

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.011

含硼聚乙烯复合材料构型对中子屏蔽性能的影响

焦力敏, 王智鹏, 高旭东, 张沛东, 孙谦, 陈磊, 王长武, 庄大杰

(中国辐射防护研究院, 太原 030006)

摘要: 针对传统屏蔽材料体积和质量较大导致放射性物质运输成本高、运输效率低的问题, 基于中子与物质相互作用的机理和梯度材料的设计理念, 构建了以聚乙烯为基体, 碳化硼为填料的梯度复合材料, 提高了复合材料的屏蔽性能。通过 TopMC 软件计算了穿透不同构型、不同厚度以及不同填料含量的材料的中子注量, 并从中子能量分布的角度探讨了梯度构型对屏蔽性能的增强机制。计算结果表明, 相比均匀构型和多层构型的复合材料, 采用梯度构型的屏蔽材料具有更好的屏蔽能力, 梯度构型复合材料的屏蔽增强率达 9.39%, 并且穿透中子的能量分布结果显示梯度材料显著降低了能量在 0.5~<300 eV 的中子的穿透性, 更大程度地发挥了填料的作用。随着材料厚度的增加, 屏蔽性能逐渐增强, 穿透 12 cm 厚材料的中子注量是穿透 6 cm 厚材料的 15%, 并且在一定厚度范围内, 厚度和材料构型具有协同作用。此外, 硼含量对屏蔽性能的增强存在阈值, 10.5% 质量分数的硼可兼顾材料的成本与性能。该研究为放射性物质运输领域轻量化、高效能中子屏蔽材料的设计与优化提供了参考。

关键词: 运输容器; 乏燃料; 中子屏蔽; 含硼聚乙烯; 复合材料; 梯度材料; 模拟计算

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0069-06

Effect of boron-containing polyethylene composites configurations on neutron shielding performance

JIAO Limin, WANG Zhipeng, GAO Xudong, ZHNAG Peidong, SUN Qian, CHEN Lei, WANG Changwu, ZHUANG Dajie

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

Abstract : To address problems of high transportation costs and low efficiency for radioactive materials caused by large volume and heavy weight of traditional shielding materials, a gradient shielding composite with polyethylene as matrix and boron carbide as filler was constructed based on mechanism of neutron-matter interaction and design concept of gradient materials, which improves shielding performance of composite. TopMC software was used to calculate neutron fluence penetrating materials with different configurations, thicknesses, and filler contents, and enhancement mechanism of gradient configuration on shielding performance was discussed from perspective of neutron energy distribution. The calculation results show that compared with uniform configuration and multi-layer configuration composite materials, shielding material with the gradient configuration has better shielding ability, with shielding enhancement rate of gradient configuration composite reaching 9.39%. Moreover, energy distribution results of penetrating neutrons indicate that gradient material significantly reduces penetrability of neutrons with energies ranging from 0.5 eV to 300 eV(excluding 300 eV), giving full play to role of filler. As material thickness increases, shielding performance gradually improves. Neutron fluence penetrating 12 cm material is 15% of that penetrating 6 cm thick material, and within a certain thickness range, thickness and material configuration have a synergistic effect. In addition, there is a threshold for enhancement of shielding performance by boron content, and a boron content of 10.5 wt% can balance cost and performance of material. This study provides a reference for design and optimization of lightweight, high-efficiency neutron shielding materials in field of radioactive material transportation.

Keywords : transportation container ; spent fuel ; neutron shielding ; boron-containing polyethylene ; composites ; gradient materials ; simulation calculation

基金项目: 中国辐射防护研究院青年基金项目

通信作者: 焦力敏, 博士, 助理研究员, 研究方向为放射性物质运输容器屏蔽材料

收稿日期: 2025-04-09

引用格式: 焦力敏, 王智鹏, 高旭东, 等. 含硼聚乙烯复合材料构型对中子屏蔽性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 69-74.

JIAO Limin, WANG Zhipeng, GAO Xudong, et al. Effect of boron-containing polyethylene composites configurations on neutron shielding performance[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 69-74.

