

MXene/PVA/PNIPAM 复合水凝胶智能窗的相变热响应与光热调控性能研究

李长达¹ 黄毓²

1.上海申能崇明发电有限公司, 上海 202155

2.上海电力大学 能源与机械工程学院, 上海 201306

[摘要]围绕相变调温型智能窗对建筑围护界面热管理效率的提升需求, 研究以 PVA/PNIPAM 双网络水凝胶为基体, 引入二维 MXene 构建复合水凝胶智能窗体系, 系统考察其微观结构、热学转变、光学调制及模型窗热管理表现。结果显示, MXene 的加入没有破坏基体, 约 33℃ 附近的热响应区间却改善了传热与热管理能力; 当 MXene 含量由 1wt% 提高至 4wt% 时, 复合体系热导率由 $1.82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 提升至 $2.74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。光学结果表明, 材料在常温下仍保持较好的透光能力, 而高温相变后可见光与太阳能透过率同步下降, 表现出较强的动态遮蔽能力。综合透光、遮热和结构稳定性后, 3wt% 样品在性能均衡性上更具优势, 其 25℃ 时的可见光透过率为 81.22%, 40℃ 时降至 27.44%, 模型腔体峰值温度控制在 49.4℃。研究表明, MXene/PVA/PNIPAM 复合水凝胶能够通过吸光升温、相变触发、散射增强、透热降低的连续过程实现稳定调温, 为相变储热方向的智能窗材料设计提供了实验依据。

[关键词]MXene; PVA/PNIPAM; 水凝胶智能窗; 热响应; 光热调控

DOI: 10.33142/sca.v9i5.19741

中图分类号: TP391.44

文献标识码: A

Study on Phase Change Thermal Response and Photothermal Control Performance of MXene/PVA/PNIPAM Composite Hydrogel Smart Windows

LI Changda 1, HUANG Yu 2

1. Shanghai Shenneng Chongming Power Generation Co., Ltd., Shanghai, 202155, China

2. College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, 201306, China

Abstract: Focusing on the demand of the phase-shifting temperature regulating smart window for improving the thermal management efficiency of the building envelope interface, the research takes PVA/PNIPAM dual network hydrogel as the matrix, introduces two-dimensional MXene to build a composite hydrogel smart window system, and systematically examines its microstructure, thermal transformation, optical modulation and model window thermal management performance. The results showed that the addition of MXene did not damage the matrix, but improved the heat transfer and thermal management capabilities in the thermal response range around 33 °C; When the MXene content is increased from 1 wt% to 4 wt%, the thermal conductivity of the composite system increases from $1.82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ to $2.74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. The optical results indicate that the material maintains good transparency at room temperature, but after high-temperature phase transition, the visible light and solar transmittance decrease synchronously, showing strong dynamic shielding ability. After comprehensive analysis of light transmission, heat shielding, and structural stability, the 3 wt% sample has an advantage in performance balance. Its visible light transmittance at 25 °C is 81.22%, which decreases to 27.44% at 40 °C, and the peak temperature of the model cavity is controlled at 49.4 °C. The research shows that MXene/PVA/PNIPAM composite hydrogel can achieve stable temperature regulation through the continuous process of light absorption and temperature rise, phase change triggering, scattering enhancement, and heat transfer reduction, which provides an experimental basis for the design of smart window materials in the direction of phase change heat storage.

Keywords: MXene; PVA/PNIPAM; hydrogel smart windows; thermal response; photothermal regulation

引言

建筑围护结构的热调控能力直接影响室内能耗与热

舒适水平, 兼具透光、隔热与动态响应功能的智能窗材料因此受到持续关注。水凝胶因含水网络结构稳定、可调光

学特性明显, 在智能窗领域展现出较强应用潜力。以聚 N-异丙基丙烯酰胺 (PNIPAM) 为代表的温敏聚合物能够在相变温区内发生链段重排, 从而实现透过率调节, 但其导热能力和热响应效率仍有提升空间。MXene 具有优良的宽谱吸收性能、层状导热特征和丰富表面官能团, 将其引入聚乙烯醇 PVA/PNIPAM 双网络体系, 有望同时改善材料的结构稳定性、光热转换性能与热管理表现。基于此, 文章围绕 MXene/PVA/PNIPAM 复合水凝胶智能窗展开研究。

