

亚微米球 $\text{Eu}_2\text{O}_3/\text{B}_4\text{C}/\text{HDPE}$ 复合材料的 制备及中子/伽马辐射屏蔽性能

张捷^{1,2}, 霍志鹏², 钟国强²

(1. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230026;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要 采用均相沉淀法合成了亚微米球 $\text{Eu}_2\text{O}_3(\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S})$ 填料, 将其与不规则形貌的商用 $\text{Eu}_2\text{O}_3(\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C})$ 填料以及 PbO 填料增强复合材料进行了对比研究. XRD 测试结果表明, 合成的 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 属立方晶系, 体心立方格子, $Ia\bar{3}(206)$ 空间群. SEM 测试结果表明, 合成的 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料为粒径均一的亚微米球, 而商用 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料为不规则形貌的微米颗粒. 力学拉伸测试与 DSC 测试结果表明, 制备的 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}/\text{B}_4\text{C}/\text{HDPE}$ (HDPE=高密度聚乙烯) 复合板材的屈服强度和抗拉强度分别为 21.3 MPa 与 21.0 MPa, 熔融温度为 119.7 °C, 均强于商用 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}/\text{B}_4\text{C}/\text{HDPE}$ 板材. 中子和伽马辐射屏蔽测试结果表明, 粒径均一的 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料在 HDPE 基体中分散性最优, 能增强复合材料的屏蔽性能, 厚度为 1.5 cm 的板材具有最优的中子屏蔽率(43.66%), 其伽马射线屏蔽率为 13.48%, 接近采用 PbO 填料的对比复合板材.

关键词 Eu_2O_3 ; 复合材料; 中子; 伽马射线; 辐射屏蔽

中图分类号 O614

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20250298

Preparation and Neutron and Gamma Radiation Shielding Properties of Submicron Spheres $\text{Eu}_2\text{O}_3/\text{B}_4\text{C}/\text{HDPE}$ Composite

ZHANG Jie^{1,2}, HUO Zhipeng^{2*}, ZHONG Guoqiang²

(1. Science Island Branch, Graduate School of University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract Submicron spherical $\text{Eu}_2\text{O}_3(\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S})$ filler was synthesized by homogeneous precipitation method, and a comparative study was conducted with commercial $\text{Eu}_2\text{O}_3(\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C})$ filler with irregular morphology and PbO filler reinforced composite materials. XRD tests show that the synthesized Eu_2O_3 filler ($\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$) is of cubic crystal system, body-centered cubic lattice, $Ia\bar{3}(206)$ space group. SEM tests show that the synthetic $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ filler has submicron spherical morphologies with uniform particle size, while the commercial $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ filler has micron particles with irregular morphologies. Mechanical tensile tests and DSC tests show that the yield stress and tensile stress of the synthetic $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}/\text{B}_4\text{C}/\text{HDPE}$ (HDPE=high density polyethylene) composite material are 21.3 MPa and 21.0 MPa, respectively, and the melting temperature is 119.7 °C, all of which are higher than those of commercial

收稿日期: 2025-10-15. 网络首发日期: 2025-11-24.

联系人简介: 霍志鹏, 男, 博士, 副研究员, 主要从事辐射防护及辐射屏蔽材料方面的研究. E-mail: zhipeng.hu@ipp.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 12575224)、安徽省生态环境科研项目(批准号: 2023hb0017)、安徽省高校协同创新项目(批准号: GXXT-2022-001)、中国聚变技术综合研究设施项目(批准号: 2018-000052-73-01-001228)和合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室)项目(批准号: 21KZL401, 21KHH105, 21KZS205, 24JYZL01, 24JYJB01)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.12575224), the Anhui Province Ecological Environment Research Project, China(No. 2023hb0017), the University Synergy Innovation Program of Anhui Province, China(No. GXXT-2022-001), the Comprehensive Research Facility for Fusion Technology Program of China(No.2018-000052 73-01-001228) and the Programs of Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, China(Nos.21KZL401, 21KHH105, 21KZS205, 24JYZL01, 24JYJB01).

Eu₂O₃-C/B₄C/HDPE composite material. Neutron and gamma radiation shielding tests show that the Eu₂O₃-S filler with uniform particle size has the best dispersion in the HDPE matrix and can enhance the shielding rate of the composite material. The plate with a thickness of 1.5 cm has the best neutron shielding rate(43.66%), and its gamma shielding rate is 13.48%, which is close to the comparison composite material with Pb fillers.

Keywords Eu₂O₃; Composite; Neutron; Gamma ray; Radiation shielding

核能是一种绿色、友好且具有广阔发展前景的清洁能源,但是在核反应过程中会有核辐射产生,其中伽马射线和中子的穿透性极强,必须采取相应的屏蔽防护措施,否则会对人体免疫能力、生殖能力以及神经系统等产生不可逆的损伤^[1-4]. 因此,在核能的开发过程中,对中子和伽马射线屏蔽材料的研究具有重要意义.

屏蔽混凝土^[5]是现代辐射场中应用最广泛的屏蔽材料. 此外,科研人员已经依据不同基体开发出具有中子、伽马辐射屏蔽效果的复合材料,其中包括金属基体^[6]、玻璃基体^[7]、陶瓷基体^[8]以及聚合物基体^[9],不同基体制备复合材料的性能也不尽相同. 屏蔽混凝土虽然成本低且应用广泛,但存在体积大、质量重等缺点,而轻质且易加工的高分子材料能克服这一问题^[10]. 聚合物基辐射屏蔽材料存在基体不耐高温、填料-基体相容性差、填料分散不均匀等问题,导致复合材料性能存在瓶颈. 相关研究表明,进行填料表面改性或减小填料尺寸能够有效增强填料与基体间的界面结合力并提高填料分散的均匀性,降低受外力作用时的应力集中,从而改善复合材料的性能. Jing等^[11]采用界面交联法制备出具有晶态-非晶态分级结构的聚乙烯复合材料,通过调控晶相交联结构,不仅实现了复合材料力学性能与耐热性能的增强,该材料还展现出良好的中子屏蔽能力. Wang等^[12]采用硅烷偶联对Sm₂O₃填料进行表面改性处理,增强了Sm₂O₃填料与基体的界面相容性,提高了分散均匀性. Li等^[13]制备了不同尺寸Gd₂O₃填料的复合材料,纳米Gd₂O₃填料在基体中的分散比微米Gd₂O₃填料更加均匀,复合材料的力学性能与辐射屏蔽性能更好. 聚乙烯是一种理想的中子屏蔽材料,因为其具有非常高的含氢量,并且具有体积小、质量轻、加工简便等优点,所以可作为屏蔽材料的基体. 研究人员发现,碳化硼(B₄C)可被用作中子吸收材料,其不仅热中子吸收截面较高^[14],而且在热中子俘获反应后也只会产生能量较低的次级伽马射线^[15]. 伽马射线的屏蔽效果主要与原子序数(*Z*)有关,一般原子序数越大的材料对伽马射线的屏蔽效果越好,例如金属铅可用作伽马射线屏蔽材料^[16,17]. 但是铅属于重金属,具有很强的生物毒性^[18],这也为其在伽马射线屏蔽方面的应用带来局限性. 因此,亟待开发出安全且环保的伽马射线屏蔽填料. 稀土元素铕(Eu)具有较高的原子序数(*Z*=63),能有效衰减伽马射线,同时其热中子吸收截面较高,且与中子发生俘获反应的半衰期较长,这使得铕可作为一种兼具中子和伽马射线屏蔽功能的材料^[19]. Saudi^[20]等制备了掺Eu³⁺硼酸盐玻璃,结果表明,在硼酸盐玻璃中加入Eu₂O₃填料可以有效提高伽马射线屏蔽性能. El-Khayatt^[21]等用Eu₂O₃填料替代ZnO填料制备出了玻璃材料,结果表明,在低能和高能光子辐照下,材料的屏蔽性能均有所提高. Madak^[22]等通过添加Eu₂O₃来提高陶瓷材料对中子和光子的屏蔽性能,结果表明,添加Eu₂O₃填料可以有效衰减快中子,提高陶瓷的光子和中子屏蔽性能,并且通过调节Eu₂O₃填料的含量可以调整屏蔽性能.

