

慢化球探测器组合法测试中子屏蔽性能应用

孟宪芳 郭广水 张 龙 秦培中 孙 超 马慧玲 曾心苗 王连才

(北京市射线应用研究中心 辐射新材料北京市重点实验室 北京 100015)

摘要 随着核技术在各领域的应用推广,中子屏蔽材料得到越来越广泛的应用,而目前国内外还没有测试中子屏蔽性能的统一标准。为了探索一种简单可行、能够在较宽中子能量范围内测试材料屏蔽性能的方法,本文对 ^3He 正比计数管、计数管外包镉及计数管外包不同直径的聚乙烯(Polyethylene, PE)慢化球共12个模型进行了MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code)模拟计算,得到一种慢化球探测器组合法测试方法,使测试能够在 1×10^{-5} –1.25 MeV 能量范围内有较一致的响应。利用这种方法测试了2 cm和4 cm厚PE对 ^{252}Cf 中子的透射率,与多球谱仪解谱法得到的结果在 $\pm 1.0\%$ 内相吻合,对几种材料的测试结果也符合不同类型材料对中子的屏蔽规律,证实了这种简易组合测试方法的可行性。

关键词 慢化球探测器, 中子屏蔽性能, 中子透射率

中图分类号 TL816.3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.050201

Neutron shielding property test with combination detection method based on moderation sphere detectors

MENG Xianfang GUO Guangshui ZHANG Long QIN Peizhong SUN Chao MA Huiling
ZENG Xinmiao WANG Liancai

(Beijing Research Center for Radiation Applications, Beijing Radiation Materials Key Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract Background: With the development of nuclear technique, neutron shielding materials have been used widely in many fields. Up to now, there is still no standard test method for neutron shielding property both at home and abroad. **Purpose:** This study aims to find an easy and feasible way to test the shielding effectiveness of materials in a wide range of neutron energy. **Methods:** Models for ^3He proportional counter cooperating together with polyethylene (PE) moderating spheres of different diameters were calculated using MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code) and the neutron transmittance of some materials was tested. **Results:** The combination detection method by using moderating sphere detectors has consistent response in a wide range of neutron energy from 1×10^{-5} MeV to 1.25 MeV. The article tested the neutron transmittance of 2 cm- and 4 cm-thick PE plates for ^{252}Cf neutrons. The results coincide with multi-sphere spectrometer within $\pm 1.0\%$ and the ordinary shielding rules of different type materials for neutrons. **Conclusion:** The method is validated to be feasible and simple to neutron shielding.

Key words Moderation sphere detector, Neutron shielding property, Neutron transmittance

随着核能、核技术在工业、农业、医疗、科研等领域的利用,针对中子防护的屏蔽材料应运而生,例如:聚乙烯、含硼聚乙烯、铅硼聚乙烯、特种混凝土^[1]等。中子不带电,几乎不和原子的电子相互

作用,只能和原子核相互作用,发生弹性散射、非弹性散射、俘获反应、以及(n,2n)、(n,3n)等多种核反应。对于中子屏蔽,在宏观上表现为被材料吸收一部分中子,透射一部分中子,透射出的中子占总

第一作者: 孟宪芳, 男, 1972 年出生, 2009 年于广西大学获硕士学位, 原子核物理专业

First author: MENG Xianfang, male, born in 1972, graduated from Guangxi University with a master's degree in 2009, major in nuclear technology applications

收稿日期: 2016-01-15, 修回日期: 2016-03-17

中子的份额,即为材料的中子透射率。中子透射率 T 定义为:

$$T(E) = N(E_i) / N(E_0) \quad (1)$$

式中: $N(E_i)$ 为穿透样品的连续谱中子的中子数; $N(E_0)$ 为源中子的中子数^[2-4]。中子透射率可以反映一定厚度的某种屏蔽材料对某中子场的屏蔽性能,为中子屏蔽材料的研发配方筛选或工程材料的选择提供参考。测试仪器可以用中子谱仪、中子长计数器、慢化球探测器^[5]等,均要求探测器尽量在较宽的中子能区内有较好的能量响应。

