液晶与显示
Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-23

光响应胆甾相液晶材料的研究进展

鞠宇阳,李建港,马　云*
(南京邮电大学 柔性电子全国重点实验室,江苏 南京 210000)

摘要:胆甾相液晶(Cholesteric liquid crystals, CLCs)具有周期性螺旋超结构,可实现选择性光反射与动态光子带隙调控,是构建智能光学材料与可调谐光子器件的重要平台。通过引入光响应分子开关,可利用光诱导分子构型转变、手性传递、分子运动及光热效应等机制,对CLCs的分子排列与螺旋超结构进行多层次调控。本文系统综述偶氮苯、螺吡喃、二芳基乙烯、酰腙、拥挤烯烃及其他新型光响应体系的分子设计策略、光响应机制与结构调控规律,重点梳理该类材料在智能显示、手性发光、信息加密、自适应光学、软体致动等领域的应用进展;对比分析不同光响应体系在响应波段、调谐范围、循环稳定性、器件集成等方面的优势与局限。最后针对可见光响应、能量利用效率、多模式响应、规模化器件构筑等方向提出展望,为光响应胆甾相液晶的后续研发提供参考。

关　键　词:光响应分子;胆甾相液晶;结构色;分子开关;螺旋扭曲力
中图分类号:O753^{+}.2　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3724/CJLCD.2026-0177　　**CSTR**:32172.14.CJLCD.2026-0177

Research progress of light-responsive cholesteric liquid crystal materials

JU Yuyang, LI Jiangang, MA Yun*

(*State Key Laboratory of Flexible Electronics* (*LoFE*), *Nanjing University of Posts and Telecommunications*, *Nanjing* 210000, *China*)

Abstract: Cholesteric liquid crystals (CLCs), characterized by periodic helical superstructures, exhibit selective light reflection and dynamically tunable photonic bandgaps, making them promising platforms for smart optical materials and tunable photonic devices. By incorporating photoresponsive molecular switches, the molecular organization and helical superstructures of CLCs can be regulated at multiple levels through mechanisms including photoinduced configurational changes, chirality transfer, molecular motion, and photothermal effects. This review systematically summarizes the molecular design strategies, photoresponsive mechanisms, and structural regulation principles of azobenzene-, spiropyran-, diarylethene-, hydrazone-, and overcrowded-alkene molecular motor-based systems, as well as other emerging photoresponsive systems. Particular emphasis is placed on their applications in smart displays, chiral luminescence, information encryption, adaptive optics, and soft actuation. The advantages and limitations of different photoresponsive systems are comparatively analyzed in terms of response

收稿日期:2026-09-03;**修订日期**:2026-10-21.
基金项目:国家自然科学基金(No. 62322508)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62322508)
*通信联系人,E-mail:iamyma@njupt.edu.cn

wavelength, tuning range, cycling stability, and device integration. Finally, future perspectives are discussed with a focus on visible-light responsiveness, energy utilization efficiency, multimodal responses, and scalable device fabrication, providing a reference for the further development of photoresponsive CLCs materials.

Key words: photoresponsive molecules; cholesteric liquid crystals; structural color; molecular switches; helical twisting power

1 引　　言

胆甾相液晶(CLCs)是一类由手性诱导形成的有序液晶体系,其指向矢沿螺旋轴方向连续旋转,形成具有周期性螺距的手性一维螺旋超结构[1-5]。这种周期性排列赋予CLCs独特的光子特性,使其在满足布拉格匹配条件时能够选择性反射与螺旋旋向一致的圆偏振光,同时透过相反旋向的圆偏振光[6-10]。由此形成的选择性布拉格反射使CLCs呈现出独特的结构色,其反射中心波长主要受螺距和平均折射率影响,而反射圆偏振态则由螺旋旋向决定[11-16]。因此,通过调节胆甾相螺距、螺旋旋向及液晶分子的取向状态,可实现对光子带隙、结构色、偏振态和光散射等光学性质的有效调控[17-23]。

早期CLCs体系通常采用具有内禀手性的胆甾醇衍生物或手性液晶分子,通过自组装形成手性螺旋结构。然而,这类体系在分子结构设计、螺距调控和功能化修饰等方面仍存在明显局限,难以满足动态光子材料对结构可编程性和功能可调性的需求[24-28]。相比之下,在向列相液晶中引入少量手性掺杂剂诱导形成胆甾相结构,为CLCs的可调控构筑提供了更加灵活的策略[29-31]。手性掺杂剂能够在向列相液晶中引入局域手性扰动,并依托液晶体系连续的弹性取向场实现手性信息的传播与放大,从而使少量手性分子即可诱导液晶分子形成具有长程有序性的螺旋排列[32-36]。其中,手性掺杂剂的分子结构、空间构型及其与液晶基质之间的相互作用共同决定其螺旋扭曲力(Helical twisting power,HTP,记为β),进而影响CLCs的螺距、选择性反射波长及螺旋旋向[37-43]。然而,传统手性掺杂剂的β值通常由其固定分子结构所决定,因此主要实现对CLCs螺旋超结构和光学性质的预设调控,难以响应外界刺激实现实时、可逆及空间选择性的动态调节。为突破这一限制,研究者将刺激响应单元引入手性掺杂剂、液晶分子或聚合物网络中,为CLCs螺旋结构及光学性能的动态调控提供了新的材料设计策略[44-49]。

分子开关是一类能够响应外界刺激发生可逆结构或构型变化的功能分子,其状态变化通常伴随分子几何构型、电子结构、偶极矩及分子间相互作用的改变[50-52]。相较于热、电、磁等外场刺激,光调控具有非接触远程操控、波长可选择以及高时空分辨率等优势,因此成为实现CLCs动态可逆调控的重要手段。目前,光响应CLCs体系主要通过引入偶氮苯、螺吡喃、二芳基乙烯、酰腙以及拥挤烯烃等光响应单元实现动态调控[53-56]。光照引起的异构化、开/闭环转化、构象重排或方向性分子运动,可进一步改变分子与液晶基质之间的相互作用及手性传递过程,并通过不同层级的结构响应转化为宏观光学性能变化[57-61]。需要指出的是,上述相互作用与手性传递过程不能简单归因于单一的β变化。部分光响应单元还可通过调控液晶分子取向有序度、畴结构或相态,实现透射、散射及结构色的动态调节。引入兼具发光或光致变色特性的分子,还能够将吸收光谱、荧光信号与二色性变化和CLCs光子结构耦合,构建多通道光学输出。与此同时,光热效应与聚合物网络内的光—机械耦合作用进一步拓展了体系的响应模式,可实现热致相变与宏观力学致动。综上,光响应CLCs的研究正从以β和螺距调控为主的单一结构色调制,逐步发展为融合螺旋旋向、液晶取向与相态、发光及二色性、光热与力学响应的多模式协同调控体系。

基于上述发展趋势,本文聚焦“光响应分子结构变化—液晶有序结构调控—宏观光学性能输出”之间的密切联系,系统总结偶氮苯类、螺吡喃类、二芳基乙烯类、酰腙类和拥挤烯烃等典型

光响应体系的分子设计策略、光响应机制及性能调控规律，重点比较不同体系在响应波段、响应方式、螺旋结构调控、稳定性及器件适用性等方面的特点，并进一步讨论其在智能显示、手性发光、信息加密和软体致动等领域的应用进展。最后，针对响应速度、可见光响应、长期循环稳定性、大面积制备及器件集成等关键问题进行总结，并展望光响应CLCs由单一光学调控向多模式响应和集成化光子器件发展的未来方向。

2 光响应胆甾相液晶材料的研究进展

CLCs的选择性反射特性与其周期性螺旋结构密切相关。在正常入射条件下，选择性反射中心波长λ_0与胆甾相螺距p及液晶平均折射率$\bar{n}$近似满足：

$$\lambda_0 = \bar{n}p \ , \tag{1}$$

其中λ_0为反射中心波长，$\bar{n}$为液晶平均折射率，p为胆甾相螺距。由式(1)可知，螺距变化可直接引起选择性反射波长及光子带隙位置的移动。在低浓度手性掺杂体系中，胆甾相螺距p与手性掺杂剂浓度c及其螺旋扭曲力β之间近似满足[37]：

$$p = \frac{1}{\beta c} \ , \tag{2}$$

其中，β表示手性掺杂剂的HTP，其绝对值反映手性掺杂剂诱导液晶形成螺旋结构的能力，而其符号用于表征所诱导螺旋的旋向。需要指出的是，不同文献中手性掺杂剂浓度c可采用质量分数(wt %)、摩尔分数(mol %)等不同定义，因此相应β的数值及单位取决于具体浓度基准，不同定义下报道的β绝对值不宜直接进行定量比较。本文涉及具体β数据时均保留原始文献采用的浓度定义、单位及旋向符号约定。

从材料构筑方式来看，现有光响应CLCs体系主要可归纳为三类代表性策略[62-64]。第一类是将光响应分子作为外加功能组分，与向列相液晶基质和手性掺杂剂通过物理共混构筑光响应CLCs体系。该策略无需复杂的分子一体化合成，具有体系构筑简单、组分调节灵活等优势，是光响应CLCs中较为常见的设计方式。第二类是将光响应单元与手性掺杂剂进行分子一体化设计，使单一分子同时承担手性诱导和光响应调控功能。相较于第一类策略，该类体系能够建立更直接的“分子构型—手性传递—螺旋结构”关联，有利于提高光响应调控的可预测性和精确性。第三类是将光响应基团整合至液晶分子、聚合物网络或其他功能化CLCs结构中。此类体系的光响应行为不一定依赖β变化，而可通过光诱导分子取向重排、畴结构变化、液晶相态转变以及聚合物网络内应力等机制，实现透射/散射切换、结构色变化及宏观形变。与此同时，将光致变色、荧光或其他功能单元与CLCs光子结构耦合，还可进一步实现结构色、吸收、荧光和圆偏振光等多种光学信号的协同调控，为多功能光子器件提供新的设计途径。

基于上述构筑策略，不同类型光响应分子在结构变化方式、激发与恢复波长、手性传递能力、响应动力学及循环稳定性等方面表现出明显差异，其对CLCs的调控也由传统的β和螺距变化逐渐拓展至螺旋旋向、液晶取向与相态、发光与二色性以及光热和光机械响应等多个维度。为便于比较，表1总结了本文中不同类型光响应CLCs体系的代表性调控机制、激发/恢复条件、响应时间、反射波长调谐范围、循环稳定性、螺旋旋向反转能力及主要优势与局限。在此基础上，下文将以光响应分子类型为主线，对典型体系展开具体讨论。

2.1 偶氮苯类光响应胆甾相液晶材料

偶氮苯是一类最具代表性的光响应分子开关，其核心结构单元为偶氮键(-N=N-)，能够在不同波长光刺激下发生可逆的E/Z(反式/顺式)异构化过程[65-66]。其中，E型偶氮苯分子通常呈现较为伸展的棒状结构，具有较好的液晶相容性和分子取向能力；在紫外光照射下，其可转变为结构弯曲的Z型异构体，而在可见光照射或热作用下又可恢复至稳定的E型状态。该过程伴随分子几何构型、偶极矩、空间位阻及分子间相互作用的可逆变化，因此能够进一步影响手性传递、液晶取向及相态结构，使偶氮苯及其衍生物成为构筑光响应CLCs材料的重要分子单元。

传统偶氮苯Z型异构体通常具有较低的热稳定性，在CLCs体系中的热半衰期仅约8.5 h，

表1 不同光响应CLCs体系的光响应特征与调控性能比较

Tab. 1 Comparison of photoresponsive characteristics and modulation performance of various photoresponsive CLCs systems

