

文章编号: 1007-2780(2026)03-0319-14

基于边界条件约束液晶拓扑缺陷的研究进展

吴作用¹, 陈雅丽¹, 林或轩¹, 张润中¹, 姚丽双^{1,2*}

(1. 汕头大学理学院, 广东 汕头 515063;
2. 广东省车载显示触控技术企业重点实验室, 广东 汕头 515047)

摘要: 液晶是一类兼具液体流动性与晶体有序性的各向异性软物质, 因其光学、电学及力学性质的显著各向异性而在显示及光调控领域获得广泛应用。此外, 凭借独特的长程有序性, 液晶已成为研究连续介质有序性与对称性破缺的理想模型。然而液晶的长程有序性并非绝对稳定, 其在自组装过程中或受到外界扰动时, 往往会产生缺陷。随着软物质物理与拓扑场论的发展, 人们对液晶缺陷的理解逐渐从“被动形成的缺陷结构”转向“可编程的功能单元”。为此, 本文综述了液晶缺陷的起源、分类、形成机理以及其基于边界条件约束的可控构筑与应用前景。首先, 从缺陷的物理定义出发, 梳理了向错、位错等缺陷类型及拓扑特征; 接着, 分析了液晶取向有序性与缺陷形成的内在关联; 随后, 从不同类型边界条件对液晶取向场约束作用出发, 分别讨论了固体界面的微结构化约束、自由界面的自发锚定效应以及外场驱动下流体软界面的边界约束响应等 3 种视角下液晶缺陷在空间位置与构型上的可控实现方式。最后, 展望了液晶拓扑缺陷在拓扑光子学、可调激光器、微流控操控与胶体组装等前沿领域的应用前景。

关键词: 液晶; 拓扑缺陷; 调控; 取向; 界面

中图分类号: O753⁺.2 文献标识码: A doi: 10.37188/CJLCD.2025-0253 CSTR: 32172.14.CJLCD.2025-0253

Research progress on topological defects in liquid crystals under boundary conditions

WU Zuoyong¹, CHEN Yali¹, LIN Yuxuan¹, ZHANG Runzhong¹, YAO Lishuang^{1,2*}

(1. College of Science, South Shantou University, Shantou 515063, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Automotive Display and Touch Technologies, Shantou 515047, China)

Abstract: Liquid crystals are anisotropic soft materials that combine fluidity with long-range orientational order, exhibiting pronounced optical, electrical, and mechanical anisotropy, which underpins their widespread use in displays and optical modulation. Furthermore, their unique ordered states also make them ideal model systems for studying symmetry breaking and continuous media order. However, such order is not perfect; defects readily form during self-assembly or under external perturbation. Advances in soft-matter physics and topological field theory have shifted the perception of defects from mere structural imperfections to programmable functional units. In this review, we summarize the origins, classification, and formation mechanisms of defects in liquid crystals, with a focus on their controllable construction via boundary conditions and their emerging applications. First, we outline fundamental defect types, including

收稿日期: 2025-12-22; 修订日期: 2026-02-05.

基金项目: 2023 年度广东省科技创新战略专项资金 (No. 2023B1212020004)

Supported by Guangdong Provincial Science and Technology Innovation Strategy Special Fund (No. 2023B1212020004)

*通信联系人, E-mail: lsyao@stu.edu.cn

disclinations and dislocations, and describe their topological characteristics. This is followed by an analysis of the relationship between orientational order and defect formation. We then discuss strategies for regulating defects from three interfacial perspectives: microstructured solid boundaries, spontaneous anchoring at free interfaces, and field-responsive soft fluid interfaces, with an emphasis on spatial and configurational control. Finally, we highlight prospective applications in topological photonics, tunable lasers, microfluidic manipulation, and colloidal assembly.

Key words: liquid crystals; topological defects; manipulation; alignment; interface

1 引言

液晶作为一种典型的软物质,兼具液体的流动性和晶体的光学各向异性,能够在特定条件下自组装形成具有长程取向有序的宏观相,从而展现出丰富的相行为和多层级组装结构^[1]。根据液晶分子内在排列和对称性的不同,液晶展现出具有不同取向序和位置序的多种物相,包括向列相、近晶相、胆甾相和蓝相等相态。在液晶从各向同性相向有序相转变的过程中,若受几何约束、界面锚定及外场扰动时,体系的指向矢量往往难以维持空间的连续性分布,这种指向矢取向的不连续性导致了序参数场的奇异性,进而形成拓扑缺陷。目前,已有大量研究工作通过利用光、电、磁等外场刺激诱导液晶指向矢重排,进而实现缺陷的产生和调控^[2-5]。

本文重点综述了基于界面锚定与体相弹性竞争机制且结合预设空间几何图形、界面拓扑形貌及界面化学性质限域,来实现拓扑缺陷诱导和调控的研究进展。首先从缺陷的物理定义出发,梳理了向错、位错等拓扑特征以及缺陷形成的内在作用机制。随后,从不同类型边界条件对液晶取向场的约束作用出发,分别讨论了固体界面的微结构化约束、自由界面的自发锚定效应以及外场驱动下流体软界面的边界约束响应等3种视角下液晶缺陷在空间位置与构型上的可控实现方式。最后,展望了液晶拓扑缺陷在拓扑光子学、可调激光器、微流控操控与胶体组装等前沿领域的应用前景。

2 缺陷定义

在晶体中,自组装构筑的是平移对称的周期性晶格,原子偏离理想格点的位置会形成缺陷。Volterra于1907年首次提出缺陷概念,并逐步发

展出位错和向错两大类理论框架^[6]。缺陷的存在对有序介质性质具有决定性影响,20世纪40年代的位错理论为塑性变形提供了基础解释,而显微镜在20世纪20年代已观察到向错,理论体系则直到60年代才逐渐完善。这一发展脉络表明,缺陷的产生与体系对称性的破缺密切相关。

液晶缺陷是指液晶分子取向或位置的有序性发生局部破缺,导致局部区域取向或位置的不连续现象。晶体位错主要来源于平移对称性的破缺。液晶缺陷主要源于取向序或部分有序结构的破缺。

在各种液晶相中,向列相与近晶相作为两种被广泛探讨的相态,其结构组织、缺陷行为及对外界刺激的响应机制,可为理解液晶微观有序与宏观物性之间的关联奠定重要基础。

在向列相液晶中,缺陷主要表现为向错,指向矢在空间中不连续变化;在近晶相或胆甾相液晶中,由于同时具有取向序与一定程度的位置序,则可同时出现向错与位错类型的缺陷。因此,尽管在缺陷分类与拓扑描述上可做一定参照,但二者在对称性基础与物理机制上并不严格对应。

向列相液晶拓扑缺陷通常借助同伦的理论进行描述^[7]。对于具有头尾对称性的向列相,其分子取向可用无符号指向矢 $\mathbf{n}(\mathbf{r})$ (其中 \mathbf{n} 与 $-\mathbf{n}$ 等价)来表征。用一个序参量可表示液晶分子的取向,液晶分子所有可能的取向组成一个序参量空间,称为内态流形。为了判断某一区域内部是否存在缺陷,可以在实空间中围绕该区域取一个闭合环路,并观察环路上液晶分子取向在内态流形中对应的变化轨迹。如果这一轨迹能够在不破坏取向连续性的前提下被“收缩”到流形上的一个点,则说明该区域内部的取向场是连续的,没有拓扑缺陷。相反,如果这条轨迹由于流形自身的拓扑限制而无法收缩为一点,则意味着该区

