

文章编号: 1000-7032(2026)06-1070-10

高稳态 PVDF 基弹性 ACEL 纤维制备及性能研究

陈 漪^{1,2,3}, 胡 毅^{1,2,3*}

(1. 浙江理工大学 生物基纤维材料全国重点实验室, 浙江 杭州 310018;

2. 中国纺织工业联合会 染整节能减排重点实验室, 浙江 杭州 310018;

3. 浙江理工大学 嵊州创新研究院, 浙江 绍兴 312400)

摘要: 采用同轴共轭静电纺丝技术制备了一种多组分协同优化的聚偏氟乙烯-六氟丙烯(PVDF-HFP)基弹性交流电致发光(Alternating-current electroluminescent, ACEL)纤维器件。系统分析了钛酸钡(BaTiO₃)、聚二甲硅氧烷(PDMS)及流变助剂(RA-8410)掺杂浓度对发光层介电性能、力学行为和颗粒悬浮稳定性的影响规律。结果表明, BaTiO₃通过提升体系介电常数有效增强了局域电场; PDMS的引入可以降低材料的杨氏模量并诱导极性 β 相的形成; RA-8410则通过构建物理触变网络解决了发光颗粒的沉降难题。当BaTiO₃与PVDF-HFP质量比为1:6, PDMS和RA-8410添加质量分数分别为20%和5%时, 发光层综合性能达到最佳。在该最佳工艺下, 所制备的弹性 ACEL 纤维成功打破了亮度与弹性的制约瓶颈, 在200 V_{rms}, 6 kHz驱动下亮度可达56.64 cd·m⁻², 并能承受100%的拉伸应变。本研究为智能可穿戴显示器件的连续化规模制备提供了切实可行的新思路。

关键词: 交流电致发光纤维; 共轭静电纺丝; 流变助剂; 柔性显示器件

中图分类号: TN253

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260059

CSTR: 32170.14.CJL.20260059

Fabrication and Properties of Highly Stable PVDF-based Stretchable ACEL Fibers

CHEN Yi^{1,2,3}, HU Yi^{1,2,3*}

(1. State Key Laboratory of Bio-based Fiber Materials, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Key Laboratory of Dyeing and Finishing Energy Saving and Emission Reduction,

China Textile Industry Federation, Hangzhou 310018, China;

3. Shengzhou Innovation Research Institute of Zhejiang Sci-Tech University, Shaoxing 312400, China)

* Corresponding Author, E-mail: huyi-v@zstu.edu.cn

Abstract: A multicomponent synergistically optimized poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP)-based stretchable alternating-current electroluminescent (ACEL) fiber device was fabricated using coaxial conjugated electrospinning. The effects of doping concentrations of barium titanate (BaTiO₃), polydimethylsiloxane (PDMS), and a rheological additive (RA-8410) on the dielectric properties, mechanical behavior, and particle suspension stability of the emissive layer were systematically investigated. The results demonstrate that the incorporation of BaTiO₃ effectively enhances the local electric field by increasing the dielectric constant; PDMS significantly decreases the Young's modulus and induces the formation of the electroactive β -phase; and RA-8410 resolves the particle sedimentation dilemma by constructing a physical thixotropic network. The comprehensive performance of the emissive layer is maximized at a BaTiO₃/PVDF-HFP mass ratio of 1:6, with mass fraction 20% PDMS and 5% RA-8410. Under these optimal conditions, the as-fabricated stretchable ACEL fibers successfully break the inherent trade-off between mechanical compliance and luminescent performance, delivering a reliable luminance of 56.64 cd·m⁻².

收稿日期: 2026-02-25; 修订日期: 2026-03-02

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY21E030023); 浙江理工大学嵊州创新研究院项目(SYY2024C000008)

Supported by Zhejiang Natural Science Foundation Project (LY21E030023); Zhejiang Sci-Tech University Shengzhou Innovation Research Institute Project (SYY2024C000008)

under 200 V_{rms} and 6 kHz driving field while withstanding a 100% tensile strain. This research provides a highly feasible paradigm for the continuous and scalable fabrication of smart wearable display devices.

Keywords: alternating-current electroluminescent fiber; conjugated electrospinning; rheological additive; flexible display device

1 引 言

随着智能穿戴设备的发展,交流电致发光(Alternating-current electroluminescent, ACEL)器件因具备轻薄柔巧的特点,成为柔性显示领域的热点研究对象^[1-5]。特别是经典的 ZnS:Cu 等电致发光材料,其在复杂机械形变下的机电-光响应等前沿功能特性备受关注^[6]。在器件的连续化制备中,共轭静电纺丝技术由于分散性较好^[7-8]、可降低功能材料团聚风险^[9-10],成为制备功能性器件的理想工艺之一^[11-15]。其中,该工艺制备的交流电致发光器件通常采用纯聚偏氟乙烯-六氟丙烯(PVDF-HFP)基溶液作为纺丝载体,以负载 ZnS:Cu 等无机发光材料制备功能性薄膜^[16-18]。然而,传统 PVDF-HFP 基发光层存在客观局限。一是力学与发光性能相互制约,其有限的杨氏模量和光电性能难以满足大应变拉伸需求^[19-20]。虽然在基体中掺杂钛酸钡(BaTiO₃、BTO)等高介电无机颗粒可以提高介电常数进而增加发光亮度^[21-22],但无机颗粒的加入通常会增加复合材料的整体杨氏模量,降低其柔韧性^[23-25]。同时,PVDF-HFP 基体中极性 β 相的相对含量通常受限,制约了介电响应的进一步提高^[26-28]。在静电纺丝前驱液中,ZnS:Cu 与 BTO 等无机颗粒密度较大,容易受重力作用发生物理沉降^[29-30]。传统借助磁力搅拌器的分散效果不理想,难以维持长程纺丝过程中的颗粒均匀分布^[31-33]。

基于此,本研究提出一种多组分协同优化的共轭静电纺丝策略。通过在 PVDF-HFP 基体中引入 BTO 与 PDMS 协同调控介电常数与杨氏模量,并利用流变助剂(RA-8410)改善无机颗粒的悬浮稳定性,成功制备了一种弹性 ACEL 纤维器件。系统探究了 BTO、PDMS 及 RA-8410 掺杂浓度对器件的电致发光性能、力学行为及溶液分散性的影响,并确定了最佳制备工艺。测试结果表明,在 200 V_{rms} 、6 kHz 驱动条件下,该器件亮度可达 56.64 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$,并能在 100% 拉伸应变下保持稳定发光。本研究可为高性能弹性交流电致发光器件的连续化制备提供理论参考与技术路径。

