

## 力致发光材料的前沿应用进展

王 宇<sup>1</sup>, 索 浩<sup>2</sup>, 王 锋<sup>1,3\*</sup>

(1. 香港城市大学 材料科学与工程系, 香港 九龙 999077;

2. 河北大学 物理科学与技术学院, 河北 保定 071002;

3. 香港城市大学 清洁能源研究院, 香港 九龙 999077)

**摘要:** 力致发光是固体材料在机械作用下产生光发射的独特现象, 因其具备自供能、可视化、响应灵敏等优势, 展现出广阔的应用前景。本文综述了近年来力致发光材料在自供能传感、工程结构健康监测、信息安全加密及生物医学成像等方向的新兴应用进展, 并简要分析了材料亮度提升与光谱调控的关键技术路径。同时, 指出了当前存在的机理研究尚不充分等挑战, 并展望了其在柔性电子、智能传感等领域的未来发展方向。本文旨在为力致发光技术的实际应用提供有价值的参考。

**关键词:** 力致发光; 应力传感; 信息安全; 生物医学应用

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10. 37188/CJL. 20260074

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260074

## Recent Progress in Frontier Applications of Mechanoluminescent Materials

WANG Yu<sup>1</sup>, SUO Hao<sup>2</sup>, WANG Feng<sup>1,3\*</sup>

(1. Department of Materials Science and Engineering, City University of Hong Kong, Kowloon 999077, Hong Kong SAR, China;

2. College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding 071002, China;

3. Hong Kong Institute for Clean Energy, City University of Hong Kong, Kowloon 999077, Hong Kong SAR, China)

\* Corresponding Author, E-mail: fwang24@cityu.edu.hk

**Abstract:** Mechanoluminescence, the light emission of solids under mechanical actions, presents broad application prospects due to its unique advantages of self-powering capability, visualized response, and high sensitivity. This review highlights the emerging applications of mechanoluminescence materials in self-powered sensing, engineering structural health monitoring, information security, and biomedical imaging. Strategies for enhancing brightness and spectral regulation are briefly discussed, alongside current challenges such as insufficient mechanistic understanding. Future opportunities in flexible electronics and intelligent sensing are also envisioned. These insights aim to provide valuable references for advancing the practical implementation of mechanoluminescence technologies.

**Keywords:** mechanoluminescence; stress sensing; information security; biomedical applications

### 1 引 言

力致发光 (Mechanoluminescence, ML) 是指材料在受到诸如粉碎、摩擦、冲击、压缩、拉伸、弯曲、

扭曲、超声作用等外部机械刺激时, 能将机械能定量转换为辐射发光的特性。该过程无需外部供能, 可实现机械信号到光学信号的直接转换, 具备可视化、响应灵敏、远程无源遥感等突出优势。自 1605

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 香港研究资助局 (项目编号: 城大 11211922); 国家自然科学基金 (项目编号: 12474402)

Supported by the Research Grants Council of Hong Kong (project no. CityU 11211922), the National Natural Science Foundation of China (No. 12474402)

年 Francis Bacon 首次记录晶体破碎发光现象以来,力致发光材料的研究历经数百年发展,从早期的现象观察逐步迈入材料设计、机理解析与应用开发的新阶段<sup>[1-3]</sup>。早先的力致发光材料几乎都属于断裂发光材料,因发光过程不可恢复而导致应用受限、研究进程较为缓慢,彼时仅能实现简单的现象观察,尚无实际应用场景的探索基础。1999年,徐超男等人报道了  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  和  $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$  的力致发光现象,首次发现了可恢复性的力致发光特性,开启了对力致发光荧光粉的研究热潮<sup>[6-7]</sup>。这一里程碑式研究突破了传统断裂发光的局限,为后续自恢复型力致发光材料的定向开发奠定了核心基础,也让力致发光材料的应用探索成为可能。

此后,研究人员围绕材料体系拓展与性能优化持续攻关,已在多种无机化合物基质中,通过掺杂过渡金属离子或稀土离子获得力致发光。其中,混合阴离子结构设计赋予了材料更优异的压电性与光谱可调性;缺陷工程实现了载流子传输与陷阱态分布的精准调控;而复合材料体系优化则解决了无机力致发光粉体可加工性差的问题。这些技术突破共同打破了力致发光材料从实验室走向实际应用的性能瓶颈,推动其在智能传感、结构监测、信息安全、生物医学等领域的应用潜力被持续挖掘<sup>[8-19]</sup>。

本文系统综述了近年来力致发光材料在自供

能传感、工程结构健康监测、信息安全加密及生物医学成像等方向的新兴应用进展,梳理了材料性能优化的关键技术路径,分析了当前研究面临的核心挑战,并展望了其在柔性电子、智能传感等领域的未来发展方向,旨在为相关技术的实际应用与创新研发提供参考。

## 2 力致发光的分类与机理

### 2.1 力致发光的分类

根据机械作用的施加方式,力致发光主要分为三种类型,即断裂发光、形变发光和摩擦发光,如图 1(a)所示。断裂发光指材料因外部机械作用产生断裂的过程中所伴随的发光现象,是最早被发现的力致发光形式之一,不具备重复性<sup>[11]</sup>。形变发光可进一步分为塑性形变发光和弹性形变发光<sup>[20-21]</sup>。其中塑性形变发光与断裂发光类似,发光过程通常伴随材料的不可逆结构破坏,难以实现重复激发。相比之下,弹性形变发光发生于材料的弹性形变阶段,在外力卸载后材料结构能够恢复,使发光过程具有良好的可重复性和稳定性,是当前力致发光研究的主要方向。摩擦发光指的是两种特定类型的材料在接触或分离时产生的发光现象,无需材料发生宏观断裂,仅通过界面的摩擦、揉搓、接触挤压等作用即可触发,属于非破坏性的机械刺激<sup>[7]</sup>。

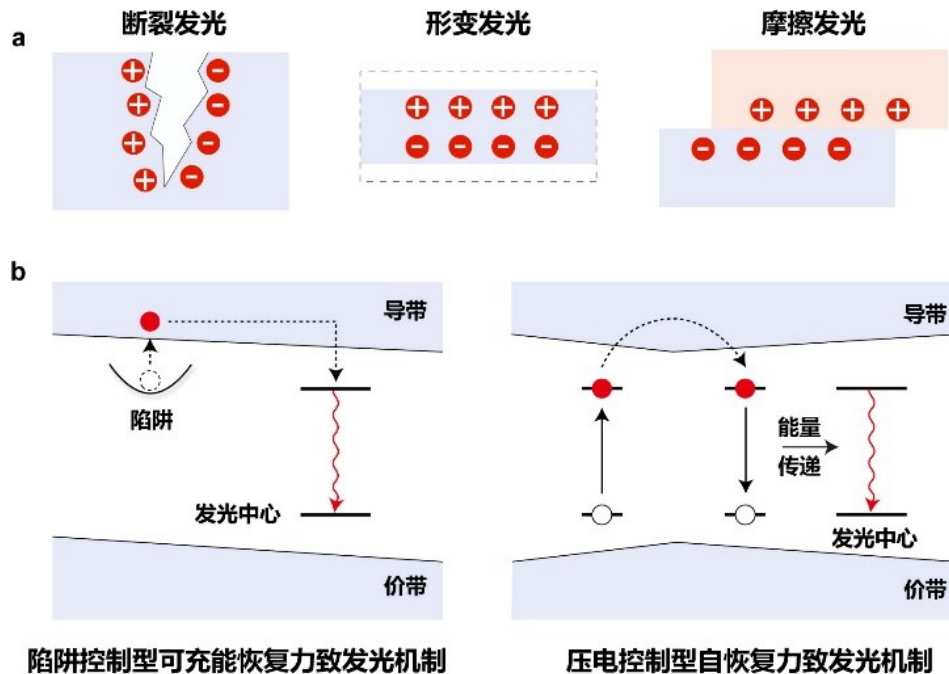


图 1 (a)力致发光的分类;(b)弹性力致发光的发光机理。

Fig. 1 Schematic illustration of (a) mechanoluminescence classification and (b) elastico-mechanoluminescence mechanism.

## 2.2 可恢复力致发光的机制

### 2.2.1 压电效应介导的弹性可恢复力致发光

可恢复的弹性力致发光可细分为两类:一类是需要预激发进行能量填充的陷阱控制型,另一类则是无需预辐照的自恢复型,如图1(b)所示<sup>[22-25]</sup>。

对于陷阱控制型力致发光材料而言,需要通过光激发预先充能,将载流子储存于陷阱中。随后,外部机械刺激产生的压电场会导致能带结构倾斜或陷阱深度减小,从而触发载流子脱陷。最终,被释放的载流子经由发光中心复合并产生力致发光。随着陷阱中载流子的耗尽,材料的力致发光强度将逐渐减弱直至消失,但可以再次通过光激发重新填充载流子得以恢复。经过多次优化、改进与完善,对于陷阱控制型力致发光材料来说,此“压电诱导载流子脱陷模型”是目前适用性最广、认可度最高的理论模型<sup>[26-41]</sup>。

对于无需预辐照的压电效应介导型力致发光材料而言,外加机械作用可通过压电效应直接激发发光中心,从而持续产生自恢复发光。在实际应用中,自恢复型力致发光材料具有显著优势,特别是在难以获取电力或光照的复杂场景中,体现出独特的应用价值与发展潜力。然而,目前针对自恢复型力致发光过程的具体激发机制,仍缺乏清晰且统一的物理解释<sup>[42-52]</sup>。

### 2.2.2 界面作用介导的摩擦自恢复力致发光

界面作用引发的摩擦发光现象的早期报道多见于ZnS体系,其核心机制为摩擦起电诱导电致发光,这也为后续界面作用介导型自恢复力致发光的研究提供了理论参考。近年来,一种新型界面作用介导型自恢复力致发光体系逐渐发展起来。该类材料率先于2019年在YAG:Ce<sup>3+</sup>体系中被发现,并在2025年Sr<sub>9</sub>LiMg(PO<sub>4</sub>)<sub>7</sub>:Dy<sup>3+</sup>相关研究中得到系统阐释<sup>[53-54]</sup>。

在这类体系中,无机粉体本身并无内在的力致发光特性,也不表现出电致发光行为。然而,当其与PDMS等柔性聚合物复合后,宏观机械力的施加会诱导无机粉体与聚合物界面产生氢键、静电作用等分子间相互作用,并通过界面能量/电荷转移触发无机粉体中发光中心的电子跃迁,进而产生力致发光。同时,无机粉体与聚合物基体间的界面结合状态可在外力消失后逐步重构,从而赋予复合材料体系良好的力致发光自恢复特性。

特别地,该界面作用过程可同步对陷阱控制型力致发光材料进行充能,实现即时力致发光与长余辉发光的双重效果。

## 3 力致发光材料的调控与优化策略

力致发光材料的性能调控与优化是拓展其多场景应用的核心前提,当前研究主要从成分调控、结构设计、体系复合及制备工艺四大维度构建系统性优化策略,实现材料光谱可调性、发光强度、稳定性、应力响应灵敏度及可加工性的提升。

