

光-热双响应材料研究进展: 从设计策略到智能窗应用

陈明俊¹, 缪洪康², 肖英俊², 邓建波³, 张翔¹, 赵九蓬³, 李珏^{1,4}

(1. 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001; 2. 上海卫星工程研究所, 上海 201100; 3. 哈尔滨工业大学 化工与化学学院, 哈尔滨 150001; 4. 苏州国家实验室, 苏州 215123)

摘要: 随着全球人口增长与工业化进程加速, 建筑能耗持续攀升, 节能降耗成为建筑领域实现“双碳”目标的关键任务。窗户作为建筑光热交换的核心构件, 其隔热与采光性能直接影响室内热环境调控能耗, 决定了建筑整体节能效率。传统节能窗因其静态结构而难以适应变化的环境, 单一刺激响应智能窗也因调控形式单一而无法满足不同多元化节能需求。光-热双响应智能窗可同步响应光照与温度变化, 实现动态协同调控, 成为建筑节能的创新解决方案。本文系统综述了光-热双响应材料及其智能窗的最新研究进展, 聚焦三类核心设计策略: 一是具备功能协同效应的单组分光-热双响应材料; 二是融合光致变色与热致变色特性的光-热双响应多组分复合物; 三是光热材料与热致变色耦合体系。针对每类策略, 详细阐述其设计思路、微观结构特征及光-热双响应变色机制。同时, 深入探讨光-热双响应智能窗在实际建筑场景中的应用潜力, 系统分析当前面临的技术挑战, 并对未来发展前景进行展望。本文旨在为光-热双响应智能窗的结构设计优化、性能提升及工程化开发提供全面的理论参考与实践指引, 助力建筑节能技术的革新与产业升级。

关键词: 光致变色; 热致变色; 光-热双响应材料; 智能窗; 零能耗建筑; 综述

中图分类号: TB34 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2026)06-0723-16

Photo- and Thermo-chromic Dual-responsive Materials: A Review on Design Strategies and Applications in Smart Windows

CHEN Mingjun¹, MIAO Hongkang², XIAO Yingjun², DENG Jianbo³,
ZHANG Xiang¹, ZHAO Jiupeng³, LI Yao^{1,4}

(1. Center for Composite Materials and Structure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201100, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 4. Suzhou National Laboratory, Suzhou 215123, China)

Abstract: With the continuous growth of the global population and accelerated advancement of industrialization, energy consumption in the construction sector has been rising steadily. Energy conservation and consumption reduction have become a key task for this field to achieve the "dual carbon" goals. As a central component for photothermal exchange within buildings, the thermal insulation and daylighting performance of windows directly

收稿日期: 2025-09-18; 收到修改稿日期: 2025-11-05; 网络出版日期: 2025-11-11

基金项目: 国家重点研发项目(2022YFB3902704); 黑龙江省博后面上资助项目(LBH-Z24130); 国家自然科学基金(52472157)
National Key R&D Program of China (2022YFB3902704); Heilongjiang Postdoctoral Fund (LBH-Z24130); National Natural Science Foundation of China (52472157)

作者简介: 陈明俊(1996-), 男, 副研究员. E-mail: mingjunchen@hit.edu.cn

CHEN Mingjun (1996-), male, associate professor. E-mail: mingjunchen@hit.edu.cn

通信作者: 张翔, 副教授. E-mail: zhangxhit@hit.edu.cn; 李珏, 教授. E-mail: yaoli@hit.edu.cn

ZHANG Xiang, associate professor. E-mail: zhangxhit@hit.edu.cn; LI Yao, professor. Email: yaoli@hit.edu.cn

determine the energy consumption for regulating the indoor thermal environment, and play a decisive role in the overall energy-saving efficiency of buildings. Traditional energy-saving windows are limited by their static structure, rendering them ill-suited to adapt to changing environments. Smart windows with single-stimulus response, characterized by their singular regulation mode, cannot meet the diversified energy-saving demands. In contrast, photo-thermal dual-responsive smart windows can simultaneously and accurately respond to changes in external light intensity and temperature, realizing dynamic and coordinated regulation of light transmission and heat conduction. This innovation provides an effective solution for building energy conservation. This review systematically summarizes the latest research progress of photo-thermal dual-responsive materials and their smart windows, focusing on three core design strategies: firstly, single-component photo-thermal dual-responsive materials with functional synergy; secondly, photo-thermal dual-responsive multi-component composites integrating photochromic and thermochromic properties; thirdly, coupled systems of photothermal materials and thermochromic materials. For each strategy, the design concept, microstructural characteristics, and photo-thermal dual-responsive color-changing mechanism are elaborated in detail. Meanwhile, the application potential of photo-thermal dual-responsive smart windows in actual building scenarios is deeply discussed, the current technical challenges are systematically analyzed, and the future development prospects are prospected. This review aims to provide comprehensive theoretical references and practical guidance for the structural design optimization, performance improvement, and engineering development of photo-thermal dual-responsive smart windows, thereby promoting the innovation and industrial upgrading of building energy-saving technologies.

Key words: photochromic; thermochromic; dual-responsive material; smart window; zero-energy building; review

随着全球人口增长与工业现代化进程的加快,能源短缺与环境问题已成为世界各国共同面临的重大挑战。目前,建筑能耗约占全球一次能源消耗的40%,且该比例将持续攀升,给能源供应体系带来巨大压力^[1-3]。在现代社会中,推广绿色节能建筑并推进既有建筑的节能改造显得尤为重要。窗户作为建筑采光与热交换的核心构件,其性能优化对建筑节能具有关键意义。传统窗户虽能满足采光需求,但其高透光性在高温季节会加剧室内温度上升,而高红外发射率又会在寒冷季节加速热量散失,导致建筑过度依赖空调和采暖系统来维持室内舒适度。目前,主流节能窗(如中空玻璃和低辐射 Low-E 玻璃)虽具备一定节能效果,但其透光率和红外发射率等核心参数固定,无法实现适应不同环境温度和季节变化的智能调节。因此,智能窗应运而生,其能够动态调控室内外的光热交换,在提升采光质量与热舒适性的同时,显著降低照明、采暖及空调系统的能耗^[4-6]。

根据响应刺激源(如电场、光照、温度)的不同,智能窗主要分为电致变色(EC)、光致变色(PC)和热致变色(TC)三大类型^[7-9]。其中,EC 智能窗因在太阳光谱范围内具备优异的动态调控能力和快速的动态响应特性而受到广泛关注,且用户可以主动控制^[10-15]。然而,其复杂的器件结构和持续的电力依

赖增加了设计与安装难度,并导致额外的能耗。相比之下,PC 智能窗具有无需外部能源、结构设计简单,可根据太阳辐射强度自主调节透光率等独特优势^[16-18],但其有限的光调制幅度、光响应滞后性与不可逆性,以及对光照强度的高度依赖性,限制了其在建筑领域的实际应用^[19]。类似地,TC 智能窗在不消耗能量的情况下响应热辐射变化,近年来逐渐成为研究热点^[20-23],但由于其最大可见光透过率较低以及对外界温度高度依赖,难以满足建筑对采光与热舒适性的双重要求,且在色彩多样性和美观性方面存在不足^[24]。由此可见,单一刺激响应的智能窗虽各有优势,但技术瓶颈使其难以满足日常应用中对调光、控热、隐私保护及美观性的多元化需求。因此,设计融合 PC 智能窗与 TC 智能窗优势的光致-热致变色(光-热)双响应智能窗,实现无需外部供能的智能调控(即“零能耗”),具有重要的理论价值和实践意义。

光-热双响应智能窗是一种能够同时响应环境光照强度与温度变化,并自动调节光学性能(如透光率、太阳热辐射)的新型智能窗^[25-28]。与单一响应型智能窗相比,它能依据光照与温度的双重变化进行动态协同调控,为实现建筑节能与人性化的光热管理提供了创新性解决方案。在强光照-低温场景下(如高纬度地区的冬季),智能窗会优先通过 PC 机制

降低眩光干扰;而在弱光照-高温工况下(如夏季阴天),则通过TC相变来阻隔近红外热辐射。然而,目前针对应用于零能耗建筑的光-热双响应材料和智能窗的系统性综述相对匮乏,光-热双响应材料的设计策略及背后的基础科学原理尚未得到全面梳理。本文综述光-热双响应材料及其智能窗的最新研究进展(图1),从融合TC和PC特性的光-热双响应单组分材料、多组分复合材料到光热材料与TC材料的集成体系三种创新设计策略入手,重点阐述其功能材料和智能窗的设计策略、结构和变色机制。最后,分析光-热双响应材料在智能窗领域的应用潜力、技术挑战与发展前景,旨在为下一代零能耗建筑的功能材料开发与智能窗设计提供理论参考和实践路径。

1 光-热双响应单组分材料

通过分子剪裁、元素掺杂及缺陷工程等材料改性手段,在单组分材料中实现TC与PC双响应功能的整合,是当前光-热双响应材料和智能窗设计的前沿方向。这类材料通过化学结构(如共轭骨架、配位键)与电子态(如能带结构、缺陷能级)的精准修饰,突破了传统单响应材料功能单一的局限,在单一分子或晶体框架中实现了对光信号和热信号的协同响应。目前,已报道的光-热双响应单组分材料可分为

三大类:有机功能分子(如水杨醛席夫碱衍生物^[29-31]、螺吡喃衍生物^[32-33]、紫精基有机分子^[34-35]等)、无机过渡金属氧化物(如 MoO_3 ^[36-37]、 V_2O_5 ^[38]和 VO_2 ^[39-40]等)及钙钛矿材料^[41-43](如钙钛矿结构铁电陶瓷和金属卤化物钙钛矿等)。

1.1 有机功能分子

水杨醛席夫碱是以水杨醛为母体,与胺类化合物缩合形成亚胺键($-\text{C}=\text{N}-$)的有机化合物。其分子结构中的酚羟基与亚胺键赋予其PC和TC双响应特性,且因其优异的耐疲劳性、易合成性和低成本,成为智能响应材料的研究热点^[29]。Hadjoudis^[30]研究发现,固态下水杨醛席夫碱衍生物的变色性能受分子构型和晶体堆积影响:平面紧密堆积结构有利于TC,而非平面松散堆积则有利于PC。郑州大学李恺团队^[31]进一步揭示了分子间 $\pi-\pi$ 堆积对性能的调控作用:弱 $\pi-\pi$ 作用的衍生物表现出显著的光-热双响应特性,90℃加热变黄,紫外光照射变红(图2(a));而强 $\pi-\pi$ 堆积的衍生物则无此特性。然而,其对特定条件(365 nm 紫外光,90℃高温)的依赖限制了实际应用。

螺吡喃衍生物因其光诱导可逆结构转变特性而成为光-热双响应材料的重要体系。为突破PC与TC协同调控的难题,研究者提出了分子修饰策略^[32],如四川大学高峻团队^[33]设计的硝基取代螺吡喃(SP-Br)展现出独特的PC与TC协同效应(图2(b)),即加热促进开环部花菁(MC)形成而显色,随着温度从25℃升至60℃,SP-Br溶液从无色逐渐转变为紫红色;当SP-Br受紫外光(365 nm)或可见光(>420 nm)照射时,MC结构会被激发至高能态,随后通过电子转移与共轭结构断裂,迅速恢复为闭环SP结构,导致其颜色明显褪去。螺吡喃衍生物的光-热双响应特性为智能窗的开发提供了新颖的材料设计思路,但其实际应用仍需克服环境稳定性、透光率调控以及规模化制备等核心挑战。