1 材料制备与表征

建筑外围护结构承担着太阳辐射筛分、室内外温差缓冲和热环境稳定三重任务, 窗体又处在传热最敏感的位置, 材料选得合不合适, 后续空调负荷就会跟着变^[1]。传统玻璃在可见光透过方面表现稳定, 但它对近红外辐射的主动调节能力有限, 夏季强光持续作用时, 进入室内的热量往往上升得很快。温敏水凝胶智能窗因此受到关注, 原因并不复杂, 这类材料在低温状态下能够维持较高透明度, 温度接近相变阈值后, 聚合物链段发生重排, 透光路径被重新组织, 材料会从单纯透光逐渐转向透光与遮热并行^[2]。PNIPAM 体系的相变区间通常处在室温附近, 这一点与建筑热舒适调控需求较为接近, 不过单一 PNIPAM 水凝胶仍有短板, 热触发速度不够快, 热量在网络内部传递偏慢, 单靠基体自身实现高效热管理并不轻松。PVA 的加入改善了网络韧性和成膜稳定性, 双网络结构也为后续引入功能填料留下了调控空间, 因此以 PVA/PNIPAM 为主体构建温敏智能窗, 具备较强的材料基础^[3]。

1.1 样品制备

复合体系以 PVA/PNIPAM 双网络水凝胶为基体, 并以 MXene 作为功能填料进行改性。MXene 制备阶段以 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{-MAX}$ 相为前驱体, 在氩气保护下于 700°C 条件中反应 7h, 随后通过洗涤、去镍和离心步骤获得分散性较好的片层材料^[4]。复合水凝胶制备阶段先将 MXene 纳米片分散于脱氧去离子水中, 再与 PVA/PNIPAM 前驱溶液混合, 之后加入交联剂和引发剂, 在室温下完成原位聚合。为比较不同掺量对结构和性能的影响, 实验设置了 1wt%、2wt%、3wt% 和 4wt% 四组 MXene 含量, 并保留未加 MXene 的 PVA/PNIPAM-15 作为基准样。

所得凝胶进一步封装为智能窗样件, 用于分析复合体系在透光、光热转化和热管理过程中的变化。模型窗测试采用长 20cm、宽 20cm、高 15cm 的方形泡沫箱腔体, 外部光照强度保持在 100mW cm^{-2} , 这一布置虽然属于实验室尺度, 但它能够把不同样品在相同辐照条件下的温升差异直观地拉开, 便于判断材料的真实调控效果。

1.2 表征与性能评价体系

复合体系的性能评价需要同时覆盖结构、界面、热响应、光学调制和应用表现。微观层面主要依靠 SEM 观察孔道结构的连续性和片层材料的分散情况, XRD 则用来判断 MXene 进入双网络后是否保留原有层状结构, 以及基体和填料之间是否形成了稳定界面。热学部分分别从热导率、三个角度切入, 前者热导率用来衡量热量在复合网络中的传递效率, DSC 用以辨识相变区间是否发生偏移, TGA 分析测试用以考察材料的稳定性。

光学部分以 250~2500nm 范围内的紫外-可见-近红外透过谱为基础, 配合可见光透过率 T_{lum} 和太阳光透射率 T_{sol} 两个参数评价动态透光和太阳辐射管理水平。热管理测试进一步将材料封装为模型窗体, 通过腔温变化考察其在实际受光条件下的调温效果。对于智能窗材料而言, 单一指标的高低并不能直接说明应用价值, 只有当热响应速度、透光保持、太阳能调制和结构稳定性形成协同时, 材料的综合优势才会真正显现。

2 相变热响应与结构调控特征

2.1 微观形貌与界面结合特征

图 1 为不同 MXene 含量下 MXene/PVA/PNIPAM 复合水凝胶的 SEM 图。由图 1 可以看出, PVA/PNIPAM 基体经冷冻干燥后形成了贯通性较强的多孔网络, 这种海绵状骨架给水分迁移和片层填料嵌入都留出了空间。低含量 MXene 加入后, 孔壁仍较薄, 孔道保持较高开放度, 结构上的变化主要表现为骨架表面开始出现片层附着。随着含量提升至 3wt%, MXene 在网络中的覆盖更加均匀, 孔壁厚度上升, 局部支撑作用明显增强, 连续导热通路也在这一阶段更容易建立。继续增加到 4wt% 后, 材料虽然失去了整体多孔特征, 但局部孔道缩小和片层堆叠的趋势已经出现, 界面热阻可能随之增加。

