高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

综述 / Review DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26322

限域结构调控液晶弹性体的构筑及其功能应用进展

张 萌 王晓光*

(美国俄亥俄州立大学化学与生物分子工程系 哥伦布 43210)

摘 要 液晶弹性体(liquid crystal elastomers, LCEs)兼具液晶(liquid crystals, LCs)的取向有序性与交联聚合物网络的弹性，可在热、光、电、磁及化学刺激下产生大幅、可逆和可编程形变。取向结构是决定LCE驱动方式、响应效率和功能集成能力的核心因素。近年来，基于模板和空间限域的构筑策略为精准调控液晶基元取向、网络成型和宏观形变提供了重要途径。本文围绕一维、二维和三维限域结构，综述阳极氧化铝纳米孔、聚合物微沟槽、毛细管、摩擦聚酰亚胺取向层、光取向、表面化学修饰、液滴、微流控和多孔骨架等方法的构筑机制，重点分析几何约束、界面锚定和外场耦合对LCE取向结构及驱动性能的影响，并进一步讨论其在人工肌肉、智能纺织品、光驱动执行器、智能窗、柔性电子、软体机器人、微流控器件和自适应结构中的功能应用。最后，本文从多尺度限域设计、复杂取向精准调控、多场耦合响应以及规模化制备等方面对限域LCE的发展方向进行了展望。

关键词 液晶弹性体；限域结构；模板辅助制备；可编程驱动；软体机器人

Advances in the Fabrication and Functional Applications of Liquid Crystal Elastomers Regulated by Confined Structures

Meng Zhang, Xiao-guang Wang*

(*William G. Lowrie Department of Chemical and Biomolecular Engineering, The Ohio State University, Columbus OH 43210*)

Abstract Liquid crystal elastomers (LCEs) combine the orientational order of liquid crystals (LCs) with the elasticity of crosslinked polymer networks, enabling large-amplitude, reversible, and programmable deformation under thermal, optical, electrical, magnetic, and chemical stimuli. The orientational structure is a key factor determining the actuation mode, response efficiency, and functional integration capability of LCEs. In recent years, template-assisted and spatial confinement-based construction strategies have provided important approaches for precisely regulating mesogen alignment, network formation, and macroscopic deformation. Focusing on one-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional confined structures, this review summarizes the construction mechanisms of anodic aluminum oxide (AAO) nanopores, polymer microgrooves, capillaries, rubbed polyimide (PI) alignment layers, photoalignment, surface chemical modification, droplets, microfluidics, and porous scaffolds. Particular emphasis is placed on the effects of geometric constraints, interfacial anchoring, and external-field coupling on the orientational structures and actuation performance of LCEs. Furthermore, the functional applications of confined LCEs in artificial muscles, smart textiles, light-driven actuators, smart windows, flexible electronics, soft robotics, microfluidic devices, and adaptive structures are discussed. Finally, the future development of confined LCEs is prospected from the perspectives of multiscale confined structural design, precise regulation of complex orientational architectures, multi-field coupled responses, and scalable fabrication.

Keywords Liquid crystal elastomers; Confined structures; Template-assisted fabrication; Programmable actuation; Soft robotics

庆祝浙江大学化学工程与生物工程学院建院百年专辑; 2026-07-07 收稿, 2026-08-11 录用

* 通信联系人: 王晓光, E-mail: wang.12206@osu.edu

引用:张萌, 王晓光. 限域结构调控液晶弹性体的构筑及其功能应用进展. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26322

Citation: Zhang, M.; Wang, X. G. Advances in the fabrication and functional applications of liquid crystal elastomers regulated by confined structures. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26322

1 液晶弹性体的发展概况及取向结构的关键作用

液晶弹性体(liquid crystal elastomers, LCEs)是一类兼具液晶取向有序性与交联聚合物网络熵弹性的软物质材料[1~3]。其中主要组成成分液晶(liquid crystal, LC)在向列相、层列相或胆甾相等有序相中具有各向异性排列如图1所示[4]，在LCE中，交联聚合物网络不仅起到固定液晶基元取向结构的作用，实现宏观弹性回复和可逆驱动的核心。液晶基元赋予材料取向有序性和各向异性响应能力，而交联网络则将这种分子尺度的取向变化传递并放大为宏观形变[5~8]。二者耦合后，外界热[9~12]、光[13~16]、电[17~20]、磁[21~24]或化学环境的变化[25~27]可引发取向变化，并进一步转化为宏观收缩、弯曲、扭转、卷曲和表面起伏等可逆形变。因此，LCE不仅是研究分子有序到宏观运动跨尺度传递机制的重要模型体系，也是软体机器人[28~30]、人工肌肉[31~33]、可重构光学[34~36]、智能表面[36~38]和柔性电子[39~41]等领域的重要候选材料如图1所示。

如图2所示，从分子结构来看，液晶弹性体(LCE)通常由刚性液晶基元、柔性间隔链、聚合物主链及交联点组成。根据液晶基元与聚合物主链的连接方式，LCE可分为主链型、甲壳型和侧链型3类。主链型LCE将液晶基元直接嵌入聚合物主链中，液晶取向与聚合物网络形变耦合紧密，因此通常具有较高的驱动应变和力学输出。甲壳型LCE中，液晶基元通过较短的柔性间隔链以高密度悬挂于聚合物主链两侧，形成类似“甲壳”的分子结构，兼具较好的液晶有序性和力学性能。侧链型LCE则通过柔性间隔链将

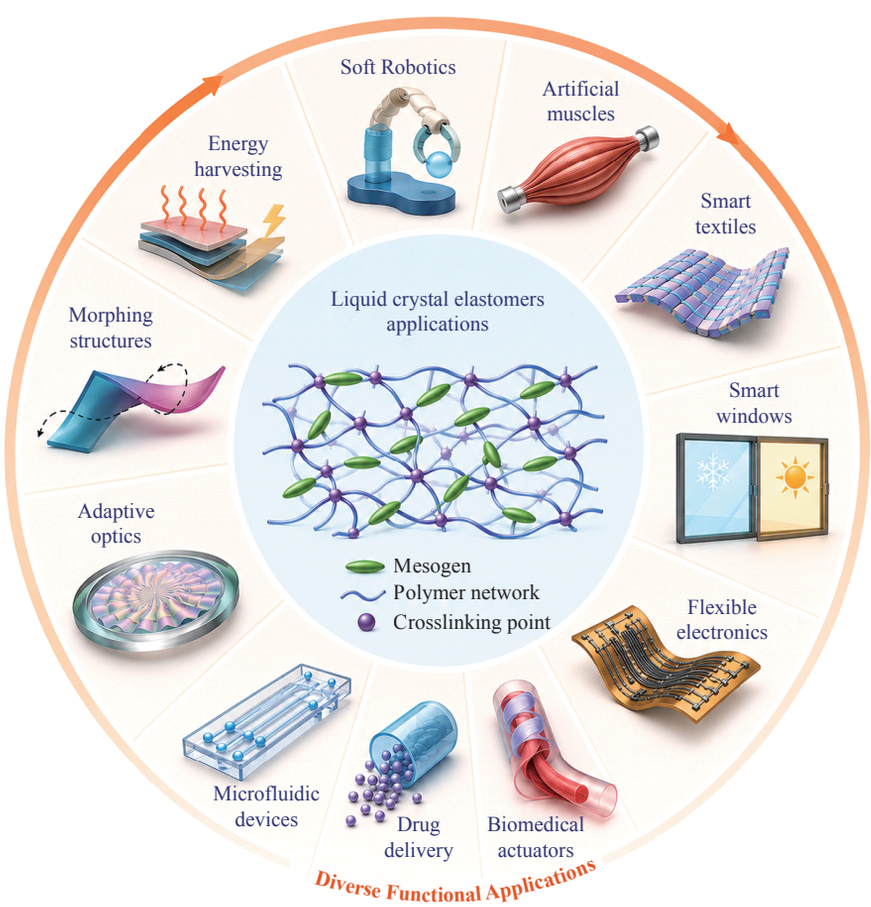

图 1 液晶弹性体的应用

Fig. 1 Applications of LCEs

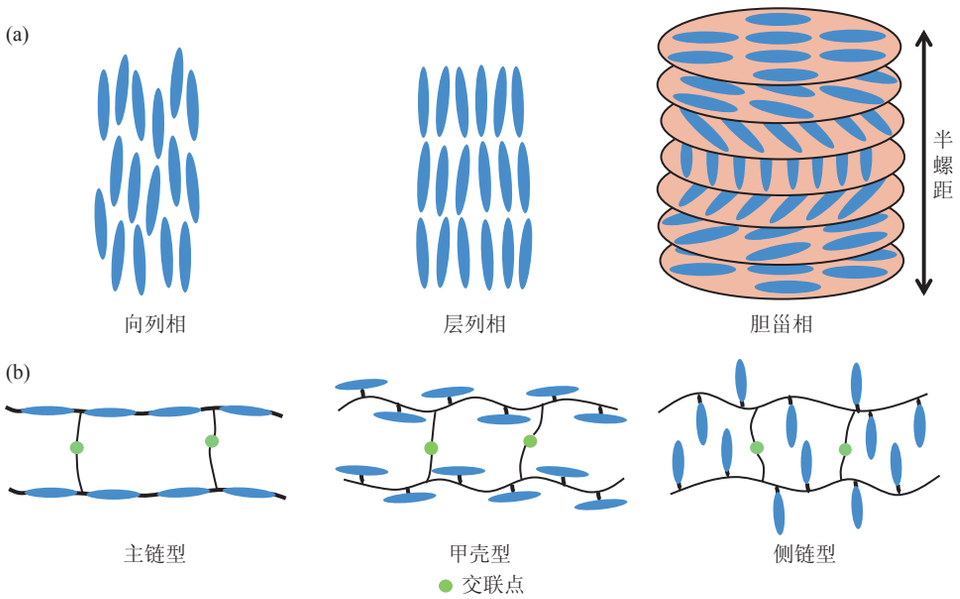

图 2 液晶介相与液晶弹性体(LCEs)中的分子排列: (a)向列相、层列相和胆甾相排列中液晶分子示意图; (b)主链型,甲壳型及侧链型液晶弹性体的结构表征

Fig. 2 Molecular order in LC mesophases and LCEs: (a) Schematics of molecular alignment in nematic, smectic, and cholesteric arrangements; (b) Structural representations of main-chain and side-chain LCEs containing crosslinking points

液晶基元连接至聚合物主链侧基，液晶基元的取向序与主链构象具有一定的解耦特征，因此具有较高的取向自由度和优异的刺激响应性能。典型制备方法包括Finkelmann两步交联法[42,43]、丙烯酸酯光聚合[44]、硫醇–烯点击反应[45]、动态共价网络构筑等[46,47]，此外，近年来墨水直写(direct ink writing，DIW)等先进加工成形技术也被广泛应用于复杂结构LCE器件的制备[48,49]。

LCE的核心功能来源于取向结构被“写入”交联网络后的记忆效应。当温度升高至液晶–各向同性相转变区间时，液晶基元取向有序性降低，沿取向方向产生收缩而垂直方向发生膨胀；降温后，取向有序性恢复，材料可回到初始状态。若在网络中引入偶氮苯、光热填料、导电组分或磁性颗粒等响应单元，还可实现光驱动、电热驱动、近红外驱动以及多场耦合驱动。由此可见，LCE的结构与性能不仅受化学组成影响，还依赖于取向场、交联网络拓扑及宏观几何结构之间的协同调控。取向结构是决定LCE驱动模式与性能的关键。如图3所示，对于单轴取向LCE，液晶基元沿统一方向排列，材料在刺激下通常表现为取向方向收缩、垂直方向膨胀的简单各向异性响应[50]。相比之下，多轴或空间非均匀取向LCE中，不同区域的局部应变方向存在差异，内部不相容应变可诱导弯曲、扭转、褶皱、锥形突起及多步形变等复杂运动[51]。因此，取向场不仅决定“变形多少”，更决定“如何变形”。

从结构–功能关系看，分子取向与宏观响应之间存在明确的关联：界面或外场首先决定液晶单体的初始排列，聚合及交联过程将该排列固定于弹性网络中，随后刺激诱导液晶序参量改变，最终通过网络弹性约束放大为可观测形变[52]。取向均匀性、空间取向分布(包括面内和厚度方向取向梯度)、缺陷拓扑以及取向与几何边界之间的相对关系，都会影响LCE的驱动应变、响应速度、输出力、循环稳定性和形变可逆性。

传统机械拉伸、摩擦取向或电磁场取向可以获得高质量单轴结构，但在微纳尺度、曲面界面、三维体相和层级结构中仍面临空间分辨率不足、厚度受限、形状与取向难以精确控制等问题[42]。为突破这些限制，近年来基于模板与限域效应的构筑策略受到

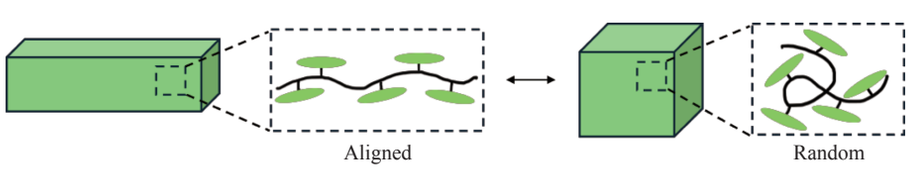

图 3 液晶基元重取向诱导的LCE体形状变化

Fig. 3 Mesogens reorientation-induced shape changing of LCE

广泛关注。模板通过几何边界、表面锚定、毛细填充、界面化学和外场耦合等方式，将取向规则写入LCE前驱体，实现从一维纤维、二维薄膜到三维颗粒、孔道和微结构的可编程构筑。

2 不同维度限域结构的构筑策略与取向机制

限域结构是调控LCE取向有序性和宏观响应行为的重要手段。与传统机械拉伸、外场取向等方法相比，限域构筑策略能够利用预设模板的几何形状、尺寸尺度、表面化学性质和界面锚定作用，在材料成型过程中诱导液晶基元定向排列，并将这种取向结构固定于交联聚合物网络中[42,53~55]。根据限域空间的维度特征，可将相关策略大致分为一维限域、二维界面限域和三维空间限域。其中，一维限域主要依赖纳米孔道、微沟槽或毛细管等具有高长径比的线性空间，引导液晶基元沿特定轴向排列；二维界面限域通常通过平面基底、取向层或图案化表面实现面内取向调控；三维限域则借助液滴、微流控、多孔骨架等空间模板，在曲面或体相结构中构筑更加复杂的取向场。不同维度限域方式在取向诱导机制、结构精度、可加工尺度和功能输出方面各具特点，为LCE从简单单轴驱动向复杂可编程形变发展提供了丰富的结构基础。

2.1 一维限域构筑及取向机制

一维限域通常是指利用纳米孔、微沟槽、毛细管或纤维状空间等具有明显轴向特征的模板，对液晶单体或LCE前驱体进行空间约束和取向诱导。在这类体系中，模板的长轴方向为液晶基元提供了优先排列方向，同时孔壁、沟槽壁或管壁与液晶分子之间的界面相互作用进一步增强取向有序性。由于一维限域空间具有较高长径比和明确的几何边界，液晶基元在聚合或交联过程中更容易形成单轴排列结构，从而赋予所得LCE纤维、纳米线或微结构显著的各向异性驱动行为。与二维薄膜相比，一维限域LCE在轴向驱动、纤维集成、微尺度执行和可编织结构方面具有独特优势，是构筑人工肌肉、智能纺织品和微驱动器的重要基础[9,32,56~59]。

