

侧链型液晶聚合物对手性向列相液晶螺旋结构的影响研究

贾志轩, 黑鸿君, 于盛旺, 申艳艳*

太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024

摘要 通过改变表面的锚定条件,可以在不借助外部条件的情况下获得热力学稳定态的长程有序的螺旋结构。通过调节沉积在硅晶片上的液晶聚合物[6-(4-甲氧基-偶氮苯-4'-氧基)甲基丙烯酸乙酯](PMMAZO)的接枝密度来调节表面锚定,从而实现对螺旋结构的螺距和螺旋方向的准确控制。随着接枝密度的增加,螺旋结构的倾斜变形增加,螺距的大小被抑制;随着液晶盒厚度的增加,形态会从长程有序的条纹状逐渐过渡到指纹状。

关键词 材料; 液晶; 螺旋结构; 聚合物; 改性; 平面锚定

中图分类号 O753+.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2216001

Effect of Side-Chain Liquid Crystalline Polymer on Helical Structure of Chiral Nematic Liquid Crystal

Jia Zhixuan, Hei Hongjun, Yu Shengwang, Shen Yanyan*

College of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract By varying the anchoring condition, the helical structure with a long-range order is achieved as a thermodynamically stable state without external supports. Poly [6-(4-methoxy-azobenzene-4'-oxy) hexyl methacrylate] (PMMAZO) is deposited onto the silicon substrate to tune the anchoring. Both orientation and pitch can be controlled by varying the PMMAZO grafting density. As the grafting density increases, the enhanced tilted deformation of helical structure suppresses the pitch size. As the cell thickness increases, the pattern transition from a long-range order stripe to a small fingerprint domain is facilitated.

Key words material; liquid crystal; helical structure; polymer; modification; surface anchoring

OCIS codes 160.3710; 160.5470; 240.2130

1 引言

手性向列相液晶(CLC)可通过将手性掺杂剂加入到向列相液晶中而得到,并且螺旋结构自发地形成^[1]。由于其独特的螺旋结构,CLC在光的折射方面表现出周期性的变化,并在光学领域中有巨大的应用潜力^[2-4]。螺旋结构的螺距和螺旋方向是影响CLC光学性质的两个重要因素。CLC的螺距可以由其形态变化的周期长度来体现,并且CLC的形态也会随着螺旋结构的螺旋方向发生变化。在上下表

面锚定不同的液晶盒中,CLC可以呈现长程有序的条纹形态^[5],液晶分子以倾斜的方式排列。这些条纹形态具有优异的光学特性,例如光的衍射^[6-11],但是这种倾斜排列需要通过对液晶盒施加外部电场来获得。

液晶内部的不同构象可以通过聚合物来进行稳定,液晶聚合物在液晶的实际应用中起到了关键的作用,其不仅可以加快液晶分子的响应速度,而且在很大程度上稳定液晶缺陷^[12]。为了在聚合物液晶材料中获得倾斜排列的液晶分子,可以在液晶盒表

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-05-20; 录用日期: 2021-06-08

基金项目: 山西省科技重大专项(20181102013)

通信作者: *shenyanyan@tyut.edu.cn

面覆以高分子聚合物涂层,如碳水化合物巨表面活性剂^[13]和化学吸附的硫醇^[14]。在接枝密度较高的涂层区域,主链型介晶聚合物的分子链将沿着表面法线的方向被拉伸,从而形成垂直锚定;反之,平面锚定将会出现^[15-16]。高接枝密度区域的垂直锚定与低接枝密度区域的平面锚定之间将产生竞争,从而导致倾斜锚定的产生。侧链型高分子聚合物涂层也可以被用来改变液晶分子的排列^[17]。在聚合物涂层中,聚合物主链并没有被完全展开,而是处于蜷缩的状态,聚合物侧链将会以垂直的状态分布于涂层上,进而导致了垂直锚定的产生。利用柔性间隔基,将介晶单体引入到一端固定在基底表面上带有聚甲基丙烯酸酯的聚合物主链上,形成带有偶氮基介晶基团的液晶聚合物^[18],通过控制侧链型介晶聚合物,6-(4-甲氧基-偶氮苯-4'-氧基)甲基丙烯酸酯(PMMAZO)的浓度来获得具有不同接枝密度的聚合物涂层,从而赋予向列相液晶不同的锚定行为;随着接枝密度的增加,向列相液晶分子的倾斜程度增加,会从垂直于涂层表面逐步地过渡到平行于涂层表面^[19]。但是,CLC在不同的螺旋构造(例如指纹形态和Grandjean形态)中存在相似的能量状态,这使得CLC分子的稳定控制相较于向列相液晶分子的稳定控制有着更大的挑战,通常情况下需要借助一些外场的介入来维持目标形态所需的能量状态。此外,对于热力学稳态的CLC系统,通过

