



MXene/硬脂酸定型相变复合材料的太阳能光热储能性能

尚蒙娅¹, 郑露寒¹, 高慧星¹, 贾夏萱¹, 陆 亮², 彭 进¹, 李俊壮¹, 黄鹏东¹
(¹河南工业大学材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; ²江苏三菱磨料磨具有限公司, 江苏 盐城 224003)

摘 要: 针对传统有机相变材料(PCM)在固-液相变过程中易发生泄漏, 及本身不具备光吸收能力而难以直接高效利用太阳能这两大关键技术瓶颈, 本研究发展了一种结合化学交联与冷冻干燥的简易复合策略。该策略成功将作为相变功能组分的硬脂酸(SA)与具有优异光热转换性能的二维 MXene 纳米片协同封装于聚乙烯醇(PVA)三维多孔网络骨架中, 制备出了一种定型光热相变复合材料。利用扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)和傅里叶变换红外光谱(FT-IR)等表征手段, 系统分析了复合材料的微观形貌、晶体结构及化学组成, 结果证实硬脂酸被均匀、稳定固定于 PVA 的多孔骨架内, 且与基体间具有良好的相容性。进一步通过差示扫描量热(DSC)、热重分析(TGA)及紫外-可见-近红外光谱测试, 并结合模拟太阳光源, 定量评估了其储热性能、热稳定性及光热转换行为。研究表明, MXene 的引入使光吸收率提升了约 350%, 实现了高效的太阳光捕获与光热转换。当 SA 含量低于 75% 时, 复合材料在发生固-液相变时能有效避免液相泄漏, 展现出优异的定型效果, 其相变焓高达 112.56 J/g, 具有较高的储能密度, 此外, 复合材料具有良好的热稳定性和循环性能。本工作为解决相变材料的泄漏问题并同时赋予其高效转换能力提供了一种简便、可靠的材料设计与制备思路, 为开发集太阳能捕获、热能存储与释放于一体的新型热能管理材料奠定了实验基础。

关键词: MXene; 硬脂酸; 光热储能; 定型相变材料

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0878

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-374-08

Solar photothermal energy storage performance of MXene/stearic acid shape-stabilized composite phase change materials

SHANG Mengya¹, ZHENG Luhan¹, GAO Huixing¹, JIA Xiakuan¹, LU Liang², PENG Jin¹,
LI Junzhuang¹, HUANG Pengdong¹

(¹School of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China; ²Jiangsu Sanling Abrasives Co., Ltd., Yancheng 224003, Jiangsu, China)

Abstract: Conventional organic phase change materials (PCMs) often suffer from leakage during solid-liquid transitions and limited solar absorption, which restrict their practical application in thermal energy management. To address these challenges, this study presents a facile composite design combining chemical cross-linking and freeze-drying techniques. Stearic acid (SA), serving as the phase change component, is effectively encapsulated

收稿日期: 2025-09-28; 修改稿日期: 2025-10-18。

基金项目: 河南省科技攻关项目 (242102321066); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划 (21421260); 河南省重点研发专项 (241111233100); 河南工业大学本科生科研训练项目 (KYXL2025104); 河南工业大学大学生创新训练计划 (202510463097)。

第一作者及通信联系人: 尚蒙娅 (1990—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为光热转换、相变储能, E-mail: mengyashang@haut.edu.cn。

引用本文: 尚蒙娅, 郑露寒, 高慧星, 等. MXene/硬脂酸定型相变复合材料的太阳能光热储能性能[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 374-381.

Citation: SHANG Mengya, ZHENG Luhan, GAO Huixing, et al. Solar photothermal energy storage performance of MXene/stearic acid shape-stabilized composite phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 374-381.

together with two-dimensional MXene nanosheets, which possess superior photothermal conversion properties, within a three-dimensional porous polyvinyl alcohol (PVA) network, resulting in a shape-stabilized photothermal composite PCM. Comprehensive characterization using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) confirmed the uniform and stable immobilization of SA within the PVA matrix and demonstrated excellent compatibility among components. Thermal energy storage performance, thermal stability, and photothermal conversion were further evaluated using differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), UV-vis-NIR spectrophotometry, and simulated solar irradiation. The incorporation of MXene increased light absorption by approximately 350 percent, enabling efficient solar harvesting and photothermal conversion. The composite maintained superior shape stability with no observable leakage for SA mass fraction up to 75%, while achieving a high latent heat of 112.56 J/g. In addition, it exhibited excellent thermal stability and cycling durability. This work establishes a robust and scalable strategy for fabricating leakage-proof, solar-responsive PCMs, providing a solid experimental foundation for advanced thermal energy management systems that integrate solar harvesting, thermal storage, and controlled energy release.

