

柔性电致变色器件：从刚性到柔性的材料与器件演进

樊媛媛^{1*}, 曾燕飞¹, 刘启凡¹, 黄雅珺¹

1. 广西民族大学, 材料与环境学院, 广西 南宁, 53100

摘要: 电致变色器件在外加电压下可逆调节光学性质, 在智能窗、柔性显示、可穿戴电子领域应用前景广阔。随着柔性电子技术发展, 电致变色器件正经历从刚性基底到刚柔结合再到本征柔性的技术演进。以这一演进为主线, 系统综述柔性电致变色器件研究进展: 阐述工作原理、器件结构及核心性能指标后, 按“无机材料柔性化改造→本征柔性有机材料→无机/有机复合”的逻辑分析电致变色材料柔性化策略, 同步梳理透明导电电极和电解质的发展历程, 并展望应用前景与面临的挑战。旨在为理解电致变色器件柔性化技术路径提供系统参考。

关键词: 电致变色器件; 柔性电子; 氧化钨; 导电聚合物; 透明导电电极

Flexible Electrochromic Devices: Evolution of Materials and Devices from Rigid to Flexible

Yuanyuan Fan^{1,*}, Qifan Liu¹, Yanfei Zeng¹, Yajun Hang¹

1. School of Materials and Environment, Guangxi Minzu University, Nanning 530100, China

Abstract: Electrochromic devices can reversibly modulate optical properties under applied voltage, showing broad application prospects in smart windows, flexible displays, and wearable electronics. With the rapid development of flexible electronics, electrochromic devices are undergoing a technological evolution from rigid substrates to rigid-flexible integration and further toward intrinsic flexibility. Taking this evolution as the main line, this paper systematically reviews the research progress of flexible electrochromic devices. After elaborating the working principles, device structures, and key performance indicators, this review analyzes the flexibility strategies of electrochromic materials following the logic of "flexible transformation of inorganic materials → intrinsically flexible organic materials → inorganic/organic composites". The development of transparent conductive electrodes and electrolytes is also examined in parallel. Finally, the application prospects and challenges are discussed. This review aims to provide a systematic reference for understanding the technological pathways toward the flexibility of electrochromic.

Keywords: Electrochromic devices; Flexible electronics; Tungsten oxide; Conductive polymers; Transparent conductive electrodes

随着全球能源需求持续增长, 建筑能耗在全球总能耗中占比超过 30%, 开发动态调节光热透过率的节能技术成为研究热点^[1, 2]。电致变色是指材料在外加电场驱动下发生可逆氧化还原反应, 进而改变其光学性质的物理现象。基于此构建的电致变色器件可在低电压下实现可逆颜色切换, 因其低功耗、高对比度和双稳态特性, 在智能窗、防眩目后视镜等领域获得广泛应用^[3, 4]。传统电致变色器

件多采用氧化铟锡 (ITO) 或氟掺杂氧化锡 (FTO) 涂层玻璃作为透明导电基底, 虽性能稳定, 但在机械形变下电极易产生裂纹, 难以满足可穿戴设备对柔性和贴合性的要求^[5,6]。为突破刚性局限, 研究者通过在聚合物基底上沉积电致变色材料, 借助纳米结构工程和低温工艺赋予器件可弯曲性。近年来, 本征柔性电致变色材料和全柔性器件结构的出现, 标志着电致变色技术正全面迈向柔性化时代^[7-9]。Chen 和 Mo 对导电聚合物基电致变色储能器件进行了系统综述^[10], 重点在于储能集成与电化学性能。与之互补, 本文聚焦“柔性化”这一维度, 从材料与结构的演进视角梳理该领域发展脉络, 旨在为理解电致变色器件柔性化技术路径提供系统参考。

