

核素中子源发射率绝对测量装置参数研究及 实验验证

张海贤, 刘毅娜, 王志强, 李春娟, 宋明哲, 骆海龙

(中国原子能科学研究院 计量与校准技术重点实验室, 北京 102413)

摘要: 锰浴活化法是普遍采用的一种中子源发射率定值方法, 本研究采用蒙特卡罗方法(MCNP)计算锰浴装置中溶液池半径、 $MnSO_4$ 溶液密度和测量室体积等主要参数对中子俘获份额、泄漏份额和探测器计数率的影响, 并计算不同尺寸溶液池和测量室的情况下, 测量中子源发射率时的活化计数率。依据模拟计算的结果建立一套可移动式小锰浴装置, 结果表明, 在测量 $^{241}Am-Be$ 源时净计数率比原有锰浴标准装置提高了约11.5倍, 测量范围扩大约1个数量级。采用可移动式小锰浴装置测量两枚低发射率中子源, 发射率分别为 $4.09 \times 10^4 s^{-1}$ 和 $1.75 \times 10^5 s^{-1}$, 相对合成标准不确定度小于1.5%($k=1$)。

关键词: 锰浴活化法; 蒙特卡罗方法; 放射性核素中子源; 中子源发射率; 锰浴装置参数

中图分类号: TL84

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2025)04-0352-07

doi: 10.7538/tws.2025.youxian.012

Research And Experimental Verification of Absolute Measurement Facility Parameters for Radionuclide Neutron Source Emission Rate

ZHANG Haixian, LIU Yina, WANG Zhiqiang, LI Chunjuan, SONG Mingzhe, LUO Hailong

(National Key Laboratory for Metrology and Calibration Techniques, China Institute of Atomic Energy,

Beijing 102413, China)

Abstract: The manganese bath method is a commonly used method for determining neutron source emission rate. The Monte Carlo method (MCNP) was used to calculate the influence of main parameters such as bath radius, $MnSO_4$ solution density, and measurement chamber volume on neutron capture fraction, leakage fraction, and detector count rate in a manganese bath facility. The activation count rate for measuring neutron source emission rate was also calculated for different sizes of bath and measurement chamber. Based on the calculation results, a movable manganese bath facility was established, which achieved a counting rate approximately 11.5 times higher than the primary manganese bath facility when measuring $^{241}Am-Be$ neutron source, therefore the measurement range was expanded by approximately one order of magnitude. Two low emission rate neutron sources were measured by movable manganese bath facility, which emission rate is $4.09 \times 10^4 s^{-1}$ and $1.75 \times 10^5 s^{-1}$, respectively. The standard uncertainty is less than 1.5%.

Key words: manganese bath; Monte Carlo method; radionuclide neutron source; neutron source emission rate; manganese bath facility parameters

放射性核素中子源相比于其他的中子源不需要复杂的控制机制,使用便捷且价格低,一直以来广泛应用于科研、医疗、工业、农业等领域。中子发射率即放射性核素中子源单位时间内发射到 4π 立体角的中子数,其测量方法主要分为绝对测量和相对测量,常用的绝对测量方法有锰浴活化法、水浴活化片法等^[1],相对测量方法有石墨慢化法^[2]、长计数器法^[3]等,其中锰浴活化法应用最为广泛,国内外部分计量实验室如英国国家物理实验室(NPL)、美国国家标准技术研究所(NIST)、中国原子能科学研究院(CIAE)和捷克计量研究院(CMI)等均基于锰浴活化法建立了中子源发射率定值标准装置,但目前这些标准装置普遍存在两个问题^[4-6]。

(1)装置体积较大,球形溶液池直径通常在98~110 cm之间,配备溶液循环管路及较为复杂的中子源提升装置,因此只能固定在实验室内使用。

(2)测量低发射率中子源时溶液比活度较低,装置本底计数率水平与低发射率中子源引起的中子计数率相当,通常可测发射率下限最低 $2\times 10^5\text{ s}^{-1}$ 。

