

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-09

具有近红外圆偏振发光可调的液晶弹性体

王思洁, 赵 怡, 马晓楠, 吴 杰, 段力澜, 谢鹤楼*

(湘潭大学化学学院, 环境友好化学及应用教育部重点实验室, 湘潭 411105)

摘要: 近红外圆偏振发光(NIR-CPL)材料兼具深层组织穿透与高信息容量的双重优势,在光学防伪、信息加密、生物成像及光学器件等领域展现出广阔的应用前景。然而,现有材料普遍存在发光不对称因子(g_{lum})较低的问题且难以调控,限制了其实际应用。针对这一挑战,本文构建了一种基于胆甾相液晶弹性体(CLCEs)的NIR-CPL体系。通过将近红外发光分子引入手性液晶弹性体网络,利用CLCEs的周期性螺旋结构形成光子禁带(PBG),并实现了PBG位置的连续调控。研究发现,当PBG与近红外发光分子的发射峰精准重叠时,NIR-CPL得到显著增强,最大不对称因子(g_{lum})高达0.3。该研究不仅为构筑高性能NIR-CPL材料提供了简便有效的策略,也为其在癌症检测和多级信息加密中的应用奠定了材料基础。

关键词: 近红外发光; 圆偏振发光; 胆甾相液晶弹性体; 光子禁带

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10.3724/CJL.20260244

CSTR: 32170.14.CJL.20260244

Liquid crystal elastomer with tunable near-infrared circularly polarized luminescence

Wang Si-Jie, Zhao Yi, Ma Xiao-Nan, Wu Jie, Duan Li-Lan, Xie He-Lou*

(School of Chemistry, Xiangtan University, Key Laboratory of Environmentally Friendly Chemistry and Applications,
Ministry of Education, Xiangtan 411105)

* Corresponding Author, E-mail: he-lou@xtu.edu.cn

Abstract: Near-infrared circularly polarized luminescence (NIR-CPL) materials offer the dual advantages of deep tissue penetration and high information capacity, holding great potential for application in optical anti-counterfeiting, data encryption, bioimaging and optical devices. However, existing materials suffer from low luminescence asymmetry factors that are difficult to tune, which limits their practical application. To address this challenge, this paper reports a high-performance NIR-CPL system based on cholesteric liquid crystal elastomers (CLCEs). By incorporating near-infrared luminescent molecules into CLCEs, a photonic bandgap is formed via the periodic helical structure of the CLCEs, enabling continuous control over the photonic bandgap position. Notably, when the photonic bandgap closely matches the emission peak of the NIR luminescent molecules, circularly polarized luminescence is significantly enhanced, yielding a maximum asymmetry factor (g_{lum}) of 0.3. This study not only provides a simple and effective strategy for developing high-performance NIR-CPL materials, but also establishes a material foundation for advanced applications in cancer detection and multi-level information encryption.

Keywords: Near-infrared luminescence; circularly polarized luminescence; cholesteric liquid crystal elastomer; photonic bandgap

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(NNSFC 22575207 and 22275158)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (NNSFC 22575207 and 22275158)

1 引 言

随着光电子技术的飞速发展,具有光学手性的圆偏振发光(Circularly Polarized Luminescence, CPL)材料在光电子器件、三维显示、信息加密、防伪技术及光波导等领域展现出广阔的应用前景^[1-3]。近红外圆偏振发光(Near-Infrared Circularly Polarized Luminescence, NIR-CPL)材料凭借其深层组织穿透能力和低背景噪声干扰等显著优势,在生物成像、癌症检测及隐蔽光学编码等特定场景中具有不可替代的价值,因此近年来该类材料受到关注^[4-6]。然而,现有 NIR-CPL 材料的发光不对称因子(g_{lum})普遍较低且不可调节,远未达到实际手性光电器件的应用需求。因此,开发兼具高发光效率和高发光不对称因子的 NIR-CPL 材料具有重要的意义^[7-8]。

胆甾相液晶弹性体(Cholesteric Liquid Crystal Elastomers, CLCEs)是一类由手性添加剂自组装形成的、具有周期性螺旋纳米结构的弹性体^[9-10]。CLCEs 具有胆甾相液晶的有序性与弹性体网络的橡胶弹性,其螺旋螺距对外界刺激(如手性添加剂含量、机械应变/应力等)高度敏感,从而赋予材料优异的结构色动态可调性^[11]。根据布拉格反射原理,当光的波长落入其光子禁带(Photonic Bandgap, PBG)范围时,该螺旋结构会选择性地反射与其旋向相同的圆偏振光,而透过相反旋向的光,从而形成 PBG。其中心反射波长 λ_r 遵循布拉格方程:

$$\lambda_r = np \cos \theta = \lambda_0 \cos \theta$$

其中, n 为材料的平均折射率(液晶通常约为 1.6), p 是胆甾相螺距, θ 是入射光与螺旋轴之间的夹角, λ_0 为垂直入射($\theta = 0$)时的最大中心反射波长^[12]。通过精确调控手性添加剂的浓度,可以连续调节液晶螺距 p , 从而实现 PBG 位置的动态调控。当发光分子的发射光谱与 CLCEs 的 PBG 发生有效重叠时,体系会对特定旋向的圆偏振光产生强烈的选择性调制,从而显著放大发光不对称因子。这种独特的光子-手性耦合效应,使得 CLCEs 成为构筑柔性 CPL 器件和固态光子材料的理想平台^[13]。特别是对于近红外发光体系,液晶弹性体不仅可以作为发光分子的载体,更能利用其可调的 PBG 实现对 NIR-CPL 信号的手性增强。基于上述背景,本文旨在构建一种基于 CLCEs 的

