

以水作为慢化体的多球中子谱仪模拟与解谱研究

TOLYMKHAN Yerzhan, 王忠海, 陈秀莲, 黎小兵,
王 玉 东, 覃 雪, 刘 军, 杨朝文
(四川大学物理学院 辐射物理与技术教育部重点实验室, 成都 610064)

摘 要: 中子能谱的测量是核辐射探测领域的一个重要研究课题, 它在整个中子辐射防护检测中具有重要地位, 与中子辐射剂量关系密切. 多球中子谱仪是进行中子能谱测量的常见工具, 具有非常多的优势, 首先操作简单方便; 其次功能强大, 主要表现在测量范围上, 相比较于其他类似设备来说要大许多; 最后在灵敏性方面十分出色. 本研究分别采用水和聚乙烯作为多球中子谱仪的慢化体, 使用蒙特卡罗程序 Geant4, 计算了 $10^{-9} \sim 10^2$ MeV 能量范围中 60 个能量点的响应函数, 并分析比较; 利用 Gravel 少道解谱算法, 对不同中子场中的水慢化体多球中子谱仪测量数据进行解谱, 数据显示水可以用作慢化体在设备中使用. 该研究为水用作慢化体在设备中使用提供了理论和模拟研究基础.

关键词: 多球中子谱仪; Geant4; 水慢化体; 响应函数; Gravel 算法

中图分类号: TL817+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2020)04-0753-06

Simulation and spectrum unfolding of multi-sphere neutron spectrometer with water as moderator

TOLYMKHAN Yerzhan, WANG Zhong-Hai, CHEN Xiu-Lian, LI Xiao-Bing,
WANG Yu-Dong, QIN Xue, LIU Jun, YANG Chao-Wen
(Key Laboratory of Radiation Physics and Technology, Ministry of Education, College of Physics,
Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Neutron energy spectrum measurement is an important research topic in the field of nuclear radiation detection. It plays an important role in the whole neutron radiation protection detection and is closely related to the neutron radiation dose. Multi-sphere neutron spectrometer is a common tool for neutron spectrum measurement. It has many advantages. First of all, it is simple and convenient to operate. Secondly, it is powerful, mainly in the measurement range, which is much larger than other similar equipment. Finally, it is very good at sensitivity. In this paper, water and polyethylene are used as the moderators of multi-sphere neutron spectrometers respectively, and the Monte Carlo program Geant4 is used to calculate the response functions of 60 energy points in the energy range of 10^{-9} MeV to 10^2 MeV, and the neutron response function curves of the two kinds of multi-sphere neutron spectrometers are compared. Using the Gravel few-channel spectrum unfolding algorithm, we measured data of the water moderator multi-sphere neutron spectrometer in different neutron fields. The spectrum unfolding results show that it is feasible to use water as the moderator of the multi-sphere neutron spectrometers.

收稿日期: 2019-04-12
基金项目: 国家自然科学基金 (11205108, 11475121); 四川大学优秀青年基金 (2016SCU04A13)
作者简介: Tolymkhan Yerzhan(1993—), 男, 哈萨克斯坦人, 硕士研究生.
通讯作者: 王忠海. E-mail: zhonghaiwang@scu.edu.cn

ter. The research results provide a theoretical and simulation basis for the use of water as a moderator in equipment.

Keywords: Multi-sphere neutron spectrometer; Geant4; Water moderator; Response function; Gravel algorithm

1 引言

随着中子物理学的发展,无论是在基础中子物理研究、中子应用领域,还是在辐射防护领域,为了更好地进行研究和工作的,中子能谱是必不可少的一部分^[1-2]. 由于中子能谱包含了大量关于核反应的特征信息,中子能谱在实验研究和理论分析中具有重要意义. 在实际操作中,中子能谱测量的方法包括多球中子谱仪、飞行时间法、活中子谱分析法、阈探测器法和核反冲质子法^[3]. 其中值得一提的是多球中子谱仪,多球中子谱仪是进行中子能谱的测量时的常见工具,具有非常多的优势. 首先操作简单方便;其次测量范围广;最后在灵敏性方面十分出色.

