



·电离辐射环境、效应与防护·

## 舰船舱室的早期伽马辐射屏蔽特性\*

柴辰睿<sup>1</sup>, 郝建红<sup>1</sup>, 张 芳<sup>2</sup>, 赵 强<sup>2</sup>, 范杰清<sup>1</sup>, 董志伟<sup>2</sup>, 薛碧曦<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 利用蒙特卡罗方法对早期核辐射场景下的舰船舱室屏蔽特性进行研究。使用早期伽马辐射作为辐射源, 测定了舰船主体常用的 HSLA-80、5456Al 及 FDCL-3B 三种材料的质量衰减系数, 并根据舰船的几何结构建立了模拟舱室模型, 采用高斯展宽方法对探测器的能谱拟合处理, 得到了伽马辐射下舱室内部 NaI 探测器的吸收能谱, 并与文献中的实验结果进行了对比, 验证了计算模型和计算结果的可靠性。在此基础上, 以伽马防护系数为评价指标, 考虑放射性同位素(单能点源)和早期伽马辐射(具有能量分布的面源)两种场景, 计算分析了模拟舱室伽马辐射屏蔽的空间分布特性, 结果表明: 模拟舱室对不同放射性同位素的防护系数是不同的, 最多可相差 6.74 倍(Cd-109 与 Cs-137); 舱室不同位置的防护系数不同。舱室前端的伽马辐射剂量较大, 而角落的伽马辐射剂量较小, 相差 35%; 防护系数与伽马辐照的入射角度有关。与正入射相比, 模拟舱室对斜 45°入射的伽马辐射防护系数更高, 可提升 43%。

**关键词:** 质量衰减系数; 船舶舱室; 伽马辐射; 伽马防护系数

中图分类号: O571.33

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230373

## Shielding characteristics of ship cabin against early gamma radiation in nuclear explosions

Chai Chenrui<sup>1</sup>, Hao Jianhong<sup>1</sup>, Zhang Fang<sup>2</sup>, Zhao Qiang<sup>2</sup>, Fan Jieqing<sup>1</sup>, Dong Zhiwei<sup>2</sup>, Xue Bixi<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Monte Carlo method was used to study the shielding characteristics of ship compartments in early nuclear radiation scenarios. Using early gamma radiation as a radiation source, the mass attenuation coefficients of three commonly used materials, HSLA-80, 5456Al, and FDCL-3B, for ship bodies were measured. A simulated cabin model was established based on the geometric structure of the ship, and Gaussian broadening method was used to fit the detector's energy spectrum. The absorption energy spectrum of the NaI detector inside the cabin under gamma radiation was obtained, and compared with experimental results in the literature, thus verified the reliability of the calculation model and results. On this basis, using the gamma protection coefficient as the evaluation index, considering two scenarios of radioactive isotopes (single energy point sources) and early gamma radiation (surface sources with energy distribution), the spatial distribution characteristics of gamma radiation shielding in simulated cabins were calculated and analyzed. The results show that the protection coefficient of the simulated cabins for different radioactive isotopes was different, with a maximum difference of 6.74 times (Cd-109 and Cs-137); The protection coefficient varies in different positions of the cabin. The gamma radiation dose at the front end of the cabin is relatively high, while the gamma radiation dose at the corners is relatively low, with a difference of 35%; The protection coefficient is related to the incident angle of gamma irradiation. Compared with normal incidence, the simulated cabin has a higher gamma radiation protection coefficient for oblique 45° incidence, which can be improved by 43%.

**Key words:** mass attenuation coefficient, ship cabin, gamma radiation, gamma protection factor

\* 收稿日期: 2023-10-26; 修订日期: 2024-03-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (12205024)

联系方式: 柴辰睿, crchai@ncepu.edu.cn。

通信作者: 张 芳, fangzhang328@163.com。

早期核辐射指爆炸瞬间释放的辐射,通常指爆炸一分钟内产生的大量辐射,包括伽马光子、中子、 $\alpha$ 粒子、 $\beta$ 粒子等<sup>[1]</sup>。由于其高强度和短时程,早期辐射能够穿透建筑物、土壤和水源,对人员和环境带来严重影响,造成显著的生命危险和健康风险。因此,应尽早采取有效措施来保护人员免受早期辐射。对于承担海上运输任务的船舶、载有乘客的游轮,辐射一方面会对舱室内的电子设备造成损伤,影响设备的可靠运行<sup>[1]</sup>,另一方面与陆上设施相比,船舶内部空间窄小、人员集中、活动余地小,在面临突发核辐射时人员的疏散和躲避更加困难。为保护海上运输、作战船舶及游轮内的人员和设备安全,船舶的核辐射屏蔽性能需要较好的评估<sup>[2]</sup>。因此,对核辐射下舱室内部的核辐射剂量进行相关实验和仿真研究,以便对船舶可能遭受的核辐射进行评估,为制定应急决策及核加固技术提供理论依据,具有十分重要的研究意义和实际参考价值。

由于伽马辐射具有较高的穿透力,对防护屏蔽的挑战性更大。研究其特性和传播规律,有助于防护屏蔽材料的选择和防护策略的设计,以最大程度地减少辐射带来的风险。对于伽马辐射屏蔽的研究主要分为两方面,一方面是基于元素组成对材料的辐射屏蔽能力进行评估;另一方面是对于某个特定的空间结构进行辐射剂量或注量分布特性研究。