随着我国核电产业的快速发展,核电站产生了大量乏燃料。乏燃料具有极强的放射性,会释放大量中子和伽马射线,对人类和环境有害。这些乏燃料必须通过运输容器外运到处理处置场地,根据我国法规及国际原子能机构(IAEA)制定的安全标准,运输放射性物质的系统均需配备屏蔽材料,该材料置于辐射源与人或环境之间,可实现控制危害、事故预防并减轻电离辐射造成的有害后果^[1]。

为确保安全,乏燃料运输容器需具备可靠的屏蔽结构。当前,乏燃料运输容器外壳厚度达12~38 cm,由多层钢、混凝土、铅、硼化聚合物等材料组成,导致运输容器极为笨重。公路运输的乏燃料集装箱满载重量可达25 t,其中乏燃料仅占0.5~2.2 t^[2];铁路运输的集装箱满载重量更是高达150 t。这种现状不仅限制了单次运输量,还增加了运输成本和安全风险,因此优化乏燃料运输容器的屏蔽材料至关重要。

在中子屏蔽领域,科研人员一直致力于寻找更高效的材料和结构。中子屏蔽主要包含两个物理过程:慢化与吸收。中子首先与含氢量高的材料发生弹性碰撞,降低能量,随后被中子吸收截面大的材料俘获吸收。传统的均匀屏蔽材料在应对复杂的辐射环境时,难以充分发挥填料的性能优势^[3]。

近年来,梯度材料因其独特的性能受到广泛关注。梯度材料是成分随尺寸渐变的新材料,其性能优化源于精妙的梯度结构设计。例如自然界中竹子、木材和甲壳等生物材料,通过4~7级梯度结构组合,展现出优异的力学性能^[4-6]。在工程领域,梯度材料已在电磁屏蔽、力学性能增强、热性能提升等方面得到应用^[7-10]。在核辐射屏蔽方面,Fan等^[11]通过模拟提出层状金属复合材料可以有效屏蔽高能辐射,与相同面密度的单一屏蔽材料相比,多层材料可将辐射剂量率降低60%以上。Park等^[12]通过压缩成型制备了碳化硼(B_4C)-铝- B_4C 三层结构的复合材料。结果表明, B_4C 颗粒均匀地分散在铝基体中,无明显的缺陷和孔隙,并且具有优异的中子屏蔽能力。对于厚度为3 mm, B_4C 质量分数为40%的铝基复合材料,几乎所有(99.2%)的中子被复合材料所吸收。国内四川大学的张先龙课题组也对多层屏蔽材料进行了研究^[13-14]。他们设计了氮化硼(BN)粒子在高密度聚乙烯(PE-HD)中的3种分布方式:随机、定向和周期性。研究表明,随着多层复合材料

层数的增加,中子屏蔽效率迅速提高,与BN粒子的随机分布相比,多层结构有助于减少中子的穿透性,并提高线性和质量衰减系数。在此基础上,他们还通过分层共挤出系统制备了交替多层复合材料:第一层为BN/PE-HD,第二层为硫酸钡($BaSO_4$)/PE-HD,第三层为BN/PE-HD。这样的结构不仅可以入射中子慢化吸收,还可以有效减弱中子引起的二次辐射。与交替多层PE-HD/(BN/PE-HD)复合材料相比,交替多层(BN/PE-HD)/($BaSO_4$ /PE-HD)具有更高的线性衰减系数和质量衰减系数。

Ahmad等^[15]将遗传算法与SuperMC软件结合,设计了基于聚乙烯(PE)、钨(W)和 B_4C 的一种用于核辐射屏蔽的梯度复合材料。研究表明,该梯度材料在150 cm的厚度下,通过探测器的总剂量比均匀材料低约1250%,显示出更好的屏蔽性能。该梯度复合屏蔽材料对于移动式紧凑核应用中的屏蔽具有重要意义。Hu等^[16]开发了一种用于屏蔽中子和伽马射线的梯度复合屏蔽材料,该材料由环氧树脂、 B_4C 、铅(Pb)和少量氧化石墨烯组成。并结合遗传算法和蒙特卡罗粒子传输设计了材料的层厚和组成,实验结果表明,梯度材料的屏蔽性能比均匀材料更有效。这些研究成果为梯度材料在乏燃料运输容器屏蔽领域的应用提供了参考。目前以PE为基材的梯度屏蔽材料的研究集中于小型堆的紧凑设计,其屏蔽层通常较厚(150 cm),而运输容器受限于体积质量,屏蔽层通常不超过20 cm,因此缺乏较小厚度下梯度屏蔽材料的屏蔽性能研究。