2.1.1 阳极氧化铝模板限域

阳极氧化铝模板是一类典型的一维纳米限域模板[60,61]，具有高度有序、孔径可调和孔道垂直排列等特点如图4所示[62]。阳极氧化铝模板中规则排列的圆柱形纳米孔能够为液晶单体或LCE前驱体提供均一的限域空间。当液晶前驱体通过毛细作用、真空辅助渗透或溶液浸润等方式进入纳米孔道后，孔壁的空间约束和界–面锚定作用会限制液晶基元的自由取向，使其倾向于沿孔道长轴方向排列。随后通过热聚合或光聚合将取向结构固定在交联网络中，去除阳极氧化铝模板后即可获得具有单轴取向的LCE纳米线、纳米柱或表面纳米阵列结构[62]。阳极氧化铝模板通常采用酸(如盐酸)或碱(如NaOH)溶液进行选择性刻蚀去除，在适当条件下能够完整释放LCE纳米线结构。然而，对于高长径比阵列，过度刻蚀或模板去除过程中产生的机械应力可能导致纳米结构发生断裂、团聚或塌陷，因此需合理控制刻蚀条件，并保证交联网络具有足够的力学稳定性，以维持结构完整性和驱动性能。

阳极氧化铝纳米孔限域的核心在于纳米尺度孔道对液晶基元排列和网络成型过程的双重调控。一方面，圆柱形孔道提供了高度各向异性的几何边界，使液晶基元在填充和相转变过程中沿轴向取向更为有利；另一方面，孔壁与液晶分子之间的界面相互作用能够进一步增强取向有序度，并抑制多畴结构的

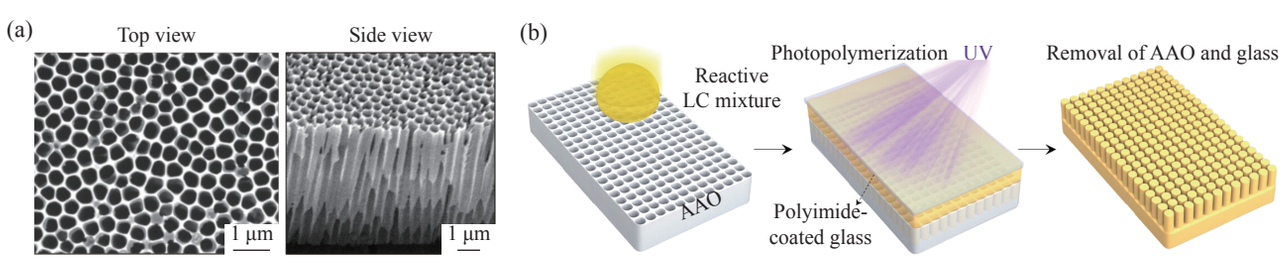

图 4 (a)阳极氧化铝模板的俯视和截面SEM图像(模板具有垂直排列的纳米孔道，孔径约为 400 nm，孔深约为 10 μm；样品未经导电喷镀直接进行SEM表征)；(b)阳极氧化铝模板限域制备液晶弹性体纳米阵列结构的示意图[62] (2025 John Wiley and Sons)

Fig. 4 (a) Top-view and cross-sectional SEM images of anodic aluminum oxide (AAO) template (Vertically aligned nanopores with an average diameter of 400 nm and a depth of 10 μm, the template was imaged without conductive coating); (b) Schematic illustration of the fabrication of liquid crystal elastomer micropillar arrays using anodic aluminum oxide template (Reprinted with permission from Ref. [62]; Copyright (2025) John Wiley and Sons)

形成[63]。因此，阳极氧化铝模板不仅可以实现LCE在纳米尺度上的形貌复制，还能够诱导其形成明确的单轴排列结构。此类结构在热刺激下通常表现出沿孔道轴向的收缩或伸长，并可通过纳米线弯曲、阵列倾斜或表面形貌重构实现可逆驱动，为构筑响应性表面、可调黏附界面和微纳执行器提供了重要方法[53,64]。

近年来，阳极氧化铝模板限域进一步从一维的单根LCE纳米线或纳米柱的制备拓展到表面纳米线阵列化二维LCE薄膜的构筑[62]。由此可见，阳极氧化铝模板限域在LCE结构设计中具有多重作用：既能通过纳米孔几何约束诱导液晶基元取向并复制纳米形貌，又能借助纳米线阵列放大其表面性能，使LCE由单一驱动材料进一步发展为兼具可编程形变和表面功能的仿生响应体系。

2.1.2 聚合物微沟槽(PDMS)模板限域

聚合物微沟槽模板，尤其是聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane，PDMS)软模板，是实现LCE微尺度一维取向调控的另一类重要方法，其制备方法如图5所示。通常可通过光刻、激光刻写、软刻蚀或复制模塑等技术在基底表面制备具有周期性沟槽和脊状结构的各向异性微图案，再将液晶单体或LCE前驱体注入由沟槽模板构成的受限空间中。由于沟槽结构在几何上具有明确的方向性，液晶基元在流动、填充和聚合过程中会受到沟槽壁的导向作用，倾向于沿沟槽方向排列，从而形成面内单轴或准单轴取向结构[65,66]。

PDMS微沟槽模板的取向诱导主要来源于沟槽导向效应和表面约束效应的协同作用。沟槽的长轴方向为液晶基元提供了低能排列路径，而沟槽侧壁和底部表面对液晶分子的锚定作用则进一步稳定这种排列状态。当沟槽宽度、深度和周期与液晶基元的取向相关尺度相匹配时，模板诱导效应更为显著，可有效减少取向缺陷并提高宏观各向异性。与化学取向层相比，微沟槽模板依赖物理拓扑结构即可实现取向调控，具有制备过程相对简单、图案可复制和适用于柔性基底等优点。所得LCE薄膜或微结构在刺激作用下可表现出沿沟槽方向的定向收缩、垂直方向的补偿形变，适用于可重构表面、柔性执行器和微尺度响应器件[67]。

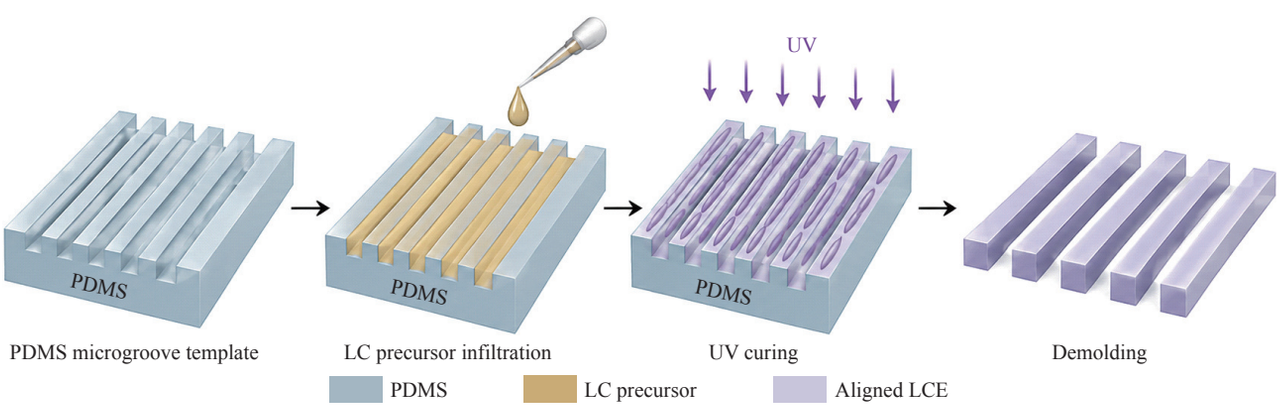

图 5 PDMS微沟槽模板诱导LCE取向示意图

Fig. 5 Schematic illustration of the fabrication of aligned LCE microstrips using a PDMS microgroove template

聚合物微沟槽或表面光栅模板的作用并不局限于诱导液晶基元初始排列，还能够将LCE的驱动形变转化为可视化的光学信号。通过调节光栅方向与样品拉伸方向之间的夹角，可进一步调控热刺激下光栅周期和高度的变化幅度，从而实现不同程度的颜色变化。该类结构在信息加密、防伪显示和可视化传感等领域具有潜在应用价值，也表明一维表面限域结构可与LCE体相取向和双向形状记忆行为耦合，形成兼具形变输出和光学反馈的层级响应体系[68,69]。

2.1.3 毛细管限域

毛细管限域是利用圆柱形或其他线性微通道对LCE前驱体进行填充、取向和原位聚合的一种简便方法。在制备过程中，液晶单体、交联剂和引发剂组成的前驱体可在毛细作用、压力驱动或真空辅助作用下进入玻璃毛细管、聚合物微管或微流道中。由于毛细管具有封闭或半封闭的线性空间，液晶基元在填充过程中会受到流动剪切、管壁锚定和几何约束的共同影响，进而沿管道轴向形成取向排列。随后通过光固化或热固化将该取向结构固定，移除模板后可得到LCE纤维、微棒或管状驱动结构[55,70]。

毛细管限域的特点在于其能够同时实现形貌成型和取向诱导。毛细管的轴向几何约束限制了液晶

基元在径向和周向上的无序排列，而填充过程中的流动场又可进一步增强轴向取向趋势[71]。与此同时，管壁表面能、粗糙度和化学组成会影响液晶分子的界面锚定方式，从而调控最终取向结构的均匀性和稳定性。通过改变毛细管直径、管壁表面处理、填充速率和聚合条件，可进一步调节LCE纤维的取向有序度、交联网络结构和驱动性能。由于所得材料通常具有高长径比和良好的轴向连续性，毛细管限域方法特别适合制备驱动纤维、人工肌肉丝和可编织智能材料[55]。

总体而言，阳极氧化铝模板、PDMS沟槽模板及毛细管限域均属于一维限域构筑策略，但三者分别依托纳米孔道、微/纳米沟槽及微米级圆柱管道等不同模板实现液晶弹性体的定向构筑。其中，阳极氧化铝模板具有纳米尺度孔径，可提供较强的几何限域和界面锚定作用；PDMS沟槽主要依靠表面拓扑结构诱导液晶基元沿沟槽方向排列，适用于大面积有序结构的构筑；毛细管限域则利用微米级圆柱形空间实现液晶前驱体的轴向排列，更适用于连续纤维及柱状结构的制备。尽管3种方法在模板类型、限域尺度及适用对象上存在差异，但其取向机制具有共同特征，均可概括为轴向排列、几何约束和各向异性应变放大3个方面。首先，高长径比的一维限域结构为液晶基元提供了明确的轴向取向方向，使其在孔道、沟槽或管道中形成单轴有序排列；其次，模板边界的空间约束及界面锚定作用降低了液晶基元的取向自由度，抑制了多畴结构和随机取向的形成；最后，当取向结构经交联网络固定后，液晶相变或取向有序度变化所产生的微观应变能够沿限域方向有效传递并放大，最终表现为宏观尺度上的定向收缩、伸长、弯曲或表面重构。正是这种由限域几何，分子取向和宏观驱动构成的连续耦合机制，使一维限域构筑策略成为实现高性能液晶弹性体定向构筑和驱动性能提升的重要途径。

2.2 二维界面限域构筑及取向机制

二维界面限域是目前LCE薄膜制备和取向调控中应用最广泛的策略之一。与一维限域依赖孔道、沟槽或毛细管等线性空间不同，二维界面限域主要通过平面基底、取向层、图案化表面或表面化学修饰等方式[72~75]，在薄膜厚度方向上施加界面约束，并在面内诱导液晶基元沿特定方向排列。

如图6所示，基于聚酰亚胺(PI)取向层的表面限域是液晶弹性体最经典、应用最广泛的取向方法之一。通常，LCE前驱体被填充于两片基底构成的光学池或薄层空间中，其中至少一侧或两侧基底预先涂覆PI取向层，并经单向摩擦处理(unidirectional rubbing)形成各向异性的微沟槽结构。摩擦不仅在PI表面产生沿摩擦方向排列的微纳尺度沟槽，而且使聚合物链段发生定向排列，从而形成具有各向异性表面能的取向界面。在界面锚定作用下，液晶基元优先沿摩擦方向发生平行排列，并通过液晶分子之间的长程有序相互作用将这种取向传递至整个液晶层，实现大面积均一的单轴取向。当液晶前驱体进一步发生光聚合或热交联时，液晶基元的有序排列被永久固定于交联网络中，最终获得具有稳定单畴取向结构的LCE薄膜。相比于模板限域策略，PI取向层主要依赖表面锚定效应诱导液晶取向，具有工艺成熟、取向均匀性高、易于实现大面积制备等优势，因此被广泛应用于液晶弹性体薄膜、驱动器及光响应器件的制备。二维界面限域具有制备过程成熟、取向方向可控、薄膜厚度易调节和适合图案化设计等优点，是构筑单畴LCE薄膜、复杂面内取向场和可编程驱动器的重要基础。

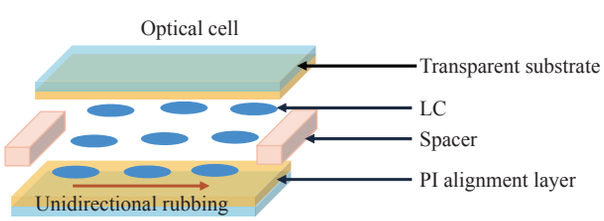

图 6 液晶光学池(optical cell)结构示意图

Fig. 6 Schematic illustration of an optical cell for LC alignment

2.2.1 摩擦聚酰亚胺取向层

摩擦聚酰亚胺取向层是液晶材料中最经典的平面取向方法之一，也广泛用于LCE薄膜的取向构筑。通常先在玻璃或柔性基底表面旋涂一层聚酰亚胺薄膜，经热固化后利用绒布或其他摩擦材料沿固定方向进行单向摩擦处理。摩擦过程会在PI表面形成微弱的各向异性微沟槽，同时诱导聚合物链段在表面发生一定程度的定向排列，从而为液晶基元提供优先取向方向。当LCE前驱体被注入由2片摩擦PI基底构成的光学池中时，液晶基元在界面锚定作用下沿摩擦方向排列，并在热聚合或光聚合过程中固定为单畴取向结构[72]。

摩擦诱导取向的本质是表面拓扑效应与分子间相互作用的协同结果。一方面，摩擦形成的微纳尺度沟槽可通过几何导向作用降低液晶基元沿摩擦方向排列的自由能；另一方面，PI分子链与液晶基元之间的范德华作用、偶极相互作用和π–π相互作用能够进一步稳定平面取向状态。通过控制上下基底摩擦方向的一致或相互垂直，可分别构筑平面取向、扭曲取

向或混合取向结构[76,77]。当LCE薄膜中液晶基元形成均一取向时，材料在热或光刺激下通常沿取向方向发生收缩，并在垂直方向产生补偿性伸长[50]；而当上下表面取向方式不同或形成取向梯度时，则可进一步诱导薄膜发生弯曲、卷曲或波动等非均匀形变[78]。该策略的优势在于能够通过调控上下界面取向关系，实现厚度方向取向梯度的精确构筑。因此，摩擦PI取向层为LCE二维薄膜的基础取向和可控驱动提供了简便可靠的方法。因此，摩擦 PI取向层不仅是实现均一单畴LCE薄膜的基础方法，也可与臭氧处理玻璃、硅烷化表面或其他垂直取向界面结合，用于构筑具有梯度取向和复杂光机械响应的二维限域LCE执行器。