改变聚合物分子刷的接枝密度来控制其形态转变并精准控制尺寸的方法鲜有报道。

本文通过控制液晶盒的厚度和其表面所覆盖的聚合物分子刷的接枝密度,控制CLC的形态变化。在垂直锚定液晶盒内,利用十八烷基三氯硅烷(OTS)对上下表面进行表面改性,以获得较强的垂直锚定;对于混合锚定液晶盒,利用OTS对其上表面进行处理,获得垂直锚定,在下表面旋涂不同浓度的PMMAZO,从而获得倾斜的锚定。CLC长程有序的条纹状形态和指纹形态会在不同的液晶盒中被观察到。两种不同形态并不会相互排斥,而是表现出一种随液晶盒厚度和聚合物分子刷接枝密度变化的相互过渡的关系。

2 实验材料与方 法

2.1 实验材料

5CB(4-戊基-4-连苯甲腈)购买自Sigma-Aldrich公司[图1(a)]。5CB在室温下呈现向列相,液晶相-各相同性相的转变温度为35℃。手性掺杂物为CB15[(s)-4'-甲基丁基)(1,1'联苯)-4-甲腈],购买自Merck公司。庚烷、异丙醇、OTS和氯苯购买自Sigma-Aldrich公司。PMMAZO根据Stewart等^[20]的研究合成。硅晶片购买自Wafer Pro公司。玻璃盖玻片购买自Fisher Scientific公司。

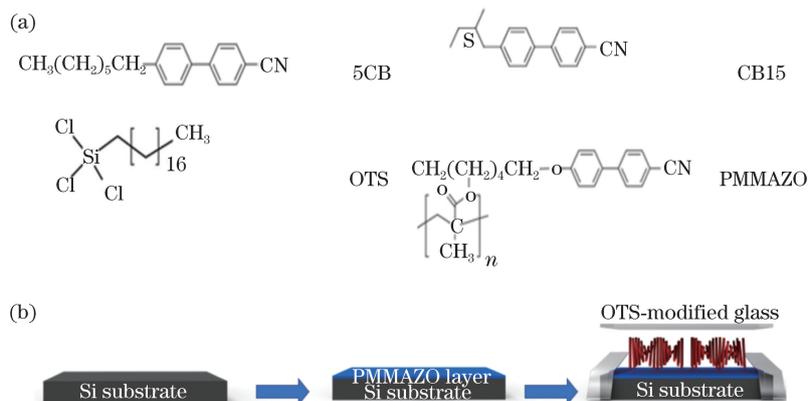


图 1 实验材料与液晶盒组装过程。(a)向列相液晶、手性掺杂物(CB15)、OTS以及PMMAZO的化学结构式;(b)液晶盒组装过程示意图

Fig. 1 Experimental materials and cell preparation process. (a) Chemical structures of nematic liquid crystal, chiral dopant (CB15), OTS, and PMMAZO; (b) cell preparation process

2.2 表面改性

将盖玻片和硅晶片放置于Piranha刻蚀液(浓硫酸与过氧化氢的体积比为5:5)中1h以清洗表面。对于OTS对照组,盖玻片与硅晶片被浸入OTS溶液(13.8 μL OTS加入120 mL庚烷)中1h;

对于PMMAZO实验,以4000 r/min转速在硅晶片上旋涂PMMAZO溶液(PMMAZO的质量分数为0.03%~0.15%,溶剂为氯苯)1min;随后在250℃的氮气环境中进行5min的退火处理;最后使用氯苯对其进行3次,每次5min的超声波清洗。在完

成表面改性处理后,使用氮气迅速将表面吹干。

2.3 液晶盒组装

对于 OTS 对照组,需要使用经过 OTS 处理过的盖玻片和硅晶片。具体的组装流程如图 1(b)所示。不同厚度的聚酯薄膜在液晶盒的上下表面之间产生间隙。液晶盒和 CLC(手性掺杂物 CB15 的质量分数为 6%)均在加热台上被加热至 45 °C,随后使用移液枪提取 4 μ L 的 CLC,在液晶盒一侧缓慢地注入。完成注射后关闭加热台,待液晶盒自然冷却至室温。对于 PMMAZO 实验组,除了需要将经过 OTS 处理过的硅晶片替换为 PMMAZO 硅晶片,组装过程与 OTS 对照组相同。

2.4 表征

通过偏光显微镜(BX53 Olympus)观察 CLC 液晶盒。CLC 条纹形态的周期长度和指纹域的尺寸通过图像处理程序(Image J)获得。PMMAZO 涂层厚度由椭圆仪(Alpha-SE Ellipsometer)测量。

