

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.12.021

芳纶纤维增强抗弹复合材料中子辐射屏蔽模拟计算

张敏, 魏忠仁, 辛建平, 孙宗保, 宫平, 张鹏

(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 芳纶纤维增强抗弹复合材料因具有优异的破片防护性能、阻燃性能及低密度等特点被广泛应用于装甲车辆防护产品中。提升该复合材料的核防护能力可进一步提高装甲车辆的综合防护能力。基于蒙特卡罗方法, 采用 MCNP 软件建立了芳纶纤维增强聚氨酯树脂基复合材料计算模型, 分析了该复合材料在不同条件下对不同能量中子射线的辐射屏蔽能力。模拟计算结果表明, 该复合材料在不同成型压力下, 对热中子射线的屏蔽能力影响很小, 可忽略不计; 随着树脂含量的增加, 复合材料对中子射线的屏蔽能力线性增大, 其中对热中子影响最为显著, 对快中子屏蔽效果最差; 随着厚度的增加, 该复合材料对中子屏蔽能力不断增强但趋势不同, 其中对慢中子和中能中子屏蔽能力较强且非线性增大, 最后趋于平稳, 对快中子屏蔽能力较弱但线性增大。另外, 通过模拟计算, 对穿透中子的能量分布进行了统计分析, 结果表明, 芳纶纤维增强抗弹复合材料对慢中子和中能中子具有较高的慢化效应, 对快中子的慢化效应较低。

关键词: 蒙特卡罗方法; 计算模型; 中子屏蔽; 树脂含量; 厚度; 慢化效应

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)12-0152-06

Simulation calculation on neutron radiation shielding properties of aramid fiber reinforced ballistic composites

ZHANG Min, GUO Zhongren, XIN Jianping, SUN Zongbao, GONG Ping, ZHANG Peng

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

Abstract: Aramid fiber reinforced ballistic composites are widely used in armored vehicle protection products because of their excellent fragment protection performances, flame retardant performance and low density. Improving the nuclear protection capability of the composites can further improve the comprehensive protection capability of armored vehicles. The numerical models of aramid fiber reinforced polyurethane resin matrix composites were established by MCNP software based on Monte Carlo method. The radiation shielding abilities of the composites with different conditions to various energy neutron rays were analyzed. The simulation results show that the thermal neutron shielding ability of the composite is little affected and negligible by different molding pressure. With the increase of the resin content, the shielding efficiency of the composite on neutron ray increases linearly, especially for thermal neutron, which is the worst for fast neutrons. Then, with the increase of thickness, the neutron shielding ability of the composite is continuously enhanced, but the increase trend is different, in which the shielding ability for slow and medium neutrons is strong and increases nonlinearly, and finally tends to be stable, and the shielding ability for fast neutrons is weak but increases linearly. In addition, the energy distribution of penetrating neutrons was analyzed by simulation. The results show that aramid fiber reinforced ballistic composites have high moderating effect for slow and medium neutrons and low moderating effect for fast neutrons.

Keywords: Monte Carlo method; numerical model; neutron shielding; resin content; thickness; moderating effect

现代战场环境中坦克装甲车辆面临的主要威胁除了各种炮弹、导弹、集束炸弹、简易爆炸装置和枪弹等地面各种反装甲武器的火力打击外, 还有来自空中的各种战斗机、作战无人机的多种威胁。其

通信作者: 魏忠仁, 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: 2024-08-13

引用格式: 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.