中子剂量仪器大多数属于慢化型仪器,探头通常采用一定厚度的慢化体,比如聚乙烯、甲烷、水、石蜡等^[4]. 一般来说,中子能谱解谱是非常复杂的,因此,研究人员开发了几种数学方法和计算代码^[5-6]. Gravel 算法是 PTB 实验室开发的一种重要算法^[7],目前在多球中子谱仪解谱领域得到了广泛应用.

本文的主要研究目标是分别用水、聚乙烯为慢化体,来模拟不同半径慢化体的多球中子谱仪,并对这两种慢化体的响应函数模拟结果进行比较,之后利用 Gravel 解谱算法得到使用水作为慢化体的多球中子谱仪所测得的中子能谱.

2 多球中子谱仪

多球中子谱仪,又名 Bonner 球中子谱仪,该仪器由多个慢化体球壳组成,各球壳的体积大小不一,每个球壳都会含有热中子灵敏探测器. 其中灵敏探测器的种类多种多样,包括应用最广泛的³He 正比计数器,常用的⁶Li 晶体探测器和比较少见的活化片或带转换体(如¹⁰B、⁶Li、²³⁵U 等)的径迹探测器等^[8]. 值得一提的是,³He 正比计数器的灵敏度非常高,与其它探测器的相比较灵敏度有一定的优势. 球壳外径根据具体情况会稍有不同,主要是在 5~40 cm^[9]. 通常的多球中子谱仪的慢化体由聚乙烯组成,罕有文献报道过以

水作为慢化体的多球中子谱仪.

3 计算模型

多球谱仪的球体中心为热中子探测器,因此需在热中子探测器外包裹大量中子散射截面较大的慢化材料,由此提高设备的响应能力. 多球谱仪的基本结构是球形³He 正比计数管外包裹慢化体,通过改变单一参数来研究各结构参数对能量响应的影响. 根据实际情况,此处采用的探测器为应用广泛的 SP9³He 球形正比计数器,该计数器由英国 Centronic 公司生产,原子密度为 10²⁰ atoms/cm³,质量密度为 4.966×10⁻⁴ g/cm³,球体内半径 1.6 cm,外半径 1.65 cm. 采用了水和聚乙烯作为原材料,其中材料半径采用多种尺寸,包括 2.75、4.35、5.95、7.55、9.15、10.75、12.35、13.95 和 15.55 cm. 慢化材料外面的不锈钢厚度为 0.1cm. 锥型中子束从点源出射到慢化球上(如图 1),忽略中心探测器的连接器与各种线缆的影响. 选取了 60 个能量点进行模拟,能量从 10⁻⁹ MeV 到 10² MeV 变化.

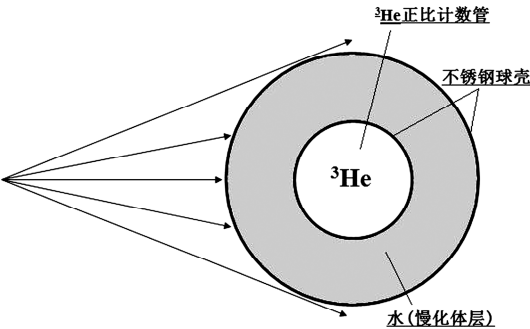


图 1 多球中子谱仪计算模型
Fig. 1 Calculation model of multi-sphere neutron spectrometer

4 水与聚乙烯响应函数曲线比较

本研究采用蒙特卡罗程序 Geant4 模拟计算了慢化体分别为水和聚乙烯探测器的响应函数曲线. Geant4 是一个工具包,它可以模拟粒子在物质中的输运和相互作用过程,其理论基础是蒙特卡罗方法^[10].

