

锰浴测量装置参数研究

杨竣凯 张健 王平全 张辉 张亚楠

(中国计量科学研究院 北京 100029)

摘要 锰浴法是测量中子源强度普遍采用的方法之一。根据锰浴测量装置参数,采用模拟方法开展锰浴测量装置参数的研究,结果表明: MnSO_4 溶液浓度在17.3%~38.6%时,溶液总中子吸收份额和锰的热中子俘获份额较高,减少中子逃逸和截面比的不确定度;球形锰浴半径在45~60 cm时,可获得较高的溶液体积比活度和较低的中子逃逸份额。同时利用蒙特卡罗模拟程序MCNP(Monte Carlo N - Particle Transport Code System)计算时发现,当粒子数达到10万时,修正因子数值基本稳定,由输入粒子数带来的统计涨落不确定度可以忽略。根据计算结果建立了一套锰浴测量基准装置,并进行中子源国际比对和12枚中子源测量,测量结果与参考值均在不确定度范围内一致,为以后锰浴测量装置的建立提供参考。

关键词 锰浴法, 蒙特卡罗模拟, 溶液浓度, 半径, 参数

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060501

Parameters of manganese bath measurement device

YANG Junkai ZHANG Jian WANG Pingquan ZHANG Hui ZHANG Yanan

(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract [Background] Mn bath method is one of the most commonly used methods to measure the intensity of radionuclide neutron sources in the world. [Purpose] This study aims to guarantee the accuracy of numerical transmission and give a reasonable parameter range during the design of manganese bath device. [Methods] First of all, Monte Carlo N - Particle Transport Code System (MCNP) was employed to calculate the correction factors, solution concentrations and Mn-bath sphere. Then, a reference device of Mn bath measurement was setup according to the MCNP calculation results, and applied to the measurement of 12 neutron sources located in the standard of thermal neutron fluence rate with International Comparison of neutron sources. [Results] Simulation results show higher ratio of total neutron absorption and manganese neutron capture is obtained when the solution concentration is 17.3%~38.6% in which the uncertainty of neutron-escaping and section ratio is reduced, and the radius of Mn-bath sphere is 45~60 cm in which the volume specific activity of solution is increased and neutron-escaping is decreased. When the number of input particles is up to 100 000, the values of correction factors remain stable, hence the statistical fluctuation can be ignored. The international comparison of neutron sources for the measurement of 12 neutron sources indicates consistent results with the reference values within the uncertainty range. [Conclusions] The parameters range of this study provides an effective reference for the establishment of Mn bath device in the future.

中国计量科学研究院基本业务费(No.AKYZZ2113)、国家重点研发计划(No.2017YFF0206205)资助

第一作者: 杨竣凯, 男, 1994年出生, 2020年于中国原子能科学研究院获硕士学位, 研究领域为粒子物理与原子核物理

通信作者: 张辉, E-mail: zhanghui@nim.ac.cn

收稿日期: 2021-12-29, 修回日期: 2022-03-03

Supported by Fundamental Research Funds of National Institute of Metrology, China (No.AKYZZ2113), National Key Research and Development Program of China (No.2017YFF0206205)

First author: YANG Junkai, male, born in 1994, graduated from China Institute of Atomic Energy with a master's degree in 2020, focusing on particle physics and nuclear physics

Corresponding author: ZHANG Hui, E-mail: zhanghui@nim.ac.cn

Received date: 2021-12-29, revised date: 2022-03-03

Key words Mn bath method, Monte Carlo simulation, Solution concentration, Radius, Parameters

放射性同位素中子源广泛应用于核技术应用、核物理实验和中子计量等领域^[1-3],其中子源强度(也称为中子发射率)的准确性直接影响其他仪器设备参数的测量。目前,国际上普遍采用锰浴法测量放射性同位素中子源的强度,该方法也是国际计量局电离辐射咨询委员会中子源发射率K9关键比对(Bureau International des Poids et Mesures Consultative Committee for Ionizing Radiation Section III-K9, BIPM CCRI (III)-K9)中最主要方法之一,它具有设备简单、操作方便和测量不确定度小等优点。

不同锰浴测量装置的参数,尤其是溶液浓度和锰池半径,会影响中子逃逸份额和锰的中子吸收份额,从而影响探测器测量结果的统计涨落和准确性;同时可能造成较大的屏蔽负担,增加装置以外的建设成本。尽管《计量测试技术手册》电离辐射部分对于锰池设计给出部分定性要求,如锰池较大、溶液浓度较高^[4],但并未给出具体的参数范围。因此,研究锰浴装置参数的最佳范围,对锰浴测量装置的合理设计并提高测量效率具有重要的参考价值。