本研究采用均相沉淀法,以六水合硝酸铕和尿素为原料,合成了形貌为亚微米球的Eu₂O₃(Eu₂O₃-S)填料,采用X射线衍射仪(XRD)对两种Eu₂O₃填料的物相进行了表征,采用扫描电子显微镜(SEM)表征和对比了填料及样板断面的微观形貌. 并以高密度聚乙烯(HDPE)为基体,按照相同质量比例制备了Eu₂O₃-S/B₄C/HDPE、商用Eu₂O₃-C/B₄C/HDPE、B₄C/HDPE和PbO/HDPE复合材料样板,研究对比了样板的力学性能、热学性能及中子和伽马辐射屏蔽性能.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

六水合硝酸铕[Eu(NO₃)₃·6H₂O]、尿素(urea)、商用氧化铕(Eu₂O₃-C, 粒径4~6 μm)和碳化硼(B₄C, 粒径2~3 μm),分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;氧化铅(PbO),分析纯,上海阿拉丁生

化科技股份有限公司; HDPE(500目, 熔融指数0.035 g/min), 中国石化茂名石油化工有限公司; 实验中使用的超纯水通过YK-RO-B型舒活泉超纯水机制备。

HC-3018型高速离心机, 合肥安徽中科中佳科学仪器有限公司; SFM-3-II型可调速高能三维(3D)摆震球磨机, 合肥科晶材料技术有限公司; QE-70E型微型密炼机和R32212017型小型热压机, 武汉启恩科技发展有限公司; PC-180型塑料破碎机, 苏州斯铂格智能自动化科技有限公司; HS-ZW-150B型紫外线老化试验箱, Techlab精密仪器(深圳)有限公司; DIL 402 Expedis Supreme型热膨胀仪, 德国Netzsch公司; Smart Lab SE型X射线衍射仪(XRD), 日本Rigaku公司; TESCAN MIRA LMS型扫描电子显微镜(SEM), 泰思肯(中国)有限公司; Q2000型差示扫描量热仪(DSC), 美国TA公司; AGS-X-50N型电子万能试验机, 日本Shimadzu公司; Smart REM型中子探测器, 美国Fluke公司; FHZ672 E-10型伽马辐射探测器, 美国Thermo Fisher Scientific公司。

1.2 实验过程

1.2.1 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料的合成 采用均相沉淀法合成 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料。将4.4606 g(0.01 mol)六水合硝酸铈和12.0120 g(0.20 mol)尿素混合, 并加入800 mL超纯水溶解后移至1000 mL的锥形瓶中; 将锥形瓶置于集热式恒温加热磁力搅拌器上使混合物在80 °C油浴下反应3 h, 反应结束后产物为悬浊液状态, 冷却至室温; 将反应产物悬浊液在8000 r/min转速下离心2 min, 并将离心后的产物移至干燥箱中, 在60 °C恒温条件下干燥6 h; 研磨烘干后的产物, 再将所得粉末移至管式炉中, 在800 °C、空气气氛条件下加热2 h, 得到 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 。合成 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料的化学反应方程式如下:



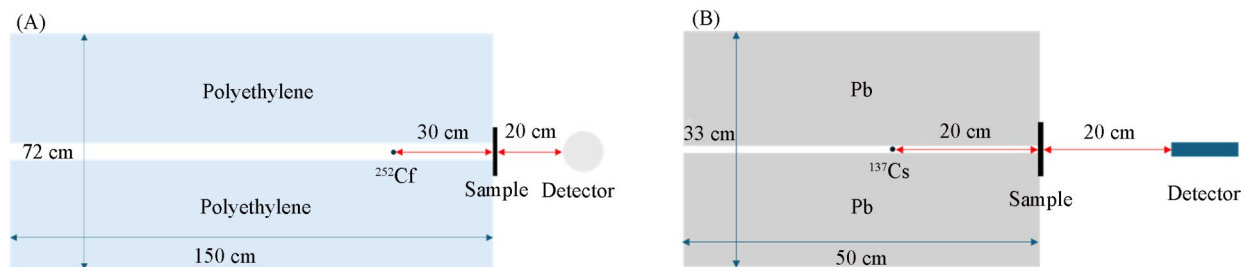
1.2.2 复合材料样板的制备 前期研究发现, 当 $\text{Eu}_2\text{O}_3/\text{B}_4\text{C}/\text{HDPE}$ 的质量比为2:1:7时复合材料样板的屏蔽效果最佳^[23,24]。本实验制备的 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}/\text{B}_4\text{C}/\text{HDPE}$ 样板中也选定为 $m(\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}):m(\text{B}_4\text{C}):m(\text{HDPE})=2:1:7$; 同时为排除质量比对实验结果的影响, $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}/\text{B}_4\text{C}/\text{HDPE}$ 的质量比为2:1:7, PbO/HDPE 和 $\text{B}_4\text{C}/\text{HDPE}$ 的质量比均为3:7。以 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料为例, 样板制备过程具体如下: 首先, 按照2:1:7的质量比分别称取 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 、 B_4C 和HDPE, 并使用球磨机在800 r/min的转速下球磨混合1 h, 以实现3种原料粉末的均匀混合; 然后, 将球磨后的粉料转移至密炼机中, 在200 °C下密炼10~15 min, 使3种粉末进一步熔融混合; 最后, 破碎冷却后的密炼产物, 将破碎颗粒装入热压模具中, 进行热压制备样板。热压操作共包含4个步骤: (1) 将破碎后颗粒装入热压模具中, 在200 °C下进行熔化; (2) 待颗粒完全熔化后, 对模具加压至30 MPa, 保持30 min; (3) 升高温度至240 °C, 增加模具压力至50 MPa, 保持1 h; (4) 待热压完成后通冷却水, 降至室温后进行降压、脱模, 得到复合材料样板。