紫精因其大共轭分子结构、优良的电子转移能力及氧化还原可逆性,成为构建光-热双响应体系的理想平台^[34]。东北师范大学张宏团队^[35]利用溶剂热法合成新型Cd(II)-紫精基配位聚合物,突破传统体系限制,实现快速可逆光-热双响应特性(图2(c)):紫外光照射20 s内颜色从黄色变为浅绿色,4 min内达饱和状态,且可循环超过7次;热刺激(120~170℃)下,通过羧酸根 $\text{O} \rightarrow$ 吡啶N的电子转移,实现黄色到浅绿色和深绿色的渐变。尽管该材料展示出可逆变色及宽温域响应能力,在柔性显示、防伪技术等领域具有广阔前景,但其可逆响应

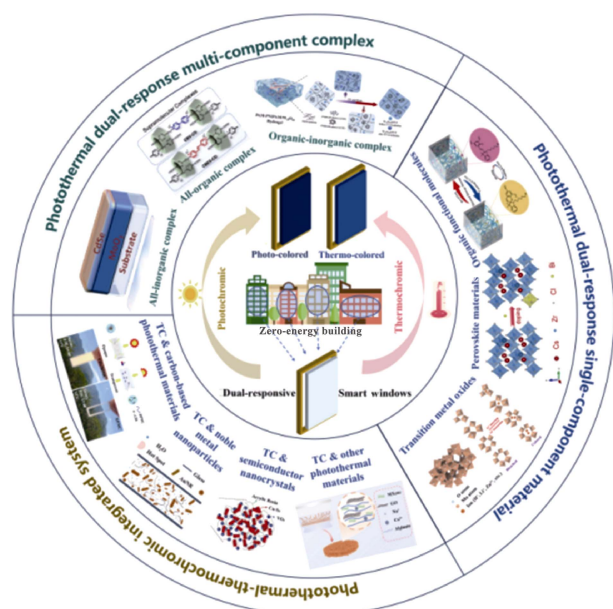
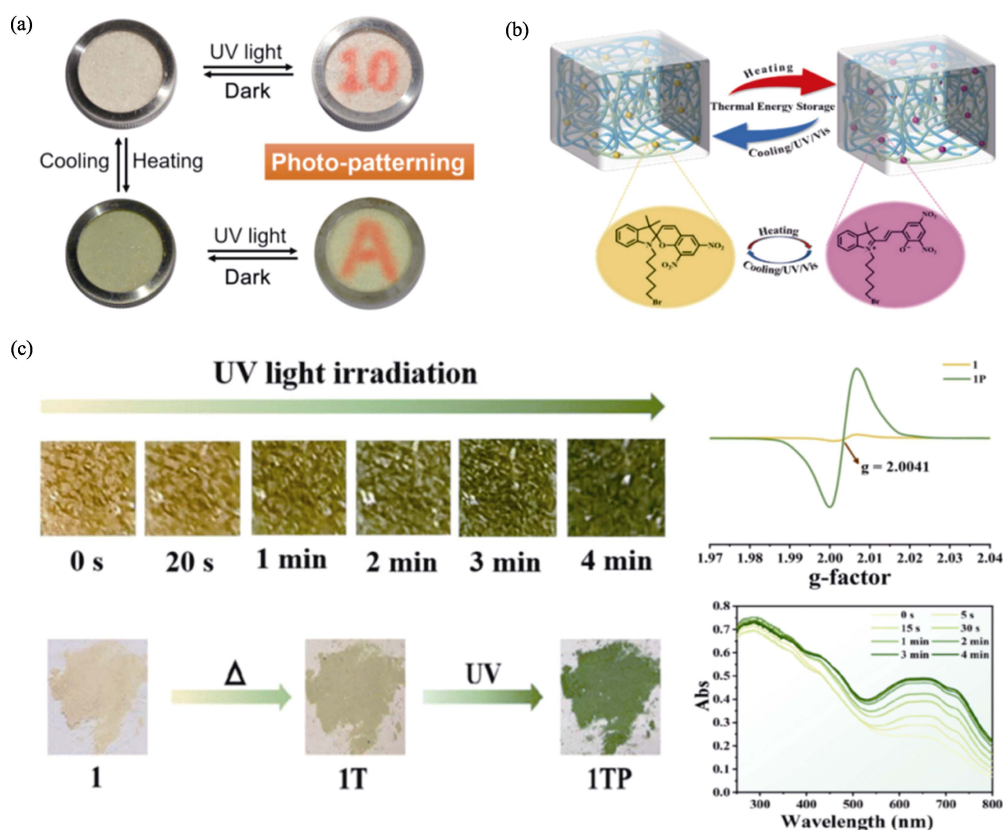


图1 用于零能耗建筑的光-热双响应材料和智能窗的设计策略、结构及原理

Fig. 1 Overview of the design strategy, structure and principle for the photo- and thermo-chromic dual-responsive materials and smart windows in zero-energy buildings

图 2 有机功能分子的光-热双响应性能^[31, 33, 35]Fig. 2 Photo-thermal dual-responsive of organic functional molecules^[31, 33, 35](a) π - π stacking controlled salicylaldehyde Schiff base derivatives^[31]; (b) Spiropyran compounds^[33]; (c) Cd(II)-viologen coordination polymer^[35]

温度范围(120~170 °C)仍高于智能窗的理想工作区间(20~80 °C), 未来需通过分子设计降低热响应阈值。

1.2 无机过渡金属氧化物

无机过渡金属氧化物(如 MoO_3 ^[36-37]、 V_2O_5 ^[38]和 VO_2 ^[39-40]等)因其高化学稳定性及可逆氧化还原特性, 成为光-热双响应材料的重要研究方向。通过元素掺杂与缺陷工程调控能带结构, 可以实现光吸收与热响应的协同耦合。以 MoO_3 为例, Tomás 等^[36]采用热蒸发法制备了 ZnSe 掺杂的 MoO_3 薄膜, 研究发现, 5%(摩尔分数)ZnSe 掺杂的薄膜在光照下快速呈现深蓝色(最大吸收峰 820 nm), 并在 23~125 °C 加热时变色效果最优, 而 10%(摩尔分数)ZnSe 掺杂的薄膜中过量 Se^{2-} 占据氧空位导致性能下降。其机理在于: 光照激发电子形成氧空位色心(Mo^{5+}), ZnSe 作为电子供体通过界面势垒注入额外电子以增强色心密度; 在加热过程中, 高温激活晶格振动, 促进电子跃迁并生成更多氧空位。5%的掺杂比例有助于优化氧空位的动态平衡, 从而增强变色效果。该团队进一步采用射频反应磁控溅射法, 通过调控溅射气氛(O_2/Ar 比)与工作压力制备了氧缺陷可控的 MoO_3 薄膜^[37]。在 5.3×10^{-1} Pa 压力下制备的薄膜

的双响应性能最佳: 在空气中退火时, 薄膜颜色在温度升至 250 °C 的过程中逐渐加深至深蓝色, 超过 300 °C 时因结晶化与氧空位减少而褪色; 在氩气中退火时, 薄膜则维持非晶态, 颜色随温度升高持续加深; 经过 180 min 紫外光照射后, 薄膜显色稳定, 其 PC 机制归因于光激发电子跃迁形成 Mo^{5+} 与氧空位色心。尽管此类材料在智能窗领域潜力显著, 但仍需进一步降低热响应温度阈值(如开发低温相变组分), 并提升光响应灵敏度(如构建异质结增强载流子分离效率)。

1.3 钙钛矿材料

钙钛矿材料凭借其可调的晶体结构和优异的光电性能, 已成为光-热双响应领域的新兴方向^[41-43]。以铁电陶瓷为例, 西北工业大学高峰团队^[41]采用传统高温固相法制备得到 $0.83\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3-0.11\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.06\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PZNNT) 钙钛矿陶瓷。如图 3(a)所示, 该陶瓷展现出出色的光-热双响应性能: 在 395 nm 光照下, 仅需 1 s 即可触发 PC, 随着照射时间延长, 反射率逐渐降低并在 120 s 内达到饱和; TC 过程中, 200 °C 热处理 10 min 即可实现光学状态的无损恢复, 且在 5 次循环中表现出稳定的可逆性。其机理源于氧空位(V_{O})捕获电

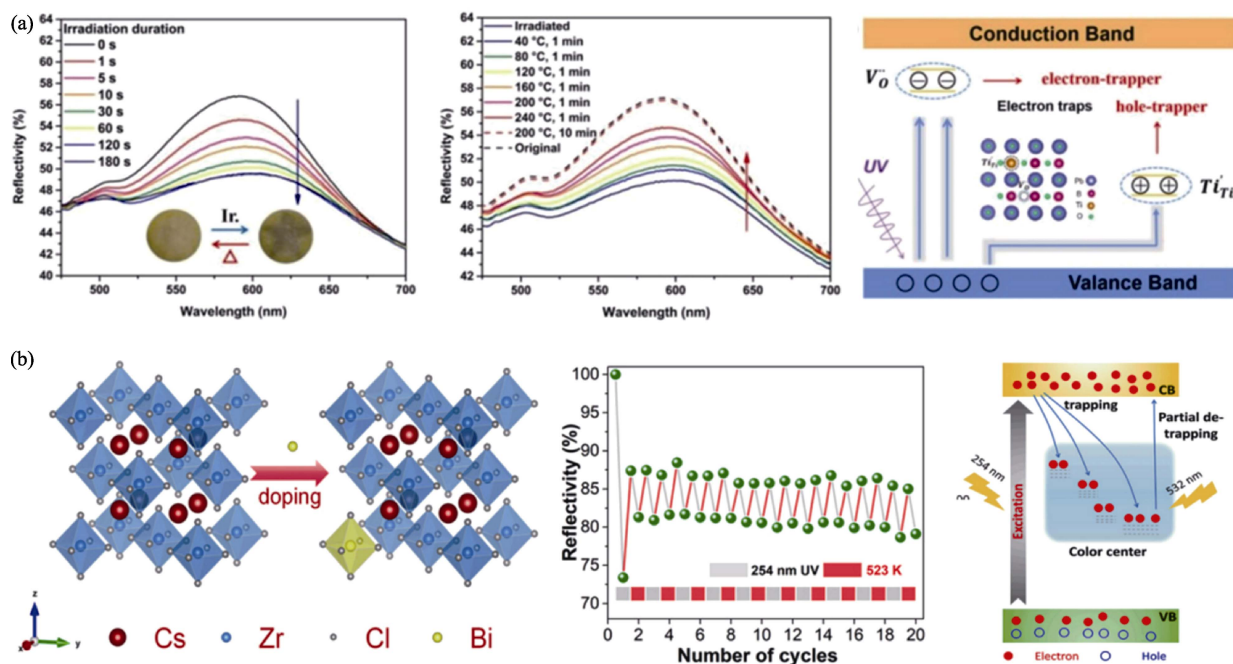


图3 (a) PZNNT 钙钛矿陶瓷的 PC、TC 性能及机制^[41]; (b) Cs₂ZrCl₆:Bi³⁺ 卤化物钙钛矿^{43]} 的结构、光-热双响应性能及机制^[43]
 Fig. 3 (a) Photochromic, thermochromic properties and mechanism of PZNNT perovskite ceramics^[41]; (b) Structure, photo-thermal dual-responsive properties and mechanism of Cs₂ZrCl₆:Bi³⁺ halide perovskite^[43]