### 3.1 调控激活离子与掺杂体系

通过选用合适的基质材料,结合不同稀土离子(Eu<sup>3+</sup>、Tb<sup>3+</sup>、Nd<sup>3+</sup>等)或过渡金属离子(Mn<sup>3+</sup>、Cr<sup>3+</sup>等)作为激活剂离子,可以实现从紫外到近红外的发射波段调控,适配多场景应用。如图2(a)所示,2019年,我们课题组通过在CaZnOS材料中掺杂不同的稀土离子,实现了力致发光从紫外光到近红外光的全光谱表达<sup>[55]</sup>。2025年徐旭辉课题组在Lu<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>10</sub>材料中,通过Pr<sup>3+</sup>与Gd<sup>3+</sup>的能级匹配构建能量转移通道,调控二者掺杂浓度,增强了深紫外光力致发光<sup>[56]</sup>。同年,吴明梅课题组通过在SrZnP<sub>2</sub>O<sub>7</sub>材料中掺杂Sm<sup>3+</sup>、Dy<sup>3+</sup>、Tb<sup>3+</sup>、Tm<sup>3+</sup>等稀土离子实现了覆盖350-750 nm光谱范围的力致发光。同时,通过引入碱金属离子Li<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>作为电荷补偿剂,解决稀土离子与基质中Sr<sup>2+</sup>取代导致的电荷失衡问题,并有效调控了晶格缺陷分布<sup>[57]</sup>。如图2(b)所示,张君诚团队于2026年构建了以Cr<sup>3+</sup>和Ni<sup>2+</sup>为发光中心的MgO基力致发光体系,实现了覆盖近红外一区与近红外二区的宽带、多模态力致发光,并系统研究了其力-电-光转换机理<sup>[58]</sup>。

对于特定种类的基质与激活离子体系,也可以通过取代基质中的阳离子或调控掺杂离子的浓度实现对力致发光光谱的调控。如图2(c)所示,我们课题组通过在Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Cr<sup>3+</sup>中共掺杂Y<sup>3+</sup>离子,破坏八面体的局部对称性,提升电子跃迁几率,使得发光强度相较于单掺Cr<sup>3+</sup>的样品提升3.8倍。此外,通过共掺杂In<sup>3+</sup>离子调控了Cr<sup>3+</sup>局域晶体场环境,当In<sup>3+</sup>的掺杂浓度从0%增加到40%时,Cr<sup>3+</sup>的发射光谱在715-830 nm的宽范围内呈现出连续的光谱红移,同时其半峰宽也由109 nm拓宽到170 nm。如图2(d)给出了进一步共掺Yb<sup>3+</sup>离子后,借助能量传递效应,发光范围拓展至650-1100 nm,半峰宽达到267 nm,实现了对力致发光

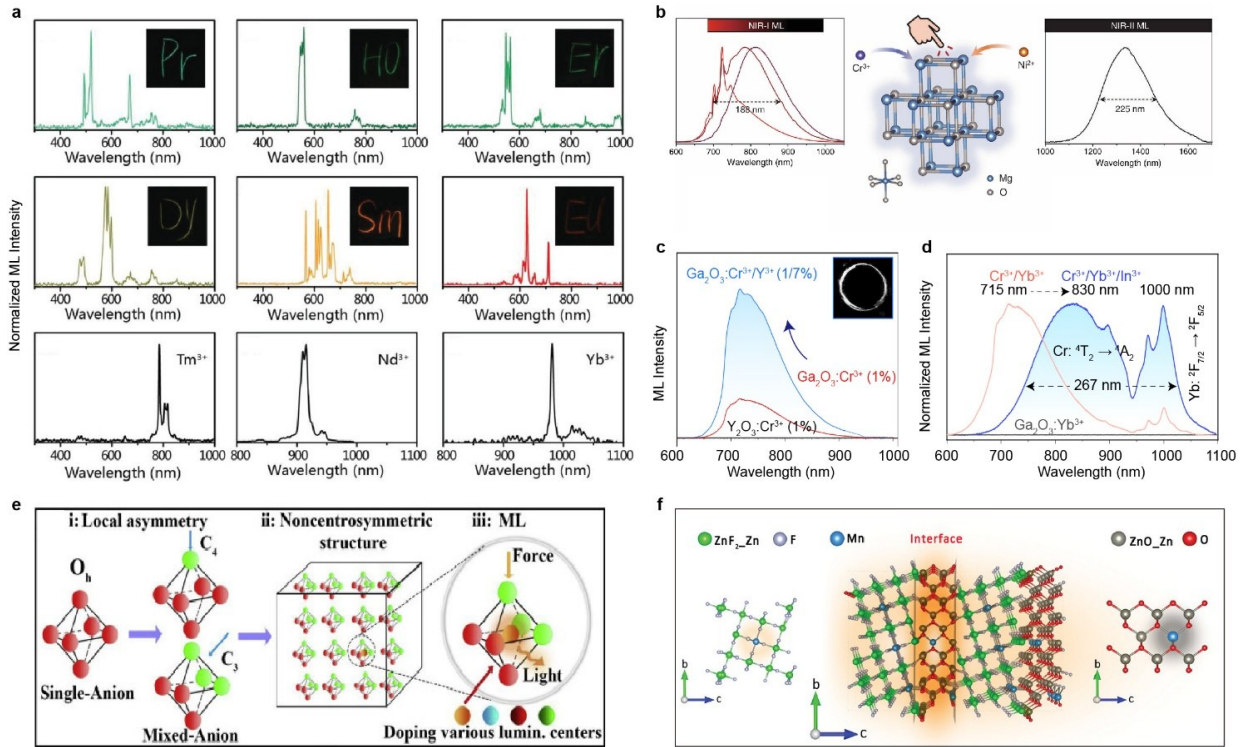


图2 (a) 稀土离子掺杂调控发射波段<sup>[55]</sup>; (b)  $\text{Cr}^{3+}/\text{Ni}^{2+}$  双发光中心实现近红外宽带发射<sup>[58]</sup>; (c) 阳离子取代调控局域晶场<sup>[59]</sup>; (d)  $\text{Cr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺杂拓展发光范围<sup>[59]</sup>; (e) 混合阴离子多面体构建非中心对称结构<sup>[60]</sup>; (f)  $\text{ZnS}/\text{CaZnOS}$  异质结增强电荷转移效率<sup>[63]</sup>。

Fig. 2 (a) Emission band regulation via rare earth doping; (b) Near-infrared broadband luminescence from  $\text{Cr}^{3+}/\text{Ni}^{2+}$  dual emission centers; (c) Local crystal field modulation through cation substitution; (d) Emission range extension by  $\text{Cr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doping; (e) Construction of non-centrosymmetric structures via mixed-anion polyhedrons; (f) Charge transfer efficiency enhancement in  $\text{ZnS}/\text{CaZnOS}$  heterojunctions.

强度和发光位置的精细调控<sup>[59]</sup>。

2020年,解荣军团队提出了一种开发力致发光材料的新策略,即在混合阴离子化合物中引入稀土或过渡金属离子实现可见-近红外多波段可调谐力致发光,如图2(e)所示。混合阴离子化合物中,不同阴离子的尺寸、电荷、电负性、极性存在差异,这些因素会破坏阳离子周围的局域对称性,使材料更容易获得非中心对称晶体结构并产生压电性。在此类具有非中心对称的混合阴离子化合物中引入特定的发光中心,通过压电效应和光致发光效应的耦合,可以实现多个波段的力致发光。基于上述设计思路,研究人员已经开发出 $\text{SrZn}_2\text{S}_2\text{O}$ 、 $\text{SrZnSO}$ 、 $\beta\text{-SiAlON}$ 和 $\text{SrS}_2\text{O}_2\text{N}_2$ 等一系列力致发光材料体系,实现了470 - 1600 nm超宽带可调谐力致发光<sup>[60]</sup>。值得一提的是,不同类型阴离子的引入会引起材料局域结构的显著变化,如禁带宽度改变、空间构型增多、晶体场能级分裂、成键类型转变、局域对称性降低等,为控制和调节材料的电子和原子结构增加了新的灵活性

维度<sup>[61]</sup>。

### 3.2 异质结与固溶体构建

由多种材料组合而成的异质结或固溶体结构,利用界面能带偏移增强电荷转移效率,优化缺陷结构与性能,提升发光强度与稳定性,已被认为是一种提高发光性能的有效策略<sup>[62-70]</sup>。近年来,彭登峰团队构建了一系列 $\text{ZnS}/\text{CaZnOS}$ 、 $\text{ZnS}/\text{SrZnOS}$ 、 $\text{CaZnOS}/\text{ZnS}/\text{SrZnOS}$ 异质结,结合 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Sm}^{3+}$ 、 $\text{Er}^{3+}$ 等离子作为发光中心。由于界面能带的显著偏移,电子激发能垒得以有效降低,从而促进了电荷分离与复合,最终实现了力致发光强度的大幅提升。构建的 $\text{ZnS}/\text{CaZnOS}$ 异质结以 $\text{Mn}^{2+}$ 为发光中心,其力致发光强度是商用 $\text{ZnS}$ 的2.2倍,是 $\text{CaZnOS}$ 的3.5倍,在1N的微弱机械刺激下即可发光<sup>[62]</sup>。2023年,杨艳民团队制备出基于 $\text{ZnF}_2/\text{ZnO}:\text{Mn}^{2+}$ 异质结的可重复力致发光材料,如图2(f)所示。通过密度泛函理论计算证实,发光增强的机制为异质结通过界面处阴离子和阳离子的轨道杂化降低电子从价带至导带的激发势垒,同时

借助价带偏移与导带偏移优化电荷转移路径,促进电子-空穴对高效复合<sup>[63]</sup>。张建忠和任晶团队在铌酸盐材料  $\text{NaNbO}_3/\text{LiNbO}_3$  和  $\text{Na}_{1-x}\text{Mg}_x\text{NbO}_3$  中发现,通过调节  $\text{Na}^+/\text{Li}^+$  比例或  $\text{Mg}^{2+}$  离子取代,优化缺陷深度与浓度,可实现力致发光强度 4 倍以上提升,且兼具压电响应与温度传感功能<sup>[65]</sup>。2025 年,王赵锋课题组报道了一种  $\text{CaF}_2/\text{CaAl}_2\text{O}_9:\text{Dy}$  异质结,证实异质结策略对“摩擦电型力致发光”材料的增强效果,建立了“陷阱控制+摩擦电轰击”的双机制协同模型,为柔性力致发光材料设计提供了新范式<sup>[70]</sup>。

### 3.3 复合材料体系优化

#### 3.3.1 有机基底精准适配

已报道的力致发光材料多为微米级颗粒,可加工性差,限制了应用场景。将其分散嵌入基底形成复合薄膜/涂层,是拓展其表征与应用的核心方法。1999 年,徐超男团队首次将  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}$  粉体与光学环氧树脂复合制备成柔性复合圆盘,实现了力致发光性能的高效测试与应力可视化,验证了无机力致发光粉体与有机柔性聚合物复合的可行性<sup>[7]</sup>。这一复合思路一直被后续研究沿用,为开发兼具柔性、拉伸性和循环稳定性的力致发光体系奠定了坚实基础。

不同聚合物基底在弹性、摩擦电特性、透光性、界面相容性等性能上存在显著差异,直接决定了复合体系的力致发光强度、循环稳定性、应力响应灵敏度及适用场景,成为复合材料体系优化的核心考量因素<sup>[70-73]</sup>。2025 年,Hyosung Choi 团队以  $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}@\text{AlO}_x$  为发光材料,按荧光粉与聚合物按质量比 7:3 制备了环氧树脂(Epoxy Resin, ER)、聚氨酯(Polyurethane, PU)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚己二酸丁二醇酯-对苯二甲酸酯硅烷(EF)、聚碳酸酯硅烷(DS)五种典型弹性聚合物基复合材料<sup>[71]</sup>。研究发现,基底负摩擦电特性是决定发光亮度的核心因素;而弹性模量则通过调控界面孔隙影响摩擦电效应的发挥;同时,透光性决定发光信号输出效率。三者协同作用,共同决定综合性能。

具体而言,ER 硬度高、弹性低,应力传递高效且压力响应灵敏,但弹性差易开裂、循环稳定性不佳,同时摩擦电效应弱导致发光强度低,适用于静态高压检测场景;PU 弹性与界面粘结性适中,应力响应范围宽,对多种机械刺激稳定,适合智能穿

