

手性发光液晶的构筑及圆偏振发光研究进展

肖 遥, 潘雪兰, 邱圣祺, 余振强*

(深圳大学 化学与环境工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 圆偏振发光(CPL)在三维显示、不对称光催化、信息加密与防伪等领域具有潜在的应用前景, 已经成为光化学及光功能材料领域的研究热点。手性发光液晶(CLCC)集成了手性、发光和液晶有序性三大核心要素, 在CPL领域表现出独特优势。与传统的掺杂型CLCC相比, 本征型CLCC具有结构稳定、无宏观相分离等优势, 成为当前CPL材料研究的前沿热点。本文系统综述了CLCC的最新研究进展, 包括分子设计策略、自组装行为及圆偏振发光性能。首先, 剖析了掺杂型与本征型CLCC的构筑策略; 其次, 聚焦具有聚集诱导发光(AIE)特性的小分子CLCC体系研究进展; 最后, 针对CLCC在高不对称因子与高发光效率协同提升、手性传递、光子带隙精准匹配等挑战, 提出了可能的发展方向及可能的解决策略。

关 键 词: 手性发光液晶; 圆偏振发光; 聚集诱导发光; 胆甾相液晶

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260206

CSTR: 32170.14.CJL.20260206

Construction of chiral luminescent liquid crystals and progress of the circularly polarized luminescence

XIAO Yao, PAN Xuelan, QIU Shengqi, YU Zhenqiang*

(School of Chemistry and Environmental Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518071, China)

* Corresponding Author, E-mail: zqyu@szu.edu.cn

Abstract: Circularly polarized luminescence (CPL) has become a hot topic, due to their potential applications in 3D displays, asymmetric photocatalysis, information encryption and anti-counterfeiting. Chiral luminescent liquid crystals (CLCC) exhibit unique advantages in the field of CPL because of their simultaneously integrate the elements of chirality, luminescence, and liquid crystallinity. Compared with traditional doped CLCC, intrinsic CLCC possess the outstanding advantages such as structural stability and no macroscopic phase separation, making them hot topic in CPL materials. This article systematically reviews the latest progress on CLCC, including molecular designing strategy, self-assembly behavior, and circularly polarized luminescence. Firstly, analyzed the construction strategies of doped and intrinsic CLCC. Secondly, focus on small-molecular CLCC with Aggregation-Induced Emission (AIE) characteristics. Finally, potential development directions and solutions are proposed according to the challenges faced by CLCC, such as synergistic improvement in high asymmetry factors and high luminescence efficiency, chiral transfer, and precise matching of photon band gaps.

Keywords: Chiral luminescent liquid crystals; circularly polarized luminescence; aggregation-induced luminescence; cholesteric liquid crystals

1 引 言

圆偏振发光(Circularly Polarized Lumines-

cence, CPL)材料指受激发射时能产生差异性的左旋或右旋圆偏振光现象的一类材料, 反映材料激发态的手性光学信息^[1-3], 其在光电器件^[4-6]、三维显

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(22272109); 广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515011045)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(22272109); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(2024A1515011045)

示^[7-8]、不对称合成^[9]、信息加密^[10-12]和防伪技术^[13-15]等领域有广泛应用前景,因此 CPL 研究一直在持续发展。发光不对称因子(g_{lum})^[16]是评估 CPL 性能的关键参数。同时,荧光量子效率(Φ_{PL})也是衡量 CPL 材料的重要参数之一,然而,如何同步实现高 g_{lum} 值和高 Φ_{PL} 一直是该领域面临的重大挑战。围绕手性发光功能材料的构建及 CPL 性能(Φ_{PL} 、 g_{lum} 及手性旋向)调控,研究人员在有机小分子^[17-19]、手性聚合物^[20-21]、金属配合物^[22-23]、光子上转换^[24-25]、手性液晶^[26-27]和自组装凝胶^[28]等不同类型的发光功能材料的构建及应用方面取得了系列进展。手性发光液晶^[29](Chiral Luminescent Liquid Crystals, CLLCs)是一类集手性、发光与液晶有序性于一体的软物质功能材料,因其卓越的手性光学性质,在 CPL 材料领域表现出独特优势,从而备受关注。胆甾相液晶(CLCs)因其独特的周期性螺旋超结构而表现出与光子晶体相似的光子带隙(Photonic Band Gap, PBG)^[30]。当发光体的发射光谱与 CLCs 的 PBG 重叠时,与螺旋手性相同的圆偏振光被选择性反射,而手性相反的圆偏振光被透射^[31],这一机制可将 g_{lum} 值放大至接近理论极限(± 2.0)。此外,CLCs 对外界刺激(温度、电场、光照等)具有高度敏感性,也为实现 CPL 信号的动态调控提供了理想平台。

CLLC 主要包括掺杂型和本征型两种。掺杂型 CLLC 主要通过将发光手性剂掺杂到非手性向列相液晶主体而成,具有制备便捷、性能可调、成本廉价等优点,也面临高浓度掺杂所导致的相分离及稳定性问题。本征型 CLLC 则将手性单元、发光基团与液晶基元通过共价键整合于单一分子中,通过形成具有超分子螺旋结构的手性向列相,具有结构稳定、无相分离等优势。传统发光基团面临聚集诱导淬灭(Aggregation-Caused Quenching, ACQ)而导致 Φ_{PL} 低的难题,而聚集诱导发光(Aggregation-Induced Emission, AIE)概念的引入为这一难题提供了根本性解决方案。将 AIE 基团(如氰基二苯乙烯、四苯乙烯等)^[32-34]引入手性液晶的分子设计,有望同时获得高 g_{lum} 和高 Φ_{PL} ,二者的协同提升为当前手性发光液晶的研究提供了新思路。

本文旨在系统综述手性发光液晶最新研究进展。值得指出的是,CLLC 体系中高效 CPL 的产生并不仅依赖于手性基元的引入,更取决于手性信

息在液晶有序环境中的传递与放大机制。通常,分子间的 $\pi-\pi$ 堆积、偶极-偶极相互作用以及氢键等非共价作用能够促进手性从分子尺度向超分子尺度逐级传递,并在胆甾相液晶的长程有序螺旋结构中实现进一步放大。此外,在引入荧光共振能量转移(Fluorescence Resonance Energy Transfer, FRET)机制后,使非手性受体获得圆偏振发光特性,从而为高性能 CPL 体系的构筑提供新的设计思路。因此,从手性传递机制、能量协同机制以及结构调控规律角度理解 CLLC 体系,对实现高发光效率与高不对称因子的协同提升具有重要意义。在介绍手性发光液晶的两种构筑策略基础上;重点阐述具有 AIE 特性手性发光液晶的分子设计、结构调控及手性光学性能;讨论 CPL 性能的动态调控;最后探讨手性发光液晶在光电器件及信息防伪等领域的应用前景,并展望其未来发展方向。

2 手性发光液晶的制备策略

2.1 掺杂型手性发光液晶

掺杂型 CLLC 的突出优势在于制备简便、性能可调、普适性强。其关键步骤是将发光分子及手性剂掺杂到非手性向列相液晶主体获得。其本质依赖于发光分子、手性剂与液晶分子之间的相互作用,通过非共价相互作用,手性自组装形成具有超分子螺旋,从而获得高性能 CPL。 $\pi-\pi$ 堆积强度、偶极-偶极相互作用以及手性剂的螺旋扭曲力(HTP)等因素共同决定手性传递效率。一般而言,手性剂的 HTP 值越高,手性剂浓度越低,体系稳定性越强。

将胆固醇修饰的发光手性剂掺杂到 5CB 主体中,通过手性组装有望形成 CLLC,从而获得高性能 CPL。唐本忠课题组^[35]以胆固醇修饰的四苯乙烯 1 为发光手性剂,与 5CB 共组装形成具有超螺旋结构的 CLLC,从而获得性能优异的 CPL(图 1)。

成义祥课题组^[36]合成了 D-A 型发光手性剂 2 和 3,将其掺入向列相液晶 E7 中构建 CLLC,如图 2a 所示。与发光手性剂 2 相比,发光手性剂 3 具有较小的二面角,其 HTP 更高,所形成的 CLLC 能够发射更强的 CPL 信号。施加直流(DC)电场可以观察到液晶织构的转变,且随着直流电压的增大,CPL 强度逐渐降低,从而实现电场诱导的 CPL “开-关”。

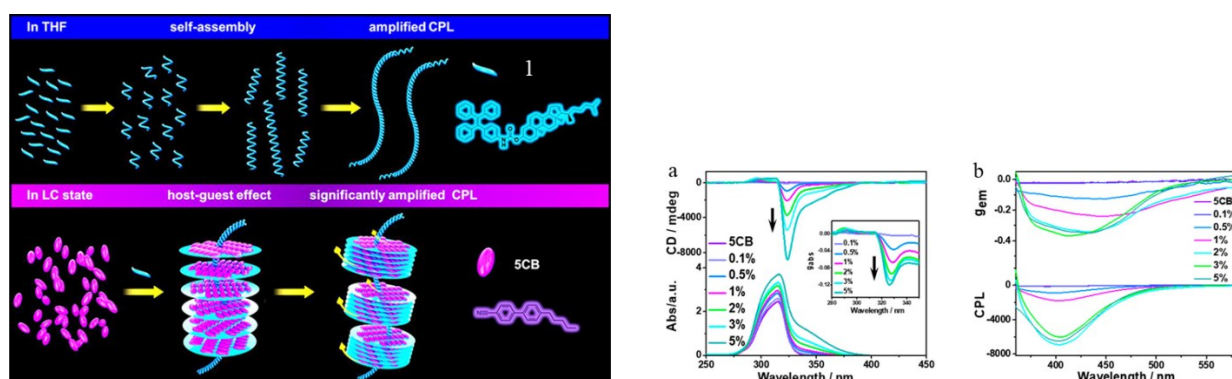


图1 通过添加手性掺杂剂1诱导非手性液晶5CB产生CPL的手性诱导示意图;不同掺杂比例下:(a)圆二色光谱CD以及(b)圆偏振发光光谱图^[35]

Fig. 1 Chiral induction diagram of CPL generated by adding chiral dopant 1 to induce achiral liquid crystal 5CB; (a) Circular dichroism spectrum CD and (b) circularly polarized emission spectrum under different doping ratios^[35]