子与小极化子 Ti^{3+} 捕获空穴的动态平衡, 即光照诱导的载流子被缺陷捕获导致反射率下降, 加热则释放载流子, 从而恢复初始光学性能。为进一步突破传统钙钛矿在高温恢复方面的限制, 华侨大学魏展画团队^[43]通过铋离子(Bi^{3+})掺杂与热重结晶的协同策略, 在单相 $\text{Cs}_2\text{ZrCl}_6:\text{Bi}^{3+}$ 卤化物钙钛矿中实现了高稳定的光-热双响应(图 3(b))。 Bi^{3+} 取代 Zr^{4+} 后引入晶格应变, 形成 Cl^- 空位与反位缺陷(陷阱深度约 0.67 eV), 捕获光生载流子生成 $\text{Bi}^{2+}/\text{Bi}^{4+}$ 色心, 触发 553 nm 吸收带(反射率差 ΔR 达到 27%~36%)。在 254/365 nm 紫外光照射下, 材料从白色变为粉色, 且在环境光条件下维持超过 20 d; 在 523 K 加热条件下, 热致相变引发宿主进一步晶格弛豫, 优化 Bi^{3+} 能级并增强电子云重排, 导致光致发光峰红移 20 nm(蓝→青), 同时电荷存储容量提升 2 倍, 持久发光强度提升 2.5 倍(>10000 s)。该策略通过缺陷工程与晶格调控的协同作用, 实现了 PC 的长期稳定性与 TC 的高效可逆响应。尽管钙钛矿材料为光-热双响应智能窗设计提供了新思路, 但其高温恢复需求(>200 °C)、有限循环稳定性及低光学调制幅度仍需进一步改进。

2 光-热双响应多组分复合物

尽管单组分材料通过分子剪裁、元素掺杂及缺陷工程实现了光-热双响应功能的集成, 但其性能

仍受单一化学结构本征特性的制约。通过物理共混或化学杂化策略构建的多组分复合体系, 能够实现光响应与热响应功能模块的空间分离与协同耦合, 在保持单组分材料精准响应特性的同时, 通过不同组分间的协同作用突破单一材料的性能上限。目前, 通过超分子组装、能级调控及界面工程等策略, 已在全有机、全无机及有机-无机杂化体系中实现了显著的 PC 和 TC 协同增强效应, 为智能窗材料开发提供了新的解决方案。

2.1 全有机复合物

光-热双响应全有机复合体系的构建主要依赖物理共混与化学键合两种核心策略, 二者基于不同作用机制实现功能组分的复合整合: 物理共混策略通过范德瓦尔斯力、氢键等非化学键作用力驱动组分复合, 各功能组分在分子结构上保持相对独立性; 化学键合策略则利用共价键、配位键等稳定化学作用力, 实现不同响应单元的分子级连接与整合, 显著提升体系的结构稳定性与响应协同性。在物理共混策略方面, 华北电力大学王鹏团队^[44]通过共混 TC 与 PC 有机颜料, 制备出超疏水光-热双响应涂层, 其可实现四种状态的颜色切换(图 4(a)): 在温度低于 31 °C 时呈紫色, 31~45 °C 温度范围内转变为绿色, 温度高于 45 °C 时完全无色, 而在紫外光照下则显蓝色(图 4(b))。在化学键合策略方面, 复旦大学周刚团队^[45]通过 γ -环糊精(CD)封装紫精衍生物(CBV)构

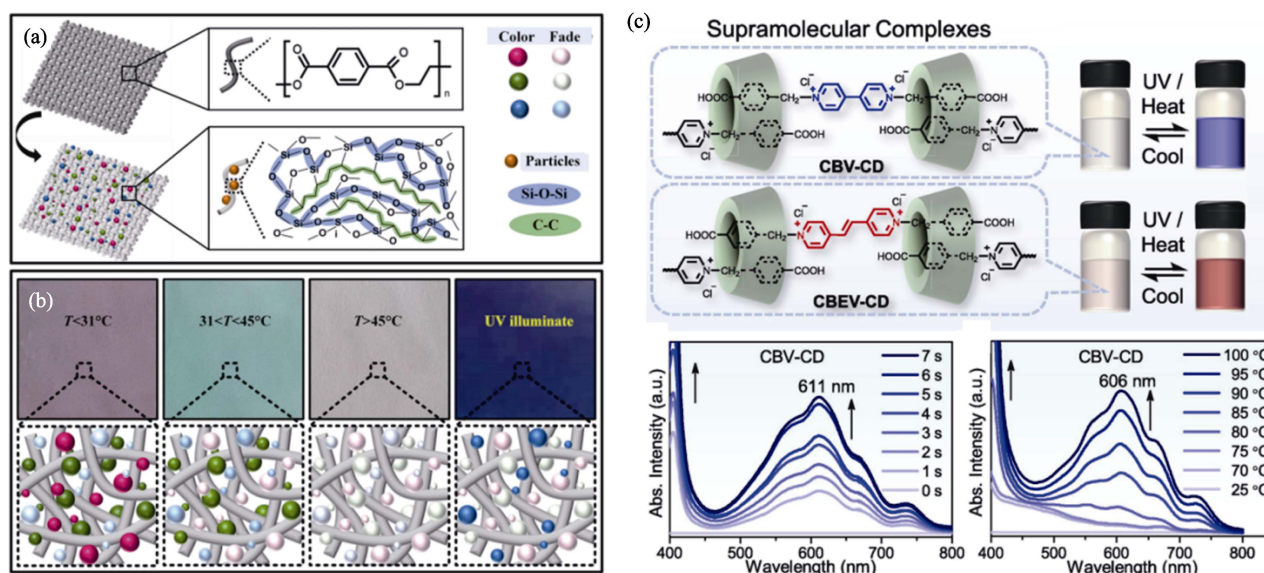


图 4 (a, b)超疏水光-热双响应涂层的(a)多色响应原理示意图及(b)其照片^[44];

(c)光热双响应超分子复合物 CBV-CD 的原理图及 PC 和 TC 性能图^[45]

Fig. 4 (a) Schematic diagram and (b) photographs of multicolor response of the superhydrophobic photo-thermal dual-responsive coatings^[44]; (c) Schematic diagram and photo- and thermo-chromic performance of photo-thermal dual-responsive supramolecular complexes CBV-CD^[45]

建了主客体复合物 CBV-CD, 其中 CD 通过主-客体相互作用稳定 CBV 的自由基阳离子并调控电子转移路径, 而 CBV 作为氧化还原中心直接参与光/热响应过程。图 4(c)显示, 两者协同作用使 CBV-CD 实现快速、可逆的双响应特性: 在紫外光照 7 s 内, 材料因光致电子转移变为蓝色(吸收峰 611 nm), 加热时则通过热诱导分子构象变化转为红棕色(吸收峰 606 nm)。同时, CBV-CD 复合物具有优异的循环稳定性, 经过 50 次 TC 循环或 PC 循环后, 其吸光度保持稳定。尽管全有机复合体系的光-热双响应特性为智能窗提供了新思路, 但其光学性能和稳定性尚未满足实际需求, 需通过分子结构优化或稳定性修饰进一步提升。

2.2 全无机复合薄膜

为突破全有机复合体系在光学调制能力与高温稳定性方面的瓶颈, 研究者开始探索全无机复合薄膜的设计, 借助能带工程与异质结构设计, 力求协同增强材料的光-热双响应性能。具体策略是在无机过渡金属氧化物上沉积一层低带隙半导体中间层, 如硫化镉(CdS, 光学带隙为 2.4 eV)^[46]、硒化镉(CdSe, 光学带隙为 1.7 eV)^[47]。在异质结构界面处形成的 II 型能带排列的异质结, 能够有效促进载流子分离, 进而显著增强材料的 PC 和 TC 响应。例如, Morales-Luna 等^[47]通过真空热蒸发法, 在玻璃基板上制备了包含 Substrate/MoO₃/CdSe (SMC)和 Substrate/CdSe/MoO₃ (SCM)的双层薄膜, 其中

MoO₃ 层厚约 250 nm、CdSe 层厚约 20 nm。研究发现, 相较于单层 MoO₃ 薄膜, 这两种双层薄膜的 PC 和 TC 性能均得到增强(图 5(a))。在 PC 性能方面, SMC 复合薄膜表现更为出色, 当受到紫外线照射时, 随着辐照时间的延长, 820 nm 处的色心吸收带变得更加明显; 在 TC 性能方面, SMC 复合薄膜的优势突出, 在 25~225 °C 加热过程中, 820 nm 波段的吸收带变化显著。从性能增强机制来看, 在 TC 过程中, SMC 复合薄膜中的 CdSe 层充当屏障, 减少氧气与 MoO₃ 的相互作用, 营造出类似还原气氛的环境, 这有利于色心的形成和 TC 反应的进行。而在 PC 过程中, CdSe 在光照下产生电子-空穴对, SCM 体系中这些电子更容易注入到 MoO₃ 层中, 形成更多的色心, 从而增强 PC 效果。哈尔滨工业大学李垚团队^[48]构建了一种基于 VO₂ 相变特性的 Al/HfO₂/VO₂ 全无机复合多层结构器件。该器件在热激发或激光激发下, 可同时实现近红外(NIR, 1.06 μm)激光波长与长波红外(LWIR, 8~14 μm)波段的耦合调制: 在低温环境中(VO₂ 呈 M 相), 8~14 μm 波段发射率 $\epsilon=0.18$, 可有效保温; 在高温环境中(VO₂ 转变为 R 相), 该波段发射率提升至 $\epsilon=0.64$, 可高效散热; 在 0~60 °C 温度范围内, 器件的辐射功率调节能力达 145.06 W·m⁻², 且在 1.06 μm 波长处的反射率调制值为 0.78。此外, 在 1.9 W·cm⁻² 激光照射下, 该器件的相变时间仅为 1003 ms, 即便在 1.9 W·cm⁻² 激光下持续照射 10 s, 仍能保留 80% 的相变性能。该研究成果为智能窗

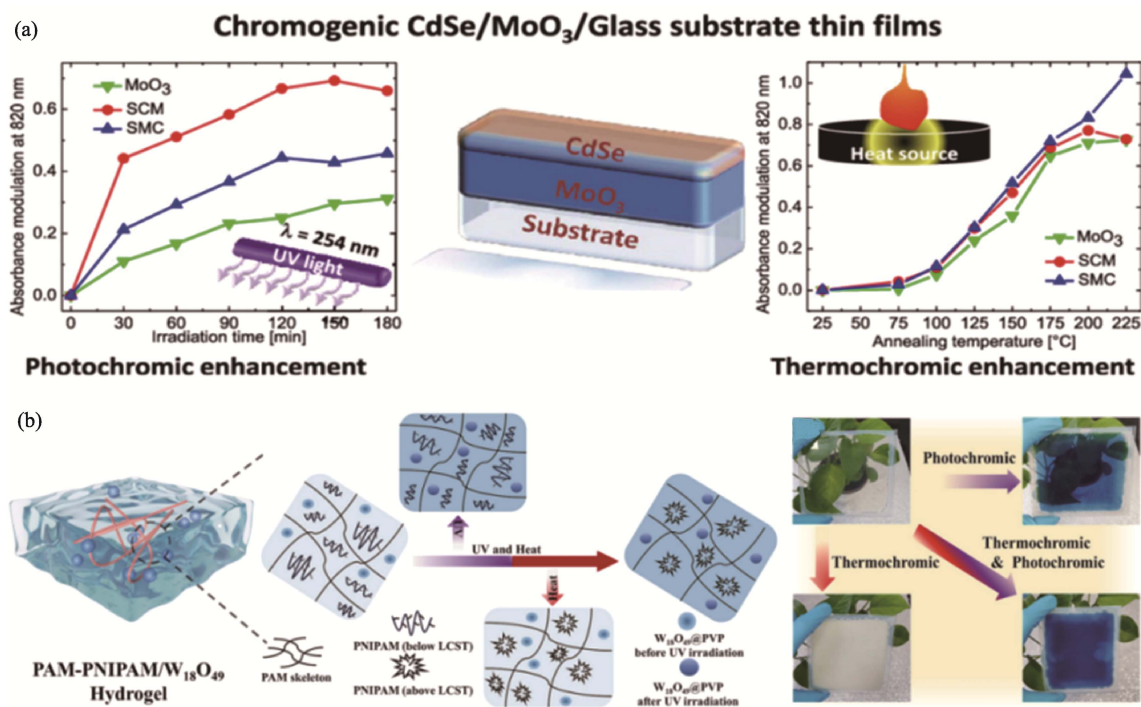


图 5 (a)全无机 CdSe/MoO₃ 复合薄膜^[47]和(b) W₁₈O₄₉/PAM-PNIPAM 有机-无机复合薄膜^[27]的结构示意图及光-热双响应性能
Fig. 5 Schematic diagrams and photo-thermal dual-responsive performance of (a) all-inorganic CdSe/MoO₃ composite films^[47] and (b) organic-inorganic W₁₈O₄₉/PAM-PNIPAM composite films^[27]

