

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.04.016

# 组合结构装甲钢/芳纶纤维增强聚氨酯辐射屏蔽模拟计算

张敏, 虢忠仁, 王慧军, 惠林海, 辛建平, 孙宗保, 张鹏, 宫平

(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

**摘要:** 针对装甲车辆在核爆环境下面临的辐射威胁, 基于蒙特卡罗方法, 利用MCNP软件建立了装甲钢616和芳纶纤维增强树脂基复合材料的计算模型, 系统分析了二者在不同厚度下对不同能量中子和 $\gamma$ 射线辐射的屏蔽能力。模拟计算结果表明, 复合材料对慢中子和中能中子的屏蔽效果优于装甲钢616, 但对快中子和 $\gamma$ 射线的屏蔽方面弱于装甲钢616。此外, 将装甲钢616和芳纶纤维增强树脂基复合材料的组合结构进行匹配, 基于总厚度30 mm, 模拟计算二者不同厚度占比对各能量中子和 $\gamma$ 射线的屏蔽情况。结果表明, 在满足重量和体积等要求的前提下, 屏蔽慢中子和中能中子应尽可能增大复合材料的厚度占比, 屏蔽快中子和 $\gamma$ 射线应尽可能增大装甲钢616的厚度占比。最后设定装甲钢常用厚度为10 mm, 模拟计算不同厚度复合材料的组合结构对不同能量中子和 $\gamma$ 射线的辐射屏蔽率并求出相应的半值层, 结果表明, 厚度21 mm的复合材料可以实现对中子和中能 $\gamma$ 射线50%以上的屏蔽, 针对高能 $\gamma$ 射线的屏蔽, 从实际应用角度考虑, 增加装甲钢厚度来提高屏蔽效果更有性价比。

**关键词:** 蒙特卡罗方法; 计算模型; 辐射屏蔽; 组合匹配; 厚度

**中图分类号:** TB332   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1001-3539(2025)04-0108-08

## Simulation calculation of radiation shielding properties for composite structure armor steel/aramid fiber-reinforced polyurethane

ZHANG Min, GUO Zhongren, WANG Huijun, HUI Linhai, XIN Jianping, SUN Zongbao, ZHANG Peng, GONG Ping

(Shandong Institute of Non-Metallic Materials, Jinan 250031, China)

**Abstract :** In view of the radiation threat faced by armored vehicles in the nuclear explosion environment, based on the Monte Carlo method, the MCNP software was used to establish computational models of armor steel 616 and aramid fiber reinforced resin-based composite materials, and the shielding ability of them for neutrons and  $\gamma$ -rays of different energies were systematically analyzed at different thicknesses. The simulation results show that the shielding effect of the composite material on slow neutrons and medium-energy neutrons is better than that of armor steel 616, but it is weaker in shielding fast neutrons and  $\gamma$ -rays. In addition, the matching of the composite structure of armor steel 616 and aramid fiber reinforced resin matrix were carried out based on the total thickness of 30 mm, and the shielding situation of them under different thickness were simulated and calculated. The results show that subject to the requirements of weight and volume, etc, the thickness of the composite material should be increased as much as possible for the shielding of slow neutrons and medium-energy neutrons, and the thickness of armor steel 616 should be increased as much as possible for the shielding of fast neutrons and  $\gamma$ -rays. Finally, the common thickness of the armor steel was set to 10 mm, and the radiation shielding rate of composite structure with different thickness of composite materials for different energy neutrons and  $\gamma$ -rays were simulated and calculated, and the corresponding half-value layer was obtained. The results show that the composite material with a thickness of 21 mm can achieve more than 50% shielding of neutron and medium-energy  $\gamma$ -rays, and for the shielding of high-energy  $\gamma$ -rays, increasing the thickness of armor steel to enhance the shielding effect is more cost-effective from the perspective of practical application.

**Keywords :** monte carlo method ; computational model ; radiation shielding ; combination matching ; thickness

**通信作者:** 虢忠仁, 硕士, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为高性能纤维增强复合材料

**收稿日期:** 2025-02-09

**引用格式:** 张敏, 虢忠仁, 王慧军, 等. 组合结构装甲钢/芳纶纤维增强聚氨酯辐射屏蔽模拟计算[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(4): 108-115.

ZHANG Min, GUO Zhongren, WANG Huijun, et al. Simulation calculation of radiation shielding properties for composite structure armor steel/aramid fiber-reinforced polyurethane[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4): 108-115.

在信息化网络作战时代,坦克装甲车辆作为陆战核心装备,其战场生存能力与综合防护性能仍是现代军事研究的关键课题<sup>[1]</sup>。当前针对装甲车辆炮弹和炮弹方面的防护,国内外学者已经开展了大量研究并形成了相对成熟的体系,但针对防辐射性能方面的研究仍存在显著空白。

电磁辐射和电离辐射是辐射的两种主要形式,电磁辐射对人体的伤害较小,主要包括红外线以及可见光等。电离辐射能引发物质电离作用进而对人体组织器官产生破坏性损伤,主要包括核反应产生的中子、 $\gamma$ 射线、 $\beta$ 射线和 $\alpha$ 射线等高能粒子流<sup>[2]</sup>。其中 $\alpha$ 、 $\beta$ 等带电粒子可通过常规材料有效屏蔽。而中子和 $\gamma$ 射线能量高且不带电,因此穿透性强、屏蔽难度大,会对人员和仪器设备产生极大损伤,所以亟需开展针对中子和 $\gamma$ 射线的辐射防护研究<sup>[3-6]</sup>。