1 基础原理与器件结构

1.1 工作原理

1.1.1 电化学与电致变色机制

电致变色本质上是电化学氧化还原反应的光学表现。在外部电压驱动下, 电子从透明导电层注入电致变色层, 同时电解液中的离子嵌入或脱出材料晶格以保持电荷平衡。这种离子和电子的双注入/抽取过程引发了材料价态的可逆变化, 宏观上表现为颜色的可逆变化^[11]。电致变色材料可分为阴极着色材料 (如三氧化钨, 在还原过程着色) 和阳极着色材料 (如氧化镍, 在氧化过程着色) 两大类^[12]。

1.1.2 导电聚合物的电致变色机理

导电聚合物因其独特的掺杂/去掺杂机制, 在柔性电致变色领域展现出独特价值^[13]。聚苯胺 (PANI) 是最具代表性的导电聚合物之一, 在不同电压下存在四种氧化还原态, 可在淡黄色、绿色、蓝色和深紫色之间可逆切换^[10,14]。聚吡咯 (PPy) 显示黄绿色 (中性态)、深棕色 (氧化态) 和蓝灰色 (还原态) 三种颜色状态。PEDOT:PSS 则因其出色的导电性和透明性, 既可作为电致变色层也可作为透明电极使用, 在深蓝色和透明态之间切换^[15]。

从柔性化视角看, 导电聚合物的核心优势在于其分子链的柔性本质, 天然适配于柔性器件。然而不同导电聚合物在环境稳定性和颜色丰富度方面存在差异: PEDOT:PSS 导电性和透明性最优但颜色单一, PANI 多色性突出但循环稳定性有待提升。器件设计中需要根据具体应用需求进行材料选择。

1.2 设备结构

现代电致变色器件通常采用“三明治”多层结构, 由透明导电层、电致变色层、离子储存层、电解质层和另一层透明导电层组成^[16]。透明导电层负责收集和传输电子, 刚性器件多采用 ITO/FTO 玻璃, 柔性器件则采用 ITO/PET、银纳米线复合电极等^[17]。电致变色层是核心功能层, 材料包括三氧化钨等无机材料或 PANI、PEDOT:PSS 等导电聚合物。离子储存层常采用氧化镍、聚苯胺或普鲁士蓝等^[18]。电解质层正从液态向凝胶电解质和全固态复合电解质发展^[19]。

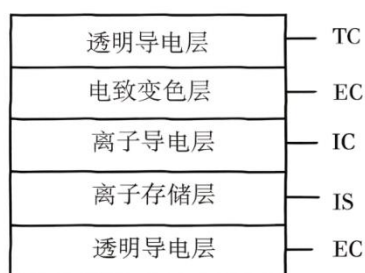


图1 电致变色器件经典五层结构示意图^[13]

Fig. 1 Schematic diagram of the classic five-layer structure of electrochromic devices^[13]

从结构演进角度看,电致变色器件经典五层结构示意图由图1所示,这一基本构型在从刚性到柔性的发展过程中保持稳定,变化的核心在于各层材料的选择和制备工艺的适配。这种“结构不变、材料演进”的特点表明,电致变色器件的柔性化本质上是材料科学的命题,材料创新是推动该领域发展的核心驱动力。

1.3 性能指标

评估柔性电致变色器件的性能主要依据光学调制范围、切换时间、着色效率、循环稳定性和颜色范围等参数^[14, 20]。光学调制范围是褪色态与着色态透射率的差值;切换时间是达到90%总调制幅度所需时间;着色效率反映单位电荷引起的光密度变化;循环稳定性包括电化学和机械弯曲两方面。这些指标之间存在相互制约——追求高光学调制往往需要更厚的变色层,这会延长切换时间。因此器件的优化设计需要在多个指标间寻找平衡点。

2 关键材料与技术: 柔性化演进的路径

2.1 电致变色材料的柔性化演进

电致变色材料是器件的核心,其柔性化程度直接决定了器件的机械性能。从刚性到柔性的演进,本质上是电致变色材料从“脆性无机物”向“本征柔性有机物”拓展的过程。方华靖等人指出无机材料化学稳定性高,有机材料颜色丰富、响应速度快^[5]。

