



硫醇含量对蓝相液晶弹性体性能的影响

郑琳, 许雪敬, 杜开阳, 高涵, 王子岳, 周璇, 朱吉亮

引用本文:

郑琳, 许雪敬, 杜开阳, 高涵, 王子岳, 周璇, 朱吉亮. 硫醇含量对蓝相液晶弹性体性能的影响[J]. 液晶与显示, 2022, 37(3): 285–291.

ZHENG Lin, XU Xue-jing, DU Kai-yang, GAO Han, WANG Zi-yue, ZHOU Xuan, ZHU Ji-liang. Thiol content effect on properties of blue phase liquid crystal elastomers[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(3): 285–291.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2022-0008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光响应蓝相液晶的研究进展

Research progress of light-responsive blue phase liquid crystal

液晶与显示. 2021, 36(4): 493–503 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0279>

蓝相液晶晶体结构与结构色

Crystal structures and structural colors of blue phase liquid crystals

液晶与显示. 2020, 35(7): 685–696 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203507.0685>

蓝相液晶材料与光子学器件研究进展

Progresses on the researches of blue phase liquid crystal materials and photonic devices

液晶与显示. 2017, 32(5): 325–338 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173205.0325>

电场频率对可双频驱动蓝相液晶温域及电光性能的影响

Influence of electric field frequency on the blue phase temperature range and electro-optical property of dual-frequency-driven blue phase liquid crystal materials

液晶与显示. 2019, 34(9): 849–856 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193409.0849>

近红外光响应液晶纳米智能材料

Near-infrared light-responsive intelligent liquid crystal nanocomposites

液晶与显示. 2020, 35(7): 631–644 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203507.0631>

文章编号:1007-2780(2022)03-0285-07

硫醇含量对蓝相液晶弹性体性能的影响

郑 琳, 许雪敬, 杜开阳, 高 涵, 王子岳, 周 璇, 朱吉亮*

(河北工业大学 理学院, 天津 300401)

摘要:蓝相液晶弹性体(BPEs)是一种集三维光子晶体结构与橡胶软弹性于一身的功能材料,在液晶光子学领域具有广泛的应用前景,但是新型 BPEs 的制备方法及其弹性性能有待进一步研究。本文在原位光聚合的基础上,引入硫醇(EDDET)和丙烯酸酯之间的点击化学反应制备了不同 EDDDET 含量的 BPE 薄膜,系统研究了 EDDDET 含量和光固化对 BP 晶格结构、热稳定性和光学特性的影响,并测量了 EDDDET 含量不同的 BPE 的弹性性能和力致变色性能。试验结果表明,EDDET 可以有效填充 BP 的缺陷结构,随着含量的增加,BP 的热稳定性提高了 5 倍。光固化过程中会诱导 BP 晶格形变,随 EDDDET 含量增加,BPE 薄膜的断裂长度可以提高 7 倍,布拉格反射峰移动量相同时,应力减小约 52 倍。通过该方法制备的 BPE 在智能仿生、传感、防伪、激光等领域具有广泛的应用前景。

关 键 词:硫醇含量;刺激响应;光聚合;蓝相;液晶弹性体

中图分类号:O753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0008

Thiol content effect on properties of blue phase liquid crystal elastomers

ZHENG Lin, XU Xue-jing, DU Kai-yang, GAO Han, WANG Zi-yue,

ZHOU Xuan, ZHU Ji-liang*

(School of Sciences, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Blue phase liquid crystal elastomer (BPE) is a functional material integrating three-dimensional photonic crystal structure and rubber soft elasticity and has a wide application prospect in the field of liquid crystal photonics. However, the novel preparation method and elastic properties of BPEs need to be further investigated. On the basis of in-situ photopolymerization, BPE films with different mercaptan (EDDET) contents were prepared by introducing the click chemical reaction between EDDDET and acrylate. The influence of EDDDET content and UV curing on the lattice structure, thermal stability and optical properties of BP were systematically studied, in addition, the elastic properties and stress color change properties of BPE prepared with different EDDDET content were measured. The experimental results show that EDDDET could effectively fill the disclination network of BP. With the increase of EDDDET content, the thermal stability of BP was increased by 5 times. The UV light curing process would induce BP lattice deformation. As the EDDDET content increased, the fracture length of

收稿日期:2022-01-06;修订日期:2022-01-27.