1 锰浴法

锰浴法中子源强度测量装置主要由球形锰池、电子学系统及 γ 测量系统组成。将被测中子源放在充满 $MnSO_4$ 溶液的锰池中心,中子源发射的中子被溶液中的 ^{55}Mn 俘获生成具有 γ 放射性的 ^{56}Mn ,经过一定时间($\gg 10T_{1/2}$)^[5], ^{56}Mn 的生成数和衰变数相等,溶液达到放射性平衡,通过测量并修正 ^{56}Mn 放射性活度即可得到被测中子源的强度。

如图1所示,被测中子源发射的中子并非全部被 ^{55}Mn 俘获,部分中子还会与 $MnSO_4$ 溶液中的其他成分发生不同反应,同时由于锰池尺寸有限,部分中子会从锰池边界逃逸^[6],因此需要对计数率的结果

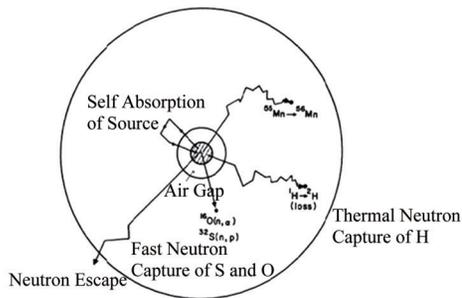


图1 中子进入锰浴后所发生的事件类型
Fig.1 Event types of neutrons entering Mn bath

进行修正,主要包括锰俘获份额、氧硫快中子俘获份额、源自吸收份额和中子逃逸份额,将计数率和各修正因子代入式(1)即可得到中子源强度 Q ^[7]:

$$Q = \frac{C}{f\epsilon(1-L-S-O)} \quad (1)$$

式中: Q 为中子源强度, s^{-1} ; C 为计数率, s^{-1} ; f 为锰的热中子俘获份额占溶液俘获份额中子的比例; O 为氧硫快中子俘获份额; S 源自吸收份额; L 为中子逃逸份额。

上述修正因子除了与被测中子源的能谱、包壳和尺寸等相关外,还与锰池尺寸和 $MnSO_4$ 溶液浓度两项锰浴装置的参数有关。

2 分析方法

通过改变 $MnSO_4$ 溶液浓度和锰池尺寸,可以获得这两个参数与各项修正因子的关系,进而获得这两个参数的最佳范围。早期修正因子主要通过实验方法确定,每次改变锰池尺寸和浓度都需要重新刻度 γ 测量系统的探测效率,需要另外制备 ^{56}Mn 放射源,根据制备方法和放射源管理规定,制备 ^{56}Mn 放射源比较复杂,降低了可操作性。此外,逃逸中子、氧硫俘获和源自吸收等修正因子通过实验测量难度较大,在不同物理模型和锰池参数条件下利用经验公式计算会引入较大误差,从而影响测量结果的准确性,因此实验方法局限性较大。

随着中子输运计算技术的发展,目前可利用蒙特卡罗模拟方法(Monte Carlo N - Particle Transport Code System, MCNP)针对不同的锰浴测量装置参数,精确计算各项修正因子,解决实验方法存在的问题^[8-10]。通常,基于模拟方法获得的修正因子,锰浴法中子源强度测量结果的合成不确定度基本在0.8%($k=1$)左右,近两次的中子发射率国际比对也充分证明模拟方法的可靠性,因此本工作利用MCNP研究了锰浴测量装置参数的最佳范围。

3 参数研究

以一枚 ^{241}Am -Be中子源为例,中子源活性区半径0.95 cm,高1.8 cm,其中 $^{241}AmO_2$ 质量分数5.67%, 9Be 质量分数94.33%,密度 $1.1 g \cdot cm^{-3}$,中子源包壳内的活性区外有铝垫片。测量使用的不锈钢中子源定位容器内半径1.6 cm,厚度1 mm,其他结构的材料参数和物理模型见表1和图2。

被测 ^{241}Am -Be源包壳外的中子能谱采用ISO 8529-1—2001给出的能谱^[11]。根据实际测量条件,

中子源包壳内的铝垫片、包壳及定位容器会影响中子出射能谱,导致活性区发射的中子数与进入锰池的中子数不一致,因此需要对中子源活性区能谱和发射权重进行修正。首先利用 MCNP 将包壳外的