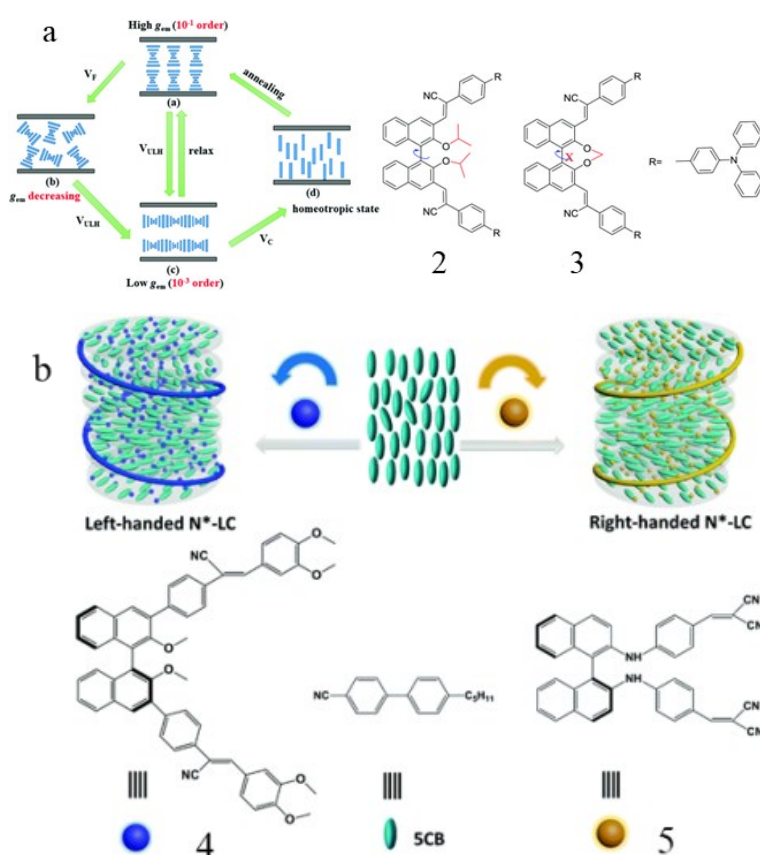


图2 (a) 化合物2和3的分子结构;在施加直流电场的情况下,可循环使用电场诱导CPL强度切换的示意图^[36]和(b)展示了相同(R)构型的手性掺杂剂4和5,掺杂到液晶5CB中所构建的手性发光液晶示意图^[37]

Fig. 2 (a) Molecular structures of compounds 2 and 3; A schematic diagram showing the cyclic electric field-induced CPL intensity switching under the application of a DC electric field^[36] and (b) a schematic diagram showing the chiral light-emitting liquid crystals constructed by doping chiral dopants 4 and 5 of the same (R) configuration into liquid crystal 5CB^[37]

上述工作验证了该构筑策略在实现CPL发射方面的可行性,为后续液晶圆偏振发光材料的发展奠定了基础。然而,为进一步提高体系的发光

效率及圆偏振发光性能,研究者围绕分子结构优化、手性传递效率提升等方面进行了进一步探索。基于此,段鹏飞课题组^[37]设计合成了含有不同取

代基的联萘衍生物手性诱导剂,并系统研究了取代基对CPL性能的影响规律,如图2b所示。结果表明,R构型的化合物4和5在5CB中表现出相反的诱导行为。化合物4在5CB中诱导产生左旋CPL,而化合物5却诱导产生右旋CPL。这种不同的手性诱导现象由联萘衍生物二面角差异所致,可用于CPL性能调控。

2.2 本征型手性发光液晶

与掺杂型CLLC相比,本征型CLLC具有结构

稳定、无相分离等优势,但也面临复杂的化学合成(需手性拆分)、难以预测的液晶相行为及发光波长调控难度大等问题。

余振强课题组^[38]将柔性轴手性骨架亚烷基环己烷与氰基二苯乙烯(CS)结合获得了手性发光液晶6,实现了 Φ_{PL} 高达98.4%和 g_{lum} 值达 2.1×10^{-2} 的CPL,如图3所示。这一分子设计在获得优异CPL性能的同时,通过调控冷却速率形成手性发光液晶和手性晶体,实现了基于相转变的手性翻转。

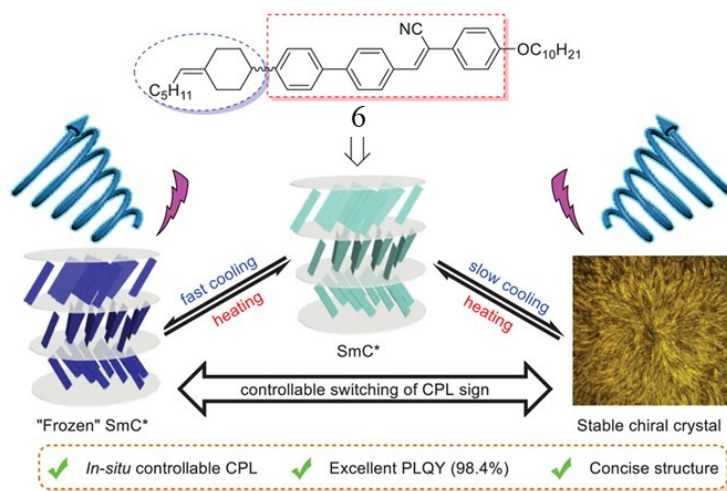


图3 化合物6的化学结构;通过调控冷却速率实现对手性相的调控^[38]

Fig. 3 Chemical structure of compound 6; control of the chiral phase by regulating the cooling rate^[38]

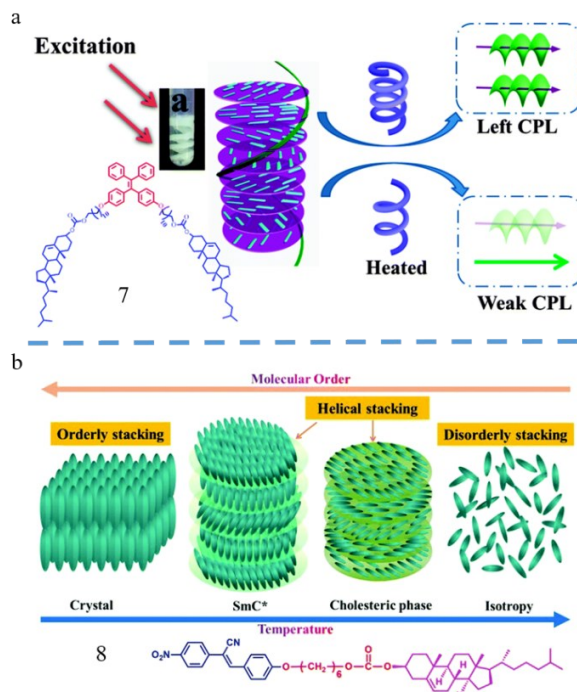


图4 (a) 化合物7的结构及产生CPL的示意图^[39]和(b) 化合物8的分子结构及其在不同相态下的聚集结构^[40]

Fig. 4 (a) Structure of compound 7 and schematic diagram of CPL generation^[39] and (b) molecular structure of compound 8 and its aggregation structure in different phases^[40]

路庆华团队^[39]将两个胆固醇单元通过一定长度的烷基链连接到四苯乙烯上,合成了一种手性发光分子7,通过偏光显微镜(POM)的典型焦锥

纹理织构证实7能形成手性液晶相(图4a)。其不对称因子可达到 2×10^{-2} 。同时,可以通过温度调控实现7的CPL性能调控。

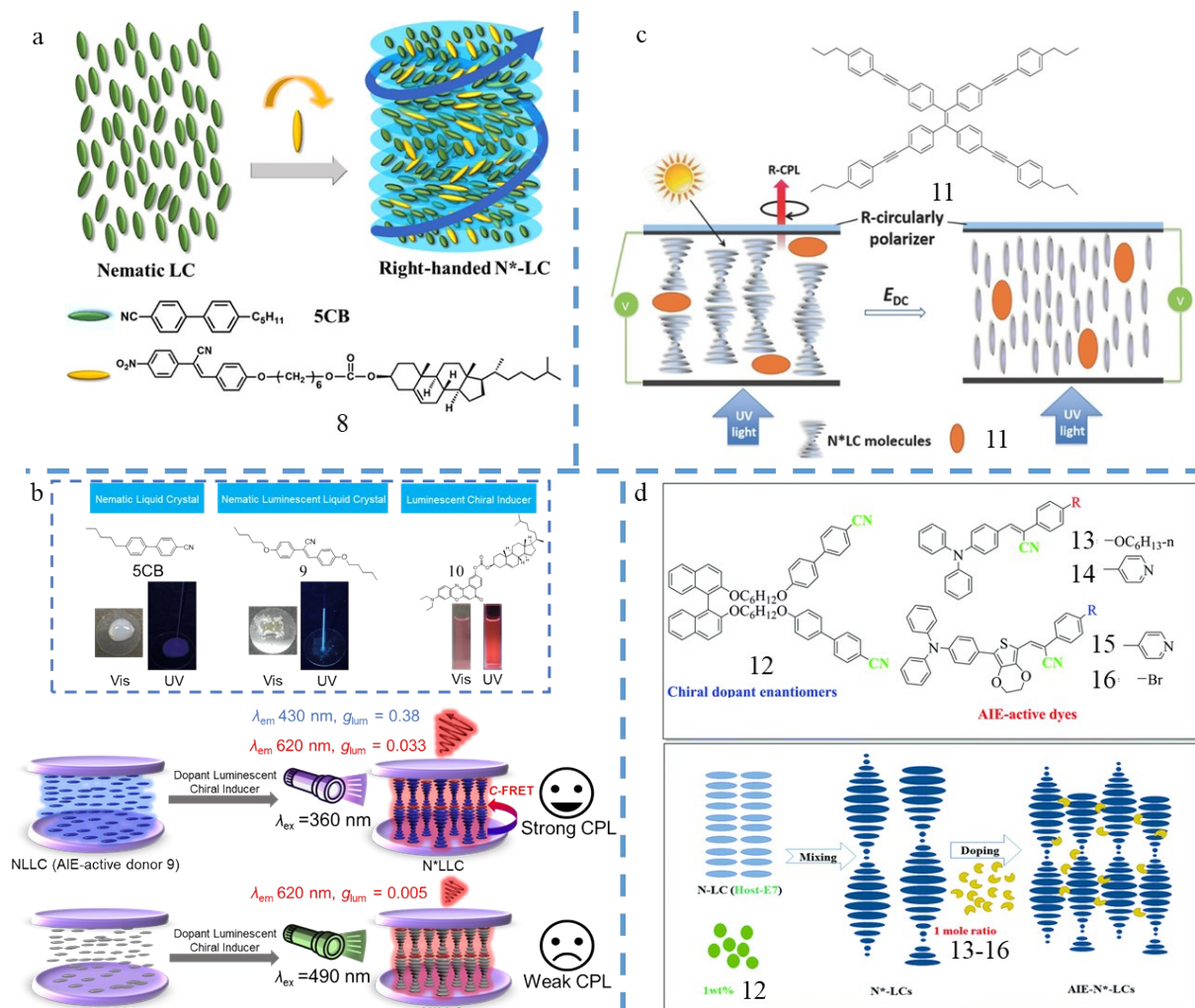


图5 (a) 展示了手性发光液晶的螺旋组装的形成过程,以及手性掺杂剂8的分子结构^[44] (b) 向列相发光液晶9以及发光手性剂10的分子结构;构建CLLC策略的示意图^[45] (c) 展示了电场“关闭”和“开启”状态下,液晶内分子排列的示意图;以及AIE发光体11的分子结构^[46] (d) AIE发光体13-16和手性掺杂剂12的结构式;以及构建AIE手性发光液晶的示意图^[47]

