

热致变色材料在温度监测中的 机制剖析与前沿研究进展

庞志远, 赫明南*

(清华大学工物系, 北京 100084)

摘要: 热致变色材料因其对温度变化的高度敏感性和独特的颜色响应特性, 在温度监测领域展现出广阔的应用前景。这类材料通过颜色变化直观反映温度变化, 具有响应灵敏、不需要电源、可视化监测等显著优势。根据材料的化学性质, 热致变色材料可分为有机材料、无机材料和复合材料等。有机材料具有宽泛的变色温度范围和丰富的颜色变化, 适用于柔性显示和智能包装。无机材料凭借卓越的热稳定性和化学稳定性, 广泛应用于高温监测。复合材料结合了有机和无机材料的优点, 兼具良好的加工性能和可设计性。其变色机制涵盖分子结构变化、晶体相变、电子态跃迁以及化学键的动态平衡, 这些微观机制共同赋予了材料对温度变化的高度敏感性。热致变色材料在食品包装、医疗健康、智能窗户、工业安全监测等领域展现出广泛的应用潜力, 为温度监测提供了革命性解决方案。未来的研究将聚焦于新型材料体系的开发, 以提升材料的灵敏度、稳定性和响应速度, 进一步拓展其应用范围。

关键词: 热致变色; 温度监测; 有机材料; 无机材料; 复合材料

中图分类号: TQ311; TB383

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0183-08

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.034

Mechanism Analysis and Frontier Research Progress of Thermochromic Materials in Temperature Monitoring

PANG Zhiyuan, HE Mingnan*

(Engineering Physics Department of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Thermochromic materials have demonstrated broad application prospects in the field of temperature monitoring due to their high sensitivity to temperature changes and unique color response characteristics. These materials intuitively reflect temperature changes through color variations, offering significant advantages such as rapid response, no need for power supply, and visual monitoring. Based on their chemical properties, thermochromic materials can be classified into organic material, inorganic material, and composites. Organic materials are characterized by a wide color-changing temperature range and rich color variations, making them suitable for flexible displays and smart packaging. Inorganic materials, with their excellent thermal and chemical stability, are widely used for high-temperature monitoring. Composites combine the advantages of both organic and inorganic materials, possessing good processability and designability. Their color-changing mechanisms include molecular structural changes, crystal phase transitions, electronic state transitions, and dynamic equilibrium of chemical bonds. These microscopic mechanisms collectively endow the materials with high sensitivity to temperature changes. Thermochromic materials have shown extensive application potential in areas such as food packaging, medical health, smart windows, and industrial safety monitoring, providing revolutionary solutions for temperature monitoring. Future research will focus on the development of new material systems to enhance the sensitivity, stability, and response speed of the materials, further expanding their application field.

Keywords: Thermochromic; Temperature monitoring; Organic materials; Inorganic materials; Composites

收稿日期 Submitted date 2025-03-30; 修回日期 Revised date 2025-05-10; 录用日期 Accepted date 2025-07-10

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2024M761729)

*联系人, mnhe@mail.tsinghua.edu.cn

引用本文: 庞志远, 赫明南. 热致变色材料在温度监测中的机制剖析与前沿研究进展[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 183-190.

Citation: PANG Z Y, HE M N. Mechanism analysis and frontier research progress of thermochromic materials in temperature monitoring[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 183-190.

温度的变化是自然体系和合成材料化学与物理性质变化的重要驱动因素,贯穿工业生产、农业种植、医疗健康以及日常生活等多个领域^[1]。温度的波动可能对设备运行效率和系统安全性带来显著影响^[2]。在工业领域,温度监测是确保设备运行在最佳状态的关键,能够有效避免因过热或过冷引发的故障或事故^[3]。在农业领域,精准的温度控制能够优化作物生长环境,显著提高产量和质量^[4]。在医疗领域,温度监测对于药品保存、手术环境以及患者体温管理至关重要,直接影响治疗效果和患者安全^[5]。此外,温度监测在气候变化研究、能源管理以及食品安全等领域也发挥不可或缺的作用^[6]。通过实时监测温度可以及时发现异常并采取措施,从而保障系统的稳定运行、资源的高效利用以及人类生活的舒适与健康^[7]。

热致变色材料是一类能够随温度变化而发生颜色变化的智能材料,广泛应用于温度监测、显示和传感等领域^[8]。这类材料通过颜色变化直观反映温度变化,具有响应灵敏、无需电源、可视化监测等显著优势^[9]。热致变色材料能够智能地调整其结构和性质以响应温度变化,这种特性使其在监测温度的同时,能够以肉眼可见的方式呈现温度变化^[10]。由于其长寿命和防止材料失效的优点,近年来,这类材料受到广泛关注^[11]。随着科研人员对热致变色材料研究力度的不断加大,相关领域的研究已经取得了巨大的进展^[12]。根据变色的可逆性,热致变色材料可以分为两类:可逆热致变色材料(颜色随温度变化循环改变)和不可逆热致变色材料(颜色变化后不可恢复)^[13]。可逆热致变色材料能够在温度变化后恢复原始颜色适用于动态监测,而不可逆热致变色材料则在温度变化后保持颜色变化,用于记录温度变化的历史^[14]。近年来,材料科学的发展推动了热致变色体系的多样化,包括有机染料、无机配合物、高分子聚合物及纳米复合材料,使其在温度监测领域的应用场景不断拓展^[15]。在食品包装领域,热致变色材料可实时监测食品存储和运输中的温度变化,防止污染和变质^[16]。在医疗健康领域,通过集成到可穿戴设备中,热致变色材料能够监测体温异常,为快速识别高热患者提供了便捷手段^[17-21]。在智能窗户领域,利用热致变色材料可动态调节透光率,降低建筑能耗,助力低碳经济^[22-27]。在化学工程中,通过颜色变化监测催化剂烧结反应温度,保障反应过程的安全与高效。在火灾预警方面,热致变色材料通过颜色变化实现低温快速响应,为火灾预防提供可靠支持^[28]。在工业安全监测中,热致变色材料被用于航空航天、电子设备、锂电池等领域,实时监测温度异常,降低安全隐患^[29-31]。总之,热致变色材料在温度监测领域的出色表现,不仅提升了各行业的智能化水平,也为全球可持续发展提供了有力技术支撑。