图 2, 3, 4 和 5 展示了半径分别为 2.75、

4. 35、10. 75 和 13. 95 cm 水慢化体与聚乙烯慢化体 Geant4 程序的响应函数计算结果.

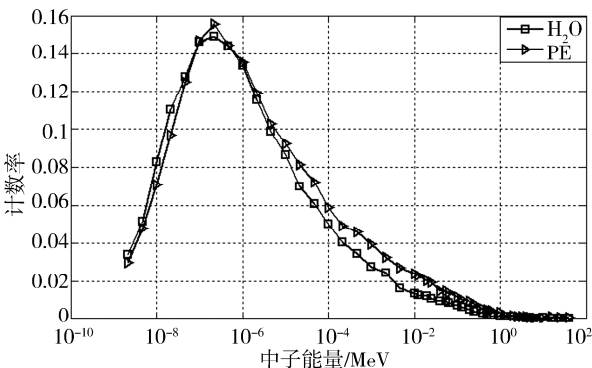


图 2 半径为 2. 75 cm 水慢化体与聚乙烯慢化体的响应函数曲线

Fig. 2 Response function curve of water moderator and polyethylene moderator with radius of 2. 75 cm

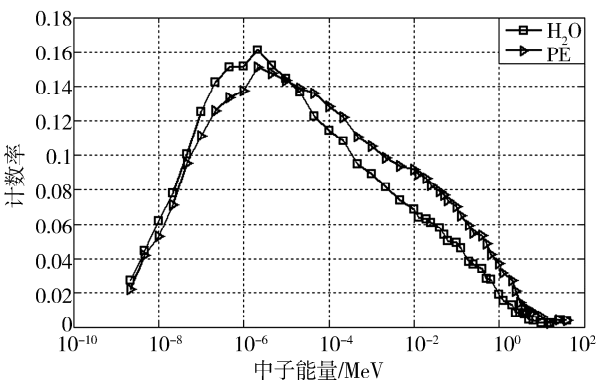


图 3 半径为 4. 35 cm 水慢化体与聚乙烯慢化体的响应函数曲线

Fig. 3 Response function curve of water moderator and polyethylene moderator with radius of 4. 35 cm

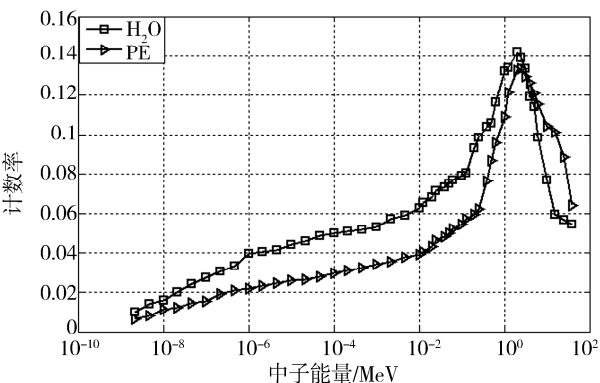


图 4 半径为 10. 75 cm 水慢化体与聚乙烯慢化体的响应函数曲线

Fig. 4 Response function curve of water moderator and polyethylene moderator with radius of 10. 75 cm

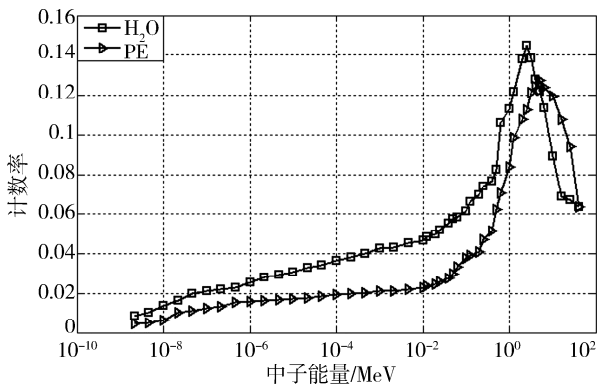


图 5 半径为 13. 95 cm 水慢化液体与聚乙烯慢化体的响应函数曲线

Fig. 5 response function curve of water moderator and polyethylene moderator with radius of 13. 95 cm

经过对图 2~5 四种曲线变化的综合分析, 可以得到不管是水还是聚乙烯, 在慢化体的应用中效果相差不大. 尤其慢化体半径越小, 两者的差距越不明显. 当慢化体半径较大时差别略大, 但趋势一致. 多球中子谱仪响应函数曲线的差异主要是由核素种类及其含量、密度等参数差异所造成的.