Fig. 5 (a) The process of forming a helical assembly of a chiral luminescent liquid crystal is shown, as well as the molecular structure of chiral dopant 8^[44], (b) the molecular structure of nematic luminescent liquid crystal 9 and luminescent chiral dopant 10; A schematic diagram of the CLLC strategy is shown^[45], (c) a schematic diagram of the molecular arrangement in the liquid crystal under the "off" and "on" electric field states is shown, as well as the molecular structure of AIE luminescent material 11^[46], (d) the structural formulas of AIE luminescent materials 13-16 and chiral dopant 12; and a schematic diagram of the construction of AIE chiral luminescent liquid crystal^[47]

张海良团队^[40]报道了一种能发射高效CPL的手性发光液晶8(图4b)。在退火过程中,依次观察到了胆甾相、手性近晶C(SmC*)相和结晶相。通过液氮对胆甾相和SmC*相的快速冷却获得了室温稳定性胆甾相膜、SmC*膜和结晶膜。8在胆甾相和SmC*膜中表现出较大的发光量子效率和

较高的不对称因子,但在结晶状态中未检测到CPL信号。基于8的热驱动相变特性,可以有效通过相变调控CPL。

2.3 两种策略的适用范围与性能对比

掺杂型和本征型CLLC的核心构筑策略在制备过程、性能表现及应用场景等方面存在明显差

异。掺杂型 CLLC 主要通过发光手性掺杂剂与非手性向列相液晶共混而成,本征型 CLLC 则通过自组装实现手性传递。掺杂型 CLLC 制备简便高效,易于实现性能调控、高 g_{lum} 值(目前已报道接近理论极限)。然而,掺杂型 CLLC 面临高掺杂浓度引起的相分离、热稳定性以及浓度淬灭效应等挑战。本征型 CLLC 通过共价键将手性单元、AIE 基元与液晶基元整合于单一分子中,通过手性诱导驱动超分子螺旋自组装。该方法结构稳定,无相分离风险,便于深入研究手性中心-发光核-液晶间的调控规律,而本征型 CLLC 存在合成难度高,液晶相行为难以预测等挑战。目前 g_{lum} 值多集中在 10^{-3} 到 10^{-1} 量级,在手性放大方面仍有较大提升空间。

总之,掺杂法简单便捷可获得高性能 CPL,适合将非手性发光体引入手性环境实现 CPL,而本征法能实现稳定性更高的 CPL 发射。两种策略近年来呈现融合发展趋势:以本征法获得结构稳定的手性骨架,再通过掺杂实现功能组分的性能拓展;以掺杂法筛选高性能组合,再通过本征法优化结构通过共价键整合为单一分子。这种协同方式有助于推动 CLLC 材料从基础研究走向应用研究。

当前 CLLC 体系的圆偏振发光性能提升主要通过外部调控与分子结构设计两种途径实现。一方面,基于动态刺激响应、荧光共振能量转移(FRET)及 PBG 增强等外部调控策略,能够在保持液晶有序结构的基础上实现发射波长、发光强度及不对称因子的有效优化,为多功能 CPL 材料构筑提供了重要思路;另一方面,从分子结构层面出发,通过合理设计手性单元、发光基元及液晶基元之间的组合方式,则能够从根本上调控体系的液晶相行为、手性传递效率,从而实现更加稳定且高效的 CPL 输出。

3 小分子手性发光液晶的构筑策略与圆偏振发光性能

小分子发光液晶体系因结构明确、易于修饰及可控自组装等特点,成为手性发光液晶体系的理想平台^[41-43]。根据手性来源不同,小分子手性发光液晶主要包括手性掺杂型 CLLC、发光掺杂型 CLLC 和本征型 CLLC 三类。根据构筑方式及手性来源的不同,小分子 CLLC 体系可进一步划分

为掺杂型和本征型两大类。其中,掺杂型体系通过将手性组分与发光组分引入非手性液晶主体中构筑,依据发光单元是否具有手性,又可细分为手性发光掺杂体系和非手性发光掺杂体系;本征型体系则通过共价键将手性单元、发光基元及液晶基元整合于单一分子中,并依赖分子自组装形成有序手性液晶结构。相比之下,掺杂型体系具有构筑简便、性能可调的优势,而本征型体系则表现出更高的结构稳定性和更明确的结构-性能关联规律。

3.1 手性发光掺杂型 CLLC

手性掺杂型 CLLCs 是研究最早的小分子 CLLC 体系。将 AIE 分子和手性分子掺杂到非手性向列相液晶主体中,通过分子间非共价相互作用诱导形成胆甾相螺旋结构。张海良团队^[44]构建了一个可电控和热控切换的 AIE 型 CPL 体系,如图 5a 所示。将 AIE 型发光手性掺杂剂 8 掺杂到 5CB 中成功构建了胆甾相发光液晶(CLLC)。利用 CLLC 的超螺旋结构使其手性得到放大,获得了更高的 g_{lum} 值。此外,将 8 的含量为 6 wt% 的 CLLC 注入到涂有 ITO 膜的液晶盒中,并施加直流(DC)电场。通过温度和电压的调节,实现了 g_{lum} 值的“开启”和“关闭”状态之间切换。

将发光手性剂与 AIE 特性的非手性向列相发光液晶掺杂,可用于构建 CLLC。余振强课题组^[45]将发光手性剂 10 掺杂到 AIE 特性的本征向列相发光液晶 9 中,构建了二元 CLLC 体系,如图 5b 所示。结果表明,9 不仅表现出良好的室温向列相特性,而且还是一个有效的能量供体,通过 FRET 将能量传递给 10。发光手性剂 10 有效地诱导 9 形成超螺旋结构,显著增强了 CPL 信号。该策略由于没有形成可

见光范围的 PBG,有效排除了选择性反射引起的能量损失。

3.2 非手性发光掺杂型 CLLC

将非手性 AIE 基团引入 CLLC 的分子设计以实现 CLLC,是近年来发展高性能 CPL 的主要策略。该策略的核心优势在于免去了手性发光体的复杂合成,可充分利用现有的 AIE 分子库,从而拓展了手性发光液晶的材料选择范围。

唐本忠课题组^[46]报道了一种基于四苯乙烯的非手性发射体 11,将其掺入 CLC 中以诱导产生 CPL,如图 5c 所示。将不同浓度的手性掺杂剂

CB-15 掺入向列相液晶 SLC1717 中, 制备了四种类型的 CLLCs。将 0.5 wt% 的 11 掺入 CLCs 中, 其 PBG 没有造成破坏, 从而制备了高性能 CPL 的 CLLCs (11-CLCs)。在施加直流电场后 PBG 破坏后, CPL 消失, 其荧光强度也因电场诱导的液晶分子各向同性排列而发生变化。得益于这种切换机制, 成功构建了一种在自然光和紫外线照射下都能工作的光致发光 CLLC 显示器。

成义祥课题组^[47]将基于联萘单元的手性 AIE 分子 12 掺杂至液晶 E7 中, 通过联萘单元与 E7 中联苯单元的 π - π 堆积及氰基间的偶极相互作用,

成功构建了胆甾相液晶 (CLCs), 如图 5d 所示。进一步向础上, 实现了不同波段的光, 其不对称因子 g_{lum} 值高达 1.42。

3.3 本征型 CLLC

通过共价键将手性单元与 AIE 发光核结合构建手性发光液晶, 经手性自组装实现高效 CPL, 可通过温度或机械力共同调控其手性性质。杨发福课题组^[48]将氰基二苯乙烯 (CS) 发光核与胆固醇相连得到了 CLLC 分子 17 和 18, 通过氢键诱导实现分子自组装后, 实现了机械力和温度调控的 CPL, 如图 6a 所示。

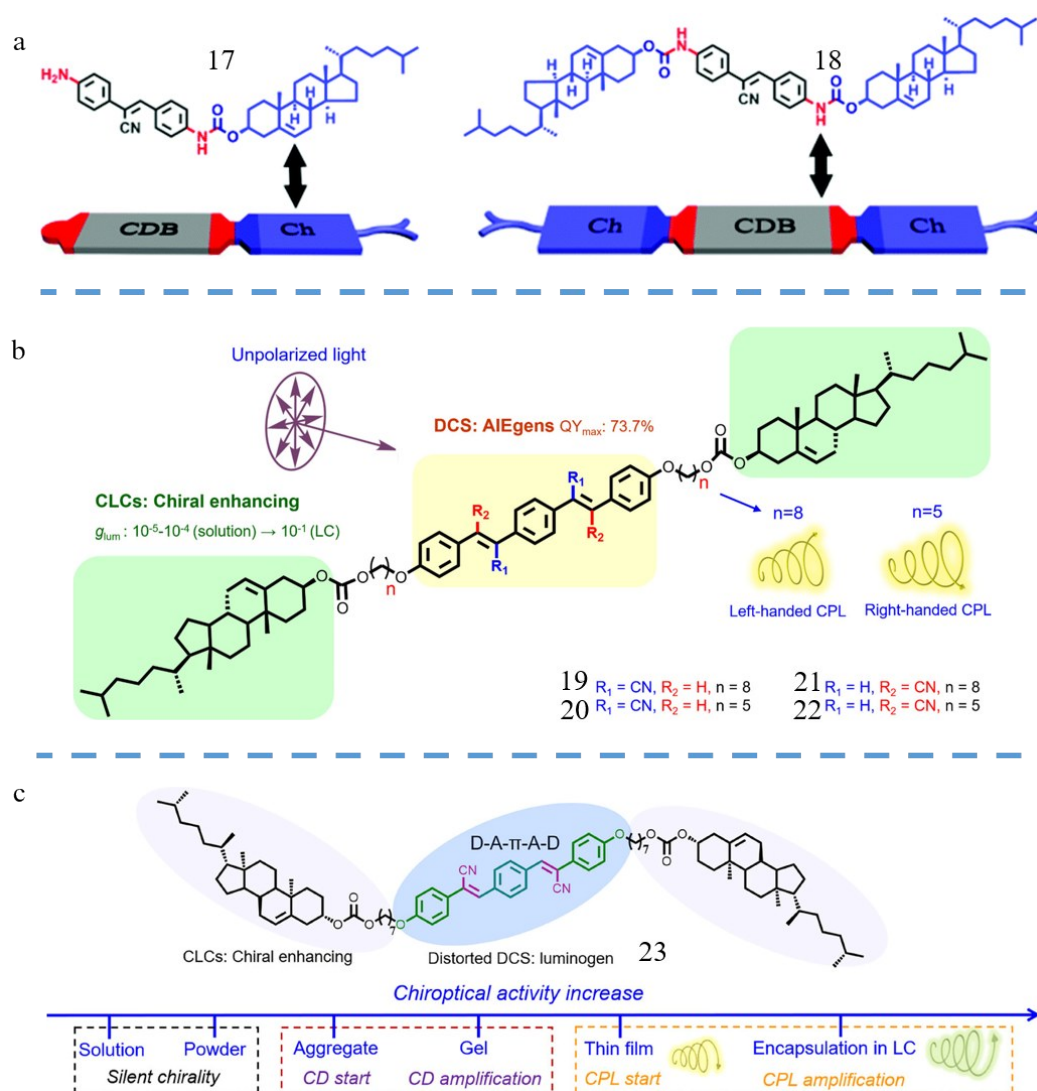


图 6 (a) 化合物 17 和 18 的分子结构^[48] (b) 手性发光液晶 19-22 的分子结构^[49] (c) 化合物 23 的分子结构以及不同状态下的手性性质^[50]

