

# MCNP 模拟研究 $\gamma$ 射线散射对屏蔽检测结果的影响

## Study on the Effects of $\gamma$ -ray Scattering on Shielding Detection Results by MCNP Simulation

王军成 杨毓枢 陈嘉浪 王 旭

WANG Juncheng YANG Yushu CHEN Jialang WANG Xu

### 摘 要

本文采用 MCNP4C 程序模拟了  $\gamma$  射线经铅(11.34g/cm<sup>3</sup>)、铁(7.86 g/cm<sup>3</sup>)、混凝土(2.35g/cm<sup>3</sup>)及水(1.00g/cm<sup>3</sup>)在有准直器及无准直器情况下屏蔽后剂量率随这些屏蔽材料的厚度的变化关系,结果表明: $\gamma$  射线穿过屏蔽材料的过程中,部分  $\gamma$  射线被材料吸收,部分  $\gamma$  射线在材料中发生散射,不同的屏蔽材料对  $\gamma$  射线的吸收和散射概率不同。随着屏蔽层厚度的增加,散射占探测器接收的剂量率的份额越来越大。还模拟了准直器准直孔几何结构变化对经一定厚度屏蔽材料屏蔽后剂量率变化的影响,结果表明:准直孔深宽比 <1 时,随着深宽比增大准直器不仅不会起减小散射的作用,反而使散射的贡献增加;当准直器深宽比在 1~7 之间时,随着深宽比增大,散射对测量结果的影响会被迅速地抑制;当准直器深宽比 >7 时,准直器可将散射的  $\gamma$  射线全部吸收。通过计算结果与测量值的比较证明 MCNP 是研究  $\gamma$  射线散射的一种很好的方法。

### 关键词

MCNP 模拟;  $\gamma$  射线散射;准直器;屏蔽

中图分类号: TL81

文献标识码: A

DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2020.07.077

### 王军成

1987.04—/男/汉族/湖北孝感人/理学硕士/助理研究员/现从事电离辐射计量和反应堆堆外核测量探测器研制工作/中国核动力研究设计院/(成都 610005)

### 杨毓枢

中国核动力研究设计院(成都 610005)

### 陈嘉浪

中国核动力研究设计院(成都 610005)

### 王 旭

中国核动力研究设计院(成都 610005)

### Abstract

MCNP4C program was used to simulate the relationship between the dose rate of  $\gamma$ -rays after exposure to lead(11.34g/cm<sup>3</sup>), iron(7.86g/cm<sup>3</sup>), concrete (2.35g/cm<sup>3</sup>) and water (1.00g/cm<sup>3</sup>) with and without collimator with the thickness of these materials in this paper, the results show that some  $\gamma$ -rays are absorbed by the material and some  $\gamma$ -rays are scattered in the materials when  $\gamma$ -rays penetrate the shielding materials, and different shielding materials have different absorption and scattering probability of  $\gamma$ -rays. With the increase of the thickness of the shielding layer, scattering takes up a larger share of the dose rate received by the detector. The effect of geometric structure change of collimator on dose rate change after shielding with a certain thickness of shielding material is also simulated. The results show that the collimator will not reduce the scattering effect but increase the scattering contribution with the increase of depth-width ratio when the collimator depth-width ratio is <1. When the depth-width ratio of the collimator is between 1 and 7, the influence of scattering on the measurement results is inhibited rapidly with the increase of depth-width ratio. When the collimator depth-width ratio is >7, all the scattered  $\gamma$ -rays can be absorbed by the collimator. It is proved that MCNP is a good method to study  $\gamma$ -ray scattering.

### Key Words

MCNP simulation;  $\gamma$ -ray scattering; Collimator; Shielding

表1 普通混凝土基本组成

元素	H	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ni
质量百分比(%)	0.5558	49.8076	1.7101	0.2565	4.5746	31.5092	0.1283	1.9239	8.2941	1.2398

## 0 引言

$\gamma$ 射线是一种波长很短的电磁波,它可以通过重核裂变,裂变产物衰变,辐射俘获,非弹性散射,活化产物衰变等情形产生。 $\gamma$ 射线是一种穿透能力很强的间接电离粒子,其穿过物质的过程中与物质发生光电效应、康普顿效应及电子对效应。在对屏蔽体进行屏蔽检测的过程中,这些效应产生的次级粒子会使检测结果偏大,而一些研究结果表明<sup>[1-4]</sup>检测结果偏大主要来源于康普顿散射。