考虑到目前中子源发射率定值装置无法满足 10^4 s^{-1} 量级的低发射率中子源溯源需求,以及受到国内放射源运输安全管控导致不便溯源等因素,本研究采用蒙特卡罗粒子输运程序(MCNP)研究了锰浴装置中 MnSO_4 溶液池和测量室主要参数的变化对中子源发射率测量结果的影响,并以2英寸NaI(Tl)探测器为例,计算了同溶液池半径和测量室体积的锰浴装置在测量 $^{241}\text{Am-Be}$ 源和 ^{252}Cf 源时探测器的计数率。依据模拟结果建立一套测量下限更低的可移动式小锰浴装置,并通过实验验证该装置测量结果的可靠性。

1 可移动式小锰浴装置工作原理

可移动式小锰浴装置的结构示意图于图1。中子源放置在充满硫酸锰水溶液的球体容器中心,中子源发射的中子被溶液中的核素慢化至热中子能区后经 $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)$ 俘获反应生成 ^{56}Mn , ^{56}Mn 半衰期为2.579 h,衰变时放出847.75 keV~3.37 MeV的 γ 射线^[7]。当中子源辐照溶液超过30 h后,溶液池中的 ^{56}Mn 数量将达到平衡状态,

溶液的放射性活度接近饱和。饱和活化溶液经过循环泵不断的运送至测量室内,由测量室内的 γ 探测器测量 ^{56}Mn 衰变放出的 γ 射线即可计算得到中子源的发射率 Q 。

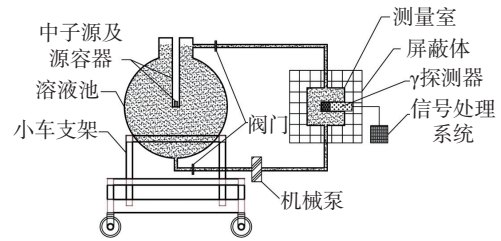


图1 可移动式小锰浴装置结构示意图

Fig.1 The structure of movable manganese bath facility

$$Q = \frac{A}{\varepsilon f(1-L-O-S-M)} \quad (1)$$

式中, A 为活化溶液产生的计数率,由实验测量得到; ε 为探测效率,即锰浴装置中每个 ^{56}Mn 衰变在探测器上产生计数的概率,可通过在锰浴装置中引入已知活度的 MnSO_4 活化溶液实验测量得到; $f(1-L-O-S-M)$ 为中子源每发射一个中子和 MnSO_4 溶液发生 $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ 的概率; L 为溶液池装置边界泄漏份额; O 为氧和硫原子核俘获的快中子份额; S 为源自吸收份额; M 为不锈钢外壳和源容器吸收的中子份额; L 、 O 、 S 、 M 四项修正因子都可以采用蒙特卡罗粒子输运程序(MCNP)计算得到^[8]; f 为锰俘获修正,即剩余的中子俘获份额中, $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ 反应的占比,可以由式(2)和式(3)计算得到^[9]。

$$f = \frac{N_{\text{Mn}}\sigma_{\text{Mn}}(1+G\bar{\tau}s)}{N_{\text{Mn}}[\sigma_{\text{Mn}}(1+G\bar{\tau}s)+\sigma_{\text{S}}+4\sigma_{\text{O}}]+N_{\text{H}}\left(\sigma_{\text{H}}+\frac{1}{2}\sigma_{\text{O}}\right)} \quad (2)$$

$$1+G\bar{\tau}s = \frac{0.19031}{N_{\text{H}}/N_{\text{Mn}}} + 1.00992 \quad (3)$$

式中, σ_{Mn} , σ_{H} , σ_{S} , σ_{O} 分别为Mn、H、S、O的热中子俘获截面; N_{H} , N_{Mn} 为单位体积溶液内的Mn、H的原子核数; $(1+G\bar{\tau}s)$ 为锰的共振俘获修正。