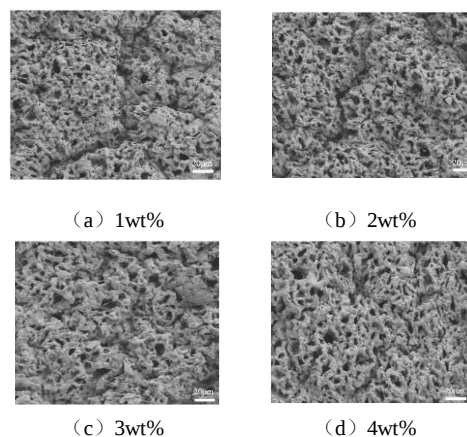


图 1 不同 MXene 含量 MXene/PVA/PNIPAM 复合水凝胶的 SEM 图

图2为MXene/PVA/PNIPAM的XRD分析结果。由图2可以看出,纯PVA在 $2\theta=20^\circ$ 处存在微晶峰,纯MXene在 $6^\circ\sim 7^\circ$ 及 $35^\circ\sim 40^\circ$ 附近保留特征衍射峰;复合后这些峰位并未消失,也没有出现新的物相峰,说明体系以物理复合为主。

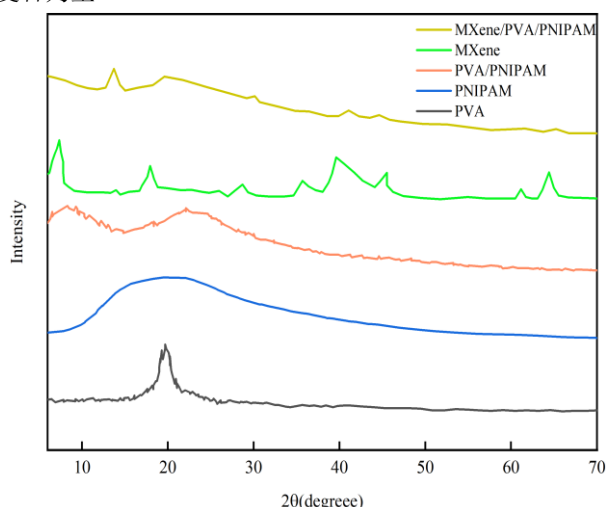


图2 MXene/PVA/PNIPAM的XRD图谱

2.2 热传导与热转变行为

热导率和热转变行为决定了这类材料能否在实际工况中迅速作出响应。MXene引入后,复合水凝胶的热导率随着MXene含量的增加逐渐升高,MXene含量为1 wt%、2 wt%、3 wt%和4 wt%时,复合材料样品热导率分别达到 1.82 、 2.28 、 2.52 和 $2.74 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。这表明,二维片层在复合材料中确实形成了更加有效的传热路径和导热网络。

表1 不同MXene含量复合水凝胶的玻璃化转变温度

样品	$T_{g, \text{onset}}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{g, \text{mid}}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{g, \text{end}}$ ($^\circ\text{C}$)
PVA/PNIPAM-15	32.51	33.12	33.35
MXene/PVA/PNIPAM-1	32.60	33.15	33.36
MXene/PVA/PNIPAM-2	32.65	33.18	33.40
MXene/PVA/PNIPAM-3	32.72	33.24	33.46
MXene/PVA/PNIPAM-4	32.78	33.30	33.51

表1为不同MXene含量下复合水凝胶的玻璃化转变温度。由表1可以得出,各样品的玻璃化转变温度在 $32.51\sim 32.78^\circ\text{C}$ 之间,起始和终止温度只发生了很小的幅度波动,这意味着MXene没有打乱PVA/PNIPAM基体原有的温敏响应区间。