域内存在无法通过连续形变消除的缺陷。不同轨迹的绕法属于不同的同伦类,它们之间不能通过连续变形相互转化。拓扑荷 m 定义为指向矢方位角 θ 沿围绕缺陷核心的闭合回路变化的总相位除以 2π ^[8],即

$$m = 2\pi \int \nabla \theta dl. \quad (1)$$

向错强度也被称为该向错的拓扑荷,是拓扑不变量,表示不同的同伦类。由于棒状液晶分子的反转取向与它本身等价, m 只能取整数或半整数。如图1(a)所示,当沿闭合回路顺(或逆)时针绕行缺陷核心一周时,若指向矢也以相同方向连续旋转 2π ,则该缺陷的拓扑荷为 $+1$;当沿闭合回路顺(或逆)时针绕行缺陷核心一周时,若指向矢以相反方向连续旋转 π ,则该缺陷的拓扑荷 m 为 $-1/2$ 。

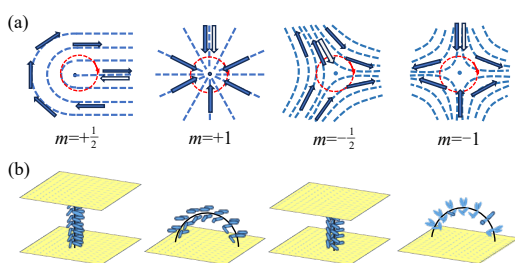


图1 向列相液晶中的拓扑缺陷。(a)不同二维液晶拓扑荷点缺陷的结构示意图;(b)不同组合方式形成的三维液晶向错线结构示意图。

Fig.1 Topological defects in nematic liquid crystals. (a) Schematics of point defects with different topological charges in two-dimensional liquid crystal systems; (b) Schematics of disclination lines formed by different combinations in three-dimensional liquid crystal systems.

向列相液晶中缺陷的拓扑分类亦会随空间维度变化而变化。对于二维向列相液晶系统,例如在薄膜几何约束或者具有显著界面效应的体系中,缺陷的拓扑荷 m 可为任意整数或半整数,因此理论上存在几乎无穷多种不同的拓扑缺陷。而对于三维向列相液晶系统,所有的半整数向错在拓扑上彼此等价,它们可以通过连续的形变相互转换;相反,所有的整数向错在拓扑上等价于均匀结构,如图1(b)所示^[9]。

近晶相液晶,由于其分子排列成层状结构,

在垂直于层的法线方向分子具有位置有序性,而在每一层中分子具有取向有序性,所以它比向列相更有序^[10]。位置有序性的存在使层间距具有较强的刚性,因此层状结构对分子取向场的变化提出了更强的限制。指向矢的扭曲和弯曲往往会破坏层状排列,或导致层的错位、断裂以及局部层间距变化,因而对应的能量代价较高;相比之下,与层状结构更易协调的展曲形变更容易发生^[11]。因此,当近晶相液晶分子层与界面相互作用时,为保持液晶分子层间距恒定,分子层会发生一定程度的展曲形变以适应锚定条件,从而常在微观尺度下诱导出焦锥畴等具有复杂拓扑特征的缺陷结构。

3 边界条件约束下液晶缺陷的形成

向列相液晶宏观取向有序性通常用指向矢量 $\mathbf{n}(\mathbf{r})$ 来描述,指向矢代表液晶分子在微观尺度下分子长轴的平均排列方向。为了定量刻画分子取向相对于指向矢的有序程度,引入序参数:

$$S = \langle P_2(\cos \theta) \rangle = \frac{1}{2} \langle 3\cos^2 \theta - 1 \rangle, \quad (2)$$

其中: θ 为单个分子长轴与局域指向矢 \mathbf{n} 之间的夹角,尖括号表示对所有分子取向的统计平均, $P_2(x)$ 为第二阶勒让德多项式。该定义源于向列相液晶分子取向在统计意义上满足头尾等价的对称性要求,即体系在 $\mathbf{n} \rightarrow -\mathbf{n}$ 变换下保持不变,因此序参数必须为 $\cos \theta$ 的偶函数。在各向同性相中,分子取向在空间中均匀分布,有 $\langle \cos^2 \theta \rangle = 1/3$,从而自然得到 $S=0$;而在完全取向有序的理想情况下,所有分子沿指向矢排列,对应 $\theta=0$,此时 $S=1$ 。因此,在向列相液晶中序参数满足 $0 < S < 1$ 。对于给定的液晶材料,序参数 S 通常随温度升高而减小,在典型向列相体系中其取值范围一般介于 $0.3 \sim 0.8$ 之间^[12]。

向列相液晶分子的长程取向有序性不仅由体相内分子间的相互作用决定,而且对界面条件极为敏感。当向列相液晶与固体基底、空气或不互溶流体等不同物相接触时,界面处的分子排列会受到表面化学性质、表面形貌及几何约束等因素的共同影响,从而产生对分子取向具有影响作用的界面锚定效应^[13-15]。通常,在接触界面附近会形成一层厚度约为分子尺度(约 $2 \sim 4$ nm)的有

序取向层,其指向矢沿界面所偏好的方向排列,该排列方向称为分子在界面的锚定方向。图 2(a)为液晶分子不同排列方式示意图。在无外场作用的情况下,这种界面诱导的取向偏好通过向列相液晶内部的弹性相互作用而向体相内部传播,进而影响整体指向矢场的空间排列构型。

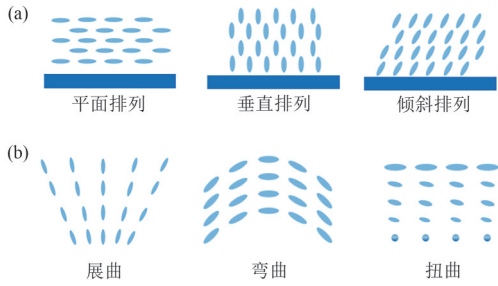


图 2 向列相液晶排列及弹性形变示意图。(a) 分子取向排列示意图;(b) 3种弹性形变示意图。

Fig. 2 Schematic diagram of the molecular alignment and elastic deformations in the nematic phase. (a) Schematic of molecular orientation alignment; (b) Schematic of the three types of elastic deformations.

根据界面作用强度的不同,锚定能 W 可分为强锚定与弱锚定两类,其典型取值范围为 $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ J/m}^2$ ^[16]。强锚定条件下,界面处分子的取向近乎固定;而在弱锚定条件下,表面取向可在弹性力或外加扰动作用下发生有限偏转。因此,通过调控界面的化学组成或表面微观形貌,可以有效实现向列相液晶指向矢的重排及锚定模式调控。

在有边界条件约束的向列相液晶体系中,界面锚定所施加的取向约束对液晶体相中的指向矢量场分布亦起着关键作用。界面锚定所施加的取向约束会在液晶体相中引入取向梯度,使指向矢量场发生弹性畸变。图 2(b)为向列相液晶指向矢的 3 种不同典型形变方式:展曲、扭曲和弯曲。相应的 Frank-Oseen 弹性自由能密度可以表示为:

$$f = \frac{1}{2} K_{11} (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_{22} (\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_{33} (\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n})^2, \quad (3)$$

其中, K_{11} 、 K_{22} 和 K_{33} 分别是展曲、扭曲、弯曲的弹性常数^[17]。然而,这一矢量场理论存在一个根本性局限。在分析拓扑缺陷时,直接计算得到的缺

陷核心能量往往会发散至无穷大,导致理论预测与实验结果不符。为了克服 Frank-Oseen 理论在描述缺陷核区域时的困难, Landau-de Gennes 理论随后被发展出来^[18]。

相较于 Frank-Oseen 理论, Landau-de Gennes 理论对向列相液晶系统中缺陷行为的描述更为精确。Landau-de Gennes 理论引入对称、无迹的序参数张量 \mathbf{Q} 作为基本描述变量。在单轴向列相中, \mathbf{Q} 可写为:

$$\mathbf{Q}_{ij} = S \left(n_i n_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right), \quad (4)$$

