

γ 射线屏蔽复合材料的研究进展与轻量化路径

周娜¹ 王倩文¹ 黄洪涛² 孙元杰² 李志刚¹ 田波^{1,2} 赵弘韬^{1,2}

¹(黑龙江省原子能研究院 哈尔滨 150081)

²(哈尔滨工程大学核科学与技术学院 哈尔滨 150001)

摘要 γ 射线屏蔽材料在核能、医疗和航空航天等领域具有重要的应用价值。传统铅基材料虽然具备优异的屏蔽性能,但其存在密度高、毒性和柔性不足等问题,限制了其在轻量化和绿色化中的应用。近年来,复合材料因其低密度、良好的可加工性以及性能可调控等特点,逐渐成为研究热点。本文系统综述了轻量化 γ 射线屏蔽复合材料的研究进展,从基体类型、填料尺寸和结构优化3个方面,总结了不同设计策略的特点与不足,并进一步探讨了阻燃、电磁屏蔽及绿色可持续性等多功能设计的新趋势。可见, γ 射线屏蔽复合材料轻量化设计已取得积极进展,但该类材料仍面临屏蔽效率与力学性能之间平衡不足、填料分散性差以及工程化应用受限等问题。未来研究应致力于多功能设计,推动绿色可持续方案的发展,并加强规模化制备技术的创新,从而为应对复杂辐射环境下的防护需求提供新思路。

关键词 γ 射线屏蔽, 复合材料, 轻量化, 多功能设计, 绿色可持续

中图分类号 TL7

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0077

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0077

引用该文:

周娜, 王倩文, 黄洪涛, 等. γ 射线屏蔽复合材料的研究进展与轻量化路径[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2026, 44(1): 010101. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0077.

ZHOU Na, WANG Qianwen, HUANG Hongtao, *et al.* Research progress and lightweight path of γ ray shielding composites[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2026, 44(1): 010101. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0077.



基金资助: 黑龙江省科学院人才队伍建设项目(RC2024YZN01)、黑龙江省省属院所科研业务费项目(CZKYF2025-1-B001)、黑龙江省重点研发计划项目(GA23A912)、黑龙江省科学院院预研配套项目(YYP2024YZN01)、黑龙江省科学院能力提升专项(YSTS2025YZN01)

第一作者: 周娜, 女, 2001年出生, 2023年于四川师范大学获得学士学位, E-mail: 13002859682@163.com.

通信作者: 田波, 博士, 副研究员, E-mail: tianbo_0627@163.com; 赵弘韬, 博士, 研究员, E-mail: zhaohongtao2019@163.com

收稿日期: 初稿 2025-09-01; 修回 2025-10-15

Supported by Talent Team Building Project of Heilongjiang Academy of Sciences (RC2024YZN01), Scientific Research Operating Expenses of Provincial Scientific Research Institutes of Heilongjiang Province (CZKYF2025-1-B001), Heilongjiang Provincial Key R&D Plan Project (GA23A912), Pre-research Supporting Project of Heilongjiang Academy of Sciences (YYP2024YZN01), and Special Project of Improving Ability of Heilongjiang Academy of Sciences (YSTS2025YZN01)

First author: ZHOU Na (female) was born in 2001, obtained her bachelor's degree from Sichuan Normal University in 2023, E-mail: 13002859682@163.com

Corresponding author: TIAN Bo, doctoral degree, associate researcher, E-mail: tianbo_0627@163.com; ZHAO Hongtao, doctoral degree, researcher, E-mail: zhaohongtao2019@163.com

Received 01 September 2025; accepted 15 October 2025

Research progress and lightweight path of γ ray shielding composites

ZHOU Na¹ WANG Qianwen¹ HUANG Hongtao² SUN Yuanjie² LI Zhigang¹

TIAN Bo^{1,2} ZHAO Hongtao^{1,2}

¹(Heilongjiang Institute of Atomic Energy, Harbin 150081, China)

²(College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

ABSTRACT γ ray shielding materials have important application value in fields such as nuclear energy, medical treatment, and aerospace. Although traditional lead-based materials exhibit excellent shielding performance, their high density, toxicity, and insufficient flexibility, which limits their application in lightweight and environmentally friendly designs. In recent years, composite materials have attracted growing research interest due to their low density, good processability, and tunable properties. This review systematically summarizes recent advances in lightweight γ ray shielding composites, with a focus on three key aspects: matrix types, filler size, and structural optimization. The characteristics and limitations of various design strategies were discussed, along with emerging trends in multifunctional designs such as flame retardancy, electromagnetic shielding, and green sustainability. Significant progress has been made in the lightweight design of γ ray shielding composites; however, challenges remain regarding the balance between shielding efficiency and mechanical properties, poor filler dispersion, and limitations in engineering applications. Future research should focus on integrated multifunctional design, promote the development of green and sustainable solutions, and advance scalable fabrication techniques, thereby providing new strategies for protection in complex radiation environments.

KEYWORDS γ ray shielding, Composite materials, Light weight, Multifunctional design, Green sustainability

CLC TL7

随着核工业的高速发展，高能射线在医学、工业和农业等领域的应用日益广泛，产生高能射线的设备数量也持续增加^[1]。当人类接触电离辐射的概率显著上升时，随之而来的射线泄漏会对人类造成严重的健康影响，增加皮肤烧伤、心血管疾病和癌症等风险^[2]。在各类电离辐射中， γ 射线通常具有最高的能量，因而对其有效屏蔽提出了更高要求。传统高密度屏蔽材料(如铅及铅基复合材料)虽具备良好的 γ 射线屏蔽能力^[3]，却因其重量过大、加工性能较差，严重限制了其在重量敏感型应用场景中的使用，包括航空航天设备、移动医疗装置以及应急防护装备等领域^[4]。随着全球核产业的持续扩张，太空探索活动的激增，以及公众对辐射防护意识的提升，传统屏蔽材料的“效率-重量”矛盾日益凸显。因此，开发兼具高效 γ 射线屏蔽能力与轻量化特性的新型屏蔽材料，成为降低辐射风险、保障人类健康、推动核产业可持续发展的迫切需求，也成为材料科学与辐射屏蔽领域的研究热点^[5-6]。

