

# 材料组合模式对中子屏蔽性能影响研究

孟宪芳, 张 龙, 王士军, 孙 超, 马慧玲, 秦培中

(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:**在实验室中利用 $^{252}\text{Cf}$  中子源的中子辐照装置产生快中子和热中子场, 测试了相同材料的三种不同组合模式的中子衰减倍数, 利用 MCNP 软件进行模拟计算。结果表明: 实验测试与模拟计算偏差小于 5.0%, 三种组合模式对快中子屏蔽性能影响不明显, 而对热中子屏蔽性能的影响高达 2~3 倍。

**关键词:**材料组合模式; 中子衰减倍数; 蒙特卡罗

**中图分类号:** TL375.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-0934(2017)6-0599-04

随着核技术的推广应用, 聚乙烯(PE)、含硼聚乙烯(B-PE)、特种混凝土<sup>[1]</sup>等中子屏蔽材料被大量应用到中子防护工程设计中。根据中子与物质的相互作用原理, 中子在物质中减弱时发生非弹性散射的过程具有阈能, 几 MeV 以上的快中子更容易与具有中等质量数以上的原子核发生非弹性散射而损失能量。弹性散射中, 富含氢的聚乙烯、石蜡等物质是 1 MeV 左右的快中子最好的慢化剂。热中子与 $^{10}\text{B}$  或 $^6\text{Li}$  发生(n,  $\alpha$ )反应的核反应截面很大, 因此当中子能量降到热能时, 在屏蔽层中加入适量的 $^{10}\text{B}$  或 $^6\text{Li}$  等, 就可以大概率地吸收热中子, 从而达到屏蔽中子的效果。

本研究根据中子与物质的相互作用原理, 利用中子慢化材料和中子吸收材料建立了三种组合模式, 通过实验测试和 MCNP 模拟计算两种方法, 验证了不同中子屏蔽功能材料的组合模式对中子屏蔽效果的影响, 为中子屏蔽选材和工程的优化设计提供指导。

## 1 实验

### 1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。实验用 $^{252}\text{Cf}$  中子源, 中子发射率为 $8.2 \times 10^7/\text{s}$ , 安装在以聚乙烯为主体的屏蔽体内<sup>[2]</sup>,  $^{252}\text{Cf}$  中子源通过横截面为 $20\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  准直孔发射形成快中子场, 通过在准直孔内加中子慢化体产生热中子场。热中子直接用 $^3\text{He}$  正比计数器探测, 快中子用 $^3\text{He}$  正比计数器外加 PE 慢化球探测。数据采集系统由前置放大器、高压电源、单道脉冲放大器和计数器等电子学插件组合。为了减少中子散射影响, 使用轻质台架安置探测器。对于地板、墙面、环境中杂物等造成的散射中子, 快中子测试用影锥体扣除, 热中子测试通过在 $^3\text{He}$  正比计

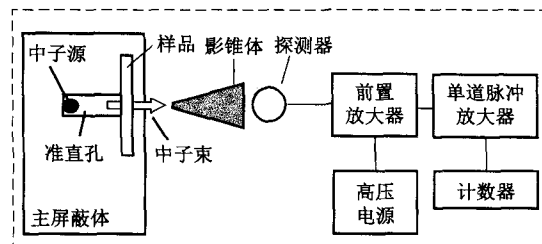


图 1 中子衰减倍数实验测试框图

收稿日期: 2017-06-27

作者简介: 孟宪芳(1972—), 男, 山东滨州人, 副研究员, 主要从事核技术应用与辐射防护研究。

数器外包 1 mm 厚铅扣除。

## 1.2 实验原理

中子屏蔽性能用某厚度屏蔽材料的中子衰减倍数表示,即在某单向连续谱中子辐射场中,不加屏蔽材料时的辐射量与加屏蔽材料时的辐射量比值,定义为:

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

式中: $N(E_0)$ 为不加屏蔽材料时辐射场中某一点中子辐射量; $N(E_i)$ 为加屏蔽材料后辐射场中同一点中子辐射量<sup>[3-5]</sup>,中子辐射量可以是中子注量或剂量当量。中子衰减倍数能够反映一定厚度屏蔽材料对某特定中子场的屏蔽性能,通过实验测试可以为中子屏蔽材料的研发进行配方筛选,为工程材料的选用提供依据。

## 1.3 样品材料及组合模式

制备 30 cm×30 cm×2 cm 聚乙烯(PE)样品板两件和 30 cm×30 cm×1 cm 含硼聚乙烯(B-PE)样品板一件,按照图 2 中 A、B、C 三种模式组合样品,利用图 1 所示测试系统测试中子衰减倍数。