其中: S 表示向列相单轴序参数; \mathbf{n} 为液晶分子指向矢, n_i 或 n_j 表示指向矢 \mathbf{n} 的不同分量的数值; δ_{ij} 为 Kronecker's delta 函数(当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$; 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$)。 \mathbf{Q} 张量本身包含了序参数 S 和指向矢 \mathbf{n} 的信息,并允许有序度在空间中连续变化,甚至在缺陷核处显著降低。在该理论中,体系的总自由能表示为体自由能、弹性畸变能与表面锚定能之和:

$$F_{\text{LdG}} = \int_V (f_{\text{bulk}} + f_{\text{elastic}}) dV + \int_A f_{\text{surface}} dA, \quad (5)$$

其中: V 和 A 分别表示液晶系统的体积和表面积;体自由能项 f_{bulk} 描述向列相-各向同性相变及局域有序度的稳定性;弹性畸变能项 f_{elastic} 通过 \mathbf{Q} 张量的梯度项刻画取向畸变,其系数与 Frank 弹性常数之间存在对应关系;表面自由能项 f_{surface} 直接通过 \mathbf{Q} 与锚定强度 W 表征边界处的取向约束。该理论以 \mathbf{Q} 张量作为基本描述量构建张量场模型,对液晶体系中的有序结构进行分析,拓展了对相变机制、拓扑缺陷及双轴行为的理解^[19]。

当向列相液晶与另一相界面(如固体基底、空气或不互溶性液体)接触时,其分子排列会受到界面锚定的约束。固体基底通常提供较强且取向明确的锚定强度;而空气或各向同性液体界面则提供较弱的有效锚定,其取向偏好多表现为近似自由取向或倾向于垂直排列^[20-22]。在典型的向列相液晶薄膜体系中,液晶材料涂覆于单一固体基底之上,下基板施加确定性的强锚定约束,而上方的自由空气界面则引入整体性但相对较弱的取向限制。当上下界面所施加的锚定条件存在差异甚至相互对抗时,即上下表面液晶分子受到不同方向的锚定,液晶分子将难以在体相内维持单一、均匀的取向结构。为满足指向矢量场的

空间连续性并兼顾界面边界条件,体系中将不可避免地产生弹性畸变。液晶指向矢场通过局域取向重排与空间重构来响应这些边界约束。当这种连续调节无法在整个区域内维持取向连续性时,局部区域便会出现取向奇异性,从而形成拓扑缺陷结构。

相比之下,在向列相液晶/各向同性流体(如水、甘油)构成的软物质界面体系中,界面锚定主要来源于物理吸附的表面活性剂分子,其有效锚定强度相对较弱,属于弱锚定范畴^[23-25]。由于该类界面缺乏固体基底所具有的刚性取向约束,界面锚定所对应的取向偏好及其强度可随温度、表面活性剂浓度或流体动力学条件发生连续变化。此类弱锚定与几何受限共同作用的液晶体系中,虽然锚定竞争同样会诱导缺陷(如网格孔洞中的径向点缺陷),但由于缺乏固体界面那样强大的定向约束能力,这些缺陷结构往往可随界面吸附分子的扩散与重组过程发生位置迁移、形态重构以及相互并合或湮灭。

4 边界条件约束的拓扑缺陷研究

4.1 结构化编程固体界面

在几何编程结构化固体界面的表面锚定条件下,向列相液晶体系的取向有序在界面边界条

件的约束下建立。当不同界面所施加的取向锚定在空间上呈现对抗性分布时,分子在有序结构形成过程中难以在体相内维持原有的均匀取向排列。为同时满足界面锚定条件与体相有序结构建立所要求的弹性约束,取向场将发生一定程度的弹性畸变以适应几何边界条件。液晶体相弹性能与各向异性表面锚定能的共同作用使总自由能达到极小^[19,26]。通常先对固体基底进行取向锚定处理,从而预设具有特定几何或拓扑特征的取向分布以建立预设的界面锚定场。随后将经取向锚定的基板组装成液晶盒或引入微结构的受限空间(如图3(a)所示,为基于光控取向设计的 ± 1 拓扑周期性分布的取向图案及其所组装成的液晶器件结构示意图)。液晶在相变过程中伴随着连续对称性的破缺,其分子取向在外加边界条件或几何约束的引导下会自发发生重组,从而形成特定的有序结构及其对应的拓扑缺陷。在液晶相变发生之前,液晶处于各向同性相,其分子取向为随机无序。当液晶相由各向同性相向向列相液晶相转变时,界面锚定开始发挥引导作用,分子的有序排列从界面处开始并逐渐向体相内部扩展。向列相液晶在相变过程中建立取向有序结构时,其分子排列需同时满足体相弹性约束与界面锚定所施加的取向场边界条件约束。当预设的锚定区域或不同界面所施加的取向场

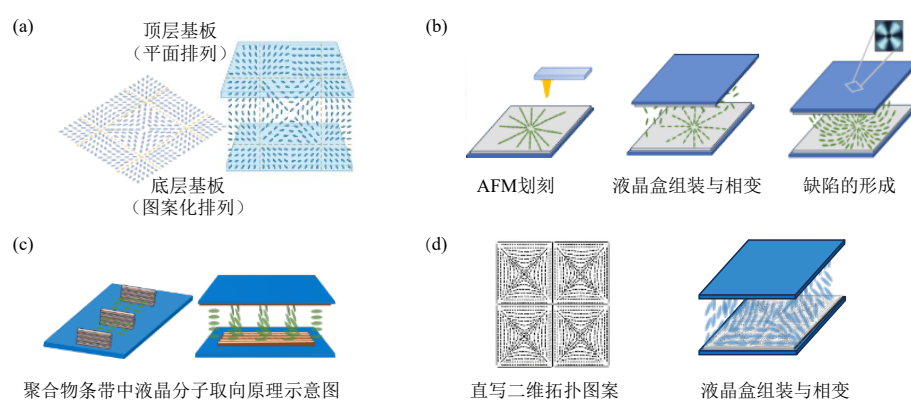


图3 基于取向调控的拓扑周期性分布取向图案及所组装成液晶器件示意图。(a) ± 1 拓扑阵列基板与组装液晶盒示意图;(b) 原子力显微镜(AFM)划刻图案化锚定及诱导拓扑缺陷的形成示意图;(c) 聚合物条带中液晶分子取向原理示意图;(d) 直写二维拓扑图案与组装液晶盒示意图。

Fig. 3 Schematic illustrations of topologically periodic orientation patterns based on alignment control and the assembled liquid crystal devices. (a) Schematic of a ± 1 topological array substrate and the assembled liquid crystal cell; (b) Schematic of a liquid crystal cell constructed using polymer strips and a rubbed alignment layer; (c) Schematic illustration of AFM-scratched patterned anchoring and the induced formation of topological defects; (d) Schematic illustration of direct-written 2D topological pattern and LC cell assembly.