戴领域的中等应力柔性传感;EF、DS 等硅烷聚合物弹性极高,可用于极端形变场景,但成本高、透光性与界面相容性不佳,暂未规模化应用;相比之下,PDMS 兼具高透明度、高弹性和显著的负摩擦电性,与无机粉体界面相容性好,应力传递高效,加之具备易加工、成本低的实用优势,是目前力致发光复合体系中应用最广、适配性最优的基底<sup>[72-73]</sup>。

长期以来, $\text{ZnS}:\text{Cu}/\text{PDMS}$  是唯一能在连续拉伸条件下实现 10000 次以上稳定发光的体系,该性能源于  $\text{ZnS}:\text{Cu}$  独特的交流电致发光特性与界面摩擦电效应的耦合。但由于其发光机理的独特性,研究人员长期未能将高循环稳定性拓展至其他材料体系,严重限制了力致发光弹性体的多样化应用。2025 年,王赵锋团队的研究打破了这一僵局,成功开发出首个非  $\text{ZnS}$  基高循环稳定性力致发光弹性体  $\text{CaBa}_4(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}/\text{PDMS}$ 。该体系可在 50% 应变、3 Hz 频率的连续拉伸下,稳定发光超过 20000 次,且发光光谱无明显变化;即使在 8 Hz 高频或 100% 应变条件下,仍能保持优异的循环稳定性<sup>[10]</sup>。同年,王赵锋课题组报道了  $\text{CaF}_2/\text{CA}_6:\text{Dy}^{3+}$  异质结,其中  $\text{CaF}_2$  在  $\text{CA}_6$  表面原位外延生长。该结构实现了  $\text{CA}_6$  向  $\text{CaF}_2$  定向转移电荷,从而增强了界面处的摩擦电场。增强的电场进一步加速了 PDMS 基质中的电子对发光颗粒的轰击,激发更多载流子参与发光,提升亮度和重复性。该材料可实现 10000 次循环发光,自恢复度达 91.6%<sup>[70]</sup>。

#### 3.3.2 功能化微观结构设计

通过引入孔隙结构、核壳结构或微纳阵列,可针对性解决力致发光材料中颗粒分散性差、界面电荷分离效率低、应力响应阈值高等关键问题,进而显著提升力致发光强度与检测灵敏度。通过构建核壳结构可有效提升分散性与界面电荷分离效率。例如,采用  $\text{AlO}_x$ 、 $\text{SiO}_2$  等无机材料包覆力致发光颗粒,可形成异质界面,并利用界面极化效应促进摩擦电荷积累与分离,减少非辐射复合,从而提升力致发光强度<sup>[74]</sup>。此外,潘曹峰团队以蛋壳为原料制备了  $\text{CaCO}_3$  基力致发光材料,通过溶液包覆法引入聚酰亚胺壳层,再与聚氨酯复合构建自驱动力致发光传感器。该策略将蛋壳衍生的力致发光材料与聚合物复合,显著提升了自驱动传感器的发光稳定性与使用寿命<sup>[75]</sup>。

在力致发光复合材料中引入可控孔隙,可使用孔隙周围的基质材料在机械刺激下更易产生局部形变,从而放大应力对力致发光颗粒的作用,提升材料对微小压力的响应灵敏度。高鹏课题组采用盐模板法在PDMS中引入球形孔隙,复合ZnS:Cu制备了泡沫状力致发光复合材料,其性能相较无孔隙样品提升2.6倍,可较好适配微弱力学信号检测场景<sup>[76]</sup>。此外,通过模板法、光刻法在复合材料表面构筑微纳阵列,可增强界面摩擦电效应,提升空间分辨率。Annalisa Relini团队以SU-8光刻胶为模板,在CaZnOS:Mn<sup>2+</sup>/PDMS力致发光薄膜表面制备了微柱阵列,用于指纹纹理的力致发光成像。结果表明,微柱阵列使指纹纹理对应的力致发光对比度提升45%,空间分辨率达50 μm,可清晰识别如汗孔、脊线等指纹细节;在1000次指纹按压测试后,阵列结构完好率达95%<sup>[77]</sup>。

### 3.4 工艺与制备技术改进

#### 3.4.1 粉体合成工艺优化

通过精准调控合成参数,可实现材料粒径、形貌、晶体纯度及缺陷结构的可控调节,进而改善粉体分散性、发光均匀性与载流子传输效率,满足不同应用场景的差异化需求<sup>[78-81]</sup>。其中,熔盐法、生物矿化仿生法等合成策略可精准调控材料粒径与形貌,显著提升分散性与发光均匀性;高温固相法、溶胶-凝胶法则更适用于调控晶体纯度与缺陷态分布。

在高温固相法制备过程中,通过调控烧结温度、升温速率与保温时间,可优化晶体纯度与缺陷态分布,从而获得高结晶度的块状材料。潘曹峰团队提出了一种常压下氧辅助固相反应制备ZnS:Mn力致发光颗粒的新方法,解决了传统真空固相法元素损失、掺杂量控制不精确的问题,并成功制备出高压力灵敏度的器件,实现了动态压力分布的原位成像<sup>[78]</sup>。彭登峰团队采用熔盐法合成了尺寸均匀的CaZnOS微晶,通过熔盐体系对颗粒团聚的抑制作用,实现了层状结构的可控构筑。所制备的材料具有优异的压电响应与光学性能,其中层状结构增强了载流子传输效率<sup>[79]</sup>。此外,洪国松团队借鉴生物矿化的“抑制溶解”机制,合成了一类可充电的力致发光流体,突破了传统力致发光材料多为固态的局限,构建了涵盖不同发光波长的力致发光流体库,实现多色发光调控<sup>[80]</sup>。

#### 3.4.2 复合器件制备技术

利用涂覆、3D打印、静电纺丝等技术构建柔性力致发光薄膜,优化薄膜厚度与颗粒分布,优化薄膜成型工艺,可适配可穿戴设备、柔性传感等场景<sup>[82]</sup>。其中,刮涂、旋涂等溶液加工方法因工艺简单、可扩展性强,被广泛用于柔性力致发光薄膜的制备。通过控制湿厚度与干燥温度,可有效保证薄膜均匀性与结构完整性。此外,基于光固化的3D印技术可实现柔性力致发光器件的定制化制造,适用于复杂结构与个性化应用场景。例如,通过光固化3D打印制备定制化的人体关节应力传感器,可实现对关节运动轨迹的精准发光可视化,满足个性化医疗设备需求。相比之下,静电纺丝技术则更适合制备具有高比表面积的柔性力致发光纤维薄膜,有助于获得更低的应力响应阈值。杨中民团队制备了ZnS:Cu/PU静电纺丝薄膜,充分利用纤维的高比表面积与优异柔性,实现了低至0.1%的拉伸应变响应阈值。通过调控纺丝电压、溶液浓度与接收距离等关键工艺参数,进一步构筑了高比表面积的力致发光纳米纤维薄膜,提升了应力响应灵敏度,使其在微应变传感应用中表现出良好的效适配性<sup>[83]</sup>。

## 4 力致发光材料的应用

力致发光荧光粉凭借独特的力-光转换特性在实际应用中备受青睐,在多个前沿领域展现出广阔应用潜力:在自供能传感器件中,可实现无需外部供能的应力信号采集与转换;在工程结构健康监测领域,能直观可视化结构内部应力分布与裂纹;在信息安全加密方面,依托力致发光的动态触发特性,可构建高安全性的防伪与信息验证体系;在生物医学成像中,近红外波段力致发光材料凭借组织穿透性优势,能为深层生物组织力学成像提供新的技术路径。此外,该类材料还为应力传感、应力记录与显示等场景提供了创新探测方案,应用价值显著。

### 4.1 自供能传感

力致发光自供能传感器凭借自供能、可视化、柔性适配等优势,在智能传感领域展现出巨大应用潜力。近年来,国内外课题组围绕可穿戴、人机交互、精密检测等方向开展了大量创新性研究。徐超男等人较早提出“用力致发光材料构建人工皮肤”,将力致发光特性与人工皮肤功能需求相结合,为智能传感型人工皮肤提供了全新的材料方

向。2018年,宋延林团队采用 $\text{SiO}_2$ 纳米粒子改性 $\text{ZnS}:\text{Cu}/\text{Mn}^{2+}@\text{Al}_2\text{O}_3@\text{PDMS}$ 复合材料,结合3D打印技术制备出可贴肤应力传感薄膜,实现了面部表情的可视化监测,为光子皮肤与应力可视化应用奠定了基础<sup>[84]</sup>。

2022年,相关研究开始向特殊场景交互与全光学传感方向拓展。如图3(a)所示,刘小钢团队将 $\text{ZnS}$ 基力致发光荧光粉封装于光纤中,构建出交互式护口器,借助口腔动作与机器学习算法实现对外

部设备的操控,为肢体障碍人群提供了新型辅助交互方式<sup>[85]</sup>。此外,如图3(b)所示,潘曹峰团队将 $\text{ZnS}-\text{CaZnOS}:\text{Mn}$ 与 $\text{PDMS}$ 复合,实现了自供能、无线化的全光学触觉传感,摆脱了传统电子皮肤对电路的依赖,在VR、智能机器人等领域具有重要应用价值<sup>[86]</sup>。同年,解荣军团队进一步拓展了力致发光的传感维度,利用发光寿命的温度依赖性实现自供能测温,并基于短寿命材料实现高频机械脉冲检测,丰富了自供能智能传感的技术体系<sup>[87]</sup>。

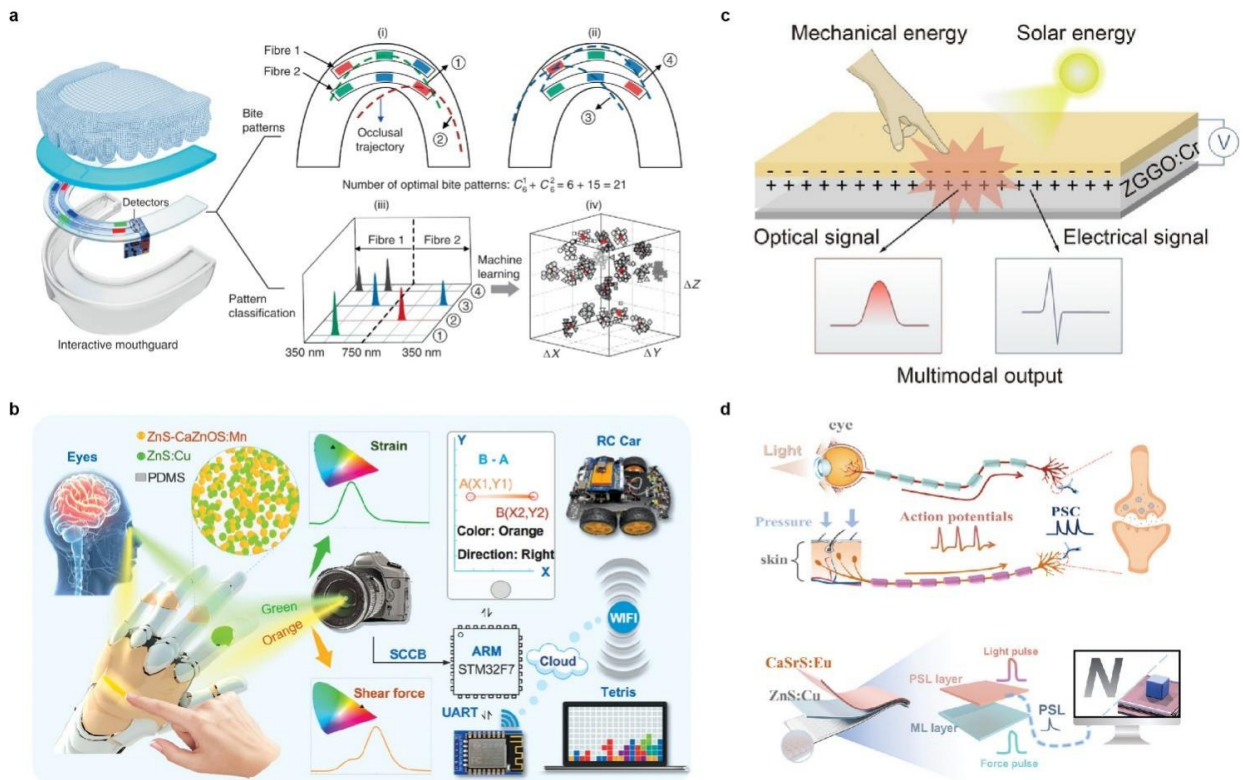


图3 (a)基于力致发光光纤的交互式护口器设计<sup>[85]</sup>; (b)面向用户交互界面的全光学触觉传感平台示意图<sup>[86]</sup>; (c)多模态压力传感器<sup>[88]</sup>; (d)光-触觉跨模态感知的人工突触系统<sup>[89]</sup>。

Fig.3 (a) Design of an interactive mouthguard based on mechanoluminescent optical fibers; (b) Schematic diagram of an all-optical tactile sensing platform for user interaction interfaces; (c) Multimodal force sensor; (d) Artificial synaptic system for optical-tactile cross-modal perception.