Fig. 6 (a) Molecular structures of compounds 17 and 18^[48], (b) molecular structures of chiral luminescent liquid crystals 19-22^[49], (c) molecular structure of compound 23 and its chiral properties in different states^[50]

唐本忠团队^[49]通过不同长度间隔基将二氰基二苯乙烯基苯 (DCS) 发光核与胆固醇连接, 获得

了高性能的 CPL 材料 19-22, 如图 6b 所示。该类手性发光液晶在聚集态下实现了高达 73.7% 的

发光量子效率。在形成胆甾相液晶后,其不对称因子显著增加到 1.1×10^{-1} 。这种手性自组装通过分子间 π - π 堆积、范德华力及液晶相形成过程中的熵驱动协同完成的。通过改变烷基链长度和氰基的连接位点,可以精确调控 CPL 信号的手性旋向。化合物 19 和 21 表现出左旋圆偏振发光,化合物 20 和 22 则显示出右旋圆偏振发光。该研究实现了兼具高不对称因子 1.1×10^{-1} 和高量子产率 73.7% 的 CPL 材料。

吴玥课题组^[50]将 DCS 与胆固醇通过共价连接得到手性发光液晶 23,实现了多种状态(溶液态、粉末态、聚集态、凝胶态、薄膜态和液晶态)的高荧光量子产率(36%-74%),如图 6c 所示。

随着组装体尺寸的连续增加(从溶液态的分子到液晶态的组装体),其圆二色性 CD 和 CPL 均得到增强,表明了组装体尺寸与手性光学性质之间存在一定的关联。

3.4 分子结构与手性光学性能关系

上述实例表明手性发光液晶体系的性能在一定程度上取决于分子结构。因此,深入理解分子结构与手性光学性能关系是理性设计高性能手性发光材料的基础。柔性链长度、手性中心数量与位置、AIE 发光核的平面性等因素通过液晶态中的分子堆积方式,综合决定其手性光学性能^[51-54]。柔性烷基链不仅决定了液晶相区间,还直接影响手性传递效率。一般而言,烷基链增长会导致清亮点温度降低,适当长度的柔性链有助于分子在液晶相中的有序排列。然而,过长的柔性链会削弱刚性发光核之间的有效 π - π 相互作用,降低分子堆积紧密程度,从而影响手性传递效率和发光效率。因此,柔性链长度需要在液晶有序性与分子聚集之间达到平衡;手性中心的数量和位置决定了超分子螺旋的手性偏向。一般而言,多手性中心的引入能够增强整体分子的手性偏向性,提高超分子螺旋结构形成能力,从而提升手性传递效率及 CPL 信号强度。同时,即使是同一构型的手性中心,其在分子骨架中的连接位置不同,也可诱导出不同的超分子螺旋,这一现象源于手性中心对超分子整体的调控差异;AIE 发光核的结构特征会影响聚集态发光效率以及 CPL 性能^[55-57]。TPE 的螺旋桨构型赋予其典型的 AIE 特性,而氰基二苯乙烯则兼具 AIE 特性和液晶性,因其适中的平面性和可修饰性,在保持高发光效率的同时

更易于形成有序液晶相。

总之,分子结构与手性光学性能之间存在紧密的关联。深入理解它们之间的关系,将为高性能手性发光液晶的理性设计提供坚实的理论指导。

4 CLLC 的性能调控与功能化

CLLC 的优势不仅在于能够实现高 g_{lum} 值,更在于其螺旋超结构对外界刺激的高度敏感性,可作为 CPL 性能动态调控的理想平台。在本节中,将重点围绕 CPL 动态开关、FRET 增强型 CPL 以及 PBG 边缘增强三个方向展开介绍。

4.1 动态 CPL 开关

动态 CPL 开关是手性发光液晶功能化研究的重要方向之一,其调控维度涉及 CPL“开启”和“关闭”、手性信号翻转、波长和强度协同调谐等多种形式。根据调控机制的不同,现有研究可分别归纳为:电场或温度诱导的手性调控、光/热响应手性开关诱导的手性调控、基于二色性染料的 CPL 调控。

邓建平课题组^[58]成功实现了从小分子单体的点手性到非荧光手性聚合物 24 的手性转移,再到液晶的超分子手性的三级手性转移和放大,如图 7a 所示。将聚合物 24 掺入 5CB,通过引入非手性发光团,成功构建了全色 CPL 的 CLCs。24 的螺旋扭转力(HTP)是其相应单体的五倍。利用超分子手性自组装和选择性反射机制,最大 g_{lum} 值和量子效率分别达到 1.54 和 63.8%。通过上述两种机制的协同作用,实现了白光 CPL 的制备, g_{lum} 达到 1.46。此外,还制备了电刺激响应型 CPL 器件,开发了防伪安全、多级信息存储和加密以及手性逻辑门应用。

为进一步拓展非手性发光体在 CLCs 中的应用,Imai 课题组^[59]采用非手性荧光分子芘(Pyrene)和芘(Perylene)作为发光单元,分别掺杂至由 5CB 与手性液晶 25 构筑的胆甾相液晶体系中,如图 7b 所示。尽管两种发光分子本身均不具有手性,但在手性液晶螺旋结构诱导下均表现出明显的圆偏振发光特性,其 CPL 旋向可通过改变 25 的手性构型进行调控。进一步研究发现,在直流电场作用下,该体系能够实现 CPL 信号的连续可逆开关,表现出良好的电响应调控能力,为电控 CPL 器件的发展提供了新的设计思路。

郭金宝团队^[60]设计并开发了两种基于卤键荧

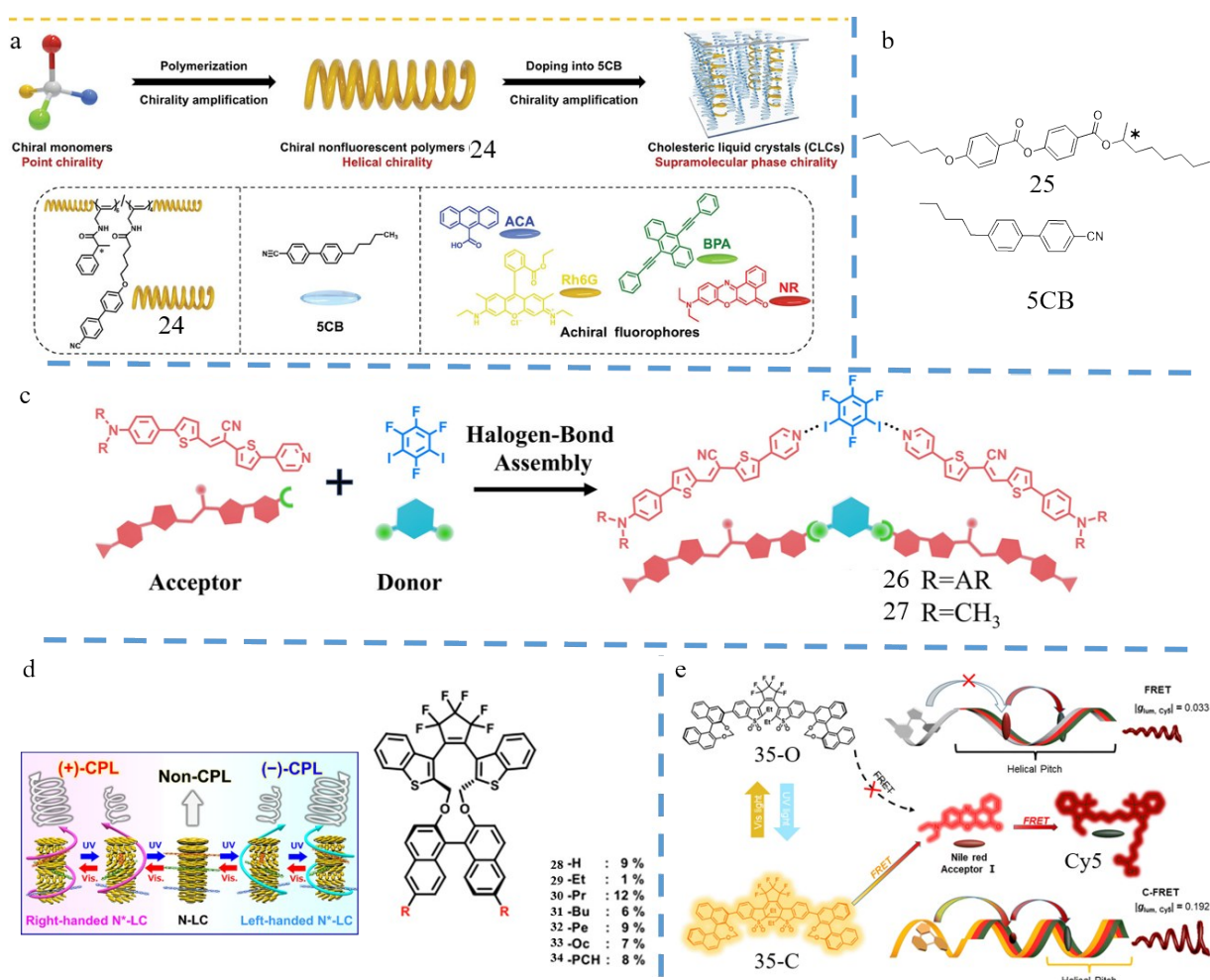


图7 (a) 展示了手性发光液晶的超分子组装体的形成过程, 以及化合物 24 的分子结构^[58] (b) 化合物 25 以及液晶 5CB 的分子结构^[59] (c) 卤键自组装路线以及化合物 26, 27 的分子结构^[60] (d) 手性化合物 28-34 的分子结构^[61] (e) 展示了 35-O/35-C 的异构化过程, 动态调控能量转移以及化合物 35-O/35-C 的分子结构^[62]

