

不同材料中子反射与屏蔽效应研究

丁 雄¹ 孙新利¹ 李 振² 朱芫江¹ 黄武瑞¹

1 (火箭军工程大学 核工程系 西安 710025)

2 (海军装备研究院 北京 100161)

摘要 利用 Monte Carlo 粒子输运计算程序 SuperMC 对厚度 1–5 cm 的多种材料进行中子反射和屏蔽性能分析计算。这些材料包括金属材料铍、铅、铜、含硼钢以及 ^{238}U 和非金属材料聚乙烯、氢化锂、混凝土, 中子能段选取 10^{-5} eV–20 MeV。结果显示, 中子反射能力和屏蔽性能都会随着材料厚度而增加, 但增加的幅度逐渐减小。铍和聚乙烯在中子反射和屏蔽方面性能优越, 而常用来屏蔽 γ 射线的铅在这两方面性能都是 8 种材料中最差的。 ^{238}U 只在材料厚度很小时性能卓著, 随着材料厚度增加, 其性能便远不如大部分材料。考虑到聚乙烯的力学性能较差, 在屏蔽材料的选择上有很大的限制, 所以在 8 种材料中, 铍的综合性能相对较好。

关键词 Monte Carlo, SuperMC, 中子反射, 屏蔽性能

中图分类号 TL77

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.030201

Simulation of neutron reflecting and shielding property of various materials

DING Xiong¹ SUN Xinli¹ LI Zhen² ZHU Yuanjiang¹ HUANG Wurui¹

1(Department of Nuclear Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

2(Navy Equipment Research Institute, Beijing 100161, China)

Abstract Background: Neutron reflectivity has a great impact on the transformation of nuclear energy, so the neutron reflection performance should be considered in the neutron shielding material. **Purpose:** The aim is to analyze the neutron reflection and shielding properties of several materials. **Methods:** The Monte Carlo particle transportation program named SuperMC is used for calculating neutron reflecting and shielding properties of various materials with thickness of 1–5 cm. These materials include metal materials (Be, Pb, Cu, boron steel and ^{238}U) and non-metal materials (Polyethylene (PE), LiH and concrete). **Results & Conclusion:** The neutron reflecting and shielding properties will increase as the thickness of the materials increases, but the increasing amplitude gradually decreases. The reflecting and shielding properties of Be and PE are superior to the other six materials. Besides, the reflecting and shielding properties of Pb are the worst of eight materials, though Pb is often used as the gamma-ray shielding material. In addition, only in the condition that the material thickness is relatively small and ^{238}U have an outstanding performance. However, with the increase in the thickness of the material, its performance will be far worse than most other materials. Considering the mechanical properties of materials, the comprehensive properties of Be are relatively better in eight materials.

Key words Monte Carlo, SuperMC, Neutron reflecting, Shielding property

国家自然科学基金(No.51401237)资助

第一作者: 丁雄, 男, 1993 年出生, 2015 年毕业于火箭军工程大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核辐射与屏蔽效应

通信作者: 孙新利, E-mail: s_xinli@sina.com

收稿日期: 2016-11-15, 修回日期: 2016-12-22

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51401237)

First author: DING Xiong, male, born in 1993, graduated from Rocket Force University of Engineering in 2015, master student, focusing on nuclear radiation and shielding effect

Corresponding author: SUN Xinli, E-mail: s_xinli@sina.com

Received date: 2016-11-15, accepted date: 2016-12-22

在核设施、核武器的设计中,核材料外围的屏蔽材料选择既要考虑对射线的防护效果,也需考虑屏蔽材料的体积、重量、结构稳定性等。本文在考虑上述情况的基础上,侧重考虑了屏蔽材料对中子的反射效应。经屏蔽材料反射回核材料再次参与反应的中子数量越多,核材料的反应率将越快,核材料的有效燃耗率也会越高,这在核武器设计中尤为重要。

