

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.06.029

聚合物辐射屏蔽材料研究进展

周冠辰^{1,2,3}, 姜哲⁴, 董宏亮⁵, 吴德慧^{1,2}, 陈俊祥^{1,2}

(1. 中国核电工程有限公司北京核化工研究设计院, 北京 100840; 2. 中国核工业集团有限公司核燃料后处理工程技术研究中心, 北京 100840; 3. 哈尔滨工业大学材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨 150001; 4. 中国核电工程有限公司科技部, 北京 100840; 5. 中核工程咨询有限公司, 北京 100840)

摘要: 近年来, 填充改性聚合物辐射屏蔽材料因其轻质、功能可设计等优势成为研究热点。本文介绍了核辐射类型及其屏蔽机理, 并回顾了近年来 γ 射线和中子屏蔽材料的研究进展, 分析了聚合物屏蔽材料的制备过程, 包括配方、加工和成型。现阶段已成功研制兼具柔韧性、弹性、抗拉强度、硬度、透光性和屏蔽性能的聚合物复合材料。分析表明, 辐射防护材料的选择取决于辐射的来源、类型和能量; 对于 γ 射线屏蔽, 可以采用Bi、W、钨等高原子序数金属的复合材料; 对于中子屏蔽, 可以采用具有高俘获截面的元素。除了材料配方外, 填料在聚合物基体中的均匀分布, 有利于提升聚合物材料的辐射屏蔽及力学性能。从辐射屏蔽材料加工装备角度考虑, 微纳层叠方法在聚合物辐射屏蔽材料的大批量工业化制备上具有优势。

关键词: 聚合物; 辐射屏蔽; γ 射线辐射; 中子辐射; 屏蔽材料

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)06-0244-06

Research progress on polymer radiation shielding materials

ZHOU Guanchen^{1,2,3}, JIANG Zhe⁴, DONG Hongliang⁵, WU Dehui^{1,2}, CHEN Junxiang^{1,2}

(1. Beijing Nuclear Chemical Research & Design Institute, CNPE, Beijing 100840, China; 2. Nuclear Fuel Reprocessing Engineering Technology Research Center, CNNC, Beijing 100840, China; 3. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 4. Department of Science and Technology, CNPE, Beijing 100840, China; 5. China Nuclear Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: In recent years, filled and modified polymer radiation shielding materials have become a hot topic of research due to their advantages, such as light weight and design flexibility. The types of nuclear radiation and their shielding mechanisms were introduced, recent research progress on γ -ray and neutron shielding materials was reviewed, and the preparation methods for polymer shielding materials were analyzed in terms of formulation, processing, and molding. At present, polymer composites that combine flexibility, elasticity, tensile strength, hardness, light transmittance, and shielding performance have been successfully developed. Analysis indicates that the selection of radiation shielding materials depends on the source, type, and energy of the radiation. For γ -ray shielding, the use of composites containing high-atomic-number metals such as Bi, W, and Ce has been proposed; for neutron shielding, the use of elements with high capture cross-sections has been suggested. In addition to material formulations, the uniform distribution of fillers within the polymer matrix contributes to enhancing the radiation shielding and mechanical properties of the polymer materials. From the perspective of processing equipment for radiation shielding materials, the micro-nano lamination method has advantages in the large-scale industrial production of polymer radiation shielding materials.

Keywords: polymer; radiation shielding; gamma radiation; neutron radiation; shielding material

核能在医学诊断、癌症治疗、清洁能源等领域得到广泛应用。中国核能发展报告(2025)^[1]显示, 全球核能发展迎来全面复兴, 按照当前的建设速度和节奏, 2030年前我国的运

核电装机规模将跃居世界第一, 预计到2040年我国核电装机需达到2亿kW, 发电量占比约10%, 发展核能产业是我国实现“碳达峰、碳中和”目标, 加快绿色低碳发展, 全面提高资

通信作者: 吴德慧, 博士, 研究员级高级工程师, 硕士生导师, 研究方向为化工过程机械、高分子材料加工成型

收稿日期: 2026-03-26

引用格式: 周冠辰, 姜哲, 董宏亮, 等. 聚合物辐射屏蔽材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(6): 244-249.

ZHOU Guanchen, JIANG Zhe, DONG Hongliang, et al. Research progress on polymer radiation shielding materials[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(6): 244-249.