中,导致坦克装甲车辆损毁和人员伤亡原因的80%为各种弹药爆炸破片或者其引起的爆炸等二次效应^[1-2]。另外,核爆炸也是坦克装甲车辆面临的一种可能的威胁。针对坦克装甲车辆面临的以上各种威胁,大量国防科研院所开展相应的防护对策,构建装备综合防护理念,实现“避免被发现、避免被击中、避免被毁伤”的目标,提升装备的综合防护能力。其中,装甲车辆衬层是装备综合防护系统中最后一道屏障,对装备内人员和设备的安全具有重要意义^[3]。

在战场中,核爆炸会产生强辐射作用,若未采取有效措施,会对装甲车辆乘员和设备产生极大的杀伤作用。核反应主要产生中子、 γ 射线、 β 射线、 α 射线等高能粒子流^[4]。 α 和 β 粒子的质量相比其他粒子大很多,它们很容易被屏蔽材料粒子阻断,一般普通衣物就可以实现屏蔽,不需要使用特殊的防护材料。中子和 γ 射线能量高并且中子不带电会在材料中传播非常长的距离,粒子碰撞会产生电离作用,对人体组织器官产生破坏性损伤,针对它们的辐射防护需要研究出针对性的屏蔽材料^[5]。

纤维增强复合材料由于具有密度低、比吸收率高、比强度和比模量大等优点被广泛应用在装甲车防护产品中^[6]。碳纤维材料强度高,但其吸能较低,受冲击易损坏,一般不独立应用在防护产品中;超分子量聚乙烯纤维材料比模量和比强度高、吸能较高、密度低,但其具有的氧指数低、耐热性较差等缺点无法满足装甲车辆内装性能要求;芳纶Ⅲ具有对位芳纶的高韧性、高强度、高模量等优点,是装备防护的理想材料,在装甲防护领域和轻量化方面具有更加较大的优势,但是由于芳纶Ⅲ纺丝难度大、纺丝效率低,导致芳纶Ⅲ目前产业化程度低,整体价格较高,仅仅应用在一些特定高端领域;聚对苯撑苯并二恶唑(PBO)纤维作为新一代特种超级纤维,具有比强度高、比模量大、氧指数高等优异性能,但是其价格较高,并且在光照和湿热条件下性能下降快,使得PBO目前在装甲车辆防护中没有大规模应用;对位芳纶纤维由于具有高强、高模、高韧、氧指数较高以及价格适中等优异性能而被广泛应用在装甲车辆防护产品中。

目前国内外学者针对对位芳纶纤维增强复合材料抗弹性能已经展开了大量深入研究,并得到了广泛的应用,此外装甲车辆基体甲板一般由重金属

元素组成,具有良好的 γ 射线屏蔽能力,但是防中子性能较弱。Cai等^[7]采用MCNP程序,模拟计算了不同复合结构材料的屏蔽性能并对其进行了比较,研究结果得出,多层复合材料比单层材料和单一元素材料在屏蔽性能方面表现出更优的价值。此外Zhang等^[8]进一步验证了多层复合材料的屏蔽效果,得出随着层数的增加,复合材料引起的二次辐射效应减弱。另外,为改善复合材料对中子的辐射屏蔽效果,该作者通过多层共挤压技术制备了含有多层结构的交错复合材料,并与常规的复合材料进行对比,发现这种交错复合结构材料,在提高粒子碰撞概率方面具有明显优势,极大提高了对中子的辐射屏蔽率^[9]。鉴于芳纶纤维含有大量的氢元素且聚氨酯在具有较强抗辐射能力同时其部分原料可以循环使用,Derradji等^[10]利用聚氨酯和芳纶纤维制备了一种多层交替复合结构材料,该材料可以保证由其制备的防护衬层具有良好的防中子辐射性能。

MCNP软件是一款通用的蒙特卡罗模拟程序软件,其主要可以用于模拟粒子传输并对粒子与物质相互作用进行计算,该软件模拟计算不同材料的辐射屏蔽具有较高的准确性,无须考虑实验带来的危险且不需要昂贵的辐射源。MCNP软件在辐射屏蔽方面应用极广,其中子源强度的设定可以小到 10^{-11} MeV,在 γ 射线源方面,最低能量设定不能低于1 keV,能量最高值能设置到1 GeV。真实的实物都是三维实体空间结构,需要设计每个面的数学计算方程,再用布尔运算交、并、补的方式将方程用来围成空间立体几何模型,所以不管多么复杂的屏蔽体,都可以通过布尔运算将屏蔽体通过各个面组合起来。此外该软件还有几何图形绘制模块,程序运算之前,可通过该模块来检查模型的准确性,提高运行效率。MCNP软件中放射源的表达方式有很多,可以根据需要设计点源、线源、面源和体源等能量源,源的位置和强度值也可以用多种函数来设定。同时针对粒子的探测,MCNP软件有多种设定方法,其中 γ 射线有6种计数卡,中子有7种,粒子数量统计的结果都能被MCNP软件归一化。