通过测试中子能谱,可以在较宽的中子能量范围内较准确地表征中子透射率。但是要想得到中子场中某一位置的中子能谱,需要用 10 个慢化球参与测试,测试设备和解谱方法繁杂。本工作拟通过 MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code) 模拟计算,筛选两个合适直径慢化球分别与 ^3He 正比计数管组合构成慢化球探测器进行测试,然后将得到的测试数据进行处理,既能拓宽中子响应能量,又能快速便捷地测试材料中子屏蔽性能。

1 MCNP 模拟计算

1.1 模型创建

慢化球探测器由一支 ^3He 正比计数管和 10 个聚乙烯慢化球组成。慢化球直径分别为 6.35 cm、7.62 cm、8.89 cm、10.16 cm、12.70 cm、15.24 cm、20.32 cm、25.40 cm、30.48 cm、38.10 cm, ^3He 正比计数管为英国 Centronic 公司生产的 SP9 球形 ^3He 正比计数管,不锈钢球壳外径为 33 mm,壁厚为 0.5 mm,内充 700 kPa 的 ^3He 气体(气体成分包括 99.95% ^3He 、0.05% ^4He 和 120 kPa 的氮气)。在测试过程中,在 ^3He 正比计数管外边分别加不同直径的聚乙烯慢化球组成慢化球探测器,测试中子产生的累积计数,所以模拟计算时也是以这样的方式创建计算模型,如图 1 所示。

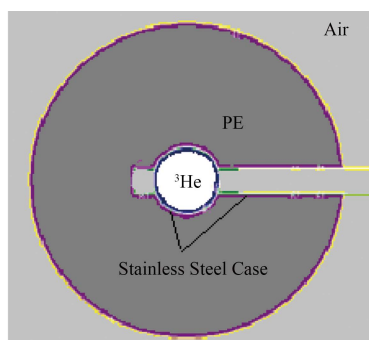


图 1 MCNP 计算模型
Fig.1 MCNP calculation model.

1.2 计算结果

计算模型包括 ^3He 管、 ^3He 管包 1 mm 厚锡片及 ^3He 管分别加 10 个慢化球,共计 12 种。中子能量从 9.441×10^{-10} –18.84 MeV 细分为 206 个能段,利用 MCNP 程序对各种慢化球探测器的中子能量响应进行模拟计算,中子响应曲线如图 2 所示。

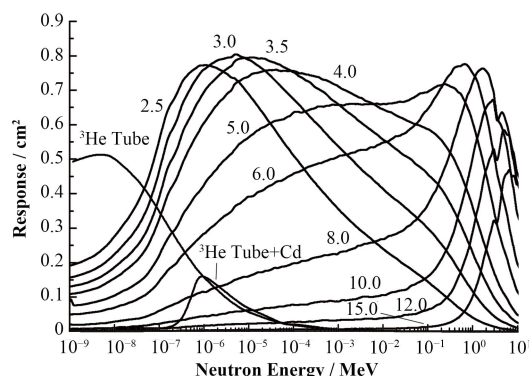


图 2 慢化球探测器中子能量响应曲线
Fig.2 Neutron energy response curves of combined moderation sphere detectors.

由图 2 可知,不同模型对不同能量的中子有各自的响应曲线,有的偏重低能区,有的偏重高能区,在实际测试中就表现为某种探测器对不同能量的中子探测效率不同,在中子能量变化较大的中子场中测试时,就会产生较大的误差。为了拓宽中子测试能量范围,假设对子中子场中同一点仅用两个不同的慢化球探测器分别测试,然后将测试结果进行整合处理得到中子透射率。这种慢化球探测器组合法有可能弥补中子能量响应不均衡的缺陷,起到拓宽中子测试能量的作用。利用模拟计算得到的每一种慢化球探测器中子响应数据进行两两组合,得到新的中子响应曲线,图 3 中仅列出了 4 种较典型的响应曲线。

由以上 4 种中子响应曲线可知,如果某两种配合方式对中子的能量响应相差太大,组合后就不会得到较平的能量响应曲线。图 3(a)、(b)、(c)组合在较宽的能量范围内中子响应明显不同,只有图 3(d)中 10.16 cm 和 15.24 cm 慢化球组合后,在 1×10^{-5} –1.25 MeV 较宽的能量范围内有较平坦的中子响应曲线,本实验就选择了这种组合方式进行实验测试。