源利用效率的重要举措。除了核电外,我国同位素自主供应能力实现显著突破,镅-177、钇-90、镭-223、碘-125等多种关键医用同位素实现批量化生产^[2],核医疗、核农业、工业辐照等核技术应用领域不断取得新进展。

以核电为例,U235等重原子核吸收中子后发生裂变,分裂成两个或多个较轻的原子核(裂变产物),同时释放出大量能量和额外的中子。这些新产生的裂变产物通常是不稳定的放射性同位素,它们会通过衰变(如 α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变)来达到稳定状态,从而持续释放出 α 粒子、 β 粒子和 γ 射线等电离辐射。核辐射因其能电离原子和分子,辐射暴露导致DNA损伤和细胞破坏,存在显著的健康风险^[3]。传统 γ 射线和中子屏蔽材料诸如含铅材料、聚乙烯/水/硼存在功能单一、有毒有害、物理笨重等问题^[4],无法同时满足现代核工业、医疗及航空航天领域对轻量化、高效化、多功能化和绿色化的复合需求。

对此,开发轻质、无毒并兼具其他功能(透明、阻燃、柔韧、抗穿刺等)的辐射屏蔽材料对安全使用核能起着举足轻重的作用。本文综述了核辐射类型及其屏蔽机理及 γ 射线屏蔽聚合物、中子屏蔽聚合物最新进展,在 γ 射线和中子屏蔽的辐射防护领域具有重要意义。

1 辐射屏蔽机理及聚合物基体材料

为了有针对性的设计、加工制造辐射屏蔽,需要明晰辐射源项类型及其与辐射屏蔽材料的作用机制,及其衰减过程中产生的二次辐射。本节综述了辐射类型及其穿透能力及 γ 射线、中子与屏蔽材料间的相互作用。

1.1 辐射类型及其穿透能力

辐射是以粒子流或移动波的形式释放能量,以各种形式存在于人类的生活中。辐射有两种基本类型:非电离辐射和电离辐射。非电离辐射是一种相对较低的能量,携带的能量不足以从原子中移除电子。与之相反的某些类型的辐射能量足以将电子从原子轨道中击落,这会扰乱电子/质子的平衡使原子带正电,带电的分子和原子被称为离子,能产生离子的辐射称为电离辐射。电离辐射有多种类型,包括 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线和中子^[5]。

1.2 γ 射线与屏蔽材料相互作用

高能 γ 射线与物质相互作用的机制主要有三种:光电效应、康普顿散射、电子对效应。这三种相互作用都以一定的相对概率发生,通常用原子截面(σ)来量化^[6],它代表入射光子与屏蔽材料原子在单位面积上的相互作用几率,原子截面与入射光子的能量和屏蔽材料的性质有关。其中屏蔽材料元素的原子序数越大,其越有利于光电效应的发生;一般采用高原子序数的元素作为 γ 射线的屏蔽组分,进而实现康普顿散射、光电效应两种方式衰减及吸收 γ 光子^[7]。

1.3 中子与屏蔽材料相互作用

中子是具有质量且不带电的中性粒子,因此不会像带电粒子与原子核外电子发生库仑相互作用,中子主要与屏蔽材

料中的原子核相互作用,不会被原子电子周围的电磁场显著偏转或减慢。中子与原子核之间的相互作用可以分为两类:中子散射和中子吸收。中子屏蔽的核心是先将高能中子慢化成低能中子,然后将其吸收,并尽量避免产生次级 γ 射线^[8]。中子散射:散射是消耗中子能量的主要方式,分为弹性散射和非弹性散射。中子与原子核发生碰撞,总动能守恒,类似台球之间的碰撞。中子将部分动能传递给靶核,自身速度和能量降低。散射对任何能量中子都有效,其中轻核效率最佳,因为轻核的质量与中子相近,中子在一次碰撞可损失最多能量^[9-10],这是水、石蜡、聚乙烯等含氢元素材料成为优异慢化剂的原因。中子吸收:中子被原子核吸收后,形成激发态的复合原子核,该种复合原子核极不稳定,需要发射一个或多个 γ 射线退激到稳定态^[11]。由于吸收反应过程中会释放 γ 射线,一般选择释放 γ 射线较小的元素(硼化物)作为中子吸收组分^[12]。

