

文章编号: 1007-2780(2025)02-0272-12

基于液晶聚合物的功能性涂层

冯 伟*

(中国科学技术大学 工程科学学院, 安徽 合肥 230027)

摘要: 液晶聚合物(LCP)的分子基元按液晶顺序排列,因此液晶聚合物(LCP)具有光学、电学以及力学性质的各向异性。引入响应性化学基团后,LCP涂层具有刺激响应性,能够对光、热和电场等刺激做出响应。LCP涂层能够在外界刺激下智能调控其表面形貌,调节表面的摩擦和润滑性质,并影响细胞的生长和分化行为。本文回顾了液晶聚合物涂层的最新进展,重点介绍了其在调控表面摩擦和润滑性质以及在生物医用方面的应用。同时,展望了液晶聚合物涂层在未来发展中的应用前景,并指出了需要解决的科学问题。

关键词: 液晶聚合物;涂层;刺激响应性;摩擦;润滑

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2024-0216 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2024-0216

Functional coatings based on liquid crystalline polymers

FENG Wei*

(School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Liquid crystal polymer (LCP) has anisotropy in optical, electrical and mechanical properties because its molecular units are arranged in a liquid crystal order. After the introduction of responsive chemical groups, LCP coatings have stimulus responsiveness and can respond to stimuli such as light, heat and electric fields. The LCP coating can intelligently regulate its surface topography under external stimulation, adjust the friction and lubrication properties of the surface, and affect the growth and differentiation behavior of cells. This article reviews the latest advances in scientific research on liquid crystal polymer coatings, focusing on their applications in regulating surface friction and lubrication properties and in biomedical applications. At the same time, the article looks forward to the application prospects of liquid crystal polymer coatings in future development and points out the scientific issues that need to be solved.

Key words: liquid crystal polymer; coating; stimuli-responsive; friction; lubrication

1 引言

人的表面皮肤具有防护、散热与分泌等多种

功能^[1-2]。类似于人的皮肤,涂层作为器件与外界直接接触的界面,也承担着多种重要的作用。例如,自清洁、疏水、防腐蚀等功能都是涂层能够实

收稿日期: 2024-07-28; 修订日期: 2024-09-02.

基金项目: 中国科学技术大学启动经费(No.KY2090000140)

Supported by Start-up Funding from University of Science and Technology of China (No.KY2090000140)

*通信联系人, E-mail: fengw@ustc.edu.cn

现的^[3-4]。自然界中的涂层和表面对生命的维持也发挥着重要的作用。

随着科技的发展和器件智能化程度的提高,动态涂层开始显示出更为丰富和多样化的功能。这些功能包括无接触控制管道内液体流动、动态调整摩擦系数以及可控分泌功能等,逐渐引起了人们的广泛关注。

在众多材料中,液晶聚合物(LCP)以其独特的刺激响应性和优异的可加工性能,展现了极佳的应用前景。液晶聚合物涂层在诸如表面摩擦性质控制和生物工程等领域的应用研究进展显著,展示出广泛的潜在应用前景。本文详细综述了液晶聚合物涂层在这些领域的研究进展,探讨了其未来的发展方向和应用潜力。通过对LCP涂层的深入研究,可以预见其将在智能涂层领域发挥越来越重要的作用,为各类高科技器件和系统提供更多的功能和可能性。

2 液晶聚合物的形变原理

自然界中存在很多具有精细结构的表面,如壁虎脚掌的微结构带来的干黏附功能使壁虎能够在竖立墙壁和天花板爬行(图1(a)),猪笼草表面的润滑性液体帮助猪笼草捕食昆虫(图1(b)),细胞也能感知表面的作用力按一定的图案生长(图1(c))。

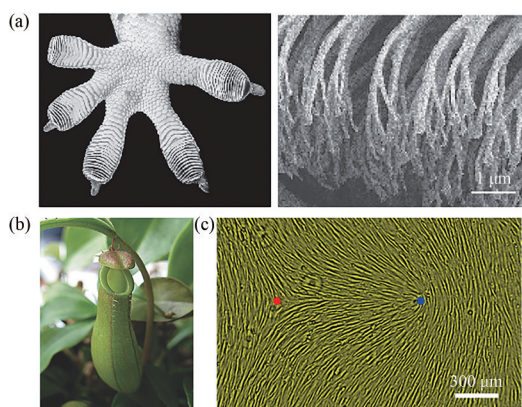


图1 自然界中的功能性表界面。(a) 具有干黏附功能的壁虎脚掌及其微观结构^[5]; (b) 具有润滑液的猪笼草; (c) 细胞在外界基质诱导下按一定的图案进行排列^[6]。

Fig. 1 Functional surfaces in nature. (a) Gecko's pad with dry adhesion function and its microstructure^[5]; (b) Nepenthes with lubricating fluid; (c) Cells are arranged in a certain pattern under the guidance of external matrix^[6].