从图 2 到图 5 容易发现多球中子谱仪每个球的能响曲线都有一个峰值, 且峰值应该在其计算的能量范围内均匀的分开, 峰值集中在两个能量段, 较小直径慢化体的峰值集中在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ MeV 之间, 较大直径慢化体的峰值集中在 $10^0 \sim 10^2$ MeV 之间.

对于慢化体比较薄(即直径比较小)的球, 热中子基本被聚乙烯散射和吸收; 对于低能中子, 部分中子被散射而逃逸, 部分经慢化后变为热中子, 进入 ^3He 管而被探测; 对于高能中子, 部分中子被散射而逃逸, 部分经慢化, 但慢化程度低, 不足以使其变成热中子, 因而仍旧不易被探测. 所以其响应曲线峰值在低能端.

对于慢化体比较厚(即直径比较大)的球, 热中子和低能中子几乎全部被慢化体散射和吸收; 对于高能中子, 部分中子被散射而逃逸, 部分经慢化后变为热中子而被探测. 因此, 其响应曲线峰值在高能端.

图 1 所进行的实验, 慢化体层的厚度处在递增的状态中, 能量范围从 $10^{-9} \sim 10^2$ MeV, 得出了从裸球到慢化体层厚度为 15.55 cm 的水球响应函数曲线(如图 6). 从图 6 可以得知, 中子的表现在各种慢化体中不尽相同, 这是由于各中子间能量的差异, 所以不管是在慢化程度还是在响应程度方面都会有所差异. 这也是实际中对中子能量分

布判断的重要依据。在慢化层厚度递增的同时,不同类型的中子会有不同的表现,热中子会被慢化体吸收,部分逃跑。低能中子会努力向热中子的方向发展,部分发展为热中子,然后被探测到,部分在这个过程中被吸收。高能中子的情况比较特殊,分为慢化层厚薄两种情况,前者可慢化为热中子,从而被探测到,反之则会趋于逃逸。综上所述,响应程度会随着慢化层不断加厚从低能区较活跃转为高能区较活跃。

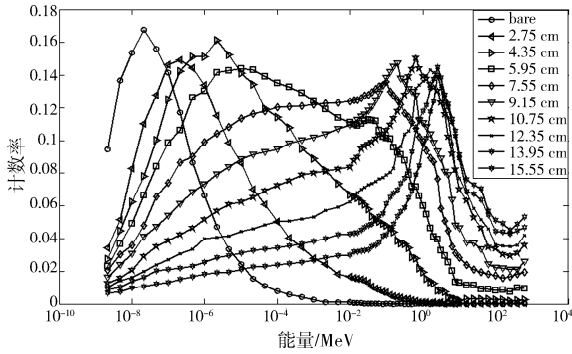


图 6 水慢化球的响应函数曲线

Fig. 6 Response function curve of water moderator sphere

5 多球中子谱仪的解谱方法与结果

解谱的本质工作就是通过利用数学或者物理的方式方法在一切可能的能谱空间中去探寻出一个最合理的能谱,让其无限地贴近于真实的能谱^[11]。对于一个大小相对固定的多球来说,其能量响应函数也就是确定的,通过结合每一个多球对 neutron 辐射场测量的结果,可以用下式进行描述:

$$N_k = \int R_k(E)\Phi(E)dE, k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, n 为探测器的数量; N 是计数率; k 则是对不同探测器的区分; E 指的是能量值; R 为能量响应; $\Phi(E)$ 是中子能量为 E 的注量率。得到该式的表示方法后结合测量结果,并进行解谱之后可得到最终的中子能谱。(1)式最大的特点体现在能量上,它是连续的,被称为费雷德霍姆型积分方程,实践中常将能量划分为若干个组,把上式写成离散的形式:

$$N_k = \sum_i R_{ik}\Phi_i, k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中, N 是计数率, k 则是对不同探测器的区分, R 为能量响应, i 是对不同区间做的区分,各个区间中子的具体数值用 m 来表示。注量值用 Φ_i 来表示。

解谱的过程相对来说比较复杂,数学上存在两点问题:一是少道解谱(Few-Channel);二是多道解谱(Multi-Channel)。可以这样理解:当 $n < m$, 即探测器个数小于所分能量区间的个数时,就称为少道解谱;当 $n \geq m$, 即探测器个数大于等于所分能量区间的个数时,就称为多道解谱^[12]。当然,从上面的结论可以得出,多球中子谱仪解谱的问题就属于少道解谱。解谱的本质在于进行求解反卷积方程(2)。基于求解中子能谱的基本思想和解谱方法,当前已发展了多款解谱程序包和算法。结合实际情况,在此处采用了应用广泛的 Gravel 算法,该算法属于迭代计算,同时该算法采用了功能强大的 GRAVELW 程序,该程序的理论基础为非线性最小二乘法^[13],该算法的前身是 SAND-II 解谱算法,经过一系列的改进创新最终得到该算法。该算法被应用于解谱中各个情况,比如说由中子能量沉积谱到中子能谱的反解。在所考虑的 χ^2 表达式中,脉冲高度谱值 A_0 的对数与对角(相对)协方差矩阵一起使用:

$$\chi^2 = \sum_i (\ln A_{0i} - \ln A_i)^2 \cdot \frac{1}{\rho_i^2} \quad (3)$$

$$A_i = \sum_v R_{iv} \cdot \Phi_v = \sum_v R_{iv} \cdot \exp(\ln \Phi_v) \quad (4)$$

ρ_i 是 A_0 的相对标准偏差,即 $\rho_i = \frac{\sigma_{0i}}{A_{0i}}$ 。在最初 SAND-II 代码中,不包括“权重” ρ_i 。假设已知一个近似解 $\ln \Phi^{(1)}_v$, 公式(4)可以扩展成泰勒级数第二阶:

$$\ln A_i = \ln A_i^{(1)} + \sum_v W_{iv}^{(1)} \cdot (\ln \Phi_v - \ln \Phi_v^{(1)}) \quad (5)$$

$$A_i^{(1)} = \sum_v R_{iv} \cdot \exp(\ln \Phi_v^{(1)}) \quad (6)$$

$$W_{iv}^{(1)} = \frac{R_{iv} \cdot \exp(\ln \Phi_v^{(1)})}{A_i^{(1)}} \quad (7)$$

为了找到 χ^2 表达式等式(3)的最小值,可以构造迭代过程。也就是说,先得到 k 的值,通过 k 的值得到 $(k+1)$ 的值,具体表示如下: $\ln \Phi_\mu^{(k+1)} - \ln \Phi_\mu^{(k)} = \lambda_\mu^{(k)} \cdot \sum_i (\ln A_{0i} - \ln A_i^{(k)}) \cdot \frac{W_{i\mu}^{(k)}}{\rho_i^2}$, 其中,

$$\lambda_\mu^{(k)} = \left(\sum_i \frac{W_{i\mu}^{(k)}}{\rho_i^2} \right)^{-1} \quad (8)$$