2.1.1 无机材料的柔性化改造

如果说刚性器件时代奠定了电致变色的材料基础,那么无机材料的柔性化改造则是刚性时代的延续与改良。过渡金属氧化物具有化学稳定性高的优点,但其本征脆性是与生俱来的短板^[12]。

三氧化钨(WO_3)是最具代表性的阴极电致变色材料。在电场驱动下,阳离子注入 WO_3 晶格, W^{6+} 被还原为 W^{5+} ,薄膜由透明转变为深蓝色^[21]。然而,传统制备方法获得的 WO_3 薄膜过于致密或需要高温退火,与柔性基底不兼容,构成了无机材料柔性化的核心障碍。针对这一矛盾,研究者发展了多种策略。在纳米结构工程方面,刘建伟等将溶剂热法制备的 $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ 纳米线与银纳米线在PET基底上共组装得到柔性变色薄膜,在1.2 cm曲率半径下弯曲1000次后仍具有稳定的导电性和电致变色性能^[7]。一维纳米线结构通过滑移和网格释放弯曲应力,但多次弯曲后可能出现节点松动问题。

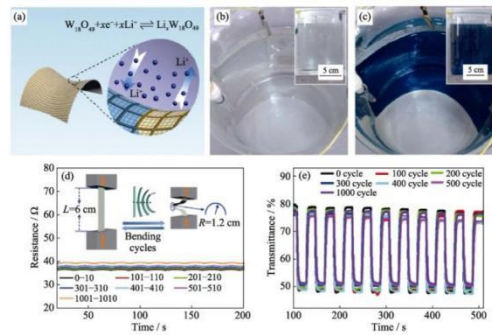


图 2 $W_{18}O_{49}$ 纳米线共组装柔性薄膜的综合性能^[7]

(a) 结构示意图; (b-c) 贴合于曲面烧杯的褪色态与着色态照片; (d) 弯曲次数

Fig. 2 Comprehensive performance of the $W_{18}O_{49}$ nanowire co-assembled flexible film^[7]

(a) Schematic diagram of the structure; (b-c) Photographs of the faded and colored states attached to a curved beaker; (d) Number of bending cycles

在元素掺杂方面, $W_{18}O_{49}$ 纳米线共组装柔性薄膜的综合性能由图 2 所示, 丁秉强等人通过钨元素掺杂调控 WO_3 晶格结构, 采用喷涂工艺构建多孔氧化钨钼电致变色层, 器件在 720 nm 处实现 46.1% 的光学调制幅度, 经过 4000 次循环后保持 87.7% 的初始性能^[21]。在复合电极结构方面, 刘星元等在室温下制备柔性 $WO_3/Ag/WO_3$ 薄膜^[22], 经过 1600 次弯折方阻几乎没有变化^[23]。

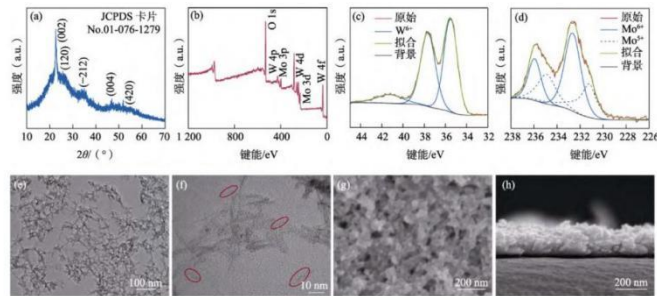


图 3 氧化钨钼纳米线 XRD 图谱及其电致变色的结构与形貌^[21]

(a) XRD 图谱; (b)~(d) XPS 测量图谱; (e)~(f) TEM 图图像; (h) 横截面 SEM 图像

Fig. 3 XRD patterns of tungsten-molybdenum oxide nanowires and their electrochromic structure and morphology^[21]