中子的屏蔽材料常用混凝土、石蜡和金属等材料,魏强林等^[1]对含硼钢中不同硼含量对屏蔽性能的影响进行了研究,但研究对象仅限为含硼钢和慢中子;而李哲夫等^[2]进一步研究了含硼的复合材料中子屏蔽性能;葛峰等^[3]从理论层面上对中子屏蔽层进行了设计;柴浩等^[4]研究了柔性材料的中子屏蔽性能,柔性屏蔽材料力学性能不够,应用不广;徐军等^[5]则是对水泥基的中子屏蔽材料进行了研究,但是水泥基屏蔽材料在核设施内部应用较少,多用于最外层防护;曾心苗等^[6]利用 Monte Carlo 方法对不同材料中子透射系数进行了研究;而国外对这方面的研究很多, Ji 等^[7-9]也都对中子屏蔽材料进行了研究。上述研究取得了丰富的成果,但多数研究的模拟计算的材料种类较少,一般都是针对某一装置或某一使用要求等特定场合,对宽能谱的中子束流的屏蔽性能研究不够详细。同时,对中子反射性能的研究也有所欠缺。因此有必要对中子反射及屏蔽性能进行更加详细的计算。

本文采用蒙特卡罗粒子输运计算程序 SuperMC,对厚度 1–5 cm 的多种材料的中子反射、屏蔽性能进行模拟计算,获得了大量不同厚度、不同材料的中子反射和屏蔽数据,并进行了分析和对比,能为屏蔽体的设计和屏蔽材料的选用提供参考。

1 计算方法

1.1 SuperMC 程序

SuperMC 是中国科学院核能安全技术研究所 FDS 团队开发的一款粒子输运计算软件。SuperMC 可实现几何与物理过程全过程自动建模,计算中子、光子和中子-光子耦合输运问题,还可以用于计算核材料临界(包括次临界及超临界)的本征值和有效增殖因子等问题。具有物理建模简单快捷、计算结果可视化等优点。

1.2 模型及计算条件

本文用 SuperMC 程序对入射中子的能量、位置以及方向进行抽样,为方便计算,本文将放射源和

屏蔽材料都设置成球壳型。而屏蔽材料以外的空间全部设置为真空,避免其他因素对结果的影响,计算模型见图 1。对每个模型抽样 10^8 中子进行跟踪,记录穿过屏蔽层的中子数,大数据的粒子抽样可有效避免抽样的随机性,减少计算误差。穿过屏蔽层的中子数用同一空间内的中子通量表示。本文结果和讨论中给出的数据皆为某一空间内的中子通量。由于反射能力是为了研究哪种材料更能提高核材料利用率,而有效增殖因子的大小可以反映出单位时间内核材料反应量的大小,所以本文计算了在无屏蔽材料和不同屏蔽材料下核材料的有效增殖因子,通过比较有效增殖因子来反映核材料的反应效率,从而比较不同材料在不同厚度下反射中子能力。

由于球壳模型的放射源在计算时只需要对一个方向进行计算,节省了计算量,同时也更符合许多真实情况,故本文模拟计算采用的放射源模型是半径 4–5 cm 的球壳型 ^{235}U 放射源,屏蔽材料则是内半径为 5 cm、外半径 6–10 cm 的球壳型,产生的中子由中心的 ^{235}U 提供。使用 SuperMC 的 T4 卡进行计算,认为误差大于 5% 的数值为坏值,不予考虑。

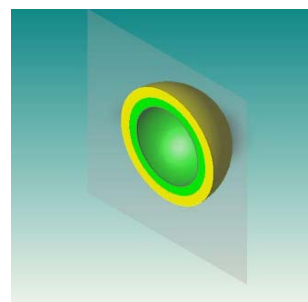


图 1 计算模型
Fig.1 Calculative model.

1.3 材料及入射中子能量

为分析不同种类、不同厚度的材料对宽能谱中子的反射、屏蔽性能,考虑到反应堆的中子一般能量较高,而核武器以及储存的铀材料衰变放射出的中子能量较小,本文选取 10^{-5} eV–20 MeV 的宽能谱入射中子。选用铍、铅、铜、含硼钢(硼含量为 0.37%)以及 ^{238}U 和非金属材料聚乙烯、氢化锂、混凝土(H 和 O 质量百分比分别为 1.03%和 54.68%)等作为屏蔽材料。