2 实 验

2.1 试剂与仪器

实验材料:ZnS:Cu 发光粉(D512CT,上海科炎光电技术有限公司),N,N-二甲基甲酰胺(DMF)(AR,杭州高晶精细化工有限公司),丙酮(AR,湖州双林化学科技有限公司),聚偏氟乙烯-六氟丙烯共聚物(PVDF-HFP)(Kynar Flex2801,上海爱纯生物科技有限公司),银纳米线(AgNWs,直径 90 nm,长度 20~60 μm ,20 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$,南京先丰纳米材料科技有限公司),钛酸钡(BTO)纳米颗粒(上海罗恩试剂;杭州米克化学仪器有限公司),Sylgard 184 硅橡胶套装(美国陶氏化学公司)。

实验仪器:扫描电子显微镜(SEM)(Ultra 55,德国卡尔蔡司公司),X 射线衍射仪(D8 Advance,德国 Bruker 公司),高性能荧光寿命和稳态光谱仪(FluoTime 300,德国 PicoQuant 公司),旋转流变仪(MCR52,奥地利 AntonPaar 公司),光谱辐射计(PR670,美国 Photo Research 公司),精密阻抗分析仪(4294A,美国 Agilent 公司),万能材料试验机(Instron 5943,美国 Instron 公司),光谱辐射计(PR670,美国 Photo Research 公司),高压放大器(ATA-7015,西安安泰电子科技有限公司),傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet iS50,美国 Thermo Fisher Scientific 公司)。

2.2 液态金属基导线制备

将聚氨酯(TPU)溶于含 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)的混合溶剂中配制成纺丝液。以水晶线为芯线,利用静电纺丝技术(推进流速 1.2 $\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$,接收端转速 180 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,喷头移动速度 0.6 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,往复纺丝 4 层)将 TPU 均匀负载于芯线表面,制得表面粗糙多孔的同轴复合弹性基材。随后,对共晶镓铟合金(EGaIn)进行表面改性获得粘稠状导电浆料。最后,对该基材施加 20% 预拉伸应变,利用其粗糙多孔特性,通过涂覆法将改性液态金属均匀负载于其表面,完成液态金属底电极的构建。

2.3 弹性 ACEL 纤维器件制备

将 PVDF-HFP 溶解于 DMF 与丙酮混合溶剂

(质量比为 3:2)中,配制成质量分数 15% 的基体溶液。随后加入 ZnS:Cu 与 BTO 颗粒(控制质量比为 $m_{\text{ZnS:Cu}}:m_{\text{PVDF-HFP}}=3:1$ 及 $m_{\text{BTO}}:m_{\text{PVDF-HFP}}=1:6$),并添加占混合液总质量 20% 的 PDMS 与 5% 的流变助剂 RA-8410。磁力搅拌 6 h 至均匀分散,得纺丝前驱液。利用共轭静电纺丝技术(推进流速 $0.8 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$, 转速 $190 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 移动速度 $0.8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 施加电压 10 kV, 往复纺丝 5 次)将其均匀负载于自制的液态金属导线表面。纺丝完成后,连续 5 次浸涂银纳米线构建致密的外电极逾渗网络。最后,涂覆 PDMS 溶液(组分 A 与 B 质量比 10:1)进行两遍封装,每次均仔细刮除多余溶液以保证极薄包覆,随后于 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 固化 30 min, 即得弹性 ACEL 纤维器件。

2.4 样品表征

通过场发射扫描电子显微镜观察样品的表面及截面微观形貌。采用 X 射线衍射仪表征 ZnS:Cu 荧光粉的晶体结构。使用傅里叶变换红外光谱仪评估聚合物基体中 α 相向 β 相的转变特征。利用旋转流变仪测定纺丝前驱液的流变性能。采用万能材料试验机测试复合薄膜的室温拉伸力学性能。使用精密阻抗分析仪测量复合发光层在宽频

范围内的介电常数。通过任意波形发生器和高压放大器对纤维器件进行驱动,同时采用光谱辐射计记录不同电压和频率下的发光亮度、电致发光(EL)光谱及色坐标(CIE 1931)。此外,利用红外热成像相机记录器件在连续工作下的表面温度变化。

3 结果与讨论

3.1 弹性 ACEL 纤维器件制备工艺流程

ACEL 纤维器件的制备流程如图 1(a)所示。采用共轭静电纺丝技术,将含有发光材料 ZnS:Cu 的 PVDF-HFP 基纺丝液均匀负载至弹性导电芯材表面,随后通过浸渍法包覆外电极,并使用 PDMS 封装。本器件呈现同轴结构(图 1(b)、(e)):从内至外依次为弹性芯材(厚度约 0.6 mm)、内电极(厚度约 0.033 mm)、发光层(厚度约 0.39 mm, 补充文件图 S1 证明发光层纺 5 层时, ZnS:Cu 颗粒分布最均匀)、外电极(厚度约 0.03 mm)以及 PDMS 封装层。图 1(c)进一步探究了发光层的形貌特征,其中图 1(c)-iii 展示了发光层的三维网络结构,验证了共轭静电纺丝方法能够实现发光材料在纤维基体中均匀负载的可行性。图 1(d)显示了器件