蒙特卡罗方法(Monte Carlo)简称为MC方法,随着科技的发展和计算机的出现,蒙特卡罗方法逐渐发展成为一种独立的研究方法。蒙特卡罗方法是一种特殊的计算方法,它是以概率统计理论为基础。由于它能够非常逼真的描述事物的特点及物理实验的整个过程,能够解决一些难以用数值计算方法难以解决的问题,因而被应用于越来越多的研究领域。MCNP<sup>[5]</sup>是由美国的洛斯阿拉莫斯实验室研制出来的大型多功能蒙特卡罗计算程序,能够计算复杂结构中的中子、光子、电子及它们的耦合输运问题。MCNP对源的描述、对物质空间几何分布的描述非常灵活,因此应用非常广。目前已被用于放射性无损检测、反应堆设计、辐射屏蔽与防护、核仪器探测器的设计与分析、医学中的放射性治疗、物理保健等领域。本文采用MCNP4C程序模拟研究了屏蔽检测中散射对检测结果的影响。

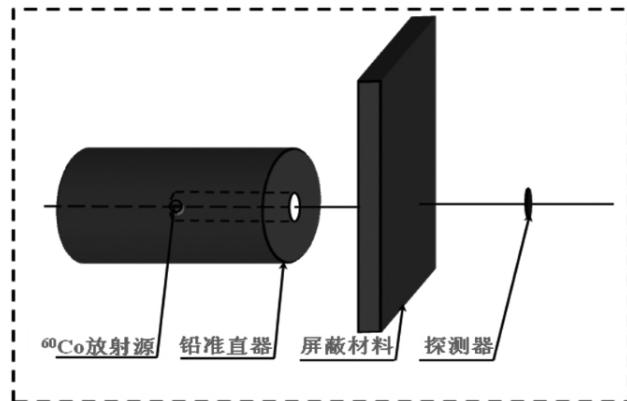


图1 MCNP模拟模型示意图

## 1 MCNP模型建立

图1是MCNP模拟程序的简易图,模型中采用各向同性的<sup>60</sup>Co点源,放射源置于内径2cm,外径102cm的圆柱形铅准直器之中,准直器除准直方向的外壁厚都为50cm。准直器右端距屏蔽材料30cm,放射源距探测器110cm。采用MCNP4C版本<sup>[6]</sup>程序,模拟粒子数 $>2 \times 10^8$ ,误差率保持在 $<0.0835$ 范围内,模拟了 $\gamma$ 射线经铅( $11.34\text{g/cm}^3$ )、铁( $7.86\text{g/cm}^3$ )、混凝土( $2.35\text{g/cm}^3$ )及水( $1.00\text{g/cm}^3$ )在有准直器及无准直器情况下屏蔽后剂量率随这些屏蔽材料的厚度的变化关系,还模拟了准直器准直孔几何结构变化(准直孔长度与其直径之比——深宽比)对经一定厚度屏蔽材

