

文章编号:1007-2780(2023)10-1322-08

基于液晶功能表面的液滴输运研究

窦韵洁, 王泽宇[#], 魏 阳^{*}, 马玲玲^{*}, 陆延青

(南京大学 固体微结构物理国家重点实验室, 现代工程与应用科学学院,
江苏 南京 210093)

摘要:基于液晶开放表面的微流体操纵技术是一种利用微流体学原理和微加工技术,在微纳尺度上对液体进行操纵和控制的方法,对新型微流控平台的开发至关重要。本文通过注液光滑表面的理论设计,利用液晶聚合物薄膜的可控制备,开发了取向序各向异性的功能聚合物薄膜,包括向列相聚合膜和近晶相聚合膜。研究表明,与近晶相聚合膜相比,向列相聚合膜在同等条件下,为水滴提供更快输运速度,比近晶相聚合膜约快 1 个数量级。近晶相聚合膜和向列相聚合膜对于水滴的输运均具有方向选择性,实现了液滴在液晶功能表面的各向异性输运,为开发基于图案化液晶功能表面的特异性微流控技术奠定了基础。

关键词:液晶;向列相;近晶相;液晶聚合物;液滴输运

中图分类号:O734;O753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2023-0211

Transport behavior of liquid droplets based on functional liquid crystal surfaces

DOU Yun-jie, WANG Ze-yu[#], WEI Yang^{*}, MA Ling-ling^{*}, LU Yan-qing

(National Laboratory of Solid State Microstructures, College of Engineering and Applied Sciences,
Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The liquid crystal (LC)-based open surface microfluidic can manipulate the liquid in micro-nano scale by utilizing microfluidics principles and micromachining techniques, which is crucial for developing next generation microfluidic platforms. In this work, rational theoretical design and controlled synthesis are conducted to prepare anisotropic functional polymer films including nematic and smectic LC polymer films. According to our study, the flow of droplets on nematic LC polymer films is an order of magnitude faster than on smectic LC polymer films. Moreover, both the nematic and smectic LC polymer films can

收稿日期:2023-06-12;**修订日期:**2023-07-04.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2022YFA1405000);国家自然科学基金(No. 52003115);江苏省自然科学基金(No. BK20212004, No. BK20200320);小米公益基金会小米青年学者-科技创新奖和中国科协青年人才托举工程(No. 2022QNRC001)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFA1405000); National Natural Science Foundation of China (No. 52003115); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20212004, No. BK20200320); Xiaomi Young Scholar Program and Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (No. 2022QNRC001)

[#]共同第一作者

^{*}通信联系人, E-mail: yangwei20630@163.com; malingling@nju.edu.cn

trigger orientation-dependent flow velocity of droplets, which realize the anisotropic transports of droplets and thereby lays a foundation for the development of specific microfluidic technology based on patterned LC functional surfaces.

Key words: liquid crystal; nematic phase; smectic phase; liquid crystal polymer; droplet transport

1 引言

近年来,基于微流体技术的功能材料系统在化学^[1-2]、生物^[3-4]、环境^[5-6]等领域广泛应用。其中,微流控系统可以通过精确操控微小液滴和微流体在微米级尺度上实现样本的混合、分离、输运、反应和分析。2018年He等人利用超疏水性和超亲水性的仿生超可湿微图案,开发了一种超亲水/超疏水胶带,并将其用于重金属监测^[5];2020年,Li等人提出了一种具有可调结构的磁驱动机器人,实现了液滴的可编程多重操作,并成功操纵各种流体^[6]。微流控系统具有小样本用量、高通量性能、快速反应和精确控制等方面的独特优势^[7],为科学研究提供了新的工具和方法,并且在新兴传感等领域具有广泛的应用前景。然而,传统微流控系统往往存在系统繁杂、操作复杂、功能单一等问题,极大限制了微流控器件的普及。