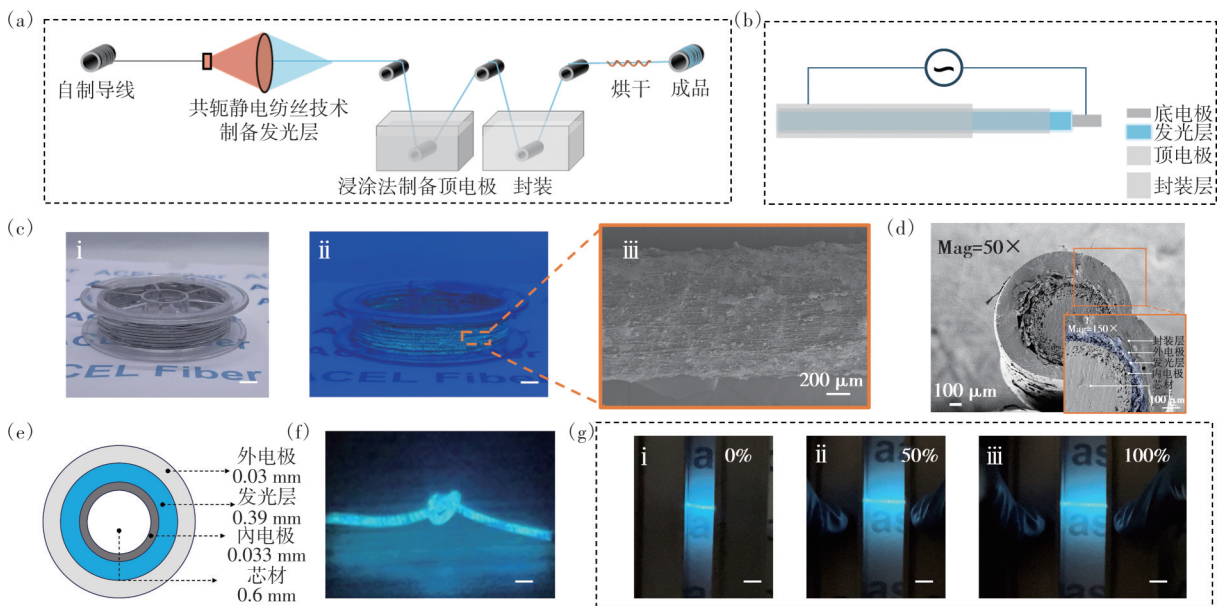


图 1 弹性 ACEL 纤维器件的制备工艺、微观结构及力学性能。(a)制备工艺流程;(b)多层结构模型;(c)发光层形貌:(i)日光及(ii)紫外光下照片(比例尺 1 cm),(iii)表面微观形貌;(d)器件横截面 SEM 图像(50 \times 与 150 \times);(e)各功能层厚度统计;(f)打结柔性展示(比例尺 1 cm);(g)拉伸性能测试(比例尺 1 cm)

Fig.1 Fabrication, structure, and mechanical properties of the stretchable ACEL fiber. (a) Fabrication process. (b) Multilayer architecture. (c) Luminescent layer morphology: (i) daylight and (ii) UV light photographs (scale bars: 1 cm), (iii) surface SEM image. (d) Cross-sectional SEM images (50 \times and 150 \times). (e) Layer thickness statistics. (f) Knotted flexibility (scale bar: 1 cm). (g) Tensile performance (scale bar: 1 cm)

的截面扫描电子显微镜(SEM)图像,器件各功能层之间界面贴合紧密,有助于确保施加在发光层上的电场的均匀性。在力学性能方面,图1(f)展示了器件在打结状态下的实物照片,说明器件具有良好的柔韧性。此外,该器件在承受0%~100%的拉伸应变过程中能够维持稳定的发光状态(图1(g))。上述结果初步证实了该器件在兼顾发光与力学柔韧性方面的优势及工艺可行性。

3.2 复合纤维纺丝液流变性能控制

本研究在纺丝前驱液中创新性地引入了流变助剂 RA-8410,以期通过流变学调控攻克颗粒悬浮难的问题。图2(a)展示了 RA-8410 掺杂质量分数 0~5% 纺丝液的稳态流变特性,溶液均表现出

明显的剪切变稀行为,且低剪切粘度随流变助剂增加而上升(从未添加时初始粘度为 $2.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 升至添加 5% RA-8410 粘度为 $6.14 \text{ Pa}\cdot\text{s}$),这有效抑制了颗粒沉降^[34-35]。正如沉降实验(图2(b)与图S2)所证实,未添加助剂的纺丝液 3 h 后沉降高度为 4.5 mm,而添加 5% 助剂的纺丝液无沉降。结合图2(c)的机理示意图可知流变助剂赋予溶液触变性能。RA-8410 中含有的针状微结晶能够在静置状态下自发交联,构建出具有一定屈服应力的三维网络结构,可以为无机颗粒提供较强的物理托举,从而缓冲沉降趋势。当溶液受到剪切外力时,该三维网络会表现出剪切变稀行为,避免对静电纺丝过程造成干扰^[36-37]。

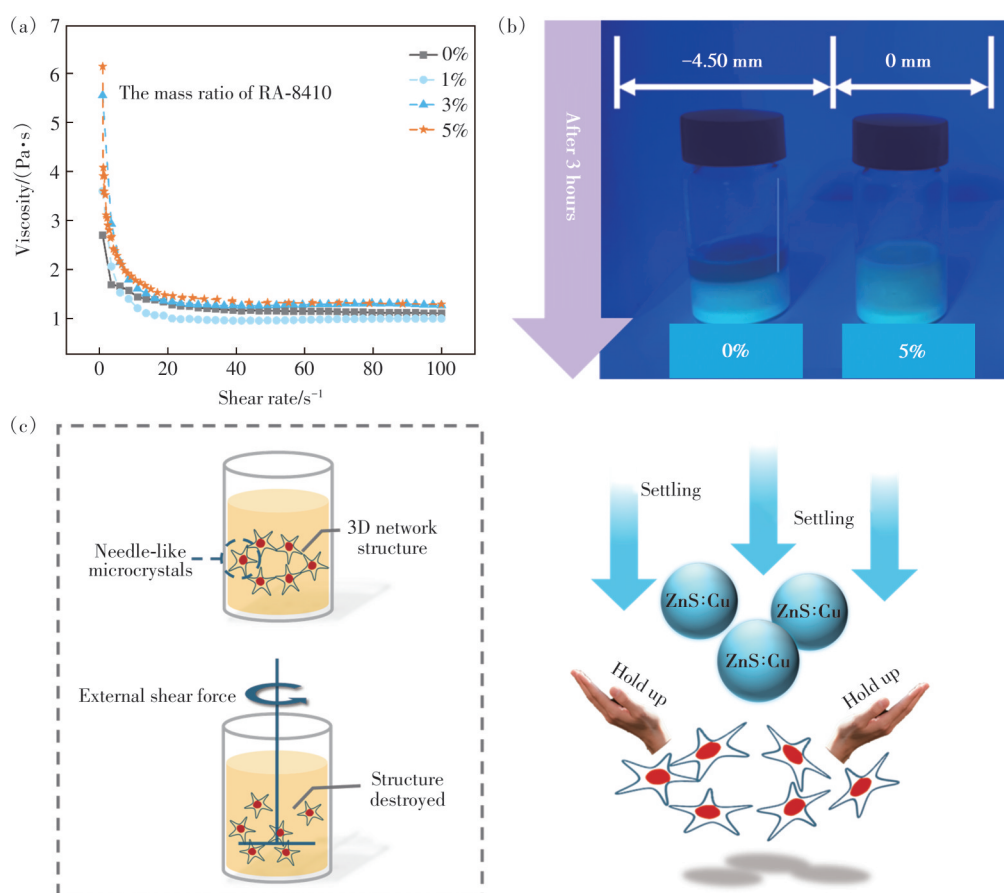


图2 RA-8410对纺丝液流变特性及颗粒悬浮稳定性的影响。(a)粘度随剪切速率的变化规律;(b)静置3 h后的颗粒沉降对比(0与5%);(c)防沉降触变网络机理示意图