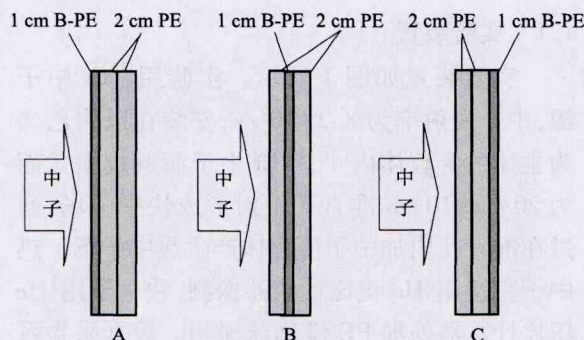


图 2 屏蔽材料三种组合模式

# 2 MCNP 模拟计算

## 2.1 计算模型

根据实验装置建立计算模型,由 MCNP 模拟计算输入文件产生的模型剖面图如图 3 所示。

$^3\text{He}$  正比计数器不锈钢球壳外径为 33 mm,壁厚为 0.5 mm,内充 700 kPa 的  $^3\text{He}$  气体(气体成分包括:99.95%  $^3\text{He}$ ,0.05%  $^4\text{He}$  和 120 kPa 的氩气)。MCNP 模拟计算使用  $^{252}\text{Cf}$  源标准能谱,使用 F1 计数卡分能量段进行计数,分别获得了中子辐照装置不加慢化体时的快中子能谱、加中子慢化体时的热中子能谱、快

中子探测器和热中子探测器中子响应曲线,以及屏蔽材料三种组合模式对快中子和热中子的衰减倍数。

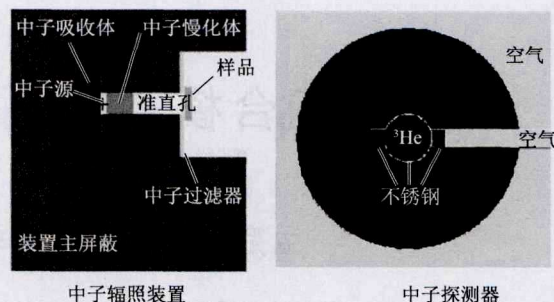


图 3 MCNP 计算模型

## 2.2 中子能谱

$^{252}\text{Cf}$  中子源标准能谱<sup>[6]</sup>及通过 MCNP 模拟得到的实验用快中子和热中子能谱如图 4 至图 6 所示。

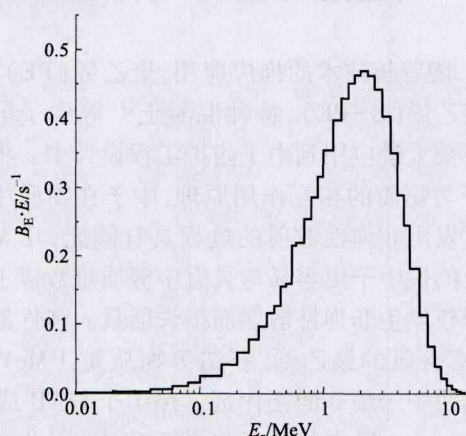


图 4  $^{252}\text{Cf}$  标准源

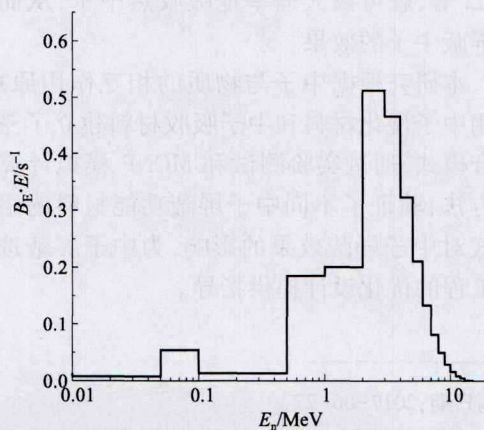


图 5 实验用快中子谱

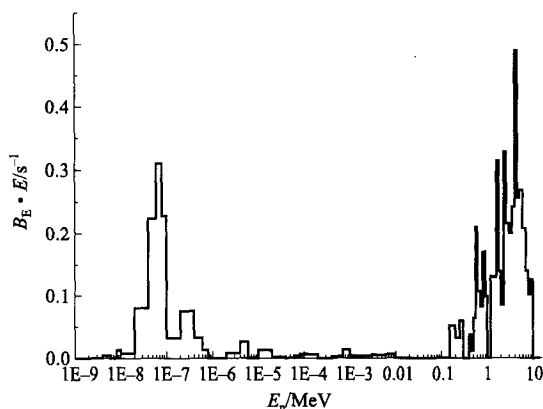


图6 实验用热中子谱

比较图4和图5可知:实验用快中子比标准 $^{252}\text{Cf}$ 源减少了部分快中子,在0.1 MeV处出现了部分低能中子,这是由于 $^{252}\text{Cf}$ 源中子被不锈钢载体慢化,且中子经过装置准直孔时受到多次散射,造成了部分中子能量降低。但是这个能量点仍然在图7所示快中子探测器的中子响应能量范围内,不会对快中子测试造成太大影响。图6中 $^{252}\text{Cf}$ 源中子经慢化体后在 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6}$ 产生了大量低能量的中子,正是热中子实验所需要的中子,能量在图7所示热中子探测器的中子响应能量范围内。