3 分析与讨论

3.1 PMMAZO 聚合物构象

为了研究不同锚定状态下 CLC 的形态和周期的变化,此实验中加入了垂直锚定的液晶盒作为对照组。在此对照组中,作为上表面的盖玻片和作为下表面的硅晶片均被 OTS 进行了表面处理,具有垂直锚定状态。CLC 的螺旋结构受上下表面的锚定作用而呈平躺状处于液晶盒中,螺旋长轴平行于液晶盒表面。此对照组与被 OTS/PMMAZO 处理过的液晶盒组作对比,在后者液晶盒组中,上表面被 OTS 处理,呈垂直锚定状态;下表面被 PMMAZO 处理,聚合物分子刷的接枝密度是通过旋涂不同浓度的 PMMAZO 获得的,呈倾斜锚定状态。随着接枝密度的变化,聚合物分子刷的主链具有不同的自身构象,其介晶支链的方向决定了 CLC 在表面上的锚定行为^[15]。为了确定 CLC 液晶盒系统中 PMMAZO 聚合物分子刷主链的构象,我们引入了聚合物回旋半径(R_g)和递减接枝密度(Σ)。当相邻的两个高分子聚合物的间距大于 $2R_g$ 或者 Σ 小于 1 时,被 PMMAZO 旋涂的硅晶片表面没有完全被覆盖,并且锚定行为被底物效应所取代^[17]。当相邻的高分子聚合物的间距接近于 $2R_g$ 或者 Σ 介于 1 至 5 之间时,硅晶片上会出现聚合物分子刷。只有当其间距小于 $2R_g$ 或者 Σ 大于 5 时,聚合物分子刷才会呈现出被高度拉伸的状态。聚合物回旋半径的表达式^[21]为

$$R_g = \sqrt{\frac{C_\infty nl}{6}}, \quad (1)$$

递减接枝密度表达式为

$$\Sigma = \sigma\pi(R_g)^2, \quad (2)$$

式中: C_∞ 是 PMMAZO 的特征值($C_\infty = 8$); n 是 PMMAZO 主链中的 C—C 键数量($n = 559$); l 是 C—C 键的长度($l = 0.154$ nm)。由此得出 PMMAZO 的回旋半径为 10.7 nm。

实验中 PMMAZO 的浓度(质量分数,全文同)分别设置为 0.03%、0.06%、0.08% 和 0.12%。PMMAZO 接枝密度表达式^[22]为

$$\sigma = (h\rho N_A 10^{-21})/M_n, \quad (3)$$

式中: σ 是 PMMAZO 的接枝密度; h 是 PMMAZO 涂层的厚度; ρ 是 PMMAZO 的密度(此处假设为 1.25 g/mL); N_A 为阿伏伽德罗常数; 10^{-21} 是聚合物转化因子常数; M_n 是 PMMAZO 的相对分子质量(110 K 温度下)。利用(3)式,计算得出 PMMAZO 的接枝密度分别为 1.8×10^{-2} , 2.06×10^{-2} , 2.362×10^{-2} , 2.68×10^{-2} chain/nm²。PMMAZO 接枝密度与 PMMAZO 旋涂液浓度的关系如表 1 所示,各浓度下 PMMAZO 涂层所对应的递减接枝密度均大于 6,所以 PMMAZO 聚合物分子刷会呈现出被拉伸的状态。

表 1 PMMAZO 接枝密度与旋涂液浓度的关系

Table 1 Relationship between PMMAZO grafting density and spin-coating liquid concentration

Mass fraction /%	Coating thickness /nm	$\sigma / (10^{-2} \text{ chain} \cdot \text{nm}^{-2})$	Σ
0.03	2.632	1.8	6.47
0.06	3.011	2.06	7.41
0.08	3.452	2.362	8.49
0.12	3.912	2.68	9.63

3.2 CLC 形态变化

当 CLC 被限制在垂直锚定的液晶盒中,螺旋结构的长轴平行于液晶盒表面,通过偏光显微镜可以观察到 CLC 呈现指纹形态,同时伴随着长程有序的条纹形态以及树枝状形态^[23]。图 2 展示出 CLC 被限制在具有不同厚度和 PMMAZO 接枝密度的液晶盒中的形态变化。在 OTS 对照组中,液晶盒的上下表面具有较强的垂直锚定作用,当液晶盒的厚度介于 1 μ m 至 5 μ m 之间时,CLC 主要呈现为条纹状形态;同时,随着液晶盒厚度的增加,更多的液晶缺陷随之出现,并且可以更频繁地观察到树枝状形态。当液晶盒厚度持续增加到 7 μ m,长程有序的条纹开

始重新排列,成为直径较大的指纹域。当液晶盒厚度达到 $9\ \mu\text{m}$ 时,均匀的指纹状形态扩展至整个液晶盒表面。当液晶盒厚度从 $7\ \mu\text{m}$ 增加至 $9\ \mu\text{m}$