条件在空间上存在差异时,为满足指向矢场的空间连续性并适应界面锚定条件,液晶分子取向将发生一定程度的弹性畸变,如此在体相 Frank 弹性能与各向异性表面锚定能的共同作用下,体系通过形成拓扑缺陷使总自由能达到极小。

为了实现特定拓扑缺陷的构筑,可通过不同的取向策略诱导向列相液晶分子沿预设方向排列。早期 Maugin 等人首次应用摩擦取向技术,通过在基底旋涂并固化聚酰亚胺取向膜后沿单一方向摩擦,使向列相液晶分子获得均匀锚定^[27]。但其难以构筑非均一或复杂的取向场,难以调控实现缺陷的形成。随后出现的原子力显微镜(AFM)划刻等微尺度图案化方法,使人们能够在基底上实现区域化、多微区的取向锚定设计,从而引导向列相液晶在相变自组装过程中形成与界面预设拓扑构型相匹配的缺陷结构。Charles Rosenblatt 等人利用原子力显微镜的接触模式,如图 3(b)所示,在下基板上划刻构建出具有特定拓扑荷的径向排列微区结构,并与平面锚定的上基板组装成液晶器件^[28]。在随后的冷却相变过程中,液晶相在由各向同性相冷却至向列相的相变过程中诱导形成与预设拓扑荷相对应的缺陷结构。偏光显微镜观察表明,所得缺陷的指向矢构型与设计拓扑强度高度一致,实现了通过锚定场设计液晶缺陷的形成,譬如基板表面构建出预设的微区锚定图案(如径向结构的+1缺陷构型)。这些人为设计的非均一边界条件引导向列相液晶分子在相变自组装过程中沿特定方向排列,从而诱导形成与预设图案相匹配的缺陷。与此同时,飞秒激光双光子聚合技术通过直写聚合物微结构实现对局部锚定场的灵活调控,为复杂拓扑缺陷的构筑提供了新途径^[29-30]。许京军课题组通过飞秒激光双光子聚合技术在下基板的 SU-8 光刻胶薄膜上直写聚合物条带,形成具有表面浮雕光栅的微结构(图 3(c)为聚合物条带中液晶分子取向原理示意图),以诱导向列相液晶分子沿特定方向排列并实现局部锚定调控。通过偏光显微镜下的观测,验证了该结构对液晶分子的锚定能力,可诱导分子沿光栅沟槽方向排列^[31]。随后通过在下基板上直写制作复杂拓扑图案,成功实现了液晶缺陷的产生,如图 3(d)所示。将直写处理过的下基板与未直写处理的上

基板组装成液晶盒后,通过毛细作用注入液晶,使向列相液晶在界面锚定作用下自发形成与预设图案一致的缺陷结构。

相比之下,光控取向技术凭借其非接触、可重写和高空间分辨率等特性,成为构筑复杂取向场的重要技术路径。该方法基于光诱导分子取向机制,通过调控入射光的偏振态与曝光区域,可在光敏取向膜表面实现更高的自由度锚定分布,为液晶缺陷的空间排布与拓扑重构提供了更加灵活调控手段。Kristiaan Neyts 等人利用空间光调制器实现了对基底的精准光调控,在光敏取向层上直接“写入”含有 $\pm 1/2$ 拓扑荷的周期性指向矢图案,从而在基底上预设表面点缺陷^[32]。组装成液晶盒后,图案化基底与上基板的均匀取向形成不对称的边界条件,在液晶由各向同性相冷却的过程中,体系为协调上下表面的取向差异并降低弹性能量,会在体内自发生成连接这些点缺陷的拓扑缺陷,最终构筑出与底部图案一致的缺陷构型。韦齐和等人利用含矩形纳米孔阵列的铝掩模在宽带光照下产生空间调制的偏振分布,并将其投影至光敏取向层,实现了液晶指向矢场的高通量、高分辨率图案化,可在单次曝光中构建复杂取向结构,进而在液晶自组装过程中诱导生成与预设图案匹配的缺陷构型,为缺陷结构的可控演化与功能化应用提供了有力手段^[33]。

近晶相液晶由于位置序的引入,导致拓扑缺陷的类型必然会发生变化。近晶相在保留取向序的同时引入一维位置序,即层状结构,层间距近似恒定的约束与层形变的引入显著改变了允许连续形变模式^[19]。南京大学胡伟等人构建了一个混合排列的液晶盒,其中一侧基板通过光取向技术预设了呈晶格排列的径向取向图案(每个单元中心为+1拓扑奇点),而另一侧基板则提供垂直的锚定取向^[34]。这种上下表面锚定方向的冲突,使得当液晶从各向同性相填入并冷却时,分子取向需要同时满足这两个竞争性的表面约束。在具有径向图案的基板附近,液晶分子被迫遵循预设的平面径向排列;而在靠近垂直锚定基板处,分子则趋向于垂直排列。在这两个表面之间的体相中,液晶指向矢必须发生连续的扭曲与弯曲形变来适应这一矛盾。这种强烈的形变与空间约束使得体系无法在整体上形成均匀一

致的排列,从而在特定位置产生局部的取向不连续性。通过设计径向图案的初始方位角和采用不同的降温速率,可以有效地调控这些缺陷的类型(如汇聚型或发散型点缺陷、扭曲型或楔型向错线)及其空间排列。

与传统基底取向体系相比,微流控技术能够在受限空间和流动条件下影响液晶分子的取向排列。通过限制几何结构、调节流速以及构建稳定的锚定界面,可以进一步研究液晶在受限空间中的取向响应和界面锚定行为^[35-37]。郑致刚等人系统研究了向列相液晶在不同微流体锚定条件下的缺陷形态与演化^[38]。他们通过调控微通道内壁的化学特性构建了多种可控锚定环境,从而系统比较了指向矢量场在不同边界约束条件下的空间分布特征及其对应的缺陷构型。在均匀平面锚定通道中,向列相液晶指向矢量场可保持连续排列,不产生缺陷。在上下界面存在锚定竞争的混合锚定通道中,体系为释放弹性应力而自发形成稳定的向错线,且其数量随通道宽深比线性变化。在垂直取向微通道中,所有内壁均诱导液晶分子呈垂直站立排列,正常情况下分子排列连续且无缺陷;但当引入流速骤降导致局部回流时,流场产生的剪切会扰动原本的垂直指向。由于上下表面仍维持强垂直锚定,这一倾斜无法被连续平滑地释放,因而在空间中形成取向相位的跃迁,表现为一系列垂直于底面的向错线缺陷构型。

4.2 自由固定混合界面

与利用结构化固体界面进行锚定调控不同,当液晶材料与空气的自由界面接触时,空气界面的锚定类型取决于液晶分子的性质。大多数棒状液晶分子,例如 *n*CB,在空气界面呈现垂直锚定,这可能与具有较强偶极矩的端基趋使液晶相以降低界面自由能有关^[39-40]。而少数液晶分子,例如对氧化偶氮茴香醚、主链型液晶聚酯 MHDT 等,由于不含长烷基链,空气界面则表现为平面锚定^[41]。还有一些液晶分子,如 MBBA,其在空气表面的指向矢相对于表面法线呈倾斜排列,且倾斜角会随温度变化而变化^[42]。

当自由界面的自发锚定与另一界面所施加的取向约束同时存在时,即上下界面对液晶分子施加不同甚至相互对抗的锚定条件,液晶体系中指向矢量场难以在整个体相内保持单一且连续的

取向分布。在响应上下界面锚定约束的过程中,为满足指向矢场的空间连续性并协调不同边界条件所引入的取向不相容性,液晶分子取向会在局域区域发生调整,并伴随产生弹性畸变。在体相弹性作用与各向异性表面锚定效应的共同影响下,体系往往通过形成局域取向变化区域或引入拓扑缺陷结构,以适应复杂边界条件所施加的取向约束。在这一过程中,液晶体系可能形成多种缺陷构型^[19,43-45]。图4直观展示了这些由界面竞争诱导产生的向列相液晶典型缺陷微观构型。图4(a)和图4(b)通过垂直截面与平面视图的结合,解析了向列相液晶局域倾斜畴的三维几何特征,并对比了畴结构“外部”(图4(c))与“内部”(图4(d))沿厚度方向截然不同的指向矢分布模式。这些织构形态直观地反映了向列相液晶体系在响应复杂边界条件时,向列相液晶体系中的指向矢量场难以保持单一取向,而是在局部区域发生对称性破缺与空间重排,以响应复杂边界所施加的取向约束。

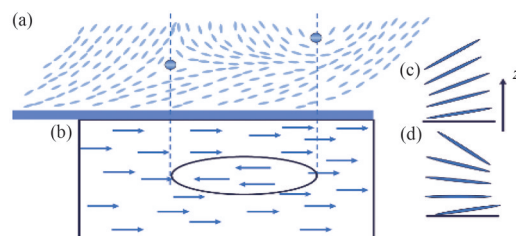


图4 向列相液晶倾斜畴指向矢缺陷构型示意图。(a)垂直截面视图;(b)平面视图;(c)倾斜畴外部指向矢构型;(d)倾斜畴内部指向矢构型。长棒状示意液晶分子,图(b)中的箭头表示液晶分子在水平面投影方向。

Fig. 4 Schematic illustration of director-field defect configurations in tilted domains of nematic liquid crystals. (a) Vertical cross-section view; (b) Plane view; (c) Director configuration outside the tilted domain; (d) Director configuration inside the tilted domain. Elongated rods denote nematic mesogens, and the arrows in (b) indicate the in-plane projection direction of the director.