热致变色材料的温度响应特性使其能够以多种形态存在,包括溶液、凝胶、表面接枝、自组装纳米颗粒、多层膜和固体^[32]。这些材料对温度极为敏感,并通过改变其微观

结构特性(如链的构象变化、膨胀、塌陷、溶胶-凝胶转变、疏水性/亲水性转变、溶解度和导电性)来响应温度变化,具体机制取决于材料的物理状态^[33]。热致变色材料的适应性和对环境变化的响应性使其在各种尖端应用中展现出巨大的潜力,包括智能窗口、生物传感器和可穿戴设备等,这些技术正在重新定义日常生活中的便利性和效率^[34]。

本文系统讨论热致变色材料的最新进展及其未来前景,重点讨论有机、无机以及复合材料在温度监测中的应用。根据热致变色材料对温度的响应机制,本文将具有可见响应的热致变色材料进行分类,并对各自的热致变色效应的设计策略、先进技术、结构-性质关系以及不同材料类别的优缺点进行评估。通过深入分析聚集、异构化、共振能量转移、电荷转移、相转变以及共价/非共价键的断裂与形成等机制,本文旨在为设计和开发具有高度应用价值的热致变色材料提供参考。

1 热致变色材料原理

温度的变化是驱动材料化学与物理性质改变的关键因素,而热致变色材料作为一类能够响应温度变化的智能材料,因其独特的可视化特性,在多个领域展现出广泛的应用潜力^[35]。根据材料的化学性质,热致变色材料可分为有机材料、无机材料和复合材料^[36]。有机热致变色材料通常具有较宽的变色温度范围(-100~100 °C),颜色变化丰富,表现出良好的可逆性和稳定性^[37]。无机热致变色材料则在较高温度(通常超过100 °C)下发生变色,具有较高的热稳定性和化学稳定性^[38]。复合热致变色材料结合了有机和无机材料的优点,兼具良好的加工性能和可设计性,能够制备成各种形状和尺寸的热致变色器件^[39]。

根据变色原理,热致变色材料可分为可逆和不可逆两类。可逆热致变色材料在加热后冷却时能够恢复到原始颜色,适用于智能窗户、温度指示器等动态监测应用。变色机理主要包括以下3种机制:一是物理变化,如晶型转变、晶格膨胀与收缩、结晶水的失去与吸湿;二是化学变化,如化合物的分解或重组以及电子转移引发的氧化还原反应;三是分子结构变化,如分子内电子转移平衡、溶剂分子数量的改变或配位几何形状的动态响应。这些机制的共同作用使材料能够在温度变化后恢复原始颜色,从而实现可逆的颜色响应。

不可逆热致变色材料是一种功能材料,其颜色变化源于在特定温度范围内因受热而发生的不可逆物理或化学变化,这种颜色变化具有永久性,无法通过降温恢复到原始状态,因此常用于记录材料经历的最高温度^[40]。冷却后,颜色不会恢复到原始状态,从而记录下材料经历的温度历史,这种特性使其在温度记录等领域具有重要应用价值。

热致变色材料的颜色变化主要依赖分子结构、晶体结构或电子态的变化。这些变化可以表现为分子内或分子间化学键的断裂与形成、晶体结构中晶格常数的改变或晶

体形态的变化、电子能级的跃迁或电子云密度的改变等。这些微观机制使材料在不同温度下展现出不同的颜色特性。

2 有机热致变色材料

有机热致变色材料因其卓越的柔韧性和优异的可加工性,在柔性显示、智能包装等领域展现出巨大的应用潜力,成为智能材料领域的研究热点^[41]。这类材料的独特优势在于其可逆/不可逆的热致变色性、对温度的高度敏感性以及分子设计的多样化可能性^[42]。其热致变色机制涉及分子结构、电子跃迁、晶体相变等多层次的动态响应,核心机理之一是温度驱动的电子转移或分子构象变化。温度通过电子-声子相互作用影响材料的带隙,从而改变其光学性质。温度升高导致分子振动加剧,分子内扭转角增大,削弱了共轭效应,进而引发颜色转变。此外,热致变色性与分子内电荷转移效应密切相关,温度变化会动态调整分子间的堆积模式,进一步影响材料的光学响应。同时,聚集态结构和分子堆积方式的变化也在热致变色行为中扮演重要角色,这些变化往往与分子间相互作用的动态调整密切相关。这种多维度的热致变色机制不仅为材料的性能优化提供了依据,也为智能温度监测材料的设计和应用开辟了新的方向。通过精准调控分子结构和聚集态特性可以实现对热致变色行为的精确调控,从而推动其在柔性显示、智能包装、传感器等领域的实际应用^[43]。

2.1 分子间氢键作用

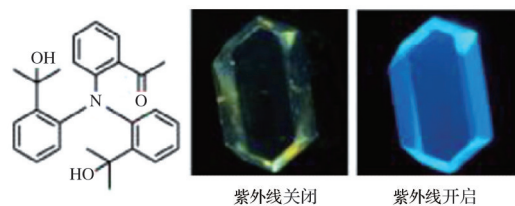
氢键的形成与强度是影响荧光变色的关键因素。分子内氢键和分子与溶剂之间的氢键通过调节分子刚性和共轭程度,直接影响荧光颜色和强度。分子刚性与松弛程度的变化是热致变色材料的核心机制,通过设计氢键作用可以实现对荧光颜色和强度的精确调控,为智能响应材料的设计提供了重要策略。