笔者基于蒙特卡罗方法研究不同成型压力、厚度以及不同树脂含量下芳纶纤维增强抗弹复合材料的中子射线屏蔽性能,并建立相应的辐射仿真模型,从而为后续开发具有防辐射性能的多功能防护产品提供借鉴。

1 复合材料辐射屏蔽蒙特卡洛计算

1.1 辐射屏蔽机理

中子由于不带电荷,它就不会与质子和电子生成的电场发生作用,所以中子会就有一定概率直接与原子核发生碰撞反应。中子和原子核碰撞作用一开始主要是散射,当中子能量降到一定低值时,会和原子核发生中和反应,沉积在材料中^[11-13]。辐射屏蔽机理示意图如图1所示,一部分中子与屏蔽粒子碰撞被直接散射出去,再一部分中子因吸收或其他作用沉积在材料中,还有一部分中子穿透屏蔽材料。

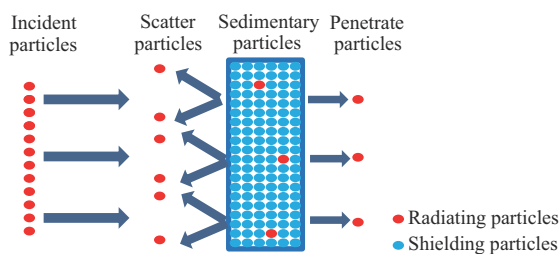


图1 辐射屏蔽机理

Fig. 1 Radiation shielding mechanism

中子反应截面是描述中子与屏蔽材料粒子元素反应概率的物理量,其数值常用单位为靶恩,简称为靶,记为 b 。中子反应截面的数值与入射中子能量、屏蔽元素种类以及碰撞角度等有关。中子反应截面表示为式(1)。

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

式中: I 为入射中子数; I_0 为穿透中子数; N_s 为屏蔽粒子数; σ 为中子反应截面。

1.2 模型建立

利用MCNP程序构建辐射屏蔽模型,主要包含中子源的设置、复合材料模型搭建以及探测器的设置三部分,如图2所示。

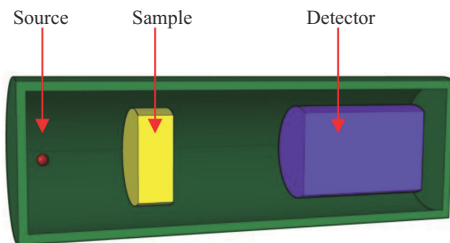


图2 辐射屏蔽计算模型

Fig. 2 Model of radiation shielding calculation

1.3 粒子源设置

设置粒子源为点源形式,垂直入射材料样品表面。中子通常根据能量划分成3个区间:快中子

(0.1~10 MeV)、中能中子(1 keV~0.1 MeV)和慢中子(0.025 3 eV~1 keV,其中热中子能量为0.025 3 eV)。为了研究复合材料对不同能量等级中子射线的辐射屏蔽效果,分别设置1 MeV, 1 keV, 1 eV和0.025 3 eV 4种单能中子源。李昆伦等^[14]通过蒙特卡罗模拟与实验相结合方法研究聚甲基丙烯酸甲酯基复合材料的辐射屏蔽性,发现模拟的可靠程度随着粒子发射数量的增多而增大,发射粒子数达到 10^7 个时,模拟结果的误差率基本控制在5%以内。考虑到运算效率以及屏蔽计算结果的准确性,笔者设置的中子射线粒子数量为 10^7 个。