1.2.3 Eu_2O_3 填料及其复合材料样板的表征 通过XRD测试确定 Eu_2O_3 填料的物相组成, $\text{Cu K}\alpha$ 射线, $\lambda=0.154056 \text{ nm}$, $2\theta=10^\circ\sim 80^\circ$ 。通过SEM测试分别对合成及商用 Eu_2O_3 填料的微观形貌进行观察, 并通过EDS测试分析合成及商用 Eu_2O_3 填料的元素组成; 同时, 对掺入合成及商用 Eu_2O_3 填料的两类复合材料样板的断面进行SEM测试, 得出两种填料在基体中的分布情况。通过电子万能试验机测试样条的力学性能, 测试样条以GB/T 1040.2—2006 1BA型规格进行制备, 拉伸速率为5 mm/min。采用DSC测试分析复合材料的热学性能, 测试气氛为 N_2 气, 测试温度范围为50~200 °C。热膨胀测试样条尺寸为25 mm×4 mm×2 mm, 测试温度范围为-50~75 °C, 升温速率为10 °C/min。

中子屏蔽系统的剖面图如Scheme 1(A)所示, 组成部分主要包括聚乙烯屏蔽筒、高灵敏中子探测器以及 ^{252}Cf 中子辐射源。测试流程如下: 将探测器放置于距离聚乙烯屏蔽筒出射孔20 cm处且正对出射孔, ^{252}Cf 中子辐射源距离屏蔽筒出射孔30 cm, 测量排除自然环境中本底中子剂量的影响后, 未经屏

蔽样板吸收的中子辐射源的剂量读数, 记作 I_n ; 测量装备屏蔽样板时排除自然环境中中子剂量的影响后, 经过屏蔽样板吸收后的中子辐射源的剂量读数, 记作 I_n .

伽马射线屏蔽系统剖面图如 Scheme 1(B) 所示, 组成部分主要包括铅准直屏蔽筒、伽马辐射探测器以及 ^{137}Cs 伽马辐射源. 在伽马射线屏蔽性能测试中, ^{137}Cs 伽马辐射源距离屏蔽筒出射孔 20 cm, 测量排除自然环境中本底伽马射线剂量的影响后, 未经屏蔽样板吸收的伽马辐射源的剂量读数, 记作 $I_{\gamma 0}$; 测量装备屏蔽样板时排除自然环境中伽马射线剂量的影响后, 经过屏蔽样板吸收后的伽马辐射源的剂量读数, 记作 I_{γ} .



Scheme 1 Schematic diagrams of test devices for neutron(A) and gamma ray(B) shielding

1.2.4 屏蔽参数计算 为了表征材料对中子和伽马辐射的屏蔽效果, 引入屏蔽率 $S(\%)$ 这一物理量, 其可由式(6)^[25]描述:

$$S = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100\% \quad (6)$$

式中: I 为经屏蔽样板吸收后的辐射剂量; I_0 为未经屏蔽样板吸收的辐射剂量.

中子具有高散射性, 将入射中子束视作多能宽束, 通过屏蔽材料的中子的能量衰减规律可由修正的 Beer-Lambert 公式[式(7)]描述^[26,27]:

$$I_n = BI_{n0}e^{-\Sigma d} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $I_n(\%)$ 为中子屏蔽率; $\Sigma(\text{cm}^{-1})$ 为材料宏观中子总截面; $d(\text{cm})$ 为复合材料厚度; B 为累积因子^[25].

伽马射线的散射小, 将入射伽马射线视作单能窄束, 通过屏蔽材料的伽马射线的能量衰减规律可由 Beer-Lambert 公式[式(8)]描述^[26,27]:

$$I_{\gamma} = I_{\gamma 0}e^{-\mu d} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $I_{\gamma}(\%)$ 为伽马射线屏蔽率; $\mu(\text{cm}^{-1})$ 为伽马辐射的线性衰减系数.

质量衰减系数($\mu_m, \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)可消除材料密度对伽马射线衰减程度的影响, 可由公式(9)描述^[28]:

$$\mu_m = \mu/\rho \quad (9)$$

式中: $\rho(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ 为屏蔽材料的密度.

半值层 HVL(cm) 为伽马射线强度降低为初始值一半时所经过的屏蔽材料的厚度, 可由公式(10)描述^[28,29]:

$$\text{HVL} = \ln 2/\mu \quad (10)$$

2 结果与讨论

2.1 Eu_2O_3 填料与复合材料样板的表征

合成的 Eu_2O_3 填料($\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$)与商用 Eu_2O_3 填料($\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$)的 XRD 谱图如图 1 所示. 在图 1 中, $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料与 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料在 $2\theta = 28.421^\circ$, 32.926° , 47.266° 和 56.077° 处的衍射峰分别对应于 (222), (400), (440) 和 (622) 晶面, 两者的衍射峰均与体心立方格子 Eu_2O_3 (PDF#34-0392) 的标准衍射峰相吻合并且没有杂峰, 晶格参数为 $a=b=c=1.0868 \text{ nm}$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$, 属于 $Ia\bar{3}(206)$ 空间群. 利用 Scherrer 公式, 由合成 Eu_2O_3 填料各晶面对应的衍射峰数据计算得到 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料的晶粒尺寸 $D_{(222)}=24.47 \text{ nm}$, $D_{(400)}=24.55 \text{ nm}$, $D_{(440)}=23.88 \text{ nm}$, $D_{(622)}=25.26 \text{ nm}$, 其平均晶粒尺寸 $\bar{D}=24.54 \text{ nm}$; 各晶面的结晶度分别

为 $C_{(222)}=33.21\%$, $C_{(400)}=11.34\%$, $C_{(440)}=24.49\%$, $C_{(622)}=19.85\%$, 其总结晶度为 88.89%.

利用扫描电子显微镜观察 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料与 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料的微观形貌. 由 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料的 SEM 照片[图 2(A)]可见, 其形貌为亚微米球形, 平均粒径 $\bar{D}=(468.3\pm 26.9)$ nm, 图中存在尺寸较小的球形, 该现象可根据 Ostwald 熟化理论解释^[30]: 溶液中较小的晶体颗粒相较于较大的晶体颗粒具有更高的曲率、表面能和溶解度, 因此较小的颗粒会逐渐溶解到周围的溶液中, 并在较大的颗粒表面重新沉淀, 从而进一步增大较大颗粒的尺寸. 图 2

(B)为 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料的 SEM 照片, 其粒径为 4~6 μm , 呈不规则形貌, 既有块状形貌也有片状形貌. 有相关报道指出, 填料尺寸均一有利于性能提升. Semaan 等^[31]研究了纳米晶纤维素与微晶纤维素对聚合物复合材料力学性能的影响, 发现粒径分布更小的纳米晶纤维素在提高复合材料力学性能方面具有更加显著的效果. Liu 等^[32]制备了粒径分布更均匀且粒径尺寸更小的改性木质素, 发现改性木质素/HDPE 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率均显著提升. Sousa 等^[33]制备了 HDPE/羟基磷灰石(HA)复合材料, 并对比了由烧结型 HA 填料与非烧结型 HA 填料制备的复合材料的性能, 发现由具有更小粒径分布的非烧结型 HA 填料制备的复合材料在增强强度方面表现出显著效果. 本研究中的 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料相较于商用的 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料具有更小的粒径分布, 因此对于复合材料性能的增强效果会更加显著. 填料在基体内的分布情况也会对屏蔽样板的力学性能和热稳定性产生影响^[34,35]. 图 2(C)和(D)分别为 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料与 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料的屏蔽样板断面 SEM 照片. 对比两者可以看出, $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料在屏蔽样板中仍然保持亚微米球形貌, 并且在样板中的分布比较均匀; 而 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料由于形貌不规则且尺寸差异较大, 导致其在屏蔽样板中的分布极不均匀. 在 Eu_2O_3 分子中, Eu 原子与 O 原子的标准原子数比为 2:3. 元素分析结果表明, $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 和 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料中的 Eu 元素和 O 元素含量分别为 37.58%, 62.42% 和 40.35%, 59.65%, 均接近 2:3 的标准原子数比.