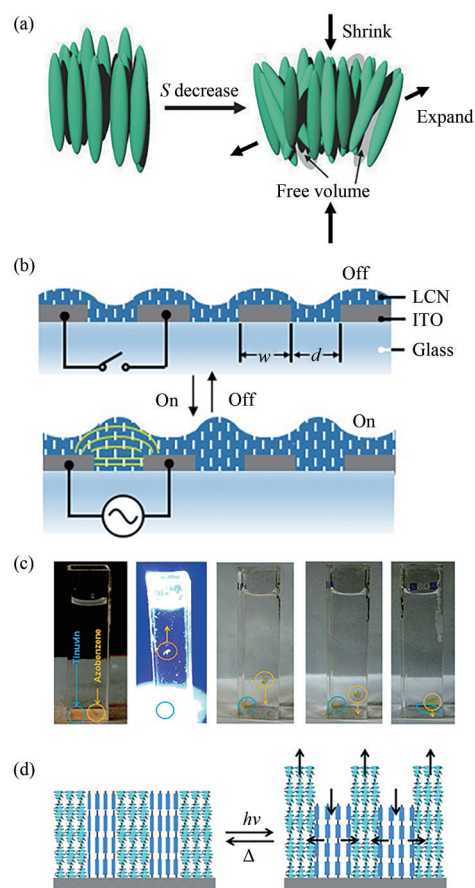


图2 (a) 单畴液晶聚合物在外界刺激作用下秩序参数降低后发生各向异性变形^[10]; (b) 垂直取向的液晶聚合物涂层在图案化电场中的变形^[11]; (c) 由于光照导致的自由体积空洞导致液晶聚合物薄膜密度降低,与之对比,光热效应并没有导致聚合物密度明显下降^[12]; (d) 具有胆甾相-垂直取向交替取向的液晶聚合物涂层表面的形貌变化^[13]。

Fig. 2 (a) Anisotropic deformation of a monodomain liquid crystal polymer after the order parameter is reduced under external stimulation^[10]; (b) Deformation of a vertically aligned liquid crystal polymer coating in a patterned electric field^[11]; (c) Density reduction of a liquid crystal polymer film due to free volume voids caused by light irradiation. In contrast, the photothermal effect did not lead to a significant decrease in polymer density^[12]; (d) Morphological changes on the surface of a liquid crystal polymer coating with alternating cholesteric-vertical orientation^[13].

这些自然界中的功能性表面涂层很多是由聚合物组成的,其微结构具有特定的顺序和响应性。与之对应地,响应性液晶聚合物也有一定的微纳结构取向和响应性。液晶聚合物是由液晶

基元交联形成的高分子材料^[7-9]。根据液晶基元的种类,可以分为盘状液晶和棒状液晶。目前在液晶聚合物涂层领域,研究较多的是棒状液晶材料。这类材料在受到外界刺激后,如温度、光或电场,液晶聚合物的秩序参数会降低,导致液晶畴发生各向异性形变。这种形变表现为液晶聚合物在垂直于液晶指向矢的方向上膨胀,而在平行于液晶指向矢的方向上收缩^[10],如图 2(a)所示。由于涂层在平面方向的变形受到一定的限制,因此这种各向异性形变主要表现在涂层的厚度方向。具体来说,当外界刺激引起液晶聚合物的秩序参数降低时,涂层会在厚度方向上发生显著的伸缩。这种厚度方向上的变形不仅可以调控涂层的物理性质,还可以为智能涂层提供可控的响应机制。

液晶聚合物涂层在实际应用中展现出多种潜在功能和优势。例如,通过调节外界刺激条件,可以实现涂层表面的动态调控,从而使其具备自清洁和调控表面摩擦性质等特性。此外,液晶聚合物的刺激响应性还使其在生物工程和机电系统(MEMS)等领域具有广泛的应用前景。本文将进一步探讨液晶聚合物涂层的研究进展,重点介绍其在不同刺激条件下的响应机制和应用实例,并展望其未来的发展趋势和潜在应用领域。

3 LCP 涂层在控制表面摩擦黏附性质方面的应用

涂层表面的摩擦黏附性质与表面形貌和化学性质密切相关。一般来说,涂层的表面形貌越粗糙,其摩擦系数越大。这是因为粗糙表面提供了更多的接触点和不规则的微观结构,增加了接触面积和摩擦力。作为一种动态材料,液晶聚合物(LCP)涂层具有特殊的性质,可以在光、电或热等外部刺激作用下改变形状。这种形状改变可以直接影响涂层表面的摩擦和黏附性质。例如,通过调控液晶聚合物分子的排列方向或聚合物链的排布,可以调节涂层表面的平整度,从而影响其摩擦系数和黏附性能。因此,LCP 涂层不仅是静态的防护层,还可以根据外界条件动态调整其性能,以适应不同的工作环境和

应用需求。

LCP 表面的变形可以发生在单畴聚合物涂层中。刘丹青和 Broer 等人利用电场刺激单畴液晶聚合物产生自由体积空洞(图 2(b)),从而产生表面的变形^[11]。这种自由体积空洞引起的表面凸起图案主要是由涂层下面的电极决定的。其中涉及的驱动动力学过程较为复杂,涉及到涂层由极性分子随交变电场的振荡(10~100 ms)、玻璃态液晶高分子塑性的转变(~1 s)以及随之表现在涂层形貌的变形(10~100 s)^[14]。这种由于外界刺激产生的自由体积空洞在光照-密度实验中得到明显的实验验证^[12]。含有偶氮苯分子的液晶聚合物网络(LCN)薄膜在受到紫外线照射后,由于自由体积空洞的产生,其密度减小并在梯度盐水中上浮(图 2(c))。除了宏观的光照,微观尺度的光照也可以促使液晶聚合物变形,由此制备微观可控的微米机器人或形貌变形^[15]。

除了均一取向的 LCP,用于表面形貌驱动的还是具有多畴取向的 LCP 涂层。冯伟、刘丹青和 Broer 等人利用胆甾相与垂直取向交替分布的多畴取向制备了表面形貌可变的 LCP 涂层^[10],可以实现比较大的表面形变(图 2(d))。这种分子排列可以通过液晶分子的自组装形成,也可以通过利用图案化的电场将胆甾相转变成垂直取向。

