

DOI:10.13475/j.fzxb.20201009007

# 可连续化生产的电刺激响应型液晶纤维 制备及其性能

盛明非<sup>1,2</sup>, 王婉宁<sup>1,2</sup>, 张丽平<sup>1,2</sup>, 付少海<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省纺织品数字喷墨印花工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122;

2. 生态纺织教育部重点实验室(江南大学), 江苏 无锡 214122)

**摘要** 为解决电刺激响应液晶纤维在无外加电极下的柔性变色问题,提出一种同轴三明治结构的电致变色液晶纤维的制备方法。采用连续涂层法制备以导电纤维为内导电层,导电水凝胶为外透明导电层,聚合物分散液晶为电致变色层的电刺激响应液晶纤维。对导电纤维种类、聚合物分散液晶体系组分等对电刺激响应液晶纤维形貌和电致变色性能的影响规律进行分析。结果表明:以炭黑掺杂锦纶为芯材的导电纤维,当胆甾相液晶、聚甲基丙烯酸甲酯、二氯甲烷质量比为15:1:8时,制备的电致变色液晶纤维有明显的3层核壳结构,具有良好的电致变色性能,其驱动电压为40 V,响应时间为9 s。所制备的无外加电极下电刺激响应液晶纤维器件可为纺织品智能柔性显示应用提供技术支持。

**关键词** 胆甾相液晶;同轴结构;电致变色性能;柔性显示;液晶纤维;导电水凝胶

中图分类号:TS 101.8

文献标志码:A

## Preparation and properties of continuously produced electric-responsive liquid crystal fibers

SHENG Mingfei<sup>1,2</sup>, WANG Wanning<sup>1,2</sup>, ZHANG Liping<sup>1,2</sup>, FU Shaohai<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Engineering Research Center for Digital Textile Inkjet Printing, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Key Laboratory of Eco-Textiles (Jiangnan University), Ministry of Education, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract** To solve the color changing problem in flexible display made of electro-responsive liquid crystal fibers without an external electrode, this study developed a preparation process for electrochromic liquid crystal (ECLC) fibers with a coaxial sandwich structure. The ECLC fiber with conductive fiber for the inner conductive layer, conductive hydrogel for the outer transparent conductive layer, polymer dispersed liquid crystal (PDLC) as the electrochromic layer was prepared via a continuous coating method. The influence of conductive fiber types and PDLC components on the morphology and electrochromic properties of ECLC fibers was explored. The results show that when the carbon/polyamide fiber is as the core material and the mass ratio of R-CLC/polymethyl methacrylate/CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> is set to 15:1:8, the prepared ECLC fiber has an obvious three-layer core-shell structure demonstrating good electrochromic performance in low driving voltage (40 V) and fast response time (9 s). The electrodeless ECLC fiber device developed in this study lays the foundation for the development of smart flexible display textiles.

**Keywords** cholesteric liquid crystal; coaxial structure; electrochromic property; flexible display; liquid crystal fiber; conductive hydrogel

日益增长的个性化需求已经成为纺织服装行业发展的新挑战与新趋势。智能纺织品是具有感知和

反应双重功能的一类新型纺织品<sup>[1-2]</sup>。其中电致变色材料可在电场刺激下实现纺织品光学属性(反射

收稿日期:2020-11-02 修回日期:2020-11-12

基金项目:中央高校基本科研专项资金资助项目(JUSRP22040);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX20-1797)

第一作者:盛明非(1995—),男,博士生。主要研究方向为先进液晶材料与智能可穿戴纺织品技术。

通信作者:付少海(1972—),男,教授,博士。主要研究方向为生态染整技术。E-mail:shaohai@ hotmail.com。

率、透过率、吸收率等)改变,从而在宏观上表现为颜色或者透光率的可逆变化,在军用防护隐蔽材料、柔性显示、防伪标志、安全警示和艺术饰品等方面具有广泛的应用,是智能纺织品能够感知与直观反馈外界环境变化的一个关键组件<sup>[3-4]</sup>。

传统的电致变色材料总体上分为 2 类:一类是无机电致变色材料,其依赖于过渡金属元素离子的氧化还原变色;另一类为有机电致变色材料,其进一步分为氧化还原型的有机小分子电致变色材料和掺杂离子在聚合物链中迁入迁出导致电子能级跃迁变色的导电聚合物电致变色材料。不同于传统电致变色材料的电化学反应机制,胆甾相液晶的电刺激响应变色是一个物理变化过程,具有使用寿命长、响应速度快和透明态到有色态全谱段显示等优点。然而,胆甾相液晶在器件挠曲过程中易流动,难以塑形;同时,胆甾相液晶的螺旋结构以分子间作用力形成稳态,极易受到外界环境影响丧失电致变色性能;此外,传统的电致变色液晶器件大都是以导电玻璃为基底的刚性器件,不能满足智能纺织品的服用要求,极大限制了液晶在纺织品上的进一步应用,因此亟需研制可编织型柔性电致变色液晶器件<sup>[5-6]</sup>。

