

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-09

具有宽范围热致变色的胆甾相液晶薄膜

赵嵩岚, 李傲天, 朱吉亮, 周璇*
(河北工业大学理学院, 天津 300401)

摘要:胆甾相液晶弹性体因其独特的螺旋结构和可调光学响应,在智能变色材料领域受到广泛关注。然而,受限于聚合物网络的约束,胆甾相液晶弹性体通常具有较窄的热致变色范围或需要较高温度才能实现显著变色。本文通过引入不同含量的链延伸剂EDDET,制备了一系列具有不同交联密度的胆甾相液晶薄膜(CLCFs),并且研究了交联密度对其热致变色和机械致变色性能的影响。实验结果表明,随着EDDET含量增加,交联密度降低,热致变色范围显著扩大。在20~100 °C范围内,反射波长最大红移可达259 nm;同时,材料的热响应灵敏度明显提升,在60~80 °C区间内最大局部热灵敏度达到8.2 nm °C⁻¹。力学测试显示,降低交联密度可有效提高断裂伸长率和相应的波长蓝移范围。结合预拉伸处理后,CLCF的热致波长移动范围可达340 nm,平均热敏感度达到4.31 nm °C⁻¹。这种具有宽热致变色范围和高灵敏度的CLCF在智能传感、信息加密及可穿戴光学器件等领域具有潜在应用价值。

关键词:胆甾相液晶;聚合物;热致变色;光学传感

中图分类号:O753⁺.2 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2026-0049 CSTR:32172.14.CJLCD.2026-0049

Cholesteric liquid crystal films with wide-range thermochromism

ZHAO Songlan, LI Aotian, ZHU Jiliang, ZHOU Xuan*

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

Abstract: Cholesteric liquid crystal elastomers (CLCEs) have attracted considerable attention in smart color-changing materials due to their unique helical structures and tunable optical responses. However, the thermal color-change range of CLCEs is often limited by the constraints of the polymer network, resulting in a relatively narrow color-change range or requiring elevated temperatures to achieve significant optical variation. In this work, a series of cholesteric liquid crystal films (CLCFs) with varying crosslinking densities were prepared by introducing different amounts of the chain extender EDDET. The influence of crosslinking density on both thermochromic and mechanochromic behaviors was systematically investigated. Increasing the EDDET content effectively reduces the crosslinking density, leading to a significantly broadened thermochromic range. Within 20~100 °C, a maximum red shift of 259 nm in the reflection wavelength was observed. Meanwhile, the thermal sensitivity was markedly enhanced, reaching a local maximum of 8.2 nm °C⁻¹ in the 60~80 °C range. Mechanical tests reveal that lower crosslinking density improves the elongation at break and enlarges the strain-induced blue-shift range. After pre-stretching treatment, the thermally induced wavelength shift of the CLCF can be extended to 340 nm,

收稿日期:2026-03-20;修订日期:2026-04-06.

基金项目:河北省自然科学基金(No.A2023202010;No.F202202017)

Supported by National Natural Science Foundation of Hebei Province (No.A2023202010;No.F202202017)

*通信联系人, E-mail:XXX

with an average thermal sensitivity of $4.31 \text{ nm } ^\circ\text{C}^{-1}$. These CLCFs, featuring a wide thermochromic range and high sensitivity, are promising candidates for smart sensing, information encryption, and wearable optical devices.

Key words: cholesteric liquid crystal; polymer; thermochromism; optical sensing

1 引言

结构色源于材料内部的微纳结构对光产生的干涉、衍射,反射等光学作用,具有更高的饱和度和稳定性^[1]。一些生物能够调控皮肤内的微纳结构实现颜色变化。例如变色龙和章鱼等可以在外界环境改变时,通过肌肉改变皮肤细胞的排列,从而改变光的传播路径,以实现动态变色,伪装以及信息传递的作用^[2-4]。受这种自然现象启发,研究人员开发出多种具有结构色的新型功能材料,并且可以调控内部的微观结构实现可调谐的光学响应^[5]。例如水凝胶能够通过湿度变化引起体积膨胀或收缩,进而改变内部周期结构,调节反射波长^[6-7]。在众多结构色材料中,胆甾相液晶弹性体(CLCE)因其独特的自组装螺旋分子结构和优异软弹性受到广泛关注^[8-9]。这种特殊的螺旋结构赋予了胆甾相液晶选择性反射的特性。同时,胆甾相液晶(CLC)对多种外界刺激具有响应特性^[10],例如光照^[11],温度^[12-15],湿度^[16]或电场^[17]等。这些刺激会引起螺旋节距变化,进而引起反射波长的可逆调控。而内部的交联网络稳定了CLC的结构,使其保持响应性的同时具有良好的机械稳定性^[18-19]。因此,胆甾相液晶弹性体在智能传感^[8],可穿戴器件^[20],新型加密^[9]等领域具有广泛应用。