对于材料的辐射屏蔽效果评估广泛应用于土壤、矿石检测,新型材料研发等领域。在2004年,陈英琦等<sup>[2]</sup>采用NaI(Tl)闪烁谱仪测全能峰的方法测量了Cs-137和Co-60 $\gamma$ 射线在铅、铜、铝材料中的吸收系数;2007年,周剑良等<sup>[3]</sup>基于MCNP程序使用两种方法计算了未知物在Co-60源下的线吸收系数,结果偏差为4.53%,为 $\gamma$ 射线在未知物料中线吸收系数的测定提供了可靠的方法;2014年,Singh等<sup>[4]</sup>研究了PbO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>玻璃体系的结构性能;2017年,Abutalib等<sup>[5]</sup>对掺钎HAp进行了Cs-137(662 keV)的 $\gamma$ 辐照,并计算和分析了其相关参数;2020年,Sayyed等<sup>[6]</sup>使用蒙特卡罗模拟MCNP-5程序研究了含有不同比例玄武岩、磁铁矿和双晶石矿物骨料的三种不同系列混凝土的伽马射线衰减参数;2021年,Rammah等<sup>[7]</sup>研究了Pb、Sn、三元素合金的伽马质量衰减系数和有效原子序数。

另一方面,中子、伽马辐射的空间剂量、注量分布对于评估人员、设备受损伤程度有重要参考意义。2013年,Khattab等<sup>[8]</sup>使用MCNP对叙利亚伽马辐射设施进行剂量映射模拟并进行基准测试,建立了叙利亚伽玛辐照设施(SGIF)的三维模型,计算结果与实测值吻合较好, $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向最大相对差分别小于7%、4%和4%;2014年,Meng-Jen Wang等<sup>[9]</sup>对HTR-10球床反应器进行了临界计算,通过与连续能量SCALE6/CSAS6和MCNP5计算的比较来评估多组结果;2015年,Hamzah等<sup>[10]</sup>对RRI-50反应堆辐射筛分方案进行设计,堆芯结构由16个燃料元件和4个控制元件和5个辐照位置组成,形成5 $\times$ 5的矩阵,计算了工作区和周围环境的剂量率分布;2015年,Erwin等<sup>[11]</sup>使用放射性同位素对驾驶舱的屏蔽效果进行了不同放射源及放射源位置的仿真和实验对照;2016年,Ouahdani等<sup>[12]</sup>使用ENDF/B-VII.1和JENDL-4.0核数据库对KRITZ-2反应性温度系数临界基准进行蒙特卡罗分析;2018年,Abrefah等<sup>[13]</sup>使用ORIGEN-S和MCNP 6对加纳研究堆-1(GHARR-1)核燃料剂量率进行估计,经过30天的冷却期后观测到的源为 $(1.767 \times 10^{13} \pm 0.0008) \text{ s}^{-1}$ ;2019年,Amir Hamzah等<sup>[14]</sup>利用MCNP对10 MW实验功率堆剂量率分布进行初步分析,结果表明在正常工作条件下,生物屏蔽外表面的最大剂量率为8  $\mu\text{Sv/h}$ ,剂量率低于限值。

对于辐射的空间剂量、注量分布,相比于核反应堆、反应器等的关键反应计算,而舰船的早期辐射计算与核反应堆有如下不同:核反应堆的几何结构和材料组成相对固定,布局通常是确定的,其核裂变放射能谱和能量范围通常相对集中,可以从核能反应输出数据集中获取;而在舰船辐射计算中,舰船的结构和复杂性通常更高,其变化和配置灵活性较大。在核反应堆中,操作和安全控制较为统一,并且特有的工作及使用条件(如温度、压力等)通常会事先给定;而舰船辐射计算需要针对不同舱室、舰船部件以及材料辐射特性进行详细的建模,计算可能需要考虑不同环境条件,甚至需要在突发环境下进行预测模拟。

本文使用蒙特卡罗方法研究船舶舱室对早期伽马辐射的屏蔽特性。首先,对船舶三种常用材料的质量衰减系数进行计算,初步评估了船舶主要材料的屏蔽性能;随后,选择对伽马辐射屏蔽性能较好的HSLA80钢材构建模拟舱室,对其可靠性进行校验后,计算了其对放射性同位素的响应能谱和防护系数,以及对早期伽马辐射的屏蔽特性。

## 1 材料的屏蔽特性

### 1.1 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法是一种基于统计抽样进行模拟的计算方法,它可以对辐射传输和相互作用过程进行详细的模拟

和分析。在使用蒙特卡罗方法对材料和模型进行计算时,首先定义计算的几何结构,包括几何形状、尺寸和位置,随后使用材料库对几何实体设置不同的元素组成和密度。之后确定辐射源的能谱、方向和位置,设置模拟运行的参数,如模拟粒子数目、截止条件等。

在程序运行时,使用蒙特卡罗方法随机伽马粒子的输运,在穿过屏蔽材料时根据材料库的反应截面随机发生反应(如光电效应、康普顿散射和对电子效应等)。通过抽样计算伽马粒子在物质中的相对剂量分布、能谱、散射角度等信息,最后得到粒子的剂量和注量,并据此计算相应的评估参数。