Keywords: MXene; stearic acid; photothermal energy storage; shape-stabilized phase change material

随着社会与科技的快速发展,全球能源消耗量大幅攀升,对高效能源解决方案的需求愈发迫切。太阳能是储量最丰富的清洁可再生能源之一,而光热转换技术是将太阳辐射转化为热能,进而实现太阳能高效利用的重要方式^[1-2]。然而,太阳辐射的间歇性限制了其直接应用,因此发展高效的热能储存技术尤为关键^[3]。与显热和化学反应热储存技术不同,基于有机相变材料(PCM)的潜热储存技术凭借高储能密度、稳定的化学性质、无腐蚀性以及低过冷度等优点成为近期研究热点^[4]。然而,传统的单组元相变材料存在易泄漏、热导率低、功能单一和光吸收差等缺陷,限制了太阳能储存技术的广泛应用^[5-6]。为克服这些缺陷,构建形状稳定的复合相变材料被认为是最有效的策略。近年来,研究者们开发了多种多孔三维网络作为支撑骨架,通过毛细作用力和空间限域效应等封装有机 PCM。Liu 等^[7]通过一步合成法将十八烷封装于聚乙烯醇气凝胶骨架中。Wang 等^[8]通过直接浸渍法将十六烷与十四胺引入石墨烯气凝胶及全碳气凝胶中,实现了对有机相变材料的有效封装。Chen 等^[9]以交联聚乙烯醇和 Kapok 纤维构建的三维网络结构为支架,成功封装了 1-十四烷醇,并实现了 204 J/g 的高效热能储存。

然而,单组元相变材料本身仍是被动的热能储

存单元,无法直接利用太阳能。要赋予其光热转换能力,需引入光热剂。二维过渡金属碳化物/氮化物(MXene),自 2011 年被发现以来,已成为光热领域的明星材料^[10-11]。尤其是研究最为广泛的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene,因局域表面等离子共振效应(LSPR)而具备覆盖整个太阳光谱的宽带吸收特性,以及近乎 100% 的内部光热转换效率^[10]。Zhu 等^[12]用 K^+ 诱导 MXene 纳米片自组装制备了无黏结剂、定向的多孔气凝胶,随后用熔融浸渍法封装石蜡,实现了高达 98.4% 的光热转换效率和 261.7 J/g 的储能密度。Jiang 等^[13]通过自组合法合成 MXene/纤维素纳米晶体复合气凝胶,将其作为支撑材料,利用真空浸渍法封装十六胺,实现了 94.1% 的光热转换效率和 221.5 J/g 的储能密度。尽管已有研究证实了 MXene 在光热相变储能领域的巨大潜力,但现有制备方法仍存在一些局限性,即依赖于“先构筑骨架,后填充相变材料”的多步工艺,过程相对烦琐,且难以在单一体系中实现对多组分(多孔骨架、PCM、光热剂)的协同调控与均一分散。

本研究通过一步交联与冷冻干燥法,利用 PVA 三维多孔网络协同封装硬脂酸(SA)与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene,制备出一种兼具高潜热、优异形状稳定性和高效光热转换性能的多功能定型相变复合材料。

PVA 经交联后形成的三维多孔网络可有效解决 SA 的泄漏问题,而均匀分散的 MXene 纳米片则充当高效的太阳能捕获与光热转换材料。通过系统研究复合材料的微观结构、储放热性能、热稳定性及光热储能行为,为开发下一代高性能太阳能储存材料提供了新思路。

1 实 验

1.1 实验材料

聚乙烯醇(1788)、戊二醛、硬脂酸 40、盐酸、曲拉通、氟化锂、钛碳化铝、去离子水,上海麦克林生化科技有限公司,所有试剂均为分析纯。

1.2 实验过程

MXene/硬脂酸定型相变复合材料制备过程如图 1 所示。

1.2.1 MXene 前体的制备

将 20 mL 12 mol/L HCl 倒入烧杯,加入 1 g LiF, 38℃ 搅拌 30 min, 分次加入 1 g Ti_3AlC_2 粉末, 38℃ 反应 36 h。用 1 mol/L HCl 离心洗涤 2 次,再用去离子水洗涤至 pH>6。将沉淀物稀释在集气瓶中,通入惰性气体,冰水浴超声剥离 1 h,再离心 10 min,得到 MXene 纳米片胶体悬浮液,冷冻干燥 72 h 得 MXene 粉末,将其配成 50 mg/mL 悬浮液。

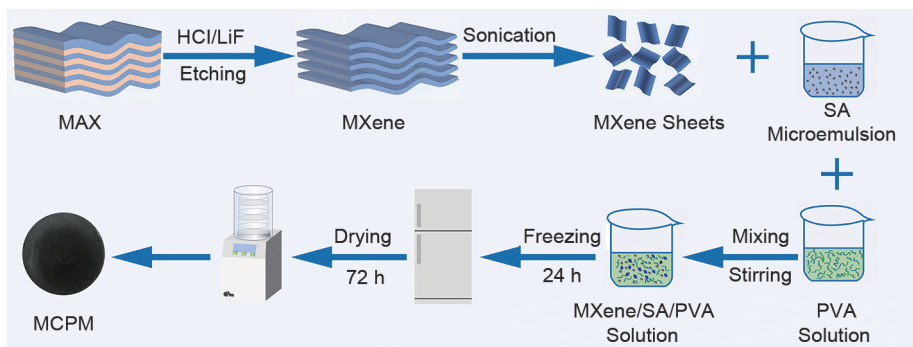


图 1 MXene/硬脂酸复合材料制备流程
Fig. 1 Preparation process of MXene/stearic acid composite material