液晶是除气、液、固以外的第四态,兼具晶体的有序性和液体的流动性^[8-9],在微流控领域极具潜能^[10-11]。由于液晶灵敏的刺激响应特性,微小的外场变化足以引起液晶材料的结构变化,因此人们可以通过施加外界电场、热场、光场、磁场和化学环境等因素来调控其光学、电学等物理性质^[12-18],实现对流体输运、混合、分离和操控等过程的精确控制^[19-20]。此外,良好的透明性也是液晶不容忽视的优势之一,可以在不影响光学观察的情况下对探测液体进行实时监测,对于观察或分析微流体内部流动行为以及检测微小生物、颗粒或分子等十分有益^[21]。液晶材料的可逆动态调控使得基于液晶开发的微流控系统可以被多次重复利用,提高了器件的效率和成本效益^[22-23]。此外,基于液晶的开放表面微流体设计还可以按需同时控制液滴的流动性和化学成分,实现微小尺寸、较高能效和高灵活性的功能器件,在医学和生命科学等领域具有广泛的应用前景^[24-25]。然而,目前基于液晶开放表面开发定向输运微流控元件,及其操控液滴、微粒等目标探测物的相关规

律与机制亟待研究。

本文基于注液光滑表面进行理论设计,利用各向异性液晶聚合物薄膜研制注液光滑表面,实现了液滴(水滴)在液晶功能表面的各向异性输运。

2 实验材料及方法

本实验中所用材料包括:液晶前聚体RM257、小分子液晶8CB(近晶相-向列相相变温度:33℃,向列相-各向同性相相变温度:38℃)、水平取向剂SD1、光引发剂651以及ITO导电玻璃基板(20 mm×10 mm)。

具体制备流程如下:

(1)在ITO玻璃基板上旋涂SD1取向剂溶液,随后将其置于预先设定温度为100℃的热台上加热退火10 min。

(2)将厚度为125 μm的间隔条置于两块玻璃基板之间(玻璃基板ITO面向内),按需制成特定盒厚的液晶盒并进行水平取向。

(3)将RM257和8CB液晶按照10%的比例均匀混合,配置成混合物样品。掺入10%的RM257后,整个混合物的近晶相-向列相相变温度为19.5℃,向列相-各向同性相相变温度为42.2℃。测试相变温度方法如下:将装有样品的热台放置于显微镜载物台,通过快速升温(10℃/min)过程将液晶混合物升至清亮点以上,在显微镜下观察并粗略确定液晶的相变温度,然后开始降温,在接近相变温度时,将降温速度调至1℃/min,得到更加精确的相变温度。

(4)向混合物样品中加入质量分数为1%的光引发剂651,在热台上持续加热(保持在各向同性态)并进行多次震荡搅拌,每次约30 s,重复该操作直至混合均匀。

(5)在混合物样品的清亮点以上将材料灌入液晶盒内。将10%配比的液晶混合物在向列相温度(30℃)下,利用紫外光强为2 mW/cm²的紫外灯进行聚合。将同样配比的样品在近晶相温

度(15℃)下,紫外光强 4 mW/cm²的条件下进行聚合。聚合所用紫外光波长均为 365 nm,曝光时间为 20 min。以下我们称在向列相态下聚合的聚合物薄膜为向列相聚合膜,在近晶相态下聚合的聚合物薄膜为近晶相聚合膜。

(6)通过偏光显微镜下观察到向列相和近晶相液晶聚合膜的织构如图 1 所示。聚合后用干净的刀片从液晶盒的边缘将液晶盒撬开,液晶聚合物层将附着在其中一片玻璃基板上。在聚合物薄膜上用毛细管铺上一定量的液晶 8CB,并静置一段时间,获得实验所需的液晶功能表面。

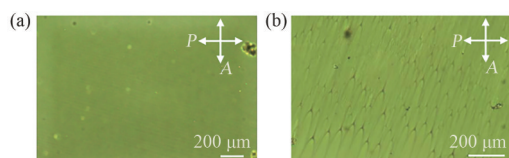


图 1 偏光显微镜下的显微织构图。(a)向列相聚合膜显微织构,液晶盒盒厚 125 μm,环境温度 $T=30^{\circ}\text{C}$,比例尺为 200 μm;(b)偏光显微镜下观察到的近晶相液晶混合物盒内焦锥畴织构,液晶盒盒厚 125 μm,温度 $T=15^{\circ}\text{C}$,比例尺为 200 μm。

Fig. 1 Texture images under polarized microscope. (a) Texture of nematic LC polymer film observed under polarized microscope (cell thickness=125 μm, $T=30^{\circ}\text{C}$, scale bar=200 μm); (b) Texture of smectic LC polymer film observed under polarized microscope (cell thickness=125 μm, $T=15^{\circ}\text{C}$, scale bar=200 μm).