轻量化屏蔽材料不仅需要突破传统材料体系的性能瓶颈，更需通过多学科交叉融合。研究表

明，基体类型、填料的含量和尺寸以及结构设计等因素会影响材料的屏蔽性能和轻量化程度^[7-9]。 γ 射线屏蔽材料轻量化的设计具有以下几大优势：(1)降低材料的密度，减少材料的使用量，从而降低成本，便于运输和安装^[10-11]；(2)在保证屏蔽效果的同时，提高设备的便携性和灵活性，拓展其在不同领域的应用场景^[12]；(3)在航空航天等对重量敏感的场景中，可满足载重限制要求，同时保证 γ 射线屏蔽效果^[13]。凭借这些优势， γ 射线屏蔽材料轻量化的设计在对辐射屏蔽要求严格的众多领域中发挥着关键作用^[14-15]。鉴于此，本文从基体类型、填料尺寸和结构设计3方面探索了 γ 射线屏蔽材料轻量化的设计方法，旨在实现轻量化与屏蔽性能提升的双重突破，使其广泛应用于各个领域。

1 γ 射线屏蔽概述

随着航空航天、放射医疗、核能发电等核技术相关领域的迅速发展，人类在相关工作与活动环境中难以避免地暴露于多种形式的电离辐射中^[16]。目前，降低 γ 射线辐射污染的最有效手段是

使用 γ 射线屏蔽材料来实现电离辐射屏蔽^[17]。电离屏蔽是通过材料或技术手段减弱电离辐射的穿透能力,减少射线对周围测量或分析产生的不良影响^[18]。这一方法不仅有效消除了对周边环境的辐射污染和对人体健康的辐射威胁,还能够确保核领域设备免受外部因素干扰。

在 γ 射线屏蔽过程中, γ 光子与物质的相互作用主要包括光电效应、康普顿散射和电子对效应^[19-21](图1),其发生概率与 γ 射线能量和材料原

子序数(Z)密切相关^[22]。当 γ 射线能量低于100 keV时,光电效应占主导地位,且概率随原子序数的增加而显著提高;当能量处于0.1~10 MeV范围时,康普顿散射成为主要机制,其发生概率与原子序数近似成正比;当 γ 射线能量超过10 MeV时,高原子序数材料则更易发生电子对效应^[23]。通过合理选择和组合不同原子序数的基体与填料,可以有效调控上述作用机制^[24],从而提升 γ 射线的整体衰减能力。

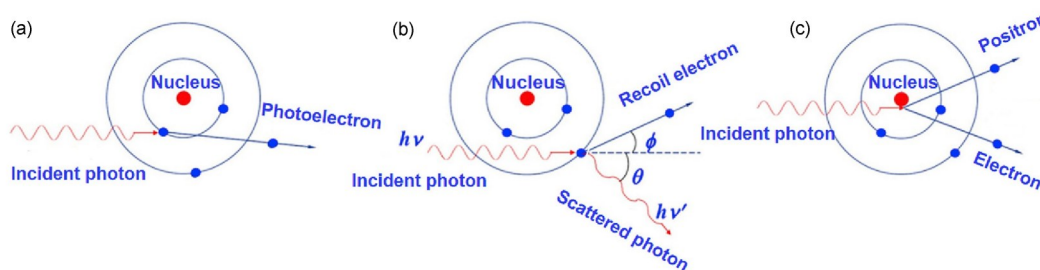


图1 光电效应(a)、康普顿散射(b)和电子对效应(c)的产生原理图^[23]
Fig.1 The schematic of photoelectric effect (a), Compton scattering (b), and electron pair (c)^[23]

近年来的研究进一步表明,这些相互作用机制在复合材料体系中表现出新的特征,例如高 Z 填料能够显著增强低能区的光电效应^[25],低 Z 基体则通过调控散射路径影响康普顿散射的贡献^[26],多层或多孔结构可通过界面作用提高 γ 光子的多重散射概率^[27]。此外,有效原子序数与能谱分布之间的相互关系已被证明是预测屏蔽性能的重要依据,纳米填料与复杂界面结构还会改变次级电子的迁移和能量沉积分布,从而实现比传统单相材料更优的屏蔽效果。这些进展为理解 γ 射线与物质的相互作用提供了更深层次的认知,也为轻量化屏蔽材料的设计提供了新的思路。

2 轻量化 γ 射线屏蔽复合材料的设计策略

2.1 金属、陶瓷与聚合物基体的比较与选择

在 γ 射线屏蔽材料轻量化的探索中,基体材料的选择构成了研究体系的框架,金属基、陶瓷基和聚合物基是三类重要的基体。不同类型的基体在密度、加工性和结构稳定性上差异显著,直接决定了复合材料在轻量化与屏蔽效率之间的平衡。例如,金属基体^[28]具有高屏蔽效能但重量大,陶瓷基体^[29]兼顾较低密度与耐高温性能,而聚合物基体^[30]则凭借低密度和柔性成为轻量化设计的核心选择。

金属基材料因其高密度而具备优异的屏蔽能力,但重量大、刚性高。研究者尝试通过合金化在屏蔽效能与轻量化之间寻找平衡^[31-32]。Sathish等^[33]系统比较了二元、三元和四元合金的 γ 射线及中子屏蔽性能,结果表明,钨铅合金具有最大的质量衰减系数和有效原子序数,同时展现出较高的辐射屏蔽效率,其中子总相互作用截面和吸收截面也远高于其他合金,说明其在双重辐射防护中表现突出,这类合金为金属基屏蔽材料的优化提供了方向,但其较高的密度仍限制了在轻量化应用中的推广。

陶瓷基材料凭借高硬度、耐高温和中等密度的特点^[34],成为轻量化屏蔽的重要选择。Hannachi等^[35]制备了不同含量(质量分数0%~10%)PbO的钆基陶瓷($GdBa_2Cu_3O_y$),结果显示,陶瓷密度随PbO含量由4.42 g/cm³提高至4.72 g/cm³,同时,辐射屏蔽性能明显增强,证明了在陶瓷体系中引入高 Z 组分能够有效提升其防护性能。这类陶瓷不仅满足核工业对高温和辐射环境的要求,还展现出较好的轻量化潜力。

聚合物基复合材料因密度低(通常<2 g/cm³)、加工性优良和柔性突出而备受关注^[36]。El-Mesady等^[37]在高密度聚乙烯(HDPE)中加入质量分数为0%~20%的玄武岩粉末,图2结果表明,复合材料的纵向模量、剪切模量、体积模量和杨氏模量均

随填料浓度增加而显著提升；同时样品的质量衰减系数在低-中能区整体提高，其中HDPE-B20样品表现出最小的半值层，在低密度条件下实现了优异的 γ 射线屏蔽性能。这一研究说明天然矿物填料在改善力学性能的同时，还能赋予聚合物复合材料良好的辐射防护能力，为可加工、可穿戴的轻量化材料提供了新的选择。