## 1.2 材料质量衰减系数计算

表征材料对伽马辐射屏蔽效果的参数包括有效原子序数<sup>[15]</sup>、半值层(half-value layer)、平均自由程(mean free path)和线性衰减系数(linear attenuation coefficient)。为了进一步对不同密度材料的屏蔽特性进行分析和对比,定义质量衰减系数(mass attenuation coefficient, MAC)(单位  $\text{cm}^2/\text{g}$ )为<sup>[10]</sup>

$$\mu_m = \mu/\rho \quad (1)$$

式中:  $\mu$ 为材料的线性衰减系数,单位  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\rho$ 为材料的密度,单位  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。MAC对材料的密度进行了归一化,可以对屏蔽效果有更准确的描述。线性衰减系数  $\mu$ 根据朗伯-比尔定律<sup>[14]</sup>由下式求得

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I} \quad (2)$$

式中:  $I_0$ 为初始的伽马辐射强度,  $I$ 为穿过  $x$  厚度材料后的伽马辐射强度。

船舶结构的主要材料有钢材、铝材以及玻璃等,本文中钢材和铝材分别选用舰船用 HSLA80<sup>[16]</sup>和 5456Al<sup>[17]</sup>材料,以及 FDCL-3B 型防弹玻璃,三种材料的元素组成如表 1 所示。

表 1 材料元素构成  
Table 1 Composition of material elements

element			chemical composition/%		
5456Al	HSLA80	FDCL-3B	5456Al	HSLA80	FDCL-3B
Al	Fe	Na	92.6	98.2	8.6
Si	C	Ca	0.25	0.22	4.4
Cu	Cu	Si	0.1	0.5	26
Mg	Mn	O	5	0.6	60
Zn	Ni		0.25	0.4	
Mn	P		1	0.08	
Ti			0.2		
Fe			0.4		
Cr			0.2		

早期伽马辐射能量区间为 0.01~15 MeV,分别对上述三种材料的质量衰减系数在该能量区间进行了计算和分析。图 1 给出了三种材料的 MAC 随伽马能谱的变化曲线,其中 HSLA80 的 MAC 曲线始终最高,该材料中 Fe 质量分数 98.2%,且 Fe 的原子序数最大。一般而言,材料对伽马辐射的屏蔽效果与材料元素的原子序数直接相关,原子序数越大,材料的屏蔽效果越好。图 1(a)能量区间 0.01~0.3 MeV,主要发生光电效应。伽马射线能量被吸收产生电子, HSLA80 的 MAC 值随着能量的增加从 167  $\text{cm}^2/\text{g}$  降到 0.1  $\text{cm}^2/\text{g}$ ,其他两种材料的 MAC 也变化很快;图 1(b)能量区间 0.3~3 MeV 此时康普顿散射起主要作用,随着伽马射线被散射,所有材料的 MAC 逐渐降低;在图 1(c)的 3~15 MeV 区间,随着能量的增加,光电效应和康普顿效应减弱,与能量的对数成正比的电子对效应逐渐增强,而对数变化较慢,因此三种材料的 MAC 在 0.02~0.036  $\text{cm}^2/\text{g}$  之间,变化的幅度很小,在 9 MeV 之后,由于电子对效应的增强, HSLA80 的 MAC 开始出现上升趋势。

## 2 模拟舱室的构建及校验

MAC 是辐射屏蔽中常用的对材料的评估参数,通过上一节计算我们发现三种材料中 HSLA80 钢材对伽马辐射有较好的屏蔽性能,并且由于该材料普遍应用于舰船甲板和舱室的制造,因此使用 HSLA80 作为舱室外墙材料,