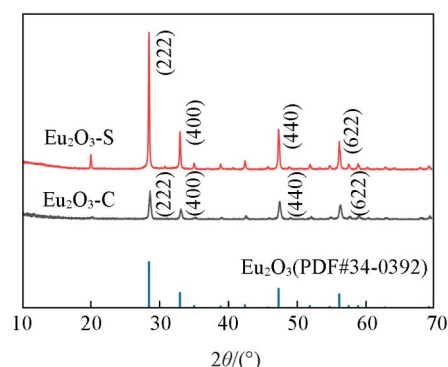


Fig. 1 XRD patterns of $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ and $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ fillers

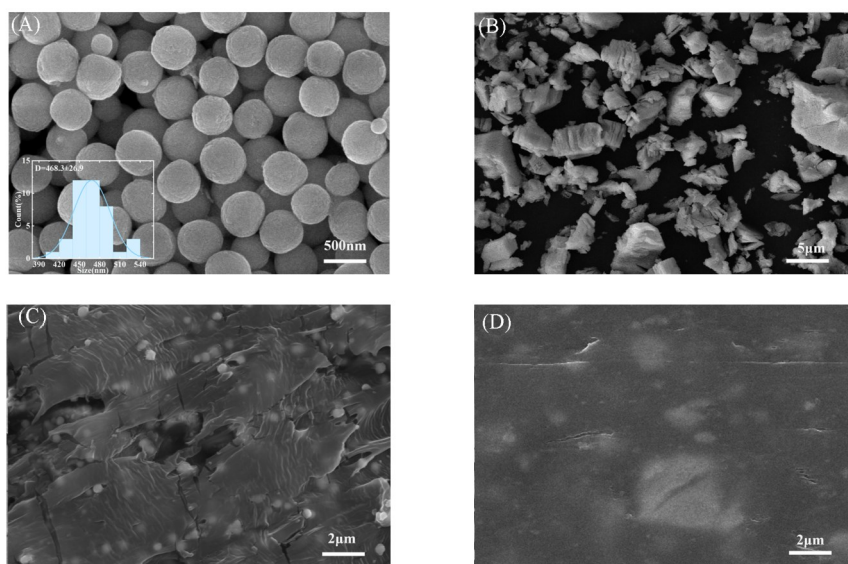


Fig. 2 SEM images of $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ (A) and $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ (B) fillers, and fracture surface of composites doped with $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ (C) and $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ (D) fillers

2.2 复合材料样板的力学性能

图 3(A)为复合材料样板的应力-应变曲线, 图 3(B)为在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下持续 15 d 的紫外线加速老化实验

后,不同复合材料在老化前后对应的屈服强度相对比值.屈服强度是材料产生屈服现象时的最小应力,抗拉强度是材料拉断前承受的最大拉应力,杨氏模量用于表征材料抵抗形变的能力. $\sigma_{y1}\sim\sigma_{y5}$ 分别为HDPE样板、 B_4C /HDPE样板、 Eu_2O_3 -S/ B_4C /HDPE样板、 Eu_2O_3 -C/ B_4C /HDPE样板以及PbO/HDPE样板的屈服强度, $\sigma_{t1}\sim\sigma_{t5}$ 分别是上述样板的抗拉强度.

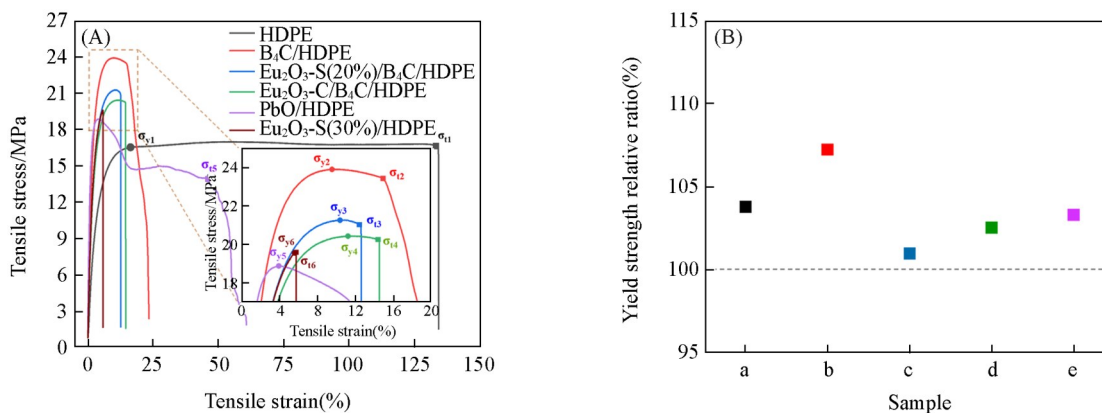


Fig. 3 Stress-strain curves of different composite samples(A) and yield strength relative ratio of different composites before and after UV accelerated ageing at 60 °C for 15 d

(B) a. HDPE; b. B_4C /HDPE; c. Eu_2O_3 -S/ B_4C /HDPE; d. Eu_2O_3 -C/ B_4C /HDPE; e. PbO/HDPE.

