of the source. [Results] Measurement results of five different positions of the point source in the detection space show that the positioning deviation on each

第一作者: 梁庆雷, 男, 1981 年出生, 2009 年于中国原子能科学研究院获硕士学位, 研究领域为核保障与核查技术研究, E-mail: qinglei98@126.com

收稿日期: 2023-06-05, 修回日期: 2023-08-30

First author: LIANG Qinglei, male, born in 1981, graduated from China Institute of Atomic Energy with a master's degree in 2009, focusing on nuclear safeguard and verification technology, E-mail: qinglei98@126.com

Received date: 2023-06-05, revised date: 2023-08-30

coordinate axis is within 1.5 cm, and the relative standard deviation of neutrons measured in this detection space is within 1%. **[Conclusions]** This methodology effectively demonstrated the feasibility of employing neutron position-sensitive detectors to precisely locate radioactive sources, establishing a strong foundation for future endeavors aimed at accurately determining the positions of nuclear materials within processing equipment in nuclear facilities.

Key words Localization, Position-sensitive detector, Point source

目前,普雷克斯(Purex)溶剂萃取流程已广泛应用于核燃料后处理工业。流程中的一个重要步骤是草酸铀沉淀流程,流程中用到的一个重要设备是沉淀反应器,沉淀反应器是带有锥形底的圆筒形设备。铀的调价、沉淀和滤饼陈化都在这个设备中进行^[1]。沉淀反应器采用机械搅拌或空气搅拌均可。但是在实际操作中,草酸铀有可能在沉淀反应器的内壁上结疤,结疤严重有可能导致发生临界安全事故。在沉淀反应器上结疤的草酸铀可以被看作是一个“放射源”,由于后处理环境中的辐射剂量较高,因此需要在不对相关设备进行任何拆卸操作的前提下,使用相关探测装置确定是否有“放射源”并确定其位置。

目前,国内外主要是使用探测器阵列对放射源进行定位,例如使用NaI(Tl)探测阵列装置对 γ 源进行快速定位^[2-4],使用中子探测器对中子源或者发射中子的核材料进行定位,比如南华大学的廖俊辉和广西大学的徐明^[5-6]利用 ^3He 中子探测器阵列使用电阻电荷分配法来获取散射中子的位置信息;清华大学的于昊等^[7]使用 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 面积的涂硼探测器阵列,并基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)数据处理获得了较好的中子位置分辨;兰州大学的刘凌等^[8]研制了 ^3He 高压二维多丝正比室位置灵敏中子探测器,测量了散裂中子源的束流线,在垂直于探测器阳极丝的方向位置分辨为 0.99 mm ,平行于阳极丝的方向位置分辨为 1.36 mm ;中国工程物理研究院的黄朝强等^[9]提出了PSD(Position Sensitive Detector)标定方法,实验结果表明,探测器的空间分辨为 $2.15\text{ mm}(H)\times 2.04\text{ mm}(V)$;西南科技大学的魏阳东等^[10]采用聚乙烯转换层的GEM(Gas Electron Multiplier)探测器做了初步的中子束流实验,探测器具有良好的二维成像能力,位置分辨率可达 2.9 mm ;俄罗斯的Potashev等^[11]研究了一种基于 ^{10}B 的二维坐标探测器和一个气体电离室,通过电荷分配法可使一个坐标的分辨率达到 2 mm ;日本的Kiyonagi等^[12]使用256个针形二维位置灵敏探测器通过飞行时间法对脉冲中子成像,像素尺寸能够达到 0.8 mm ;德国的Herzkamp等^[13]研制了一种以 ^6Li 闪烁体和数字SiPM阵列为光电探测器,展示了用于中子事件位置重建算法以及