1.2.2 PVA 溶液的配制

将 10 g PVA 加入 90 mL 水,在 95℃、500 r/min 条件下搅拌 2 h,得到 10% 的 PVA 溶液。

1.2.3 硬脂酸微乳液的制备

在 80℃ 下,将 6 g SA、30 mL 去离子水和 400 μL 曲拉通在 400 r/min 搅拌 1 h,标记为 1 号。同样,7 g SA、30 mL 去离子水和 460 μL 曲拉通为 2 号;7.5 g SA、30 mL 去离子水和 500 μL 曲拉通为 3 号。

1.2.4 复合相变材料的制备

将 1 mL MXene 悬浮液加入 1 号 SA 微乳液中,随后缓慢加入 39.5 mL 的 10% PVA 溶液。在 80℃、400 r/min 下搅拌 1 h,依次加入 500 μL 戊二醛(搅拌 4 min)和 500 μL 1.2 mol/L HCl 溶液(搅拌 2~3 min)以引发交联。将所得凝胶倒入培养皿中在 -18℃ 下冷冻 24 h,冷冻干燥 72 h 后,获得定型相变复合材料 MCPM1。

为系统研究组分含量对材料热性能的影响,通过改变 SA 微乳液、MXene 悬浮液和 PVA 溶液的用

量,得到 MCPM2-MCPM9 系列样品,各样品配方见表 1。

表 1 MXene/硬脂酸定型相变复合材料配方

Table 1 Formulation of MXene/stearic acid shape-stabilized phase change composite materials

样品	SA/%	PVA/%	MXene/%
MCPM1	60	39.5	0.5
MCPM2	70	29.5	0.5
MCPM3	75	24.5	0.5
MCPM4	60	39	1
MCPM5	70	29	1
MCPM6	75	24.5	1
MCPM7	60	38.5	1.5
MCPM8	70	28.5	1.5
MCPM9	75	23.5	1.5

1.3 材料表征

将复合材料断面用离子溅射仪进行喷金处理 100 s,喷金电流为 10 mA。用扫描电子显微镜(SEM, FEIINSPECTF50)观察材料的微观结构与形貌。将复合材料研磨成粉末,以 $\text{Cu K}\alpha$ 射线为辐射源,使用 X 射线衍射仪(XRD, MINIFLEX600)分

析材料的晶体结构, 扫描角度 $5^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。用傅里叶变换红外光谱分析仪(FT-IR, Nicolet IS20)鉴定材料的化学结构及官能团, 扫描范围 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 。采用紫外-可见-近红外分光光度计(UV-vis-NIR, UV-2600i)测试材料的光吸收性能, 测试范围 $200 \sim 1400 \text{ nm}$ 。采用差示扫描量热仪(DSC, DSC200F3)测试复合材料的相变温度和相变焓, 温度范围 $15 \sim 100^{\circ}\text{C}$, 升温速率 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 氮气氛围。采用热重仪(TG, ZRT-2)分析复合材料的稳定性, 温度范围 $20 \sim 800^{\circ}\text{C}$, 升温速率 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 氮气氛围。

用3A级氙灯模拟太阳光(PE300L)照射样品表面, 设置光强为 $1 \text{ sun}(1 \text{ kW}/\text{m}^2)$, 用红外热像仪(Potric326 Pro)每隔 10 s 记录样品表面温度变化, 分析样品的光热转换和储放热性能。将加热台设定在 80°C , 温度恒定后将滤纸放至加热台, 并将样品放置于滤纸上, 加热 5 min 和 10 min 后拍照记录泄漏情况, 验证相变材料封存效果。

2 结果与讨论

2.1 样品形貌

如图2(a)所示, 激光束透过MXene悬浮液时可观察到清晰的丁达尔效应, 表明水溶液的单层或少层MXene纳米片分散性良好^[14]。图2(b)中MCPM9样品呈现出由交联PVA形成的多孔互联的网络结构, SA均匀包裹于网络结构中。

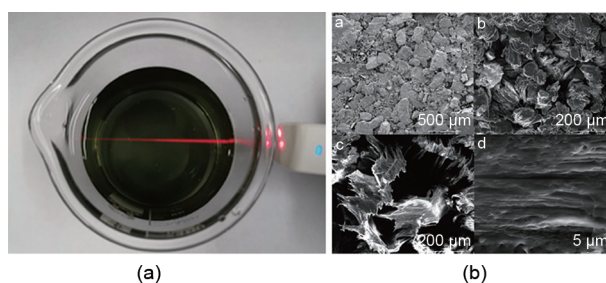


图2 (a) MXene悬浮液的丁达尔效应; (b) 纯MXene粉末和MCPM9在不同放大倍率下的SEM图像

Fig. 2 (a) Tyndall effect of MXene suspension; (b) SEM images of pure MXene powder and MCPM9 at different magnification levels