光响应分子（代表体系）	光响应机制	激发/恢复条件	响应时间	调控路径及β旋向变化	典型光学输出/反射范围	稳定性	主要优势与局限
偶氮苯/偶氮吡唑（M1-M3）	E/Z光异构化；伴随构型、偶极矩及分子取向变化	紫外光激发；可见光或加热恢复	10 s－19 s	以β/螺距调控、螺旋旋向调控及取向/畴结构重构为主。	450 nm－800 nm	传统Z态热稳定性较低；结构优化后可显著提高状态保持能力	优势：响应快、结构设计灵活；局限：存在热弛豫及光疲劳问题
螺吡喃（SP/MC）	SP/MC可逆开环－闭环反应，引起共轭程度、极性、吸收和荧光变化	紫外光激发；可见光或加热恢复	10s	吸收、荧光与结构色耦合实现多通道光学调控；β/旋向未报道	420 nm－840 nm	MC态相对亚稳；Zn^{2+}配位可提高稳定性；长期UV照射存在降解风险	优势：变色明显、易实现多模式信息输出；局限：MC稳定性有限、UV依赖较明显
二芳基乙烯（M4-M8）	可逆光环化/开环，引起分子手性表达及β变化	紫外光激发；可见光照射恢复	10 s－33 s	通过β/螺距及螺旋旋向调控；可发生β符号反转实现旋向切换	380 nm－850 nm	热双稳态突出，光热稳定性和抗疲劳性能较好	优势：调谐范围大、抗疲劳；局限：合成相对复杂，UV依赖较明显
酰腙/腙（M9-M17）	E/Z光异构化，并可伴随氢键网络重构及多态构象转换	440－480 nm激发；340－365 nm或加热恢复	5 s－15 s	β/螺距调节及相态调控实现响应；未报道旋向反转	460 nm－1100 nm	双稳态或多稳态明显，暗态保持时间长	优势：多状态调节、状态保持能力强、；局限：响应行为对环境较敏感
拥挤烯烃（M18等）	光异构化与热螺旋反转驱动方向性分子旋转，引起动态手性变化	紫外光激发；热螺旋反转/热弛豫恢复	10 s－80 s	手性传递、螺旋结构重构及光机械耦合实现响应；可诱导旋向反转	420 nm－1100 nm	可形成多稳态，但循环动力学受光化学和热过程共同影响	优势：具有方向性分子运动，可实现微观放大；局限：常存在机制耦合

注：表中数据均取自相关文献中具有代表性的体系

Note: All data in the table are derived from representative systems reported in relevant literature

限制了其在长期光学调控和信息存储领域中的应用。针对这一问题，研究者主要通过分子结构优化提高Z态稳定性，同时保持较高的光异构化效率。2025年，Yang课题组提出邻位甲基修饰策略，将偶氮苯光响应基元与异山梨醇手性结构结合，设计合成了具有手性特征的光响应分子开关M1（图1 a）[53]。邻位甲基的引入提高了Z态向E态热回转过程的能垒，从而有效延长光诱导状态的寿命。DFT计算结果表明，M1的（E，E）构型能量分别低于（E，Z）和（Z，Z）构型14.43 kcal/mol和28.86 kcal/mol，说明其E型构型具有更高热力学稳定性，同时顺式异构体向反式构型的热回转过程受到明显抑制（图1 b）。值得注意的是，该结构优化并未显著降低光响应效率，

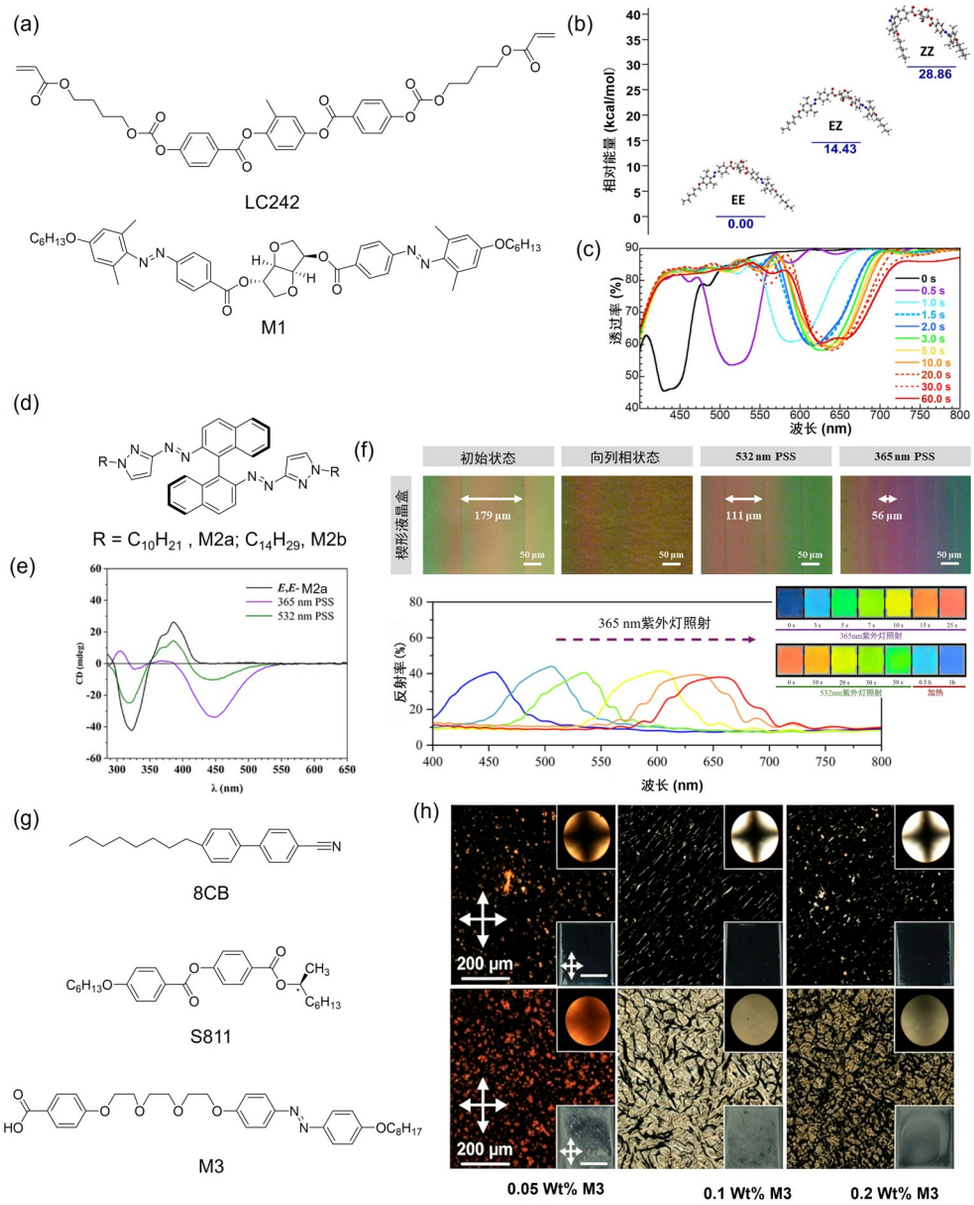


图 1. (a)M1 和 LC242 化学结构;(b)M1 在不同构型下 DFT 计算能量;(c)365 nm 照射不同时间下,掺杂 M1 的 CLCs 体系的透射光谱[53];(d)M2 的分子结构;(e)M2a 在不同状态下的 CD 光谱;(f)M2b 手性开关掺杂 E7 在不同状态下的 POM 图像;M2b 手性开关掺杂的 CLCs 体系在 365 nm 照射不同时间下的反射光谱,插图为相应的反射颜色[54];(g)M3,8CB 和 S811 的分子结构;(h)不同 M3 掺杂浓度(0.05、0.1 和 0.2 wt %)液晶体系的 POM 图像和紫外光照射后平面取向状态对应的 POM 图像、宏观照片及共聚焦显微图像[55]。

Fig. 1 (a) Chemical structures of M1 and LC242; (b) DFT calculated energies of M1 under different configurations; (c) Transmittance spectra of the doped M1 cholesteric liquid crystal system under 365 nm irradiation for different durations[53]; (d) Molecular structure of M2; (e) CD spectra of M2a in different states; (f) POM images of the M2b chiral switch doped E7 in different states under different durations of 365 nm irradiation; the reflected spectra of the M2b chiral switch doped CLCs system under 365 nm irradiation for different durations, with the corresponding reflected colors as illustrations[54]; (g) Molecular structures of M3, 8CB, and S811; (h) POM images of liquid crystal systems with different M3 doping concentrations (0.05, 0.1, and 0.2 wt %); the POM images corresponding to the planar orientation states after UV irradiation, macroscopic photos, and confocal micrographs of the liquid crystal systems[55].

在365 nm紫外光照射(260 mW·cm^{-2})下,M1仅需10 s即可达到光稳态。进一步地,以M1作为光响应手性掺杂剂,并结合手性分子S5011和液晶材料LC242构筑CLCs体系,实现了450-650 nm范围内的可调Bragg反射(图1 c)。该研究表明,通过提高光异构态稳定性并调控体系的手性传递能力及β值,可有效拓展偶氮苯CLCs体系的结构色调控范围和响应持续时间。

除邻位甲基修饰外,通过改变偶氮苯骨架结构也是提高光异构体稳定性和调控手性传递行为的重要策略。Zhang等人将偶氮吡唑光开关与联萘轴手性骨架相结合,设计合成了联萘偶氮吡唑类手性掺杂剂M2(图1 d)[54]。相比传统偶氮苯结构,吡唑环的引入促进Z异构体形成更加稳定的T型构象,提高了E/Z异构化过程中的能垒,从而显著抑制热回转过程,使M2光诱导异构态的热弛豫时间最长可达两个月。与此同时,M2a保持良好的光控手性调节能力,其甲苯溶液在365 nm和532 nm光照下表现出明显的圆二色谱图(Circular dichroism, CD)信号变化,表明其手性表达可通过光刺激实现调控(图1 e)。进一步将M2b以3 wt %掺杂于向列相液晶E7中,发现体系在光照过程中经历胆甾相(N*)—向列相(N)—胆甾相(N*)的可逆相态演变。在532 nm光照下,位错线间距由约179 μm逐渐缩短至111 μm,表明光异构过程能够有效改变体系的有效螺旋扭曲能力及螺旋结构参数(图1 f)。此外,研究人员进一步采用Grandjean-Cano楔形盒法对β值进行定量测定,结果表明M2b的β值由初始状态的-5.1 μm^{-1}转变为365 nm光稳态下的+16.3 μm^{-1}。β符号的反转表明体系的螺旋扭曲方向发生改变,从而证实了CLCs螺旋旋向的光诱导反转。将所得CLCs体系组装于12 μm液晶盒中后,样品初始反射450 nm蓝光,在365 nm光照下可实现由蓝向红的连续色彩调节,且Z态结构色在暗处可稳定保持至少一周,展现出优异的光诱导状态保持能力。

不同于前述通过调节光响应手性掺杂剂β值实现螺旋结构调控的策略,近年来研究进一步发展了将偶氮苯单元直接整合至液晶分子骨架中的分子设计方法。2025年,Yoon等人将偶氮苯光响应基团引入向列相液晶分子结构中,构筑了一种新型光响应液晶分子M3,并通过加入手性掺杂剂S811形成光响应CLCs体系(图1 g)[55]。该策略使偶氮苯单元不仅参与手性调控,同时能够直接影响液晶分子的取向行为和组装结构。研究发现,M3掺杂浓度对光响应行为具有显著影响,其中0.1 wt %掺杂比例能够实现最佳光诱导结构转变,而过低浓度不足以产生完整取向调控,过高浓度则由于分子过度聚集而抑制光异构化过程。在优化条件下,该CLCs体系形成手性SmA*单畴结构,初始状态表现为透明态;紫外光照射后,M3中的偶氮苯单元发生E/Z异构化,引起表面锚定状态变化以及液晶体相取向有序度降低,使原有有序单畴结构转变为随机分布的多畴结构。由此产生的增强光散射效应使体系由透明态转变为不透明态(图1 h)。该研究拓展了偶氮苯在CLCs体系中的功能定位,表明其不仅能够作为光响应手性调控单元改变螺旋结构,还能够通过调节液晶分子取向和组装行为实现多模式光学响应。

综上,偶氮苯类光响应CLCs体系的发展经历了由传统光异构调控、光响应手性掺杂剂设计到光响应液晶分子构筑的发展过程。早期研究主要依赖偶氮苯异构化对β值和螺距的调节,而近年来的研究逐渐拓展至手性传递调控、螺旋旋向反转以及液晶取向重构等更复杂的光响应机制。这些研究表明,通过分子结构精准设计与CLCs组装方式协同优化,偶氮苯体系能够实现从单一波长调控到多维光学功能集成,为构筑高性能动态光子材料提供了重要策略。

2.2 螺吡喃类光响应胆甾相液晶材料

螺吡喃(Spiropyran, SP)是一类典型的光响应分子开关,其光响应过程主要基于可逆的开环/闭环转变。在光刺激作用下,闭环无色的SP结构发生C-O键断裂,转变为具有共轭结构和强吸收特性的开环部花青(Merocyanine, MC)结构[67-68]。该过程伴随着分子偶极矩、极性以及电子共轭程度的变化,可进一步影响其与液晶基质之间的分子间作用以及CLCs螺旋结构的局部环境,从而实现光子带隙和光学响应行为的动态调控。由于兼具可逆光致变色、荧光调节以及多通道光学输出等特性,螺吡喃基光响应CLCs材料在智能显示、信息编码和光子器件等领域展现出