空间分辨率的结果。

与上述文献相比,本文利用1根中子位置灵敏探测器两端探测中子信号的时间差来确定放射源一维空间的位置坐标^[14],利用该探测器与相邻探测器中子计数率的比值来确定放射源其余二维空间的位置坐标,可对本文使用4根相同的中子位置灵敏探测器(尺寸为 $\text{Ø}2.2\text{ mm}\times 400\text{ mm}$)搭建的 $200\text{ mm}\times 400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 探测空间内的任意源强的点源进行定位,该方法已经应用到后处理沉淀反应器内结疤位置的确定。根据后处理厂沉淀反应器的实际大小来选择相应尺寸的探测器利用该方法就可以确定结疤位置,目前也得到了应用,但是对于多个不同坐标放射源位置的确定还有待进一步的探索。

1 实验过程

1.1 基本原理

将一个信号分成两路,其中一路直接接入示波器,另一路经过延迟电路接入示波器,形成两个信号,如图1所示,调节延迟电路上的电阻,使两路信号的时间间隔为 $1\text{ }\mu\text{s}$ 。

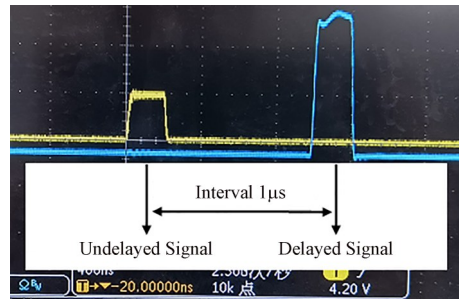


图1 两路信号的波形显示
Fig.1 Waveform display of two signals

同理,同一个中子信号可以被位置灵敏探测器两端同时探测形成两路信号,一路信号通过探测器连接的信号处理模块(Signal Processing Module, SPM)直接输入到数据采集卡,另一路信号经SPM通过延迟电路输入到数据采集卡,数据采集卡记录两路中子信号的时间差 Δt (图2),统计 Δt 的个数就可以得到探测器探测到中子的计数。

实验中利用4根位置灵敏中子探测器(D1、D2、D3和D4)搭建了一个 $200\text{ mm}\times 400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的

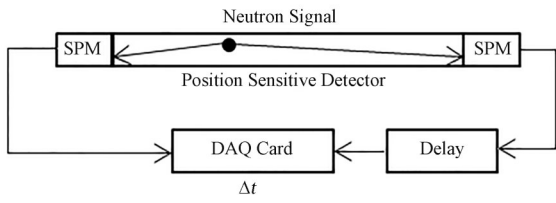


图2 中子探测原理框图
Fig.2 Block diagram of neutron detection

探测空间,如图3所示。

如图3所示,为确定放射源的三维 (x, y, z) 位置坐标,首先比较数据采集卡上采集到的4路中子计数率 s_1, s_2, s_3 和 s_4 (统计每路 Δt 的数量)得出最大值,说明放射源与该探测器的距离最近,利用该探测器的时间差 Δt 来确定放射源的 y 轴坐标,然后根据与该探测器相邻两个探测器计数率的相应关系来确定放射源 x 轴与 z 轴的位置坐标。

由于放射源向 4π 方向发射中子,经过慢化和散射之后,数据采集卡采集到的时间差 Δt 并不相同,统计单位时间间隔内 Δt 的个数,如图4所示,就可以得到 Δt 数量与 Δt 的关系曲线。保持放射源在 x 轴和 z 轴位置不变,改变 y 轴方向的位置,计数峰值对应的 Δt 也会发生改变。由于放射源在 y 轴的位置与计