目前应用在装甲车辆中的基体材质主要包括装甲钢、铝合金和钛合金三类。铝合金密度低、力学性能和工艺性能良好,但铝合金相对于装甲钢在硬度和强度方面较低,在主战坦克应用上受到限制。钛合金因其强度高、密度低、耐腐蚀等优异性能,成为一种性能优良的装甲材料,但因其价格昂贵及加工工艺复杂,在装甲防护领域内尚未得到广泛使用<sup>[7-8]</sup>。装甲钢因其优异的综合性能,是目前在装甲车辆上应用最为广泛的基体材质。另外,装甲车辆内部防护衬层是装备综合防护系统中的最后一道屏障,对装备内人员和设备的安全具有重要意义。纤维增强复合材料由于具有密度低和比强度高优点,在市场上得到广泛应用<sup>[9]</sup>。其中对位芳纶纤维由于其比吸能大、氧指数高以及价格适中等优异性能被广泛作为防护衬层的增强材料。热塑性聚氨酯韧性好、强度高,在抗冲击方面应用广泛<sup>[10-11]</sup>。并且聚氨酯的抗辐射能力强、部分原料来源于可再生资源,因此聚氨酯是作为制备屏蔽层最为合适的聚合物基体。

MCNP是基于蒙特卡罗方法模拟计算粒子与物质相互作用的软件。MCNP使用随机概率设计理论显现实际环境中粒子的运动轨迹,能够计算空间中光子和中子的作用情况。MCNP建模采用布尔运算方式将空间中的每个面组合起来围成封闭实体,设计者只需知道各个面的数学方程表达方式即可创建各种形状复杂结构,并且该软件在辐射屏蔽模拟计算方面具有较高的准确性。李昆伦<sup>[12]</sup>通过

MCNP模拟计算聚甲基丙烯酸甲酯基复合材料的辐射屏蔽性,并与实验测试结果对比得出:模拟粒子发射数量越多误差越小,发射粒子数为 $10^7$ ,误差率能够控制在5%以内。

笔者基于蒙特卡罗方法研究装甲钢、芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料以及两者的组合结构对各能量中子和 $\gamma$ 射线的辐射屏蔽情况,为开发相应防辐射产品提供参考。

## 1 辐射屏蔽蒙特卡洛计算

### 1.1 辐射屏蔽机理

$\gamma$ 射线与屏蔽材料粒子间的作用形式主要有3种:光电效应、康普顿散射和电子对效应,其中光电效应以及康普顿散射覆盖全部能量区间的 $\gamma$ 射线,而电子对效应需要 $\gamma$ 射线的能量超过一定强度值时才会触发<sup>[13-14]</sup>。图1分别为光电效应、康普顿散射和电子对效应的示意图。其中, $E$ 为光子能量, $h$ 为普朗克常数, $\nu$ 为光子频率, $A$ 为逸出功, $E_e$ 为反冲电子能量, $h\nu'$ 为散射光子能量, $\Phi$ 为反冲电子散射角, $\theta$ 为光子散射角。

中子与屏蔽材料粒子间作用形式主要包括碰撞散射、粒子沉积以及粒子穿透三种形式,中子屏蔽机理示意图如图2所示,粒子反应截面计算方法见式(1)<sup>[15]</sup>。

$$\sigma = \frac{I_0}{IN_s} \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为反应截面; $I_0$ 为入射粒子数; $I$ 为穿透粒子数; $N_s$ 为屏蔽粒子数。

半值层(HVL)和十值层(TVL)分别为将辐射粒子强度衰减到入射强度的一半及1/10所需要屏蔽材料的厚度值,图3为HVL和TVL的示意图。

### 1.2 模型创建

利用MCNP程序构建辐射屏蔽模型,主要包含辐射源的设置、屏蔽材料模型搭建以及探测器的设置三部分,如图4所示。将射线源、样品和探测器放置于圆柱形容容器内,为了提高计算效率、减小误差,将容器外区域设置为真空,散射到容器外的粒子进行消散处理。射线源置于整个空间模型的原点位置,测试样品置于射线源与探测器中间位置。

#### 1.2.1 辐射源设置

辐射源设置为点源形式,以垂直屏蔽材料端面方向发射粒子。中子按能量大小通常可分成3个区间:慢中子(0.025 3~1 keV,其中热中子能量为0.025 3 eV)、中能中子(1 eV~0.1 MeV)和快中子