胆甾相液晶弹性体的热致变色特性已经得到广泛研究。在加热过程中,温度诱导液晶序参量降低,导致沿液晶指向矢方向发生收缩,并且通过沿螺旋轴方向的热膨胀来抵消这种变化,从而带动螺距伸长,进而引起反射波长的红移^[9, 13]。Timothy J. White等人^[15]将二聚化氧苯甲酸(OBA)衍生物引入到CLCE中,通过预拉伸实现了升温后可见光范围内约270 nm的波长红移。Kyle R. Schlafmann等人^[14]通过调控交联密度和液晶组成,制备出可逆热致变色响应的CLCE,在20~150 °C范围内实现了从约500 nm~760 nm的波长转变。Chung-Yu Kuo等人^[21]制备了具有

倾斜排列的混合液晶薄膜驱动器。该驱动器通过将胆甾相液晶与垂直排列的向列液晶层集成,表现出形状变形和热致变色能力(30 nm)。然而,由于聚合物网络对胆甾相液晶分子的锚定作用,CLCE体系的螺距调节受到一定限制,从而抑制了其热致变色范围^[22]。此外,实现显著的变色通常需要较高温度^[23-24]。因此,在较低温度下实现大范围的热致变色响应仍然是CLCE研究中的重要挑战。

在本研究中,我们报道了一种在较低温度依然具有宽热致变色范围的胆甾相液晶薄膜(CLCF)。首先,通过控制预聚物中EDDET的含量,制备了一系列具有不同交联密度的CLCF,并探究了不同的交联密度对CLCF弹性性能和热致变色性能的影响。在经过拉伸后,所得的CLCF表现出不同的最大拉伸范围。同时在升温后,CLCFs表现出差异化的波长变化范围。结合了预拉伸和热致变色,CLCF最高可以在20~100 °C内实现340 nm波长移动范围,平均热响应灵敏度为 $4.31 \text{ nm } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。本研究为高灵敏热致变色响应的结构色液晶材料提供了新的思路,在智能传感,高级信息加密等领域具有重要应用。

2 实验

2.1 实验材料

用于制备CLCFs的实验材料的化学结构式如图1所示,包括向列相主体液晶E7、用于诱导胆甾相结构形成的高扭曲值(HTP)手性剂R5011、用于形成内部交联网络的双官能团丙烯酸酯类单体RM257,用于在紫外线下激发交联反应的光引发剂Irgacure 184。上述材料均购置于江苏和诚显示技术有限公司。非介晶性单体EDDET,作为链延伸剂,和催化剂二正丙胺(DPA)购自凯马特化工科技有限公司。所有材料均直接使用,未经进一步纯化。

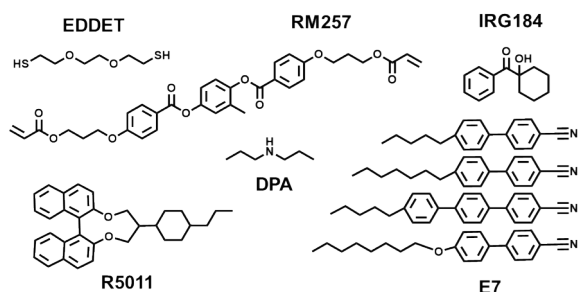


图1 材料的化学结构式

Fig. 1 Chemical structural formula of materials

2.2 样品制备

CLCFs的制备主要包括预聚物配制和光聚合固化两个阶段。首先进行预聚物的配制:将向列相液晶RM257、手性掺杂剂R5011、小分子液晶E7以及光引发剂Irgacure 184按顺序加入棕色试剂瓶中。棕色瓶可以有效阻隔外界光,避免光引发剂在制备过程中提前引发光聚合反应。将试剂瓶加热至135℃,当所有原料完全溶解后,降低温度到120℃并保持恒温。随后将试剂瓶置于磁力搅拌台上,在1200 rpm转速下搅拌20 min,确保各组分充分混合均匀。搅拌结束后,将试剂瓶从热台上取下,自然冷却至室温。之后,在冷却后的混合物中依次加入不同比例的链延伸剂EDDET和催化剂DPA。其中,DPA需要提前使用小分子液晶E7按照1:50的比例稀释。加入上述组分后,将混合物在室温下以800 rpm转速继续搅拌5 min,最终得到均匀的CLCF预聚物。各材料的质量分数比例如表1所示。

表1 不同质量配比的材料

Tab. 1 CLCF materials with different mass ratios

| Sample | E7 | R5011 | RM257 | DPA | Irg184 | EDDET |
|-------------------|------|-------|-------|-----|--------|-------|
| E _{8.6} | 33.2 | 2.9 | 54.7 | 0.2 | 0.4 | 8.6 |
| E _{11.0} | 32.4 | 2.8 | 53.2 | 0.2 | 0.4 | 11.0 |
| E _{13.4} | 31.5 | 2.7 | 51.8 | 0.2 | 0.4 | 13.4 |
| E _{15.8} | 30.6 | 2.7 | 50.4 | 0.2 | 0.3 | 15.8 |
| E _{17.6} | 30.0 | 2.6 | 49.3 | 0.2 | 0.3 | 17.6 |