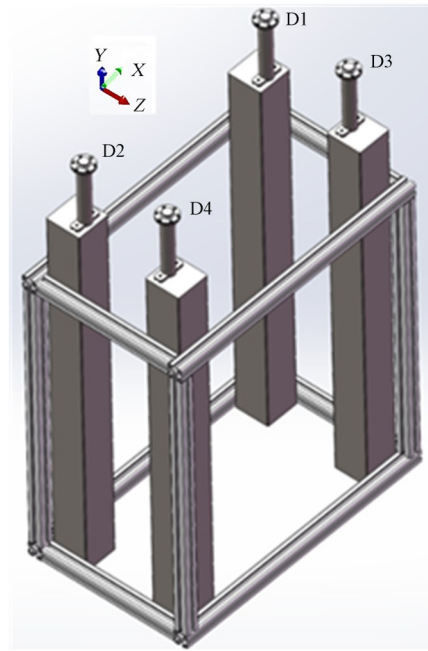


图3 实验装置示意图
Fig.3 Diagram of the experimental device

数峰值对应的 Δt 呈线性关系,对该线性函数进行刻度后,通过测量 Δt 就可以得到放射源在 y 轴的位置坐标。

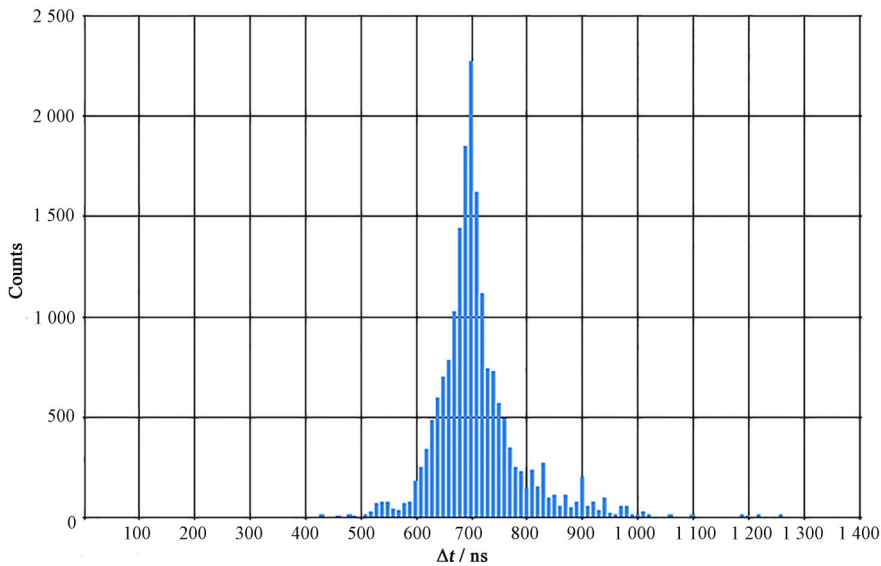


图4 时间差与计数谱图
Fig.4 Spectrum of Δt and counts

确定放射源在 x 轴与 z 轴位置的计算原理是一样的,如图5所示,两根探测器之间相距为 L ,中子源距离探测器D1为 L_1 ,由于探测器探测到的中子通量与源的距离的平方成反比,假设D1探测到的中子计数为 s_1 ,D2探测到的中子计数为 s_2 ,则 L_1 可用公式(1)进行表示,其中 k 和 b 代表简化后的系数。

$$L_1 = k \sqrt{\frac{s_2}{s_1}} + b \quad (1)$$

如图3所示,假设探测器D1的计数率 s_1 最高,则根据 s_1/s_2 来确定 x 轴方向的位置坐标,根据 s_1/s_3 来确定 z 轴方向的位置坐标。由于该方法是利用两个探测器计数率的比值进行计算,因此,可以对任意源强的放射源进行定位。不同探测器 x 轴和 z 轴的计算

因数如表1所示,根据计算因数就可以计算出放射源在 x 轴和 z 轴方向上的位置坐标,式(3)的函数同样需要刻度。

1.2 装置优化与刻度

使用位置灵敏的中子探测器对放射源进行测量时,由于中子探测器对探测热中子较为灵敏,因此需要将放射源发射的中子进行慢化,慢化体材料选用高密度聚乙烯,使用AmLi源作为中子源,AmLi源被密封在一个 $\text{O}25\text{ mm}\times 34\text{ mm}$ 的小圆柱内,中子发射率为 $5\times 10^4\text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$,在蒙特卡罗程序上建立了模型,如图6所示,简化放射源为点源。初始慢化体尺寸为 $31\text{ cm}\times 31\text{ cm}\times 15\text{ cm}$,在 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 的小方格内(图中P处)统计中子体通量,同时使用乘子卡假设每个小方格内的材料为 ^3He 来统计(n,p)反应率。这一过程等价于将 ^3He 探测器置于该小方格中,其他部分的聚乙烯均起慢化作用。根据计算得到的反应率变化情况即可确认探测器放置的最佳位置,以及慢化体的最佳形状。