高性能 NIR-CPL 体系。通过将近红外发光分子引入手性液晶弹性体网络中,利用手性添加剂含量精细调控液晶螺距,使 CLCEs 的 PBG 与近红外发光分子的发射峰精准重叠。实验结果表明,该类液晶弹性体体系中获得了高达 0.3 的 NIR-CPL 发光不对称因子(g_{lum})。本研究不仅证实了利用 PBG 增强 NIR-CPL 信号的有效性,并为高性能手性发光材料的构筑提供了简便策略,同时也凭借近红外光的隐蔽性与 CPL 的手性特征,展现出该材料在柔性光学防伪、多通道信息加密及近红外手性光电子器件领域的巨大应用潜力。

2 实 验

2.1 近红外分子的合成

近红外分子 TPAQA 合成路线如图 S1 所示,中间体及前驱体的详细合成步骤请参考文献^[14-18], TPAQA 的合成具体如下:将化合物 8 (2.00 g, 2 mmol) 和化合物 6 (1.00 g, 5.5 mmol) 加入 250 ml 圆底烧瓶中,加入无水乙醇(20 ml),升温回流搅拌反应 18 h。停止反应并冷却至室温,旋蒸除去溶剂,进行柱层析分离提纯,洗脱剂比例为 DCM: 甲醇=100:1~20:1,得到深蓝色粉末 0.5 g,产率为 33.4%。¹H NMR (400 MHz, DMSO- d_6) δ 8.46 (d, $J = 15.2$ Hz, 1H), 8.35 (d, $J = 8.4$ Hz, 1H), 8.18 (dd, $J = 12.4, 8.8$ Hz, 2H), 7.97 (d, $J = 9.2$ Hz, 1H), 7.91 (s, 1H), 7.78 (dd, $J = 19.2, 8.4$ Hz, 3H), 7.66 (t, $J = 7.6$ Hz, 1H), 7.48 (d, $J = 8.4$ Hz, 2H), 7.40 (s, 1H), 7.25 (d, $J = 16.4$ Hz, 1H), 7.02 (d, $J = 8.4$ Hz, 4H), 6.86 (d, $J = 8.4$ Hz, 4H), 6.77 (d, $J = 8.0$ Hz, 2H), 4.79 (s, 2H), 3.73 (s, 6H), 2.79 (s, 2H), 1.86 (s, 6H)。 ¹³C NMR (101 MHz, DMSO- d_6) δ 172.78, 162.30, 155.86, 148.22, 147.98, 146.59, 141.73, 139.94, 139.79, 139.27, 138.82, 138.27, 136.35, 132.43, 130.67, 130.52, 129.99, 129.64, 128.15, 127.12, 126.84, 122.70, 119.41, 119.16, 117.90, 114.95, 113.95, 113.18, 112.91, 55.24, 52.80, 35.78, 30.76, 25.74, 17.91。MALDI-TOF-MS (m/z): calcd for C₄₉H₄₃N₂O₅S⁺[M - Br]⁺: 771.290, found: 771.579。

2.2 液晶弹性体的制备

该液晶弹性体参照图 1 所示合成,各组分按照表 S1 精确称量,采用文献报道的两步聚合法结合各向异性脱溶胀工艺制备^[19-20]。以 LCE-3 样品为例,具体制备流程如下:首先,将 RM257 (267 mg,

79.46 wt. %)、手性添加剂 S/R5011 (8 mg, 2.38 wt. %)、近红外分子 TPAQA (3.5 mg, 1.04 wt. %) 溶解于 0.165 g 甲苯中, 在 80 °C 下搅拌 10 min 以形成均匀溶液。随后将溶液缓慢冷却至室温, 依次加入 PETMP (10.71 mg, 3.19 wt. %), EDDET (45.16 mg, 13.44 wt. %) 以及光引发剂 IRGA-CURE 651 (1.65 mg, 0.49 wt. %), 超声分散 10 min。接着加入催化剂 DPA (0.64 mg) 引发第一步

迈克尔加成反应。将混合均匀的前驱体溶液倾倒入玻璃基板上, 在 25 °C 下反应 5 h, 当样品表面出现可见反射色时, 表明 CLCEs 已经完成自组装。随后将样品置于紫外光 (365 nm, 100 mW/cm²) 下辐照 10 min 以引发光交联反应; 最后将其在自然条件下风干 24 h, 以确保残余甲苯完全挥发。通过系统调节手性添加剂 S5011 的浓度, 可制得呈现红、绿、蓝等不同颜色反射的胆甾型液晶弹性体。

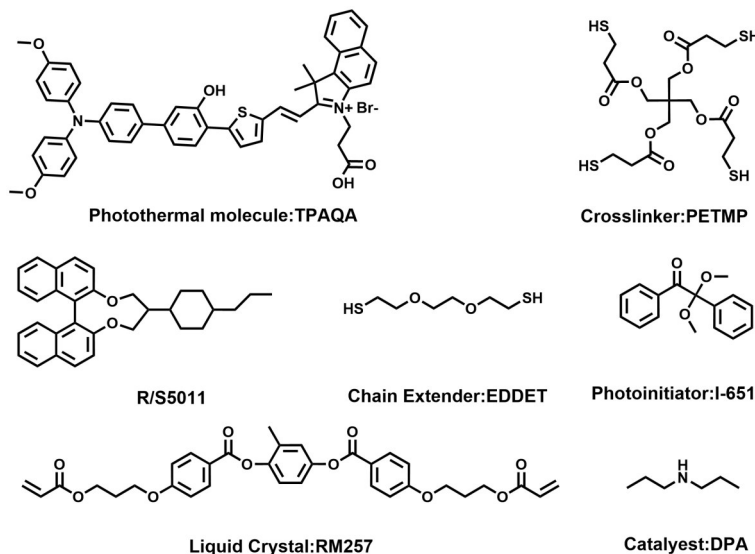


图1 制备 CLCEs 所用原料的化学结构式

Fig. 1 Chemical structural formulae of the raw materials used in the preparation of cholesteric liquid crystal elastomers

