

文章编号: 1007-2780(2026)05-0605-09

光热协同调控的可涂刷胆甾相液晶

李博文, 林瀚, 李佳乐, 景家琦, 万文谈, 袁丛龙, 胡宏龙*, 郑致刚
(华东理工大学物理学院, 上海 200237)

摘要: 柔性可调液晶光学元件在智能显示、软体机械、信息加密等领域展现出广阔的应用前景。胆甾相液晶凭借其手性螺旋结构所赋予的布拉格反射特性及优异的外场响应能力, 正成为该领域的有力竞争者。然而, 传统胆甾相液晶常依赖单一外场调控, 调控自由度较低; 此外, 由于液晶体系自身流动性较大, 难以在柔性基板上实现有效封装与稳定应用。针对上述问题, 本文设计温敏液晶体系并引入光敏分子, 同时添加乙基纤维素与松油醇构成的可涂刷油墨以优化体系流动性, 实现了热与光双外场协同调控。实验结果表明, 该温敏体系在 37~29 °C 范围内可实现反射波长在 420~1 000 nm 的宽范围调控; 引入光敏分子后, 可在特定温度下通过光照实现反射波长在 450~700 nm 可见光波段动态调控, 且温度和光照并非简单叠加, 而是协同决定螺距变化。通过对液晶体系与可涂刷油墨质量比的系统优化, 发现 9:1 配比是实现可涂刷性与成膜完整性的最佳平衡点。本研究成功实现了在柔性基板上对胆甾相液晶布拉格反射波长的光热协同动态调控, 可按需定制特定反射颜色, 为信息防伪与智能显示领域提供具有多外场响应能力且易于柔性封装的新型光学应用方案。

关键词: 胆甾相液晶; 光热协同调控; 可涂刷油墨; 结构色; 柔性光学应用

中图分类号: O753.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2026-0071 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2026-0071

Paintable cholesteric liquid crystals with synergistic photothermal modulation

LI Bowen, LIN Han, LI Jiale, JING Jiaqi, WAN Wentan, YUAN Conglong,
HU Honglong*, ZHENG Zhigang

(School of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Flexibly tunable liquid crystal optical elements exhibit broad application in smart displays, soft robotics, and information encryption. Cholesteric liquid crystals (CLCs), endowed with Bragg reflection characteristics and excellent external field responsiveness by their chiral helical structures, are becoming strong competitors in this field. However, conventional CLCs usually rely on single external field regulation with limited tunability, and their high fluidity poses challenges for effective encapsulation and stable application on flexible substrates. To address these issues, this paper designs a thermosensitive liquid crystal system incorporated with photoswitch, while introducing a paintable ink composed of ethyl cellulose and terpineol to optimize viscosity, thereby achieving synergistic regulation via dual external

收稿日期: 2026-04-10; 修订日期: 2026-04-20.

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2022YFA1203700); 国家自然科学基金 (No.22305079, No.62505085)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFA1203700); National Natural Science Foundation of China (No.22305079, No.62505085)

*通信联系人, E-mail: hlhu@ecust.edu.cn

fields of temperature and light. Experimental results show that the thermosensitive system enables broadband regulation of the reflection wavelength from 420 nm to 1 000 nm within the temperature range of 37 °C to 29 °C. Upon incorporation of photoswitch, dynamic tuning of the reflection wavelength from 450 nm to 700 nm is achieved by light irradiation at a specific temperature, where temperature and light synergistically determine the pitch variation. Systematic optimization of the mass ratio between CLC and the ink reveals that the 9:1 ratio strikes the best balance between brushability and film-forming integrity. This study successfully demonstrates photothermal synergistic dynamic regulation of the Bragg reflection wavelength of CLCs on flexible substrates, enabling on-demand customization of specific reflection colors, thereby providing a novel photonic platform with multi-external-field responsiveness and facile flexible encapsulation for information anti-counterfeiting and smart display applications.