将配制好的预聚物置入由两片玻璃基板组成的液晶盒中,液晶盒厚50 μm。随后对样品施加剪切力进行取向处理,使胆甾相液晶形成平面态织构。将取向完成的样品置于365 nm紫外光下(光强为45 mW cm⁻²)曝光20 min,使预聚物中的

聚合物网络充分交联固化。固化完成后,将液晶盒加热至80℃,此时CLCF薄膜可从玻璃基板上完整剥离,用于后续的结构表征与性能测试。

2.3 性能评估

CLCF热致变色测试:测试了样品在不同温度下的布拉格反射中心波长。将CLCF裁剪为直径1 cm的圆形样品,置于精密恒温工作台上进行加热测试。为确保样品在升温过程中自由膨胀,样品与基板之间填充硅油以确保其在升温过程中自由膨胀/收缩。样品的反射光谱通过光纤耦合的光谱仪实时采集,光谱仪的光源光谱采用高反射率镜面(反射率≥95%)进行反射测量并记录,作为后续光谱归一化的基准。所有采集的光谱数据均经归一化处理后进行分析,反射中心波长通过光谱仪配套软件(Ocean Optics,内置“寻峰”功能)自动计算获得。

CLCF机械变色测试:将CLCF切成10 mm×5 mm的条状,后通过紫外胶将其两端固定于两片玻璃上,通过测力计测量拉伸过程中的拉力变化,并用光纤光谱仪记录样品的反射光谱。

3 结果与讨论

3.1 交联密度对CLCF热致变色性能的影响

高交联密度使聚合物网络约束过强,反射波长调节范围窄且所需温度区间大,导致灵敏度较低,预计降低CLCF中的交联密度使聚合物网络约束减弱,CLCF在热刺激下可发生更大尺度的热膨胀,从而显著扩大螺距调节范围。为评估交联密度对热刺激反应和光学性质的影响,我们在制备CLCF的过程中,选择加入不同质量分数的EDDET含量,制备了五组样品,E_{8.6}、E_{11.0}、E_{13.4}、E_{15.8}和E_{17.6},其中EDDET的质量分数分别为8.6、11.0、13.4、15.8、17.6%。体系中丙烯酸酯与硫醇的质量比换算为官能团摩尔比,分别为1:0.5、1:0.65、1:0.85、1:1和1:1.15。在紫外光曝光后,双官能团液晶单体RM257通过其介晶基元嵌入主链,形成具有刚性特征的网络结构。同时,EDDET作为双巯基链延伸剂,通过迈克尔加成反应与丙烯酸酯反应后接入网络,使CLCF内部形成包含不同柔性链段的交联网络^[25]。交联网络的存在抑制了分子的流动性和液晶组分的泄露,但同时降低了材料对温度变化的敏感性,

而其中交联密度起到了关键作用。通过调节 EDDET 的含量,可以改变柔性链段的比例,从而实现整体交联密度的调控。为清晰比较各样品的热响应性能,我们将热灵敏度定义为单位温度变化引起的反射波长变化量,单位为 $\text{nm}\cdot\text{C}^{-1}$ 。

将所得 CLCF 在 $20\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内逐步升温,记录其反射光谱随温度的变化情况(图 2),并据此获得各样品的波长偏移范围及对应的热灵敏度。如图 3 所示,随着 EDDET 含量的增加,CLCF 在整个升温过程中的热致变色范围整体呈增大趋势。低含量样品 $E_{8.6}$ 在整个升温过程

中仅表现出 35 nm 的波长红移范围,平均热灵敏度仅为 $0.49\text{ nm}\cdot\text{C}^{-1}$ 。而含有较高 EDDET 含量的 $E_{11.0}$,在 $20\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内中心波长向红色区域移动了 57 nm ,平均热灵敏度略有升高,为 $0.71\text{ nm}\cdot\text{C}^{-1}$ 。当 EDDET 含量进一步提高至 13.4% 和 15.8% 时,样品的热响应显著增强,波长红移范围分别达到了 173 nm 和 259 nm ,平均热灵敏度显著提高,分别达到 2.16 和 $3.24\text{ nm}\cdot\text{C}^{-1}$ 。这是由于交联密度降低,网络在热膨胀时具有更高的自由度,使螺距可以在更大的范围内伸长,带来更宽的波长调制范围。