金属基复合材料以金属为基体，通常表现出良好的导电性、导热性和较高的机械强度，能够承受较大外力，但其密度偏高，在一定程度上限

制了其在轻量化辐射屏蔽中的应用。陶瓷基复合材料以陶瓷为基体，具有高硬度、耐高温和优异的化学稳定性，能够有效屏蔽 γ 射线，同时其密度相对较低，更符合轻量化设计要求。聚合物基复合材料以聚合物为连续相，具备极低的密度和灵活的成型工艺，适用于复杂结构件，然而其本身对 γ 射线的屏蔽能力较弱，通常需引入高Z填料以提升防护性能。通过合理配方设计，聚合物基复合材料有望在轻量化 γ 射线屏蔽材料中发挥重要作用。

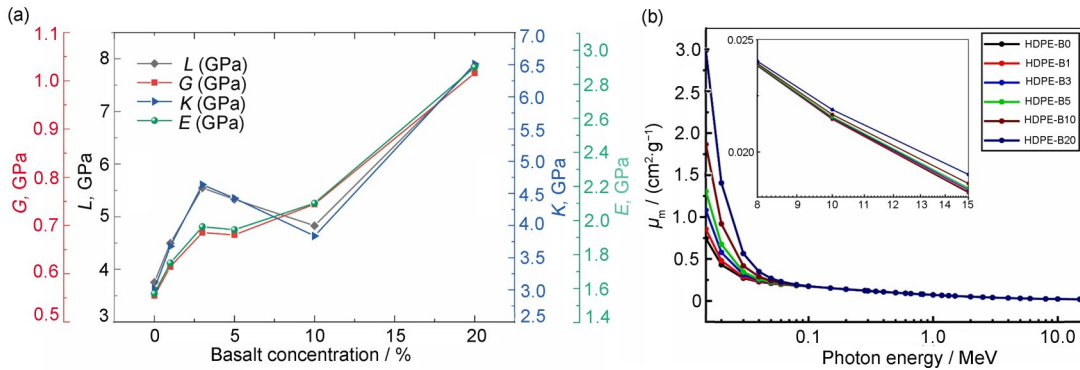


图2 (a)纵向模量(L)、剪切模量(G)、体积模量(K)、杨氏模量(E)与玄武岩浓度的关系;(b)HDPE-Bx样品的质量衰减系数(μ_m)^[35]
 Fig.2 (a) Longitudinal (L), shear (G), bulk (K), and Young's modulus (E) versus basalt concentrations mass content, (b) the mass attenuation coefficient (μ_m) of the HDPE-Bx samples^[35]

2.2 微纳米填料的协同作用与轻量化优化

填料尺寸在轻量化屏蔽材料设计中具有关键影响，直接关系到材料在达到高效辐射屏蔽的同时能否有效控制密度。微米级填料虽成本较低，但通常需要较高的填充量才能实现有效屏蔽，易导致材料重量增加；纳米级填料凭借其显著的界面效应，可在较低掺杂量下实现优异的屏蔽性能，更有利于轻量化设计；而微纳米混合填料体系则能够通过两级尺度间的协同作用，在维持较低材料密度的同时，进一步优化整体屏蔽效能。

微米级填料^[38]的典型例子是高Z金属或陶瓷颗粒，其粒径在1~100 μm 范围。Huo等^[39]制备了Sm₂O₃微米板/B₄C/HDPE复合材料。实验结果表明，高比表面积(8.20 m²/g)且粒径均匀的Sm₂O₃填料显著提升了材料的中子与 γ 射线屏蔽性能。如图3所示，不同材料的中子和 γ 通量衰减特性被展示出来，质量分数10% Sm₂O₃ (R=1:25)/20% B₄C/70% HDPE复合材料在3种样品中具有最佳的中子和 γ 屏蔽性能，当厚度为15 cm时，该复合材料在²⁵²Cf中子源下的屏蔽率达98.70%，在¹³⁷Cs γ 源

下的屏蔽率为72.10%。该研究表明，微米级Sm₂O₃填料凭借高比表面积和均匀粒径，在中子与 γ 射线的复合防护中具有显著效果，说明微米填料可在较高填充条件下构建高效的辐射散射网络。尽管如此，微米级填料通常需较高的填充量才能达到理想的屏蔽效果，这往往导致材料整体密度上升，从而在一定程度上限制了材料轻量化的实现。

纳米级填料^[40-42](粒径小于100 nm)因其高比表面积和界面效应，在低用量条件下即可显著提升屏蔽效率。Naeema等^[43]在聚丙烯基体中引入Fe₂O₃和CdO纳米颗粒，制备了不同质量分数(15%~75%)掺杂的复合材料。从图4可以看出，随着 γ 射线能量的增加，线性衰减系数和质量衰减系数值呈指数下降趋势，且在0.06~0.30 MeV的能量范围内下降较为显著；随着CdO含量从15%增加至75%，质量衰减系数和线性衰减系数均显著提升，最高值分别达到10.61 cm²/g和28.73 cm⁻¹，远高于未掺杂聚丙烯的6.90 cm²/g和6.20 cm⁻¹。这表明纳米CdO填料在提升屏蔽效率方面具有优势，且增幅与掺杂浓度呈正相关，但同时意味着在轻量化与性能提升间需要寻求平衡，且其分散性与团聚

问题仍需通过表面改性或原位合成方法加以解决^[44]。

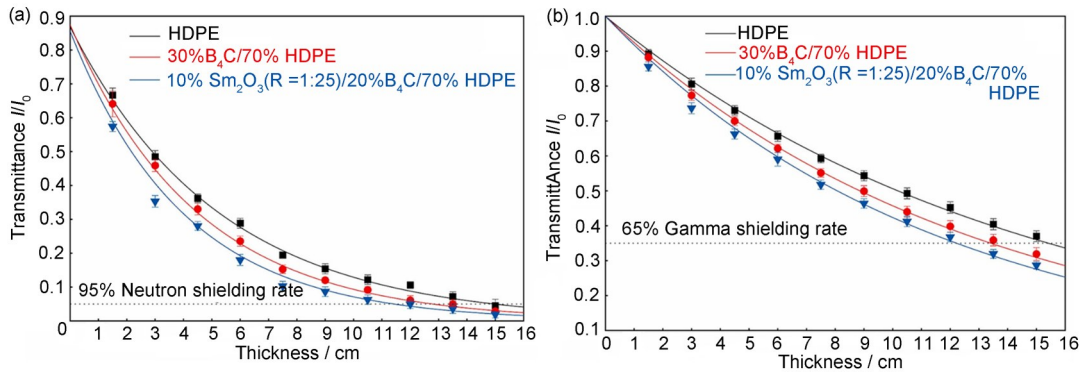


图3 (a)不同材料的中子通量衰减与(b) γ 通量衰减曲线^[39]
Fig.3 (a) Neutron flux attenuations and (b) gamma flux attenuations curves for different materials^[39]