料屏蔽后剂量率变化的影响。计算所采用的混凝土基本组成如表1中所示。

## 2 结果及讨论

### 2.1 有无准直器对屏蔽后剂量率的影响

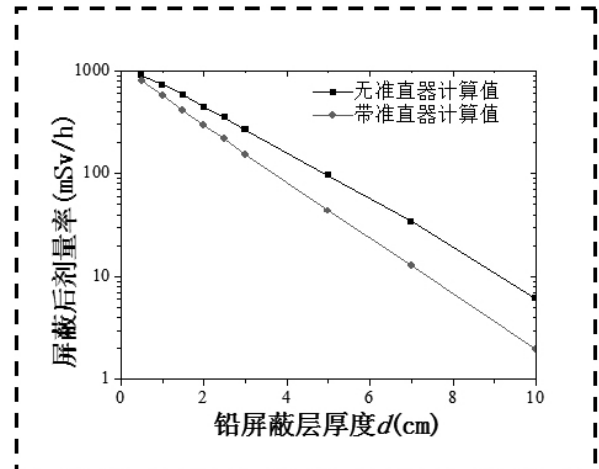


图2a 剂量率随铅厚度的变化关系

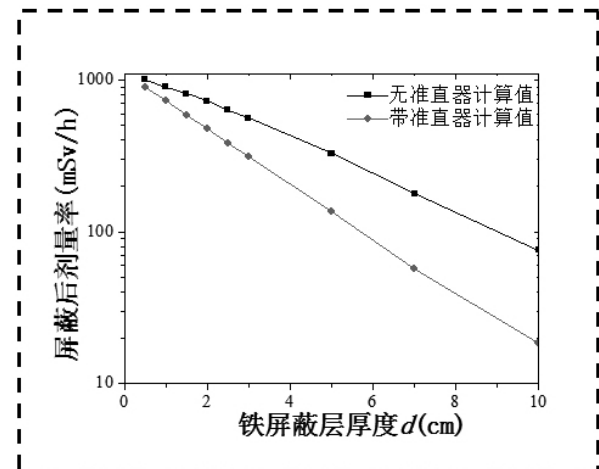


图2b 剂量率随铁厚度的变化关系

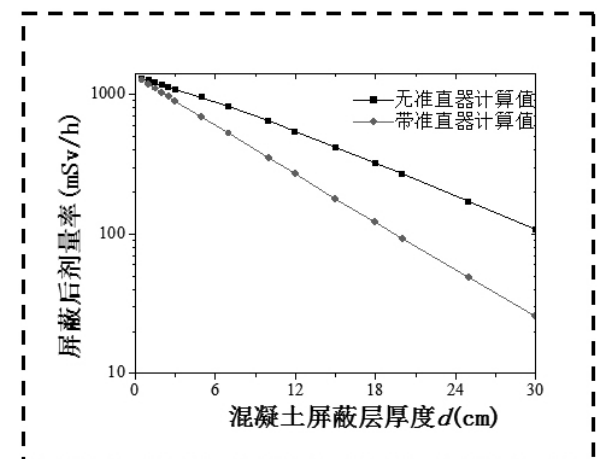


图2c 剂量率随混凝土厚度的变化关系

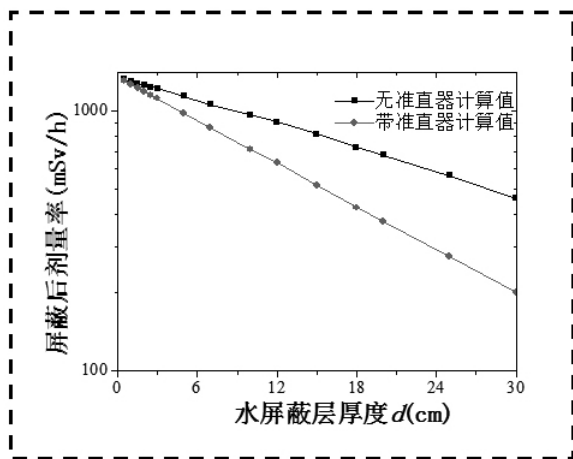


图 2d 剂量率随水厚度的变化关系

图 2 中显示了有、无准直器情况下经铅、铁、混凝土及水屏蔽后剂量率随这些屏蔽材料的厚度的变化关系。从图 2a、2b、2c 及 2d 中可以看出经相同厚度屏蔽材料屏蔽后无准直器剂量率比有准直器准直情况下剂量率大, 主要是因为无准直器情况下大量  $\gamma$  光子经散射进入到探测器之中。为了更清楚地研究散射对屏蔽后剂量率的影响, 我们将无准直时的计算结果对有准直器时计算结果进行归一化处理, 结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 随着屏蔽材料厚度的增加散射在计算结果的占比越来越大; 不同材料厚度相同时, 空间结构相同, 空气散射贡献完全一样, 然而, 从图 3 中看出经相同厚度的不同材料屏蔽后剂量率存在很大差异, 说明  $\gamma$  光子在屏蔽材料中也会发生散射, 且不同材料对  $\gamma$  光子的散射差异很大。从图中还可看出, 屏蔽层厚度小于约 1.8cm 时, 相同厚度的水、混凝土、铁及铅对  $\gamma$  射线的散射依次增大; 但是, 当屏蔽层厚度大于 1.8cm 时, 水、混凝土对  $\gamma$  射线的散射依次增大, 而铁和铅对  $\gamma$  射线的散射发生翻转。查阅文献[2]发现,  $\gamma$  射线在屏蔽材料中的散射不仅与材料厚度有关, 还与材料的线性吸收系数  $\mu$  有关,  $\gamma$  射线射入密度较大的材料时, 更多的射线被材料吸收, 而射入密度较小的材料时, 被材料吸收的射线份额相对少得多, 大量的  $\gamma$  射线发生散射, 这是为何在屏蔽材料较厚时随着屏蔽材料厚度增加在铁中  $\gamma$  射线发生散射的份额比在铅中发生散射的份额大的原因。