ZHENG等^[44]研究揭示了三苯胺衍生物在受热时的荧光变色机理。图1为三苯胺衍生物的化学结构和晶体在白光和365 nm光下的照片和加热后的图像^[44]。从图1可以看出,在固态下,三苯胺衍生物通过强分子内氢键形成刚性的金字塔结构,使其在室温下发蓝光。当温度升高时,分子刚性减弱,构象逐渐松弛,非辐射衰减增加,导致荧光强度降低并发生红移。当温度进一步升高至超过熔点时,分子进入液态,构象松弛程度进一步增加,辐射跃迁效率提高,荧光强度增强,颜色从暗绿色变为亮绿色。实验结果通过荧光光谱和颜色变化直观展示了温度对荧光颜色的调控作用,验证了加热导致的热致变色现象。

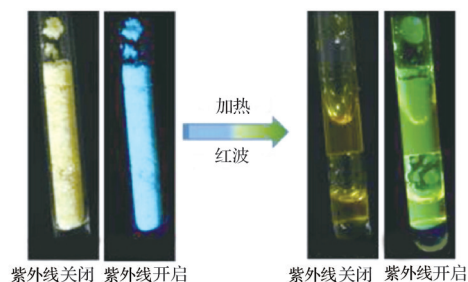
2.2 共价键可逆解离

共价键可逆解离指动态共价键在特定温度下可逆断裂与重组的能力。在一定条件下,共价键可以发生断裂并重新形成,整个过程处于动态平衡状态。XU等^[45]报道了基于动态共价键的可逆解离热致变色材料。异吲哚基自由基在溶液中表现出明显的热致变色行为。在室温下,二

聚体在溶液中主要以二聚体形式存在,表现出典型的二聚体吸收光谱(250~400 nm)。当温度升高时,二聚体逐渐解离为单自由基,伴随新的吸收峰出现在长波长区域,导致溶液颜色发生变化。温度升高削弱了二聚体中动态共价键的键能,导致自由基解离并表现出颜色变化。降温时,键能恢复,自由基重新结合为二聚体颜色恢复。



(a) 三苯胺衍生物的分子结构及晶体在白光和365 nm光下的照片



(b) 加热至液态前后的晶体的图像

图1 三苯胺衍生物的分子结构和晶体在白光和365 nm光下的照片和加热后的图像

Fig.1 Photos and heated images of molecular structure and crystal of triphenylamine derivative under white light and 365 nm light

2.3 分子间电荷转移

电子供体与受体之间的电荷转移效率变化是导致材料吸收光谱偏移的关键机制,也是材料实现变色的主要原理。JIANG等^[46]报道一种基于三元体系的变色材料,该体系由结晶紫内酯(CVL)作为电子供体,双酚A(BPA)作为电子受体,十六醇作为溶剂构成。CVL的分子结构中包含1个内酯环,在高温条件下,内酯环会发生开环或闭环的结构变化,从而破坏或形成分子的共轭体系,进而引发颜色变化。BPA的羟基(—OH)在高温下会释放质子(H⁺),并与CVL发生电子转移反应,进一步调控体系的变色行为。这一体系的核心机制在于CVL内酯环的结构变化以及BPA质子的释放与结合,两者协同作用实现了材料的变色功能。

3 无机热致变色材料

无机热致变色材料因其卓越的热稳定性和化学稳定性,在高温监测与防伪领域展现出广阔的应用前景。这类材料通过温度变化触发颜色的动态转变,其变色机制涉及晶体结构、分子构型和电子状态等多层次的物理化学变化,具有复杂而精妙的科学基础。

在晶体结构层面,温度变化会引发材料的晶型相变,主要表现为重建型和位移型两种形式^[47]。这种晶型转变会显著改变材料的光吸收特性,从而实现颜色的可逆或不

可逆变化。此外,金属合金或氧化物在加热过程中可能发生晶格无序化或氧化还原反应,进一步丰富了材料的变色机制。

在分子结构层面,配位体的几何构型变化是重要的变色驱动力^[48]。例如,过渡金属配合物的配位数或几何构型随温度变化而调整,直接影响d-d电子跃迁的能量,从而改变材料的光学吸收特性。此外,溶剂分子的脱离或离子脱水也会改变材料的电子结构,进一步影响其颜色表现。

电子转移和氧化还原反应同样是无机热致变色材料的重要机制。金属离子的价态变化通常伴随着电子在离子间的转移,这种过程会显著改变材料的吸收光谱,从而实现颜色的动态调控。此外,热分解或化合反应可能导致材料组分的变化,或伴随氧化还原反应的发生,进一步驱动颜色的转变。

无机热致变色材料的变色机理涵盖晶体结构、分子构型和电子状态等多个维度。这些复杂物理化学过程的共同作用赋予了材料独特的热致变色特性,为其在高温监测等领域的广泛应用奠定了坚实的科学基础。

3.1 晶体相变

不同温度下晶体材料的晶体结构下发生可逆或不可逆的晶型转换^[49]。LIAO等^[50]通过实验和理论计算揭示了 $\text{Cs}_7\text{Cd}_3\text{Br}_{13}$ 在高温下的相变行为。研究发现, $\text{Cs}_7\text{Cd}_3\text{Br}_{13}$ 在约523 K的温度下会发生可逆的相变,转变为 Cs_2CdBr_4 。这种相变可通过加热和冷却循环反复实现,表明其具有热致可逆性。在室温下, $\text{Cs}_7\text{Cd}_3\text{Br}_{13}$ 具有独特的晶体结构,其中 Cd^{2+} 以两种配位模式共存,分别为四面体和八面体,这种结构特征使 Cd^{2+} 能够在不同配位环境中动态分布。这种配位环境的变化直接决定了材料的发光特性,为热致变色的应用提供了依据。

LIANG等^[51]报道了关于基于钒氧化物(VO_2)纳米结构的智能窗材料长期稳定性与效率的研究成果。该文章深入剖析了 VO_2 的变色机理以及借助多层结构设计优化其环境稳定性和光学性能的方法。 VO_2 作为典型的热致变色材料,其变色机理主要源于晶体结构的相变。 VO_2 在低温环境下呈现单斜晶系(M相),在高温时则转变为四方晶系(R相)。这种相变过程伴随着显著的光学性能变化,特别是在近红外区域(NIR)。 VO_2 的相变过程具有可逆性,能够在不同温度下反复切换状态,这为智能窗实现动态调光功能奠定了基础。