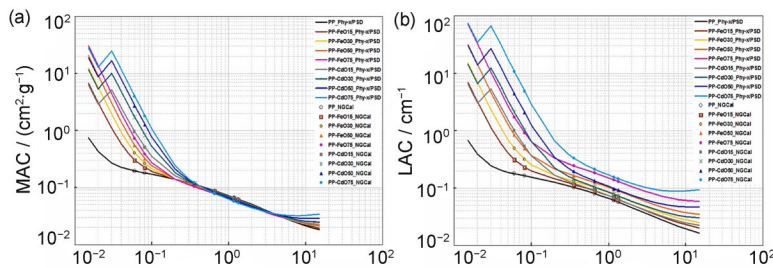


图4 纳米复合材料在不同能量 γ 射线下的MAC(a)和LAC(b)^[43](彩色见网络版)
Fig.4 MAC (a) and LAC (b) of the nanocomposites when exposed to γ -rays of varying energies^[43] (color online)

微纳米混合填料^[45-46]利用多尺度协同效应^[47]实现了屏蔽与轻量化的平衡。Almuqrin等^[48]制备了微米CuO、纳米CuO以及微纳米混合CuO的环氧树脂复合材料，并在0.06~1.33 MeV能区下测试其屏蔽性能。结果发现，混合填料复合材料在全能区均表现出更高的衰减能力，其屏蔽性能优于单独使用微米或纳米填料的体系。该研究证明了多尺度填料协同作用在增强 γ 射线屏蔽性能、降低密度方面具有显著优势，是轻量化设计的重要途径之一。

微米填料常用于 γ 射线屏蔽材料，通过形成物理阻挡网络，阻碍射线传播，但其比表面积小，需大量添加，易团聚并增加重量，影响轻量化设计。纳米填料尺寸极小，比表面积大，能均匀分散于基体中，通过量子尺寸效应增强射线散射与吸收，显著提升屏蔽性能，且用量少，对材料重量影响小，更适合轻量化需求。混合填料结合微米和纳米填料的优势，微米填料构建宏观阻挡网络，纳米填料优化微观结构，通过科学配比实现高效屏蔽与轻量化的平衡，成为 γ 射线屏蔽材料轻量化研究的前沿方向，突破单一填料的局限性。

2.3 多层、梯度或多孔结构的轻量化优化策略

结构优化是实现 γ 射线屏蔽材料轻量化的重要途径。通过多层、梯度和多孔等结构设计，可以在不增加材料整体密度的前提下提高 γ 光子的衰减效率。多层结构利用界面效应强化屏蔽，梯度结构实现能谱匹配优化，多孔结构则在降低质量的同时增加散射路径，这些策略共同为突破传统均质材料的“性能-重量”矛盾提供了解决方案。

多层结构利用不同材料的交替排布实现分层衰减^[49]。Lu等^[50]采用放电等离子烧结技术制备了Al/W多层复合材料，由图5可见，随着烧结温度升高至615 $^{\circ}$ C，界面处形成连续的Al-W金属间化合物层，使得复合材料的压缩强度提高至679 MPa，压缩破坏应变达9.10%。在610 $^{\circ}$ C下制备的Al-20W多层复合材料，其质量衰减系数达到Pb的157.40%，屏蔽性能优于均质Al/W复合材料。这一结果证明了多层结构的界面作用能显著提高屏蔽性能，同时也说明采用轻质Al与高Z元素W的复合设计，在保证性能的同时降低了整体密度^[51]，是传统Pb基屏蔽材料的可行替代方案，适用于医疗与工业领域的便携式屏蔽装置。

梯度结构^[52]通过材料成分或密度的逐层过渡，

实现与 γ 射线能谱的匹配，从而优化能量衰减效果。Hu 等^[53]设计了一种由环氧树脂、碳化硼、铅和少量氧化石墨烯组成的梯度复合材料，用于中子与 γ 射线屏蔽。图 6 表明，与均匀混合材料相比，该梯度材料在 30 cm 厚度处的屏蔽效率提高了

18.40%，在不同深度均展现出更优的防护效果，这种优势主要来自成分分布与能谱衰减的匹配。这一研究说明梯度设计能够在满足强屏蔽需求的同时降低整体重量，为移动式核反应堆等轻量化应用提供了潜在解决方案。

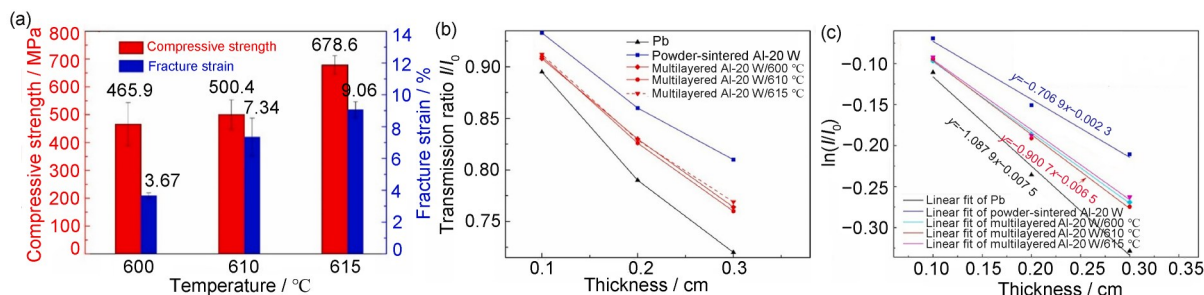


图 5 (a)通过准静态压缩试验,研究了不同温度下制备的多层 Al-20 W 复合材料的压缩性能;(b)不同厚度的复合材料和铅的线性衰减系数的透射比和(c)拟合结果^[51](彩色见网络版)

Fig.5 (a) Compressive properties of the multilayered Al-20 W composites prepared at different temperatures obtained by quasi-static compressive tests; (b) transmission ratios and (c) fitting results of the linear attenuation coefficients of the composites and Pb with different thicknesses^[51](color online)

