

文章编号: 1000-7032(2026)06-0935-13

用于辐射探测及防护的高负载透明复合物研究进展

刘凌云, 张玉海*

(济南大学 前沿交叉科学研究院, 山东 济南 250022)

摘要: 辐射相关技术在医疗诊断、核工业监测等领域的应用日趋广泛,对探测及防护材料综合性能提出了更高的要求。传统无机闪烁晶体、有机塑料闪烁体及铅基防护材料均存在固有缺陷,难以兼顾性能与应用需求。高负载透明复合物突破了“填充量”与“透明性”的核心矛盾,通过大量的功能纳米单元强化辐射相互作用效率,以优异的光学透明性保障信号传输,成为领域研究热点。本文系统综述其合成策略,重点探讨在辐射探测、成像及防护三大核心领域的应用进展,总结当前挑战与未来方向,为材料优化及产业化应用提供参考。

关键词: 高负载透明复合物; 辐射探测; 辐射成像; 辐射防护

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260032

CSTR: 32170.14.CJL.20260032

Research Progress of High-loading Transparent Composites for Radiation Detection and Protection

LIU Lingyun, ZHANG Yuhai*

(Institute of Advanced Interdisciplinary Research (IAIR), University of Jinan, Jinan 250022, China)

* Corresponding Author, E-mail: ifc_zhangyh@ujn.edu.cn

Abstract: The application of radiation-related technologies in fields such as medical diagnosis and nuclear industry monitoring is becoming increasingly widespread, placing higher demands on the comprehensive performance of detection and protective materials. Traditional inorganic scintillation crystals, organic plastic scintillators, and lead-based shielding materials all suffer from inherent limitations, making it difficult to balance performance with practical application requirements. High-loading transparent composites overcome the fundamental conflict between “filler loading” and “optical transparency” by utilizing a high density of functional nanounits to enhance radiation interaction efficiency, while maintaining excellent optical transparency to ensure signal transmission. Consequently, these composites have emerged as a major research focus in the field of radiation materials. This article systematically reviews their synthesis strategies, focusing on application progress in the three core areas of radiation detection, imaging and shielding. It also summarizes current challenges and future directions, aiming to provide guidance for material optimization and industrial application.

Keywords: high-loading transparent composites; radiation detection; radiation imaging; radiation protection

1 引言

在医疗诊断、核工业监测、安全检测等现代科技领域,辐射相关技术的应用日益广泛,对探测及

防护材料的综合性能提出了更为严苛的要求^[1-4]。辐射探测的灵敏度、辐射成像的清晰度以及辐射防护的安全性及舒适性,直接取决于材料对辐射的响应效率与信号传输能力^[5-6]。长期以来,辐射

收稿日期: 2026-01-29; 修订日期: 2026-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(52472206); 山东省自然科学基金(ZR2023JQ026); 济南市“新高校20条”项目(202228091)
Supported by National Natural Science Foundation of China (52472206); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2023JQ026); 20-Item Project in Universities of Jinan City (202228091)

探测及成像领域依赖于几类特征分明的传统材料体系。以铯掺杂碘化铯($\text{CsI}(\text{Tl})$)和掺铈硅酸钇镨($\text{LYSO}:\text{Ce}$)为代表的无机闪烁晶体虽具备高原子序数(Z)带来的优异辐射阻挡本领及高光产额,但其高昂的成本、固有的脆性以及难以加工成大尺寸或复杂形状的优点,严重限制了其应用范围与集成灵活性^[7-9]。有机塑料闪烁体虽具有成本低廉、易于加工成型、衰减快等优势,却因材料组成元素的低原子序数而导致对高能光子的相互作用截面低、光产额有限,难以实现高灵敏度的能谱分辨^[10-11]。在辐射防护领域,传统的铅或含铅玻璃虽屏蔽性能优异,但其固有的高密度、毒性、不透明性及机械柔性差等问题,使其无法满足现代柔性电子、可穿戴设备及需要视觉观察的精密仪器等新兴场景的应用需求^[12]。

高负载透明复合物作为一类兼具高功能组分负载量与优异光学透明性的新型材料,解决了传统材料“填充量”与“透明性”之间难以兼顾的核心矛盾^[13]。在复合体系中引入高含量的功能纳米单元(如高原子序数纳米颗粒、发光纳米晶等)是提升辐射吸收、闪烁发光等核心性能的基础,能够增强材料与辐射的相互作用效率,突破传统材料在探测灵敏度、屏蔽效能等方面的瓶颈;而良好的光学透明性则是保障信号无损耗传输、成像清晰度提升的前提,可避免功能组分团聚导致的光散射与信号衰减,实现从辐射响应到可视化输出的高效转化^[14-17]。二者的协同优化使高负载透明复合物在辐射相关场景中展现出不可替代的应用价值。

近年来,科研工作者通过创新合成策略、优化界面设计等手段,在高负载透明复合物的制备与应用方面取得了一系列突破性进展。本文将系统综述高负载透明复合物的合成策略,重点探讨其在辐射探测、辐射成像及辐射防护三大核心领域的应用研究进展,并总结当前材料发展面临的挑战与未来发展方向,为该类材料的进一步优化与产业化应用提供参考。

2 高负载透明复合物合成策略

尽管通过引入功能纳米颗粒能显著提高复合材料辐射相关的性能,但实现高负载下的光学透明性仍是制备工艺中的关键瓶颈。高负载的纳米颗粒由于较高的表面能,倾向于颗粒团聚,导致分散系数严重,雾度增大^[13, 18]。例如, Ou 等将 $\text{Na-LuF}_4: 15\% \text{Tb}@ \text{NaYF}_4$ 纳米晶负载到聚二甲基硅氧

烷(PDMS)透明基质中,制备了透明的X射线成膜屏^[19]。但是,当纳米晶负载量超过2.5%(质量分数)时,该薄膜的透明度几乎完全丧失。因此,如何同时实现纳米功能单元的“高负载”和体系光学“透明性”一直是难以解决的问题。要制备高质量的透明复合物,主要受两个关键参数的制约:一方面,根据瑞利散射理论,透明复合物的散射强度主要由基体和嵌入纳米晶之间的折射率差异(Δn)所决定,较小的差异会导致散射减弱,从而得到透明的复合物(图1(a))^[20];另一方面,纳米晶的粒径从根本上影响薄膜的性能,当纳米晶的尺寸足够小时,即使与聚合物基质的折射率相差较大,也可以实现复合物的高负载与透明(图1(b))^[21]。例如, Zhang 等以 LaF_3 纳米晶为模型,利用瑞利散射公式对薄膜透明度进行了模拟,发现在尺寸小于10 nm 时,透明薄膜可以容忍质量分数90%以上的负载量^[22]。但是,小尺寸颗粒由于表面能增加,在高负载情况下易于团聚,因此通过表面修饰增强其分散性是复合物透明化的关键。

高负载透明复合物的的发展依赖于坚实的理论支持与一系列的创新合成策略,以达到纳米功能单元的高负载与体系光学透明性的平衡^[13, 18]。2017年, Liu 等提出“部分配体交换-原位共聚”策略,利用双(2-甲基丙烯酰氧乙基)磷酸酯(BMEP)修饰 $\text{CdZnS}@ \text{ZnS}$ 量子点,使其在乙烯基甲苯(VT)单体中兼具分散性与可聚合性,通过原位自由基聚合将量子点共价键合至聚苯乙烯基甲苯(PVT)网络,成功制备了负载量达60%(质量分数)的透明块体复合物(图1(c))^[23]。Xia 等研究了一种无表面修饰剂的水相合成法,通过调控铅盐在酸性环境中的结晶动力学,获得平均粒径约7 nm、固含量达35%(质量分数)且长期稳定的 ZrO_2 水相纳米分散体(图1(e)),并借助旋涂工艺制备了负载量达80%(质量分数)的透明复合薄膜^[24]。相较于固态体系,液相体系可避免机械加工限制,易于实现大体积与复杂几何构型填充^[25-26]。基于此,2021年, Zhao 等将高负载策略拓展至液相,制备了基于 HfO_2 纳米晶/PBD/POPOP 的液体闪烁体(图1(d))。该工作通过甲苯-萘混合溶剂优化分散稳定性,在质量分数20%~50%的纳米晶负载范围内保持液体高透明度与稳定性。引入高 Z 值的纳米晶能大幅增大光电效应截面,提高闪烁体的伽马光子产率,从而在脉冲高度谱上形成可分辨的光电峰,实