1.4 核辐射屏蔽基体的聚合物材料

在制造用于核辐射防护的高分子复合材料中,理想的高分子基体必须具有良好的机械强度、热和化学稳定性、无毒性以及优异的核衰减性能。目前用作聚合物基辐射屏蔽材料基体的聚合物包括聚乙烯(PE)、聚氨酯(PUR)、聚乙烯醇(PVA)、硅聚合物、乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)及天然橡胶等^[13-16]。通常用于制备聚合物基核辐射屏蔽材料的一些聚合物基质的密度以及122 keV下的衰减系数见表1^[17]。聚合物材料的衰减系数随密度增加而增加。尽管密度最低,PE材料因其高氢含量和高中子相互作用截面,被广泛用作辐射屏蔽的基质材料。此外,PE材料具有优异的成形性和抗冲击性,且摩擦系数较低。根据应用场景的需求,市面上有三种类型的PE材料作为核辐射屏蔽材料的基底:低密度聚乙烯(PE-LD)、高密度聚乙烯(PE-HD)和超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)。PE-UHMW除了PE-HD的所有优异性能外,摩擦系数也低于PE-HD。硅胶聚合物也被广泛应用于核辐射防护的基体材料。例如,聚二甲基硅氧烷(PDMS)是一种广泛使用的硅聚合物,具有无毒、弹性良好且易于加工和成型。市售环氧树脂也常用作核辐射屏蔽材料的基质,因其成本低、收缩率低、加工和成型简便,且具有优异的耐风化和耐腐蚀性。具有上述不同物理化学性质的不同聚合物可与多种高阻抗金属/金属复合材料结合,制备多种核辐射防护复合材料。

表1 常见聚合物的密度和线性衰减系数(μ)
Tab. 1 Density and linear damping coefficient (μ) of common polymers

Polymer	Density/(g·cm ⁻³)	μ at 122 keV/cm ⁻¹
PE-LD	0.91	0.140
PE-HD	0.96	0.148
PMMA	1.19	0.192
PUR	1.25	0.205
PVA	1.28	0.212
PET	1.38	0.203

2 γ 射线屏蔽材料

γ 射线屏蔽材料普遍采用高分子材料为基体,并通过物理掺混的方式将屏蔽填料掺杂到基体中以获得具有辐射屏蔽性能的复合材料。传统的聚合物核屏蔽复合材料为铅硼聚乙烯,该材料由聚乙烯、以铅粉和碳化硼作为填充剂、聚乙烯为基体材料复合而成,铅是 γ 射线的理想屏蔽材料^[18],但是铅具有生物毒性,影响从业人员健康且对环境不友好,研究人员致力于探索无铅的聚合物辐射屏蔽材料。Ozdemir等^[19]在276.4~1 332.5 keV能量范围内,探讨了以BaSO₄和Mo为增强剂的三元聚合物复合材料的 γ 射线屏蔽性能,其中聚合物采用混合邻苯二甲酸不饱和聚酯树脂、过氧化甲乙酮(作为引发剂,用量为不饱和聚酯树脂质量的1%)和辛酸钴(作为促进剂,钴原子占辛酸钴质量的6%)制备。研究发现,相对屏蔽效率(RPE)、密度比(μ/ρ)、密度(ρ)和有效原子序数(Z_{eff})值随 γ 射线能量增加而降低,而高能屏蔽层厚度(HVL)、总屏蔽层厚度(TVL)和平均自由程(MFP)则呈现相反趋势。在所有制备的三元复合材料中,代号为BaMo50的复合材料具有最高的 γ 射线屏蔽能力,其在276.4 keV能量值下,质量衰减系数值为0.1 528 cm²/g。Çoğalmış等^[20]在聚苯胺中掺入不同质量分数(10%~20%)的钒酸铋(BiVO₄),随着BiVO₄浓度增加,不同能量 γ 射线质量衰减系数(MAC)与线性衰减系数(LAC)值呈不同比例上升,而HVL、TVL及MFP值则呈现不同比例下降。BiVO₄浓度提升显著增强了低能 γ 射线(59.5 keV)的LAC值,使其从0.14 cm⁻¹跃升至0.75 cm⁻¹。相反,在中能 γ 射线(662 keV)下仅观察到LAC的轻微增长。此外,HVL在59.5 keV时降低约81%,在662 keV时降低25%。含质量分数20% BiVO₄的复合材料样品在所有制备的复合材料中表现出最佳的 γ 射线衰减性能。Kuru-cu等^[21]制备了米糠蜡增强再生聚乙烯复合材料,RBX50展现出最强的衰减能力,其线性衰减系数为0.196 cm⁻¹,80.99 keV能区半值层达3.53 cm。Kassim等^[22]采用甲基丙烯酸环氧丙酯与铋、氧化钨纳米颗粒制备了新型聚合物复合材料,结果表明,B-NPs/PGMA在200 keV以下能区的 γ 射线线性衰减系数和质量衰减系数均显著提高。