重要应用潜力。

2024年，Wang等人构建了一种基于胆甾相液晶微球、螺吡喃分子以及海藻酸钠/聚(N-异丙基丙烯酰胺)复合水凝胶的光响应CLCs薄膜体系(图2 a)[69]。该体系利用螺吡喃SP/MC可逆光转换特性，将分子尺度的光致变色行为与CLCs结构色进行耦合，实现了结构色、染料色和荧光信号的多维光学输出。在可见光条件下，体系主要呈现来源于CLCs螺旋结构的结构色；经紫外光照射后，SP转变为具有强吸收和发光特性的MC结构，使体系产生额外的荧光和染料色响应；撤去紫外刺激后，随着MC态逐渐恢复，体系重新表现出结构色与分子色叠加的复合光学效果(图2 b，c)。该研究表明，通过将光致变色分子引入CLCs体系，可以突破传统CLCs主要依赖结构反射产生颜色的单一输出模式，实现结构色与分子光学信号的协同调控。

进一步地，该课题组利用金属离子配位策略增强螺吡喃体系的光响应性能，通过引入Zn^{2+}与MC开环态形成稳定的MC-Zn^{2+}配合结构，进一步调节其电子结构和光物理性质[70]。该配位作用不仅提高了MC状态的稳定性，同时拓展了体系的吸收和发射范围，使荧光信号、染料色响应以及CLCs结构色能够实现更加清晰的区分与独立调控。基于该策略，螺吡喃基CLCs体系能够实现多模式光学输出和更高维度的信息编码，为构筑具有动态显示和加密功能的新型光子材料提供了有效途径(图2 d)。

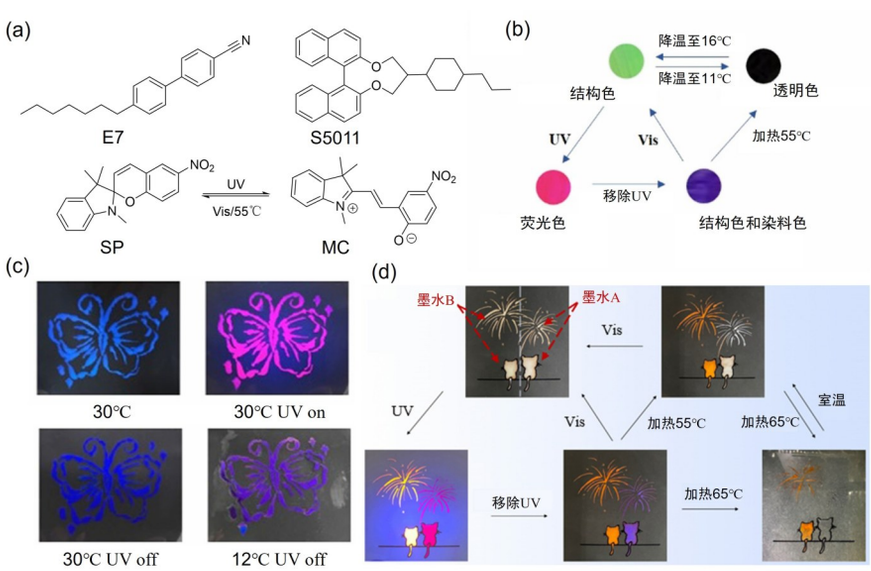


图2. (a)螺吡喃SP/MC、E7和S5011结构式；(b)基于螺吡喃的CLCs体系在不同刺激条件下的颜色变化流程图；(c)CLCs结构色与螺吡喃染料色协同作用展示[69]；(d)螺吡喃MC/Zn^{2+}墨水的多重信息加密展示[70]。

Fig. 2 (a) Structures of spiropyran SP/MC, E7 and S5011; (b) Flowchart of color changes of the CLCs system based on spiropyran under different stimulus conditions; (c) Demonstration of the synergistic effect of the structural color of CLCs and the color of spiropyran dyes[69]; (d) Demonstration of the multi-information encryption of the spiropyran MC/Zn^{2+} ink[70].

总之，螺吡喃类光响应CLCs体系展现了从单一结构色反射向光致变色、荧光调控与金属配位多模态耦合的演进路径。通过SP/MC可逆开闭环及离子配位机制，该类材料突破了传统CLCs单纯依赖光学带隙调节的局限，实现了光学信号的多维扩展与信息加密的高级调控，为智能光学器件的发展提供了重要的分子设计策略。

2.3 二芳基乙烯类光响应胆甾相液晶材料

与偶氮苯和螺吡喃等光响应单元相比，二芳基乙烯(Diarylethene，DAE)类分子通常具有较高的光热稳定性和优异的抗疲劳特性，能够在长期循环光调控过程中保持良好的结构稳定性，因此在可重复调控型光响应CLCs体系中展现出独特优势[71-72]。在光响应CLCs材料中，二芳基乙

烯通常通过引入手性结构单元或利用光诱导环化过程中产生的内源手性变化，实现对液晶螺旋结构参数以及螺旋旋向的动态调控。

针对传统二芳基乙烯体系依赖外源手性基团、手性调控效率有限的问题，2022年，Feringa等人设计了一类具有介晶侧基的内源手性二芳基乙烯光开关分子M4和M5(图3 a)[56]。该体系利用二芳基乙烯光环化过程中手性表达模式的变化，使分子由开环态的轴手性结构转变为闭环态的中心手性结构。在作为CLCs手性客体使用

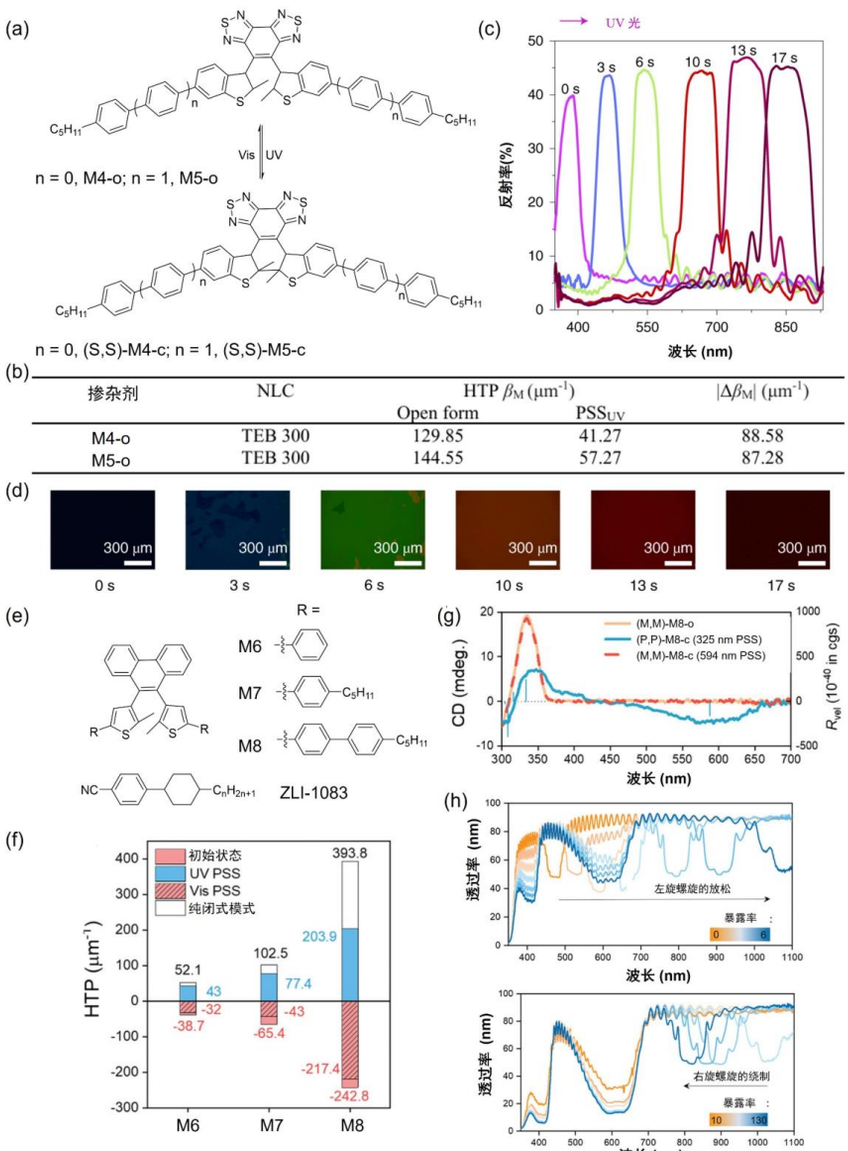


图3 (a)M4和M5光响应分子结构及其异构化过程图；(b)M4和M5的β值变化；(c)M4掺杂的CLCs体系在UV照射下的反射光谱；(d)M4掺杂的CLCs体系随UV照射时间的颜色变化[56]；(e)M6-M8和ZLI-1083分子结构式；(f)不同状态下M6-M8在ZLI-1083液晶中的β值；(g)M8-o的圆二色性光谱；(h)M8掺杂ZLI-1083液晶体系在紫外光照射下的透射光谱[73]。

Fig. 3 (a) Structures of the photo-responsive molecules M4 and M5 and their isomerization process diagram; (b) Changes in the β values of M4 and M5; (c) Reflection spectra of the CLCs system doped with M4 under UV irradiation; (d) Color changes of the CLCs system doped with M4 under UV irradiation over time[56]; (e) Molecular structures of M6-M8 and ZLI-1083; (f) β values of M6-M8 in ZLI-1083 liquid crystal under different conditions; (g) Circular dichroism spectrum of M8-o; (h) Transmission spectra of the ZLI-1083 liquid crystal doped with M8 under UV irradiation[73].

时，该策略无需额外引入手性基团即可实现液晶螺旋结构的光调控。相比传统外源手性修饰策略，M4/M5体系具有更高的立体选择性，其中M4-o向（S，S）-M4-c的对映选择性大于99 %。同时，介晶侧基的引入提高了光开关分子与液晶基质之间的相容性，并增强了手性传递效率。如图3 b所示，M4-o和M5-o分别具有129.85 μm^{-1}和144.55 μm^{-1}的初始β值，并可通过光诱导环化实现显著β值调节。以M4-o掺杂LCM17体系为例，在365 nm紫外光照射17 s内，体系反射带可由近紫外区域连续移动至蓝、绿、红光区域，并进一步扩展至近红外区域，实现约380-850 nm范围内的宽谱调控（图3 c，d）；随后经530 nm可见光照射33 s即可恢复初始状态。该研究证明，通过内源手性光开关设计，可在无需额外手性组分的情况下实现CLCs光子带隙的大范围、快速和可逆调控。

在此基础上，2024年该课题组进一步发展了菲基二芳基乙烯光响应手性掺杂剂体系M6-M8（图3 e），将二芳基乙烯体系由单纯的螺距调节拓展至CLCs超分子手性调控[73]。该类分子通过融合乙烯桥和菲基结构，使光诱导环化过程中分子的手性表达方式发生改变，由开环态的轴手性结构转变为闭环态具有螺旋手性的结构。此外，在噻吩环上引入刚性芳香侧链进一步增强了分子的螺旋扭曲能力以及与液晶基质的相容性。当M6-M8掺入ZLI-1083向列相液晶后，开环态均诱导形成左手性胆甾相结构，并随着取代基刚性增强表现出更高的β值，其中M6-o和M8-o的β值分别为-38.7 μm^{-1}和-242.8 μm^{-1}（图3 f）。光诱导闭环后，体系β符号发生反转，由负值转变为正值（+43至+203.9 μm^{-1}），表明CLCs螺旋旋向由左手性反转为右手性，其中M8体系的$\Delta\beta$达到636.6 μm^{-1}，变化幅度约263 %。在1.5 mol % M8-o掺杂体系中，初始状态反射约450 nm蓝光；紫外光照射后，反射带逐渐红移并扩展至近红外区域，在光稳态条件下达到约800 nm；随后经595 nm可见光照射后可恢复至约510 nm（图3 g，h）。该研究实现了CLCs材料中反射波长调控与螺旋旋向翻转的协同控制，为构筑可重构手性光子器件和动态光学材料提供了新的分子设计策略。

总而言之，二芳基乙烯类光响应CLCs体系的发展体现了从光调螺距向光控超分子手性的演进过程。通过调节分子内手性表达方式、β值大小及符号变化，二芳基乙烯体系不仅能够实现宽范围光子带隙调谐，还能够实现CLCs螺旋旋向的可逆重构，为下一代可编程手性光子材料提供了重要发展方向。

2.4 酰腙类光响应胆甾相液晶材料

酰腙类分子是一类兼具优异双稳态特性和显著几何构型变化的光响应分子开关。在光刺激作用下，该类分子可在E/Z构型之间发生可逆转化[74-75]，该过程不仅伴随着明显的空间位阻和分子极性改变，还能引发分子内或分子间氢键网络的重构。这些结构层面的多维变化，能够显著改变手性分子的手性传递能力及其与液晶基体的相互作用。与偶氮苯等传统光开关相比，酰腙类体系不仅具有更大的构型变化幅度，且其异构体在室温暗态下通常具有极长的半衰期，因此成为构筑高稳定性、高对比度光响应CLCs材料的重要分子平台。