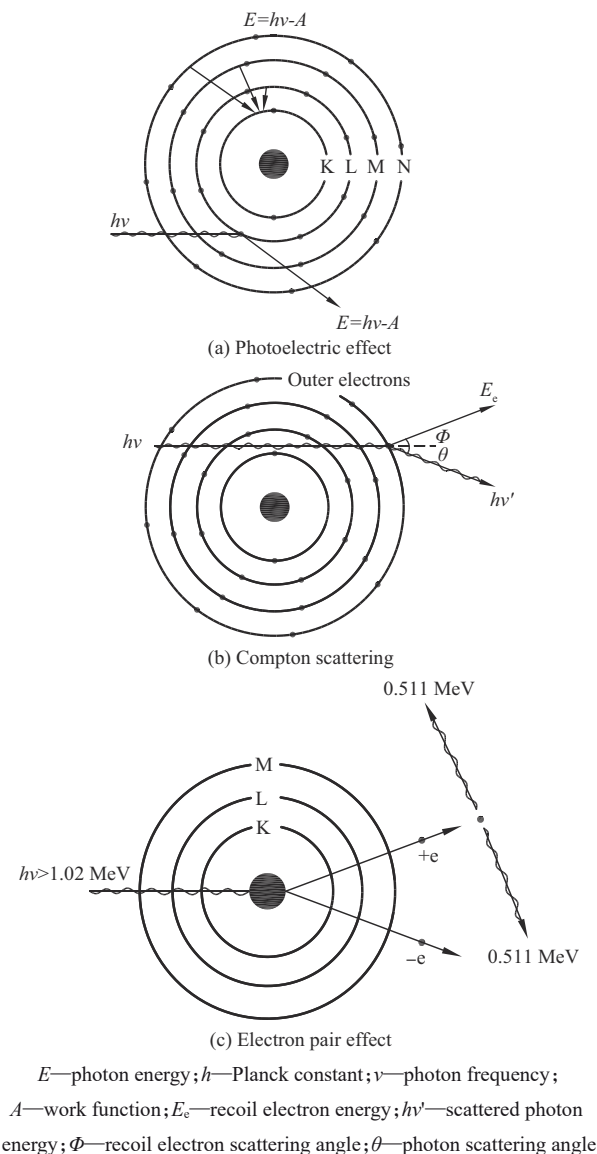
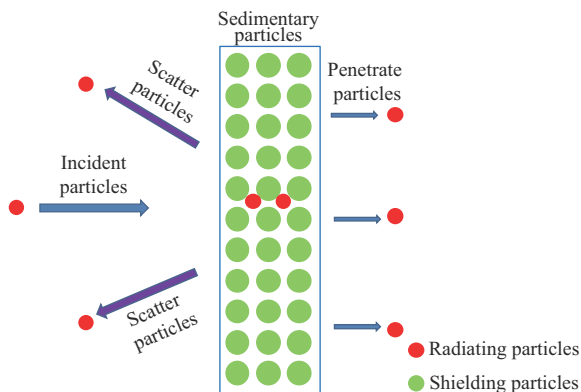
图1  $\gamma$ 射线屏蔽机理Fig. 1  $\gamma$ -ray shielding mechanism

图2 中子屏蔽机理

Fig. 2 Neutron shielding mechanism

(0.1~10 MeV)。为了研究对比屏蔽材料各能量区间中子的辐射屏蔽效果,笔者分别设置1 MeV, 1 keV,

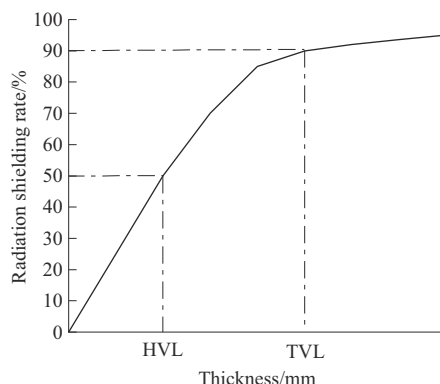


图3 HVL和TVL示意图

Fig. 3 Diagram of HVL and TVL

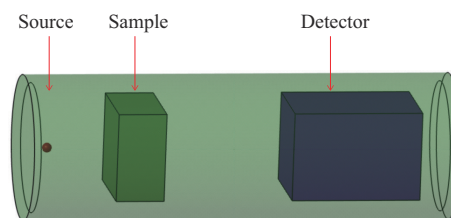


图4 辐射屏蔽计算模型

Fig. 4 Radiation shielding calculation model

1 eV和0.025 3 eV四种单能中子源,发射中子数量为 $10^7$ 个。

对于 $\gamma$ 射线,辐射源 $^{137}\text{Cs}$ , $^{241}\text{Am}$ 以及 $^{60}\text{Co}$ 是常见的三种 $\gamma$ 放射源,它们释放的光子平均能量分别是662 keV,60 keV和1.25 MeV。为提高对比性,笔者分别设置2.5 MeV,1.25 MeV,662 keV和60 keV四种单能 $\gamma$ 射线源,发射 $\gamma$ 粒子数量为 $10^7$ 个。

### 1.2.2 屏蔽材料模型搭建

装甲钢种类较多,具体应用牌号有616,675,685,601,695,GY4等,其中装甲钢616因其良好的工艺性和经济性,成为坦克装甲车辆最常用的牌号。芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料由对位芳纶纤维和聚氨酯树脂组成,其中树脂含量对材料各方面性能影响显著。张敏等<sup>[15]</sup>通过蒙特卡罗模拟研究对位芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料辐射屏蔽性,发现聚氨酯树脂含量越大,屏蔽效果越好。笔者选取装甲钢616、聚氨酯树脂质量分数20%的复合材料以及二者的组合结构为研究对象,制备不同参数的屏蔽体,如图5所示,图5a为装甲钢616模型,图5b为对位芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料模型,图5c为装甲钢616和复合材料的组合结构模型。装甲钢616和复合材料的各原子元素比例见表1和表2。

