

使用直接模拟法研究选择快中子屏蔽参数*

戴宏毅 杨化中 王尚武 苏桐龄

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 使用蒙特卡罗直接模拟法模拟了300keV氘束流 $T(d, n)^4\text{He}$ 中子源发出的中子在球壳屏蔽体介质铁中的运输规律。分析了不同介质厚度的铁对中子的反射性质和吸收性质,这些解释和分析对快中子球壳屏蔽参数的选取具有重要价值。

关键词 直接模拟法, $T(d, n)^4\text{He}$ 中子源, 反射比, 吸收比

分类号 TL501

On the Choice of the Shield Parameters of Fast Neutron with the Direct Simulation Method

Dai Hongyi Yang Huazhong Wang Shangwu Su Tongling

(Department of Applied Physics, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract With the Monte Carlo direct simulation method, we simulate the neutron tracks or histories by means of the random nature of the neutron interactions with the medium of shield which is a shell of the sphere made of Iron, and neutrons are produced by the $T(d, n)^4\text{He}$ reaction with 300 keV deuteron beam energy. The reflective properties and absorptive properties of neutrons are analysed in the different thickness of the medium of Iron. These explanations and analyses of results have an important value in choosing shield parameters of spheric shell of fast neutron.

Key words direct simulation method, $T(d, n)^4\text{He}$ neutron source, reflectance, absorptance

引言

在屏蔽设计方面,蒙特卡罗方法是一种成熟的方法。考虑到M-C方法的效率定义为

* 1996年4月29日收稿

$(\sigma^2 \cdot C)^{-1}$, 其中 σ^2 是方差, c 是计算一个中子样本所花费的费用或所花费的计算机时间, 故在 M-C 方法的改进技术中必须同时考虑这两方面的因素。因此, 降低方差的各种技巧, 如简单加权法, 统计估计法, 指数变换法, 分层抽样法, 系统抽样法, 对偶变数法, 半解析方法, 分裂和俄国轮盘赌等^[1,2], 引起了人们的普遍注意, 但利用 M-C 直接模拟法研究快中子在屏蔽材料铁中所吸收的规律, 在国内外则鲜见报道。而这些工作对于研究快中子在屏蔽材料中其强度、通量、剂量的变化以及选择中子屏蔽参数是有意义的。

文献[3]利用蒙特卡罗直接模拟法分析了中子透射性质, 计算设计一个 300keV 氘束流 $T(d, n)^4\text{He}$ 中子源的多层球壳屏蔽体的第一层介质铁的最佳厚度。本文就是使用直接模拟法在文献[3]的基础上计算分析球壳内径分别为 10、15、20、25cm 各种情况下, 不同能区的中子反射比、吸收比随介质厚度的变化规律。这些结果对确定快中子球壳屏蔽介质铁的内径、研究中子在球壳屏蔽体介质铁中的变化规律有重要价值。

1 计算方法

1.1 物理过程

由 $T(d, n)^4\text{He}$ 中子源 S 发出的中子进入球壳屏蔽体介质以后输运一段距离, 在 S_1 点与组成介质的核碰撞, 改变了原来的方向和能量(或者在该点被吸收), 继续运动到 S_2 点又发生新碰撞(或者在 S_2 点被吸收)……。用蒙特卡罗方法解这一问题就是模拟中子在介质中的运动规律, 跟踪观察中子在介质中的游动历史。具体计算方法见文献[3]。

1.2 中子的记录

计算的中子反射比, 只考虑中子在球壳体内与介质作用返回到内半径空腔中的中子数, 没有考虑中子返回的方向。并假定球壳空腔是一个强吸收核体, 当中子进入空腔时, 则予以记录。在记录反射中子时, 能量间隔的划分与透射中子的一样, 也是按能区进行分类记录的。

中子在物质中发生吸收作用后, 无需计算中子的参数, 这种事件仅仅是表示结束中子的历史, 但需要把碰撞时的中子参数记录下来。在记录吸收中子时, 是按能量分区和屏蔽体厚度分层记录的。能量间隔的划分与透射中子或反射中子的一样, 分成六个能区, 而屏蔽体厚度分层, 是不管屏蔽体的厚薄多少, 均将每个屏蔽体厚度等分成五层。