2.2.2 光取向

光取向(photoalignment)是一种利用偏振光调控表面取向方向的非接触式取向方法，特别适合构筑空间图案化和复杂取向场LCE。该方法通常在基底表面引入含偶氮苯(如azobenzene)等光响应基团的取向层[79,80]。当线偏振紫外光或可见光照射表面时，光响应分子会发生选择性光异构化如图7所示，偶氮苯光致取向主要基于Weigert效应。在线偏振紫外光照射下，偶氮苯分子首先发生可逆的反式–顺式光异构化。由于偶氮苯的电子跃迁偶极矩与其长轴基本平行，长轴平行于偏振光电场方向的分子更容易吸收光子并发生异构化，而长轴垂直于偏振方向的分子吸收概率较低，因此经历多次反式–顺式构象光循环后，前者不断重新取向，后者逐渐富集，最终使偶氮苯分子的长轴优先排列于垂直于偏振光电场方向，形成具有各向异性的光取向层。随后，液晶基元在界面锚定作用下沿偶氮苯分子的优选取向方向排列，并通过液晶分子间的长程有序相互作用将该取向传递至整个液晶层。最后，经光聚合或热聚合后，液晶基元的有序排列被固定于交联网络中，从而获得具有预设取向结构的液晶弹性体[81]。

与传统摩擦取向相比，光取向具有无接触、无机械损伤、取向方向可连续调节和空间分辨率高等优势。通过改变入射偏振光方向、曝光位置和曝光剂量，可以在同一基底上写入不同的局部取向方向，从而构筑径向、环向、螺旋、梯度或拓扑缺陷等复杂面内取向图案。LCE前驱体在这种图案化取向层中聚合后，局部液晶取向被交联网络固定，外界刺激引起的各向异性应变便会按照预设取向图案在不同区域产生差异化响应。例如，径向或环向取向可诱导薄膜形成锥形、穹顶形或鞍形形变；含有拓扑缺陷的取向图案则可在缺陷区域产生局部翘曲、突起或可逆折叠[82,83]。由此可见，光取向不仅是一种取向调控手段，更是一种将空间信息写入LCE内部的“结构编码”方法，为实现高精度可编程驱动、可重构光学器件和复杂软体执行器提供了重要平台。

2.2.3 表面化学修饰

除摩擦和光取向外，表面化学修饰也是二维界面限域中调控LCE取向结构的重要方法。通过在玻璃、硅片、金属氧化物或聚合物基底表面引入特定官能团、自组装单分子层或偶联剂，可以改变基底表面的表面能、极性、粗糙度和分子相互作用，从而调节液晶基元在界面处的锚定方式。常见的表面化学修饰包括硅烷化处理、长烷基链自组装层、亲疏水改性以及含反应性官能团的界面层构筑等。根据表面分子结构的不同，液晶基元可形成平面取向、垂直取向或倾斜取向。

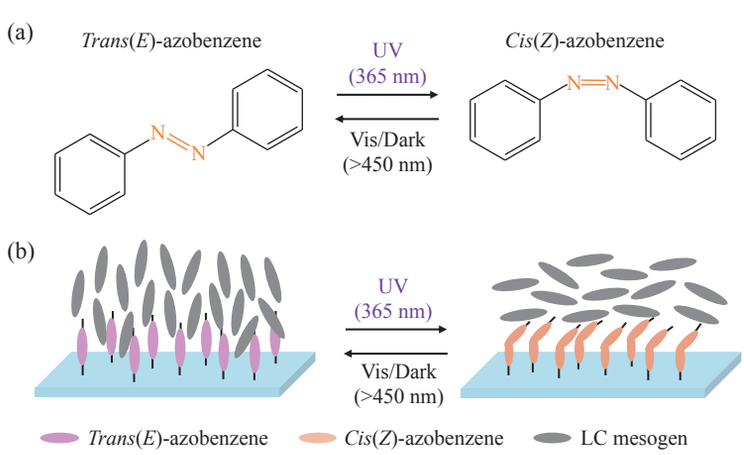

图 7 (a)偶氮苯基团的光致顺反异构化示意图；(b)基于偶氮苯层的液晶分子光取向机理示意图

Fig. 7 (a) Schematic illustration of the reversible trans-cis photoisomerization of azobenzene; (b) Schematic illustration of the photoalignment mechanism based on an azobenzene layer

表面锚定调控的关键在于界面分子结构与液晶基元之间的相互作用匹配。例如，长烷基链修饰表面通常可通过疏水链段与液晶分子的相互作用诱导垂直取向[73,84,85]；而具有各向异性分子排列或特定极性官能团的表面则更容易诱导平面或倾斜取向。通过将不同化学修饰的基底组合使用，可以在LCE薄膜厚度方向构筑取向梯度，如一侧为平面取向、另一侧为垂直取向的混合取向结构。此类结构在刺激作用下由于上下表面应变不匹配，能够实现不同锚定模式下的可编程形变[86]。与单纯物理摩擦取向相比，表面化学修饰能够更精细地调节界面锚定强度和取向模式，并可与光取向、微图案化和外场取向相结合，实现多层次二维限域调控。

总体而言，二维界面限域的取向机制主要来源于界面锚定、表面各向异性和空间图案化三方面。界面锚定决定液晶基元在基底附近的初始排列方向，表面各向异性为取向提供优先方向，而图案化表面则进一步赋予LCE局部差异化的应变输出。由于LCE薄膜的厚度通常较小，界面诱导取向能够在较大范围内传递至整个薄膜，从而实现较高程度的取向有序。二维界面限域不仅适用于制备均一单畴LCE薄膜，也可通过复杂取向图案实现弯曲、扭转、折叠、波动和三维重构等可编程形变，是LCE功能器件设计中最重要的结构调控策略之一。

2.3 三维限域构筑及取向机制

随着LCE应用从二维薄膜驱动器向软体机器人、微型执行器、仿生系统和自适应结构发展，仅依赖平面界面取向已难以满足复杂三维形变和空间功能集成的需求。三维限域构筑策略通过液滴、微流控、多孔骨架或三维网络模板等空间结构，在体相范围内对液晶基元取向、交联网络成型和宏观几何形貌进行协同调控。与二维界面限域不同，三维限域中的液晶基元受到曲面边界、内部界面、孔道连通结构以及外场作用的共同影响，因而可形成径向、双极、壳层、梯度或局部有序等更加复杂的空间取向结构。这类结构能够将分子取向的不均匀性转化为整体颗粒、壳体或多孔材料的可逆形变，为构筑具有自主运动、物质输运、可调孔隙和环境适应能力的LCE体系提供了新的设计思路。

2.3.1 液滴模板

液滴模板是一种典型的三维球形限域策略，通常通过乳液法将反应性液晶单体或LCE前驱体分散在连续相中，形成微米或亚毫米尺度的液晶液滴[87,88]。在液滴内部，液晶基元的取向由体相弹性能、液滴几何形状和液滴界面锚定条件共同决定。由于球形边界对液晶取向施加各向同性空间约束，液晶基元往往会形成具有拓扑特征的取向构型，如平面锚定条件下的双极取向，垂直锚定条件下的径向取向，以及倾斜锚定条件下的轴向或预径向取向。随后通过光聚合或热聚合将液滴内部取向结构固定，即可得到具有特定取向场的LCE微球或各向异性微粒[89,90]。

液滴限域的优势在于能够利用简单的球形界面构筑复杂的三维取向结构。通过调节表面活性剂种类和浓度、连续相组成、液滴尺寸以及界面张力，可以改变液晶基元在液滴界面的锚定方式，从而实现双极、径向或混合取向之间的转变。不同取向结构会导致聚合后LCE颗粒在刺激作用下产生不同的形貌变化。例如，双极取向可诱导颗粒沿两极方向伸长或收缩，径向取向则可能导致整体均匀收缩或壳层式形变。若在液滴表面引入胶体颗粒或功能组分，还可利用液晶缺陷区域的弹性能差异实现表面斑块化分布，形成具有各向异性相互作用和定向组装能力的LCE颗粒。因此，液滴模板不仅是制备LCE微粒的重要方法，也是研究曲面限域下液晶取向和拓扑缺陷调控的重要模型体系。

2.3.2 微流控模板

微流控模板是在液滴模板基础上发展起来的一类高精度三维限域构筑方法[91,92]。与普通乳液法相比，微流控技术能够在层流条件下连续制备尺寸均一、组成可控和结构复杂的液滴、双乳液或核壳颗粒[93~95]。通常通过同轴毛细管、流动聚焦或多通道微流控装置，将LCE前驱体与内外连续相按照设定流速引入微通道中，从而获得单分散液滴或具有核壳结

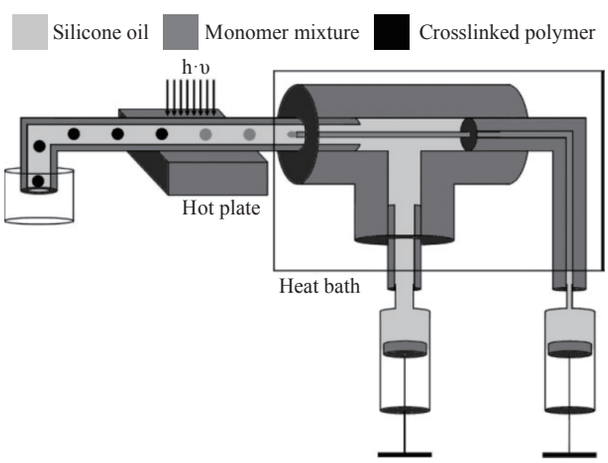

图 8 基于微流控连续聚合制备液晶弹性体示意图[96] (2009 John Wiley and Sons)

Fig. 8 Schematic illustration of the continuous microfluidic fabrication of LCEs (Reprinted with permission from Ref. [96]; Copyright (2009) John Wiley and Sons)

构的双乳液如图8所示[96]。随后通过紫外光或热诱导交联，将液晶基元的空间取向和颗粒结构固定下来。微流控限域中的取向结构受液滴曲率、内外界面锚定、流动剪切和聚合速率共同影响。在核壳结构中，LCE前驱体通常位于中间壳层，内外两侧界面同时对液晶基元施加锚定作用，使其形成径向、环向、双极或更复杂的壳层取向结构。通过调节内相、壳层和外相的流速，可以精确控制颗粒尺寸、壳层厚度和内外界面曲率；通过改变表面活性剂或界面修饰方式，则可以进一步调控锚定类型和取向场分布。由于壳层内取向结构与几何形状高度耦合，所得LCE微壳在热、光或化学刺激下可表现出翻转、塌缩、伸长或弯曲的运动行为。微流控模板因此为构筑可编程LCE微执行器、响应性胶囊、药物释放载体和微流体调控器件提供了有效途径[97~100]。

此外，微流控方法还具有良好的结构可设计性和连续制备能力。通过多级乳化、顺序聚合或多组分流体组装，可以在单个LCE颗粒中引入Janus结构、核壳结构、多层壳结构或空间分区取向。不同区域的取向差异和交联网络差异可在刺激作用下产生非对称应变，从而实现定向运动或复杂形变。与传统宏观模板相比，微流控三维限域能够在微尺度上精确控制LCE的组成、形貌和取向，是实现微型软体机器人和功能微粒规模化制备的重要技术平台。

2.3.3 多孔骨架模板

多孔骨架模板是构筑三维限域LCE的另一类重要策略。该方法利用多孔聚合物网络、气凝胶骨架、泡沫材料或其他三维连通模板作为空间支撑，将LCE前驱体填充至孔隙或骨架间隙中，并在限域环境下完成取向和交联[101~104]。与液滴或微流控模板相比，多孔骨架模板具有连续三维孔道、较高比表面积和可调孔径结构，能够在更大体积范围内实现LCE与三维网络结构的耦合。根据模板是否被去除，可获得LCE多孔结构、LCE复合骨架或具有周期性孔隙的响应性网络材料。

在多孔骨架限域中，液晶基元的取向通常受到孔壁锚定、孔道几何、毛细填充过程和外场作用的共同影响。当孔道呈现一定方向性或周期性排列时，液晶基元可沿孔道方向形成局部取向；若孔隙结构无规但具有高比表面积，界面锚定作用则可能在孔壁附近形成局部有序层[101]。通过引入磁场、电场、光取向或机械预拉伸等外场，还可进一步增强或重新编程孔道内部的取向结构。多孔骨架不仅能够赋予LCE较大的形变空间和较低的有效模量，还可通过孔隙开闭、结构塌缩或周期性尺寸变化实现光学、力学和传质性能的调控。

典型的多孔骨架模板包括多孔聚合物网络、气凝胶骨架和三维网络模板等[105~107]。多孔聚合物网络具有良好的柔性和可加工性，可与LCE形成互穿或半互穿结构，提高材料的力学稳定性和响应可逆性。气凝胶骨架具有超低密度、高孔隙率和连续三维网络，可作为轻质支撑体引入LCE体系，实现轻量化驱动、隔热调控或环境响应功能。多孔骨架模板不仅提供了三维空间限域，还为LCE引入了可调孔隙、层级结构和多功能响应界面。

总体而言，三维限域LCE的取向机制体现为曲面边界约束、内部界面锚定和空间网络协同调控。液滴模板利用球形界面诱导径向、双极或拓扑缺陷取向；微流控模板通过多重流体界面和壳层几何实现可编程空间取向；多孔骨架模板则依赖三维孔道和网络结构实现体相限域与多尺度结构耦合。与一维和二维限域相比，三维限域能够在更复杂的空间结构中建立液晶取向与宏观形变之间的关联，是实现LCE从简单驱动元件向仿生运动系统、智能微结构和自适应功能材料发展的关键方向。

3 基于不同维度限域结构的功能应用

限域结构不仅能够调控LCE中液晶基元的取向方式和交联网络形貌，还直接决定其宏观驱动模式和功能输出形式。不同维度的限域结构赋予LCE不同尺度和不同方向的响应能力：一维限域结构通常具有高长径比和明确的轴向取向特征，适合构筑纤维状驱动器、人工肌肉、微纳执行器和智能织物[6,9,33,57,58]；二维限域结构能够在薄膜或表面中实现面内取向调控和图案化应变输出，广泛用于光驱动执行器、智能窗、柔性电子和可重构表面[16,108~111]；三维限域结构则可在颗粒、壳体、多孔网络或复杂空间结构中构筑非均匀取向场，为软体机器人、仿生运动系统、微流控器件和自适应结构提供材料基础[93,112~115]。此外，通过将不同维度的限域结构进行耦合，可进一步形成层级化、编织化或多模态响应体系，实现从单一形变到复杂运动和多功能集成的拓展。

3.1 一维限域LCE

一维限域LCE通常以纳米线、微棒、纤维或管状结构为主要形态，其内部液晶基元在限域空间中沿轴向或特定方向排列，因此在外界刺激下可产生显著的轴向收缩、伸长、弯曲或扭转行为。这类结构具有高长径比、质量轻、响应方向明确和易于集成等特