HE等^[52]研究一种新型二维热致变色钙钛矿材料(TMPI,即 $\text{Tha}_2\text{MAPbI}_4$,其中Tha为硫脲,MA为甲胺),该材料在智能窗户领域展现出卓越的环境稳定性与热致变色性能。图2为TMPI的制备过程、冷态和热态下的照片及晶体结构^[52]。从图2可以看出,处于冷态(低温)时, TMPI呈现零维钙钛矿结构, $[\text{PbI}_6]$ 八面体分散且未连接,晶格内的结合水以及MA填充在八面体间隙,赋予材料较

高透明度。随着温度上升进入热态(高温),结合水蒸发, $[\text{PbI}_6]$ 八面体通过角共享连接形成层状,转变为二维钙钛矿结构,硫脲与甲胺作为间隔层分布于不同平面间,这一结构变化致使材料颜色与光学性质显著改变。TMPI展现出极佳的环境稳定性,在高湿度条件下,其热致变色性能依然能够长时间维持。通过监测温度来调整材料结构为智能窗户的实际应用提供了关键优势。

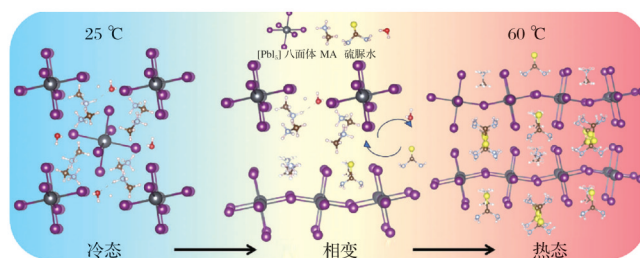
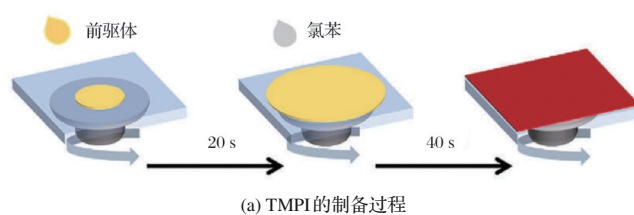


图2 TMPI的制备过程、冷态和热态下的照片及晶体结构
Fig.2 Preparation process, photos and crystal structure at cold and hot states of TMPI

3.2 金属离子几何构型变化

MORAIS等^[53]以1-丁基-3-甲基咪唑氯化物($[\text{BMIm}]\text{Cl}$)和六水合氯化镍($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)配位反应合成的 $[\text{BMIm}]_2[\text{NiCl}_4]$ 复合物转变温度低(30~40 °C),颜色变化对比度高(从浅绿色到强烈蓝绿色)。常温下, $[\text{BMIm}]_2[\text{NiCl}_4]$ 复合物中镍离子(Ni^{2+})呈八面体构型,与氯离子(Cl^-)和咪唑阳离子($[\text{BMIm}]^+$)配位,升温至约40 °C时,构型转变为四面体,颜色改变,此过程可逆,依赖水分子和氯离子与镍离子间的动态平衡。图3为 $[\text{BMIm}]_2[\text{NiCl}_4]$ 配合物热变色机理和核磁分析^[53]。从图3b和图3c可以看出,升温时所有共振峰向高场移动,反映了镍离子 $[\text{NiCl}_4]^{2-}$ 、 $[\text{BMIm}]^+$ 和水分子间相互作用。从图3d可以看出, ^{35}Cl 核磁共振谱图中谱峰半高宽随温度变化趋势,在313 K(40 °C)前后变化趋势明显分界,与热致变色复合物转变温度一致,表明镍离子几何构型改变。这些核磁共振数据为理解 $[\text{BMIm}]_2[\text{NiCl}_4]$ 复合物热致变色机制提供直接证据,通过分析谱图化学位移和谱峰变化,有助于优化材料性能,对开发高性能热致

变色材料意义重大。

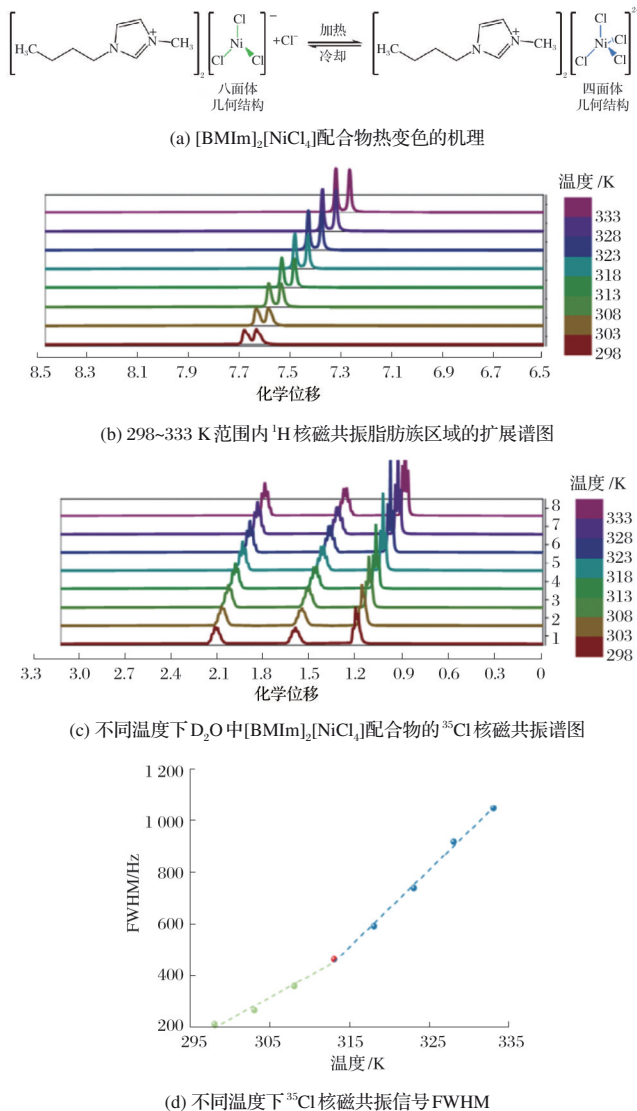


图3 [BMIm]₂[NiCl₄]配合物热变色机理和核磁分析

Fig.3 Mechanism and nuclear magnetic analysis of thermochromism of [BMIm]₂[NiCl₄] complex