系统的电磁协同控制与自适应热管理提供了新方案。尽管全无机体系凭借其良好的高温耐受性和较长的使用寿命在建筑智能窗领域展现出广阔的应用前景,但目前该领域的研究还处于实验室薄膜制备阶段。在完整器件中,材料的光-热双响应性能尚不明确,与有机-无机杂化体系相比,其光-热双响应灵敏度仍存在差距。因此,未来需要通过进一步优化能带工程或界面结构设计,来提升全无机复合薄膜的性能,推动其在智能窗实际应用中的发展。

2.3 有机-无机复合薄膜

光-热双响应有机-无机复合薄膜相较于全无机和全有机复合薄膜具有显著优势,主要体现在性能互补与协同增效方面。该复合薄膜巧妙结合了无机材料的优良热稳定性、特定光学性质以及有机材料的柔韧性和易加工性,通过独特的界面协同机制实现性能增强。例如,武汉理工大学田守勤团队^[27]通过混合光响应的 W₁₈O₄₉ 和热响应的聚丙烯酰胺-聚(N-异丙基丙烯酰胺)(PAM-PNIPAM)水凝胶,制备了 W₁₈O₄₉/PAM-PNIPAM 水凝胶复合薄膜(图 5(b))用于光-热双响应智能窗。在该复合体系中, W₁₈O₄₉ 发挥 PC 和光热效应的关键作用,而 PAM-PNIPAM 水凝胶则赋予薄膜柔韧性和 TC 能力。二者相互作用产生的协同效应,不仅拓宽了热响应范围,还增强了 PC 的稳定性。这种光-热双响应智能窗具备出

色的阳光调节能力,能够实现分级和双波段调节。在初始状态下,智能窗对可见光和近红外光呈现透明状态,透光率可达 79.49%。随着太阳辐射增强, W₁₈O₄₉ 在紫外线触发下产生 PC 效应,智能窗逐渐阻挡近红外光,同时保持一定透光率,从而有效延缓室内温度上升。当太阳辐射达到最大值时,环境温度升高,与着色后的 W₁₈O₄₉ 产生的光热效应共同触发水凝胶的 TC,此时智能窗能够阻挡全波段阳光,阳光透过率降至 0。研究团队进一步在模型房中对该光-热双响应智能窗的实际节能效果进行了评估,结果显示其可使室内温度降低 8.5 °C。光-热双响应性能增强机制在于, W₁₈O₄₉ 产生的局部表面等离子体共振(LSPR)效应显著提升了 PC 性能,而其光热效应又促使水凝胶更易发生 TC。然而,该薄膜应用于智能窗时,存在 W₁₈O₄₉ 褪色时间较长的问题,光-热双响应智能窗完全恢复需要 18 h。为推动其更广泛应用,可考虑通过元素掺杂 W₁₈O₄₉ 纳米颗粒或使用超细 W₁₈O₄₉ 纳米颗粒的方法,通过增大比表面积来提升反应速率,进而优化智能窗的性能。

当前,光-热双响应复合薄膜在智能窗领域已取得重要进展:全有机体系凭借柔性和调控效率设计拓宽了应用场景,全无机体系通过双响应集成提升了稳定性,而有机-无机复合体系则通过界面协同实现了多功能增强。然而,其产业化仍面临长期

稳定性不足、规模化制备复杂及环境适应性等挑战。

3 光热-热致变色耦合体系

为实现智能窗的光-热双响应调控功能,另一种常用策略是将 TC 材料与光热材料耦合^[23]。碳基纳米材料、贵金属纳米颗粒及半导体纳米晶等典型光热转换材料,以其高太阳吸收特性或 LSPR 效应,能够高效捕获太阳光并将其转化为热能,进而在室温环境下触发 TC 材料发生光学性能转变^[49]。

3.1 碳基光热材料和 TC 材料耦合

在众多光热转换材料中,碳基光热转换材料,如氧化石墨烯(GO)和碳点(CDs),因其优异的光吸收和导热能力脱颖而出。它们能高效捕获太阳能并快速将其转化为热能,成为与 TC 材料复合构建光-热双响应材料体系的理想选择^[49]。然而,研发用于智能窗的这类材料时,精确设计吸收峰至关重要且复杂,因为太阳光透过率直接决定智能窗调节室内光照和温度的性能。例如,无定形碳虽有良好的光热特性,但在可见光波段的高吸收率会严重削弱智能窗透光性能,进而影响室内采光和视野,因此不适合用于智能窗^[50]。

GO 与 TC 材料相结合时,可以发挥其大比表面积和良好热传导性,快速吸收光能并均匀传热,精确调控 TC 材料相变温度,从而动态调节透光率^[51-54]。Lee 等^[52]将 Poly(NIPAm-co-NDEAm-co-VP)(PNDV)水凝胶与 GO 光热材料进行复合,然后将该复合材料密封在双层玻璃之间,成功组装出一种新型嵌入式智能窗。从图 6(a, b)中可以清晰地看到,相较于普通水凝胶 TC 智能窗,这种新型智能窗具有独特的光-热双刺激响应优势。在实际应用场景中,该智能窗能够根据外界环境的变化灵活调节室内的光照和温度。一方面,它对温度变化极为敏感。随着外界温度升高,TC 水凝胶会发生相分离,使智能窗的透过率逐渐降低。当温度接近 40 °C 时,智能窗完全着色,呈现出不透明状态(图 6(a)),有效阻挡阳光进入室内。另一方面,它能依据阳光强度自适应地调节透过的光和热。当阳光强度较低,仅为 1.1 mW/cm² 时,玻璃的透过率较高,可以让大量阳光进入室内,提升室内的采光效果;当阳光强度逐渐增强至 12.4 mW/cm² 时,玻璃开始变得模糊,能够遮挡部分阳光,减少进入室内的光量,避免室内光线过强;当阳光强度进一步增强至 22.8 mW/cm² 时,玻璃变得完全不透明,完全阻挡光和热进入室内(图 6(b)),起到良好的遮阳隔热作用。Tai 团队^[53]

通过改进的 Hummers 法制备 GO,并利用原位自由基聚合将 PNIPAM 链接枝到 GO 表面,制备出对光照和温度均有响应的 GO/PNIPAM 纳米复合水凝胶。该水凝胶 TC 性能出色,25 °C 时透光率高达 96.6%,而当温度升高到 37 °C 时,透光率几乎降至 0。值得注意的是,GO 作为一种性能优异的光热材料,引入后显著提升了复合水凝胶的光响应调控能力。在 25 °C 阳光下照射 5 min,普通 PNIPAM 玻璃无明显变化,而 GO/PNIPAM 玻璃因 GO 的光热效应,吸收光能后温度升高,促使水凝胶发生相变,该玻璃由透明变为不透明,从而阻挡阳光、降低室温,并在阳光减弱时恢复透明。此外,GO 还能使智能玻璃吸附彩色有机溶剂,呈现各种颜色。在建筑领域,这种光-热双响应智能窗可根据外界温度或光照强度自动调节室内光线和温度,减少空调和照明设备使用,从而降低建筑能耗。

CDs 是尺寸小于 10 nm 的新型零维碳纳米材料,与 GO 在诸多方面相似,不仅化学结构和物理性质相近,而且都具备良好的光热性能。中北大学胡胜亮团队^[54]通过将 CDs 掺入 TC 的羟丙基甲基纤维素(HPMC),成功制备出一种光-热双响应变色复合材料 CDs/HPMC。CDs 的超小尺寸使得 CDs/HPMC 的透明度相当高,并增强了材料的光吸收能力。此外,CDs 与 HPMC 之间的相互作用进一步增强了光吸收效果,促进了光激发电荷载流子的非辐射复合,显著提升了 CDs 的光热转换效率,同时确保了复合材料结构的稳定性。从图 6(c)可以看出,CDs/HPMC 复合薄膜的透过率随着环境温度的升高逐渐降低,且在相似温度下,光照对透过率也有显著影响。由于 CDs 具有显著的光热效应,CDs/HPMC 在光照作用下能够迅速且可逆地在透明和不透明状态之间切换。相比之下,纯 HPMC 仅对温度变化做出变色响应,即使在烈日下长时间照射,仍能保持透明状态。这一对比充分证明了 CDs/HPMC 在不同光照强度和温度下具有优异的光-热双响应调控能力,能够根据天气条件动态调节太阳光透过率,有效降低空调和照明能耗。该材料为光-热双响应智能窗的设计和多功能应用开辟了全新途径,在建筑节能等领域具有广阔的应用前景。

3.2 贵金属纳米颗粒光热材料和 TC 材料耦合

贵金属纳米颗粒,如金(Au)、银(Ag)纳米颗粒,基于 LSPR 效应,能够在特定波长范围内实现强光吸收。将这些纳米颗粒与 TC 材料复合后,所吸收的光能可转化为热能,驱动 TC 材料发生可逆的光学变化。通过精确控制贵金属纳米颗粒的尺寸和形状,

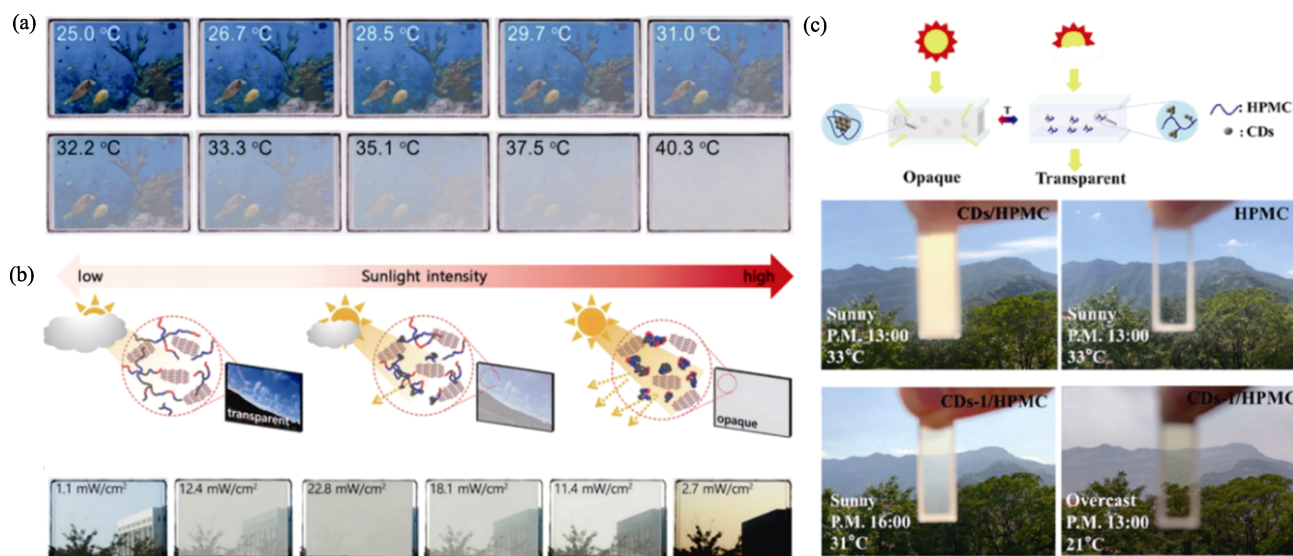


图 6 (a, b) PNDV/GO 水凝胶窗的(a) TC 和(b) PC 性能^[52]; (c) CDs/HPMC 复合薄膜的示意图及其 TC、PC 性能^[54]