2024年,研究重点转向多维响应与超高精度检测。袁荃团队研发的 $\text{Zn}_{1.2}\text{Ga}_{1.6}\text{Ge}_{0.2}\text{O}_4:\text{Cr}$ 材料兼具力致发光与光电响应,成功实现仿生痛觉传感,在无电源条件下即可实现0.1 - 10 N宽范围压力的精准识别<sup>[88]</sup>。此外,涂东等人提出了一种基于 $\text{LiTaO}_3:\text{Tb}^{3+}$ 弹性力致发光材料的双模式应力传感策略,可同时实现应力强度与应变速率检测,其微应变响应阈值低至 $500 \mu\text{st}$ ,是目前绿色力致发光材料中的最低应变响应值,为精密机械微小形变监测、高端设备应力状态实时溯源、微小结构

健康诊断等场景提供了无需复杂电路的可视化新方法<sup>[12]</sup>。

2025年,力致发光传感进一步向多模态感知、极限灵敏度与器件结构化方向突破。郝建华团队融合力致发光材料 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 与光激励发光材料 $\text{CaSrS}:\text{Eu}$ 实现了视觉-触觉跨模态感知的传感器内计算,突破了传统传感与计算分离的架构局限,为机器人的多模态感知系统设计提供了全新策略<sup>[89]</sup>。图3(d)给出了受生物突触启发、用于传感器内计算的人工视觉-触觉感知系统的示意图。

黄维团队制备的DPO3C、DPO4C日盲紫外光致发光材料,与柔性基底复合后,可在日光下检测拉伸、折叠等应力,能够适配柔性机器人关节与可穿戴设备压力监测<sup>[90]</sup>。李振团队的m-4F-TPE材料通过氟原子相互作用构建超分子网络,可在0.05 N超低冲击力下实现肉眼可见发光,制成的PDMS复合弹性体可响应按压、摩擦等多种机械刺激,进一步拓展了力致发光材料在高灵敏自供能传感中的应用场景<sup>[91]</sup>。

在微应力与高精度检测方面,相关工作也取得了标志性进展。董林团队受人体绒毛启发设计的ZnS:Cu/PDMS毛发状微纤阵列传感器,将力致发光激活阈值降至10 mN,可实现蚊虫叮咬、指尖轻触等微弱应力的可视化识别<sup>[91]</sup>。涂东等人开发的NaTaO<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup>复合薄膜进一步将微应变检测极限提升至0.01%,对拉、压应变均表现出优异线性响应,性能可与商用传感器媲美,为可穿戴高精度应力检测提供了更为理想的材料方案<sup>[48]</sup>。

综上所述,力致发光传感已从单一应力响应逐步发展为多模态、自供能、可视化、超高灵敏的智能感知体系,在可穿戴电子、人机交互、动态监测等领域展现出不可替代的优势。

#### 4.2 工程结构健康监测

工程结构健康监测依托力致发光材料对微小应力的高灵敏响应,凭借自供能、可视化、实时响应等独特优势,已实现宏观基础设施、工业机械构件、极端环境特殊构件及生物医学硬组织等多场景的应力与损伤检测,为结构损伤的实时监测、损伤定位及动态应力演化分析提供了高效解决方案。

在宏观基础设施领域,基于陷阱控制型力致发光粉体的透明涂层传感器是该领域的主流应用形式。以SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup>环氧树脂复合涂层为例,该涂层厚度为50 - 100 μm,可直接喷涂于钢结构桥梁的焊缝、承重部位,对结构应力的响应范围为0 - 500 MPa,发光强度与应力大小呈线性关系,当结构局部应力超过安全阈值时,涂层发光亮度会发生阶跃式变化,实现损伤的可视化定位。该涂层已在小型钢构桥梁的实桥监测中应用,成功捕捉到焊缝处的早期应力集中现象<sup>[6-7]</sup>。随后,如图4(a)所示,余雪团队开发了一种基于MgF<sub>2</sub>基质的Mn<sup>2+</sup>和Yb<sup>2+</sup>双掺杂力致发光材料,通过应力调控发光颜色实现可视化应力分布检测,并利用自激

活长余辉特性拓展了延迟应力传感能力,为结构力学领域复杂三维结构的应力可视化与分析提供了有力支撑<sup>[92]</sup>。Kee-Sun Sohn团队利用含稀土离子的力致发光粉体,实现了陶瓷断裂过程中裂纹扩展的高速可视化成像;该团队还将力致发光粉体SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu, Dy, Nd与PDMS复合,制备出力致发光薄膜,当薄膜贴附于建筑物墙体等结构表面时,可在裂纹区域产生明显发光,以直观视觉信号指示损伤位置,为民用建筑与工业厂房的日常安全监测提供了便捷方案<sup>[93-94]</sup>。

在工业机械构件健康诊断方面,ZnS:Mn<sup>2+</sup>力致发光复合涂层被广泛应用于机械臂、机床主轴等关键部件,构件长期运行产生的疲劳应力可使涂层发光强度呈现规律性变化,从而实现疲劳状态的原位判别。2021年,王赵锋团队将Sr<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>:Eu,Y和PDMS混合后涂覆在螺丝表面,如图4(b)所示,通过发光颜色由蓝色(预紧)向紫色(终紧)的变化实现螺丝的原位应力可视化,为精密仪器的保护提供了一种有效方案<sup>[95]</sup>。2023年,徐旭辉等人将具备力致发光性能的Cs<sub>0.02</sub>Na<sub>0.98</sub>LuF<sub>4</sub>:Tb<sup>3+</sup>纳米晶与光敏树脂混合制成打印墨水,通过3D打印技术制备出不同规格的立方体打印件。如图4(c)所示,在拧入3D打印立方体的过程中对打印件产生机械刺激,触发打印件中的纳米晶发生力致发光,从而实现应力分布的3D可视化成像。可视化不同孔径下的应力分布,清晰呈现应力集中区域,可拓展至航空航天、机械工程等领域的复杂结构应力检测<sup>[96]</sup>。

在工程监测方面,2025年,任晶团队开发的新型宽带近红外光致发光薄膜,在50 μst微应变下即可产生清晰发光信号,为精密设备部件的微应变精准测量提供了高性能解决方案<sup>[97]</sup>。董国平团队开发的高透明无定形力致发光玻璃,通过硅锆酸盐玻璃网络的缺陷调控策略,实现了高效力致发光与优异的环境稳定性,在15次充能-释放循环后发光强度完全恢复,在水和乙醇等不同液体环境中浸泡14天后性能无衰减,可直接复合于建筑结构或机械部件表面,实现三维应力可视化监测<sup>[98]</sup>。张君诚团队通过定量研究建立了力致发光强度与弹性应变能功率密度的耦合关系,提出的应力标定模型可将发光强度定量转化为应力值,为工程结构应力的精准量化检测提供了理论支撑<sup>[99]</sup>。如图4(d)所示,解荣军团队庄逸熙等人

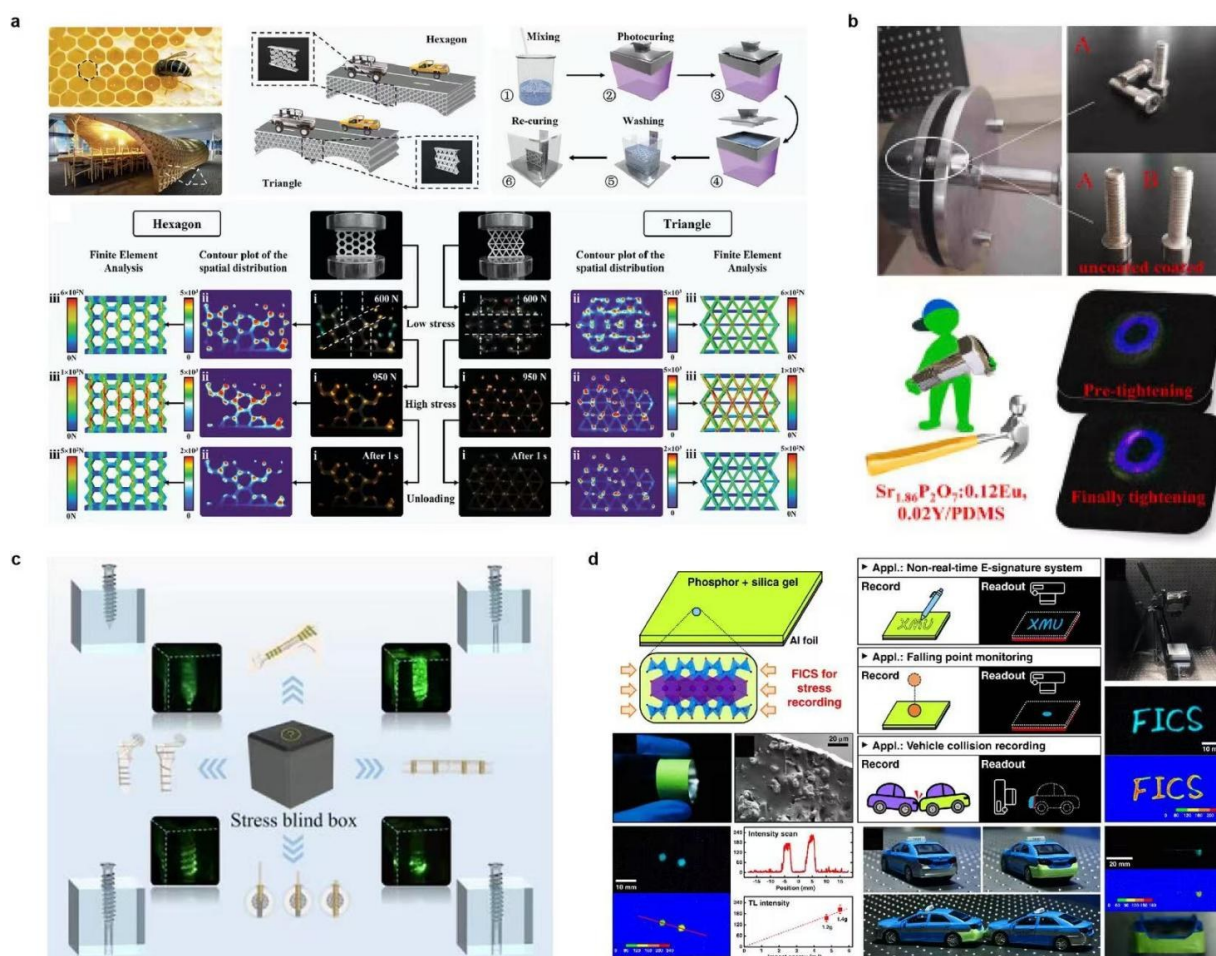


图4 (a)结构应力可视化<sup>[92]</sup>; (b)原位应力可视化<sup>[95]</sup>; (c)打印件的3D应力分布半定量传感<sup>[96]</sup>; (d)力致发光材料的应力存储-光激发读取功能示意图<sup>[100]</sup>。

Fig.4 (a) Structural stress visualization; (b) In-situ stress visualization; (c) Semi-quantitative sensing of 3D stress distribution in printed parts; (d) Schematic diagram of the stress storage and photo-stimulated readout function of mechanoluminescent materials.