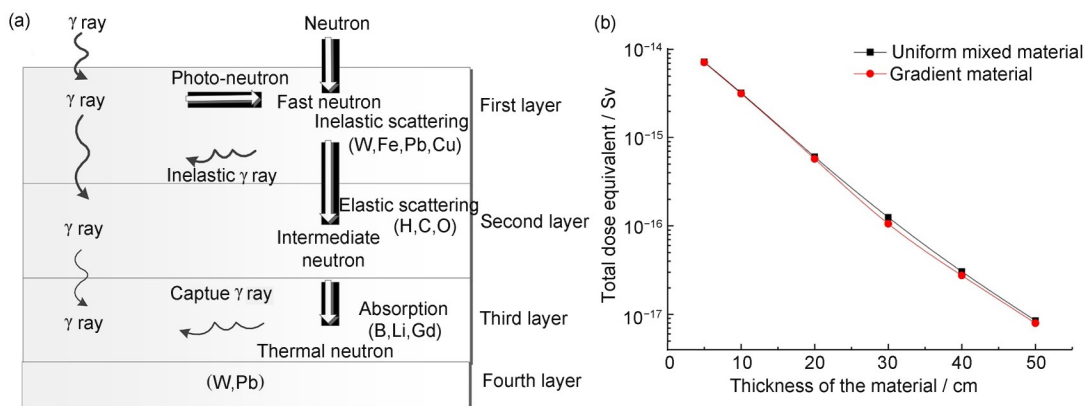


图 6 中子和 γ 射线在多层材料中的相互作用(a);均匀混合材料与梯度材料的比较(b)^[53]

Fig.6 Interaction of neutrons and γ -ray in the multi-layer material (a), comparison between the uniform mixed material and the gradient material (b)^[53]

多孔结构^[54]则通过孔隙引入多重散射路径，在降低材料密度的同时保持甚至增强屏蔽性能。Zhou 等^[55]制备了泡沫金属基复合屏蔽材料，并以 W 为基体、B₄C 为填充物，考察了不同孔隙率对屏蔽性能的影响。表 1 结果显示，当孔隙率为 80% 时，仅需 8.50 cm 厚度即可使中子透过率降至 50% 以下， γ 射线透过率降至 30% 以下，相比传统铁/水混合屏蔽结构，厚度减少了 84.45%，质量降低了 47.53%。该研究表明，泡沫金属基复合材料通过引入多孔结构增加了光子与中子的散射路径，有效提升了屏蔽效率并降低了整体质量。特别是 W 基体在保证高 Z 效应的同时，通过与合适填充物的协同作用实现了轻量化与高效防护的统一。该类材料不仅在核反应堆管道和乏燃料运输容器中具

有应用潜力，也为未来多功能轻量化防护材料的结构优化提供了新思路。

多层结构通过组合不同屏蔽性能的材料实现轻量化设计，通常采用外层轻质材料进行初步屏蔽和散射衰减，内层则使用高屏蔽性能材料以有效吸收残余射线，从而减少高密度材料的总体用量。然而，此类结构存在层间界面协同性有限、应力集中及性能跃变等问题。梯度结构在此基础上进行了优化，其材料成分与结构呈连续或渐变分布，能够针对不同穿透深度的辐射粒子逐级发挥屏蔽作用，不仅显著提高辐射防护效率，还有效降低了整体材料的重量，体现出更优的结构功能一体化潜力。多孔结构代表了 γ 射线屏蔽材料轻量化设计中的一种先进策略。该结构通过在材料

内部引入可控孔隙,显著降低了整体密度,同时利用孔隙界面引起的多次射线散射和反射效应延长了光子路径,从而增强屏蔽性能。多孔结构实

现了轻量化与防护效能协同提升,被认为是未来高性能辐射屏蔽材料的重要发展方向。

表1 各方案的最小壁厚及相关参数^[53]
Table 1 The minimum wall thickness of each scheme and related parameters^[53]

方案 Scheme	材料 Material	厚度 / cm Thickness	泡孔率 / % Porosity	总体质量 / kg Total quality	中子透射率 / % Neutron transmittance	γ 透射率 / % Gamma transmittance
1	钨+碳化硼 W + B ₄ C	8.50	80	28.31	49.95	8.18
2	钨+硼化聚乙烯 W + Borated polyethylene	10.50	50	69.24	48.85	0.16
3	低活化铁素体/马氏体钢+碳化硼 RAFM + B ₄ C	10.00	75	31.99	48.98	29.52
4	低活化铁素体/马氏体钢+硼化聚乙烯 RAFM + Borated polyethylene	11.60	70	34.10	49.70	29.82
5	水/T91 Water/T91	16.20	—	135.52	49.25	22.93

2.4 兼具阻燃、电磁或绿色特性的轻量化屏蔽材料

随着屏蔽复合材料研究的不断深入,轻量化设计已从早期单纯追求低密度和高 γ 射线屏蔽效率,逐渐拓展为兼顾多功能的发展新方向。屏蔽材料兼具阻燃性能、电磁屏蔽特性以及环境友好性等多种功能,可以实现材料性能的多元化提升,为面向核设施、航空航天、可穿戴防护装备等复杂应用场景的新材料开发提供了更多可能性。

多功能聚氨酯作为下一代智能材料,其易燃特性限制了其广泛应用。Li等^[56]受固沙机理的启发,通过仿生阻燃策略,引入稀土氟化物纳米颗粒,实现了催化碳化和结构支撑双重功能,也实现了阻燃与辐射防护的双重性能。与普通的聚氨酯相比,氨基三甲丙烷-钨共聚聚氨酯材料的放热率和产烟率,分别下降了55%和60%;苯基膦酸钨-共聚聚氨酯材料的 γ 射线屏蔽效率提高了10.60%,紫外屏蔽效率达到99%。这类阻燃-屏蔽双功能复合材料为可穿戴和易加工的轻量化辐射防护材料提供了新途径。

随着深空探测技术的发展,制备兼具电磁和辐射屏蔽性能的轻质复合材料显得尤为重要。Tang等^[57]将在电磁屏蔽领域广泛应用的Fe₃O₄纳米颗粒均匀分散于多层MXene(即Ti₃C₂T_x)中,构建