在材料构筑策略方面，研究者首先探索了将腙类光开关引入液晶聚合物网络的构筑策略，以实现复杂的光学正交调控。2022年，Lan等人通过在腙类分子的定子单元中引入含介晶侧链的聚合位点，合成了光响应单体M9（图4 a）[76]。将其与液晶单体、交联剂及手性掺杂剂R5011共聚后，构筑了具有稳定螺旋超结构的胆甾相液晶聚合物网络薄膜（Cholesteric liquid crystal polymer network，CLCN）。研究发现，聚合网络中的腙类单元不仅保持了良好的光异构化能力，还赋予体系稳定的荧光发射特性。在365 nm和450 nm光交替照射下，薄膜的荧光发射峰位置保持不变，但荧光强度能够实现无衰减的可逆循环调制（图4 b）。基于此，该体系实现了结构色与荧光强度的正交双模式动态调控（图4 c），即两种光学信号互不干扰。该设计显著提升了光子薄膜在信息加密、高级防伪等领域的应用潜力与设计维度。

近年来，通过光响应手性掺杂剂一体化设计构筑多态响应体系，成为酰腙类CLCs材料的重要发展方向。2025年，Aprahamian课题组突破传统单一光开关的二元调控局限，以手性异山梨醇

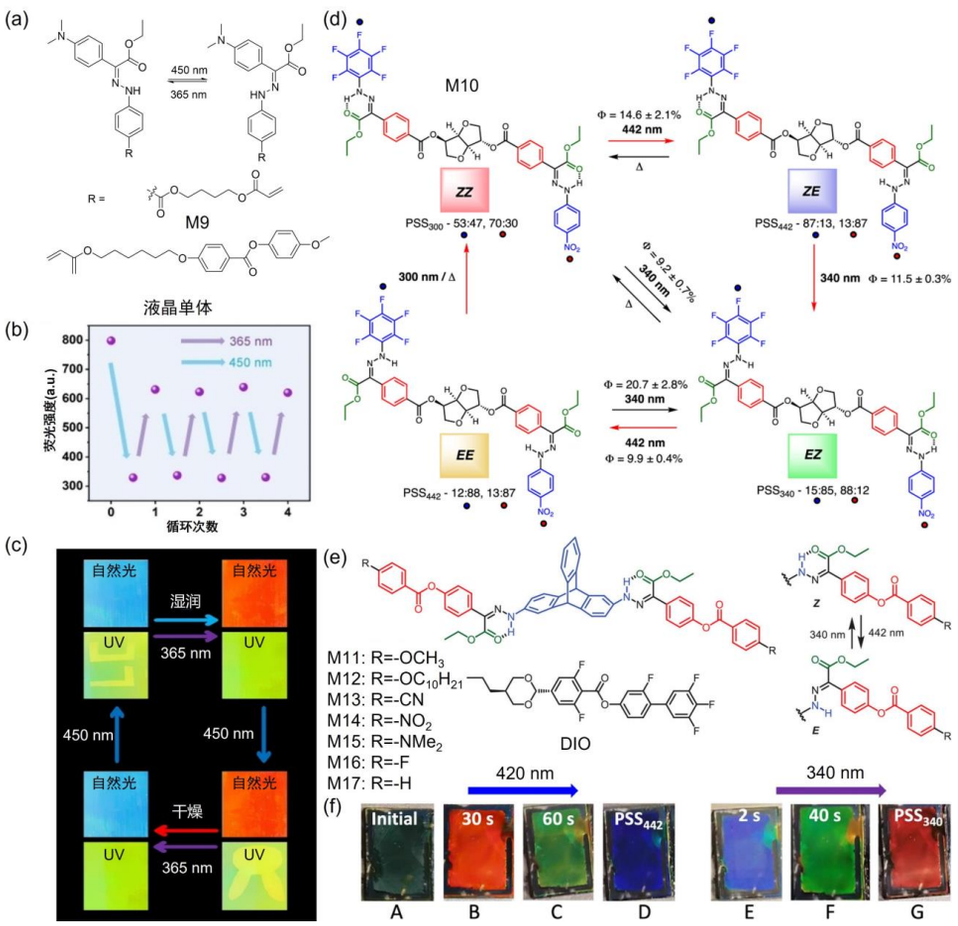


图4. (a)M9、液晶单体、交联剂和手性分子的化学结构;(b)CLCN薄膜在365 nm和450 nm交替照射下的发射强度变化;(c)双模式CLCN薄膜演示[76];(d)M10的多态异构化过程[77];(e)M11-17和铁电向列液晶的化学结构;(f)M11掺杂CLCs体系在442 nm和340 nm照射下的颜色演变[78]。

Fig. 4 (a) Chemical structures of the M9, liquid crystal monomer, crosslinking agent and chiral molecule; (b) The emission intensity variation of the CLCN film under alternating 365 nm and 450 nm irradiation; (c) Demonstration of the dual-mode CLCN film[76]; (d) The polymorphic isomerization process of M10[77]; (e) Chemical structures of the M11-17 and ferroelectric nematic liquid crystal; (f) Color evolution of the M11 doped CLCs system under 442 nm and 340 nm irradiation[78].

为骨架,将两个酰腙光开关单元非对称连接,开发了一类手性非对称双酰腙光开关M10(图4 d)[77]。作为手性掺杂剂引入向列相液晶5CB后,在特定波长光照下,M10可分别稳定在Z/E、E/Z和E/E三种不同的异构状态,对应的体系β值分别约为53、48和110 μm^{-1}。这种多态异构化过程不仅实现了对手性传递效率的阶梯式、多级调控,更值得注意的是,当分子完全转变为E/E状态时,可诱导体系由胆甾相向焦锥相转变。该研究表明,多开关集成的分子设计不仅能够实现螺距的精细调控,还能够驱动液晶宏观相态的相变,为多重逻辑门和可编程光学器件提供了物质基础。

此外,由于酰腙分子具有突出的极性特征,其在新型极性液晶体系中的调控机制也备受瞩目。同年,该课题组将手性中心替换为刚性与对称性更高的三蝶烯骨架,制备了一系列双酰腙手性分子(M11-M17),并创新性地将其应用于新兴的铁电向列相液晶基质DIO中(图4 e)[78]。通过改变末端取代基(如-OCH_3、-CN、-F等),系统考察了分子结构对手性传递行为的影响。实验表明,这些手性分子能诱导DIO形成胆甾相,并在冷却过程中转变为手性铁电向列相。机理研究揭示,具有高极化率的取代基(如-CN,M13的β值约35 μm^{-1})表现出更强的手性诱导能力,而分

子的纯电子给受体性质影响较小，证实了分子极化率是决定极性铁电液晶基质中手性传递效率的关键因素。其中，甲氧基取代的代表性分子M11在442 nm光照（Z→E异构化）后，表现出最大的HTP提升幅度（$\Delta\beta$）。得益于这种高效的手性调控能力与良好的稳定性，M11掺杂体系成功实现了反射波长从近红外区经红、绿直至蓝光的连续可逆大范围调谐（图4 f）。

综上，酰腙及腙类光响应CLCs体系的发展，展现了从简单的几何异构向多重氢键重构、多态逻辑调控以及强极性基质适配的深度演化。通过分子骨架与光开关数量的精巧设计，该类材料已突破了传统的二元波长调节，实现了荧光/结构色正交调控、多级β值阶梯响应以及铁电胆甾相的大范围波长调谐，代表了光响应手性超分子体系向高复杂度、高信息密度方向迈出的重要一步。

2.5 拥挤烯烃类光响应胆甾相液晶材料

拥挤烯烃是一类具有本征手性的光响应分子，大位阻骨架使其能够维持稳定螺旋构型，而特定波长光刺激能够驱动其发生具有方向选择性的旋转循环过程[79-80]。与偶氮苯、螺吡喃等主要依赖离散构型转换的传统光响应分子不同，拥挤烯烃能够通过连续方向性旋转实现动态手性变化，并在旋转循环过程中伴随显著的构型重排和手性表达改变。因此，该类分子能够借助液晶超分子组装的放大效应，将分子尺度运动转化为宏观螺旋结构响应。

在光响应手性掺杂剂设计策略中，2021年，Yang等研究者以拥挤烯烃M18为核心，通过与明胶—阿拉伯胶复合体系以及向列相液晶E7结合，构建了光响应CLCs微胶囊体系（图5 a，b）[62]。在365 nm紫外光照射下，M18发生光响应构型变化并伴随手性表达改变，同时部分光能通过非辐射弛豫转化为热量，引起微胶囊内部温度升高（图5 c）。其中，异构化过程中产生的动态手性变化改变了其对液晶体系的手性传递能力，进而调节β值并驱动CLCs螺旋超结构发生宏观反转。同时，液晶超分子组装的放大效应能够将分子尺度的构型变化转化为微米尺度结构响应，使胶囊体系表现出可逆光诱导结构重构行为。为了进一步区分光热效应与手性调控效应

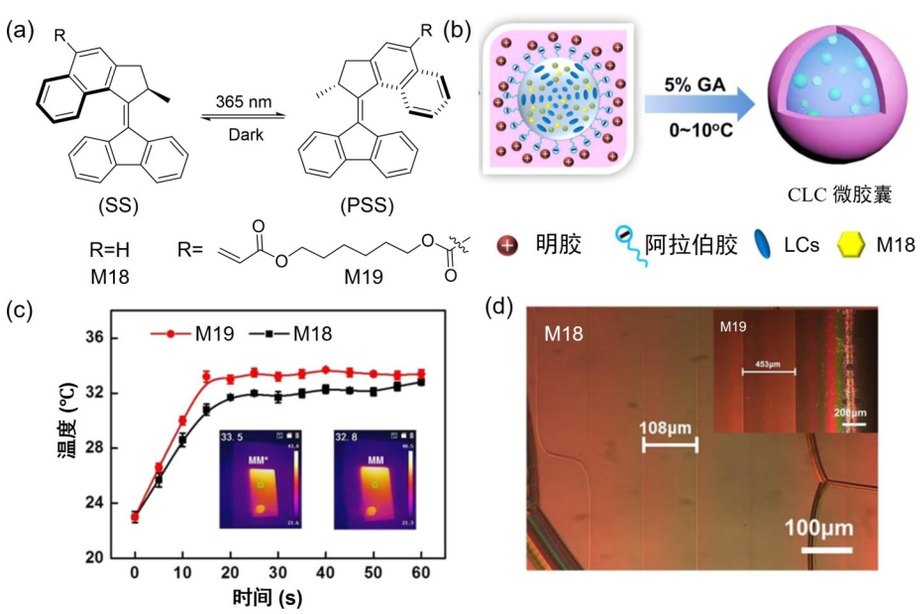


图5. （a）M18和M19的分子结构式；（b）拥挤烯烃基光响应CLCs微胶囊体系构建示意图；（c）M18和M19构筑的CLCs微胶囊体系在紫外光下的温度变化；（d）M18和M19构筑的CLCs微胶囊体系的偏光显微镜图像[62]。

Fig. 5 (a) Molecular structures of M18 and M19; (b) Schematic diagram of the construction of crowded olefin-based photo-responsive CLCs microcapsule system; (c) Temperature changes of the CLCs microcapsule system constructed by M18 and M19 under ultraviolet light; (d) Polarizing microscope images of the CLCs microcapsule system constructed by M18 and M19[62].