首次实现应力的“存储-读取”功能,通过外力作用将电荷载流子捕获在材料的深层陷阱能级中,后续通过光激发等方式读取存储的应力信息,解决了力致发光信号易随外力消失、无法追溯历史应力的问题<sup>[100]</sup>。

总体而言,力致发光材料在工程结构健康监测中的一系列技术突破,打破了传统应力检测技术的空间与场景限制,实现了结构内部应力的直观、实时、无损监测,显著提升了工程结构的安全可靠性与服役寿命,同时为动态应力分布可视化、无源长期监测等方向开辟了新的发展空间。

#### 4.3 信息安全加密

信息安全加密领域的核心需求聚焦于动态触发防伪与高安全性信息存储,力致发光材料独特的机械刺激响应发光特性与这一需求高度契合。其典型应用主要集中在电子签名防伪、多模光学

加密、信息存储与动态解密三大方向,依托刺激响应发光实现高安全性、高辨识度的信息保护。

在电子签名防伪方向,与传统电子签名仅记录手写图形的局限不同,力致发光材料能够捕捉更多难以复制的个性化特征,显著提升身份验证的可靠性与安全性。基于力致发光材料构建的动态响应电子签名系统,可同步记录签名过程中的应力分布、书写力度与运笔速度,形成包含个人书写习惯的多维行为特征数据库,有效防范签名伪造与信息欺诈。如图5(a)所示,2015年,王中林团队构建了ZnS:Mn<sup>2+</sup>基电子签名系统,其响应时间小于10 ms,空间分辨率达256 dpi<sup>[101]</sup>。

在多模光学加密方向,力致发光作为一种独特的刺激响应模式,可与其他光学防伪机制协同使用,在光、力等不同激励下呈现单色或多色发光输出,大幅提升加密与防伪复杂度。例如,将力致

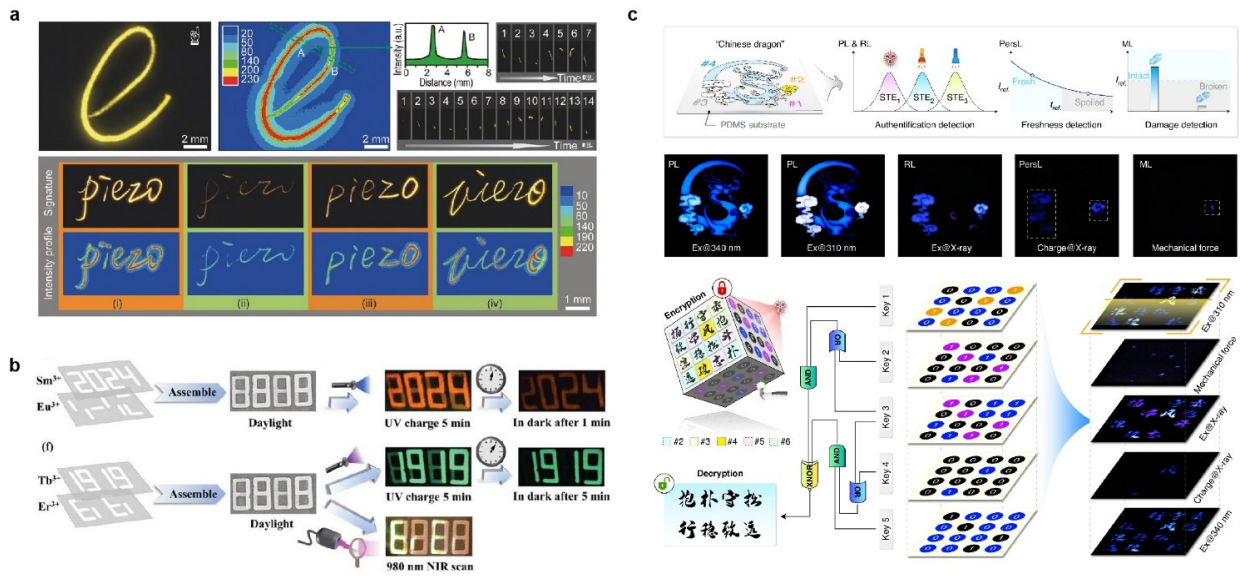


图5 (a)电子签名体系<sup>[101]</sup>; (b)动态防伪体系<sup>[103]</sup>; (c)多级认证与信息加密体系<sup>[105]</sup>。

Fig.5 (a) The electronic signature system; (b) the dynamic anti-counterfeiting system; (c) Multi-Level Authentication and Information Encryption System.

发光与上转换发光、长余辉发光、热释发光等模式结合,可构建多模发光加密体系。2018年,张君诚团队报道的 $\text{NaNbO}_3\text{:Pr}^{3+},\text{Er}^{3+}$ 材料,可在压力、光、热等不同外部刺激下选择性呈现或隐藏光学信息,通过可调发光波长和寿命实现高级光学防伪<sup>[102]</sup>。2024年,许京军团队选择具有高缺陷容忍度的 $\text{CaGa}_4\text{O}_7$ 为基质,通过改变掺杂发光中心,实现了上/下转换发光、长余辉发光、力致发光和X射线激发发光五种发光模式,并获得覆盖紫外至近红外的全光谱多色发射。材料中载流子的储存与释放过程可在X射线、紫外光、可见光、980 nm激光、热扰动及机械力等多种外场刺激下达到动态平衡。如图5(b)所示,基于该材料的多模式、多色发光特性,研究团队实现了大容量、多通道光学防伪方案,通过切换激发源可对存储信息进行动态或静态调控输出,满足时空多维信息编码需求<sup>[103]</sup>。

在信息存储与动态解密方向,研究人员通过结构设计与性能调控,进一步提升了信息存储的安全性与抗破解能力。2025年,臧法珩团队通过微尺度图案与纳米尺度特征的层次结构设计,构建了具备视觉编码功能的力致发光材料体系。该体系利用不同区域力致发光强度与波长的差异化响应,实现了多维度信息存储,且信息读取需特定压力序列触发,有效提升了加密体系的抗破解能力<sup>[104]</sup>。如图5(c)所示,我们团队采用全无机卤化物双钙钛矿单晶 $\text{Cs}_2\text{NaScCl}_6$ 为研究对象,通过单

一 $\text{Sb}^{3+}$ 离子掺杂实现了可由紫外光、X射线以及机械力选择性激发的多重激子发射。结合长余辉与光致发光的多重响应模式,构建出多级安全认证体系,可同时完成商品真伪鉴定与运输损伤评估<sup>[105]</sup>。

此外,2026年,阳军亮团队开发了全打印光电双模柔性传感器,并将其集成于智能门禁系统的足迹识别模块。该器件以 $\text{ZnS:Mn}^{2+}/\text{PDMS}$ 为发光层,柔性电极层为电容检测层,可同时采集足迹形状对应的力致发光成像特征和体重对应的电容信号,结合向量机算法,对合法用户的身份识别准确率达98.5%;即使入侵者模仿合法用户的足迹形状,系统仍可通过电容值的差异实现精准区分,解决了单一成像加密的易模仿问题,显著提升了信息安全等级<sup>[16]</sup>。

综上,基于力致发光的动态响应特性与多模式调控策略,使其在防伪认证、机密信息存储、动态加密解密等高端安全领域展现出不可替代的优势与广阔应用前景。

#### 4.4 生物医学成像

力致发光材料凭借机械刺激下的自发光特性,尤其是近红外波段材料在组织穿透性、生物相容性和动态响应能力上的突出优势,已在生物医学领域实现从体外检测到体内植入、从结构成像到功能监测的多维度应用,为疾病诊断、治疗研究提供了创新技术路径。

在骨科与牙科领域,力致发光材料的应用有

效解决了传统力学监测与损伤检测的痛点。徐超男团队利用 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 材料,实现了股骨动态生物力学的高清可视化,通过涂覆该材料的合成股骨在不同载荷下的发光成像,可全面获取骨组织的力学环境信息,为骨科器械设计优化提供了精准数据支撑<sup>[106]</sup>。在牙科应用中,2018年,王赵锋团队将 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Dy}^{3+}$ 融入义齿基托树脂,应用于人工牙咬合检测,解决了传统咬合纸检测灵敏度低、结果不准确的问题,为口腔临床咬合分析提供了新型可靠的技术方案<sup>[107]</sup>。2021年,该团队进一步利用 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ /PDMS力致发光材料优异的生物相容性和耐磨性能,实现了咬合压力的可视化监测,将研究拓展至颞下颌关节紊乱的辅助治疗<sup>[108]</sup>。2022年,Won Bin Im等人将力致发光材料 $\text{ZrO}_2:\text{Ti}^{4+}$ 与可拉伸自修复光电探测器阵列结合,可实现亚微米级牙齿裂纹的高分辨率成像,有效解决了传统检测方法准确率低、设备复杂的难题<sup>[109]</sup>。

在心血管与细胞监测领域,力致发光材料展现出高灵敏度与特异性优势。 $\text{CaZnOS}:\text{Nd}^{3+}$ /PDMS复合人工血管移植体,可通过近红外力致发光信号实时反映血管阻塞程度与高血压状况<sup>[110]</sup>;而 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 与 $\text{MoS}_2$ 场效应晶体管集成的压力传感器

阵列,可精准分析单个心肌细胞的压力分布,为心肌细胞信号传递机制研究提供了高灵敏度工具<sup>[111]</sup>。其中, $\text{CaZnOS}:\text{Nd}^{3+},\text{Mn}^{2+}$ 通过 $\text{Mn}^{2+}$ 共掺杂实现双重敏化,其近红外发光的信噪比和穿透深度显著优于单一掺杂材料,在鸡胸肉和人类脸颊成像中展现出清晰的光斑和高信号质量<sup>[112]</sup>。 $\text{LiNbO}_3:\text{Nd}^{3+}$ 在2500 N压缩载荷下发光强度稳定,其近红外光可有效穿透猪肉皮肤、脂肪和瘦肉组织,穿透深度可达22 mm,展现出在深层组织成像中的潜力<sup>[113]</sup>。 $\text{Cr}^{3+}$ 掺杂材料凭借其可调的近红外发光特性,在生物成像应用中表现突出。如图6(a)所示,徐旭辉团队在 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ 通过引入 $\text{Ga}^{3+}$ 提升晶体场强度,增强了688 nm处的近红外发射。将样品嵌入猪肉组织或鸡爪关节后,可清晰捕捉受力后的发光信号,实现体内原位实时应力监测<sup>[114]</sup>。王菲菲团队基于血糖增强750-850 nm波段吸收、血脂主要影响光散射的差异化光学特性,成功开发了 $\text{Y}_3\text{Ga}_3\text{MgSiO}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ 材料。如图6(b)所示,该体系在实现体内应力监测的同时,为血糖/血脂无创检测提供了一种新的技术范式,相比传统有创方法更便捷、低痛,且可扩展至其他血液成分检测<sup>[115]</sup>。