Fig.2 Effect of RA-8410 on rheological properties and suspension stability. (a) Viscosity variation with shear rate. (b) Sedimentation comparison after standing for 3 h (0 vs. 5%). (c) Schematic of the anti-settling thixotropic network

3.3 复合纤维形貌、力学性能及电致发光性能调控

3.3.1 钛酸钡含量对复合发光层性能的影响

本研究通过引入BTO纳米颗粒对纺丝液进行改性^[22,38]。其中,ZnS:Cu的形貌、物相及光致发光特性详见图S3~S5。如图3(a)所示,不同质量

比(0:1、1:12、1:6、1:3)复合薄膜的傅里叶变换红外(FTIR)光谱特征峰未发生明显变化,证实BTO与基体之间为纯物理共混。发光层的介电性能随BTO掺杂浓度的变化如图3(b)所示。随着BTO比例的增加,发光层的介电常数得到较高提升。

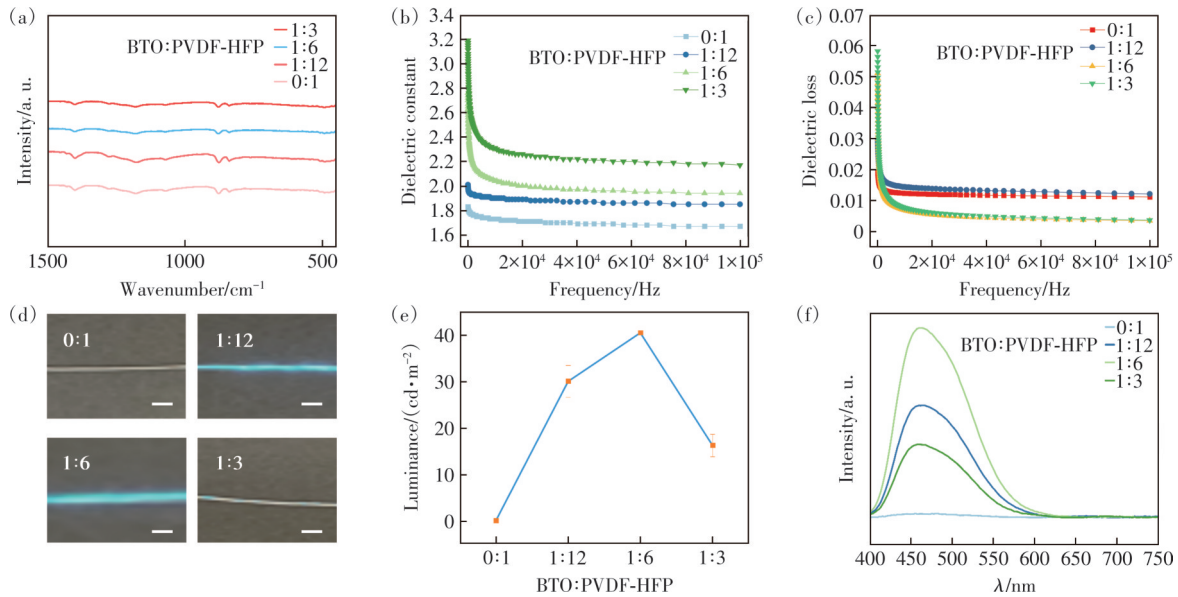


图3 BTO掺杂浓度对复合发光层性能的影响。(a)FTIR光谱;(b)介电常数及(c)介电损耗随频率的变化;(d)不同掺杂比例下器件的发光照片(比例尺1 cm);(e)发光亮度随BTO含量的变化规律;(f)不同比例器件的电致发光(EL)光谱
Fig.3 Effect of BTO concentration on emissive layer performance. (a) FTIR spectra. Frequency dependence of (b) dielectric constant and (c) dielectric loss. (d) Luminescent photographs of devices with varying BTO ratios (scale bar: 1 cm). (e) Luminance variation with BTO content. (f) Electroluminescence (EL) spectra

不同比例复合膜所制器件的发光亮度(图3(d)~(f))呈现先升后降的趋势。当质量比为1:6时,器件的亮度达到最佳,约为 $40.53 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。而当比例升高至1:3时,亮度有所下降。结合图3(c)分析,这主要归因于过量的无机纳米颗粒在基体中可能发生团聚,导致产生局域电场分布畸变,无法高效地集中激发发光颗粒;此外,密集的团聚体及其伴生的界面缺陷也会对光子射出产生物理遮蔽与散射,进而大幅削弱了器件的有效发光效率。

3.3.2 PDMS对发光层微观结构与力学性质的调控

PVDF-HFP基体相对较高的 α 相仍限制了器件在较高拉伸场景下的应用。在此基础上引入PDMS,利用其柔性链段的增塑效应协同调控复合发光层的晶相结构与力学性能。PVDF-HFP的晶相构象如图4(a)所示。其中, β 相规整的晶区排列有助于提升材料的机电耦合响应。基于图4(b)中不同PDMS含量(质量分数0~25%)复合薄膜的FTIR光谱,本研究结合Lambert-Beer定律精确定量计算了 β 相的相对含量 $F(\beta)$ ^[39]。计算公式如下:

$$A = 2 - \lg T, \quad (1)$$

其中, A 为绝对吸光度, T 为透射率。

$$F(\beta) = \frac{A_{\beta}}{1.26A_{\alpha} + A_{\beta}} \times 100\%, \quad (2)$$