Fig. 7 (a) The formation process of supramolecular assemblies of chiral luminescent liquid crystals is shown, as well as the molecular structure of compound 24^[58], (b) the molecular structures of compound 25 and liquid crystal 5CB^[59] (c) the halogen bond self-assembly route, and the molecular structures of compounds 26 and 27^[60], (d) the molecular structures of chiral compounds 28-34^[61] (e) the 35-O/35-C isomerization process is shown, the dynamic regulation of energy transfer is shown, and the molecular structure of compound 35-O/35-C^[62]

光分子开关 26 和 27, 如图 7c 所示。用特定波段的紫外线/可见光激发, 实现了可控且可逆的 Z/E 异构化。将这些开关掺杂到蓝相液晶(BPLC)中, 其蓝相的温度范围得到了显著性增大。在掺杂 26 的蓝相液晶体系中, 在紫外线/可见光照射以及冷却/加热过程中,

实现了 CPL 信号的可逆翻转。通过光/热诱导调控 CPL 信号, 为动态调控 CPL 体系提供了新的可能性。

Akagi 等人^[61]设计合成了手性光响应分子 28-34, 并作为手性掺杂剂构筑光响应胆甾相液晶体系, 如图 7d 所示。研究表明, 紫外/可见光交替照

射诱导手性光响应分子发生可逆光异构化, 伴随 HTP 变化, 实现胆甾相液晶螺旋旋向的可逆翻转。进一步将红、绿、蓝三种非手性共轭聚合物分别掺杂至上述体系中, 均获得显著 CPL 信号, 并实现左、右旋白光 CPL, 其 g_{lum} 可达 0.2 - 1.0。该工作通过光响应分子的手性转移, 实现了液晶螺旋结构与 CPL 输出的协同调控, 为智能显示与动态光子器件提供了新的设计策略。

段鹏飞课题组^[62]在胆甾相液晶中构建了一种具有光响应的 CPL 体系, 如图 7e 所示。将手性剂 35-O/35-C 掺杂到向列相液晶主体 E7 中, 通过光照调控闭环和开环转换, 实现了动态可调的 CPL

和能量转移模式。它能够在光的控制下,在不同手性环境条件中有效地传递手性和能量。这种由受体 Cy5 产生的 CPL 所导致的连续能量传递得到了逐步增强,并且该过程可以通过手性环境的变化而“开启”和“关闭”。

除传统光响应手性分子外,光驱动分子马达也为 CLLC 体系的动态调控提供了新的策略。Fe-ringa 课题组^[63]将光驱动分子马达 36 作为光响应

手性掺杂剂引入胆甾相液晶体系,并结合非手性荧光染料构筑了光控圆偏振发光体系,如图 8a 所示。在光激发下,分子马达发生可逆构型转变,进而调控液晶螺旋结构的旋向,实现左、右旋 CPL 之间的可逆切换。同时,通过改变不同分子马达及荧光染料的组合,还能够实现 CPL 发射颜色及手性的调控,为三维立体显示器件的发展提供了新的设计思路。

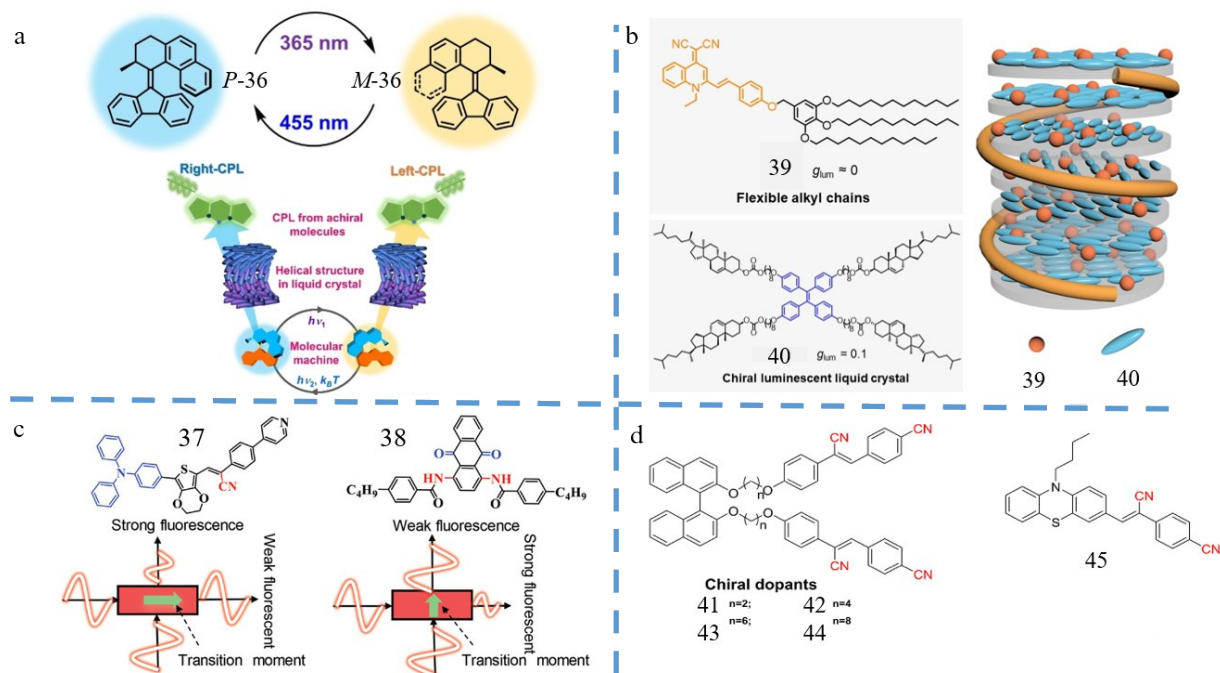


图 8 (a) 化合物 P-36 和 M-36 的分子结构^[63] (b) 化合物 39 和 40 的分子结构;以及 C-FRET 胆甾相液晶体系的构建示意图^[67] (c) 化合物 37 和 38 的分子结构^[64] (d) 手性掺杂剂 41-44, 非手性受体的分子结构 45^[68]

Fig. 8 (a) The molecular structures of compounds P-36 and M-36^[63]; (b) the molecular structures of compounds 39, 40; and schematic diagram of the construction of the C-FRET cholesteric liquid crystal system^[67], (c) the molecular structures of compounds 37 and 38^[64] (d) the molecular structures of chiral dopants 41-44 and achiral acceptor 45^[68]

棒状结构二色性染料分子的跃迁偶极矩矢量 (TDM) 在分子长轴和分子短轴表现出荧光各向异性。基于此,成义祥课题组^[64]制备了一对供体-受体型(D-A)非手性二色性染料分子,如图 8c 中 37 和 38 所示。37 的 TDM 向量与分子长轴平行,而 38 的 TDM 向量与分子长轴垂直。将 37 或 38 与手性掺杂剂掺入非手性向列相液晶 SLC1717 中制得 CLLC。通过改变 37:38 的质量比,实现了手性旋向和 g_{lum} 可调控的 CPL,其最大 g_{lum} 达到了 0.71。尽管通过 CLLC 中染料分子 TDM 的向量能够调节 CPL 的手性旋向及 g_{lum} 值,但染料分子并未改变 CLLC 的螺旋方向。这种通过调节染料分子二色性实现 CPL 动态调控有望用于 CPL 显示器和信息存储。

4.2 FRET 增强型 CPL

荧光共振能量转移(FRET)在 CLC 体系中展现出独特优势:手性给体在能量转移过程中将手性信息传递给非手性受体,能同时实现手性信号的传递与放大^[65-66],可以通过分子间协同作用实现高效 CPL 性能,有望避免复杂的手性发光分子的合成。

余振强课题组^[67]以发光手性液晶分子 40 作为能量和手性供体,非手性发光分子 39 作为能量和手性受体构建 FRET 体系,通过能量和手性协同转移,实现了圆偏振荧光共振能量转移(C-FRET),如图 8b 所示。热退火后的供体分子 40 在 472 nm 处显示出强的左旋 CPL 信号,但在 330 nm 激发下,非手性的受体分子 39 获得了较强的 CPL 信号,同时伴随供体 CPL 的猝灭以及 g_{lum} 峰值红

移至 570 nm,表明在组装体系内发生了有效的手性转移。偶极-偶极相互作用诱导的 C-FRET 机制促进了有序的 CLC 体系内的非辐射能量转移,效率高达 50.8%, g_{lum} 值也提升至 0.12。当供体-受体距离超过 Förster 半径时,能量转移受到抑制,证明了 FRET 机制的主导作用,从而为手性功能材料中的能量转移赋予了新的思路。

成义祥课题组^[68]构建了一种基于分子间 FRET 机制的三元手性 CLLC 体系。在液晶环境中,通过手性供体与非手性受体之间的的手性诱导,成功获得了超强 CPL。将四种手性聚集诱导发光(AIE)特性的供体(41-44)作为手性发光掺杂剂和能量供体,以及长波长的非手性 AIE 特性受体(45)掺入商业向列相液晶 E7 主体中,构建了具有

CPL 性能的三元 CLLC,如图 8d 所示。其中基于分子间 FRET 机制的三元手性发光液晶能够发射高强度红光 CPL,量子产率为 16.56%,并通过分子间的能量转移以及由 CLC 的超分子自组装产生的手性诱导,其不对称因子可提升至 1.51。

4.3 PBG 增强型 CPL

在 CLC 体系中,周期性螺旋排列形成有序光子晶体结构,其特征性的选择性反射来源于 PBG 的形成。当入射光的旋向与 CLC 螺旋方向一致时,特定波长范围内的光将被选择性反射,而相反旋向的圆偏振光则可透过。这一特性使 CLC 体系能够对发光过程中的左右旋圆偏振光进行差异化调控,从而有效增强圆偏振发光信号。可实现 g_{lum} 值的超强放大。

表 1 代表性手性发光液晶体系的圆偏振发光性能汇总

Tab. 1 Summary of circularly polarized luminescence properties of representative chiral luminescent liquid crystal systems