相比传统的二维或三维器件,纤维状电子器件的直径在数十到数百微米之间,属于一维结构,具有质量轻、柔韧性好、可编织性强等特点。充分利用纤维状器件的可伸缩、自愈、形状可记忆等优势,将其编织成可弯曲、变形、透气、耐水的智能纺织品,是电致变色液晶器件重要发展方向<sup>[7-8]</sup>。因此,基于大面积电致变色机制,攻克柔性电致变色液晶材料纤维化的技术瓶颈,并实现可编织智能电致变色液晶纤维的连续化制备与应用,成为亟待解决的问题<sup>[9-11]</sup>。

针对上述问题,本文致力于将液晶应用在电致变色纺织品中,开发柔性电致变色液晶纤维基材,在扩展液晶非显示应用领域的同时,提高电致变色纺织品的生产技术,以满足市场的多样化需求。通过连续同轴涂层法制备了大尺寸电刺激响应液晶纤维,探索连续化生产电致变色纤维器件的工艺方法。在此基础上,研究了电刺激响应液晶纤维器件的工艺优势及连续化同轴涂层工艺参数对纤维的结构、表面形貌及电致变色性能的影响,并且通过不同的聚合物分散液晶体系调节器件电致变色层。通过以上工作,对不同制备工艺进行探索比较,为连续化大尺寸电刺激响应液晶纤维器件的光电性能、服用性能的提高,以及规模化生产提供理论及实践参考。

## 1 实验部分

### 1.1 材料和仪器

材料:胆甾相液晶(CLC, U10-006G-680),石家庄诚志永华显示材料有限公司;二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )、聚乙烯吡咯烷酮(PVP, K88-96, 平均分子量为 1 300 000),上海麦克林生物有限公司;聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、无水乙醇、二氯甲烷( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ )、丙烯酰胺(AAM)、N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(N,N'-MBAA)、四甲基乙二胺(TEMED)、过硫酸铵(APS)、二碘甲烷( $\text{CH}_2\text{I}_2$ )、苯甲醇(BnOH)、甲酰胺、乙二醇(EG),国药集团化学试剂有限公司;氯化锂(LiCl),嘉善巨枫化工厂;神盾 27.8 tex 锦纶纤维、神盾 CVC45 型导电银/涤纶混纺纱线、神盾 2.22 tex(3 f) 炭黑掺杂锦纶导电纤维,新乡北方纤维公司;去离子水,实验室自制。

仪器:85-2A 型数显恒温测速磁力搅拌器(金坛市白塔新宝仪器厂);GZX-9240MBE 型电热鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司医疗设备厂);JK6010S 型可调直流稳压恒流电源(深圳市竣科仪器科技有限公司);VC 型数字多用表(深圳市胜利高电子科技有限公司);EL204 型电子天平(梅特勒托利多仪器上海有限公司);XY-MRT 型金相显微镜(宁波舜宇仪器有限公司);SU1510 型扫描电子显微镜(日本日立株式会社);DMP-2700 型热台偏光显微镜(德国徕卡显微系统有限公司);Nicolet is10 型傅里叶红外光谱仪(赛默飞世尔科技中国有限公司);TA-Q500 型热重分析仪(上海莱睿科学仪器有限公司);JC2000DS1 型接触角测量仪(上海中晨数字技术设备有限公司)。

### 1.2 试样制备方法

#### 1.2.1 聚合物分散液晶体系的配制

首先称取 1.00 g CLC 和 0.03 g  $\text{SiO}_2$  混合,加热至 60 °C,在 500 r/min 的条件搅拌 20 min,制备得到电致变色液晶体系(R-CLC);然后按不同质量比例称取 R-CLC、PMMA、 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ,在 60 °C 条件下磁力搅拌至 PMMA 完全溶解,制备 PMMA/R-CLC/ $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  混合液备用。

#### 1.2.2 导电水凝胶的制备

称取 25 mL 去离子水,加入 4.3 g LiCl、3.5 g 丙烯酰胺、2.1 mg N,N'-MBAA、3.5 mg APS 混合,在 100 r/min 的条件下搅拌 30 min;然后加入 0.025 mL TEMED 继续搅拌,得导电水凝胶母液,反应机制如图 1 所示。AAM 和 N,N'-MBAA 在催化剂作用下发生自由基聚合反应,生成高分子聚合网络,从而锁