2.3 样品表征

合成近红外分子的化学结构由核磁共振氢谱 (¹H NMR) 进行表征, 采用 Bruker ARX400 型光谱仪, 以四甲基硅烷 (TMS) 为内标, 氘代氯仿 (CDCl₃) 或氘代二甲亚砜 (DMSO-d₆) 为溶剂。液晶弹性体的化学结构通过 Nicolet 6700 型傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR) 进行测试, 记录波数范围 400–4000 cm⁻¹。采用 TA SDT Q600 型热重分析仪 (TGA) 在氮气氛围下测试材料的热稳定性, 升温速率为 10 °C/min。材料的热转变行为采用 TA Q110 型差示扫描量热仪 (DSC) 进行测定, 在氮气保护下以 10 °C/min 的速率进行升降温扫描。液晶弹性体的织构图像采用配有 Mettler FP82HT 加热台的 Leica DM-LM-P 型偏光显微镜 (POM) 进行观察与记录。透射光谱与吸收光谱由 Cary 3500 型紫外-可见分光光度计 (UV-Vis) 测定, 激发与光致发光 (PL) 光谱由 QM40 型荧光分光光度计测定。力学性能测试采用 E43.104 型万能拉伸试验机进行。除特殊说明外, 所有测试均在室温 (25 °C) 下进行。

3 结果与讨论

3.1 胆甾相液晶弹性体的合成及其相行为

根据图 S1 的合成路线合成了近红外分子 TPAQA, 其相关结构表征 (图 S1~S4) 与光学性能 (图 S5) 测试结果表明: 该分子的最大吸收波长为 620 nm, 发射波长为 823 nm, 并展现出良好的聚集诱导发光特性。随后, 利用 TPAQA 与手性添加剂 (S5011 和 R5011) 构建了两种 CLCEs, 其具体的分子组成如图 1 所示。按照掺杂剂含量不同, 所得 S5011 和 R5011 液晶弹性体分别命名为 S-LCE_x 和 R-LCE_x (x=1, 2, 3, 4, 5)。在此以含有 S5011 的 S-LCE_x 为例对其化学结构与性能进行表征。FT-IR 如图 2a 所示, 在 1637 cm⁻¹ (-C=C-伸缩振动) 以及 989 cm⁻¹ (RCH=CH₂ 面外弯曲振动) 附近均未观察到相应的特征吸收峰, 说明硫醇与丙烯酸酯基团之间的迈克尔加成反应已进行完全, 表明 CLCEs 已成功制备。热重分析 (TGA) 结果显示 (图 2d), 在氮气氛围下所有样品 TGA 的 5% 分解温度 (*T*_{5%}) 均超过了 350 °C, 说明材料均具有优异的热稳定性。DSC

测试结果显示,所有样品的各向同性温度(T_{iso})约为 65 °C,且受手性添加剂浓度的影响较小(图 2e)。然而,随手性添加剂含量的增加,样品的玻璃化转变温度(T_g)略有下降(图 2f),这归因于手性添加剂增塑作用削弱了分子间的相互作用力。POM 的照

片(图 2b-c)表明所有样品均呈现出胆甾相液晶的织构(图 S7),证明 R/S5011 具有强大的螺旋扭曲力,能够诱导液晶自组装成长程有序的螺旋手性结构。此外,R5011 的液晶弹性体表现出完全一致的结构与热学行为(图 S6 和 S7),在此不再赘述。