对体系响应的贡献，研究人员设计并合成了结构相近但光致手性变化能力较弱的M19作为对照。实验发现，M18和M19体系在紫外光照射下均产生相近程度的温升效应，但M19难以诱导明显的CLCs螺旋翻转，其偏振光显微镜下的纹理变化明显弱于M18体系（图5 d）。该结果证明，CLCs宏观结构响应并非主要来源于光热效应，而是由光响应手性变化引起的手性传递调控所主导。

综上，拥挤烯烃类光响应CLCs材料代表了光响应液晶体系由静态构型调节向动态分子运动调控的发展方向。通过将方向性分子旋转与液晶超分子组装相结合，该类体系能够实现分子运动向宏观手性结构变化的有效传递，为开发主动响应型手性光子器件和动态软物质材料提供了新的设计思路。

2.6 其他类型的光响应胆甾相液晶材料

除了上述经典光开关的体系外，一些新型发光基元与特殊响应机制分子的引入，进一步拓宽了光响应CLCs材料的功能边界[81-84]。例如，传统光响应CLCs研究多聚焦于反射波长的调控，而如何实现圆偏振发光（Circularly polarized luminescence，CPL）的动态光学调控则成为了近年来的研究热点。为此，Li等人开发了一种基于二色性调控的光响应CLCs体系，通过将光响应非手性负二色性染料M20、静态非手性正二色性染料NR以及手性诱导剂R/S-811共同掺入向列相液晶E7中，构筑了高性能发光CLCs材料（图6 a）[85]。在该体系中，R/S-811诱导液晶形成稳定的胆甾相螺旋超结构，而M20和NR作为发光组分协同参与液晶有序排列，从而赋予体系显著的CPL特性。研究发现，M20分子的α-氰基苯乙烯侧链在365 nm紫外光照射下发生顺反异构化，导致其分子取向有序度下降，二色性显著减弱（SF由-0.21降至-0.09）。对应地，CLCs-M20体系的CPL发光不对称因子（*g*lum）由0.67下降至0.28，而荧光量子产率仅略微下降至9.7 %，证明光照主要影响发光分子的取向有序性而非其本征发光效率（图6 b）。更为重要的是，通过优化M20与NR的掺杂比例，可在M20∶NR为1∶1时实现体系CPL符号的可逆反转（*g*lum由-0.20/0.14变化至0.02/-0.04，图6 c）。偏光显微镜与楔形池测试证实，该符号反转过程并未引起CLCs宏观螺距及螺旋旋向的改变（图6 d，e），表明该策略成功实现了在维持液晶基体结构稳定的前提下，对CPL的独立、精准光调控。

另一方面，为了引入更丰富的外部响应维度，研究者也开始关注具有双重光响应模式的新型光致变色分子。供体—受体Stenhouse加成物（Donor-Acceptor Stenhouse Adducts，DASAs）是一类近年来备受瞩目的可见光响应分子，其核心特征在于具备双重光响应机制：在可见光照射下可发生线性态与环状态之间的可逆异构化，而在紫外光照射下则发生不可逆降解生成苯胺类衍生物（图6 f）。基于此，Yan等人提出了一种利用多模式光响应分子调控胆甾相液晶相变温度及热致变色行为的新策略。研究人员首先利用相分离技术将胆甾相液晶微滴均匀分散于聚乙烯醇基体中，制备出兼具优异热致变色性能和良好机械稳定性的聚合物分散胆甾相液晶（Polymer-dispersed cholesteric liquid crystals，PDCLCs）自支撑薄膜（图6 g）[86]。随后，将具有双重响应特性的DASA分子（M21）引入微滴内部，利用其可逆异构与不可逆降解过程，实现对CLCs相变温度窗口的高效调控。实验结果表明，掺杂M21后，PDCLCs体系的热致变色温度区间由原始的25.5-38 ℃显著拓宽并平移至17-28 ℃，且仍能保持覆盖可见光全波段的反射特性。在可见光照射下，由于M21发生可逆异构化，体系相变温度可恢复至22-35 ℃；而在紫外光照射下，M21发生不可逆降解，使相变温度进一步调控至23-35 ℃左右（图6 h-j）。该研究通过引入DASAs分子，不仅实现了在保持反射色域基本不变的前提下对热致变色窗口的宽范围光调控，还为开发具备空间寻址能力的智能热致变色器件提供了新途径。

本节所述的二色性发光染料与双重响应DASAs体系，标志着光响应CLCs材料的研究正由单纯的物理构型改变—螺距调节向发光手性调控以及热致变色行为的多模态适配方向纵深发展。这些新兴分子与机制的引入，极大地丰富了光响应胆甾相液晶材料的物理内涵，为其在先进防伪、智能加密及动态热管理领域的应用开辟了广阔空间。

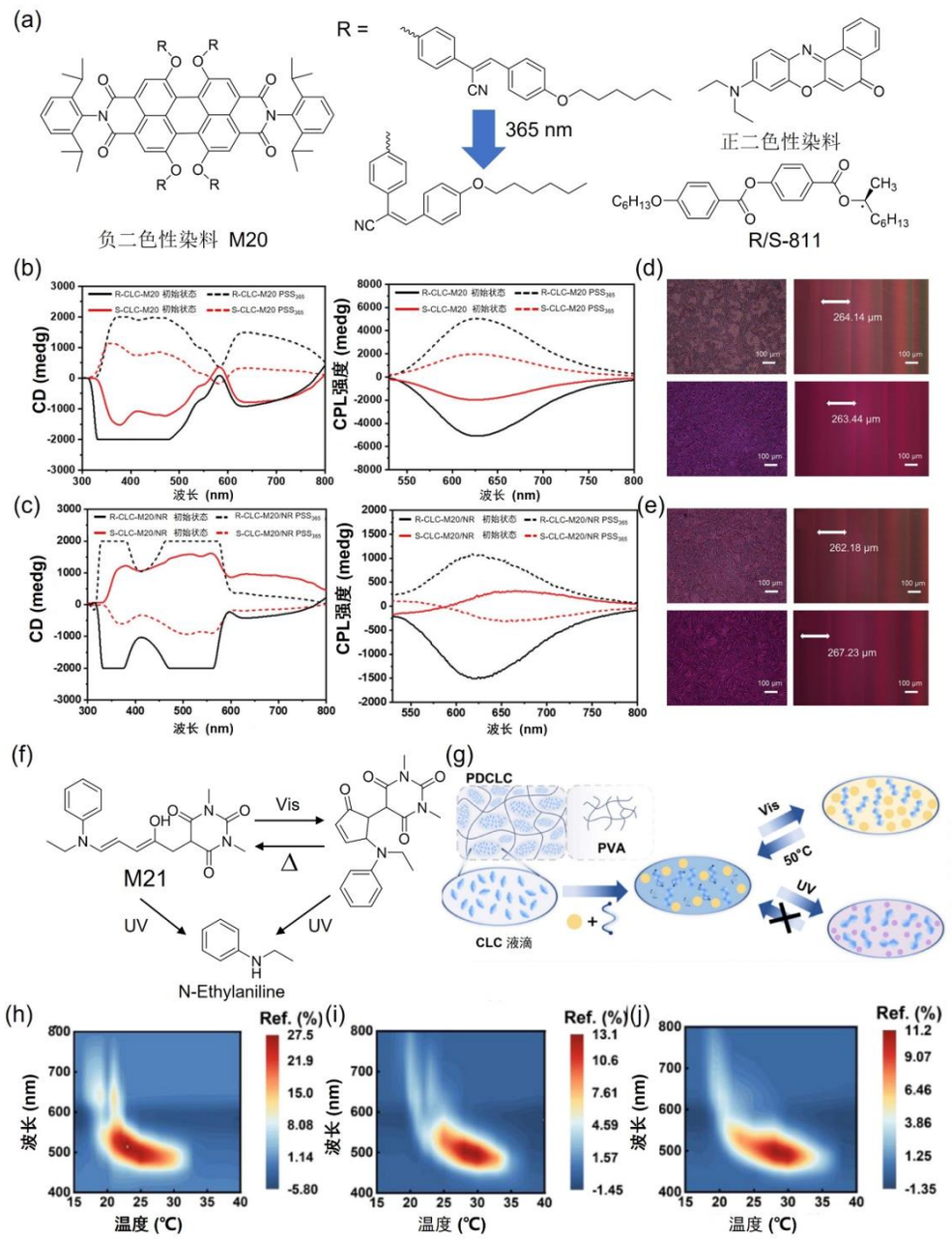


图6. (a)M20以及掺杂剂的分子结构;(b)CLCs-M20在初始状态和PSS_{365}状态下的CD光谱和CPL光谱;(c)CLCs-M20/NR-1:1在初始状态和PSS_{365}状态下的CD光谱和CPL光谱;(d)CLCs-M20在初始状态和PSS_{365}状态下的偏光显微镜图像;(e)CLCs-M20/NR-1:1在初始状态和PSS_{365}状态下的偏光显微镜图像[85];(f)M21分子结构式;(g)聚合物分散CLCs体系示意图;(h)M21-PDCLCs体系在其原始状态下的温度分辨反射光谱;(i)M21-PDCLCs体系在可见光照射后的温度分辨反射光谱;(j)M21-PDCLCs体系在热处理后的温度分辨反射光谱[86]。

Fig. 6 (a) Molecular structure of M20 and dopants; (b) CD spectra and CPL spectra of CLCs-M20 in the initial state and PSS_{365} state; (c) CD spectra and CPL spectra of CLCs-M20/NR-1:1 in the initial state and PSS_{365} state; (d) Polarized light microscope images of CLCs-M20 in the initial state and PSS_{365} state; (e) Polarized light microscope images of CLCs-M20/NR-1:1 in the initial state and PSS_{365} state[85]; (f) Molecular structure of M21; (g) Schematic diagram of polymer dispersed cholesteric liquid crystal system; (h) Temperature-resolved reflection spectra of M21-PDCLCs system in its original state; (i) Temperature-resolved reflection spectra of M21-PDCLCs system after visible light irradiation; (j) Temperature-resolved reflection spectra of M21-PDCLCs system after heat treatment[86].

3 光响应胆甾相液晶材料的应用

随着对光响应分子开关构效关系及超分子手性传递机制研究的不断深入，光响应CLCs材料正加速从基础体系向高性能、多维度的功能器件转化。得益于其独特的动态光子带隙、可编程分子取向以及光机械响应特性，该类材料在智能显示、手性光子学、信息安全及仿生致动等前沿领域展现出不可替代的应用价值。

3.1 智能显示与可重构光子器件

智能显示器件是光响应CLCs材料最经典且最具潜力的应用方向之一。其核心优势在于能够依托光子带隙的光致位移实现结构色的可逆切换，从而实现低功耗、无需额外化学染料的高对比度显示[87-88]。2020年，Ryabchun等人将分子马达(M22)引入CLCs体系，通过光诱导马达在多稳态异构体之间的转变，实现了液晶螺旋超结构的动态调谐与手性反转，为可编程结构色输出奠定了基础(图7 a)[57]。为了进一步提升显示的复用性与信息复杂度，Cui等研究者将光调控螺距与液晶宏观相态重构相结合，制备了基于光响应手性转换分子M23的可重构手性光子纸(图7 b)[58]。该器件不仅可通过光响应调节螺距实现由蓝至红的连续结构色调控，更巧妙地利用了液

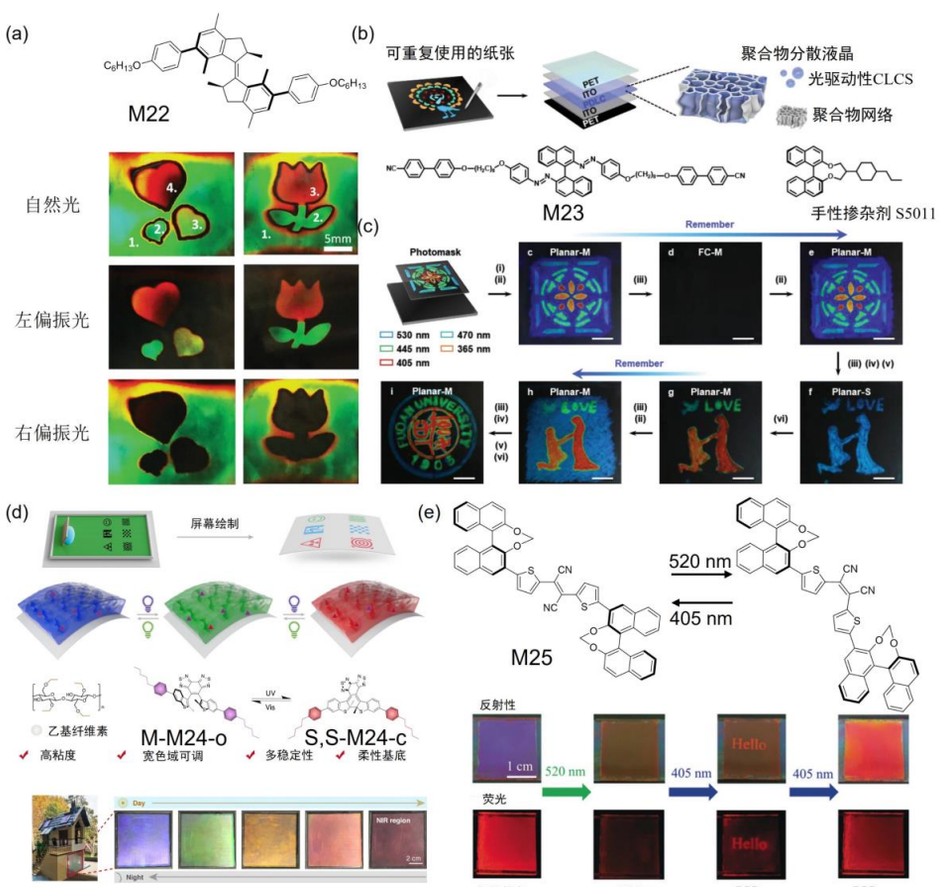


图7. (a)M22化学结构及在CLCs体系中实现可编程结构色输出[57]；(b)基于M23的可重构手性光子纸制备流程；(c)光响应可重构手性光子纸实现结构色连续调控及图案可逆写入/擦除[58]；(d)柔性可涂绘CLCs软光子结构的图案化制备及宽波段反射调控[59]；(e)基于M25的CLCs体系实现结构色与圆偏振荧光的协同调控[60]。

Fig. 7 (a) The chemical structure of M22 and its ability to achieve programmable structural color output in the CLCs system[57]; (b) The preparation process of reconfigurable chiral photonic paper based on M23; (c) The continuous control of structural color and reversible writing/erasing of patterns by the photo-responsive reconfigurable chiral photonic paper[58]; (d) The patterning preparation of flexible paintable CLCs soft photonic structures and wide-bandwidth reflection control[59]; (e) The collaborative control of structural color and circularly polarized fluorescence in the CLCs system based on M25[60].