由于液晶聚合物的各向异性变形,不同取向的液晶畴会有不同的内应力。相邻不同取向的液晶畴会相互挤压,促使比单一取向 LCP 更大的变形幅度,因此可以制备具有复杂取向畴的液晶聚合物涂层。Babakhanova 等人利用光取向技术制备了包括+1、-1、+(1/2)和-(1/2)在内的缺陷取向^[16](图 3(a))。热刺激会导致相应的拓扑缺陷区域出现凹陷或凸起。利用结构化的电场或偏振光,还可以在涂层中引入表面形貌的振荡。冯伟等人利用平面交变电场刺激具有指纹状织构的液晶聚合物(图 3(b)),其中的胆甾相和垂直取向的液晶畴分别下降和升高,并且由于极性液晶单元在电场中的受力变化随着交变电场不断发生二级的振动^[10]。干燥多沙地区的大面积太阳能电池板容易被沙尘暴带来的沙尘覆盖导致发电效率急剧降低。而干燥的戈壁沙漠地

区少水且劳动条件艰苦,人工去清扫大面积的太阳能电池板代价高昂。上述电控振动的液晶聚合物涂层有望用于电控远程清洁这些干燥多沙地区的光伏器件。由于偶氮苯分子在液晶聚合物中的取向,含偶氮苯的LCP涂层还可以被偏振光诱导振动。Hendrikx等人利用偏振方向不断旋转的365 nm紫外光作为偶氮苯分子 *trans-cis*

构型转变的刺激光源,455 nm可见光作为偶氮苯分子 *cis-trans* 构型的恢复光源,实现了在光刺激下的液晶聚合物涂层的形貌振荡^[17-18](图3(c))。利用这些涂层的表面形貌变化,通过控制涂层表面形貌的粗糙度,可以控制表面的摩擦系数^[13]。此外,还可以利用多种刺激(如光和电)结合的方式为涂层的形貌变化引入包括时序逻辑控制等

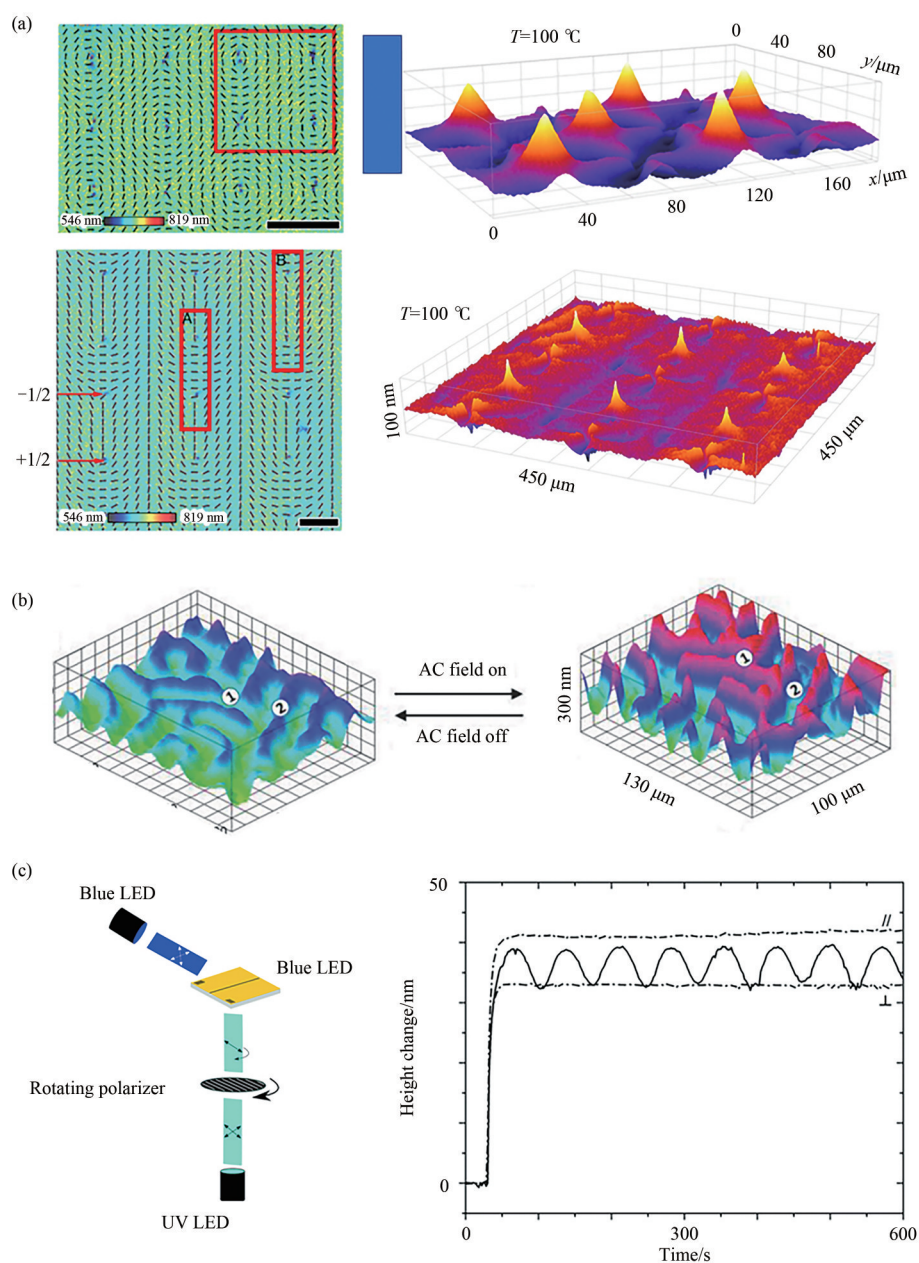


图3 (a) LCP中的+1和±(1/2)拓扑缺陷在受热后形成的表面形貌^[16]; (b) 指纹状织构LCP涂层在电场中的形貌变化^[10]; (c) LCP涂层在偏振方向旋转的偏振光场刺激下的形貌变化和振荡^[17]。

Fig. 3 (a) Surface topographies of +1 and ±(1/2) topological defects in LCP after heating^[16]; (b) Topographical changes of fingerprint-textured LCP coating in an electric field^[10]; (c) Topographical changes and oscillations of LCP coating under the stimulation of polarized light field with polarization direction rotated^[17].