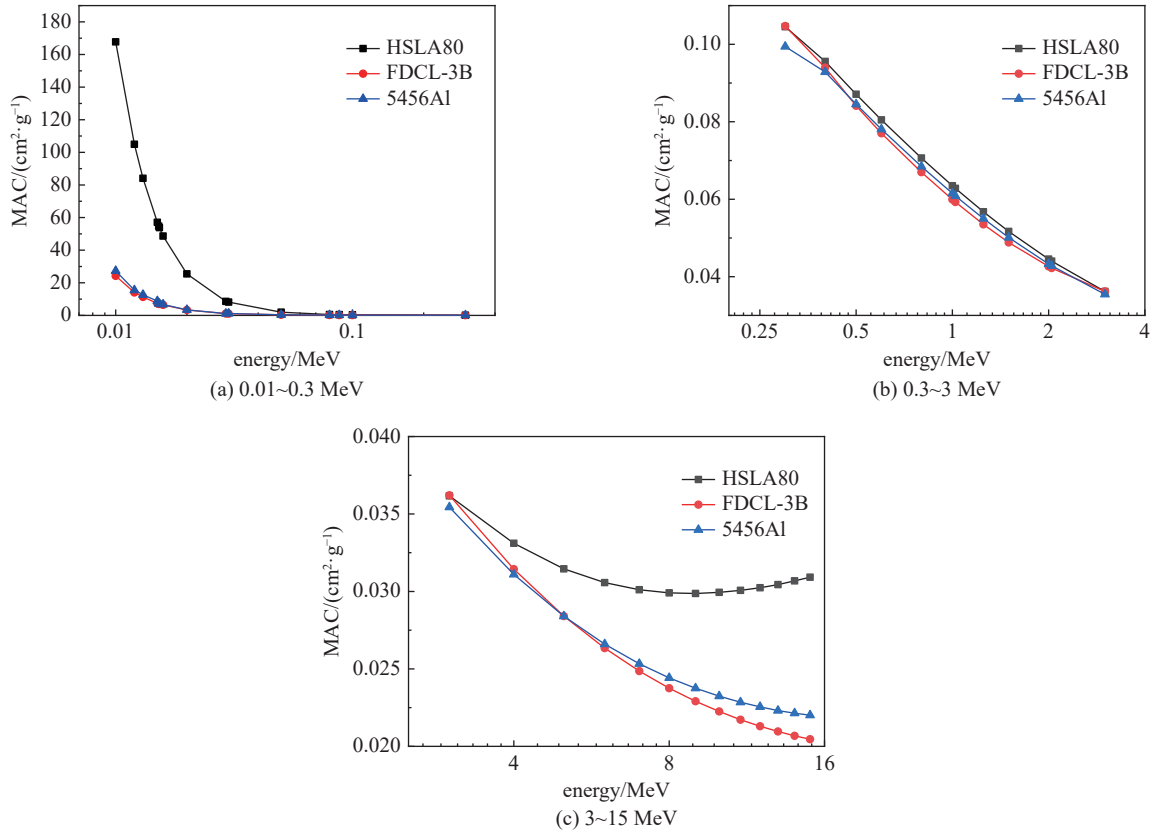


Fig. 1 Mass attenuation coefficient (MAC) of different materials from 0.01 MeV to 15 MeV

图 1 0.01~15 MeV 不同材料的质量衰减系数

对其伽马辐照下的空间分布特性进行研究。依据探测器响应方法<sup>[18]</sup>,通过伽马防护系数<sup>[19]</sup>(gamma protection factor, GPF),对构建的舱室结构模型进行校验,以确定后续计算的可靠性。

GPF 是衡量屏蔽体对伽马射线屏蔽效果的参数,表示为无屏蔽的探测器的吸收剂量  $D_F$ (图 2(a))与有屏蔽的探测器的吸收剂量  $D_S$ (图 2(b))之比,即

$$F_{GP} = D_F / D_S \quad (3)$$

吸收剂量  $D$  ( $D_F$ 与  $D_S$ ) 的表达式为

$$D = \sum_{i=1}^n E_i A_i \quad (4)$$

式中:  $E_i$  为能量,  $A_i$  为该能量伽马辐射光子在探测器中沉积的数量。

对于舰船舱室的建模,出于要先与实验数据验证对比的考虑,初步建模结构应尽量简单。模拟舱室模型如图 3 所示,设置舱室为厚度均匀的全封闭正方体模型,材料为钢(97.7% Fe, 2.3% C),外边长为 57.15 cm,舱室厚度设为 0.635 cm。半径 3.15 cm、高 8.83 cm 的 NaI 探测器位于舱室结构模型内部中心,在 8~10 cm 处放置 Cs-137 辐射源。