Key words: cholesteric liquid crystals; photothermal synergistic regulation; paintable ink; structural color; flexible optical applications

1 引 言

柔性可调液晶光学元件在动态显示、柔性传感、软体机械等领域展现出广阔的应用前景^[1-6]。胆甾相液晶(CLCs)因其独特的结构色及快速的外场响应能力,在动态调控光子学中具有显著优势^[7-10]。CLCs通常在向列相液晶中掺杂手性分子,诱导液晶分子自组装形成螺旋结构,从而获得选择性反射特定波长圆偏振光的能力。通过外场诱导螺距变化,可实现对反射波长动态调控^[11-13]。

已有研究实现了利用温度^[14-15]、光场^[16-20]、电场^[21-24]、外力^[25-26]、湿度^[27]、离子^[28]等单一外场对反射结构色的动态调控。为进一步拓展调控自由度,多外场协同调控逐渐成为研究热点,例如光-离子协同调控螺旋结构的动态范围^[29]、光-电协同调控螺旋结构的手性方向与螺距大小等^[30]。然而,上述研究中所采用的液晶体系普遍具有较强的流动性,必须依赖刚性基板进行封装,因而存在灵活性差、应用场景受限等固有缺陷。因此,如何在柔性基板上实现对反射波长的动态、宽范围多外场协同调控,仍是一项亟待解决的关键挑战。

针对上述问题,本文开发了一种基于柔性基底、可实现光-热协同多自由度调控的可涂刷CLC体系。具体而言,首先设计了一种温敏液晶体系,在37~29 °C的温度范围内,成功实现反射波长在420~1 000 nm的宽谱调控。其次,通过引入光敏分子,该体系可在特定温度下借助光照进一步将反射波长在450~700 nm可见光波段内

进行动态调控。光热协同调控策略使得体系在外场变化条件下仍能保持反射波长稳定性,展现出优异的光热协同性能。此外,引入由乙基纤维素与松油醇构成的可涂刷油墨以优化体系流动性,确定液晶与油墨的最佳质量比为9:1,并借助丝网印刷技术将体系成功转移至柔性基底。最终,本研究实现了在柔性基板对CLC布拉格反射波长的光热协同动态调控,可按需定制反射颜色,为信息防伪与智能显示领域提供了一种具备多外场响应能力且易于柔性封装的新型光学方案。

2 材料体系制备

2.1 实验材料

实验中用于制备样品的主要材料及其化学式如图1所示。温敏液晶(TLC)三元混合物体系由COC、CN、CD三种组分构成(购自西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司),三者协同作用以实现体系对温度的灵敏响应。光控功能通过手性结构M1(实验室合成)实现,紫外光可诱导M1发生从开环到闭环的转变,导致螺旋扭曲力降低、螺距增大(反射波长红移);可见光则可诱导其逆向转变,使螺距减小(反射波长蓝移)。可涂刷油墨体系由乙基纤维素(EC)与松油醇(购自河北百灵威超精细材料有限公司)配制而成,其中EC作为黏度调节剂用于抑制液晶流动性,松油醇则充当溶剂以优化油墨的涂布性能。此外,为改善体系各组分的分散均匀性,还添加了分散剂平平加O(购自江苏省海安石油化工厂),

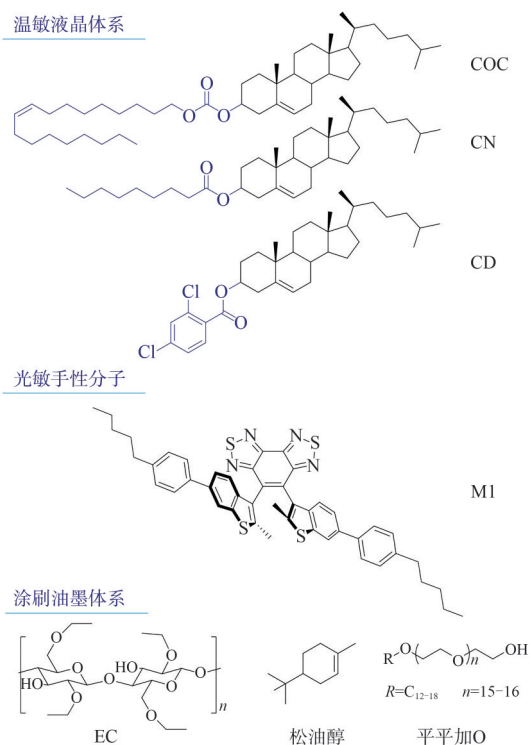


图1 材料化学结构式

Fig. 1 Chemical structural formula of materials

以确保液晶、光敏分子及油墨基质之间良好相容与稳定分布。

2.2 体系制备

首先制备温敏液晶体系(TLC)S1。按 $m(\text{COC}):m(\text{CN}):m(\text{CD})=3:4:3$ 质量比称取各组分,置于棕色试剂瓶中,加入搅拌子并滴加二氯甲烷作为溶剂。将样品瓶置于磁力搅拌台上,以 $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速搅拌,使各组分充分混合。待二氯甲烷完全挥发后,取出样品备用。