2 装置参数

采用蒙特卡罗方法(MCNP)计算锰浴装置的各项修正因子和 ^{56}Mn 衰变在探测器中引起的

计数率,通过改变锰浴装置的溶液池半径、 MnSO_4 溶液浓度和测量室体积,研究其对探测器计数率的影响。

计算中以一枚 $^{241}\text{Am-Be}$ 源和一枚 ^{252}Cf 源为例,其中 $^{241}\text{Am-Be}$ 源外观尺寸为 $\phi 22.4\text{ mm}\times 31\text{ mm}$; ^{252}Cf 源外观尺寸为 $\phi 7.8\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。 $^{241}\text{Am-Be}$ 源包壳外的能谱和 ^{252}Cf 源活性区的中子能谱采用ISO-8529:2021中推荐的标准能谱^[10],由于 $^{241}\text{Am-Be}$ 源中活性材料发射的中子经过源材料和包壳后其能谱会产生变化,为确保计算结果的可靠性,本工作中利用MCNP通过多次迭代的计算方法^[11]修正了 $^{241}\text{Am-Be}$ 源包壳外的中子能谱,修正过程中首先利用ISO-8529:2021的标准能谱作为裸源活性区的初始能谱,并采用相同的能群结构记录源的封装包壳外的能谱,计算出其与标准能谱的差值,并将差值叠加在初始能谱上作为裸源活性区的中子能谱重新进行计算,各次修正能谱和标准能谱的偏差情况示于图2,重复计算3次,封装包壳外的能谱与ISO-8529:2021的标准能谱接近,可作为源活性区的中子能谱。 ^{252}Cf 源的活性材料体积较小,包壳外中子能谱变化不大,仍采用标准能谱进行模拟。

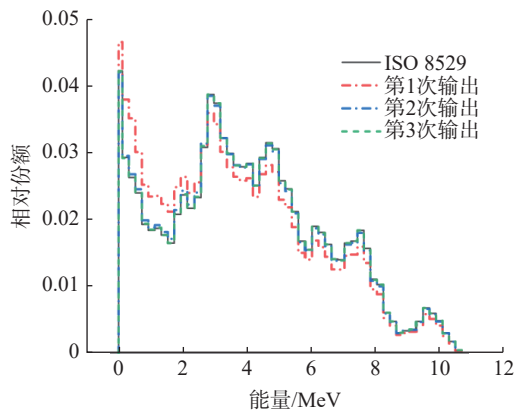


图2 $^{241}\text{Am-Be}$ 源各次修正输出的能谱和ISO-8529 2021标准能谱比较

Fig.2 Comparison of energy spectra of $^{241}\text{Am-Be}$ with ISO-8529 2021 standard energy spectra and each correction output

锰浴装置球形溶液池的MCNP计算模型示于图3,中子源通过一根不锈钢管道定位至溶液池的几何中心,源项为中子源活性区内各向同性发射的中子,在MCNP程序中主要记录了以下几项内容:1)溶液的总俘获份额;2)溶液池

边界的中子泄露份额 L ;3) $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ 反应的份额;4)溶液中O、S的快中子俘获份额 O ,包括氧原子的 (n,α) 反应和硫原子的 (n,α) 、 (n,p) 反应;5)源材料及源包壳的中子俘获份额 S ;6)不锈钢外壳的中子俘获份额 M 。

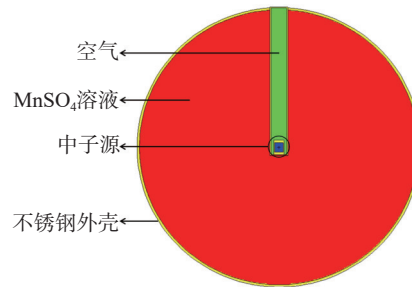


图3 溶液池的MCNP模型

Fig.3 MCNP model of solution pool

锰浴装置溶液池的MCNP模型示于图4,测量室为一个底端开口的等高圆柱形不锈钢筒,内部充满 MnSO_4 溶液,2英寸 NaI(Tl) 探测器的闪烁晶体定位于测量室的中心,探测器后端的空腔近似为空气,源项为 MnSO_4 溶液中各向同性发射的光子,光子源项的输入能谱采用了 ^{56}Mn 衰变放出 γ 光子的能量及其分支比,在MCNP程序中主要记录了光子衰变在探测器上产生的脉冲幅度概率谱。