表1 x 轴和 z 轴的计算因数
Table 1 Calculation factor of x and z

最大计数率 Max count rate	s_1	s_2	s_3	s_4
x 轴计算因数 Calculation factor of x axis	s_1/s_2	s_2/s_1	s_3/s_4	s_4/s_3
z 轴计算因数 Calculation factor of z axis	s_1/s_3	s_2/s_4	s_3/s_1	s_4/s_2

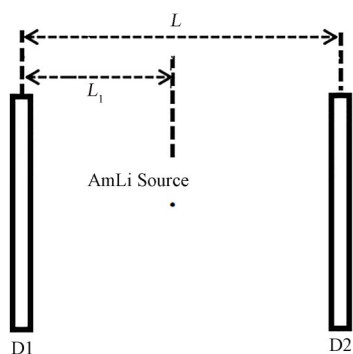


图5 x 轴和 z 轴的计算原理
Fig.5 Calculation principle along the x axis and z axis

实验中使用位置灵敏 ^3He 中子探测器的直径为 2.54 cm ,探测活性区长度约为 40 cm ,根据探测器的尺寸,利用“切削法”^[15]得到聚乙烯慢化体的最佳尺寸为长 $20\text{ cm}\times$ 宽 $10\text{ cm}\times$ 高 50 cm 。如图7所示,(n,p)反应率在慢化体内部的峰值变化形状为长方形。

考虑到实际情况,设计出的慢化屏蔽体示意图如图8所示。慢化屏蔽体整体尺寸为 10 cm (长) $\times 10\text{ cm}$ (宽) $\times 50\text{ cm}$ (高),内部空腔用来放置

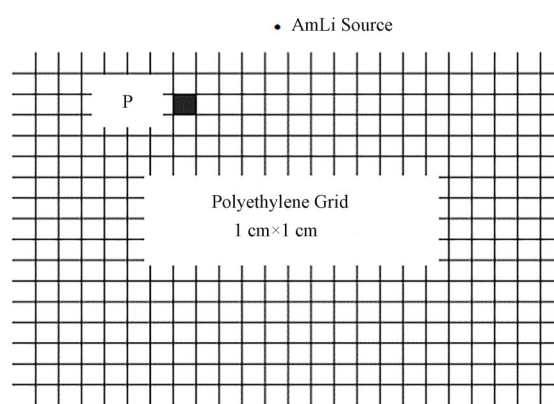


图6 蒙特卡罗程序中聚乙烯慢化体布置模型
Fig.6 Polyethylene moderating body layout model in the Monte Carlo program

中子探测器,聚乙烯外侧加入 1 mm 的铅片来屏蔽放射源中 γ 射线的干扰,左侧靠近中子源,其余三侧贴上镉片,用来屏蔽其他方向的热中子。整个慢化屏蔽体用不锈钢进行固定。一共加工了4个同样的屏蔽慢化体,构成了一个长方体的探测空间如图3所示。

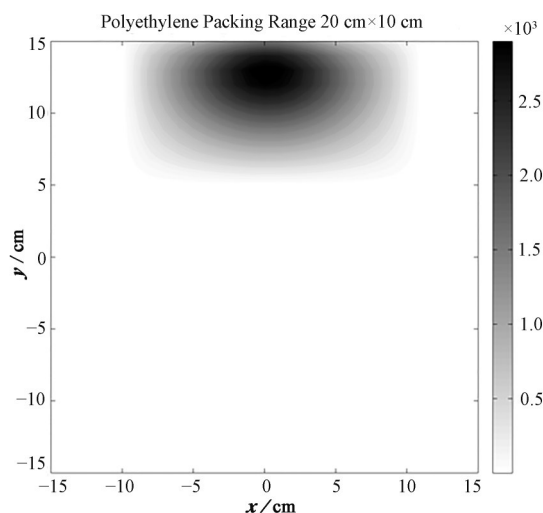


图7 聚乙烯慢化体内部(n,p)反应率变化
Fig.7 Polyethylene moderating body layout model in the Monte Carlo program