1.4 复合材料模型创建

采用的复合材料是由对位芳纶纤维和聚氨酯树脂组成,纤维与树脂层层铺设,最后通过热压工艺复合而成,如图3所示。选取面密度为410 g/cm²芳纶纤维织物与聚氨酯树脂为主要原材料,制备不同形式的芳纶纤维织物/聚氨酯预浸料,纤维和树脂材料中各原子数量的百分数见表1。

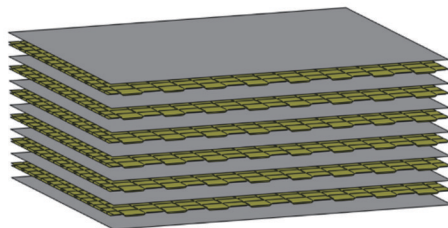


图3 复合材料模型

Fig. 3 Composite model

表1 纤维和树脂材料中各原子数量的百分数

Tab. 1 Percentage of each atomic quantity in fiber and resin materials

Material	Atomic species	Percentage of quantity/%
Para-aramid fiber	C	50.0
	H	35.7
	N	7.15
	O	7.15
Polyurethane	C	21.4
	H	57.15
	N	14.3
	O	7.15

1.5 探测器设置

探测器设置在复合材料后面用于计算穿过复合材料的粒子情况。探测器可以通过设计不同的计算卡来统计穿透屏蔽材料的粒子能量、位置和类型等信息,从而得出穿透粒子的能量强度和能量分布,最终得出该复合材料对不同射线粒子的辐射屏蔽效果。

2 结果与讨论

2.1 成型压力

在不同成型压力下,复合材料会呈现出不同厚度和密度,由于热中子能量低,屏蔽体对热中子的屏蔽效果最敏感。因此首先在聚氨酯树脂质量分数为20%以及相同复合材料质量的条件下,采用能量为0.025 3 eV,模拟计算该复合材料在不同成型压力下对热中子的辐射屏蔽率。以40层芳纶纤维布为模拟条件然后计算该复合材料在压力为0.5,1,1.5,2,2.5,3 MPa下对热中子的辐射屏蔽率,结果如图4所示。由于热中子能量低,复合材料对热中子的屏蔽效果比较显著,对热中子的辐射屏蔽率控制在91.14%左右。随着成型压力增加,复合材料对热中子的辐射屏蔽率几乎维持不变,最大误差小于0.1%,与实验误差5%相比基本可以忽略不计。因此,后续考虑其他因素对中子的屏蔽效果时,可以忽略成型压力的影响。

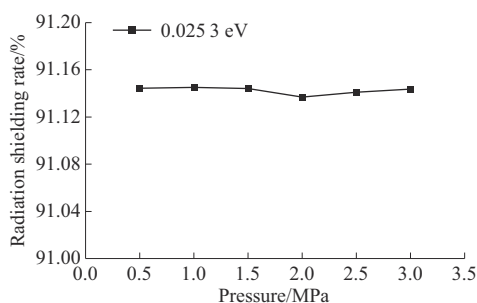


图4 不同成型压力下复合材料对热中子的辐射屏蔽率

Fig. 4 Radiation shielding rate of composite with different forming pressures on thermal neutrons

2.2 树脂含量

复合材料中的树脂基体可以传递应力,将冲击载荷均匀分散开,树脂基体与纤维增强材料的匹配性对复合材料的整体性能起到至关重要的作用^[15]。纤维抗弹复合材料中,树脂含量的改变会影响材料的整体破坏形式进而对抗弹性能产生较大的影响,其中热塑性树脂可以通过材料的变形来吸收大量的冲击能量,而热固性树脂通过刚度和强度来防御冲击破坏。树脂含量过低时,纤维之间无法黏接固定,会产生松散滑移进而出现间隙,层层破坏,降低了防弹性能^[16];树脂含量过高时,树脂基体容易内聚产生破坏,纤维会被过度约束,得不到应有的变形,从而严重削弱复合材料的性能。要想充分发挥树脂与纤维的共同作用,树脂基体与纤维要有相似的刚强度,能够做到同步伸长和断裂,才能得到理想