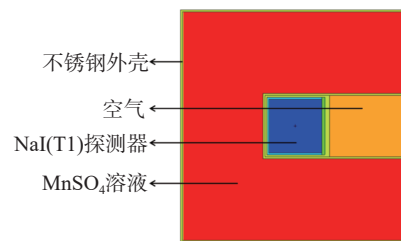


图4 测量室的MCNP模型

Fig.4 MCNP model of measuring chamber

2.1 溶液池半径

不同半径溶液池对应的中子俘获和泄露份额的MCNP模拟结果示于图5,模拟结果表明,随着溶液池半径的增加,中子的总俘获份额和 ^{55}Mn 俘获份额增加,边界泄露份额减小。 $^{241}\text{Am-Be}$ 源和 ^{252}Cf 源在半径为50 cm的溶液池中的边界泄露份额分别为1.16%和0.82%,在此基础上增加锰池直径时,泄露份额的减小作用不大,但由于溶液体积的增加,单位体积的活化溶液中 ^{56}Mn 的活度减小,导致 γ 探测器的信号强度下降。当

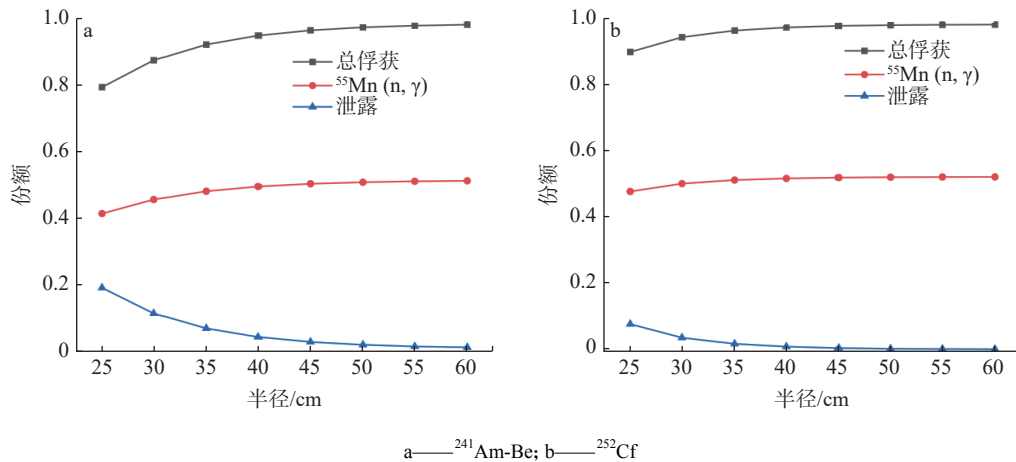


图5 溶液池半径对 neutron 俘获和泄漏份额的影响

Fig.5 The influence of bath radius on neutron capture and leakage fraction

溶液池直径减小时, 边界泄漏中子份额增大, 该项分量对测量结果的不确定度贡献增大。

继续将溶液密度设置为 1.4 g/cm³, 不同溶液池体积的装置在测量 ²⁴¹Am-Be 和 ²⁵²Cf 源时, 中子源每发射一个中子所产生活化溶液的比活度计算结果列于表 1。

表 1 ²⁴¹Am-Be 和 ²⁵²Cf 源每发射一个中子产生活化溶液的比活度

Table 1 Specific activity of activated solutions produced by each neutron emission from ²⁴¹Am-Be and ²⁵²Cf