时,更多的指纹域会被观察到,并且在同类竞争中指纹域的尺寸会随着更多指纹域的出现而减小,如图 3(a)所示。

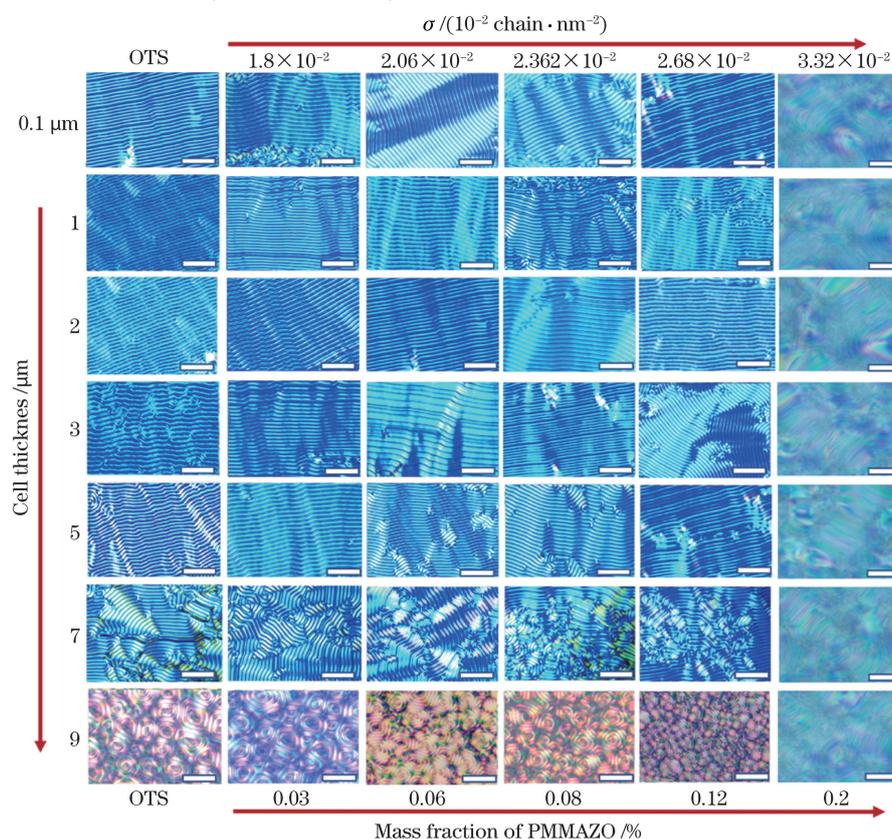


图 2 CLC 被固定在具有不同厚度和 PMMAZO 接枝密度的液晶盒内的形态, 比例尺为 $25\ \mu\text{m}$
Fig. 2 Morphologies of CLCs confined in cells with different cell thicknesses and grafting densities of PMMAZO for scale bar of $25\ \mu\text{m}$

在 PMMAZO 实验组中(接枝密度的范围为 $1.8 \times 10^{-2} \sim 2.68 \times 10^{-2}\ \text{chain}/\text{nm}^2$),长程有序的条纹状形态出现在厚度为 $1 \sim 5\ \mu\text{m}$ 的液晶盒中。然而,当液晶盒厚度大于 $5\ \mu\text{m}$ 或者接枝密度大于 $2.362 \times 10^{-2}\ \text{chain}/\text{nm}^2$ 时,部分条纹会被液晶缺陷和指纹域所取代,并且伴随着一些错位线的出现。当液晶盒厚度增加时,这些出现在对照组和实验组液晶盒中的液晶缺陷并不是树枝状形态,它们的出现是由于条纹的断裂^[24]。在厚度为 $9\ \mu\text{m}$ 的液晶盒中,长程有序的条纹会发生变形,转变成为更均匀、尺寸更小的指纹域,并且指纹域的尺寸会随着液晶盒厚度的增大而减小[图 3(b)~(f)]。图 3 比较了以指纹形态为主导的厚度为 $7\ \mu\text{m}$ 与 $9\ \mu\text{m}$ 的液晶盒内的 CLC 指纹域直径大小,使用 Image J 对观察到的液晶图像进行灰度处理,对不同锚定条件下的指纹域取样 20 次计算出直径的平均值。通过对比发现,CLC 指纹域的尺寸不仅会随着液晶盒厚度的变化而变化,同样也会随着接枝密度的增加而变小。

较为模糊且错位的指纹域出现在厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 、 $12\ \mu\text{m}$ 以及 $14\ \mu\text{m}$ 的液晶盒内(图 4),这是手性掺杂物加入到向列相液晶中,在 CLC 系统中产生的手性扭矩所造成的。当限制 CLC 的液晶盒的厚度相较于螺距足够大时,液晶盒的表面锚定作用将不足以稳定较大的手性扭矩,因此难以维持 CLC 螺旋结构的连续性,从而破坏了原有的长且连贯的螺旋结构。同时,均匀的长程有序的条纹形态(ULH)出现在接枝密度为 $1.800 \times 10^{-2}\ \text{chain}/\text{nm}^2$ 、厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 的液晶盒中以及接枝密度为 $2.06 \times 10^{-2}\ \text{chain}/\text{nm}^2$ 、厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 的液晶盒中(图 2)。

随着 PMMAZO 涂层接枝密度的增加,由于表面锚定而出现更大的倾斜趋势,因此 CLC 螺旋体的变形量加大。在具有较高接枝密度的液晶盒中(液晶盒厚度为 $1 \sim 5\ \mu\text{m}$,接枝密度为 $2.362 \times 10^{-2} \sim 2.68 \times 10^{-2}\ \text{chain}/\text{nm}^2$)出现少数的错位线,这是液晶盒表面锚定与 CLC 手性扭矩之间竞争的结果。在 CLC 螺旋结构中,存在拉伸、扭曲和弯曲变形,从