综上所述,传统的防护以含铅材料为主,因具有高密度和高原子序数从而屏蔽性能优异,但其具有生物毒性,正逐渐被钨、铋、钼等高原子序数材料取代^[23]。由于涉核恶劣服役环境下,通常需要在辐射屏蔽基础上具有其他功能属性,对此,研究人员制备了适用于柔性穿戴的屏蔽材料(手套箱的屏蔽手套),透明光学材料(窥视窗),阻燃材料(具有火荷载的高温核设施)等兼具其他功能的复合材料。

2.1 兼具柔性的 γ 射线屏蔽穿戴材料

吴莹等^[24]以聚四氢呋喃二醇(PTMG)、二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)和1,4-丁二醇(BDO)为主要原料,采用半预聚法制备了一种具有低模量和优异高低温性能的聚氨酯基体材料。利用尼龙织物提供材料的力学性能,采用刮涂工艺制备了尼龙织物/钨掺杂聚氨酯复合防辐射材料,当复合材料

的厚度为0.30 mm、面密度为1.48 kg/m²、钨粉负载量达质量分数92.0%时,复合材料对X射线(120 kV)的屏蔽率可达61.1%。Fisli等^[25]开发了柔韧的无铅La(OH)₃增强天然橡胶复合材料。添加La(OH)₃使复合材料密度从0.975 g/cm³(NR)升至2.156 g/cm³(La250-NR),硬度从27升至53,但随着La(OH)₃含量的增加,抗拉强度从13.1 MPa降至5.8 MPa,断裂伸长率从440%降至320%;其辐射衰减性能显著提高,在81 keV能量下,质量衰减系数从0.161 cm²/g上升至2.029 cm²/g,半值层厚度从4.41 cm(NR)降至0.16 cm(La250-NR),相较于天然橡胶达到相同屏蔽效果所需厚度减少了96%。Güngör等^[26]探讨了含三氧化铋乙丙橡胶样品的 γ 射线屏蔽性能,获得68.6%至94%的辐射衰减率值。不同氧化铋含量样品在100%伸长率下的模量值随总辐照剂量增加而降低,随着三氧化二铋用量的增加,EPDM的断裂行程值呈上升趋势。Zhang等^[27]以羧基化逆硫化共聚物作为交联剂和界面偶联剂,在填充羧基化铋基颗粒的天然橡胶基体中构建了双动态网络。不仅赋予天然橡胶复合材料卓越的屏蔽性能,还具有优异的抗拉强度、抗穿刺性和抗撕裂性、自愈合性和可回收性。屏蔽复合材料的拉伸强度和撕裂强度分别可达到28.12 MPa和41.2 kN/m的较高水平。此外,在59.5 keV γ 射线,填充80 phr羧基铋基颗粒的天然橡胶复合薄膜的线性衰减系数和质量衰减系数可分别达到未填充天然橡胶的743.0%和521.2%。该策略成功制备出具有显著自愈合和可回收能力的新型 γ 射线辐射屏蔽天然橡胶复合薄膜。Zailan等^[28]探讨了添加质量分数3%~12% Fe₃O₄纳米颗粒对通过熔融共混法制备的橡胶状聚合物纳米复合材料性能的影响。这种橡胶状聚合物混合物基体由天然橡胶和作为热塑性组分的线型PE-LD组成,并加入了导电聚合物聚苯胺(PANi)以及自合成的液态天然橡胶(LNR)。当Fe₃O₄质量分数为最佳值6%时,材料的拉伸和冲击性能得到改善,在283.5 keV能量下,质量分数12% Fe₃O₄的LAC值增至0.124 31 cm⁻¹,而快中子散射截面值则从0.104 27 cm⁻¹降至0.085 48 cm⁻¹。Liu等^[29]制备了一种基于氢端基苯基聚硅氧烷(HTTP)和聚硼硅氧烷(PBS)双网络弹性体和五氧化钨功能填料的新型自愈合可穿戴辐射防护材料,该复合材料通过利用HTTP中的苯基作为刚性组分和共价网络,从而获得鲁棒性和弹性;HTTP充当支架,保持PBS形状的稳定性并提供弹性,PBS中存在的超分子网络赋予了材料高黏弹性,并增强了自愈能力。此外,五氧化钨增强了该双交联弹性体的辐射屏蔽和热管理性能,当填料质量分数达到20%时,复合材料对低能 γ 射线具有较高的吸收系数。这种集热管理、自主自愈、机械强度以及辐射防护于一体的独特组合,在低温、低能核辐射相关场所具有广阔的应用前景。

在辐射场柔性穿戴服役工况下,研究人员采用高原子序数金属填充改性PUR、三元乙丙、天然橡胶等弹性体,重点瞄准材料的抗拉强度、抗穿刺性能、耐老化及自愈等性能开展研究。不过该种改性方法在提升屏蔽性能的前提下,牺牲了