半径/cm	体积/L	溶液比活度/(Bq·L ⁻¹)	
		²⁴¹ Am-Be源	²⁵² Cf源
25	65	6.28×10 ⁻³	7.33×10 ⁻³
30	113	4.01×10 ⁻³	4.45×10 ⁻³
35	179	2.66×10 ⁻³	2.86×10 ⁻³
40	268	1.84×10 ⁻³	1.93×10 ⁻³
45	381	1.31×10 ⁻³	1.36×10 ⁻³
50	523	9.64×10 ⁻⁴	9.96×10 ⁻⁴
55	696	7.28×10 ⁻⁴	7.49×10 ⁻⁴
60	904	5.63×10 ⁻⁴	5.77×10 ⁻⁴

2.2 MnSO₄ 溶液浓度

20 °C 时, MnSO₄ 溶液饱和浓度约 38.6%, 对应的密度为 1.48 g/cm³, 单位体积溶液内的氢锰核数比 $N_H/N_{Mn}=27$ 。当溶液池内直径为 30 cm, 溶液的密度取值范围为 1.19~1.48 g/cm³ 时, 利用 MCNP 模拟计算得到不同溶液浓度对于中子吸收份额的影响示于图 6。结果表明, 当溶液浓度约为 1.34 g/cm³, 即 N_H/N_{Mn} 约为 41 时, Mn 和 H 的中子俘获份额相等。在溶液密度不超

过 1.48 g/cm³ 的情况下, 溶液的总俘获份额和溶液中 ⁵⁵Mn 的中子俘获份额随着溶液浓度的增加而增加, 而中子泄漏份额随着其增加而减小。

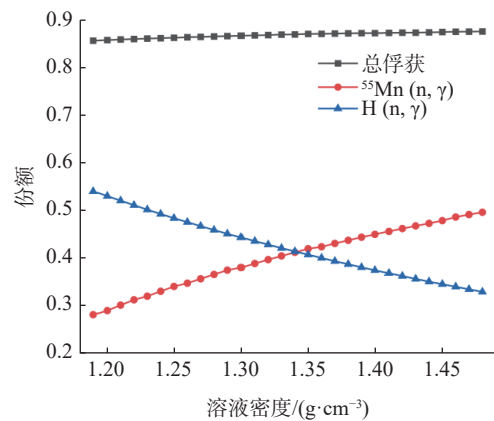


图 6 MnSO₄ 溶液密度对 neutron 俘获份额的影响

Fig.6 Effect of MnSO₄ solution density on neutron capture fraction

2.3 测量室体积

测量室中 ⁵⁶Mn 衰变产生的光子在探测器上产生的脉冲幅度概率谱示于图 7。当选取计数下阈值为 50 keV 时, 不同体积测量室中每个 ⁵⁶Mn 衰变时在探测器上产生计数的概率列于表 2。

根据表 1 和表 2 中的数据, 当溶液密度为 1.4 g/cm³ 时, 锰浴装置在不同溶液池和测量室几何参数组合下, 每个源中子在探测器上产生的计数率计算结果列于表 3 和表 4。在实际测量中可根据探测器的本底计数、中子信号计数率和中子泄漏份额等因素合理选择溶液池和测量室的尺寸。

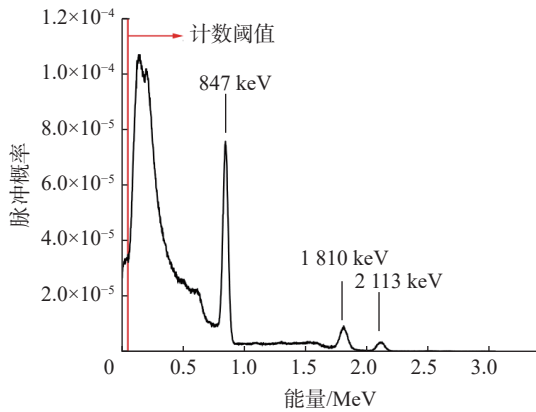


图7 探测器脉冲幅度概率谱

Fig.7 Probability spectrum of detector pulse amplitude

表2 不同体积测量室中⁵⁶Mn衰变在探测器上产生计数的概率

Table 2 Probability of counting generated by a ⁵⁶Mn decay on the detector in different volume measurement chambers