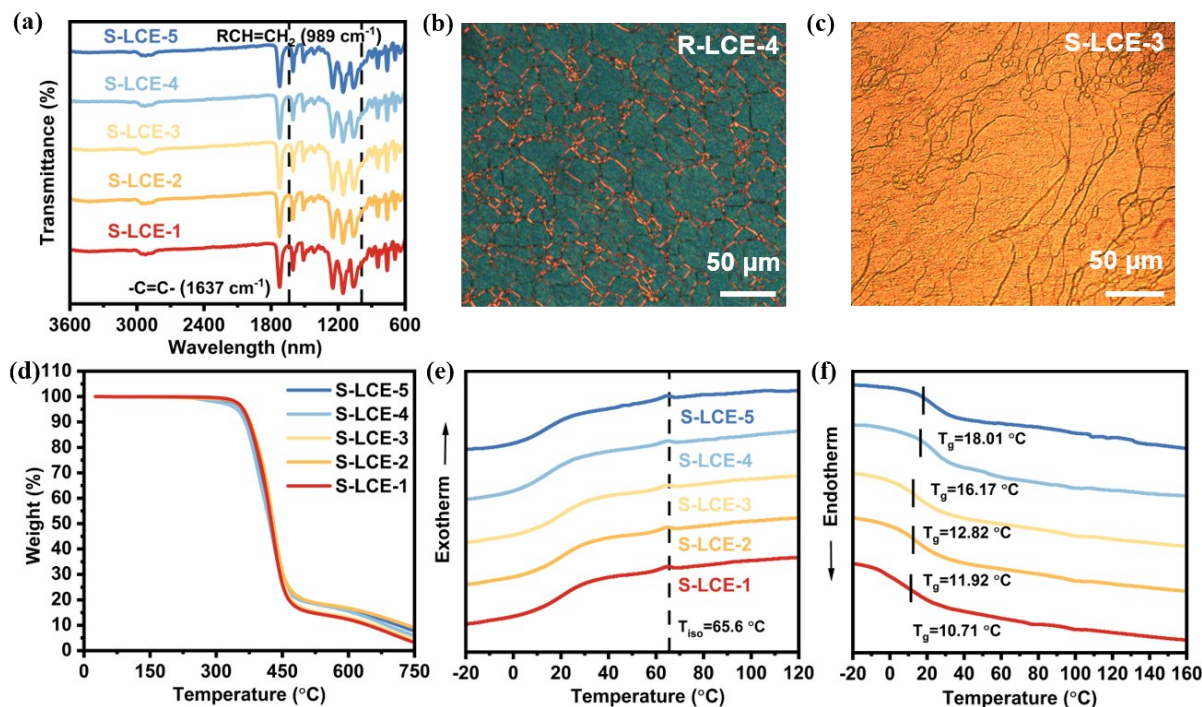


图 2 LCE_x 的合成及其相行为 (a) S-LCE_x 的 FT-IR 光谱; (b-c) R-LCE-4 和 S-LCE-3 在 55 °C 的 POM; (d) S-LCE_x 的 TGA 曲线; (e-f) S-LCE_x 的差示扫描量热 (DSC) 曲线。

Fig. 2 Synthesis and phase behavior of LCE_x, (a) FT-IR spectrum of S-LCE_x, (b-c) POM of R-LCE-4 and S-LCE-3, (d) TGA curve of S-LCE_x, (e-f) Differential scanning calorimetry (DSC) curve of S-LCE_x.

3.2 胆甾相液晶弹性体的近红外圆偏振行为

图 3a-b 所示为 CLCEs 的紫外可见吸收光谱和荧光发射光谱。样品 S-LCE-1 至 S-LCE-5 的最大吸收峰均位于 620 nm 处,表明手性添加剂 S5011 含量对材料的紫外吸收行为无显著影响,手性添加剂浓度的改变并未影响近红外分子的基态电子跃迁行为。图 S5 的稳态发射光谱表明,纯近红外分子 TPAQA 的发射峰位于 823 nm 处。然而,当 TPAQA 掺杂入 CLCEs 网络后(图 3b),观察到随着手性添加剂浓度的变化,样品 S-LCE-1 至 S-LCE-5 的表观荧光发射峰位发生了不同程度的偏移,且发光强度也表现出显著的差异。这种发光强度和峰位的差异归因于 CLCEs 特有的 PBG 调制效应^[21-24]。随着手性添加剂浓度的改变,液晶基元的螺旋扭曲度随之变化,进而实现了对体系宏观螺距及 PBG 位置的连续调节。当发射体位于 PBG 边缘时,其荧光发射会得到增

强;而当发射波长落入禁带中心,由于带隙内的光子态密度受到抑制,荧光发射则会受到调制或抑制。如图 3c 所示,不同手性添加剂含量显著影响了 PBG 的位置,并在自然光条件下产生不同的结构色反射。其中,S-LCE-4 的 PBG 与 TPAQA 的发射峰近乎重叠(图 3d),两者中心波长的差值趋近于零($\Delta\lambda \approx 0$)(图 3d)。此外,该 PBG 的半高宽(FWHM=110 nm)显著大于发射峰的半高宽(FWHM=65 nm),表明光子禁带完全覆盖了内部发光频带。这种完美的共振匹配引发了强烈的光子手性放大效应,赋予了 CLCEs 极强的选择性反射作用,使得 S-LCE-4 表现出独特的荧光调控行为^[25-37],这也为后续实现高效的圆偏振发光奠定了物理基础。此外,含有 R5011 的液晶弹性体系亦表现出完全一致的光学调控规律(图 S8)。

如图 4a-b 及图 S9-S10 所示,所有样品均表现

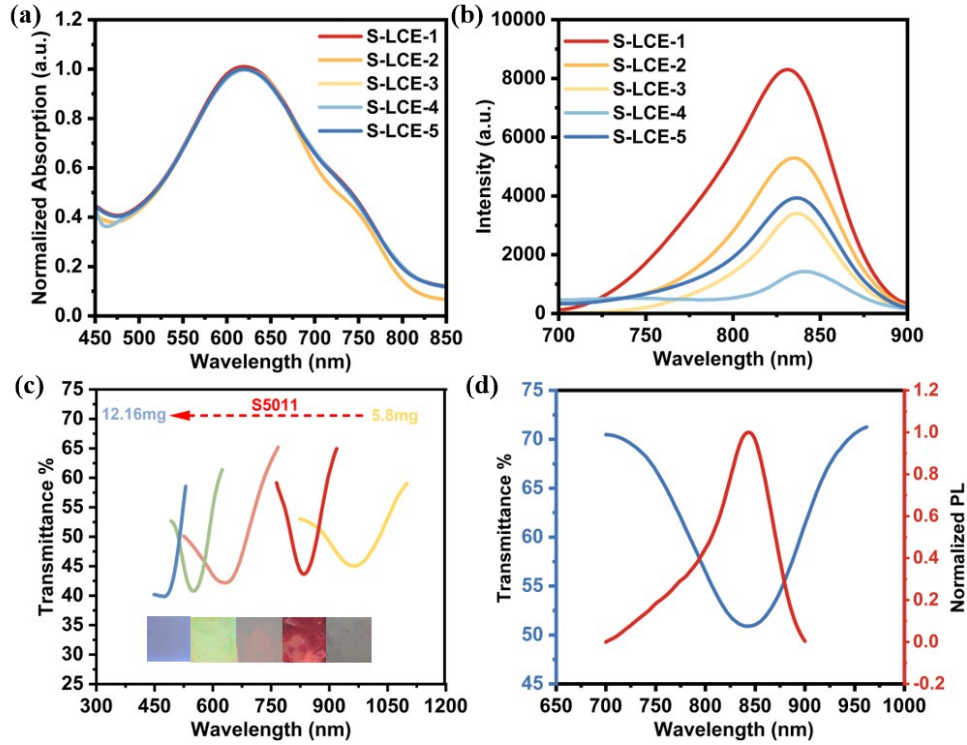


图3 S-LCE_x 的光物理性能(a)S-LCE_x 的UV-Vis 光谱;(b)S-LCE_x在室温条件下的稳态发射光谱;(c)S-LCE_x 掺杂不同含量S5011的透射光谱图,插图为自然光条件下照片;(d)S-LCE-4的透射光谱及其归一化发射光谱。