类似的工作还有 Jeroen Beeckman 等人基于 RM 类液晶单体混合物,研究了空气界面垂直锚定与底部平面锚定竞争条件下的聚合物液晶薄膜缺陷。通过在光取向或摩擦处理的基板上旋

涂 RM 类液晶单体并进行紫外光聚合,基板基底为沿单一方向排列的平面锚定,而空气界面为诱导的垂直锚定倾向。上下界面锚定冲突导致薄膜中形成局域倾斜反转畴,偏振显微镜(POM)下呈明暗交替纹理^[45]。为了解释这一现象,他们建立了基于 Oseen-Frank 弹性理论与 Rapini-Papoular 表面锚定能的理论模型描述,在上下界面锚定相互竞争冲突的条件下,液晶体系通过形成局域倾斜反转的畴结构的弹性形变方式降低系统总能量,用以说明空气自由界面的垂直弱锚定对薄膜取向结构与倾角分布的影响。

相比于向列相液晶,近晶相液晶的有序度更高,液晶分子呈分层排列。当近晶相液晶薄膜上下表面处于对抗性的表面锚定条件下时,层结构的出现使得指向矢量连续形变的模式发生改变,不能像向列相液晶那样仅通过局域连续转动来满足边界条件,还需要在适配对抗性锚定时调整其分子层间取向。如此,近晶层结构通过层法线的连续弯曲以及局域取向的有序重构实现应力弛豫,将剧烈的取向变化在空间上平滑分散,从而有效降低整体弹性能。在体弹性能与界面锚定能的共同约束下,该系统逐步演化为能量更低的焦锥畴、油纹等缺陷结构以协调界面锚定约束^[46-47]。图 5(a)所示为具有复杂空间曲率的环曲面焦锥畴,它产生于底面是随机面内取向而上界面为竖直取向的锚定情况。而油纹织构如图 5(b)所示,描述一系列规则排列的线型缺陷,其主要特征缺陷是相邻线形畴间的缺陷墙,缺陷墙的延伸方向垂直于底面取向方向。

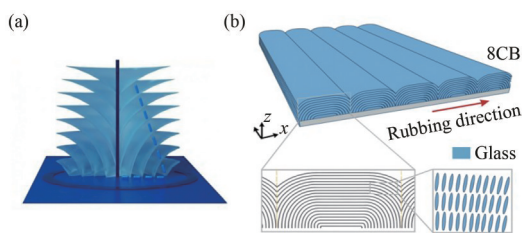


图 5 近晶相液晶缺陷示意图。(a)环曲面焦锥畴;(b)油纹结构(蓝色和黑色曲线表示液晶分子布,长棒状为液晶分子)。

Fig. 5 Schematic illustrations of defects in smectic liquid crystals. (a) Focal conic domain with a toroidal geometry; (b) Oily streak texture (blue and black curves represent the molecular layering, and the elongated rods denote liquid crystal molecules).

南京大学胡伟等人通过动态偏振微光刻系统在 SD1 光取向膜表面预设了具有特定方向(如单向、交替或径向分布)的平面锚定图案,而空气界面自然倾向于诱导分子的垂直排列,这种“平面-垂直”的混合锚定条件构成了竞争性的边界约束^[48]。随后,将近晶相材料 8CB 加热至各向同性相后滴加于图案化基板上,通过旋涂形成厚度均匀的薄膜。当近晶相液晶(8CB)从向列相冷却至层状近晶相时,分子层需要在体相中发生一定形变以同时适配下表面的图案化平面锚定与上表面的垂直锚定。在这种竞争性混合锚定条件的作用下,体系内部的取向场呈现周期性调制,从而形成一系列平行排列的“油纹”条带缺陷结构,相邻条带之间由周期性缺陷壁分隔。在 POM 观测中,缺陷壁处相邻指向在局部锚定方向附近取向并产生相位延迟,呈现亮带;而两缺陷壁之间的区域指向近乎竖直,表现为规则暗线。更重要的是,缺陷壁的平面方位由预设的表面锚定方向所引导,并总体上与局部锚定取向方向保持垂直关系。

通过改变光取向图案的几何参数(如角度、曲率、空间分布),可以精确控制缺陷壁的走向、弯曲与分叉行为,进而实现从简单条纹到复杂阵列的可编程缺陷构筑。Delphine Coursault 等人研究了 8CB 近晶相液晶在此类混合锚定条件下的自组行为^[49]。在该体系中,摩擦处理的聚乙烯醇(PVA)基底诱导平面锚定,而上界面空气自由表面则倾向于垂直排列。在近晶相液晶响应上下界面混合锚定的过程中,上下界面的锚定竞争会驱动近晶层内部发生形变,以协调上下界面的锚定冲突。通过这种局域展曲和指向矢场的空间连续过渡,体系最终形成具有周期性的扁平半圆柱形的油纹缺陷域,从而显著降低体系自由能。每个油纹缺陷域内部并非简单的层弯曲,他们通过分析 X 射线散射信号随角度的变化关系,发现在每个油纹缺陷域的高曲率区域,近晶层通过形成局部旋转晶界带来缓解应力,该晶界由一系列平行于圆柱轴的位错线构成,其顶端集中于空气界面附近。进一步地,南京大学陆延青课题组还通过改变旋涂转速以获得不同厚度的 8CB 薄膜,研究了混合锚定体系中缺陷类型与特征尺度随膜厚的演化^[46]。当膜厚较大时,体系自组装

形成尺寸均一、排列有序的正方焦锥畴(SFCD)缺陷阵列,且SFCD尺寸随膜厚减小而单调减小。在较大膜厚下,近晶层可借由形成局域焦锥核缺陷有效消解上下界面的锚定错配,从而稳定生成规则的SFCD阵列。然而,当膜厚降至临界值以下时,缺陷发生从SFCD到周期性油纹缺陷的显著转变。该现象归因于薄膜厚度减小后,液晶分子层受取向层作用更明显,焦锥畴缺陷结构已无法在受限空间内有效容纳上下界面的锚定冲突,进而近晶层转而采用沿水平方向的周期展曲模式,从而使缺陷结构由FCD结构转变为周期性Zigzag缺陷结构。

4.3 动态流体软物质界面

在流体软物质界面作用下,当液晶材料与另一种不混溶液体(如水或油)接触时,与固体界面不同,流体界面由于表面较光滑缺乏化学缺陷构筑点,空间上更加均匀,因此其锚定特性与固体表

面显著不同。传统诱导液晶材料/软物质液体界面锚定转变的方法通常依赖于在水相中溶解表面活性剂分子,常用的液晶材料(如联苯腈类)在水界面上表现为平面锚定^[50-52]。而当掺杂表面活性剂后,其吸附会迫使分子沿烷基链方向重新排列,从而实现垂直锚定,如溴化烷基三甲基铵(C_n TAB)、十二烷基硫酸钠(SDS)和聚氧乙烯烷基醚(C_nE_m)均已被用于实现这种界面锚定调制^[53-54]。如图6所示,以典型的5CB-水界面为例直观展示了这一锚定转变过程:在未添加表面活性剂的纯水界面,5CB分子受界面张力影响倾向于呈平面取向(图6(a))。而在引入表面活性剂后,界面处活性剂分子的定向吸附驱动液晶分子重新排列,使其分子排列趋向于垂直于界面(图6(b))。这种基于界面吸附的调控机制,直接预设了液晶分子在宏观尺度上的平均指向场。