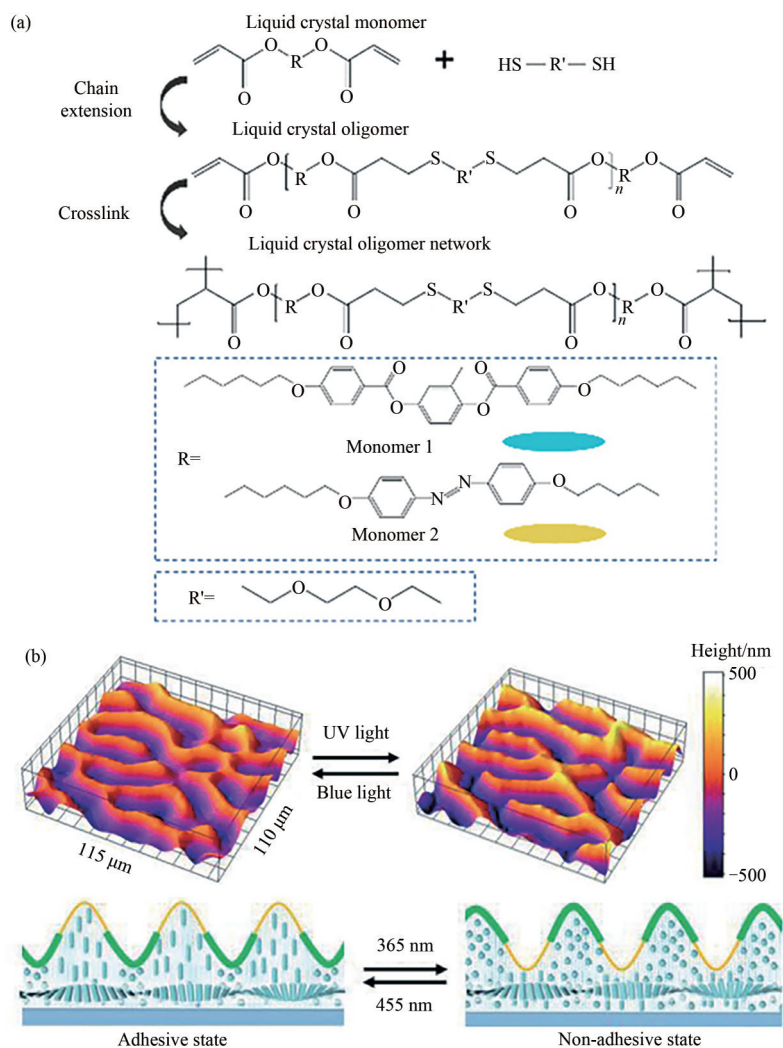


图5 (a) 具有较大变形幅度的LCON化学结构^[21]; (b) 可表面反转及水下黏附性切换的LCP涂层^[24]。

Fig. 5 (a) Chemical structure of LCON with large deformation amplitude^[21]; (b) LCP coating with surface inversion and underwater adhesion switching^[24].

4 LCP 涂层在控制表面润滑和流体流动方面的应用

表面润滑是自然界中常见的表面现象,分布范围从人体器官内部的组织液到植物(如猪笼草)表面的润滑液。在生物体内部,例如关节和眼球的液体润滑剂能够减少摩擦和磨损,保护组织不受损伤。而在植物表面,如猪笼草等植物的叶表面分泌的黏液不仅帮助捕捉昆虫,还能有效防止表面黏附其他物质,保持叶面的清洁和光滑。这些表面润滑的机制不仅在自然界中发挥重要作用,也启发了人类在工程和技术领域开发润滑材料的设计与应用。

LCP 涂层除了可以通过改变表面的粗糙度

来实现表面的摩擦性质之外,还可以通过“分泌”蕴含在其中的润滑液来实现表面润滑性质的变化。这种涂层技术利用了液晶聚合物的独特特性,可以在特定条件下释放内部储存的润滑液,从而动态调节表面的润滑性质并驱动液体的流动。之前,液晶聚合物也被用在密闭管道中驱动液滴的流动。俞燕蕾教授课题组利用涂覆在管道内部的液晶聚合物的形变实现了光控驱动液滴在管道内部的运动^[28-29]。本文主要关注液晶聚合物涂层在开放式微流控中的应用。Gelebart等人制备了垂直取向的近晶相LCP“海绵”,其中含有的偶氮苯基团使得该复合材料具有光响应性^[25](图6(a))。在紫外光照刺激作用下,偶氮苯分子的异构化使液晶高分子网络形变,挤压