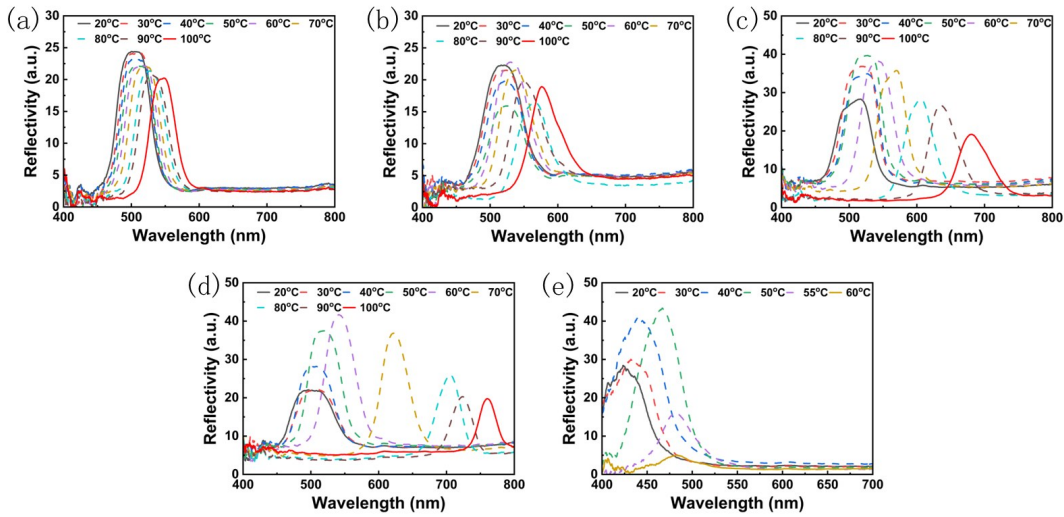


图 2 EDDET 质量分数为 8.6% (a), 11.0% (b), 13.4% (c), 15.8% (d), 17.6% (e) 样品随温度变化的光谱。

Fig. 2 Spectra of samples as a function of temperature, with EDDET mass fractions of 8.6% (a), 11.0% (b), 13.4% (c), 15.8% (d), and 17.6% (e).

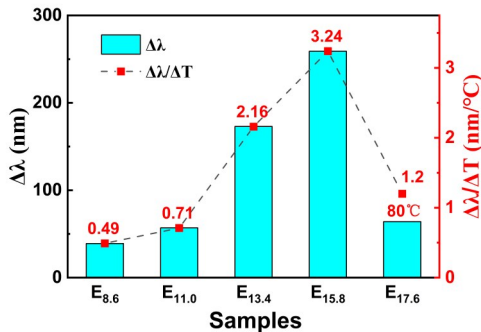


图 3 不同样品的波长偏移量和热灵敏度

Fig. 3 Wavelength shift and thermal sensitivity of different samples

然而,当 EDDET 含量进一步增加至 17.6% 时,样品表现出不同的变化趋势。尽管波长仍

持续红移,反射强度却迅速衰减,几乎消失。这表明过低的交联密度导致网络对液晶分子的约束不足,在高温下材料发生向各向同性相的转变。

为减少初始波长对热致变色范围的影响,计算得到了每个 CLCF 的温度诱导的波长变化率,如图 4 所示。各温区内波长变化率曲线的斜率可用于表征材料的热灵敏度。由于 CLCF 热致变色过程呈非线性,不同温区灵敏度存在差异。结果表明, $E_{15.8}$ 在 $60\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内表现出最大局部热灵敏度,达到 $8.2\text{ nm}\cdot\text{C}^{-1}$,进一步证明适度降低交联密度有利于提升材料的热响应性能,而过低的交联密度会降低热致变色的范围。此外,各样品的反射强度随温度的变化趋势也存在差异。

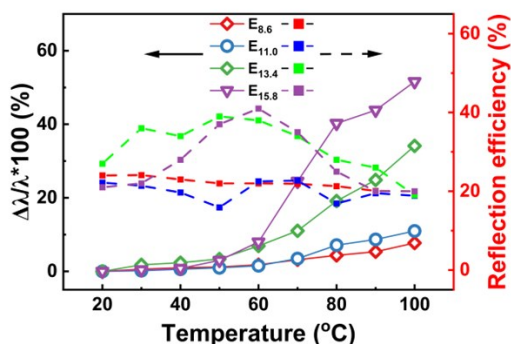


图4 热诱导反射波长的相对变化和反射强度变化

Fig. 4 Thermally induced relative wavelength shift and intensity variation

由于交联网络对液晶分子具有较强的锚定作用,低EDDET含量样品 $E_{8.6}$ 和 $E_{11.0}$ 随温度的升高,反射强度略有降低。高EDDET含量样品 $E_{13.4}$ 和 $E_{15.8}$ 的反射强度随温度升高呈现出先增强后下降的趋势。这可能由于温度升高增强了液晶分子的运动能力,有助于局部缺陷的消除,使胆甾相螺旋结构更加规整,表现为反射峰强度增强。随着温度进一步升高,温度升高导致分子取向无序化增强,反射强度逐渐下降。特别是在低交联密度样品中,高温下液晶结构稳定性下降,螺旋结构逐渐破坏。