笔者基于射线与物质相互作用原理,将梯度材料概念引入容器的屏蔽材料设计,针对实际乏燃料组件中子能量范围宽的特点以及运输容器屏蔽层有限的限制条件,以含氢量高的PE为基材,系统探究了均匀、多层、梯度三种构型的屏蔽性能对容器屏蔽材料性能的影响,并通过穿透中子能量的计数分析,揭示了梯度屏蔽材料的增强机理,建立了适用于乏燃料运输容器的梯度屏蔽材料设计方法,为轻质、紧凑型运输容器屏蔽材料的开发提供坚实的理论基础。

1 屏蔽计算

1.1 中子屏蔽原理

中子是一种电中性粒子,质量比质子略大。由于在与物质粒子的碰撞过程中,中子不受原子核及核外电子静电力的作用,能够轻易地撞击原子核,

与原子核发生各种相互作用。材料对中子的屏蔽主要包括两个物理过程,即中子的散射和中子的吸收。快中子首先通过非弹性散射变为中能中子,中能中子通过与含氢量高的材料发生弹性散射进一步使能量降低,随后通过俘获反应被中子吸收截面大的材料吸收。PE-HD因其密度低且中子弹性散射截面大,是常用的慢化材料,适用于多种应用场景。此外,在低质量同位素中,硼-10 (^{10}B)在中子俘获方面表现尤为突出,它在天然硼中的占比为19.9%,热中子俘获截面可达3 800 靶恩^[17]。

1.2 屏蔽材料的构型

通常,屏蔽材料具有三种构型:单一均质材料、单一复合材料、多层材料。如前所述,单一均质材料所能发挥的作用有限,往往不是中子屏蔽材料的最优选择。因此,笔者着重研究单一复合材料、多层材料和梯度材料的屏蔽性能,材料构型示意图如图1所示,相应的描述如下。

构型 I:均匀复合材料,含硼聚乙烯($\text{B}_4\text{C-PE}$), B_4C 均匀分布在PE基质中;

构型 II:双层复合材料,从左到右为PE, $\text{B}_4\text{C-PE}$,其中 $\text{B}_4\text{C-PE}$ 中的 B_4C 含量与构型 I 相同;

构型 III:四层复合材料,从左到右为PE, $\text{B}_4\text{C-PE}$, PE, $\text{B}_4\text{C-PE}$,两层 $\text{B}_4\text{C-PE}$ 中的 B_4C 含量之和与构型 I 相同;

构型 IV:八层复合材料,从左到右为4组由PE, $\text{B}_4\text{C-PE}$ 组成的重复单元, $\text{B}_4\text{C-PE}$ 中的 B_4C 含量之和与构型 I 相同;

构型 V:梯度复合材料,从左到右为PE, B_4C 含量梯度增加的 $\text{B}_4\text{C-PE}$,梯度层数为6层, B_4C 含量之和与构型 I 相同。