Fig. 6 (a) Thermochromic and (b) photochromic performance of PNDV/GO hydrogel window^[52]; (c) Schematic diagram and photo- and thermo-chromic performance of CDs/HPMC composite film^[54]

能够定制复合体系的光热响应特性,从而在不同光照条件下展现出差异化的光学性能,为智能窗提供灵活的调控方案^[28, 55-58]。苏州大学程思团队^[55]利用 Au 纳米晶(Au NCs)的 LSPR 光热转换特性,将其与 TC 材料(HPMC)结合,开发出一种阳光驱动的被动式、节能的太阳光响应的光-热致变色智能窗,这种窗户能够在酷热天气(39 °C 炎热天气)下自动变暗以阻挡阳光,其可见光透射率从 90%(透明态)降至 1%(不透明态),在 30 °C 以下或阴天时恢复透明状态(图 7(a))。此外,东华大学丁彬团队^[56]将一维 Au 纳米链光热材料与 PNIPAM TC 水凝胶相结合,制备出具有自适应太阳光透过率调节功能的智能窗。通过改变组装条件(如盐浓度)可调节 Au 纳米链的链长和折叠程度,增强近红外区吸收,形成宽波段吸收平台。在模拟太阳光照射下, Au 纳米链表面温度可达 53.7 °C,比普通玻璃高 20 °C 以上,能够快速刺激水凝胶相变。室温下,窗户的可见光透过率高达 71.2%,有效提高了室内视觉舒适性。高温下,窗户的太阳光透过率从 63.1%降至 5.9%,调制幅度达 57.2%。户外模型房测试显示,智能窗的室内温度比普通玻璃低 7.8 °C(图 7(b)),被动冷却效果显著,体现了一维 Au 纳米链与 PNIPAM TC 水凝胶耦合体系在建筑节能方面的应用潜力。

Ag 纳米粒子光热材料与 PNIPAM TC 水凝胶的结合在光-热双响应智能窗领域同样展现出显著的应用潜力。香港科技大学黄宝陵团队^[28]将 Ag 纳米线(AgNWs)光热材料和 PNIPAM TC 水凝胶复合,开发出了一种兼具太阳光调节和热辐射调节功能的

全天候光-热双响应智能窗。利用 AgNWs 的光热效应和 PNIPAM 水凝胶相变引发的水定向迁移机制(图 7(c)),首次同步调节太阳光(调制幅度 58.4%)与红外热辐射(调制幅度 57.1%)。低温下, PNIPAM 溶胀呈透明态, AgNWs 网络能够反射热辐射,实现高太阳光透过(65.5%)和低红外热辐射散热(35.2%);高温下, PNIPAM 相分离排开水分,水层覆盖于 AgNWs 形成高红外热辐射层(92.3%),同时水凝胶浑浊阻挡太阳光透过(7.1%)。这种光-热双响应智能窗在冬季、夏季、白天和夜晚均能有效调控室内温度,其年节能效果是传统低辐射 Low-E 节能窗的 6.8 倍、水凝胶 TC 窗的 2.1 倍,为全气候智能窗技术发展提供了新思路。

3.3 半导体纳米晶光热材料和 TC 材料耦合

研究发现, LSPR 不仅存在于贵金属中,还广泛存在于硫化铜(Cu_xS)^[59-60]、硫化钼(MoS_2)^[61]、钨铈青铜(Cs_xWO_3)^[62-64]、氧化铟锡(ITO)^[65]和氧化锡锑(ATO)^[66-68]等具有较高自由载流子密度的半导体纳米晶材料中。与传统贵金属相比,这些半导体纳米晶可在紫外-可见-近红外光区展现出 LSPR 效应,显著拓展光吸收范围。当这类材料与 TC 材料耦合后,可将光能高效转化为热能,驱动 TC 材料发生光学状态转变。该集成体系兼具高光热转换效率与光谱响应设计灵活性,可在智能窗光热管理领域有效提升室内舒适度与能源利用效率。

金属硫化物(如 Cu_7S_4 、 MoS_2 等)因成本低、光热稳定性好且颗粒尺寸可控,成为光-热双响应智能窗的理想光热材料。例如, Cu_7S_4 纳米晶体是一种

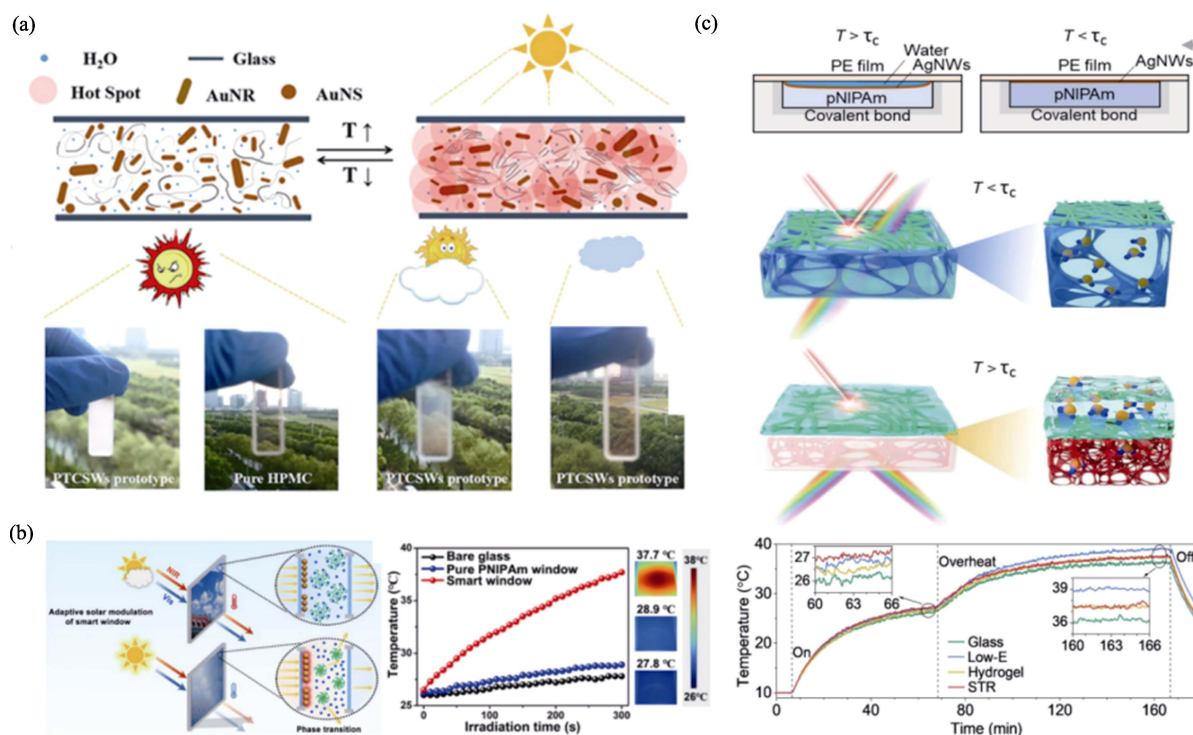


图 7 (a) Au 纳米晶与 HPMC^[55]、(b) 一维 Au 纳米链与 PNIPAM 水凝胶^[56]、(c) Ag 纳米线 与 PNIPAM 水凝胶^[28]耦合的光-热双响应智能窗的变色机理示意图和热调节能

Fig. 7 Schematic diagrams of color-changing mechanism and thermal regulation performance for the photo- and thermo-chromic dual-responsive smart windows integrated with (a) Au nanocrystals and HPMC^[55], (b) one-dimensional Au nanochains and PNIPAM hydrogel^[56], and (c) Ag nanowires and PNIPAM hydrogel^[28]

具有间接带隙的 p 型半导体材料, 在近红外区域表现出显著的 LSPR 特性, 成为与 TC 材料集成的优质光热组件。湘潭大学嵇海宁团队^[60]将 Cu_7S_4 光热材料与传统 VO_2 基 TC 薄膜集成, 制备出温度-太阳光双驱动的智能窗(图 8(a))。该智能窗在低温/高温下的可见光透过率分别为 60.8%和 55.9%, 太阳光透过率调节幅度达 12.3%; 而 Cu_7S_4 纳米粒子的高光热转换效率使其在红外光照射下迅速升温至 72 °C, 3 min 内即可完成透明-不透明状态转变, 甚至能在寒冷天气通过吸收阳光提升室内温度。此外, 具有高长径比和高自由载流子浓度的六方相 Cs_xWO_3 纳米颗粒可通过小极化子转变吸收 780~1100 nm 的近红外光, 并通过 LSPR 吸收 1100~2500 nm 的光^[69], 从而展现出出色的近红外屏蔽与高光热效应。大连工业大学史非团队^[64]通过将 $\text{Li}_m\text{Cs}_n\text{WO}_3$ 颗粒的高近红外屏蔽/光热效应与聚乙烯醇-聚(N-异丙基丙烯酰胺)(PVA-PNIPAM)水凝胶的热致调光特性结合, 制备了可见-近红外双波段快速自响应的 PVA-PNIPAM/ $\text{Li}_m\text{Cs}_n\text{WO}_3$ 复合水凝胶。在此体系中, 可见光透过率由 PVA-PNIPAM 的相变来调节, 而近红外光透过率由 $\text{Li}_m\text{Cs}_n\text{WO}_3$ 的小极化子跳跃和 LSPR 效应调控。如图 8(b)所示, 在太阳光照射下, $\text{Li}_m\text{Cs}_n\text{WO}_3$ 持

续吸收近红外光并将其转化为热能, 驱动水凝胶相变, 进而使复合水凝胶在室温(20 °C)下快速切换光谱透过与屏蔽。基于该材料的智能窗, 近红外屏蔽率最高达 99.77%, 且可见光透过率在相变前后分别为 67.48%和 16.76%, 有效兼顾了采光与隔热需求。

然而, 由于 Cu_7S_4 的黑色特性以及 $\text{Li}_m\text{Cs}_n\text{WO}_3$ 的高吸光性, 协调光热材料含量与智能窗透过率的关系成为两类材料的共同研究难点。可见光透过率作为智能窗的关键指标, 促使研究者寻求兼具高可见光透过率和近红外调控能力的材料。ATO 作为透明 N 型半导体, 其近红外吸收主要源于自由载流子引发的 LSPR 效应, 且具有较高的可见光透过率, 但传统 ATO 在近红外吸收与光热性能方面的表现有限, 这可通过调整自由载流子浓度来优化。济南大学蒋绪川团队^[68]设计的氟掺杂 ATO 纳米晶体, 通过引入高浓度氧空位和自由电子, 显著增强了 NIR 吸收与光热转换性能。基于该材料和 PNIPAM-g-壳聚糖(PNC)水凝胶的集成, 制备的智能窗初始可见光透过率高达 75.0%, 高温或强光照射下可逆相变后, 可屏蔽 300~2500 nm 范围内 99.5%的太阳辐射, 模拟室内温度比黑色窗户低 17.2 °C, 在建筑节能领域展现出显著的应用潜力(图 8(c))。