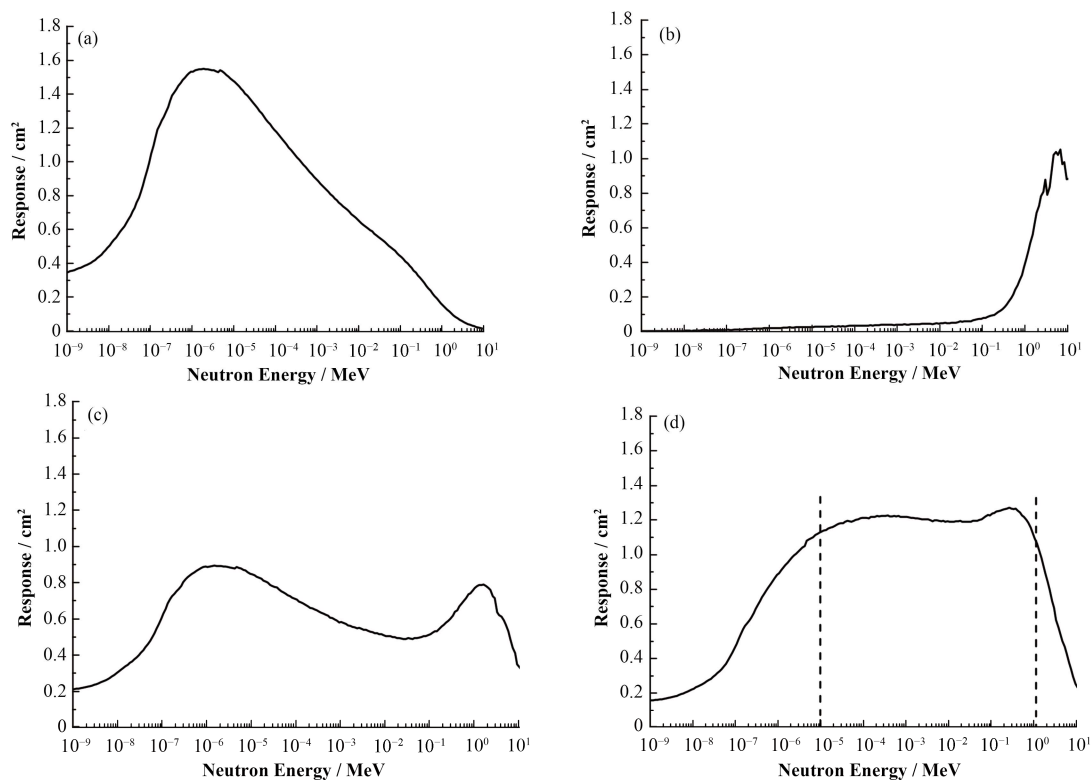


图3 慢化球探测器组合后的中子响应曲线

(a) 6.35 cm 和 7.62 cm, (b) 30.48 cm 和 38.10 cm, (c) 6.35 cm 和 20.32 cm, (d) 10.16 cm 和 15.24 cm

Fig.3 Neutron energy response curves of combined moderation sphere detectors.

(a) 6.35 cm and 7.62 cm, (b) 30.48 cm and 38.10 cm, (c) 6.35 cm and 20.32 cm, (d) 10.16 cm and 15.24 cm

2 实验

2.1 实验条件

实验用 ^{252}Cf 中子源产生裂变中子, 中子发射率为 $8.8 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 。中子源置入由聚乙烯和铅硼聚乙烯为基材做成的屏蔽体中^[6], 在中子源与后端的准直孔产生中子场, 也可以通过在准直孔中加不同厚度

的慢化体形成不同能量的中子场。为了减少中子散射影响, 使用轻质台架安置探测器, 用影锥体扣除地板、墙壁等周边环境产生的散射中子。探测系统所用的前置放大器、高压电源、单道脉冲放大器和计数器均为美国阿美特克公司(ORTEC)组合电子学插件, 实验框图如图4所示。