2 结果及讨论

首先对不加屏蔽层的裸源进行计算,源以外的空间全部设为真空,避免其他因素的影响。这样我们便可以得到裸源情况下的辐射场(即本文所用的

^{235}U 源的裂变谱) 和有效增殖因子等参数, 这些参数将作为对比分析的基础数据。裸源情况下有效增殖因子 $k_{\text{eff}}=0.2768$, 辐射场变化如图 2 所示。

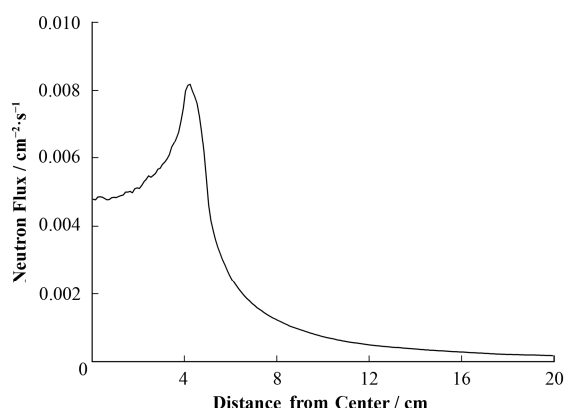


图 2 裸源情况下 10^{-5} eV–20 MeV 中子辐射场分布
Fig.2 Distribution of 10^{-5} eV–20 MeV neutron radiation field under the circumstance of uncovered source.

2.1 不同厚度的材料对中子反射能力的影响

计算了加入 8 种屏蔽材料后, 不同厚度条件下的辐射场和有效增殖因子。不同材料、不同厚度下有效增殖因子的变化如图 3 所示。

由图 3 可知, 在加入屏蔽材料后, 中子源的有效增殖因子会相应增大; 随着材料厚度的增加, 有效增殖因子不断升高, 且随厚度增加其增长的幅度都越来越小。不同材料的有效增殖因子不同, 而有效增殖因子越高, 表明材料反射中子能力越强。1 cm 厚度时, 所有材料中 ^{238}U 反射中子能力最强, 但随着材料厚度增加, 其增长的幅度越来越小, 当材料厚度在 2 cm 以上时, 其反射中子能力开始小于聚乙烯; 在材料厚度达到 5 cm 时, ^{238}U 比铍材料和氢化锂材料都要低。聚乙烯材料在 1 cm 厚度时反射中子能力略小于 ^{238}U , 当材料厚度在 2 cm 以上时, 其反射中子能力是所有材料中最好的, 而且随着厚度的增加其反射中子能力的增长幅度也是最大的。铍材料与氢化锂以及含硼钢与混凝土反射中子的能力均相差不大, 但是由于每个材料随厚度的变化不同, 当厚度变大时, 氢化锂和混凝土反射中子能力会渐渐超过铍材料和含硼钢。铜在材料厚度较低时反射中子能力在 8 种材料中较好, 但由于其反射中子能力随厚度增加的幅度较小, 可以预见到, 当材料较厚时, 其反射中子能力与大部分材料都无法相比。而铅不管是反射中子能力还是随厚度而增长的幅度都是最小的。

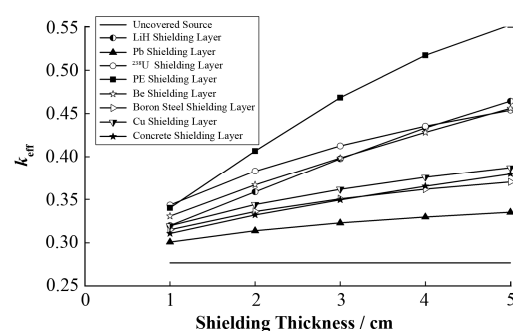


图 3 不同材料在不同厚度下的有效增殖因子
Fig.3 k_{eff} of various materials in the circumstance of different thickness.