体积/L	概率/%
3.9	4.69
5.5	3.96
7.5	3.39
9.9	2.93
12.7	2.55

3 实验测量

根据研究成果,本研究初步建立了一套可移动式小锰浴装置,溶液池的半径为30 cm,溶液池内的MnSO₄体积约109.25 L,测量室为φ22 cm×22 cm的等高圆柱,容积约7.27 L,其中中心φ6.5×12 cm的空腔内放置2英寸NaI探测器。采用比重法测量的溶液密度为1.332 g/cm³,即N_H/N_{Mn}=42.23。测量室外侧采用了10 cm的铅

和40 cm的聚乙烯用于屏蔽装置工作环境中的光子和中子,溶液池和测量室之间采用耐酸碱软管连接,并通过机械泵实现溶液的循环搅拌。

3.1 中子源发射率测量验证

采用一枚经中国原子能科学研究院的中子源发射率标准装置^[12]绝对测量的²⁴¹Am-Be源(编号为JLN1#,发射率为6.83×10⁶s⁻¹,不确定度为1.5%(k=2))实验测量了可移动式小锰浴装置的探测效率,采用标准锰浴装置和可移动式小锰浴装置测量JLN1#的计数率分别为476 s⁻¹和5469 s⁻¹,两套装置的本底计数率相当,即中子源的净计数率提高了约11.5倍。在溶液N_H/N_{Mn}=42.23时,由式(2)和式(3)计算得到f=0.48,通过MCNP程序计算得到可移动式小锰浴装置在测量JLN1#时的修正因子(1-L-O-S-M)为0.82,结合式(1)可以计算得到可移动式小锰浴装置的探测效率ε=2.02×10⁻³。

采用可移动式小锰浴装置对两枚低发射率中子源(编号为JLN2#和JLN3#)进行实验测量,测量结果列于表5。

由表5中f(1-L-O-S-M)和Q的结果可以反推得到当JLN2#和JLN3#辐照溶液至饱和活化时,溶液的比活度分别为140.72 Bq/L和670.74 Bq/L。在MCNP程序中根据实际建立的锰浴装置几何结构建立了测量室模型,计算得到测量室中每个⁵⁶Mn衰变在探测器上产生计数的概率为3.2%,综上可以计算得到在测量JLN2#和JLN3#时探测器的净计数率为32.7 s⁻¹和156.1 s⁻¹,相比于实验测量结果分别低1.2%和1.3%。

3.2 不确定度评定

根据可移动式小锰浴装置的计算数学模

表3 ²⁴¹Am-Be源每发射一个中子产生的计数率

Table 3 Count rate of each neutron emitted by ²⁴¹Am-Be

溶液池半径/cm	不同测量室体积下产生的计数率/s ⁻¹				
	3.9 L	5.5 L	7.5 L	9.9 L	12.7 L
25	1.09×10 ⁻³	1.27×10 ⁻³	1.43×10 ⁻³	1.58×10 ⁻³	1.70×10 ⁻³
30	7.13×10 ⁻⁴	8.37×10 ⁻⁴	9.55×10 ⁻⁴	1.07×10 ⁻³	1.17×10 ⁻³
35	4.79×10 ⁻⁴	5.65×10 ⁻⁴	6.49×10 ⁻⁴	7.29×10 ⁻⁴	8.05×10 ⁻⁴
40	3.33×10 ⁻⁴	3.94×10 ⁻⁴	4.54×10 ⁻⁴	5.12×10 ⁻⁴	5.68×10 ⁻⁴
45	2.39×10 ⁻⁴	2.83×10 ⁻⁴	3.26×10 ⁻⁴	3.69×10 ⁻⁴	4.11×10 ⁻⁴
50	1.76×10 ⁻⁴	2.09×10 ⁻⁴	2.41×10 ⁻⁴	2.74×10 ⁻⁴	3.05×10 ⁻⁴
55	1.33×10 ⁻⁴	1.58×10 ⁻⁴	1.83×10 ⁻⁴	2.08×10 ⁻⁴	2.32×10 ⁻⁴
60	1.03×10 ⁻⁴	1.22×10 ⁻⁴	1.42×10 ⁻⁴	1.61×10 ⁻⁴	1.80×10 ⁻⁴