的复合材料防护性能。为了较全面研究树脂含量对各能量中子辐射屏蔽的影响,在保持纤维铺放层数为40层条件下,改变单层树脂含量,分别以能量为0.025 3 eV,1 eV,1 keV,1 MeV中子源为研究对象,模拟计算树脂质量分数为10%,12%,14%,16%,18%,20%时,该复合材料对不同能量中子的辐射屏蔽率,结果如图5所示。由图5看出,中子能量强度越大,对应复合材料辐射屏蔽率越低。复合材料对热中子的辐射屏蔽率最大,中能中子次之,快中子最小。在中子源能量强度相同的情况下,复合材料辐射屏蔽率随着树脂含量的增加而线性增大,且增大幅度基本相同。当中子源能量强度为1 MeV(快中子)、树脂质量分数为10%时,复合材料的辐射屏蔽率约为37%,当树脂质量分数增加到20%时,辐射屏蔽率达到42%。当中子源能量强度在1 eV~1 keV(中能中子)区间时,相同树脂含量下复合材料屏蔽率相差很小,且树脂质量分数为10%时,复合材料的辐射屏蔽率约为76%,当树脂质量分数增加到20%时,辐射屏蔽率达到83%。当中子源能量强度为0.025 3 eV(热中子)、树脂质量分数为10%时,复合材料的辐射屏蔽率约为86%,当树脂质量分数增加到20%时,辐射屏蔽率达到91%。因此,在满足碎片防护以及其他功能的条件下,尽可能提高树脂含量来增大复合材料对各个能量中子的辐射屏蔽率。但是该复合材料对快中子总体屏蔽率比较低,为了实现有效防护需要采取额外的措施。

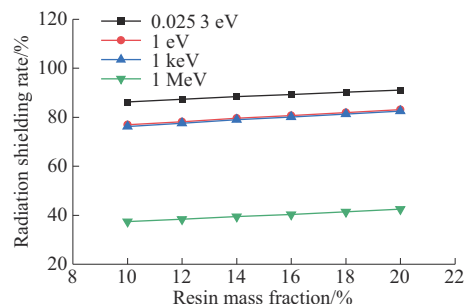


图5 不同树脂含量的复合材料对不同能量中子的辐射屏蔽率

Fig. 5 Radiation shielding rate of composite with different resin contents on different energy neutrons

2.3 厚度

保持纤维单层厚度为0.2 mm以及聚氨酯树脂质量分数为20%条件下,分别以能量为0.025 3 eV,1 eV,1 keV,1 MeV中子源为研究对象,模拟计算复合材料厚度为5,8,11,14,17,20 mm时该复合材料

对不同能量中子的辐射屏蔽率,结果如图6所示。由图6可以看出,中子能量强度越大,对应复合材料辐射屏蔽率越低。复合材料对热中子的屏蔽率最大,中能中子次之,快中子最小。当中子源能量强度为1 MeV (快中子)时,复合材料辐射屏蔽率随着厚度的增加线性增大;当复合材料厚度为5 mm时,辐射屏蔽率约为13%,复合材料厚度为20 mm时,辐射屏蔽率约为42%。当中子源能量强度在1 eV~1 keV (中能中子)区间时,不同厚度下复合材料屏蔽率相差很小,随着厚度的增加辐射屏蔽率非线性增大且增大幅度逐渐降低;当复合材料厚度为5 mm时,复合材料的辐射屏蔽率约为36%,复合材料厚度为20 mm时,复合材料的辐射屏蔽率约为83%。因此,在满足质量和厚度条件下,对于快中子辐射防护方面可以通过不断增加复合材料厚度来提高复合材料屏蔽率。对于中能中子和热中子辐射防护,当复合材料厚度到达一定值时,其屏蔽率趋于较低水平,再增加厚度对屏蔽率的贡献不大。