### 1.2.3 探测器设置

探测器可以通过设计不同的程序计算卡来统

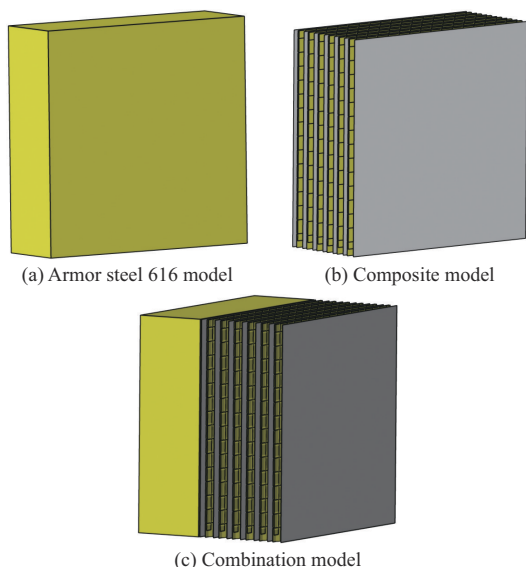


图5 屏蔽模型

Fig. 5 Shielding model

表1 装甲钢616中各原子的原子百分数

Tab. 1 Atomic percent of each atomic in armor steel 616

| Material        | Atomic species | Atomic percent/% |
|-----------------|----------------|------------------|
| Armor steel 616 | C              | 0.22             |
|                 | Si             | 0.85             |
|                 | Mn             | 1.67             |
|                 | P              | 0.02             |
|                 | S              | 0.01             |
|                 | B              | 0.001 8          |
|                 | Ti             | 0.003            |
|                 | Fe             | 97.225           |

表2 对位芳纶纤维和聚氨酯树脂中各原子的原子百分数

Tab. 2 Atomic percent of each atomic in para-aramid fiber and polyurethane

| Material          | Atomic species | Percentage of quantity/% |
|-------------------|----------------|--------------------------|
| Para-aramid fiber | C              | 50.0                     |
|                   | H              | 35.7                     |
|                   | N              | 7.15                     |
|                   | O              | 7.15                     |
| Polyurethane      | C              | 21.40                    |
|                   | H              | 57.15                    |
|                   | N              | 14.30                    |
|                   | O              | 7.15                     |

计穿透屏蔽材料的粒子数量和类型等信息,得出穿透粒子的分布情况,从而分析出屏蔽材料对不同辐射粒子的辐射屏蔽效果。探测器通常设置在屏蔽材料后并与辐射源位于同一轴线上。

## 2 结果与讨论

### 2.1 中子辐射屏蔽分析

选取厚度分别为5, 8, 11, 14, 17, 20 mm的装甲钢616和芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料,对能量分别为0.025 3 eV, 1 eV, 1 keV和1 MeV的辐射中

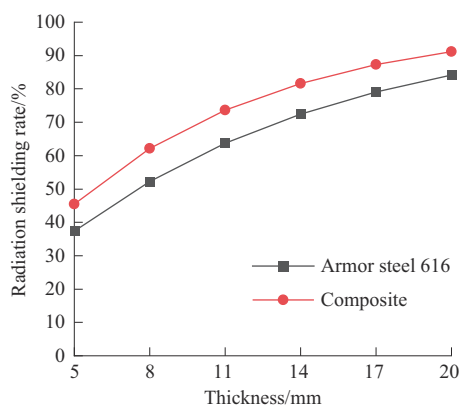
子源进行模拟计算。装甲钢616和芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料对中子辐射屏蔽率随厚度变化的规律如图6所示。由图6可见,当中子源能量为0.0253 eV, 1 eV和1 keV时,随着厚度的增加,装甲钢616和芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料对中子辐射的屏蔽率逐渐增大且呈现非线性趋势,相同厚度条件下,芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料的辐射屏蔽效果优于装甲钢616。当中子源能量为1 MeV时,随着厚度的增加,装甲钢616和复合材料辐射屏蔽率逐渐增大且呈现线性趋势,相同厚度条件下,装甲钢616的辐射屏蔽优于复合材料,且随着厚度的增加,差距逐渐增大;当屏蔽体厚度为5 mm时,二者的中子辐射屏蔽率差值为1%,当厚度为20 mm时两者屏蔽率差值为3%。结合四个图可以看出,随着中子源能量的增加,复合材料和装甲钢616的辐射屏蔽率越小,屏蔽难度越大。