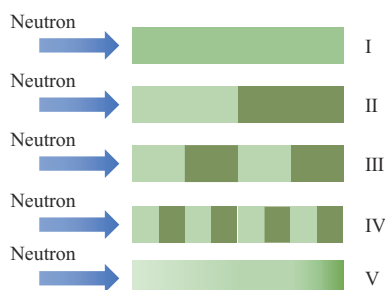


图1 屏蔽材料构型示意图

Fig. 1 Schematic of shielding material configuration

1.3 计算程序

屏蔽计算采用由凤麟核中科超安科技有限公司自主研发的“一体化核设计与安全评价软件系

统”(TopMC 软件)。该软件以中子及相关辐射输运计算为核心,支持包含核素燃耗、材料活化、辐射剂量等的全过程中子学计算。

1.4 计算模型

乏燃料具有较强的伽马和中子放射性,因此运输容器结构通常采用钢-铅-钢-中子屏蔽体-钢的结构。笔者参考了德国设计的一款用于运输乏燃料棒的容器(NCS 45)的结构,容器内腔直径为220 mm,铅屏蔽层厚度为195 mm,不锈钢厚度为25 mm。由于该运输容器仅对伽马射线进行了独特设计,未对中子进行专门的屏蔽设计,而笔者的研究对象主要为中子屏蔽体,因此在该设计的基础上在容器外部额外设置了厚度为60 mm的 $\text{B}_4\text{C-PE}$ 中子屏蔽体,根据几何尺寸参数,建立计算模型开展计算,计算模型示意图如图2所示。

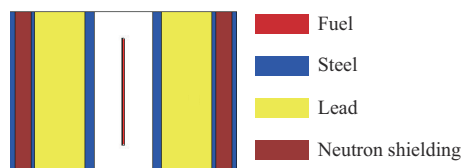


图2 计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of computational model

计算过程中所使用的 $\text{B}_4\text{C-PE}$ 材料参数来源于西安稀有金属材料研究院的产品,PE 材料参数则来源于中玺新材料(安徽)有限公司生产的M-IV牌号产品,具体材料参数详见表1。

表1 材料参数

Tab. 1 Parameters of materials

Materials	Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Mass fraction/%		
		H	C	B
PE	0.93	14.3	85.7	
$\text{B}_4\text{C-PE-5}$	1.00	13.4	81.6	5.0
$\text{B}_4\text{C-PE-10.5}$	1.05	12.3	77.2	10.5
$\text{B}_4\text{C-PE-14.7}$	1.09	11.5	73.8	14.7
$\text{B}_4\text{C-PE-19.8}$	1.18	10.4	69.8	19.8

计算采用的中子源项信息为:燃料棒中 ^{235}U 的初始富集度为3%(质量分数),燃耗深度为57 $\text{GW}\cdot\text{d/tU}$,冷却时间为半年。在容器外表面设置了环探测器用于计算穿过容器屏蔽体的粒子情况,模拟输运粒子数为 2×10^7 个。按照中子能量的不同对中子进行分类(5个区间),能量在0.025 eV以下的为冷中子,能量在0.025~<0.5 eV范围内的为超热中子,能量在0.5~<10 eV范围内的为超镉中子,能量在10~<300 eV范围内的为共振中子,能量在300 eV~<1 MeV范围内的为中能中子,能量在1~20

MeV范围内的为快中子。并分别统计了中子在不同能量区间的计数。

为了使数据具有可对比性,模拟计算工作采用增强率(R_E)来表征不同构型对材料中子屏蔽性能的影响。屏蔽层采用均匀复合材料时,探测器的中子注量为 I_0 ,屏蔽层采用其他构型的屏蔽材料后的探测器中子注量为 I ,增强率计算见式(1)。

$$R_E = \frac{I_0 - I}{I_0} \times 100\% \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 屏蔽构型

乏燃料释放的中子穿透容器结构后,其中子注量会发生显著改变。首先计算了无中子屏蔽材料、纯PE作为中子屏蔽材料,以及硼质量分数为10.5%的 B_4C -PE作为中子屏蔽材料时,容器表面的中子注量,计算结果如图3a所示。结果表明,在容器中设置PE屏蔽层可以显著降低中子注量,屏蔽后的中子注量约为无屏蔽状态的1/3。向PE中添加 B_4C 后中子注量进一步降低,约为未屏蔽的1/5。对穿透后不同能量的中子数量进行统计,结果如图3b所示,PE和 B_4C -PE极大程度地降低了能量超过300 eV的中