由上述分析可以发现, 中子能谱在 10^{-5} eV–20 MeV 时, 除了 ^{238}U , 轻核材料反射中子能力都要大于重核材料, 同样随着厚度的增加, 轻核材料反射中子能力增长的幅度也是远超过重核材料, 其原因是中子与重核相互作用时, 双方的质量相差较大, 中子发生非弹性散射的几率要大于弹性散射^[10]。因此中子与重核材料作用时, 大部分中子会发生非弹性散射, 中子能量的损失很大, 这样导致中子慢化效果非常明显。同时, 重离子对中子的吸收截面也比轻核材料要大, 许多中子会被重核材料吸收, 能反射回核材料中子数量会很少, 大部分中子都被材料吸收, 同时反射回去的中子由于经过慢化后能量降低, 无法使得核材料继续发生裂变, 随着材料厚度增加, 这种情况越加明显。相反, 中子与轻核材料反应时, 由于双方质量相差不多, 中子发生弹性散射的几率相对较大, 对中子的慢化效果较低, 在发生弹性散射情况下, 中子能量损失很小, 因此能够反射回核材料继续参加反应的中子数量较多, 随着材料厚度的增加, 反射回的中子数量也相应的会增大。但是, 材料厚度增大以后, 中子在返回的路径上连续多次发生弹性散射的情况也会增多^[10], 这种情况下中子损失能量也会增加, 一些低能量的中子便可能因此不能返回核材料继续进行反应, 所以反射中子能力会随着厚度增长的幅度越来越小。另外, 在轻核材料中铍材料与中子相互作用的机理与其他材料也有所不同, 由于一部分中子与铍材料发生 $\text{Be}(n,2n)$ 反应, 所以会使得中子的通量比在其他材料中要多。

而 ^{238}U 是一个特殊的情况, 在材料厚度很小时, 其展现了与其他重核材料不同的反射中子能力, 但随着厚度的增加, 与其他重核材料的差距越来越小。这与 ^{238}U 材料本身具有裂变截面的性质有关, 在中子进入 ^{238}U 后会有一定的概率发生核反应并产生中子来弥补发生裂变反应和非弹性反应中子的损失, 这种效应在屏蔽层厚度较小时比较明显。但随着厚

度的增加, ^{238}U 产生的中子与损失的中子差距越来越大, ^{238}U 产生中子所起的作用相对越来越小, 便会使得 ^{238}U 材料在厚度较大时与其他重核材料反射中子能力基本相同。

2.2 不同厚度的材料对中子的屏蔽性能的影响

由于中子反射性能的存在导致不同材料包裹时中子源的有效增殖因子不同, 因而用中子通过材料的减少值即中子通量差来表征一种材料的屏蔽能力。对裸源也对其在相应的屏蔽材料厚度处进行中子通量的记录并计算相应中子通量的减少值。中子通量减少越多说明材料屏蔽性能越好。不同材料中子屏蔽性能随厚度的关系如图 4 所示。

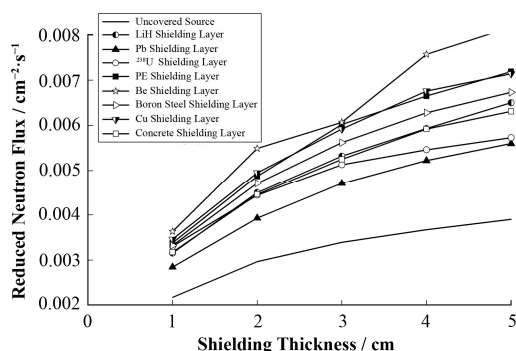


图 4 不同材料在不同厚度下的中子屏蔽性能
Fig.4 Neutron shielding property of various materials in the circumstance of different thickness.

由图 4 可知, 中子能谱在 0–20 MeV 时, 加入屏蔽材料后, 确实对中子有了屏蔽作用, 且随着材料厚度的增加, 屏蔽性能不断增强, 但增强的幅度逐渐减少。在所有材料中, 铍的屏蔽性能最好, 且屏蔽性能随厚度增加而增强的幅度也是最大的。其次是铜和聚乙烯, 这两种材料屏蔽能力不相上下, 在不同厚度下会有微小的差别。而 ^{238}U 和含硼钢在材料厚度为 1 cm 时屏蔽能力几乎相同, 但由于 ^{238}U 屏蔽能力随厚度而增加的幅度较小, 导致随着厚度的增加, ^{238}U 的屏蔽能力与含硼钢的差距越来越大, 在材料厚度大于 2 cm 时, 屏蔽能力也小于混凝土和氢化锂材料。而氢化锂和混凝土两种材料屏蔽能力相差不大, 但是在每个厚度氢化锂都要略大于混凝土材料, 且随着厚度不断增加, 这两种材料屏蔽能力的差值也越来越大。8 种屏蔽材料中, 铅材料的屏蔽性能最差且随着厚度增加其增强的幅度也是最小的。