使用蒙特卡罗模拟程序可计算得到舱室内 NaI 探测器吸收能谱,如图 4(a)所示。为了验证所建模型的可靠

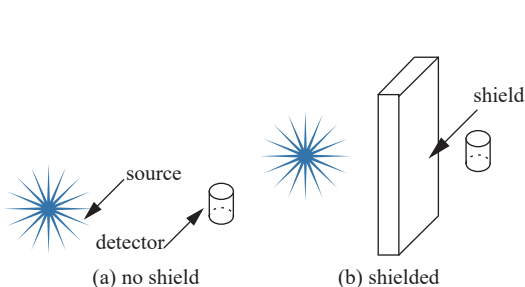


Fig. 2 Calculation method of GPF

图 2 GPF 的计算方法

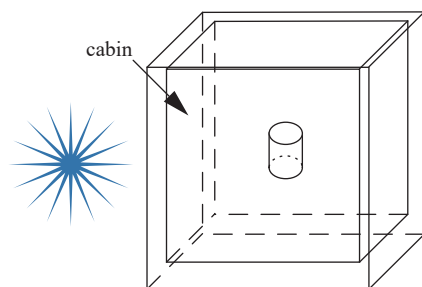


Fig. 3 Gamma irradiation cabin model

图 3 伽马辐照舱室模型

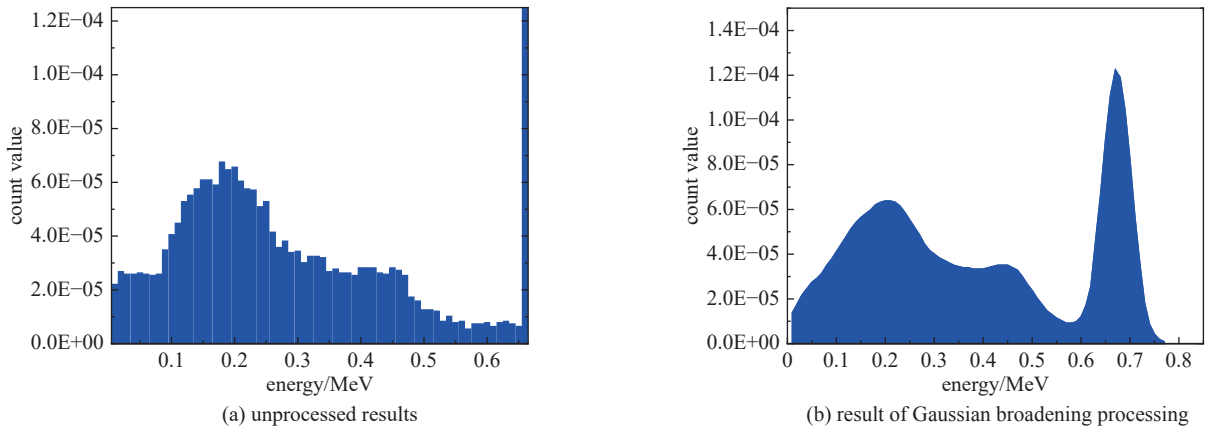


Fig. 4 Spectral response of simulated cabin detectors

图 4 模拟舱室探测器的能谱响应

性, 将计算结果与文献 [11] 的实验数据 (见图 5) 进行对比, 厚度为 0.625 cm 时计算两者 GPF 值分别为 1.046、1.059, 从数值上看, 仿真与实验结果较为接近, 图 4(a) 的能谱显然不具备图 5 的响应能谱特征, 因此需要进一步使用信号处理技术对仿真计算得到的 NaI 探测器能谱进行更精确的分析。本文使用高斯展宽<sup>[18]</sup>方法, 调整合适的参数对能谱进行高斯卷积处理, 得到新的响应能谱如图 4(b) 所示。可以看出, 处理后的响应能谱更接近实验结果, 可以进一步分析存在的细微差别。实验能谱在较低的能量区域有更多聚集, 是由于背景辐射以及探测器中的磷光饱和导致。此外实验能谱 (图 5) 最大能量为 0.775 MeV, 并有平缓延伸, 比处理能谱 (图 4(b)) 多 0.02 MeV, 可能是由于实验中电源供电波动造成的。在排除实验中的干扰因素后, 处理能谱 (图 4(b)) 和实验能谱 (图 5) 相吻合, 再结合两者的 GPF, 可以认为, 该模拟舱室计算结果与实验结果相符。

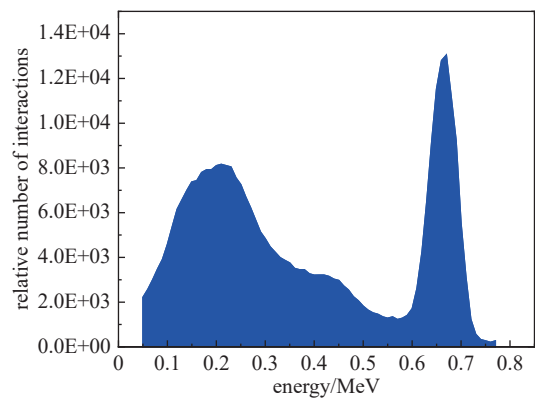


Fig. 5 Spectral response of the detector in the experiment

图 5 实验中探测器能谱响应

### 3 模拟舱室屏蔽特性的计算分析

#### 3.1 对单能伽马源的屏蔽效果

先使用常见的放射性同位素, 使用如上高斯展宽方法, 计算 GPF 和能谱, 以确定模拟舱室的单能伽马屏蔽特性。将图 3 中的放射源分别替换为 Cs-137 (峰值 0.662 MeV)、Co-57 (峰值 0.123 MeV)、Cd-109 (峰值 0.088 MeV), 不同能量峰值的放射源对应的 GPF 如表 2 所示, 可以看出, 随着放射性同位素的伽马能量峰值不断增大, 舱室的 GPF 不断降低。其中 Cd-109 的 GPF 最高, Cs-137 的 GPF 最低, 二者的比值为 6.74, 说明舱室厚度一定, 伽马辐射能量越低, 舱室的屏蔽效果越好。

将舱室材料的厚度增加到 1.2、2.4、3 cm, 计算辐射源为 Cs-137 (峰值能量 0.662 MeV) 的探测器响应能谱如图 6 所示。由图 6 可知, 厚度增加首先使得峰值能量处的伽马辐射衰减更多。0.4 MeV 以下的低能区域吸收剂量随着厚度的增加先增后减, 这是因为峰值能量的伽马射线与材料相互作用后变成低能伽马射线, 随后被计入低能区域的吸收剂量, 导致低能区域计数增加 (图 6 中 1.2 cm 曲线), 随着厚度的继续

表 2 不同单峰值源的 GPF 计算

Table 2 GPF calculation for different single peak value sources

radioisotope	peak value/MeV	GPF
Cs-137	0.662	1.022
Co-57	0.123	2.457
Cd-109	0.088	6.89

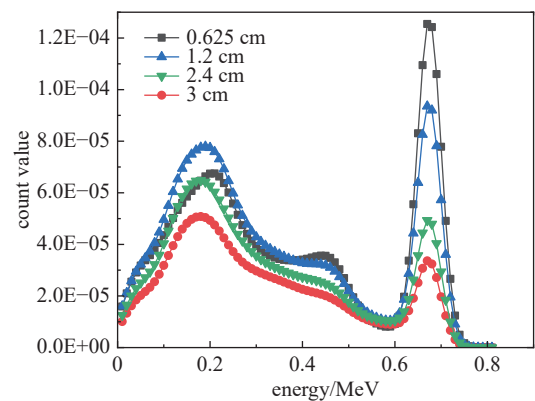


Fig. 6 Response spectra of compartments with different thicknesses

图 6 不同厚度舱室的响应能谱

增加,更多的低能伽马射线在材料内部不断吸收,只有少量能逸出材料被计入低能区域吸收剂量(图6中2.4 cm和3 cm曲线)。

### 3.2 对早期伽马辐射的屏蔽特性

早期伽马辐射与放射性同位素相比,距离较远,到达舱室时应视为均匀传输的面源,如图7(a)所示。图7(b)为某次早期伽马辐射能谱,横坐标为伽马射线的能量(MeV),纵坐标为每千吨当量的伽马射线数,能量范围0.01~15 MeV,大多粒子低于1 MeV。