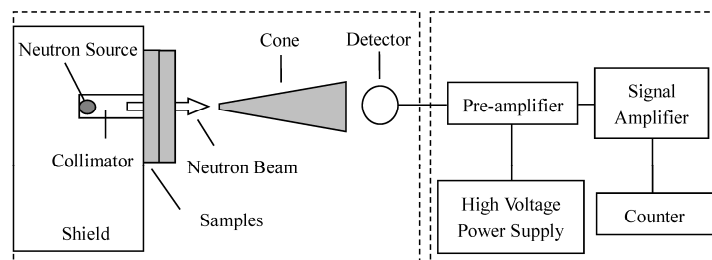


图4 中子透射率实验测试框图

Fig.4 Diagram of neutron transmittance test.

2.2 实验方法

在上述中子场中, 用多球谱仪分别测试无样品

时和加 2 cm 厚 PE 时的中子场, 通过解谱软件得到上述两种中子谱, 计算 PE 在 1×10^{-5} –1.25 MeV 的能

量范围内的透射率 T_D 。然后将 ^3He 管分别加 10.16 cm 和 15.24 cm 慢化球得到的测试数据整合处理。不加材料时的场强净计数分别为 N_{01} 和 N_{02} , 加 PE 材料时的场强净计数 N_1 和 N_2 。因为探测器计数为 neutron 累积响应相关量, 所以可以假定为: $N(E_0)=N_{01}+N_{02}$, $N(E_i)=N_1+N_2$, 最后通过式(1)可以得到中子透射率 $T(E)$ 。

3 结果与讨论

3.1 测试结果

在 ^{252}Cf 准直中子场中, 不加样品和加 2 cm 和 4 cm 厚 PE 样品时, 多球谱仪的解谱结果如图 5 所示, 计算 1×10^{-5} –1.25 MeV 的能量范围内 PE 的中子透射率 T 。利用图 3 中 4 种组合得到的中子透射率结果分别为 T_a 、 T_b 、 T_c 和 T_d , 分别与 T 进行对比, 结果如表 1 所示。同时, 利用图 3(d)慢化球探测器组合方法测试了铁(Fe)、含硼聚乙烯(B-PE)、铅硼聚

乙烯(Pb-B-PE)等几种相同厚度材料的中子透射率, 如表 2 所示。

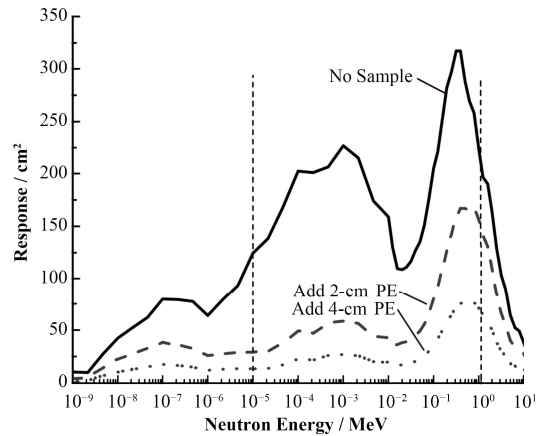


图 5 多球谱仪中子解谱

Fig.5 Neutron spectrum unfolding using multi-sphere spectrometer.

表 1 中子透射率测试结果比较
Table 1 Comparison of neutron transmittance test results.

PE 厚度 Thickness of PE samples / cm	中子透射率 Neutron transmittance / %					与多球谱仪测试比较 Test comparison with multi-sphere spectrometer / %			
	T	T_a	T_b	T_c	T_d	$(T_a-T)/T$	$(T_b-T)/T$	$(T_c-T)/T$	$(T_d-T)/T$
2	41.4	36.7	52.2	46.1	41.7	-11.4	26.1	11.4	0.7
4	24.1	19.3	28.1	26.4	23.9	-19.9	16.6	9.5	-0.8

表 2 几种材料的中子透射率
Table 2 Neutron transmittance of several materials.