无机热致变色材料的机理核心在于温度诱导的物理化学结构变化,包括晶型转变、配位环境改变、电子转移等。无机热致变色材料的应用覆盖智能建筑、工业检测、纺织品等多个领域,未来需在环保性、灵敏度和多功能性方面进一步突破。

4 复合材料

复合材料较之于单一材料优势极为显著,集中体现在性能优化、设计灵活、轻量化、耐久性佳以及环境友好等层面^[54]。通过融合不同材料的特性,复合材料得以在实现轻量化的同时大幅增强强度与刚度。不仅如此,它还具备卓越的耐腐蚀性与耐高温性能,能在极端环境中维持稳定状态。多功能集成堪称复合材料的一大突出特性。复合材料可将传感、驱动以及能量存储等功能集于一身,在智能纺织品与可穿戴设备领域应用前景广阔^[55]。从设计角度来看,复合材料定制程度极高,能够依据特定需求灵活调

整成分与结构,契合多样化的性能要求。其具备的复杂形状成型能力使其可借助模具成型或者3D打印技术,制造出传统材料难以达成的部件。轻量化亦是复合材料的显著优势,其质量一般远低于传统金属材料,然而强度与刚度却更为出色。论及耐久性,复合材料在循环载荷作用下展现出优异的抗疲劳性能,在高温、高湿度以及腐蚀性环境中均能保持稳定。通过整合多种材料的特性,复合材料达成了单一材料无法企及的性能与功能。其优化的力学性能、多功能性、设计灵活性、轻量化特质、出色的耐久性以及环境友好属性,充分彰显出热致变色监测材料在不同领域的应用前景。

WU等^[56]报道了可逆热致变色纳米纤维膜(RT-NFMPCMs)的变色机理。该机理主要依赖电子供体、电子受体和有机溶剂。当环境温度高于有机溶剂的熔化温度时材料无色。低于该温度时材料显示绿色。RT-NFMPCMs的变色基于电子供体与电子受体间的反应,受有机溶剂熔化和结晶温度调控,为智能纺织品及热调节应用提供了新途径。图4为RT-NFMPCMs的热致变色机理和制备过程^[56]。采用共轴静电纺丝技术制备RT-NFMPCMs,内针装载核心溶液,外针装载壳层溶液,在高压电场下同时纺丝形成核壳结构纳米纤维。通过调控溶液参数,可制备出理想性能的产品。其核壳结构避免了相变材料泄漏,提升了热稳定性,经过100次加热-冷却循环,潜热几乎不变,循环稳定性卓越。

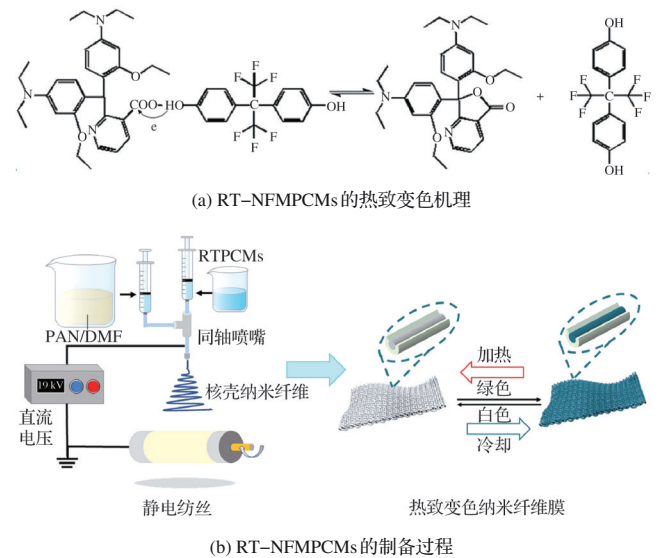


图4 RT-NFMPCMs的热致变色机理和制备过程
Fig.4 Thermochromic mechanism and formation process of RT-NFMPCMs

LIANG等^[51]研究表明,通过精心设计VO₂/TiO₂/SiO₂多层结构能够显著优化VO₂的光学性能。图5为VO₂/TiO₂/SiO₂工作原理和制备工艺^[51]。利用原子层沉积(ALD)技术在VO₂表面构建一层非晶态TiO₂,这一设计巧妙地赋予了VO₂卓越的紫外线防护能力,有效避免了因紫外照射引发的性能衰退。在此基础上,进一步在TiO₂表面涂覆超

疏水 SiO₂ 涂层, 不仅增强了 VO₂ 的湿度稳定性, 还成功维持了可见光透过率。VO₂ 独特的变色特性源于其晶体结构从 M 相到 R 相的可逆相变过程, 这一相变伴随显著的光学性能改变, 使 VO₂ 成为智能窗应用的理想材料。研究中所设计的 VO₂/TiO₂/SiO₂ 多层结构显著提升了 VO₂ 在复杂环境中的稳定性和光学性能, 为其商业化应用提供了有力的技术支撑。