S2的配制方法与S1类似,区别在于引入了光敏手性分子M1。在M1含量为TLC体系总质量2%的条件下,按相同方法制备S2。

表1 液晶体系制备配比

Tab. 1 Preparation ratio of liquid crystal system

体系	材料质量分数/%			
	TLC	M1	EC	平平加O
S1	100.00	0	0	0
S2	98.00	2.00	0	0
S3	90.31	1.84	4.85	3.00
S4	85.55	1.75	9.70	3.00
S5	76.05	1.55	19.40	3.00

在此基础上,依次配制S3~S5三个样品,逐步增加可涂刷油墨体系(乙基纤维素与松油醇)的含量,TLC与油墨的质量比分别为95:5、90:10和80:20。后续混合操作同S1,所有体系制备配比如表1所示。

2.3 性能测试

将上述配制好的液晶体系置于热台上,加热并持续搅拌,使其充分混合均匀。随后,采用灌盒法或丝网印刷法制备液晶样品,以获得具有光热响应特性的液晶体系。

样品表征与性能测试方法如下:采用精密控温台(HCS410,INSTECH)配合偏光显微镜(LVPOL100,Nikon)观察样品在不同温度下的光学织构变化;同时,使用光谱仪(Avaspec-ULS2048,分辨率 2 nm ,波长范围 $200\sim 1100\text{ nm}$)记录其反射光谱特征。为评估光响应性能,分别采用特定波长的紫外灯(SunSpot 2, $4.0\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$,Uvitron)与绿光灯(M530L3, $4.0\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$,Thorlabs)照射样品(光功率计对样品表面实际光强进行校准),并动态记录光学织构及反射光谱随光照时间的变化过程。

3 结果与讨论

3.1 温度响应特性

本研究首先以温敏液晶体系S1为基础体系,系统探究了其可见光波段的温度调控机制,并精确测定了其变色温区范围。该部分工作为后续实现光热协同调控奠定了必要的温控基础。

在表征过程中,将S1样品置于精密控温台上,以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率加热至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (清亮点以上),使其完全转变为各向同性态。待体系达到稳态后,再以相同速率冷却至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在此降温条件下静置 10 min ,光谱测试结果显示无明显反射峰。随着降温速率进一步降低至 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,采用阶梯式降温策略,以 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为间隔逐级降温。样品在每个温度点恒温稳定 5 min ,同时同步记录其偏光织构与反射光谱。

图2(a)展示了S1液晶体系在 $37\sim 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温区内、以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为间隔采集的典型液晶织构图像。随着温度逐步降低,可清晰地观察到反射光谱发生显著红移:主反射峰波长由可见光区持续向长波方向移动,并最终延伸至近红外波段,实现 $420\sim$

1 000 nm 的宽范围连续调控(图 2(b))。此外,所测得的反射谱线型规整、峰形光滑,表明 S1 液晶体系内部形成了有序度较高的螺旋结构,为后续协同调控奠定了良好的材料基础。

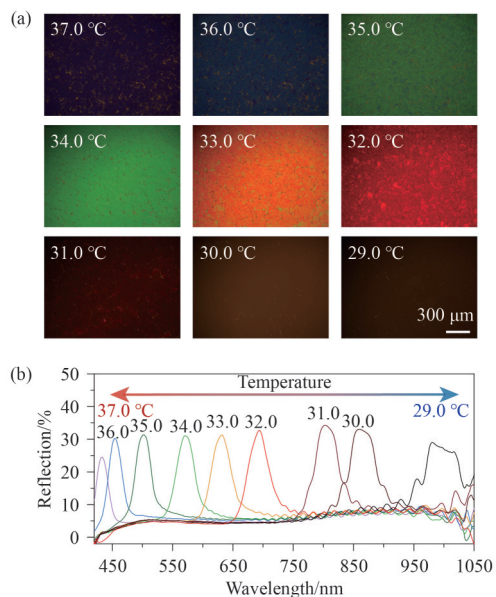


图 2 S1 体系的温度响应特性。不同温度(37 °C、36 °C、35 °C、34 °C、33 °C、32 °C、31 °C、30 °C、29 °C)下的 (a) 光学织构和 (b) 反射光谱。图中标尺为 300 μm 。

Fig. 2 Temperature-responsive characteristics of the S1 system. (a) Optical textures and (b) reflection spectra at different temperatures (37 °C, 36 °C, 35 °C, 34 °C, 33 °C, 32 °C, 31 °C, 30 °C, and 29 °C). Scale bar: 300 μm .