点，特别适合构筑人工肌肉、驱动纤维、微驱动器和智能纺织品[6,9,33,57,58]。在人工肌肉和驱动纤维领域，一维限域LCE能够模拟天然肌肉纤维的收缩—舒张行为。当液晶基元在热、光或溶剂刺激下发生取向有序度变化时，纤维沿取向方向产生可逆长度变化，从而输出拉伸力或驱动力。与传统气动、液压或电机驱动系统相比，LCE人工肌肉具有柔软、轻质、结构简单和可直接由材料内部相变驱动等优势。通过提高取向有序度、优化交联密度以及引入光热填料或导电组分，可进一步提升其响应速度、输出应力和循环稳定性。

阳极氧化铝纳米孔模板构筑的LCE纳米线为微纳尺度驱动器提供了典型范例。Zentel等[53]利用阳极氧化铝模板制备出长度约10~30 μm、直径约180 nm的LCE纳米线，并证明其在液晶相至各向同性相转变过程中能够沿长轴方向发生可逆收缩。该类纳米线在冷却后可恢复初始长度，表现出良好的循环可逆性如图9所示，说明一维纳米限域能够将液晶基元取向变化有效转化为轴向驱动行为。由于其尺寸进入微纳尺度，此类结构在微机电系统、纳米执行器、响应性表面和微尺度力学输出单元中具有潜在应用价值。除独立纳米线外，一维表面纳米结构还可与LCE薄膜耦合形成兼具刺激响应与界面功能的二维仿生表面。Wang等[62]利用阳极氧化铝模板在LCE薄膜表面构筑了高密度纳米线阵列，成功实现了纳米线结构与LCE网络的一体化集成。阳极氧化铝孔道诱导液晶基元沿孔道方向取向，而薄膜另一侧保持平面取向，从而形成跨膜取向梯度，使材料在热刺激或有机溶剂蒸气作用下发生可逆弯曲变形。同时，表面纳米线显著增加了界面接触面积和摩擦力，使LCE薄膜具有优异的黏附性能，并可通过形变实现与凸面或凹面基底的自适应贴合。进一步结合纳米线诱导的摩擦各向异性及表面化学修饰，该体系还可实现尺蠖式仿生爬行、水下超疏油界面以及液滴操控与微反应平台等功能，充分展示了一维限域结构在LCE界面功能集成与智能驱动中的应用潜力。在智能纺织品领域，LCE驱动纤维可作为可编织、可穿戴和环境响应的功能单元。通过将LCE纤维与普通纤维、导电纤维或弹性纤维复合编织，可制备能够随温度、湿度、光照或人体运动变化而动态调节孔隙、透气性、贴合度和形状的智能织物。例如，热响应LCE纤维可在高温环境下收缩并改变织物孔隙结构，从而提高透气散热能力；光响应或电热响应LCE纤维则可在特定刺激下产生局部弯曲或开合，实现遮光、通风或形状调节。由于一维LCE纤维易于规模化加工和织物

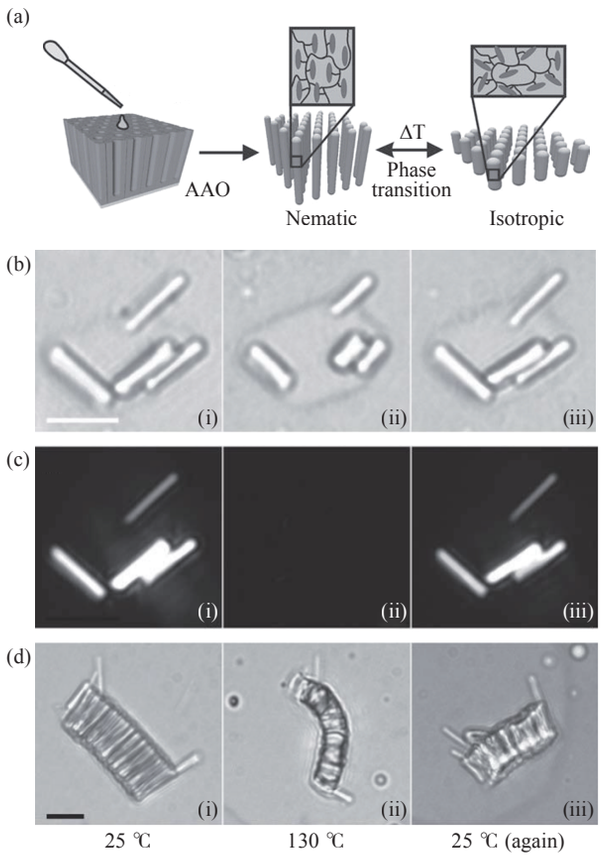

图 9 阳极氧化铝模板限域制备液晶弹性体纳米线及其热响应形变行为示意图与光学显微镜图像[53]：(a)阳极氧化铝模板诱导液晶基元沿孔道方向取向，并在相变过程中发生可逆形变；(b)明场光学显微镜图像；(c)交叉偏振光显微镜(POM)图像，显示液晶基元的有序取向及其热致相变；(d)纳米线束在25、130 °C及再次冷却至25 °C过程中的可逆热响应形变(2010 John Wiley and Sons)

Fig. 9 AAO-template-assisted fabrication of LCE nanowires and their thermally induced actuation: (a) Schematic illustration of AAO-confined alignment of LCE nanowires and the reversible nematic–isotropic phase transition; (b) Bright-field optical microscopy images; (c) Polarized optical microscopy (POM) images showing the birefringence change during the phase transition; (d) Reversible thermally induced shape deformation of LCE nanowire bundles at 25, 130 °C, and after cooling back to 25 °C (Reprinted with permission from Ref. [53]; Copyright (2010) John Wiley and Sons).

集成，其在可穿戴设备、柔性护理材料和主动热管理服装中具有广阔应用前景。

3.2 二维限域LCE

二维限域LCE主要表现为薄膜、涂层、层状复合材料或图案化表面，其核心优势在于能够通过界面取向、光取向和表面图案化实现面内取向结构设计。不同于一维限域主要实现轴向应变输出，二维限域更强调界面取向编程。由于LCE薄膜的厚度较小，表面取向层对整体取向结构具有显著影响，因此二维

限域方法特别适合实现局部可编程应变、光学调控和表面形貌重构。基于这些特点，二维限域LCE主要应用于可编程薄膜、可重构表面及智能窗等二维界面器件[16,108~111]。

光驱动执行器是二维限域LCE最具代表性的应用之一。Broer等利用平面/垂直混合取向构筑了具有splay取向结构的光响应液晶聚合物薄膜，并在其中引入快速热回复的偶氮苯衍生物。该薄膜在恒定光照下能够产生连续、方向可控的宏观机械波，其波动方向取决于平面取向侧或垂直取向侧朝向光源的方式如图10(a)和10(b)所示[86]。该研究表明，二维界面限域形成的厚度方向取向梯度能够将局部光响应转化为连续波动、类蠕虫运动和表面自清洁行为，为光驱动软执行器和能量转换器件提供了重要设计思路。基于光取向的二维限域LCE则进一步拓展了可编程形变能力。Ware等通过光取向方法在LCE中逐点写入局部液晶取向，实现了体素尺度的取向编码如图10(c)所示[116]。

由于每个局部取向单元在刺激下产生方向不同的应变，平面LCE薄膜可在热或化学刺激下转变为三维锥形、折叠或其他复杂结构。例如，含有+1拓扑缺陷阵列的LCE薄膜在升温后可形成锥形突起，并在冷却后恢复平面状态如图10(d)[116]。这种从二维取向图案到三维结构输出的转化机制，使LCE可用于可编程软执行器、自适应光学元件、柔性变形基底和可重构表面。

二维薄膜的空间异质性设计还可借鉴光编码结晶度图案实现4D形变的策略。Xie等利用数字光热效应在PLLA形状记忆聚合物薄膜中写入空间选择性的结晶度图案，使预拉伸二维薄膜在均匀加热下按照预设路径转变为三维结构。该工作中，灰度墨水图案通过光热升温诱导局部冷结晶，不同结晶度区域具有不同形状恢复能力，因此二维薄膜能够演化为金字塔、仿生叶片、蜗牛壳和蠕虫状结构等复杂三维形态如图10(e)[117]。虽然该体系不属于LCE，但其“二维图案化物理异质性—局部恢复差异—三维形貌输出”的设计思路，与图案化取向LCE中“二维取向编码—各向异性应变差异—三维可编程形变”的机制具有相似性。因此，该类光编码图案化策略可为二维限域LCE的复杂形变设计、可重构结构和智能制造提供重要参考。

智能窗和智能显示是二维限域LCE在光学调控方向的重要应用。LCE薄膜的取向有序结构、表面微结构和相转变行为可用于调节光透过、散射、反射和结构色。当温度或光照强度变化时，液晶基元取向或薄膜表面形貌发生改变，从而实现透明—散射、反射—透射或颜色变化等可逆光学响应。Wang等[118]通过UV辅助纳米压印在LCE表面构筑周期性光栅结构，并利用LCE的无应力双向形状记忆效应实现宏观形变与微观光栅变化的同步调控。随着温度变化，LCE发生可逆伸缩，表面光栅周期和高度随之改变，从而引起结构色变化。该策略可用于多维信息加密、防伪显示和可视化传感，体现了二维表面限域在形变—光学耦合功能中的优势。

在柔性电子器件方面，二维限域LCE可作为可变形基底、应变调控层或动态界面材料。由于LCE具有柔软、可拉伸和可逆形变特性，将其与导电聚合物、液态金属、碳纳米管、银纳米线或二维导电材料复合后，可制备具有形变响应导电性、应变传感能力或自适应贴合能力的柔性电子器件[119~121]。当LCE薄膜发生取向驱动形变时，可同步调控导电网络的几何形貌和接触状态，从而实现应变传感、软开关、可拉伸电极或可重构电路。此外，图案化取向LCE还可在局部区域产生可控形变，为柔性电子的动态组装、界面贴合和可穿戴传感提供新的材料平台。

可重构表面是二维限域LCE的另一类重要功能应用。通过在薄膜表面构筑微沟槽、褶皱、柱状结构、光栅结构或取向图案，LCE可在刺激作用下实现表面形貌、粗糙度、润湿性、摩擦力、黏附性能和光学反射的动态调控[62,122,123]。例如，取向梯度或表面交联密度差异可诱导薄膜产生可逆褶皱，用于调节光散射、液滴运动或细胞黏附；表面图案化取向还可使LCE在不同区域产生差异化突起或凹陷，形成可编程触觉界面、动态光学表面或仿生防污表面[36,124~126]。由此可见，二维限域LCE不仅可以作为驱动薄膜，还可作为能够主动调节界面性质的智能表面材料。

3.3 三维限域LCE

三维限域LCE通过液滴、微流控、多孔骨架或三维网络结构可实现空间结构重构及体相功能调控。由于三维限域结构中液晶基元受到曲面边界、内部界面和多孔网络的共同约束，其取向场往往具有径向、双极、壳层、梯度或局部各向异性特征。这种复杂取向与几何结构的耦合使三维限域LCE在软体机器人、仿生运动系统、微流控器件和自适应结构中展现出独特优势[93,112~115]。

液滴模板可用于构筑具有复杂取向场和可控形貌的三维微粒。Abbott等利用液晶液滴作为模板，将反应性液晶单体RM257与非反应性液晶5CB混合形

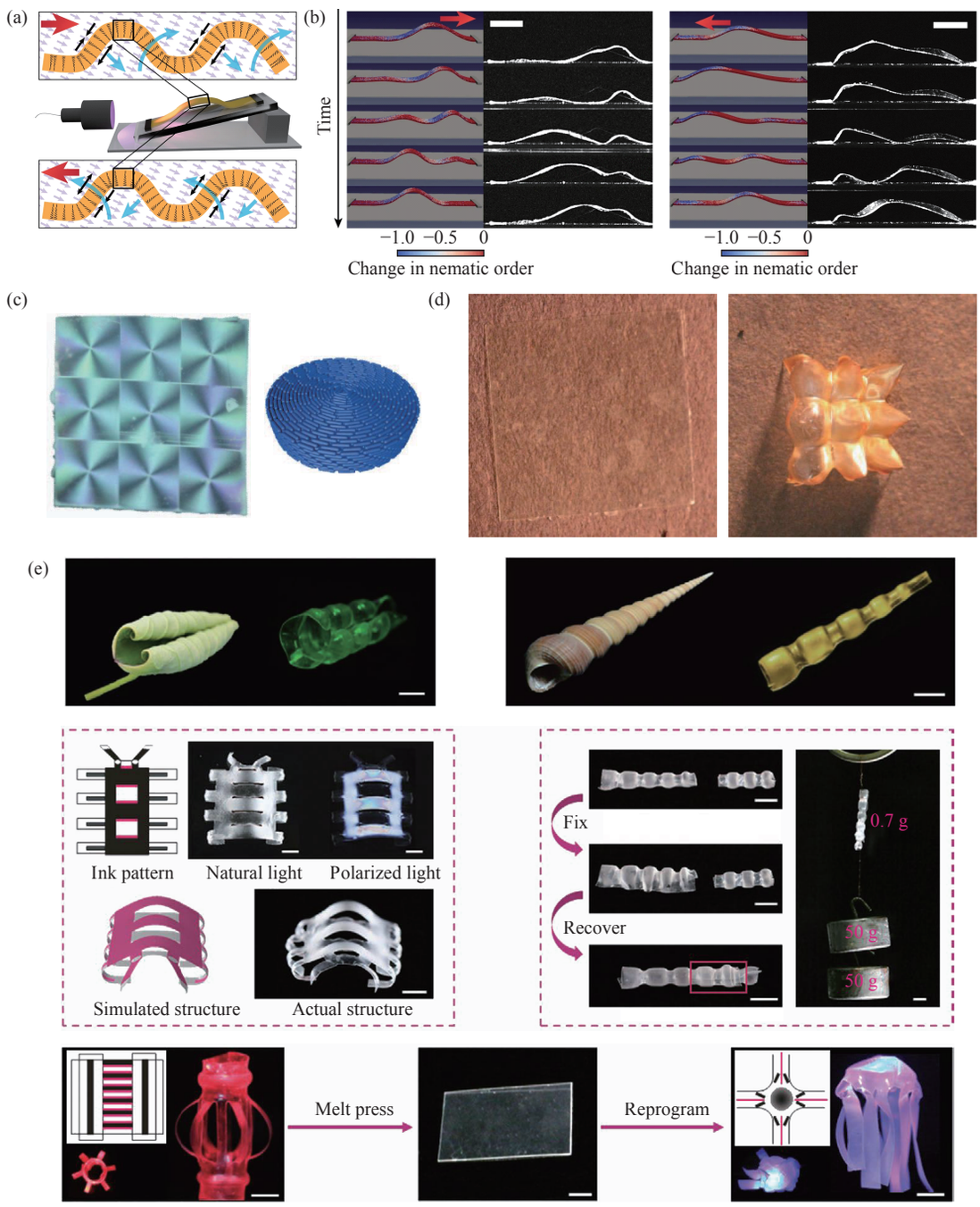

图 10 基于二维取向编程的液晶弹性体可编程形变及功能应用：(a)光热诱导向列相有序度时空调控实现液晶弹性体的定向爬行[86]；(b)爬行过程中向列相有序度变化及形变演化[86] (2017 Springer Nature)；(c)光取向构筑拓扑缺陷阵列，实现液晶弹性体薄膜的三维形貌重构[116]；(d)热刺激驱动平面薄膜向三维阵列结构转变[116] (2015 The American Association for the Advancement of Science)；(e)基于图案化取向与结构设计构筑仿生三维结构、形状记忆互锁结构及可重编程三维器件，展示了二维取向编程在复杂形貌设计、智能驱动及可重构器件中的应用潜力[117] (2020 John Wiley and Sons)