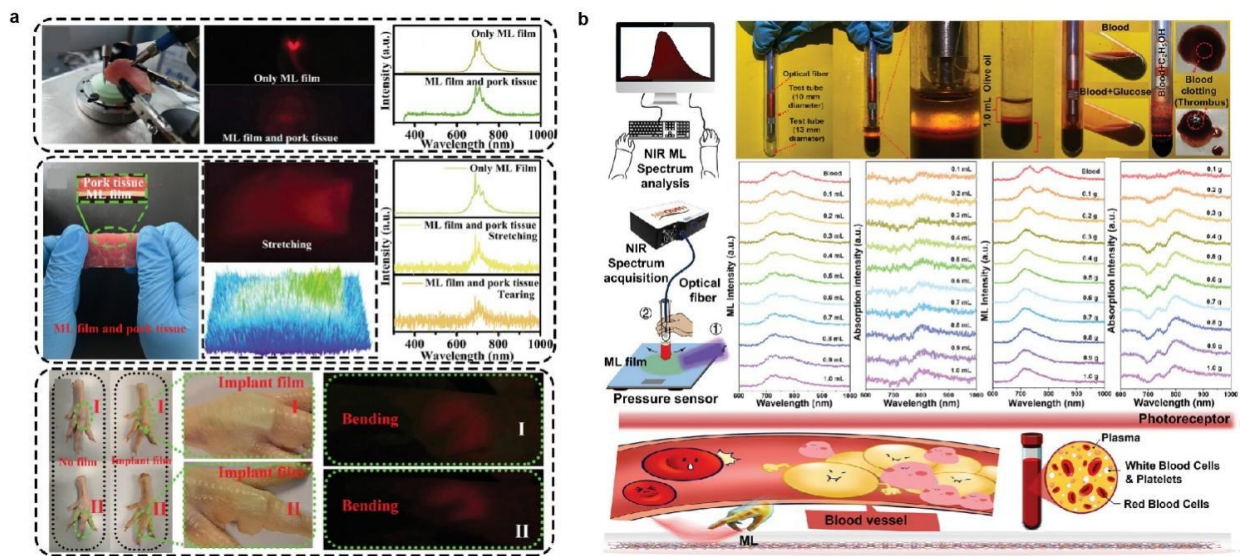


图6 (a)血糖/血脂无损检测系统<sup>[114]</sup>; (b)制备-成像-力学测试流程<sup>[115]</sup>。

Fig.6 (a) Non-destructive detection system for blood glucose/lipids; (b) Preparation-bioimaging-mechanical testing process.

在细菌感染治疗、肿瘤治疗等领域,力致发光材料实现了“成像-治疗”一体化,兼具精准定位与靶向干预能力。李小红团队设计了 $\text{mSZ-Clr@eP-DA}$ 复合纳米颗粒,将 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 力致发光材料与克拉霉素结合,该体系经聚焦超声激活后,一方面通过近红外长余辉实现幽门螺杆菌生物膜成

像,另一方面释放药物杀灭细菌,显著减轻感染组织炎症<sup>[116]</sup>。宋焱焱和丁辰团队报道了“测试-治疗”双层垫,其外层的 $\text{Pt@TiO}_2@\text{CaZnOS}:\text{Mn}^{2+}/\text{PDMS}$ 复合材料,其可在机械应力下产生活性氧杀灭耐药菌,同时内层水凝胶可通过颜色变化区分敏感菌与耐药菌,实现选择性治疗<sup>[117]</sup>。在肿瘤治疗

中,力致发光微器件通过磁场驱动产生 544 nm 绿色发光,激活肿瘤细胞内的血红蛋白产生活性氧,在体外细胞实验和小鼠皮下肿瘤模型中均展现出显著的肿瘤抑制效果<sup>[118]</sup>。

值得注意的是,短波紫外(200 - 280 nm, UVC)力致发光材料凭借高光子能量,可直接破坏微生物的 DNA 和 RNA 结构,在灭菌领域展现出独到的应用价值。然而,长期以来,UVC 力致发光材料的发展受到诸多限制,仅局限于少数陷阱控制型体系。这类材料需要依赖预辐照进行充能,且循环稳定性较差,严重制约了其实际应用。2026年,梁延杰等人成功开发出一种无需预辐照的 UVC 力致发光弹性体  $\text{Sr}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Pr}^{3+}/\text{PDMS}$ , 该材料同时具备 10000 次以上高循环稳定性与自恢复性能,为短波近紫外外力致发光技术的实用化奠定了重要基础<sup>[119]</sup>。

近年来,力致发光材料在生物医学成像中的应用已逐步从体外检测向体内植入式成像拓展。通过表面修饰与生物功能化改性,材料的血液循环半衰期可延长至 24 小时以上,为动态生物力学监测奠定了基础。这些进展推动生物医学成像从结构成像向功能化、动态化力学成像跨越,为疾病早期诊断与病理机制研究提供了全新视角。

## 5 结论与展望

力致发光材料凭借自供能、可视化、应力响应灵敏等优势,成为智能传感、生物医学等领域的研究热点。本文系统综述了近年来力致发光材料的研究进展,首先明确了力致发光的分类与发光机制,剖析了压电效应介导型与界面作用介导型自恢复机制的差异;其次从成分调控、结构设计、体系复合及制备工艺四个维度,梳理了材料性能优化的关键策略,揭示了混合阴离子结构设计、异质结构、界面工程等技术对材料发光性能的提升机制;最后结合典型器件实例,总结了其在自供能传感、工程结构健康监测、信息安全加密及生物医学成像四大领域的前沿应用。本文通过系统对比不同基质体系的性能差异,明确了各体系的优势与适用场景,并对当前力致发光机理研究的争议点进行了分析。

尽管力致发光材料领域发展迅速,发光效率提升、新型体系不断出现,应用潜力巨大,但仍存在诸多关键难题,制约其进一步发展与实际应用落地。在材料性能方面,现有材料存在光谱范围

窄、发光强度低、应力响应阈值高、稳定性差等短板,难以满足实际需求。目前力致发光荧光粉多集中于可见光波段,近红外高性能材料稀缺,限制了其应用范围;生物医用领域中,材料体内长期安全性未明确,阻碍其在体内应力监测、活体成像等方向的发展;在测试与评价体系方面,目前缺乏统一规范的测试标准,各课题组自行搭建测试装置,导致不同团队获得的应力响应阈值、发光强度-应力依赖关系等关键数据不具备横向可比性,建立标准化测试方案已成为当务之急。此外,领域内目前仍缺乏统一且系统的综合评价体系,力致发光机理尚未充分阐明,缺乏普适性理论支撑,导致材料研发依赖经验试错、效率低下;同时,规模化制备技术不成熟,难以实现低成本批量生产,阻碍其商业化应用。

随着多学科的深度交叉融合,力致发光材料有望突破现有瓶颈,在多个前沿领域实现颠覆性应用,整体呈现多元化、集成化、智能化的发展趋势。在柔性电子与可穿戴设备领域,超薄、轻质、自修复的力致发光复合薄膜将成为重点研发方向。将其集成于智能织物、电子皮肤等器件,可实现健康监测、运动分析、人机交互等功能一体化,如实时捕捉人体关节应力分布、精准解析运动姿态、构建柔性人机交互界面,为新一代可穿戴智能设备提供全新技术路径。在智能传感与物联网领域,结合人工智能与机器学习构建多参数、高灵敏度力致发光传感网络,可广泛应用于工业无损检测、智能家居等场景,实现设备运行状态、环境应力变化的实时监测与智能预警,推动物联网感知体系向更高层级的智能化升级。在生物医学领域,通过优化近红外外力致发光材料的生物相容性与发光效率,有望突破传统生物成像的穿透深度与时空分辨率限制,拓展其在深层组织成像、靶向治疗、神经调控等场景的应用,为疾病早期诊断与精准治疗提供全新工具,助力精准医学发展。

此外,新型多功能响应材料的开发将持续为领域注入新动能。未来研究应着力攻关磁、电、光、力多模式响应的力致发光材料,构建自供能、自修复、自适应的智能材料体系,以满足复杂环境与极端工况下的应用需求,实现力致发光材料从单功能响应向多功能集成的跨越式升级。伴随发光机理的不断明晰、标准化测试体系的建立及规

模化制备技术的成熟,力致发光材料的产业化进程将显著提速,有望在民生健康、高端装备、工业监测等领域发挥关键支撑作用,开启智能应力传感与发光功能一体化应用的全新阶段。

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] KNIMURA S, YAMADA H, XU C N. Strong reddish-orange light emission from stress-activated  $\text{Sr}_{(n+1)}\text{Sn}_{(n)}\text{O}_{(3(n+1))}:\text{Sm}^{3+}$  ( $n = 1, 2, \text{infinity}$ ) with perovskite-related structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 101(9):091113-1-3.
- [ 2 ] DICKENS T J, BREAUX J, OLAWALE D O, *et al.* Effects of ZnS: Mn concentrated vinyl ester matrices under flexural loading on the triboluminescent yield [J]. *J. Lumin.*, 2012, 132(7):1714-1719.
- [ 3 ] LI C, XU C N, IMAI Y, *et al.* Real-time visualisation of the Portevin-Le Chatelier effect with mechanoluminescent-sensing film [J]. *Strain*, 2011, 47(6):483-488.
- [ 4 ] BACON F. *The Advancement of Learning* [M]. New York: Da Capo Press, 1605.
- [ 5 ] CHANDRA B P. *Mechanoluminescence* [M]. VIJ D R. *Luminescence of Solids*. Boston: Springer, 1988.
- [ 6 ] XU C N, WATANABE T, AKIYAMA M, *et al.* Artificial skin to sense mechanical stress by visible light emission [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74(9):1236-1238.
- [ 7 ] XU C N, WATANABE T, AKIYAMA M, *et al.* Direct view of stress distribution in solid by mechanoluminescence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74(17):2414-2416.
- [ 8 ] SUN J, LI Y Q, W L, *et al.* Multi-force-driven self-recoverable SWIR mechanoluminescence for underwater communication [J]. *Adv. Sci.*, 2026, e23643.
- [ 9 ] JEONG S M, SONG S, LEE S K, *et al.* Mechanically driven light-generator with high durability [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(5):051110-1-5.
- [ 10 ] FANG S F, ZHAO L S, HE X, *et al.* Highly Repeatable and Cyclically Stable Mechanoluminescence of the Flexible Composite Elastomer [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37, 2505071.
- [ 11 ] CHEN B, ZHANG X, WANG F. Expanding the Toolbox of Inorganic Mechanoluminescence Materials [J]. *Acc. Mater. Res.*, 2021, 2:364-373.
- [ 12 ] YANG H, WEI Y, JU H N, *et al.* Microstrain-Stimulated Elastico-Mechanoluminescence with Dual-Mode Stress Sensing [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36:2401296.
- [ 13 ] ZHANG J C, PAN C, ZHU Y F, *et al.* Achieving thermo-mechano-opto-responsive bitemporal colorful luminescence via multiplexing of dual lanthanides in piezoelectric particles and its multidimensional anticounterfeiting [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(49):1804644-1-9.
- [ 14 ] TU D, XU C N, KAMIMURA S, *et al.* Ferroelectric  $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7:\text{Nd}^{3+}$ : a new multipiezo material with ultrasensitive and sustainable near-infrared piezoluminescence [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(25):1908083.
- [ 15 ] ZHOU J Y, GU Y, LU J Y, *et al.* An ultra-strong non-pre-irradiation and self-recoverable mechanoluminescent elastomer [J]. *Chem. Eng. J.*, 2020, 390:124473.
- [ 16 ] ZHOU H, QIU Y, HE P, *et al.* Fully-Printed Optical-Electric Dual Mode Flexible Sensor [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38: e2517426.
- [ 17 ] BOTTERMAN J, VAN DEN EECKHOUT K, DE BAERE I, *et al.* Mechanoluminescence in  $\text{BaSi}_2\text{O}_5\text{N}_2:\text{Eu}$  [J]. *Acta Mater.*, 2012, 60(15):5494-5500.
- [ 18 ] YANG Y Y, WANG Z J, XIONG J J, *et al.* Trap-piezoelectric synergistic mechanism in high intensity mechanoluminescent phosphors  $\text{Ca}_2\text{GeO}_4:\text{Tb}^{3+}$  for potential dynamic multi-modal anti-counterfeiting and remote monitoring [J]. *Adv. Optical Mater.*, 2026, 2602905.
- [ 19 ] AHMAD S, XIAO Y, SUN J L, *et al.*  $\text{CaZnOS}$  mechanoluminescent families: From fundamental insights to functional applications [J]. *Appl. Mater. Today*, 2025, 47:102913.
- [ 20 ] ZHANG H, WEI Y, HUANG X, *et al.* Recent development of elastico-mechanoluminescent phosphors [J]. *J. Lumin.*, 2019, 207:137-148.
- [ 21 ] BÜNZLI J C G, WONG K L. Lanthanide mechanoluminescence [J]. *J. Rare Earths*, 2018, 36(1):1-41.
- [ 22 ] LI W; CAI Y; CHANG J, *et al.* Unraveling mechanoluminescent mechanisms in doped  $\text{CaZnOS}$  materials: co-mediation of trap-controlled and non-trap-controlled processes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(48):2305482.