其中, A_{α} 和 A_{β} 分别代表PVDF-HFP的 α 相(对应波长约 763 cm^{-1})和 β 相(对应波长约 840 cm^{-1})扣除

基线后的净吸光度,1.26为代表 β 相与 α 相特定吸收系数的比值。

图4(c)显示,随着PDMS含量的增加, β 相的相对含量从未添加时的78.7%逐渐上升,当含量达到20%时 $F(\beta)$ 达到接近100%。这归因于纺丝时的微观相分离:两者溶解度差异导致PDMS析出。其构建的受限空间协同电场极化与拉伸效应迫使PVDF-HFP分子链转变为全反式(TTT)构象,从而大幅提升 β 相含量。如图4(d)所示,复合薄膜的力学性能随PDMS掺杂量的增加呈现先升后降趋势,当达到20%PDMS时薄膜的拉伸性能最佳,这主要归因于PDMS弹性网络在PVDF-HFP基体中构建了有效的应力耗散通道^[40-41]。

3.3.3 PDMS含量对复合纤维形貌及电致发光性能的影响

如图5(a) i~iv所示,随着PDMS含量的增加,静电纺丝纤维的平均直径呈现出逐渐增大的趋势(从0%的 $(0.27 \pm 0.09) \mu\text{m}$ 增加至20%的 $(0.35 \pm 0.14) \mu\text{m}$)。较粗且紧密交织的复合纤维能够更稳定地包覆ZnS:Cu发光颗粒,从微观层面支撑了薄膜具备较好的力学性能^[42]。结合发光照片与趋势图(图5(b)~(c)),器件亮度随 $F(\beta)$ 的增加呈小幅提升,证实20%为兼顾力学与发光性能的最优配比^[20,43]。

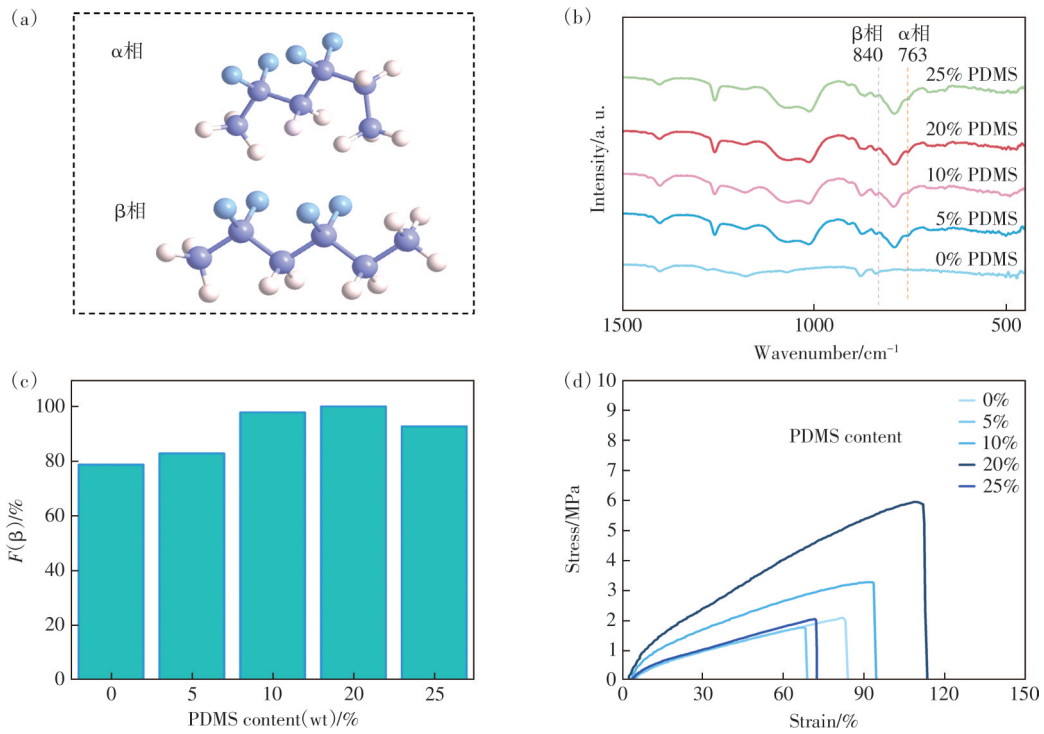


图 4 PDMS 对发光层微观结构与力学性能的调控。(a) α 相与 β 相的分子构象; (b) 不同 PDMS 含量的 FTIR 光谱; (c) β 相相对含量随 PDMS 浓度的演变; (d) 复合薄膜的应力-应变曲线

Fig.4 Modulation of microstructure and mechanical properties by PDMS. (a) Molecular conformations of α - and β -phases. (b) FTIR spectra at various PDMS contents. (c) Evolution of β -phase relative fraction with PDMS concentration. (d) Stress-strain curves of composite films