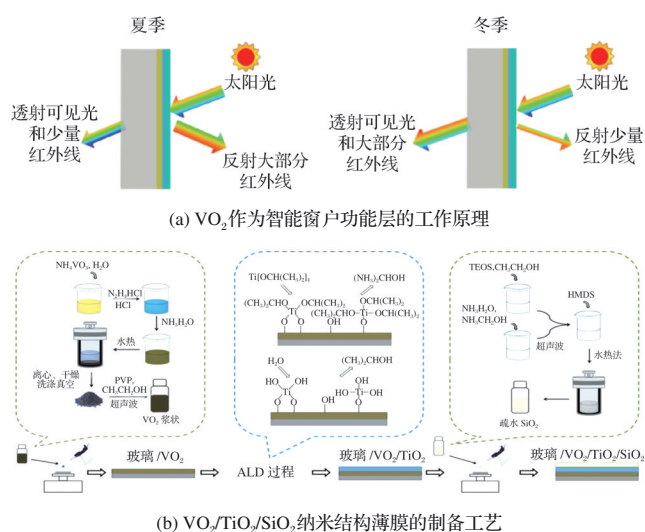


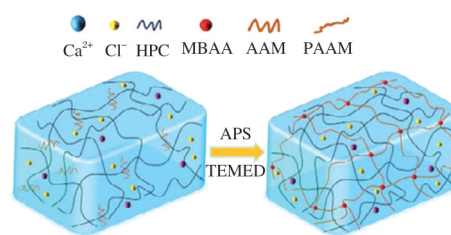
图5 VO₂/TiO₂/SiO₂ 工作原理和制备工艺

Fig.5 Working mechanism and preparation process

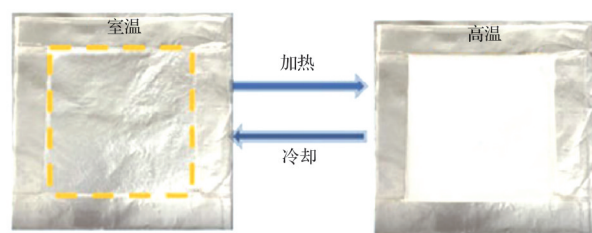
of VO₂/TiO₂/SiO₂

WANG 等^[57]详细描述一种基于羟乙基纤维素(HPC)的热致变色水凝胶的机理及其在智能窗户中的应用。图6为双网络凝胶制备过程、在不同温度下的照片以及在车辆中的应用^[57]。热致变色水凝胶的变色行为主要基于HPC的低临界溶液温度(LCST)特性。HPC是一种典型的热致变色材料, 其在温度变化时会发生从亲水到疏水的相转变, 从而导致光学性能的变化。HPC在低于LCST时表现为亲水性, 聚合物链在水中充分伸展, 水凝胶保持透明。当温度超过LCST时, HPC的聚合物链会因氢键的破坏而发生收缩, 导致聚合物链从水中析出, 水凝胶变得不透明。温度变化导致聚合物链的亲水-疏水转变产生了颜色的变化。无机材料CaCl₂通过离子交联和氢键作用调节了相变温度, 说明无机材料加入可以提高有机聚合物材料的变色区间, 使其适应不同的应用场景。

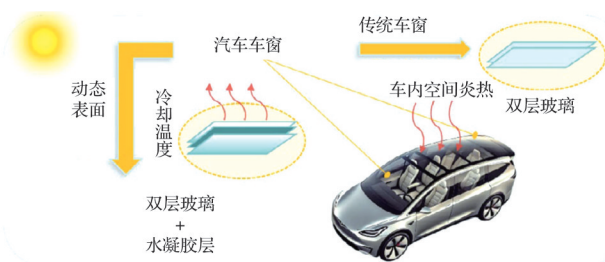
近年来, 复合材料在提升热致变色材料的温度监测性能方面展现出显著优势。通过将热致变色组分与高导热性纳米材料及具有稳定结构的材料复合, 有效拓宽了材料的热响应范围, 实现了对温度敏感性的精准调控。这种协同效应不仅增强了材料的环境适应性, 还通过结构优化提升了颜色对比度, 从而提高了视觉辨识度。复合策略同步解决了传统热致变色材料循环稳定性差和响应滞后等瓶颈问题, 为生物医药冷链监测、智能可穿戴传感及工业设备过热预警等领域提供了高可靠性的解决方案。



(a) 双网络凝胶制备过程



(b) 智能窗在室温下和高温下(不透明状态)的照片



(c) 智能窗在车辆中的应用

图6 双网络凝胶制备过程、在不同温度下的照片以及其在车辆中的应用

Fig.6 Preparation process, photos at different temperatures and application in vehicle of dual-network gel

5 结论

热致变色材料作为一种智能材料, 因其对温度变化的高度敏感性和独特的颜色响应特性, 在温度监测领域展现出广阔的应用前景。通过材料的合理设计与优化, 其性能和应用范围得以进一步提升。

有机材料以宽泛的变色温度范围和丰富的颜色变化见长, 适用于柔性显示和智能包装。无机材料凭借卓越的热稳定性和化学稳定性, 广泛应用于高温监测。复合材料则融合了有机和无机材料的优点, 兼具良好的加工性能和可设计性。其变色机制涵盖分子结构变化、晶体结构转变、电子态跃迁以及化学键的动态平衡, 这些微观机制共同赋予了材料对温度变化的高度敏感性。

尽管热致变色材料在性能上表现出色, 但其实际应用仍面临诸多挑战。材料的合成与制备工艺需要进一步优化, 以实现规模化生产和一致性的质量控制。部分材料在恶劣环境下的稳定性和耐久性不足, 需要通过掺杂、复合等手段提升其热稳定性和化学稳定性。此外, 在食品、医药等与人体密切相关的领域, 环境影响和生物相容性问题尤为重要, 需要深入评估其安全性和潜在相互作用。

未来的研究将聚焦于新型材料体系的开发, 以提升材料的灵敏度、可逆性和响应速度。多功能集成与智能化设

计将成为重要方向,通过构建实时温度预警系统,进一步拓展热致变色材料的应用边界。跨学科合作将推动材料从实验室走向产业化,为精准医疗、智慧城市等场景提供革命性解决方案。随着对材料响应机制的深入理解,热致变色材料有望在温度监测及其他跨行业领域实现更广泛的应用,助力构建更加智能、互联且能精准感知温度变化的未来。