### 2.2 $\gamma$ 辐射屏蔽分析

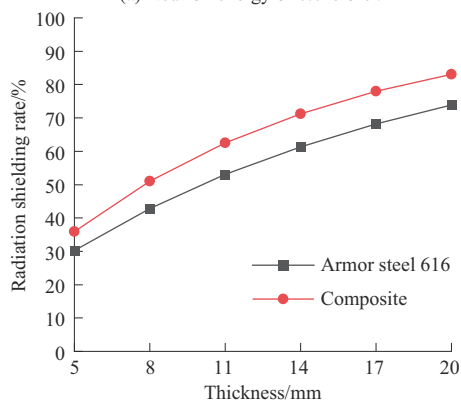
选取厚度分别为5, 8, 11, 14, 17, 20 mm的装甲钢616和芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料厚度,对能量为60 keV, 662 keV, 1.25 MeV和2.5 MeV的辐射 $\gamma$ 射线源进行模拟计算。装甲钢616和芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料的 $\gamma$ 射线屏蔽率随厚度变化的规律如图7所示。由图7可知,当 $\gamma$ 射线源能量为60 keV时,5 mm厚度的装甲钢616可以实现有效防护, $\gamma$ 射线屏蔽率达到99%。当 $\gamma$ 射线源能量为662 keV, 1.25 MeV和2.5 MeV时,随着厚度的增加,装甲钢616和复合材料辐射屏蔽率逐渐增大且近似线性趋势,其中装甲钢616屏蔽率增大的趋势高于复合材料,相同厚度条件下,装甲钢616的辐射屏蔽效果优于复合材料。结合四个图可以发现随着 $\gamma$ 射线源能量的增加,复合材料和装甲钢616的辐射屏蔽率越低、屏蔽难度越大且厚度对屏蔽率的贡献值逐渐减缓。

### 2.3 组合结构匹配分析

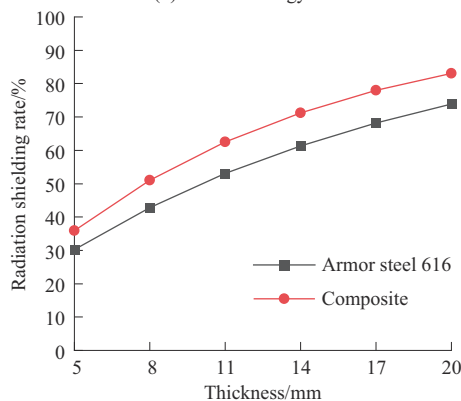
Cai等<sup>[6]</sup>采用蒙特卡罗模拟程序,模拟计算了不同结构材料的屏蔽性能,结果表明,多层结构材料比单层材料在屏蔽性能方面有更好的效果。由2.1和2.2数据可知,芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料对慢中子和中能中子有较好屏蔽效果,装甲钢616在快中子和 $\gamma$ 射线屏蔽方面更有优势。从表面上看,将两者组合起来形成互补可以对各能量中子和 $\gamma$ 射线都有较好屏蔽效果。由于辐射屏蔽原理比较



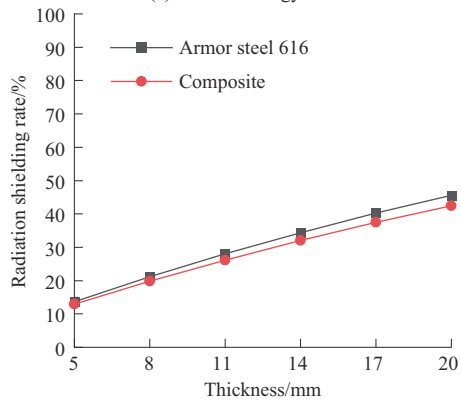
(a) Neutron energy of 0.0253 eV



(b) Neutron energy of 1 eV



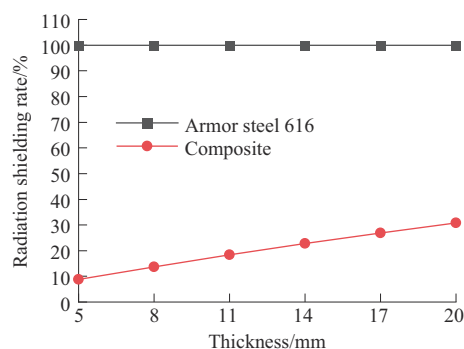
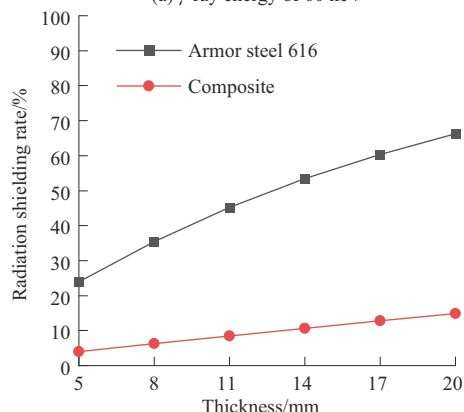
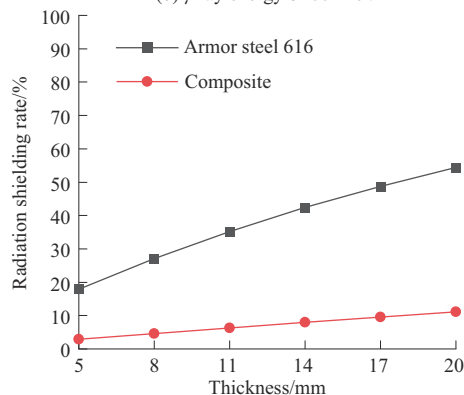
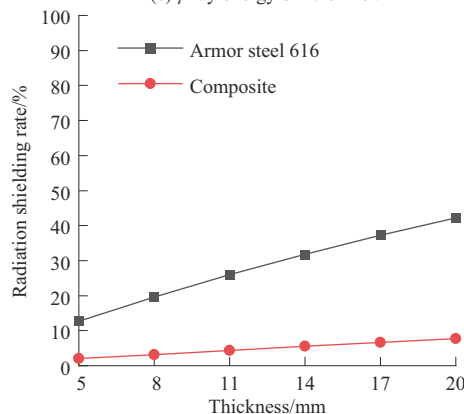
(c) Neutron energy of 1 keV