Fig. 3 Optical properties of S-LCE_x, (a) UV - Vis spectrum of S-LCE_x, (b) Steady-state emission spectrum of S-LCE_x at room temperature, (c) Transmission spectra of S-LCE_x doped with varying concentrations of S5011, the inset shows a photograph taken under natural light conditions, (d) Transmission spectrum and normalized emission spectrum of S-LCE-4.

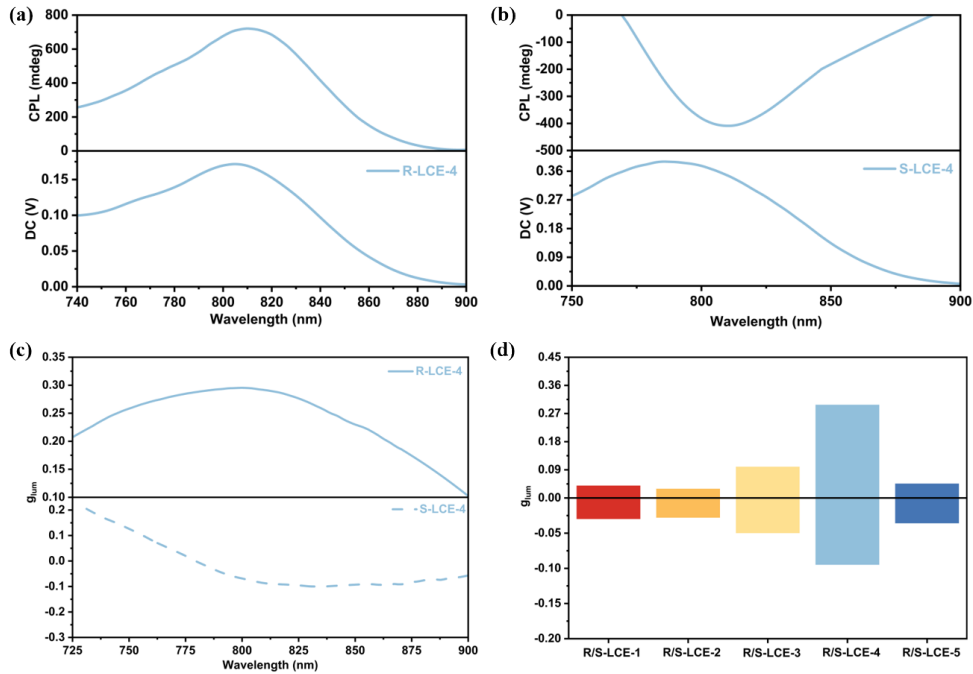


图4 LCE_x 的近红外圆偏振行为(a)S-LCE-4 的CPL 和电压关系图;(b)R-LCE-4 的CPL 和电压关系图;(c)S/R-LCE-4 的 g_{lum} 图;(d)S/R-LCE_x 的 g_{lum} 柱状图,R-LCE_x 的 g_{lum} 为正,S-LCE_x 的 g_{lum} 为负。

Fig. 4 Near-infrared circularly polarized behavior of LCE_x, (a) The relationship diagram between CPL and voltage of S-LCE-4, (b) The relationship graph between CPL and voltage of R-LCE-4, (c) The g_{lum} diagram of S/R-LCE-4, (d) The g_{lum} histogram of S/R-LCE_x shows that the g_{lum} of R-LCE_x is positive, while the g_{lum} of S-LCE_x is negative.

出明显的 NIR-CPL 信号,但含有 R5011 与 S5011 分子的液晶弹性体表现出完全相反的 CPL 信号(图 4d)。这一现象不仅证实了 CLCEs 的手性螺旋结构能够有效诱导近红外分子产生 CPL,也表明其 CPL 行为受手性螺旋结构的精准调控。随着手性添加剂含量的改变,其发光不对称因子 g_{lum} 随手性添加剂含量呈现先升高后降低的趋势。这是由于随着手性添加剂掺杂量的减少,体系的螺距逐渐增大,导致 PBG 发生连续移动。当掺杂量为 2.38% 时, PBG 与近红外分子的发射峰达到最佳重叠(图 3d),从而最大程度地放大了

CPL 信号,此时获得的最大 g_{lum} 高达 0.3(图 4c)。若进一步减少手性添加剂掺杂含量会使 PBG 偏离发射峰,导致对 CPL 选择增强减弱, g_{lum} 随之下降。上述结果表明,通过调控手性添加剂含量实现 PBG 与发光分子发射光谱的精确重叠,是实现高性能 NIR-CPL 调控的关键策略。