为了研究液滴在液晶膜上的输运行为,我们将微量级的液滴用注射器滴到液晶聚合物膜上并观察其运动情况。在注液光滑表面上滴上探测液滴后会形成一个包括气体、润滑液、探测液和固体在内的四相系统。热力学条件不同,该四相系统会呈现 12 种不同的状态。以本文实验体系为例,在功能表面上滑动的探测液为水滴,润滑剂为小分子液晶 8CB,另外两个相是空气和固体液晶聚合物网络。当扩散参数 $S>0$ 时,水滴将被小分子液晶完全包裹(图 2),而当扩散参数 $S<0$,在水滴边上会形成新月形状的润湿脊。

液晶在水滴上的扩散参数定义如式(1)所示:

$$S_{lw} = \gamma_{wa} - \gamma_{lw} - \gamma_{la}, \quad (1)$$

其中: γ_{wa} 是水、空气界面的界面张力, γ_{lw} 是液晶、水界面的界面张力, γ_{la} 是液晶、空气界面的界面

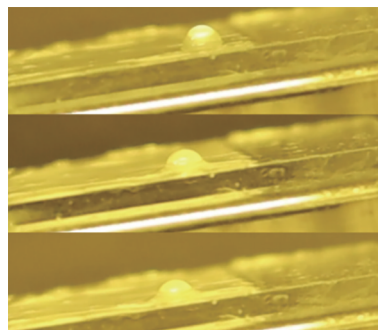


图 2 近晶相聚合膜上水滴被小分子液晶 8CB 的包裹过程。水滴在未被液晶包裹时形状呈现部分球体;当被液晶完全包裹后,水滴形成了一定的润湿脊,从反光变成亚光。

Fig. 2 Encapsulation of water droplet by small LC molecule 8CB on polymerized smectic film. The droplets initially appear as glowing partial sphere and turn into matt droplets surrounded by obvious wetting ridge after the encapsulation process.

张力。式(1)可以通过杨氏方程模型进行一定的理解。在水平方向上根据杨氏方程,认为小分子液晶是在水表面的液滴,可以列出力学平衡方程 $\gamma_{wa} = \gamma_{lw} + \gamma_{la} \cos \theta$,当完全润湿时接触角为 0° ,再进行移项:

$$\gamma_{wa} - \gamma_{lw} - \gamma_{la} = 0, \quad (2)$$

其中:左边部分定义为扩散参数,当扩散参数大于 0 时,可以认为 γ_{wa} 足够大(也可以认为 γ_{lw} 和 γ_{la} 较小),以至于将小分子液晶在水表面拉平,形成完全包裹的液晶层。因为液体和固体存在差别,严格来说这样套用杨氏方程是不准确的,但用于理解扩散参数的定义依然是可行的。该参数可以用于解释实验中液晶润滑层表面水滴滑动时液晶包裹层的形成以及小分子液晶层上水滴的扩散行为。

杨氏接触角可以用于描述平坦固体表面的静态润湿性,而此类系统的动态润湿性需要用前进角 θ_a 、后退角 θ_r 和接触角滞后 θ_H 描述。实验表明,前进角与表面润湿性相关,而后退角与表面附着力相关。接触角滞后 θ_H 的定义为前进角 θ_a 和后退角 θ_r 之间的差值。定义水滴开始相对于倾斜表面移动时的倾角为水滴的滑动角 α 。

在滑动角测试实验中,水滴滑动的主要驱动力为重力,力的大小如式(3)所示:

$$F = mg \sin \alpha = \rho \Omega g \sin \alpha, \quad (3)$$

其中: F 是水滴所受的重力, Ω 是水滴的体积, ρ 是水滴的密度, α 是倾斜角, m 是水滴的质量, g 是重力引起的加速度。

尽管大多数注液光滑表面上液体运动是通过滑动的方式,但事实证明,液体的运动方式取决于两种液体的粘度。Smith 等人证明,在使用高粘度润滑剂的情况下,水滴会在润滑剂上滚动而不是滑动^[26]。该行为由方程(4)表示。

$$\frac{V_i}{V} \sim \left(1 + \frac{\eta_l R}{\eta_w h}\right)^{-1}, \quad (4)$$