综上所述,热致变色材料正从实验室走向产业化,其在温度监测领域的创新应用正在推动工业安全、电子器件和生物医学等领域的智能化升级。通过材料设计、纳米技术、多学科交叉等手段,热致变色材料的温度响应范围、灵敏度和功能性将进一步拓展,为智能温度监测提供革命性解决方案,为人类创造更高效、更安全、更可持续的未来。

参考文献

- [1] BASSO M, COLUSSO E, SGARBOSSA F, et al. Ultrafast laser crystallization dynamics of thermochromic VO₂ thin films by simple moisture-assisted sol-gel[J]. *Chemistry of Materials*, 2024, 36(11): 5508-5520.
- [2] CHEN F P, WU X W, LU G Q, et al. Thermochromic hydrogels with adjustable transition behavior for smart windows[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(16): 21013-21023.
- [3] MAI Z X, LIN Z H, SONG P, et al. *In situ* electrospun thermochromic menthol-loaded fibrous membranes for monitoring body temperature indicator[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(24): 15043-15057.
- [4] OSHITA M, MURATA H, YAMAMOTO H, et al. High-pressure route to irreversible thermochromic materials[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2024, 128(24): 10184-10191.
- [5] ÖZMEN E, SOMERS N, LOSEGO M D. Rapid, direct fabrication of thermochromic ceramic composite sensors via flash lamp annealing[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2024, 26(11): 2400323.
- [6] BAEK S, HEO J M, BAE K, et al. Co-assembly-directed enhancement of the thermochromic reversibility and solvatochromic selectivity of supramolecular polydiacetylene[J]. *Langmuir*, 2024, 40(34): 18272-18282.
- [7] CHEN W Q, LIN Z Q, HU S. An all-weather sol-gel thermochromic energy-saving smart window[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(51): 70863-70873.
- [8] DONG Z Q, YI B, CHEN X, et al. Aqueous and solid phase synthesis of [Ni(Me₃en)(acac)] BPh₄ and its solvatochromic properties: A laboratory experiment for first-year undergraduates[J]. *Journal of Chemical Education*, 2024, 101(5): 2080-2086.
- [9] GAO W C, WANG L Y, WEI Q Y, et al. Pure physical-crosslinked high-strength thermochromic hydrogel for smart window and energy conservation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(16): 2418941.
- [10] GRAHAM S A, MANCHI P, PARANJAPPE M V, et al. Multifunctional thermochromic dye-integrated hybrid nanogenerators for mechanical energy harvesting and real-time iot sensing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(51): 2409608.
- [11] GUAN H J, LU Y H, YOU Y J, et al. Toughness and thermoresponsive hydrogel for sandwich smart window with adaptive solar modulation and energy saving[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(39): 52997-53006.
- [12] HAN R J, YUE Q, CAO Y J, et al. Highly sensitive two-dimensional ruddlesden-popper perovskites for thermochromic smart windows[J]. *ChemNanoMat*, 2024, 10(10): e202400306.
- [13] HU J M, ZHU S T, GU M, et al. Reversible thermochromic perovskite-based dynamic optical encryption and holographic inference[J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(5): 2007-2015.
- [14] PENG H C, FU R F, ZHAO Y H, et al. Dynamically tunable thermochromic smart windows for building energy conservation[J]. *ACS Materials Letters*, 2024, 6(8): 3404-3413.
- [15] KAUFMAN M, VLCEK J, HOUSKA J, et al. Design and scalable synthesis of thermochromic VO₂-based coatings for energy-saving smart windows with exceptional optical performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(42): 57268-57276.
- [16] WANG M, CHEN X, LI G Q, et al. Thermally enhanced self-trapped exciton emission based on thermochromic Ag⁺ doping 0D zinc-based halides[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(11): 2400752.
- [17] TANG J L, WANG Y C, HE M J, et al. Electrothermochromic fabrics with a single-layer functional coating based on silver nanowires/thermochromic microcapsules/waterborne polyurethane paints[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(51): 70963-70972.
- [18] WANG H B, YUE X Y, SHEN X Y, et al. Fabrication of pressure visual fiber based on liquid metal control thermochromic pigments[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(14): 12636-12648.
- [19] ZIA G, LINTZ A, HARDIN C, et al. Assessment of thermochromic phantoms for characterizing microwave ablation devices[J]. *Medical Physics*, 2024, 51(11): 8442-8453.
- [20] AKSOY S A, ÖZKAYALAR S, ALKAN C. Development of hybrid functional thermoregulating and thermochromic microcapsules and polyester textiles[J]. *Energy Storage*, 2025, 7(3): e70110.
- [21] LEE C, TAN J, TAN J J, et al. Intelligent thermochromic heating E-textile for personalized temperature control in healthcare[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(3): 5515-5526.
- [22] WANG D K, CHEN G Q, FU J. Multifunctional thermochromic smart windows for building energy saving[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(22): 12960-12982.
- [23] XIAO C, WANG C C, ZHANG L P, et al. A multimode dynamic color-changing device for smart windows based on integrating thermochromic and electrochromic properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(44): 60678-60685.
- [24] XIE G X, LI Y F, LUO J, et al. Scalable fabrication of thermochromic smart windows for broadening temperature ranges and their coupled thermoelectric power generation[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024, 12(40): 14890-14901.
- [25] XU G, LU Y C, ZHOU X, et al. Thermochromic hydrogel-based energy efficient smart windows: Fabrication, mechanisms, and advancements [J]. *Materials Horizons*, 2024, 11(20): 4867-4884.
- [26] CHEN Y Z, ZHENG C. Physically cross-linked hydrogel designed for thermochromic smart windows: Balance between thermal stability and processability[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2025, 13(6): 2574-2585.
- [27] YAN Q, DING R J, LI P Y, et al. Thermochromic Janus membranes