2.2 结构分析

如图3(a)所示, MXene在 $2\theta=9.52^{\circ}$ 展现出明显的特征衍射峰, 对应(002)晶面, 表明生成了单层MXene, $2\theta=39.12^{\circ}$ 、 60.21° 等位置处的衍射峰表明MXene中存在未完全刻蚀的MAX相^[15]。SA在 $2\theta=21.76^{\circ}$ 、 24.04° 处出现了较为明显的特征峰, 分别对应(110)和(021)晶面, PVA的衍射峰与SA的衍射峰重合于 $2\theta=20.13^{\circ}$ 。MCPM9各个峰位和纯SA、MXene及PVA所有的衍射峰基本重合, 且未观察到新的衍射峰, 这表明各组分主要通过物理混合与包裹结合。由于PVA高分子链的插层效应以及对MXene重新堆叠的抑制作用, MXene纳米片晶面间距增大, 气凝胶中MXene相较于MXene粉末样品, 其特征衍射峰向小角度发生了微小偏移。

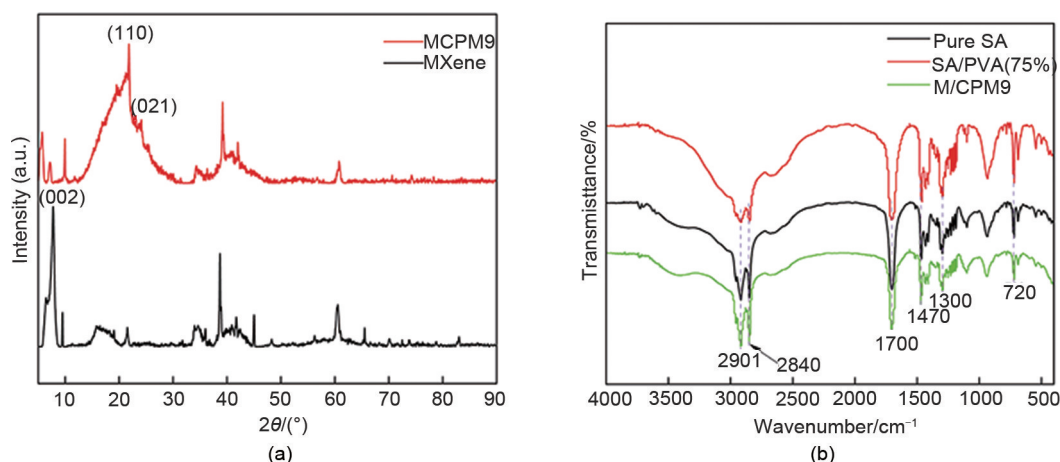


图3 (a) MXene和MCPM9的XRD图谱; (b) 纯SA、SA/PVA(75%)和MCPM9的FT-IR吸收图谱

Fig. 3 (a) XRD patterns of MXene and MCPM9; (b) FT-IR absorption spectra of pure SA, SA/PVA(75%), and MCPM9

如图3(b)红外谱图所示, 2910 cm^{-1} 和 2840 cm^{-1} 对应SA中的C—H伸缩振动, 1700 cm^{-1} 对应C=O伸缩振动峰, 1470 cm^{-1} 对应C—H弯曲振动, 1300 cm^{-1} 对应O—H面内弯曲振动, 而 720 cm^{-1} 的峰则对应长链烷烃中—CH₂—基团的摇摆振动。MCPM9的红外谱图中既包含SA的全部特征峰, 也出现了PVA的宽O—H伸缩振动峰, 且未出现新的吸收峰, 这表明SA、PVA与MXene主要通过物理相互作用结合, 与XRD结果一致。

2.3 吸光和储放热循环性能

复合材料的光吸收能力是其实现光热储存功能的基础。图4(a)为不同样品的UV-vis-NIR吸收光

谱。SA/PVA表现出极低的光吸收能力, 引入MXene后, 复合材料的吸光率显著提升。由于MXene纳米片优异的宽光谱光吸收特性, MCPM9的吸光率相较于SA/PVA(75%)提升了约350%。通过DSC测试了各样品的储放热性能, 此外还引入了两个关键的性能评价指标——相对焓效率(λ)和焓效率(η)^[12]。其中

$$\lambda = \frac{\Delta H_m(\text{PCC})}{\Delta H_m(\text{SA})} \times 100\%$$

用于直接比较单位质量的复合材料与单位质量的纯SA之间的储能能力差距:

$$\eta = \frac{\Delta H_m(\text{PCC})}{\Delta H_m(\text{SA}) \times w} \times 100\%$$