式中: V 是水滴的速度, V_i 是在水-液晶界面上的速度, h 是液晶润滑层的厚度, R 是水滴的半径, η_l 和 η_w 分别是润滑剂和水的动态粘度。Keiser 等人基于这些对实验结果的观察,展示了两种不同的水滴流动方式^[27],并表明水滴受到非线性摩擦力,假设该摩擦来自前进和后退的流体弯月面及其粘性效应。此外,当 $\eta_w \gg \eta_l$ 时,水滴速度和表面微结构无关;但当 $\eta_w \ll \eta_l$ 时,水滴速度与 $\phi^{3/2}$ 成反比。因此,随着微结构比例的增加,作用在水滴上的摩擦力也会增加。对于平面和纹理表面,摩擦力取决于液体和表面的附着力和润湿特性。

3 实验结果

为了研究水滴在液晶聚合膜上的输运特性,我们首先探究了向列相液晶聚合膜对水滴的输运行为,水滴用量约为 50 μL 。向列相液晶聚合膜的高平整度以及疏水性使其拥有良好的水滴输运功能。在 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,向列相聚合膜上的小分子液晶 8CB 处于近晶相状态,此时液晶聚合膜上的水滴无法滑动,即使将液晶基板垂直于水平面,水滴也会被“固定”在液晶表面,无法进行有效输运。而当样品升温至 35 $^{\circ}\text{C}$,使液晶功能表面 8CB 处于向列相时,水滴在液晶表面的输运特性发生变化,水滴可以完成速度较快的滑动。实验表明当倾斜角度为 7 $^{\circ}$ 时,水滴在液晶聚合膜光滑表面的输运功能良好,均速约 26 mm/min。

我们进一步测试了水滴的滑动角,发现在该液晶聚合膜上水滴可以在极小倾角(约 1 $^{\circ}$)情况下进行滑动。当将样品升温至 8CB 的向列相温度以

上时(如 35 $^{\circ}\text{C}$),水滴立即开始缓慢滑动。沿着取向方向水滴滑动速度约 1.9 mm/min(图 3(a)),垂直于取向方向水滴滑动速度约 1.0 mm/min(图 3(b)),比倾斜角度为 7 $^{\circ}$ 时输运速度小了一个数量级。

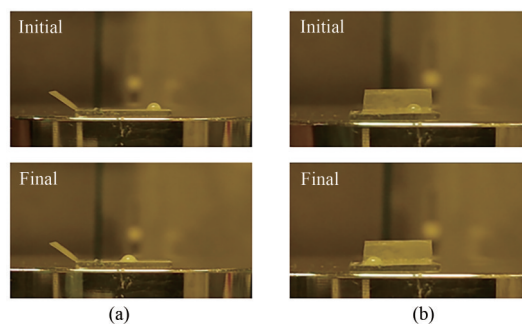


图 3 (a)水滴沿向列相聚合膜取向方向滑动的始末位置,均速为 1.9 mm/min;(b)水滴沿垂直于向列相聚合膜取向方向滑动的始末位置,均速为 1.0 mm/min。玻璃基板的倾斜角度约为 1 $^{\circ}$ 。

Fig. 3 (a) Initial and final positions of the sliding of water droplet along orientation direction of the nematic LC polymer film with the average velocity of 1.9 mm/min; (b) Initial and final positions of the sliding of water droplet along the direction perpendicular to the LC orientation with an average velocity of 1.0 mm/min. The inclination angle of the glass substrate is approximately 1 $^{\circ}$.