一定的弹性。在实际工程应用时,应当对源项辐射能量进行充分评估,在安全阈值内设计材料配比,进而实现聚合物材料的辐射屏蔽与弹性的兼顾。

2.2 兼具透明的 γ 射线屏蔽材料

Saberi Rise等^[30]提出一种基于铝箔的新型铋粉合成方法,并制备了含质量分数40%、50%和60%铋的柔性Bi-PMMA复合材料,随着聚合物基体中铋粉质量百分比的增加,复合材料在各 γ 能级下的屏蔽性能得到提升,含60%铋的PMMA基复合材料样品在59.5 keV γ 能量下的MAC值与HVL值分别为3.81 cm²/g和0.072 cm,与传统铅材料(0.896 cm²/g和0.068 cm)的数值极为接近。Dorostkar等^[31]在PMMA掺入高原子序数填料,如氧化镉(CdO)和氧化汞(HgO),纯PMMA材料辐射强度衰减约90%,仅添加质量分数0.5%填料即可提升至近98%,在提升屏蔽性能的前提下保持复合材料的透明度,使其成为防护玻璃应用的有力候选材料。Mohammed B. Katea等对比了PMMA与不同质量比的Bi₂O₃、MoO₃、B₂O₃、SiO₂、Na₂O和Fe₂O₃共混而成的聚合物复合材料的力学性能及辐射屏蔽能,结果表明,添加质量分数20% Bi₂O₃的PMMA展现出优异的 γ 射线衰减和屏蔽能力。随着Bi₂O₃含量的增加, μ 和吸收率(A)值显著上升,但透射率(T)呈现下降趋势。Almutairi^[32]采用不同比例的氧化钡纳米粒子(NPs)和二氧化锆微粒子(MPs)作为填料填充双酚A二缩水甘油醚(DGBA),DGBA-BZ4复合材料在5 cm处实现60.3%的辐射屏蔽效率,与商用RS-253玻璃(61.3%)相当。

在透明光学服役工况下,研究人员多采用聚甲基丙烯酸甲酯作为基体材料,掺杂填料以实现 γ 射线的屏蔽性和透明性的兼具,Bi作为填料表现出更优异的辐射屏蔽性能,但是随着填料的比例增加,会导致光学性能(透射率)的降低。

2.3 兼具阻燃的 γ 射线屏蔽材料

Sun等^[33]通过添加由聚磷酸铵、二乙二醇、受阻胺阻燃剂(Flamestab® NOR116)和纳米磷酸铝组成的混合阻燃剂,制备了一系列基于PE-UHMW的复合材料。当添加质量分数18.88%的阻燃剂时,材料的极限氧指数(LOI)达到40%,满足UL 94 V-0级标准。为进一步提升散热能力,在上述超高分子量聚乙烯基复合材料中引入质量分数5%的石墨,使热导率从0.74 W/(m·K)显著提升至3.73 W/(m·K),同时保持优异阻燃性(LOI=39%,UL 94 V-0级)。Geant4模拟与⁶⁰Co辐射试验均证实,该导热阻燃PE-UHMW基复合材料在保持优异屏蔽性能的同时兼具导热性。Salem等^[34]制备了质量浓度分别为0%、1%、2.5%、4%和5%的亲水性膨润土纳米黏土填料(H₂Al₂O₆Si)的交联聚乙烯(XLPE)样品,纳米黏土颗粒的均匀分散增强了复合材料的热性能,形成了起屏障作用的碳化层,从而减缓了热分解并降低了热释放速率。LOI从28%提高到34%,且随着纳米黏土浓度的增加,燃烧速率得到改善。此外,随着填料浓度的增加,吸收率及光学带隙计算值均呈下降趋势。与XLPE相比,其辐射衰减能力在中子方面提高了约40%,在 γ 射线方面提高了约30%。Kavanoz等^[35]针对

复合材料在 γ 射线屏蔽及防火叠加的服役条件,采用钒渣、环氧树脂和三氧化二锑配制而成的复合材料,环氧树脂-钒渣-三氧化二锑三元玻璃态复合材料的辐射屏蔽性能优于混凝土,但弱于铅。

研究人员主要通过基体材料中加入阻燃剂等方式实现材料的防火性能。在工程应用方面,需要根据具体的服役场景,评估火荷载、燃烧速度及温度等因素,结合辐射场能力,调控阻燃与辐射屏蔽填料的配比。