从图3中可以看出,含有填料的样板的屈服强度和抗拉强度均高于HDPE样板.由表1可知,含有填料的样板的杨氏模量均高于HDPE样板.导致以上现象的主要原因是 B_4C 填料、 Eu_2O_3 填料以及PbO填料的引入对HDPE分子链的迁移产生抑制效果^[36,37],从而使样板的力学性能得到了提升.断裂伸长率是表征材料塑性的重要指标.由图3和表1中可以看出,添加 B_4C 填料、 Eu_2O_3 填料和PbO填料的样板的断裂伸长率相比于HDPE样板明显减小,这是因为在HDPE基体中引入的填料会限制其分子链运动^[38],从而降低了样板的断裂伸长率.有研究报道表明,在低填料含量的情况下,复合材料性能的提升可归因于填料分散均匀性的提升^[39].因本文中 Eu_2O_3 -S填料具有均一的粒径尺寸,在HDPE基体中的分散更加均匀,从而提升了复合材料的力学性能和热稳定性.也有研究表明^[40],当填料含量较低时,填料-基体间的相互作用较强,此时复合材料的力学性能较好;而当填料含量过高时,填料-填料间的界面相互作用增加,填料-基体间界面相互作用被削弱,复合材料性能反而会下降.根据这一机制,本研究将 Eu_2O_3 -S填料的含量(质量分数)提高到30%并测试了该复合材料的拉伸力学性能.如图3(A)所示,相比 Eu_2O_3 -S填料含量为20%的复合材料, Eu_2O_3 -S填料含量为30%的复合材料的拉伸强度和断裂伸长率均降低.这是由于填料-填料间的界面相互作用增加而填料-基体间的界面相互作用被削弱导致的^[40]. Eu_2O_3 -S/ B_4C /HDPE复合材料比 Eu_2O_3 -C/ B_4C /HDPE复合材料具有更高的屈服强度和拉伸强度,同时 Eu_2O_3 -S填料比 Eu_2O_3 -C填料在HDPE基体中的分散更加均匀,因此能够提供更多的限制位点,阻碍HDPE分子链运动的能力更强.由图3(B)可知,在60 °C下连续紫外光照射15 d后,含有 Eu_2O_3 填料的复合材料相较于其它复合材料,老化前后对应的屈服强度相对比值更低,这是由分散在HDPE基体中的 Eu_2O_3 填料的紫外吸收效应导致的.有报道表明 Eu_2O_3 分子具有紫外吸收能力,这是由于电荷从 O^{2-} 的填满2p轨道转移跃迁到 Eu^{3+} 部分填充4f轨道导致的^[41,42],该特性有助于延长材料的使用寿命.

Table 1 Tensile parameters of composite samples

Sample	Yield stress, σ_y /MPa	Tensile stress, σ_t /MPa	Young's modulus /MPa	Elongation at break (%)
HDPE	16.5	16.7	639.2	134.3
B_4C /HDPE	23.9	23.4	1149.3	23.5
Eu_2O_3 -S(20%)/ B_4C /HDPE	21.3	21.0	1060.9	12.6
Eu_2O_3 -C/ B_4C /HDPE	20.4	20.3	1005.5	14.5
PbO/HDPE	18.9	17.6	809.3	46.1
Eu_2O_3 -S(30%)/HDPE	19.6	19.6	1170.7	5.1

值得注意的是,与其它复合材料相比, B_4C /HDPE 复合材料具有更高的屈服应力、拉伸强度和杨氏模量. 因为 HDPE 属于非极性高分子材料,其分子链不含极性基团, B_4C 分子中的 B—C 共价键的极性较弱,而 Eu_2O_3 和 PbO 填料的离子键具有强的分子极性^[43],因此 B_4C 填料与 HDPE 基体具有更好的相容性,使得 B_4C /HDPE 复合材料展现出更优异的力学性能.

2.3 复合材料样板的热稳定性

图 4(A) 为复合材料样板的 DSC 曲线, T_p 为复合材料样板 DSC 曲线熔融峰的峰值温度. HDPE 样板、 B_4C /HDPE 样板、 Eu_2O_3 -S/ B_4C /HDPE 样板、 Eu_2O_3 -C/ B_4C /HDPE 样板以及 PbO/HDPE 样板的 T_p 值分别为 112.6, 114.6, 119.7, 116.1 以及 115.2 °C. 对比可知,含有填料的样板的 T_p 值均高于 HDPE 样板,这是因为向 HDPE 基体中加入填料后,会在基体内生成大量的限制位点,不仅会使基体分子链的迁移率下降,还会导致其中 C—C 键的热振动减弱^[44];同时,在本研究中的填料含量条件下,填料-基体界面间的相互作用较强,因此复合材料的热稳定性提升^[40]. 将 Eu_2O_3 -S/ B_4C /HDPE 与 Eu_2O_3 -C/ B_4C /HDPE 样板进行对比发现,含有 Eu_2O_3 -S 填料的样板 T_p 值大于含有 Eu_2O_3 -C 填料的 T_p 值,这是因为合成的 Eu_2O_3 -S 填料具有规则的亚微米球形貌,尺寸较小,并且其在 HDPE 基体中分布均匀,这使得 Eu_2O_3 -S 填料在 HDPE 基体中可以产生更多的限制位点;而商用 Eu_2O_3 -C 填料形貌不规则,粒径较大且在基体中的分布极不均匀. 从图 4(B) 中可以看出,添加填料的复合材料的热膨胀系数均低于纯 HDPE,这是因为 B_4C 的热膨胀系数为 $3.2 \times 10^{-6} K^{-1}$ ^[45], Eu_2O_3 为 $9.0 \times 10^{-6} K^{-1}$ ^[46], PbO 为 $16.0 \times 10^{-6} K^{-1}$ ^[47],均低于 HDPE 的热膨胀系数 ($\sim 100 \times 10^{-6} K^{-1}$)^[48]. 添加 Eu_2O_3 -S 填料的复合材料的热膨胀系数是最低的,这是因为 Eu_2O_3 -S 填料具有均一的粒径尺寸,在 HDPE 基体中的分散更加均匀,从而提升了复合材料热稳定性. 这表明 Eu_2O_3 -S 填料能有效提升复合材料在极端温度下的热稳定性, Eu_2O_3 -S/ B_4C /HDPE 复合材料具有最佳的热稳定性.

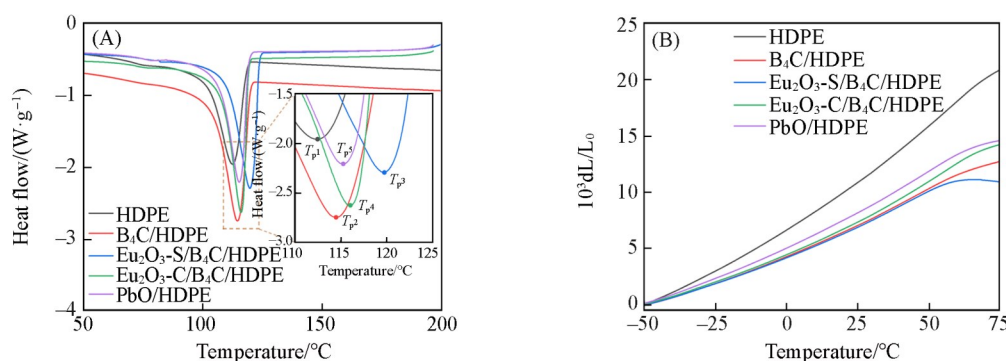


Fig. 4 DSC curves(A) and thermal expansion curves(B) of different composites

2.4 复合材料样板的辐射屏蔽性能

图 5(A) 为不同元素的中子截面图,图 5(B) 为不同填料的质量衰减系数曲线. 从图 5(A) 中可以看出,当中子能量为热中子能级 (0.0253 eV) 时, Eu 元素具有最高热中子吸收截面 (4553 barn), B 元素次之 (769 barn), Pb 的热中子吸收截面最低 (11 barn). 本研究中的 ^{137}Cs 伽马辐射源的能量为 0.662 MeV. 从图 5(B) 中可以看出,不同填料的质量衰减系数大小依次为 $PbO > Eu_2O_3 > B_4C$. PbO 对于伽马射线的屏蔽能力优于 Eu_2O_3 ,但 Eu 的热中子吸收截面更高,具有更好的中子屏蔽能力,因此, Eu_2O_3 可作为一种优秀的中子和伽马射线双功能屏蔽填料.