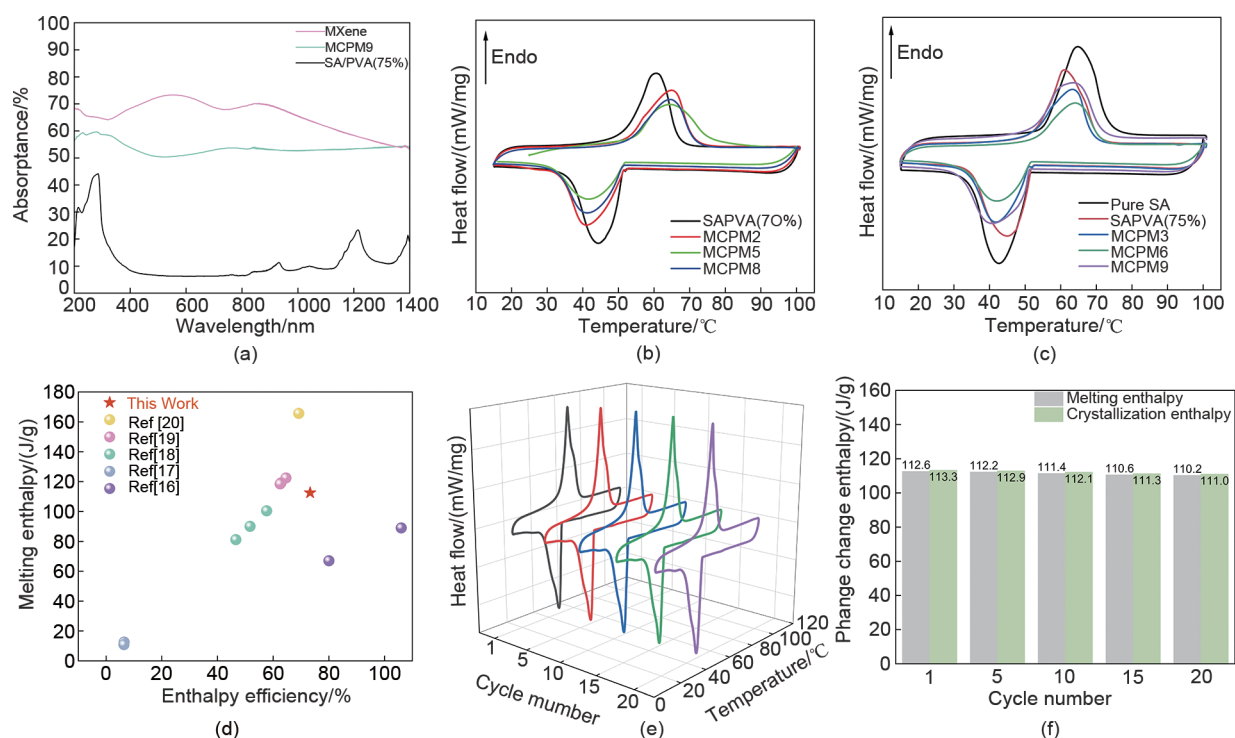


图4 (a) MXene、SA/PVA (75%) 和 MCPM9 在 200~1400 nm 的吸光率; (b) 70% SA 和不同 MXene 含量的相变复合材料 DSC 曲线; (c) 75% SA 和不同 MXene 含量的相变复合材料 DSC 曲线; (d) MCPM9 储热性能与其他研究的比较; (e) MCPM9 经过 20 次熔融-凝固循环后的 DSC 曲线; (f) MCPM9 经过 20 次熔融-凝固循环后的熔融焓和结晶焓

Fig. 4 (a) Absorbance of MXene, SA/PVA(75%), and MCPM9 within the wavelength range of 200—1400 nm; (b) DSC curves of phase change composite materials containing 70% SA and varying MXene contents; (c) DSC curves of phase change composite materials containing 75% SA and varying MXene contents; (d) Comparison of the heat storage performance of MCPM9 with other studies; (e) DSC curve of MCPM9 after 20 melting-solidification cycles; (f) The enthalpy of melting and crystallization of MCPM9 after 20 melting-solidification cycles

用于衡量复合材料中SA在相变过程中性能的保持程度。其中, $\Delta H_m(\text{PCC})$ 和 $\Delta H_m(\text{SA})$ 分别为复合材料和SA的熔融焓, w 为复合材料中SA的质量分数。DSC测试结果如图4(b)、(c)所示, 相应数据

见表2。MCPM复合材料表现出明显的熔融和结晶行为, 且熔点和结晶点均接近纯SA, 焓效率 η 值普遍处于较高水平, 表明PVA三维网络在有效束缚SA的同时, 未严重干扰其分子链的规整排列与结

晶过程，最大程度保留了 SA 的相变储热性能。此外，随着 MXene 含量增加，复合材料的熔融焓和结晶焓并非单调变化，而是先减小后增大。MCPM9 的熔融焓和结晶焓分别为 112.56 J/g 和 113.32 J/g，相对焓效率和焓效率分别为 73.27% 和 97.69%，拥有最佳的储能密度和焓效率。最优样品 MCPM9 与其他多种基于 MXene 的复合相变材料^[16-20]的比较结果如图 4(d)所示，MCPM9 可

以在储能密度和焓效率之间实现优异的平衡。此外，为评估其在实际应用中的长期可靠性，对 MCPM9 进行了 20 次熔融-凝固循环。第 1、5、10、15 和 20 次循环后的 DSC 曲线和对应的相变焓分别如图 4(e)、(f)所示。经过 20 次循环后，其熔融焓仅从 112.6 J/g 微降至 110.2 J/g，循环性能良好，展现了其作为长周期热能储存应用的热可靠性。