晶在平面态（呈现结构色）与焦锥态（呈现光散射）之间的可逆转变，实现了局部图案的高分辨率写入与整体擦除（图7 c）。该写入—调色—擦除一体化设计赋予了光子纸优异的信息存储与可重复使用能力。

随着柔性光电子技术的发展，光响应CLCs正逐渐由传统的刚性液晶盒封装向柔性、可加工涂层拓展。Hu等人将内源手性光开关（M24）与纤维素基CLCs体系交联，构筑了具有多稳态特征的可涂绘软光子薄膜（图7 d）。该体系摆脱了刚性器件的束缚，能够在柔性基底表面实现大面积复杂图案化制备，并通过光照实现可见光至近红外宽波段的反射调控，展现出在柔性可穿戴光子器件中的重要应用潜力[59]。此外，Li等利用二噻吩二氰乙烯手性荧光开关（M25），实现了选择性反射波长与圆偏振荧光强度的同步调控，进一步证明了光响应CLCs在多模态光子器件中的广阔前景（图7 e）[60]。

3.2 可调谐手性发光器件

圆偏振发光材料在手性传感、自旋光电子学以及量子通信等先进光子学领域具有重要应用价值[89-90]。光响应CLCs因具备自发形成一维光子晶体谐振腔的能力，可通过动态调节光子带隙实现对CPL发射的精确调制，成为构筑手性光源器件的理想材料。2021年，Yang等人以光响应分子马达（M26）为手性源，在SLC1717向列相液晶中掺杂多种非手性荧光染料，构建了动态CLCs圆偏振发光器件（图8 a，b）[91]。研究揭示了显著的光子带隙边缘增强效应：当染料发射峰位于光子带隙边缘时，CPL信号被显著放大；同时该器件能够实现CPL手性的完全反转，最高发光不对称因子可达0.42。基于此，该体系实现了覆盖蓝至红光的全彩可调CPL发光，并可借助滤光片在自然光和紫外光下读取差异化信息（图8 c）。

2025年，在放大自发辐射（Amplified spontaneous emission，ASE）的基础上，Hu等人提出了一种基于垂直堆叠结构的手性可逆光响应圆偏振放大自发辐射器件[92]。该器件创造性地将掺杂分子马达（M27）的动态CLCs作为可调光学调制层，以多晶$MAPbX_3$钙钛矿薄膜作为高增益介质（图8 d）。在紫外光照射下，分子马达的可逆异构化引起CLCs螺旋旋向的动态翻转及光子带隙的连续调谐，从而对钙钛矿层的ASE信号进行圆偏振选择性滤波调制。该器件不仅响应时间低至数秒，其ASE信号的CPL不对称因子更可在-1.38至+1.22之间连续可逆调节。通过替换钙钛矿卤素组分，该体系实现圆偏振放大自发辐射输出，为可调谐手性激光器的发展提供了可行思路。

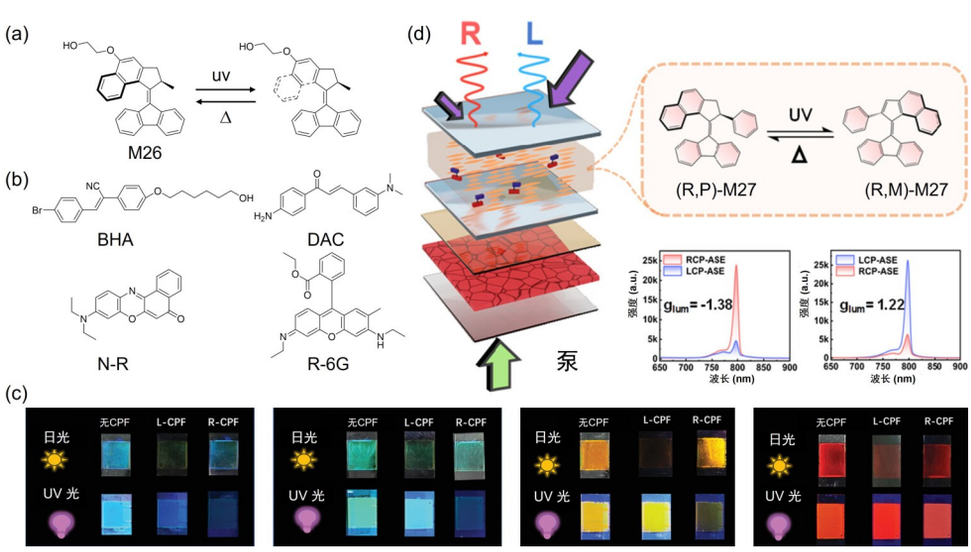


图8. (a)M26分子结构式；(b)各种荧光染料分子式；(c)掺杂多种荧光染料的CPL光子薄膜照片[91]；(d)垂直堆叠结构的手性可逆光响应圆偏振放大自发辐射器件[92]。

Fig. 8 (a) The molecular structural formula of M26; (b) Molecular formulas of various fluorescent dyes; (c) Photograph of the CPL photonic film doped with multiple fluorescent dyes[91]; (d) Chiral reversible photo-responsive circularly polarized amplification spontaneous emission device with vertical stacking structure[92].

3.3 多维信息加密与高级防伪

在高级信息安全领域，实现多层信息的独立存储与按需读取是防伪技术的核心挑战。传统CLCs薄膜在进行多重信息编码时容易产生信号串扰，而借助微流控等微纳加工技术将光响应CLCs进行像素化、微滴化，为解决这一痛点提供了有效路径[93-96]。光响应CLCs微滴凭借结构色与偏振反射的双重光响应能力，成为多维加密标签的理想载体。

2023年，Li等报道了一种基于分子马达(M27)掺杂CLCs微滴的多层信息加密策略[97]。该体系利用分子马达单向旋转带来的手性反转特性，同步调控CLCs的β值和宏观螺旋旋向。研究者采用微流控技术制备了高度单分散的CLCs微滴，并将其作为光学像素组装成信息阵列。在单层系统中，自然光下标签显示蓝色“SCNU”字样；而在紫外光照射或左圆偏振光读取条件下，结构色信息被完全隐藏(图9 a)。更为精妙的是，通过将光响应型与非光响应型CLCs微滴进行空间阵列组合，作者构筑了互不干扰的双层加密系统。例如，自然光下显示第一层信息“BLF”，在特定刺激下“BLF”消失并显现第二层隐藏信息“RUG”(图9 b)；甚至可实现由绿色“熊猫”图案向隐藏文字“I love you 2022”的复杂切换(图9 c)。该策略通过空间像素化与光学信号的正交解耦，实现了防伪标签的高安全性与无串

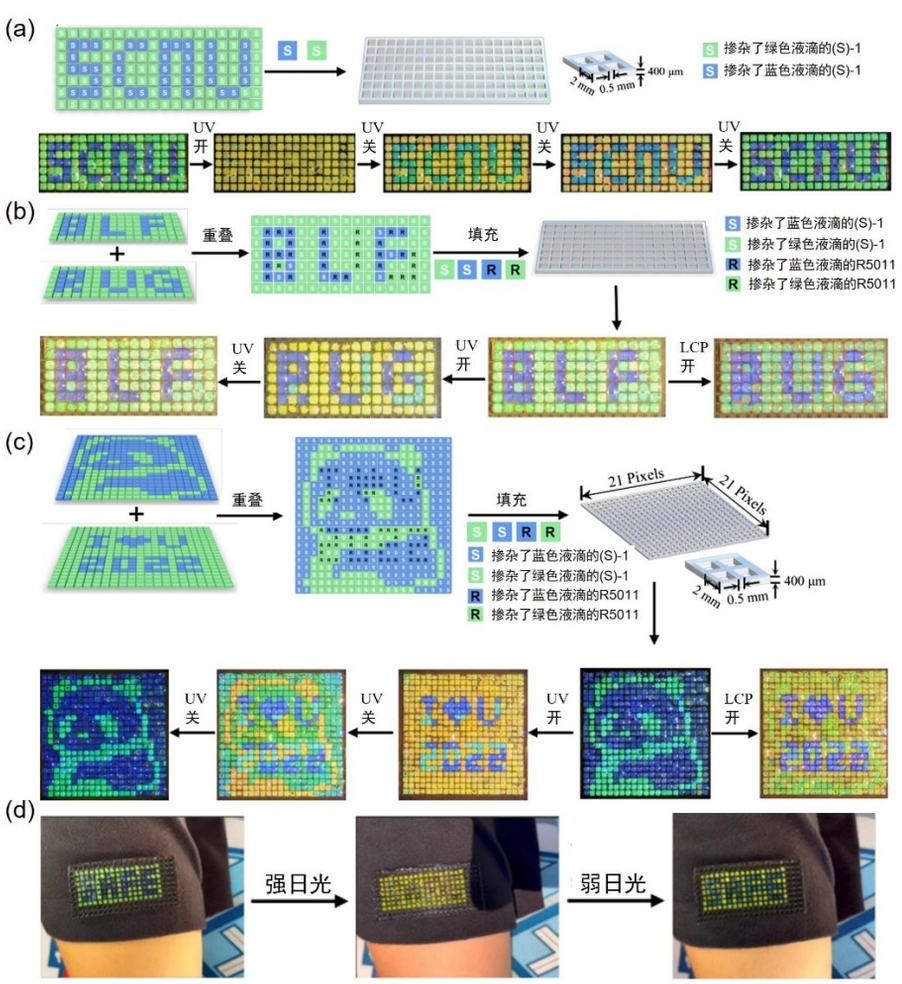


图9. (a)单层信息加密标签示意图；(b)双层信息加密标签示意图；(c)复杂图案双层信息示意图；(d)身份认证标签实际应用展示[97]。

Fig. 9 (a) Illustration of a single-layer information encryption tag; (b) Illustration of a double-layer information encryption tag; (c) Illustration of a complex pattern with double-layer information; (d) Actual application display of the identity authentication tag[97].