了Fe₃O₄@Ti₃C₂T_x/EP环氧树脂基复合材料,实现了优异的 γ 射线屏蔽与电磁性能协同增强。Fe₃O₄@Ti₃C₂T_x/EP复合材料表现出高线性衰减系数(0.71 cm⁻¹),其屏蔽性能较纯环氧树脂提升6倍。Fe₃O₄的引入不仅提高了Ti₃C₂T_x的结构稳定性,防止层间坍塌,还优化了介电性能,并通过表面富集的Fe元素有效限制了 γ 射线传输。该研究为深空探测等尖端领域开发轻质、高效、多功能的辐射屏蔽包装材料提供了新思路。

在绿色可持续发展背景下,Alhindawy等^[58]通过绿色水热法成功合成了Fe、Ba和B掺杂的ZrO₂基纳米材料,该材料兼具光催化降解污染物和 γ 射线屏蔽的双重功能。在光催化方面,掺杂显著提升了罗丹明B降解效率,其中Ba-ZrO₂在30 min内去除率高达99%。在屏蔽性能方面,材料密度最高达6.67 g/cm³(Fe-ZrO₂),其线性衰减系数随 γ 射线能量升高(0.245~1.408 MeV)而下降,Fe-ZrO₂的线性衰减系数从0.978 cm⁻¹降至0.333 cm⁻¹,优于未掺杂ZrO₂(0.810~0.277 cm⁻¹)。该材料体系体现了“先净化后防护”的全生命周期设计理念,不仅提升了环境修复效率,也实现了使用后的资源化再利用,为开发可持续、多功能的纳米防护材料提供了新策略。

总体而言,多功能轻量化屏蔽材料已成为辐

射防护领域的重要研究方向。将阻燃与屏蔽性能结合、电磁屏蔽与辐射屏蔽功能相结合,并将绿色可持续理念融入屏蔽材料设计,不仅拓宽了材料的应用范围,也为便携式核防护装备、航天器屏蔽组件及建筑防护系统等应用提供了新的技术支撑。未来该领域将更加注重多功能发展,推动材料实现更高效率、智能响应与可持续目标,从而设计出更为先进和适应复杂需求的辐射防护材料。

3 结论与展望

本文系统综述了 γ 射线屏蔽复合材料的轻量化设计进展,重点围绕基体类型、填料尺寸与结构设计三个方面展开,并结合最新的多功能发展趋势进行了探讨。

首先,在基体类型方面,金属基复合材料具备优异的屏蔽性能,但其密度较高,不利于轻量化应用;陶瓷基材料在保持较低密度的同时具备良好的高温稳定性,实现了性能与重量的较好平衡;而聚合物基复合材料凭借其低密度和优良的柔性,在便携式设备和可穿戴防护装备中显示出广阔的应用潜力。其次,在填料方面,微米级填料成本较低,但通常需要较高的添加量才能达到理想屏蔽效果;纳米填料则能够在较低掺量下显著提升材料的屏蔽性能,体现出更高的效率;将微米与纳米填料混合使用,可发挥协同增强作用,进一步提升复合材料的综合屏蔽性能。在结构优化方面,多层结构利用不同材料的交替排布实现分层衰减,梯度结构通过与 γ 射线能谱匹配以提高能量衰减效率,多孔结构则在降低密度的同时延长光子与粒子的传播路径,从而提升综合防护效果。此外,轻量化屏蔽材料正逐步向多功能方向发展,结合阻燃、电磁屏蔽、绿色可持续等功能,不仅拓展了应用范围,也符合未来复杂辐射环境下的多元需求。

综上所述,轻量化 γ 射线屏蔽复合材料的研究已从单一性能提升逐渐过渡到结构-性能-功能一体化的协同设计。未来亟需解决的关键问题包括屏蔽与力学性能的平衡、填料的分散与界面作用、多功能一体化,以及规模化低成本制备工艺的发展。未来研究应进一步结合多学科方法,深度融合先进制备技术,以推动该类材料在核能、医疗装备、航空航天等复杂辐射环境下的实际工程应用。

作者贡献声明 周娜是本论文的主要执行人,负责论文的写作及参考文献分析;王倩文、黄洪涛、孙元杰负责综述文献的收集和整理;李志刚负责论文的格式、图形、表格及结构审查;田波、赵弘韬负责论文整体思路的指导和论文的修改。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- Girard-Perier N, Dorey S, Marque S R A, *et al.* Mapping the scientific research on the ionizing radiation impacts on polymers (1975–2019)[J]. *e-Polymers*, 2021, **21**(1): 770-778. DOI: 10.1515/epoly-2021-0065.
- Al-Ibraheem A, Moghrabi S, Abdlkadir A, *et al.* An overview of appropriate medical practice and preparedness in radiation emergency response[J]. *Cureus*, 2024, **16**(6): e61627. DOI: 10.7759/cureus.61627.
- 郭生良, 向叶舟, 葛良全, 等. 水体放射性在线监测系统校准装置设计[J]. *核技术*, 2023, **46**(1): 010401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010401. GUO Shengliang, XIANG Yezhou, GE Liangquan, *et al.* Design of calibration device for real-time on-line monitoring system of water radioactivity[J]. *Nuclear Techniques*, 2023, **46**(1): 010401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010401.
- Wu S Y, Zhang W, Yang Y M. Progress in flexible and wearable lead-free polymer composites for radiation protection[J]. *Polymers*, 2024, **16**(23): 3274. DOI: 10.3390/polym16233274.
- 陈帅, 余磊, 周建明, 等. 中子与 γ 射线辐照对 B_4C /环氧树脂屏蔽材料性能的影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2022, **40**(2): 020201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0201. CHEN Shuai, YU Lei, ZHOU Jianming, *et al.* Neutron and gamma irradiation effects on properties of a B_4C /epoxy resin shielding material[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2022, **40**(2): 020201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0201.
- 黄芙蓉, 王艺蒙, 陈熙邦, 等. 银/氧化碳纳米管/还原氧化石墨烯复合材料的辐射制备及其电磁屏蔽效能[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2018, **36**(4):040301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rjr.36.040301. HUANG Furong, WANG Yimeng, CHEN Xibang, *et al.* One-step radiation-induced synthesis of Ag/o-MWCNT/rGO nanocomposites for electromagnetic interference shielding[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation*