应该提到的是, BUNKI (SPUNIT) 算法类似于 SAND-II (Gravel) 算法。从 SAND-II 迭代公式方程(8)开始,在 $A_i^k = A_{i0} + \delta_i^k$ 周围展开右边,一阶得到:

$$\Phi_\mu^{(k+1)} = \Phi_\mu^{(k)} \frac{\sum_i \frac{A_{0i}}{A_i^k} \cdot \frac{R_{i\mu}}{A_{0i}} \cdot \frac{1}{\rho_i^2}}{\sum_i \frac{R_{i\mu}}{A_{0i}} \cdot \frac{1}{\rho_i^2}}$$

基于上述原理, 我们开发了一个基于 MatLab 的解谱迭代程序来执行 Gravel 算法, 并计算每次迭代的 χ^2 . 能量箱是我们选取的样本, 样本数目定为 60 个, 与上面多球中子谱仪中的数值一致. 使用该程序的解谱效果见图 7~9.

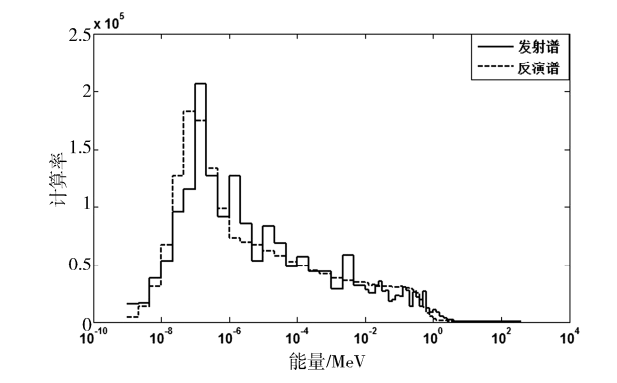


图 7 发射谱为裂变环境模拟谱时的解谱
Fig. 7 Spectral unfolding results of the emission spectrum in a fission environment simulation spectrum

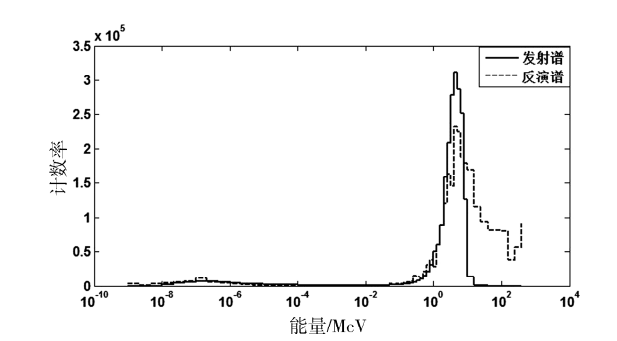


图 8 快中子能区的解谱结果
Fig. 8 Spectral unfolding results of fast neutron energy region

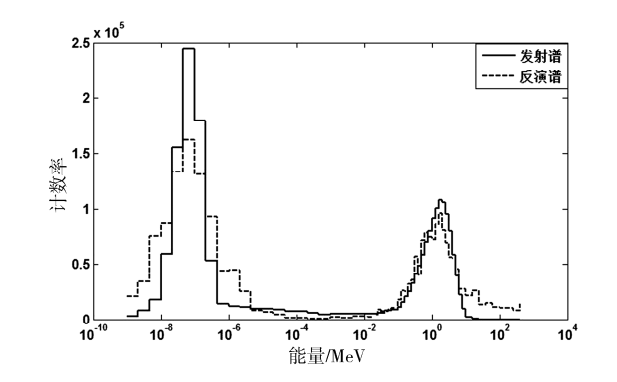


图 9 Gravel 算法对 Am-B 源的解谱结果
Fig. 9 Spectral unfolding results of Am-B sources by Gravel algorithm

通过对图 7~9 的解谱结果分析可知, 利用 Gravel 算法得出的反演谱在裂变环境和快中子能区以及 Am-B 源环境中的反演谱和发射谱的总体

趋势符合得较好, 但仍存在一定差异性. 比如, 图 7 中反演谱的峰位(10^{-7} MeV)较发射谱的相应峰位(4.64×10^{-8} MeV)向高能端移动; 图 8 中反演谱和发射谱的峰位也有差异, 且反演谱高能拖尾严重; 图 9 表明, 两种谱的差异不大, 仅仅在高能峰幅度上面存在一定的差异, 在实际操作中, 并不会对最终结果有显著影响, 所以忽略不计.