2 计算结果与分析

中子的透射情况已在文献[3]中讨论, 下面讨论中子的反射情况和吸收情况。

2.1 中子的反射

图 1 表示内径 15cm 的球壳屏蔽体介质铁中反射中子在各能区的反射比随介质厚度的变化。其中 $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6$, $R_{56} = R_5 + R_6$ 。从图 1 可以看出, 中子源发出的中子经过 1cm 屏蔽介质后, 反射回球壳空腔中的中子主要是 10.0—15.5MeV 和 5.0—10.0MeV 能区的中子, 而其它能区反射回的中子很少; 随着介质厚度的增加, 各能区反射中子的反射比 $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ 也随之增大。但是, 各能区的反射中子达到饱和时的介质厚度值是不同的。结合内径为 15cm 时各能区中子透射比随介质厚度的变化曲线^[3]可以知道, 5.0MeV 以下各能区的透射中子的透射比所处峰值位置时的厚度值,

是其相应能区的反射中子达到饱和时的介质厚度值,而 5.0—10.0MeV 能区和 10.0—15.5MeV 能区的反射中子达到饱和时介质厚度值,严格地说,是在其相应能区的中子透射比 T_5 和 T_6 等于 0 时的介质厚度值。因此,总的中子反射比 R 是在介质厚度为 40cm 后才达到饱和,这时总的反射中子占整个中子数的 36%,其中 5.0—15.5MeV 能区的反射中子占整个中子数的 22.1%。

图 2 表示内径分别为 10、15、20、25cm 的球壳屏蔽体介质铁的反射中子反射比 R 随 d 的变化。从图 2 可知, R 与球壳内径有关,内径越大,中子的反射比 R 越大。内径增到 15cm 时, R 随内径增大而增加得缓慢了。考虑到屏蔽体的重量及经济条件,选择 300keVT(d,n)⁴He 中子源的球壳屏蔽体内径 15cm。

2.2 中子的吸收

图 3 表示内径 15cm 球壳屏蔽厚度分别为 1、5、10、15、20、25、30、35、40、50、60、70、80、90 和 100cm 时,介质铁对中子的吸收比 A 、 A_1 和 A_{56} 曲线。图上所画的吸收比曲线为各能区中所对应的每个厚度的总吸收比,其中 A 是中子的总吸收比, A_1 是 0.0—0.5 MeV 能区的总吸收比, A_{56} 是 5.0—15.5 MeV 能区中子的总吸收比。

从图 3 可以看出, 5.0—15.5MeV 能区的中子被物质铁吸收时,开始 A_{56} 随 d 增加而增大, d 增加到 15cm 后,达到稳定, A_{56} 占总跟踪中子数的 10% 左右。也就是说, 5.0—15.5MeV 能区的中子吸收主要是在屏蔽介质厚度为 15cm 以内。其主要原因是,一方面由公式 $N = N_0 e^{-2.2 \cdot d}$ 可计算出 14 MeV 的中子通过 15cm 厚的铁后,强度减弱到 4.0%。这样比例的中子在随 d 减弱时,对吸收中子是非常小的。96.0% 的中子在 15cm 厚的介质内主要通过非弹性散射被减弱。另一方面,从 ⁵⁴Fe 和 ⁵⁶Fe 的反应截面与能量关系^[4]可以看出, 3.0—10.0MeV 能区的中子与铁核发生 (n, p) 吸收反应,相对其它能区的中子来说,吸收截面较大,尤其 ⁵⁶Fe 丰度大, (n, p) 吸收截面在 5.0—15.5MeV 能区相对其它能区来说也较大,产生吸收的几率大;而 ⁵⁴Fe 虽然 (n, p) 截面在 3.0—

