

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-08

杂化 Mn 基卤化物力致发光性能及应力可视化应用

汪玉珍^{1*}, 阿卜杜拉·阿卜来海提¹, 陈惠琳², 夏志国^{1*}

(1. 华南理工大学 物理与光电学院, 发光材料与器件全国重点实验室,

广东省光纤激光材料与应用技术重点实验室, 广东 广州 510641;

2. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 有机-无机杂化金属卤化物材料具有结构多样性和优异的光电性能, 并在力致发光及传感领域具有特异性。本文设计合成了一种零维杂化锰基卤化物晶体 (TPPen)₂MnBr₄ (TPPen 为戊基三苯基膦), 表征了其晶体结构、光致发光性能及机械刺激下的发光响应, 晶体可在 365 nm 紫外光激发下呈现明亮的光致发射, 同时在机械刺激下产生力致发光, 发光波长均位于 517 nm, 皆归属于 Mn²⁺ 的 d-d 跃迁。进一步制备了基于卤化物晶体的弹性体复合薄膜以验证其应力可视化应用, 研究发现, 将晶体复合于弹性体薄膜后, 该薄膜在不同划擦力度下呈现出发光响应, 展现出应力可视化应用潜力。

关键词: 锰基杂化卤化物; 光致发光; 力致发光; 应力可视化

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260207

CSTR: 32170.14.CJL.20260207

Mechanoluminescence Performance and Stress Visualization Applications of Manganese-Based Organic-Inorganic Hybrid Halides

WANG Yuzhen^{1*}, ABLAIHET Abdulla¹, CHEN Huilin², Xia Zhiguo^{1*}

(1. The State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, Guangdong Provincial Key Laboratory of Fiber Laser Materials and Applied Techniques, School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

* Corresponding Authors, E-mail: wangyuzhen@scut.edu.cn; xiazg@scut.edu.cn

Abstract: Organic-inorganic hybrid metal halide materials feature structural diversity and outstanding optoelectronic properties, and exhibit unique characteristics in the fields of mechanoluminescence (ML) and sensing. In this work, a zero-dimensional manganese-based hybrid halide crystal (TPPen)₂MnBr₄ (TPPen = pentyltriphenylphosphonium) was designed and synthesized. We systematically characterized the crystal structure, photoluminescence performance, and luminescent response under mechanical stimuli. The crystal emits bright photoluminescence under 365 nm excitation and generates ML upon mechanical stimulation. Both emission bands are centered at 517 nm, originating from the d-d transitions of Mn²⁺ ions. After embedding the crystals into elastomer films, the composite films display distinct luminescent responses under different scratching forces, demonstrating their great potential for stress visualization applications.

Keywords: Mn-based hybrid halide; photoluminescence; mechanoluminescence; stress visualization

1 引言

力致发光 (mechanoluminescence, ML) 是一种

在机械刺激 (如压缩、拉伸、摩擦等) 下材料产生发光的物理现象。自早期在蔗糖晶体中被观察到以来, 力致发光因其在应力传感、损伤检测以及人机

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金 (52425206, 52302177); 广东省基础与应用基础面上 (2024A1515011070) 资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (52425206 and 52302177), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2024A1515011070).

交互等领域的巨大应用潜力而受到广泛关注^[1-4]。与需要持续外部激发的光致发光或电致发光不同,力致发光能够实现无需电源的实时机械-光学响应,因此被认为是下一代智能材料和结构健康监测系统中的重要功能载体^[5,6]。其中,弹性变形诱导的可重复 ML 在循环应力传感和结构健康监测中尤为重要,而断裂诱导的 ML 则伴随材料的不可逆破坏,更适用于一次性应力事件记录、过载预警和破坏痕迹标记等特定场景。

当前,研究者已开发出多种力致发光材料。其中主要包括无机荧光粉体系,如 ZnS:Mn , $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$, CaZnOS 基材料以及某些压电晶体^[7-9]。这些材料通常被嵌入弹性体或者聚合物基质中,在机械变形作用下实现可重复的力致发光。此外,有机材料和金属有机框架近年来也被探索作为新型力致发光材料体系,但其发光效率和稳定性相比无机发光材料仍有较大差异^[10]。

尽管目前对力致发光材料的研究已取得了显著的进展,稀土长余辉基力致发光体系仍存在难以规避的应用短板,即必须预先经过紫外/可见光辐照完成陷阱充能,才能产生明显的力致发光信号。这一类材料的典型代表为 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$, 其力致发光完全依赖紫外预充储存在深陷阱的载流子;而少量缺陷匮乏的纯硫化锌晶体,在无预辐照条件下也仅能观测到极微弱力致发光^[11]。该预充能步骤极大提升设备操作复杂度,严重限制其在密闭、无光、无法提前光照储能场景下的实际应用。相比之下, ZnS:Mn 、 ZnS:Cu 等压电弹性发光晶体以及部分有机无机杂化卤化物断裂发光晶体,依靠外力直接诱导局域压电电荷分离或断裂瞬时电场激发载流子,无需紫外预充即可实现力学发光,在无源、全黑暗应力可视化传感领域具备独特优势^[12]。此外,有机无机杂化卤化物材料还具有合成简单、发光效率高、机械响应灵敏等优点,在应力传感领域展现出广阔的应用前景^[13]。