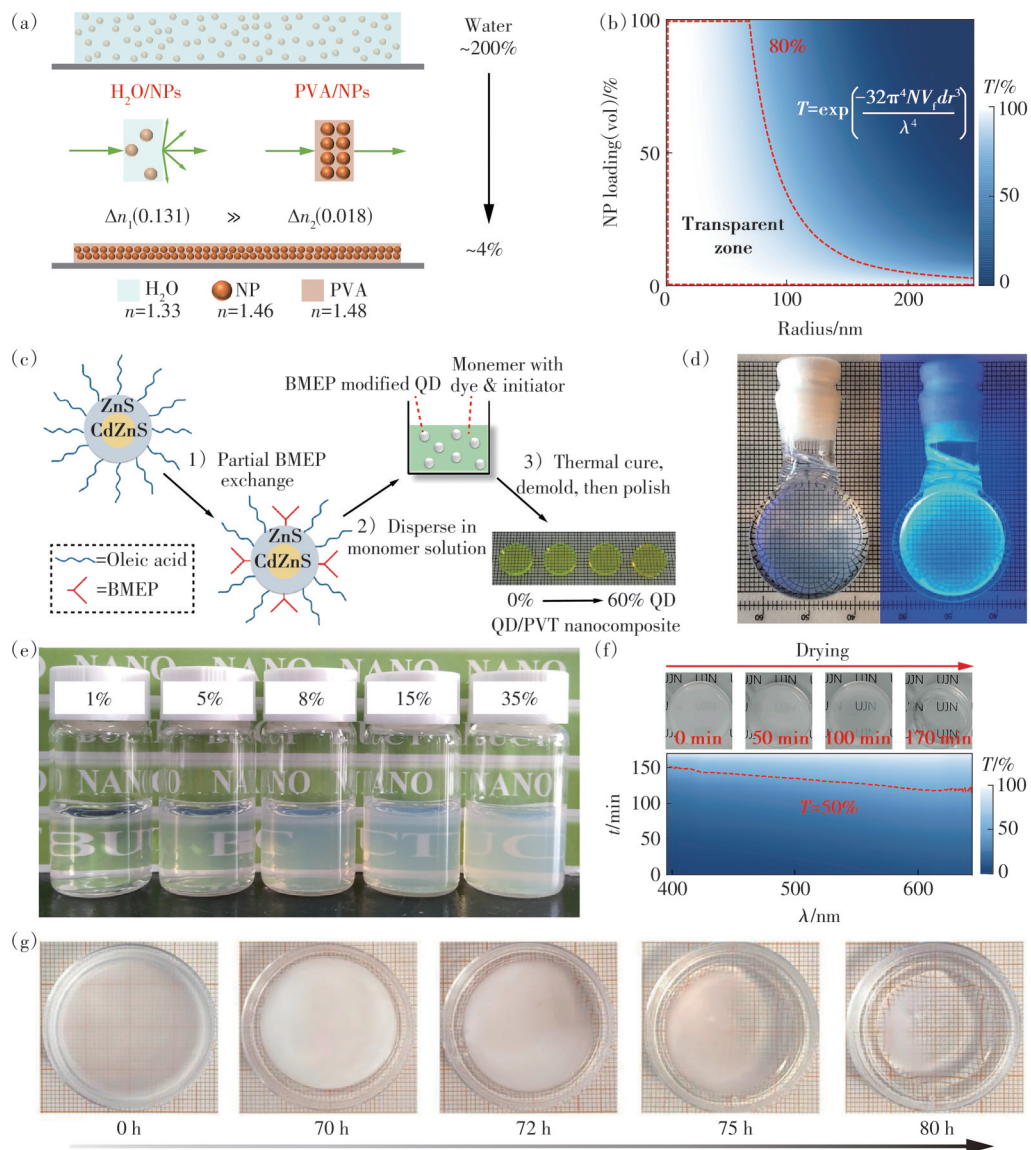


图1 (a)两个界面散射效应的变化示意图,包括H₂O/纳米晶和PVA/纳米晶界面,在干燥过程中,折射率差 Δn 从0.131逐渐减小到0.018^[22]; (b)纳米晶负载薄膜的模拟光透射光谱($d=30\ \mu\text{m}$, $n_p=1.464$, $n_m=1.482$),显示出较大的“透明区间”^[22]; (c)高负载CdZnS@ZnS量子点/FBtF(有机染料)/PVT的透明复合材料的部分表面改性-原位共聚过程示意图,照片为量子点负载量0~60%(质量分数)的透明复合物(厚度:2 mm,直径:1 cm)^[23]; (d)质量分数40%的HfO₂纳米晶/PBD/POPOP的液体闪烁体在环境光(左)和紫外光照射(右)下的照片^[27]; (e)不同浓度的ZrO₂纳米晶分散在水中的照片^[24]; (f)对质量分数83% LaF₃/PVA透明复合薄膜形成过程的实时跟踪,照片(上图)和相应的透射率曲线(下图)展示了从不透明到透明的转变过程^[22]; (g)室温下,CaMoO₄:15%Eu³⁺纳米晶在正己醇溶剂蒸发时的成膜过程^[33]

Fig.1 (a) Schematic illustration of the evolution of scattering effects at two interfaces: H₂O/nanocrystal and PVA/nanocrystal. The refractive index difference (Δn) gradually decreases from 0.131 to 0.018 during the drying process^[22]. (b) Simulated optical transmission spectra of a nanocrystal-loading film ($d=30\ \mu\text{m}$, $n_p=1.464$, $n_m=1.482$), revealing a wide “transparency zone”^[22]. (c) Schematic of a surface modification and *in-situ* copolymerization process for fabricating transparent composites with high-loading CdZnS@ZnS quantum dots, FBtF organic dye and PVT matrix. The photographs show transparent composites with quantum dot loading ranging from a mass fraction of 0 to 60% (thickness: 2 mm, diameter: 1 cm)^[23]. (d) Photographs of a liquid scintillator containing the mass fraction of 40% HfO₂ nanocrystals, PBD and POPOP under ambient light (left) and UV illumination (right)^[27]. (e) Photographs of ZrO₂ nanocrystals dispersed in water at different concentrations^[24]. (f) Real-time monitoring of the formation process for the mass fraction of 83% LaF₃/PVA transparent composite film. The photographs (top) and corresponding transmission spectra (bottom) illustrate the transition from opacity to transparency^[22]. (g) Film-forming process of CaMoO₄:15%Eu³⁺ nanocrystals during solvent (n-hexanol) evaporation at room temperature^[33]

现能谱分析^[27]。对于单一元素,光电效应的相互作用截面(σ)强烈依赖于原子序数,其近似关系可通过公式(1)表示^[28]:

$$\sigma \propto \frac{Z^n}{E^3}, \quad (1)$$

其中指数 n 在光电效应中通常取 4~5,表明高原子序数材料对光子的吸收能力呈指数级增强。对于由多种元素组成的复合材料,其有效原子序数(Z_{eff})可通过公式(2)计算^[29],以表示整体对光电效应的贡献:

$$Z_{\text{eff}} = \left(\sum_i p_i Z_i^{2.94} \right)^{\frac{1}{2.94}}, \quad (2)$$

其中, p_i 为第 i 种元素的电子分数, Z_i 为其原子序数。该公式表明,引入高原子序数,纳米单元能显著提升复合材料的整体 Z_{eff} ,从而增大光电效应截面,增强材料对伽马光子的吸收与转换效率。

相比于 II-VI 族半导体,氟化物的带隙非常宽(8~12 eV),在可见光至近红外波段几乎无本征吸收,具有非常高的光学透过率^[30]。此外,氟化物的折射率(~1.5)接近于大多数透明聚合物基质^[31-32],是透明复合物中理想的功能填料。2022年,Zhang等揭示了固态高负载薄膜形成过程中的关键光学机理(图 1(f)),制备了负载量高达 83%(质量分数)的 LaF_3/PVA 透明复合薄膜,并通过实时跟踪干燥过程,发现基质的有效折射率会随水分蒸发动态变化,并最终与纳米颗粒折射率高度匹配,从而驱动薄膜透光率非线性上升,实现从乳白色到高度透明的转变^[22]。但稀土离子掺杂氟化物纳米晶存在明显的表面猝灭效应,纳米晶表面大量的原子处于不饱和配位状态,成为荧光猝灭中心,激发态的能量易通过非辐射跃迁方式耗散,导致其量子产率(PLQY)普遍偏低。需要通过表面配体、惰性层等对表面缺陷进行钝化,抑制非辐射跃迁。2025年,Zeng等进一步突破聚合物基质的限制,提出蒸发诱导自组装策略,将超小尺寸(~3.5 nm) $\text{CaMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 纳米晶在正己醇中自组装形成致密、无裂纹的“纳米晶玻璃”薄膜(图 1(g)),实现理论上质量分数 100% 的纳米晶负载(值得注意的是,由于表面效应,在超小纳米晶中的配体成分不可忽略,质量分数约为 10% 以上),同时维持 >80% 的可见光透过率^[33]。