2.3 热稳定性与结构保持能力

热稳定性和保水能力关系到智能窗能否长时间工作,

否则材料在实验阶段表现出的光学和热学优势很容易在使用阶段被削弱。图3为MXene/PVA/PNIPAM复合水凝胶的TGA和DTG曲线图。

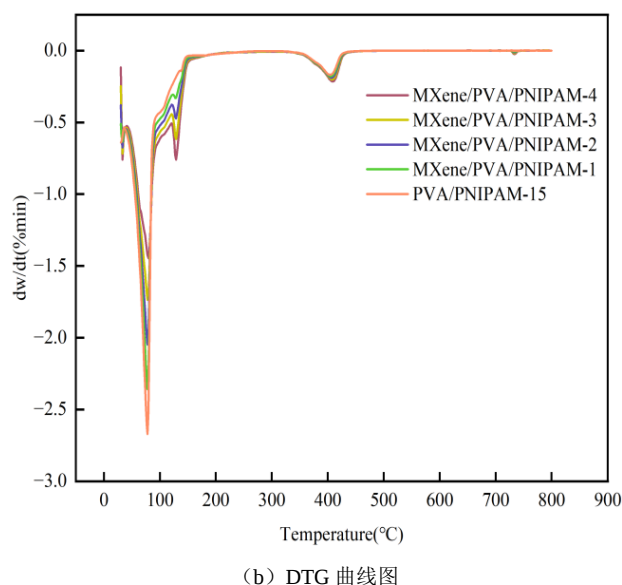
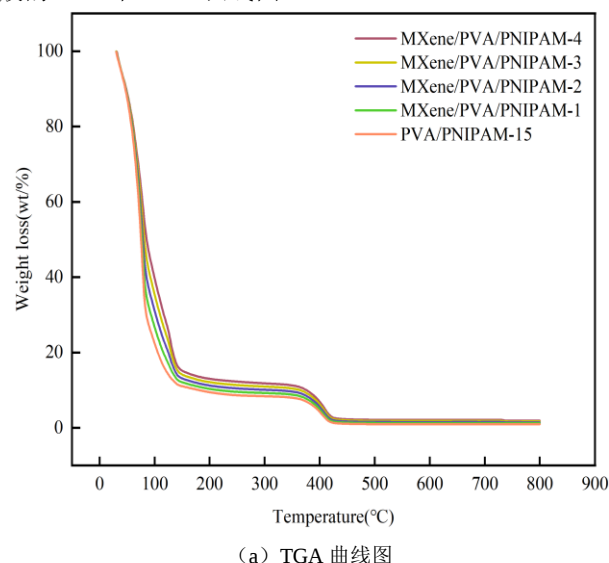


图3 MXene/PVA/PNIPAM复合水凝胶

由图3(a)的TGA结果可知,样品主要经历两个显著的失重阶段, 150°C 左右的失重占比最高,幅度约为 $85\%\sim 90\%$,主要对应自由水和结合水的蒸发; 350°C 的失重则与PVA和PNIPAM骨架裂解有关。图3(b)可知,引入MXene后,DTG主峰整体向高温方向偏移, 800°C 时残余质量也略有增加,这表明片层填料在热解过程中起到了物理阻隔和界面增强作用。对智能窗来说,这一结果的意义并不在高温极限本身,而在于材料的实际工作温度远低于聚合物降解区间,因此其服役安全性具有较强冗余性。

3 光热调控性能与智能窗应用分析

3.1 光学调制与太阳能管理特征

光学调制是水凝胶智能窗进入应用场景的关键环节，因为窗体既不能在常温下失去基本采光能力，也不能在高温辐照下放任热量大量穿透。表 2 和表 3 为复合水凝胶的光学调控参数：可见光透过率和太阳光透射率。

表 2 复合水凝胶的可见光透过率

样品	T_{lum} (25°C)	T_{lum} (40°C)	ΔT_{lum}
基体	96.56%	37.83%	58.73%
1wt%	87.99%	30.58%	57.41%
2wt%	85.73%	28.55%	57.18%
3wt%	81.22%	27.44%	53.78%
4wt%	77.83%	26.11%	51.72%

随着 MXene 含量的上升，复合水凝胶材料在 25 °C 下的可见光透过率 T_{lum} 由 96.56% 依次降至 87.99%、85.73%、81.22% 和 77.83%。

表 3 复合水凝胶的太阳光透射率

样品	T_{sol} (25°C)	T_{sol} (40°C)	ΔT_{sol}
基体	88.33%	46.41%	41.92%
1wt%	83.05%	41.48%	41.57%
2wt%	79.42%	40.03%	39.39%
3wt%	75.54%	38.15%	37.39%
4wt%	72.45%	36.84%	35.61%

随着 MXene 含量的上升，复合水凝胶材料在 25°C 下的太阳光透射率 T_{sol} 则由 88.33% 降至 72.45%。这种下降符合片层材料宽谱吸收增强后的规律。而且，3 wt% 样品在室温下仍保留 81.22% 的可见光透过率，说明其静态采光能力依然处在可接受范围。温度升高到 40°C 后，PNIPAM 链段发生疏水塌缩，相分离带来的光散射叠加 MXene 的吸光效应，使样品的高温遮蔽能力增强。