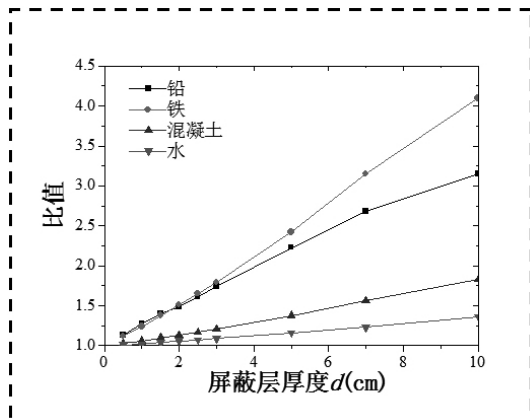


图 3 无准直时的计算结果对有准直器时计算结果进行归一化处理结果

表 2 10cm 的铅、铁、混凝土及水的计算结果与文献结果比较

	计算值	文献值	偏差(%)
铅	3.15	3.07	2.6
铁	4.34	5.20	-16.5
混凝土	1.83	1.99	-8.0
水	1.36	1.23	10.6

将厚度为 10cm 的铅、铁、混凝土及水的计算结果与文献<sup>[2]</sup>中的结果进行比较, 如表 2 中所示。从表 2 中可以看出, 10cm 的铅、铁、混凝土及水的计算结果变化趋势与文献给出的结果符合的很好。从表 2 中还可看出, 铅、混凝土及水的计算结果与文献[2]给出的结果符合得很好, 但是, 铁的计算值与文献给出结果差异很大, 由于计算用得铁材料人为设定为单质, 文献[2]中用的材料很可能是成分复杂的合金材料, 所以会出现较大差异。

## 2.2 准直器几何结构对屏蔽后剂量率的影响

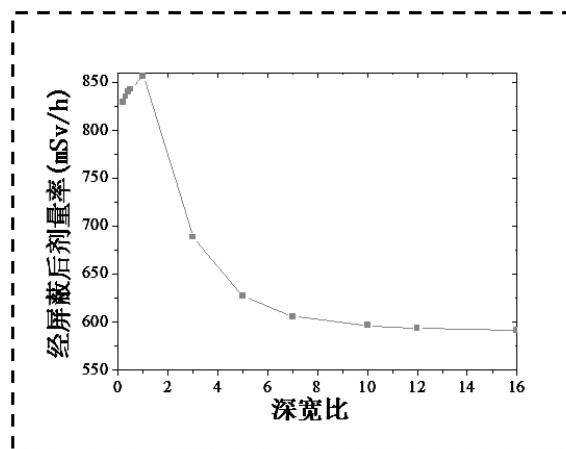


图 4 经屏蔽层屏蔽后剂量率随准直器深宽比变化的计算结果

计算所用模型与图 1 相同, 将准直器孔径改为 5cm, 准直孔长度从 1cm 逐渐增大至 80cm。经屏蔽层屏蔽后剂量率随准直器深宽比变化的计算结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出: 准直器深宽比  $< 1$  时, 经屏蔽层屏蔽后剂量率随准直器深宽比增大小幅增大, 这是由于准直孔长度增加使得准直方向来自孔壁单次散射的  $\gamma$  射线增加; 当准直器深宽比在 1~7 之间时, 经屏蔽层屏蔽后剂量率随准直器深宽比增大迅速减小, 主要是因为随着准直器准直孔长度的增大, 大量的  $\gamma$  被准直器所吸收, 从而大大减小了周围散射  $\gamma$  射线进入探测器之中的可能性; 当准直器深宽比  $> 7$  之间时, 经屏蔽层屏蔽后剂量率随准直器深宽比增大几乎不变, 主要因为当准直器深宽比接近 7 时, 准直器已经可以将四周发散的  $\gamma$  射线几乎全部吸收, 只有准直方向的部分  $\gamma$  光子透过屏蔽材料进入探测器中, 随着深宽比进一步增大, 这种情况几乎不会发生改变。