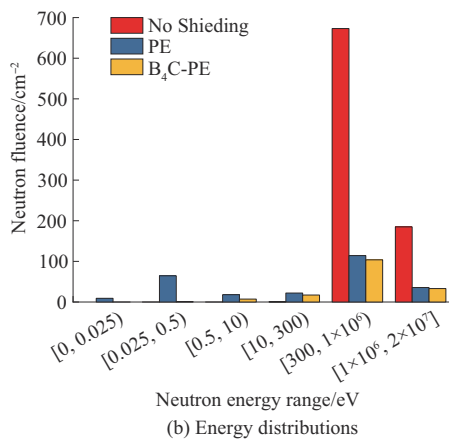
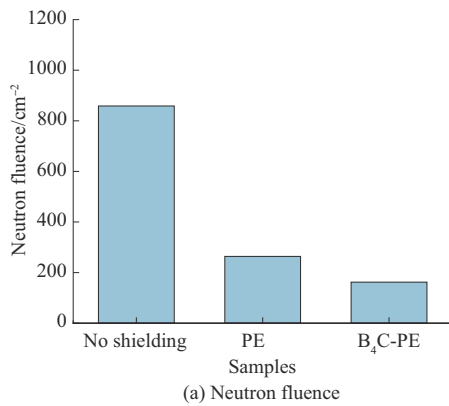


图3 不同材料的屏蔽性能

Fig. 3 Shielding properties of different materials

子数量。对于 B_4C -PE来说,由于硼元素对中子的强吸收作用,能量处于0.025~<0.5 eV区间的中子数比添加PE的更低。

随后在硼质量分数为10.5%的条件下,对1.2部分提到的5种屏蔽材料构型进行了屏蔽计算,结果如图4所示。从图4a可以看出,构型V即梯度屏蔽材料显示出了更优异的屏蔽性能, R_E 达到9.39%。从图4b可以看出,相比其他构型,梯度复合材料有助于减少能量在0.5~<300 eV的中子的穿透性,进而提高材料的屏蔽性能。在中子刚进入材料时,能量较高,主要为快中子,此时需要PE对快中子进行充分的慢化。随着中子沿厚度方向穿透,热中子的比例逐渐增加,快中子的比例逐渐减少,此时材料中的具有吸收中子功能的硼元素开始发挥作用,沿着中子穿透方向硼元素含量逐渐增加,可以达到充分吸收中子的作用。而将复合材料分为双层后,材料的屏蔽性能也有一定的提高, R_E 为5.79%。并且,结合图4b中的对不同能量中子分布的分析可知,将均匀的复合材料分为PE/ B_4C -PE的双层组合后,能

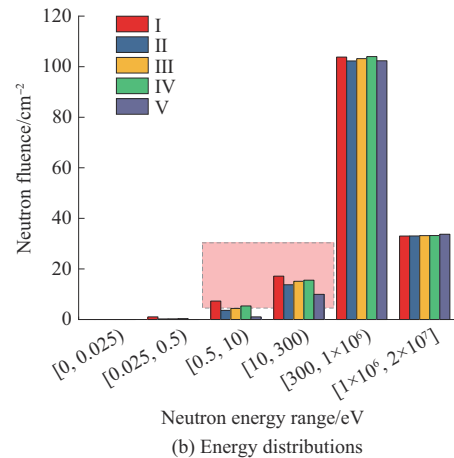
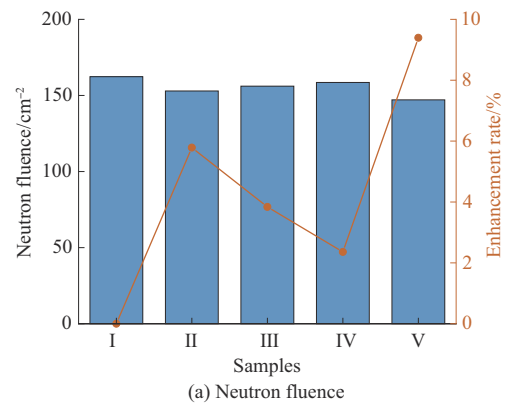


图4 不同构型屏蔽材料的屏蔽性能

Fig. 4 Shielding properties of shielding materials with different configurations

量在 $0.5\sim<300$ eV 的中子注量降低,表明分层后有利于硼元素对热中子的俘获。但是,进一步地增加分层数反而会使屏蔽性能有所下降。这可能是由于随着层数的增加,多层材料的构型向均匀材料靠拢,在中子刚进入材料内部时,其能量较高,而硼元素主要对热中子的俘获截面较高,因此部分硼元素尚未完全发挥出其吸收中子的能力。