基金项目:河北省自然科学基金(No.F2020202015)

Supported by Natural Science Foundation of Hebei Province(No.F2020202015)

* 通信联系人, E-mail: jlzhu@hebut.edu.cn

BPE film was increased by 7 times, and the stress decreases by about 52 times with the same change of the Bragg reflection peak of BP. We believe that the BPE films prepared by this method has a wide application in the fields of intelligent bionics, sensing, anti-counterfeiting, lasing and so on.

Key words: thiol content; stimuli-responsive; photopolymerization; blue phase; liquid crystal elastomers

1 引言

液晶弹性体(LCE)是一种集液晶有序性和橡胶弹性于一身的软物质,是高分子材料研究领域备受关注的材料^[1-2]。基于诸如温度^[3-6]、光照^[7-8]、磁场^[9]、机械刺激^[10-15]等外场刺激发生液晶基元有序性改变的特性,LCE被广泛应用于传感^[15-16]、致动^[17-19]、激光^[12-14,20]、形状记忆等重要领域^[21,22]。色彩变化是人类感知外界刺激的关键信号之一,因此研发刺激变色响应的LCE至关重要。受章鱼变色的启发,Chen和Ye等人利用3D打印技术将胆甾相液晶(CLC)液滴分散在聚合物基质中,制备了宽范围变色响应性薄膜^[5],其弹性改变量可达535%,光子禁带移动量可达209 nm^[10]。但是,胆甾相液晶是一种一维光子晶体,其颜色的角度依赖性限制了它的实际应用。研发角度无依赖的三维光子晶体液晶弹性体有重要的价值。

蓝相(BPs)是由液晶分子自组装而成的双螺旋柱堆叠而成的一种特殊液晶相态,常出现在手性向列相(N*)和各向同性相(Iso)之间的一个狭窄温度区间内(约0.5~3℃)。常见的蓝相有3种结构:体心立方晶格(BP I)、简单立方晶格(BP II)和无定形结构(BP III)。BP I和BP II是三维光子晶体^[23-26],对应的布拉格反射波长覆盖紫外-可见-近红外波段。基于其特殊的结构,BP具有宏观光学各向同性和外场刺激响应变色的特性,是一类具有重要研究价值的液晶软光子学材料。

由于双螺旋柱之间存在缺陷,较差的热稳定性曾经是BPs面临的关键技术问题。为此,诸多改善BPs热稳定性的技术被提出。其中,聚合物稳定法被公认为是改善蓝相热稳定性最有前景的方法,它是用丙烯酸酯类反应性介晶单体填充缺陷,通过原位光聚合生成聚合物网络用于稳定缺陷结构^[27-28]。但是,常用的聚合物网络几乎完全冻结了BPs的晶格结构,导致BPE中的液晶分子

很难响应外场刺激,也无法承受任何机械变形,从而限制了其在液晶“软”光子学领域的应用。为此,Castles等人通过将聚合物单体适当原位光聚合的方法制备了独立式可拉伸BP凝胶^[29],最大弹性形变量约为50%,光谱可蓝移约100 nm,具备电场和力的双重响应特性。随后,Lee等人通过全聚合体系制备了高热稳定性BPEs,最大弹性形变量为74%,光谱最大可蓝移135 nm^[30]。2021年,Schlafmann等人通过一步光聚合的方法也获得了一种BPEs,最大弹性形变量约为150%,光谱可蓝移约120 nm^[31]。虽然BPEs的制备上取得了一些突破性进展,但是现阶段BPEs的最大弹性形变量仍然较小,光谱最大移动范围也有限,无法满足潜在的应用需求。综上所述,现阶段BPEs的弹性性能和光学调控性能仍然有待进一步改善。

本文采用非液晶性二硫醇单体(EDDET)、双丙烯酸酯单体(C3M)和单丙烯酸酯单体(RM105)作为反应性单体;二丙胺(DPA)为碱催化剂,促进硫醇与丙烯酸酯单体之间的点击化学反应,生成长链低聚物;使用光引发剂(IRG184)对反应后的低聚物进行光固化,制备了一种BPE膜。研究了不同EDDET含量对BP晶格结构和BPEs的性能的影响,包括应力应变关系、断裂长度、相转变温度等,并探究了BPE的力致变色特性。