3.2 光响应特性

S2 是由温敏液晶基质与光敏手性分子 M1 共同构建的光热协同可调液晶体系。该体系展现出典型且可逆的光开关响应特性:在可见光照射下,CLC 的螺旋结构距离变小,导致反射波长发生蓝移;而在紫外光照射下,螺旋结构距离变大,引起反射波长红移。这种可逆的光致螺旋结构变化是体系实现光调控的核心机制。

为系统评估 S2 体系的光响应行为,通过交替施加 365 nm 紫外光与 532 nm 可见光(绿光)照射,并同步记录反射光谱与光学织构的演变过程,获得了该体系在可见光范围内的光学织构图(图 3(a))及光可调反射光谱曲线(图 3(b))。实验结果表明,S2 体系对 365 nm 紫外光刺激响应迅速,反射波长在可见光波段持续红移;切换至

532 nm 绿光照射后,反射波长由红区蓝移至蓝区,实现了 450~700 nm 波长范围内的可逆、连续调控。

上述结果充分证明,S2 体系不仅具备快速的光响应能力,还可在 365 nm 与 532 nm 两种特征光照条件下实现可逆光谱切换,展现出优异的光调控特性。该光响应体系的成功构建,为后续进一步结合温度响应、实现光热协同调控奠定了坚实的材料与实验基础。

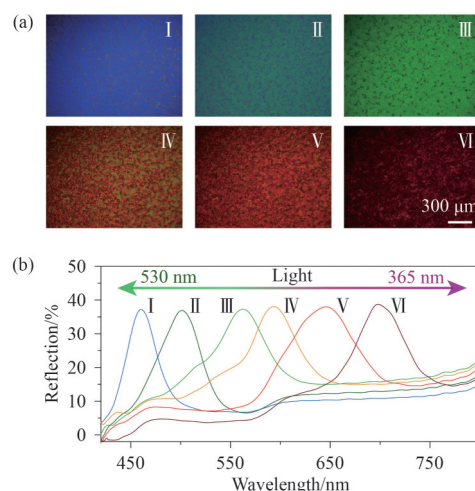


图 3 S2 体系的光响应特性(22.5 °C)。不同光照下的 (a) 光学织构和 (b) 反射光谱。图中标尺为 300 μm 。

Fig. 3 Photo-responsive characteristics of the S2 system (22.5 °C). (a) Optical textures and (b) reflection spectra at different light irradiation. Scale bar: 300 μm .

3.3 光热协同响应特性

为进一步探究 S2 体系在光与热协同调控下的外场响应特性,本文以该体系为研究对象,系统开展了光热双外场协同调控实验。前述实验已证实,S2 体系对单一温度场及单一光场(365 nm 紫外光与 532 nm 可见光)均具有良好的响应能力,具体表现为:升温或可见光照射可诱导 CLC 螺距减小,从而使反射波长发生蓝移;反之,降温或紫外光照射促使螺距增大,引起反射波长红移。这种对温度与光照的双重敏感性为光热协同调控提供了物理基础。基于此,通过协同调控光照条件与环境温度,在不同物理参数组合下可实现对同一反射波长的按需定制,从而显著拓展体系在多维度、多参数调控场景中的应用潜力,满

足复杂防伪与智能显示对多自由度调控的需求。

如图4所示,将S2体系置于精密控温台上,初始温度设定为15℃,随后以 $0.1\text{℃}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率缓慢升温,并采用 0.5℃ 为温度间隔,阶梯式捕捉体系在不同温度下的光学响应。在升降温过程中,同步使用光谱仪记录反射光谱,同时利用偏光显微镜采集反射波长为650 nm(红色)、550 nm(绿色)和450 nm(蓝色)所对应的光学织构图像(图4(a))及反射光谱曲线(图4(b)),并详细记录各温度点对应的具体数值。实验发现,当升温至 22.5℃ 时,体系反射波长恰好达到450 nm(蓝光区域)。在此温度点施加365 nm紫外光照射,可观察到反射波长逐渐发生红移,数秒后稳定在550 nm(绿光区域),随即停止紫外光照射。此后,采用相同的操作流程继续进行升温 and 降温处理,并再次记录650 nm、550 nm及450 nm对应的织构与光谱图像,以验证体系的可逆性与稳定性。