住氯化锂离子溶液,形成具有导电性的水凝胶膜。

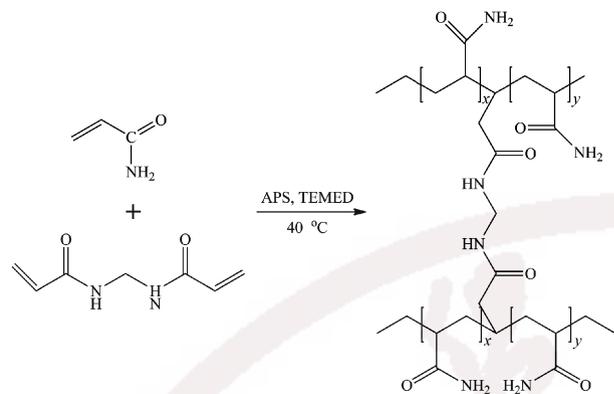


图 1 导电水凝胶反应机制

Fig.1 Synthetic mechanism diagram of conductive hydrogel

### 1.2.3 电致变色液晶纤维的制备

电致变色液晶纤维的制备过程如图 2 所示。将炭黑掺杂锦纶导电纤维(1<sup>#</sup>)以一定速度及拉力通过 PMMA/R-CLC/CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 盒,待二氯甲烷在空气中挥发完全,得到 PMMA/R-CLC 纤维(2<sup>#</sup>)。随后纤维继续经过导电水凝胶盒,转移至 40 °C 烘箱继续反应固化 2 h,即得到电致变色液晶纤维(3<sup>#</sup>)。电致变色液晶锦纶纤维、银纤维制备过程与上述制备过程相同。

R-CLC/PMMA/CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>盒 导电水凝胶盒

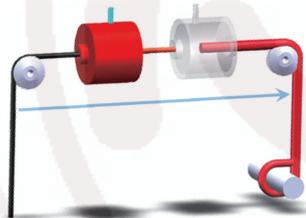


图 2 电致变色液晶纤维制备示意图

Fig.2 Schematic diagram of ECLC fiber preparation

## 1.3 性能测试与表征

### 1.3.1 形貌结构分析

取电致变色液晶纤维固定在载玻片上,采用光学显微镜观察纤维形貌,并通过实时照片记录。

取电致变色液晶纤维产品置于铝箔上,在室温常压下充分干燥,对样品进行喷金处理 30 s,然后在扫描电子显微镜(最大加速电压为 15 kV)下观察纤维的尺寸和表面形貌。

将电致变色液晶纤维样品及原材料进行干燥,采用傅里叶红外光谱仪测试样品的化学结构。扫描范围均为 4 000~500 cm<sup>-1</sup>。

采用热重分析仪测试得到电致变色液晶纤维的热稳定性曲线,并根据曲线计算聚合物分散液晶占比<sup>[10]</sup>。升温速率为 10 °C/min,升温范围为 50~600 °C, N<sub>2</sub> 流速为 50 mL/min。

### 1.3.2 芯材纤维界面性能研究

利用接触角测量仪分别测试二碘甲烷、去离子水、苯甲醇、甲酰胺、乙二醇与锦纶、银纤维和炭黑掺杂锦纶导电纤维的接触角。同时,通过 Fowkes/Owen-Wendtl 理论<sup>[12]</sup>计算纤维基材的表面能。

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cos\theta$$

$$\gamma_s = \gamma_s^p + \gamma_s^d$$

$$\gamma_l = \gamma_l^p + \gamma_l^d$$

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 2(\gamma_s^d \gamma_l^d) - 2(\gamma_s^p \gamma_l^p)^{\frac{1}{2}}$$

式中: $\gamma_s$  为纤维基材的表面能, mJ/m<sup>2</sup>;  $\gamma_l$  为探针液体的表面能, mJ/m<sup>2</sup>;  $\gamma_{sl}$  为纤维基材与探针液体的界面能, mJ/m<sup>2</sup>;  $\gamma_l^p$  为探针液体的表面能极性分量, mJ/m<sup>2</sup>;  $\gamma_l^d$  为探针液体的表面能色散分量, mJ/m<sup>2</sup>;  $\gamma_s^p$  为纤维基材的表面能极性分量, mJ/m<sup>2</sup>;  $\gamma_s^d$  为纤维基材的表面能色散分量, mJ/m<sup>2</sup>;  $\cos\theta$  为探针液体在纤维基材表面的接触角余切值。

采用水与二碘甲烷为探针液体,测试并计算玻璃与聚四氟乙烯的表面能;再利用 R-CLC、R-CLC/PMMA/CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 为探针液体,对玻璃及聚四氟乙烯进行接触角测量,统计接触角数据并计算出 R-CLC、R-CLC/PMMA/CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 的表面能参数及其与纤维的界面能。纤维基材与探针溶液(R-CLC/PMMA/CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>)之间的界面能、粘附功的计算公式<sup>[12]</sup>为

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 2(\sqrt{\gamma_s^d \gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^p \gamma_l^p})$$

$$W_{sl} = 2(\sqrt{\gamma_s^d \gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^p \gamma_l^p})$$