2.2 屏蔽厚度

屏蔽材料的厚度会极大地影响材料的屏蔽性能,图5显示了硼质量分数为10.5%,不同厚度(6, 8, 10, 12 cm)的梯度复合材料的屏蔽性能。其中相对增强率定义为相同厚度下梯度复合材料的中子注量计数与均匀复合材料的中子注量计数的比值。由图5可知,随着厚度的增加,中子屏蔽性能随之增加,穿透12 cm厚材料的中子注量是穿透6 cm厚材料的15%,而相对增强率在厚度增加过程中先增加后降低,厚度为8 cm时相对增强率达到最大为11%,反映出在一定厚度范围内,屏蔽层厚度和材料构型具有协同作用,能够共同提高材料的屏蔽性能。在实际应用中可根据所需屏蔽效果来确定材料的厚度。

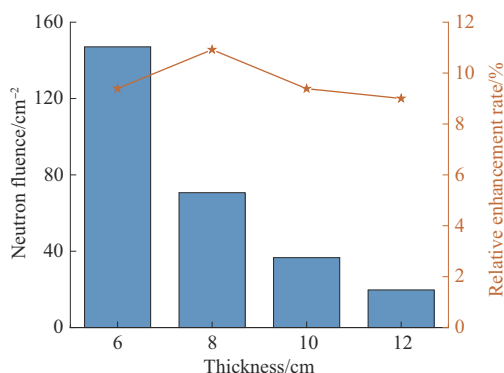


图5 不同厚度梯度复合材料的屏蔽性能

Fig. 5 Shielding properties of gradient configuration composite with different thicknesses

2.3 硼含量

填料硼的含量也是影响材料屏蔽性能的重要因素,图6呈现了硼质量分数对梯度复合材料中子注量的影响。由图6可知,当硼质量分数从5.0%增加到10.5%时,中子注量显示出一定的下降趋势,意味着材料的屏蔽性能有所提升;而当硼质量分数进一步增加到14.7%和19.8%时,中子注量基本没有发生变化,表明进一步增加硼质量分数对材料的屏蔽性能的提升没有显著效果。在成本方面,碳化硼填料价格约为基体材料的8~10倍,硼质量分数为

10.5%的复合材料既能保障屏蔽性能处于较高水平,又能有效控制材料成本。相较于硼质量分数为19.8%的材料,10.5%的材料成本降低约35%,同时屏蔽性能损失在可接受范围内。综合性能提升幅度与成本增量来看,10.5%的硼质量分数可实现材料成本与性能的较好平衡。

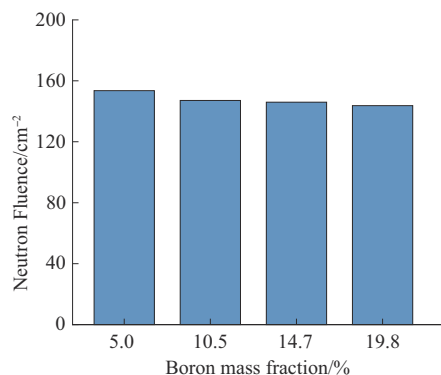


图6 不同硼含量梯度复合材料的屏蔽性能

Fig. 6 Shielding properties of gradient configuration composite with different boron contents

3 结论

(1)梯度构型能显著提升屏蔽材料的中子屏蔽性能,相对于均匀复合材料,梯度构型复合材料的屏蔽增强率达9.39%,且对 $0.5\sim<300$ eV中子的屏蔽效果提升尤为显著。分层设计也可提高材料屏蔽性能,但过多分层会因趋近均匀分布而削弱梯度优势,反导致屏蔽性能下降。

(2)屏蔽材料厚度增加可提升屏蔽性能,穿透12 cm厚材料的中子注量是穿透6 cm厚材料的15%,并且在一定厚度范围内,厚度和材料构型具有协同作用。实际应用中,需结合辐射场强度与空间限制动态选择厚度。

(3)10.5%的硼质量分数在保障中子慢化(依赖PE)与吸收(依赖B₄C)协同作用的同时,兼顾材料成本与加工可行性,可实现材料成本与性能的较好平衡。

参考文献

- [1] 李国强,孙谦,庄大杰,等.放射性物品运输包装容器安全试验简述[J].包装工程,2025,46(7):234-239.
LI Guoqiang, SUN Qian, ZHUANG Dajie, et al. Overview of safety test for radioactive materials transport packages[J]. Packaging Engineering, 2025, 46(7):234-239.
- [2] MOHAMMADI A, HASSANZADEH M, GHARIB M. Shielding calculation and criticality safety analysis of spent fuel transportation cask in research reactors[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2016, 108:129-132.