表 4 ^{252}Cf 源每发射一个中子产生的计数率
Table 4 Count rate of each neutron emitted by ^{252}Cf

溶液池半径/cm	不同测量室体积下产生的计数率/ s^{-1}				
	3.9 L	5.5 L	7.5 L	9.9 L	12.7 L
25	1.27×10^{-3}	1.48×10^{-3}	1.67×10^{-3}	1.84×10^{-3}	1.99×10^{-3}
30	7.91×10^{-4}	9.28×10^{-4}	1.06×10^{-3}	1.18×10^{-3}	1.29×10^{-3}
35	5.14×10^{-4}	6.07×10^{-4}	6.97×10^{-4}	7.83×10^{-4}	8.64×10^{-4}
40	3.50×10^{-4}	4.15×10^{-4}	4.78×10^{-4}	5.39×10^{-4}	5.97×10^{-4}
45	2.48×10^{-4}	2.94×10^{-4}	3.40×10^{-4}	3.84×10^{-4}	4.27×10^{-4}
50	1.82×10^{-4}	2.16×10^{-4}	2.49×10^{-4}	2.82×10^{-4}	3.15×10^{-4}
55	1.37×10^{-4}	1.63×10^{-4}	1.88×10^{-4}	2.13×10^{-4}	2.38×10^{-4}
60	1.06×10^{-4}	1.26×10^{-4}	1.45×10^{-4}	1.65×10^{-4}	1.84×10^{-4}

表 5 中子源发射率测量结果
Table 5 Measurement results of neutron source emission rate

源编号	源类型	A/s^{-1}	本底计数/ s^{-1}	$f(1-L-O-S-M)$	Q/s^{-1}	参考时间
JLN2#	$^{241}\text{Am-Be}$	37.8	4.7	0.4009	4.09×10^4	2024-12-15
JLN3#	^{252}Cf	162.8		0.4466	1.75×10^5	2024-12-13

型, 中子源发射率测量结果的不确定度主要来自统计涨落、溶液中各核素的核反应截面、溶液密度、溶液池半径等分量, 分析结果列于表 6。

表 6 可移动式小锰浴装置不确定度评定
Table 6 Uncertainty evaluation of movable manganese bath facility

分量	来源	不确定度/%		灵敏系数	对合成不确定度的贡献/%
活化计数	统计涨落	0.09	0.09	1	0.09
锰俘获修正	反应截面	0.01	0.26	1	0.26
	溶液密度	0.26			
泄漏修正	统计涨落	0.11	4.27	0.15148	0.65
	反应截面	1.41			
	溶液密度	0.06			
	球体半径	4.03			
氧、硫快中子俘获	统计涨落	0.08	16.13	0.02678	0.43
	反应截面	16.07			
	溶液密度	0.50			
	球体半径	1.32			
源自吸收	统计涨落	0.16	5.06	0.01163	0.06
	反应截面	5.06			
	溶液密度	0.06			
	球体半径	0.42			
不锈钢外壳俘获	统计涨落	0.20	2.19	0.02193	0.05
	反应截面	2.13			
	溶液密度	0.17			
	球体半径	0.42			
探测效率	统计涨落	0.09	1.11	1	1.11
	修正因子	0.82			
	中子源强	0.75			
相对合成标准不确定度				1.4%($k=1$)	