近年来,锰基有机-无机杂化卤化物作为一类新兴的力致发光材料体系受到广泛关注。得益于有机阳离子的结构多样性和 $[\text{MnX}_4]^-$ 四面体单元的发光可调性,该类材料可在零维结构框架下实现高效的光致发光与力致发光的协同输出。2024 年,He 等报道了一对 $[\text{H}_2(2\text{R},4\text{R})-(+)/(2\text{S},4\text{S})-(-)-2,4\text{-bis(diphenylphosphino)pentane}]\text{MnBr}_4$ 手性零维锰溴化物,在机械刺激下首次实现了明亮的圆偏振

力致发光,且其力致发光在 0.1 N 的超低外力下即可被检测到,展现了极高的力敏感性^[14]。此外, $(\text{ETP})_2\text{MnBr}_4$ ($\text{ETP} = \text{ethyltriphenylphosphonium}$) 在压力刺激下可实现机械发光与压致变色的协同响应,并在无外部光源条件下成功驱动了球磨罐内的光化学反应,拓展了力致发光从传感向“力-光-化学”能量转化的应用边界^[15]。上述进展表明,锰基杂化卤化物在无需紫外预充能的本征型力致发光方面具有独特优势,其发光效率、机械敏感性和可加工性正快速提升,在柔性传感、信息加密和自供能光学标记等领域展现出广阔的应用前景。当前已报道的锰基杂化卤化物 ML 大多属于断裂主导型,其发光以材料结构的不可逆损伤为代价。尽管此类 ML 不具备弹性 ML 的可重复使用特性,但在单次应力事件的光学记录、隐蔽结构破坏标记以及防伪加密等无需重复使用的场景中仍具有独特的应用价值。

基于此,本工作聚焦于断裂型 ML 的性能表征及其在一次性应力可视化中的可行性验证,报道了一种零维锰基杂化卤化物力致发光材料 $(\text{TP-Pen})_2\text{MnBr}_4$ ($\text{TP-Pen} = \text{戊基三苯基膦}$)。通过系统的单晶结构解析、光谱学表征及力学响应测试,我们证明晶体在温和的机械刺激下能够产生明亮的绿色发光,且无需任何光学预激发。该材料同时展现出高的力致发光强度、优异的热稳定性以及简便的溶液合成工艺,并成功实现了柔性薄膜基底的应力可视化成像。本研究结果不仅丰富了杂化卤化物力致发光材料体系,揭示了其独特的力致发光机制,研究也为无需预充能的本征型力致发光材料设计提供了新的实验依据,有望推动其在自供能传感和智能结构监测等领域的实际应用。

2 实 验

2.1 样品制备

本研究所用主要化学试剂包括:溴化锰 (MnBr_2 , 纯度 99.8%)、戊基三苯基溴化磷 ($\text{C}_{23}\text{H}_{26}\text{PBr}$), 氢溴酸, N,N -二甲基甲酰胺 (DMF, 色谱纯, 无水级)。所有试剂均直接使用,未经进一步纯化处理。采用溶液挥发法合成 $[\text{C}_{23}\text{H}_{26}\text{P}]_2\text{MnBr}_4$ 单晶 ($(\text{TP-Pen})_2\text{MnBr}_4$)。首先,将 MnBr_2 与 $\text{C}_{23}\text{H}_{26}\text{PBr}$ 按物质的量之比 1:2 精确称量,置于 20 mL 玻璃样品瓶中。随后,向样品瓶中加入 6 mL 混合溶剂(氢溴酸与 DMF 的体积比为 2:1),在 110 °C 下磁力搅拌 30 min,使固体完全溶解,形成澄清透明的黄绿

色溶液。将样品瓶置于 60 °C 恒温环境中静置结晶, 溶剂缓慢挥发。约 7-10 天后, 瓶中析出黄绿色块状透明单晶。将所得晶体用少量无水乙醚洗涤 2 次, 最后置于干燥箱密封保存备用。

本文采用光固化法制备 (TPPen)₂MnBr₄@gel 柔性薄膜, 其实验过程包括: 首先, 称取 3.48 g 丙烯酸羟乙酯, 加入 0.046 g N,N 亚甲基双丙烯酰胺和 0.046 g 三甲基苯甲酰基二苯基氧化膦, 在玻璃瓶中搅拌至溶解, 倒入尺寸为 3.5 cm×3.5 cm 的正方形聚四氟乙烯模具, 再加入 1 g 研磨的 (TPPen)₂MnBr₄ 晶体机械搅拌后放置在波长为 405 nm 功率为 1 W 的紫外灯下, 距离光源 20 cm 处, 3 min 后即可从模具中取出固化的柔性薄膜。薄膜厚度可通过截面扫描电子显微镜 (SEM) 图获得 (图 S1), 为 0.86 mm。