手性发光液晶体系	发光不对称因子(g_{lum})	量子产率($\Phi_{PL}(\%)$)	文献
2/E7 (掺杂型)	-0.20/+0.26	21.32	[36]
3/E7 (掺杂型)	-0.83/+0.86	29.51	[36]
6 (本征型)	0.021	98.4	[38]
8 (本征型) State A	0	38.4	[40]
8 (本征型) State B	0.025	18.9	[40]
8 (本征型) State C	0.15	15.2	[40]
9/10 (掺杂型)	0.38	14	[45]
21 (本征型)	0.11	48.4	[49]
23 (本征型) thin film	0.03	36	[50]
37/SLC1717 (掺杂型)	+0.71/-0.66	20.16	[64]
38/SLC1717 (掺杂型)	-0.53/+0.511	2.03	[64]
43/45/E7 (掺杂型)	1.51	16.56	[68]

实现 PBG 与发射波长的精准匹配,关键在于 CLC 螺距的精确调控。通过调控手性掺杂剂浓度、分子结构及温度等参数改变液晶螺距,可以实现 PBG 位置的精确调控。当 PBG 中心与发光分子的发射峰发生有效重叠时,可提高 g_{lum} 值。当前调控 CLC 螺距主要包括手性剂掺杂浓度的调控、温度/电场等外界刺激调控、掺杂手性光开关等手段。手性剂掺杂浓度的调控是通过向 CLC 中增加手性掺杂剂的浓度,进而使 CLC 螺距减小,从而实现 PBG 随浓度升高发生蓝移。这种方式的弊端在于只能通过增加手性剂浓度使 PBG 单向移动,难以实现波长红移调控;温度/电场等外界刺激可改变液晶分子的有序程度或手性剂的螺旋扭转力(HTP),实现对螺距的动态可逆调控。温度升高通常导致螺距增大,使 PBG 波长红移;电场可诱导液晶分子的螺旋排列转变为各向同性,从而使 PBG 消失;通过掺杂手性光开关,在

CLC 中构建 PBG,其优势在于可实现 PBG 的宽范围波长调控,进而实现 CPL 波长及手性的多维度动态调控。

段鹏飞课题组^[69]设计合成了一系列手性发光掺杂剂 46-49,如图 9a 所示。通过调控 R-46 与液晶 5CB 的比例,实现了超分子手性以及 CPL 的多级反转。当 R-46 含量从 1 wt% 增加到 3 wt% 时,液晶的螺旋方向由左旋翻转为右旋,相应地,CPL 也由左旋转变为右旋。由于其强大的螺旋扭转能力,当 R-46 含量增加到 4 wt% 时,液晶的 PBG 与掺杂剂的发射光谱相匹配,导致 CPL 再次发生翻转,其 g_{lum} 高达 1.2,实现了 CPL 的多级翻转。虽然掺杂型 CLLC 能有效提升 CPL 不对称因子,但高掺杂浓度也使 CLLC 存在相分离、浓度淬灭及 PBG 与发光波长匹配困难等挑战。

通过温度控制也能够实现 PBG 波长调控。Akagi 等人^[70]构建了一种基于双层 CLC 体系与发

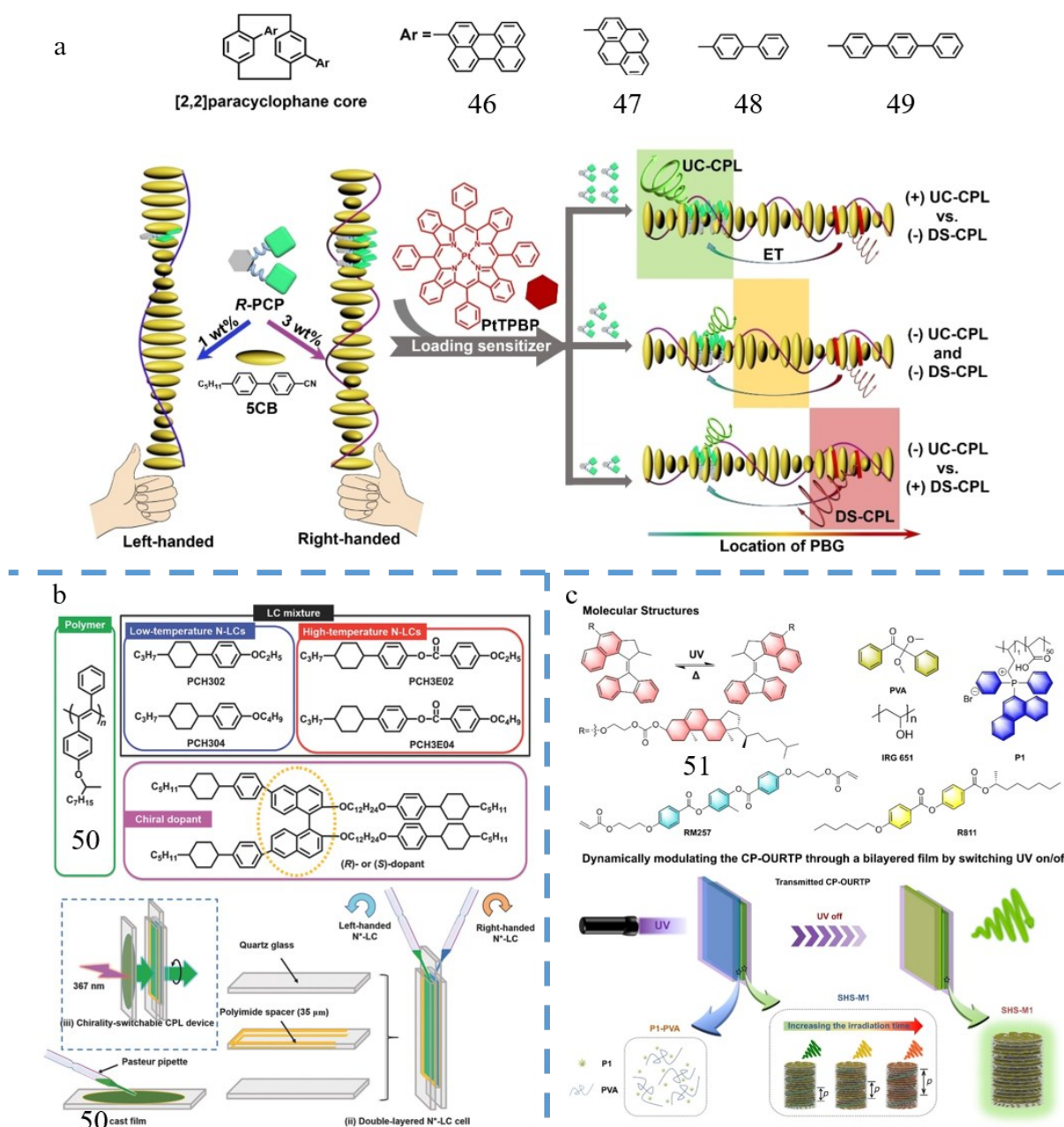


图9 (a) 展示了手性发光液晶中手性发光掺杂剂的不同浓度可对PBG波长调谐,以及手性发光掺杂剂46-49的分子结构^[69] (b) 化合物50、低温向列相液晶(PCH302和PCH304)、高温向列相液晶(PCH3E02和PCH3E04)、(R)或(S)手性掺杂剂的分子结构以及可切换手性的双层胆甾相液晶构建示意图^[70] (c) 展示了动态调控有机圆偏振室温磷光的示意图以及化合物51、P1、PVA、IRG651、RM257和R811的分子结构^[71]

Fig. 9 (a) The molecular structures of chiral dopants (46-49) are shown, which can tune the photonic band gap (PBG) wavelength by different concentrations of chiral dopants^[69] (b) The molecular structures of compound 50, low-temperature nematic liquid crystals (PCH302 and PCH304), high-temperature nematic liquid crystals (PCH3E02 and PCH3E04), (R) or (S) chiral dopants, and a schematic diagram of the construction of a bilayer cholesteric liquid crystal with switchable chirality are shown^[70] (c) A schematic diagram of the dynamic modulation of organic circularly polarized room-temperature phosphorescence is shown, as well as the molecular structures of compounds 51, P1, PVA, IRG651, RM257, and R811^[71]

光共轭聚合物50的CPL器件,实现了可温度调控的CPL动态切换,如图9b所示。分别将R-和S-型

手性掺杂剂掺杂到双层结构中,形成了螺旋方向相反的左旋和右旋CLC。通过精确调节掺杂剂浓

度,两层CLC的PBG可以在室温下与聚合物的发射波长错开或保持一致。温度升高时,螺距变大,导致PBG红移,从而实现PBG波长的动态调控。

通过光照可以实现PBG的非侵入式动态调控。赵强团队^[71]采用光调控CLC的螺旋结构,实现了对有机室温圆偏振磷光不对称因子的可逆动态调控,如图9c所示。通过构建多层薄膜体系,包括一个掺入光驱动分子马达化合物51的螺旋超结构(SHS)层,以及一个单独的室温磷光聚合物(P1-PVA)层。在405 nm紫外光照射下,化合物51光异构与手性掺杂剂R811协同作用,导致SHS状态从右手型(P)转变为左手型(M)。这种分子结构变化促使SHS层的螺距增大,从而导致PBG红移。随着PBG从P1-PVA层的磷光发射波长远离,整体 g_{lum} 从初始的1.38降低到0.6。在40℃时停止热处理或光照,分子马达恢复到原始螺旋状态,使PBG可逆蓝移并恢复到高 g_{lum} 值。

当前,PBG增强型CPL的研究正从静态匹配向动态可调控发展,为同时实现高 g_{lum} 值、宽波长调谐和多维度调控提供了新思路。

5 总结与展望

5.1 主要进展总结

基于CLLC的CPL材料研究已取得显著进展,已经形成了从分子设计到功能应用的系统化研究。从体系构筑层面看,目前已建立起掺杂型与本征型材料体系,实现了从小分子到超分子的材料全覆盖。掺杂型通过将手性掺杂剂与非手性向列相液晶主体共混,实现了手性信息的高效传递与放大;本征型则通过共价键将手性单元、发光基团与液晶基元整合于单一分子中,能够实现CPL材料的结构稳定性。两种策略优势互补,为不同应用场景提供了多样化的选择。

在性能提升方面,CPL材料的 g_{lum} 值实现了跨越式提升。早期有机CPL材料的 g_{lum} 值多集中在 10^{-5} 到 10^{-2} 量级^[72];基于CLLC的CPL材料,目前已报道的最高 g_{lum} 值已接近理论极限 ± 2.0 。与此同时,通过引入AIE基团,有效克服了传统发光材料在聚集过程中的浓度淬灭效应,实现了高 g_{lum} 与高发光效率的协同提升。

在调控维度方面,CPL材料研究正面临静态到动态可调控的转变。基于CLLC对外界刺激的敏感性,研究人员已成功构建了温度、电场、光照、机械力等多种外界刺激响应的CPL动态开关,能