3 高负载透明复合物应用研究

3.1 辐射探测

塑料闪烁体因成本低、稳定性好、易于加工等

优点,在辐射探测领域具有广泛应用。但因缺乏高 Z 值元素,导致光产额较低,且无法实现高能射线的能谱探测^[11]。尽管引入高 Z 纳米晶可增强高能射线吸收,但因其不发光,高负载会导致光产额显著下降,存在“高负载”与“高光产额”之间的权衡^[11]。与此同时,现有发光纳米晶(如 CsPbBr_3)又面临稳定性不足的挑战^[34]。因此,开发高负载、高光产额、稳定的纳米复合闪烁体是迫切需求。2025年,Sun等制备了核壳结构的 Ln^{3+} 掺杂 NaGdF_4 纳米晶/MF/PBD/POPOP/PVT 透明复合物^[35],如图 2(a)所示。伽马光子与纳米晶相互作用转化为光电子, Tb^{3+} 被激发产生可见光,同时高能光电子通过碰撞能量交换产生低能激子,激子在基质中经福斯特共振能量转移(FRET)将能量传递给发光纳米晶或有机染料,最终产生可探测的可见光。在质量分数 40% $\text{NaGdF}_4:15\% \text{Tb}^{3+}$ 纳米晶负载量下的伽马射线光产额达到 $7\,020 \text{ photons} \cdot \text{MeV}^{-1}$,较非发光 NaGdF_4 负载体系提升了 14.3%(图 2(c)),并展现出 ~2 ns 的超快衰减寿命(图 2(b)),这一快衰减特性源于 POPOP 染料的衰减寿命与高量子产率(PLQY)。随后,Winardi 团队则采用三重态激子捕获策略,以 mCP 和 MF 为三重态主体、FlrPic 为磷光染料,构筑了闪烁体基质,即使负载质量分数 20%~35% HfO_2 纳米晶,光产额仍维持在 $8\,800\sim 10\,800 \text{ photons} \cdot \text{MeV}^{-1}$,662 keV 处能量分辨率达 6.4%~9.7%(图 2(d)、(e)),为伽马能谱分析提供了可靠的材料体系^[36]。

相比于固态闪烁体,无定形的液体闪烁体可以有效消除样品仓中残留空气影响,并可填充形状复杂的容器,从而提升对不同类型辐射(如 X 射线、伽马射线或快中子)的探测效率^[27, 37-38]。Wang 等提出有机-无机杂化策略,通过 b-PBD 与 CsPbX_3 ($X: \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) 钙钛矿纳米晶形成“N-Pb”键合界面,促使 X 射线诱导 b-PBD 的高能电子向钙钛矿纳米晶定向转移,提升高能量电子浓度,显著增强了溶液相钙钛矿纳米晶的 X 射线辐射发光效率(图 2(f))。其中, $\text{CsPbBr}_3(80 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}) + \text{b-PBD}(200 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1})$ 体系的光产额达 $57.1 \text{ photons} \cdot \text{keV}^{-1}$,是纯 CsPbBr_3 溶液的 18.59 倍,且超过商用 $\text{CsI}(\text{Tl})$ 闪烁体(图 2(g))^[37]。如此高的光产额虽然令人鼓舞,但仍然需要能谱测试来确认^[39]。面对穿透力极强的快中子,McCall 等将几种硫族化物和钙钛矿纳米晶分别分散于高氢密度溶剂中,制备了快

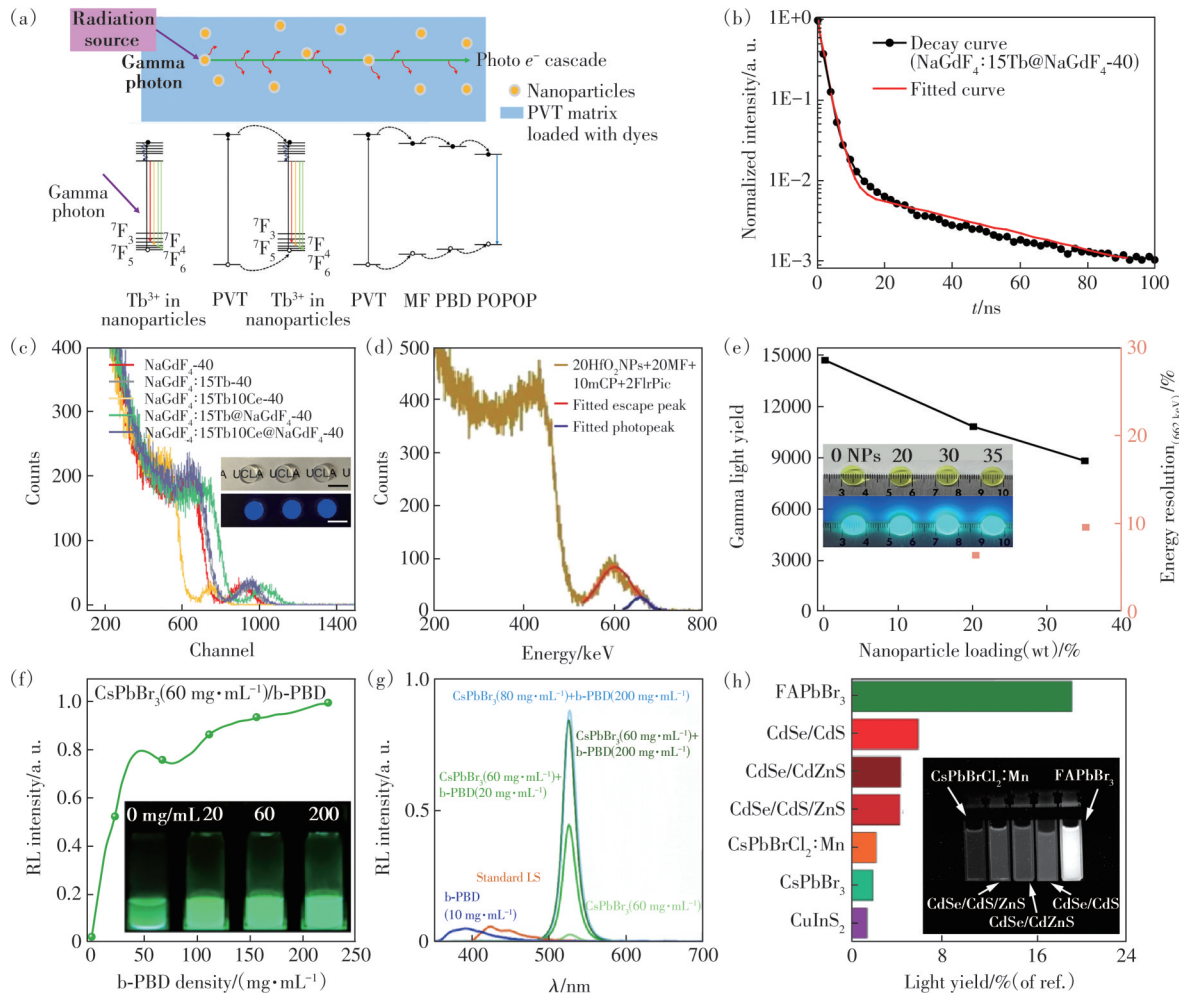


图 2 (a) 镧系离子掺杂 NaGdF₄ 纳米晶/MF/PBD/POPOP/PVT 透明复合物的闪烁过程及能量传递示意图和 (b) 相应的 Cs-137 的闪烁衰减曲线^[35]; (c) 质量分数 40% 镧系离子掺杂 NaGdF₄ 纳米晶透明复合物的 Cs-137 脉冲高度谱, 插图为环境光和紫外光照射下的透明复合物的照片 (厚度: 2 nm)^[35]; (d) 质量分数 20% HfO₂ 纳米晶/MF/mCP/FlrPic/PVT 透明复合物的能量分辨脉冲高度谱^[36]; (e) 伽马射线光产额和 662 keV 处的能量分辨率分别随纳米晶负载量的变化情况, 插图为环境光和紫外光照射下的透明复合物的照片^[36]; (f) CsPbBr₃ 纳米晶+b-PBD 混合液体闪烁体的 RL 强度随 b-PBD 浓度的变化情况, CsPbBr₃ 纳米晶浓度为 60 mg·mL⁻¹, 插图为相应的液体闪烁体在 X 射线 (90 kV-89 μA) 照射下的照片^[37]; (g) b-PBD+CsPbBr₃ 混合液体闪烁体与其他液体闪烁体的 RL 强度的比较^[37]; (h) 在 300 s 快速中子束照射下, 五种纳米晶发射体的最大光产额柱状图, 以相对于在相同条件下获得的参考 ZnS:Cu(PP) 闪烁屏的光产额所占的百分比来表示, 插图为每种纳米晶发射体的辐射发光照片^[38]