- [3] 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.
- [4] 徐文卓, 李文晓. 梯度聚合物泡沫材料制备方法研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6):176–181.
XU Wenzhuo, LI Wenxiao. Research progress in preparation methods for gradient polymer foams[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6):176–181.
- [5] 韩保红, 鲁明远, 赫万恒, 等. $TiB_2/42CrMo$ 连续梯度材料力学分析与结构设计[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(2):689–697.
HAN Baohong, LU Mingyuan, HE Wanheng, et al. Mechanical analysis and structure design of $TiB_2/42CrMo$ continuous gradient materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(2):689–697.
- [6] BAGHERI S, KHALAFI H. SMR, 3D source term simulation for exact shielding design based on genetic algorithm[J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, 191. DOI:10.1016/j.anucene.2023.109915.
- [7] 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.
- [8] 肖俊华, 万武举, 郭之熙, 等. 梯度双材料负泊松比蜂窝夹芯板局部冲击失效研究[J]. 复合材料学报, 2025, 42(3):1 689–1 699.
XIAO Junhua, WAN Wujun, GUO Zhixi, et al. Failure study of gradient bimaterial negative Poisson's ratio honeycomb sandwich panels subjected to local impact[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(3):1 689–1 699.
- [9] 高瑞泽, 王亚强, 张金钰, 等. 梯度结构金属材料的制备方法和力学性能研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(15):17–28.
GAO Ruize, WANG Yaqiang, ZHANG Jinyu, et al. Progress in the preparation methods and mechanical properties of gradient-structured metallic materials[J]. Materials Reports, 2024, 38(15):17–28.
- [10] 蔡艳芝, 王源, 成来飞, 等. CNT纸/SiC对称梯度层状复合材料的高温电磁屏蔽性能和介电性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(11):2 877–2 888.
CAI Yanzhi, WANG Yuan, CHENG Laifei, et al. High-temperature electromagnetic shielding and dielectric properties of CNT buckypaper/SiC symmetric graded laminated composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(11):2 877–2 888.
- [11] FAN W C, DRUMM C R, ROESKE S B, et al. Shielding considerations for satellite microelectronics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(6):2 790–2 796.
- [12] PARK J J, HONG S M, LEE M K, et al. Enhancement in the microstructure and neutron shielding efficiency of sandwich type of 6061Al - B_4C composite material via hot isostatic pressing[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 282:1–7.
- [13] ZHANG X, ZHANG X L, GUO S Y. Simple approach to developing high-efficiency neutron shielding composites[J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(s2):E348–E355.
- [14] ZHANG X L, YANG M T, ZHANG X M, et al. Enhancing the neutron shielding ability of polyethylene composites with an alternating multi-layered structure[J]. Composites Science and Technology, 2017, 150:16–23.
- [15] AHMAD S, CHANG B, LIAN C, et al. Design and development study of gradient composite shielding material for nuclear radiation[J]. Nuclear Engineering and Design, 2023, 414 . DOI: 10.1016/j.nucengdes.2023.112517.
- [16] HU G, SHI G, HU H S, et al. Development of gradient composite shielding material for shielding neutrons and gamma rays[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(10):2 387–2 393.
- [17] 焦力敏, 王智鹏, 孙谦, 等. 乏燃料运输和储存容器中子屏蔽材料应用及研究现状[J]. 包装工程, 2024, 45(11):266–274.
JIAO Limin, WANG Zhipeng, SUN Qian, et al. Application and research status of spent fuel transportation and storage cask neutron shielding materials[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(11):266–274.