3.2 交联密度对CLCF机械变色性能的影响

所制备的CLCF体系具有可调交联密度,从而表现出显著差异的力学性能。采用测力计对样品进行单轴拉伸测试,并记录应力-应变关系。在拉伸过程中,样品的应变定义为:

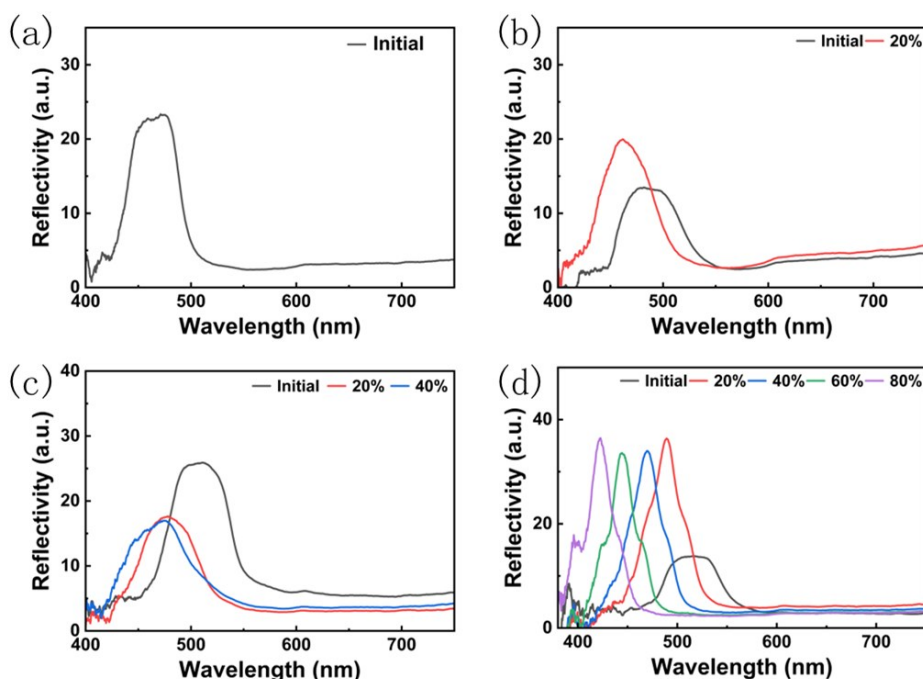
$$\varepsilon = (l/l_0 - 1) \times 100\%, \quad (1)$$

其中, l 为拉伸过程中的实时长度, l_0 为初始长度。应力定义为:

$$\sigma = F/S, \quad (2)$$

其中 F 是施加力的大小, S 是与拉力正交的横截面积。而 $E_{17.6}$ 粘性过高,不适用于进行拉力测试。

不同样品的拉伸波长变化如图5所示,具有最低EDDET含量的 $E_{8.6}$ 在受到拉伸时很快断裂,拉伸率低于20%。而随着EDDET含量的增加,样品具有更高的拉伸率。 $E_{11.0}$ 可以拉伸超过20%,同时中心波长发生蓝移,达到466 nm,反射率出现升高。 $E_{13.4}$ 可以拉伸超过40%,中心波长移动46 nm,反射率降低。 $E_{15.8}$ 表现出最大的拉伸长度和波长蓝移范围。在拉伸至初始长度的180%时,其中心反射波长由516 nm连续蓝移至421 nm。

图5 不同样品的在拉伸时光谱变化(a) $E_{8.6}$, (b) $E_{11.0}$, (c) $E_{13.4}$, (d) $E_{15.8}$ Fig. 5 Spectral changes of different samples under tension (a) $E_{8.6}$, (b) $E_{11.0}$, (c) $E_{13.4}$, (d) $E_{15.8}$.

不同样品的应力-应变曲线(图6(a))表明,其拉伸强度位于170~490 kPa之间,断裂伸长率为13%~94%。随着EDDET含量的增加,体系交联密度降低,材料的拉伸强度逐渐下降,而断裂伸长率相应提高。其中, $E_{8.6}$ 表现出最高的拉伸强度,但断裂伸长率仅为13%,限制了其通过机械拉

伸实现波长调控的能力。相比之下,随着EDDET含量进一步增加, $E_{11.0}$ 、 $E_{13.4}$ 和 $E_{15.8}$ 均表现出明显的反射波长蓝移,且波长变化范围逐步增大。如图6(b)所示,以 $E_{15.8}$ 为例,当应变由初始状态增加至80%时,薄膜颜色由绿色逐渐转变为蓝色,其中心反射波长由516 nm连续蓝移至421 nm。