- Processing, 2018, **36**(4): 040301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.040301.
- 7 Soykan U, Kalkan Y, Kaya S, *et al.* Remarkable improvement in radiation shielding efficiency, thermal insulation performance and compressive strength of rigid polyurethane foam composites by synergetic effect of PbO and colemanite fillers[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2025, **227**: 112401. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2024.112401.
- 8 Thandavamoorthy R, Devarajan Y. Study on the nuclear shield behaviors of basalt/carbon fibers reinforced PbO blended epoxy matrix composite - A novel material for thermal insulation applications[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2025, **57**(2): 103200. DOI: 10.1016/j.net.2024.09.003.
- 9 Giuliani C, De Stefano I, Mancuso M, *et al.* Advanced electrospun composites based on polycaprolactone fibers loaded with micronized tungsten powders for radiation shielding[J]. Polymers, 2024, **16**(18): 2590. DOI: 10.3390/polym16182590.
- 10 Kim S C. Metal particle pencil beam spray-coating method for high-density polymer - resin composites: evaluation of radiation-shielding sheet properties[J]. Materials, 2023, **16**(18): 6092. DOI: 10.3390/ma16186092.
- 11 Sobczak J, Cioch K, Żyła G. Paraffin-based composites containing high density particles: lead and bismuth and its' oxides as γ -ray shielding materials: an experimental study[J]. Discover Nano, 2025, **20**(1): 33. DOI: 10.1186/s11671-025-04203-z.
- 12 Özdemir T, Güngör A, Reyhancan İ A. Flexible neutron shielding composite material of EPDM rubber with boron trioxide: mechanical, thermal investigations and neutron shielding tests[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2017, **131**: 7-12. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.10.012.
- 13 Jarrett W, Jeffs S P, Korkees F, *et al.* The opportunities and challenges of hybrid composite driveshafts and their couplings in the aerospace industry: a review[J]. Composite Structures, 2023, **320**: 117203. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117203.
- 14 Li Y L, Wu X Q, Pei Y, *et al.* Recent advances on macromolecular medicinal materials for radioprotection [J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2023, **81**: 104224. DOI: 10.1016/j.jddst.2023.104224.
- 15 王赛, 钟奕宁, 王凯凯, 等. 基于氮化硼-丙烯酸铅杂化填料的 n- γ 混合辐射场防护用柔性复合材料研究[J]. 核技术, 2025, **48**(8): 080501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240485.
- WANG Sai, ZHONG Yining, WANG Kaikai, *et al.* Study on flexible composite materials for n- γ mixed radiation field protection based on boron nitride-lead acrylate hybrid filler[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(8): 080501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240485.
- 16 Car C, Quevarec L, Gilles A, *et al.* Evolutionary approach for pollution study: the case of ionizing radiation[J]. Environmental Pollution, 2024, **349**: 123692. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123692.
- 17 Filak-Mędoń K, Fornalski K W, Bonczyk M, *et al.* Graphene-based nanocomposites as gamma- and X-ray radiation shield[J]. Scientific Reports, 2024, **14**(1): 18998. DOI: 10.1038/s41598-024-69628-5.
- 18 Wu Y H, Wang Z K. Progress in ionizing radiation shielding materials[J]. Advanced Engineering Materials, 2024, **26**(21): 2400855. DOI: 10.1002/adem.202400855.
- 19 Kwon J, Motta A T. Gamma displacement cross-sections in various materials[J]. Annals of Nuclear Energy, 2000, **27**(18): 1627-1642. DOI: 10.1016/S0306-4549(00)00024-4.
- 20 Serafini J, Hossain A, James R B, *et al.* Time-resolved, nonequilibrium carrier and coherent acoustic phonon dynamics in (Cd, Mg)Te single crystals for radiation detectors[J]. Semiconductor Science and Technology, 2019, **34**(3): 035021. DOI: 10.1088/1361-6641/ab0219.
- 21 Fornalski K W. Simple empirical correction functions to cross sections of the photoelectric effect, Compton scattering, pair and triplet production for carbon radiation shields for intermediate and high photon energies[J]. Journal of Physics Communications, 2018, **2**(3): 035038. DOI: 10.1088/2399-6528/aab408.
- 22 Sayyed M I, Mhareb M H A, Hamad M K. Physical, mechanical, and ionizing radiation shielding properties of 10PbO-10Na₂O- (80-x)B₂O₃-xBaO glasses[J]. Optical Materials, 2024, **150**: 115237. DOI: 10.1016/j.optmat.2024.115237.
- 23 Morgan D V, Bartlett R J. Single-photon ionization of helium from 4.5 to 12 keV by Compton scattering and the photoelectric effect[J]. Physical Review A, 1999, **59**(5): 4075-4078. DOI: 10.1103/physreva.59.4075.
- 24 Jing H, Geng L Y, Qiu S Y, *et al.* Research progress of rare earth composite shielding materials[J]. Journal of Rare Earths, 2023, **41**(1): 32-41. DOI: 10.1016/j.jre.