2.3 计算结果与测量值的比较

计算所采用的模型来源于西安核设备制造有限公司《乏燃料运输容器屏蔽检测项目》中的灌铅试验件,其基本结构如图 5 所示。有无准直器时的测量值如表 3 所示,表 4 中展示了相同测量点处的计算结果与测量值。从表 3 中可以看出,无准直器时测量值比有准直器时测量值大,这与图 2 中显示的结果相符,说明  $\gamma$  射线穿过屏蔽材料时在材料内部确实存在散射。表 4 中的结果显示相同测量点处的计算结果与测量值非常符合,说明 MCNP 模拟可以用于研究  $\gamma$  射线散射对屏蔽检测结果的影响。

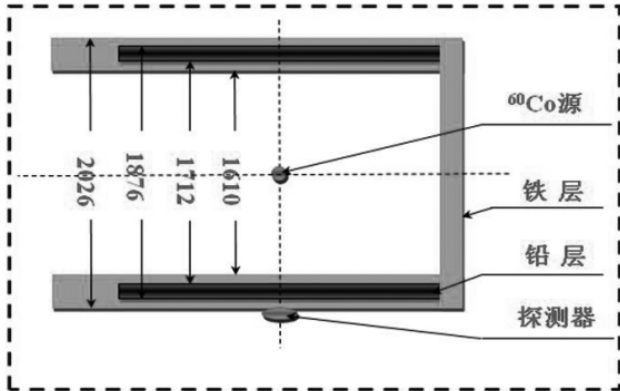


图 5 乏燃料运输容器灌铅试验件示意图

表 3 有无准直器时的测量值

测量点	无准直器测量值( $\mu$ Sv/h)	有准直器测量值( $\mu$ Sv/h)
测量点 1	8.190	6.036
测量点 2	8.292	6.229

表 4 相同测量点处的计算结果与测量值比较

测量点	计算值( $\mu$ Sv/h)	测量值( $\mu$ Sv/h)	偏差(%)
测量点 3	26.9	25.9	3.9
测量点 4	16.7	17.3	-3.5
测量点 5	11.6	11.1	4.5

3 结论

(1)通过 MCNP 模拟研究在有无准直器时  $\gamma$  射线经一定厚度的屏蔽材料屏蔽后的剂量率变化发现:运用不同的检测方法对屏蔽材料进行屏蔽性能检测时,散射会使的检测结果产生很大差异。

(2)  $\gamma$  射线穿过屏蔽材料的过程中,部分  $\gamma$  射线被材料吸收,部分  $\gamma$  射线在材料中发生散射,不同的屏蔽材料对  $\gamma$  射线的吸收和散射概率不同。但是,随着屏蔽层厚度的增加,散射占探测器接收的剂量率的份额越来越大。

(3)通过 MCNP 模拟研究准直器结构变化对测量结果的影响发现:准直孔深宽比  $<1$  时,准直器不仅不会起减小散射的作用,反而使散射的贡献增加;当准直器深宽比在  $1\sim7$  之间时,随着准直孔深宽比增大,散射对测量结果的影响迅速受到抑制;当准直器深宽比  $>7$  时,准直器已经可以将散射的  $\gamma$  射线全部吸收。

(4)通过计算结果与测量值的比较,进一步证明了上述结果。还说明 MCNP 是研究  $\gamma$  射线散射的一种很好的方法。

参考文献

[1]W.R.Johoson et al. Gamma-Ray Attenuation at energies of Approximately 6 and 8 MeV[J].Nucl.Sci.Eng.,43(1973),32.  
[2]中国科学院工程力学研究所,  $\gamma$  射线屏蔽参数手册[M].北京:原子能出版社,1976:95-103.  
[3]L.F.Rodriguez et al.Evaluation of Gamma-Ray Shielding Calculation and Determination of Shielding Parameters with Bremsstrahlung Radiation[J].Nucl. Sci. Eng.,49(1972),349.  
[4]S.Datta et al. Photo Scattering Cross Section of  $^{88}\text{Sr}$  in the Energy Region 8.6 to 12 MeV[J].Phys.Rev.C,8(1973),1421.  
[5]Los Alamos National Laboratory. Monte Carlo N-Particle Transport Code System [M].7,2000.