进一步地,我们通过将液晶聚合单体和 8CB 的混合物在近晶相态下聚合来研究近晶相聚合膜对水滴的各向异性输运性能。在制得的近晶相聚合物膜上铺上一层 8CB 润滑剂,并在升温后于显微镜下对该注入液晶的多孔聚合物膜进行观察。在 30 $^{\circ}\text{C}$ 时可以观察到聚合膜表面伴随着焦锥畴的生长(图 4(a)),在 35 $^{\circ}\text{C}$ 时可以观察到 8CB 的向列相结构,携带了系列缺陷线(图 4(b)),当升温至 40 $^{\circ}\text{C}$,即升温至 8CB 各向同性相时(图 4(c))并未出现完全消光现象,仍然可以看到聚合物的网络结构,但视野亮度的降低表明小分子液晶 8CB 确实到达了各向同性相。

将该样品置于显微镜下,并于 40 $^{\circ}\text{C}$ 时滴上水滴进行观察。为了便于显微观察,控制水滴的体积为 8 μL 。将温度降至 35 $^{\circ}\text{C}$,再升高至 40 $^{\circ}\text{C}$,同时观察该区域内的液晶相变结构变化情况。在该实验中,载玻片存在一定微小角度,造成了水滴沿液

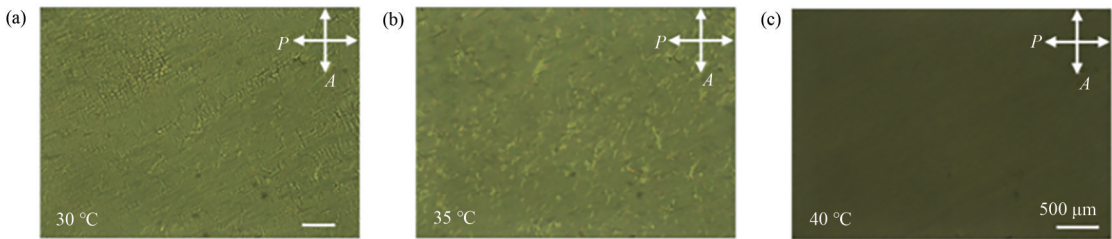


图 4 偏光显微镜下的织构图。(a) 30 °C, (b) 35 °C, (c) 40 °C 时偏光显微镜下观察到铺上小分子液晶 8CB 的近晶液晶聚合物膜。膜厚 150 μm , 比例尺为 500 μm 。
Fig. 4 Texture of 8CB-infused smectic LC polymer film observed under polarized microscope at the temperature of (a) 30 °C, (b) 35 °C and (c) 40 °C, respectively (thickness of the film=150 μm , scale bar=500 μm).

晶取向方向的滑动。在显微镜下观察(图 5(a)), 水滴沿着取向方向缓慢滑动。此外, 水滴在不断变小, 这是由于该近晶相聚合薄膜尚未被润滑剂填满, 水滴可以渗入它的多孔结构中。这也间接证明了在该结构上添加小分子液晶 8CB 润滑剂的必要性。

我们在已铺上足量 8CB 的近晶相液晶聚合物膜上研究了水滴的输运行为, 水滴约为 50 μL , 基板倾角为 6°。与图 5(a)中水滴沿着取向方向滑动的结果一致, 当温度升至 35 °C 时, 沿取向方向(图 5(b)左)的水滴滑动速度比垂直于取向方向(图 5(b)右)的速度快。但由于近晶相聚合

物膜开盒时略不平整, 表面粗糙度较向列相聚合膜高, 因此滑动速度较向列相聚合膜对水滴的滑动速度慢了一个数量级, 但这一点可以通过增加 8CB 润滑剂的量来改善。此外, 当将近晶相液晶聚合物膜加热至不同温度时, 可以观察到不同的显微织构, 验证了结构随温度的改变, 并会对水滴形态产生影响。与预期相符, 我们通过控温测量液晶聚合膜表面的接触角。实验表明, 随着液晶表面温度的升高, 水滴接触角有下降的趋势, 如图 5(c)所示, 因此, 水滴接触角、液晶粘度(随温度升高降低)这两个主要影响水滴输运的物理参数是一对需要平衡的考虑因素。