Fig. 10 Programmable shape morphing and functional applications of LCEs enabled by two-dimensional alignment programming: (a) Photothermally driven directional locomotion through spatiotemporal modulation of the nematic order; (b) Evolution of the nematic order and deformation during crawling (Reprinted with permission from Ref. [86]; Copyright (2017) Springer Nature); (c) Photoalignment-generated topological defect arrays for programmable three-dimensional shape morphing; (d) Thermally induced transformation of a planar film into a three-dimensional patterned architecture (Reprinted with permission from Ref. [116]; Copyright (2015) The American Association for the Advancement of Science); (e) Representative bioinspired three-dimensional structures, shape-memory-assisted interlocking structures, and reprogrammable architectures enabled by patterned alignment, demonstrating the potential of two-dimensional alignment programming for complex shape morphing, soft actuation, and reconfigurable devices (Reprinted with permission from Ref. [117]; Copyright (2020) John Wiley and Sons)

成微液滴，并通过调控界面锚定条件获得双极、径向、轴向和预径向等不同取向构型。光聚合后，液晶取向被固定在聚合物网络中，随后萃取非反应性液晶组分，网络发生各向异性收缩，从而得到纺锤形、球形、球柱状和泪滴状等不同微粒形貌如图11(a)所示[127]。该工作说明，液滴内部取向场可作为一种“软模板”，将三维限域中的分子排列转化为颗粒尺度的形状输出，为构筑各向异性微粒、响应性胶体和可组装微结构提供了重要策略。在软体机器人和仿生运动系统中，三维限域LCE可作为具有内禀驱动能力的结构单元。自然界中的许多生物运动，如水母脉动、植物卷曲、花瓣开合和软体动物抓附，均依赖层级结构和非均匀应变分布。三维限域LCE能够通过预设空间取向和结构梯度模拟这些生物运动机制。例如，

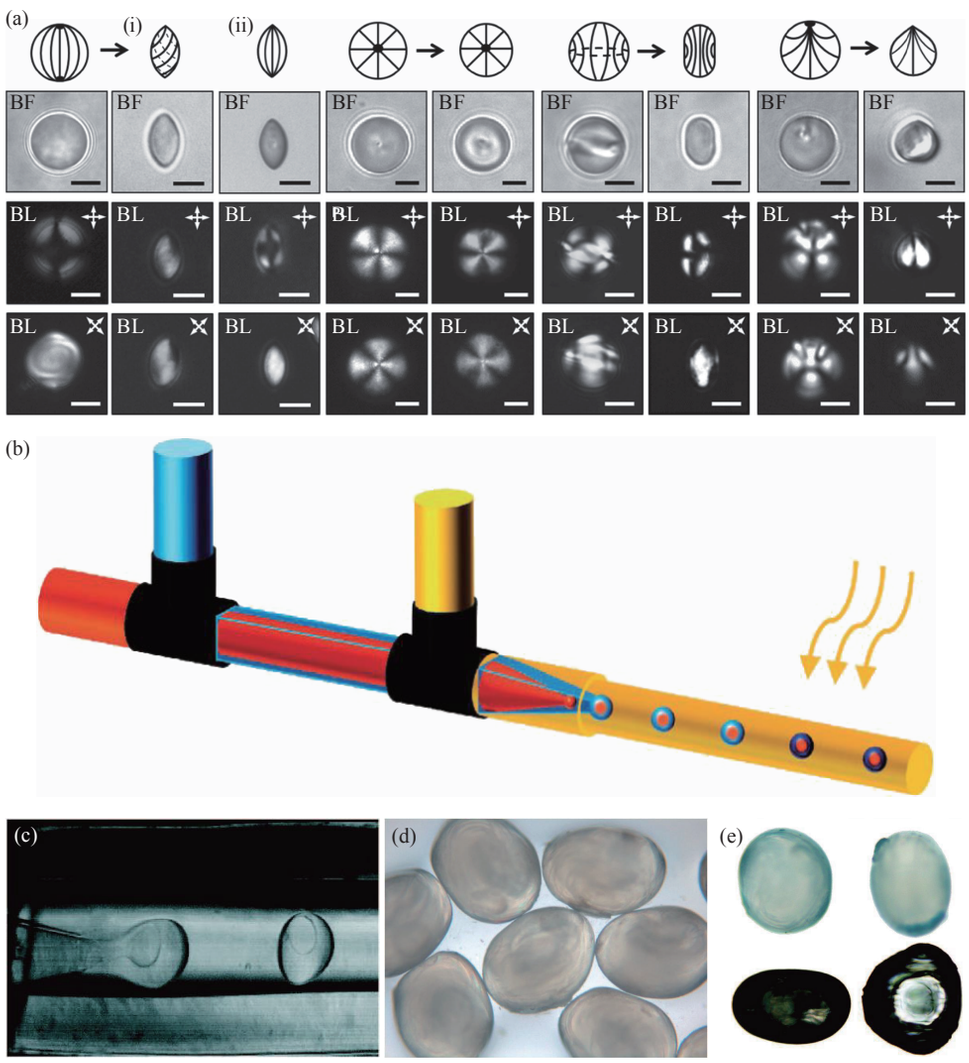

图 11 液晶液滴限域模板构筑各向异性聚合物微颗粒：(a)不同液晶取向构型(双极型、径向型、轴向型和预径向型)作为模板，经光聚合及液晶去除后可获得纺锤形、球形、柱状及泪滴状等具有不同内部取向结构的聚合物微颗粒[127] (2016 John Wiley and Sons); (b)微流控制备尺寸均一的液晶液滴，实现聚合物颗粒尺寸与形貌的精确调控[128]; (c)微流控液滴形成过程[128]; (d, e)制备得到的各向异性聚合物微颗粒及其在明场和偏光显微镜下的形貌与光学特征[128] (2012 Springer Nature)

Fig. 11 Fabrication of anisotropic polymeric microparticles using LC droplets as confined templates: (a) Different nematic director configurations, including bipolar, radial, axial, and preradial droplets, serve as templates to produce spindle-shaped, spherical, spherocylindrical, and tear-shaped polymeric microparticles after photopolymerization and removal of the LC, while preserving distinct internal orientational structures (Reprinted with permission from Ref. [127]; Copyright (2016) John Wiley and Sons); (b) Schematic illustration of microfluidic generation of monodisperse LC droplets for precise control of particle size and morphology; (c) Optical image of droplet formation in the microfluidic device; (d, e) Representative anisotropic polymeric microparticles and their optical textures observed under bright-field and polarized optical microscopy, demonstrating the preserved LC-templated internal organization (Reprinted with permission from Ref. [128]; Copyright (2012) Springer Nature)

径向取向或壳层取向结构可模拟花瓣闭合和颗粒膨缩，梯度取向结构可实现类似植物卷须的卷曲，非对称核壳或多孔结构可产生方向性弯曲、泵送或推进。由于LCE的形变来源于材料内部的分子取向变化，其仿生运动不需要复杂铰链或刚性连接件，更接近生物组织中连续、柔顺和可逆的运动方式。

微流控器件是三维限域LCE的重要应用方向。Zentel等通过三重同轴微流控装置连续制备了具有液体核心和LCE壳层的核壳颗粒如图11(b)~11(e) [128]，并将其用作一体式微泵。该LCE壳层在温度刺激下发生液晶相—各向同性相转变，导致壳层形变并将内部液体挤出或吸回，从而产生类似水母脉动的泵送行为。与传统微泵依赖复杂微加工、多层结构或外部机械组件不同，这类LCE核壳微泵可通过材料自身的形变实现流体输运，具有结构简单、连续制备和易于集成至微流控系统的优势。因此，三维限域LCE在实验室芯片、微反应器、可控释放和软体微执行器中具有重要应用潜力。

自适应结构是三维限域LCE面向工程应用的重要发展方向。利用多孔骨架、气凝胶网络或周期性三维模板构筑的LCE材料可随环境变化动态调节形状、孔隙率、力学性能、光学性能和传热特性[102,105~107,129]。例如，多孔LCE在温度变化下可通过网络收缩调控孔道尺寸，用于可变过滤、可调阻尼或自适应隔热；气凝胶/LCE复合结构则可结合轻质隔热和可逆驱动特性，用于航空航天、智能建筑和环境响应装置。三维限域LCE因此不仅是驱动材料，也可作为具有环境感知和结构自调节能力的智能工程材料。

3.4 多维限域耦合结构

随着LCE功能需求从单一驱动向复杂运动和多功能集成发展，单一维度限域结构已难以满足高性能器件对取向精度、结构层级和响应模式的综合要求。多维限域耦合结构通过将一维纤维、二维薄膜、表面微纳结构和三维网络等不同结构单元进行组合，能够在多个尺度上协同调控液晶基元取向、交联网络形貌和宏观几何结构，从而实现更复杂的形变路径和功能输出。这类结构体现了从“单尺度取向调控”向“多尺度结构编码”的发展趋势。

二维到三维组装是多维限域耦合中最常见的策略之一。通过在二维LCE薄膜中预先写入空间变化的取向图案，可在热、光或溶剂刺激下使平面薄膜自发转变为三维结构，如锥形、鞍形、穹顶、螺旋、折纸状或花瓣状结构。White等展示的voxel化LCE正体现了这一策略[116]：光取向层提供二维图案化取向信息，而热刺激则将这种取向信息转化为三维形变输出。该方法不需要复杂三维模具即可实现形状编程，是二维界面限域向三维结构组装转化的重要范例。

Chen等进一步提出了一种基于形状记忆机制的可快速重复重编程LCE，为多维限域结构中的可重构驱动提供了新思路。该研究设计了同时含有液晶相和结晶相的双相LCE网络，其中结晶相的熔融温度高于液晶相转变温度。材料在高温下受力变形并冷却后，结晶相能够通过形状记忆效应固定机械变形，并作为“内置取向框架”诱导液晶基元排列；当温度在液晶相转变温度上下循环时，材料即可发生可逆驱动。更重要的是，加热至结晶相熔融温度以上可擦除已编程取向，使同一LCE样品能够在数秒尺度内被重新编程为不同驱动模式如图12(a)~12(b)[129]。该策略不同于传统交联固定取向方法，而是利用可逆物理相变实现取向的写入、擦除和重写，为复杂几何LCE执行器和可重复使用软机器人提供了重要材料基础。多模态驱动系统是多维限域LCE发展的重要方向。通过在LCE中同时引入光响应基团、光热材料、导电填料、磁性颗粒、离子组分或化学响应基团，可使其对热、光、电、磁、溶剂和湿度等多种刺激产生响应。Xie等报道的液晶介电弹性体(LC-DE)则展示了LCE形状切换与介电弹性体电驱动相结合的典型多模态体系如图12(c)~12(g)[130]。该材料在液晶相转变前后具有不同几何形状和弯曲刚度，因此在施加电场后可表现出不同的介电驱动模式，实现温度控制下的驱动模式切换。同时，低温临时形状可通过力导向溶剂挥发过程重新编程，高温永久形状可通过动态酯交换网络重构，从而使电驱动模式能够被反复定义和重构。该体系还利用空间电荷机制将驱动电场降低至约8 $V\cdot\mu m^{-1}$，并实现电场方向控制下的双向驱动行为。从功能应用角度看，LC-DE体系将LCE的热响应形状变化、电场驱动、动态网络重构和可重复编程有机结合，为软体机器人和可重构执行器提供了新的设计路径。例如，材料可被编程为钩形、金字塔形、花瓣形、W形、V形或Miura折纸结构，并在不同温度下切换弯曲、摆动、扭转、开合和抓取等动作模式。与传统介电弹性体通常依赖固定电极图案、刚性约束或外部结构实现单一驱动不同，该类LC-DE能够利用材料自身的形状变化调控电驱动模式，体现出“几何形变—力学刚度—电场驱动”之间的耦合优势。因此，这类多模态体系在可重构抓手、微型驱动器、智能软机器人和复杂任务执行系统中具有重要应用潜力。

层级结构是提升LCE综合性能的重要途径。通

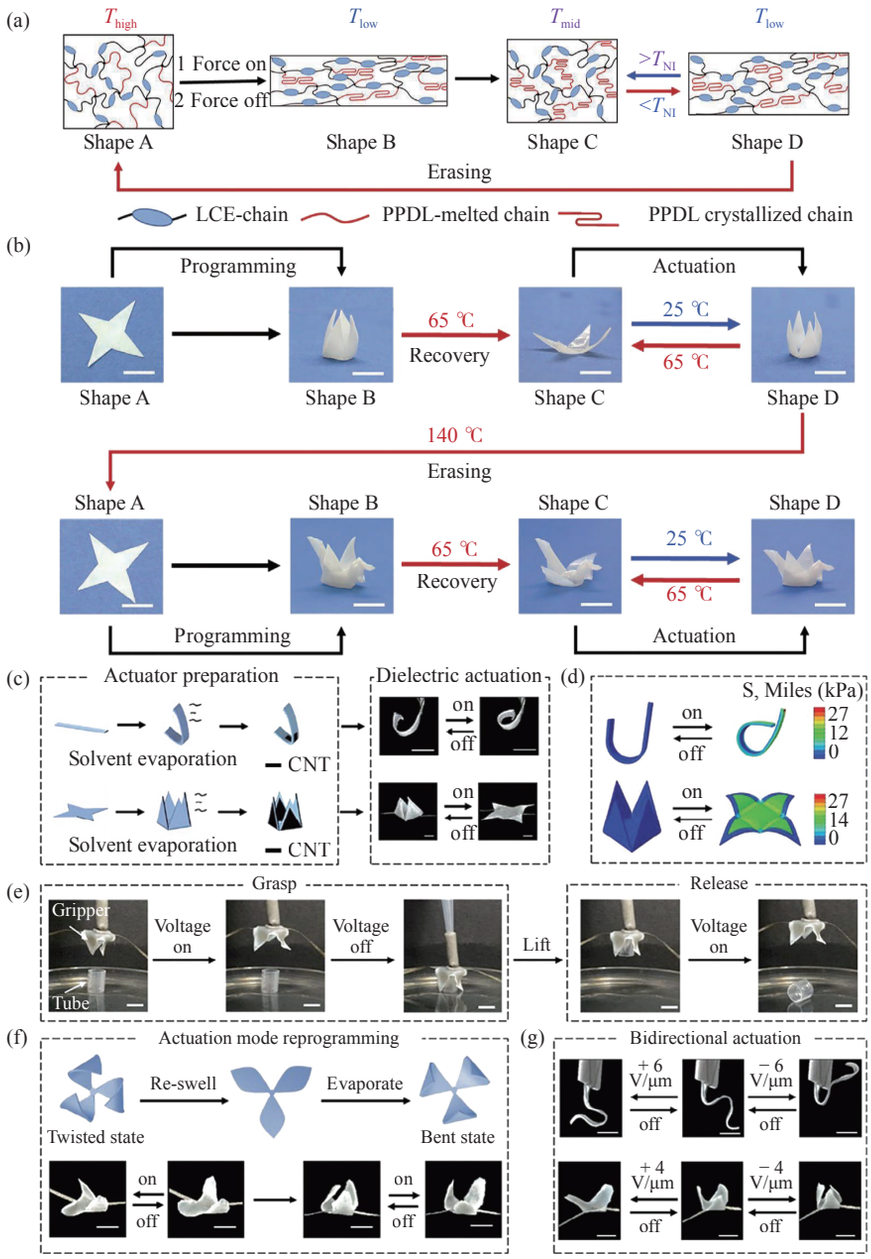

图 12 基于不同编程机制的可重编程LCE驱动器代表性策略:(a)基于形状记忆机制的可重编程LCE, 通过引入结晶相作为临时取向模板, 实现介晶取向及驱动模式的反复编程、擦除与重写[129]; (b)基于形状记忆机制实现的可编程与可重编程形状变换, 同一LCE驱动器可被赋予不同的热响应驱动模式[129] (2022 John Wiley and Sons); (c)基于溶剂辅助制备的介电驱动LCE, 通过可重构形变实现电驱动抓取与释放功能[130]; (d)介电驱动过程中电场诱导变形及应力分布的有限元模拟结果[130]; (e)电驱动软体夹持器实现目标物体的可逆抓取、提升与释放[130]; (f)通过溶胀与溶剂挥发实现驱动模式重编程, 在扭转态与弯曲态之间进行可逆切换[130]; (g)通过改变外加电场极性实现双向可逆电驱动[130] (2024 John Wiley and Sons)