3 中子屏蔽材料

中子屏蔽材料已从传统的块状慢化剂和吸收剂,发展为精密的多层复合结构。这些结构将慢化、吸收和 γ 射线衰减功能整合为一体^[36]。本节重点介绍了中子屏蔽配方、阻燃和柔性屏蔽材料。这些技术为设计适用于反应堆、医疗系统和空间环境的轻量化多功能中子屏蔽解决方案提供了前景广阔的路径。

Sheng等^[37]采用熔融混合与热压成型工艺制备了掺杂Cd和WO₃的PE基复合材料,并在马来西亚核能机构使用²⁴¹Am/Be中子源和¹³⁷Cs γ 射线源对其屏蔽性能进行评估。研究发现,单层屏蔽结构中,掺杂质量分数20% WO₃的PE+20%WO₃复合材料具有最大的中子宏观去除截面与 γ 射线线性衰减系数。多层结构配置下,PE+10%Cd与PE+10%WO₃复合材料展现出最佳的中子- γ 射线混合辐射衰减性能。

在阻燃且屏蔽中子方面,Wang等^[38]开发了一种基于EVA聚合物的新型聚合物复合材料。EVA是乙烯与醋酸乙烯酯的共聚物,因其柔韧性好、加工性能优异且成本低廉,可广泛应用于各类材料领域。绝缘EVA可用于电缆护套、汽车隔音等众多领域。由氮化硼(BN)、硼酸锌(ZB)、氢氧化镁(MH)与EVA组成的复合材料兼具中子屏蔽和阻燃性能。随着BN和ZB含量的增加,材料的中子屏蔽性能最高可达33.08%。随着作为阻燃剂的MH和ZB含量的增加,材料的LOI得到改善。材料的断裂伸长率和抗拉强度随填料粉末含量的增加而降低。Salem等^[39]制备了含不同比例(NH₄H₂PO₄/SiO₂)及固定量Pb₂O₃的PE-HD复合板,用作中子屏蔽和阻燃材料。通过向PE-HD基体中添加(NH₄H₂PO₄/SiO₂),PE-HD样品的LOI从20.1%提高到24.1%。此外,结果表明快中子参数同时取决于屏蔽材料的密度和化学组成。当填料含量为40 phr时,中子衰减率增加约45%,而平均自由程则减少约55%。

在柔性中子屏蔽方面,Özdemir等^[40]制备了三元乙丙橡胶与三氧化硼中子屏蔽柔性复合材料。测试结果表明,三氧化硼改善了复合材料的拉伸性能和撕裂强度,由于三氧化硼的润滑作用,随着三氧化硼含量的增加,100%模量降低而蠕变速率升高,质量分数20%三氧化硼的EPDM材料衰减系数实测值为0.561 cm⁻¹。Thakur等^[41]采用重金属氧化物钴铁氧化物(CoFe₂O₄或CoFe)增强的PA制备了轻质、柔性、无毒的屏蔽材料。在15~15 000 keV能量范围内对31个离散光子能量点进行了复合材料的 γ 射线衰减效率分析并针对快中

子屏蔽性能进行了测试。结果表明,添加质量分数0.6%钴铁的快中子去除截面较不含钴铁提升34.96%,半价层降低效果较商用聚氯乙烯提升15.96%。在80℃高温和50%湿度服役环境下,仍可以保持98.7%的初始屏蔽效能,相较于传统铅板(高温下效能衰减42%)和PVC(湿度敏感性达31%)具有显著优势。在核反应堆燃料运输容器内衬的应用方面,可使 γ 射线剂量率从初始的3.8 Gy/h降至0.32 Gy/h,同时保持容器柔性变形能力(弯曲半径5 cm)。

4 辐射屏蔽材料加工成型方法

聚合物配方对屏蔽性能有着重要作用,其分散效果对屏蔽效能同样有着举足轻重的作用,目前辐射屏蔽领域多采用纳米颗粒填料以提升分散效果进行聚合物的加工。例如Song等^[42]将微米级碳支架为基底锚定的超细碳化钨纳米颗粒(3~4 nm)嵌入聚丙烯(PP)基体中,该复合材料兼具微米与纳米尺度特性的碳化钨-碳复合材料,有效抑制了纳米颗粒团聚现象,并在宽能谱范围内显著提升了辐射衰减效能。含质量分数45%碳化钨-碳的PP在59.6 keV下展现出 3.597 cm^{-1} 的线性衰减系数和48.3%的辐射防护效率。