3.3 胆甾相液晶弹性体的力学性能及近红外圆偏振发光的机械调控

图 5a 为 CLCEs 的应力-应变曲线图,所有样品均表现出弹性体典型的力学行为,即低应变区应力增长比较平缓,高应变区应力随应变快速上

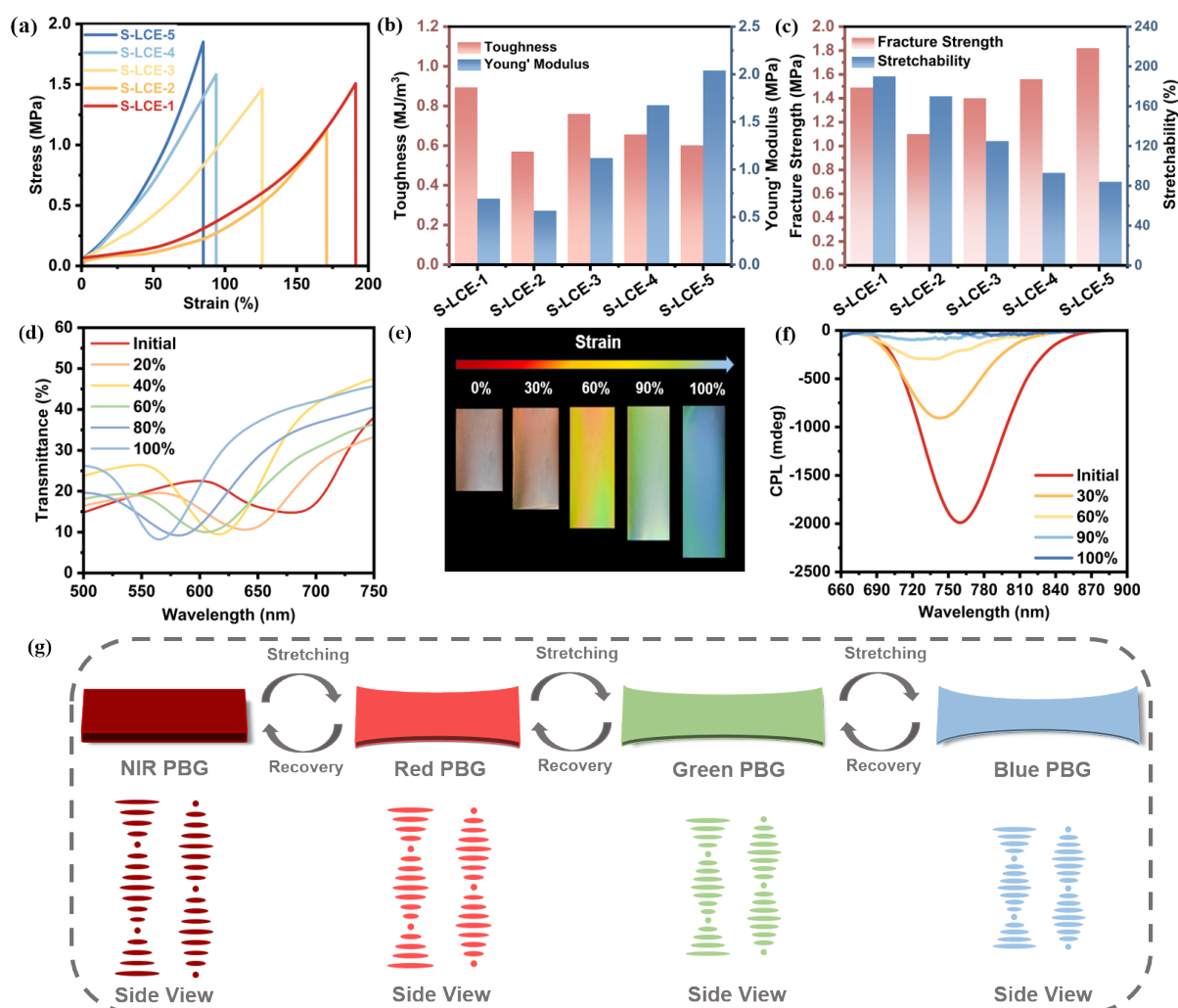


图 5 LCE_x 的力学性能及 NIR-CPL 的机械调控 (a) S-LCE_x 的应力-应变曲线; (b) S-LCE_x 的杨氏模量和韧性; (c) S-LCE_x 的断裂伸长率和断裂强度; (d) S-LCE-3 在 0%-110% 应变范围内的透射光谱; (e) S-LCE-3 的机械拉伸照片; (f) S-LCE-3 在 0%~100% 应变范围内的 CPL 光谱; (g) 拉伸过程中弹性体手性螺旋结构的演变示意图。

Fig. 5 Mechanical properties of LCE_x and mechanical control of its near-infrared circularly polarized luminescence, (a) Stress-strain curve of S-LCE_x, (b) Young's modulus and toughness of S-LCE_x, (c) Elongation at break and tensile strength of S-LCE_x, (d) Transmittance spectra of S-LCE-3 over a strain range of 0% - 110%, (e) Photograph of S-LCE-3 undergoing mechanical tensile testing, (f) CPL spectra of S-LCE-3 over a strain range of 0% - 100%, (g) Schematic diagram illustrating the evolution of the chiral helical structure of the elastomer during the stretching process.