- with dynamic solar modulation toward sustainable and high-efficiency solar-to-thermal intelligent management[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024, 12(19): 7487-7498.
- [28] TIAN A Q, PAN C, WU M X, et al. Fabrication of thermochromic photonic crystal stickers with highly sensitive response for non-open fire sensing[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(48): 66436-66446.
- [29] WEI X H, CHUN F J, CAO Y X, et al. Disproportionation thermochromic response in a luminescent lanthanide metal-organic framework[J]. *ACS Applied Optical Materials*, 2024, 2(6): 1217-1223.
- [30] WANG T H, LIU X B, LUO J, et al. Encapsulation of dyed alkanes with polyurethane microcapsules from interfacial polymerization enables irreversible thermochromic coatings[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(15): 8811-8820.
- [31] YANG Y Z, RONG Y, LI Y Y, et al. Rationally integrating charge-transfer cocrystal and Ni(II) organometallics for visualized photo/thermochromic sensors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(32): 42726-42735.
- [32] 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.
- [33] LIU B X, MAZO A R, GURR P A, et al. Reversible nontoxic thermochromic microcapsules[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(8): 9782-9789.
- [34] LIU Y M, LV W X, FENG J Z, et al. Emerging thermochromic perovskite materials: Insights into fundamentals, recent advances and applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(37): 2402234.
- [35] ZHAI X Y, WU Z D, PENG H. Minireview on application of microencapsulated phase change materials with reversible chromic function: Advances and perspectives[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(15): 8054-8065.
- [36] SHANG J, ZHANG Y H, ZHANG J H, et al. Hydrogel-based stimuli-responsive radiative and/or evaporative cooling materials for carbon neutrality[J]. *ACS Energy Letters*, 2024, 9(2): 594-626.
- [37] SHIN D, LEE N E, LEE J H, et al. Noncontact anticounterfeiting technology with dual NIR-responsive photothermal effect and thermochromic materials[J]. *ACS Applied Optical Materials*, 2024, 2(11): 2320-2327.
- [38] STAL S, CORDIER M, MASSUYEAU F, et al. Luminescence thermochromism of a noncluster copper iodide complex[J]. *Inorganic Chemistry*, 2024, 63(45): 21687-21698.
- [39] SUN X P, WU Y P, TANG S C. Self-adaptive smart thermochromic film with quick response for all-year radiative cooling and solar heating [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(49): 68407-68415.
- [40] TOLLAN C M, MARCILLA R, POMPOSO J A, et al. Irreversible thermochromic behavior in gold and silver nanorod/polymeric ionic liquid nanocomposite films[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2009, 1(2): 348-352.
- [41] SEEBOTH A, LOTZSCH D, RUHMANN R, et al. Thermochromic polymers: Function by design[J]. *Chemical reviews*, 2014, 114(5): 3037-3068.
- [42] LI R, XU F F, GONG Z L, et al. Thermo-responsive light-emitting metal complexes and related materials[J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2020, 7(18): 3258-3281.
- [43] WESTON M, TJANDRA A D, CHANDRAWATI R. Tuning chromatic response, sensitivity, and specificity of polydiacetylene-based sensors [J]. *Polymer Chemistry*, 2020, 11(2): 166-183.
- [44] ZHENG X, WANG G, LIU L J, et al. Hydrogen bonding-induced multicolor and thermochromic emissions of triphenylamines[J]. *Chemistry-A European Journal*, 2025, 31(25): e202500643.
- [45] XU T T, HAN Y, NI Y, et al. Oxindolyl-based radicals with tunable mechanochromic and thermochromic behavior[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(2): e202414533.
- [46] JIANG X R, HU T Y, YAO K, et al. Thermochromic insulation composites for prewarning of thermal faults in electrical equipment[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025, DOI:10.1002/app.56414.
- [47] AZMAT M, NASEEM M K, HAJRA, et al. Samarium-doped vanadium dioxide thin films to modulate the thermochromic properties for energy-saving smart windows[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2024, 7(9): 3776-3786.
- [48] AZMAT M, SHOAIB S, HAJRA, et al. Enhancing thermochromic properties for thermal regulation: A synergistic study of Er-W-codoped vanadium dioxide (VO₂) [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2024, 7(15): 6746-6756.
- [49] ZHOU Y C, DUAN R. Leak-proof reversible thermochromic microcapsule phase change materials with high latent thermal storage for thermal management[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2024, 7(14): 5944-5956.
- [50] LIAO W, ZHOU X Q, JIN J C, et al. Screening thermochromic luminescent materials in Cs-Cd-Br ternary phase diagram for temperature visualization applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(9): 2400194.
- [51] LIANG Z H, LIAO X H, YU J, et al. Long-term stability and efficiency of VO₂ nanostructure-based thermochromic smart windows[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(18): 21683-21691.
- [52] HE H, LIU S, DU Y W, et al. Enhancing stability: Two-dimensional thermochromic perovskite for smart windows in building applications [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024: 2417582.
- [53] MORAIS M, FIGUEIRA J, CORVO M C, et al. Flexographic printed flexible thermochromic stickers for smart sensing applications[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2025, 12(11): 2400972.
- [54] ZHANG C, LI N Q, REN J P, et al. Highly tough room-temperature self-healing polyurethane with thermochromic properties based on dynamic covalent bonding and multiple H-bonding[J]. *Chemistry of Materials*, 2024, 36(21): 10474-10482.
- [55] XIANG B, XU L Y, LI Y F, et al. Scalable film based on thermochromic and radiative cooling effects for anti-counterfeiting and low temperature preservation[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(20): 12568-12574.
- [56] WU Z Q, ZHANG W H, HAN N, et al. Reversible thermochromic nanofiber membrane for energy storage and thermoregulation[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2023, 6(4): 2423-2433.
- [57] WANG J K, LEI Y, JALEEL H N, et al. Hydroxypropyl cellulose-based thermochromic hydrogels for smart passive cooling[J/OL]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36: 2420946.