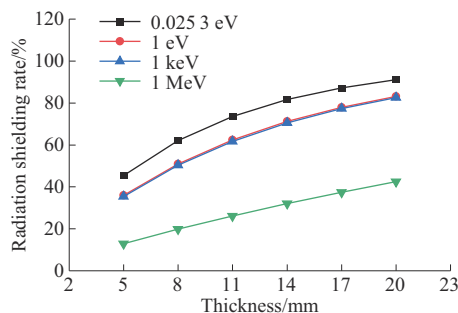


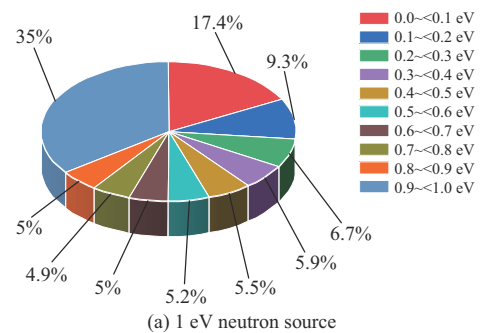
图6 不同厚度复合材料对不同能量中子的辐射屏蔽率

Fig. 6 Radiation shielding rate of composite with different thickness on different energy neutrons

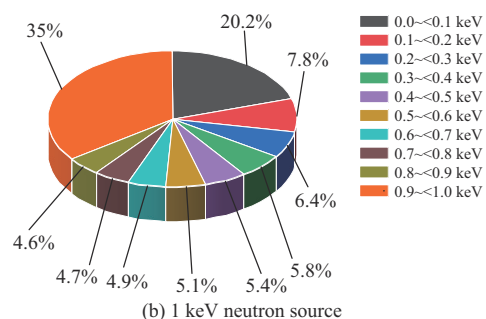
2.4 穿透中子能量分析

由于中子与屏蔽材料粒子经过数次碰撞后,能量会发生不同程度衰减,为了进一步摸清中子辐射屏蔽规律以及后续实施针对性屏蔽方案,同样以能量为1 eV,1 keV,1 MeV中子源为研究对象,对通过厚度为20 mm、聚氨酯树脂质量分数为20%的复合材料的中子能量进行模拟计算,统计分析各个区间穿透中子能量分布,结果如图7所示。中子源能量强度为1 eV和1 keV时,穿透中子中有65%的中子

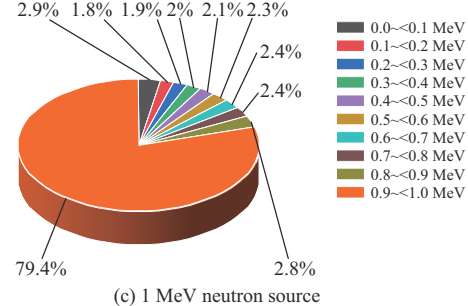
能量低于0.9 eV和0.9 keV,表明复合材料对该能量区间中子具有较高的慢化效应。其中对1 eV中子源的屏蔽中,17.4%穿透中子能量低于0.1 eV,中子源能量强度为1 keV时,穿透中子中有20.2%的中子能量低于0.1 keV。而当中子源能量强度为1 MeV时,穿透中子中仅有20.6%的中子能量低于0.9 MeV并且仅有2.9%穿透中子能量低于0.1 MeV,表明该复合材料对1 MeV能量快中子慢化效应相对较小。



(a) 1 eV neutron source



(b) 1 keV neutron source



(c) 1 MeV neutron source

图7 不同能量中子源下穿透复合材料后的中子能量分布对比

Fig. 7 Comparison of energy distribution of neutrons after penetrating composite under different energy neutron sources

3 结论

(1)以聚氨酯树脂质量分数为20%以及厚度为20 mm的芳纶纤维增强聚氨酯基复合材料为研究对象,模拟得出在不同成型压力下,该复合材料对热中子的总体屏蔽效果影响很小,最大误差小于0.1%,基本可以忽略不计。