- [ 23 ] ZHENG X; CHENG Y; GAO Y, *et al.* Doping dependent dual-response mechanoluminescence in  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023,11(5):1747-1753.
- [ 24 ] CHANDRA V K, CHANDRA B P; JHA, P. Self-recovery of mechanoluminescence in  $\text{ZnS}:\text{Cu}$  and  $\text{ZnS}:\text{Mn}$  phosphors by trapping of drifting charge carriers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013,103(16):161113.
- [ 25 ] SOHN, K-S, TIMILSINA S, SINGH S P, *et al.* Mechanically driven luminescence in a  $\text{ZnS}:\text{Cu}$ -PDMS composite [J]. *APL Mater.*, 2016,4(10):106102.
- [ 26 ] AN H, JU H, REN Z, *et al.* Near-infrared mechanoluminescence sensor: a new method for on-site infrastructure detection [J]. *Luminescence*, 2024,39(5):e4754.
- [ 27 ] LI W; WANG S; JIN M, *et al.* Near-infrared dual-modal sensing of force and temperature in total knee replacement using mechanoluminescent phosphor of  $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7:\text{Nd},\text{Yb}$  [J]. *Small*, 2024,20(25):2310180.
- [ 28 ] ZHANG J C; XU C N; LONG Y Z. Elastico-mechanoluminescence in  $\text{CaZr}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}^{2+}$  with multiple trap levels [J]. *Opt. Express*, 2013,21(11):13699-13709.
- [ 29 ] KADUKAR M R, YAWALKAR P W, CHOITHRANI R, *et al.* Mechanoluminescence, thermoluminescence, photoluminescence studies on  $\text{Ca}_3\text{Y}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}:\text{Re}^{3+}$  ( $\text{Re}^{3+} = \text{Dy}^{3+}$  and  $\text{Eu}^{3+}$ ) phosphors [J]. *Luminescence*, 2015,30(8):1219-1225.
- [ 30 ] TIWARI N; KURARIA R K; KURARIA S R, *et al.* Mechanoluminescence, photoluminescence and thermoluminescence studies of  $\text{SrZrO}_3:\text{Ce}$  phosphor [J]. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, 2015,8(1):68-76.
- [ 31 ] TIWARI N, DUBEY V, KURARIA R K. Mechanoluminescence study of europium doped  $\text{CaZrO}_3$  phosphor [J]. *J. Fluoresc.*, 2016,26(4):1309-1315.
- [ 32 ] ZHANG J-C, LONG Y-Z, YAN X, *et al.* Creating recoverable mechanoluminescence in piezoelectric calcium niobates through  $\text{Pr}^{3+}$  doping [J]. *Chem. Mater.*, 2016,28(11):4052-4057.
- [ 33 ] ZHANG J-C, FAN X-H, YAN X, *et al.* Sacrificing trap density to achieve short-delay and high-contrast mechanoluminescence for stress imaging [J]. *Acta Mater.*, 2018,152:148-154.
- [ 34 ] XU C N. Green mechanoluminescence of  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}$  and  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu},\text{Dy}$  [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2008,155(2):J55.
- [ 35 ] ZHANG H, TERASAKI N, YAMADA H, *et al.* Mechanoluminescence of europium-doped  $\text{Sr}_2\text{AMgSi}_2\text{O}_7$  ( $\text{A}=\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ ) [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2009,48(4S):04C109.
- [ 36 ] YAN Y, FANG S, LI Y, *et al.* Trap-regulated highly efficient mechanoluminescence and persistent mechanoluminescence of  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$  [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023,11(34):11509-11517.
- [ 37 ] XU C N. Observation of elasticoluminescence from  $\text{Ca}_2\text{AlSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}$  and its water resistance behavior [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2008,155(3):J63.
- [ 38 ] ZHANG L, XU C N, YAMADA H, *et al.* Enhancement of mechanoluminescence in  $\text{Ca}_2\text{AlSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}$  by partial  $\text{Sr}^{2+}$  substitution for  $\text{Ca}^{2+}$  [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2010,157(3):50-53.
- [ 39 ] CHU Z M, LI Y X, WANG X S, *et al.* Blue-green mechanoluminescence of  $\text{Ca}_2\text{AlSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}$  and  $\text{Ca}_2\text{AlSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  [J]. *Adv. Mater. Res.*, 2013,815:655-661.
- [ 40 ] FANG H, QIU G, LI J, *et al.*  $\text{Sr}^{2+}$  substitution for  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  co-doping enhance mechanoluminescence of  $\text{Ca}_2\text{AlSi}_2\text{O}_8$  phosphors [J]. *J. Alloys Compd.*, 2018,763:267-272.
- [ 41 ] CAO J, DING S, ZHOU Y, *et al.* Unveiling the potential of sunlight-driven multifunctional blue long persistent luminescent materials via cutting-edge trap modulation strategies [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023,12(7):2302011.
- [ 42 ] CHEN C, ZHUANG Y, LI X, *et al.* Achieving remote stress and temperature dual-modal imaging by double-lanthanide-activated mechanoluminescent materials [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021,31(25):2101567.
- [ 43 ] LI X, ZHENG Y, MA R, *et al.* Broadband multimodal emission in Sb-doped  $\text{CaZnOS}$ -layered semiconductors [J]. *Sci. China Mater.*, 2021,65(5):1329-1336.
- [ 44 ] YANG Y L, YANG X C, YUAN J Y, *et al.* Time-resolved bright red to cyan color tunable mechanoluminescence from  $\text{CaZnOS}:\text{Bi}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$  for anti-counterfeiting device and stress sensor [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021,9(16):2100668.
- [ 45 ] YANG Y L, YANG X C, YUAN J Y, *et al.* Stimuli responsive lanthanide ions doped layered piezophotonic microcrystals for optical multifunctional sensing applications [J]. *Nano Energy*, 2021,87:106177.
- [ 46 ] ZHAO Y, PENG D, BAI G, *et al.* Multiresponsive emissions in luminescent ions doped quaternary piezophotonic materials for mechanical-to-optical energy conversion and sensing applications [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021,31(22):

- 2010265.
- [ 47 ] ZHOU S, CHENG Y, XU J, *et al.* Design of ratiometric dual-emitting mechanoluminescence: lanthanide/transition-metal combination strategy [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2022, 16(5):2100666.
- [ 48 ] YANG H, TU D, WEI Y, *et al.* Ultrasensitive mechanoluminescence of Pr<sup>3+</sup>-doped perovskite oxide for 3D strain sensing and visualization [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37:e10747-e10754.
- [ 49 ] TU D, XU C N, YOSHIDA A, *et al.* LiNbO<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup>: a multipiezo material with simultaneous piezoelectricity and sensitive piezoluminescence [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(22):1606914.
- [ 50 ] SUO H, LI L, SUN J, *et al.* A Self-Powered Tactile Sensor Resistant to Environmental Interference [J]. *Adv. Mater.*, 2025, e16596.
- [ 51 ] CAI C, LI L, LIH, *et al.* All-lanthanide mechanoluminescence from transparent In-doped MgF<sub>2</sub>@elastomer for flexible and stretchable lighting and stress sensing [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2024, 9(7):2301855.
- [ 52 ] HARA H, XU C N, WANG R, *et al.* Control of crystal structure and performance evaluation of multi-piezo material of Li<sub>1-x</sub>Na<sub>x</sub>NbO<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup> [J]. *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 2020, 128(8):518-522.
- [ 53 ] MA Z D, ZHOU J Y, ZHANG J C, *et al.* Mechanics-induced triple-mode anticounterfeiting and moving tactile sensing by simultaneously utilizing instantaneous and persistent mechanoluminescence [J]. *Mater. Horiz.*, 2019, 6(10):2003-2008.
- [ 54 ] YAN Y J, ZHOU B, GUO Z Y, *et al.* Interfacial Interaction Modulated Radiation Defects for Self-Charging Persistent Mechanoluminescence [J]. *Small*, 2025, 21:e06203.
- [ 55 ] DU Y Y, JIANG Y, SUN T Y, *et al.* Mechanically excited multicolor luminescence in lanthanide ions [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31:1807062.
- [ 56 ] LIU Z C, LV X L, LIANG Y J, *et al.* Self-recovery UV mechanoluminescence material from garnet structure and its bactericidal application [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, e29517.
- [ 57 ] XIANG Y F, ZHONG L, LONG Y W, *et al.* Deciphering defect-mediated anti-thermal quenching multimodal luminescence for information encryption [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37:e15825.
- [ 58 ] CAO Y Y, CHANG J Q, ZHANG J, *et al.* Dual-Window Broadband Near-Infrared Mechanoluminescence in MgO-Based Phosphors [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 0:e22739.
- [ 59 ] SUO H, WANG Y, ZHANG X, *et al.* A broadband near-infrared nanoemitter powered by mechanical action [J]. *Matter*, 2023, 6(9):2935-2949.
- [ 60 ] CHEN C J, ZHUANG Y X, TU D, *et al.* Creating visible-to-near-infrared mechanoluminescence in mixed-anion compounds SrZn<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O and SrZnSO [J]. *Nano Energy*, 2020, 68:104329.
- [ 61 ] PAN X, ZHUANG Y X, HE W, *et al.* Quantifying the interfacial triboelectricity in inorganic-organic composite mechanoluminescent materials [J]. *Nat Commun*, 2024, 15:2673.
- [ 62 ] PENG D F, JIANG Y, HUANG B L, *et al.* A ZnS/CaZnOS heterojunction for efficient mechanical-to-optical energy conversion by conduction band offset [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 1907747.
- [ 63 ] LI L P, CAI C Y, LV X H, *et al.* Stress-triggered mechanoluminescence in ZnO-based heterojunction for flexible and stretchable mechano-optics [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 2301372.
- [ 64 ] WU S, WANG S Y, SHAO Z G, *et al.* Self-powered near-infrared mechanoluminescence through MgO/MgF<sub>2</sub> piezo-phonic heterojunctions [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16:63980-4.
- [ 65 ] WANG C, SHI H Z, LI W H, *et al.* Interface-mediated mechanoluminescence enhancement from heterojunction phosphors: experiment and theory [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15, 205391-30901.
- [ 66 ] LI X, WANG C F, ZHENG Y T, *et al.* Smart semiconductor-heterojunctions mechanoluminescence for printable and wearable sports light sources [J]. *Mater. Des.*, 2023, 225:111589.
- [ 67 ] LI W H, JIN M Y, LI J H, *et al.* Theoretical understanding of defects-driven mechanoluminescence for Pr<sup>3+</sup>-doped NaNbO<sub>3</sub>/LiNbO<sub>3</sub> heterojunctions [J]. *J. Rare Earths*, 2025, 43:691-700.
- [ 68 ] QIN F L, CHEN Y J, HU Q *et al.* Enhanced rare-earth doped mechanoluminescent piezoelectric heterojunction semiconductors through interface engineering with tunable photonic responses for advanced sensing applications [J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 518:164710.
- [ 69 ] LIANG T L, ZHENG Y T, ZHANG Q A, *et al.* Downconversion mechanoluminescence from lanthanide codoped hetero-