式中,  $W_{sl}$  为纤维基材与探针溶液的粘附功, mN/m。

### 1.3.3 光电性能测试

取电致变色液晶纤维固定于载玻片上,使直流稳压电源电极分别连接内层炭黑掺杂锦纶导电纤维及导电玻璃或者电致变色液晶纤维的导电水凝胶层,在光学显微镜下观察其电致变色过程。

## 2 结果与讨论

### 2.1 制备工艺的影响因素分析

#### 2.1.1 芯材纤维对电致变色纤维形貌的影响

分别以锦纶、银/涤纶混纺纱线和炭黑掺杂锦纶导电纤维为芯材制备电致变色液晶纤维,观察聚合物分散液晶体系在纤维表面分布形态,结果如图 3 所示。

由图 3(a)可以看出,锦纶基电致变色液晶纤维上聚合物分散液晶层分布均匀,厚度约为 5.59 μm;由图 3(b)可看出,芯材银/涤纶混纺纤维是由 2 股

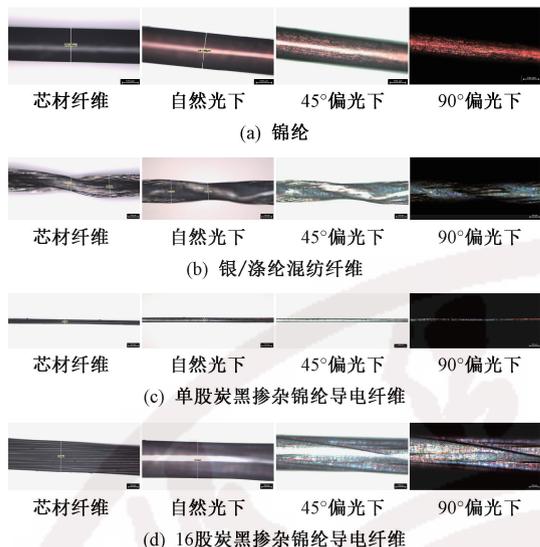
图 3 不同芯材电致变色液晶纤维光学显微镜照片( $\times 100$ )

Fig.3 OM images of ECLC fiber with different core materials

( $\times 100$ ). (a) Nylon; (b) Silver/polyester fiber; (c) Single-strand carbon/polyamide conductive fiber; (d) 16-strand carbon/polyamide conductive fiber

纤维加捻而成的,该电致变色液晶纤维表面分布较少的聚合物分散液晶,主要存在于纤维交界凹槽处。上述结果表明锦纶基纤维对聚合物分散液晶具有更好的界面亲和性,因此,本文研究选用炭黑掺杂锦纶导电纤维为芯材制备电致变色液晶纤维。由图 3(c)可以看出,原始芯材纤维直径为  $56.14 \mu\text{m}$ ,其表面有线状凹痕。以此制备的电致变色液晶纤维表面光滑,且均匀包覆着聚合物分散液晶,厚度约为  $0.09 \mu\text{m}$ ,同时由于双折射效应在偏振光作用下呈现多彩的颜色。炭黑掺杂锦纶导电纤维的直径细,导致表面涂覆的聚合物分散液晶层少,对纤维显色效果不利。进一步研究中,经手工加捻制备了 16 股炭黑掺杂锦纶导电纤维,如图 3(d)所示。以其为芯材制备的电致变色液晶纤维表面光滑,聚合物分散液晶在纤维表面均匀附着,厚度约为  $15.36 \mu\text{m}$ ,具有良好的显色性能。

### 2.1.2 芯材纤维的表面性能分析

为研究聚合物分散液晶在不同纤维表面的铺展行为及其与基材界面性能关系,采用接触角法测试锦纶、银/涤纶混纺纤维以及炭黑掺杂锦纶导电纤维的接触角,结果如图 4 所示。

由探针液体的表面性能参数及其在纤维基材上的接触角测试可得纤维基材的表面性能拟合曲线,如图 5 所示。可知:锦纶的色散分量和极性分量分别为  $29.72$  和  $0.91 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ,表面能为  $30.63 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ;银/涤纶混纺纤维的色散分量和极性分量分别为  $49.77$  和  $0.12 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ,表面能为  $49.89 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ;炭黑

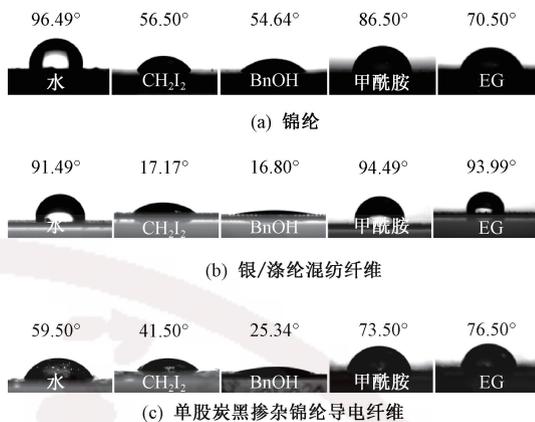


图 4 锦纶、银/涤纶混纺纤维、炭黑掺杂锦纶导电纤维静态水接触角测试

Fig.4 Static water contact angle test of polyamide (a), silver/polyester (b) and carbon/polyamide conductive fiber (c)