Fig.2 (a) Schematic illustration of the scintillation process and energy transfer within a transparent composite containing lanthanide-doped NaGdF₄ nanocrystals, MF, PBD, POPOP, and a PVT matrix^[35]. (b) The corresponding scintillation decay curve measured under Cs-137 gamma-ray irradiation^[35]. (c) Pulse height spectrum with a Cs-137 source of a transparent composite with the mass fraction of 40% lanthanide-doped NaGdF₄ nanocrystals. The inset shows photographs of the composite under ambient light and UV illumination (thickness: 2 nm)^[35]. (d) Energy-resolved pulse height spectrum of a transparent composite containing the mass fraction of 20% HfO₂ nanocrystals, MF, mCP, FlrPic, and PVT^[36]. (e) Gamma-ray light yield and energy resolution at 662 keV plotted as a function of nanocrystal loading. The inset shows photographs of the transparent composite under ambient and UV light^[36]. (f) RL intensity of the CsPbBr₃ nanocrystals/b-PBD liquid scintillator as a function of b-PBD concentration, with the CsPbBr₃ concentration fixed at 60 mg·mL⁻¹. The inset shows photographs of the corresponding scintillators under X-ray irradiation (90 kV, 89 μA)^[37]. (g) Comparison of the RL intensity between the b-PBD/CsPbBr₃ mixed scintillator and other reference liquid scintillators^[37]. (h) Histogram comparing the maximum light yield of five different nanocrystal-based emitters under fast neutron beam irradiation (300 s exposure), presented as a percentage relative to the light yield obtained from a reference ZnS:Cu^[26] scintillation screen under same conditions. The inset shows radioluminescence photographs of each nanocrystal emitter^[38]

中子液体闪烁体^[38]。快中子通过弹性散射产生反冲质子,反冲质子与含富氢的有机溶剂/钙钛矿有机配体相互作用,从而产生一系列的电子与空穴,最终迁移沉积至纳米晶的发光中心,并通过辐射跃迁的方式产生荧光。在 300 s 快中子照射条件下, FAPbBr₃ 纳米晶的总光产额达到商用 ZnS: Cu (PP) 闪烁体标准的 19.3%, 是所有测试纳米晶中最高的。目前, 基于 FAPbBr₃ 纳米晶的液体闪烁体尚未超过商业标准的光输出和空间分辨率, 可以通过优化浓度、利用大斯托克斯位移染料减少自吸收等策略加以改进, 有望为快中子成像与探测开辟新的技术路径。

这里需要指出, 若从探测贡献角度定义负载量, 对不同辐射源是不具备普适性的。在 X 射线/伽马射线探测中, 负载量主要用于表征提供高有效原子序数的无机功能相所占比例, 有机组分仅作为基质载体; 而在中子探测中, 负载量则需兼顾无机功能相与作为氢源的有机基质的协同贡献。因此, 必须明确不同探测场景下负载量的定义边界与表述前提, 避免因场景混用而造成概念理解上的偏差。

3.2 辐射成像

由于在可见光区域无明显自吸收, 透明纳米复合物在 X 射线成像屏方面受到了广泛关注。Song 等通过 ZnO 量子点的无序组装策略, 制备出尺寸为 1 m × 0.5 m × 0.5 mm 的大尺寸透明闪烁体, 其可见光区域透光率高达 96%^[40]。由于量子点之间的空间隔离与无明显晶界特性, 折射率差异极小, 显著抑制了光散射(图 3(a))。这种高透明性保障了单线态-三线态混合型自陷激子(STEs)的高效辐射, 使该闪烁体在调制传递函数(MTF)为 0.2 处的空间分辨率为 42 lp·mm⁻¹(图 3(b)), 并成功实现 5 000 cm²大面积的 X 射线成像。除了这些刚性的闪烁体, 柔性闪烁体薄膜也得到研究和发。Zhang 等制备了氟化物纳米晶负载量高达 83% (质量分数)的柔性透明复合薄膜, 可见光区域透明度保持 89%。如图 3(c)所示, 使用铜网格作为 X 射线成像的靶标物体, 坐标 I4 和 H4 的精细特征在透明复合薄膜中清晰可见, 与相应的光学图像几乎完全一致, 并且获得了高达 8 μm 的空间分辨率^[22]。在进行大规模生产过程中, 固态闪烁体薄膜可能会出现纳米晶分散不均匀或者产生难以控制的裂纹, 因此, 在辐射成像过程中会产生不必要

散射, 从而影响分辨率。相比之下, 液体闪烁体凭借其形态灵活性和易于大规模生产等优点得以广泛研究^[41]。如图 3(d)所示, Cho 等合成了 CsPbX₃ (X: Cl, Br, I) 纳米晶与 2,5-二苯基恶唑(PPO)有机分子杂化的液体闪烁体, 通过纳米晶与 PPO 在辛烷中的均匀分散形成了无沉淀的透明体系, 避免光散射导致的信号衰减, 在 70 kVp X 射线辐照下, 实现了 3.5 lp·mm⁻¹的空间分辨率^[42]。

虽然液态闪烁体已通过溶剂中溶解或分散发光溶质的方式进行了研究, 但这些混合物仍然存在浓度依赖性的局限性^[27, 37]。此外, 许多现有的液态闪烁体含有有毒的铅或易燃的有机溶剂, 这给实际应用带来了安全方面的困扰^[43]。开发一种透明、稳定且生物相容的液态闪烁体仍然是推进 X 射线成像技术的关键挑战。2025 年, Qiu 等提出原位配位策略构建无散射镧系离子液体闪烁体(Tb(IL)₃), 通过镧系离子与离子液体配体的配位形成分子级的均匀结构, 在 1 mm 厚闪烁屏中仍保持高透明性, 可见光透过率超过 93%, 空间分辨率达 26 lp·mm⁻¹^[44]。基于该材料的流体特性与高透明性, 该团队进一步开发出自适应变焦辐射成像系统, 通过调节注入透明柔性容器的液体体积, 实现焦距从 ~2 cm 到无穷远的动态可调, 变焦倍率最高达 3.5×(图 3(e))。高透明性确保变焦过程中光传输无损耗、成像无畸变, 可清晰分辨 50 μm 间距的电极结构, 为动态变焦辐射成像提供了全新方案。

值得注意的是, ZnO 量子点闪烁体薄膜与 Tb(IL)₃ 离子液体闪烁体等材料在功能单元负载量的定义上, 目前尚未形成统一标准。以 ZnO 量子点为例^[40], 其合成过程中采用有机硅烷偶联剂 APTES 进行表面改性, 最终闪烁体薄膜中含有约 1% (质量分数)的 APTES 组分, 因此 ZnO 量子点的负载量不能按质量分数 100% 计算。而 Tb(IL)₃ 是由镧系离子与有机离子液体经原位配位形成的分子级均一体系^[44], 体系中少量丙酮溶剂已在 40 °C 下去除, 离子液体与 Tb³⁺ 发光离子共同构成功能整体, 并非简单的有机载体与发光中心, 其负载量可定义为质量分数 100%。因此, 若采用无机相与有机相的质量比定义负载量, 虽更易被广泛接受, 但仍需结合材料体系与制备过程具体分析。