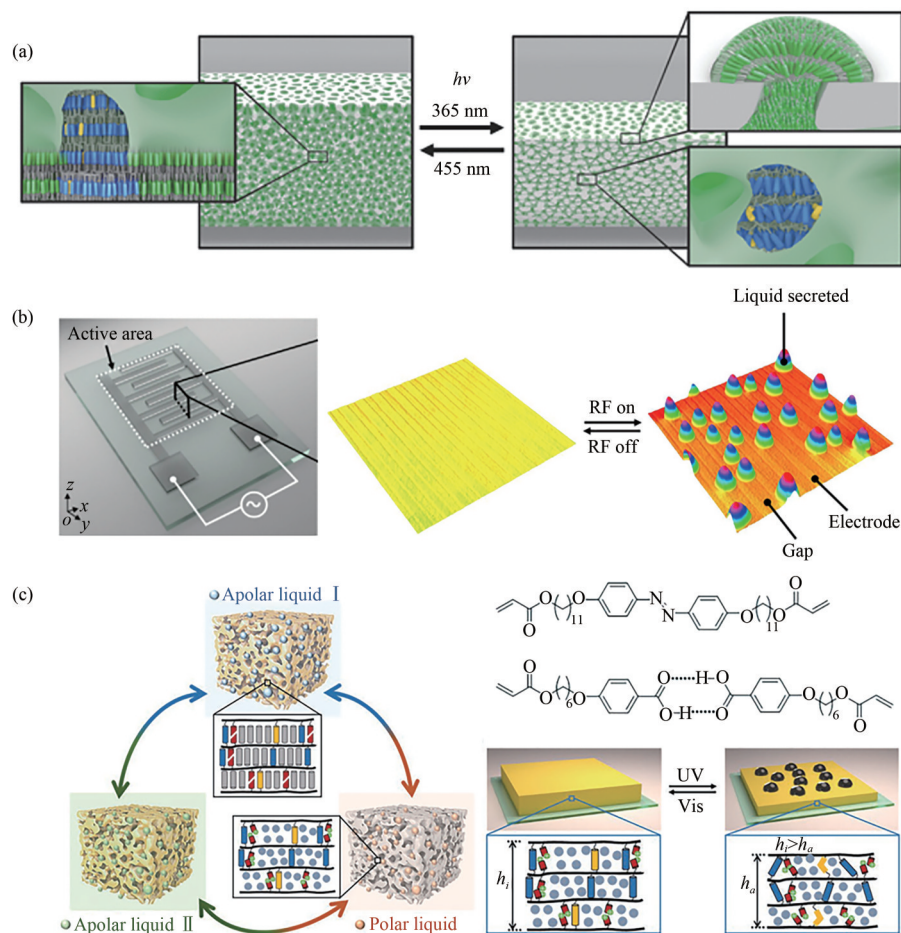


图6 (a) 光控分泌8CB的LCP“海绵”机理示意图^[25]; (b) 电控分泌8CB的LCP“海绵”机理示意图^[26]; (c) 基于LCP的8CB浸润润滑表面,其润滑性质可以通过调控润滑剂8CB/偶氮苯复合物的相变温度进行调节^[27]。

Fig. 6 (a) Schematic diagram of the LCP “sponge” mechanism for light-controlled secretion of 8CB^[25]; (b) Schematic diagram of the LCP “sponge” mechanism for electrical secretion of 8CB^[26]; (c) Lubrication properties of the 8CB-infiltrated lubricating surface based on LCP can be adjusted by regulating the phase transition temperature of the lubricant 8CB/azobenzene complex^[27].

“海绵”涂层中含有的小分子8CB在涂层表面析出,从而改变涂层表面的润滑性质^[25]。同样地,交变电场也可以刺激液晶聚合物网络发生变形,从而在涂层表面分泌润滑液液体,改变涂层表面的润滑性质^[26](图6(b))。通过使用pH响应的羧酸类单体,Zhan等人利用液晶聚合物涂层负载极性不同的液体,并且通过光照操作实现了这些液体在涂层表面的主动析出^[30](图6(c))。

此外,除了改变负载润滑剂的本体,液晶聚合物体系也可以通过改变润滑剂的性质来改变涂层的润滑性质。俄亥俄州立大学的王晓光课题组等研究团队通过利用polyRM257液晶聚合物作为本体,为8CB润滑剂提供良好的共存性,展现了这一技术的创新性应用。他们通过在

8CB润滑剂中掺杂偶氮苯基团,并利用紫外光刺激这些偶氮苯基团,成功地改变了润滑剂的相变温度^[27](图7(a))。这样,即使在温度不变的情况下,润滑剂也能从近晶相转变为向列相,从而实现涂层润滑性质的动态调控。这种方法不仅增加了润滑剂和液晶聚合物基体之间的兼容性,还利用光响应特性精确控制润滑剂的物理状态。这种相变带来的湿润脊液晶位置秩序(Positional Order)的变化使得水滴在表面由固定转变为滑动状态。

同样地,类似的注入液晶润滑剂的LCP表面涂层还可以用于水下环境中气泡的操纵(图7(b))。通过类似的机理,可以实现气泡的光控水下运输。研究人员通过在液晶润滑剂中添加偶氮苯