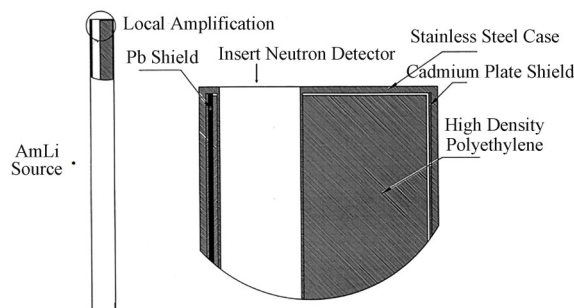


图8 慢化屏蔽体示意图
Fig.8 Diagram of the moderation and shield

为确定探测器测量中子的稳定性,选取了图3探测空间内8个顶点的测量点进行测量,统计时间

差的计数,每个点测量10次,每次测量120 s,计算10次测量计数的相对标准偏差(Relative Standard Deviation, RSD),测量结果如表2所示,RSD均在1%以内,可以认为在此探测空间内,探测器测量中子的稳定性较好。同时,对每个测量点计数峰值对应的 Δt 进行统计,重复测量10次 Δt 的偏差均在一个时间间隔以内,稳定性也较好。

表2 每个测量点的相对标准偏差
Table 2 RSD of each measuring point

测量点 Measuring point	RSD / %			
	D1	D2	D3	D4
1	0.86	0.42	0.76	0.95
2	0.61	0.51	0.72	0.79
3	0.89	0.36	0.71	0.85
4	0.58	0.57	0.89	0.95
5	0.83	0.48	0.65	0.56
6	0.95	0.69	0.48	0.64
7	0.93	0.59	0.89	0.75
8	0.95	0.75	0.79	0.51

如图3所示,假设2号探测器底端为坐标原点,以3号探测器为例对位置函数进行刻度,首先保持 x 轴、 z 轴坐标位置不变,改变放射源 y 轴坐标的位置,得到对应函数关系如图9所示。

保持放射源 y 轴、 z 轴坐标位置不变,改变 x 轴坐标的位置,得到 x 轴坐标函数如图10所示。经拟合后得到的 k 值和 b 值分别为8.56和-8.03。同理,保持 x 轴、 y 轴坐标位置不变,改变放射源 z 轴坐标的位置,经拟合后 k 值和 b 值分别为-2.86和6.21。将4根探测器共计12个位置函数刻度完成后,就可以对该探测空间内放射源的任意位置进行定位。

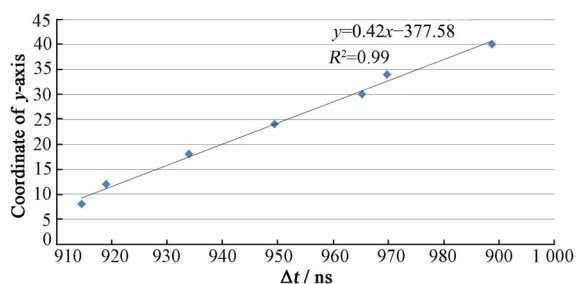


图9 y 轴坐标函数图
Fig.9 Coordinate function graph of the y axis

2 结果和讨论

将放射源置于探测空间内的固定位置,每隔10 s在位置图上点一个坐标点,每个位置测量0.5 h,得到5组坐标及定位范围如表3所示。 x 轴定位偏差在(-1.5 cm, 0.5 cm)范围之内, y 轴定位偏差在(-0.1 cm, 0.8 cm)范围之内, z 轴范围偏差在(-0.7 cm, 1.1 cm)范围之内,以下对造成位置偏差的原因进行分析。