Fig. 12 Representative strategies for reprogrammable LCE actuators based on different programming mechanisms: (a) Shape-memory-assisted reprogrammable LCEs, in which a crystalline phase serves as a temporary alignment template to repeatedly program, erase, and rewrite mesogen orientation and reversible actuation; (b) Demonstration of programmable and reprogrammable shape transformations enabled by the shape-memory mechanism, allowing different actuation modes to be encoded within the same LCE actuator (Reprinted with permission from Ref. [129]; Copyright (2022) John Wiley and Sons); (c) Solvent-assisted preparation of dielectric LCE actuators with reconfigurable deformation modes, enabling electrically driven grasping and release; (d) Finite-element simulation of electrically induced deformation and corresponding stress distribution during dielectric actuation; (e) Electrically controlled soft gripper capable of reversible grasping, lifting, and releasing of objects; (f) Reprogramming of actuation modes through solvent swelling and solvent evaporation, enabling reversible switching between twisted and bent configurations; (g) Bidirectional electro-actuation achieved by reversing the polarity of the applied electric field (Reprinted with permission from Ref. [130]; Copyright (2024) John Wiley and Sons).

过将纳米孔、微沟槽、薄膜取向、表面光栅、纤维编织和三维多孔网络等不同尺度的限域结构组合，可构筑兼具微纳表面功能、宏观驱动能力和整体力学稳定性的LCE体系。例如，阳极氧化铝纳米线结构可增强界面黏附和微尺度驱动，二维混合取向薄膜可提供可逆弯曲和波动行为，表面光栅结构可赋予结构色和信息加密功能，而三维核壳或液滴模板则可实现微流控泵送和颗粒形貌编程。多尺度层级结构能够模拟生物材料中常见的“分子—纤维—组织—器官”式结构组织方式，使LCE在柔顺性、力学强度、响应速度和功能多样性之间实现更好的平衡。然而，不同限域策略在取向精度、结构复杂度及加工可扩展性方面各有优势与限制，其适用性也随目标功能和尺度需求而变化。因此，对这些策略进行系统比较，可为多尺度结构的组合设计与制备方法的选择提供依据。表1总结了目前常见限域构筑策略的取向方式、调控机制、结构尺度、代表性应用及其主要局限性。

表 1 液晶弹性体限域构筑策略的调控方法、限域维度、应用及局限性

Table 1 Comparison of templating strategies for LCEs in terms of alignment methods, dimensionality, representative applications, and key limitations

限域构筑策略	典型取向类型	取向调控机制	典型结构尺度	限域维度	代表性应用	主要局限性
平面模板	平面取向、垂直取向、混合取向	摩擦取向、光取向、表面微沟槽诱导	薄膜厚度 ≤100 μm	二维薄膜	单畴LCE薄膜、光驱动器件、自适应光学	仅适用于薄膜；易产生缺陷；光刻和光取向成本较高
多孔模板(阳极氧化铝、二氧化硅、MOFs等)	单轴取向(沿孔道方向)	纳米孔道几何限域	孔径 20~500 nm；孔深数μm	一维纳米结构、表面图案	纳米线、仿壁虎黏附、可调光子表面	模板去除困难；纳米结构脆弱；规模化制备受限
液滴模板(乳液、微流控)	双极取向、径向取向、预径向取向	界面锚定、表面活性剂调控、微流控剪切	液滴直径 1~100 μm	三维微球/微粒	微泵、药物递送、活性胶体、可重构微机器人	难以规模化；材料兼容性有限(如PDMS溶胀)；液滴均一性控制困难
胶体组装(反蛋白石结构)	局部向列取向、周期性取向	胶体模板浸润、聚合及模板去除	晶格间距亚微米至数微米	三维周期多孔结构	光子晶体、力致变色传感器、光学驱动器	胶体堆积易产生缺陷；模板去除复杂；液晶基元取向控制困难
微结构模板结合磁场	任意取向、梯度取向、倾斜取向	磁场诱导液晶基元取向	特征尺寸 10~100 μm	可编程三维微结构	仿生虹膜、可调光阑、软体微机器人、复杂曲率驱动器	需要较强磁场；受体系黏度影响；工业化难度较大
纤维模板(纺丝、模塑、电纺)	轴向取向、正交取向、混合取向	拉伸流场、剪切流场及限域固化	纤维直径 10 nm~100 μm	一维纤维及二维/三维织构	智能纺织品、人工肌肉、力致变色纤维仿生驱动器	纤维直径均一性差；易形成缺陷；亚微米尺度控制困难
直写打印(DIW)	沿打印路径取向	挤出剪切诱导取向及原位固化	特征尺寸几十微米至毫米	三维自由构型	软体机器人、可编程驱动器、智能器件	打印分辨率有限；流变性能要求高；制备效率较低

4 总结与展望

总体而言，不同限域构筑策略可实现液晶弹性体在不同尺度和维度上的取向调控，从而赋予其多样化的结构特征与功能应用。一维LCE纤维可用于输出收缩力，二维取向薄膜可用于实现方向性弯曲，表面微纳结构可用于调节颜色、黏附和润湿性，三维核壳结构则可用于调节传质和泵送行为；进一步结合形状记忆结晶相、动态共价网络或介电驱动机制后，LCE体系还可获得可擦除、可重编程和多场耦合驱动能力。未来，多维限域耦合LCE有望在智能机器人、可穿戴设备、自适应光学、微流控芯片和生物医学器件中发挥更大作用。

综上所述，限域结构为液晶弹性体的取向调控、形貌构筑和功能拓展提供了重要策略。LCE的宏观响应本质上来源于液晶基元取向有序变化与交联聚合物网络弹性形变之间的耦合，而限域结构能够在材料成型过程中对液晶基元施加几何约束、界面锚定和空间导向作用，从而有效提高取向结构的可控性和功能输出的可编程性。具体而言，一维纳米孔、微沟槽和毛细管等限域空间可诱导液晶基元沿轴向或特定方向排列，实现LCE纤维、纳米线、微棒及表面阵列结构的定向驱动；二维界面限域可通过摩擦取向、光取向、表面化学修饰和图案化基底构筑均一取向、梯度取向或复杂面内取向场，使LCE薄膜在刺激作用下产生弯曲、卷曲、扭转、波动以及二维到三

维的可逆形变；三维限域则借助液滴、微流控、核壳结构和多孔骨架等模板，在曲面界面或体相空间中形成径向、双极、壳层、梯度或局部各向异性取向结构，为软体机器人、仿生运动系统、微流控器件和自适应结构提供了新的材料基础。

面向未来发展，限域LCE仍需在多尺度结构设计、复杂取向精准调控、多场耦合响应和规模化制备等方面进一步突破。首先，多尺度限域结构设计将是提升LCE综合性能的重要方向。通过将纳米孔道、微米沟槽、表面微纳结构、纤维编织体系和三维多孔网络进行层级化组合，可实现从分子取向、局部应变到宏观驱动的跨尺度协同调控，使材料同时具备高驱动效率、优良力学稳定性和多功能界面响应。其次，复杂取向结构的精准构筑仍是实现高性能可编程驱动的关键。未来需要发展更高分辨率、更高自由度和可重复写入的取向方法，如动态光取向、可重构表面模板、数字化加工和外场辅助取向等，以实现拓扑缺陷、连续梯度、三维空间取向以及多区域异质取向的精确控制。再次，多场耦合响应LCE有望进一步拓展材料的智能化水平。通过引入光热材料、导电填料、磁性颗粒、离子组分、动态共价键或形状记忆单元，可使LCE对热、光、电、磁、溶剂、湿度和pH等多种刺激产生协同响应，并实现形状记忆、传感反馈、能量转换和多模态驱动的一体化。

然而，限域结构调控LCE从实验室研究走向实际应用仍面临若干挑战。例如，部分模板辅助制备方法步骤复杂、效率较低，难以实现大面积和连续化生产；未来可结合卷对卷加工(roll-to-roll manufacturing)、数字光处理(DLP)、3D打印及连续微流控制备等先进制造技术，实现限域结构的连续化和规模化构筑。同时，可通过开发可重复使用或可降解模板、优化模板复制工艺以及将模板限域与光取向、磁场取向等方法相结合，在提高取向精度的同时简化制备流程、降低制造成本，从而进一步推动LCE限域构筑策略向高效率、大面积和产业化方向发展。微纳尺度限域结构在放大制备过程中容易出现取向不均、缺陷累积和结构一致性下降等问题；同时，LCE材料在驱动应变、输出力、响应速度、循环稳定性和环境耐受性之间仍存在性能平衡难题。未来可通过优化模板精度、界面锚定及前驱体填充—聚合过程，提高规模化制备中的取向和结构一致性；同时结合分子结构设计、交联网络调控和多尺度复合增强，实现驱动性能、力学稳定性与响应效率的协同优化。此外，在器件集成层面，如何将限域LCE与电极、传感单元、控制系统和柔性基底可靠结合，也是其应用于软体机器人、智能纺织品、柔性电子和生物医学器件时必须解决的问题。因此，未来研究应进一步结合材料化学、微纳加工、数字制造、结构力学和器件工程，建立从限域结构设计、取向调控机制到器件性能评价的系统研究框架。随着可规模化加工技术、可重编程取向策略和多场耦合驱动机制的不断发展，限域结构调控LCE有望在智能纺织、柔性电子、软体机器人、自适应光学、微流控芯片和生物医学器件等领域展现更加广阔的应用前景。

参 考 文 献

1 Ware, T. H.; Biggins, J. S.; Shick, A. F.; Warner, M.; White, T. J. Localized soft elasticity in liquid crystal elastomers. *Nat. Commun.*, **2016**, 7, 10781.

2 Agrawal, A.; Adetiba, O.; Kim, H.; Chen, H. Y.; Jacot, J. G.; Verduzco, R. Stimuli-responsive liquid crystal elastomers for dynamic cell culture. *J. Mater. Res.*, **2015**, 30(4), 453−462.

3 Martella, D.; Parmeggiani, C. Advances in cell scaffolds for tissue engineering: the value of liquid crystalline elastomers. *Chem.*, **2018**, 24(47), 12206−12220.

4 Samulski, E. T.; Dong, R. Y. Chain ordering and molecular orientational order in liquid crystals. *J. Chem. Phys.*, **1982**, 77(10), 5090−5096.

5 Terentjev, E. M. Liquid-crystalline elastomers. *J. Phys.: Condens. Matter*, **1999**, 11(24), R239−R257.

6 Ohm, C.; Brehmer, M.; Zentel, R. Liquid crystalline elastomers as actuators and sensors. *Adv. Mater.*, **2010**, 22(31), 3366−3387.

7 Kularatne, R. S.; Kim, H.; Boothby, J. M.; Ware, T. H. Liquid crystal elastomer actuators: synthesis, alignment, and applications. *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, **2017**, 55(5), 395−411.

8 Ula, S. W.; Traugutt, N. A.; Volpe, R. H.; Patel, R. R.; Yu, K.; Yakacki, C. M. Liquid crystal elastomers: an introduction and review of emerging technologies. *Liq. Cryst. Rev.*, **2018**, 6(1), 78−107.

9 Tian, X. W.; Guo, Y. S.; Zhang, J. Q.; Ivasishin, O. M.; Jia, J. R.; Yan, J. H. Fiber actuators based on reversible thermal responsive liquid crystal elastomer. *Small*, **2024**, 20(24), 2306952.

10 Sawa, Y.; Urayama, K.; Takigawa, T.; DeSimone, A.; Teresi, L. Thermally driven giant bending of liquid crystal elastomer films with hybrid alignment. *Macromolecules*, **2010**, 43(9), 4362−4369.

11 Wu, J.; Yao, S. L.; Zhang, H.; Man, W. T.; Bai, Z. L.; Zhang, F.; Wang, X. M.; Fang, D. N.; Zhang, Y. H. Liquid crystal elastomer metamaterials with giant biaxial thermal shrinkage for enhancing skin regeneration. *Adv. Mater.*, **2021**, 33(45), 2106175.

12 Zhang, M.; Lu, X. X.; Ye, T. T.; Hu, H. D.; Scarbrough, J. P.; Wang, R.; Yao, Y. X.; Li, S. C.; Wang, X. G. Liquid crystal elastomers for solar, mechanical, thermal, and electrochemical energy applications. *J. Mater. Chem. A*, **2026**, 14(6), 3185−3209.

13 Brannum, M. T.; Steele, A. M.; Venetos, M. C.; Korley, L. T. J.; Wnek, G. E.; White, T. J. Light control with liquid crystalline elastomers. *Adv. Opt. Mater.*, **2019**, 7(6), 1801683.

14 Ikeda, T.; Mamiya, J. I.; Yu, Y. L. Photomechanics of liquid-crystalline elastomers and other polymers. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2007**, 46(4), 506−528.

15 Dunn, M. L. Photomechanics of mono- and polydomain liquid crystal elastomer films. *J. Appl. Phys.*, **2007**, 102, 013506.

16 Li, Y.; Liu, Y. J.; Luo, D. Polarization dependent light-driven liquid crystal elastomer actuators based on photothermal effect. *Adv. Opt. Mater.*, **2021**, 9(5), 2001861.

17 He, Q. G.; Wang, Z. J.; Wang, Y.; Minori, A.; Tolley, M. T.; Cai, S. Q. Electrically controlled liquid crystal elastomer–based soft tubular actuator with multimodal actuation. *Sci. Adv.*, **2019**, 5(10), eaax5746.

18 Fowler, H. E.; Rothemund, P.; Keplinger, C.; White, T. J. Liquid crystal elastomers with enhanced directional actuation to electric fields. *Adv. Mater.*, **2021**, 33(43), 2103806.

19 Li, Z. F.; Olson, G.; Patel, D. K.; Yao, L. N.; Majidi, C. Electrically controlled liquid crystal elastomer surfaces for dynamic wrinkling. *Adv. Intell. Syst.*, **2024**, 6(2), 2200402.