(a) XRD patterns; (b)~(d) XPS survey spectra; (e)~(f) TEM images; (h) cross-sectional SEM image

在其他无机材料中, 氧化镍 (NiO) 是最广泛应用的阳极电致变色材料, 氧化钨钼纳米线 XRD 图谱及其电致变色的结构与形貌由图 3 所示, 在离子脱嵌后从透明变为灰黑色^[24]。普鲁士蓝 (PB) 具有成本低廉、颜色中性等优点, 在电压作用下可实现无色、蓝色、绿色和黄色之间的切换^[18]。通过将 Fe^{3+} 替换为其他过渡金属, 可获得颜色更丰富的普鲁士蓝类似物^[25]。Ding 等人在室温下于柔性 PET 基板上沉积大面积 PB 薄膜, 构建的 PB/Zn 器件在 700 nm 处光学对比度达 68.3%^[26]。 PB 体系的优势在于制备温度低、与柔性基底兼容性好, 但体积变化和结晶水影响循环稳定性。

三种主要无机材料各有侧重: WO_3 综合性能最优但工艺温度高, NiO 适合作为对电极材料, PB 体系低温兼容性好但循环稳定性有待提升。

2.1.2 本征柔性的有机材料

导电聚合物的出现标志着电致变色材料从“改造刚性”到“本征柔性”的范式转变, 其分子链的柔性本质使它们天然适配于柔性器件。

聚苯胺因多色变化和良好的电化学性能成为研究最广泛的有机电致变色材料。李晓霞等人在导电聚酯薄膜上电聚合 PANI 膜, 在-0.2 至 2.0 V 电压范围内实现黄绿-绿-深蓝的循环变化^[15]。张邱平等以 PANI 为电致变色层制备对称结构柔性器件, 着色时间 3.2 s, 褪色时间 2.8 s^[13]。PEDOT:PSS 因其高导电性和透明性, 既可作为电致变色层也可作为透明电极。Cai 等人在银栅格/PEDOT:PSS 杂化膜上涂覆 WO₃ 纳米颗粒, 1200 次弯曲后光调制仅有 7.5% 的衰减^[15]。紫罗精是有机小分子电致变色材料的代表, 杨晨等人以 PVDF-HFP 为基底制备离子凝胶, 构筑了导电织物/变色凝胶/透明导电膜器件, 着色和褪色时间分别为 12 s 和 24 s^[27]。

尽管有机材料在柔性方面具有天然优势, 但其环境稳定性和长期循环寿命仍与无机材料存在差距。有机材料更适用于可穿戴和消费电子场景, 而在建筑节能窗领域, 无机材料仍具有不可替代的优势。

2.1.3 无机/有机复合体系

当无机材料的稳定性优势与有机材料的柔性优势难以兼得时, 复合体系代表了“刚柔融合”的探索方向。王宏志等在超薄 PET 基底上构建 AgNWs-W18O49 网络, 以 PEDOT:PSS 为电荷平衡层, 实现了可进行 500 次弯曲循环的柔性薄膜^[28]。丁秉强等人将氧化钨钼层与 PANI 对电极复合, 展示出宽光谱调控和高循环稳定性的兼顾潜力^[19]。复合策略的核心科学问题在于界面的相容性和电荷传输效率, 如何优化界面结构是实现协同增效的关键。

2.2 透明导电电极的柔性化演进

透明导电电极的演进遵循“ITO 玻璃→ITO/PET→新型柔性电极”的路径, 核心驱动力是解决导电性、透光率和机械柔性的矛盾。传统 ITO 玻璃性能优异但完全不可弯曲。ITO/PET 方案只是将脆性 ITO 层从玻璃转移到塑料上, 本质上未解决本征脆性问题^[5]。