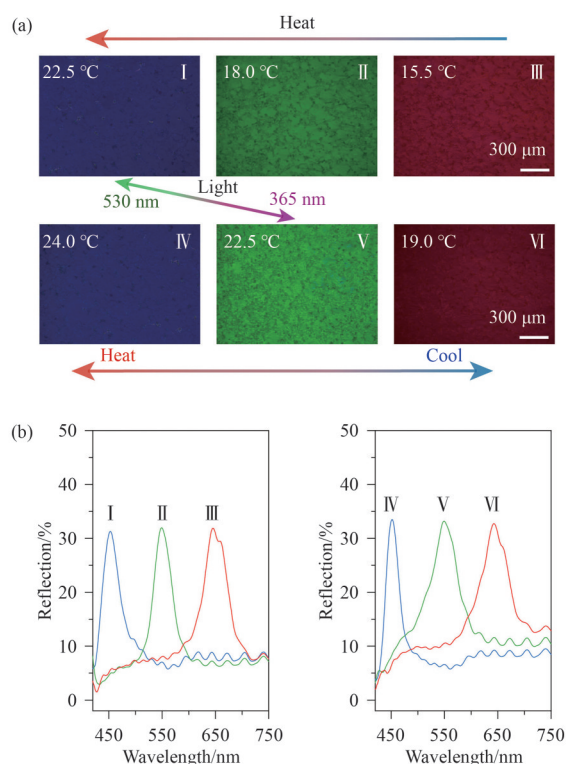


图4 S2体系的光热协同响应特性。不同温度和光照下的(a)光学织构和(b)反射光谱。图中标尺为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 。

Fig. 4 Photothermal synergistic response characteristics of the S2 system. (a) Optical textures and (b) reflection spectra under different temperature and light illumination conditions. Scale bar: $300\text{ }\mu\text{m}$.

通过对降温与升温过程中相同反射波长下的织构演变与光谱响应进行系统对比,可得出以下结论:在光场与热场的协同调控下,S2体系表现出优异且可逆的光学结构响应,反射波长可在 $450\sim 700\text{ nm}$ 的可见光范围内实现稳定、可逆、连续的切换,响应速度快且重复性好,充分证明该体系具备良好的光热协同调控能力。值得注意的是,对于同一结构色,可通过不同的参数组合实现:既可通过单纯的温度调控达到该波长,也可通过温度与光照时间的协同配合获得相同的颜色效果,为后续防伪识别与信息加密应用提供了灵活的多参数编码策略,即通过不同的外场参数组合表征相同的光学输出,从而大幅提升信息加密的复杂性和破译难度。该光热协同调控体系的成功构建,为开发下一代柔性智能光子器件奠定了坚实的材料基础与实验依据,在信息防伪、智能显示及光学加密等领域展现出广阔的应用前景。

3.4 可涂刷液晶体系

为进一步提升该体系的应用价值,摆脱传统刚性基板封装对应用场景的诸多限制,本研究尝试将上述光热协同调控的CLC体系开发为可涂刷的柔性光子材料。刚性器件因无法弯折、难以紧密贴合等固有缺陷,在可穿戴设备、柔性显示、曲面防伪等新兴领域中面临严峻挑战。因此,实现CLC体系在柔性基板上的有效涂刷与稳定成膜,是其走向实际应用的关键一步。

基于此,本研究引入由乙基纤维素与松油醇组成的可涂刷油墨体系,并添加适量分散剂平平加O以降低界面张力、改善油墨与液晶的相容性,从而获得均匀的可涂刷液晶油墨。进一步通过调控黏度,构筑了S3、S4、S5三种不同配比的体系。采用丝网印刷技术(图5(a))将上述体系涂刷于PET柔性基板上,系统评估各体系的成图效果。实验结果表明,体系黏度对印刷质量具有决定性影响:S3因黏度过低,油墨在基板表面过度扩散,导致印刷图案边缘模糊、线条粘连,无法分辨清晰的轮廓及内部细节;S5则因黏度过高,液晶油墨难以顺利穿过丝网网孔,造成图案缺失、断线甚至无法完整印刷(图5(b));相比之下,S4体系在黏度与流动性之间取得了良好平衡,表现出最佳的完整成图性,图案清晰、边缘规

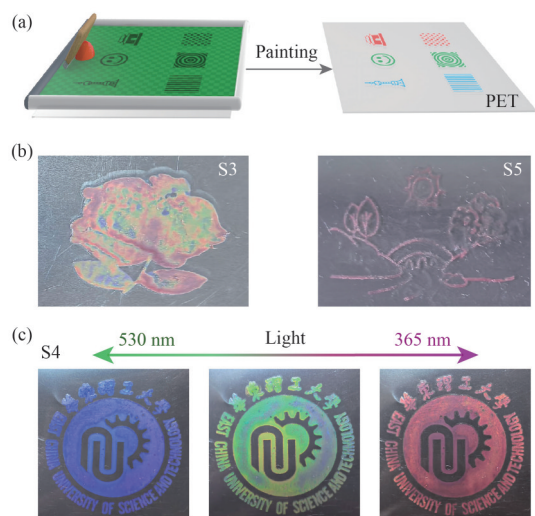


图5 可涂刷液晶体系的构筑。(a) 丝网印刷示意图,通过涂刷可实现不同图案;(b) 不同黏度体系在PET基板上的印刷效果对比图:S3(黏度过低,导致图案模糊),S5(黏度过高,导致图案缺失);(c) 最佳印刷效果(S4体系)在不同光照下的红、绿、蓝变色效果图。