(d) Neutron energy of 1 MeV

图6 不同厚度装甲钢616和复合材料对不同能量中子的辐射屏蔽率

Fig. 6 Radiation shielding rate of armor steel 616 and composite with different thickness on different energy neutrons

(a)  $\gamma$ -ray energy of 60 keV(b)  $\gamma$ -ray energy of 662 keV(c)  $\gamma$ -ray energy of 1.25 MeV(d)  $\gamma$ -ray energy of 2.5 MeV图7 不同厚度装甲钢616和复合材料对不同能量 $\gamma$ 射线的辐射屏蔽率Fig. 7 Radiation shielding rate of armor steel 616 and composite with different thickness on different  $\gamma$ -ray energy

复杂,涉及的因素较多,二者的综合屏蔽效果不是各个材料屏蔽效果的简单叠加,需要对二者的组合结构进行匹配分析。

由于车辆内部受设备和人员等因素影响,防护空间有限,笔者首先以总厚度 30 mm 为基准,研究不同厚度比组合结构对不同能量射线的屏蔽效果,设置了 5 种不同厚度比值,厚度配比见表 3。

表 3 不同厚度比值的组合结构

Tab. 3 Composite structures with different thickness ratios

| Combina-<br>tion | Total<br>thickness/<br>mm | Composite<br>thickness/mm | 616 thick-<br>ness/mm | Thickness<br>percentage<br>of 616/% |
|------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| T1               | 30                        | 30                        | 0                     | 0                                   |
| T2               | 30                        | 22.5                      | 7.5                   | 25                                  |
| T3               | 30                        | 15                        | 15                    | 50                                  |
| T4               | 30                        | 7.5                       | 22.5                  | 75                                  |
| T5               | 30                        | 0                         | 30                    | 100                                 |

中子辐射屏蔽方面,对能量分别为 0.025 3 eV, 1 eV, 1 keV 和 1 MeV 中子源进行模拟计算,组合结构 T1, T2, T3, T4 和 T5 的中子屏蔽率随厚度变化的规律如图 8 所示。由图 8 可见,当中子源能量为 0.025 3 eV, 1 eV 和 1 keV 时, T1~T5 对中子辐射屏蔽率逐渐减小。所以针对低能量中子辐射时,屏蔽材料要尽量选取复合材料占比大的组合结构。当中子源能量为 1 MeV 时, T1~T5 对中子辐射的屏蔽率逐渐增大。所以针对高能量中子辐射时,屏蔽材料要尽量选取装甲钢 616 占比大的组合结构。

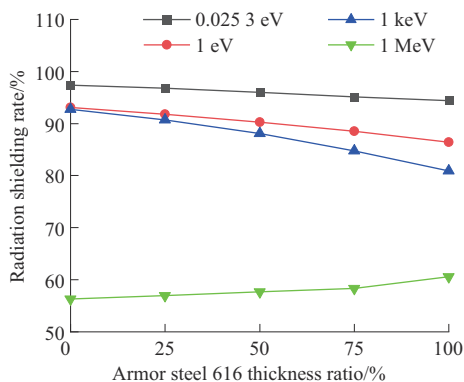


图 8 不同组合结构对不同能量中子的辐射屏蔽率

Fig. 8 Radiation shielding rate of different composite structures on different energy neutrons

$\gamma$  射线辐射屏蔽方面,对能量分别为 60 keV, 662 keV, 1.25 MeV 和 2.5 MeV 的  $\gamma$  射线进行模拟计算。组合结构 T1, T2, T3, T4 和 T5 对  $\gamma$  射线屏蔽率随厚度变化的规律如图 9 所示,当  $\gamma$  射线源能量为 60 keV 时, T2~T5 的辐射屏蔽率达到 99%,所以针对

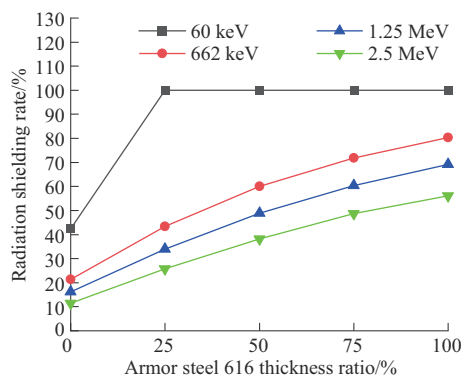


图 9 不同组合结构对不同能量  $\gamma$  射线的辐射屏蔽率

Fig. 9 Radiation shielding rate of different composite structures on different  $\gamma$ -ray energy