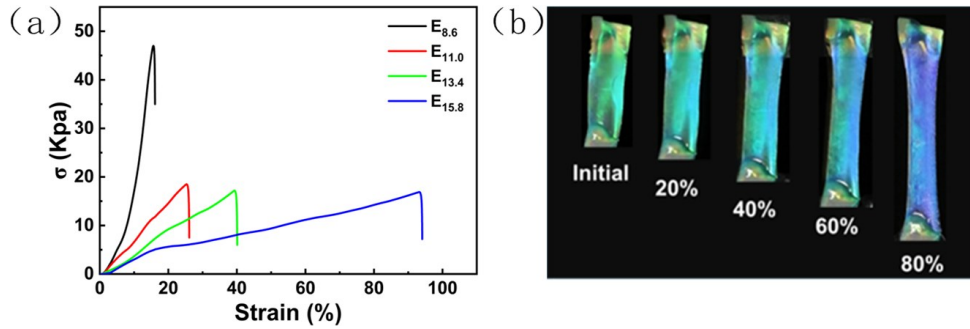


图6 (a)样品在拉伸时的应力-应变曲线;(b)不同拉伸率下 $E_{15.8}$ 的照片。

Fig. 6 (a) The stress-strain curve of the sample under tension; (b) Photos of $E_{15.8}$ at different stretching rates.

为消除不同样品初始波长差异的影响,对反射波长变化进行了归一化处理(图7)。结果表明,中心波长主要取决于应变大小,而与样品的断裂伸长极限无关。其原因在于拉伸过程中,材料沿拉伸方向发生延伸,同时横向尺寸及厚度减小;厚度方向的压缩导致液晶螺距减小,从而引起反射波长的蓝移。因此,该光学响应本质上由应变主导。

对于含EDDET质量分数为15.8%的CLCF,在机械拉伸过程中同样观察到显著蓝移。经拉伸后,由于聚合物链段运动受到限制,拉伸后的构型无法在室温下通过分子热运动自发恢复,使体系处于受限弹性储能状态。因此,无需外

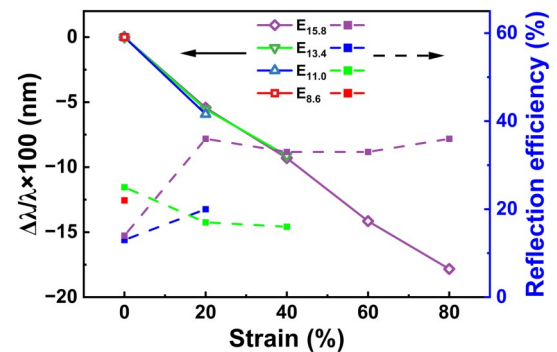


图7 机械拉伸下反射波长的相对变化和反射率变化

Fig. 7 Changes of relative reflection wavelength and reflectivity under mechanical stretching

力维持,其形状和颜色即可保持稳定。如图8(a)

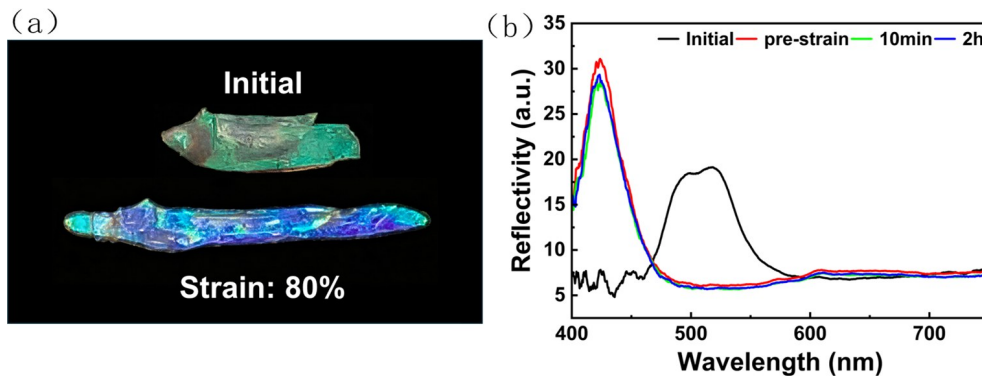


图8 (a)CLCF在拉伸前和拉伸后的照片;(b)相应的光谱变化。

Fig. 8 (a) Photos of CLCF before and after stretching; (b) Corresponding spectral changes.