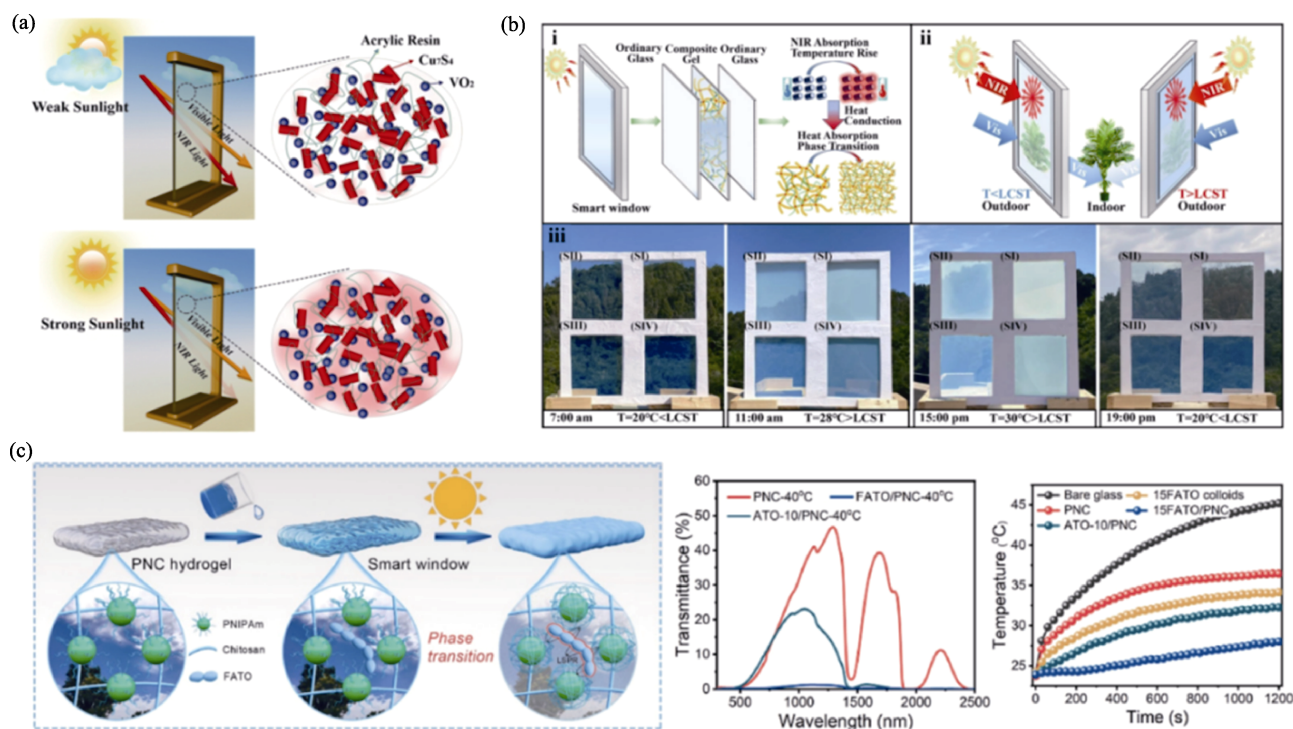


图8 (a) Cu_7S_4 与 VO_2 基 TC 薄膜集成的智能窗变色机理示意图^[60]; (b) $\text{Li}_m\text{Cs}_n\text{WO}_3$ 与 PVA-PNIPAM 水凝胶集成的智能窗结构示意图(i)、变色机理示意图(ii)和一天内不同时间的光学照片(iii)^[64];

(c) 氟掺杂 ATO 纳米晶体与 PNC 水凝胶集成的智能窗变色机理示意图和调光控温性能^[68]

Fig. 8 (a) Schematic diagram of color-changing mechanism of the smart window integrated with Cu_7S_4 and traditional VO_2 -based TC film^[60]; (b) Schematic diagram of structure (i), color-changing mechanism (ii), and optical photos at different time of the day (iii) of the smart window integrated with $\text{Li}_m\text{Cs}_n\text{WO}_3$ and PVA-PNIPAM hydrogel^[64];

(c) Schematic diagram of color-changing mechanism and dimming and temperature control performance of the smart window integrated with fluorine-doped ATO nanocrystals and PNC hydrogel^[68]

3.4 其它光热材料和 TC 材料耦合

不仅无机材料可用作光热材料, 有机聚合物如聚多巴胺纳米粒子(PDAPs)同样具备这一功能。与传统材料相比, PDAPs 具有优异的近红外响应性和高热导率, 并且表现出良好的生物相容性和抗氧化性。其制备工艺简便、成本低廉, 且产率较高, 仅需室温聚合即可。四川大学杜晓声团队^[70]通过原位聚合法成功制备了 PDAPs 与 PNIPAM 的复合水凝胶, 并将其应用于智能窗材料领域。该复合水凝胶利用 PDAPs 的光热转换效应, 能够在环境温度低于 PNIPAM 的低临界溶解温度(LCST)时, 借助阳光照射触发相变, 实现 TC。如图 9(a)所示, 在光学性能方面, 在 20 °C 时, 其可见光透过率超过 82%, 而在 40 °C 时可见光透过率显著降低, 并且具备出色的太阳光透过率调制能力(>86%)。此外, 引入 PDAPs 显著提升了智能窗的综合性能: 纯 PNIPAM 智能窗的响应时间为 130 s, 而添加质量分数 0.42% 的 PDAPs 后, 响应时间缩短至 33 s; 经过 100 次循环测试后, 性能依然保持稳定。这些结果表明, 添加 PDAPs 使 PNIPAM 基 TC 智能窗在太阳光下具备良

好的响应能力, 同时提升了智能窗的响应速度和稳定性, 为节能智能窗的发展提供了新思路。

为进一步提升光热材料的光热转换效应, 研究人员开始探索复合光热材料体系^[71-72]。例如, 哈尔滨工业大学赫晓东院士团队^[72]设计了一种由 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/GO/藻酸盐纤维非织造布(GMF)层和 P(NIPAM-co-DMAA)(PAD)水凝胶层组成的复合体系, 通过 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/GO 复合薄膜高效的光热转换效应与 PAD 水凝胶的 TC 特性(LCST 为 37.7 °C), 动态调制太阳光透过率(图 9(b))。当环境温度低于 LCST 时, 水凝胶的光透过率达 67.59%, 有利于阳光加热室内; 当环境温度高于 LCST 时, 光透过率降为 0, 有效阻挡热量进入。此外, 通过调节 MXene 与 GO 的比例, 光热复合薄膜的平衡温度可控制在 32~36 °C, 显著降低建筑温控能耗。

综上所述, 碳基纳米材料(GO、CDs)、贵金属(Au、Ag)纳米颗粒、半导体(Cu_xS 、 Cs_xWO_3 等)纳米晶及其他类型光热材料与 TC 材料的集成体系, 在光-热双响应智能窗应用中各有优势与局限: 碳基材料成本可控、相容性好且光热效率稳定, 兼具美

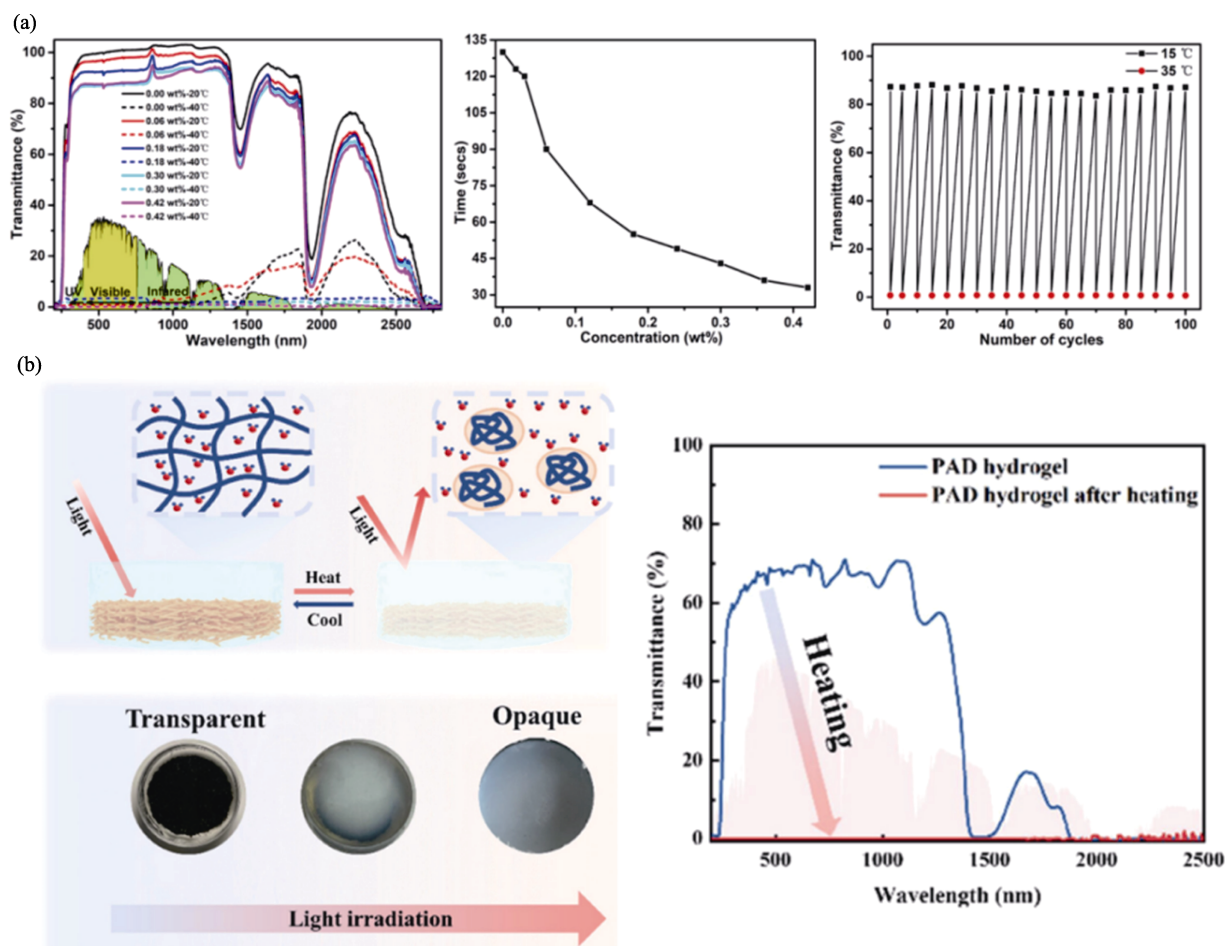


图 9 (a) PDAPs 与 PNIPAM 复合水凝胶基智能窗的光-热双响应性能^[70]; (b) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ MXene/GO 复合光热薄膜与 PAD 水凝胶集成的智能窗的变色机理示意图和光-热双响应性能^[72]

Fig. 9 (a) Photo- and thermo-chromic performance of the composite hydrogel-based smart window composed of PDAPs and PNIPAM^[70]; (b) Schematic diagram and photo- and thermo-chromic performance of the smart window integrated with $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ MXene/GO composite photothermal film and PAD hydrogel^[72]

学与节能协调潜力,但光谱设计难度高、初始透光率易降低且稳定性受环境影响;贵金属纳米颗粒的 LSPR 效应可控,能够协同调控光热辐射且循环性能稳定,但受高成本与规模化制备的制约;半导体纳米晶光吸收范围广、成本较低,部分材料可兼顾透光与红外屏蔽,但存在性能调控矛盾与长期稳定性不足的问题;PDAPs 体系制备简便、响应快速,而 MXene/GO 复合体系光热调控精准,这两类新型体系均面临界面兼容性设计复杂与规模化工艺不成熟的问题。

当前,光热-TC 耦合体系集成过程中仍面临三大核心挑战:一是透光性能与光热效率的协同调控难度大,强吸光特性容易降低初始透光率,尤其在低光照环境下更为突出,这制约了实用化推进;二是界面相容性不足导致能量传递效率低,在长期使用中容易因分层、团聚及材料稳定性下降引发性能衰退,机制尚未明确;三是规模化制备依赖精密技

术,成本较高且与现有工艺适配性差,阻碍了产业化发展。未来需通过分子设计优化、界面技术创新及低成本工艺开发来解决这些难题,推动材料深度融合,支撑零能耗建筑智能窗技术实用化。

