

文章编号: 1007-4627(2007)01-0040-03

用 MC 方法计算铅玻璃对核材料 γ 射线的屏蔽作用*

税 举, 何 彬, 王 冬, 付广智, 李如松, 周百昌

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘 要: 核材料辐射出的 γ 射线对人体有很强的辐射损伤, 实际工作中多用铅玻璃对其进行屏蔽。以甲状腺为研究对象, 应用蒙特卡罗方法通用软件 MCNP4B 程序建立模型, 模拟计算了操作人员操作核弹头时, 弹头中产生的 γ 射线透过各种厚度的铅玻璃时人体甲状腺吸收剂量率。结果表明, 铅玻璃确有良好的降低 γ 射线吸收剂量率的作用。

关键词: 铅玻璃; γ 射线; 甲状腺; 吸收剂量率; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: O571.32

文献标识码: A

1 引言

在操作核材料过程中, 核材料会放出 α , β , γ 和中子等射线, 由于 α 和 β 射线在空气中射程较短, 对操作人员的辐射损伤较小。 γ 射线和中子不带电, 射程远, 可以穿透金属壳层和屏蔽物, 是操作人员吸收剂量的主要来源(即主要是外照射损伤)。在实际操作过程中, 一般采用铅玻璃对 γ 和中子射线进行屏蔽。

人体甲状腺位于颈部气管前下方 2—3 cm 处, 呈椭圆形, 分左、右两叶, 两叶间以峡部相连, 形成盾甲状, 重约 15—30 g, 两个侧叶各自的宽度约为 2 cm, 高度为 4—5 cm, 峡部宽度为 2 cm, 高度为 2 cm。甲状腺很小很薄, 约 5 mm^[1]。

MCNP4B^[2, 3] 是一个通用蒙特卡罗(MC)多粒子输运程序, 可用来计算中子、光子、电子或耦合中子/光子/电子输运等问题, 也能计算临界系统的本征值问题。该程序能处理任意三维结构材料, 材料几何单元的边界可以是一次曲面、二次曲面或四次椭圆环面。本文应用 MC 方法计算程序 MCNP4B 建立了核材料操作场所及人体等效模型, 计算了采用不同厚度的铅玻璃时, 操作人员的甲状腺 γ 射线吸收剂量率。

2 MC 模型的建立和计算

尽管核材料、人体器官和组织有很多种类, 为

计算和讨论方便, 建立弹头和人体等效理论模型, 并以人体甲状腺 γ 射线吸收剂量率作为模拟对象, 但并不影响本文讨论内容: 铅玻璃对 γ 射线屏蔽作用。

2.1 核弹头理论模型

图 1 给出了核弹头的理论模型^[4], 其组成如下: 1 为空心球, 2 为武器级铀(WgU)或武器级钚(WgPu), 3 为铍反射层, 4 为贫化铀或钨反射层。在用 MCNP4B 建模时, 1 对应于 1# 栅元, 依次类推。弹头核材料的组成及其各成分质量百分含量列于表 1^[5]。尽管实际弹头具体设计方案不尽相同, 但大致如此。下面分析以此模型为基础。

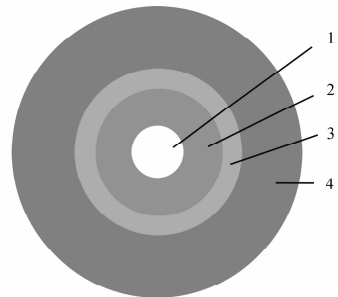


图 1 核弹头的理论模型

核材料的特征 γ 射线有很多条, 本文所采用的核材料的特征 γ 射线及发射率列于表 2^[6]。

铅玻璃组分质量含量为: Pb, 58.21%; O, 16.36%; Ca, 0.45%; Si, 6.92%; Na, 0.52%;

* 收稿日期: 2006-04-25; 修改日期: 2006-09-26

作者简介: 税 举(1974—), 男(汉族), 四川射洪人, 硕士研究生, 从事工程物理研究; E-mail: shuiju94@126.com

K, 17.54%。

表 1 弹头中核材料的组成

武器级铀		贫化铀		武器级钚	
^{234}U	1.0%	^{234}U	0.2%	^{238}Pu	0.005%
^{235}U	93.3%	^{235}U	0.4%	^{239}Pu	93.3%
^{238}U	5.5%	^{238}U	99.4%	^{240}Pu	6.0%
其它	0.2%			^{241}Pu	0.48%
				^{242}Pu	0.015%
				其它	0.2%