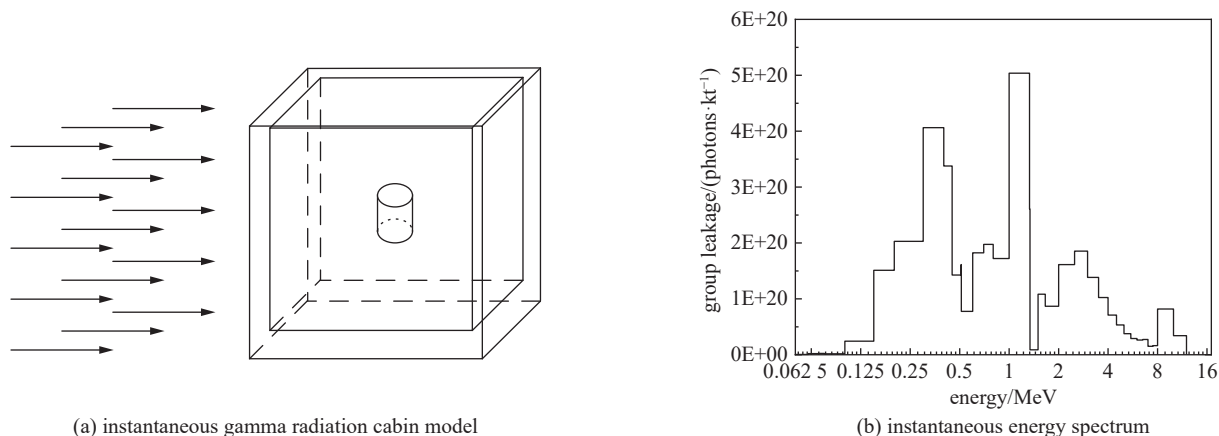


Fig. 7 Instantaneous radiation model and instantaneous energy spectrum

图7 瞬发辐射模型与瞬发能谱

首先计算辐射从舱室正面直射的情况。图8为无舱室屏蔽的NaI探测器响应能谱与有舱室屏蔽的NaI探测器响应能谱。经过屏蔽后,0.25 MeV峰值处经过屏蔽降低90%,1 MeV处峰值经过屏蔽降低80%。经计算GPF为1.92,即屏蔽后吸收剂量减少48%。以1 MeV为界,分别计算舱室对小于1 MeV和大于1 MeV伽马辐射的GPF,为2.38和1.82,说明舱室对低能伽马的屏蔽效果好。

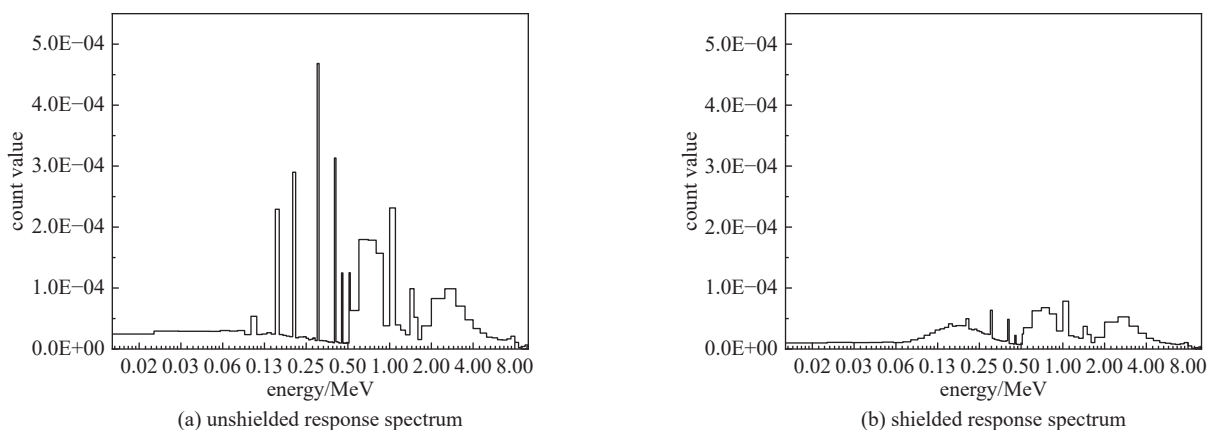


Fig. 8 Detector response spectrum

图8 探测器响应能谱

伽马辐射与舱室表面法向方向成 $0\sim 45^\circ$ 角入射,通过位于中心的探测器响应能谱,计算出GPF随角度变化的曲线如图9所示。GPF在 $0^\circ$ 时取得最小值1.92, $45^\circ$ 时取得最大值2.75,比正入射高43%。入射角度增加,伽马辐射穿过舱室所经过的厚度增加,粒子衰减距离增大,GPF变大,屏蔽效果增强。伽马辐射在 $45^\circ$ 时穿过厚度最大,舱室屏蔽效果最好。

如图10所示,将舱室内的探测器移动位置,从1号移动到9号,分析不同位置受到的伽马辐射剂量。给定的编号是按照其靠近角落的程度进行排序的,编号越大越靠近角落。其中1号到5号位于模型中轴线上,1号靠近正面内侧的中心,5号靠近背面内侧的中心,5号移动到7号是从背面中心移动到背面棱心,7号到9号是从棱心移动到正方体背面的顶点。随着探测器逐渐靠近角落,舱室的GPF变化曲线如图10(c)所示。图中GPF最小位于1号,取值1.74,最大位于9号,取值2.35,9号比1号GPF高35%。GPF随位置编号不断增大,即随着探测器的位置