2 实验与表征

2.1 材料

具有介晶性的丙烯酸酯单体,1,4-双-[4-(3-丙烯酰氧基丙氧基)苯甲酰氧基]-2-甲基苯(C3M)和4-甲氧基苯基-4'-((6-(丙烯酰氧基)己基)氧基)苯甲酸酯(RM105)购自江苏和成显示科技有限公司;非介晶性单体2,2'-(1,2-乙二基双氧代)双乙硫醇(EDDET)购自凯玛特化工科技有限公司。上述用于制备BPE膜的单体分子结构如图1所示。向列相性液晶混合物(BP006)、

手性剂(R5011)和光引发剂、1-(1-羟基)环己基-1-苯基酮(IRG184)购自江苏和成显示科技有限公司;催化剂二丙胺(DPA)购自上海阿拉丁试剂有限公司。

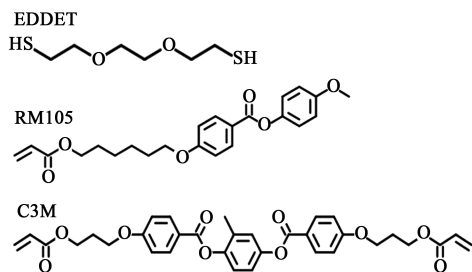


图1 各反应单体的化学结构

Fig.1 Chemical structures of reactive monomers

2.2 样品制备

本文制备了 EDDET 含量不同的 4 组样品(碳碳双键:硫氢键,1:0,1:0.4,1:0.8 和 1:1)。首先,将质量分数为 54% 的 BP006、2.4% 的 R5011、33.7% 的 C3M、9.2% 的 RM105 和 0.5% 的 IRG184 混合,在 120 °C 的磁力搅拌台上加热搅拌 30 min 后冷却至室温;其次,加入质量分数为 0.2% 的 DPA,在室温下并搅拌 10 min;然后,按比例分别向样品 A1~A4 中额外加入质量分数分别为 0%、5.0%、10.0% 以及 12.5% 的 EDDET,并在室温下搅拌 5 min,得到混合均匀的混合物,混合物中碳碳双键和硫氢键的摩尔比见表 1 所示;再次,将混合物加热至 Iso,并通过毛细作用灌入厚度为 180 μm 的平行取向液晶盒中,进而将液晶盒以 0.3 °C/min 的速率冷却至 BP;最后,使用强度为 62 mW/cm² 的紫外灯(365 nm)照射 10 min,在 80 °C 热台上打开液晶盒,获得 BPE 膜。

表 1 BPE 碳碳双键与硫氢键摩尔比

Tab.1 Molar ratio of C=C and S-H in BPE

Samples	C=C (C3M)	C=C (RM105)	S-H(EDDET)
A1	0.83	0.17	0
A2	0.83	0.17	0.4
A3	0.83	0.17	0.8
A4	0.83	0.17	1

2.3 性能评估

2.3.1 测试设备

实验使用的主要测试设备有偏光显微镜

(POM, SPL-50TF)、光纤光谱仪(USB2000)、精密温控台(Instec, ACS402)和测力计(HF-05, AIPU)。

2.3.2 测试方法

利用精密温控台控制样品温度和降温速率(0.3 °C/min),利用偏光显微镜与光纤光谱仪观测 BP 织构和降温过程中的相变行为,确定相变温度和 BP 温宽。利用紫外灯(365 nm, C11924, 强度为 62 mW/cm²)对样品进行光固化。

将 BPE 膜一端固定,另一端与测力计相连,缓慢拉伸 BPE 膜;利用直尺测量不同拉力作用下 BPE 膜的拉伸长度,并利用光纤光谱仪测量相应反射光谱的变化。根据实验数据,理论计算获得薄膜的应力应变关系:应力 $\sigma = F/S$, F 为拉力, S 为横截面积。由于拉伸过程中会产生变形, S 改变,体积 V 守恒,所以 $S = V/l$, l 为膜的长度。