表 2 核材料的特征 γ 射线及发射率

核素	γ 射线能量/keV	γ 射线发射率/($\text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)
^{235}U	185.7	43 000
^{238}U	1 001	74
^{239}Pu	413.7	35 000

模型中将核弹头放置在由铅玻璃围成的容器 (88 cm×88 cm×48 cm) 底部, 模拟人位于容器外离容器壁 10 cm 处。整个系统位于 1 个 600 cm×1 000 cm×400 cm 的房间内, 房间的墙壁为厚 50 cm 的水泥墙。系统的其它部分由空气填充。

2.2 人体模型

由于甲状腺位于颈部, 周围的组织和器官对它的吸收剂量影响较大, 所以建立了较为细致的颈部模型。如图 2 所示, 假定颈部为一圆柱体, 直径为 11 cm, 高 10 cm, 甲状腺两个侧叶均厚 0.5 cm、高 4 cm、质量 10 g, 位于颈部前侧。

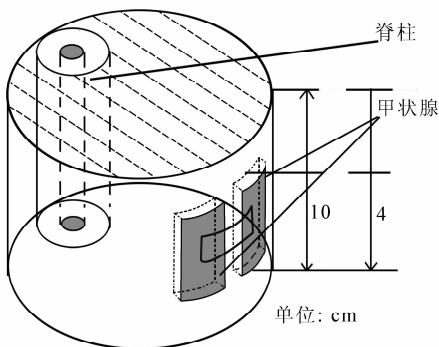


图 2 甲状腺模型

模型中人体的躯干和腿部等效为圆柱体, 头部

等效为球体。

组织材料采用 ICRP 参考成人模型(男性)的组织元素组成, 其中除脊柱按骨骼对待外, 人体模型其他部分均按软组织(均匀)对待^[7, 8]。

2.3 剂量计算

用 MCNP4B 程序首先分别计算弹头各层核材料发射的 γ 射线对甲状腺吸收剂量的贡献, 而总的吸收剂量为它们的和, 即

$$D_t = D_2 + D_4,$$

式中, D_t 为甲状腺总的吸收剂量, D_2 为 2[#] 栅元(武器级铀或武器级钚)的贡献, D_4 为 4[#] 栅元(贫化铀或锡反射层)的贡献(栅元划分见图 1)。

计算中, γ 光子的出射位置在 2[#] 或 4[#] 栅元体内均匀抽样, 能量由核材料中核素的特征 γ 射线及其分支比决定, 发射方向为各向同性。 γ 光子经过核材料本身的散射和空气、铅玻璃的屏蔽减弱后, 把一部分能量沉积在甲状腺内, 对能量沉积进行计数, 得到平均每个光子的能量沉积, 再根据核材料的光子发射率, 得到甲状腺的吸收剂量率。

计算结果显示于图 3。图中圆点为计算值, 实线为对计算值用最小二乘法按 2 次方函数进行拟合所得到的结果。

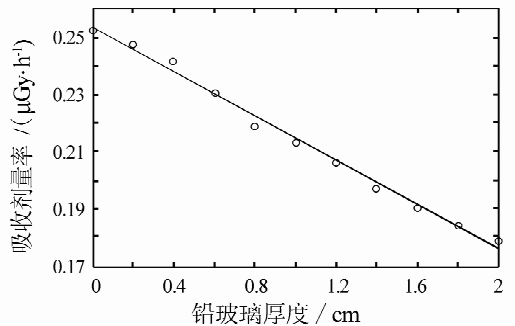


图 3 弹头理论模型中人员 γ 射线吸收剂量率

3 小结

从计算结果(图 3)可以看出, 当无铅玻璃时, 操作人员 γ 射线的吸收剂量率约为 0.25 $\mu\text{Gy}/\text{h}$, 以每年工作 2 000 h 计, 年吸收剂量为 0.5 mGy, 仅就甲状腺而言, 剂量虽并不很高, 但还未计入中子吸收剂量。为此, 采取适当的防护措施很有必要; 铅玻璃厚度在 0—2 cm 内变化时, 甲状腺的 γ 射线