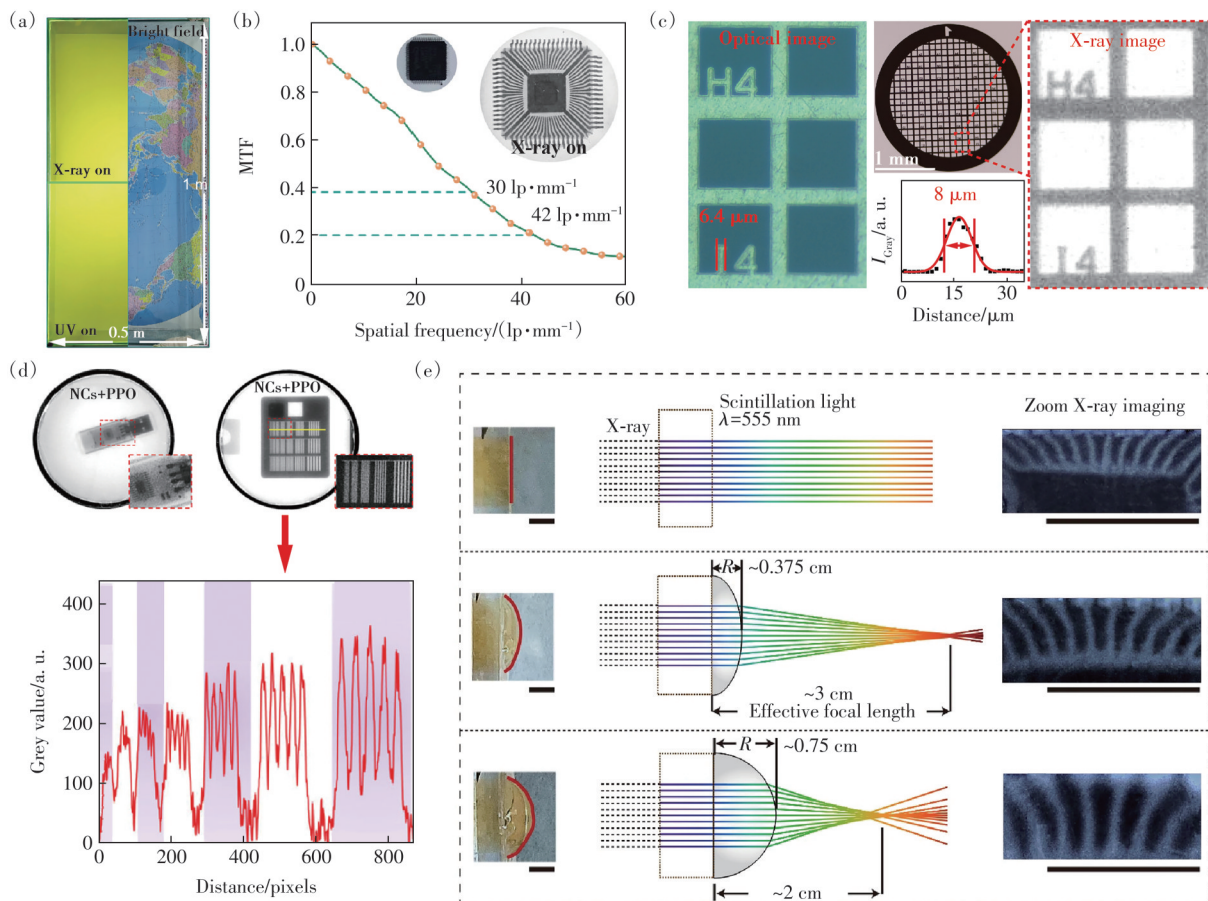


图3 (a)由ZnO量子点构成的透明闪烁体的照片(尺寸:1 m×0.5 m×0.5 mm,左边置于紫外光和X射线照射;右边置于环境光下)^[40]; (b)基于ZnO量子点的闪烁体的X射线成像空间分辨率,插图为测试芯片以及相应的X射线照射下的照片(剂量率为 $16.9 \mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$)^[40]; (c)在光学和X射线照射下LaF₃/PVA透明闪烁体分别对铜网格进行成像,其空间分辨率达到了 $8 \mu\text{m}$ ^[22]; (d)CsPbBr₃纳米晶+PPO混合液体闪烁体对数据存储设备和标准化测试模型分别进行X射线成像(上),以及X射线照片中黄线所对应区域的辐射强度的变化情况(下)^[42]; (e)镧系离子液体用于变焦闪烁透镜的工作原理:不同透镜的曲率(R)通过改变焦距从而实现X射线成像的可调放大功能,右图:在不同放大倍数下拍摄的芯片引脚的X射线照片(比例尺:5 mm)^[44]

Fig.3 (a) Photograph of a transparent scintillator screen of ZnO quantum dots under UV and X-ray illumination (left) and ambient light (right)^[40]. (b) Spatial resolution of X-ray imaging using the ZnO quantum dot-based scintillator. The inset shows the test pattern and a corresponding photograph under X-ray irradiation (dose rate: $16.9 \mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$)^[40]. (c) Optical and X-ray images of a copper mesh acquired with a LaF₃/PVA transparent scintillator, showing a spatial resolution of $8 \mu\text{m}$ ^[22]. (d) The CsPbBr₃ nanocrystals + PPO liquid scintillator was used to perform X-ray imaging on data storage devices and standard test models^[42]. (e) Working principle of a lanthanide-ion-based liquid zoom scintillation lens, where different lens curvatures (R) alter the focal length, enabling tunable magnification for X-ray imaging. Right panel: X-ray images of chip pins captured at different magnifications (Scale bars: 5 mm)^[44]

3.3 辐射防护

防护材料的选择要依据实际辐射场类型和应用场景,中子防护与伽马光子防护的材料存在本质差异,高 Z 与低 Z 材料的应用需以实际辐射场景为核心依据。对于伽马光子防护,其衰减效率与材料 Z 值密切相关,高 Z 元素(如Bi、Hf等)可通过光电效应、康普顿散射等作用高效捕获伽马光子能量,因此高负载高 Z 无机颗粒的透明复合物

成为伽马射线透明防护场景的核心候选材料;而中子主要通过轻元素(如H、C、O、Li、B)的弹性散射慢化并吸收,这类含氢量高的低 Z 材料(如石蜡)虽无法衰减伽马光子,却是中子防护的最优选择。例如,在核反应堆或热中子监测窗口场景中,应以低 Z 透明材料为主导,优先实现热中子的高效屏蔽;而在医疗室观察窗场景中,X射线/伽马光子为主要辐射类型,需选用高 Z 透明复合物。

随着高能 X 射线/伽马射线在医疗成像、核工业监测等领域的广泛应用,辐射防护材料的需求日益迫切。为应对传统铅基防护材料毒性高、重量大的固有缺陷^[45-46],早期无铅辐射防护材料的研究聚焦于非铅重金属元素及其复合物。Wang 等使用 Bi_2O_3 、 WO_3 、 W_2C 和 Ta_2O_5 作为屏蔽颗粒(BW-WT 屏蔽颗粒)制备了 BWWT/PP 基 3D 复合针刺织物用来辐射防护^[47]。如图 4(a)所示,0.45-3D 织

物(密度为 $0.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$)在 30~100 keV 范围内实现了最佳的 X 射线衰减效率,达到 73%~100%。其轻量化($0.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 面密度)与超高透气性($> 1096 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 空气渗透率)的设计思路验证了无铅复合体系的可行性。此外,Xu 等通过将具有互补 K 吸收边的 $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Gd}_2\text{O}_3$ 一维纳米纤维借助定向冷冻技术进行三维受限组装,成功构建了超轻(密度可低至 $10 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$)、超弹性的 $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Gd}_2\text{O}_3$ 纳米纤

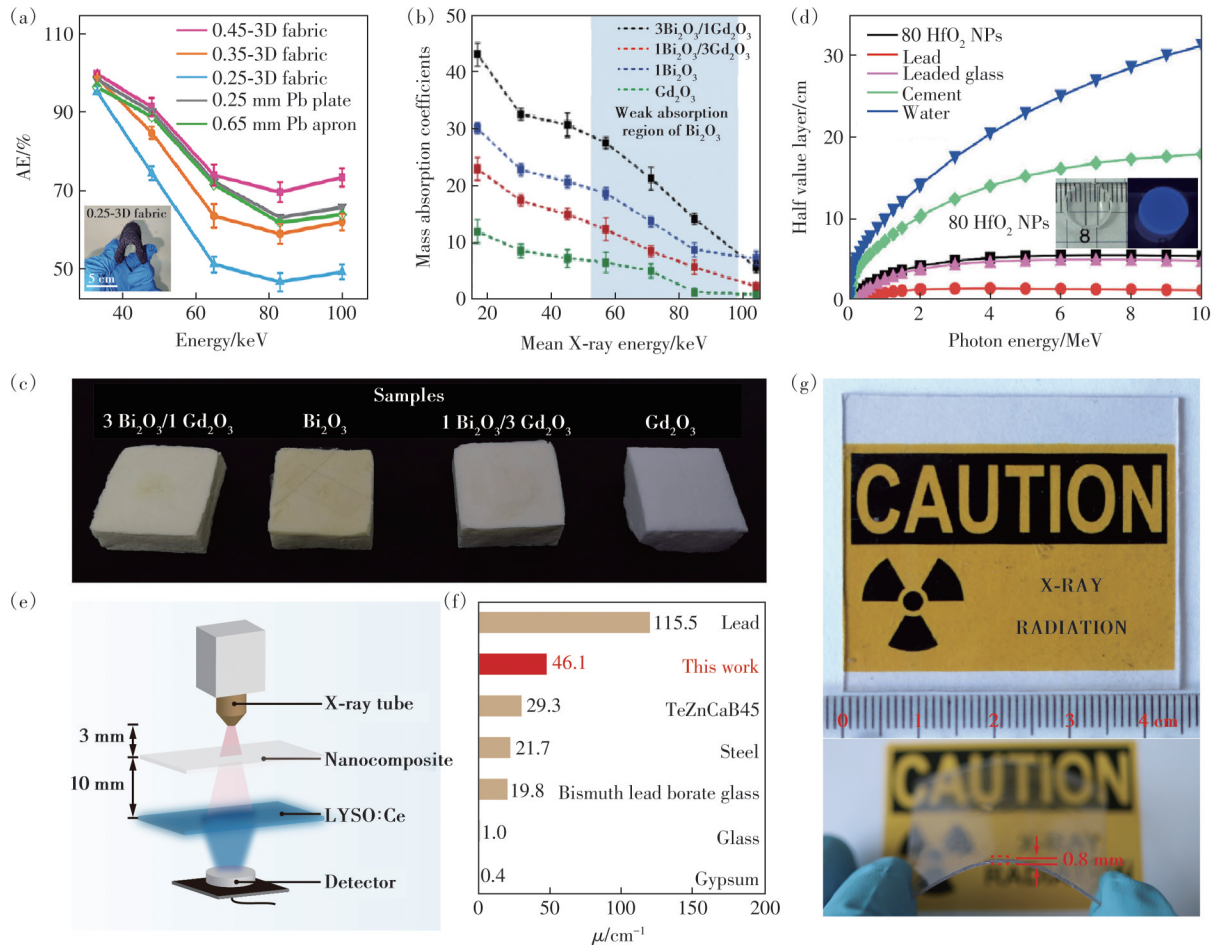


图 4 (a)由质量分数 65% 混合微粒填料(Bi_2O_3 、 WO_3 、 W_2C 和 Ta_2O_5)/PP 制备而成不同密度的三维针刺防护布的 X 射线衰减效率,插图是密度为 $0.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的三维针刺防护布照片^[47]; (b)不同 $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Gd}_2\text{O}_3$ 纳米纤维比例的气凝胶的质量吸收系数以及 (c) 相应的照片^[48]; (d) 质量分数 80% HfO_2 纳米晶/MF/PBD/POPOP/PVT 透明复合物与铅、铅玻璃、水泥和水的半值层比较,插图为相应的透明复合物在环境光下和紫外光照射下的照片^[49]; (e) X 射线防护性能测试平台示意图^[50]; (f) 质量分数 70% LaF_3/PVA 与其他材料的 X 射线 (50 keV) 衰减能力比较以及 (g) 叠层透明复合材料的照片^[50]