4 结论与展望

光-热双响应材料及其智能窗作为建筑节能领域的重要研究方向,近年来在材料体系设计和性能优化方面取得了显著进展(表 1)。通过分子结构设计、材料复合和多组分单元集成策略,研究人员开发出多种具有光-热双响应特性的智能窗材料,为建筑节能提供了新的技术路径。研究表明,单组分光-热双响应材料虽然结构简单,但在实际应用中常面临响应阈值较高、循环稳定性不足等问题。相比之下,多组分复合体系通过功能材料的协同作用,能够实现更优异的光热调控性能。特别是将光热转

表 1 典型的光-热双响应材料性能比较

Table 1 Properties comparison of typical photo- and thermo-chromic dual-responsive materials

Photo- and thermo-chromic dual-responsive materials			PC performance			TC performance	
			Stimulus-response condition	Optical modulation or color change	Response time	Stimulus-response condition	Optical modulation or color change
Single-component material	Organic functional molecule	Salicylaldehyde Schiff base ^[31]	Irradiation with 365 nm UV light	White to red	—	Heating at 90 °C	White to yellow
		Spiropyran derivative ^[33]	Irradiation with UV light (365 nm) or visible light (>420 nm)	Purplish red to colorless	60 s (UV light), 12 min (visible light)	Heating at 60 °C	Colorless to purplish red
		Viologen derivativer ^[35]	Irradiation with UV light	Yellow to light green	20 s	Heating at 120–170 °C	Yellow to light green and dark green
	Inorganic transition metal oxide	ZnSe-doped MoO ₃ ^[36]	Irradiation with UV light	Pale-yellow to blue	180 min	Heating at 23–125 °C	Pale-yellow to deep blue
		Oxygen-deficient MoO ₃ ^[37]	Irradiation with UV light	Colorless to dark blue	180 min	Heating at 250 °C	Colorless to dark blue
	Perovskite material	PZNT ceramic ^[41]	Irradiation with 395 nm UV light	~9% (ΔR)	120 s	Heating at 250 °C for 10 min	~8% (ΔR)
Cs ₂ ZrCl ₆ :Bi ³⁺ ^[43]		Irradiation with 254 nm UV light	~27% (ΔR)	20 min	365 nm excitation after being kept at 250 °C	Blue to cyan	
Multicomponent composite material	All-organic complex	Mixing TC with PC organic pigment ^[44]	Irradiation with UV light	Purple to blue	—	Heating from 31 to 45 °C	Purple to green and then to colorless
		Host-guest CBV-CD ^[45] complex	Irradiation with 365 nm UV light	Colorless to blue	7 s	Heating from 25 to 100 °C	Colorless to reddish brown
	All-inorganic composite film	MoO ₃ /CdS ^[46]	Irradiation with a 100 W tungsten lamp	1.8 (ΔOD)	45–180 min	Heating from 100 to 225 °C	1.0 (ΔOD)
		MoO ₃ /CdSe and CdSe/MoO ₃ ^[47]	Irradiation with 254 nm UV light	0.7 (ΔA)	180 min	Heating from 25 to 225 °C	1.0 (ΔA)
	Organic-inorganic composite film	W ₁₈ O ₄₉ /PAM-PNIPA M hydrogel ^[27]	Irradiation with UV light	34.6% (ΔT_{lum})	20 min	Heating from 20 to 40 °C	79.49% (ΔT_{lum})
Integrated system combining TC material with photo-thermal material	Carbon-based photothermal material	PNDV hydrogel & GO ^[52]	Solar irradiation of 22.8 mW/cm ²	Colorless to yellow	—	Heating at 40 °C	Transparent to opaque
		HPMC & CDs ^[54]	Solar irradiation of 100 mW/cm ²	65.6% (ΔT_{sol})	5 min	Heating at 33 °C	Transparent to opaque
	Nobel metal nanoparticles photothermal material	PNIPAm hydrogel & 1D Au nanochain ^[55]	Solar irradiation of 2.8 kW·m ⁻²	80% (ΔT)	2 h	Heating from 20 to 40 °C	80% (ΔT)
		PNIPAm hydrogel & Ag nanowire ^[28]	Solar irradiation of 800 W/m ²	58.4% (ΔT_{sol})	40 min	Heating from 25 to 40 °C	58.4% (ΔT_{sol})
	Semiconductor nanocrystal photothermal material	VO ₂ & Cu ₇ S ₄ ^[60]	Infrared light irradiation of 100 W	Transparent to opaque	3 min	Heating at 70 °C	12.3% (ΔT_{sol})
		PVA-PNIPAM & LimCsnWO ₃ ^[64]	Near-infrared light irradiation	Transparent light blue to translucent blue	—	Heating at 50°C	50.7% (ΔT_{vis})
	Other photothermal material	PNIPAm hydrogel & PDAPs ^[70]	Solar irradiation	87.6% (ΔT_{lum})	33 s	Heating from 20 to 40 °C	87.6% (ΔT_{lum})
		PAD hydrogel & Ti ₃ C ₃ T _x MXene/GO ^[72]	One-sun illumination	Transparent to opaque	—	Heating at 37.7 °C	67.6% (ΔT_{lum})

ΔR : Reflectance modulation; ΔT : Transmittance modulation; ΔT_{lum} : Luminous transmittance modulation; ΔT_{sol} : Solar light transmittance modulation; ΔT_{sol} : Visible light modulation; ΔA : Absorbance modulation; ΔOD : Optical density modulation

Future directions for photo- and thermochromic dual-responsive materials

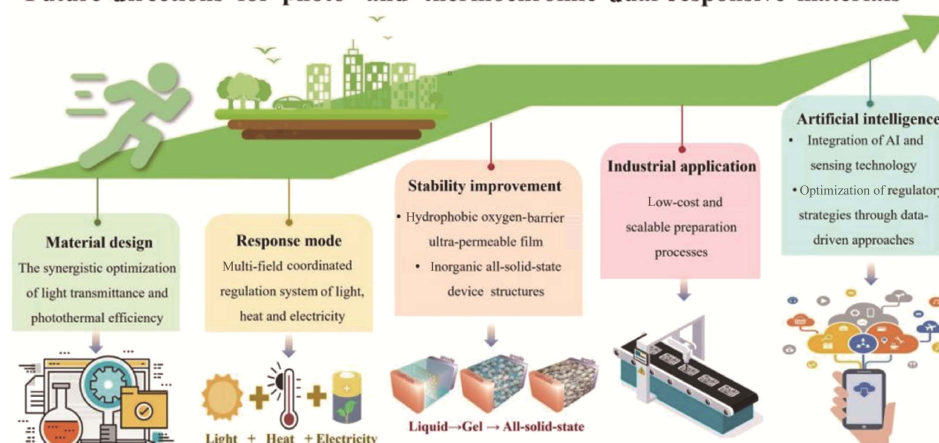


图 10 光-热双响应材料及智能窗的未来发展方向

Fig. 10 Prospective development orientation of photo- and thermo-chromic dual-responsive materials and smart windows

换材料与 TC 材料相结合的集成体系, 展现出良好的环境自适应性和节能潜力。然而, 现有技术仍面临透光性与光热效率难以兼顾、长期稳定性不足、规模化制备困难等挑战, 这些问题制约着光-热双响应智能窗的实际应用。

针对上述问题, 未来研究应重点突破以下方向(图 10): (1)在材料设计方面, 基于半导体异质结的能带工程与纳米晶粒子的 LSPR 效应, 协同调控光吸收与热转换过程, 协同优化透光性与光热效率; (2)在响应方式方面, 构建光-热-电多场协同调控系统, 提高响应灵敏度和能量利用效率; (3)在稳定性提升方面, 研发疏水隔氧超薄膜封装技术或开发无机全固态器件结构, 以应对复杂环境下的性能衰减问题; (4)在智能化方面, 深度融合人工智能(AI)与传感技术, 利用 AI 算法对环境的多维度参数(如光照强度、温度、湿度)进行实时精准分析与预测, 驱动智能窗动态自适应调控, 同时通过数据挖掘优化调控策略, 突破传统调控的滞后性与局限性, 充分发挥 AI 在智能窗技术升级中的前沿价值; (5)在产业化方面, 亟需发展低成本、可规模化的制备工艺, 加速产业化进程。通过持续优化材料体系、创新器件结构和完善制备工艺, 光-热双响应智能窗将在 AI 技术的深度赋能下, 加速向“零能耗、自适应、多功能”方向发展。未来, AI 不仅能进一步提升智能窗动态光热调控的精准性与能效, 还可推动其与发电、储能、显示等功能的协同集成, 为建筑行业绿色转型提供更智能、高效的技术支撑。

参考文献:

[1] WANG S, JIANG T, MENG Y, *et al.* Scalable thermochromic

smart windows with passive radiative cooling regulation. *Science*, 2021, **374**(6574): 1501.

- [2] MEI Z, DING Y, WANG M, *et al.* A colorful electrochromic infrared emissivity regulator for all-season intelligent thermal management in buildings. *Advanced Materials*, 2025, **37**(20): 2420578.
- [3] CHEN M, DENG J, ZHANG H, *et al.* Advanced dual-band smart windows: inorganic all-solid-state electrochromic devices for selective visible and near-infrared modulation. *Advanced Functional Materials*, 2025, **35**(3): 2413659.
- [4] 赵思名, 郭震宇, 黄娅, 等. 面向建筑节能的新型光热调控技术: 主动电致变色与被动辐射制冷. *材料导报*, 2025, **39**(1): 24100008.
- [5] LIANG J, SUI C, TIAN J, *et al.* Ionic liquid-based reversible metal electrodeposition for adaptive radiative thermoregulation under extreme environments. *Advanced Functional Materials*, 2026, **36**(6): 2419087.
- [6] HUANG S, GUO H, XIA P, *et al.* Integrated device of luminescent solar concentrators and electrochromic supercapacitors for self-powered smart window and display. *Nature Communications*, 2025, **16**: 2085.
- [7] ZHAO F, WANG B, HUANG B, *et al.* Inorganic electrochromic smart windows for advancing building energy efficiency. *Nature Reviews Clean Technology*, 2025, **1**(6): 396.
- [8] ZHAO T, CHEN Y, GUO X, *et al.* High performance tungsten-doped VO₂ polycrystalline films for advanced dynamic radiant thermal management. *Materials Futures*, 2025, **4**(3): 035101.
- [9] YAO G, XIAO Y, CHEN M, *et al.* All-solid-state variable emissivity devices with excellent smart thermal control performance. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, **19**(16): 2402082.
- [10] WANG Y, SUN X, LIU Q, *et al.* Functional gel materials for next-generation electrochromic devices and applications. *Chemical Society Reviews*, 2025, **54**(7): 3475.
- [11] WANG J, GUO X, BIAN C, *et al.* Roadmap for electrochromic smart devices: from materials engineering and architectures design to multifunctional application. *Progress in Materials Science*, 2025, **153**: 101461.
- [12] CHEN M, ZHANG X, YAN D, *et al.* Oxygen vacancy modulated amorphous tungsten oxide films for fast-switching and ultra-stable dual-band electrochromic energy storage smart windows. *Materials Horizons*, 2023, **10**(6): 2191.
- [13] ZHAO X, CHEN Q, FAN F, *et al.* Dual-band electrochromic smart window for dynamic switching between radiative cooling and solar heating. *Advanced Science*, 2025, **12**: e04483.