升直至断裂。不同样品之间的应力-应变曲线未呈现出严格的单调的变化规律,表明该体系的力学响应受多因素共同调控。如图 5b-c 所示,样品的杨氏模量呈上升趋势,而断裂伸长率有所下降,断裂强度和韧性则在一定范围内波动。这表明手性添加剂 S5011 引入强化了胆甾相有序结构对分子链运动的约束,从而使材料刚性提高、可拉伸性下降;同时,近红外发光分子与液晶弹性体网络之间的相互作用影响局部应力传递,导致各力学参数未呈现简单线性关系。

同时所制备的 CLCEs 表现出典型的机械变色特性(图 5e),以 S-LCE-3 为例深入研究了其变色机制:如图 5d 所示,当拉伸应变从 0% 增至 100% 时,样品反射中心波长由初始的 700 nm 蓝移至 565 nm,结构色呈现出从红色、橙色、黄色到绿/蓝色的连续动态变化,根据引言中所述的布拉格反射方程,在材料平均折射率(n)基本恒定的前提下,反射中心波长(λ_r)的连续蓝移为微观螺距(p)的减小提供了直接的光学证据,因此,该现象归因于拉伸诱导的胆甾相螺旋压缩与周期缩短。进一步的 CPL 测试结果表明,随着拉伸应变的增加,CPL 信号强度逐渐减弱;当应变达到 100% 时, g_{lum} 值趋近于零(图 5f)。这是由于高应变下弹性体内部的螺旋手性结构受到严重破坏或沿拉伸方向倾斜压缩,削弱了其对圆偏振光的 PBG 调制作

用(图 5g),表明外部机械应力可有效调控材料的近红外 CPL 特性。此外,含有 R5011 液晶弹性体表现出完全一致的力学响应及机械应力可调控的 NIR-CPL 行为(图 S11)。这种机械可调谐的 NIR-CPL 行为,为开发新型近红外手性光子器件提供了全新的设计思路。

4 结论

本文成功构筑了一类兼具力学可调谐的高性能 NIR-CPL CLCEs。实验结果表明,在 620 nm 红光激发下,该材料展现出优异的近红外发光性能。通过调节手性添加剂的掺杂浓度,能够实现对材料 PBG 的连续精准调控。当液晶弹性体的 PBG 与近红外发光分子的发射光谱精准重叠时,材料展现出优异 CPL 增强性能,其最大发光不对称因子(g_{lum})高达 0.3。该材料具有显著的机械变色特性,在 0% 到 100% 的拉伸应变范围内,其反射中心波长可由 700 nm 连续蓝移至 565 nm,实现了结构色的灵敏动态变化,同时其 NIR-CPL 信号也展现出动态应变可调性。该工作不仅有效克服了 NIR-CPL 不对称因子较低的难题,更为未来柔性光学防伪、多级信息加密技术及近红外手性光电子器件的发展提供了重要的材料基础与全新的设计思路。

参 考 文 献:

- [1] XIAO Y, PAN X L, WAN J, *et al.* Control of circularly polarized luminescence in cholesteric luminescent liquid crystals: from FRET to exciton coupling [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2026, 65: e1985010.
- [2] LI J, GUAN Y, HAO T T, *et al.* Phosphorescent liquid crystalline polymer-based circularly polarized luminescence optical waveguides for enhanced photonic signal processing and information encryption [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64: e202423395.
- [3] WANG X Y, WEI Y, XU X, *et al.* Circularly polarized luminescence optical waveguides based on one-dimensional hybrid copper-silver bromide crystal [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64: e202515434.
- [4] ZHOU X F, GENG W Y, LI J Y, *et al.* An ultraviolet-visible and near-infrared-responded broadband NIR phosphor and its NIR spectroscopy application [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8: 1902003.
- [5] XU L, ZHAO Y X, ZHOU B X, *et al.* Engineered oligomeric indolizine-fused BODIPY fluorophores for interventional NIR-II fluorescence imaging of acute cardio-cerebrovascular events [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38: e16403.
- [6] LI W H, XIONG P X, ZHEN X X, *et al.* Micro-strain responsive near-infrared mechanoluminescence for potential nondestructive artificial joint stress imaging [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38: e05360.
- [7] KIZHAKIDATHAZHATH R, LAGERWALL J P F. Robust cholesteric liquid crystal elastomer fibers for mechanochromic textiles [J]. *Nat. Mater.*, 2022, 21: 1441-1447.
- [8] CHENG D, XIN Y B, XIAO L Y, *et al.* Helical photonic confinement of metal clusters enables switching and imaging of near-infrared circularly polarized light [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38: e73316.

