

基于埃洛石气凝胶复合相变材料的全天候界面蒸发器

顾晓滨¹, 穆昱男², 韩玉静¹

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘 要: 利用相变材料储存太阳能在能源利用领域极具发展前景, 为此, 本工作利用低成本埃洛石制备了一种三维孔隙结构的埃洛石气凝胶, 并用于封装十四酸, 并以碳纤维为导热增强剂, 制得 3 种不同碳纤维含量的埃洛石气凝胶复合相变材料。对其进行了组分与微观形貌、储热性能、导热性能、光热转换性能以及水蒸发性能的综合测试。结果表明: 复合材料中的相变材料负载率高达 84%, 碳纤维的加入将复合材料的导热系数提高了 158%; 最佳样品的潜热可达 140.65 J/g; 在 1 个太阳光强度下照射下, 吸热储能 3 h 后, 将其用于夜间的太阳能界面蒸发器, 夜间水蒸发速率相较于纯水提高了 4.21 倍, 并探讨其水蒸发性能的提升机理。为太阳能的高效利用效率和海水淡化效果提升提供了参考依据。

关键词: 埃洛石; 气凝胶; 相变材料; 界面水蒸发; 强化机理

中图分类号: TD985 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)12-3522-09

网络出版时间: 2025-10-16



面对全球水资源短缺的严峻挑战, 开发高效、可持续的淡水生产技术迫在眉睫。太阳能驱动界面水蒸发技术(SIE)因其绿色、低能耗的特性而备受瞩目。然而, 太阳能在时间和空间分布上的不稳定性, 导致 SIE 下的生产设备夜间无法维持较高的效率, 严重限制了其性能的进一步提升。因此, 通过储能技术有效利用太阳能, 将白天充足的太阳能以热能的形式存储起来并在夜间来使用, 有望缓解 SIE 夜间效率低的问题^[1-3]。现有的储能技术主要包括: 物理储能^[4-5]、化学储能^[6]、磁性储能^[7]和相变储能^[8-10]等。其中, 相变储能是一种利用相变材料(PCMs)相态变化进行储能的新型储能技术, 具有储能密度大, 相变过程近似恒温等优点, 有望显著缓解太阳能等可再生能源在空间和时间上的不稳定性^[11-12]。因此, 相变储能技术在太阳能驱动界面水蒸发领域具有很好的应用潜力, 成为近年来全球研究和关注的热点。

然而 PCMs 在相变过程中产生的泄露问题大大限制了其应用范围。为了解决这一问题, 研究者们致力于研发多孔的矿物基支撑材料, 用于 PCMs 的封装。Lv 等^[13]采用层状结构的高岭石封装石蜡, 制备了一种形状稳定的复合相变材料。Ramakrishnan

等^[10]采用孔隙率更大的多孔膨胀珍珠岩作为支撑材料, 制备了负载率高达 50% 的石蜡/膨胀珍珠岩复合相变材料, 解决了 PCMs 的泄露问题。上述层状或多孔矿物, 通过毛细管力、表面张力、氢键和范德华力等多因素作用下, 能够将 PCMs 锚定在矿物表面^[14], 但考虑到层间距较小或多孔矿物中存在大量封闭气孔, 其封装能力上限仍较低。

埃洛石(HNT)是属于高岭石族的黏土矿物, 它的化学式为 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, 根据取样地点、地质构造和结晶条件的不同, 埃洛石可以呈管状、球状或板状。在这些不同形态中, 管状颗粒最具代表性, 且长宽比约为 20。与层状矿物主要通过其表面的范德华力等微观作用力对 PCMs 封装相比, 管状结构的埃洛石在此基础上, 还可以通过其纳米管内腔物理空间, 封装负载更多的 PCMs。此外, 通过冷冻干燥等相关技术, 将埃洛石制备成三维网络结构的气凝胶, 可以在矿物原有结构的基础上, 制造更多的孔隙空间, 有望进一步提升其对 PCMs 的封装能力^[15-16]。

另一方面, PCMs 在界面水蒸发技术中的应用还面临着导热系数低的问题。在近期的研究中, 有研究者通过高导热铜的加入, 来提升 PCMs 的导热

收稿日期: 2025-06-30。 修订日期: 2025-07-27。

基金项目: 青海省基础 Research 计划(2025-ZJ-901T); 国家自然科学基金(52474445)。

第一作者: 顾晓滨(1988—), 男, 博士, 副研究员。

Received date: 2025-06-30. Revised date: 2025-07-27.