3 结果与讨论

3.1 EDDET 含量对蓝相特性的影响

本文研究了 BPE 前聚体降温过程中的相转变过程(图 2)。样品 A1~A4 Iso 与 BP 之间的相转变温度($T_{\text{Iso-BP}}$)分别为 79.2, 58.9, 41.4, 34.2 °C; BP 和 N* 之间的相转变温度($T_{\text{BP-N*}}$)分别为 76.5, 51.9, 31.2, 21.1 °C。 $T_{\text{Iso-BP}}$ 和 $T_{\text{BP-N*}}$ 均随 EDDET 含量增加逐渐降低。由于 EDDET 分子量较低,常温下为液体,起到了降低 $T_{\text{Iso-BP}}$ 和 $T_{\text{BP-N*}}$ 的作用。样品 A4 中的 BP 可在室温下存在。样品 A1~A4 的 ΔT_{BP} 分别为 2.7, 6.6, 11.2, 13.1 °C。可见, ΔT_{BP} 随 EDDET 含量的增加而增

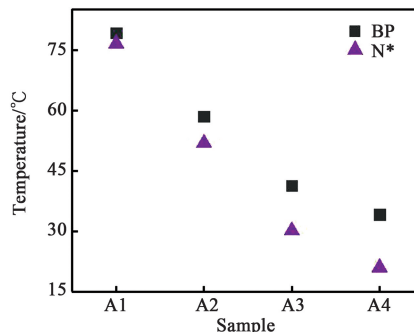


图2 EDDET 含量对 BPE 前聚体相转变温度的影响

Fig.2 EDDET contents effect on the phase transition temperature of BPE precursors

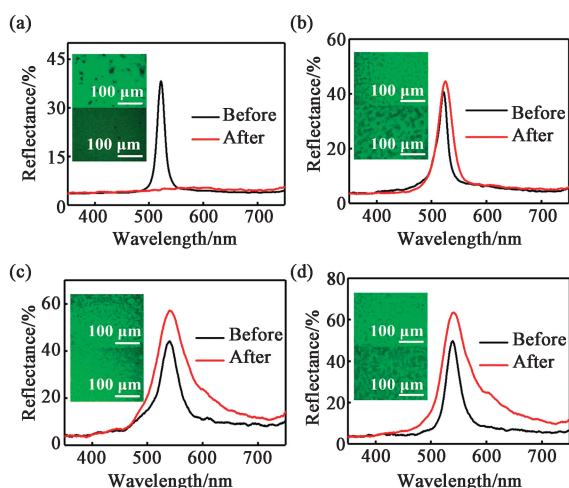


图 3 具有不同 EDDT 含量的 BPE 样品 (a) A1、(b) A2、(c) A3 和 (d) A4 在紫外固化前后的光谱及其偏光照片。

Fig.3 Spectra and POM images of BPE samples (a) A1, (b) A2, (c) A3 and (d) A4 prepared with different EDDT contents before and after UV curing.

加。这是由于 EDDT 不具有液晶性,会填充在 BP 晶格的缺陷中,起到了稳定缺陷的作用。样品 A4 的 ΔT_{BP} 约为样品 A1 的 5 倍。

图 3 给出了光固化前后 4 个样品的偏光照片及其对应的反射光谱。虽然在 R5011 的作用下,液晶分子可以自组装成 BP 的立方体结构,但是样品 A1 中没有非液晶性单体来填充 BP 的缺陷结构,其 BP 的热稳定性很差,并且在紫外光的照射下,丙烯酸酯之间的原位聚合反应并不能保留 BP 的结构,因此固化后的 BP 的特征反射峰消失。样品 A2~A4 中含有 EDDT,它可以填充 BP 的缺陷结构,固化后也可以观察到 BP 织构及其对应的 BP 特征峰。样品固化后的布拉格反射率随 EDDT 含量增加而升高。但是,过量的 EDDT 会对晶格形状产生影响,使得固化后散射增强,布拉格反射峰变宽。

3.2 EDDT 含量对 BPE 弹性的影响

从液晶盒中取出的薄膜样品 A1~A4,分别裁剪成相同的尺寸 ($5\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 180\text{ }\mu\text{m}$),如图 4 所示。由于 EDDT 不具有手性,其含量的增加会降低混合物中手性剂 R5011 的相对含量,增大蓝相的晶格常数,导致其布拉格反射波长红移。