- junctions [J]. *Mater. Futures*, 2025,4:025701.
- [ 70 ] TIAN B R, ZHAO L S, WANG Y S, *et al.* Interfacial charge flow modulation of CaF<sub>2</sub>/CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub>:Dy heterojunctions for enhanced mechanoluminescence in flexible composites [J]. *Adv. Mater.*, 2025,e15048.
- [ 71 ] JEONG H I, JUNG H S, DUBAJIC M, *et al.* Super elastic and negative triboelectric polymer matrix for high performance mechanoluminescent platforms[J]. *Nat. Commun.*, 2025,16:854.
- [ 72 ] JEONG S M, SONG S, LEE S K, *et al.* Bright, wind-driven white mechanoluminescence from zinc sulphide microparticles embedded in a polydimethylsiloxane elastomer [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2014,7(10):3338-3346.
- [ 73 ] WANG W X, WANG S W, GU Y, *et al.* Contact-separation-induced self-recoverable mechanoluminescence of CaF<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> PDMS elastomer [J]. *Nat. Commun.*, 2024,15:2014.
- [ 74 ] DAI P H, CONG Z C, JIANG C H, *et al.* Mechanoluminescence of ZnS:Cu@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> enabled optical fiber microlens passive tactile sensor for hardness recognition [J]. *Opt. Lett.*, 2024,49,4991-4994.
- [ 75 ] WANG C F, PAN C F, WANG Z L, *et al.* Mechanoluminescent hybrids from a natural resource for energy-related applications [J]. *InfoMat*, 2021,3 (12):1523-1534.
- [ 76 ] XU J B, CHEN M, GANESAN P, *et al.* Intriguing role of weak electron donor in dictating the luminescent characteristics of D<sup>S</sup>-A-D<sup>W</sup> materials [J]. *Adv. Optical Mater.*, 2024,12,2302789.
- [ 77 ] CANEPA E, BOCHICCHIO D, BROSIO G, *et al.* Cholesterol-containing liposomes decorated with au nanoparticles as minimal tunable fusion machinery [J]. *Small*, 2023,19,2207125.
- [ 78 ] WANG X D, LING R, ZHANG Y F, *et al.* Oxygen-assisted preparation of mechanoluminescent ZnS: Mn for dynamic pressure mapping [J]. *Nano Res.*, 2018,11(4):1967 - 1976.
- [ 79 ] ZHENG Y T, LI X, MA R H, *et al.* Molten salt shielded synthesis of monodisperse layered CaZnOS-based semiconductors for piezophotonic and x-ray detection applications [J]. *Small*, 2022,18:2107437.
- [ 80 ] YANG F, WU X, CUI H, *et al.* Palette of rechargeable mechanoluminescent fluids produced by a biomineral-inspired suppressed dissolution approach [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2022, 144:18406-18418.
- [ 81 ] HUANG Z F, LI X, LIANG T L, *et al.* Smart mechanoluminescent phosphors: A review of zinc sulfide based materials for advanced mechano-optical applications[J]. *Responsive Mater.*, 2024,2,e20240019.
- [ 82 ] SUN X L, LING S H, QIN Z H, *et al.* 3d printing of auxetic self-powered mechanoluminescent photonic skins for underwater communication and safety monitoring [J]. *Adv. Mater.*, 2025,2502793.
- [ 83 ] LIANG H H, HE Y C, CHEN M H, *et al.* Self-powered stretchable mechanoluminescent optical fiber strain sensor [J]. *Adv. Intell. Syst.*, 2021,3:2100035.
- [ 84 ] QIAN X, CAI Z R, SU M, *et al.* Printable skin-driven mechanoluminescence devices via nanodoped matrix modification [J]. *Adv. Mater.*, 2018,30:1800291.
- [ 85 ] HOU B, YI L Y, LI C, *et al.* An interactive mouthguard based on mechanoluminescence-powered optical fibre sensors for bite-controlled device operation [J]. *Nature Electron.*, 2022,5:682-693.
- [ 86 ] WEI R L, HE J Q, GE S P, *et al.* Self-powered all-optical tactile sensing platform for user-interactive interface [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2023,8:2200757.
- [ 87 ] CHEN C J, LIN Z, HUANG H H, *et al.* Revealing the intrinsic decay of mechanoluminescence for achieving ultrafast-response stress sensing [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023,2304917.
- [ 88 ] WANG W J, TAN J, WANG H, *et al.* Self-powered and self-recoverable multimodal force sensors based on trap state and interfacial electron transfer [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024,63:e202404060.
- [ 89 ] GUO J X, GUO F, ZHAO H J, *et al.* In-sensor computing with visual-tactile perception enabled by mechano-optical artificial synapse [J]. *Adv. Mater.*, 2025,2419405.
- [ 90 ] WANG H L, XIAO Y X, KONG S T, *et al.* Solar-blind uv organic mechanoluminescent materials [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64,e202506461.
- [ 91 ] QIAO W G, CHANG K, YU X Y, *et al.* Supramolecular mechanoluminescence via fluorine interactions [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025,e23121.
- [ 92 ] GUO L C, XIA P, WANG T, *et al.* Visual representation of the stress distribution with a color-manipulated mechanoluminescence of fluoride for structural mechanics [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023,2306875.
- [ 93 ] KIM J S, KWON Y N, SOHN K S. Dynamic visualization of crack propagation and bridging stress using the mechano-lu-

- minescence of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ : (Eu, Dy, Nd) [J]. *Acta Mater.*, 2003, 51:6437-6442.
- [ 94 ] KIM J, KWON Y, SHIN N, *et al.* Visualization of fractures in alumina ceramics by mechanoluminescence [J]. *Acta Mater.*, 2005, 53:4337-4343.
- [ 95 ] TIAN B R, WANG Z, SMITH A T, *et al.* Stress-induced color manipulation of mechanoluminescent elastomer for visualized mechanics sensing [J]. *Nano Energy*, 2021, 83:105860.
- [ 96 ] PENG S, XIA P, WANG T, *et al.* Mechano-luminescence behavior of lanthanide-doped fluoride nanocrystals for three-dimensional stress imaging [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(10):9543-9551.
- [ 97 ] LI W H, XIONG P X, ZHENG X X, *et al.* Micro-strain responsive near-infrared mechanoluminescence for potential non-destructive artificial joint stress imaging [J]. *Adv. Mater.* 2026, 38, e05360
- [ 98 ] JIANG H J, ZHOU Z H, JI G C, *et al.* Trap-assisted mechanoluminescence in  $\text{Mn}^{2+}$ -doped transparent amorphous glass for potential stress sensing [J]. *Adv. Optical Mater.*, 2025, 13, 2500037.
- [ 99 ] TANG Y Q, CAI Y Y, DOU K P, *et al.* Dynamic multicolor emissions of multimodal phosphors by  $\text{Mn}^{2+}$  trace doping in self-activated  $\text{CaGa}_4\text{O}_7$  [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15:3209.
- [ 100 ] ZHUANG Y X, TU D, CHEN C J, *et al.* Force-induced charge carrier storage: a new route for stress recording [J]. *Light Sci Appl.*, 2020, 9:182.
- [ 101 ] WANG X D, ZHANG H L, YU R M, *et al.* Dynamic pressure mapping of personalized handwriting by a flexible sensor matrix based on the mechanoluminescence process [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27:2324-2331.
- [ 102 ] ZHANG J C, PAN C, ZHU Y F, *et al.* Achieving thermo-mechano-opto-responsive bitemporal colorful luminescence via multiplexing of dual lanthanides in piezoelectric particles and its multidimensional anticounterfeiting [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30:1804644.
- [ 103 ] HANG P, ZHAO X H, JIA Z W, *et al.* High Defect Tolerance Breaking the Design Limitation of Full-Spectrum Multimodal Luminescence Materials [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 2411532.
- [ 104 ] MA X L, WANG J X, LI J, *et al.* Visually encoded mechanoluminescence through hierarchical structuring with microscale patterns and nanoscale features [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16: 9550.
- [ 105 ] SUO H, WANG N, ZHANG Y, *et al.* Excitation-mode-selective emission through multiexcitonic states in a double perovskite single crystal [J]. *Light Sci. Appl.*, 2025, 14:21.
- [ 106 ] HYODO K, TERASAWA Y, XU C N, *et al.* Mechanoluminescent stress imaging for hard tissue biomechanics [J]. *J. Biomech.*, 2012, 45:S263.
- [ 107 ] JIANG Y, WANG F, ZHOU H, *et al.* Optimization of strontium aluminate-based mechanoluminescence materials for occlusal examination of artificial tooth [J]. *Mater. Sci. Eng., C*, 2018, 92:374-80.
- [ 108 ] HAN Y, BAI Y, BIAN J, *et al.* Polydimethylsiloxane-Based Mechanoluminescent Occlusal Splint with the Visualization of Occlusal Force [J]. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2021, 3(10):5180-7.
- [ 109 ] Kim H J, Ji S, Han J Y, *et al.* Detection of cracked teeth using a mechanoluminescence phosphor with stretchable photodetector array [J]. *NPG Asia Mater*, 2022, 14, 26.
- [ 110 ] LIU X, XIONG P, LI L, *et al.* Monitoring cardiovascular disease severity using near-infrared mechanoluminescent materials as a built-in indicator [J]. *Mater. Horiz.*, 2022, 9(6):1658-69.
- [ 111 ] JANG J, KIM H, JI S, *et al.* Mechanoluminescent, air-dielectric  $\text{MoS}_2$  transistors as active-matrix pressure sensors for wide detection ranges from footsteps to cellular motions [J]. *Nano Lett.*, 2019, 20(1):66-74.
- [ 112 ] LI L, WONDRAKZEK L, LI L, *et al.*  $\text{CaZnOS}:\text{Nd}^{3+}$  Emits Tissue-Penetrating near-Infrared Light upon Force Loading [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(17):14509-16.
- [ 113 ] XIONG P, PENG M. Near infrared mechanoluminescence from the  $\text{Nd}^{3+}$  doped perovskite  $\text{LiNbO}_3:\text{Nd}^{3+}$  for stress sensors [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(21):6301-7.
- [ 114 ] LIU Z, YU X, PENG Q, *et al.* NIR Mechanoluminescence from  $\text{Cr}^{3+}$  Activated  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  with Intense Zero Phonon line [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(27):2214497.
- [ 115 ] WU S, ZHOU G Y, WU Y F, *et al.* Multiple defect-induced high-resolution near-infrared mechanoluminescent materials for non-destructive detection of blood glucose and lipids [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(50):2408508.
- [ 116 ] ZHOU D T, ZHANG Z L, QIU B, *et al.* Ultrasound-activated persistent luminescence imaging and bacteria-triggered drug release for helicobacter pylori infection theranostics [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(23):26418-

26430.

- [ 117 ] ZHAO C X, LI J J, WANG H Y, *et al.* A "test-to-treat" pad for real-time visual monitoring of bacterial infection and on-site performing smart therapy strategies [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(15):14890-14902.
- [ 118 ] CHEN G F, ZHANG Y P, LIU M Q, *et al.* Magnetic-driven mechanoluminescent microdevices for tumor therapy via reactive oxygen species generation [J]. *Small*, 2021, 17(45):2103876.
- [ 119 ] LV X L, DUAN T Y, FANG S F, *et al.* Self-powered mechanoluminescent elastomer for solar-blind ultraviolet emission [J]. *Light Sci Appl.*, 2026, 15:61.



王宇(1998-),女,河北秦皇岛人,博士,2025年于河北大学获得博士学位,主要从事近红外发光材料方面的研究。

E-mail: ywan67@cityu. edu. hk



王锋(1979-),男,陕西渭南人,博士,教授,2006年于浙江大学获得博士学位,主要从事微纳结构发光材料方面的研究。

E-mail: fwang24@cityu. edu. hk