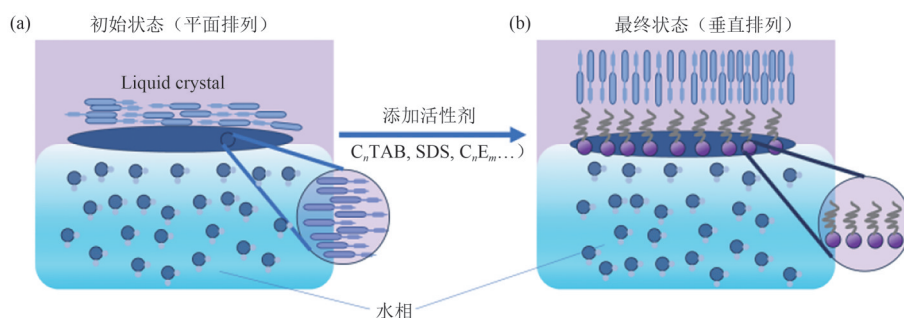


图6 5CB-水界面取向调控示意图。(a) 在没有表面活性剂的情况下,分子呈平面取向;(b) 加入表面活性剂后,分子排列呈现垂直构型。

Fig. 6 Schematic illustration of orientational control at the 5CB-water interface. (a) Planar anchoring of 5CB molecules in the absence of surfactants; (b) Homeotropic configuration induced by the addition of surfactants.

当由此类吸附分子提供的界面锚定与由其他边界约束所施加的锚定条件在空间中形成取向竞争时,这两种锚定在空间上方向不同,体系为同时满足这些相互矛盾的边界条件,指向矢量无法在空间中保持连续变化,从而出现取向的不连续。Teresa Lopez-Leon等人通过将向列相液晶注入特制的“双联”透射电镜铜网格中,并将其悬置于观察腔室的中央,使上下表面均与PVA水溶液直接接触,从而形成由两个液-液界面约束的悬浮薄膜^[55]。利用界面吸附的PVA分子提供平面态锚定,同时受限于金属网格边界的几何约束。在这种混合界面锚定与有限边界尺寸共同作用的条件下,液晶指向矢量在网

格单元内部难以维持单一均匀取向,而需通过连续的空间取向调节来协调不同位置所施加的锚定约束。当这种连续取向在整个区域内难以保持时,局部区域会出现取向奇异性,从而形成相应的拓扑缺陷结构。此外,若在其清亮点附近施加缓慢的温度变化,界面PVA/液晶材料混合层的有序性率先降低,其局部各向异性与锚定强度显著减弱,破坏了维持原有向错缺陷核心的边界条件,使其在热扰动下发生弛豫而瞬时湮灭。然而,一旦界面锚定条件随温度恢复,体系因受拓扑与几何约束,往往会再次形成类似的径向缺陷构型。

除此之外,在液晶材料/软物质界面体系中,

液晶缺陷的产生不仅可能来源于宏观边界条件的竞争,也可由界面自身的局域锚定非均匀性引起。所谓局域锚定非均匀性,是指界面上液晶分子所受锚定作用在空间上存在局部差异。这种非均匀性可能源自界面吸附分子在空间上的分布不均、溶液浓度梯度、表面活性剂或其他功能分子的局域聚集,以及界面形貌微小扰动等因素。这些局域差异会迫使液晶分子的指向矢在界面附近发生局部弯曲和扭转,以协调相邻区域不同的锚定方向,形成多种缺陷构型。此类缺陷的形态与位置往往并非固定不变,而是随着界面吸附分子的扩散、聚集等动力学过程发生演变。与之类似地,Abbott 等人进一步将调控手段从热力学驱动拓展至化学吸附驱动。他们采用类似的液晶材料/水溶液界面悬浮膜体系,将承载向列相液晶 5CB 的铜网格浸入含不同浓度 SDS 的水溶液中^[24]。SDS 作为一种表面活性剂,其分子结构同时具有疏水的碳氢尾链和亲水的硫酸根头基。当它吸附于液晶材料/水界面时,其疏水尾链会插入液晶相,与 5CB 分子发生疏水相互作用,而亲水头基则伸入水相。在低浓度 SDS 下,界面平面锚定占优,在受限的网格孔洞中,指向矢场为了满足边界条件,液晶形成以点缺陷为核心的径向结构。随着 SDS 浓度增加,界面锚定由平面到垂直逐渐转变,指向矢场发生取向的冲突,从而出现多个局部缺陷域,包括点缺陷和线缺陷。而在高浓度下,界面转为垂直锚定,薄膜

呈现均匀取向的暗场状态。

此外,刺激响应性分子(如光致异构化分子)同样可在界面处实现锚定状态的动态切换;通过光照或其他刺激改变界面极性、分子排列和局域锚定方向,从而驱动液晶指向矢场的重构,并在局部产生缺陷。Daniel K. Schwartz 等人将光致异构化表面活性剂含偶氮苯基的两亲性脂肪酸(8Az3)均匀掺入向列相液晶中,经氮气吹干后填充入覆有正辛基三乙氧基硅烷(OTES)自组装单层的金属 TEM 网格,随后在超纯水中浸泡,以促使 8Az3 从体相选择性吸附到液晶材料/水界面,并在暗处静置,形成以 *trans* 构象为主的单分子层^[56],此时该界面锚定主要诱导垂直的排列取向。如图 7 所示,在初始状态下,界面处致密的 *Trans*-8Az3 单层维持了均匀的垂直锚定边界;随着紫外光的辐照,分子发生异构化转变为 *Cis* 构型,打破了界面的对称性并导致非均匀成核。他们利用 436 nm/365 nm 窄带光源调控体相中 8Az3 的 *cis/trans* 比例,并通过界面的吸附进一步改变界面单层的组成。不同光照条件下的 *cis* 含量通过 UV-Vis 光谱测定,而相应的液晶锚定状态与缺陷形态则通过偏光显微镜进行观察。通过在显微镜下突然切换光照波长,可直接观察界面单层在 *cis/trans* 比例突变时的缺陷变化过程,使液晶指向矢场经历由弱倾斜向强倾斜或垂直锚定等不同状态的过渡,并在此过程中表现为拓扑缺陷的生成、迁移或最终湮灭。

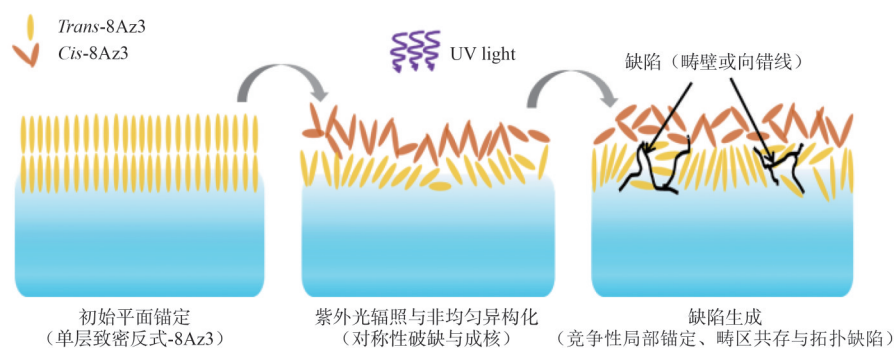


图 7 光驱动动态锚定切换和 8Az3/水界面缺陷产生示意图

Fig. 7 Schematic diagram of light-driven dynamic anchoring switching and defect generation at the 8Az3/water interface

Jun-ichi Fukuda 等人利用 SU-8 光刻在硅片上制备微柱母模,从而获得具有特定直径与深度的聚二甲氧硅烷(PDMS)微井阵列,然后将其与带入口的 PDMS 片通过硅胶垫片组装成封