Fig.4 (a) X-ray attenuation efficiency of three-dimensional needle-punched shielding fabrics with different densities, fabricated from the mass fraction of 65% mixed particulate fillers (Bi_2O_3 , WO_3 , W_2C , and Ta_2O_5) in a polypropylene matrix. The inset shows a photograph of the fabric with a density of $0.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ^[47]. (b) Mass attenuation coefficients of aerogels with different ratios of $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Gd}_2\text{O}_3$ nanofiber and (c) corresponding photographs^[48]. (d) Comparison of the half-value layer (HVL) for the mass fraction of 80% HfO_2 nanocrystal/MF/PBD/POPOP/PVT transparent composite against lead, lead glass, cement and water. The inset shows photographs of the transparent composite under ambient light and UV illumination^[49]. (e) Schematic diagram of the X-ray shielding performance test platform^[50]. (f) Comparison of X-ray (50 keV) attenuation capability between the mass fraction of 70% LaF_3/PVA composite and other reference materials, and (g) photographs of the multilayered transparent composite^[50]

维气凝胶(图4(c)所示)^[48]。该材料内部形成类叶细胞的多级六边形纳米陷阱阵列,通过双组分协同实现了16~90 keV宽能段的高效吸收。其中,当 Bi_2O_3 与 Gd_2O_3 纳米纤维以3:1比例复合时,在45 keV处获得最高质量吸收系数($30.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)和超过70%的屏蔽效率,展现了最优的宽能段X射线协同吸收性能,为发展下一代轻质、柔性、高性能X射线防护材料提供了重要的理论与技术借鉴。

在X射线/伽马射线防护领域,传统高性能防护材料依赖于铅、铋等高原子序数(Z)元素,但其固有的光学不透明性严重限制了其在观察窗、显示屏及精密光学仪器中的直接应用^[12,47-48]。透明防护材料的研发成为拓展其应用的关键。Winaridi等制备了 HfO_2 纳米晶/MF/PBD/POPOP/PVT透明复合防护材料,质量分数80%纳米晶负载量下5.4 cm厚样品在10 MeV光子能量下的屏蔽能力与4.9 cm铅玻璃相当,且保持良好透明性^[49]。在实现高负载与透明性平衡的基础上,降低材料厚度、实现结构轻量化,成为提升材料实用性与拓

展其应用场景的关键前沿。Zhang等制备了 LaF_3/PVA 透明纳米复合物,在 LaF_3 纳米晶负载量达质量分数70%时,单层薄膜可见光透过率高达86%。值得注意的是,23层堆叠后透过率依然能达到81%(图4(g)),0.8 mm厚度的材料在50 kV下的线性衰减系数达 46.1 cm^{-1} ,是传统铅玻璃的2.3倍,在80 keV临床X射线源下屏蔽效率达66%^[50]。这种超薄形态不仅极大地减轻了重量、提升了穿戴舒适性与材料柔性,也为集成到介入手术智能眼镜、电子显示面板、柔性可穿戴设备及精密光学器件中提供了可能。

随着柔性辐射防护场景的动态形变需求,高负载透明复合物力学性能是其在实际应用中不可忽视的研究内容。如图5(a)、(b)所示,热拉伸处理后BWWT/PP三维针刺织物的断裂伸长率为43%,拉伸强度可达158.56 MPa,约为原始BWWT/PP纤维的6倍。同时,其杨氏模量为33.16 MPa,比原始纤维高183%。因此,热拉伸工艺能够显著增强纤维的机械性能^[47]。此外,Xu等制备的BGAs

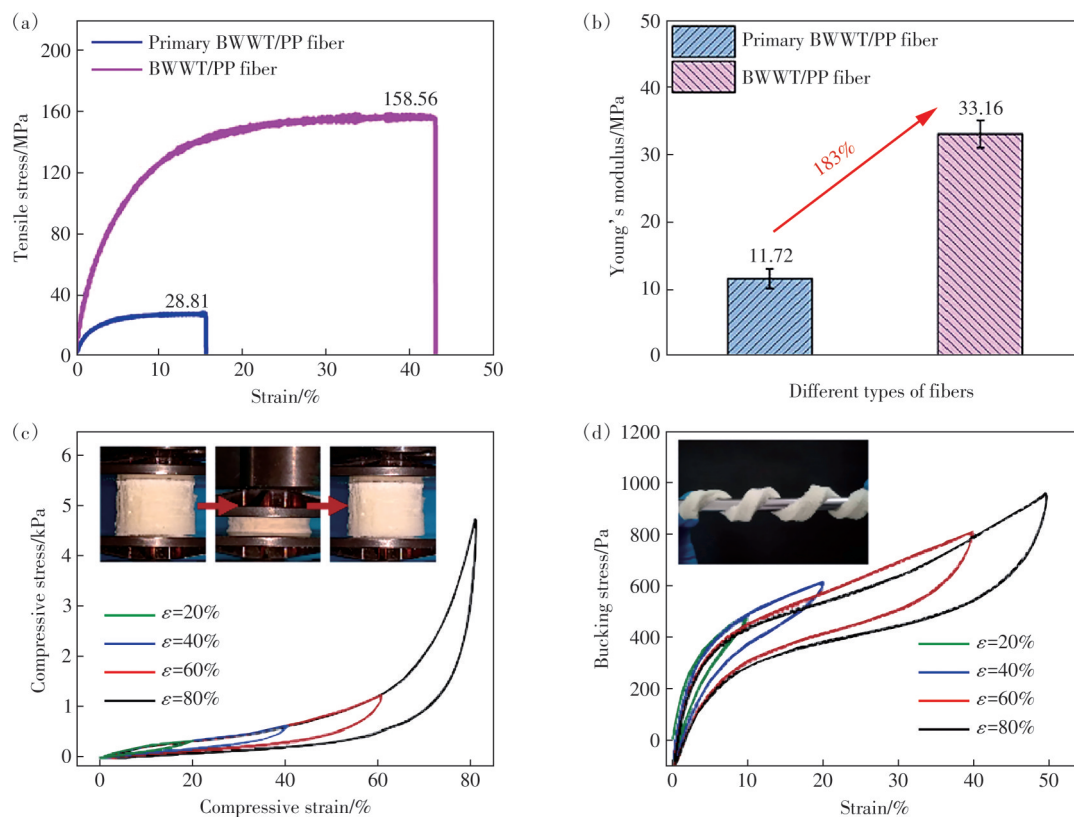


图5 热拉伸处理前后BWWT/PP纤维的(a)应力-应变曲线和(b)杨氏模量比较^[47];BGAs纳米纤维气凝胶的(c)循环压缩应力-应变曲线和(d)循环弯曲应力-应变曲线^[48]

Fig.5 (a)Comparison of stress-strain curves and (b)Young's modulus of primary BWWT/PP fiber and hot-stretched BWWT/PP fiber^[47]. (c)Cyclic compressive stress-strain curves and (d)cyclic flexural stress-strain curves of BGAs^[48]

纳米纤维气凝胶得益于其特殊的阵列结构,展现出良好的压缩性和弯曲性^[48]。图 5(c)中所示的应力-应变曲线呈现出典型的滞后环形特征,具有压缩-恢复的特性。在不同的压缩应变下,BGAs 纳米纤维气凝胶显示出出色的恢复性能,其在 80% 应变下的压缩应力高达 4.7 kPa。其次,将 BGAs 纳米纤维气凝胶弯曲并缠绕在一根钢柱上,在经历了 50% 的弯曲应变后,纳米纤维气凝胶仍能恢复到初始状态,表明其能够承受较大的弯曲应力。然而,上述研究多针对非透明柔性复合物,如何在实现高光学透明性的前提下,系统调控高负载纳米复合材料的力学特性及长期动态稳定性,仍是当前研究所欠缺的。未来需以柔性基体的选择、纳米单元空间分布的优化等为研究目标,探索“透明-柔性-力学增强”协同设计的新策略,以满足智能防护、可穿戴电子设备等新兴应用需求。

