

桶型 ^3He 中子探测器探测效率标定装置设计分析研究

于嘉蕾, 侯 龙*, 王 琦

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要:基于后处理生产的 ^3He 中子探测器,开展了桶型中子探测效率标定装置的材料选择及功能结构设计分析,使用MCNP程序构建了装置及 ^3He 探测器的相关计算模型,根据生产过程及设计需求,分别分析了桶型中子探测效率标定装置慢化层的慢化效果,及不同位置多根 ^3He 管中子探测器的探测效率,并计算了源管、探测器上方及屏蔽体周围的剂量,结果表明该装置的慢化能力及屏蔽效果良好,放射性剂量水平满足辐射防护要求。

关键词:蒙特卡罗方法; ^3He 中子探测器;标定装置;辐射屏蔽

中图分类号:TL816+.3 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2022)02-0032-05

Design and Analysis of Barrel Type ^3He Neutron Detection Efficiency Calibration Device

YU Jialei, HOU Long*, WANG Qi

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

Abstract:In this paper, the material selection and functional structure design of ^3He tube barrel neutron detection efficiency calibration device for spent-fuel reprocessing are carried out. The calculation models of the device and ^3He detector are built based on MCNP program, the moderating ability and effect of the moderating layer of the device are calculated, the detection efficiency of several ^3He tube neutron detectors at different positions and the dose above the source tube, detector and around the shield are calculated. The results show the calibration and shielding effect of the device are good, and the radioactive dose level meets the requirements of radiation protection.

key words:Monte Carlo method; ^3He neutron detector;calibration device;radiation shielding

收稿日期:2022-03-09

作者简介:于嘉蕾(1998—),女,硕士研究生,主要从事粒子物理与原子核物理方面的研究。E-mail:849556952@qq.com。*通信作者:侯 龙(1965—),男,研究员,主要从事核技术及应用方面的研究。E-mail:houl@ciae.ac.cn

0 引言

在后处理生产过程会产生某些具有自发中子裂变特性的物料,这些物料随着生产过程其位置、形态和质量均会发生变化,但由于生产环境的特殊性,这些物料难以离线测量分析,需要采用大量的中子探测器进行在线测量,因此对这些中子探测器开展准确、快速的标定测量具有重要的实际意义。本文针对后处理生产工况的实际需求,设计了可一次对多根 ^3He 中子探测器进行标定测量的立式桶型中子探测器探测效率标定测量装置,对该装置的材料选型、功能结构开展数学建模,选用 ^{252}Cf 中子源并基于蒙特卡罗程序对立式桶型中子探测效率标定测量装置的中子慢化能谱、中子探测效率、中子及 γ 屏蔽效果进行分析计算。

1 桶型中子探测效率标定装置设计及建模

为了对大量的中子探测器进行高效的标定测量,本文基于待测 ^3He 中子探测器,设计了一次可对多个中子探测器进行标定测量的桶型中子探测效率标定装置,对中子源及慢化屏蔽材料进行了选型,并对该标定装置构建了MCNP计算模型。

1.1 ^3He 管中子探测器

立式桶型中子探测效率标定测量装置系统选用 ^{252}Cf 中子源作为测量源,其半衰期为2.65 a,中子射线平均能量为2.348 MeV,大部分中子属快中子。对于 ^{252}Cf 源还需考虑两部分 γ 射线: ^{252}Cf 源自身 α 衰变产生的平均能量为0.8 MeV的 γ 射线以及中子经过慢化层俘获反应后产生的 γ 射线。

^3He 对热中子的反应截面最大($5.3\times 10^{-25}\text{ m}^2$),广泛用于正比计数器中,热中子与 ^3He 的反应为: $^3\text{He}+n\rightarrow ^1\text{H}+^3\text{H}+765\text{ keV}$ 。 ^3He 管中子探测器主要通过记录中子与 ^3He 发生核反应时放出的带电粒子在探测器中引起的电离来实现中子探测^[1]。由于其探测效率高,不用低温保存,且具有对 γ 射线灵敏度低,结构简单,性能稳定等特点而得到了广泛应用^[2-3]。基于以上性能特点,在后处理生产线中将使用大量 ^3He 中子探测器,因此需提前将 ^3He 探测器探测效率计算分析,并进行归一化处理。

由于 ^3He 探测器对热中子探测效率高,为提高热能区的中子注量率需要选择合适的慢化材料。由于不同能量的中子与物质相互作用具有各

自的特点,需要对不同能量的中子源选择不同的慢化体并进行结构设计。本文采用分层复合慢化设计方式:先使用含氢较高的材料(如聚乙烯、水、重水等材料)将透射中子慢化为热中子;再加上对热中子有较大吸收截面的材料(如含锂、硼、稀土元素等材料)将热中子充分吸收;此外中子与屏蔽材料相互作用的过程中^[4],会产生大量 γ 射线,最外层还需使用中高原子序数的元素做 γ 射线屏蔽材料^[5]。