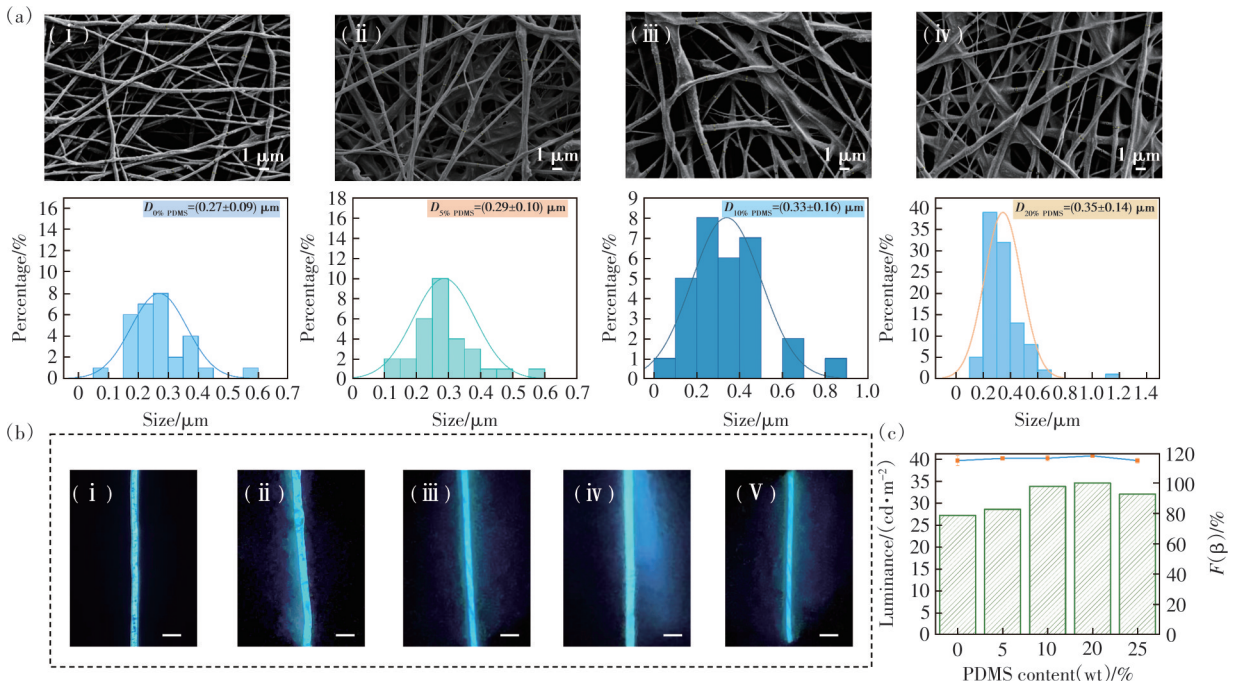


图 5 PDMS 含量对复合纤维形貌及电致发光性能的影响。(a) 发光层纤维的 SEM 图像及直径分布 (i ~ iv: 0, 5%, 10%, 20%); (b) 器件发光状态照片 (i ~ v: 0, 5%, 10%, 20%, 25%, 比例尺 1 cm); (c) 发光亮度与 β 相相对含量随 PDMS 含量的演变规律

Fig.5 Effect of PDMS content on fiber morphology and electroluminescent performance. (a) SEM images and diameter distributions of emissive fibers (i ~ iv: 0, 5%, 10%, 20%). (b) Photographs of luminescent devices (i ~ v: 0, 5%, 10%, 20%, 25%; scale bar: 1 cm). (c) Evolution of luminance and β -phase relative fraction with PDMS content

3.4 ACEL 纤维器件的电致发光特性与工作稳定性

为验证该策略在实际应用中的有效性,本节对器件的发光性能与耐久性进行了评估。5 kHz 下器件亮度随电压呈非线性上升(图 6(a)),在 $850 V_{\text{peak}}$ ($\sim 2.18 V \cdot \mu\text{m}^{-1}$) 时达 $235.03 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在 $200 V_{\text{rms}}$ ($\sim 0.51 V \cdot \mu\text{m}^{-1}$) 下(图 6(b)、(c)),亮度随频率提升小幅增加,且光谱显著“蓝移”,1~6 kHz 时色坐标由 (0.17, 0.41) 移至 (0.15, 0.25), 这归因于不同能级发光中心在不同交变频率下电子跃

迁概率的差异^[4,44]。工作稳定性方面(图 6(d)~(e)),96 h 连续驱动的亮度变化率 ($\Delta L/L_0$) 仅约 -0.02 , 且工作 300 min 后表面温度变化 ($\Delta T/T_0$) 趋近于 0, 具备优异的低热辐射特性。器件在缠绕(图 S6)及经历 50% 应变 1 000 次弯曲循环与拉伸(图 S7~S8)后,亮度变化率均维持在 -0.1 以内;其刺绣于织物上拉伸前后亦发光稳定(图 S9)。对标前沿文献(表 S1)证实,本策略成功打破了力学与发光性能的制约瓶颈,在兼顾高亮度与大拉伸应变方面具有较高优势^[16,18,45]。

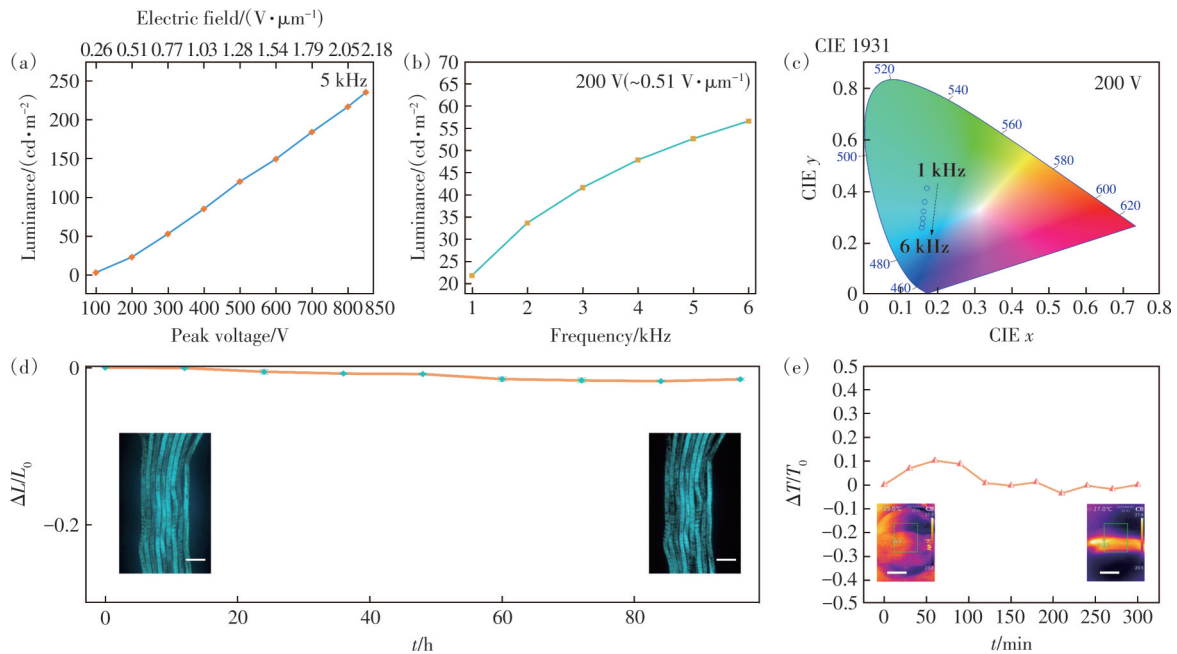


图 6 交流电致发光(ACEL)纤维器件的电致发光特性及工作稳定性。(a)发光亮度随驱动电压的变化(5 kHz);(b)发光亮度随驱动频率的变化(固定电压 $200 V_{\text{rms}}$, 电场强度 $\sim 0.51 V \cdot \mu\text{m}^{-1}$);(c)不同频率(1~6 kHz)下的 CIE 色坐标图;(d)连续工作期间的亮度变化率 $\Delta L/L_0$ 及实测照片(插图比例尺:1 cm);(e)表面温度变化率 $\Delta T/T_0$ 及红外热成像图(插图比例尺:1 cm)