20 Wang, M.; Cheng, Z. W.; Zuo, B.; Chen, X. M.; Huang, S.; Yang, H. Liquid crystal elastomer electric locomotives. *ACS Macro Lett.*, **2020**, 9(6), 860−865.

21 Sun, Y. X.; Wang, L.; Zhu, Z. Q.; Li, X. X.; Sun, H.; Zhao, Y.; Peng, C. H.; Liu, J.; Zhang, S. W.; Li, M. J. A 3D-printed ferromagnetic liquid crystal elastomer with programmed dual-anisotropy and multi-responsiveness. *Adv. Mater.*, **2023**, 35(45), 2302824.

22 Zhang, J. C.; Guo, Y. B.; Hu, W. Q.; Soon, R. H.; Davidson, Z. S.; Sitti, M. Liquid crystal elastomer-based magnetic composite films for reconfigurable shape-morphing soft miniature machines. *Adv. Mater.*, **2021**, 33(8), 2006191.

23 Liu, J.; Jiang, H. Y.; Tian, J. Q.; Tang, Y. Q.; Feng, C. B.; Zhou, X. Y.; Huang, Z. J.; Li, B. X.; Lu, Y. Q.; Li, Q. Stimuli-responsive liquid crystal elastomers: from materials to applications. *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, 36(27), e24606.

24 Yang, Y.; Zhang, S.; Ji, Y.; Wei, Y.; Wang, J. L.; He, X. M. Magneto-responsive liquid crystalline elastomer nanocomposites. *Mater. Today*, **2024**, 74, 167−186.

25 Boothby, J. M.; Kim, H.; Ware, T. H. Shape changes in chemoresponsive liquid crystal elastomers. *Sens. Actuators B Chem.*, **2017**, 240, 511−518.

26 Camacho-Lopez, M.; Finkelmann, H.; Palffy-Muhoray, P.; Shelley, M. Fast liquid-crystal elastomer swims into the dark. *Nat. Mater.*, **2004**, 3(5), 307−310.

27 Ube, T.; Ikeda, T. Photomobile polymer materials with crosslinked liquid-crystalline structures: molecular design, fabrication, and functions. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2014**, 53(39), 10290−10299.

28 Tang, J. L.; Chen, Z. Q.; Cai, Y. T.; He, J.; Luo, Y. W. Stretch-activated reprogrammable shape-morphing composite elastomers. *Adv. Funct. Mater.*, **2022**, 32(34), 2203308.

29 Zhou, X. R.; Chen, G. C.; Jin, B. J.; Feng, H. J.; Chen, Z. K.; Fang, M. Q.; Yang, B.; Xiao, R.; Xie, T.; Zheng, N. Multimodal autonomous locomotion of liquid crystal elastomer soft robot. *Adv. Sci.*, **2024**, 11(23), 2402358.

30 Liu, J. Q.; Gao, Y. C.; Wang, H. H.; Poling-Skutvik, R.; Osuji, C. O.; Yang, S. Shaping and locomotion of soft robots using filament actuators made from liquid crystal elastomer–carbon nanotube composites. *Adv. Intell. Syst.*, **2020**, 2(6), 2070063.

31 Mao, J.; Li, J. H.; Dou, X. R.; Zhao, H. Y.; Zhong, P. Y.; Yin, L. J.; Luo, Y. W.; Pei, Q. B.; Dang, Z. M. A self healable dielectric elastomer artificial muscle. *Nat. Commun.*, **2026**, 17, 5451.

32 Sun, J. H.; Wang, Y. P.; Liao, W.; Yang, Z. Q. Ultrafast, high-contractile electrothermal-driven liquid crystal elastomer fibers towards artificial muscles. *Small*, **2021**, 17(44), 2103700.

33 Li, M. H.; Keller, P. Artificial muscles based on liquid crystal elastomers. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, **2006**, 364(1847), 2763−2777.

34 Chen, W.; Wang, Z. Y.; Yu, X.; Pan, J. T.; Wei, Y.; Yu, A. Z.; Yan, S. Y.; Ma, L. L.; Lu, Y. Q. Soft mattonics: harnessing light with liquid crystals. *Photonics Insights*, **2026**, 5(1), R03.

35 Wang, Y. C.; Dang, A. L.; Zhang, Z. F.; Yin, R.; Gao, Y. C.; Feng, L.; Yang, S. Repeatable and reprogrammable shape morphing from photoresponsive gold nanorod/liquid crystal elastomers. *Adv. Mater.*, **2020**, 32(46), 2004270.

36 Yue, L. S.; Lugger, S. J. D.; Debije, M. G.; Schenning, A. P. H. J. Reconfigurable exotic liquid crystal elastomer "smart" surfaces *via* hot embossing. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(3), 2413306.

37 Seki, T. Light-directed alignment, surface morphing and related processes: recent trends. *J. Mater. Chem. C*, **2016**, 4(34), 7895−7910.

38 Wang, M.; Chu, D.; Liu, L.; Huang, S.; Chen, X. M.; Liu, Z. Y.; Yang, H. Intelligent surfaces thermally switchable between the highly rough and entirely smooth states. *Chin. J. Polym. Sci.*, **2021**, 39(12), 1609−1616.

39 Zhao, H. Y.; Chen, Z. K.; Li, J. H.; Luo, Y. W.; Peng, Z. K.; Mao, G. Y.; Xiao, R.; Mao, J. Spatiotemporally programmed dielectric liquid crystal elastomer: electro-reversible 3D morphing *via* inverse 4D printing. *Sci. Adv.*, **2025**, 11(48), eaeb2289.

40 Ma, Y. B.; You, J. X.; Zhang, L.; Chen, R.; Zeng, H. Q.; Ge, J. H.; Li, K.; Ma, X. K.; Jen, A. K.; Liu, S. F. High thermal conductivity of liquid crystal elastomer for stress-less flexible perovskite solar cells. *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(46), 2405250.

41 Huang, Z. Q.; Li, L.; Wu, T. Q.; Xue, T. Y.; Sun, W.; Pan, Q.; Wang, H. D.; Xie, H. F.; Chi, J. M.; Han, T.; Hu, X. T.; Su, M.; Chen, Y. W.; Song, Y. L. Wearable perovskite solar cells by aligned liquid crystal elastomers. *Nat. Commun.*, **2023**, 14, 1204.

42 Herbert, K. M.; Fowler, H. E.; McCracken, J. M.; Schlafmann, K. R.; Koch, J. A.; White, T. J. Synthesis and alignment of liquid crystalline elastomers. *Nat. Rev. Mater.*, **2022**, 7(1), 23−38.

43 Küpfer, J.; Finkelmann, H. Nematic liquid single crystal elastomers. *Makromol. Chem., Rapid Commun.*, **1991**, 12(12), 717−726.

44 Yakacki, C. M.; Saed, M.; Nair, D. P.; Gong, T.; Reed, S. M.; Bowman, C. N. Tailorable and programmable liquid-crystalline elastomers using a two-stage thiol–acrylate reaction. *RSC Adv.*, **2015**, 5(25), 18997−19001.

45 Ware, T. H.; Perry, Z. P.; Middleton, C. M.; Iacono, S. T.; White, T. J. Programmable liquid crystal elastomers prepared by thiol–ene photopolymerization. *ACS Macro Lett.*, **2015**, 4(9), 942−946.

46 Fan, Q. Y.; Tang, Y. T.; Sun, H. N.; Guo, D. K.; Ma, J. W.; Guo, J. B. Cluster-triggered self-luminescence, rapid self-healing, and adaptive reprogramming liquid crystal elastomers enabled by dynamic imine bond. *Adv. Mater.*, **2024**, 36(31), 2401315.

47 Wang, Z. X.; Si, M. Q.; Han, J. Y.; Wu, Y.; Zhang, T.; Yin, K. Y.; Chen, T. Photoinduced, swift, and reversible spatiotemporal programming of double dynamically bonded liquid crystal elastomer actuators. *Adv. Mater.*, **2025**, 37(28), 2501815.

48 Saed, M. O.; Ambulo, C. P.; Kim, H.; De, R.; Raval, V.; Searles, K.; Siddiqui, D. A.; Cue, J. M. O.; Stefan, M. C.; Shankar, M. R.; Ware, T. H. Molecularly-engineered, 4D-printed liquid crystal elastomer actuators. *Adv. Funct. Mater.*, **2019**, 29(3), 1806412.

49 Yang, L.; Liu, Y.; Bi, R.; Chen, Y. H.; Valenzuela, C.; Yang, Y. Z.; Liu, H.; Wang, L.; Feng, W. Direct-ink-written shape-programmable micro-supercapacitors with electrothermal liquid crystal elastomers. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(39), 2504979.

50 Yao, Y. X.; Waters, J. T.; Shneidman, A. V.; Cui, J. X.; Wang, X. G.; Mandsberg, N. K.; Li, S. C.; Balazs, A. C.; Aizenberg, J. Multiresponsive polymeric microstructures with encoded predetermined and self-regulated deformability. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **2018**, 115(51), 12950−12955.

51 Bischoff, A.; Jamshididana, S.; Miller, Z.; Hernandez, K.; Gonsalves, N.; Olarra, A.; Yoo, E.; Herman, J. A.; Roach, D. J. Spatially tailorable liquid crystalline elastomer alignment during digital light process 3D printing. *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, 36(33), e22676.

52 Warner, M.; Terentjev, E. M. *Liquid Crystal Elastomers*. Revised. Oxford: Clarendon Press, **2007**.

53 Ohm, C.; Haberkorn, N.; Theato, P.; Zentel, R. Template-based fabrication of nanometer-scaled actuators from liquid-crystalline elastomers. *Small*, **2011**, 7(2), 194−198.

54 Zhang, M.; Yang, L.; Ding, X. Y.; Scarbrough, J. P.; Singh, T. N.; Yao, Y. X.; Li, S. C.; Wang, X. G. Liquid crystal elastomers under confinement: a review of template-based fabrication and applications. *Adv. Eng. Mater.*, **2026**, 28, e202501727.

55 Geng, Y.; Lagerwall, J. P. F. Multiresponsive cylindrically symmetric cholesteric liquid crystal elastomer fibers templated by tubular confinement. *Adv. Sci.*, **2023**, 10(19), 2301414.

56 Liu, X.; Zhou, X.; Liu, Z. F. Strengthening liquid crystal elastomer muscles. *Acc. Chem. Res.*, **2025**, 58(6), 907−918.

57 Ma, J. Z.; Yang, Z. Q. Smart liquid crystal elastomer fibers. *Matter*, **2025**, 8(2), 101950.

58 Roach, D. J.; Yuan, C.; Kuang, X.; Li, V. C.; Blake, P.; Romero, M. L.; Hammel, I.; Yu, K.; Qi, H. J. Long liquid crystal elastomer fibers with large reversible actuation strains for smart textiles and artificial muscles. *ACS Appl. Mater. Interfaces*,

2019, 11(21), 19514−19521.

59 Hu, Z. M.; Li, Y. L.; Zhao, T. H.; Lv, J. A. Self-winding liquid crystal elastomer fiber actuators with high degree of freedom and tunable actuation. *Appl. Mater. Today*, **2022**, 27, 101449.

60 Steinhart, M.; Wendorff, J. H.; Greiner, A.; Wehrspohn, R. B.; Nielsch, K.; Schilling, J.; Choi, J.; Gösele, U. Polymer nanotubes by wetting of ordered porous templates. *Science*, **2002**, 296(5575), 1997.

61 Mijangos, C.; Martin, J. Polymerization within nanoporous anodized alumina oxide templates (AAO): a critical survey. *Polymers*, **2023**, 15(3), 525.

62 Dupont, R. L.; Xu, Y.; Borbora, A.; Wang, X. Y.; Azadi, F.; Havener, K.; Lewis, B.; Deng, W. C.; Tan, B. W.; Li, S. C.; Zhang, R.; Yao, Y. X.; Manna, U.; Wang, X. G. Synergistic adhesion and shape deformation in nanowire-structured liquid crystal elastomers. *Adv. Mater.*, **2025**, 37(9), 2414695.

63 Zhang, R. B.; Zeng, X. B.; Kim, B.; Bushby, R. J.; Shin, K.; Baker, P. J.; Percec, V.; Leowanawat, P.; Ungar, G. Columnar liquid crystals in cylindrical nanoconfinement. *ACS Nano*, **2015**, 9(2), 1759−1766.

64 Xia, Y.; Lee, E.; Hu, H.; Gharbi, M. A.; Beller, D. A.; Fleischmann, E. K.; Kamien, R. D.; Zentel, R.; Yang, S. Better actuation through chemistry: using surface coatings to create uniform director fields in nematic liquid crystal elastomers. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2016**, 8(19), 12466−12472.

65 Lee, Y. J.; Abdelrahman, M. K.; Kalairaj, M. S.; Ware, T. H. Self-assembled microactuators using chiral liquid crystal elastomers. *Small*, **2023**, 19(41), 2302774.

66 Shahsavan, H.; Salili, S. M.; Jákli, A.; Zhao, B. X. Smart muscle-driven self-cleaning of biomimetic microstructures from liquid crystal elastomers. *Adv. Mater.*, **2015**, 27(43), 6828−6833.

67 Han, W. C.; Lee, Y. J.; Kim, S. U.; Lee, H. J.; Kim, Y. S.; Kim, D. S. Versatile mechanochromic sensor based on highly stretchable chiral liquid crystalline elastomer. *Small*, **2023**, 19(7), 2206299.

68 Moorhouse, T.; Raistrick, T. Sub-micron diffractive optical elements facilitated by intrinsic deswelling of auxetic liquid crystal elastomers. *Adv. Opt. Mater.*, **2024**, 12(24), 2400866.

69 Zhang, P.; de Haan, L. T.; Debije, M. G.; Schenning, A. P. H. J. Liquid crystal-based structural color actuators. *Light Sci. Appl.*, **2022**, 11, 248.

70 Liu, X. Y.; Kim, S. K.; Wang, X. G. Thermomechanical liquid crystalline elastomer capillaries with biomimetic peristaltic crawling function. *J. Mater. Chem. B*, **2016**, 4(45), 7293−7302.

71 Wang, Q. R.; Tian, X. Y.; Zhang, D. K.; Zhou, Y. L.; Yan, W. Q.; Li, D. C. Programmable spatial deformation by controllable off-center freestanding 4D printing of continuous fiber reinforced liquid crystal elastomer composites. *Nat. Commun.*, **2023**, 14, 3869.

72 Kumar, S.; Kim, J. H.; Shi, Y. S. What aligns liquid crystals on solid substrates? The role of surface roughness anisotropy. *Phys. Rev. Lett.*, **2005**, 94(7), 077803.

73 Oh, S. Y.; Kang, S. W. Photoreactive self-assembled monolayer for the stabilization of tilt orientation of a director in vertically aligned nematic liquid crystals. *Opt. Express*, **2013**, 21(25), 31367.

74 Fuchi, K.; Ware, T. H.; Buskohl, P. R.; Reich, G. W.; Vaia, R. A.; White, T. J.; Joo, J. J. Topology optimization for the design of folding liquid crystal elastomer actuators. *Soft matter*, **2015**, 11(37), 7288−7295.

75 Sousa, M. E.; Broer, D. J.; Bastiaansen, C. W. M.; Freund, L. B.; Crawford, G. P. Isotropic “islands” in a cholesteric “sea”: patterned thermal expansion for responsive surface topologies. *Adv. Mater.*, **2006**, 18(14), 1842−1845.