掺杂锦纶导电纤维的色散分量和极性分量分别为  $30.10$  和  $16.78 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ,表面能为  $46.88 \text{ mJ}/\text{m}^2$ 。

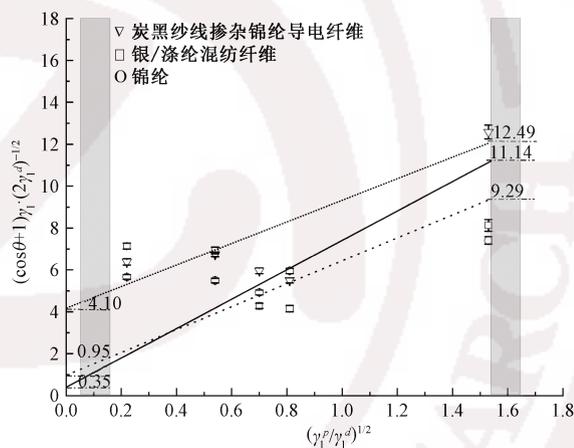


图 5 锦纶、银/涤纶混纺纤维和炭黑掺杂锦纶导电纤维的表面性能拟合曲线

Fig.5 Surface performance simulation curves of polyamide, silver/polyester, and carbon/polyamide fiber

因此,经计算得到锦纶及 R-CLC/PMMA/ $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  界面能为  $61.42 \text{ mN}/\text{m}$ ,粘附功为  $42.19 \text{ mN}/\text{m}$ ;银/涤纶混纺纱线与 R-CLC/PMMA/ $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  界面能为  $84.19 \text{ mN}/\text{m}$ ,粘附功为  $39.91 \text{ mN}/\text{m}$ ;炭黑掺杂锦纶导电纤维与 R-CLC/PMMA/ $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  界面能为  $26.78 \text{ mN}/\text{m}$ ,粘附功为  $94.31 \text{ mN}/\text{m}$ 。粘附功与界面亲和性成正相关,因此,聚合物分散液晶体系在银纤维表面不能稳定存在,但可在炭黑掺杂锦纶导电纤维表面均匀铺展。

### 2.1.3 聚合物分散液晶配比对纤维形貌的影响

采用炭黑掺杂锦纶导电纤维为芯材纤维,制备不同 R-CLC、PMMA 和  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  质量比的 2<sup>#</sup>纤维,其光学显微镜照片如图 6 所示。

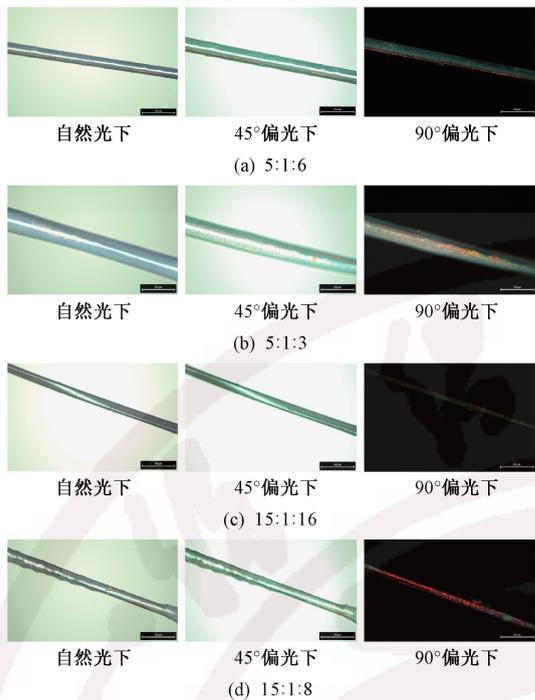


图 6 不同 R-CLC、PMMA 和  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  质量比的 2<sup>#</sup> 纤维光学显微镜照片 ( $\times 100$ )

Fig.6 Optical microscope photos of 2<sup>#</sup> with different mass ratios of R-CLC, PMMA and  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$