材料名称 Material name	材料密度 Material density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	样品厚度 Sample thickness / cm	中子透射率 Neutron transmittance / %
PE	0.95	2.0	41.7
B-PE	1.11	2.0	30.6
Pb-B-PE	6.10	2.0	42.0
Fe	7.78	2.0	66.2

3.2 讨论

由表 1 可知, 在 1×10^{-5} –1.25 MeV 能量范围内, 慢化球组合法测试的 PE 的中子透射率与多球谱仪在 $\pm 1.0\%$ 以内相吻合, 说明通过慢化球探测器组合法测试中子透射率, 可以拓展对中子的能量测试范围。另外, 从中子屏蔽机理来讲, 氢元素主要通过弹性散射慢化中子, 铅和铁元素主要通过非弹性散射慢化中子, 且前者更容易使快中子损失能量, ^{10}B 元素对低能中子有较大的吸收截面^[7-8]。从表 2 测试的相同厚度不同材料的中子透射率来看, 含硼聚乙

烯对中子的屏蔽效果最好, 铅硼聚乙烯中由于添加了高原子序数的铅元素, 中子屏蔽能力会有所下降, Fe 元素中子屏蔽效果最差, 符合材料对中子的屏蔽性能规律。

4 结语

通过 MCNP 模拟计算与多球谱仪实际测试对比, 说明利用慢化球探测器组合法能够拓宽对中子的能量响应范围, 可以较便捷地使探测效率在较宽的能量范围内保持一致, 提高中子透射率测试的精确度。通过对几种常见材料的中子屏蔽性能实测比较, 说明这种慢化球探测器组合法可以在更宽的中子能量范围内评价材料对中子的屏蔽性能。

参考文献

- 1 潘自强. 辐射安全手册[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 153–156
PAN Ziqiang. Radiation protection manual[M]. Beijing: Science Press, 2011: 153–156

- 2 朱传新, 牟云峰, 郭海萍, 等. 铅硼聚乙烯等复合材料 D-T 中子透射性能实验研究[J]. 第十四届全国核电子学与探测技术学术年会, 中国核学会, 2008: 349–352
ZHU Chuanxin, MU Yunfeng, GUO Haiping, *et al.* Measurements of DT neutron transmittance of Pb-B polythene composite[J]. The 14th National Nuclear Electronics and Detection Technology Academic Meeting, Chinese Nuclear Society, 2008: 349–352
- 3 张关铭, 韩国光, 袁祖伟, 等. 核科学技术辞典[M]. 北京: 原子能出版社, 1993: 227–228
ZHANG Guanming, HAN Guoguang, YUAN Zuwei, *et al.* Nuclear science and technology dictionary[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1993: 227–228
- 4 段绍节. 中子学宏观实验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 123–124
DUAN Shaojie. A macro experiment of neutronics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 123–124
- 5 丘东, 李俊杰. 含硼聚乙烯材料中子衰减系数的实验测量[C]. 第十三届全国核电子学与核探测技术年会论文集, 中国核学会, 2006: 329–331
QIU Dong, LI Junjie. Neutron decay constant test of boron-doping polyethylene[C]. The 13th National Nuclear Electronics and Detection Technology Academic Meeting, Chinese Nuclear Society, 2006: 329–331
- 6 孟宪芳, 曾心苗, 刘元理, 等. ^{252}Cf 源中子辐照装置的设计及性能测试[J]. 核技术, 2011, **34**(5): 358–361
MENG Xianfang, ZENG Xinmiao, LIU Yuanli, *et al.* The development of a ^{252}Cf source-based neutron irradiation facility[J]. Nuclear Techniques, 2011, **34**(5): 358–361
- 7 王零森. 碳化硼屏蔽吸收芯块的研制及其在快堆中的性能考核[J]. 中国有色金属学报, 2006, **16**(9): 1481–1484
WANG Lingsen. Preparation of boron carbide pellets and testing in fast breeder reactor[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, **16**(9): 1481–1484
- 8 郭洪生, 李恩平, 何锡钧, 等. 含硼聚乙烯对 D-T 中子的屏蔽研究[J]. 核电子学与探测技术, 2004, **24**(5): 467–468
GUO Hongsheng, LI Enping, HE Xijun, *et al.* The radiated-shielding effects on the $\text{B}_4\text{C}+\text{CH}_2$ to D-T neutron[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, **24**(5): 467–468