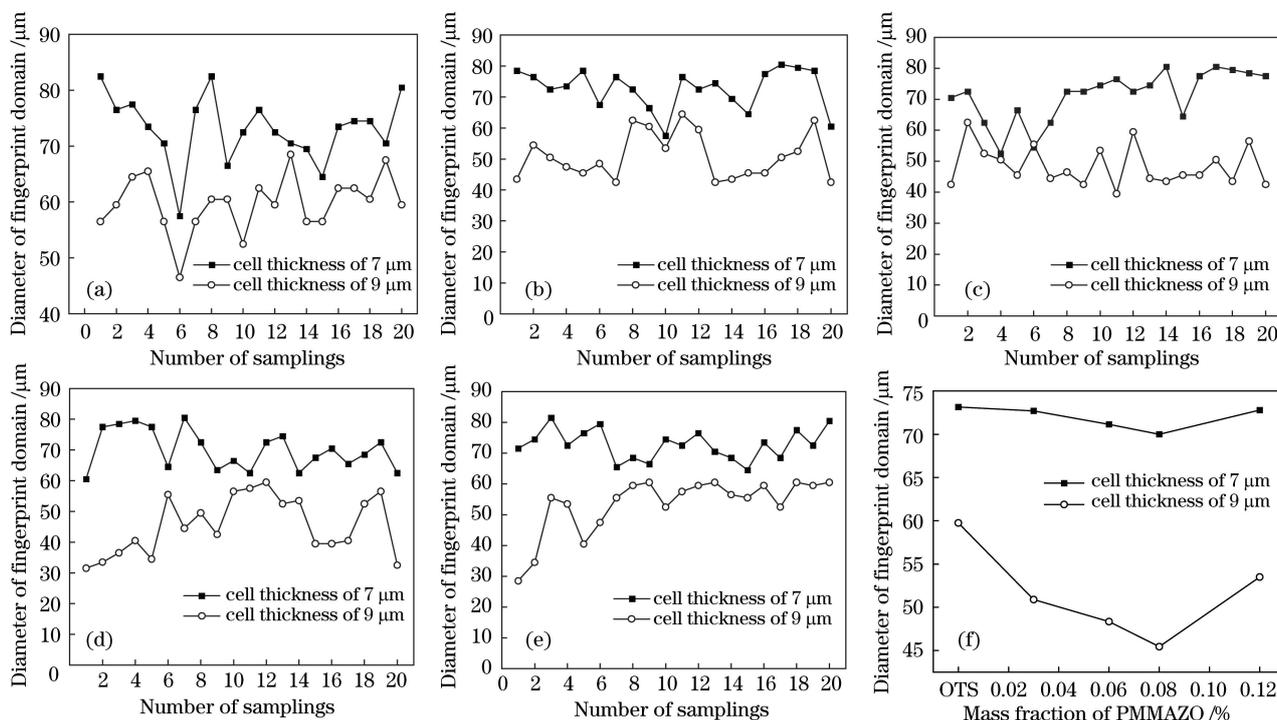


图 3 厚度为 7 μm 和 9 μm 的液晶盒中指纹域的尺寸。(a) OTS; (b) PMMAZO 的质量分数为 0.03%, $\sigma = 1.800 \times 10^{-2}$ chain/ nm^2 ; (c) PMMAZO 的质量分数为 0.06%, $\sigma = 2.060 \times 10^{-2}$ chain/ nm^2 ; (d) PMMAZO 的质量分数为 0.08%, $\sigma = 2.362 \times 10^{-2}$ chain/ nm^2 ; (e) PMMAZO 的质量分数为 0.12%, $\sigma = 2.680 \times 10^{-2}$ chain/ nm^2 ; (f) 当 $\sigma = 1.800 \times 10^{-2}$ chain/ nm^2 , 不同 PMMAZO 质量分数和 OTS 下的指纹域尺寸

Fig. 3 Average size of fingerprint domain in cells with 7 μm and 9 μm thicknesses. (a) OTS; (b) mass fraction of PMMAZO is 0.03%, $\sigma = 1.800 \times 10^{-2}$ chain/ nm^2 ; (c) mass fraction of PMMAZO is 0.06%, $\sigma = 2.060 \times 10^{-2}$ chain/ nm^2 ; (d) mass fraction of PMMAZO is 0.08%, $\sigma = 2.362 \times 10^{-2}$ chain/ nm^2 ; (e) mass fraction of PMMAZO is 0.12%, $\sigma = 2.680 \times 10^{-2}$ chain/ nm^2 ; (f) average size of fingerprint domain for OTS and different PMMAZO mass fractions when $\sigma = 1.800 \times 10^{-2}$ chain/ nm^2