Fig.6 Electroluminescent characteristics and operational stability of ACEL fiber devices. (a) Luminance variation with driving voltage (5 kHz). (b) Luminance variation with driving frequency (fixed voltage $200 V_{\text{rms}}$, electric field $\sim 0.51 V \cdot \mu\text{m}^{-1}$). (c) CIE chromaticity diagram at different frequencies (1~6 kHz). (d) Relative luminance change $\Delta L/L_0$ during continuous operation and optical photographs (inset scale bar: 1 cm). (e) Surface temperature variation $\Delta T/T_0$ and IR thermal images (inset scale bar: 1 cm)

4 结论与展望

本研究采用共轭静电纺丝技术,通过在 PVDF-HFP 基体中协同引入 BaTiO_3 纳米颗粒、PDMS 及流变助剂 RA-8410,成功制备了兼具较高亮度与较好弹性的交流电致发光(ACEL)纤维器件。研究表明,适量 BaTiO_3 (质量比 1:6)有效提升了介电常数与局部电场;质量分数 20% PDMS 不仅优化了纤维形貌,还诱导基体发生向 β 相的转变,

实现了器件力学拉伸性与发光亮度的平衡;同时,质量分数 5% RA-8410 构建的触变网络有效提升了纺丝液的悬浮稳定性,解决了连续纺丝中 ZnS:Cu 颗粒易沉降的难题。测试表明,所制备的弹性 ACEL 纤维器件展现出卓越的电致发光特性与环境适应性。在 6 kHz、 $200 V_{\text{rms}}$ ($\sim 0.51 V \cdot \mu\text{m}^{-1}$) 驱动下,器件亮度达 $56.64 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, 且在 100% 拉伸应变及复杂形变(如打结)下仍能维持稳定发光,并具备低热辐射与高工作耐久度。本研究为可拉伸

电致发光纤维器件的设计提供了一种新型策略, 未来有望在智能体育装备、柔性可穿戴显示及多模态可视化交互等前沿领域得到广泛应用。

本文补充文件和专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260059>

参 考 文 献:

- [1] WANG Z, SHI X, PENG H S. Alternating current electroluminescent fibers for textile displays [J]. *Natl. Sci. Rev.*, 2023, 10(1): nwac113.
- [2] QU C M, XU Y, XIAO Y, *et al.* Multifunctional displays and sensing platforms for the future: a review on flexible alternating current electroluminescence devices [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2021, 3(12): 5188-5210.
- [3] YANG Z L, WANG W W, PAN J, *et al.* Alternating current electroluminescent devices with inorganic phosphors for deformable displays [J]. *Cell Rep. Phys. Sci.*, 2020, 1(10): 100213.
- [4] ZHANG X, WANG F. Recent advances in flexible alternating current electroluminescent devices [J]. *APL Mater.*, 2021, 9(3): 030701.
- [5] WANG L, XIAO L, GU H, *et al.* Advances in alternating current electroluminescent devices [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(7): 1801154.
- [6] HUANG Z F, LI X, LIANG T L, *et al.* Smart mechanoluminescent phosphors: a review of zinc sulfide-based materials for advanced mechano-optical applications [J]. *Responsive Mater.*, 2024, 2(3): e20240019.
- [7] DINUWAN GUNAWARDHANA K R S, SIMORANGKIR R B V B, MCGUINNESS G B, *et al.* The potential of electrospinning to enable the realization of energy-autonomous wearable sensing systems [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(4): 2649-2684.
- [8] WANG S G, FAN P, LIU W B, *et al.* Research progress of flexible electronic devices based on electrospun nanofibers [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(46): 31737-31772.
- [9] KIM D C, CHOI M K, KIM D H, *et al.* Rise of intrinsically stretchable electroluminescent materials: toward free-form displays [J]. *npj Flexible Electron.*, 2025, 9(1): 50.
- [10] LIU W, WANG G, WANG S H. Intrinsically stretchable electroluminescent materials and devices [J]. *CCS Chem.*, 2024, 6(6): 1360-1379.
- [11] DAI Z, WANG N, YU Y, *et al.* One-step preparation of a core-spun Cu/P(VDF-TrFE) nanofibrous yarn for wearable smart textile to monitor human movement [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(37): 44234-44242.
- [12] TIAN J, MA Q L, YU W S, *et al.* High pairing rate Janus-structured microfibers and array: high-efficiency conjugate electrospinning fabrication, structure analysis and co-instantaneous multifunctionality of anisotropic conduction, magnetism and enhanced red fluorescence [J]. *RSC Adv.*, 2019, 9(19): 10679-10692.
- [13] JIANG Q, YUAN H L, DONG K, *et al.* Continuous and scalable manufacture of aggregation induced emission luminogen fibers for anti-counterfeiting and hazardous gas detecting smart textiles [J]. *Mater. Des.*, 2021, 205: 109761.
- [14] WU W Q, JIN X, TILIMAN A, *et al.* A flexible, highly sensitive, and anti-strain interference sensing fabric based on conjugated electrospinning core-shell conductive nanofiber yarns for ultra-stable pressure sensing and human-machine interaction [J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 503: 158602.
- [15] QI K, MA Z Y, WANG Z R, *et al.* Helical stretchable conductive sensing liquid metal nanofiber-yarn with embedded hierarchical structure for wearable electronic [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2025, 7(22): 10352-10363.
- [16] ZHANG Y, LIU M Y, WANG X, *et al.* Fluorescent dye-enhanced ACEL fibers for omnidirectional luminescence and voice-interactive human-machine interfaces [J]. *Adv. Fiber Mater.*, 2025, 7(6): 1788-1802.
- [17] 刘明宇, 张英, 陈漪, 等. ZnS:Cu 基液体桥接 ACEL 纤维器件的制备及应用 [J]. *发光学报*, 2025, 46(7): 1317-1325.
LIU M Y, ZHANG Y, CHEN Y, *et al.* Preparation and application of ZnS: Cu-based liquid bridged ACEL fiber device [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(7): 1317-1325. (in Chinese)
- [18] XIE Q Y, YAO Y J, HU L L, *et al.* Flexible silk-fibroin-based electroluminescent fiber with external-field-driven touch response and triboelectric sensing for smart wearables [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2026, 36(9): e14650.
- [19] HUND J, GRANUM H M, OLUFSEN S N, *et al.* Impact of stress triaxiality, strain rate, and temperature on the mechanical