由图 6(a)可知,当R-CLC、PMMA 和  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  质量比为 5:1:6时,PMMA/R-CLC 在纤维表面均匀包覆,厚度约为  $13.26 \mu\text{m}$ 。当 R-CLC、PMMA 和  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  质量比为 5:1:3(见图 6(b))时,纤维表面 PMMA/R-CLC 层厚度约为  $27.49 \mu\text{m}$ 。混合液中  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  量越少,混合液黏度越大,聚合物分散液晶体系更容易转移吸附在纤维基材表面。进一步地当 R-CLC、PMMA 和  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  质量比为 15:1:16(见图 6(c))时,PMMA/R-CLC 在纤维表面涂覆较薄,偏光下双折射现象较弱,聚合物分散液晶量较少。当 R-CLC、PMMA 和  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  质量比为 15:1:8(见图 6(d))时,混合液的黏度增加,滞留在纤维表面的 PMMA/R-CLC 变多,厚度约为  $11.37 \mu\text{m}$ ,同时,纤维在偏光下具有明显的双折射现象,因此聚合物分散液晶混合液的较佳配比为 R-CLC、PMMA、 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  质量比为 15:1:8。

## 2.2 电致变色液晶纤维的结构分析

以 PMMA/R-CLC 纤维为基材,以  $0.05 \text{ m/s}$  速率经过含有导电水凝胶母液(采用最佳配比 CLC、PMMA、 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  质量比为 15:1:8)的通道制备电致变色液晶纤维,进行性能分析。

### 2.2.1 形貌分析

电致变色液晶纤维的光学显微镜及扫描电子显微镜照片如图 7 所示。图 7(a)结果表明,电致变色

液晶纤维直径约为  $84.28 \mu\text{m}$ ,导电水凝胶的厚度约为  $2.27 \mu\text{m}$ ,在偏振光下纤维具有良好双折射性能。由图 7(b)可以看出:炭黑掺杂锦纶导电纤维表面较为光滑;PMMA/R-CLC 纤维表面附着网络状聚合物分散液晶薄膜;电致变色液晶纤维表面附着有褶皱状水凝胶层。

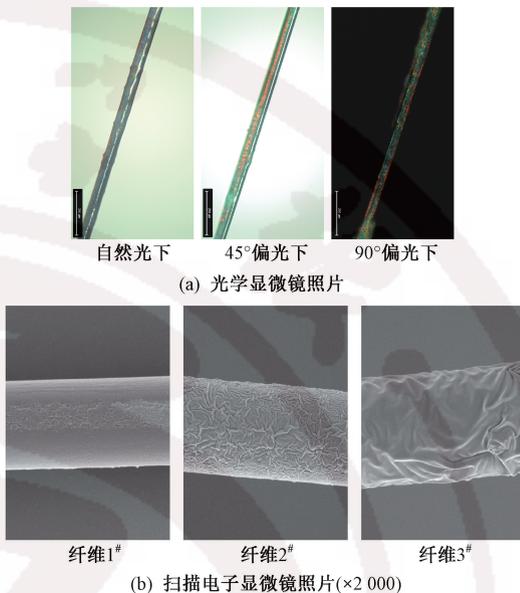


图 7 电致变色液晶纤维形貌结构图

Fig.7 Morphology and structure analysis diagram of ECLC fiber. (a) OM images of 3<sup>#</sup>; (b) SEM images ( $\times 2000$ )

### 2.2.2 化学结构分析

电致变色液晶纤维及原材料的红外光谱分析结果如图 8 所示。

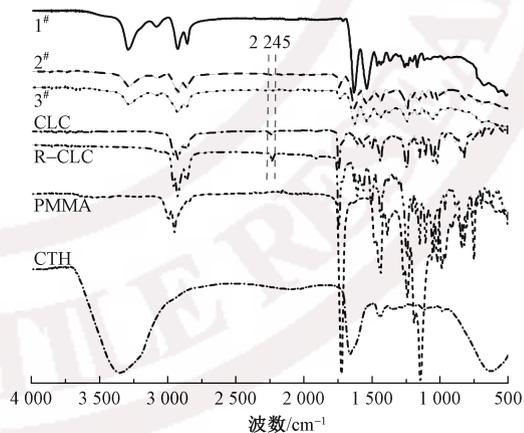


图 8 电致变色液晶纤维及原材料红外光谱

Fig.8 Infrared spectra of ECLC fiber and its raw materials

由图可以看出,电致变色液晶纤维(3<sup>#</sup>)在  $3300 \text{ cm}^{-1}$  处出现锦纶基 N—H 伸缩振动峰,由于导电水凝胶在此位置同样具有强吸收宽峰,使其较芯材纤维吸收峰变宽且峰尖位置出现了一定红移。3<sup>#</sup>纤维在  $2245 \text{ cm}^{-1}$  处出现了 1 个吸收峰,为聚合物分散液晶层的—CN 伸缩振动峰;在  $1750 \text{ cm}^{-1}$  处出

现了吸收峰,为芯材纤维与 PMMA 中的  $-C=O$  伸缩振动峰。上述分析可知,聚合物分散液晶体系与导电水凝胶在经过连续同轴法工艺后较好地分布在电致变色液晶纤维上。