在银纳米线电极方面, 何锐辉等人构建 AgNWs/PVA 复合透明电极, 550 nm 处透过率 85%, 面电阻 1.72 Ω, 成功应用于 WO₃ 基柔性器件^[17]。AgNWs 的主要瓶颈在于抗氧化性和长期服役稳定性。在碳基电极方面, 碳纳米管和石墨烯-纤维素纸膜展现出优异的力学柔韧性, 但方阻通常高于金属基电极^[29, 30]。MXene 基电极方面, Tian 等人将 MXene 修饰在 FTO 表面, PB 纳米颗粒均匀分散于 MXene 纳米片, 在 10000 圈循环中保持稳定^[31]。MXene 在导电性和可加工性方面表现出色, 但环境稳定性仍是制约因素。新型柔性电极的发展呈现两个趋势: 一维材料构建导电网络利用柔性适应形变, 二维材料与聚合物复合提升力学性能。

2.3 电解质的柔性化演进

电解质从“液态→凝胶态→全固态”的演进, 本质是在离子电导率、机械柔性和封装安全性之间寻求最优解^[5]。凝胶电解质在一定程度上平衡了液态的高电导率和固态的机械稳定性, 但仍存在溶剂挥发和界面分离隐患^[13, 27]。在全固态复合电解质方面, 丁秉强等人在聚氨酯基电解质中复合 Yb₃O(OH)₆Cl 纳米线, 获得 0.39 MPa 的界面黏附强度和 2.32×10⁻⁵ S/cm 的离子电导率, 器件在 4500 圈循环后仍保持 90.8% 的调制性能^[19]。全固态电解质是柔性器件实用化的关键使能技术, 当前核心挑战在于同时实现高离子电导率、宽电化学窗口和优异的界面稳定性。

2.4 器件结构的柔性化演进

从平面刚性到平面柔性, 再到纤维/织物基结构, 器件构型的演进对应着应用需求从“可弯曲”到“可穿戴”的升级。纤维状器件方面, Chen 等人将碳纳米管缠绕在预拉伸橡胶纤维上电沉积 PANI,

制备出可拉伸的纤维超级电容器^[31]。织物基器件方面,杨晨等人构筑了导电织物/变色凝胶/透明导电膜三明治结构,在弯曲状态下仍能保持变色性能^[27]。这类结构更接近实际可穿戴需求,但核心挑战在于如何在反复穿着、洗涤和机械形变中保持稳定的性能。

3 应用前景

从刚性到柔性的演进极大拓展了电致变色器件的应用场景。在电子显示领域,柔性器件凭借断电记忆和宽视角优势,可用于电子标签和可弯曲数字看板^[13]。在能源存储方面,与超级电容器集成可在充放电过程中直观显示能量状态^[10]。在智能建筑中,柔性电致变色窗可贴合于曲面玻璃,实现可见-近红外双波段调控^[21]。此外,织物基器件展示了与智能服装集成的可能性^[27],反射型器件在军事伪装领域也具有应用潜力^[14]。

4 挑战与展望

4.1 当前面临的挑战

在性能与柔性的平衡方面,柔性基底制成的器件性能往往不如玻璃基底器件,柔性化所需的材料改性和低温工艺往往以牺牲结晶质量为代价^[5]。在机械稳定性方面,多次弯折后材料和基底可能脱离,银纳米线等新型电极也存在腐蚀或氧化问题,机械失效是界面分层、材料疲劳和电极腐蚀的耦合结果。在全固态化方面,固态电解质的离子电导率仍普遍低于液态电解质^[19],大面积、高质量的界面接触是产业化面临的关键工程挑战。

4.2 未来发展方向

未来研究应聚焦于高性能柔性透明电极的开发,尤其是提升长期环境稳定性;兼具高着色效率和本征柔性的新型电致变色材料设计;高离子电导率全固态电解质的开发;电致变色纤维和大面积织物集成技术;以及与传感器、能量采集单元的多功能集成。从更长远的视角看,柔性电致变色器件将经历从“可弯曲”到“可拉伸”再到“自适应”的升级过程。