中子能谱多次迭代至源活性区内,使其发射至包壳表面的源能谱与 ISO 8529 近似;由于源材料和源包壳的(n, 2n)反应,将源发射中子权重设为 0.984,以对源包壳外中子进行归一化处理^[8]。

表1 基于 MCNP 的锰浴测量装置结构及材料参数
Table 1 Structure and material parameters of manganese bath based on MCNP

结构 Structure	材料 Material	密度 Density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	厚度 Thickness / cm
球形锰池 Mn bath sphere	MnSO ₄ 溶液 MnSO ₄ solution	1.239 4	—
锰池外壳 Mn bath shell	316L 不锈钢 Stainless steel (316L)	7.93	0.4
源定位容器 Source positioning device	316L 不锈钢 Stainless steel (316L)	7.93	0.1
源定位容器腔 Cavity of source positioning container	空气 Air	0.001 29	—
源包壳 Source cladding	304 不锈钢 Stainless steel (304)	8	0.25
Al 垫片 Al sheet	Al	2.698 9	0.1
中子源 Neutron source	²⁴¹ Am-Be 中子源 ²⁴¹ Am-Be source	1.1	—

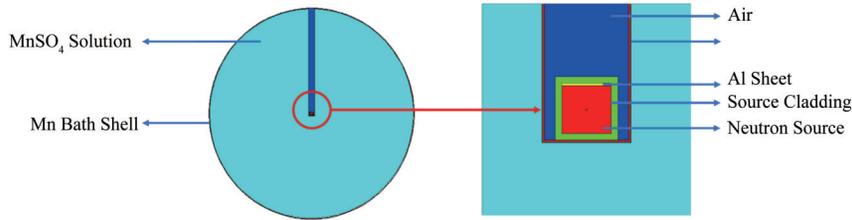


图2 MCNP 模拟的锰池几何模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of Mn bath geometric model by MCNP

默认参数下,锰池半径为 55 cm, MnSO₄ 溶液氢锰原子数比 $N_{\text{H}}/N_{\text{Mn}}$ 为 60,分析过程中,当某一参数发生改变时,其他参数均保持不变。

MnSO₄ 溶液吸收的中子份额 N_{abs} 、各项修正因子子项及标准偏差需要被严格记录。修正因子主要包括:1) 锰池边界泄漏 L ; 2) O 、 S 、 H 的快中子俘获 O_n 和热中子俘获 f_n , 包括氧原子的 (n, γ) 和 (n, α) 反应 f_3 、 O_3 、 S 的 (n, γ)、(n, α)、(n, p) 反应 f_2 、 O_2 、 O_1 和 H 的 (n, γ)、 f_4 ; 3) 中子源本身和边界材料对中子的俘获 S_n , 包括中子源材料俘获 S_1 、源包壳俘获 S_2 、源容器俘获 S_3 以及铝垫片俘获 S_4 ; 4) Mn 的 (n, γ) 反应俘获热中子 f_1 ^[6, 12-14]。修正因子为各子项之和,源自吸收和包壳材料修正因子 $S=S_1+S_2+S_3+S_4$, O 、 S 俘获的修正因子 $O=O_1+O_2+O_3$, 锰俘获热中子份额占溶液俘获中子比例 $f=f_1/(f_1+f_2+f_3+f_4)$ 。

3.1 输入粒子数

输入粒子数是 MCNP 模拟的基本参数,其数值会影响 MCNP 模拟结果的统计涨落,而统计涨落是修正因子模拟结果不确定度的来源之一。考虑到模拟的计算效率,不可能无限增加输入的粒子数,为获得较为合理的输入粒子数,并保证分析结果的可靠性,分别对 1 万、10 万、40 万、100 万和 160 万个中子

进行跟踪模拟,统计锰浴测量装置各个组分的吸收份额和相对标准偏差,并以 10 万粒子数的结果为参考值做归一化处理,其统计结果如图 3 所示。归一化结果表明,输入粒子数为 1 万时,自吸收修正因子的各项波动较大,结果不可靠;粒子数超过 10 万后,不同粒子数的各个记录量的吸收份额基本稳定,表明以 10 万粒子数进行模拟已具备较好的统计性,同时模拟结果可靠。粒子数增多时,统计涨落减小,虽然 MCNP 利用了多种统计手段计算统计涨落,但基本上与 \sqrt{T} (T 为粒子数之比) 成反比^[15],因此模拟计算中,输入粒子数达到 10 万后就可使各组分的吸收份额达到稳定,其统计涨落可以忽略,因此后续模拟分析输入的粒子数均为 10 万。