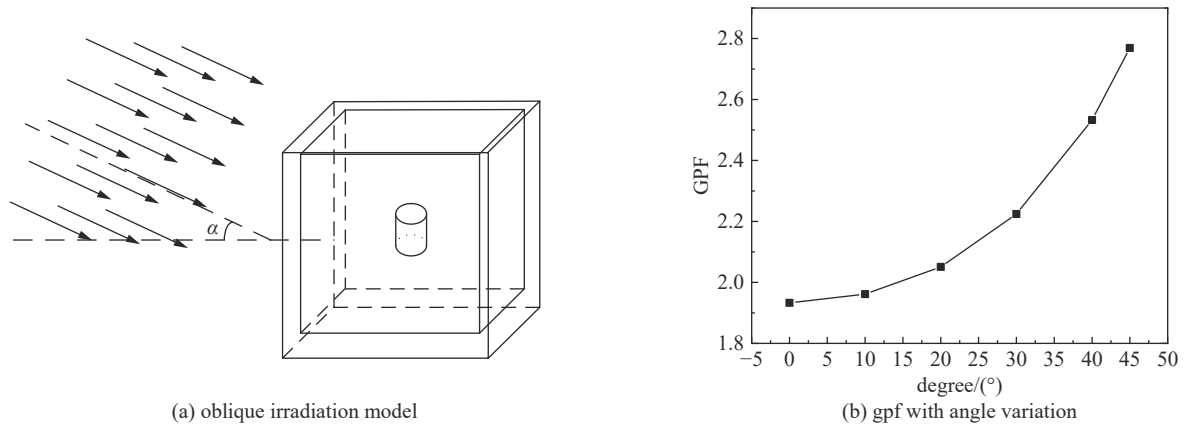


Fig. 9 Gamma protection factor (GPF) changes with angle

图 9 GPF 随角度的变化

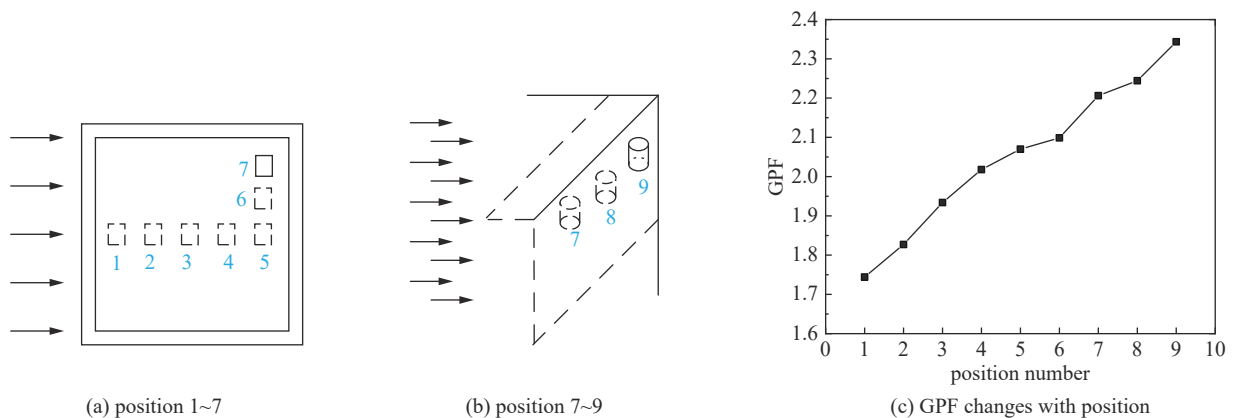


Fig. 10 Changes in GPF along the direction of radiation propagation

图 10 GPF 沿辐射传播方向的变化

逐渐靠近角落, 探测器受到的伽马辐射剂量逐渐变少。部分伽马射线在穿过墙壁时并未发生任何反应, 仍沿原来方向传播, 在均匀伽马面源辐射的情况下, 这部分粒子在舱室内任意位置的探测器上产生的吸收剂量都是相同的; 另一部分伽马射线在穿过墙壁时由于康普顿散射等效应, 能量减少、方向偏转, 这就导致探测器位于中心且靠近辐射源时更容易受到散射后伽马射线的辐射, 位于角落且远离辐射源时受到散射后伽马射线的辐射较少。

## 4 结论

本文以舰船舱室早期伽马辐射屏蔽特性为研究目标, 进行了简易的舱室建模, 初步计算了早期伽马辐射影响下舰船舱室的材料屏蔽特性和空间分布特性。首先基于早期伽马辐射的能谱计算了舰船常用材料的质量衰减系数, 之后选用对伽马辐射屏蔽效果较好的 HSLA80 材料, 构建了舰船舱室模型, 经过实验对比验证后, 计算了舱室对放射性同位素和早期伽马辐射的屏蔽效果。舱室对瞬发伽马辐射的屏蔽效果受人射角度影响, 辐射入射方向与左侧面法向的夹角越大, 舱室屏蔽效果越好, 位于中心的探测器 GPF 最高提升 43%。处于早期辐射下的舱室, 其内部远离辐射源的位置受到的伽马辐射较小。靠近边缘和角落, 舱室的屏蔽效果更佳, 可以最大限度的减少设备和人员的伽马辐射剂量。