- response and morphology of PVDF [J]. *Polym. Test.*, 2022, 114: 107717.
- [20] LI M Y, HAN X, ZHANG C L, *et al.* Self-reinforced piezoelectric response of an electroluminescent film for the dual-channel signal monitoring of damaged areas [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(3): 3786-3794.
- [21] WANG X, LIN Y T, ZHANG Y, *et al.* Coplanar pattern and temperature transient control in intelligent wearable multi-color alternating current electroluminescence devices [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(24): 2420613.
- [22] VON SZCZEPANSKI J, WOLF J, HU W H, *et al.* High-permittivity polysiloxanes for bright, stretchable electroluminescent devices [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(18): 2400132.
- [23] ZHANG C Y, GUO H T, ZHANG N, *et al.* Improved electromechanical performance of dielectric elastomers *via* constructing an all-organic composite structure [J]. *Macromolecules*, 2025, 58(13): 6698-6708.
- [24] WU W J, FAN J F, PANG Y S, *et al.* Soft, tough, and thermally conductive elastomer composites by constructing a curled conformation [J]. *Chem. Mater.*, 2023, 35(18): 7500-7510.
- [25] XIE Z L, ZHU J N, DOU Z L, *et al.* Liquid metal interface mechanochemistry disentangles energy density and biaxial stretchability tradeoff in composite capacitor film [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 7817.
- [26] GOMAA I, GAMAL F, KALIL H, *et al.* Synergistic waste-derived fillers induce polar phase transformation for high-performance fluorinated polymer [J]. *RSC Adv.*, 2026, 16(9): 7974-7991.
- [27] BHADRAPRIYA B C, BASITH S A, RAHUL M T, *et al.* Unleashing the potential: multifunctionality of PVDF-HFP based ternary nanocomposite films - magnetoelectric, energy harvesting and impact sensing performance [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2024, 315: 129057.
- [28] TAO R, SHI J H, RAFIEE M, *et al.* Fused filament fabrication of PVDF films for piezoelectric sensing and energy harvesting applications [J]. *Mater. Adv.*, 2022, 3(12): 4851-4860.
- [29] TRUPP F, BARELLA M, CIBILS R, *et al.* *In situ* syringe rotation system for heavy microparticle suspension stability in electrospinning technique [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2023, 94(3): 033906.
- [30] SOLTANI MN, MCQUILLAN R V, MAZAHERI O, *et al.* Engineering electrospun nanostructured coatings on macroscopic particles [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2026, 18(3): 6078-6087.
- [31] ZHU L, ZHU W Y, HU X, *et al.* PVP/highly dispersed AgNPs nanofibers using ultrasonic-assisted electrospinning [J]. *Polymers (Basel)*, 2022, 14(3): 599.
- [32] FERREIRA C A M, GUERREIRO S F C, ALVES N, *et al.* Influence of MgO/CuO nanoparticles dispersion methodology on the electrospun fiber's properties [J]. *Mater. Proc.*, 2022, 8(1): 125.
- [33] SPASOJEVIĆ L, IVANIŠEVIĆ I, SIKIRIĆ M D. Stability and application of TiO₂ nanomaterials in aqueous suspensions: a review [J]. *RSC Adv.*, 2025, 15(27): 21341-21368.
- [34] EMADY H, CAGGIONI M, SPICER P. Colloidal microstructure effects on particle sedimentation in yield stress fluids [J]. *J. Rheol.*, 2013, 57(6): 1761-1772.
- [35] NELSON A Z, KUNDUKAD B, WONG W K, *et al.* Embedded droplet printing in yield-stress fluids [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2020, 117(11): 5671-5679.
- [36] MÜLLER L A E, ZINGG A, ARCIFA A, *et al.* Functionalized cellulose nanocrystals as active reinforcements for light-actuated 3D-printed structures [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(11): 18210-18222.
- [37] BARABÉ B, ABAKUMOV S, GUNES D Z, *et al.* Sedimentation of large particles in a suspension of colloidal rods [J]. *Phys. Fluids*, 2020, 32(5): 053105.
- [38] STAUFFER F, TYBRANDT K. Bright stretchable alternating current electroluminescent displays based on high permittivity composites [J]. *Adv Mater.*, 2016, 28(33): 7200-7203.
- [39] SZEWCZYK P K, GRADYS A, KIM S K, *et al.* Enhanced piezoelectricity of electrospun polyvinylidene fluoride fibers for energy harvesting [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(11): 13575-13583.
- [40] LI J, LI Y S, LU Y Y, *et al.* PDMS/PVDF electrospinning membranes for water-in-oil emulsion separation and UV protection [J]. *Biomimetics*, 2022, 7(4): 217.
- [41] KAVARTHAPU V S, MANCHI P, KURAKULA A, *et al.* Flexible electrospun PDMS/PVDF-HFP composite nanofibers-based hybrid nanogenerators for efficient mechanical energy harvesting and multi-sensing applications [J]. *Fiber Mater.*, 2026, 8(2): 655-670.
- [42] JAYATHILAKA W A D M, CHINNAPPAN A, JI D X, *et al.* Facile and scalable electrospun nanofiber-based alternative

- current electroluminescence (ACEL) device [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2021, 3(1): 267-276.
- [43] LI L, HAN Z B, YENNAWAR H P, *et al.* Perfluorinated organosilicons enabling low-loss ferroelectric polymer composites for efficient energy storage and electroluminescence [J]. *Adv. Sci. (Weinh)*, 2025, 12(17): 2414380.
- [44] LIU Y B, XU M L, LONG H, *et al.* Alternating current electroluminescence devices: recent advances and functional applications [J]. *Mater. Horiz.*, 2024, 11(21): 5147-5180.
- [45] FU X M, WAN G X, GUO H C, *et al.* Self-healing actuatable electroluminescent fibres [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 10498.



陈漪(2000-),女,广东汕头人,硕士研究生,2023年于西安工程大学获得学士学位,主要从事交流电致发光纤维器件的研究。

E-mail: 2023210201005@mails.zstu.edu.cn



胡毅(1974-),男,湖北黄梅人,博士,教授,博士生导师,2008年于东华大学获得博士学位,主要从事电子智能纺织品的研究。

E-mail: huyi-v@zstu.edu.cn