3.2 MnSO₄ 溶液浓度

⁵⁶Mn 的中子吸收份额与 MnSO₄ 溶液的氢和锰的原子数之比 $N_{\text{H}}/N_{\text{Mn}}$ 相关,而 $N_{\text{H}}/N_{\text{Mn}}$ 由 MnSO₄ 溶液浓度决定,并成正相关。20 °C 时, MnSO₄ 溶液饱和浓度约为 38.6%, $N_{\text{H}}/N_{\text{Mn}}$ 为 27。通过改变 $N_{\text{H}}/N_{\text{Mn}}$ 比值可以更直观地分析溶液不同组分对中子的吸收份额,模拟计算结果如图 4 所示。中子吸收份额主要由 ⁵⁶Mn 和 H 贡献,两者吸收的中子数占总中子数的 93% 以上,随着 $N_{\text{H}}/N_{\text{Mn}}$ 比升高,溶液浓度增大, ⁵⁶Mn

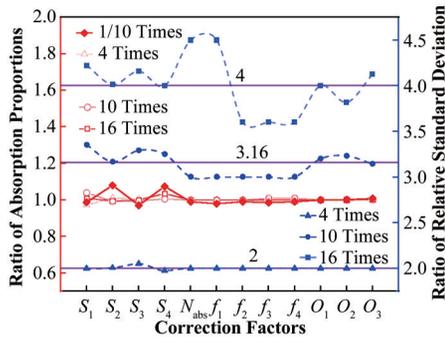


图3 各个记录量的吸收份额比和标准偏差比
Fig.3 Absorption ratio and relative standard deviation ratio of each recordation

的含量增加,因此 Mn(f_4)的中子吸收份额上升, H(f_1)的中子吸收份额下降,两者的变化呈现高度对称性,交点约为 $N_H/N_{Mn}=41$ 处。当 N_H/N_{Mn} 小于 60 时,总吸收份额(N_{abs})随 N_H/N_{Mn} 上升而下降; $60 \leq N_H/N_{Mn} \leq 80$ 时,呈上升趋势;当 $N_H/N_{Mn} > 80$ 后,由于溶液中 Mn 含量下降,其中子吸收份额也逐渐下降。此外,溶液降低,截面比 σ_H/σ_{Mn} 不确定度增大($N_H/N_{Mn}=30$ 时, $u_{(\sigma_H/\sigma_{Mn})}=0.145\%$; $N_H/N_{Mn}=192$ 时, $u_{(\sigma_H/\sigma_{Mn})}=0.287\%$)^[4],影响测量结果准确性。因此,为保证有足够的 Mn 与中子反应,降低 γ 探测装置计数结果的统计涨落并提高溶液的总吸收份额,减少中子逃逸和反应截面比的不确定度,溶液 N_H/N_{Mn} 宜在 27~80,即溶液浓度在 17.3%~38.6% 较为合适。根据表 2 的数据统计,各国家计量实验室锰浴测量装置的 N_H/N_{Mn} 最高值为 61.4,最低值为 30.09,均在此范围内。

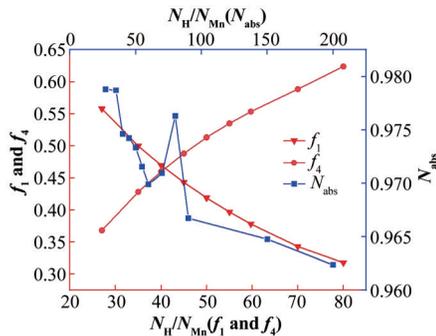


图4 MnSO₄溶液、H和Mn的中子吸收份额
Fig.4 The neutron absorption fraction of MnSO₄ solution, H and Mn

3.3 锰池半径

MnSO₄溶液对中子慢化、吸收能力及装置的中子泄漏受锰池半径影响,且溶液比活度随⁵⁵Mn的中子吸收份额而改变,从而影响 γ 测量装置的计数率和统计涨落。由于测量时,仅对一定体积的溶液进行测量,因此该处定义体积比活度 A_v ,即单位体积放射源的活度;而溶液 A_v 与⁵⁵Mn的中子俘获份额成正