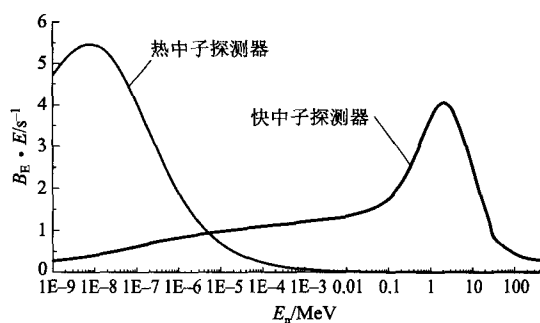


图7 探测器中子响应曲线

### 2.3 探测器中子响应曲线

热中子探测器为 $^3\text{He}$ 正比计数器,快中子探测器为 $^3\text{He}$ 正比计数器外加PE慢化球,通过MCNP模拟计算得到了两种探测器对不同能量中子的响应曲线,如图7所示。由中子能量响应曲线可知,两种探测器对不同能量中子的响应有明显区别,与实验用快中子和热中子能量范围一致,以便表征材料对不同能量中子的屏

蔽性能。

### 3 结果与讨论

通过实验测试以及根据实验条件进行MCNP模拟计算,得到了相同屏蔽材料在三种组合模式下对热中子和快中子的衰减倍数,实验测试与模拟计算结果如图8和表1所示。

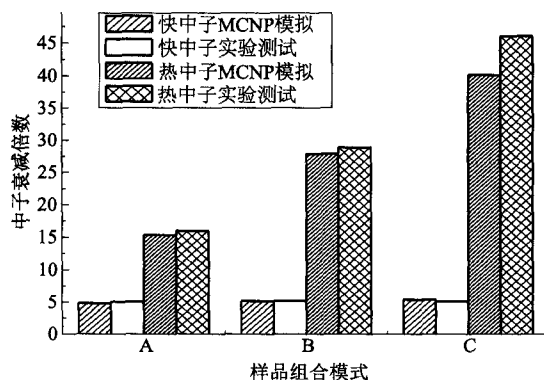


图8 三种组合模式下中子衰减倍数

表1 不同模式下中子衰减倍数比较

模式比较	衰减倍数比值			
	快中子		热中子	
	MCNP	实测	MCNP	实测
B/A	1.07	1.02	1.82	1.81
C/A	1.12	1.02	2.62	2.89

实验结果表明:在相同条件下,实验测试与模拟计算中子衰减倍数偏差小于5.0%,三种组合模式对快中子衰减倍数影响不明显,而对热中子屏蔽性能的影响高达2~3倍。因为聚乙烯(PE)的主要功能是慢化快中子,含硼聚乙烯(B-PE)的主要功能是吸收热中子,只有先对快中子进行充分慢化才能实现对热中子最大概率的吸收,结果与中子屏蔽机理相吻合。

### 4 结论

通过分析可以得到以下结论:

(1)对于不同功能的中子屏蔽材料,组合模式对中子综合屏蔽效果有不容忽视的影响,在中子屏蔽工程设计中,需要综合考虑中子能量特性和屏蔽材料功能特性进行合理布局,达到中子屏蔽的最优化。

(2)当条件设置基本一致时,MCNP 模拟计算与实验测试结果能够较好地吻合。

(3)本实验装置和实验方法可以方便地测试材料对快中子和热中子的屏蔽性能。

#### 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.
- [2] 孟宪芳,曾心苗,刘元理,等.  $^{252}\text{Cf}$  源中子辐照装置的设计及性能测试[J].核技术,2011,34(5): 358-361.
- [3] 段绍节. 中子学宏观实验[M].北京:国防工业出

版社,2008:123-124.

- [4] 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[C].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.
- [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.
- [6] 中国原子能科学研究院. 中子参考辐射 第1部分:辐射特性和产生方法;GB/ T 14055.1—2008 [S].北京:中国标准出版社,2008.

## Test and Calculation on the Effect of Material Combination Patterns on Neutron Shielding

MENG Xian - fang,ZHANG Long,WANG Shi - jun,SUN Chao,MA Hui - ling,QIN Pei - zhong

(Beijing Research Center for Radiation Application Beijing Key Laboratory of Radiation Advanced Materials  
Beijing 100015,China)

**Abstract:** With the development of nuclear technique, neutron shielding has attracted more and more attention. In addition to related to material, material combination patterns are also crucially important for neutron shielding. In the article, fast neutron and thermal neutron fields are generated by  $^{252}\text{Cf}$  source and neutron attenuation multiples are measured respectively three combination patterns by the same materials. And at the same time, neutron attenuation multiples are simulated with MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code, MCNP) under the same conditions. By comparing the results of simulation and experiment, the differences are within 5.0%, and the three combination patterns have no obvious effect on fast neutron shielding but strong effect on thermal neutron shielding up to 2 to 3 times.

**Key words:** material combination patterns; neutron attenuation multiple; Monte Carlo