Scheme 2 示出了中子和伽马光子与添加 Eu_2O_3 填料的复合材料相互作用的协同屏蔽机理. HDPE 基体中含有大量氢原子等轻核元素,可通过弹性散射与入射中子相互作用,迅速降低中子的能量;入射中子可以与 Eu 原子发生非弹性碰撞,降低能量. 当入射中子的能量降低到热中子能级时,热中子易被热中子吸收截面高的 B 元素和 Eu 元素捕获^[49]. 同时 Eu 和 B 对中子的吸收会产生次生伽马射线,而高原子序数的 Eu 原子可以吸收入射伽马射线与次生伽马射线, Eu 原子通过康普顿散射机制与光子相互作用,降低光子的能量,而核外电子得能量后形成反冲电子,同时入射光子的运动轨迹会改变,因为其损失能量变为散射光子. 当入射光子的能量降低到 0.1 MeV 时^[50],光子可以通过光电效应与 Eu 原子相互作用,该过程所发射的 X 射线可以被 Eu 原子吸收.

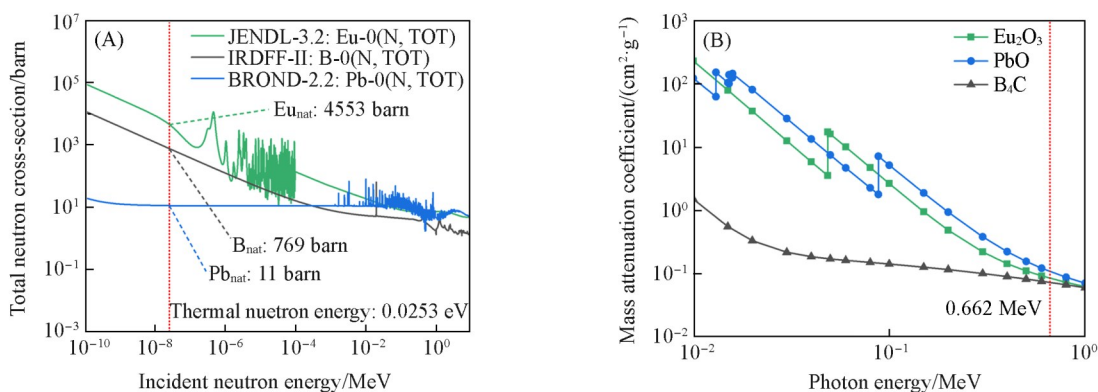
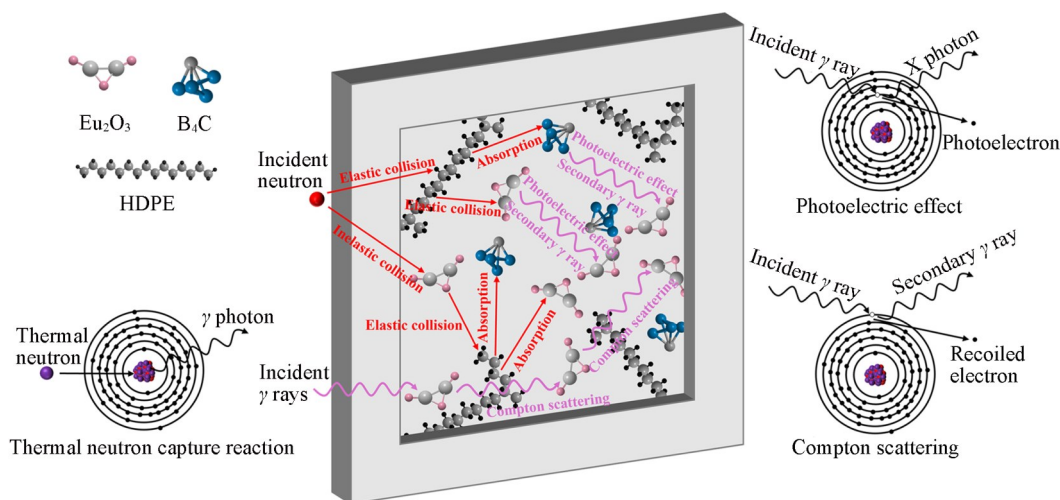


Fig. 5 Total neutron cross-sections of different elements(A) and curves of the mass attenuation coefficients (B) of different fillers varying with energy



Scheme 2 Mechanism diagram of composite materials interacting with neutrons and γ ray

图6(A)示出了样板在 ^{252}Cf 中子源辐照下的中子透过率,图6(B)示出了样板在 ^{137}Cs 伽马源辐照下的伽马射线透过率.从图6(A)中可以看出,中子透过率大小依次为 $HDPE > PbO/HDPE > B_4C/HDPE > Eu_2O_3-C/B_4C/HDPE > Eu_2O_3-S/B_4C/HDPE$,这是因为元素的热中子吸收截面越高,对中子的屏蔽效果越好;此外,含有 Eu_2O_3-S 填料的样板较含有 Eu_2O_3-C 填料的样板的透过率更低,这是因为合成的 Eu_2O_3-S 的形貌规则且粒径均一,在基体中的分布更加均匀.从图6(B)中可以看出,含有填料的样板的伽马射线透过率均低于HDPE样板,这是因为填料中元素的原子序数更大,具有更好的伽马辐射屏蔽效果.同样,含有规则形貌 Eu_2O_3-S 填料的样板的伽马射线透过率低于含有不规则形貌商用 Eu_2O_3-C 填料的样

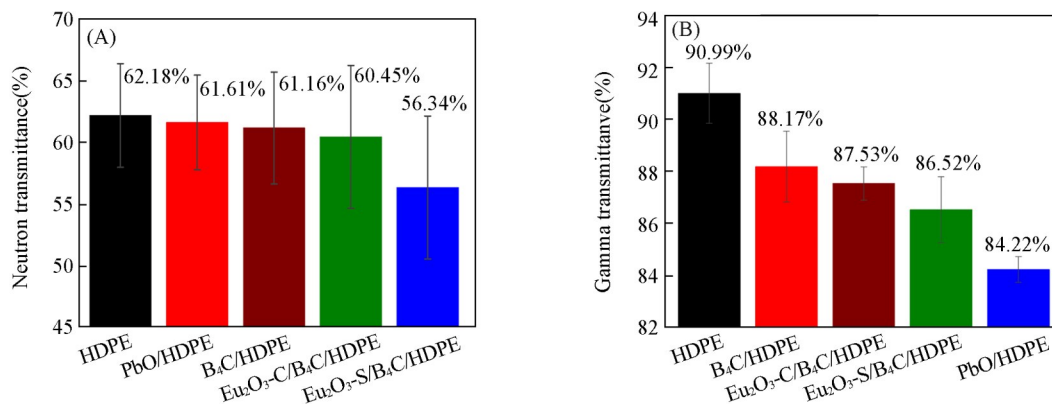


Fig. 6 Neutron transmittances of samples under the ^{252}Cf neutron source(A) and gamma transmittances of samples under the ^{137}Cs gamma source(B)

板. 合成的亚微米球 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料因具有较小且均一的粒径与更加均匀的分散性, 与入射中子和伽马光子发生相互作用的几率更大, 更有利于提高复合材料的辐射屏蔽性能. 从表 2 可知, $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S/B}_4\text{C/HDPE}$ 复合材料具有最大的宏观中子总截面 ($\Sigma=0.383\text{ cm}^{-1}$), 其线性衰减系数 $\mu=0.097\text{ cm}^{-1}$, 质量衰减系数 $\mu_m=0.079\text{ cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$, 半值层 $\text{HVL}=7.15\text{ cm}$.