Fig. 5 Construction of the paintable liquid crystal system. (a) Schematic illustration of screen painting, showing that different patterns can be achieved by painting; (b) Comparison of painting performance on PET substrates with different viscosities: S3 (viscosity too low, causing blurred patterns), S5 (viscosity too high, resulting in missing patterns); (c) Red, green, and blue color-switching performance of the optimized S4 system under different illumination conditions.

整、结构完整(图5(c))。据此确定液晶与油墨最佳质量比为9:1。

基于上述优化配比,本研究以“华东理工大学校徽”为原型图案,通过丝网印刷将其清晰转印至柔性PET基板上。印刷后的图案在光驱动下实现了红、绿、蓝3色之间的可逆转变,变色响应迅速,色彩对比鲜明。该结果充分证明,所构建的光热协同调控体系可成功涂刷于柔性基板,有效摆脱了传统刚性基板的封装束缚,同时保持了优异的光调控性能。这一柔性化策略为后续防伪标识、信息加密器件及智能显示单元等应用场景的拓展提供了新的技术路径。

3.5 柔性光子学应用

为直观展示该可涂刷液晶体系在实际场景

中的应用潜力,本研究将其通过丝网印刷技术均匀涂刷于PET柔性模板上,待油墨完全干燥后,将模板转移至盛有不同温度水的玻璃烧杯壁上,观察图案颜色的响应变化规律。如图6所示,随着水温的变化,PET模板上的图案呈现出清晰且可辨的颜色响应梯度:当水温为23℃时,图案呈现蓝色;水温降至19℃时,图案转变为绿色;进一步降温至15℃时,图案则显示为红色。这种温度驱动的颜色变化具有快速响应(通常在数秒内完成)、良好的可逆性(可循环多次而无明显衰减)以及肉眼可辨的高对比度,因此可作为一类简单、直观、无需外部供电的柔性温度指示器件,可应用于冷链监测、智能包装、生物样品运输等场景,用于快速判断物体表面或环境温度。

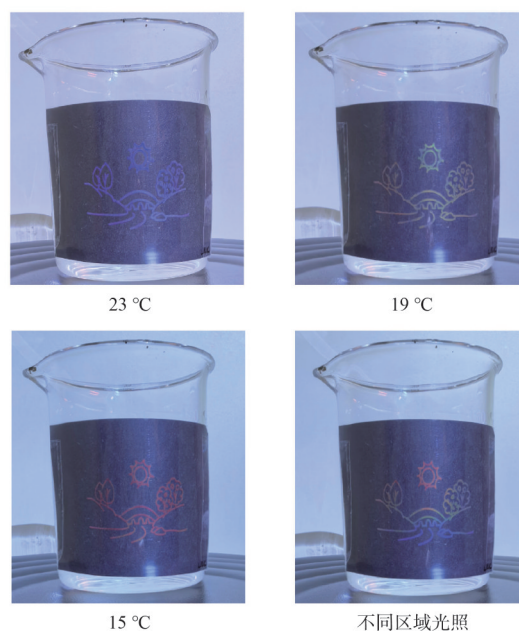


图6 柔性PET基板的光热响应颜色变化及其应用。蓝色对应23℃,绿色对应19℃,红色对应15℃。不同区域内实施不同光照时间可实现差异化颜色显示。

Fig. 6 Photothermal responsive color variation and its application on a flexible PET substrate. Blue corresponds to 23 °C, green to 19 °C, and red to 15 °C. Differentiated color display can be realized by implementing different irradiation times in different areas.