纵观上述研究进展,作为辐射探测与成像的核心功能材料,高负载透明复合物在闪烁性能方面仍面临关键挑战,尤其是难以同时实现高光产额与超快辐射响应。如表 1 所示,透明复合物的光产额大多在 $10\ 000\ \text{photons}\cdot\text{MeV}^{-1}$ 以下,与传统的闪烁晶体有较大差距。另外,基于稀土离子激

活的复合物寿命长达毫秒级别,不仅会限制材料在快速动态探测与高时间分辨率成像中的应用,还可能导致信号堆积、降低计数率与时间分辨能力,尤其在脉冲辐射场和高通量探测场景中表现更为明显。事实上,基于能谱测试的光产额数据在目前复合物闪烁体的报道中相对较少,大量研究仅仅通过参比法定性比较,与实际应用差距较远。另外,目前多数研究集中于提升光产额和与负载量的平衡,对衰减动力学的系统调控仍显不足。如表 1 所示,高光学透明度已经在高负载复合物中实现,如何达到“高光产额与超快速响应协同优化”是未来研究的关键。对于复合材料衰减寿命长的问题,可以通过稀土离子共掺杂引入敏化离子(如 Ce^{3+} 离子)实现快速能量传递;其次,对纳米晶表面进行钝化(如引入配体、惰性层等),减少非辐射跃迁。此外,通过构建“无机稀土纳米晶-有机快闪染料”复合体系,提升能量传递效率,使复合体系的整体闪烁寿命由稀土离子的毫秒级降至有机染料的纳秒级。总之,未来研究需聚焦荧光衰减寿命调控与辐射响应机制改进,探索其在快响应辐射探测与高帧率动态成像中的实际应用。

表 1 几种透明复合物的光学及闪烁性能

Tab. 1 Optical and scintillation properties of several transparent composites

透明复合物	NPs 负载量 (质量分数)/%	透过率/%	厚度	光产额/ (photons \cdot MeV $^{-1}$)	662 keV 时的 能量分辨率/%	参考 文献
$\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}/\text{ZnS}$ QDs/PVT	60	66	2 mm	9 275	9.8	[23]
HfO_2 NPs/甲苯	20	~90	2 mm	11 699	4.8	[27]
$\text{NaGdF}_4:15\%\text{Tb}/\text{NaGdF}_4$ NPs/PVT	40	~85	2 mm	7 020	11.8	[35]
HfO_2 NPs+MF+mCP+FlrPic/PVT	20	~87	2 mm	10 780	6.4	[36]
HfO_2 NPs+MF+PBD+POPOP/PVT	20	~90	2 mm	9 782	4.9	[49]
X 射线成像分辨率/ (lp \cdot mm $^{-1}$)						
LaF_3 NPs/PVA	83	89	55 μm	9 227	122	[22]
$\text{CaMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ NPs	100	~78	250 μm	7 000	27.1	[33]
ZnO QDs	99	96	300 μm	16 296	42	[40]
$\text{Tb}(\text{IL})_3$	100	>93	1 mm	2 771	26	[44]

4 结论与展望

高负载透明复合物通过在透明基体中均匀分散高含量功能纳米单元,成功实现了辐射吸收/转换效率与光学透明性的协同提升,在辐射探测与防护领域展现出显著优势,初步具备了替代传统辐射材料的潜力,为发展高性能、柔性化与集成化的新型辐射器件奠定了基础。

然而,ZnO、ZrO₂等材料仍然存在 Z_{eff} 值低的

问题,通过 Z_{eff} 的相关计算公式计算,ZnO、ZrO₂的 Z_{eff} 分别为 ~27.7、~35.7,远低于 HfO_2 (~67.3)、 LaF_3 (~50.0) 等材料,导致其对高能射线的光电效应截面小、辐射吸收效率有限。虽能通过高负载实现性能补偿,但仍难以满足高能辐射探测等需求。未来研究需在维持材料优异光学透明性的前提下,进一步优化纳米功能单元的 Z_{eff} 值。一方面,可通过 Bi、La、Gd 等高 Z 元素掺杂的方式,提高 ZnO、ZrO₂ 等材料的 Z_{eff} 值,弥补其在高能辐射

响应的短板;另一方面,充分发挥低 Z_{eff} 复合材料在低能射线成像领域的性能优势,拓展其在低能辐射场景中的应用范围,实现材料体系的差异化与多元化发展。

再者,高负载透明复合物在生物医学领域(如介入手术防护、体内辐射探测)的应用潜力巨大,在保障材料辐射性能的前提下,提升其生物相容性以满足医用场景要求显得非常重要。可以优先选择无毒或低毒且高 Z_{eff} 元素的功能纳米晶,如 LaF_3 、 HfO_2 等;同时,严格控制纳米晶的粒径,避免大粒径颗粒在体内的富集与沉积,降低器官损伤风险。此外,优选亲水性、生物可降解等聚合物基质提升生物相容性,以及构建生物相容型水凝胶体系适配医用柔性需求。此外,长期辐射照射下纳米晶团聚、基质老化引发的材料性能衰减问题,也是高负载透明复合物走向实际产业化应用的关键挑战。目前,针对高负载透明复合物的长期辐射稳定性研究仍较为有限,未来需结合加速老化实验与实时监测手段,系统探究辐射剂量、基质类

型等因素对性能衰减的影响机制,以全面推动该类材料向高性能、高稳定性、实用化方向迈进。

目前,高负载透明复合物的制备多集中于实验室小规模合成,向大规模工业化生产转化时,仍面临诸多关键技术瓶颈。对于纳米颗粒分散不均的问题,可以优化纳米颗粒表面修饰工艺等策略进行解决。除此之外,一方面,通过发展卷对卷涂布等连续生产技术,结合紫外光固化或热固化,提高大面积透明薄膜的制备效率,满足工业化大规模供货需求;另一方面,开发水相合成、无配体合成等绿色工艺和采用工业级原料替代高纯度试剂等,在保证材料性能的前提下降低生产成本。通过上述多维度技术策略的协同优化,有望为高负载透明复合物从实验室研究走向工业化生产奠定坚实基础。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260032>

参 考 文 献:

- [1] BAI X, ZHANG Y T, ZHAO H P, *et al.* Flexible X-ray detector for cumulative dose monitoring through reversible photochromism and luminescence modulation [J]. *Adv. Sci.*, 2025, 12(6): 2412986.
- [2] LI H J, LI Y, ZHANG L, *et al.* A thermo-responsive MOFs for X-ray scintillator [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(32): 2405535.
- [3] PENG H, HUANG W J, KONG L H, *et al.* All-in-one double perovskite flexible film with highly efficient warm-white emission, near-infrared emission, and X-ray radioluminescence [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(27): 2422745.
- [4] YANG Z, YAO J S, XU L M, *et al.* Designer bright and fast CsPbBr_3 perovskite nanocrystal scintillators for high-speed X-ray imaging [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 8870.
- [5] 王鲁凯, 林宏健, 吴坤, 等. 金属卤化物闪烁体薄膜的X射线成像研究进展 [J]. *发光学报*, 2024, 45(8): 1266-1280.
WANG L K, LIN H J, WU K, *et al.* Research progress in X-ray imaging of metal halide scintillator films [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(8): 1266-1280. (in Chinese)
- [6] LI Z G, SUN Y J, ZHANG Y, *et al.* Surface defect passivation by ligand in polymeric melt encapsulated CsPbBr_3 perovskite nanocrystals/PP composite with high X-ray imaging performance [J]. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2024, 134: 592-599.
- [7] GWIN R, MURRAY R B. Scintillation process in $\text{CsI}(\text{Tl})$. I. Comparison with activator saturation model [J]. *Phys. Rev.*, 1963, 131(2): 501-508.
- [8] HAWRAMI R, ARIESANTI E, FARSONI A, *et al.* Growth and evaluation of improved CsI:Tl and NaI:Tl scintillators [J]. *Crystals*, 2022, 12(11): 1517.
- [9] TAMULAITIS G, AUFRAY E, GOLLA A, *et al.* Improvement of the timing properties of Ce-doped oxyorthosilicate LY-SO scintillating crystals [J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 2020, 139: 109356.
- [10] HE S, WAN P Y, LI H C, *et al.* Hot exciton-based plastic scintillator engineered for efficient fast neutron detection and imaging [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(29): 2503688.
- [11] HAJAGOS T J, LIU C, CHEREPY N J, *et al.* High-Z sensitized plastic scintillators: a review [J]. *Adv. Mater.*, 2018,