5 结论

本文以“从刚性到柔性”的技术演进为主线,系统梳理了柔性电致变色器件在材料、电极、电解质和结构层面的发展脉络,主要结论如下:

(1) 在演进路径方面,材料层面遵循“无机材料柔性化改造→本征柔性有机材料→无机/有机复合”的路径,无机材料通过纳米结构工程和元素掺杂实现柔性化,有机材料凭借分子链的柔性本质天然适配,复合材料则实现了刚柔优势互补;电极层面经历“ITO玻璃→ITO/PET→新型柔性电极”的升级,银纳米线、碳基材料和MXene等新型电极逐步解决了导电性、透光率和机械柔性的矛盾;电解质层面呈现“液态→凝胶态→全固态”的发展,纳米填料复合策略为平衡离子电导率与机械柔性提供了可行思路;结构层面从平面刚性向纤维/织物基结构拓展,更贴近可穿戴应用的实际需求。

(2) 在核心瓶颈方面,无机材料的柔性化往往以牺牲部分电致变色性能为代价,有机材料的环境稳定性和长期循环寿命仍与无机材料存在差距,复合体系的界面相容性和电荷传输效率有待优化,新型柔性电极的长期服役稳定性和抗氧化能力仍需验证,全固态电解质的离子电导率与液态体系相比仍有较大差距。

(3) 在未来发展方向上,柔性电致变色器件的进一步突破需要材料科学、界面化学、器件工程和制造工艺的协同创新。高性能柔性透明电极的开发应着重提升长期环境稳定性,新型电致变色材料的设计需兼顾高着色效率和本征柔性,全固态电解质的研究应聚焦于同时实现高离子电导率、宽

电化学窗口和优异的界面稳定性，此外还需推进电致变色纤维和大面积织物集成技术的发展以及与传感器、能量采集单元的多功能集成。

参考文献

- [1] Guo F, van Ruijven B J, Zakeri B, et al. Implications of intercontinental renewable electricity trade for energy systems and emissions[J]. *Nature Energy*, 2022, 7: 1144.
- [2] Ke Y, Chen J, Lin G, et al. Smart windows: electro-, thermo-, mechanochromics, and beyond[J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9: 1902066.
- [3] Rozman M, et al. Electrode materials for flexible electrochromics[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26(7): 3260.
- [4] Rai V, Singh R S, Blackwood D J, et al. A review on recent advances in electrochromic devices: a material approach[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2020, 22(8): 1-23.
- [5] 方华靖, 赵泽天, 武文婷, 等. 柔性电致变色器件研究进展[J]. *无机材料学报*, 2021, 36(2): 140-151.
- [6] Eh L S, Tan A W M, Cheng X, et al. Recent advances in flexible electrochromic devices: the prerequisites, challenges and prospects[J]. *Energy Technology*, 2018, 6(1): 33-45.
- [7] Wang J L, Lu Y R, Li H H, et al. Large area co-assembly of nanowires for flexible transparent smart windows[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(29): 9921-9926.
- [8] Zhou Y, Fang J, Wang H, et al. Multicolor electrochromic fibers with helix-patterned electrodes[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2018, 4(5): 1800104.
- [9] Yan C, Kang W, Wang J, et al. Stretchable and wearable electrochromic devices[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(1): 316-322.
- [10] Chen X Y, Liu Q F, Cheng L K, et al. Advanced electrochromic energy storage devices based on conductive polymers[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2024, 9: 2301969.
- [11] Zhang W, Li H, Hopmann E, et al. Nanostructured inorganic electrochromic materials for light applications[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(2): 825-850.
- [12] Ma D Y, Wang J M. Inorganic electrochromic materials based on tungsten oxide and nickel oxide nanostructures[J]. *Science China Chemistry*, 2017, 60(1): 62-70.
- [13] Singh R, Tharion J, Murugan S, et al. ITO-free solution-processed flexible electrochromic devices based on PEDOT:PSS as transparent conducting electrode[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(23): 19427-19435.
- [14] 李晓霞, 张胜虎, 许鹏程. 聚苯胺基柔性电致变色器件的设计与研制[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(增刊): 261-265.
- [15] Cai G F, Darmawan P, Cui M Q, et al. Highly stable transparent conductive silver grid/PEDOT:PSS electrodes for integrated bifunctional flexible electrochromic supercapacitors[J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6(4): 1501882.
- [16] Zhang W, Li H, Yu W W, et al. Transparent inorganic multicolour displays enabled by zinc-based electrochromic devices[J]. *Small Science*, 2021, 1: 2100040.
- [17] 何锐辉, 刘阿雷, 陈祥远, 等. 银纳米线基透明电极的预处理优化及其在柔性电致变色器件中的应用[J]. *人工晶体学报*, 2015, 44(7): 1861-1866.
- [18] 杨睿, 刘东琦, 王宇强, 等. 普鲁士蓝基电致变色器件的研究进展[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2025, 57(12): 71-80.