- 2022.06.004.
- 25 Alharbi A. Experimental and simulation-based optimization of gamma-ray shielding using cement boards in Saudi Arabia[J]. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2025, **18**(4): 101861. DOI: 10.1016/j.jrras.2025.101861.
- 26 Middents W, Gumberidze A, Krings T, *et al.* Linear polarization properties of energetic X-rays being Compton-scattered off atomic targets[J]. *New Journal of Physics*, 2025, **27**(7): 073204. DOI: 10.1088/1367-2630/adf140.
- 27 Zhou Y, Wang H P, Wang D, *et al.* Insight to the enhanced microwave absorption of porous N-doped carbon driven by ZIF-8: competition between graphitization and porosity[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2023, **30**(3): 474-484. DOI: 10.1007/s12613-022-2499-z.
- 28 Ekinci N, Kavaz E, Aygün B, *et al.* Gamma ray shielding capabilities of rhenium-based superalloys[J]. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 2019, **174**(5/6): 435-451. DOI: 10.1080/10420150.2019.1596110.
- 29 Aycan Ş, Akkurt İ, Gunoglu K, *et al.* Experimental evaluation of gamma-rays shielding properties of ceramic materials used in dentistry[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2023, **204**: 110701. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110701.
- 30 Li R, Gu Y Z, Yang Z J, *et al.* Gamma ray shielding property, shielding mechanism and predicting model of continuous basalt fiber reinforced polymer matrix composite containing functional filler[J]. *Materials & Design*, 2017, **124**: 121-130. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.045.
- 31 Gan B, Liu S C, He Z, *et al.* Research progress of metal-based shielding materials for neutron and gamma rays[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2021, **34**(12): 1609-1617. DOI: 10.1007/s40195-021-01259-5.
- 32 Huang G Q, Shen Y F, Guo R, *et al.* Fabrication of tungsten particles reinforced aluminum matrix composites using multi-pass friction stir processing: Evaluation of microstructural, mechanical and electrical behavior[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, **674**: 504-513. DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.124.
- 33 Sathish K V, Manjunatha H C, Vidya Y S, *et al.* Investigation on shielding properties of lead based alloys [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, **137**: 103788. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103788.
- 34 Zhao Z K. Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics[J]. *Ceramics International*, 2021, **47**(4): 4389-4397. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.10.065.
- 35 Hannachi E, Sayyed M I, Mahmoud K A, *et al.* Gadolinium-based ceramics doped with lead oxide for γ -ray shielding[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, **291**: 126731. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126731.
- 36 王佳健, 姜志文, 葛志青, 等. 六方氮化硼/丙烯酸酯橡胶复合材料的制备、性能及 γ 射线辐射效应[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2022, **40**(6): 060201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0056.
- WANG Jiajian, JIANG Zhiwen, GE Zhiqing, *et al.* Hexagonal boron nitride/acrylic rubber composites: preparation, thermal and mechanical properties, and effect of γ -radiation[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2022, **40**(6): 060201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0056.
- 37 El-Mesady I A, Rammah Y S, Hussein A E, *et al.* Synthesis, optical, mechanical characteristics, and gamma-ray shielding capacity of polyethylene-basalt mixture[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2023, **209**: 110974. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2023.110974.
- 38 Alorain D A, Sayyed M I, Almuqrin A H, *et al.* Impacts of micro-size PbO on the gamma-ray shielding performance of polyepoxide resin[J]. *e-Polymers*, 2023, **23**: 0032-0042. DOI: 10.1515/epoly-2023-0032.
- 39 Huo Z P, Lu Y D, Zhang H, *et al.* Sm₂O₃ micron plates/B₄C/HDPE composites containing high specific surface area fillers for neutron and gamma-ray complex radiation shielding[J]. *Composites Science and Technology*, 2024, **251**: 110567. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110567.
- 40 Şevik S, Çiçek B, Aydoğmuş T, *et al.* Development of novel nanocomposite radiation shielding blocks as gamma rays barrier[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2023, **212**: 111068. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2023.111068.
- 41 Liu J H, Zhang Q P, Sun N, *et al.* Elevated gamma-rays shielding property in lead-free bismuth tungstate by nanofabricating structures[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2018, **112**: 185-189. DOI: 10.1016/j.jpchem.2017.09.007.
- 42 Gouda M M, Obeid A, Awad R, *et al.* Gamma-ray attenuation parameters of HDPE filled with different nano-size and bulk WO₃[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2023, **197**: 110790. DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.110790.

- 2023.110790.
- 43 Naeema N, Kadhim O J, Abdullah N J, *et al.* Shielding performance of metal oxide nanoparticles-doped polypropylene composites against gamma rays and neutrons exposure[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2024, **216**: 111461. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2023.111461.
- 44 Zhu Z X, Xu P, Fan G K, *et al.* Fast synthesis and separation of nanoparticles *via in situ* reactive flash nanoprecipitation and pH tuning[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, **356**: 877-885. DOI: 10.1016/j.cej.2018.09.103.
- 45 Alabsy M T, Abbas M I, El-Khatib A Y, *et al.* Attenuation properties of poly methyl methacrylate reinforced with micro/nano ZrO₂ as gamma-ray shields[J]. Scientific Reports, 2024, **14**(1): 1279. DOI: 10.1038/s41598-024-51551-4.
- 46 Sobczak J, Gawel Ż. Nano and microcomposites as gamma and X-ray ionizing radiation shielding materials: a review[J]. Energy, 2024, **290**: 130210. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130210.
- 47 Ma H Y, Gong P J, Qiao Y J, *et al.* Nanofiber fluorescence coating for evaluation of complex solid-/gas-multi-phase and nano-/micro-multi-scale nanocomposite foam structure[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, **154**: 106183. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106183.
- 48 Almuqrin A H, Sayyed M I, Khandaker M U, *et al.* Effect of concentration of CuO on radiation shielding characteristics of epoxy-resin materials[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2024, **223**: 111918. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2024.111918.
- 49 Wang S S, Li W, Wei L Q, *et al.* Hierarchical fibers-based breathable lead-free X-ray shielding fabrics *via* fractional-energy cyclic collisional attenuation[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, **302**: 112544. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112544.
- 50 Lu D S, You G Q, Peng L Z, *et al.* Microstructures and properties of a multilayered Al/W composite fabricated for γ -ray-shielding applications[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, **198**: 110209. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110209.
- 51 Zhou L, Zhu X G, Shen P, *et al.* Constructing multilayered WB₂/Bi/poly(ethylene-co-1-octene) composites with excellent nuclear radiation shielding efficiency and radiation damage prevention[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, **464**: 142625. DOI: 10.1016/j.cej.2023.142625.
- 52 Zübeyde Ö, Gökmen U. Radiation transmittance of aluminum/silicon matrix functionally graded hybrid composites reinforced with B₄C/TiO₂[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2023, **213**: 111250. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2023.111250.
- 53 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): 2387-2393. DOI: 10.1016/j.net.2020.03.029.
- 54 Chen P, Li Y B, Yin B, *et al.* New design of bismuth borate ceramic/epoxy composites with excellent fracture toughness and radiation shielding capabilities[J]. Materials Today Communications, 2023, **35**: 106102. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106102.
- 55 Zhou J J, Zeng Q, Xiong Y B, *et al.* Research on the shielding performance and optimization of new type foam metal matrix composite shielding materials[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2022, **516**: 31-37. DOI: 10.1016/j.nimb.2022.02.005.
- 56 Li X Y, Xie M N, Gao J Y, *et al.* Biomimetic sand-fixation-inspired flame retardants: enhanced char stabilization and multifunctional polyurethane with integrated fire safety, radiation shielding, and visual monitoring[J]. Materials Horizons, 2025, **12**(17): 6899-6911. DOI: 10.1039/D5MH00493D.
- 57 Tang X J, Li S L, Hang C J, *et al.* A novel lightweight Fe₃O₄@Ti₃C₂T_x/EP composite with accordion-like structure for gamma radiation shielding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, **1030**: 180275. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.180275.
- 58 Alhindawy I G, Mahmoud K A. Engineered zirconia nanomaterials for circular environmental and nuclear applications: dual-function design for photocatalytic pollutant degradation and gamma-ray shielding[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2025, **8**(4): 317. DOI: 10.1007/s42114-025-01379-x.