2.2 样品表征

采用 X 射线衍射仪测试所有样品的 X 射线衍射 (XRD) 图谱, 测试使用单色化 Cu K α 射线 (波长 $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), 搭配线性 VANTEC 探测器。样品的微观表面形貌、能量色散光谱 (EDS) 以及元素分布图是通过配备 Bruker XFlash 6-100 探测器的 JSM7900F 场发射扫描电子显微镜观察的。绝对光致发光量子效率采用滨松光子公司

Quantaaurus-QY Plus C13534-11 型绝对荧光量子产率测试仪测定。漫反射光谱利用日立 UH4150 分光光度计测试, 测试以硫酸钡 (BaSO₄) 作为参比标准样品。室温光致发光 (PL) 光谱与光致发光激发 (PLE) 光谱通过稳态/瞬态荧光光谱仪 FLS1000 (英国爱丁堡公司) 采集, 仪器以 450 W 连续氙灯作为激发光源。变温光致发光光谱仍使用该设备, 并外接 TC202 Orient KOJI 液氮低温装置完成测试。光致发光衰减曲线同样由 FLS1000 荧光分光光度计测得, 激发光源为 μ F900 微秒闪光灯。力致发光光谱由光纤光谱仪记录 (海洋光学, QE Pro)。

3 结果与讨论

3.1 晶体结构与光致发光性能

本文所设计合成的 (TPPen)₂MnBr₄ 晶体结构如图 1(a) 所示, 该晶体属于单斜晶系, 空间群为 P2₁/n, 晶胞参数分别为 $a=10.8431 \text{ \AA}$, $b=22.4040 \text{ \AA}$, $c=19.3647 \text{ \AA}$, $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta = 98.62^\circ$ 。在晶体结构中, Mn 与 Br 形成四面体配位单元, 此无机单元被大位阻的有机阳离子 (TPPen)⁺ 有效分隔, 形成典型的零维结构。这种 0D 结构具有大的 Mn-Mn 间距, 可有效抑制发光中心之间的浓度猝灭效

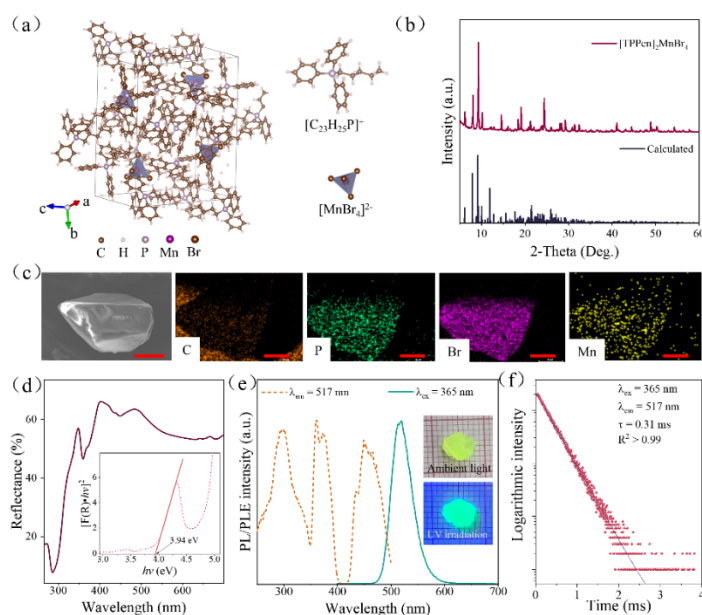


图 1(a) (TPPen)₂MnBr₄ 的单晶结构; (b) XRD 图; (c) SEM 及各元素分布, 比例尺 100 μm ; (d) 室温下漫反射光谱及光学带隙拟合; (e) 室温下激发-发射光谱与单晶在自然光和紫外光照射下的照片; (f) 室温下衰减曲线及寿命拟合结果。

Fig. 1 (a) Structure of (TPPen)₂MnBr₄; (b) XRD pattern; (c) SEM image and elemental distribution mappings (the red line represents 100 μm); (d) Diffuse reflectance spectrum and optical band gap fitting at room temperature; (e) PLE and PL spectra at room temperature, along with photographs of the single crystal under natural light and UV irradiation; (f) Fluorescence decay curve and lifetime fitting results at room temperature.