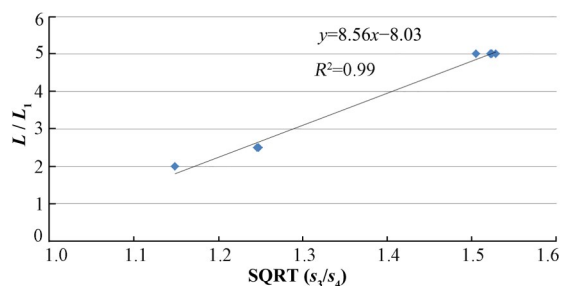


图10 x 轴坐标函数图
Fig.10 Coordinate function graph of the x axis

首先,由于 ^3He 中子探测器对探测热中子灵敏,因此,在设计慢化屏蔽体的时候,主要考虑了提高探测的中子通量,而在实际测量过程中,源中子经过多次散射和慢化后到达探测器时,其位置表征特性弱化,造成了探测偏差较大;其次,实验用的AmLi中子源并不是一个严格意义上的点源,而且无法得知源的精确形状,也会对测量结果造成一定的偏差;另外,以刻度探测器 x 轴函数为例,刻度时默认 y 轴与 z 轴坐标是不变的,通过改变中子源在 x 轴的位置来达到刻度的目的,而在实际测量中, y 轴与 z 轴的位置是不确定的,使用原有的刻度函数也会对测量结果产生影响,这也是造成位置偏差的原因之一。

3 结语

本文介绍了使用4根位置灵敏的 ^3He 中子探测器对探测空间内单枚AmLi中子源的定位过程,首先使用蒙特卡罗方法对探测器的慢化屏蔽体进行了设计,然后对探测方法及原理进行了介绍,通过实验的方法确定了在该探测空间内测量中子的相对标准偏差在1%以内,刻度好位置函数后对放射源5个不同的位置进行定位,得出了 x 、 y 和 z 轴的定位偏差,并对偏差的原因进行了分析。

表3 点源位置与偏差
Table 3 Point-source location and deviation

测点 Measuring point	1	2	3	4	5
坐标 Coordinate	(5,8,6)	(7,18,23)	(11,20,24)	(15,32,14)	(16,32,34)
x 轴定位范围 Location range of x -axis	4.9~5.1	6.9~7.3	11.1~11.5	13.5~14.1	15.2~15.7
y 轴定位范围 Location range of y -axis	7.9~8.0	18.4~18.8	20.2~20.4	32.5~32.7	32.5~32.7
z 轴定位范围 Location range of z -axis	5.8~6.2	23.1~24.1	23.4~24.5	13.6~14.1	32.3~34.6

以上结果验证了使用位置灵敏的中子探测器对放射源进行定位的可行性,当探测区域较大时,可以选择活性区域较长的探测器进行探测,或者增加探测器的数量来进一步提高测量精度。另外,在进行刻度时,可以建立更加详细的刻度曲线数据库,从而保证结果的可靠性。该方法可推广到后处理设施中快速确定沉淀反应器类似设备的结疤位置及大小,从而防止临界事故的发生,也为进一步测量核设施内相应工艺设备内核材料的滞留量等信息打下了良好的基础。