所示,初始未拉伸状态下样品呈现绿色。在经过外力拉伸后,螺距压缩带来的波长蓝移,反射颜色转变为蓝色,并且在室温下放置2小时后仍能保持拉伸后的状态,未出现反射波长的恢复(图8(b))。这表明拉伸后的状态在室温下具有良好的稳定性。

3.3 具有宽热致变色范围的 CLCF

CLCF的波长可以同时响应外力和温度的影响,且两种作用对应的调制方向相反:机械拉伸引起波长蓝移,而升温则诱导波长红移。通过将CLCF进行预拉伸处理,可以获得“宽范围+高灵敏度”的热致变色效果。预拉伸的样品在拉伸过程中,材料沿拉伸方向延展,而厚度方向受到压缩,从而导致螺距减小,波长出现蓝移。同时体系处于受限弹性储能状态,颜色得以保持。在升温过程中,热响应表现为两个阶段。在低温区时处于应力释放阶段,随着温度升高,网络链段活动性增强,预存的内应力释放,驱动材料发生沿与拉伸方向相反的方向收缩和厚度方向膨胀,从而使波长逐渐红移至初始状态。随着温度的进一步升高,此时处于热膨胀主导阶段。随着温度升高,热膨胀增强,驱动螺距持续增大,产生进一步红移。因此,可以通过“应力释放+热膨胀”的协同作用显著拓展了波长调控范围。以E_{15.8}为例制备了CLCF,其具备较大的断裂拉伸长度及显著的机械变色,同时在相对低温下具有更优异的热致变色性能。因此,基于机械预拉伸与热响应的协同作用,可进一步拓展其光学调制范围(图9)。

具体而言,样品在初始状态呈绿色,经预拉伸后转变为蓝色并在室温下保持稳定。当升温至约30℃时,样品恢复初始颜色。随着温度进

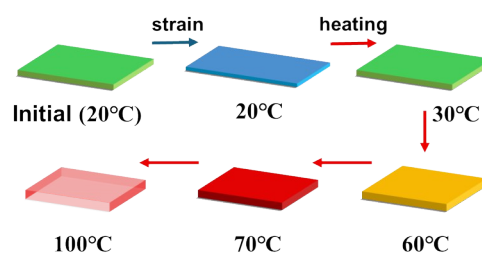


图9 预拉伸的CLCF热致变色示意图

Fig. 9 Thermo-chromic schematic diagram of pre-stretched CLCF

一步升高,反射颜色逐渐由绿转红,并最终延伸至近红外区域。整个升温过程中的光谱如图10所示,初始中心波长为421 nm,升温后波长逐渐红移,升温至100℃后,中心波长达到766 nm。在80℃的温度调控范围内,CLCF的波长偏移量为345 nm,相对变化率约为82%,平均热响应灵敏度为4.31 nm·℃⁻¹。相比于已有报道(通常<300 nm,~2~3 nm·℃⁻¹),本工作在调制范围和平均灵敏度上均实现提升(表2)。

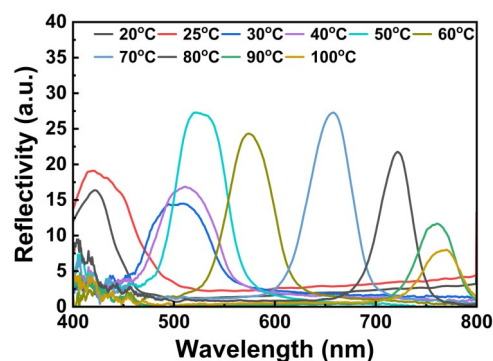


图10 预拉伸的CLCF升温后的光谱变化

Fig. 10 Spectral changes of pre-stretched CLCF after heating

表2 CLCF热致变色性能对比

Tab. 2 Comparison of thermochromic properties of CLCF

| 参考文献 | 中心波长范围(λ) | 温度范围(°C) | Δλ(nm) | Δλ/λ | 灵敏度 (nm/°C) |
|------|-----------|----------|--------|------|-------------|
| [9] | 500~680 | 20~150 | 180 | 0.36 | 1.44 |
| [13] | 470~650 | 25~200 | 180 | 0.38 | 1.03 |
| [14] | 510~760 | 25~150 | 250 | 0.49 | 2.00 |
| [15] | 460~730 | 25~100 | 270 | 0.59 | 3.60 |
| [19] | 450~680 | 20~150 | 230 | 0.51 | 1.84 |
| 本文 | 421~766 | 20~100 | 345 | 0.81 | 4.31 |

4 结 论

本文基于调控 EDDT 含量构建了交联密度可调的 CLCF 体系,系统研究了其热致及机械变色行为。随着 EDDT 含量增加,网络结构逐渐由刚性主导转向柔性主导,胆甾相液晶螺距在热刺激下具有更大的调节自由度,从而显著扩大反

射波长的变化范围。CLCF 可以在 20~100 °C 范围内实现超过 250 nm 的热致红移和最大 8.2 nm °C⁻¹ 的局部灵敏度。并且随交联密度的降低,拉伸强度降低而断裂伸长量增加。通过结合预拉伸与热刺激变色,可以实现在 20~100 °C 范围内 340 nm 的波长红移,平均热响应灵敏度为 4.31 nm °C⁻¹。这种宽热致变色范围的 CLCF 在可逆光学调制和信息存储方面具有重要应用价值。

参 考 文 献:

- [1] Zhang J, Qin S, Zhang S, *et al.* Programmable dynamic information storage composite film with highly sensitive thermochromism and gradually adjustable fluorescence [J]. *Advanced Materials*, 2023, 36(8): 2305872.
- [2] Li C, Liu J, Qiu X, *et al.* Photoswitchable and reversible fluorescent eutectogels for conformal information encryption [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(46): e202313971.
- [3] Yu Z, Zhao K, Zhao Y, *et al.* Bioinspired multi-dimensional anti-counterfeiting device by combining electrochromism and structural color [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481: 148500.
- [4] Teyssier J, Saenko S V, van der Marel D, *et al.* Photonic crystals cause active colour change in chameleons [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6368.
- [5] Doshi S, Gsken N A, Dijk G, *et al.* Soft photonic skins with dynamic texture and colour control [J]. *Nature*, 2026, 649(8096): 345-352.
- [6] Sun Y, Le X, Shang H, *et al.* Dual-mode hydrogels with structural and fluorescent colors toward multistage secure information encryption [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(28): 2401589.
- [7] Sun Y, Le X, Zhou S, *et al.* Recent progress in smart polymeric gel-based information storage for anti-counterfeiting [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(41): 2201262.
- [8] Sun D, Zheng L, Xu X, *et al.* Multi-functional stimuli-responsive biomimetic flower assembled from CLCE and MOF-based pedals [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2023, 34(1): 107208.
- [9] Du K, Zhu J, Du Y, *et al.* Hybrid encoding strategy of nanostructures for high-performance security information encryption [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(9): 2300046.
- [10] 杨晨静, 陈东. 胆甾相液晶微液滴及其应用[J]. 液晶与显示, 2022, 37(08): 1070-1078.
YANG C J, CHEN D. Researches and applications of cholesteric liquid crystal droplets [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(8): 1070-1078. (in Chinese)
- [11] 尚园园, 王京霞, 江雷. 胆甾相液晶图案的动态调控与应用[J]. 液晶与显示, 2024, 39(03): 349-368.
SHANG Yuanyuan, WANG Jingxia, JIANG Lei. Dynamic regulation and application of cholesteric liquid crystal patterns [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(3): 349-368. (in Chinese)
- [12] Zhang P, de Haan L T, Debije M G, *et al.* Liquid crystal-based structural color actuators [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 248.
- [13] 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.
- [14] Schlafmann K R, Alahmed M S, Pearl H M, *et al.* Tunable and switchable thermochromism in cholesteric liquid crystalline elastomers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(18): 23780-23787.
- [15] Schlafmann K R, Alahmed M S, Lewis K L, *et al.* Large range thermochromism in liquid crystalline elastomers prepared with intra-mesogenic supramolecular bonds [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(51): 2305818.
- [16] Feng W, Pal A, Wang T, *et al.* Cholesteric liquid crystal polymeric coatings for colorful artificial muscles and motile humidity sensor skin integrated with magnetic composites [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33

(23): 2300731.

- [17] Xiong J, Wu S-T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1(1): 3.
- [18] Mouhoubi R, Lapinte V, Blanquer S. Programmable liquid crystal elastomers via magnetic field assisted oligomerization [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(26): 2424400.
- [19] Gao H, Cai W, Li A, *et al.* Ultrasensitive biomimetic skin with multimodal and photoelectric dual-signal sensing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(16): 21073-21083.
- [20] Geng Y, Kizhakidathazhath R, Lagerwall J P F. Robust cholesteric liquid crystal elastomer fibres for mechanochromic textiles [J]. *Nature Materials*, 2022, 21(12): 1441-1447.
- [21] Kuo C-Y, Lin Y-T, Huang T-T, *et al.* Thermochromic liquid-crystalline elastomers featuring a predesigned hybrid architecture [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(15): 9080-9087.
- [22] Zhang W, Froyen A A F, Schenning A P H J, *et al.* Temperature-responsive photonic devices based on cholesteric liquid crystals [J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(7): 2100016.
- [23] Zhang W, Schenning A P H J, Kragt A J J, *et al.* Reversible thermochromic photonic coatings with a protective topcoat [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(2): 3153-3160.
- [24] Nagai H, Urayama K. Thermal response of cholesteric liquid crystal elastomers [J]. *Physical Review E*, 2015, 92(2): 022501.
- [25] Nair D P, Cramer N B, Gaipa J C, *et al.* Two-stage reactive polymer network forming systems [J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, 22(7): 1502-1510.

作者简介:



赵嵩岚,男,硕士研究生,2022年于河北工业大学获得学士学位,主要从事液晶材料与液晶器件物理方面的研究。E-mail:15284353983@163.com



周璇,女,博士,副教授,2013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,主要从事利用液晶连续体理论、Landau-de Gennes理论并结合动力学方法研究液晶系统的结构转变以及缺陷动力学行为。E-mail:zhouxuan198536@163.com