- [14] SHAO Z, HUANG A, CAO C, *et al.* Tri-band electrochromic smart window for energy savings in buildings. *Nature Sustainability*, 2024, **7(6)**: 796.
- [15] DENG J, CHEN M, ZHANG X, *et al.* Water-in-eutectogel electrolytes for scalable solid-state electrochromic devices. *Chemical Engineering Journal*, 2025, **516**: 163746.
- [16] CHEN M, ZHANG X, SUN W, *et al.* A dual-responsive smart window based on inorganic all-solid-state electro- and photochromic device. *Nano Energy*, 2024, **123**: 109352.
- [17] KUROIWA H, INAGAKI Y, MUTOH K, *et al.* On-demand control of the photochromic properties of naphthopyrans. *Advanced Materials*, 2019, **31(2)**: 1805661.
- [18] MENG W, KRAGT A J J, GAO Y, *et al.* Scalable photochromic film for solar heat and daylight management. *Advanced Materials*, 2024, **36(5)**: 2304910.
- [19] ZHU Y, YAO Y, CHEN Z, *et al.* WO₃ quantum dot photochromical film. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, **239**: 111664.
- [20] TANG K, DONG K, LI J, *et al.* Temperature-adaptive radiative coating for all-season household thermal regulation. *Science*, 2021, **374(6574)**: 1504.
- [21] 陈艺丹, 赵九蓬, 豆书亮, 等. 二氧化钒智能窗光热调控原理及进展. *光学学报*, 2024, **44(19)**: 1925004.
- [22] GENG C, CHEN Y, WEI H, *et al.* Adaptive variable emissivity reflector for seasonal and daily thermal regulation in regions with significant temperature variations. *Advanced Functional Materials*, 2024, **34(52)**: 2410819.
- [23] ZHANG Z, ZHANG L, ZHOU Y, *et al.* Thermochromic energy efficient windows: fundamentals, recent advances, and perspectives. *Chemical Reviews*, 2023, **123(11)**: 7025.
- [24] WANG Y, RUNNERSTROM E L, MILLIRON D J. Switchable materials for smart windows. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2016, **7**: 283.
- [25] ZOU X, JI H, ZHAO Y, *et al.* Research progress of photo-/electro-driven thermochromic smart windows. *Nanomaterials*, 2021, **11(12)**: 3335.
- [26] YONG W, CHEN N, XIONG T, *et al.* Development of high-performance Mo doped WO₃ photo-electrochromic devices. *Materials Today Chemistry*, 2024, **38**: 102095.
- [27] TAO J, TIAN S, LI B, *et al.* Photo-thermochromic W₁₈O₄₉/hydrogel hybrid smart windows for graded and dual-band sunlight control. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **482**: 149079.
- [28] LIN C, HUR J, CHAO C Y H, *et al.* All-weather thermochromic windows for synchronous solar and thermal radiation regulation. *Science Advances*, 2022, **8(17)**: eabn7359.
- [29] HADJODIS E, MAVRIDIS I M. Photochromism and thermochromism of Schiff bases in the solid state: structural aspects. *Chemical Society Reviews*, 2004, **33**: 579.
- [30] HADJODIS E. Photochromic and thermochromic anils. *Molecular Engineering*, 1995, **5**: 301.
- [31] LI Y, LI H, JIN W, *et al.* π - π stacking controlled photochromic/thermochromic properties of salicylaldehyde Schiff base in solid state. *Dyes and Pigments*, 2022, **202**: 110295.
- [32] TER SCHIPHORST J, VAN DEN BROEK M, DE KONING T, *et al.* Dual light and temperature responsive cotton fabric functionalized with a surface-grafted spiropyran-NIPAAm-hydrogel. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, **4(22)**: 8676.
- [33] JI S, WANG M, SU C, *et al.* Preparation and performance of thermochromic solid-solid phase change materials based on negative photochromic spiropyran. *Polymer*, 2025, **318**: 127995.
- [34] ZENG Y, FU Z, CHEN H, *et al.* Photo- and thermally induced coloration of a crystalline MOF accompanying electron transfer and long-lived charge separation in a stable host-guest system. *Chemical Communications*, 2012, **48(65)**: 8114.
- [35] HUANG L, LI X N, SHEN Y, *et al.* Tunable photo/thermochromic properties of Cd(II)-viologen coordination polymers modulated by coordination modes for flexible imaging films and anti-counterfeiting. *Dalton Transactions*, 2024, **53(20)**: 8803.
- [36] TOMÁS S A, ARVIZU M A, ZELAYA-ANGEL O, *et al.* Effect of ZnSe doping on the photochromic and thermochromic properties of MoO₃ thin films. *Thin Solid Films*, 2009, **518(4)**: 1332.
- [37] MARTÍN V C S, MORALES-LUNA M, GARCÍA-TINOCO P E, *et al.* Chromogenic MoO₃ thin films: thermo-, photo-, and electrochromic response to working pressure variation in rf reactive magnetron sputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, **29(18)**: 15486.
- [38] LE T K, PHAM P V, DONG C L, *et al.* Recent advances in vanadium pentoxide (V₂O₅) towards related applications in chromogenics and beyond: fundamentals, progress, and perspectives. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, **10(11)**: 4019.
- [39] MCGEE R, GOSWAMI A, KHORSHIDI B, *et al.* Effect of process parameters on phase stability and metal-insulator transition of vanadium dioxide (VO₂) thin films by pulsed laser deposition. *Acta Materialia*, 2017, **137**: 12.
- [40] LUKONG V T, UKOBA K, JEN T C. Fabrication of vanadium dioxide thin films and application of its thermochromic and photochromic nature in self-cleaning: a review. *Energy & Environment*, 2023, **34(8)**: 3495.
- [41] FENG X, CAO S, GUO Y, *et al.* The photo-thermochromic properties and mechanism of PZNNT ferroelectric ceramics. *Materials Letters*, 2022, **320**: 132354.
- [42] YUAN X, WANG J X, LI Y, *et al.* Multilevel information encryption based on thermochromic perovskite microcapsules via orthogonal photic and thermal stimuli responses. *ACS Nano*, 2024, **18(16)**: 10874.
- [43] YI Q, BAO H, LI H, *et al.* Enhanced photochromism and thermochromism in zirconium halide perovskite through bismuth doping and thermal recrystallization. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, **19**: 2401964.
- [44] WANG P, ZHANG X, WANG Z, *et al.* A robust superhydrophobic smart coating with reversible thermochromic and photochromic property. *Journal of Bionic Engineering*, 2022, **19(6)**: 1589.
- [45] ZHOU F, ZHANG Y, ZONG H, *et al.* Photochromic and thermochromic inks based on supramolecular complexes of viologens and cyclodextrin for printable anticounterfeiting applications. *Chemical Engineering Journal*, 2025, **507**: 160650.
- [46] QUEVEDO-LOPEZ M A, RAMIREZ-BON R, OROZCO-TERAN R A, *et al.* Effect of a CdS interlayer in thermochromism and photochromism of MoO₃ thin films. *Thin Solid Films*, 1999, **343/344**: 202.
- [47] MORALES-LUNA M, ARVIZU M A, PÉREZ-GONZÁLEZ M, *et al.* Effect of a CdSe layer on the thermo- and photochromic properties of MoO₃ thin films deposited by physical vapor deposition. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, **123(28)**: 17083.
- [48] ZHAO T, CHEN Y, GU J, *et al.* Multifunctional radiation conditioning emitter for laser and infrared with adaptive radiative cooling. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, **16(39)**: 52153.
- [49] ZHAO Y, JI H, LU M, *et al.* Thermochromic smart windows assisted by photothermal nanomaterials. *Nanomaterials*, 2022, **12(21)**: 3865.
- [50] KE Y, CHEN J, LIN G, *et al.* Smart windows: electro-, thermo-, mechano-, photochromics, and beyond. *Advanced Energy Materials*, 2019, **9(39)**: 1902066.

- [51] ZHU C H, LU Y, PENG J, *et al.* Photothermally sensitive poly(*N*-isopropylacrylamide)/graphene oxide nanocomposite hydrogels as remote light-controlled liquid microvalves. *Advanced Functional Materials*, 2012, **22**(19): 4017.
- [52] LEE E, KIM D, YOON J. Stepwise activation of switchable glazing by compositional gradient of copolymers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, **8**(39): 26359.
- [53] CHOU H T, CHEN Y C, LEE C Y, *et al.* Switchable transparency of dual-controlled smart glass prepared with hydrogel-containing graphene oxide for energy efficiency. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, **166**: 45.
- [54] CHANG Q, SHEN Z, GUO Z, *et al.* Hydroxypropylmethyl cellulose modified with carbon dots exhibits light-responsive and reversible optical switching. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, **13**(10): 12375.
- [55] CAO D, XU C, LU W, *et al.* Sunlight-driven photo-thermochromic smart windows. *Solar RRL*, 2018, **2**(4): 1700219.
- [56] GUO M, YU Q, WANG X, *et al.* Tailoring broad-band-absorbed thermoplasmonic 1D nanochains for smart windows with adaptive solar modulation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, **13**(4): 5634.
- [57] LI Y, WANG Y, LU J, *et al.* Synergistically photothermal Au nanoprisms@MXene enable adaptive solar modulation of HA-PNIPAM hydrogels for smart window. *Chemical Engineering Journal*, 2023, **457**: 141299.
- [58] ZHANG Z, WANG Q, LI Z, *et al.* A skin-beyond multifrequency camouflage system with self-adaptive discoloration and radar-infrared stealth. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **494**: 152867.
- [59] ZHU H, WANG L. Smart window based on Cu₇S₄/hydrogel composites with fast photothermal response. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, **202**: 110109.
- [60] ZHAO Y, JI H, OU Y, *et al.* Novel sunlight-driven Cu₇S₄/VO₂ composite films for smart windows. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, **12**(7): 2534.
- [61] ZHANG J, DU P, XU D, *et al.* Near-infrared responsive MoS₂/poly(*N*-isopropylacrylamide) hydrogels for remote light-controlled microvalves. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, **55**(16): 4526.
- [62] WU M, SHI Y, LI R, *et al.* Spectrally selective smart window with high near-infrared light shielding and controllable visible light transmittance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, **10**(46): 39819.
- [63] WANG B, WANG Q, ZHU Y, *et al.* A photo-/thermo-dual-responsive Cs_xWO₃/PNIPAM composite hydrogel for energy-efficient windows. *Materials Research Express*, 2019, **6**(8): 085708.
- [64] ZHANG H, LIU J, SHI F, *et al.* A novel bidirectional fast self-responsive PVA-PNIPAM/Li_mCs_nWO₃ composite hydrogel for smart window applications. *Chemical Engineering Journal*, 2022, **431**: 133353.
- [65] LIANG X, GUO S, CHEN M, *et al.* A temperature and electric field-responsive flexible smart film with full broadband optical modulation. *Materials Horizons*, 2017, **4**(5): 878.
- [66] XU Z, WANG S, HU X Y, *et al.* Sunlight-induced photo-thermochromic supramolecular nanocomposite hydrogel film for energy-saving smart window. *Solar RRL*, 2018, **2**(11): 1800204.
- [67] ZHANG Z, ZHANG R, XU L, *et al.* Visible and infrared optical modulation of PSLC smart films doped with ATO nanoparticles. *Dalton Transactions*, 2021, **50**(29): 10033.
- [68] YANG Z, ZHANG M, ZHAO X, *et al.* Fluorine-doped ATO NCs with enhanced LSPR effect for smart windows with adaptive solar modulation. *Ceramics International*, 2024, **50**(11): 19543.
- [69] LIU J, RAN S, FAN C, *et al.* One pot synthesis of Pt-doped Cs_xWO₃ with improved near infrared shielding for energy-saving film applications. *Solar Energy*, 2019, **178**: 17.
- [70] TIAN J, GU J, PENG H, *et al.* Sunlight-driven photo-thermochromic hybrid hydrogel with fast responsiveness and durability for energy efficient smart windows. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, **149**: 106538.
- [71] MA D, CHEN L, FAN F, *et al.* Solar light management enabled by dual-responsive smart window. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14**(50): 56065.
- [72] YAN Q, DING R, LI P, *et al.* Thermochromic Janus membranes with dynamic solar modulation toward sustainable and high-efficiency solar-to-thermal intelligent management. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024, **12**(19): 7487.