(2)随着聚氨酯树脂含量的增加,该复合材料对

各能量中子的辐射屏蔽率线性增加,且增加幅度基本一致。其中对0.025 3 eV中子(热中子)整体辐射屏蔽率最大,1 eV~1 keV中子(中能中子)次之,1 MeV中子(快中子)最小。

(3)随着厚度的增加,该复合材料对各能量中子的屏蔽率相应增大,但增加幅度趋势不同。其中对0.025 3 eV中子(热中子)和1 eV~1 keV中子(中能中子)辐射屏蔽影响效果显著且前期增加幅度大,最后趋于平缓,对1 MeV中子(快中子)辐射屏蔽率较低且成线性增大。

(4)最后对穿透中子进行分析,得出该复合材料对1 eV中子(慢中子)和1 keV中子(中能中子)的慢化效应较高,穿透中子中分别有65%的中子能量低于0.9 eV和0.9 keV,对1 MeV中子(快中子)的慢化效应较低,穿透中子中仅有20.6%的中子能量低于0.9 MeV。

参考文献

- [1] 蓝肖颖. 含能破片毁伤效应研究现状[J]. 飞航导弹, 2020(11): 90-94.
LAN Xiaoying. Research status of damage effect of energetic fragments[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(11):90-94.
- [2] 王丹, 姬建荣, 孔霖, 等. 实战中爆破弹药攻击目标毁伤威力准确评估[J]. 计算机仿真, 2018, 35(5):31-34.
WANG Dan, JI Jianrong, KONG Lin, et al. Accurate evaluation of explosive ammunition attacking target in actual combat[J]. Computer Simulation, 2018, 35(5):31-34.
- [3] 陈东, 包睿, 李鹏. 装甲防护衬层及相关材料研究进展[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7):9-16.
CHEN Dong, BAO Rui, LI Peng. Research progress of armored lining and materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7):9-16.
- [4] 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.
- [5] HE L, CAI Y J, LI Q. 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.
- [6] 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.
- [7] CAI Yao, HU Huasi, PAN Ziheng, 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.
- [8] ZHANG Xianlong, YANG Mingtao, ZHANG Xiaomeng, et al. Enhancing the neutron shielding ability of polyethylene composites with all alternating multi-layered structure[J]. Composites Science and Technology, 2017, 150:16-23.
- [9] ZHANG Xianlong, XU Yang, ZHANG Xuan, et al. Progress on the layer by layer assembly of multilayered polymer composites: Strategy, structural control and applications[J]. Progress in Polymer Science, 2019, 89:76-107.
- [10] DERRADJI M, MEHELLI O, BELGACEMI R, et al. High performance dual ballistic and thermal neutrons shields from kevlar fibers reinforced epoxy/B₄C hybrid composites[J]. Frontiers in Physics, 2022, 10. DOI:10.3389/fphy.2022.740673.
- [11] ZHANG Ling, SHI Jianmin, SHEN Chunlei, et al. B₄C-Al composites fabricated by the powder metallurgy process[J]. Applied Sciences, 2017, 7(10):1 009-1 017.
- [12] 周斌, 于全芝, 胡志良, 等. 高能质子在散裂靶中的能量沉积计算与实验验证[J]. 物理学报, 2021, 70(5):89-95.
ZHOU Bin, YU Quanzhi, HU Zhiliang, et al. Calculation and verification for energetic proton energy deposition in spallation target[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(5):89-95.
- [13] 廖益传. 基于组合填料的射线防护柔性复合材料的制备和性能研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.
LIAO Yichuan. Preparation and properties of flexible ray-protection composites based on composite fillers[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2018.
- [14] 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.
- [15] KARTIKEYA K, CHOUHAN H, AHMED A, et al. Determination of tensile strength of UHMWPE fiber-reinforced polymer composites[J]. Polymer Testing, 2020, 82. DOI: 10.1016/j. polymertesting.2019.106293.
- [16] LANGSTON T. An analytical model for the ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene composites[J]. Composite Structure, 2017, 179(7):245-257.