表 2 不同样品的 DSC 数据
Table 2 DSC data of different samples

样品	熔点/℃	熔融焓/(J/g)	结晶点/℃	结晶焓/(J/g)	相对焓效率/%	焓效率/%
Pure SA	64.83	153.62	42.63	153.88	100	100
SA/PVA(70%)	60.70	111.65	44.39	109.29	72.68	103.83
SA/PVA(75%)	61.14	123.90	45.00	124.39	80.65	107.5
MCPM3	63.32	96.50	41.75	92.75	62.82	83.76
MCPM6	64.07	77.57	42.06	76.49	50.49	67.33
MCPM9	63.59	112.56	40.80	113.32	73.27	97.69
MCPM2	65.02	97.71	41.02	93.00	63.60	90.86
MCPM5	64.55	73.72	41.59	72.94	47.99	68.56
MCPM8	64.56	88.16	41.18	88.74	57.39	81.98

2.4 光热储能性能

为系统评估复合材料的光热转换与储放热性能，采用模拟太阳光(光功率密度 1 kW/m²)对样品进行了光热转换性能测试，结果如图 5(a)所示。在持续 800 s 光照下，由于 SA/PVA(75%)光吸收能力弱，其升温过程十分缓慢，表面最高温度仅达 35.6℃，低于 SA 的熔融温度。而含有 MXene 的复合材料(MCPM3、MCPM6、MCPM9)均表现出明

显的升温响应，表明 MXene 作为高效光热转换剂，能将光能高效转化为热能。此外，MCPM 在升温 and 降温过程中均展现出清晰的相变平台，通过 MXene 转换得到的热能可驱动 SA 在加热时熔融储存潜热或在冷却时凝固释放潜热。复合材料的光热响应行为与 MXene 含量之间存在非单调依赖关系，在光照阶段，样品的平均升温速率关系为 MCPM3 ≈ MCPM6 > MCPM9，主要是由于 MCPM9 具有最

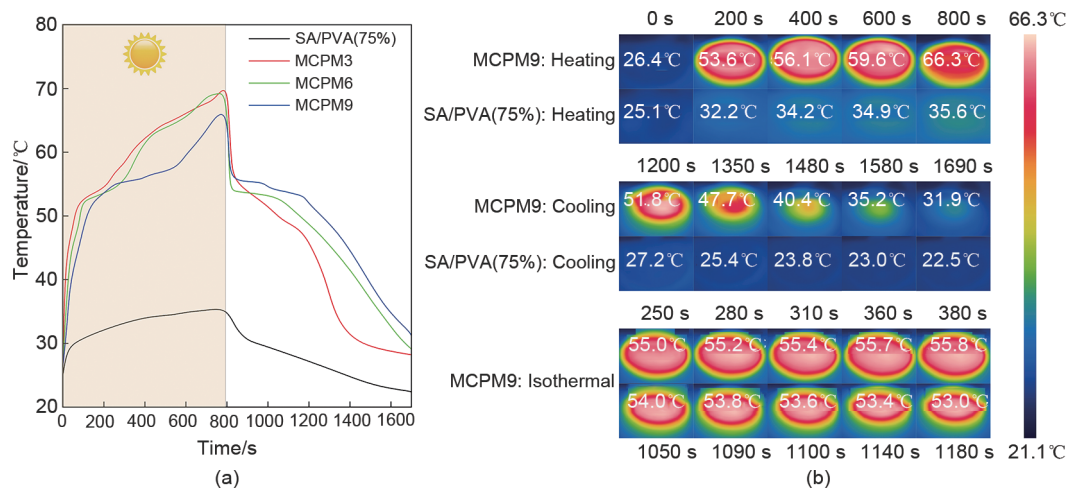


图 5 (a)MXene/硬脂酸复合材料在模拟太阳光下的时间-温度曲线; (b) MCPM9 和 SA/PVA (75%) 红外热成像
Fig. 5 (a) Time-temperature curves of MXene/stearic acid composite material under simulated sunlight;
(b) Infrared thermal imaging diagrams of MCPM9 and SA/PVA(75%)

高的熔融焓，在相变区间内可将吸收的大部分光能转化为相变潜热，可显著抑制材料温度的上升。而在自然冷却阶段，冷却速率关系为 $\text{MCPM3} > \text{MCPM6} > \text{MCPM9}$ 。MCPM9 凭借其最高的结晶焓，在相变过程中持续释放结晶潜热，有效补偿了体系的热量散失，因而表现出最慢的冷却速率和最佳的保温性能。

在图 5(b) 中的红外热像图中，加热时 MCPM9 样品表面迅速由蓝色(室温)变为亮红色至白色(高温)，而 SA/PVA(75%) 则保持在较低的蓝绿色温区。在自然冷却过程中，MCPM9 的降温速率也远快于 SA/PVA(75%)，到 1690 s 时 MCPM9 温度下降超过 30℃，表明 MXene 的引入可显著增强复合材料的热响应速率。图 5(b) 底部的恒温测试进一步揭示了复合材料优异的恒温调控能力，无论是吸热还是放热阶段，MCPM9 的表面温度可在较长时间内维持在 53~56℃。相变期间，在 130 s 内 MCPM9 的表面温度变化不超过 1℃。