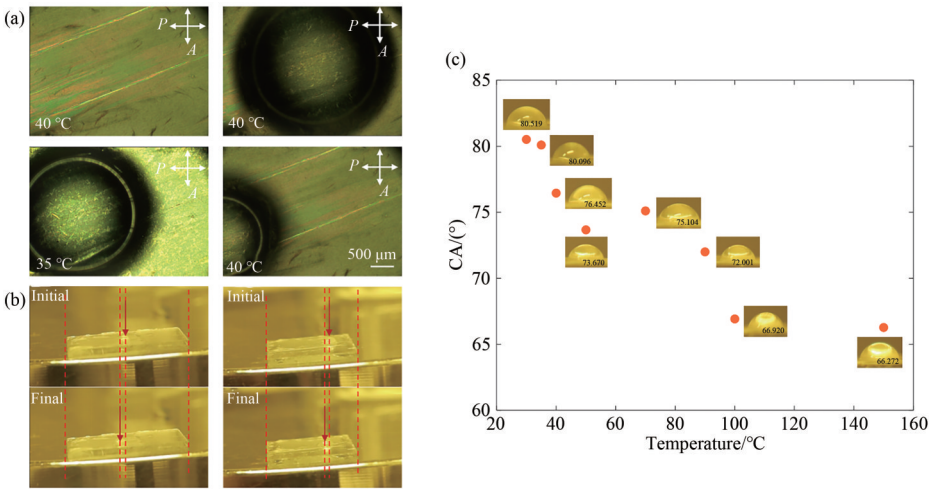


图 5 水滴在近晶相液晶聚合物膜上的行为。(a) 偏光显微镜下观察到的水滴沿近晶相液晶聚合物膜取向方向上的滑动, 比例尺为 500 μm ; (b) 水滴在近晶相液晶聚合物膜沿取向方向(左)和沿垂直于取向的方向(右)上的滑动, 均速分别为 1.5 mm/min 和 1.0 mm/min, 基板倾斜角度为 6°; (c) 近晶相液晶混合物聚合后不同温度下水滴的接触角。
Fig. 5 Behavior of water droplets on the smectic LC polymer film. (a) Sliding of water droplets along the orientation of the smectic LC polymer film observed under a polarizing microscope (scale bar=500 μm); (b) Average sliding velocity of water droplets in the orientation direction (left) and the direction perpendicular to the orientation direction (right) of the smectic LC polymer film is 1.5 mm/min and 1.0 mm/min, respectively (substrate tilt angle=6°); (c) Contact angles of water droplets at different temperatures on the smectic LC polymer film.

4 结 论

本文通过在向列相态下聚合 RM257/8CB 混合物,将 8CB 作为润滑剂注入形成注液光滑表面,成功制备了具有温度调控性的液晶功能表面,并表现出良好的液滴输运功能。通过研究发现以下规律:(1)向列相聚合膜可以使水滴在极小的倾角(1°)下流畅滑动;(2)如果用作润滑剂的小分子液晶 8CB 处于近晶相温度下(30°C),此时液晶聚合膜上的水滴被“固定”在表面,无法进行有效输运。原因为向列相和各向同性相小分子液晶 8CB 的表面粗糙度约为 0.1 nm ,而在近晶相态下,因焦锥畴的形成,表面粗糙度增加至几十纳米及以上,因此,水滴在处于近晶相态下的润滑液 8CB 表面更不易滑动,而在升温相变至向列相后开始滑动。(3)与近晶相聚合膜相比,向列相聚合膜在同等条件下,为水滴提供更快的输运速度,比近晶相聚合膜约快 1 个数量级。原因如前所述,由于焦锥畴的存在,近晶相聚合膜与处于向列相态下的小分子液晶 8CB 的排列结构匹配程度远低于向列相聚合膜,因此,作为润滑作