以 3wt% 样品为例，其可见光透过率 T_{lum} 降至 27.44%，太阳光透射率 T_{sol} 降至 38.15%，可见光调制幅度达到 53.78%，太阳能调制幅度达到 37.39%。1450nm 和 1950 nm 附近的吸收谷对应水分子的泛频吸收，这说明复合体系的光谱变化并不是单一因素造成的，而是水分、聚合物网络和 MXene 片层共同作用的结果。整体来看，MXene 提升了近红外吸收和热触发效率，PNIPAM 则负责完成高低温状态之间的动态切换，两者在智能窗中形成了较为清晰的功能分工。

3.2 模型窗体热管理效能

当复合水凝胶材料被真正装入窗体之后，热管理能力能否实现，主要取决于相变触发速度和后续透热抑制效果。

图 4 为 MXene/PVA/PNIPAM 水凝胶智能窗户模拟的腔内温度变化图。由图 4 可知，普通玻璃条件下峰值腔温为 60.4°C，而引入 MXene 的复合水凝胶窗可将峰值温度分别控制在 51.8、50.1、49.4 和 47.9°C。相对于普通玻璃，四组样品的降幅分别达到 14.2%、17.1%、18.2% 和 20.7%。这一结果说明，随着 MXene 含量升高，窗体对峰值热量的削减能力持续增强。进一步观察 1200s 后的平衡状态可以发现，高含量样品的腔温普遍能够稳定在 30°C 及以下，隔热表现更加稳定。

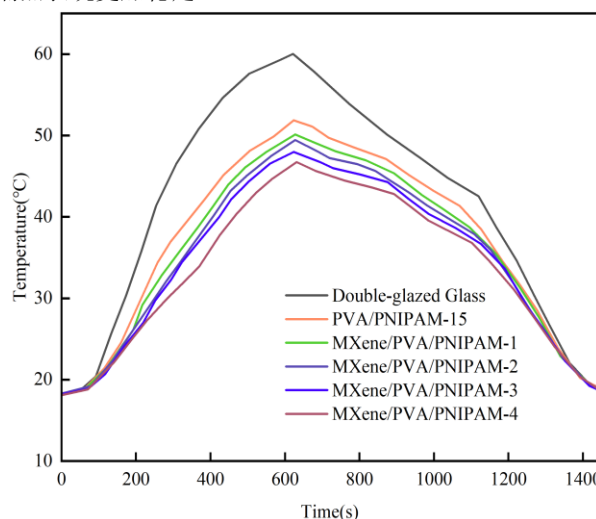


图 4 MXene/PVA/PNIPAM 水凝胶智能窗户模拟的腔内温度变化图

4wt% 样品虽然在降温幅度上最突出，但其常温透光率已经降至 77.83%，如果面向实际建筑使用，视觉舒适和采光需求不能被忽略。3wt% 样品在腔温控制和透光保持之间给出了更协调的答案，它的峰值腔温比普通玻璃低 11.0°C，同时常温透光仍保持在 80% 以上。这个结果说明，智能窗性能优化不能只关注最低温升，而要考虑采光、遮热和相变响应，对其进行综合的评价判断。

4 结论

将二维 MXene 引入水凝胶，一方面增强了复合水凝胶材料的热传导能力和光吸收能力，另一方面并未破坏 PVA/PNIPAM 基体在 33°C 附近的温敏响应区间。材料在结构上保持物理复合特征，界面氢键作用和多孔骨架共同支撑了较好的稳定性。光学与热管理数据进一步说明，复合体系能够在常温采光与高温遮热之间完成动态切换，智能窗由此具备削减峰值腔温和延缓热量进入室内的能力。从应用适配角度看，4wt% 样品呈现出更强的遮热效果，但透光损失也更明显；3wt% 样品在热导率、透光保持、相变调光和模型腔温控制之间取得了较好的平衡，更适合

作为相变调温型智能窗的优选配方。后续研究若继续引入高焓相变组分、优化封装结构并扩大循环测试时长，这一体系在相变储热型建筑窗材料方向仍有进一步提升空间。

[参考文献]

- [1]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[J].材料导报,2025,39(1):16-33.
- [2]张文霞,贾岩,程海峰,等.全固态电致变色器件研究进展[J].材料导报,2025,39(1):44-54.
- [3]赵海燕,王玲,杨槐.智能调光技术研究进展及产业化情况分析[J].液晶与显示,2025,40(10):1423-1439.
- [4]王海萍,陈必华,陶益杰,等.聚醚接枝丙烯酸树脂基凝胶聚合物电解质的制备及在电致变色器件中的应用[J].材料导报,2024,38(7):218-222.

作者简介:李长达(1990—),男,硕士,主要从事火力发电厂运维检修和技术改造等相关应用研究工作。