Table 2 Neutron and gamma ray shielding parameters of the prepared samples

Sample	$S_n(\%)$	$S_\gamma(\%)$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Σ/cm^{-1}	μ/cm^{-1}	$\mu_m/(\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1})$	HVL/cm
HDPE	37.82%	9.01%	0.931	0.317	0.063	0.068	11.0
$\text{B}_4\text{C/HDPE}$	38.39%	11.83%	1.113	0.323	0.084	0.075	8.25
$\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S/B}_4\text{C/HDPE}$	43.66%	13.48%	1.224	0.383	0.097	0.079	7.15
$\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C/B}_4\text{C/HDPE}$	39.55%	12.47%	1.248	0.336	0.089	0.071	7.79
PbO/HDPE	38.84%	15.78%	1.221	0.328	0.114	0.516	6.08

值得注意的是, PbO/HDPE 样板的伽马射线透过率是所有样板中最低的, 且具有最大的线性衰减系数 ($\mu=0.114\text{ cm}^{-1}$), 最大的质量衰减系数 ($\mu_m=0.516\text{ cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$) 以及最小的半值层 ($\text{HVL}=6.08\text{ cm}$). 这是因为 Pb 具有高原子序数 ($Z=82$), 对伽马射线具有优良的吸收效果. Pb 是一种常用的重金属伽马射线屏蔽材料, 但其具有很强的生物毒性, 长期接触会对人的健康产生危害. 表 3 示出了在相同辐射源条件下, 文献报道的复合材料与本研究制备的复合材料的辐射屏蔽性能. 可以看出, 本研究制备的亚微米球 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料不仅对伽马射线的屏蔽效果好, 且生物毒性远低于 PbO 填料, 可作为 PbO 填料的替代填料.

Table 3 Radiation shielding performance of different composites

Composite	Shielding field	Shielding performance	Ref
30%B/70%HDPE	Neutron	$S_n=92\%$ (^{252}Cf)	[51]
10% Er_2O_3 /90%ABS	γ -rays	$\text{HVL}=8.0\text{ cm}$ (^{137}Cs)	[52]
20% PbWO_4 /10% B_4C /70%HDPE	Neutron and γ -rays	$\Sigma=0.224\text{ cm}^{-1}$ (^{252}Cf); $\text{HVL}=6.48\text{ cm}$ (^{137}Cs)	[53]
20% $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ /10% B_4C /70%HDPE	Neutron and γ -rays	$\Sigma=0.383\text{ cm}^{-1}$ (^{252}Cf); $\text{HVL}=7.15\text{ cm}$ (^{137}Cs)	This work

3 结 论

采用均相沉淀法制备了微观形貌为亚微米球的 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料, 并将其与不规则形貌的商用 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料和具有生物毒性的 PbO 填料进行了对比. 结果表明, 与 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料相比, $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料在各项性能上均更加优异. $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料与 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料均为立方晶系, 体心立方格子, 属于 $Ia\bar{3}(206)$ 空间群, 但 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料具有规则的亚微米球形貌并且粒径均匀, 而商用 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料形貌不规则且粒径差异较大, 因此前者在 HDPE 基体链段中形成的限制位点更多, 使得 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S/B}_4\text{C/HDPE}$ 复合材料在力学性能和热稳定性上的表现更加突出. 形貌规整且尺寸均一的 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料比商用 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-C}$ 填料在基体中的分布更均匀, 分散性更好, 因此 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S/B}_4\text{C/HDPE}$ 复合材料对中子和伽马射线的屏蔽性能也更优秀. $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S/B}_4\text{C/HDPE}$ 复合材料在 ^{252}Cf 中子源辐照条件下具有 43.66% 的中子屏蔽率, 高于其它对比材料; 在 ^{137}Cs 伽马源辐照条件下具有 13.48% 的伽马射线屏蔽率, 仅略低于 PbO/HDPE 复合材料. 这是因为 Pb 元素的原子序数大于稀土元素 Eu. 亚微米球 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-S}$ 填料可作为高效无毒的双功能辐射屏蔽填料的替代选择.

参 考 文 献

- [1] Akiyama M., *Int. J. Radiat. Biol.*, **1995**, 68(5), 497—508
- [2] Lad J., Rusin A., Seymour C., Mothersill C., *Environ. Res.*, **2019**, 175, 84—99
- [3] Thomas G. A., Symonds P., *Clin. Oncol.*, **2016**, 28(4), 231—236
- [4] Xu Y., Kang J. J., Yuan J. H., *Sustainability*, **2018**, 10(6), 2086
- [5] Kurudirek M., *Nucl. Eng. Des.*, **2014**, 280, 440—448
- [6] Levet A., Kavaz E., Özdemir Y., *J. Alloy. Compd.*, **2020**, 819, 152946
- [7] Gomaa H. M., Sayyed M. I., Tekin H. O., Lakshminarayana G., El-Dosoky A. H., *Physica B*, **2019**, 567, 109—112
- [8] Katoh Y., Snead L. L., Szlufarska I., Weber W. J., *Curr. Opin. Solid St. M.*, **2012**, 16(3), 143—152