6 结 论

本文首先通过 Geant4 程序分别计算不同直径的水慢化体和聚乙烯慢化体多球中子谱仪的中子响应函数曲线, 分析模拟结果, 并进行对比. 综上所述, 不管是慢化体材料是水还是聚乙烯, 从整体上来看最终效果差异不大, 尤其是半径较小的球; 针对半径大一些的球, 这两种慢化体的响应函数曲线趋势也很一致. 二者差异是由核素种类及其含量、密度等参数差异所造成的. 从 Geant4 模拟结果可以看出, 两种慢化体的响应曲线的峰值都随着慢化体层厚度的增加逐渐向高能区移动, 且峰值略微有降低的趋势.

通过基于 Gravel 迭代算法的 MatLab 程序计算了三种发射谱包括裂变环境模拟谱、快中子能区的能谱和 Am-B 源为发射谱时的解谱结果. 解谱结果与对应的发射谱整体符合较好, 但仍略有差别, 这是因为计算的统计误差和不同程序统计计数方法不同. 由上述分析可知, Gravel 解谱算法可广泛运用于多种及不同环境下中子能谱的反解和求取, 为后续基于中子能谱的研究奠定了基础. 此外上述研究结果还为水慢化体多球中子谱仪的设计提供了理论依据.

参考文献:

- [1] 祝庆军, 宋逢泉, 郭倩, 等. 基于 Bonner 多球的环境中子能谱和剂量率测量[J]. 核科学与工程, 2013, 33: 49.
- [2] 郭子军, 曾进忠, 姚小丽. 辐射防护用中子剂量仪器的监测原理和使用中应注意的问题[J]. 中国辐射卫生, 2010, 19: 39.
- [3] 魏熙晔, 袁永刚. ^3He 多球中子谱仪响应函数的理论模拟[J]. 核技术, 2010, 33: 532.
- [4] 王攀峰. 多球中子谱仪的研制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 7.
- [5] 熊厚华. 反应堆堆芯中子能谱在线测量方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 20.
- [6] 李桃生. 中子周围剂量当量(率)监测方法的研究

[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2004: 47.

[7] Wang G Y, Han R, Liu J L. Comparison and re-search on the GRAVEL and PRIP algorithms of neutron energy spectrum unfolding [J]. RDTM, 2017, 11: 1.

[8] 陈军, 杨小芸, 容超凡. 有关中子多球谱仪的计算问题[R]. 西安: 第十三届全国核电子学与核探测技术学术年会, 2006.

[9] 宋逢泉, 祝庆军, 廖燕飞, 等. Bonner 球谱仪对 Pu-Be 源中子能谱的测量[J]. 核科学与工程, 2013, 33: 60.

[10] 曾志, 李君利, 程建平, 等. Geant4 在核技术领域的应用[J]. 同位素, 2005, 18: 55.

[11] 李建伟, 李德源, 刘建忠, 等. 三种解谱算法求解中子能谱的解谱效果比较[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37: 147.

[12] Matzke M. Unfolding procedures [J]. Radiat Prot Dosim, 2003, 107: 155.

[13] Reginatto M, Goldhagen P, Neumann S. Spectrum unfolding, sensitivity analysis and propagation of uncertainties with the maximum entropy deconvolu-tion code MAXED [J]. Nucl Instrum Meth A, 2002, 476: 242.

引用本文格式:

中 文: Tolymkhan Y, 王忠海, 陈秀莲, 等. 以水作为慢化体的多球中子谱仪模拟与解谱研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 753.

英 文: Tolymkhan Y, Wang Z H, Chen X L, *et al.* Simulation and spectrum unfolding of multi-sphere neutron spec-trometer with water as moderator [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2020, 57: 753.