76 Yoon, H. H.; Kim, D. Y.; Jeong, K. U.; Ahn, S. K. Surface aligned main-chain liquid crystalline elastomers: tailored properties by the choice of amine chain extenders. *Macromolecules*, **2018**, 51(3), 1141−1149.

77 Xu, Y.; Dupont, R. L.; Yao, Y. X.; Zhang, M.; Fang, J. C.; Wang, X. G. Random liquid crystalline copolymers consisting of prolate and oblate liquid crystal monomers. *Macromolecules*, **2021**, 54(12), 5376−5387.

78 Pranda, P. A.; Kim, H.; Clapper, J.; Hedegaard, A.; Nelson, E.; Biggins, J. S.; Hayward, R. C.; White, T. J. Tuning adhesion through 3D mesogen alignment in liquid crystalline elastomers. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2026**, 18(25), 35983−35992.

79 Ahn, S. K.; Ware, T. H.; Lee, K. M.; Tondiglia, V. P.; White, T. J. Photoinduced topographical feature development in blueprinted azobenzene-functionalized liquid crystalline elastomers. *Adv. Funct. Mater.*, **2016**, 26(32), 5819−5826.

80 Carroll, G. T.; Lee, K. M.; McConney, M. E.; Hall, H. J. Optical control of alignment and patterning in an azobenzene liquid crystal photoresist. *J. Mater. Chem. C*, **2023**, 11(6), 2177−2185.

81 Yu, Y. L.; Maeda, T.; Mamiya, J. I.; Ikeda, T. Photomechanical effects of ferroelectric liquid-crystalline elastomers containing azobenzene chromophores. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2007**, 46(6), 881−883.

82 Sánchez-Ferrer, A.; Merekalov, A.; Finkelmann, H. Opto-mechanical effect in photoactive nematic side-chain liquid-crystalline elastomers. *Macromol. Rapid Commun.*, **2011**, 32(8), 671−678.

83 McCracken, J. M.; Tondiglia, V. P.; Auguste, A. D.; Godman, N. P.; Donovan, B. R.; Bagnall, B. N.; Fowler, H. E.; Baxter, C. M.; Matavulj, V.; Berrigan, J. D.; White, T. J. Microstructured photopolymerization of liquid crystalline elastomers in oxygen-rich environments. *Adv. Funct. Mater.*, **2019**, 29(40), 1903761.

84 Murauski, A.; Li, X. H.; Chigrinov, V.; Kobrin, B.; Chinn, J. P-56: Aligning liquid crystals using self-assembled monolayers. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, **2007**, 38(1), 397−398.

85 Park, S. G.; Park, H. G. Alignment of liquid crystal molecules on self-assembled monolayer with fluorinated alkyl chain at different deposition time. *Opt. Mater.*, **2018**, 85, 298−302.

86 Gelebart, A. H.; Jan Mulder, D.; Varga, M.; Konya, A.; Vantomme, G.; Meijer, E. W.; Selinger, R. L. B.; Broer, D. J. Making waves in a photoactive polymer film. *Nature*, **2017**, 546(7660), 632−636.

87 Ohm, C.; Fleischmann, E. K.; Kraus, I.; Serra, C.; Zentel, R. Control of the properties of micrometer-sized actuators from liquid crystalline elastomers prepared in a microfluidic setup. *Adv. Funct. Mater.*, **2010**, 20(24), 4314−4322.

88 Miller, D. S.; Wang, X. G.; Abbott, N. L. Design of functional materials based on liquid crystalline droplets. *Chem. Mater.*, **2014**, 26(1), 496−506.

89 Bera, T.; Malcuit, C.; Clements, R. J.; Hegmann, E. Role of surfactant during microemulsion photopolymerization for the creation of three-dimensional liquid crystal elastomer microsphere spatial cell scaffolds. *Front. Mater.*, **2016**, 3, 31.

90 Mondiot, F.; Wang, X. G.; de Pablo, J. J.; Abbott, N. L. Liquid crystal-based emulsions for synthesis of spherical and non-spherical particles with chemical patches. *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, 135(27), 9972−9975.

91 Kim, J.; Khan, M.; Park, S. Y. Glucose sensor using liquid-crystal droplets made by microfluidics. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2013**, 5(24), 13135−13139.

92 Sengupta, A.; Herminghaus, S.; Bahr, C. Liquid crystal microfluidics: surface, elastic and viscous interactions at microscales. *Liq. Cryst. Rev.*, **2014**, 2(2), 73−110.

93 Shui, L. L.; Kooij, E. S.; Wijnperlé, D.; van den Berg, A.; Eijkel, J. C. T. Liquid crystallography: 3D microdroplet arrangements using microfluidics. *Soft Matter*, **2009**, 5(14), 2708.

94 Han, X. W.; Han, D. D.; Zeng, J. Y.; Deng, J. N.; Hu, N.; Yang, J. Fabrication and performance of monodisperse liquid crystal droplet-based microchips for the on-chip detection of bile acids. *Microchem. J.*, **2020**, 157, 105057.

95 Hamlington, B. D.; Steinhaus, B.; Feng, J. J.; Link, D.; Shelley, M. J.; Shen, A. Q. Liquid crystal droplet production in a microfluidic device. *Liq. Cryst.*, **2007**, 34(7), 861−870.

96 Ohm, C.; Serra, C.; Zentel, R. A continuous flow synthesis of micrometer-sized actuators from liquid crystalline elastomers. *Adv. Mater.*, **2009**, 21(47), 4859−4862.

97 Shiralipour, F.; Nik Akhtar, Y.; Gilmor, A.; Pegorin, G.; Valerio-Aguilar, A.; Hegmann, E. The role of liquid crystal elastomers in pioneering biological applications. *Crystals*, **2024**, 14(10), 859.

98 Yang, H.; Ye, G.; Wang, X. G.; Keller, P. Micron-sized liquid crystalline elastomer actuators. *Soft Matter*, **2011**, 7(3), 815−823.

99 Hessberger, T.; Braun, L.; Zentel, R. Microfluidic synthesis of actuating microparticles from a thiol-ene based main-chain liquid crystalline elastomer. *Polymers*, **2016**, 8(12), 410.

100 Sánchez-Ferrer, A.; Fischl, T.; Stubenrauch, M.; Albrecht, A.; Wurmus, H.; Hoffmann, M.; Finkelmann, H. Liquid-crystalline elastomer microvalve for microfluidics. *Adv. Mater.*, **2011**, 23(39), 4526−4530.

101 Wang, Q.; Yu, L.; Yu, M. N.; Zhao, D. Y.; Song, P.; Chi, H.; Guo, L.; Yang, H. Liquid crystal elastomer actuators from anisotropic porous polymer template. *Macromol. Rapid Commun.*, **2017**, 38(15), 1600699.

102 Gao, Y. X.; Mori, T.; Manning, S.; Zhao, Y.; Nielsen, A. D.; Neshat, A.; Sharma, A.; Mahnen, C. J.; Everson, H. R.; Crotty, S.; Clements, R. J.; Malcuit, C.; Hegmann, E. Biocompatible 3D liquid crystal elastomer cell scaffolds and foams with primary and secondary porous architecture. *ACS Macro Lett.*, **2016**, 5(1), 4−9.

103 Lee, J.; Sim, J.; Yang, X.; Wu, S.; Averitt, S.; Zhao, R. R. Porous liquid crystal elastomers for thermal-driven tunable acoustic properties. *Mater. Today*, **2026**, 98, 103394.

104 Prévôt, M. E.; Ustunel, S.; Bergquist, L. E.; Cukelj, R.; Gao, Y. X.; Mori, T.; Pauline, L.; Clements, R. J.; Hegmann, E. Synthesis of biocompatible liquid crystal elastomer foams as cell scaffolds for 3D spatial cell cultures. *J. Vis. Exp.*, **2017**(122), 55452.

105 Karausta, A.; Bukusoglu, E. Liquid crystal-templated synthesis of mesoporous membranes with predetermined pore alignment. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2018**, 10(39), 33484−33492.

106 Wang, M.; Song, Y.; Bisoyi, H. K.; Yang, J. F.; Liu, L.; Yang, H.; Li, Q. A liquid crystal elastomer-based unprecedented two-way shape-memory aerogel. *Adv. Sci.*, **2021**, 8(22), 2102674.

107 Wang, M.; Li, J. S.; Yang, H. Dynamic diselenide bond-enabled liquid crystal elastomer-based two-way shape memory

aerogels with weldability and closed-loop recyclability. *Smart Mol.*, **2023**, 1(3), e20230009.

108 Shen, W. B.; Li, G. Q. Recent progress in liquid crystal-based smart windows: materials, structures, and design. *Laser Photonics Rev.*, **2023**, 17, 2200207.

109 Astam, M. O.; Zhan, Y. Y.; Slot, T. K.; Liu, D. Q. Active surfaces formed in liquid crystal polymer networks. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2022**, 14(20), 22697−22705.

110 Ge, F. J.; Yang, R.; Tong, X.; Camerel, F.; Zhao, Y. A multifunctional dye-doped liquid crystal polymer actuator: light-guided transportation, turning in locomotion, and autonomous motion. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2018**, 57(36), 11758−11763.

111 Kragt, A. J. J.; Loonen, R. C. G. M.; Broer, D. J.; Debije, M. G.; Schenning, A. P. H. J. 'Smart' light-reflective windows based on temperature responsive twisted nematic liquid crystal polymers. *J. Polym. Sci.*, **2021**, 59(12), 1278−1284.

112 He, F.; Zhang, M. J.; Wang, W.; Cai, Q. W.; Su, Y. Y.; Liu, Z.; Faraj, Y.; Ju, X. J.; Xie, R.; Chu, L. Y. Designable polymeric microparticles from droplet microfluidics for controlled drug release. *Adv. Mater. Technol.*, **2019**, 4(6), 1800687.

113 Stratakis, E.; Ranella, A.; Fotakis, C. Biomimetic micro/nanostructured functional surfaces for microfluidic and tissue engineering applications. *Biomicrofluidics*, **2011**, 5, 013411.

114 Xu, Y.; Rather, A. M.; Yao, Y. X.; Fang, J. C.; Mamtani, R. S.; Bennett, R. K. A.; Atta, R. G.; Adera, S.; Tkalec, U.; Wang, X. G. Liquid crystal–based open surface microfluidics manipulate liquid mobility and chemical composition on demand. *Sci. Adv.*, **2021**, 7(40), eabi7607.

115 Deng, J. N.; Wang, X. C.; Liang, W. L.; Richardson, D.; Lu, Q.; Fang, J. Y. Surface modified liquid crystal droplets as an optical probe for the detection of bile acids in microfluidic channels. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **2018**, 542, 52−58.

116 Ware, T. H.; McConney, M. E.; Wie, J. J.; Tondiglia, V. P.; White, T. J. Voxelated liquid crystal elastomers. *Science*, **2015**, 347(6225), 982−984.

117 Peng, W. J.; Zhang, G. G.; Liu, J.; Nie, S.; Wu, Y.; Deng, S. H.; Fang, G. Q.; Zhou, J.; Song, J. Z.; Qian, J.; Pan, P. J.; Zhao, Q.; Xie, T. Light-coded digital crystallinity patterns toward bioinspired 4D transformation of shape-memory polymers. *Adv. Funct. Mater.*, **2020**, 30(19), 2000522.

118 Xu, Z. Y.; Li, L.; Yin, X.; Shi, L. Y.; Yang, K. K.; Wang, Y. Z. Synchronously thermochromic and shape-shifting liquid crystal elastomers enabled by hierarchical structure control for multidimensional encryption. *Adv. Mater. Technol.*, **2024**, 9(9), 2302009.

119 Xia, Y. L.; Mu, T.; Liu, Y. J.; Leng, J. S. Carbon fiber reinforced liquid crystalline elastomer composites: a dual exploration in strength augmentation and transformation flexibility through 4D printing. *Int. J. Smart Nano Mater.*, **2024**, 15(2), 312−329.

120 Chen, M.; An, R.; Demoly, F.; Qi, H. J.; Zhou, K. Hybrid 4D printing of flexible multifunctional composites by multi jet fusion and direct ink writing. *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, **2025**, 163, 100890.

121 Li, L. Z.; Dong, X.; Xu, J. W.; Jiang, Y. Y.; Zhou, X. S.; Li, Q. Y.; Yuan, N. Y.; Ding, J. N. Liquid-phase drawing of LCE/CNT composites for electrothermal actuators. *Sens. Actuators B Chem.*, **2023**, 390, 133846.

122 Agrawal, A.; Luchette, P.; Palffy-Muhoray, P.; Biswal, S. L.; Chapman, W. G.; Verduzco, R. Surface wrinkling in liquid crystal elastomers. *Soft Matter*, **2012**, 8(27), 7138.

123 Yang, X.; Sim, J.; Huang, W. B.; Zhao, R. R. Bioinspired synergistic texture and color modulation enabled by surface instability of cholesteric liquid crystal elastomer bilayers. *Sci. Adv.*, **2025**, 11(44), eaea9183.

124 Xu, Y.; Rather, A. M.; Song, S.; Fang, J. C.; Dupont, R. L.; Kara, U. I.; Chang, Y.; Paulson, J. A.; Qin, R. J.; Bao, X. P.; Wang, X. G. Ultrasensitive and selective detection of SARS-CoV-2 using thermotropic liquid crystals and image-based machine learning. *Cell Rep. Phys. Sci.*, **2020**, 1(12), 100276.

125 Hebner, T. S.; Kirkpatrick, B. E.; Anseth, K. S.; Bowman, C. N.; White, T. J. Surface-enforced alignment of reprogrammable liquid crystalline elastomers. *Adv. Sci.*, **2022**, 9(29), 2204003.

126 Babakhanova, G.; Turiv, T.; Guo, Y. B.; Hendrikx, M.; Wei, Q. H.; Schenning, A. P. H. J.; Broer, D. J.; Lavrentovich, O. D. Liquid crystal elastomer coatings with programmed response of surface profile. *Nat. Commun.*, **2018**, 9, 456.

127 Wang, X. G.; Bukusoglu, E.; Miller, D. S.; Bedolla Pantoja, M. A.; Xiang, J.; Lavrentovich, O. D.; Abbott, N. L. Synthesis of optically complex, porous, and anisometric polymeric microparticles by templating from liquid crystalline droplets. *Adv. Funct. Mater.*, **2016**, 26(40), 7343−7351.

128 Fleischmann, E. K.; Liang, H. L.; Kapernaum, N.; Giesselmann, F.; Lagerwall, J.; Zentel, R. One-piece micropumps from liquid crystalline core-shell particles. *Nat. Commun.*, **2012**, 3, 1178.

129 Chen, G. C.; Jin, B. J.; Shi, Y. P.; Zhao, Q.; Shen, Y. Q.; Xie, T. Rapidly and repeatedly reprogrammable liquid crystalline elastomer *via* a shape memory mechanism. *Adv. Mater.*, **2022**, 34(21), 2201679.

130 Zhang, C. C.; Chen, G. C.; Zhang, K. H.; Jin, B. J.; Zhao, Q.; Xie, T. Repeatedly programmable liquid crystal dielectric

elastomer with multimodal actuation. *Adv. Mater.*, **2024**, 36(16), 2313078.