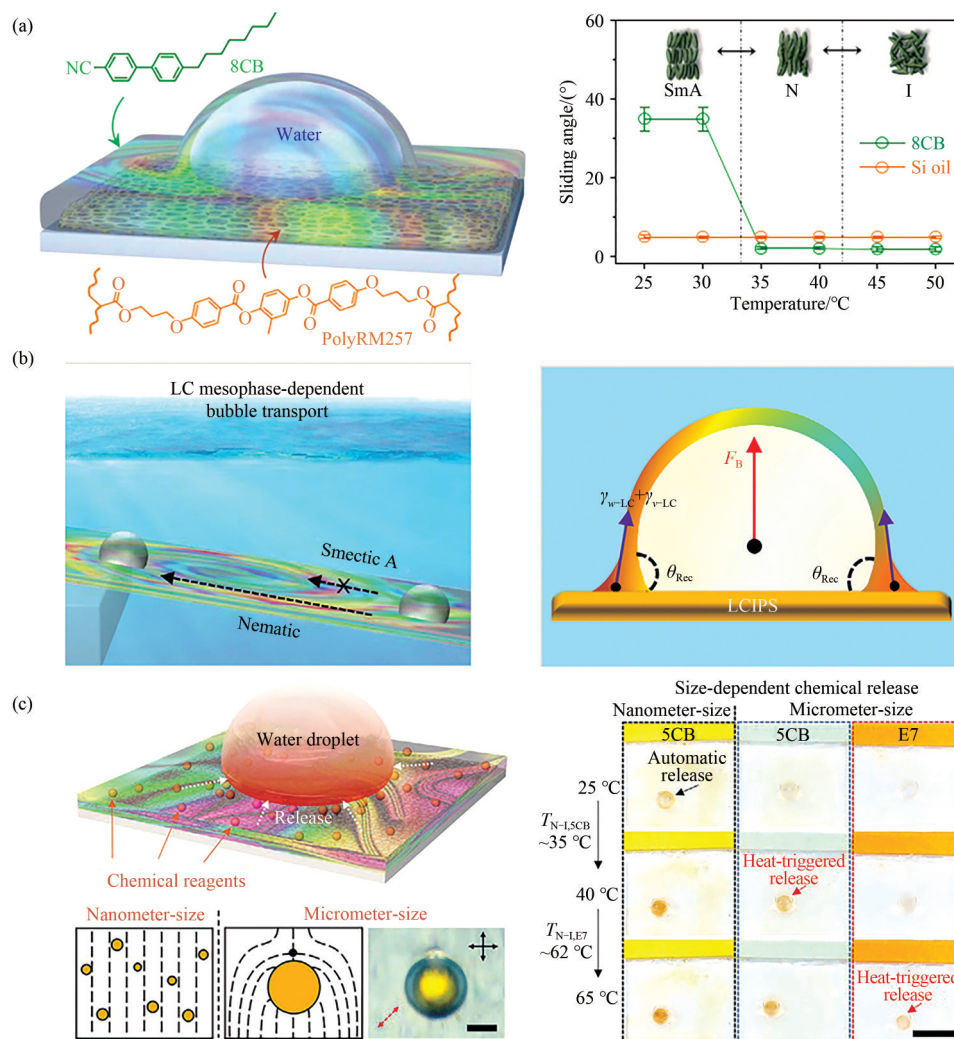


图7 (a) 液晶润滑剂的相转变导致液滴在润滑性LCP表面的状态改变^[27]; (b) 液晶润滑剂的相转变导致气泡在润滑性LCP表面的状态改变及其力学分析^[31]; (c) 分散在润滑下LCP涂层中的纳米和微米级的物质可选择性地连续/脉冲式释放至涂层表面的液滴^[32]。

Fig. 7 (a) Phase transition of liquid crystal lubricant causes state change of droplets on lubricating LCP surface^[27]; (b) Phase transition of liquid crystal lubricant causes state change of bubbles on lubricating LCP surface and its mechanical analysis^[31]; (c) Nano- and micro-scale materials dispersed in lubricated LCP coating can be selectively released continuously/pulsed to droplets on the coating surface^[32].

光响应性基团,利用紫外光照射诱导偶氮苯分子的 *trans-cis* 异构,从而诱导8CB液晶润滑剂从近晶相转变为向列相。这种相变过程引发了液晶位置秩序(Positional Order)的变化和表面粗糙度的改变,使得气泡在涂层表面从固定状态转变为滑动状态^[31]。这种技术不仅能够控制气泡在涂层表面的移动,还能够通过改变光照条件,实现气泡的定向运输。这一特性在水下环境中的应用前景非常广泛,例如在微流控系统中操纵气泡进行化学反应、样品传输或分离操作。

此外,基于液晶润滑剂的润滑涂层还能够向涂层表面的液滴(水滴)释放化学物质。这种涂层在与液滴接触时,通过液晶润滑剂的相变和物理特性的改变,可以精确地控制化学物质的释放速度和位置,从而实现高效的化学反应控制和物质传输。Xu等人利用液晶的相转变实现了5CB液晶润滑剂中的乙基黄微米颗粒的加速释放^[32](图7(c))。通过在液晶润滑剂中掺杂不同的化学物质,并将不同的器件组合起来,他们实现了模块化式控制化学反应和化学物质的连续或脉

冲式释放。这种功能性涂层可以通过开放式表面微流控的方式实现液滴中化学反应的调控,在生物医学方面有重要的应用^[35]。通过这种创新性的方法,不仅可以在复杂的水下环境中实现高效的气泡操纵和运输,还能进一步拓展液晶润滑剂的应用范围。液晶润滑剂的光响应特性和相变特性为开发智能化、多功能的表面涂层提供了新的思路,推动了水下工程、生物医学和环境科学等领域的发展。这种技术的应用潜力巨大,有望在未来的研究和工业实践中发挥重要作用。

5 LCP 涂层在生物细胞生长调控方面的应用

在许多生物组织中,由于细胞间的相互作用,细胞经常表现出一定的结构和顺序^[36]。液晶聚合物(LCP)涂层在调控细胞生长图案和运动方面具有巨大的潜力。研究表明,通过调节动态

液晶弹性网络(LCN)涂层的表面形貌,可以显著影响细胞的运动和定向生长。Koçer等人的研究展示了细胞对LCN涂层形貌做出响应,从而调控其运动行为^[37]。此外,Turiv等人证明了具有取向结构的LCP可以被用来培养人体成纤维细胞,使其按照LCP的取向结构有序生长^[6](图8(a))。这种结构化的表面能够有效引导细胞的定向生长,为构建大面积取向细胞结构提供了可能性。在纳米尺度上,近晶相液晶聚合物形成的自发纳米结构(如纳米沟壑)也被证明可以用来有序排列细胞^[33](图8(b))。这些纳米结构能够提供微环境的拓扑和力学信号,使得细胞能够按照特定的方向各向异性地生长和排列。此外,洗脱不反应性液晶后得到的单一取向聚合物框架也展示了在细胞定向生长方面的潜力^[34, 38](图8(c))。这些结构化的液晶聚合物基体不仅能够提供表面的物理支持,还能通过其取向性质直接影响细胞的生长方向和形态。在细胞生物学的应用中,多孔的液晶弹性体LCE被广泛用于增殖和分化