作者贡献声明 梁庆雷负责原理推导、方法建立、实验及撰写论文;李井怀负责探测器调试;刘国荣负责实验设计;王斌负责延迟电路设计;周浩负责蒙特卡罗模拟;田园负责实验。

参考文献

- 姜圣阶,任凤仪,马瑞华,等.核燃料后处理工学[M].北京:原子能出版社,1995.
JIANG Shengjie, REN Fengyi, MA Ruihua, *et al.* Nuclear fuel reprocessing engineering[M]. Beijing: Atomic Press, 1995.
- 管弦,魏星,李子锟,等.基于SVM的放射源快速定位技术研究[J].核技术,2023,46(9):090202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090202.
GUAN Xian, WEI Xing, LI Zikun, *et al.* Fast localization of radiation sources based on Support Vector Machine[J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(9): 090202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090202.
- 周杨,赵越,张振朝,等.基于三NaI(Tl)晶体探测器的放射源定位研究[J].核技术,2019,42(8):080401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.080401.
ZHOU Yang, ZHAO Yue, ZHANG Zhenchao, *et al.* Radiation-source localization based on three NaI(Tl) crystal detectors[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(8): 080401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.080401.
- 赵娟,高正明.基于辐射探测器阵列的单个 γ 源定位方法[J].核技术,2016,39(1):010402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.010402.
ZHAO Juan, GAO Zhengming. Location method of a single gamma source based on the detectors array[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(1): 010402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.010402.
- 廖俊辉.一维位置灵敏热中子 ^3He 正比计数管的研究[D].衡阳:南华大学,2007.
LIAO Junhui. Study on one-dimensional position-sensitive thermal neutron ^3He proportional counter[D]. Hengyang: University of South China, 2007.
- 徐明.位置灵敏型 ^3He 正比管阵列探测器研究[D].南宁:广西大学,2010.
XU Ming. The research of position sensitive ^3He tube array detector[D]. Nanning: Guangxi University, 2010.
- Yu H, Gong H, Li J M, *et al.* A multiplex readout method for position sensitive boron coated straw neutron detector [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 797: 324 - 329. DOI: 10.1016/j.nima.2015.05.038.
- 刘凌,祁辉荣,代洪亮,等.散裂中子源高压二维位置灵敏 ^3He 探测器的实验研究[J].原子核物理评论,2019,36(3):351-356. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.36.03.351.
LIU Ling, QI Huirong, DAI Hongliang, *et al.* Experimental study on two-dimensional position sensitive detector filled with helium-3 for the China Spallation Neutron Source[J]. Nuclear Physics Review, 2019, 36(3): 351 - 356. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.36.03.351.
- 黄朝强,宋建明,陈波,等.中子三轴谱仪二维位置灵敏探测器标定[J].核技术,2013,36(12):120401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.120401.
HUANG Chaoqiang, SONG Jianming, CHEN Bo, *et al.* Calibration of two-dimensional position sensitive detector of triple-axis neutron spectrometer[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(12): 120401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.120401.
- 魏阳东,周健荣,周晓娟,等.基于气体电子倍增器的位置灵敏快中子探测器优化设计[J].核技术,2021,44(2):020402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.020402.
WEI Yangdong, ZHOU Jianrong, ZHOU Xiaojuan, *et al.* Optimal design of the position sensitive fast neutron detector based on GEM[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(2): 020402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.020402.
- Potashv S I, Burmistrov Y M, Drachev A I, *et al.* Investigation of a two-coordinate gas-discharge detector of slow neutrons with a ^{10}B solid converter[J]. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018, 12(3): 627 - 631. DOI: 10.1134/S102745101802012X.
- Kiyanagi Y, Kamiyama T, Kino K, *et al.* Pulsed neutron imaging using 2-dimensional position sensitive detectors [J]. Journal of Instrumentation, 2014, 9(7): C07012. DOI: 10.1016/j.nima.2009.01.124.
- Herzkamp M, Durini D, Degenhardt C, *et al.* Development and characterization of a position sensitive neutron scintillation detector using digital silicon photomultipliers[C]//2017 IEEE Nuclear Science

- Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). October 21-28, 2017, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2018: 1 - 3. DOI: [10.1109/NSSMIC.2017.8532621](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2017.8532621).
- 14 梁庆雷, 刘国荣, 李井怀, 等. 一种快速确定沉淀反应器内结疤位置的装置及方法: CN112146600B[P]. 2021-11-02.
LIANG Qinglei, LIU Guorong, LI Jinghuai, *et al.* Device and method for quickly determining scabbing positions in precipitation reactor: CN112146600B[P]. 2021-11-02.
- 15 赵子凡, 梁庆雷, 杨海峰, 等. 总中子法在钷溶液系统浓度测量中的应用研究[J]. 核科学与工程, 2021, **41**(6): 1297 - 1302. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2021.06.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2021.06.027).
ZHAO Zifan, LIANG Qinglei, YANG Haifeng, *et al.* Study on the application of total neutron counting in the assay of plutonium solution concentration[J]. Nuclear Science and Engineering, 2021, **41**(6): 1297 - 1302. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2021.06.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2021.06.027).