用的小分子液晶 8CB 在向列相聚合膜上时,其润滑作用发挥最佳,促使水滴下滑速度也更快。(4)近晶相聚合膜和向列相聚合膜对于水滴的输运均具有方向选择性,这也是本文最主要体现的特性与功能之一。从化学角度,8CB 为一类棒状分子,氰基位于棒的一端。在 8CB 分子取向排列后,垂直取向方向的氰基密度大于平行取向方向的氰基密度。由于氰基作为强极性基团对水分子有较大的吸引力,即液滴滑动的阻力,因此液滴沿着平行取向的滑动速度大于沿垂直取向的滑动速度。另一方面,从表面能角度看,表面能可以简单理解为增加单位表面积所需要克服的分子间作用力。对于小分子液晶层表面来说,棒状液晶分子的取向排列使得垂直取向方向的液晶分子密度大于平行取向方向的液晶分子密度。因此,垂直取向方向的表面能大于平行取向的情况。也就是说,液晶沿平行取向方向运动所需要克服的表面能更低,因此滑动更快。可以预见,可以进一步通过图案化光控取向技术^[28-29],实现对微小液滴尺寸的精密控制,规划液滴在液晶光滑表面的输运路径,这将是本研究未来的重要探索方向。

参 考 文 献:

- [1] PUIGMARTÍ-LUIS J. Microfluidic platforms: a mainstream technology for the preparation of crystals [J]. *Chemical Society Reviews*, 2014, 43(7): 2253-2271.
- [2] BAWAZER L A, MCNALLY C S, EMPSON C J, *et al.* Combinatorial microfluidic droplet engineering for biomimetic material synthesis [J]. *Science Advances*, 2016, 2(10): e1600567.
- [3] LI C, BOBAN M, SNYDER S A, *et al.* Paper-based surfaces with extreme wettabilities for novel, open-channel microfluidic devices [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(33): 6121-6131.
- [4] TANG X, ZHU P A, TIAN Y, *et al.* Mechano-regulated surface for manipulating liquid droplets [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14831.
- [5] HE X C, XU T L, GAO W, *et al.* Flexible superwetable tapes for on-site detection of heavy metals [J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(24): 14105-14110.
- [6] LI A, LI H Z, LI Z, *et al.* Programmable droplet manipulation by a magnetic-actuated robot [J]. *Science Advances*, 2020, 6(7): eaay5808.
- [7] SACKMANN E K, FULTON A L, BEEBE D J. The present and future role of microfluidics in biomedical research [J]. *Nature*, 2014, 507(7491): 181-189.
- [8] MA L L, LI S S, LI W S, *et al.* Rationally designed dynamic superstructures enabled by photoaligning cholesteric liquid crystals [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(12): 1691-1696.
- [9] MA L L, LI C Y, PAN J T, *et al.* Self-assembled liquid crystal architectures for soft matter photonics [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 270.
- [10] MA L L, LIU C, WU S B, *et al.* Programmable self-propelling actuators enabled by a dynamic helical medium [J].