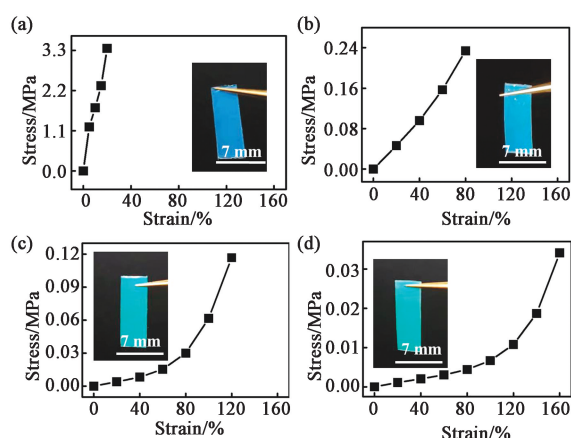


图 4 具有不同 EDDT 含量的 BPE 样品 (a) A1、(b) A2、(c) A3 和 (d) A4 的照片及其应力应变关系曲线。

Fig.4 Photographs and stress-strain curves of BPE samples (a) A1, (b) A2, (c) A3 and (d) A4 prepared with different EDDT contents.

对裁切后的样品进行拉伸测试,图 4 为不同样品的应力应变曲线。样品 A1~A4 的断裂长度分别为原长的 20%,80%、120%和 160%。显然,BPE 膜的断裂长度随硫醇含量的增加而变长,样品 A4 的断裂长度约为样品 A1 的 8 倍。我们还评估了拉伸长度为原长的 20%时,样品 A1~A4 的应力,分别为 1.210,0.047,0.004,0.001 MPa。上述实验结果说明 EDDT 的添加有效增加了 BPE 的软弹性和断裂长度。拉伸相同长度时,BPE 所需的应力减少了约 1 210 倍,断裂时样品 A1 所需的应力为样品 A4 的 99 倍。

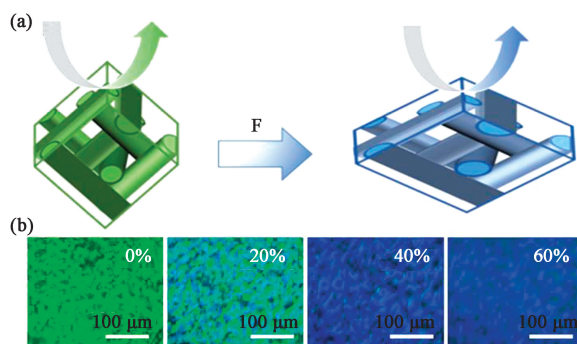


图 5 (a) 拉伸变色原理示意图和 (b) 样品 A4 拉伸过程中的 BP 织构图

Fig.5 (a) Schematic diagram of stretching discoloration principle and (b) platelet texture change during stretching (Sample A4)

3.3 EDDT 含量对拉伸变色性能的影响

BP 作为一种三维光子晶体,具有与可见光频率相对应的光子带隙,可以选择性地反射相应波长的光。横向拉伸 BPE 薄膜会纵向挤压 BP 的晶格,体积守恒的情况下,垂直于拉伸方向的光子晶体晶格周期性减小,致使 BP 的布拉格反射峰(λ_B)蓝移,如图 5 所示。

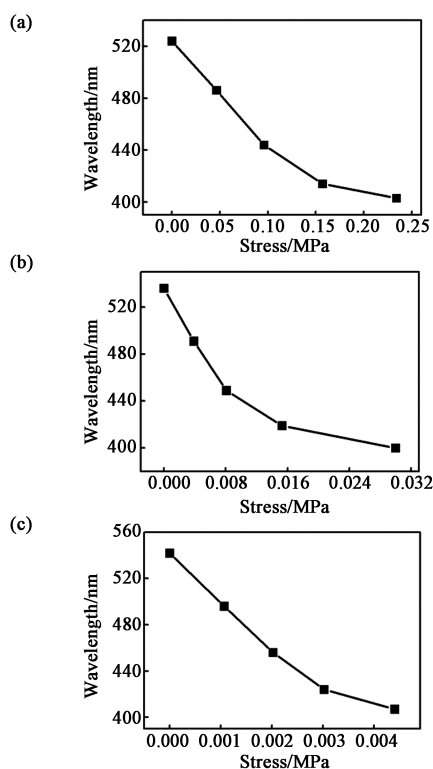


图6 具有不同 EDDT 含量的 BPE 样品(a) A2、(b) A3、和(c) A4 的应力与 λ_B 关系曲线。

Fig.6 Relationship between tension and λ_B of BPE samples (a) A2, (b) A3 and (c) A4 prepared with different EDDT contents.