2.5 热稳定性

采用 TGA 测试评估复合材料的热稳定性，结果如图 6(a) 及表 3 所示。SA 为单阶段失重，分解温度约为 206℃，并在 345℃ 左右完全分解。而 SA/PVA(75%) 和 MCPM9 则均表现为两阶段热分解行为，分别对应 SA 和 PVA 的分解。SA/PVA(75%) 和 MCPM9 的 SA 分解温度分别为 223℃ 和 231℃，相较于纯 SA 分别提升了约 17℃ 和 25℃，表明 PVA 致密的三维网络结构有效抑制了 SA 在高温下的挥发与热解，而 MXene 的引入进一步增强了这种屏障效应。此外，MCPM9 的残余质量明显高于 SA/PVA(75%)，证实了无机组分 MXene 的引入可提高复合材料的热稳定性。复合材料的定型相变特性如图 6(b) 所示，在 80℃ 下，SA 在数秒内即完全熔化，而 SA 含量为 60% 和 70% 的复合材料，在加热 10 min 后仍无明显泄漏，表明其具备优异的形状稳定性。但 SA 含量为 75% 的 MCPM9 却出现了轻微泄漏迹象，这表明该含量已接近 PVA 网络有效包裹 SA 的最大负载极限。

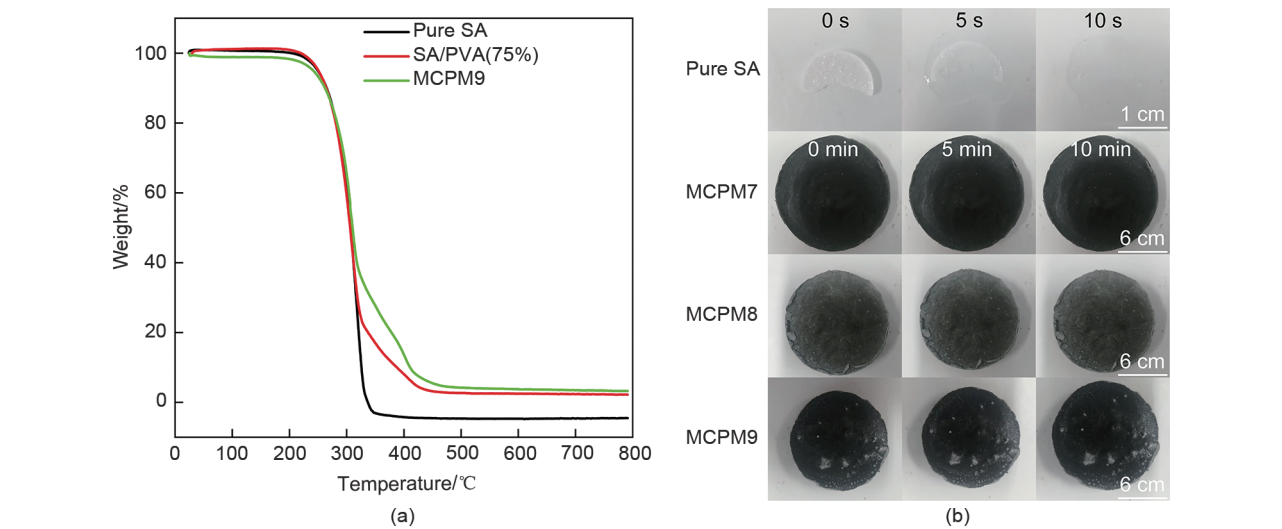


图 6 (a) 纯 SA、SA/PVA (75%) 和 MCPM9 的 TGA 曲线；(b) 纯 SA 及不同复合材料在 80℃ 加热平台上放置不同时间后的数码照片

Fig. 6 (a) TGA curves of pure SA, SA/PVA(75%), and MCPM9; (b) Digital photos of pure SA and different composite materials after being placed on an 80℃ heating platform for varying durations

表 3 SA、SA/PVA(75%)和 MCPM9 的分解温度
Table 3 Decomposition temperatures of SA, SA/PVA (75%) and MCPM9

样品	SA 分解 温度/℃	PVA 分解 温度/℃	分解结束 温度/℃	残余质量/%
SA	206	—	345	0
SA/PVA(75%)	223	322	438	2.18
MCPM9	231	321	470	3.21

3 结 论

以 PVA 为基底材料，以 MXene 为光热转换材料，以 SA 为相变储能材料，通过冷冻干燥法成功制备了 MXene/SA 定型相变复合材料。交联后的 PVA 三维多孔网络结构对 SA 实现了有效的物理封装，赋予了复合材料优异的形状稳定性，在 SA 含

量低于75%时无泄漏产生。此外,加入MXene纳米片后,MCPM9的光吸收率提升了约350%,在1 sun下表面温度可达73℃,展现出卓越的光热转换性能。该复合材料在保持112.56 J/g的储能密度和97.69%焓效率的基础上,使热分解温度较纯SA提升了约25℃,且具有良好的循环性能。这些优异的特性使MXene/SA复合材料在太阳能收集、节能建筑及智能热管理等领域展现出广阔的应用前景。为进一步推动其实际应用,未来的工作应着重于优化材料的力学特性、提升热导率以加速储/放热速率,并系统评估其在实际服役条件下的长期循环稳定性与耐久性。综上,本研究为开发兼具高效太阳能光热转换性能、高储能密度与优异热循环稳定性的复合相变储能材料提供了一种有效策略。