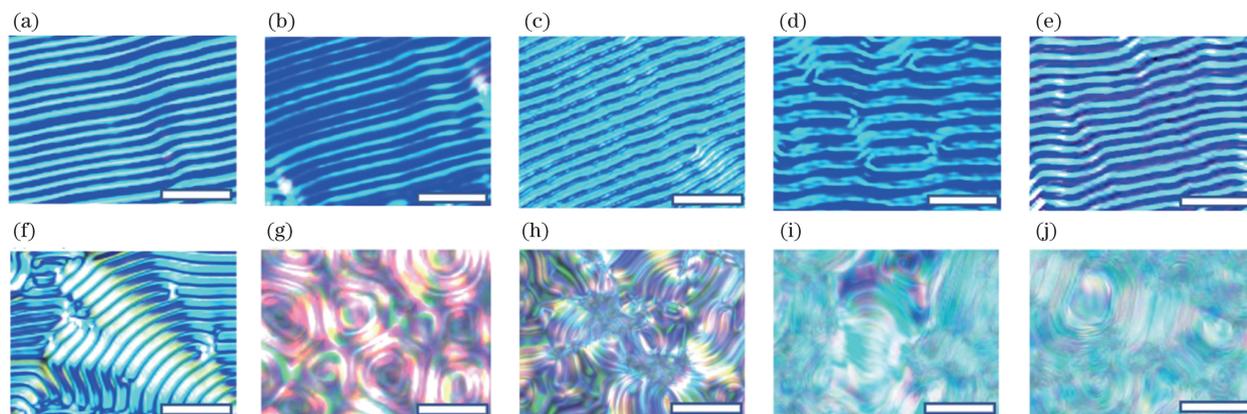


图 4 CLC 在 PMMAZO 质量分数为 0.03% 的不同厚度液晶盒中的形态, 比例尺为 10 μm 。(a) 0.1 μm ; (b) 1 μm ; (c) 2 μm ; (d) 3 μm ; (e) 5 μm ; (f) 7 μm ; (g) 9 μm ; (h) 10 μm ; (i) 12 μm ; (j) 14 μm

Fig. 4 Morphologies of CLCs in cells with different thicknesses when mass fraction of PMMAZO is 0.03% and scale bar is 10 μm . (a) 0.1 μm ; (b) 1 μm ; (c) 2 μm ; (d) 3 μm ; (e) 5 μm ; (f) 7 μm ; (g) 9 μm ; (h) 10 μm ; (i) 12 μm ; (j) 14 μm

热力学的角度来看, 由于延伸变形和扭曲变形所需要的能量更高, 因此 CLC 螺旋结构更倾向于发生扭曲变形。随着 PMMAZO 接枝密度的增加, 固定在硅晶片上 CLC 螺旋体的一端会逐渐偏离硅晶片的

法线,并且沿着具有一定倾斜角度的方向排列。这样的倾斜排列致使 CLC 螺旋结构中出现更多的延伸变形和弯曲变形,并造成系统中总弹性自由能上升。因此,较高的 PMMAZO 接枝密度会导致更多错位线的出现。当接枝密度超过临界值 (3.32×10^{-2} chain/nm², PMMAZO 质量分数为 0.2%) 后, CLC 螺旋体的倾斜趋势更加明显,不断上升的弹性势能驱使 CLC 系统逐渐地偏离最低自由能,从而导致相对模糊且错位的指纹域的出现。

3.3 条纹状形态的周期长度变化

对于没有聚酯薄膜的液晶盒,其上下表面的间距约为 100 nm^[19]。只有当 CLC 被限制在具有一定厚度的液晶盒中才会在偏光显微镜下出现条纹形态。当液晶盒厚度大于 5 μm 时,指纹域会伴随着条纹形态出现,此时长程有序的条纹形态会被指纹域破坏,并发生错位,导致条纹周期长度的测量不再准确。图 5 描述了条纹形态的周期长度和 PMMAZO 接枝密度之间的关系。在经过相同表面处理的厚度为 1~5 μm 的液晶盒中,条纹形态的周

期长度随着液晶盒厚度的增加而增加。通过纵向的比较发现,周期长度会随着 PMMAZO 接枝密度的增大而减小。PMMAZO 聚合物分子刷的主链在较高接枝密度的情况下会呈现出拉伸状的构象,使得分子刷侧链与硅晶片法线之间的角度加大^[17]。因此,CLC 分子在液晶盒中的排列方向会发生变化,在 OTS 组中,CLC 分子垂直于基板;在 PMMAZO 组中,CLC 分子的倾斜角度随接枝密度的增加而增大。我们假设 CLC 螺旋体的一端被固定在液晶盒上表面(OTS 处理过的盖玻片,垂直锚定),CLC 分子被迫垂直于表面;螺旋体的另一端被固定在具有不同接枝密度的下表面(PMMAZO 处理过的硅晶片,倾斜锚定),CLC 分子沿 PMMAZO 涂层的锚定方向排列。CLC 螺旋结构被迫发生形变以适应上下表面不同的锚定作用,并且条纹形态的周期长度会随着倾斜角度的增加而减小。在条纹形态中,CLC 的周期长度是其螺距的一半,因此,CLC 的螺距可以通过控制 PMMAZO 的接枝密度来调节。