应,可产生高效发光^[16]。图 1(b)为生长的晶体与标准卡片对比^[17],两者衍射峰位置基本吻合,未观察到明显的杂相,表明合成的晶体为纯相。图 1(c)展示了晶体的扫描电子显微镜(SEM)及EDS照片,元素面分布图像显示C、P、Mn、及Br元素在晶体中均匀分布。漫反射光谱的测试结果如图 1(d)所示,晶体在 275 nm、365 nm 及 450 nm 处出现三个特征吸收峰,其中, 275 nm 处的吸收归属于带边吸收,而 365 和 450 nm 处的吸收则对应于 Mn^{2+} 离子的 d-d 特征跃迁。根据 Kubelka-Munk 方程^[18]:

$$[F(R) \cdot hv]^2 = A(hv - E_g) \quad (1)$$

$$F(R) = (1 - R)^2 / 2R \quad (2)$$

其中, $F(R)$, $h\nu$, A , E_g , R 分别代表吸收系数,入射光子能量,拟合常数,光学带隙及反射率。根据文献的计算结果^[17], $(\text{TPPen})_2\text{MnBr}_4$ 应具有直接带隙, Tauc plot 拟合中采用直接允许跃迁模型。计算出 $F(R)$ 值后,通过 Tauc plot 拟合得到该晶体的光学带隙为 3.94 eV。随后测试了材料的激发和发射光谱(图 1(e))。在 365 nm 的紫外光照射下,黄绿

色的晶体材料展现出明亮的绿色发光,发光峰中心波长位于 517 nm,来源于 Mn^{2+} 的激发态 ${}^4\text{T}_1$ 到基态 ${}^6\text{A}_1$ 的 d-d 跃迁;监测 517 nm 的激发峰,可观测到三个特征激发峰,峰位分别为 296 nm, 365 nm 和 452 nm,依次对应于 Mn^{2+} 的基态 ${}^6\text{A}_1$ 到 ${}^4\text{A}_2$, ${}^4\text{E}$ (${}^4\text{D}$) 及 ${}^4\text{T}_2$ (${}^4\text{G}$) 激发态的跃迁。^[19] 这些激发峰的位置与图 1(d) 中漫反射光谱所示的吸收峰位置相符,进一步验证了能级指认的准确性。此外,根据图 1(f) 中的衰减曲线,采用单指数函数拟合出晶体的荧光寿命为 0.31 ms,这一处于毫秒量级的长寿命的发光特性是 Mn^{2+} 离子 d-d 跃迁的典型特征,该跃迁在自旋选择定则上属于禁阻跃迁,因此具有较长的激发态寿命。

为了进一步研究杂化卤化物晶体的发光性质及发光机制,我们系统测试了不同波长的光激发下的发射光谱,结果展现在图 2(a) 中。当激发波长变化时,晶体的发射峰位置并未发生任何偏移,证实晶体的绿光发射唯一源于 Mn^{2+} 离子,即晶体中仅存在单一的发光中心。随后我们测试了晶体的变温发光性质(图 2(b)),可观察到晶体的发光强度在升温时出现微弱的衰减,展现了较好的稳

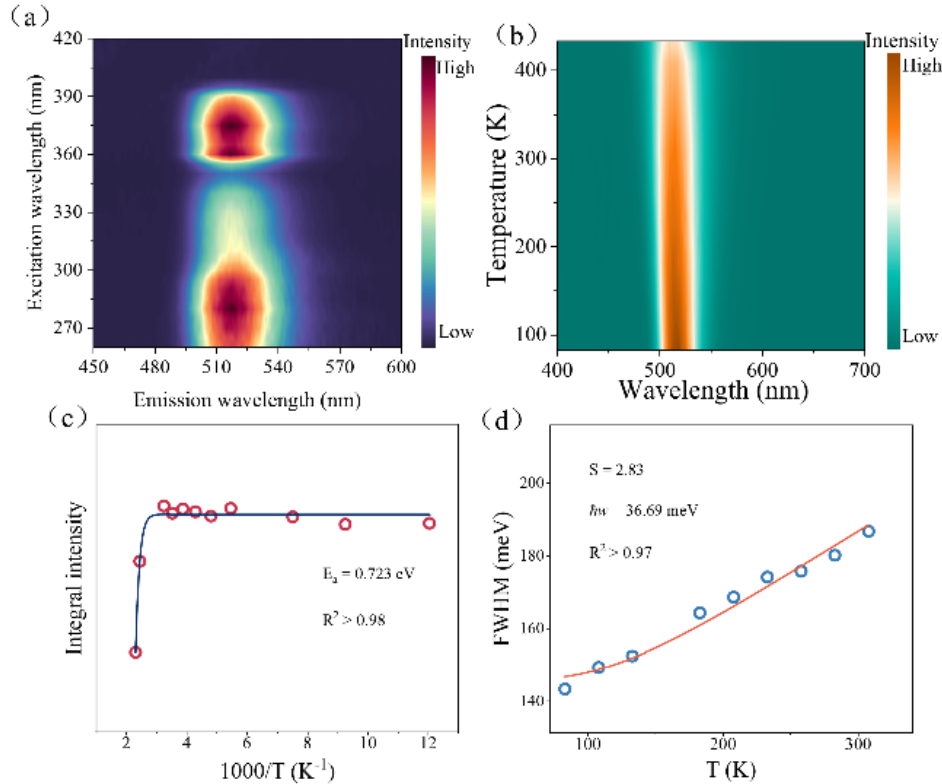


图 2 $(\text{TPPen})_2\text{MnBr}_4$ 晶体在(a)不同波长激发下的发射光谱;(b)365 nm 激发下的变温发射光谱;(c)热激活能和(d)黄昆因子拟合图谱。

Fig. 2 $(\text{TPPen})_2\text{MnBr}_4$ crystal: (a) Emission spectra under excitation at different wavelengths; (b) Temperature-dependent emission spectra excited at 365 nm; Fitting results of (c) thermal activation energy and (d) Huang - Rhys factor.