扰读取，展示了在光学寻址二维码及高级身份认证卡中的巨大潜力（图9 d）。

3.4 软体致动器与智能仿生界面

光响应CLCs不仅在光学层面具备多维调节能力，其独特的分子取向各向异性及光机电耦合效应，能够将分子尺度的构型变化高效放大为宏观的机械力，从而驱动材料发生弯曲、扭转或卷曲形变。这种非接触式、高时空分辨率的光致形变，使光响应CLCs在模拟生物肌肉纤维及植物卷须的软体机器人领域备受瞩目[98-99]。

2023年，Katsonis等人将偶氮苯光开关（M28）引入CLCs聚合物网络，构筑了可通过切角精确编码螺距及旋向的光响应CLCs弹簧致动器（图10 a）[100]。在紫外光照下，偶氮苯的反—顺异构化破坏了液晶局部有序性，并沿垂直取向方向产生膨胀内应力。由于膜厚方向存在交联密度梯度，该内应力被转化为宏观驱动力，促使弹簧实现快速、可逆的螺旋缠绕、解缠绕甚至手性翻转（图10 b）。该体系通过聚合物网络将偶氮苯光异构化引起的局部有序性变化和内应力放大为宏观螺旋形变，为开发具有复杂三维运动模式的光控微型软体机器人提供了重要模型。

除了力学致动，光响应CLCs在模拟生物环境适应性的智能仿生皮肤方面同样表现优异。然而，传统平面CLCs体系存在严重的视角依赖性以及环境稳定性差的问题。为此，Chen等人采用Pickering乳液模板法，以纤维素纳米晶（CNCs）同时作为乳化剂与取向剂，制备了掺杂光响应分子马达（M27）的CLCs微液滴，并原位包覆三聚氰胺—甲醛（MF）刚性壳层，形成高稳定微胶囊体系（图10 c）[61]。关键在于，微液滴内部的液晶分子形成了径向排列的三维螺旋结构，从根本上消除了传统一维螺旋的视角依赖，赋予了涂层视角无关的均匀结构色。将该微胶囊作为颜料涂覆后，所得智能涂层在太阳光激发下可于2分钟内完成自适应变色，脱离光源后在室内可自主恢复（图10 d），且经过200次循环后性能衰减微弱。该体系完美结合了微观螺旋重构与宏观抗疲劳特性，为开发环境响应型仿生伪装皮肤及智能自适应涂层提供了全新思路。

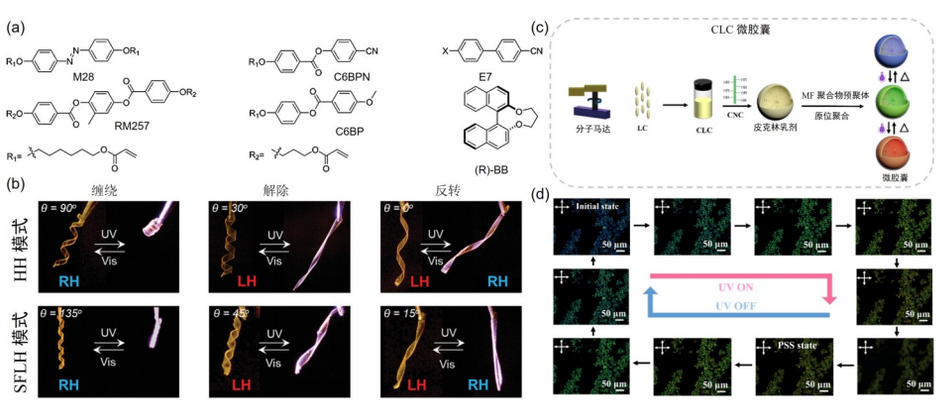


图10. (a)M28分子结构式；(b)光响应CLCs弹簧体系的响应模式[100]；(c)光响应CLCs微胶囊体系制备流程；(d)不同紫外光照射时间下CLCs微胶囊的POM图像[61]。

Fig. 10 (a) Molecular structural formula of M28; (b) Response mode of the photo-responsive CLCs spring system[100]; (c) Preparation process of the photo-responsive CLCs microcapsule system; (d) POM images of CLCs microcapsules under different ultraviolet light irradiation times[61].

4 总结与展望

胆甾相液晶材料凭借周期性螺旋超结构所赋予的选择性光反射和可调光子带隙特性，在动态光学材料和智能光子器件领域展现出重要研究价值。通过引入光响应分子，可利用光诱导异构化、构象重排、手性传递、分子运动及光热效应等机制，对CLCs的分子排列和螺旋超结构进行多层次调控。本文围绕光响应分子结构变化与CLCs有序结构及宏观性能之间的构效关系，系统总结了偶氮苯、螺吡喃、二芳基乙烯、酰腙以及拥挤烯烃等典型体系的分子设计策略、光响应机

制与结构调控规律，并梳理了其在智能显示、手性发光、信息加密、自适应光学及软体致动等领域的应用进展。

尽管近年来光响应CLCs材料取得了快速发展，但其进一步应用仍面临若干关键问题。①驱动波段与能量利用仍有局限。目前部分光响应体系仍依赖紫外光触发，存在穿透深度有限、潜在光损伤及长期照射下材料疲劳等问题，而可见光或近红外驱动体系在响应效率和调控幅度等方面仍有提升空间。②响应速度与长期循环稳定性仍需进一步提高。光响应过程不仅取决于分子开关自身的光化学转化效率，还受到液晶黏度、弹性恢复、分子扩散、界面锚定及聚合物网络约束等因素影响，导致部分体系存在响应或恢复速度较慢的问题。同时，长期反复光照可能伴随光漂白、不可逆副反应、功能分子迁移及取向缺陷累积，使调谐幅度和光学性能逐渐衰减。因此，建立统一的响应动力学和循环寿命评价方法，对推动不同体系之间的横向比较及实际应用具有重要意义。③材料稳定化与大面积制备仍存在挑战。传统CLCs具有较强流动性，通常依赖液晶盒维持稳定取向，而大面积样品中膜厚、螺距和取向的微小不均匀均可能造成反射波长、色彩及偏振性能差异，不利于柔性化和规模化器件构筑。④材料设计与器件加工之间仍缺乏充分衔接。部分高性能光响应分子的合成路线较长、成本较高，同时其光响应条件、材料稳定性与现有薄膜加工、图案化和器件封装工艺之间仍存在适配问题。⑤跨尺度构效关系仍有待深入阐明。光响应分子的微观结构变化如何经由分子间相互作用和手性传递进一步引起β值、液晶取向、相态及螺旋超结构演变，目前尚缺乏统一的定量描述，这在一定程度上限制了材料性能的预测和反向设计。

未来，光响应CLCs材料的发展需要围绕分子精准设计、响应动力学与稳定性调控、材料规模化构筑以及器件集成等层面协同推进。在分子设计方面，应进一步发展具有可见光/近红外响应、高光化学转化效率、高循环稳定性及高效手性传递能力的光响应单元，降低对高能紫外光的依赖，并结合理论计算和多尺度表征建立“分子结构—光响应过程—液晶有序结构—宏观光学性能”之间的定量构效关系。在响应性能方面，应关注分子光化学过程与液晶集体重排之间的时间尺度匹配，通过优化液晶基质黏度、分子锚定、掺杂浓度及聚合物网络结构等方式缩短响应与恢复时间；同时通过提高分子光稳定性、抑制不可逆副反应和功能组分迁移，提升长期循环使用过程中的性能保持率。在材料构筑方面，可结合聚合物稳定化、液晶弹性体、微胶囊封装及复合薄膜等策略，提高CLCs螺旋结构的稳定性、力学性能和环境适应性，并进一步发展适用于大面积加工的涂布、印刷及连续成膜技术，从而推动光响应CLCs由实验室尺度向规模化制造转变。在器件层面，应进一步加强光响应CLCs与柔性光电子器件、智能光学涂层、多维信息加密及仿生驱动系统等平台的集成，并推动结构色、偏振、荧光、散射、相态和力学形变等多种响应模式的协同设计，实现由单一光学信号调控向多模式、多通道和可编程响应发展。

参 考 文 献：

[1] NYSTRÖM G., ARCARI, MEZZENGA, R. M. & Confinement-induced liquid crystalline transitions in amyloid fibril cholesteric tactoids[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13: 330-336.

[2] SCHWARTZ M., LENZINI G., GENG Y., *et al*. Cholesteric liquid crystal droplets for molecular security[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(30): 1707382.

[3] LEE S., SEO H., KIM Y., *et al*. Structural Color Palettes of Core-Shell Photonic Ink Capsules Containing Cholesteric Liquid Crystals[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(23): 1606894.

[4] WANG D., WANG S., YONG Y., *et al*. An opto-iontronic cholesteric liquid crystalline retina for multimodal circularly polarized neuromorphic vision[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(14): 2419747.

[5] LI S., CHEN Z., 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: 27.

[6] KULKARNI C., CURVERS R., VANTOMME G., *et al*. Consequences of chirality in directing the pathway of cholesteric helix inversion of conjugated polymers by light[J]. *Advanced Materials*, 2021,33(2): 2005720.

[7] LIU Y., XING P. *et al*. Circularly polarized light responsive materials: Design strategies and applications[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(49): 2300968.

[8] HUANG Y., QIAN Y., CHANG Y., *et al*. Intense left-handed circularly polarized luminescence in chiral nematic hydroxypropyl cellulose composite films[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(18): 2308742.

[9] SHEN W., HU C., YANG S. Reply to "Comment on 'In-plane optical anisotropy and linear dichroism in low-symmetry layered TlSe'"[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(43): 37465-37467.

[10] BUKHARINA D., SOUTHARD L., DIMITROV B., *et al*. Left and right-handed light reflection and emission in ultrathin cellulose nanocrystals films with printed helicity[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(42): 2404857.

[11] HE X., LI Y., YU H., *et al*. A microsized optical spectrometer based on an organic photodetector with an electrically tunable spectral response[J]. *Nature Electronics*, 2024, 7: 694-704.

[12] SHIN S., KWON Y., HWANG C., *et al*. Visible-light-driven rapid 3D printing of photoresponsive resins for optically clear multifunctional 3D objects[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(19): 2311917.

[13] YI S., DING H., LUO S., *et al*. Research progress on aero-optical effects of hypersonic optical window with film cooling[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 310.

[14] HAN H., OH J., LEE H., *et al*. Rewritable photoluminescence and structural color display for dual-responsive optical encryption[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(14): 2310130.

[15] MAO N., LUO Y., CHIU M., *et al*. Giant nonlinear optical response via coherent stacking of in-plane ferroelectric layers[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(26): 2210894.

[16] FARYAD M., LAKHTAKIA A. The circular Bragg phenomenon[J]. *Advanced Optics and Photonics*, 2014, 6(2): 225-292.

[17] KAN Y., THRANE P., LI X., *et al*. Ångström-tunable polarization-resolved solid-state photon sources[J]. *Nature Photonics*, 2025, 19: 960-967.

[18] MA Y., QIU Y., YANG K., *et al*. Competitive Li-ion coordination for constructing a three-dimensional transport network to achieve ultra-high ionic conductivity of a composite solid-state electrolyte[J]. *Energy & Environmental Science*, 2024, 17(21): 8274-8283.

[19] 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, LIU Z, CHEN J, *et al*. Manipulation and applications of microstructures in cholesteric liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2026, 41(6): 769-782.

[20] DUTTKE S., GUZMAN C., CHANG M., *et al*. Position-dependent function of human sequence-specific transcription factors[J]. *Nature*, 2024, 631: 891-898.

[21] WANG M., LI X., GAI Y., *et al*. Dual-amide engineered blue phase liquid crystal elastomers: Synergistic fatigue resistance, programmable mechanochromics and spatiotemporally encrypted photonics[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(37): 2506129.

[22] LI X., ZHOU B., QIU X., *et al*. Wood microchannel-confined assembly of cellulosic liquid crystals for modulable chromatic materials[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(9): e18709.

[23] LI S., TANG Y., FAN Q., *et al*. When quantum dots meet blue phase liquid crystal elastomers: Visualized full-color and mechanically-switchable circularly polarized luminescence[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 140.

[24] ZHANG S., WANG J., SU D., *et al*. Facile visible-light upcycling of diverse waste plastics using a single organocatalyst with minimal loadings[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 4188.

[25] SONG X J., CHEN X., LIU J., *et al*. Biferroelectricity of a homochiral organic molecule in both solid crystal and liquid crystal phases[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 6150.

[26] BISOYI H., LI Q. Liquid crystals: Versatile self-organized smart soft materials[J]. *Chemical Reviews*, 2021, 122(5): 4887-4926.

[27] WANG Y., LI Q. Light-driven chiral molecular switches or motors in liquid crystals[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(15): 1926-1945.

[28] GUO K., JIANG J. Boronate-polyol networks reinforce cellulose-stabilized Pickering emulsions[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 366(15): 123905.

[29] LI J., WIN Q., LI C., *et al*. Efficient and high color-purity red and deep-red circularly polarized luminescence from carbon quantum dots enabled by helical co-assembly strategy[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(47): 2510409.

[30] CHEN L., HE X., YUAN J., *et al*. Tunable circularly polarized luminescence through chiral dopant dihedral angle modulation in liquid crystal polymer films[J]. *Small*, 2025, 21(35): 2505269.

[31] HOBBS J., GIBB C., MANDLE R. Ferri-and ferro-electric switching in spontaneously chiral polar liquid crystals[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 7510.

[32] LIU M., HAN X., NAH H., *et al*. Switching chirality in arrays of shape-reconfigurable spindle microparticles[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(31): 2303009.

[33] GIBB C., HOBBS J., MANDLE R. Systematic fluorination is a powerful design strategy toward fluid molecular ferroelectrics[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(5): 4571-4577.

[34] XU Z., SAIEV S., QIAN P., *et al*. Supramolecular chirality largely modulates chemical doping of conjugated polymers[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 8381.

[35] REN T., SHEN X., HUANG Z., *et al*. Buprestidae metamorphosis-inspired stiffening photonic elastomers for shape-color integrated memory and information encryption[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 1139.

[36] STRACHAN G., GÓRECKA E., HOBBS J., *et al*. Fluorination: Simple change but complex impact on ferroelectric nematic and smectic liquid crystal phases[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(7): 6058-6066.

[37] YANG C., WU B., RUAN J., *et al*. 3D-printed biomimetic systems with synergetic color and shape responses based on oblate cholesteric liquid crystal droplets[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(10): 2006361.