综上,本装置最内层采用聚乙烯作为中子慢化材料,中间采用含硼聚乙烯作为热中子吸收材料,最外层采用铅作为伽马射线屏蔽层的复合屏蔽结构。

1.2 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法又称为随机抽样技巧或统计实验方法,是一种以概率统计理论为指导的一类数值计算方法,能够比较逼真地描述模型的特点和物理过程,在粒子输运问题中应用广泛。MCNP程序是由美国阿拉莫斯实验小组经过多年研究编制的大型蒙特卡罗计算程序集,主要用于复杂三维几何结构中的中子、光子、中子-光子耦合输运问题^[6],适用的光子能量范围为 $10^{-3}\sim 10^5\text{ MeV}$,中子能量范围为 $10^{-11}\sim 20\text{ MeV}$,电子能量范围为 $10^{-3}\sim 10^3\text{ MeV}$,也可以计算反应堆中临界本征值问题。MCNP程序在模拟过程中,首先设置入射粒子的位置、能量、入射角度以及靶材料和探测器等物理参数,然后利用概率统计方法对入射粒子进行输运跟踪,模拟粒子与原子核的相互作用过程,并统计相关物理数据^[7]。

本文使用MCNP程序建立了立式桶型慢化屏蔽装置及后端集成电子学部件的 ^3He 探测器的相关计算模型,分析了该装置慢化材料厚度选取的合理性,并对探测器探测效率进行模拟,最后计算了装置外中子及伽马射线剂量,分析了慢化体的慢化能力及屏蔽体的屏蔽效果。

1.3 探测效率标定测量装置MCNP建模

基于MCNP建立的桶型中子探测效率标定测量装置模型如图1所示,其中图1(a)为桶型中子探测效率标定测量装置 $x-z$ 面,从内到外依次为源管(内部放置 ^{252}Cf 中子源)、 ^3He 管探测器、聚乙烯慢化屏蔽层、镉层作为热中子吸收层,最外层为铅层用于屏蔽 γ 射线;图1(b)为桶型中子慢化屏蔽装置 $x-y$ 面,可见源管放置圆柱形聚乙烯中子慢化材料中心,12根 ^3He 计数管等距放置在外圈,聚乙烯、含硼聚乙烯、镉层及铅屏蔽层如图示。

其中,待标定的³He 管探测器尺寸为 φ50 mm×235 mm,工作电压为 1 180 V,气压为 0.4 MPa,后端由电荷灵敏前级、主放大电路、成型电路、基线

恢复电路、高通滤波电路、甄别电路以及高低压电源集成了电子学模块,结构如图 2 所示。

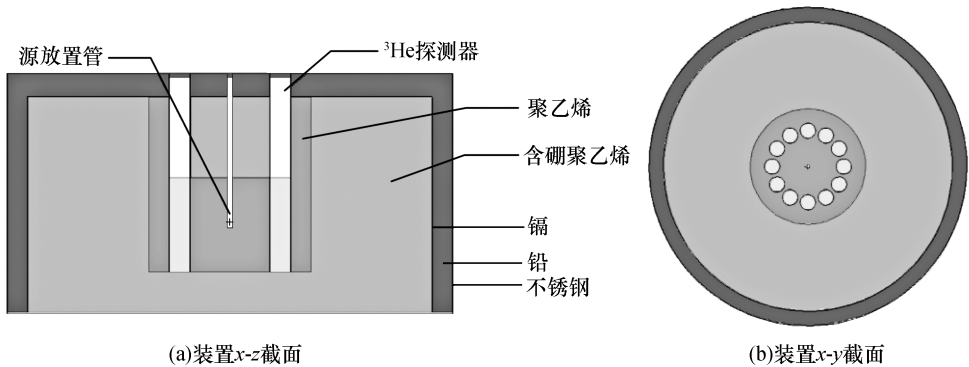


图 1 桶型中子探测效率标定测量装置结构图

Fig. 1 Structure of barrel type neutron detection efficiency calibration measuring device

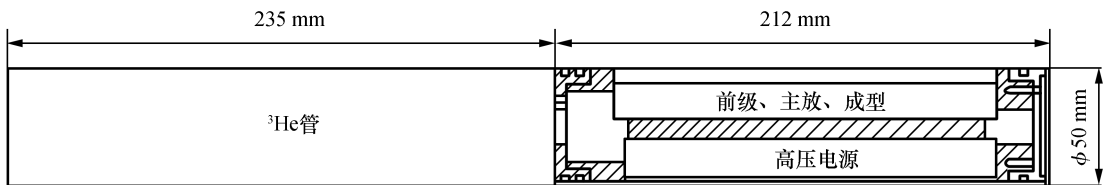


图 2 ³He 中子探测器结构图

Fig. 2 Structure of ³He neutron detector

2 桶型中子探测效率标定装置计算分析

本文根据后处理生产过程及设计需求,运用 MCNP 程序分别计算了桶型中子探测效率标定装置的聚乙烯慢化层的慢化能力及效果,不同位置 12 根³He 管中子探测器的探测效率以及源管、探测器上方及屏蔽体周围的剂量。