定性。为量化热猝灭抗性,我们依据 Arrhenius 模型对变温发光强度进行拟合:

$$I = \frac{I_0}{1 + B \exp(-\frac{E_a}{k_B T})} \quad (3)$$

其中, I 和 I_0 代表温度为 T 及初始时刻的发光强度, B 为拟合常数, E_a 为激活能, k_B 是玻尔兹曼常数。拟合得出激活能高达 0.723 eV (图 2(c))。该值显著高于大多数已报道的锰基杂化卤化物, 如 $(\text{EC-MP})_2\text{MnBr}_4$ 为 0.189 eV^[20], $\text{PrPP}_2\text{MnBr}_4$ 为 0.123 eV^[21], $(4\text{-NH}_3\text{TBP})\text{MnBr}_4$ 为 0.669 eV^[22], 进一步印证了晶体具有较高的热猝灭能垒。此外, 我们利用变温下的发射峰半高宽 (FWHM) 拟合出的 Huang-Rays 因子 (S), 用以评估电子-声子耦合强度^[20]:

$$FWHM = 2.36 \sqrt{S} \hbar \omega \sqrt{\coth \frac{\hbar \omega}{2k_B T}} \quad (4)$$

其中 $\hbar$ 为约化普朗克常数, ω 为声子角频率。如图 2(d) 所示, 拟合出的 S 值为 2.83, 表明晶体中 Mn 的发光受到电声耦合作用的影响较弱, 有助于降低非辐射弛豫的损失, 进一步证明晶体的高效发光, 测得的量子效率为 76.71%。

3.2 晶体的力致发光性能

我们进行了一系列机械刺激实验以探究晶

体的力致发光 (Mechanoluminescence, ML) 行为。如图 3(a) 所示, 在晶体断裂时瞬时产生强烈的绿光发射, 此类 ML 现象在锰基杂化卤化物中已有相关报道^[14, 23, 24]。此外, 用玻璃棒对晶体样品进行机械研磨时, 同样可观察到明亮的绿色 ML 发射。将晶体装到玻璃瓶并振荡摇晃, 晶体与瓶壁之间的撞击亦可诱发明显的绿色光发射 (如图 3(b) 所示)。为进一步明确 ML 发射的起源, 我们测试了 ML 光谱, 如图 3(c) 所示, 测试出的 ML 光谱与光致发光的光谱发光峰位完全一致, 充分表明晶体的力致发光也来源于发光中心 Mn^{2+} 离子的特征跃迁。当晶体受到机械力断裂时, 沿断裂面会产生正负电荷的分离。这些分离的电荷在断裂瞬间加速, 形成高能电子, 进而轰击并激发 Mn^{2+} 发光中心, 产生光发射。^[25] 此外, 我们还考察了晶体尺寸对 ML 发光强度的影响。实验发现, 晶体的 ML 发光强度与晶体尺寸呈明显正相关关系, 即晶体尺寸越大, ML 发光强度越高。这一现象可能是因为大晶体受压产生的有效断裂总面积更大^[25]。对同一单晶样品, 当多次加压时, 单晶持续发生碎裂, 并且 ML 强度持续降低 (图 S2), 证明晶体的发光来源于断裂型 ML, 是不可逆的破坏型发光。