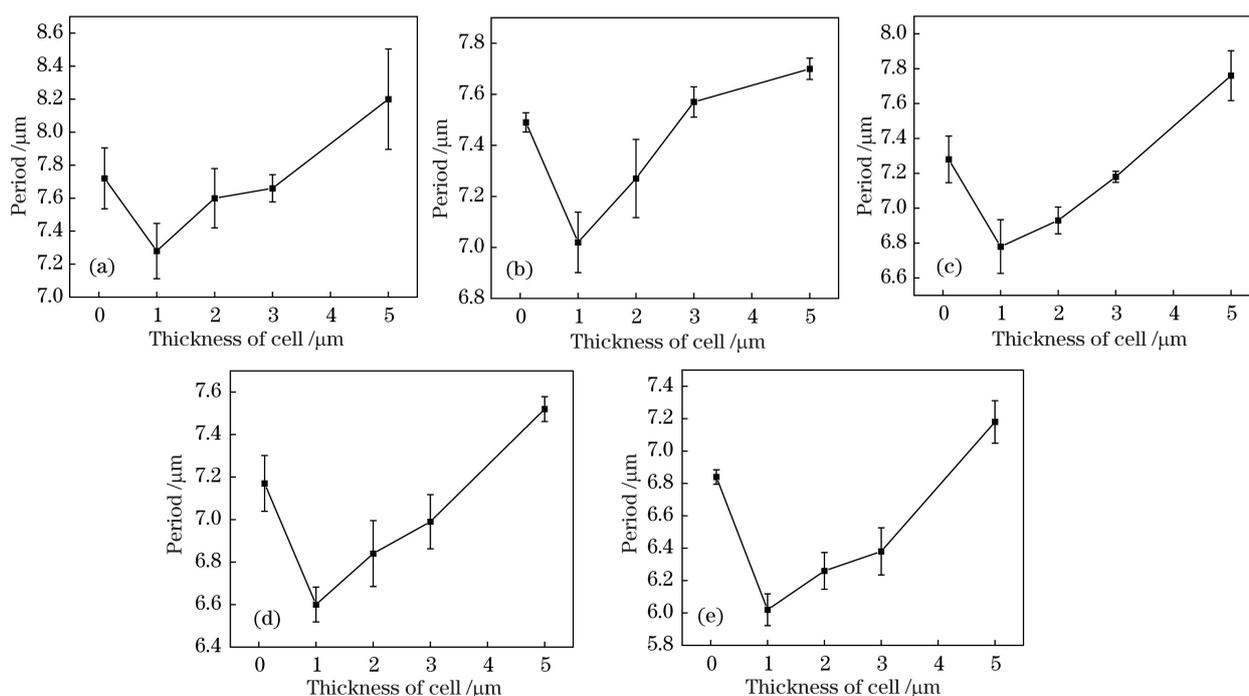


图 5 不同 PMMAZO 浓度下条纹形态的周期长度随液晶盒厚度的变化。(a) OTS;(b) PMMAZO 的质量分数为 0.03%;(c) PMMAZO 的质量分数为 0.06%;(d) PMMAZO 的质量分数为 0.08%;(e) PMMAZO 的质量分数为 0.12%

Fig. 5 Period of helix versus thickness of cell under different PMMAZO concentrations. (a) OTS; (b) mass fraction of PMMAZO is 0.03%; (c) mass fraction of PMMAZO is 0.06%; (d) mass fraction of PMMAZO is 0.08%; (e) mass fraction of PMMAZO is 0.12%

图 5 表明了 CLC 周期长度随着液晶盒厚度的增加而增加。然而,当液晶盒在制作的过程中没有加入聚酯薄膜时,液晶盒厚度约为 100 nm,CLC 在此液晶

盒中的周期长度明显大于 CLC 在 1 μm 厚度的液晶盒中的周期长度。当 CLC 被限制在具有极小厚度的液晶盒中时,CLC 螺旋结构被横向拉伸以适应上下表

面的锚定作用,周期长度增加。同时 CLC 分子将采用延伸变形而不是弯曲变形来最小化 CLC 系统中的弹性势能。一个完整的 CLC 螺旋体在极薄的液晶盒中受到挤压,从而导致它在水平方向上被拉伸,周期长度增加。CLC 周期长度在厚度大于 $1\ \mu\text{m}$ 的液晶盒中的增长机理和在 $100\ \text{nm}$ 极薄液晶盒中的机理是不同的,前者是为了适应上下表面的锚定作用,CLC 螺旋体在垂直方向上被延伸。并且在 $100\ \text{nm}$ 厚度的液晶盒中,周期长度随着 PMMAZO 接枝密度的增加而减小。

4 结 论

通过控制 PMMAZO 聚合物分子刷的接枝密度来调节 CLC 分子的排列和形态。CLC 条纹形态的周期长度会随着 PMMAZO 接枝密度的增大而减少。由于 CLC 螺旋体受到挤压而发生横向的延伸变形,其周期长度明显大于在 $1\ \mu\text{m}$ 厚度的液晶盒中的周期长度。随着液晶盒厚度的增加,长程有序的条纹形态逐渐地被指纹域所取代,直到指纹域均匀地分布在液晶盒中;当液晶盒厚度超过 $9\ \mu\text{m}$ 时,CLC 螺旋结构的连续性会被破坏并发生错位。PMMAZO 聚合物分子刷接枝密度的增加促使液晶盒表面锚定取向发生更大程度的倾斜,导致 CLC 螺旋体产生更多的延伸形变和弯曲形变,使 CLC 系统中的自由能增加,更多的错位线出现在液晶盒中。提供了一种通过聚合物改性来控制 CLC 分子排列和形态的方法,促进了 CLC 材料的应用。