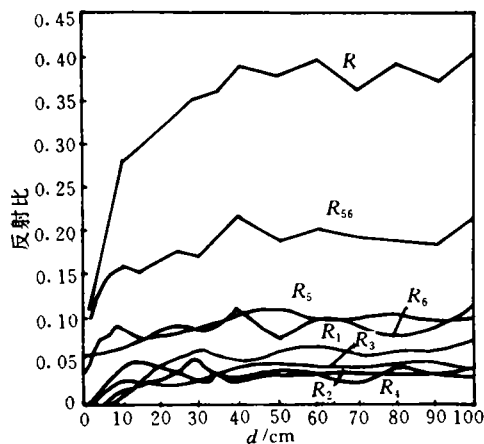


图 1 各能区中子反射比,总反射比 R 和 R_{56} 随 d 的变化

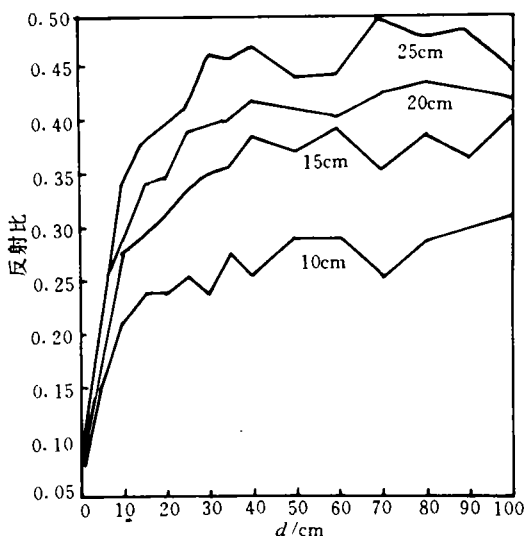


图 2 不同内径的反射比 R 随介质厚度 d 的变化

5.0MeV 能区较大,但丰度只有 0.0516,对吸收的贡献较小,因此,在 3.0—5.0MeV 能区的吸收比很小。所以,5.0—15.5MeV 能区的中子被吸收主要是在屏蔽厚度为 15cm 以内。

从图 3 还可以看出,0.0—0.5MeV 能区的中子吸收比 A_1 随 d 的变化规律:在 d 为 15cm 以内, $A_1 = 0$,当 d 达 15cm 后, A_1 随 d 增加而增大,达 70cm 后, A_1 增大得缓慢了, d 为 90cm 时, A_1 达最大值,以后, A_1 开始随 d 增加而下降。

综合上述分析,屏蔽介质铁对中子的吸收主要发生在 0.0—0.5 能区和 5.0—15.5MeV 能区,5.0—15.5MeV 能区的中子吸收是在介质厚度为 15cm 以内,0.0—15.5MeV 能区的中子吸收是在介质厚度为 15cm 以后。实际上,到了 70cm 时,只有 0.0—0.5MeV 能区的中子了。如果用铁吸收 0.0—0.5MeV 能区中子,需要的屏蔽厚度很厚,在 90cm 时只吸收了总数的 46.4%。要把 0.0—0.5MeV 能区中子全部吸收,还得加很厚的铁,这是不合算的。

3 结论

综合全文及文献[3],可得结论:在中子屏蔽设计中,若用铁来把 14MeV 中子慢化到透射比为 1% 以下,则需要铁的屏蔽厚度达 110cm 以上。同时,铁又产生很强的感生放射性,从而辐射防护很麻烦。因此,只利用铁的 (n, n') 反应,把中子能量从 14MeV 慢化到 1MeV 以下,所需的铁厚度为 40cm。然后在屏蔽层铁介质外,加含氢物质来吸收 1.0MeV 以下能量的中子。

参 考 文 献

- 1 裴鹿成,张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用. 北京:科学出版社,1980
- 2 杜书华,张树发等. 输运问题的计算机模拟. 长沙:湖南科学技术出版社,1989
- 3 戴宏毅,杨化中,苏桐龄. 用蒙特卡罗方法计算快中子屏蔽体的厚度. 国防科技大学学报,1996,(1):129
- 4 Neutron Cross Section, Volume I, CURVES, Third Edition, New York, 1976

(责任编辑 石少平)

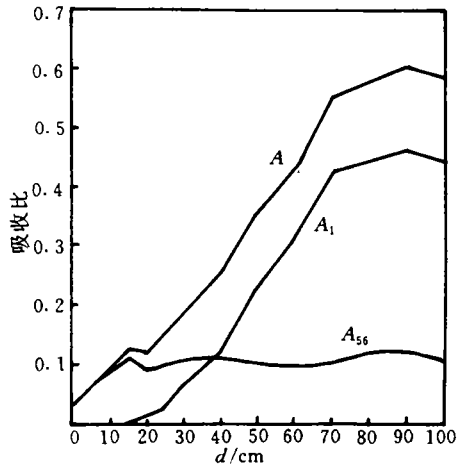


图 3 介质铁对中子的吸收比 A 、 A_1 和 A_{56} 曲线