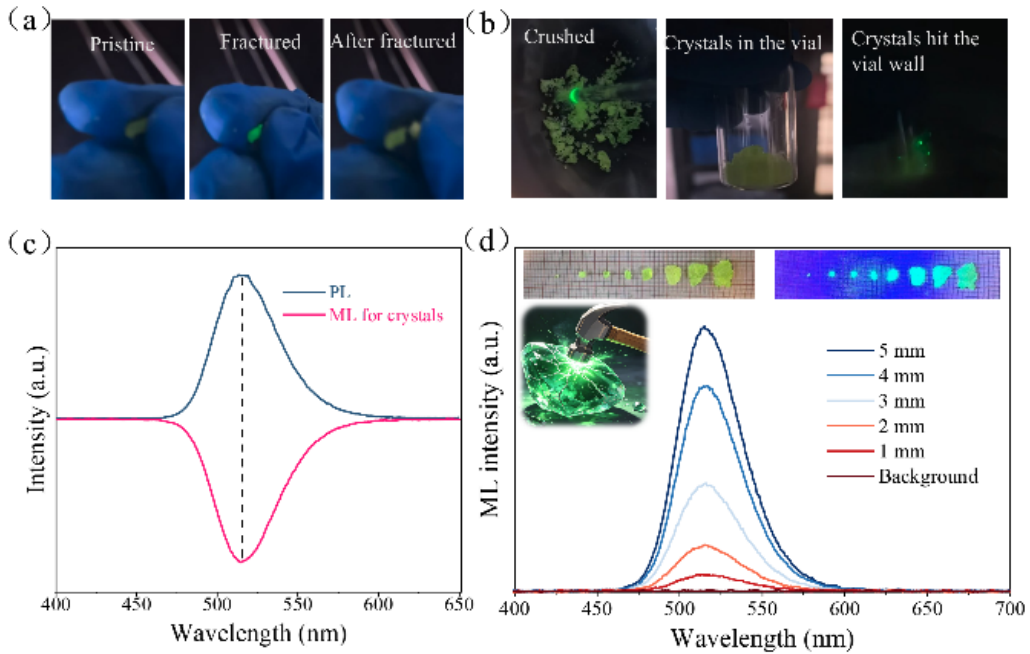


图 3(a) $(\text{TPPen})_2\text{MnBr}_4$ 晶体断裂发光照片; (b) 晶体被碾碎及撞击玻璃瓶壁的照片; (c) 力致发光与光致发光光谱对比; (d) 不同尺寸单晶力致发光光谱。

Fig. 3 (a) ML photographs of fractured $(\text{TPPen})_2\text{MnBr}_4$ crystals; (b) Photographs of crushed crystals and crystals impacting glass bottle walls; (c) Comparison of ML and PL spectra; (d) ML spectra of crystals with different sizes.

3.3 应力可视化应用展示

为了评估(TPPen)₂MnBr₄晶体在应力可视化领域的应用前景,我们设计并制备了弹性体复合薄膜。薄膜的表面和截面SEM图像及元素分布图表明晶体颗粒在聚合物基体中的均匀分布(图S1)。如图4(a)所示,所制备的薄膜在紫外光照射下也呈现出均匀且明亮的绿色发光,与晶体的发光别无二致,表明Mn²⁺的发光特性在聚合物基体中得以完好保留,发光量子效率为53.68%(图S3)。同时,薄膜展现出良好的机械柔韧性,可随

意弯折、扭曲而不发生破裂或发光性能衰减。如图S4所示,多次折叠后薄膜发光强度保持稳定。为进一步确认薄膜中ML发光的起源,我们对测试了晶体的PL光谱和薄膜的ML光谱,结果如图4(b)所示,两者发光峰位相同,半峰宽一致,充分证明薄膜的ML发射也归属于Mn²⁺发光中心的⁴T₁→⁶A₁特征跃迁,即其发光机理与晶体保持一致,未因复合加工而发生改变。随着刺激次数增加,薄膜的ML强度逐渐减弱(图S5),这可归因于薄膜中不可逆的晶体断裂。