2.1 聚乙烯慢化效果计算

通常使用聚乙烯作为中子慢化体时,在使用同一中子源的情况下,探测效率随慢化体厚度增大而增大,但通常在聚乙烯慢化体厚度>5 cm 后,探测效率没有明显提高^[8]。由于慢化体太大会使装置过大,如何在可放置的 12 根探测器的情况下,保证聚乙烯慢化体厚度的合理性,本文设计聚乙烯慢化体厚度为 10 cm,并对不同能量的中子源在有慢化材料时的中子能量分布进行了计算。通过计数卡 F4 进行模拟计算后,统计中子源未经慢化材料与经过慢化材料后,不同能量区间中子计数如表 1 所示,通过折算其中子能量分布如图 3 所示。

由图 3 可看出,中子慢化效果良好,所设计 10 cm 厚度的聚乙烯慢化体已达到慢化效果。

表 1 不同慢化材料下不同能量区间中子计数
Table 1 Neutron counting under different moderating material

能量	无慢化/cm ⁻²	有慢化/cm ⁻²
1×10 ⁻⁸	0	1.13×10 ⁻⁶
3×10 ⁻⁸	0	1.11×10 ⁻⁵
1×10 ⁻⁷	0	4.36×10 ⁻⁵
1×10 ⁻⁶	0	2.30×10 ⁻⁵
1×10 ⁻⁵	0	1.77×10 ⁻⁵
1×10 ⁻⁴	0	1.91×10 ⁻⁵
3×10 ⁻³	0	2.95×10 ⁻⁵
1.5×10 ⁻²	0	1.41×10 ⁻⁵
1×10 ⁻¹	5.62×10 ⁻⁶	1.92×10 ⁻⁵
1	1.76×10 ⁻⁴	5.14×10 ⁻⁵
10	3.73×10 ⁻⁴	7.19×10 ⁻⁵
16.9	1.19×10 ⁻⁶	3.52×10 ⁻⁷
total	5.56×10 ⁻⁴	3.02×10 ⁻⁴

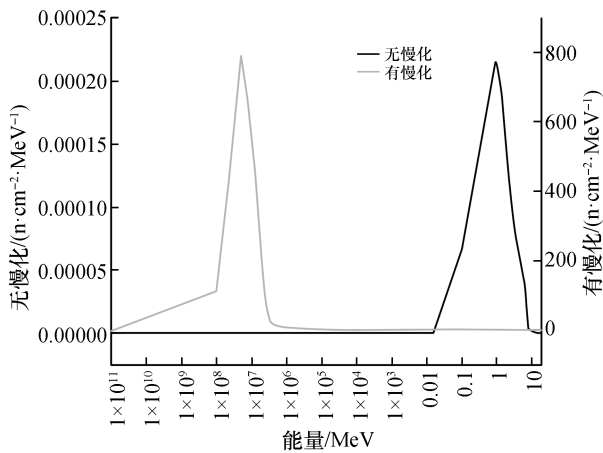


图 3 探测器位置中子能量分布
Fig. 3 Neutron energy distribution of detector and neutron placement tube

2.2 探测器探测效率模拟计算

本文计算²⁵²Cf 中子源置于装置中心时,桶型中子探测效率标定装置中子源周围待标定的 12 根³He 管中子探测器的探测效率,其计算结果如表 2 所示。通过计算结果显示,使用本装置一次性对 12 根探测器基于同一中子源的探测效率进行标定测量时结果均匀,可以较好地实现大量的

中子探测器准确、快速标定测量,为实测使用提供了良好的计算分析基础。

2.3 中子及 γ 屏蔽计算

为保证探测效率及探测器中子能谱稳定性,同时考虑辐射剂量必须满足辐射防护的要求,需要开展屏蔽计算。如前所述,由于²⁵²Cf 中子源自身 α 衰变产生以及中子与慢化材料发生辐射俘获还会发射 γ 射线,因此在屏蔽设计时需要同时考虑中子与 γ 的辐射防护问题,本文选择放射性活度约为 $1.7 \times 10^6 \text{ n}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的 Cf-252 源开展中子及 γ 屏蔽计算。本设计的桶型中子探测效率标定装置其聚乙烯慢化层外有 30 cm 的含硼聚乙烯、镉层中子吸收体及 5 cm 的铅层屏蔽 γ 。本文通过 MCNP 程序开展三维几何建模,使用中子、光子注量-剂量转换卡(DE 和 DF),计算装置外中子及 γ 剂量当量率,其中,中子、光子注量-剂量转换系数参照 ICRP-21 号报告^[9-11]。考虑到测量过程中会更换探测器,因此除了对装置周围区域剂量率开展了计算外,还分别对探测器上方位置剂量率及源管内剂量率进行了计算,结果如表 3 所示,从计算结果看装置的屏蔽效果好,满足监督区剂量率小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 的辐射防护的要求。