[38] MUJICA R., AUGUSTINE A., PAULY M., *et al*. Nature-inspired helicoidal nanocellulose-based multi-compartment assemblies with tunable chiroptical properties[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(29): 2401742.

[39] GENG Y., HONORATO-RIOS C., NOH J., *et al*. Cholesteric spherical reflectors with tunable color from single-domain cellulose nanocrystal microshells[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(8): 2305251.

[40] HWANG L., JUNG H., KIM J., *et al*. Artificial helical screws of 2D materials with Archimedean spiral arrangement[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(17): 2212997.

[41] CHEN Y., HAN B., GOBBI M., *et al*. Universal water transfer printing enables scalable structural coloration of responsive textile fibers for wearable electronics[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(5): e16769.

[42] YUAN C., LIU H., ZHAN Y., *et al*. Electro-thermo cooperative responsiveness of cholesteric heliconical photonics architectures featuring adaptative sensitivity[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(42): 2507000.

[43] ZIE B., YANG W., CHEN Y., *et al*. Temperature-time-dependent dynamic pattern from multi-inks printing based on chiral helix superstructure[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(27): 2424107.

[44] WANG H., BISOYI H., WANG L., *et al*. Photochemically and thermally driven full-color reflection in a self-organized helical superstructure enabled by a halogen-bonded chiral molecular switch[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(6): 1627-1631.

[45] LIU X., ZOLA R., CHEN Y., *et al*. Strain-responsive circularly polarized luminescence in cholesteric liquid crystal elastomers through laser-engineered microstructures[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(30): e75116.

[46] MENG J., XIN L., ZHEN Z., *et al*. AIE-Driven Chiral Covalent Organic Frameworks for Solid-State Circularly Polarized Luminescence, Hydrochromism, and Water-Induced Chiroptical Enhancement[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(32): e202509454.

[47] ZHA X., ZUO M., LUO M., *et al*. Chiroptical isomerization in chiral covalent organic frameworks with identical mesoscopic helicity[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 847.

[48] ALCALDE-ORDÓÑEZ A., SARMIENTO A., GÓMEZ-GONZÁLEZ J., *et al*. Unlocking a biological interface of chiral supramolecular helical polymers[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(29): 25254-25263.

[49] KIM J., IM J., SO S., *et al*. Dynamic hyperspectral holography enabled by inverse-designed metasurfaces with oblique helicoidal cholesterics[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(24): 2311785.

[50] CHEN B., HSU C., HUANG J., *et al*. Crystal Packing - Trajectory Correlation in Topochemical Photoisomerization[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(1): e18997.

[51] WANG Z., SHI R., TAHIR I., *et al*. Thiophene sulfone single crystal as a reversible thermoelastic linear actuator with an extended stroke and second-harmonic generation switching[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025,147(9): 7749-7756.

[52] OKUDA S., OUSAKA N., IWATA T., *et al*. Supramolecular helical assemblies of dirhodium(II) paddlewheels with 1, 4-diazabicyclo [2.2.2] octane: A remarkable substituent effect on the helical sense preference and amplification of the helical handedness excess of metallo-supramolecular helical polymers [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2022,144(6): 2775-2792.

[53] MA Z., HAN S., LI L., *et al*. Precise Control of the Wavelengths of the Reflection Bands of the Cholesteric Liquid Crystal Polymer Network Patterns [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2025, 7(12): 7999-8006.

[54] ZHANG X., TANG Y., 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.

[55] YOON W., LIM S., RIM M., *et al*. Photo- and thermo-responsive switchable smart windows developed by the control of 3D molecular orientation of chiral liquid crystals with azobenzene molecular engineering[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(27): 2425115.

[56] ZHENG Z., HU H., ZHANG Z., *et al*. Digital photoprogramming of liquid-crystal superstructures featuring intrinsic chiral photoswitches[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 226-234.

[57] RYABCHUN A., LANCIA F., CHEN J., *et al*. Helix inversion controlled by molecular motors in multistate liquid crystals[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(47): 2004420.

[58] CUI S., LIN Q., LIU X., *et al*. Programmable coloration and patterning on reconfigurable chiral photonic paper [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(5): 2102108.

[59] HU H., WAN W., LIU X., *et al*. Paintable soft photonic architectures featuring multi-stable light-actuation[J]. *Light: Science & Applications*, 2026, 15: 10.

[60] LI J., BISOYI H., LIN S., *et al*. 1, 2-Dithienyldicyanoethene-Based, Visible-Light-Driven, Chiral FluorescentMolecular Switch: Rewritable Multimodal Photonic Devices [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58(45): 16052-16056.

[61] WANG Y., ZHANG Y., LI S., *et al*. Photoresponsive coatings by light-driven molecular motors in cholesteric liquid crystal microcapsules[J]. *Precision Chemistry*, 2025, 3(3):149-156.

[62] HUANG R., LAN R., SHEN C., *et al*. Remotely controlling drug release by light-responsive cholesteric liquid crystal microcapsules triggered by molecular motors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(49): 59221-59230.

[63] BIETTI A. F, KAUTH A., HOMMEL K., *et al*. Photoresponsive molecular tweezers modulate Taspase 1 activity[J]. *RSC Chemical Biology*, 2025, 6(12): 1837-1847.

[64] PRIIMAGI A., HECHT S. From responsive molecules to interactive materials[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(20): 2000215.

[65] SUN X., CHEN D., CHEN Y., *et al*. Azobenzene-cyanine hybrids with enhanced photostability and non-radiative transitions for multimodal tumor therapy[J]. *Bioactive Materials*, 2026, 61: 339-354.

[66] LI Y., XUE B., YANG J., *et al*. Azobenzene as a photoswitchable mechanophore[J]. *Nature Chemistry*, 2024, 16: 446-455.

[67] SHENG J., PEREGO J., BRACCO S., *et al*. Construction of multi-stimuli responsive highly porous switchable frameworks by in situ solid-state generation of spiropyran switches[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(4):

2305783.

[68] ZHENG H., YANG Y., WANG Z., *et al*. Photo-stimuli-responsive dual-emitting luminescence of a spiropyran-encapsulating metal - organic framework for dynamic information encryption[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(26): 2300177.

[69] WANG Q., ZHOU D., GONG K., *et al*. A multidimensional anti-counterfeiting dynamic flexible label based on light/thermal responsive CLC microspheres[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(37): 15092-15100.

[70] WANG Q., ZHANG X., ZHOU D., *et al*. Cholesteric liquid crystal doped with spiropyran and zinc ions for multi-state anti-counterfeiting[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(20): 7225-7232.

[71] WU M., GUO J., MENG Y., *et al*. Facile fabrication of light-activated multi-level output system based on thienyl-diphenylethene: Toward intelligent multimodal security protection[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, 8: 412.

[72] CHEN B., ZHAO Z., MORRIS S. Chiral switches bring new twist to photonics[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 174-175.

[73] HOU J., WANG J., RYABCHUN A., *et al*. Amplification of light-induced helix inversion of intrinsically chiral diarylethene molecular switches[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(17): 2312831.

[74] SHAO B., FU H., APRAHAMIAN I. A molecular anion pump[J]. *Science*, 2024, 385:544-549.

[75] ZHANG X., SIVAGURU P., PAN Y., *et al*. The carbene chemistry of N-sulfonyl hydrazones: The past, present, and future[J]. *Chemical Reviews*, 2025, 125(2): 1049-1190.

[76] LAN R., BAO J., LI Z., *et al*. Orthogonally Integrating Programmable Structural Color and Photo-Rewritable Fluorescence in Hydrazone Photoswitch-bonded Cholesteric Liquid Crystalline Network[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(50): e202213915.

[77] BALAMUT B., APRAHAMIAN I. Molecular steganography using multistate photoswitchable hydrazones[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(23): 19444-19449.

[78] WANG H., BALA I., WISCONS R., *et al*. Color tuning in ferroelectric nematic liquid crystals using triptycene/hydrazone chiral photoswitches[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(44): e09125.

[79] DENG Y., LONG G., ZHANG Y., *et al*. Photo-responsive functional materials based on light-driven molecular motors[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 63.

[80] LAN R., BAO J., HUANG R., *et al*. Amplifying molecular scale rotary motion: The marriage of overcrowded alkene molecular motor with liquid crystals[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(40): 2109800.

[81] 李博文, 林瀚, 李佳乐, 等. 光热协同调控的可涂刷胆甾相液晶[J]. 液晶与显示, 2026, 41(5): 605-613.
LI B, LIN H, LI J, *et al*. Paintable cholesteric liquid crystals with synergistic photothermal modulation[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2026, 41(5): 605-613.

[82] 刘玮,杨永刚. 基于胆甾型液晶聚合物网络薄膜的圆偏振发光研究进展[J]. 发光学报, 2026, 32170(14): 1-21.
LIU W, YANG Y. Research progress on circularly polarized luminescence based on cholesteric liquid crystal polymer network film s[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2026, 32170(14): 1-21.

[83] CHEN Y., HAN B., GOBBI M., *et al*. Responsive molecules for organic neuromorphic devices: Harnessing memory diversification[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(19): 2418281.

[84] MEI L., LIAO Y., FAN K., *et al*. Beyond Enzyme Mimics: Engineering Photo-Responsive Nanozymes for Therapeutic Innovation."[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(3): e10661.

[85] LI Y., CHEN Y., LUO J., *et al*. Light-driven sign inversion of circularly polarized luminescence enabled by dichroism modulation in cholesteric liquid crystals[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(16): 2312331.

[86] YAN M., CAO Y., DONG L., *et al*. Dual-mode regulation of thermochromism in polymer-dispersed cholesteric liquid crystals for photoaddressing temperature-resolved encryption[J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(18): 2500391.

[87] ZHANG D., LIU L., LIU S., *et al*. Toward intelligent display with neuromorphic technology[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(26): 2401821.

[88] WANG Y., GAO W., YANG S., *et al*. Humanoid intelligent display platform for audiovisual interaction and

sound identification[J]. *Nano—Micro Letters*, 2023, 15: 221.

[89] PARK J., KONG L., ZHOU Y., *et al*. Large-field-of-view imaging by multi-pupil adaptive optics[J]. *Nature Methods*, 2017, 14: 581-583.

[90] FU X., WU Z., MA X., *et al*. Iwoa-optimized sensorless adaptive optics for free-space optical communication [J]. *Optics Communications*, 2025, 596: 132524.

[91] BAO J., LAN R., SHEN C., *et al*. Modulation of chirality and intensity of circularly polarized luminescence emitting from cholesteric liquid crystals triggered by photoresponsive molecular motor[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(3): 2101910.

[92] YUAN M., XU H., LIU J., *et al*. Chirality switching of amplified spontaneous emission in halide perovskites via motor-doped chiral liquid crystals[J]. *ACS Energy Letters*, 2025, 10(11): 5684-5693.

[93] QUAN Z., ZHANG Q., LI H., *et al*. Fluorescent cellulose-based materials for information encryption and anti-counterfeiting[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2023, 493: 215287.

[94] 朱亚洲, 刘煜莹, 王亚东, 等. 基于液晶弹性体的仿尺蠖软体机器人[J]. 液晶与显示, 2025, 40(4): 527-535.
ZHU Y, LIU Y, WANG Y, *et al*. Inchworm-like soft robot based on liquid crystal elastomer[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(4): 527-535.

[95] NAM S, WOO S, PARKJ. Y. et al. Programmable optical encryption using thickness-controlled stretchable chiral liquid crystal elastomers[J]. *Light Sci Appl*, 2025, 14: 136.

[96] WANG F., YU X., WANG M., *et al*. Reproducible pressure-sensitive fluorescence switch for anti-counterfeiting and information encryption[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(6): e14522.

[97] LI J., XIE S., MENG J., *et al*. Dynamic control of multiple optical patterns of cholesteric liquid crystal microdroplets by light-driven molecular motors[J]. *CCS Chemistry*, 2024, 6(2): 427-438.

[98] FU Y., LI Z., LIU Z., *et al*. Gradient-structured pi/pdms composites for photoactuation inspired by scallion leaf and bamboo node[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2026, 534: 174939.

[99] FENG X., LI K., WANG S., *et al*. Bioinspired photothermal-humidity responsive bopp/go actuators for integrated sensing and water-surface monitoring[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2026, 466(1): 140241.

[100] RYABCHUN A., LANCIA F., KATSONIS N. Light-responsive springs from electropatterned liquid crystal polymer networks[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(12): 2300358.

作者简介:



鞠宇阳,男,学士,2024年于南京邮电大学通达学院获得学士学位,主要从事有机光功能分子材料研究。E-mail:3116758423@qq.com



马　云,男,博士,教授,2015年于香港浸会大学获得博士学位,主要从事有机光功能材料及应用研究。E-mail:iamyma@njupt.edu.cn