除温度响应外,该图案还对外界紫外光(365 nm)或可见光(532 nm)的强度表现出灵敏的光学响应。在不同光线比例照射条件下(如局

部遮挡、梯度曝光等),图案可实现区域性差异化显色。具体而言,当同一器件表面不同区域接收到不同波长或强度的光照时,各区域的CLC螺旋结构发生不同程度的变化,导致反射波长产生差异化偏移,从而呈现出各不相同的颜色。这一特性赋予该体系在复杂光场环境下的多区域、多色彩独立编码能力,即通过设计特定的光照掩模或光强分布,可在单一器件上实现多色图案的按需定制。这一功能为信息加密(如多重光学防伪标识)、多通道显示(如多色电子纸)等应用提供了全新的技术路径。

值得注意的是,该体系的温度识别区间范围并非固定不变,而是可通过调节光照时间进行灵活调控。例如,在相同温度变化范围内,经过长时间紫外光预照射的样品,其颜色变化区间可向长波长方向扩展;反之,经过可见光预照射的样品,其响应区间则向短波长方向移动。换言之,通过改变紫外光或可见光的照射时长,可以按需拓宽或收窄颜色随温度变化的响应区间,甚至实现响应区间的整体平移。这种“可编程的温度响应窗口”特性充分体现了光热协同调控的核心优势——温度与光照并非简单的物理叠加效应,而是相互耦合、协同作用,共同决定最终的光学输出状态。温度负责提供连续可调的驱动力,光照则实现了对体系初始状态的预设与重置,两者相辅相成,极大地拓展了体系的多自由度调控能力。这种双外场协同调控机制为开发具有多参

数响应能力的下一代智能柔性光子器件提供了新的设计思路,在智能包装、柔性显示、光学防伪、生物传感等领域均展现出广阔的应用前景。

4 结 论

本研究成功开发了一种基于光热协同调控的可涂刷CLC体系,有效突破传统CLC器件依赖刚性封装、调控自由度低的关键瓶颈。通过温敏三元体系与光敏手性分子的协同设计,实现了反射波长在可见光至近红外波段的宽范围动态调控。尤为重要的是,实现了温度与光照双外场之间的协同调控,即同一反射颜色可通过不同的物理参数组合实现,为信息加密与防伪应用提供了更高的编码灵活性与破译复杂度。此外,针对液晶材料流动性强、难以柔性封装的固有挑战,引入乙基纤维素与松油醇构建可涂刷油墨体系,优化确立液晶与油墨的最佳质量比(9:1),实现了CLC体系在PET柔性基板上的稳定成膜与按需可控涂刷。该策略成功摆脱了刚性基板的封装束缚,赋予器件优异的弯折性与高贴合能力。应用验证表明,所制备的柔性器件对温度变化具有快速、可逆、肉眼可辨的颜色响应,同时具备区域化光响应能力与可编程的温度响应窗口,充分展现了光热协同调控的独特优势。该体系为柔性光学应用在信息防伪、智能显示及温度传感等领域开辟了新技术路径。

参 考 文 献:

- [1] ZHANG H, HE Q X, ZHANG F, *et al.* Biomimetic intelligent thermal management materials: from nature-inspired design to machine-learning-driven discovery [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(30): 2503140.
- [2] WANG R J, LEI Z H, JIANG J H, *et al.* Liquid crystal based programmable active materials [J]. *Responsive Materials*, 2025, 3(2): e20250001.
- [3] MA L L, WEI Y, WANG N, *et al.* Soft matter photonics: interplay of soft matter and light [J]. *ACS Nano*, 2025, 19(12): 11501-11516.
- [4] XU J, WAN H, FANG Z Z, *et al.* Continuous fabrication of Janus liquid crystal elastomer fibers with programmable actuation [J]. *Nature Communications*, 2026, 17(1): 2254.
- [5] ZHOU Y, WEI C, JIN L H. Fracture of liquid crystal elastomers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2025, 122(38): e2510727122.
- [6] LIU S J, ZHANG Y H, SUN R, *et al.* Multidimensional photopatterning of heterogeneous liquid-crystal superstructures toward higher-level information optics [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(37): 2506778.
- [7] HU H L, WAN W T, LIU X, *et al.* Paintable soft photonic architectures featuring multi-stable light-actuation [J]. *Light: Science & Applications*, 2026, 15(1): 10.