除了加工层面上采用纳米颗粒提高填料的分散性外,在成型角度也有诸多研究,例如采用3D打印等增材制造方式实现材料的各层的可设计性。Cao等^[43]制备了含高浓度B、C、W的聚醚醚酮3D打印屏蔽复合材料,实验结果表明,该种材料兼具中子与光子辐射屏蔽能力,且展现出优异的力学性能。Talley等^[44]开发了适用于直接墨水写入增材制造的树脂配方,可轻松定制以屏蔽多种应用场景中不同能量范围的 γ 射线和中子辐射。所研发树脂配方可容纳超高填充量的屏蔽材料:用于 γ 射线屏蔽时铋金属质量分数高达40%,用于中子屏蔽时硼-10金属质量分数高达60%。

除了上述报道在辐射屏蔽领域采用的加工成型方法外,北京化工大学杨卫民团队提出了一种扭转层叠的微纳层叠挤出技术,该技术可通过控制层数变化调控粒子的分散状态,使粒子的分散尺度随层数的增加而变小,从而有效提高粒子在基体中的分散均匀性^[45]。美国凯斯西储大学利用其研制的立交层叠共挤系统成功制备了多层纳米复合材料,且复合材料的阻燃、强度、抗撕裂、抗冲击等性能均有所提高^[46]。该种技术目前在辐射屏蔽领域未检索到相关研究,其功能性及技术匹配性极为契合,未来在大批量辐射屏蔽材料工业化制备及应用方面有巨大前景。

5 结语与展望

随着核能的广泛应用,对高性能辐射防护材料的需求不断增加。聚合物基复合材料作为传统辐射屏蔽材料的新型替代品,以其优良的屏蔽性能及兼具其他功能性成为辐射屏蔽领域的主流。本文综述了近年来聚合物在屏蔽机理及制备方法等方面的研究进展。

(1)辐射防护材料的选择取决于辐射的来源、类型和能量,以及材料对辐射的反应机制。

(2)对于 γ 射线屏蔽,基于Bi、W和Ce等高原子序数金属

的复合材料可以提供有效的屏蔽和良好的机械性能。

(3)对于中子屏蔽,应选择具有高俘获截面的元素,例如B、Li和Gd作为屏蔽组分,可有效地用作中子屏蔽材料。低原子序数值和高原子序数值金属都可用于中子屏蔽,因为中子辐射也会产生次级 γ 射线。具有低Z值的聚合物负责中子衰减,而具有高Z值的金属用作屏蔽相互作用产生的次级 γ 射线。

(4)除了掺杂重金属的类型外,填料在基体中的分散性尤为重要。从加工和成型两个方面分析,一方面是采用纳米颗粒提高分散性,与微米级重金属屏蔽颗粒相比,纳米级重金属颗粒掺入聚合物基体中可以提供更均匀、更好的衰减性能和机械性能;另一方面采用增材制造的方法,实现对材料梯度的设计与制备。

总体来说,根据服役工况,现阶段已经实现兼具柔韧性、弹性、抗拉强度、硬度、透光性和屏蔽性能的聚合物复合材料。在未来的研究中,工业规模的辐射屏蔽材料的制备尤为重要,微纳层叠技术有望在该领域大放异彩。

参考文献

- [1] 胡春玫. 中国核工业, 2025(8):32-34.
HU Chunmei. China Nuclear Industry, 2025(8):32-34.
- [2] 任峰,等. 中国食品药品监管, 2025(9):180-187.
REN Feng, et al. China Food and Drug Administration, 2025(9):180-187.
- [3] PAYNE A, et al. Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences, 2025, 56(6). DOI:10.1016/j.jmir.2025.102123.
- [4] 朱鑫国. 核辐射屏蔽材料设计、制备及辐射生物效应研究[D]. 成都: 四川大学, 2023.
ZHU Xinguo. Design, preparation, and radiation biological effect research of nuclear radiation shielding materials[D]. Chengdu: Sichuan University, 2023.
- [5] ŞAHİN S, et al. Comprehensive Energy Systems: Second Edition [M]. Oxford:Elsevier, 2025:106-159.
- [6] AL-BURIAHI M S, et al. Radiation Physics and Chemistry, 2026, 242. DOI:10.1016/j.radphyschem.2026.113607.
- [7] ALOBEID M, et al. Applied Radiation and Isotopes, 2026, 229. DOI:10.1016/j.apradiso.2025.112365.
- [8] AHMED G S M. Radiation Physics and Chemistry, 2026, 241. DOI:10.1016/j.radphyschem.2025.113544.
- [9] CAO Z Q, et al. Progress in Polymer Science, 2025, 171. DOI:10.1016/j.progpolymsci.2025.102041.
- [10] KÖHLER S, et al. Advances in Colloid and Interface Science, 2026, 349. DOI:10.1016/j.cis.2025.103757.
- [11] PAN J, et al. Materials Chemistry and Physics, 2024, 315. DOI:10.1016/j.matchemphys.2024.129001.
- [12] LI X X, et al. Nuclear Analysis, 2025, 4(2). DOI:10.1016/j.nucana.2025.100173.
- [13] DUBEY K A, et al. Polymer Composites, 2016, 37(3):756-762.
- [14] MUTHAMMA M V, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(37). DOI:10.1002/app.47949.