### 2.2.3 热性能分析

对电致变色液晶纤维及各原材料组分进行热稳定性分析,结果如图 9 所示。

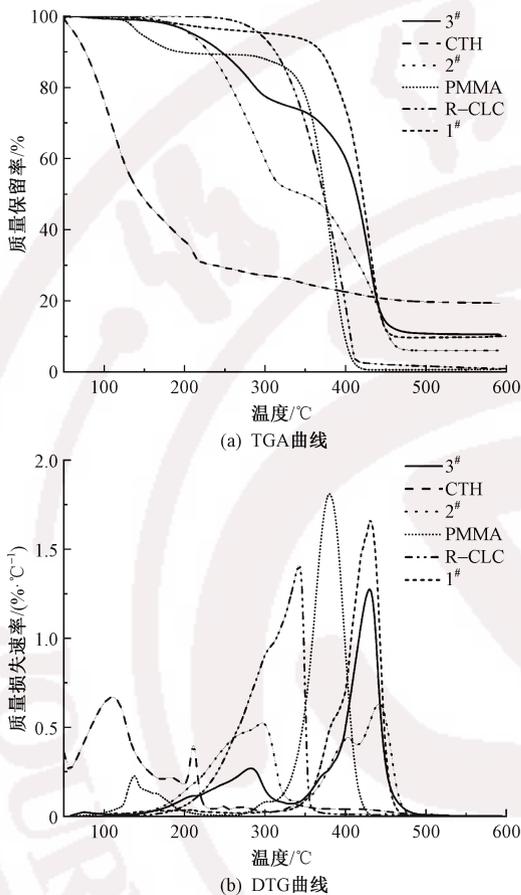


图 9 电致变色液晶纤维及原材料热性能分析  
Fig.9 TGA (a) and DTG (b) curves of ECLC fiber and its raw materials

由图可以看出:炭黑掺杂锦纶导电纤维(1<sup>#</sup>)的热分解温度区间为 350~450 °C;胆甾相液晶(R-CLC)的热分解温度区间为 200~350 °C;PMMA 热分解温度区间为 300~425 °C;导电水凝胶(CTH)在 50~220 °C 区间内分解,其中 100 °C 为水的热蒸发温度,210 °C 是凝胶聚合物的热分解温度。电致变色液晶纤维(3<sup>#</sup>)在 210 °C 的热分解峰对应于导电水凝胶的热分解过程,280 °C 的热分解峰则对应胆甾相液晶的热分解过程;在 400 °C 出现了 PMMA 的热分解峰,450 °C 出现了炭黑掺杂锦纶导电纤维的热分解峰。证明了电致变色液晶纤维上成功包裹聚合物分散液晶和导电水凝胶,进一步对热失重曲线分析计算可知,聚合物分散液晶含量约占电致变色液晶纤维总质量的 10.54%。

## 2.3 电致变色液晶纤维的光电性能分析

### 2.3.1 电致变色机制

电致变色液晶纤维的电刺激响应机制如图 10 所示。可以看出,在电致变色液晶纤维中,胆甾相液晶在聚合物作用下可形成稳定的多畴分布,基于聚合物致稳作用<sup>[13]</sup>,在无外加电场时胆甾相液晶内部分子一般呈扁平状,分子在局部范围内排列成层,层内分子相互平行,相邻层内分子的长程取向发生均匀扭曲,在三维空间上自发形成螺旋结构。基于胆甾相液晶的螺旋结构和各向异性,其对入射光会形成选择性反射,在宏观视野中显示为彩色。在施加电场的情况下,胆甾相液晶被解螺旋,由胆甾相转化为场致向列相,液晶分子沿电场方向排列,此时液晶体系对入射光线通透,并显示出芯材纤维衬底的颜色。

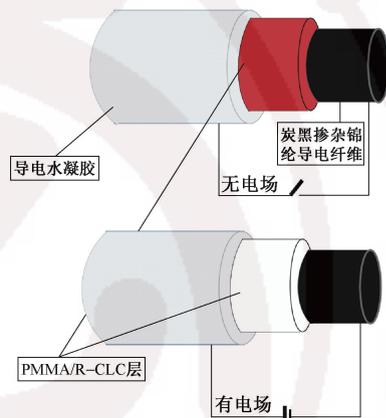


图 10 电致变色液晶纤维电刺激响应示意图  
Fig.10 Schematic diagram of electro-responsive of ECLC fiber

### 2.3.2 电致变色性能

采用光学显微镜对电致变色纤维的变色过程进行跟踪,其中炭黑掺杂锦纶导电纤维层与导电水凝胶层分别连接直流电源正负电极,测试结果如图 11 所示。可以看出,在 26 V 的驱动电压下,电致变色纤维中的液晶随着通电时间的延长逐渐发生解螺旋,当通电时间为 9 s 时纤维完全变黑,因此可以得到电致变色液晶纤维的驱动电压为 26 V,响应时间为 9 s。