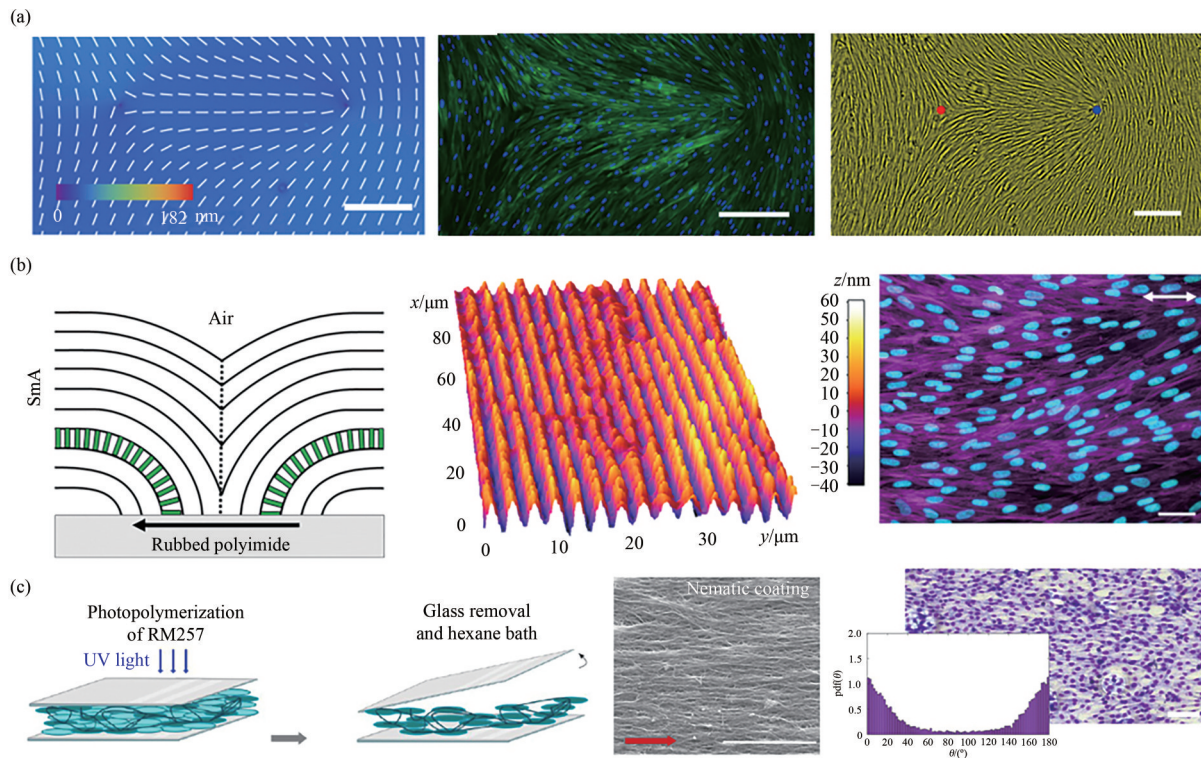


图8 (a) LCP涂层拓扑结构控制的细胞生长^[6]; (b) 近晶相自组装的纳米沟槽控制的细胞定向生长^[33]; (c) 洗脱不反应液晶后形成的形貌控制的细胞定向生长^[34]。

Fig. 8 (a) Cell growth controlled by topological structure of LCP coating^[6]; (b) Directed cell growth controlled by nano-grooves of smectic self-assembly^[33]; (c) Directed cell growth controlled by morphology formed after washing out non-reactive liquid crystal^[34].

神经元和胶质细胞。LCE的各向异性结构不仅有助于细胞的成熟过程,还可以作为理想的宿主支持原代细胞的发育和体外髓鞘形成^[39]。

综上所述,液晶聚合物涂层及其衍生材料在细胞生物学和生物医学领域的应用展示了其独特的结构调控能力和生物相容性,为生物工程和组织工程的发展提供了新的可能性和方向。

6 结论和展望

液晶聚合物(LCP)涂层作为具有刺激响应性的涂层,不仅具有普通高分子涂层的保护作

用,还可以被赋予智能功能。这些智能功能包括动态清洁、摩擦润滑性能调控和各向异性等。通过充分利用LCP涂层的动态功能,我们可以解锁许多新的功能。然而,要实现这些功能,我们仍需解决一些力学和材料问题。例如,如何提高涂层的耐久性、如何增强涂层的敏感性以及如何降低涂层所需的驱动电压或驱动光强。针对这些挑战,需要根据特定的应用场景分析LCP涂层中的力学问题,研发新的液晶聚合物材料,并设计新的器件结构。相信在不久的将来,LCP涂层将发挥重要作用,展现出更大的应用潜力。

参 考 文 献:

- [1] BRENNER M, HEARING V J. The protective role of melanin against UV damage in human skin [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2008, 84(3): 539-549.
- [2] HARDER J, DRESSEL S, WITTERSHEIM M, *et al.* Enhanced expression and secretion of antimicrobial peptides in atopic dermatitis and after superficial skin injury [J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 2010, 130(5): 1355-1364.
- [3] GANESH V A, RAUT H K, NAIR A S, *et al.* A review on self-cleaning coatings [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(41): 16304-16322.
- [4] CUI G, BI Z X, WANG S H, *et al.* A comprehensive review on smart anti-corrosive coatings [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 148: 105821.
- [5] RINALDI A. Naturally better: science and technology are looking to nature's successful designs for inspiration [J]. *EMBO Reports*, 2007, 8(11): 995-999.
- [6] TURIV T, KRIEGER J, BABAKHANOVA G, *et al.* Topology control of human fibroblast cells monolayer by liquid crystal elastomer [J]. *Science Advances*, 2020, 6(20): eaaz6485.
- [7] FENG W, HE Q G, ZHANG L. Embedded physical intelligence in liquid crystalline polymer actuators and robots [J]. *Advanced Materials*, 2024, doi:10.1002/adma.202312313.
- [8] NIE Z Z, WANG M, YANG H. Self-sustainable autonomous soft actuators [J]. *Communications Chemistry*, 2024, 7(1): 58.
- [9] ZHU C Y, LU Y, JIANG L X, *et al.* Liquid crystal soft actuators and robots toward mixed reality [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(39): 2009835.
- [10] FENG W, BROER D J, LIU D Q. Oscillating chiral-nematic fingerprints wipe away dust [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(11): 1704970.
- [11] LIU D Q, TITO N B, BROER D J. Protruding organic surfaces triggered by in-plane electric fields [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1526.
- [12] LIU D Q, BASTIAANSEN C W M, DEN TOONDER J M J, *et al.* Light-induced formation of dynamic and permanent surface topologies in chiral-nematic polymer networks [J]. *Macromolecules*, 2012, 45(19): 8005-8012.
- [13] LIU D Q, BROER D J. Self-assembled dynamic 3D fingerprints in liquid-crystal coatings towards controllable friction and adhesion [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(18): 4542-4546.
- [14] VAN DER KOOIJ H M, SEMERDZHIEV S A, BUIJS J, *et al.* Morphing of liquid crystal surfaces by emergent collectivity [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3501.
- [15] PALAGI S, MARK A G, REIGH S Y, *et al.* Structured light enables biomimetic swimming and versatile locomotion of photoresponsive soft microrobots [J]. *Nature Materials*, 2016, 15(6): 647-653.

- [16] BABAKHANOVA G, TURIV T, GUO Y B, *et al.* Liquid crystal elastomer coatings with programmed response of surface profile [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 456.
- [17] HENDRIKX M, SCHENNING A P H J, BROER D J. Patterned oscillating topographical changes in photoresponsive polymer coatings [J]. *Soft Matter*, 2017, 13(24): 4321-4327.
- [18] HENDRIKX M, SIRMA B, SCHENNING A P H J, *et al.* Compliance-mediated topographic oscillation of polarized light triggered liquid crystal coating [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2018, 5(20): 1800810.
- [19] FENG W, BROER D J, LIU D Q. Combined light and electric response of topographic liquid crystal network surfaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(2): 1901681.
- [20] LV P R, YOU Y X, LI J Y, *et al.* Translating 2D director profile to 3D topography in a liquid crystal polymer [J]. *Advanced Science*, 2021, 8(8): 2004749.
- [21] YOU Y X, GOLESTANI Y M, BROER D J, *et al.* Transforming patterned defects into dynamic poly-regional topographies in liquid crystal oligomers [J]. *Materials Horizons*, 2024, 11(13): 3178-3186.
- [22] FENG W, BROER D J, GREBIKOVA L, *et al.* Static and dynamic control of fingerprint landscapes of liquid crystal network coatings [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(5): 5265-5273.
- [23] LEE H, LEE B P, MESSERSMITH P B. A reversible wet/dry adhesive inspired by mussels and geckos [J]. *Nature*, 2007, 448(7151): 338-341.
- [24] FENG W, CHU L, DE ROOIJ M B, *et al.* Photoswitching between water-tolerant adhesion and swift release by inverting liquid crystal fingerprint topography [J]. *Advanced Science*, 2021, 8(8): 2004051.
- [25] GELEBART A H, LIU D Q, MULDER D J, *et al.* Photoresponsive sponge-like coating for on-demand liquid release [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(10): 1705942.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] LIU Q, YU G D, ZHU C Y, *et al.* An integrated droplet manipulation platform with photodeformable microfluidic channels [J]. *Small Methods*, 2021, 5(12): 2100969.
- [30] ZHAN Y Y, BROER D J, LIU D Q. Perspiring soft robotics skin constituted by dynamic polarity-switching porous liquid crystal membrane [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(12): 2211143.
- [31] RATHER A M, XU Y, CHANG Y, *et al.* Stimuli-responsive liquid-crystal-infused porous surfaces for manipulation of underwater gas bubble transport and adhesion [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(14): 2110085.
- [32] XU Y, CHANG Y, YAO Y X, *et al.* Modularizable liquid-crystal-based open surfaces enable programmable chemical transport and feeding using liquid droplets [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(20): 2108788.
- [33] BABAKHANOVA G, KRIEGER J, LI B X, *et al.* Cell alignment by smectic liquid crystal elastomer coatings with nanogrooves [J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2020, 108(5): 1223-1230.
- [34] ROJAS-RODRÍGUEZ M, FIASCHI T, MANNELLI M, *et al.* Cellular contact guidance on liquid crystalline networks with anisotropic roughness [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(11): 14122-14130.
- [35] BORBORA A, XU Y, DEY S, *et al.* Lubricated interfaces enabling simultaneous pulsatile and continuous chemical release modes [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(31): 2302264.
- [36] DUCLOS G, ERLenkÄMPER C, JOANNY J F, *et al.* Topological defects in confined populations of spindle-shaped cells [J]. *Nature Physics*, 2017, 13(1): 58-62.
- [37] KOÇER G, SCHIPHORST JTER, HENDRIKX M, *et al.* Light-responsive hierarchically structured liquid crystal polymer networks for harnessing cell adhesion and migration [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(27): 1606407.
- [38] CHEN J, LUO Y M. Disodium cromoglycate templates anisotropic short-chain PEG hydrogels [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(26): 33223-33234.
- [39] USTUNEL S, STERNBACH S, PRÉVÔT M E, *et al.* 3D Co-culturing of human neuroblastoma and human

oligodendrocytes, emulating native tissue using 3D porous biodegradable liquid crystal elastomers [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140(20): e53883.

作者简介:



冯 伟,男,博士,特任教授,2020年于荷兰埃因霍温理工大学获得博士学位,主要从事液晶聚合物等软物质力学的研究。E-mail:fengw@ustc.edu.cn