闭腔体。随后将掺混光响应分子 4,4'-双(6-丙烯酰氧基己氧基)联苯类(BHAB)的向列相液晶 7CB 注入微井,使每个微井被液晶填满,再通过同一注入口注入纯水、SDS 溶液或 PVA 溶液,使

7CB 仅保留在微井内部并被水层均匀覆盖^[57]。在未光照的初始状态下, BHAB 的 *trans* 构型吸附于液晶/水界面并诱导界面呈现垂直锚定, 使微井内液晶形成均匀的垂直排列。之后在偏光显微镜下向样品顶部施加紫外光照, 界面处的 BHAB 发生 *trans-cis* 异构化并削弱原有垂直锚定, 从而驱动微井内指向场在不同边界条件下发生重构, 表现为中心拓扑缺陷的生成或原有缺陷的消失。该实验同时通过显微图像与视频记录了这一光致界面调控引发的拓扑结构的过程。

5 总结与展望

近年来, 液晶拓扑结构研究取得了显著进展, 并在光子调控与功能软物质领域展现出广阔应用前景。随着对拓扑缺陷物理机制认识的不断深入, 研究重心正由基础结构表征逐步转向可调控构筑与功能集成。相比传统的均匀取向体系, 拓扑结构因其独特的几何构型与能量分布特征, 可赋予液晶体系多维光学响应能力, 使液晶材料由被动取向介质转变为具有可编程特性的功能平台。

目前, 液晶拓扑结构的研究在可控制备与功能调控方面取得了显著进展。图案化取向技术、多场调控手段与软物质光子学方法的协同发展,

使手性结构、拓扑缺陷阵列及拓扑光子晶体等复杂体系得以实现构筑。通过对振幅、相位与偏振等多参量的协同调控, 液晶拓扑体系在矢量光场调制、自适应光子器件及高维信息编码等领域展现出优越的性能。同时, 液晶电控可调性与拓扑结构鲁棒性的结合, 为动态可重构光子器件及太赫兹功能器件的开发提供了新的技术路径。此外, 液晶拓扑缺陷在微流控与胶体自组装体系中也表现出重要的应用潜力, 缺陷区域形成的局域弹性势阱能够实现对微纳颗粒的捕获与定向组装, 为有序软物质功能结构的构筑提供了创新思路。

然而, 液晶拓扑结构的工程化应用仍面临一定的挑战。首先, 复杂拓扑结构的大面积均匀构筑与稳定保持仍需进一步优化, 以满足器件规模化制备的需求。其次, 多场耦合调控过程涉及的参数复杂, 调控精度与长期可靠性仍有提升空间。此外, 在与集成光子学及实际器件系统融合过程中, 材料兼容性与制造成本的问题亦需系统解决。随着材料设计、多场调控及微纳加工技术的持续进步, 液晶拓扑体系有望实现更高的结构可控性、更优的功能集成度及更强的动态调节能力。未来, 结合智能化设计与跨尺度结构调控策略, 液晶拓扑结构将在可重构光子器件、信息光学及智能软物质系统等领域发挥更加重要的作用, 推动相关技术向更高水平发展。

参 考 文 献:

- [1] 陆廷青. 液晶软光子学——光场的多自由度调控[J]. 物理, 2023, 52(2): 116-124.
LU Y Q. Liquid crystal soft mattonics—multi-degree manipulation of light [J]. *Physics*, 2023, 52(2): 116-124. (in Chinese)
- [2] YU H B, ZHANG S Y, LIU X, *et al.* Programmable liquid crystal defects and dynamically manipulation with mechanical stress [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(7): 2301220.
- [3] YOSHIDA H, ASAKURA K, FUKUDA J, *et al.* Three-dimensional positioning and control of colloidal objects utilizing engineered liquid crystalline defect networks [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 7180.
- [4] TORRES-ANDRÉS J, CASSINELLO G, SAGUÉS F, *et al.* Magnetic field control of liquid crystal-enabled colloid electrophoresis [J]. *Colloids and Interfaces*, 2025, 9(3): 27.
- [5] YAO S K, WANG C C, CHOU J K, *et al.* Dense packing of topological defects in nematic liquid crystal cells with pads, crossed-strips, and porous electrodes [J]. *Optical Materials Express*, 2023, 13(7): 1883-1894.
- [6] VOLTERRA V. Sur l'équilibre des corps élastiques multiplement connexes [J]. *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 1907, 24(3): 401-517.
- [7] 王新久, 赵静安. 同伦群理论在液晶缺陷中的应用[J]. 物理学进展, 1986, 6(4): 452-468.
WANG X J, ZHAO J A. Application of homotopy theory in defects of liquid crystals [J]. *Progress in Physics*, 1986, 6(4): 452-468. (in Chinese)

- [8] 崔慧林. 液晶拓扑缺陷结构的设计和制备[D]. 天津:南开大学,2022.
CUI H L. Design and fabrication of liquid crystal topological defect structures [D]. Tianjin: Nankai University, 2022. (in Chinese)
- [9] AFGHAH S, SELINGER R L B, SELINGER J V. Visualising the crossover between 3D and 2D topological defects in nematic liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2018, 45(13/15): 2022-2032.
- [10] KIM Y H, YOON D K, JEONG H S, *et al.* Smectic liquid crystal defects for self-assembling of building blocks and their lithographic applications [J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(4): 610-627.
- [11] XIA Y, DEBENEDICTIS A A, KIM D S, *et al.* Programming emergent symmetries with saddle-splay elasticity [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5104.
- [12] WANG K M, TIEU A J K, WU H W, *et al.* Oriented structures for high safety, rate capability, and energy density lithium metal batteries [J]. *Advanced Science*, 2024, 11(34): 2403797.
- [13] JEROME B. Surface effects and anchoring in liquid crystals [J]. *Reports on Progress in Physics*, 1991, 54(3): 391-451.
- [14] SHVETSOV S A, RUDYAK V Y, EMELYANENKO A V, *et al.* Photoinduced orientational structures of nematic liquid crystal droplets in contact with polyimide coated surface [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 267: 222-228.
- [15] 张书敬, 杨国琛, 关荣华. 液晶界面物理效应研究及进展[J]. *物理*, 2003, 32(9): 577-582.
ZHANG S J, YANG G C, GUAN R H. Studies of the interfacial physical effects of liquid crystal cells [J]. *Physics*, 2003, 32(9): 577-582. (in Chinese)
- [16] KLEMAN M, LAVRETOVICH O D. *Soft Matter Physics: An Introduction* [M]. New York: Springer, 2003.
- [17] FRANK F C. I. Liquid crystals. On the theory of liquid crystals [J]. *Discussions of the Faraday Society*, 1958, 25: 19-28.
- [18] DE GENNES P G, PROST J. *The Physics of Liquid Crystals* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [19] 罗道兴, 吴金兵, 郭政昊, 等. 光控取向引导的液晶序演变[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(5): 569-592.
LUO D X, WU J B, GUO Z H, *et al.* Photoalignment guided order evolution of liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 569-592. (in Chinese)
- [20] XUE X, NYS I, BERTELOOT B, *et al.* Effect of homeotropic alignment strength at air interface on liquid crystal polymer films [C]//*Proceedings of the 28th International Liquid Crystal Conference*. Lisbon: ILCC, 2022: PB. 056.
- [21] COUSINS J R L, BHADWAL A S, CORSON L T, *et al.* Weak-anchoring effects in a thin pinned ridge of nematic liquid crystal [J]. *Physical Review E*, 2023, 107(3): 034702.
- [22] LAM M A Y H, KONDIC L, CUMMINGS L J. Effects of spatially-varying substrate anchoring on instabilities and dewetting of thin nematic liquid crystal films [J]. *Soft Matter*, 2020, 16(44): 10187-10197.
- [23] LAVRETOVICH O D. *Defects in liquid crystals: surface and interfacial anchoring effects* [M]//ARODZ H, DZIARMAGA J, ZUREK W H. Patterns of Symmetry Breaking. Dordrecht: Springer, 2003: 161-195.
- [24] BRAKE J M, ABBOTT N L. An experimental system for imaging the reversible adsorption of amphiphiles at aqueous—liquid crystal interfaces [J]. *Langmuir*, 2002, 18(16): 6101-6109.
- [25] PARSHIN A M, SUTORMIN V S, ZYRYANOV V Y, *et al.* Influence of ionic surfactant on the anchoring energy of liquid crystal with a surface investigated using magnetic threshold fields of Freedericksz transition [J]. *Liquid Crystals and their Application*, 2018, 18(3): 59-66.
- [26] MA L L, TANG M J, HU W, *et al.* Smectic layer origami via preprogrammed photoalignment [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(15): 1606671.
- [27] SCHNEIDER T, MAGYAR G, BARUA S, *et al.* A flexible touch-sensitive writing tablet [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2008, 39(1): 1840-1842.
- [28] MURRAY B S, PELCOVITS R A, ROSENBLATT C. Creating arbitrary arrays of two-dimensional topological defects [J]. *Physical Review E*, 2014, 90(5): 052501.
- [29] 李晓荣. 人工诱导液晶拓扑缺陷的研究[D]. 天津:南开大学,2021.