样品 A2~A4 的厚度为 180 μm 、宽为 5 mm、长为 10 mm。图 6 显示 BPE 的 λ_B 随拉力连续蓝移,样品 A2~A4 的 λ_B 的最大蓝移量分别为 125,136,141 nm。 λ_B 的最大蓝移量随 EDDT 含量增加略有增大,增大幅度较小。当 λ_B 的蓝移量最大时,样品 A2~A4 所承受的拉力分别为 1.171,0.150,0.022 N,所需的拉力随 EDDT 含量的增加而降低。 λ_B 蓝移量相同时,A2 所需的应力约为样品 A4 的 53 倍。以上拉伸变色过程是完全可逆的,在机械弛豫和颜色恢复时没有观察到明显的滞后。当薄膜松弛时,样品 A2~A4 均可恢复至其原始形状。随 EDDT 含量的增加,虽然 BPE 对力响应的灵敏度会提高,但是其最大可测量和机械强度会降低。

4 结 论

本文系统探讨了 EDDT 含量对 BPE 前聚体相转变过程的影响,并详细评估了 EDDT 含量与 BPE 弹性性能和力致变色性能的关系。结果表明,EDDT 对 BP 中的缺陷结构有支撑作用,随着体系中 EDDT 含量增加,BP 的温度范围拓宽了 5 倍,BPE 的弹性性能显著提高。与没有 EDDT 的薄膜相比,丙烯酸单体中的碳碳双键与 EDDT 中硫氢键的摩尔比为 1 时,BPE 薄膜的断裂长度增加了 7 倍,相同 λ_B 移动量所需的应力减少了约 52 倍。本文在 BP 结构分析、BPE 的制备、弹性性能和力致变色特性的改善方面具有一定的指导意义。我们展望通过该方法制备的 BPE 在智能仿生、传感、防伪、激光等领域具有广泛的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] SAED M O, TORBATI A H, NAIR D P, *et al.* Synthesis of programmable main-chain liquid-crystalline elastomers using a two-stage thiol-acrylate reaction [J]. *Journal of Visualized Experiments*, 2016(107): e53546.
- [2] ULA S W, TRAUGUTT N A, VOLPE R H, *et al.* Liquid crystal elastomers: an introduction and review of emerging technologies [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2018, 6(1): 78-107.
- [3] ZHANG W X, LUB J, SCHENNING A P H J, *et al.* Polymer stabilized cholesteric liquid crystal siloxane for temperature-responsive photonic coatings [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(5): 1803.
- [4] BRANNUM M T, STEELE A M, VENETOS M C, *et al.* Light control with liquid crystalline elastomers [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(6): 1801683.
- [5] YANG C J, WU B H, RUAN J, *et al.* 3D-printed biomimetic systems with synergetic color and shape responses based on oblate cholesteric liquid crystal droplets [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(10): 2006361.