表2 各国家计量院锰浴测量装置 N_H/N_{Mn} ^[16]
Table 2 N_H/N_{Mn} of Mn bath devices in different national institute of metrology^[16]

国家 Nation	机构 Institute	N_H/N_{Mn}	半径 Radius / cm
捷克 Czech	CMI	61.4	50
法国 France	LNMRI	30.09	50
美国 US	NIST	54	64.5
英国 UK	NPL	33.81	49
俄罗斯 Russia	VNIIM	48.85	42.5

比,可将溶液 A_v 转换成体积比吸收份额 A_r ,即单位体积内⁵⁵Mn中子俘获份额(式(2))。

$$A_r = \frac{3f_4}{4\pi R^3} \quad (2)$$

式中: A_r 为体积比活度份额, cm^{-3} ; R 为锰池半径, cm 。

如图 5 所示,假设 $N_H/N_{Mn}=60$,当锰池半径增大时, MnSO_4 溶液体积增多,导致溶液的慢化和吸收能力增强, Mn 的中子吸收份额 f_4 上升,锰池的中子泄漏份额 L 减少,当锰池半径超过 60 cm 之后, Mn 的中子吸收份额几乎不再随半径的增大而增大,基本接近饱和,但 A_v 和 A_r 会下降,导致 γ 测量装置的计数率下降和统计涨落升高,因此锰池半径不宜超过 60 cm;当锰池半径减少时,其中子泄漏份额不断增大, $r=60$ cm 时仅有 0.5%,而 $r=15$ cm 时中子逃逸份额高达 49.6%,接近一半的中子泄漏,不仅增大了锰浴测量装置的屏蔽负担,泄漏出来的中子可能通过墙面、地面以及其他物体反射再次进入锰池中造成中子的二次慢化和吸收,影响中子源强测量结果,并使结果的不确定度增大。因此,为有效平衡溶液的比活度和中子泄漏份额的关系,保证测量结果准确性,锰池半径宜在 45~60 cm 较为合适,此时溶液体积比活度和中子泄漏份额分别为 $9.7 \times 10^{-7} \sim 4.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$ 和 $2.3 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-3}$ 。如表 3 所示,多数国家实验室的锰池半径基本处于此范围内。

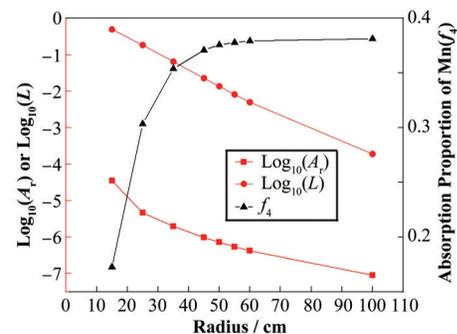


图5 锰浴球半径对溶液体积比活度、中子泄漏份额和 Mn 吸收份额的影响
Fig.5 Influence of Mn bath radius on volume specific activity, neutron leakage fraction and Mn absorption fraction of solution

表3 NIM测量结果不确定度清单
Table 3 Full uncertainty budget for NIM measurement

来源 Source	不确定度 Uncertainty / %	灵敏系数 Sensitivity	分布 Distribution	不确定度分量 Component / %	类型 Type
探测效率 Detection efficiency	0.64	1	正态 Normal	0.64	B
计数率统计 Counting statistical	0.11	1	正态 Normal	0.11	A
本底修正 Background correction	0.31	0.016	正态 Normal	0.01	A
泄露 Leakage	7.75	0.009	矩形 Rectangular	0.04	B
O、S俘获 O and S capture	20.12	0.021	矩形 Rectangular	0.24	B
源和腔的吸收 Source and cavity capture	5.09	0.021	矩形 Rectangular	0.06	B
⁵⁵ Mn的热中子俘获 Thermal neutrons captured by ⁵⁵ Mn	0.35	1	正态 Normal	0.35	B
合成标准不确定度 Combined standard uncertainty / %				0.78	
扩展不确定度(k=2) Expanded uncertainty (k=2) / %				1.56	

4 实验验证

4.1 锰浴测量装置

根据上述结论,中国计量科学研究院建立的锰

浴测量装置(中子源强度基准)(图6)主要由球形锰池、中子源定位容器、MnSO₄溶液循环管路、铅屏蔽室、γ测量装置(双路NaI探测器)及相关电子学设备组成,其中锰池半径为55 cm,溶液浓度为21.9%, N_H/N_{Mn} 为59.704。