- [8] 陆延青. 液晶软光子学——光场的多自由度调控[J]. 物理, 2023, 52(2): 116-124.
LU Y Q. Liquid crystal soft photonics——multi-degree manipulation of light [J]. *Physics*, 2023, 52(2): 116-124. (in Chinese)
- [9] MA L L, LI C Y, PAN J T, *et al.* Self-assembled liquid crystal architectures for soft matter photonics [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 270.
- [10] WANG Z Y, ZHOU Z, ZHANG H, *et al.* Vectorial liquid-crystal holography [J]. *eLight*, 2024, 4(1): 5.
- [11] BISOYI H K, LI Q. Light-driven liquid crystalline materials: From photo-induced phase transitions and property modulations to applications [J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(24): 15089-15166.
- [12] 胡宏龙, 郑致刚. 手性光开关构筑液晶螺旋结构研究进展[J]. 液晶与显示, 2025, 40(1): 75-94.
HU H L, ZHENG Z G. Progress on chiral photoswitches for constructing liquid crystal helical structures [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(1): 75-94. (in Chinese)
- [13] 尚园园, 王京霞, 江雷. 胆甾相液晶图案的动态调控与应用[J]. 液晶与显示, 2024, 39(3): 349-368.
SHANG Y Y, WANG J X, JIANG L. Dynamic regulation and application of cholesteric liquid crystal patterns [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(3): 349-368. (in Chinese)
- [14] YUAN C L, LIU H X, ZHAN Y X, *et al.* Electro-thermo cooperative responsiveness of cholesteric heliconical photonics architectures featuring adaptive sensitivity [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(42): 2507000.
- [15] SCHLAFMANN K R, ALAHMED M S, LEWIS K L, *et al.* Large range thermochromism in liquid crystalline elastomers prepared with intra-mesogenic supramolecular bonds [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(51): 2305818.
- [16] ZHENG Z G, HU H L, ZHANG Z P, *et al.* Digital photoprogramming of liquid-crystal superstructures featuring intrinsic chiral photoswitches [J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(3): 226-234.
- [17] QIN L, GU W, WEI J, *et al.* Piecewise phototuning of self-organized helical superstructures [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(8): 1704941.
- [18] ZHANG X, TANG Y Q, MA Y, *et al.* Azopyrazole-based axially chiral dopants with high thermal stability in cholesteric liquid crystals [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(32): 2425752.
- [19] WANG H, TANG Y Q, KRISHNA BISOYI H, *et al.* Reversible handedness inversion and circularly polarized light reflection tuning in self-organized helical superstructures using visible-light-driven macrocyclic chiral switches [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(8): e202216600.
- [20] CHEN P, SHEN Z X, XU C T, *et al.* Simultaneous realization of dynamic and hybrid multiplexed holography via light-activated chiral superstructures [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(5): 2200011.
- [21] LIU B H, YUAN C L, HU H L, *et al.* Dynamically actuated soft heliconical architecture via frequency of electric fields [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 2712.
- [22] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1(1): 3.
- [23] YUAN C L, CHEN J J, LIU B H, *et al.* Hyper-stable field-stimulated soft cholesteric heliconical architectures [J]. *Matter*, 2023, 6(10): 3555-3573.
- [24] 贾淑珍, 袁丛龙, 刘炳辉, 等. 基于胆甾相液晶倾斜螺旋的宽光谱动态域光电调制[J]. 液晶与显示, 2021, 36(8): 1061-1068.
JIA S Z, YUAN C L, LIU B H, *et al.* Photoelectronic modulation of broad spectral dynamic range based on heliconical cholesteric liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1061-1068. (in Chinese)
- [25] RYABCHUN A, FLORIDA Y, LI Q, *et al.* Photo-controlled dynamics of cholesteric polymer coatings via hydrazone crosslinking [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(31): e202507358.
- [26] NAM S, WOO S, PARK J Y, *et al.* Programmable optical encryption using thickness-controlled stretchable chiral liquid crystal elastomers [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 136.
- [27] LI S L, CHEN Z Y, CHEN P, *et al.* Geometric phase-encoded stimuli-responsive cholesteric liquid crystals for visualizing real-time remote monitoring: humidity sensing as a proof of concept [J]. *Light: Science & Applications*,

2024, 13(1): 27.

- [28] SHI Y H, HAN J L, JIN X, *et al.* Chiral luminescent liquid crystal with multi-state-reversibility: breakthrough in advanced anti-counterfeiting materials [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(20): 2201565.
- [29] HU H L, HE M, LIANG X S, *et al.* Multiple degrees of freedom photoprogramming of soft helical microstructures featuring copper-gated photoswitch [J]. *Matter*, 2023, 6(11): 3927-3939.
- [30] YUAN C L, HUANG W B, ZHENG Z G, *et al.* Stimulated transformation of soft helix among helicoidal, heliconical, and their inverse helices [J]. *Science Advances*, 2019, 5(10): eaax9501.

作者简介:



胡宏龙,男,博士,特聘副研究员,2022年于华东理工大学获得博士学位,主要从事液晶功能材料与光学微结构性能的研究。E-mail: hlhu@ecust.edu.cn