- [6] 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)
- [7] BISOYI H K, LI Q. Light-driven liquid crystalline materials: from photo-induced phase transitions and property modulations to applications [J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(24): 15089-15166.
- [8] 胡文婷, 左波, 聂振洲, 等. 光驱动液晶弹性体扭曲环带软致动器的有限元分析[J]. 应用化学, 2021, 38(10): 1397-1404.
HU W T, ZUO B, NIE Z Z, *et al.* Finite element analysis of light-driven liquid crystal elastomer twisted toroidal ribbon soft actuators [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1397-1404. (in Chinese)
- [9] 张帅, 杨洋, 吉岩, 等. 磁响应液晶弹性体材料研究进展[J]. 应用化学, 2021, 38(10): 1299-1309.
ZHANG S, YANG Y, JI Y, *et al.* Research process on magneto-responsive liquid crystalline elastomers [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1299-1309. (in Chinese)
- [10] YANG C J, WU B H, RUAN J, *et al.* Mechanochromic responses of cholesteric liquid crystal droplets with nanoscale periodic helical structures showing reversible and tunable structural color [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(1): 463-468.
- [11] CICUTA P, TAJBAKHSI A R, TERENTJEV E M. Photonic gaps in cholesteric elastomers under deformation [J]. *Physical Review E*, 2004, 70(1): 011703.
- [12] HIROTA Y, JI Y, SERRA F, *et al.* Effect of crosslinking on the photonic bandgap in deformable cholesteric elastomers [J]. *Optics Express*, 2008, 16(8): 5320-5331.
- [13] SERRA F, MATRANGA M A, JI Y, *et al.* Single-mode laser tuning from cholesteric elastomers using a “notch” band-gap configuration [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 575-581.
- [14] VARANYTSIA A, NAGAI H, URAYAMA K, *et al.* Tunable lasing in cholesteric liquid crystal elastomers with accurate measurements of strain [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 17739.
- [15] GARCIA-AMORÓS J, VELASCO D. Structural features guiding the design of liquid-crystalline elastomeric fluorescent force sensors [J]. *Applied System Innovation*, 2020, 3(2): 22.
- [16] OHM C, BREHMER M, ZENTEL R. Liquid crystalline elastomers as actuators and sensors [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(31): 3366-3387.
- [17] PEI Z Q, YANG Y, CHEN Q M, *et al.* Mouldable liquid-crystalline elastomer actuators with exchangeable covalent bonds [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(1): 36-41.
- [18] WANG C J, SIM K, CHEN J, *et al.* Soft ultrathin electronics innervated adaptive fully soft robots [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(13): 1706695.
- [19] HE Q G, WANG Z J, WANG Y, *et al.* Electrically controlled liquid crystal elastomer - based soft tubular actuator with multimodal actuation [J]. *Science Advances*, 2019, 5(10): eaax5746.
- [20] SCHMIDTKE J, KNIESEL S, FINKELMANN H. Probing the photonic properties of a cholesteric elastomer under biaxial stress [J]. *Macromolecules*, 2005, 38(4): 1357-1363.
- [21] WANG Z J, TIAN H M, HE Q G, *et al.* Reprogrammable, reprocessable, and self-healable liquid crystal elastomer with exchangeable disulfide Bonds [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(38): 33119-33128.
- [22] ROUSSEAU I A, MATHER P T. Shape memory effect exhibited by smectic-C liquid crystalline elastomers [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, 125(50): 15300-15301.
- [23] HU W, WANG L, WANG M, *et al.* Ultrastable liquid crystalline blue phase from molecular synergistic self-assembly [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1440.
- [24] LIU J, LIU W Z, GUAN B, *et al.* Diffusionless transformation of soft cubic superstructure from amorphous to simple cubic and body-centered cubic phases [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3477.
- [25] YANG J J, ZHAO W D, HE W L, *et al.* Liquid crystalline blue phase materials with three-dimensional nanostructures [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(43): 13352-13366.
- [26] 李辰悦, 王萌, 张翠红, 等. 电场频率对可双频驱动蓝相液晶温域及电光性能的影响[J]. 液晶与显示, 2019, 34(9): 849-856.

- LI C Y, WANG M, ZHANG C H, *et al.* Influence of electric field frequency on the blue phase temperature range and electro-optical property of dual-frequency-driven blue phase liquid crystal materials [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(9): 849-856. (in Chinese)
- [27] XU X W, LIU Y J, LUO D. Flexible blue phase liquid crystal film with high stability based on polymerized liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(3): 399-403.
- [28] LEE M J, CHANG C H, WEI L. Label-free protein sensing by employing blue phase liquid crystal [J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(3): 1712-1720.
- [29] CASTLES F, MORRIS S M, HUNG J M C, *et al.* Stretchable liquid-crystal blue-phase gels [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(8): 817-821.
- [30] ZHANG Y S, JIANG S A, LIN J D, *et al.* Stretchable freestanding films of 3D nanocrystalline blue phase elastomer and their tunable applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(1): 2001472.
- [31] SCHLAFMANN K R, WHITE T J. Retention and deformation of the blue phases in liquid crystalline elastomers [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4916.

作者简介:



郑琳(1995—),女,河北沧州人,硕士研究生,2018年于河北工业大学获得学士学位,主要从事液晶光子学器件方面的研究。E-mail: 2855907117@qq.com



朱吉亮(1982—),男,山东济南人,博士,副教授,2014年于上海交通大学获得博士学位,主要从事液晶光子学器件研究。E-mail: jlzhu@hebut.edu.cn