- LI X R. Research on artificially induced topological defects of liquid crystals [D]. Tianjin: Nankai University, 2021. (in Chinese)
- [30] JI Z C, ZHANG X Z, ZHANG Y J, *et al.* Electrically tunable generation of vectorial vortex beams with micro-patterned liquid crystal structures [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(7): 070501.
- [31] JI Z C, ZHANG X Z, SHI B, *et al.* Compartmentalized liquid crystal alignment induced by sparse polymer ribbons with surface relief gratings [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 336-339.
- [32] BERTELOOT B, NYS I, POY G, *et al.* Ring-shaped liquid crystal structures through patterned planar photo-alignment [J]. *Soft Matter*, 2020, 16(21): 4999-5008.
- [33] GUO Y B, JIANG M, PENG C H, *et al.* High-resolution and high-throughput plasmonic photopatterning of complex molecular orientations in liquid crystals [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(12): 2353-2358.
- [34] WU J B, WU S B, HU W. Azimuthal orientation guided topological defect evolution across the nematic-smectic phase transition [J]. *Physical Review B*, 2023, 108(22): 224107.
- [35] BEZRUKOV A, GALYAMETDINOV Y. Tuning molecular orientation responses of microfluidic liquid crystal dispersions to colloid and polymer flows [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(17): 13555.
- [36] SENGUPTA A, TKALEC U, RAVNIK M, *et al.* Liquid crystal microfluidics for tunable flow shaping [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(4): 048303.
- [37] AGHA H, BAHR C. Connecting and disconnecting nematic disclination lines in microfluidic channels [J]. *Soft Matter*, 2016, 12(18): 4266-4273.
- [38] 赵思纯,沈冬,郑致刚. 液晶微流体中拓扑缺陷的形态研究[J]. 液晶与显示, 2022, 37(10): 1278-1284.
ZHAO S C, SHEN D, ZHENG Z G. Morphology of topological defects in liquid crystal microfluidics [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(10): 1278-1284. (in Chinese)
- [39] GANNON M G J, FABER T E. The surface tension of nematic liquid crystals [J]. *Philosophical Magazine A*, 1978, 37(1): 117-135.
- [40] FAETTIS, PALLESCHI V. Nematic-isotropic interface of some members of the homologous series of 4-cyano-4'-(*n*-alkyl)biphenyl liquid crystals [J]. *Physical Review A*, 1984, 30(6): 3241-3251.
- [41] BOUCHIAT M A, LANGEVIN-CRUCHON D. Molecular order at the free surface of a nematic liquid crystal from light reflectivity measurements [J]. *Physics Letters A*, 1971, 34(6): 331-332.
- [42] FAETTI S, FRONZONI L. Molecular orientation in nematic liquid crystal films with two free surfaces [J]. *Solid State Communications*, 1978, 25(12): 1087-1090.
- [43] MANYUHINA O V. Shaping thin nematic films with competing boundary conditions [J]. *The European Physical Journal E*, 2014, 37(6): 48.
- [44] BABAKHANOVA G, SCHENNING A P H J, BROER D J, *et al.* Surface structures of hybrid aligned liquid crystal network coatings containing reverse tilt domain [C]//*Proceedings of SPIE 10941, Emerging Liquid Crystal Technologies XIV*. San Francisco: SPIE, 2019, 10941: 109410I.
- [45] XUE X Y, BERTELOOT B, STEBRYTE M, *et al.* Role of homeotropic alignment strength at the air interface of polymerized liquid crystal layers [J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(12): 4036-4050.
- [46] 张涵,王龙洋,朱柏翰,等. 近晶相液晶超结构的多元外场调控[J]. 液晶与显示, 2024, 39(3): 289-298.
ZHANG H, WANG L Y, ZHU B H, *et al.* Modulation of smectic liquid crystals superstructures under multiple external fields [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(3): 289-298. (in Chinese)
- [47] 郭清仪,吴赛博,钱妍,等. 液晶自组装多层级结构及其应用[J]. 高分子学报, 2020, 51(5): 484-500.
GUO Q Y, WU S B, QIAN Y, *et al.* Hierarchical structures of self-assembled liquid crystals and their applications [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2020, 51(5): 484-500. (in Chinese)
- [48] WU S B, MA L L, CHEN P, *et al.* Smectic defect engineering enabled by programmable photoalignment [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(17): 2000593.
- [49] COURSAULT D, ZAPPONE B, COATI A, *et al.* Self-organized arrays of dislocations in thin smectic liquid crystal films [J]. *Soft Matter*, 2016, 12(3): 678-688.
- [50] BRAKE J M, ABBOTT N L. An experimental system for imaging the reversible adsorption of amphiphiles at

- aqueous-liquid crystal interfaces [J]. *Langmuir*, 2002, 18(16): 6101-6109.
- [51] LOCKWOOD N A, GUPTA J K, ABBOTT N L. Self-assembly of amphiphiles, polymers and proteins at interfaces between thermotropic liquid crystals and aqueous phases [J]. *Surface Science Reports*, 2008, 63(6): 255-293.
- [52] BAHR C. Surfactant-induced nematic wetting layer at a thermotropic liquid crystal/water interface [J]. *Physical Review E*, 2006, 73(3): 030702.
- [53] BAHR C. Surface triple points and multiple-layer transitions observed by tuning the surface field at smectic liquid-crystal – water interfaces [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99 (5): 057801.
- [54] BAHR C. Experimental study of prewetting transitions by systematic variation of the surface field at nematic liquid crystal/water interfaces [J]. *Europhysics Letters*, 2009, 88(4): 46001.
- [55] DUREY G, ISHII Y, LOPEZ-LEON T. Temperature-driven anchoring transitions at liquid crystal/water interfaces [J]. *Langmuir*, 2020, 36(32): 9368-9376.
- [56] PRICE A D, IGNÉS-MULLOL J, VALLVÉ M À, *et al.* Liquid crystal anchoring transformations induced by phase transitions of a photoisomerizable surfactant at the nematic/aqueous interface [J]. *Soft Matter*, 2009, 5(11): 2252-2260.
- [57] KATAYAMA K, YOSHIMURA T, YAMASHITA S, *et al.* Formation of topological defects at liquid/liquid crystal interfaces in micro-wells controlled by surfactants and light [J]. *Soft Matter*, 2023, 19(34): 6578-6588.

作者简介:



吴作用,男,硕士研究生,2023年于湘潭大学获得学士学位,主要从事液晶光调控技术的研究。E-mail:23zywu@stu.edu.cn



姚丽双,女,博士,教授,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事液晶光调控技术的研究。E-mail:lsyao@stu.edu.cn