此能量的  $\gamma$  射线辐射时,组合结构中装甲钢 616 厚度占比 25% 以上就能实现有效屏蔽。当  $\gamma$  射线能量为 662 keV, 1.25 MeV 和 2.5 MeV 时, T1~T5 的辐射屏蔽率逐渐增大,所以针对此能量辐射时,组合结构中要尽量选取复合材料占比小的搭配。

由于装甲车辆自身结构要求,特定车辆的装甲钢厚度通常为定值。以常用装甲钢 616 厚度 10 mm 为基准,模拟计算复合材料厚度对组合结构辐射屏蔽率的影响。

以半值层作为材料屏蔽指标,对于中子辐射屏蔽方面,由前面装甲钢 616 的中子辐射屏蔽率结果可知,当中子能量为 0.025 3 eV 时, 10 mm 厚装甲钢可以达到 60% 的屏蔽率;中子能量为 1 eV 时, 10 mm 厚装甲钢可以达到 50% 的屏蔽率。所以对于基体装甲钢 616,当以厚度 10 mm 为基准时,只需要计算 1 keV 和 1 MeV 的屏蔽值,计算结果如图 10 所示。以纵坐标 50% 作水平线分别与曲线相交,对应的横坐标值就是组合结构屏蔽率达到一半时所需复合材料的厚度值,从图 10 可以得出,中子源能量

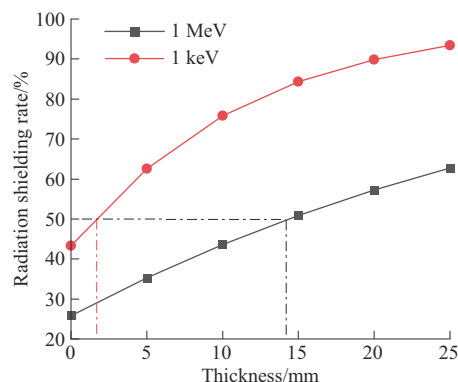


图 10 不同厚度复合材料的组合结构对不同能量中子的辐射屏蔽率

Fig. 10 Radiation shielding rate of composite structures with different thickness for composite on different energy neutrons

为1 keV和1 MeV时,组合结构屏蔽率达到HVL值所需复合材料厚度分别为2 mm和14 mm。

$\gamma$ 射线辐射屏蔽方面,由装甲钢616的 $\gamma$ 射线辐射屏蔽率结果可知,当 $\gamma$ 射线能量为60 keV时,厚度5 mm的装甲钢616可以达到99%的屏蔽率。所以对于基体装甲钢616,当以厚度10 mm为基准时,只需要计算662 keV,1.25 MeV和2.5 MeV的屏蔽值,计算结果如图11所示。以纵坐标50%作水平线分别与3条曲线相交对应的横坐标值就是组合结构所需复合材料的厚度值,从图11可以得出, $\gamma$ 射线源能量为662 keV,1.25 MeV和2.5 MeV时,组合结构屏蔽率达到HVL值所需复合材料厚度分别为21,57,108 mm。

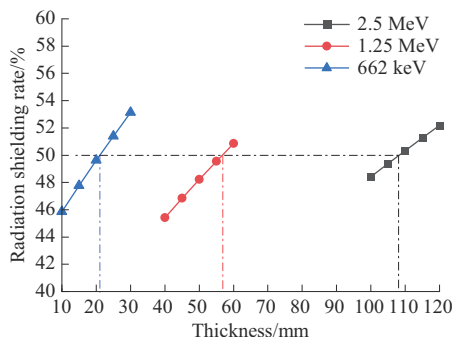


图11 不同厚度复合材料的组合结构对不同能量 $\gamma$ 射线的辐射屏蔽率

Fig. 11 Radiation shielding rate of composite structures with different thickness for composite on different  $\gamma$ -ray energy

### 3 结论

(1)芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料对慢中子和中能中子有较好的屏蔽效果,而装甲钢616对快中子和 $\gamma$ 射线屏蔽有较大的优势。

(2)辐射源能量值越大,屏蔽率越小,屏蔽难度越大。

(3)受空间限制,设定组合结构总厚度为定值,对慢中子和中能中子的屏蔽要尽可能地增大复合材料厚度占比来提高防护效果。对快中子和 $\gamma$ 射线的屏蔽要尽可能增大装甲钢616厚度占比来提高防护效果,这与单一结构屏蔽结论一致。

(4)当基体装甲钢616为常用厚度值10 mm时,14 mm复合材料能实现对1 MeV中子50%的屏蔽,21 mm复合材料能实现对662 keV  $\gamma$ 射线50%的屏蔽,但是当 $\gamma$ 射线能量在2.5 MeV左右时,对应所需复合材料HVL的厚度为108 mm,该值远大于传统防护材料所要求的厚度值,因此针对高能 $\gamma$ 射线的防护,从实际应用角度考虑,增加装甲钢厚度来提