参 考 文 献

- [1] Yu L H, Liu B H, Shen D, et al. Special liquid crystal optical materials: twist-bend nematic phase liquid crystals and the applications [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2020, 35(7): 645-661, 628.
余丽红, 刘炳辉, 沈冬, 等. 特殊液晶光学材料: 扭曲-弯曲向列相液晶及应用 [J]. 液晶与显示, 2020, 35(7): 645-661, 628.
- [2] Laudyn U A, Kwasny M, Karpierz M A. Light beam steering in chiral nematic liquid crystals [C] // 2009 3rd ICTON Mediterranean Winter Conference (ICTON-MW), December 10-12, 2009, Angers, France. New York: IEEE Press, 2009: 1-3.
- [3] Hirabayashi K, Kurokawa T. Liquid crystal devices for optical communication and information processing systems [J]. Liquid Crystals, 1993, 14(2): 307-317.
- [4] Faklis D, Morris G M. Diffractive optics technology for display applications [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2407: 57-61.
- [5] Lin C H, Chiang R H, Liu S H, et al. Rotatable diffractive gratings based on hybrid-aligned cholesteric liquid crystals [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26837-26844.
- [6] Subacius D, Bos P J, Lavrentovich O D. Switchable diffractive cholesteric gratings [J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(10): 1350-1352.
- [7] Lee S N, Chien L C, Sprunt S. Polymer-stabilized diffraction gratings from cholesteric liquid crystals [J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(8): 885-887.
- [8] Kang S W, Sprunt S, Chien L C. Structure and morphology of polymer-stabilized cholesteric diffraction gratings [J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(24): 3516-3518.
- [9] Subacius D, Shiyankovskii S V, Bos P, et al. Cholesteric gratings with field-controlled period [J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(23): 3323-3325.
- [10] Wu J J, Chen F C, Wu Y S, et al. Phase gratings in pretilted homeotropic cholesteric liquid crystal films [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002, 41(10): 6108-6109.
- [11] Hu J, Du S P, Guo H Y. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110002.
胡婕, 杜升平, 郭弘扬. 基于液晶光学相控阵的光束扫描研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110002.
- [12] Zhang Y, Yang W P, Zhao W, et al. Research advance in polymer stabilized liquid crystals [J]. Journal of Functional Polymers, 2021, 34(1): 49-65.
张洋, 杨卫平, 赵威, 等. 聚合物稳定液晶材料研究进展 [J]. 功能高分子学报, 2021, 34(1): 49-65.
- [13] Kim D Y, Lee S A, Kang D G, et al. Photoresponsive carbohydrate-based giant surfactants: automatic vertical alignment of nematic liquid crystal for the remote-controllable optical device [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(11): 6195-6204.
- [14] Clare B H, Efimenko K, Fischer D A, et al. Orientations of liquid crystals in contact with surfaces that present continuous gradients of chemical functionality [J]. Chemistry of Materials, 2006, 18(9): 2357-2363.
- [15] Halperin A, Williams D R M. Liquid crystalline brushes: an anchoring transition [J]. Europhysics Letters (EPL), 1993, 21(5): 575-580.
- [16] Williams D R M, Halperin A. Liquid crystalline polymers in nematic solvents: confinement and field effects [J]. MRS Proceedings, 1993, 328(8): 2025-2035.

- [17] Hamelinck P J, Huck W T S. Homeotropic alignment on surface-initiated liquid crystalline polymer brushes [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2005, 15(3): 381-385.
- [18] Wan X H. *In situ* controlled construction of hierarchical supramolecular chiral polymer assembly [J]. *Journal of Functional Polymers*, 2020, 33(3): 207-209.
宛新华. 原位可控构筑多层次超分子手性聚合物组装体 [J]. *功能高分子学报*, 2020, 33(3): 207-209.
- [19] Li X, Yanagimachi T, Bishop C, et al. Engineering the anchoring behavior of nematic liquid crystals on a solid surface by varying the density of liquid crystalline polymer brushes [J]. *Soft Matter*, 2018, 14(37): 7569-7577.
- [20] Stewart D, Imrie C T. Synthesis and characterization of spin-labelled and spin-probed side-chain liquid crystal polymers [J]. *Polymer*, 1996, 37(15): 3419-3425.
- [21] Dumont E L P, Belmas H, Hess H. Observing the mushroom-to-brush transition for kinesin proteins [J]. *Langmuir*, 2013, 29(49): 15142-15145.
- [22] Popelka Š, Houska M, Havlíková J, et al. Poly (ethylene oxide) brushes prepared by the “grafting to” method as a platform for the assessment of cell receptor-ligand binding [J]. *European Polymer Journal*, 2014, 58: 11-22.
- [23] Nagaya T, Hikita Y, Orihara H, et al. Experimental study of the growth of the cholesteric finger pattern [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1996, 65(8): 2707-2712.
- [24] Chaikin P M, Lubensky T C, Witten T A. *Principles of condensed matter physics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 45-74.