够实现CPL的开/关切换、手性旋向、发射波长及 g_{lum} 等性能调控。

在材料应用方面,CPL材料已从基础研究逐渐走向器件开发。在信息加密与防伪领域,基于CPL信号的手性光学信息,大幅提升了信息存储密度和防伪安全性。

5.2 手性发光液晶面临的挑战及解决策略

有关CLLC的研究方兴未艾。尽管基于CLLC的CPL材料研究取得了良好进展,但从基础研究向实际应用转化仍面临多重挑战。

高 g_{lum} 与高发光效率的协同提升。这是CPL材料领域长期存在的核心问题。CLLC所构建的PBG选择性反射机制能有效放大 g_{lum} 值,但难以获得较高的量子效率;PBG波长与发光体发射波长的精准匹配。实现PBG波长与发光体发射波长的精准匹配,是获得高 g_{lum} 值的前提。目前报道的大部分手性掺杂剂的螺旋扭转力(HTP)有限,难以实现PBG波长从紫外到可见光波段的连续覆盖;材料稳定性与实用化的挑战。CLLC的螺旋超结构对温度高度敏感,小幅温度波动即可引起螺距变化,进而影响CPL信号的稳定性。CLLC的螺旋结构也会发生退化,高浓度掺杂还存在相分离风险。

针对上述问题,未来手性发光液晶的发展可重点围绕以下几个方面展开:首先,通过分子结构优化及能量转移等方式,实现发光效率与圆偏振发光性能的同步提升。其次,应结合理论计算、原位表征及多尺度模拟等手段,进一步揭示液晶有序结构、分子堆积方式及非共价相互作用对手性传递和放大的影响机制,为高性能CLLC体系的理性设计提供理论指导。此外,可发展兼具发光、液晶及手性特性的本征手性发光液晶分子,减少多组分体系带来的相分离及能量损失问题,提高体系稳定性和可重复性。同时,可进一步结合光、电、热、磁等多刺激响应策略,实现圆偏振发光性能的精准、可逆调控,拓展其在智能显示、信息加密及光电子器件等领域的应用。未来,通过分子设计、超分子组装及器件工程的协同发展,有望推动高性能手性发光液晶材料向实际应用不断迈进。

总之,CLLC凭借其独特的螺旋有序结构、优异的多重刺激响应性以及高效的手性传递和放大能力,已成为开发高性能、动态可调CPL材料的理

想平台。随着 CLLC 材料的不断改进与提升,在
高密度光子信息存储、三维显示、手性光催化等众
多领域的实用化会更加广泛,必将展现出令人期
待的发展前景。

本文(补充文件及)专家审稿意见和作者回复内容
下载地址: [\(http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.2024****\)](http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.2024****) (2024**** 为文章
稿号)。

参 考 文 献:

- [1] DUAN Y Y, CHE S A. Chiral Mesostructured Inorganic Materials with Optical Chiral Response [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(51): 2205088.
- [2] BRASSELET E. Chiral nonlinear optical inheritance [J]. *Nat. Photon.*, 2024, 18(9): 892-3.
- [3] 连宁晓,黄国斌,田凯丽,等. 手性茈萘亚胺衍生物的超分子结构与圆偏振发光性质[J]. *发光学报*, 2025, 46(06): 1075-1081.
LIAN N X, HUANG G B, TIAN K L, *et al.* Supramolecular Structure and Circularly Polarized Luminescence Property of Chiral Perylene Diimide Derivatives[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(06): 1075-1081.
- [4] HAN Y X, YANG X F, WANG X L, *et al.* Real-Time Observation of Ultrafast Concerted Dynamics between Energy and Chirality Transfer by Femtosecond Time-Resolved Circular Polarization Luminescence Spectroscopy [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2025, 147(11): 9891-9.
- [5] HAN H, LEE Y J, KYHM J, *et al.* High-Performance Circularly Polarized Light-Sensing Near-Infrared Organic Phototransistors for Optoelectronic Cryptographic Primitives [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(52): 2006236.
- [6] WANG J Y, LU H P, PAN X, *et al.* Spin-Dependent Photovoltaic and Photogalvanic Responses of Optoelectronic Devices Based on Chiral Two-Dimensional Hybrid Organic - Inorganic Perovskites [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(1): 588-95.
- [7] SANG Y T, HAN J L, ZHAO T H, *et al.* Circularly Polarized Luminescence in Nanoassemblies: Generation, Amplification, and Application [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(41): 1900110.
- [8] ZHANG C, LI S, DONG X Y, *et al.* Circularly polarized luminescence of agglomerate emitters [J]. *Aggregate*, 2021, 2(5): e48.
- [9] LI Q H, ZHENG S W, GAO W T, *et al.* Circularly Polarized Ultraviolet Light-Activated Asymmetric Photopolymerization for the Synthesis of CPL-Active Materials [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(19): e202503197.
- [10] YANG B W, YANG X F, SHI Y H, *et al.* Upconversion/Downshifting Circularly Polarized Luminescence over 1200 nm in a Single Nanoparticle for Optical Anticounterfeiting and Information Encryption [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(4): e202417223.
- [11] LIN S Y, TANG Y Q, KANG W X, *et al.* Photo-triggered full-color circularly polarized luminescence based on photonic capsules for multilevel information encryption [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 3005.
- [12] FU K, QU D H, LIU G F, *et al.* Reversible Circularly Polarized Luminescence Inversion and Emission Color Switching in Photo-Modulated Supramolecular Polymer for Multi-Modal Information Encryption [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2024, 146(49): 33832-44.
- [13] LUO H Y, GUAN Y, HUANG J, *et al.* Circularly Polarized Luminescent Behavior of Delayed Fluorescence Liquid Crystals Based on Carbonized Polymer Dots [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(21): 2300816.
- [14] SHE P F, QIN Y Y, ZHOU Y X, *et al.* Photoactivated Circularly Polarized Luminescent Organic Radicals in Doped Amorphous Polymer [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024, 63(22): e202403660.
- [15] YANG N, ZHAO J H, LIU W, *et al.* Cholesteric Liquid Crystal Polymer Networks Doped with an Axially Chiral Fluorescent Dye: Circularly Polarized Luminescence and Anti-Counterfeiting Applications [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(2): 2402128.
- [16] RIEHL J P, RICHARDSON F S. Circularly polarized luminescence spectroscopy [J]. *Chem. Rev.*, 1986, 86(1): 1-16.
- [17] XU L T, LIU H, PENG X L, *et al.* Efficient Circularly Polarized Electroluminescence from Achiral Luminescent Materials [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(20): e202300492.
- [18] SÁNCHEZ-CARNERERO E M, MORENO F, MAROTO B L, *et al.* Circularly Polarized Luminescence by Visible-Light Absorption in a Chiral O-BODIPY Dye: Unprecedented Design of CPL Organic Molecules from Achiral Chromophores

- [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2014, 136(9): 3346-9.
- [19] LIU Y J, MA Z T, WANG Z H, *et al.* Boosting Circularly Polarized Luminescence Performance by a Double π -Helix and Heteroannulation [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2022, 144(25): 11397-404.
- [20] YU Y, XIE T T, LI J Y, *et al.* Mechanochemically Induced Circularly Polarized Luminescence from Polymers [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(50): e202517113.
- [21] NAGATA Y, UNO M, SUGINOME M, *et al.* Three-Way-Switchable (Right/Left/OFF) Selective Reflection of Circularly Polarized Light on Solid Thin Films of Helical Polymer Blends [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2016, 55(25): 7126-30.
- [22] 张友明, 邓益佳, 王练, 等. 基于四齿铂配位构型的圆偏振发光材料构筑及其深红光/近红外电致发光研究[J]. *发光学报*, 2025, 46(11): 2036-2045.
- ZHANG Y M, DENG Y J, WANG L, *et al.* Tetradentate Pt(II)-based Circularly Polarized Luminescent Materials for Deep Red/Near-infrared Electroluminescence[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(11): 2036-2045.
- [23] WILLIS B A N, SCHNABLE D, SCHLEY N D, *et al.* Spinolate Lanthanide Complexes for High Circularly Polarized Luminescence Metrics in the Visible and Near-Infrared [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2022, 144(49): 22421-5.
- [24] YANG G, ZHU L F, HU J G, *et al.* Near-Infrared Circularly Polarized Light Triggered Enantioselective Photopolymerization by Using Upconversion Nanophosphors [J]. *Chem. Eur. J.*, 2017, 23(33): 8032-8.
- [25] ZHAO T H, DUAN P F. Photon Upconversion Cooperates with Downshifting in Chiral Systems: Modulation, Amplification, and Applications of Circularly Polarized Luminescence [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024, 63(27): e202406524.
- [26] LUO J X, LI Y, LI H, *et al.* Ultrastrong Circularly Polarized Luminescence Triggered by the Synergistic Effect of Chiral Coassembly and Selective Reflective Cholesteric Liquid Crystal Film [J]. *ACS Mater. Lett.*, 2024, 6(7): 2957-63.
- [27] XU D, HUA X R, LIU C, *et al.* Induced Red Circularly Polarized Luminescence Emission Promoted by Intermolecular Förster Resonance Energy Transfer through a Cholesteric Liquid Crystal Medium [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(21): 25783-90.
- [28] WANG H R, CHEN Z, YUAN Y J, *et al.* The preparation and properties of circularly polarized luminescent liquid crystal physical gels with self-supporting performance [J]. *Soft Matter*, 2022, 18(29): 5483-91.
- [29] GAYATHRI P, QIU S Q, YU Z Q. Advances in chiral luminescent liquid crystals (CLLCs): from molecular design to applications [J]. *Mater. Horiz.*, 2025, 12(15): 5627-53.
- [30] AKAGI K, GUO S, MORI T, *et al.* Synthesis of Helical Polyacetylene in Chiral Nematic Liquid Crystals Using Crown Ether Type Binaphthyl Derivatives as Chiral Dopants [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, 127(42): 14647-54.
- [31] WU Y, LI M Q, ZHENG Z G, *et al.* Liquid Crystal Assembly for Ultra-dissymmetric Circularly Polarized Luminescence and Beyond [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2023, 145(24): 12951-66.
- [32] 王嘉慧, 曾晓璇, 吴玥, 等. 具有 pH 响应性能的聚集诱导发光材料制备与表征[J]. *发光学报*, 2021, 42(3): 311-318.
- WANG J H, ZENG X X, WU Y, *et al.* Synthesis and Characterization of pH-responsive Material with Aggregation-induced Emission Property[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(3): 311-318.
- [33] CHEN Y F, LIN J S, YUAN W Z, *et al.* 1-((12-Bromododecyl)oxy)-4-((4-(4-pentylcyclohexyl)phenyl)ethynyl) benzene: Liquid crystal with aggregation-induced emission characteristics [J]. *Sci. China Chem.*, 2013, 56(9): 1191-6.
- [34] GUO Y, SHI D, LUO Z W, *et al.* High Efficiency Luminescent Liquid Crystalline Polymers Based on Aggregation-Induced Emission and "Jacketing" Effect: Design, Synthesis, Photophysical Property, and Phase Structure [J]. *Macromolecules*, 2017, 50(24): 9607-16.
- [35] XIA Q, MENG L M, HE T C, *et al.* Direct Visualization of Chiral Amplification of Chiral Aggregation Induced Emission Molecules in Nematic Liquid Crystals [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(3): 4956-66.
- [36] LI X J, SHEN Y H, LIU K R, *et al.* Recyclable CPL switch regulated by using an applied DC electric field from chiral nematic liquid crystals (N*-LCs) [J]. *Mater. Chem. Front.*, 2020, 4(10): 2954-61.
- [37] GAO X H, QIN X J, YANG X F, *et al.* (R)-Binaphthyl derivatives as chiral dopants: substituent position controlled circularly polarized luminescence in liquid crystals [J]. *Chem. Commun.*, 2019, 55(42): 5914-7.
- [38] QIU S Q, YAO T L, XIAO Y, *et al.* Pathway-Dependent Control of Chiral Phases for Higher Performance and Inverted Circularly Polarized Luminescence [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(21): e202500956.