在屏蔽性能方面, 重核和轻核材料的区分并不是很明显, 某些重核材料和某些轻材料都具有较好的屏蔽能力。由于屏蔽性能和中子与原子的相互作用有关, 中子的反射数量需要考虑的是中子的弹性

和非弹性散射, 而材料的屏蔽能力还需要考虑材料对中子的吸收截面, 有些材料对中子的吸收截面较大, 其屏蔽能力便会相应地增强^[10]。

3 结语

从 8 种材料的中子反射和屏蔽性能的分析中可以看出, 铍和聚乙烯材料性能最好, 且这两种物质都属于低密度物质, 自重很小, 适合作为屏蔽材料。但聚乙烯材料在力学性能方面远不如铍材料。而作为实验室经常用来屏蔽 γ 射线的铅材料, 在中子反射和中子屏蔽指标中都是最差的, 说明其仅在屏蔽 γ 射线方面有一定成效。而 ^{238}U 在材料厚度很小时有很好的效果, 但随着材料厚度的不断增加, 其性能便远不如大多数材料。

参考文献

- 魏强林, 杨波, 王毅, 等. 含硼钢对慢中子衰减性能的蒙特卡罗模拟[J]. 核技术, 2010, 33(5): 367–369.
WEI Qianglin, YANG Bo, WANG Yi, *et al.* M-C simulation of slow neutron attenuation in boron-containing stainless steel[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(5): 367–369.
- 李哲夫, 薛向欣. 含硼物质及环氧树脂复合材料的中子屏蔽性能[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(2): 223–229.
LI Zhefu, XUE Xiangxin. Neutron shielding properties of boron-containing ore and epoxy composites[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(2): 223–229.
- 葛峰, 王春光, 张玉碧. 中子屏蔽材料防护层设计[J]. 应用技术, 2013, 8: 193–194.
GE Feng, WANG Chunguang, ZHANG Yubi. The design of neutron shielding material protective layer[J]. Applied Technology, 2013, 8: 193–194.
- 柴浩, 汤晓斌, 陈飞达, 等. 新型柔性中子屏蔽复合材料研制及性能研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(增 1): 839–844. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.S0.0839.
CHAI Hao, TANG Xiaobin, CHEN Feida, *et al.* Preparation and performance of new type flexible neutron shielding composite[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(Suppl 1): 839–844. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.S0.0839.
- 徐军, 康清, 沈志强, 等. 核防护用水泥基中子屏蔽材料的研究进展[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(5): 92–100. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1545.2011.05.022.
XU Jun, KANG Qing, SHEN Zhiqiang, *et al.* Progress of cement-based neutron shielding materials in nuclear protecting[J]. Department and Application of Materials,

- 2011, **26**(5): 92–100. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1545.2011.05.022.
- 6 曾心苗, 周鹏, 秦培中, 等. 不同材料的中子透射 MC 模拟计算[J]. 核技术, 2011, **34**(3): 188–192.
ZENG Xinmiao, ZHOU Peng, QIN Peizhong, *et al.* Monte Carlo simulation of neutron transmission through various materials[J]. Nuclear Techniques, 2011, **34**(3): 188–192.
- 7 Ji W S, Lee J W, Yu S, *et al.* Polyethylene/boron-containing composites for radiation shielding[J]. Thermochemica Acta, 2014, **585**(1): 5–9.
- 8 Hayashi T, Tobita K, Nakamori Y, *et al.* Advanced neutron shielding material using zirconium borohydride and zirconium hydride[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, **386**(1): 119–121.
- 9 Sinch V P, Badiger N M, Chanthima N, *et al.* Evaluation of gamma-ray exposure build up factors and neutron shielding for bismuth borosilicate glasses[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2014, **98**(1): 14–21.
- 10 卢希庭. 原子核物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2010: 299–301.
LU Xiting. Nuclear physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010: 299–301.