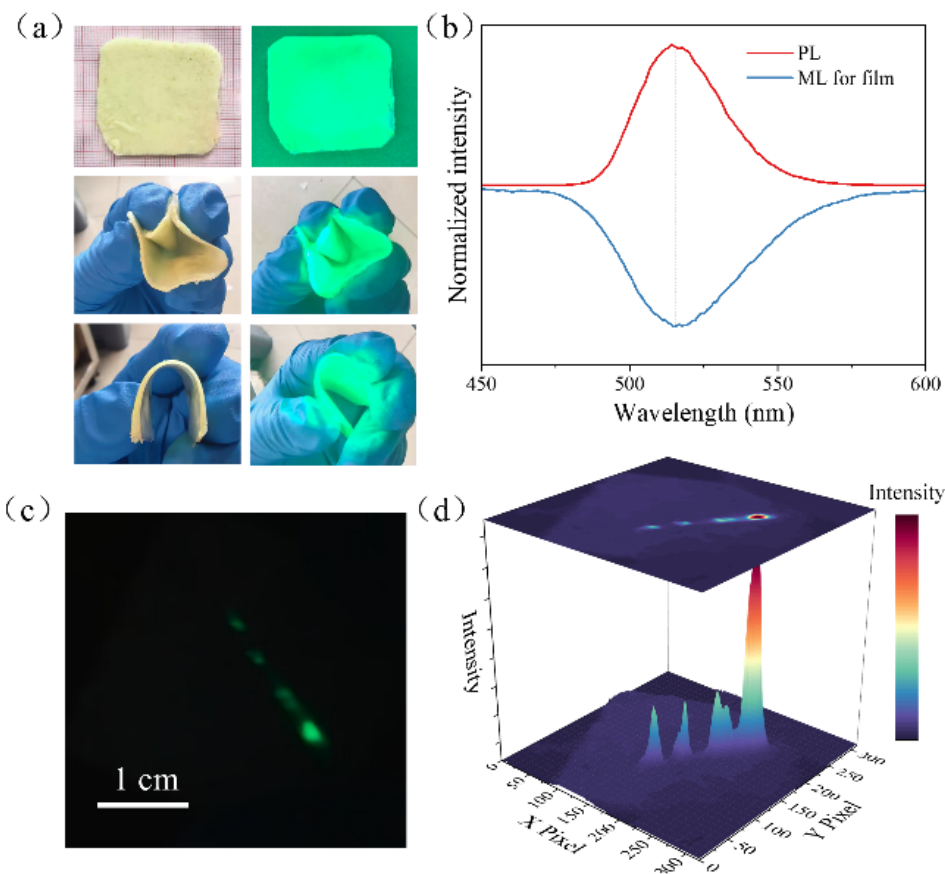


图4(a) (TPPen)₂MnBr₄@gel照片及紫外光照射下的发光照片;(b)薄膜力致发光与晶体光致发光光谱对比;(c)玻璃棒划过薄膜的ML照片;(d)提取像素灰度值得到的三维荧光强度分布图。

Fig. 4 (a) Photographs of (TPPen)₂MnBr₄@gel and its luminescence image under UV irradiation; (b) Spectral comparison between ML of the film and PL of crystals; (c) ML photograph of the film scratched by a glass rod; (d) 3D fluorescence intensity distribution image obtained by extracting pixel grayscale values.

在应力响应实验中,我们使用玻璃棒在薄膜表面施加刺激,以定性展示其力致发光的即时响应特性。如图4(c)所示,划擦轨迹处瞬时产生清晰的绿色发光,且发光强度随施加压力的改变呈现显著差异,即轻度划擦时发光较暗,而重度划擦时发光明显增强,展示了划痕区域内发光强度的空间不均匀性,该差异与手动划擦时施力大小的变化趋势定性

相符。为了对上述现象进行更为精准的定量分析,我们提取了图4(c)中发光轨迹的像素灰度值,并构建了三维荧光强度分布图(图4(d))。图中x-y平面代表空间位置(像素值),z轴表征发光强度,不同划痕区域的强度峰谷差异清晰可辨,直观地反映了不同力度下ML强度的变化。该结果不仅验证了薄膜在力学刺激下的实时发光响应能力,更凸显了其在

应力分布可视化、结构健康监测及人机交互界面等领域的潜在应用价值。

4 结 论

本文成功合成了零维锰基杂化卤化物晶体 (TPPen)₂MnBr₄, 并系统研究了其晶体结构、光致发光及力致发光性能。(TPPen)₂MnBr₄ 晶体属于单斜晶系, [MnBr₄]²⁻四面体单元被大位阻有机阳离子有效分隔, 形成典型的零维结构, 有效抑制了浓度猝灭效应。在 365 nm 紫外光激发下, 晶体发射出明亮的绿色荧光, 峰值位于 517 nm, 荧光寿命为 0.31 ms, 归属于 Mn²⁺ 离子 ⁴T₁ → ⁶A₁ 跃迁。晶体在机械刺激下展现出明亮的绿色力致发光, 其 ML

光谱与 PL 光谱高度吻合, 证实 ML 发射同样源于 Mn²⁺ 离子的特征跃迁。进一步将晶体复合于弹性体薄膜后, 该薄膜在保持良好柔韧性的同时, 对划擦力度表现出灵敏的发光响应, 三维灰度分析直观验证了其在应力分布可视化方面的应用潜力。综上所述, (TPPen)₂MnBr₄ 作为一种兼具高效绿光发射、优异热稳定性和有效力致发光响应的零维杂化卤化物材料, 在柔性应力传感和结构健康监测等领域展现出广阔的应用前景。

本文(补充文件及)专家审稿意见和作者回复内容
下载地址: http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.2026****.

参 考 文 献:

- [1] CHONGYANG Cai, XUAN Fan, WangZE, *et al.* Research progress on inorganic ultraviolet mechanoluminescence [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2026: 1-15.
- [2] CHEN Changjian, LIN Zhu, HUANG Honghui, *et al.* Revealing the intrinsic decay of mechanoluminescence for achieving ultrafast-response stress sensing [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(46): 2304917.
- [3] CHEN MENGJIA, CHEN FUGUANG, CHEN ZHI, *et al.* 力致发光光纤及其应用研究进展 [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(13): 1316009.
- [4] AO Yuchen, WANG Jin, CAI Gemei. Advances in luminescence characteristics, luminescence mechanisms and applications of inorganic mechanoluminescent materials [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(6): 942-963.
- [5] QIN Shiye, WEI Wanyuan, TIAN Birong, *et al.* Self-recoverable, highly repeatable, and thermally stable mechanoluminescence for dual-mode information storage and photonic skin applications [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(32): 2401535.
- [6] WANG Chunfeng, PENG Dengfeng, PAN Caofeng. Mechanoluminescence materials for advanced artificial skin [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(14): 1147-1149.
- [7] ZHENG Pan, XIAO Yao, XIONG Puxian, *et al.* Flexible optical fiber stress/temperature dual-mode sensing based on Ca-ZnOS:Nd,Er [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(38): 2505094.
- [8] LIU Shengqiang, GUO Yang, SONG Zhen, *et al.* Bright chromium-sensitized lanthanide nir-ii mechanoluminescence in a piezoelectric oxide [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(43): 202506957.
- [9] LIU Shuchang, CUI Yuntao, SUN Xizhi, *et al.* Transparent SrAl₂O₄:Eu²⁺, Dy³⁺ glass-ceramics with significant mechanoluminescence [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, 44(13): 7921-7926.
- [10] QI Yan, LIU Jianjun, WEI Xiaofang, *et al.* Efficient, reproducible, and thermally enhanced organic host-guest mechanoluminescence from TADF emitters [J]. *Matter*, 2026, 9(5): 102698.
- [11] CHANDRA V. K., CHANDRA B. P. Dynamics of the mechanoluminescence induced by elastic deformation of persistent luminescent crystals [J]. *Journal of Luminescence*, 2012, 132(3): 858-869.
- [12] HUANG Zefeng, LI Xu, LIANG Tianlong, *et al.* Smart mechanoluminescent phosphors: A review of zinc sulfide-based materials for advanced mechano-optical applications [J]. *Responsive Materials*, 2024, 2(3): e20240019.
- [13] LIU Xiaoting, GE Chengda, YANG Ziqi, *et al.* Guanidine-templated manganese halides single crystals toward efficient mechanoluminescence and photoluminescence by supramolecular interactions modulation [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(19): 2100862.
- [14] HE Xin, ZHENG Yuantian, LUO Zhishan, *et al.* Bright circularly polarized mechanoluminescence from 0d hybrid manganese halides [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(15): 2309906.

- [15] LI Qiushuang, GENG Jinxing, PENG Chengjie, *et al.* Multi-stimuli-responsive mechanoluminescent manganese halide toward external-light-free photochemistry [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026; e4311658.
- [16] BAO Wenxue, PENG Hui, ZOU Bingsuo. Solution synthesis, photophysical properties and photoelectric application of zero-dimensional organic-inorganic hybrid metal halide [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(10): 1751-1769.
- [17] JIN J. C., HAN K., HU Y. K., *et al.* Zn^{2+} doping in organic manganese(ii) bromide hybrid scintillators toward enhanced light yield for x-ray imaging [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(14): 2300330.
- [18] HUAIQIANG B. A., XUHUI X. U. 隧道照明用 $\text{BaMg}_{1.072}\text{Al}_{9.928}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ 近红外发光材料的光学性能及夜视成像 [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2026, 47(5): 744-754.
- [19] KONG De-Hao, ZHOU Yang, CHEN Zhong-Ning, *et al.* Manganese(II)-based luminescent materials for advanced scintillation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 0: e75222.
- [20] WANG Xiao, LI Yanyan, TANG Haitao, *et al.* Green synthesis and flexibilization engineering of $(\text{ECMP})_2\text{MnBr}_4$ for smart textile-integrated luminescence [J]. *Advanced Science*, 2025, 12(42): e11652.
- [21] XIAO Shang-Biao, ZHANG Xiangzhou, MAO Xingchu, *et al.* Ultrahigh X-ray imaging spatial resolution enabled by an 0D Mn(II) hybrid scintillator [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(40): 2404003.
- [22] CHEN Jing-Hua, LUO Jian-Bin, HE Zi-Lin, *et al.* An anti-thermal-quenching organic - inorganic hybrid manganese-based single-crystal scintillator for high-temperature X-ray imaging [J]. *Chemical Science*, 2025, 16(21): 9375-9384.
- [23] WANG Fu, WANG Kangkang, ZHAO Qiyu, *et al.* Triple-mode luminescence and versatile applications of 0D manganese-based hybrid halides [J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(12): 202403234.
- [24] YANG Tian-Yi, LI Si-Nuo, CHEN Hai-Sheng, *et al.* Self-recoverable elastico mechanoluminescence of a hybrid metal halide crystal [J]. *National Science Review*, 2025, 12(5): nwae372.
- [25] WANG Yunluo, YANG Hang, YAO Wenxuan, *et al.* Mechanistic insight into the Young's modulus threshold for fracto-mechanoluminescence in manganese halides [J]. *Nature Communications*, 2026, 17(1): 1154.



汪玉珍(1995-),女,安徽安庆人,博士,副教授,2022年于中国人民大学获得博士学位,主要从事发光材料的传感应用研究。

E-mail: wangyuzhen@scut.edu.cn



夏志国(1979-),男,湖北黄陂人,博士,教授,2008年于清华大学获得博士学位,主要从事稀土掺杂固体发光材料和新型金属卤化物发光材料的研究。

E-mail: xiazg@scut.edu.cn