因相关研究较少, 本文选取采用伽马防护系数 GPF 来研究舰船舱室的早期伽马辐射屏蔽特性, 模拟中采用了实际伽马泄露谱, 计算了舱室不同位置的辐射防护系数, 得到舱室内辐射防护性能的基本定性认识。模拟中对仿真计算方法及建模的可靠性进行了摸索, 虽然使用的模型相较于真实的舱室有较多简化, 但其仿真建模方法和模拟计算方法可为更为复杂的真实场景的研究奠定基础, 并提供一定的理论参考。

## 参考文献:

- [1] 刘晓红, 王伟力, 孟涛, 等. 早期核辐射毁伤效应空间建模及剖切算法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(9): 190-192,197. (Liu Xiaohong, Wang Weili, Meng Tao, et al. Research on 3D spatial data models for early nuclear radiation damage effects and slitting algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(9): 190-192,197)

- [2] 陈英琦, 陈玲燕, 张哲, 等. 用  $\gamma$  射线能谱法测量材料的吸收系数和厚度[J]. *同位素*, 2004, 17(1): 21-26. (Chen Yingqi, Chen Lingyan, Zhang Zhe, et al. The absorption coefficient of materials and thickness measurement by  $\gamma$ -ray energy spectrum analysis[J]. *Journal of Isotopes*, 2004, 17(1): 21-26)
- [3] 周剑良, 吕洋, 程晓龙, 等. 基于 MCNP 程序和  $\gamma$  射线能谱法对未知材料线吸收系数的测定[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(22): 6580-6582,6620. (Zhou Jianliang, Lü Yang, Cheng Xiaolong, et al. Study of the unknown line absorption coefficient of material by MCNP program and  $\gamma$ -ray energy spectrum analysis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(22): 6580-6582,6620)
- [4] Singh K J, Kaur S, Kaundal R S. Comparative study of gamma ray shielding and some properties of  $\text{PbO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  glass systems[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, 96: 153-157.
- [5] Abutalib M M, Yahia I S. Novel and facile microwave-assisted synthesis of Mo-doped hydroxyapatite nanorods: characterization, gamma absorption coefficient, and bioactivity[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, 78: 1093-1100.
- [6] Dickson E D, Hamby D M. Experimental shielding evaluation of the radiation protection provided by the structurally significant components of residential structures[J]. *Journal of Radiological Protection*, 2014, 34(1): 201-221.
- [7] Rammah Y S, Mahmoud K A, Mohammed F Q, et al. Gamma ray exposure buildup factor and shielding features for some binary alloys using MCNP-5 simulation code[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2021, 53(8): 2661-2668.
- [8] Khattab K, Boush M, Alkassiri H. Dose mapping simulation using the MCNP code for the Syrian gamma irradiation facility and benchmarking[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, 58: 110-112.
- [9] Wang M J, Sheu R J, Peir J J, et al. Criticality calculations of the HTR-10 pebble-bed reactor with SCALE6/CSAS6 and MCNP5[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 64: 1-7.
- [10] Hamzah A, Kuntoro I. Desain konseptual perisai radiasi reaktor RRI-50[J]. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, 2015, 17(2): 99-110.
- [11] Erwin W J. Verification and validation of Monte Carlo N-Particle 6 for computing gamma protection factors[D]. Wright-Patterson Air Force Base: Air University, 2015.
- [12] El Ouahdani S, Boukhal H, Erradi L, et al. Monte Carlo analysis of KRITZ-2 critical benchmarks on the reactivity temperature coefficient using ENDF/B-VII. 1 and JENDL-4.0 nuclear data libraries[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 87: 107-118.
- [13] Abrefah R G, Essel P A A, Odoi H C. Estimation of the dose rate of nuclear fuel of Ghana Research Reactor-1 (GHARR-1) using ORIGEN-S and MCNP 6[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2018, 105: 309-317.
- [14] Hamzah A, Suwoto, Adrial H. Preliminary analysis of dose rates distribution of experimental power reactor 10 MW using MCNP[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2019, 1198: 022038.
- [15] Knoll G F. Radiation detection and measurement[M]. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.
- [16] 方志刚, 刘斌, 李国明, 等. 舰船装备材料体系发展与需求分析[J]. *中国材料进展*, 2014, 33(7): 385-393. (Fang Zhigang, Liu Bin, Li Guoming, et al. Requirement and development analysis of warship equipment materials system[J]. *Materials China*, 2014, 33(7): 385-393)
- [17] 吴始栋. 美海军开发舰船用高强度耐腐蚀铝合金[J]. *鱼雷技术*, 2005, 13(3): 49-52. (Wu Shidong. Introduction to high strength and corrosion resistant aluminum alloy of ships developed by the US navy[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2005, 13(3): 49-52)
- [18] 韩良文, 高业栋, 夏星汉, 等. 基于 MCNP 的 HPGe 探测器无源效率刻度[J]. *核安全*, 2020, 19(3): 76-80. (Han Liangwen, Gao Yedong, Xia Xinghan, et al. Passive efficiency calibration of HPGe detector based on MCNP[J]. *Nuclear Safety*, 2020, 19(3): 76-80)
- [19] Leung J K C. Application of shielding factors for protection against gamma radiations during a nuclear accident[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1992, 39(5): 1512-1518.