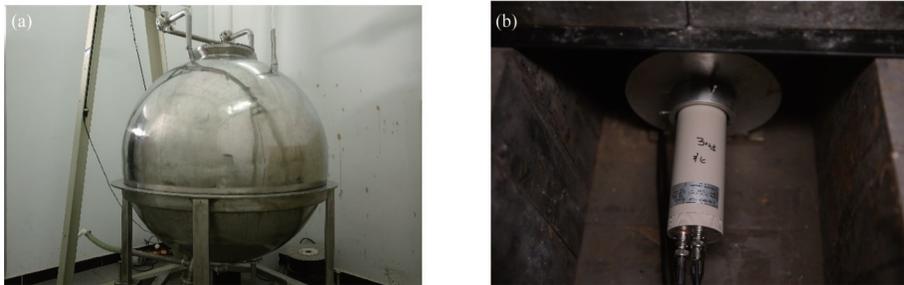


图6 锰浴测量装置 (a) 球形锰池, (b) 铅室中的NaI探测器
Fig.6 Mn bath measurement device (a) Spherical Mn bath, (b) NaI detector in lead chamber

4.2 国际比对

中子源强度比对是国际计量局电离辐射咨询委员会组织的中子计量关键比对之一,最近完成的国际比对中,主导实验室为英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL),参比实验室为中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM),比对结果分别是 $Q_{NPL}=(8.082\pm 0.102)\times 10^6 \text{ s}^{-1}$, $Q_{NIM}=(8.167\pm 0.127)\times 10^6 \text{ s}^{-1}$,结果相差1.05%,中国计量科学研究院不确定分析见表3, NPL测量结果不确定度 $u_{NPL}=0.63\%$ ($k=1$),将结果和不确定度代入式(3),得到归一化误差 $E_n=0.135$,表明依据上述研究结论建立的锰浴测量装置测量结果准确,实现了国际等效。

$$E_n = \frac{|Q_{NPL} - Q_{NIM}|}{2\sqrt{u^2(Q_{NPL}) + u^2(Q_{NIM})}} \quad (3)$$

式中: Q 为中子源强; u 为不确定度; E_n 为归一化误差,在0~1范围内表示参与实验室的测量值之间的

差异小于或等于两个实验室的合成扩展不确定度($k=2$)。

4.3 12枚中子源测量

中国计量科学研究院新建的热中子参考辐射装置(热中子注量率基准)内的12枚²⁴¹Am-Be中子源与S026/19中子源为同一批次生产的中子源,S026/19由英国NPL实验室测量,结果为 $(1.164\pm 0.015)\times 10^7 \text{ s}^{-1}$,12枚中子源由计量院测量,结果如表4所示,在不确定度范围内与英国NPL的测量结果一致^[17]。

5 结语

本文利用MCNP对锰浴测量装置的设计参数进行了分析研究,结果表明:MnSO₄溶液浓度参数的参考范围为17.3%~38.6%,即 $27\leq N_H/N_{Mn}\leq 80$,能够保证⁵⁵Mn有较高的吸收份额,同时减少截面比 σ_H/σ_{Mn}

表4 12枚²⁴¹Am-Be中子源测量结果
Table 4 The measurement results of 12 ²⁴¹Am-Be

源编号	测量结果	不确定度
Source number	Measurement result / 10 ⁷ s ⁻¹	Uncertainty / %
S020/19	1.168	0.80
S013/19	1.168	0.80
S017/19	1.166	0.80
S021/19	1.172	0.80
S019/19	1.166	0.80
S016/19	1.169	0.80
S015/19	1.165	0.80
S014/19	1.172	0.80
S018/19	1.174	0.80
S023/19	1.178	0.80
S024/19	1.180	0.80
S022/19	1.177	0.80

注：参考时间为2019.05.22

Note: Reference time was 22/05/2019

不确定度；锰池半径参数的参考为45~60 cm，⁵⁵Mn中子吸收份额基本饱和，体积比活度较大且中子逃逸份额较低。同时模拟计算过程中，输入粒子数达到10万，即可使修正因子的模拟结果达到稳定，降低了计算的时间成本。利用上述分析结论建立的锰浴法中子源强度基准装置参加了中子源中子发射率国际比对，并测量了热中子参考辐射装置的12枚中子源，为建立锰浴测量装置提供了合理的参考。