高屏蔽效果更有性价比。

### 参考文献

- [1] 张文昌. 俄乌双方坦克装甲车作战运用综合研究[J]. 国防科技工业, 2023(4):44-46.  
ZHANG Wenchang. Comprehensive research on the operational application of Russian and Ukrainian tanks and armored vehicles [J]. Defence Science & Technology Industry, 2023(4):44-46.
- [2] 吴健. 高分子材料与核辐射屏蔽功能材料的复合与应用[J]. 科技风, 2018(7):66-68.  
WU Jian. Composite and application of polymer materials and nuclear radiation shielding functional materials[J]. Technology Wind, 2018(7):66-68.
- [3] 何林, 蔡永军, 李强. 中子和伽马射线综合屏蔽材料研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(7):1 107-1 113.  
HE Lin, CAI Yongjun, LI Qiang. Research progress in radiation shielding materials serving as the combined barrier against neutron and gamma-ray[J]. Materials Reports, 2018, 32(7):1 107-1 113.
- [4] 郑伟, 汤晓斌, 黎俊, 等. 中子/ $\gamma$ 射线混合辐射场屏蔽材料研究进展[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(6):66-72.  
ZHENG Wei, TANG Xiaobin, LI Jun, et al. Research progress of neutron/gamma ray mixed radiation field shielding materials[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(6):66-72.
- [5] KWAK J, MUTH B, YANG H W, et al. Shielding analysis of metal hydride-based materials for both neutron and gamma rays using Monte Carlo simulation[J]. Korean Journal of Metals and Materials, 2021, 59(12):921-925.
- [6] WANG K B, MA L T, YANG C, et al. Recent progress in Gd-containing materials for neutron shielding applications: A review[J]. Materials, 2023, 16(12). DOI:10.3390/ma16124305.
- [7] 李龙, 吕金明, 严安, 等. 铝合金装甲材料的应用及发展[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(6):105-113.  
LI Long, LYU Jinming, YAN An, et al. Application and development of aluminum alloy armor materials[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(6):105-113.
- [8] 陈京生, 孙葆森, 安康. 钛合金在兵器装备上的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12):14-20.  
CHEN Jingsheng, SUN Baosen, AN Kang. Titanium alloys for ordnance equipment applications[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12):14-20.
- [9] 杨坤, 朱波, 曹伟伟, 等. 高性能纤维在防弹复合材料中的应用[J]. 材料导报, 2015, 29(13):24-28.  
YANG Kun, ZHU Bo, CAO Weiwei, et al. Application of high-performance fiber in bulletproof composite materials[J]. Materials Review, 2015, 29(13):24-28.
- [10] HE A N, XING T H, LIANG Z H, et al. Advanced aramid fibrous materials: Fundamentals, advances, and beyond[J]. Advanced Fiber Materials, 2024, 6(1):3-35.
- [11] 戴旭阳. 热塑性聚氨酯弹性体应力松弛研究[J]. 山东化工, 2024, 53(14):189-191.

- DAI Xuyang. Study on stress relaxation of thermoplastic polyurethane elastomer[J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(14): 189–191.
- [12] 李昆伦. 聚甲基丙烯酸甲酯基复合材料辐射屏蔽性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- LI Kunlun. Study on radiation shielding properties of polymethyl methacrylate-based composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [13] 吴忧. 含铅、硼无机功能材料的制备及其中子伽马共同防护性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- WU You. Preparation of inorganic functional materials containing lead and boron and their neutron-gamma protection properties[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [14] KAMAT V A, SWAROOP K, KIRAN K U, et al. Effects of hematite-lead oxide combination in ethylene-propylene-diene-monomer on shielding 59.54 keV gamma rays[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2019, 156:50–57.
- [15] 张敏, 魏忠仁, 辛建平, 等. 芳纶纤维增强抗弹复合材料中子辐射屏蔽模拟计算[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12):152–157.
- ZHANG Min, GUO Zhongren, XIN Jianping, et al. Simulation calculation on neutron radiation shielding properties of aramid fiber reinforced ballistic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12):152–157.
- [16] CAI Y, HU H S, PAN Z H, et al. A method to optimize the shield compact and lightweight combining the structure with components together by genetic algorithm and MCNP code[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2018, 139:169–174.

---

#### 上接第88页

- [10] ZHANG L, FU Z H, YAO C, et al. Die design and process optimization of plastic gear extrusion[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 303. DOI:10.1088/1757-899X/303/1/012020.
- [11] MAMALIS A G, VORTSELAS A K, KOUZILOS G. Tube extrusion of polymeric materials: Optimization of the processing parameters[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 126(1): 186–193.
- [12] MU Y, ZHAO G Q, WU X H. Optimization approach for processing design in the extrusion process of plastic profile with metal insert[J]. e-Polymers, 12(1):353–366.
- [13] MEKRAS N, ARTEMAKIS I. Using artificial neural networks to model extrusion processes for the manufacturing of polymeric micro-tubes[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2012, 40. DOI:10.1088/1757-899X/40/1/012041.
- [14] 李红霞. 冠脉支架的力学行为研究及其优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- LI Hongxia. Study on mechanical behavior and optimal design of coronary stents[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [15] LI H X, WANG X Y, WEI Y B, et al. Multi-objective optimizations of biodegradable polymer stent structure and stent microinjection molding process[J]. Polymers, 2017, 9(1). DOI: 10.3390/polym9010020.
- [16] LI H X, LIU K, ZHAO D Y, et al. Multi-objective optimizations for microinjection molding process parameters of biodegradable polymer stent[J]. Materials, 2018, 11(11). DOI: 10.3390/ma11112322.