吸收剂量率近似以线性规律下降。铅玻璃厚度为 1 cm, 能够将甲状腺的 γ 射线的吸收剂量降低约 17%。通过对建立的弹头理论模型的计算, 说明铅玻璃对 γ 射线确有明显的防护效果。然而, 在实际选用铅玻璃时还应考虑透光性、代价等指标, 以使操作人员受照射剂量达到合理的尽可能低的程度。

参考文献 (References):

[1] Wu Zaide. Surgery(5th Edition). Beijing: People's Medical Publishing House, 2001, 333(in Chinese).
(吴在德. 外科学(第 5 版). 北京: 人民卫生出版社, 2001, 333.)

[2] Xu Shuyan. Application of Monte Carlo Method in Nuclear Experiment. Beijing: Atomic Energy Press, 1995, 146—148 (in Chinese).
(许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用. 北京: 原子能出版社, 1995, 146—148.)

[3] Jin Wenmian, Li Sumei. MCNP4B Manual. Beijing: Computer Center of China Institute of Atomic Energy, 1998, 3—15 (in Chinese).
(金文绵, 李素梅. MCNP4B 使用手册. 北京: 中国原子能科学研究院计算机应用研究所, 1998, 3—15.)

[4] Du Xiangwan. Techniques in Nuclear Arms Control. Beijing: National Defense Industry Press, 1996, 117—118 (in Chinese).

(杜祥琬. 核军备控制的科学技术基础. 北京: 国防工业出版社, 1996, 117—118.)

[5] Chen Bo, Hao Fanhua, Gong Jian. γ Detection of Nuclear Warhead Model, Arm-control Colloquium. Beijing: Applied Physics and Computational Math Researching Institute, 1995, 77—81(in Chinese).
(陈波, 郝樊华, 龚建. 核弹头模型的 γ 射线探测. 军备控制论文集, 北京: 应用物理与计算数学研究所, 1995, 77—81.)

[6] Gong Jian, Chen Bo, Hao Fanhua. Detection and Verification of Nuclear Materials, Arm-control Colloquium. Beijing: Applied Physics and Computational Math Researching Institute, 1995, 57—62(in Chinese).
(龚建, 陈波, 郝樊华. 核材料的探测和识别. 军备控制论文集, 北京: 应用物理与计算数学研究所, 1995, 57—62.)

[7] Kramer R, Zankl M, Williams G, *et al.* The Calculation of Dose from External Photon Exposures Using Reference Human Phantoms and Monto Carlo Methods. Part 1: the Male (ADAM) and Female(EVA) Adult Mathematical Phantoms. Gesellschaft für Strahlen-und Umweltforschung München, Germany. GSF-Bericht S-885.1986, 1—10, 54—55.

[8] Chen Lishu, Chai Zhengwen, Zhang Yongxing. Coefficients for Protection of Outer Radiation, ICRP Pulication 74. Beijing: Atomic Energy Press, 1995, 31—37(in Chinese).
(陈丽姝, 柴政文译, 张永兴校. 外照射放射防护中使用的换算系数: ICRP 第 74 号出版物(国际放射防护委员会和国际辐射单位与测量委员联合工作组报告). 北京: 原子能出版社, 1995, 31—37.)

Calculation of Shielding Effect of Plumbum Glass on γ Ray of Nuclear Material by MC Method*

SHUI Ju¹⁾, HE Bin, WANG Dong, FU Guang-zhi, LI Ru-song, ZHOU Bai-chang
(The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: The γ ray which is radiated from a nuclear material can cause serious radiation damage to human organs, so lead glass are often used as a shielding material. In this paper, thyroid was the subject investigated. A mathematical model was established by using the general software code MCNP4B. We have calculated a series of thyroid's absorbed dose rate when the γ ray which was generated from the warhead penetrated the various depths of the lead glass via the model. The results indicate that lead glass work well as a protector against γ rays.

Key words: lead glass; γ ray; thyroid; absorbed dose rate; MC simulation

* Received date: 25 Apr. 2006; Revised date: 26 Sep. 2006

1) E-mail: shuiju94@126.com