- [15] EREN B E., et al. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, 306(1):107–117.
- [16] HUSAIN H S, et al. *Iop Conference*, 2018, 454. DOI: 10.1088/1757-899X/454/1/01213.
- [17] STAWARZ S, et al. *International Journal of Mechanics Materials in Design*, 2018, 15(3):585–599.
- [18] 张坤, 等. *应用化学*, 2024, 41(8):1 168–1 174.
Zhang Kun, et al. *Applied Chemistry*, 2024, 41(8):1 168–1 174.
- [19] OZDEMIR H G, et al. *Nuclear Engineering and Technology*, 2025, 57(7). DOI:10.1016/j.net.2025.103512.
- [20] ÇOĞALMİŞ F T, et al. *Applied Radiation and Isotopes*, 2026, 229. DOI:10.1016/j.apradiso.2025.112379.
- [21] KURUCU Y, et al. *Applied Radiation and Isotopes*, 2025, 226. DOI:10.1016/j.apradiso.2025.112255.
- [22] KASSIM H, et al. *Heliyon*, 2024, 10(17). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e37289.
- [23] DONG M G, et al. *Radiation Physics and Chemistry*, 2026, 243. DOI:10.1016/j.radphyschem.2026.113692.
- [24] 吴莹, 等. *北京化工大学学报*, 2023, 50(4):37–41.
Wu Ying, et al. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2023, 50(4):37–41.
- [25] FISLI A, et al. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2026, 19(1). DOI:10.1016/j.jrras.2025.102150.
- [26] GÜNGÖR A, et al. *Progress in Nuclear Energy*, 2018, 106: 262–269.
- [27] ZHANG H, et al. *Reactive and Functional Polymers*, 2026, 218. DOI:10.1016/j.reactfunctpolym.2025.106536.
- [28] ZAILAN F D, et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 186. DOI: 10.1016/j.compositesa.2024.108385.
- [29] LIU X, et al. *Reactive and Functional Polymers*, 2024, 196. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2024.105839.
- [30] SABERI R M, et al. *Radiation Physics and Chemistry*, 2023, 212. DOI:10.1016/j.radphyschem.2023.111201.
- [31] DOROSTKAR M M, et al. *Polymer*, 2025, 334. DOI: 10.1016/j.polymer.2025.128700.
- [32] ALMUTAIRI H. *Radiation Physics and Chemistry*, 2026, 242. DOI:10.1016/j.radphyschem.2026.113623.
- [33] SUN X P, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 2026, 244. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2025.111810.
- [34] SALEM E, et al. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2024, 29(7):547–561.
- [35] KAVANOZ H B, et al. *Radiation Physics and Chemistry*, 2019, 165. DOI:10.1016/j.radphyschem.2019.108446.
- [36] LEE D H, et al. *Metals*, 2021, 11(3). DOI:10.3390/met11030413.
- [37] SHENG C L, et al. *Radiation Physics and Chemistry*, 2025, 229. DOI:10.1016/j.radphyschem.2024.112506.
- [38] WANG G H, et al. *Radiation Physics and Chemistry*, 2017, 140: 322–327.
- [39] SALEM E F., et al. *Progress in Nuclear Energy*, 2023, 165. DOI: 10.1016/j.pnucene.2023.104900.
- [40] ÖZDEMİR T., et al. *Radiation Physics and Chemistry*, 2017, 131: 7–12.
- [41] THAKUR S, et al. *Applied Radiation and Isotopes*, 2026, 229. DOI:10.1016/j.apradiso.2025.112357.
- [42] SONG S D, et al. *Materials Research Bulletin*, 2026, 197. DOI: 10.1016/j.materresbull.2025.113944.
- [43] CAO Y, et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 185. DOI:10.1016/j.compositesa.2024.108352.
- [44] TALLEY S J., et al. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, 188. DOI:10.1016/j.radphyschem.2021.109616.
- [45] 张莉彦, 等. *中国塑料*, 2024, 38(11):70–75.
Zhang Liyan, et al. *China Plastics*, 2024, 38 (11):70–75.
- [46] ZHANG G J, et al. *Polymer*, 2013, 54(16):4 298–4 308.