4 结论

本研究利用 MCNP 程序对锰浴装置的溶液池半径、 MnSO_4 溶液密度、测量室体积等主要参数进行了研究, 计算了不同尺寸的溶液池和测量室组合下, 在测量中子源发射率时探测器的计数率。依据模拟结果初步建立了一套测量下限更低的可移动式小锰浴装置, 对于编号为 JLN1# 的一枚 ^{241}Am -Be 源, 探测器计数率提高了约 11.5 倍, 即在原有装置的基础上将可测范围扩大了约 1 个数量级。采用两枚低发射率中子源对可移动式小锰浴装置进行实验验证, 得到发射率分别为 $4.09 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 和 $1.75 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, 相对合成标准不确定小于 1.5%。

在 MCNP 模拟计算当中, 装置的几何模型为比较理想的状态, 与实际的几何参数有差异, 由于闪烁探测器中光电倍增管等结构未在计算模型中描述, 以及模拟计算中的计数下阈值和实验选取的计数下阈值有差异等, 导致模拟计算得到的计数率比实验测量的计数率偏低, 后期需进一步细化几何模型, 为建立锰浴装置提供更准确可靠的参考。

参考文献:

- [1] Roberts N J, Moiseev N N, Králik M. Radionuclide neutron source characterization techniques[J]. *Metrologia*, 2011, 48(6): S239-S253.
- [2] Harano H, Matsumoto T, Shimoyama T, et al. Convenient method of relative calibration of the neutron source emission rate between different source types[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(3): 1413-1417.
- [3] Hu Q Y, Zhang J H, Zhang D, et al. An improved long counter for neutron fluence measurement with a flat response over a wide energy range from 1 keV to 15 MeV[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics*, 2014, 768: 43-45.
- [4] Roberts N J, Jones L N, Wang Z, et al. International key comparison of measurements of neutron source emission rate (1999–2005): CCRI(III)-K9. AmBe[J]. *Metrologia*, 2011, 48(1A): 06018.
- [5] Roberts N J, Hui Z. Subsequent comparison of measurements of neutron source emission rate (2012) - CCRI(III)-K9. AmBe. 1[J]. *Metrologia*, 2022, 59(1A): 06006.
- [6] Roberts N J, Thiam C, Capogni M, et al. Subsequent comparison of measurements of neutron source emission rate (2016-17) - CCRI(III)-K9. AmBe. 2[J]. *Metrologia*, 2021, 58(1A): 06025.
- [7] Miyahara H, Ogata Y, Fujiki K, et al. Highly precise measurements of the relative gamma-ray intensities for ^{56}Mn and ^{72}Ga [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2004, 60(2-4): 295-299.
- [8] Rataj J, Bily T, Huml O, et al. Verification of the MCNP model of manganese bath[C]//2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering. Prague, Czech Republic: IEEE, 2020: 1-5.
- [9] Axton E J, Cross P, Robertson J C. Calibration of the NPL standard Ra-Be photoneutron sources by an improved manganese sulphate bath technique[J]. *Journal of Nuclear Energy*, 1965, 19(6): 409-422.
- [10] Neutron reference radiations fields-Part 1: Characteristics and methods of production: ISO 8529-1: 2021[S]. [S. l.]: International Organization for Standardization[iso], 2021.
- [11] 李春娟, 刘毅娜, 张伟华, 等. 锰浴法测量中子源发射率中各修正因子的蒙特卡罗计算[J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(10): 1876-1881.
Li Chunjuan, Liu Yina, Zhang Weihua, et al. Monte Carlo calculation of correction factors for radionuclide neutron source emission rate measurement by manganese bath method[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, 48(10): 1876-1881(in Chinese).
- [12] 刘毅娜, 王志强, 李春娟, 等. 锰浴法绝对测量中子源发射率[J]. *原子能科学技术*, 2013, 47(6): 1044-1047.
Liu Yina, Wang Zhiqiang, Li Chunjuan, et al. Absolute measurement of neutron source emission rate with manganese bath method[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, 47(6): 1044-1047(in Chinese).