- Science Advances*, 2021, 7(32): eabh3505.
- [11] 骆沙曼, 孙浩哲, 颜世强, 等. 含偶氮苯的光致形变液晶聚合物的细胞生物相容性[J]. 应用化学, 2021, 38(10): 1371-1381.
- LUO S M, SUN H Z, YAN S Q, *et al.* Cell biocompatibility of photodeformable azobenzene-containing liquid crystal polymers [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1371-1381. (in Chinese)
- [12] KOMAR A, FANG Z, BOHN J, *et al.* Electrically tunable all-dielectric optical metasurfaces based on liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(7): 071109.
- [13] CHEN T X, ZHAO Q L, MENG X, *et al.* Ultrasensitive magnetic tuning of optical properties of films of cholesteric cellulose nanocrystals [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(8): 9440-9448.
- [14] 陈佳浩, 刘娇, 孙路瑶, 等. 聚合物稳定双频蓝相液晶的亚微秒光电响应[J]. 液晶与显示, 2023, 38(1): 18-23.
- CHEN J H, LIU J, SUN L Y, *et al.* Sub-microsecond electro-optic response in polymer-stabilized dual-frequency blue phase liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(1): 18-23. (in Chinese)
- [15] MA L L, WU S B, HU W, *et al.* Self-assembled asymmetric microlenses for four-dimensional visual imaging [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(12): 13709-13715.
- [16] 翟飞, 封伟. 4D打印液晶弹性体软体机器人及其热致运动行为[J]. 应用化学, 2021, 38(10): 1389-1396.
- ZHAI F, FENG W. 4D printed liquid crystal elastomer soft robot and its thermal derived motion behavior [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1389-1396. (in Chinese)
- [17] 邹呈, 高延子, 于美娜, 等. 液晶/高分子复合材料及其在反式电控调光膜中的应用研究进展[J]. 应用化学, 2021, 38(10): 1213-1225.
- ZOU C, GAO Y Z, YU M N, *et al.* Recent advances in liquid crystal/polymer composites and their applications in reverse-mode electrically switchable light-transmittance controllable films [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1213-1225. (in Chinese)
- [18] 纪宇帆, 蔡锋, 于海峰. 液晶聚合物的表面形貌光调控研究进展[J]. 应用化学, 2021, 38(10): 1226-1237.
- JI Y F, CAI F, YU H F. Research progress on photoswitchable surface topography of liquid crystalline polymer [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1226-1237. (in Chinese)
- [19] LIN I H, MILLER D S, BERTICS P J, *et al.* Endotoxin-induced structural transformations in liquid crystalline droplets [J]. *Science*, 2011, 332(6035): 1297-1300.
- [20] LV J A, LIU Y Y, WEI J, *et al.* Photocontrol of fluid slugs in liquid crystal polymer microactuators [J]. *Nature*, 2016, 537(7619): 179-184.
- [21] XU Y, RATHER A M, YAO Y X, *et al.* Liquid crystal-based open surface microfluidics manipulate liquid mobility and chemical composition on demand [J]. *Science Advances*, 2021, 7(40): eabi7607.
- [22] QIU Y Q, YANG Y Z, VALENZUELA C, *et al.* Near-infrared light-driven three-dimensional soft photonic crystals loaded with upconversion nanoparticles [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(9): 2102475.
- [23] MCBRIDE M K, MARTINEZ A M, COX L, *et al.* A readily programmable, fully reversible shape-switching material [J]. *Science Advances*, 2018, 4(8): eaat4634.
- [24] ZHAN Y Y, ZHOU G F, LAMERS B A G, *et al.* Artificial organic skin wets its surface by field-induced liquid secretion [J]. *Matter*, 2020, 3(3): 782-793.
- [25] ZHANG R, MOZAFFARI A, DE PABLO J J. Logic operations with active topological defects [J]. *Science Advances*, 2022, 8(8): eabg9060.
- [26] SMITH J D, DHIMAN R, ANAND S, *et al.* Droplet mobility on lubricant-impregnated surfaces [J]. *Soft Matter*, 2013, 9(6): 1772-1780.
- [27] KEISER A, KEISER L, CLANET C, *et al.* Drop friction on liquid-infused materials [J]. *Soft Matter*, 2017, 13(39): 6981-6987.
- [28] 邹朋飞, 魏冰妍, 杨淑蕾, 等. 光控取向技术应用于液晶非显示领域的若干进展[J]. 液晶与显示, 2017, 32(6): 411-423.
- ZOU P F, WEI B Y, YANG S L, *et al.* Some progresses of photoalignment technique applied in liquid crystal non-display field [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(6): 411-423. (in Chinese)

- [29] 邓媛,范遥见,陶磊,等. 含有偶氮苯液晶纳米粒子的合成及其超分子结构和光控取向行为[J]. 应用化学,2021,38(10):1353-1361.

DENG Y, FAN Y J, TAO L, *et al.* Liquid crystal nanoparticles containing azobenzene: synthesis, supramolecular structure and their applications in light-controlled orientation [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1353-1361. (in Chinese)

作者简介:



窦韵洁(1999—),女,江苏南通人,硕士研究生,2022年于南京大学获得学士学位,主要从事有机光伏器件物理的研究。E-mail:yjdou@mail.nju.edu.cn



魏 阳(1995—),男,江苏徐州人,博士,2023年于南京工业大学获得博士学位,主要从事各向异性光学功能材料性能及其应用研究。E-mail:yangwei20630@163.com



王泽宇(2000—),男,河南周口人,硕士研究生,2021年于天津大学获得学士学位,主要从事液晶微结构的光学应用研究。E-mail:zeyuwang@mail.nju.edu.cn



马玲玲(1992—),女,浙江湖州人,博士,特聘研究员,2019年于南京大学获得博士学位,主要从事液晶光学微结构材料及其应用研究。E-mail:malingling@nju.edu.cn