- [39] YE Q, ZHU D D, ZHANG H X, *et al.* Thermally tunable circular dichroism and circularly polarized luminescence of tetraphenylethene with two cholesterol pendants [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2015, 3(27): 6997-7003.
- [40] CHEN Y D, LU P, GUI Q, *et al.* Preparation of chiral luminescent liquid crystals and manipulation effect of phase structures on the circularly polarized luminescence property [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(4): 1279-86.
- [41] WU Y, JIN P W, GU K Z, *et al.* Broadening AIEgen application: rapid and portable sensing of foodstuff hazards in deep-frying oil [J]. *Chem. Commun.*, 2019, 55(28): 4087-90.
- [42] 温雪菲, 莎仁, 王建国. 刺激响应型 AIE 水凝胶研究进展[J]. *发光学报*, 2022, 43(5): 642-661.
WEN X F, SHA R, WANG J G. Research Progress of Stimuli-responsive AIE-active Hydrogels[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(5): 642-661.
- [43] LIU Y, YOU L H, LIN F X, *et al.* Highly Efficient Luminescent Liquid Crystal with Aggregation-Induced Energy Transfer [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(3): 3516-23.
- [44] CHEN Y D, LU P, LI Z Y, *et al.* Dual Stimuli-Responsive High-Efficiency Circularly Polarized Luminescence from Light-Emitting Chiral Nematic Liquid Crystals [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(50): 56604-14.
- [45] XIAO Y, PAN X L, CAO X J, *et al.* A room temperature nematic luminescent liquid crystal: a FRET donor for amplified circularly polarized luminescence [J]. *Chem. Commun.*, 2025, 61(91): 17922-5.
- [46] ZHAO D Y, HE H X, GU X G, *et al.* Circularly Polarized Luminescence and a Reflective Photoluminescent Chiral Nematic Liquid Crystal Display Based on an Aggregation-Induced Emission Luminogen [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2016, 4(4): 534-9.
- [47] LI X J, HU W R, WANG Y X, *et al.* Strong CPL of achiral AIE-active dyes induced by supramolecular self-assembly in chiral nematic liquid crystals (AIE-N*-LCs) [J]. *Chem. Commun.*, 2019, 55(35): 5179-82.
- [48] CHEN S B, JIANG S J, QIU J B, *et al.* Dual-responding circularly polarized luminescence based on mechanically and thermally induced assemblies of cyano-distyrylbenzene hydrogen bonding liquid crystals [J]. *Chem. Commun.*, 2020, 56(56): 7745-8.
- [49] WU Y, YOU L H, YU Z Q, *et al.* Rational Design of Circularly Polarized Luminescent Aggregation-Induced Emission Luminogens (AIEgens): Promoting the Dissymmetry Factor and Emission Efficiency Synchronously [J]. *ACS Mater. Lett.*, 2020, 2(5): 505-10.
- [50] LIU Z, WANG J H, LI H X, *et al.* Assembly-Sized-Controlled Chirality: Increase from Single Molecule to Micrometer Scale Enhances Chiroptical Activity [J]. *Chem. Eur. J.*, 2025, 31(60): e01694.
- [51] 张茂鑫, 乔世一, 张翱, 等. 具有聚集诱导发光功能的圆偏振发光液晶材料[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(10): 1305-1321.
ZHANG M X, QIAO S Y, ZHANG A, *et al.* Circularly polarized luminescent liquid crystal materials with aggregation-induced emission functionality[J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2023, 38(10): 1305-1321.
- [52] 张铭江, 苏蕊琪, 庄涛涛. 圆偏振发光液晶体系的构建与应用[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(1): 111-127.
ZHANG M J, SU R Q, ZHUANG T T. Endowing circularly polarized luminescence in liquid crystal composites for desired applications[J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2025, 40(1): 111-127.
- [53] QIAN G W, YANG X F, WANG X B, *et al.* Chiral Platinum-Based Metallomesogens with Highly Efficient Circularly Polarized Electroluminescence in Solution-Processed Organic Light-Emitting Diodes [J]. *Adv. Optical Mater.*, 2020, 8(20): 2000775.
- [54] HE B H, ZHONG Q H, DONG Q W, *et al.* Liquid-crystalline circularly polarised TADF emitters for high-efficiency, solution-processable organic light-emitting diodes [J]. *Mater. Horiz.*, 2024, 11(5): 1251-60.
- [55] 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*, DOI:10. 37188/CJL. 20260072.
TONG H X, LIU N, WU Z Q. Circularly polarized luminescent(CPL)materials based on helical polymers[J]. *Chin. J. Lumin.*, DOI:10. 37188/CJL. 20260072.
- [56] LIU B H, ZONG Y, LIU N, *et al.* Advances in self-assembly-based circularly polarized luminescent materials [J]. *Sci. China Chem.*, 2024, 67(10): 3247-57. .
- [57] LI S Y, DUAN B H, LIU N, *et al.* Helical Star-Shaped Bottlebrush Polymers: From Controlled Synthesis to Tunable Photoluminescence and Circularly Polarized Luminescence [J]. *ACS Macro Lett.*, 2024, 13(11): 1396-402.
- [58] WANG X J, GAO X H, ZHONG H, *et al.* Three-Level Chirality Transfer and Amplification in Liquid Crystal Supramo-

- molecular Assembly for Achieving Full-Color and White Circularly Polarized Luminescence [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37 (1): 2412805.
- [59] TERAUBO K, NAKAJIMA H, SUZUKI D, *et al.* Control of Circularly Polarized Luminescence in Extended Π -Electronic Aromatics-Based Chiral Liquid Crystals Induced by Electric Fields [J]. *ChemPhotoChem*, 2025, 9 (10): e202500112.
- [60] LI S, WANG J J, TIAN M, *et al.* A Halogen-Bonded Fluorescent Molecular Photoswitch: Transition from 3D Cubic Lattice to 1D Helical Superstructure for Polarization Inversion of Circularly Polarized Luminescence [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024, 63(36): e202405615.
- [61] YOSHIDA S, MORIKAWA S, UEDA K, *et al.* Helicity Control of Circularly Polarized Luminescence from Aromatic Conjugated Copolymers and Their Mixture Using Reversibly Photoinvertible Chiral Liquid Crystals [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(3): 3991-4002.
- [62] REN C, ZHAO T H, SHI Y H, *et al.* Cascade energy transfer augmented circular polarization in photofluorochromic cholesteric texture [J]. *Chem. Commun.*, 2023, 59(5): 567-70.
- [63] HOU J, TOYODA R, MESKERS S C J, *et al.* Programming and Dynamic Control of the Circular Polarization of Luminescence from an Achiral Fluorescent Dye in a Liquid Crystal Host by Molecular Motors [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022, 61(41): e202206310.
- [64] CHEN Y H, ZHANG Y X, LI H, *et al.* Dynamic Circularly Polarized Luminescence with Tunable Handedness and Intensity Enabled by Achiral Dichroic Dyes in Cholesteric Liquid Crystal Medium [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34 (28): 2202309.
- [65] ANDREWS D L. Chirality in fluorescence and energy transfer [J]. *Methods Appl. Fluoresc.*, 2019, 7(3): 032001.
- [66] WADE J, BRANDT J R, REGER D, *et al.* 500-Fold Amplification of Small Molecule Circularly Polarised Luminescence through Circularly Polarised FRET [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2021, 60(1): 222-7.
- [67] WU Y, YAN C X, LI X S, *et al.* Circularly Polarized Fluorescence Resonance Energy Transfer (C-FRET) for Efficient Chirality Transmission within an Intermolecular System [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2021, 60(46): 24549-57.
- [68] YAO K, SHEN Y H, LI Y, *et al.* Ultrastrong Red Circularly Polarized Luminescence Promoted from Chiral Transfer and Intermolecular Förster Resonance Energy Transfer in Ternary Chiral Emissive Nematic Liquid Crystals [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2021, 12(1): 598-603.
- [69] REN C, SUN W J, ZHAO T H, *et al.* A Single-Enantiomer Emitter Enabled Superstructural Helix Inversion for Upconverting and Downshifting Luminescence with Bidirectional Circular Polarization [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62 (50): e202315136.
- [70] YAN J, OTA F, JOSE B ASAN, *et al.* Chiroptical Resolution and Thermal Switching of Chirality in Conjugated Polymer Luminescence via Selective Reflection using a Double-Layered Cell of Chiral Nematic Liquid Crystal [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(2): 1604529.
- [71] LIU J, WU J J, WEI J, *et al.* Dynamically Modulating the Dissymmetry Factor of Circularly Polarized Organic Ultralong Room-Temperature Phosphorescence from Soft Helical Superstructures [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024, 63(12): e202319536.
- [72] YANG X F, JIN X, ZHAO T H, *et al.* Circularly polarized luminescence in chiral nematic liquid crystals: generation and amplification [J]. *Mater. Chem. Front.*, 2021, 5(13): 4821-32.



肖遥(1997-),男,河南南阳人,深圳大学博士研究生,主要从事液晶圆偏振发光及性能调控的研究。
E-mail: x13738191356@163.com



余振强(1974-),男,安徽宿松人,博士,教授,主要从事功能性液晶(发光液晶、手性液晶、高分子液晶、圆偏振发光)的相关研究。
E-mail: zqyu@szu.edu.cn