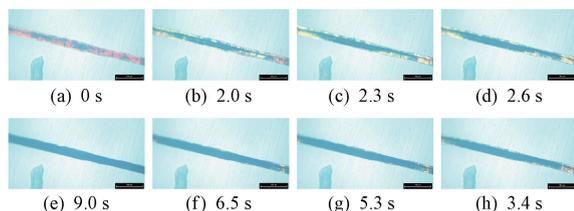


图 11 电致变色液晶纤维的电响应变色过程( $\times 100$ )  
Fig.11 Electrochromic process images of ECLC fiber( $\times 100$ )

### 3 结 论

本文将液晶显示技术应用到纺织纤维领域,以导电纤维、导电水凝胶作内外电极,聚合物分散液晶作电致变色层,制备电致变色液晶纤维,并研究制备工艺对性能影响规律。得到以下主要结论:电致变色纤维较优制备工艺为采用炭黑掺杂锦纶导电纤维为芯材纤维,聚合物分散液晶体系组成为胆甾相液晶体系、聚甲基丙烯酸甲酯和二氯甲烷质量比为15:1:8;制备的电致变色液晶纤维具有良好电刺激响应变色性能,驱动电压为26 V,响应时间为9 s。

本文研究实现了液晶在纺织品上的柔性显示应用,为后续商品化可编织电致变色液晶纤维纺织品的开发提供参考。

FZXB

#### 参考文献:

- [ 1 ] 杨晨啸,李鹏. 柔性智能纺织品与功能纤维的融合 [J]. 纺织学报, 2018, 39(5): 165-174.  
YANG Chenxiao, LI Li. Integration of soft intelligent textile and functional fiber [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(5): 165-174.
- [ 2 ] 陈志林. 智能服装开发与应用现状 [J]. 纺织科技进展, 2010(2): 88-93.  
CHEN Zhilin. Development and application of prospect smart clothing [J]. Progress in Textile Science & Technology, 2010(2): 88-93.
- [ 3 ] 吴琼,张观广,陈皇星,等. 柔性电致变色材料的研究与发展 [J]. 功能材料, 2019, 50(10): 10040-10046.  
WU Qiong, ZHANG Guanguang, CHEN Huangxing, et al. The state-of-the-art flexible electrochromic material [J]. Journal of Function Materials, 2019, 50(10): 10040-10046.
- [ 4 ] 冯博学,陈冲,何毓阳,等. 电致变色材料及器件的研究进展 [J]. 功能材料, 2004, 35(2): 145-150.  
FENG Boxue, CHEN Chong, HE Yuyang, et al. Advance in research on electrochromic materials and devices [J]. Journal of Function Materials, 2004, 35(2): 145-150.
- [ 5 ] AHMAD F, JAMIL M, JEON Y J. Advancement trends in dye-doped polymer-dispersed liquid crystals a survey review [J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2017, 648(1): 88-113.
- [ 6 ] 吕奎. 液晶微胶囊的制备与显示应用性能研究 [D]. 天津:天津大学, 2012: 6-19.  
LV Kui. Study on the preparation of liquid crystal microcapsules and their applied performances in displays [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 6-19.
- [ 7 ] FAN H, LI K, LIU X, et al. Continuously processed, long electrochromic fibers with multi-environmental stability [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12: 28451-28460.
- [ 8 ] 郝鸿飞,刘晓艳. 胆固醇液晶热致变色微胶囊的制备及其性能 [J]. 纺织学报, 2017, 38(6): 75-79.  
HAO Hongfei, LIU Xiaoyan. Preparation and properties of thermotropic cholesterol liquid crystal microcapsules [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(6): 75-79.
- [ 9 ] SHENG M F, ZHANG L P, GUAN Y, et al. The photoelectric properties characteristics of dye-doped nematic liquid crystal microcapsules with different structural composition [J]. Journal of Molecular Liquids, 2019, 283: 816-822.
- [ 10 ] SHENG M F, ZHANG L P, WANG D, et al. Fabrication of dye-doped liquid crystal microcapsules for electro-stimulated responsive smart textiles [J]. Dyes and Pigments, 2018, 158: 1-11.
- [ 11 ] 盛明非,张丽平,付少海. 基于染料掺杂型液晶微胶囊的电刺激响应智能纺织品的制备及其性能 [J]. 纺织学报, 2020, 41(8): 63-68.  
SHENG Mingfei, ZHANG Liping, FU Shaohai. Preparation and property of dye-doped liquid crystal microcapsules for electro-stimulated responsive smart textiles [J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(8): 63-68.
- [ 12 ] SHENG M F, ZHANG L P, LEI Q, et al. Dye-doped liquid crystals under confinement in microcapsules [J]. Dyes and Pigments, 2020, 180: 10854.
- [ 13 ] SHENG M F, ZHANG L P, JOHN L W, et al. Multicolor electrochromic dye-doped liquid crystal yolk-shell microcapsules [J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2020, 12(26): 29728-29736.