致谢 感谢中国原子能科学研究院李春娟老师对MCNP模拟提供的指导和帮助。

作者贡献声明 杨竣凯、王平全：直接参与、文章撰写；张健、张辉：直接参与、文章撰写、工作支持；张亚楠：直接参与、工作支持。

参考文献

- 1 丁大钊, 叶春堂, 赵志祥. 中子物理学: 原理、方法与应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.
DING Dazhao, YE Chuntang, ZHAO Zhixiang. Neutron physics: principles, methods and applications[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2001.
- 2 张锋, 袁超, 黄隆基. 中国同位素中子源测井技术与应用进展[J]. 同位素, 2011, 24(1): 12 - 19.
ZHANG Feng, YUAN Chao, HUANG Longji. Technology and application development of isotopic neutron source well logging in China[J]. Journal of Isotopes, 2011, 24(1): 12 - 19.
- 3 刘镇洲, 陈金象. Am-Be中子源辐射场周围剂量当量与吸收剂量的计算[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(1):

11 - 15.

LIU Zhenzhou, CHEN Jinxiang. Calculations of dose and ambient dose equivalent in radiation field for Am-Be neutron source[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(1): 11 - 15.

- 4 《计量测试技术手册》委员会. 计量测试技术手册第12卷: 电离辐射计量测试技术手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1997.

Technical Manual of Measurement and Testing Committee. Measurement and testing technical manual Volume 12: technical manual for measurement and testing of ionizing radiation[M]. Beijing: China Metrology Press, 1997.

- 5 卢希庭. 原子核物理[M]. 第2版. 北京: 原子能出版社, 2000.

LU Xiting. Nuclear physics[M]. 2nd Ed. Beijing: Atomic Press, 2000.

- 6 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. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.10.1876.

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. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.10.1876.

- 7 Croft S, Favalli A. How the choice of data reduction can strongly influence uncertainty assessment: a re-analysis of Mn-bath experiments[J]. Radiation Measurements, 2012, 47(7): 481 - 485. DOI: 10.1016/j.radmeas.2012.05.008.

- 8 李春娟, 陈军, 吴海成, 等. ²³⁸U裂变电离室修正因子及探测响应的蒙特卡罗模拟计算[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(3): 208 - 214.

LI Chunjuan, CHEN Jun, WU Haicheng, *et al.* Monte-Carlo simulation for correction factors and detection response of ²³⁸U fission chamber[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(3): 208 - 214.

- 9 Khabaz R. Appraisalment of the correction factors for neutron reaction in the manganese bath using Monte Carlo calculation[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2012, 293(2): 455 - 462. DOI: 10.1007/s10967-012-1792-0.

- 10 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 第2版. 北京: 原子能出版社, 2006.

XU Shuyan. Application of Monte Carlo method in

- experimental nuclear physics[M]. 2nd Ed. Beijing: Atomic Press, 2006.
- 11 ISO 8529-1—2001: Reference neutron radiations-Part 1: characteristics and method of production[S]. 2001.
- 12 Murphey W M. The correction factor for fast neutron reactions on sulfur and oxygen in the manganous-sulfate-bath calibration of neutron sources[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1965, **37**: 13 - 21. DOI: 10.1016/0029-554X(65)90330-7.
- 13 凌玉德. 锰浴法测中子源强度的修正项及²⁴¹Am(α ,n)Be中子源能谱的计算[J]. 原子能科学技术, 1984, **18**(6): 661 - 666.
LING Yude. Correction term of neutron source intensity measured by manganese bath method and calculation of energy spectrum of ²⁴¹Am(α , n)Be neutron source[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1984, **18**(6): 661 - 666.
- 14 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. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.06.1044.
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. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.06.1044.
- 15 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 第2版. 北京: 中国计量出版社, 2007.
NI Yucui. Evaluation of practical measurement uncertainty [M]. 2nd Ed. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007.
- 16 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. DOI: 10.1088/0026-1394/48/1a/06018.
- 17 杨竣凯, 王平全, 张辉, 等. 热中子参考辐射装置参数的实验测量[J]. 核技术, 2021, **44**(11): 110501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110501.
YANG Junkai, WANG Pingquan, ZHANG Hui, *et al.* Experimental measurement of parameters of thermal neutron reference field[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(11): 110501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110501.