- [9] ZINNA F, BOTTA C, LUZZATI S, *et al.* Near-infrared circularly polarized electroluminescence with switchable handedness in organic LEDs [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35: 2423077.
- [10] LUO Z W, JI H H, JIN X, *et al.* Mechanically steered photon upconversion and circularly polarized luminescence in stretchable photonic crystal films [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16: 9960.
- [11] WANG C T, CHEN K Q, XU P, *et al.* Fully chiral light emission from CsPbX₃ perovskite nanocrystals enabled by cholesteric superstructure stacks [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29: 1903155.
- [12] YANG X F, ZHOU M H, WANG Y F, *et al.* Electric-field-regulated energy transfer in chiral liquid crystals for enhancing upconverted circularly polarized luminescence through steering the photonic bandgap [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32: 2000820.
- [13] SHI Y H, HAN J L, LI C X, *et al.* Recyclable soft photonic crystal film with overall improved circularly polarized luminescence [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14: 6123.
- [14] TAN H Y, QIU Y T, SUN H, *et al.* A lysosome-targeting dual-functional fluorescent probe for imaging intracellular viscosity and beta-amyloid [J]. *Chem. Commun.*, 2019, 55: 2688-2691.
- [15] DENG Y J, WANG M Z, ZHUANG Y L, *et al.* Circularly polarized luminescence from organic micro-nano-structures [J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10: 76.
- [16] HUANG Y J, ZHOU Y J, GUO X R, *et al.* Near-infrared circularly polarized luminescence enabled by chiral inorganic nanomaterials [J]. *Nanoscale*, 2025, 17: 1922-1931.
- [17] YANG B, LI D Y, DENG R R, *et al.* Efficient multicolor X-ray excited persistent luminescence enabled by Gd-mediated trap clusters [J]. *Nat. Commun.*, 2026, 17: 1909.
- [18] XU M C, LI G Y, LI W, *et al.* Exploring the circular polarization capacity from chiral cellulose nanocrystal films for a photo-controlled chiral helix of supramolecular polymers [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022, 61: e202117042.
- [19] LI C X, YANG X F, HAN J L, *et al.* Signal transmission encryption based on dye-doped chiral liquid crystals via tunable and efficient circularly polarized luminescence [J]. *Mater. Adv.*, 2021, 2(12): 3851-3855.
- [20] JIANG Z Y, LIU H X, FU L, *et al.* Anion immobilization from quasi-icosahedron to cubo-octahedron enhances the lithium ion transference number in solid-state electrolytes [J]. *ACS Nano*, 2025, 19: 21143-21153.
- [21] WANG X J, GAO X H, ZHONG H, *et al.* Three-level chirality transfer and amplification in liquid crystal supramolecular assembly for achieving full-color and white circularly polarized luminescence [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37: 2412805.
- [22] ZHANG P, WANG C, YAN R Y, *et al.* 3D-printed architected cholesteric liquid crystal displays with spatiotemporal color modulation [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38: e74517.
- [23] SONG Z P, WEI J, LIU J, *et al.* Mechanically-tunable and full-color circularly polarized long-lived phosphorescence in chiral superstructure elastomers [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37: 2419640.
- [24] LI S, TANG Y Q, FAN Q Y, *et al.* When quantum dots meet blue phase liquid crystal elastomers: visualized full-color and mechanically-switchable circularly polarized luminescence [J]. *Light Sci. Appl.*, 2024, 13: 140.
- [25] WU Y, LIU Y, BI R, *et al.* Recent advances in cholesteric liquid crystal elastomers: fabrication, functionalization, and applications [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2026, 65: e4653597.
- [26] BERA S, UMESH, BHATTACHARYA S. Enhanced circularly polarized luminescence attained via self-assembly of heterochiral as opposed to homochiral dipeptides in water [J]. *Chem. Sci.*, 2024, 15: 13987-13997.
- [27] GHERARDI L, GABBANI A, DI BARI L, *et al.* Tunable Natural and Magnetic Circularly Polarized Luminescence in the UVB Region from a Molecular Gd(III) Complex [J]. *JACS Au*, 2026, 6(6): 3114-3121.
- [28] JI M J, ZHAO W L, LI M, *et al.* Circularly polarized luminescence with high dissymmetry factors for achiral organic molecules in solutions [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16: 2940.
- [29] 陈瑞鑫, 刘子龙, 陈佳浩, 等. 胆甾相液晶中微结构的调控与应用 [J]. *液晶与显示*, 2026, 41(6): 769-782.
CHEN R X, LIU Z L, CHEN J H, *et al.* Manipulation and applications of microstructures in cholesteric liquid crystals [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2026, 41(6): 769-782. (in Chinese)
- [30] MACKENZIE L E, PAL R. Circularly polarized lanthanide luminescence for advanced security inks [J]. *Nat. Rev. Chem.*, 2021, 5: 109-124.
- [31] 赵嵩岚, 李傲天, 朱吉亮, 等. 具有宽范围热致变色的胆甾相液晶薄膜 [J]. *液晶与显示*, 2026, 41(4): 473-481.
ZHAO S L, LI A T, ZHU J L, *et al.* Cholesteric liquid crystal films with wide-range thermochromism [J]. *Chin. J. Liq.*

- Cryst. Disp.*, 2026, 41(4): 473-481. (in Chinese)
- [32] ZHAO P, LU H Y, CHEN C F. Recent advances in preparation and applications of white circularly polarized luminescent materials [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2025, 54: 8534-8554.
- [33] SCHMIDT E L, OU Z H, XIMENDES E, *et al.* Near-infrared II fluorescence imaging [J]. *Nat. Rev. Methods Primers*, 2024, 4: 23.
- [34] LI X Y, LIN X H, SHAO J, *et al.* Near-Infrared Light-Activated Trap Filling and Luminescent Modulation in Inorganic Photochromics for Penetrable Luminescent Imaging [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2026, 0: e71392.
- [35] 佟海旭, 刘娜, 吴宗铨. 基于螺旋高分子的圆偏振发光材料 [J]. *发光学报*, 2026, 47(7): 1119-1134.
TONG H X, LIU N, WU Z Q. Circularly polarized luminescent (CPL) materials based on helical polymers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2026, 47(7): 1119-1134. (in Chinese)
- [36] 巴怀强, 徐旭辉. 隧道照明用 $\text{BaMg}_{1.072}\text{Al}_{9.928}\text{O}_{17}$: Eu 近红外发光材料的光学性能及夜视成像 [J]. *发光学报*, 2026, 47(5): 744-754.
BA H Q, XU X H. Optical properties and night vision imaging of $\text{BaMg}_{1.072}\text{Al}_{9.928}\text{O}_{17}$: Eu near-infrared luminescent materials for tunnel lighting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2026, 47(5): 744-754. (in Chinese)
- [37] 欧昌金, 陈韵如, 陶涛. 近红外二区激发的有机荧光染料: 分子设计、性质与应用 [J]. *发光学报*, 2026, 47(01): 56-74.
OU C J, CHEN Y R, TAO T. NIR- II excited organic fluorophores: molecular design, properties and applications [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2026, 47(01): 56-74. (in Chinese)



王思洁(2002—),女,湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事近红外圆偏振发光可调的液晶弹性体的研究。

E-mail: 1683224014@qq.com



谢鹤楼(1979—),男,湖南衡阳人,博士,教授,主要从事功能材料、液晶高分子、超分子组装与引导组装等方面的研究。

E-mail: xhl20040731@163.com