- [19] 丁秉强, 李耀刚, 石国英, 等. 柔性电致变色器件用聚氨酯/Yb₃O(OH) 6Cl 全固态复合电解质[J/OL]. 东华大学学报(自然科学版), 1-7.
- [20] Hassab S, Shen D E, Österholm A M, et al. A new standard method to calculate electrochromic switching time[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 185: 54-60.
- [21] 丁秉强, 李耀刚, 李克睿. 基于氧化钨钼电致变色层的柔性电致变色器件的制备与性能研究[J]. *中国钨业*, 2025, 40(0): 80-86+3.
- [22] Zhang S, Cao S, Zhang T, et al. Monoclinic oxygen-deficient tungsten oxide nanowires for dynamic and independent control of near-infrared and visible light transmittance[J]. *Materials Horizons*, 2018, 5(2): 291-297.
- [23] Li H L, Lv Y, Zhang X, et al. High-performance ITO-free electrochromic films based on bi-functional stacked WO₃/Ag/WO₃ structures[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 136: 86-91.
- [24] Cai G F, Wang X, Cui M Q. Electrochromic-supercapacitor based on direct growth of NiO nanoparticles[J]. *Nano Energy*, 2015, 12: 258-267.
- [25] Ding Y F, Sun H H, Li Z H, et al. Galvanic-driven deposition of large-area Prussian blue films for flexible battery-type electrochromic devices[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(6): 2868-2875.
- [26] 张邱平, 辛斌杰, 林兰天. 用于智能纺织品的柔性电致变色器件研究[J]. *上海纺织科技*, 2013, 41(4): 53-56.
- [27] Li K R, Zhang Q H, Wang H Z, et al. Light weight, highly bendable and foldable electrochromic films based on all-solution-processed bilayer nanowire networks[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(24): 5849-5857.
- [28] Kang Y J, Chun S J, Lee S S, et al. All-solid-state flexible supercapacitors fabricated with bacterial nanocellulose papers, carbon nanotubes, and triblock-copolymer ion gels[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(7): 6400-6406.
- [29] Tian M F, Lu M S, Wu W J, et al. Towards a large-scale and high-performance smart window based on Prussian blue: a revolutionary two-dimensional-material assisted in situ growth preparation method utilizing MXene[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(4): 2053-2065.
- [30] Chen X, Lin H, Deng J, et al. Electrochromic fiber-shaped supercapacitors[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(47): 8126-8132.
- [31] Zhang X W, Jing Y, Zhai Q F, et al. Point-of-care diagnoses: flexible patterning technique for self-powered wearable sensors[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(20): 11780-11784.

^{1,*}作者简介: 樊媛媛(2004-), 女, 本科生在读, 广西民族大学, 研究方向: 柔性电致变色器件: 从刚性到柔性的材料与器件演进。E-mail: 15578499807@163.com。