参考文献

- [1] ZHU L L, TIAN L, JIANG S Y, et al. Advances in photothermal regulation strategies: From efficient solar heating to daytime passive cooling[J]. *Chemical Society Reviews*, 2023, 52(21): 7389-7460. DOI: 10.1039/D3CS00500C.
- [2] FAN R J, CHEN G W, ZHENG N B, et al. Evaluation of the energy flow characteristics and efficiency of photothermal functional phase change materials for efficient solar thermal harvesting[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 277: 113140. DOI: 10.1016/j.solmat.2024.113140.
- [3] MATUSZEK K, KAR M, PRINGLE J M, et al. Phase change materials for renewable energy storage at intermediate temperatures[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(1): 491-514. DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00407.
- [4] CHEN G J, SU Y P, JIANG D Y, et al. An experimental and numerical investigation on a paraffin wax/graphene oxide/carbon nanotubes composite material for solar thermal storage applications[J]. *Applied Energy*, 2020, 264: 114786. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114786.
- [5] ZHANG P F, WANG Y L, QIU Y, et al. Novel composite phase change materials supported by oriented carbon fibers for solar thermal energy conversion and storage[J]. *Applied Energy*, 2024, 358: 122546. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.122546.
- [6] LIU X J, LIN F K, GUO Z J, et al. Diatomite porous ceramic-based phase change materials with $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ coating for efficient solar-thermal energy conversion[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 107: 114967. DOI: 10.1016/j.est.2024.114967.
- [7] LIU Z, LI H Y, SUN M R, et al. Polyvinyl alcohol-based phase change aerogel used for safety, thermal-comfortable, and quiet buildings[J]. *Energy*, 2025, 323: 135817. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135817.
- [8] WANG C J, WANG L Q, LIANG W D, et al. Enhanced light-to-thermal conversion performance of all-carbon aerogels based form-stable phase change material composites[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 605: 60-70. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.07.066.
- [9] CHEN Y J, CHEN L F, MA Q Y, et al. A novel kapok fiber aerogel based phase change materials with high thermal conductivity and efficient energy storage for photovoltaic thermal management[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 104: 114454. DOI: 10.1016/j.est.2024.114454.
- [10] LI R Y, ZHANG L B, SHI L, et al. MXene Ti_3C_2 : An effective 2D light-to-heat conversion material[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(4): 3752-3759. DOI: 10.1021/acsnano.6b08415.
- [11] ZENG W G, YE X Y, DONG Y C, et al. MXene for photocatalysis and photothermal conversion: Synthesis, physicochemical properties, and applications[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2024, 508: 215753. DOI: 10.1016/j.ccr.2024.215753.
- [12] ZHU C B, HAO Y R, WU H, et al. Self-assembly of binderless MXene aerogel for multiple-scenario and responsive phase change composites with ultrahigh thermal energy storage density and exceptional electromagnetic interference shielding[J]. *Nano-Micro Letters*, 2023, 16(1): 57. DOI: 10.1007/s40820-023-01288-y.
- [13] JIANG L L, ZHANG W Q, ZHANG R J, et al. High latent heat phase change materials composites based on MXene/biomass-derived cellulose nanocrystalline aerogel for solar-thermal energy conversion and storage[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(10): 17428-17438. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.02.231.
- [14] LEE J, HONG S, SUN Y, et al. Parasitic reaction driven facile preparation of segregated-MXene/polycarbonate nanocomposites for efficient electromagnetic interference shielding[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2023, 40: 103101. DOI: 10.1016/j.surfin.2023.103101.
- [15] SHENG X X, LI S H, HUANG H W, et al. Anticorrosive and UV-blocking waterborne polyurethane composite coating containing novel two-dimensional Ti_3C_2 MXene nanosheets[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(6): 4212-4224. DOI: 10.1007/s10853-020-05525-2.
- [16] JI X J, JIANG Y, LIU T, et al. MXene aerogel-based phase change film for synergistic thermal management inspired by antifreeze beetles[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2022, 3(4): 100815. DOI: 10.1016/j.xcrp.2022.100815.
- [17] WANG F X, GUO J X, LI S H, et al. Facile self-assembly approach to construct a novel MXene-decorated nano-sized phase change material emulsion for thermal energy storage[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(4): 4722-4731. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.11.008.
- [18] XU W H, SU J T, LIN J H, et al. Enhancing the light-thermal absorption and conversion capacity of diatom-based biomass/polyethylene glycol composites phase change material by introducing MXene[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108253. DOI: 10.1016/j.est.2023.108253.
- [19] WU H, HU X P, LI X L, et al. Large-scale fabrication of flexible EPDM/MXene/PW phase change composites with excellent light-to-thermal conversion efficiency via water-assisted melt blending [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 152: 106713. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106713.
- [20] DING Y, LU X, LIU S, et al. Sandwich-structured multifunctional composite films with excellent electromagnetic interference shielding and light/electro/magnetic-to-thermal conversion and storage capabilities[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 163: 107178. DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.107178.