表 2 探测器探测效率计算结果

Table 2 Results of detection efficiency under different positions

位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
探测效率	0.016 0	0.015 9	0.015 9	0.015 9	0.015 8	0.016 0	0.016 0	0.015 9	0.016 0	0.015 9	0.015 9	0.015 9

表 3 装置不同位置的辐射剂量率

Table 3 Radiation dose rates at different locations

单位: $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$

位置	源管内	探测器上方	装置周围
剂量率	3.38×10^4	2.98	4.76×10^{-2}

3 结 论

本文设计了一套可对多个³He 中子探测器进行标定测量的桶型中子探测效率标定装置,对该装置的材料、结构进行了蒙特卡罗建模分析,对慢化层的慢化能力及效果,不同位置中子探测器的探测效率以及装置周围中子及 γ 剂量进行了计算分析。结果表明,本装置能够满足后处理生产过程中物料测量对大批量³He 探测器探测效率标定的需求,为实际工作提供了有效的技术基础。

参考文献:

[1] REILLY D, ENSSLIN N, SMITH H, et al. Passive nondestructive assay of nuclear materials [M]. Washington, DC: Government Printing Office, 1991: 380-388.
[2] 杨剑波, 黄红, 刘志, 等. 初探中子探测器的研究现状与发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(14): 89-96.
[3] 丁洪林. 核辐射探测器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 83-88.
[4] 张杰. 基于紧凑型中子发生器的快中子照相准直屏蔽系统模拟与设计[D]. 兰州: 兰州大学, 2017: 30-74.
[5] 曾小义, 黎泽伟. 核辐射综合屏蔽材料的研究进展及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(35): 14352-14358.
[6] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 2 版. 北京: 原子能出版社, 2006: 179-305.

(下转第 76 页)

- 面支护反力非线性上限解[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(5): 1219-1227.
- [12] 姚聪, 杨小礼. 基于非关联流动法则的盾构隧道掌子面稳定性上限分析[J]. 矿冶工程, 2016, 36(4): 26-29.
- [13] 安永林, 李佳豪, 赵丹, 等. 斜井掌子面形状与倾角对隧道开挖面稳定性影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(10): 2612-2617.
- [14] 唐震, 黄茂松, 袁聚云. 基于连续速度场的基坑抗隆起稳定性上限分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 833-839.
- [15] 杨小礼, 王作伟. 非线性破坏准则下浅埋隧道围岩压力的极限分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(1): 299-302.
- [16] 唐高朋, 李亮, 赵炼恒, 等. 非线性破坏准则下边坡稳定性极限分析斜条分法[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 2063-2072.
- [17] YANG X L, HUANG F. Three-dimensional failure mechanism of a rectangular cavity in a Hoek-Brown rock medium[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2013(61): 189-195.
- [18] 王凤云, 钱德玲. 基于统一强度理论深埋圆形隧道围岩的剪胀分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1966-1976.
- [19] ZHANG D B, MA Z Y, YU B, et al. Upper bound solution of surrounding rock pressure of shallow tunnel under non-linear failure criterion[J]. Journal of central south university, 2019, 26(7): 1696-1705.
- [20] MOLLON G, PHOON K K, DANIEL D, et al. Validation of a new 2D failure mechanism for the stability analysis of a pressurized tunnel face in a spatially varying sand[J]. Journal of engineering mechanics, 2011, 137(1): 8-21.
-
- (上接第35页)
- [7] 胡济民. 核裂变物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014: 9-12.
- [8] 刘应都, 张国强, 王宏伟, 等. ^3He 正比计数器探测效率模拟及灵敏度刻度[J]. 核技术, 2012, 35(3): 175-178.
- [9] 谢树青, 安宁, 吴磊, 等. 中子周围剂量当量率测量技术的发展与现状[J]. 核安全, 2020, 19(4): 83-87.
- [10] ICRP. Publication 74 Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation[R]. Oxford: Pergamon, 1996: 184-200.
- [11] 陈常茂, 刘锦华. 参考中子辐射剂量-周围剂量当量换算系数的计算[J]. 辐射防护, 1996, 16(2): 98-102.