- 30(27): 1706956.
- [12] MAHMOUD M E, EL-KHATIB A M, BADAWI M S, *et al.* Recycled high-density polyethylene plastics added with lead oxide nanoparticles as sustainable radiation shielding materials [J]. *J. Cleaner Prod.*, 2018, 176: 276-287.
- [13] KRISHNAMOORTI R. Strategies for dispersing nanoparticles in polymers [J]. *MRS Bull.*, 2007, 32(4): 341-347.
- [14] KANGO S, KALIA S, CELLI A, *et al.* Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic-inorganic nanocomposites—a review [J]. *Prog. Polym. Sci.*, 2013, 38(8): 1232-1261.
- [15] BALAZS A C, EMRICK T, RUSSELL T P. Nanoparticle polymer composites: where two small worlds meet [J]. *Science*, 2006, 314(5802): 1107-1110.
- [16] MCKIGNEY E A, DEL SESTO R E, JACOBSON L G, *et al.* Nanocomposite scintillators for radiation detection and nuclear spectroscopy [J]. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A: Accel., Spectr., Detect. Assoc. Equip.*, 2007, 579(1): 15-18.
- [17] LÜ C L, YANG B. High refractive index organic-inorganic nanocomposites: design, synthesis and application [J]. *J. Mater. Chem.*, 2009, 19(19): 2884-2901.
- [18] LOSTE J, LOPEZ-CUESTA J M, BILLON L, *et al.* Transparent polymer nanocomposites: an overview on their synthesis and advanced properties [J]. *Prog. Polym. Sci.*, 2019, 89: 133-158.
- [19] OU X Y, QIN X, HUANG B L, *et al.* High-resolution X-ray luminescence extension imaging [J]. *Nature*, 2021, 590(7846): 410-415.
- [20] XXXIVRAYLEIGH L. . On the transmission of light through an atmosphere containing small particles in suspension, and on the origin of the blue of the sky [J]. *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, 1899, 47(287): 375-384.
- [21] ALTHUES H, HENLE J, KASKEL S. Functional inorganic nanofillers for transparent polymers [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2007, 36(9): 1454-1465.
- [22] ZHANG X Z, SHI Y H, WANG X J, *et al.* Flexible and transparent ceramic nanocomposite for laboratory X-ray imaging of micrometer resolution [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(12): 21576-21582.
- [23] LIU C, LI Z, HAJAGOS T J, *et al.* Transparent ultra-high-loading quantum dot/polymer nanocomposite monolith for gamma scintillation [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(6): 6422-6430.
- [24] XIA Y, ZHANG C, WANG J X, *et al.* Synthesis of transparent aqueous ZrO₂ nanodispersion with a controllable crystalline phase without modification for a high-refractive-index nanocomposite film [J]. *Langmuir*, 2018, 34(23): 6806-6813.
- [25] XU J H, LUO R, LUO Z C, *et al.* Ultrabright molecular scintillators enabled by lanthanide-assisted near-unity triplet exciton recycling [J]. *Nat. Photonics*, 2025, 19(1): 71-78.
- [26] AGOSTINI M, ALTENMÜLLER K, APPEL S, *et al.* Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the sun [J]. *Nature*, 2020, 587(7835): 577-582.
- [27] ZHAO H X, YU H, REDDING C, *et al.* Scintillation liquids loaded with hafnium oxide nanoparticles for spectral resolution of γ rays [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2021, 4(2): 1220-1227.
- [28] SU Y R, MA W B, YANG Y. Perovskite semiconductors for direct X-ray detection and imaging [J]. *J. Semicond.*, 2020, 41(5): 051204.
- [29] SINGH M P, SANDHU B S, SINGH B. Determination of effective atomic number using rayleigh to compton scattering of gamma rays [J]. *Asian J. Chem.*, 2006, 18(5): 3275-3278.
- [30] ANSARI A A, YADAV R, RAI S B. Enhanced luminescence efficiency of aqueous dispersible NaYF₄:Yb/Er nanoparticles and the effect of surface coating [J]. *RSC Adv.*, 2016, 6(26): 22074-22082.
- [31] SHAN X C, WANG F, WANG D J, *et al.* Optical tweezers beyond refractive index mismatch using highly doped upconversion nanoparticles [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2021, 16(5): 531-537.
- [32] TAN M C, AL-BAROUDI L, RIMAN R E. Surfactant effects on efficiency enhancement of infrared-to-visible upconversion emissions of NaYF₄:Yb-Er [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2011, 3(10): 3910-3915.
- [33] ZENG L C, QUAN X, WANG Y W, *et al.* Self-assembled colloidal glass with 100% lanthanide nanocrystal loading for high-resolution X-ray imaging [J]. *Nanoscale*, 2025, 17(17): 10644-10651.
- [34] NIE J, LI C, ZHOU S, *et al.* High photoluminescence quantum yield perovskite/polymer nanocomposites for high contrast X-ray imaging [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(45): 54348-54353.

- [35] SUN B W, WINARDI I, MIAULE S, *et al.* Luminescent lanthanides doped NaGdF₄ nanoparticles-plastic nanocomposites for gamma ray scintillation [J]. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A: Accel., Spectr., Detect. Assoc. Equip.*, 2026, 1082(Pt 2): 171087.
- [36] WINARDI I, HAN Z Q, YU H, *et al.* Nanocomposite scintillators loaded with hafnium oxide and phosphorescent host and guest for gamma spectroscopy [J]. *Chem. Mater.*, 2024, 36(10): 5257-5263.
- [37] WANG Y M, LIU B P, LIU Y M, *et al.* High-performance and stable b-PBD/perovskite liquid scintillators for X-ray imaging [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2025, 17(45): 62775-62786.
- [38] MCCALL K M, SAKHATSKYI K, LEHMANN E, *et al.* Fast neutron imaging with semiconductor nanocrystal scintillators [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(11): 14686-14697.
- [39] 张誉戈, 马舸, 万鹏颖, 等. X射线成像闪烁体光产额测量技术与优化方法 [J]. *发光学报*, 2025, 46(4): 630-641.
ZHANG Y G, MA G, WAN P Y, *et al.* Light yield measurement technology and optimization methods of X-ray imaging scintillator [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(4): 630-641. (in Chinese)
- [40] SONG S Y, GAO C J, ZHOU R, *et al.* Scalable X-ray scintillators with bright singlet-triplet hybrid self-trapping excitons [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 249.
- [41] 谢雷, 李腾, 徐新奇, 等. 钙钛矿液体闪烁体及其辐射探测成像应用研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(9): 1564-1576.
XIE L, LI T, XU X Q, *et al.* Research progress of perovskite liquid scintillators for radiation detection and imaging applications [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(9): 1564-1576. (in Chinese)
- [42] CHO S, KIM S, KIM J, *et al.* Hybridisation of perovskite nanocrystals with organic molecules for highly efficient liquid scintillators [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2020, 9(1): 156.
- [43] LIAN H W, ZHANG W X, ZOU R, *et al.* Aqueous-based inorganic colloidal halide perovskites customizing liquid scintillators [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(51): 2304743.
- [44] QIU J, GU C, CHEN M T, *et al.* Scattering-free lanthanide-ionic liquid scintillators for high-resolution and adaptive X-ray imaging [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 11609.
- [45] SACA N, RADU L, FUGARU V, *et al.* Composite materials with primary lead slag content: application in gamma radiation shielding and waste encapsulation fields [J]. *J. Cleaner Prod.*, 2018, 179: 255-265.
- [46] LING T C, POON C S, LAM W S, *et al.* Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation-shielding applications [J]. *J. Hazard. Mater.*, 2012, 199-200: 321-327.
- [47] WANG W T, LIU Y, LI S X, *et al.* Lead-free and wearing comfort 3D composite fiber-needled fabric for highly efficient X-ray shielding [J]. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, 2023, 6(2): 76.
- [48] XU L, ZHAO J Q, HUANG L Q, *et al.* Bi₂O₃/Gd₂O₃ meta-aerogel with leaf-inspired nanotrap array enables efficient X-ray absorption [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(23): 24080-24089.
- [49] WINARDI I, MIAULE S, CARMICHAEL R, *et al.* Multipurpose transparent nanocomposites for gamma spectroscopy, pulse shape discrimination, thermal neutron detection, radiation shielding, and high refractive index applications [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2026, 36(28): e26219.
- [50] ZHANG X Z, LIU Y Q, WANG X J, *et al.* Lead-free transparent nanocomposite for efficient clinical X-ray shielding [J]. *BMEMat*, 2025, 3(3): e70008.



刘凌云(1999-),女,河南焦作人,博士研究生,2021年于安阳师范学院获得学士学位,主要从事高负载透明纳米复合薄膜的发光特性和应用方面的研究。

E-mail: 202311100008@stu.ujn.edu.cn



张玉海(1984-),男,山东潍坊人,博士,教授,博士生导师,2014年于新加坡国立大学获得博士学位,主要从事透明发光材料(包括单晶材料、镧系元素掺杂纳米颗粒、有机-无机复合材料等)的研发和应用。

E-mail: ifc_zhangyh@ujn.edu.cn