- [9] Irim S. G., Wis A. A., Keskin M. A., Baykara O., Ozkoc G., Avci A., Dogru M., Karakoç M., *Radiat. Phys. Chem.*, **2018**, *144*, 434—443
- [10] Nambiar S., Yeow J. T. W., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2012**, *4*(11), 5717—5726
- [11] Jing H., Geng L. Y., Ling Y. Q., Luo Y. F., Liang M., Heng Z. G., Zou H. W., Pan X. Q., Wu Y., Qiu S. Y., Qian R. L., *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2025**, *64*(25), 12500—12511
- [12] Wang H. Q., Huang Q. Y., Zhai Y. T., *Polymers*, **2022**, *14*(3), 638
- [13] Li R., Gu Y. Z., Wang Y. D., Yang Z. J., Li M., Zhang Z. G., *Mater. Res. Express*, **2017**, *4*(3), 0350354
- [14] Li X. M., Wu J. Y., Tang C. Y., He Z. K., Yuan P., Sun Y., Lau W. M., Zhang K., Mei J., Huang Y. H., *Compos. Part B-Eng.*, **2019**, *159*, 355—361
- [15] Adeli R., Shirmardi S. P., Ahmadi S. J., *Radiat. Phys. Chem.*, **2016**, *127*, 140—146
- [16] Singh V. P., Badiger N. M., *Ann. Nucl. Energy*, **2014**, *64*, 301—310
- [17] Wu Y., Zhang Q. P., Zhou D., Zhou Y. L., Zheng J., *J. Alloy. Compd.*, **2017**, *727*, 1027—1035
- [18] Kumar A., Kumar A., Cabral-Pinto M. M. S., Chaturvedi A. K., Shabnam A. A., Subrahmanyam G., Mondal R., Gupta D. K., Malyan S. K., Kumar S. S., Khan S. A., Yadav K. K., *Int. J. Env. Res. Pub. He.*, **2020**, *17*(7), 2179
- [19] Kinno M., Kimura K., Ishikawa T., Miura T., Ishihama S., Hayasaka N., Nakamura T., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **2002**, *39*(3), 215—225
- [20] Saudi H. A., Abd-Allah W. M., Shaaban K. S., *J. Mater. Sci-Mater. El.*, **2020**, *31*(9), 6963—6976
- [21] El-Khayatt A. M., Saudi H. A., AlRowis N. H., *Sustainability*, **2023**, *15*(12), 9245
- [22] Madak Z., Oto B., Kavaz E., Çakar N., *J. Aust. Ceram. Soc.*, **2025**
- [23] Huo Z. P., Lu Y. D., Zhang H., Zhong G. Q., *Compos. Sci. Technol.*, **2024**, *257*, 110827
- [24] Lu Y. D., *Preparation and Properties of Micro-nano Rare Earth Oxide Fillers Reinforced HDPE Neutron and Gamma Composite Shielding Materials*, University of Science and Technology of China, Hefei, **2024** (鲁义东. 微纳稀土氧化物填料增强HDPE中子伽马复合屏蔽材料的制备及性能研究, 合肥: 中国科学技术大学, **2024**)
- [25] Lu Y. D., Huo Z. P., Zhang H., Zhong G. Q., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, *45*(9), 20240142 (鲁义东, 霍志鹏, 张宏, 钟国强. 高等学校化学学报, **2024**, *45*(9), 20240142)
- [26] Abutalib M. M., Yahia I. S., *Mat. Sci. Eng. C-Mater.*, **2017**, *78*, 1093—1100
- [27] Alfryyan N., Alrowaili Z. A., Alomairy S., Nabil I. M., Al-Buriah M. S., *Silicon*, **2023**, *15*(18), 8031—8043
- [28] Hegazy H. H., Al-Buriah M. S., Alresheedi F., El-Agawany F. I., Sriwunkum C., Neffati R., Rammah Y. S., *Ceram. Int.*, **2021**, *47*(2), 2772—2780
- [29] Boukhris I., Kebaili I., Al-Buriah M. S., Alalawi A., Abouhaswa A. S., Tonguc B., *Ceram. Int.*, **2020**, *46*(15), 24435—24442
- [30] Koroleva M. Y., Yurtov E. V., *Russ. Chem. Rev.*, **2021**, *90*(3), 293—323
- [31] Semaan P., Zahran A., Schlapp-Hackl I., Tehrani-Bagha A. R., Mustapha S., *J. Appl. Polym. Sci.*, **2024**, *141*(14), e55180
- [32] Liu W. Y., Yi S. M., Liu Z. L., Mo Q. F., Xian X. Q., Ma L. Y., Li Y. M., *Ind. Crop. Prod.*, **2022**, *189*, 115842
- [33] Sousa R. A., Reis R. L., Cunha A. M., Bevis M. J., *J. Mater. Sci-Mater M.*, **2003**, *14*(6), 475—487
- [34] Ratanawilait T., Nakawirok K., Deachsrijan A., Homkhiew C., *Fiber. Polym.*, **2014**, *15*(10), 2160—2168
- [35] Shah A. U. R., Prabhakar M. N., Wang H., Song J. I., *Polym. Compos.*, **2018**, *39*(7), 2420—2430
- [36] Huo Z. P., Lu Y. D., Chen Z. Y., Zhang J., Zhang H., Zhong G. Q., *Ceram. Int.*, **2025**, *51*(2), 2360—2372
- [37] Mahmoud M. E., El-Khatib A. M., El-Sharkawy R. M., Rashad A. R., Badawi M. S., Gepreel M. A., *J. Appl. Polym. Sci.*, **2019**, *136*(31), 47812
- [38] An N., Zhu Y., Wang X., Li Y., Liu T., Fang X., Lu Z., Yang B., Sun J., *CCS Chemistry*, **2023**, *5*(10), 2312—2323
- [39] Celebi H., Duran S., Dogan A., *Polym-Plast. Tech. Mat.*, **2022**, *61*(11), 1191—1203
- [40] Joseph T., Uma S., Philip J., Sebastian M. T., *J. Mater. Sci-Mater. El.*, **2012**, *23*(6), 1243—1254
- [41] Duan C. J., Chen H. H., Yang X. X., Zhao J. T., *Opt. Mater.*, **2006**, *28*(8/9), 956—961
- [42] Guo R., Tang S. L., Zhong S. B., Luo L., Cheng B. C., Xiong Y. H., *Solid State Sci.*, **2015**, *50*, 65—68
- [43] Liang J. Z., *Compos. Part B-Eng.*, **2013**, *51*, 224—232
- [44] Mishra T. K., Kumar A., Verma V., Pandey K. N., Kumar V., *Compos. Sci. Technol.*, **2012**, *72*(13), 1627—1631
- [45] Pozdniakov A. V., Lotfy A., Qadir A., Zolotarevskiy V. S., *Phys. Met. Metallogr.*, **2016**, *117*(8), 783—788
- [46] Vanuiter L. G., Obryan H. M., Guggenheim H. J., Barns R. L., Zydzik G., *Mater. Res. Bull.*, **1977**, *12*(4), 307—314
- [47] Schwarz J., Ticha H., *Sn Appl. Sci.*, **2021**, *3*(4), 484
- [48] Dey T. K., Tripathi M., *Thermochim. Acta*, **2010**, *502*(1/2), 35—42
- [49] Yu H. W., Wang Z., Xue Z. B., Shang X. S., Zhang Q. W., Zhang L., Li S. D., *Appl. Radiat. Isotopes*, **2022**, *190*, 110486
- [50] Pinkau K., *Exp. Astron.*, **2009**, *25*(1—3), 157—171
- [51] Balasundar S., Chandrasekaran S., Subramanian, Venkatraman B., *Ann. Nucl. Energy*, **2021**, *153*, 108083
- [52] Gultekin B., Bulut F., Yildiz H., Us H., Ogul H., *Nucl. Eng. Technol.*, **2023**, *55*(12), 4664—4670
- [53] Huo Z. P., Chen Z. Y., Lu Y. D., Zhong G. Q., *Compos. Part A-Appl. S.*, **2025**, *197*, 109011

(Ed.: H, K, M)