First author: GU Xiaobin (1988—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: guxiaobin0712@126.com

系数,取得了较好的提升效果^[17]。在此基础上,Gu 等^[18]设计了一种低成本高性能的膨胀石墨封装复合 PCMs,不仅摆脱了容器封装 PCMs 的局限,而且石墨的加入也使得复合 PCMs 的导热性得到了提高。Dong 等^[19]将石蜡封装进 HNT 的管腔中,并用聚多巴胺(PDA)进行光热改性,试验结果表明,PCMs 的引入使得系统的水蒸发量提高了 3.43 kg/m^2 。尽管相关领域研究取得了一定进展,但现有研究中天然矿物载体对 PCMs 的封装性能还不够高,此外将其应用于界面蒸发器系统中,PCMs 导热系数的仍有待提高,限制了其整体性能的提升。

本工作旨在以埃洛石为主要原材料,通过特定工艺组装制备埃洛石基气凝胶,利用气凝胶独特的三维网状结构特点,显著提升矿物载体对 PCMs 的封装性能。并在此基础上,通过碳纤维的加入,增强埃洛石基气凝胶的导热性能,提升其在界面蒸发器系统中的整体应用效果,并深入探讨其水蒸发性能的提升机理。

1 实验

1.1 原材料

埃洛石取自四川省叙永县,主要化学试剂包括盐酸多巴胺($\text{C}_8\text{H}_{12}\text{ClNO}_2$, 分析纯), Tris-HCL 缓冲液(10 mmol/L , $\text{pH}=8.5$), 海藻酸钠[SA, $(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6\text{Na})_n$, 分析纯], 正辛基三乙氧基硅烷[Triethoxy (octyl) silane, 分析纯], 十四酸(MA, 分析纯), 无水氯化钙(CaCl_2 , 分析纯), 碳纤维粉(分析纯, 粒度 300 目), 本研究用水溶液均由去离子水配置。

1.2 样品制备

1.2.1 埃洛石基气凝胶制备 首先,将 10 g HNT 加入 50 mL 的 Tris-HCL 缓冲液(10 mmol/L , $\text{pH}=8.5$) 当中,搅拌均匀后超声 30 min,再向其中加入 2 g DA-HCL,在恒温 50°C 搅拌 24 h,然后将得到的悬浊液中的固体粉末过滤并使用去离子水和无水乙醇洗涤至滤液无色,最后进行干燥得到聚多巴胺包覆的埃洛石粉末(HNTP)。取 1 g HNTP 粉末加入 40 mL 去离子水当中,搅拌均匀后超声 30 min,再向所得悬浊液中加入 1 g 海藻酸钠(SA),持续搅拌直至 SA 完全溶解,将上述液体平均分成 4 份分别加入模具中,置于冰箱内冷冻至其完全冻结,然后放进冷冻干燥机中干燥 72 h,将干燥后得到的气凝胶置于 5% (质量分数,下同) CaCl_2 溶液中浸渍 12 h,取出后再置于 5% 正辛基三乙氧基硅烷溶液中浸渍 12 h,之后使用无水乙醇洗涤,并放入烘箱

中进行干燥,最终得到埃洛石基气凝胶(HA)。根据上述步骤,将 HNT 等比例替换为碳纤维,制备出不同碳纤维含量的埃洛石-碳纤维气凝胶(HCA),并按照 HNT 与碳纤维的质量比将其命名为 HCA 4:1 和 HCA 3:2。

1.2.2 复合相变材料的制备 复合相变材料是通过真空浸渍法制备而成。将 MA 放入烘箱之中加热至超过其相变温度,使其完全转变为液态,并将上述制得的气凝胶置于其中,在真空环境的辅助下,MA 逐渐进入气凝胶的孔隙中,待其吸附完成得到复合相变材料 MA@HA, MA@HCA 4:1, MA@HCA 3:2 (其中,比例为埃洛石与碳纤维的质量比)。

1.3 样品表征

采用 $\text{Cu K}\alpha$ 辐射($\lambda=0.154 \text{ 06 nm}$)在 Bruker D8 Advance X 射线衍射仪上生成的 X 射线衍射(XRD)谱,对样品的晶体结构进行分析,扫描范围为 $10^\circ\sim 80^\circ$,扫描速率为 $10^\circ/\text{min}$ 。采用扫描电子显微镜(SEM, S-4800)对不同的气凝胶和相变复合材料的表面形貌进行了观察。在 $500\sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 的频率范围内,使用 Thermo Scientific iN10 设备测试傅里叶红外变换光(FTIR)谱。采用差示扫描量热法(DSC, 美国 TA DSC25)测试 PCMs 的相变温度和相变潜热,在氮气气氛下,起始平衡温度 20°C ; 以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 80°C ; 在 80°C 保温 5 min; 再以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 降温至 20°C 。采用热常数分析仪(Hot Disk TPS 2500 S)测试样品的导热系数。采用高性能全自动压汞仪(MicroActive AutoPore)测试气凝胶的孔径大小和孔隙率,得到压汞曲线。

太阳能光热转换试验主要分为太阳能光热水蒸发试验和太阳能光热储能试验。首先,太阳能光热水蒸发试验是在实验室模拟太阳光系统进行的,使用氙灯作为模拟太阳光光源,使用全自动光功率计测量并调控光照强度。将由光能转化的热能集中在气凝胶与水的接触界面处,实现水的蒸发,并使用精密天平进行实时测量,最终得到水蒸发质量随时间的变化曲线。太阳能光热储能试验是以复合 PCMs 为储能主体,利用氙灯模拟的太阳光照射复合 PCMs,实现光能到热能的转化,并将能量储存在 PCMs 之中。同时采用红外热成像仪和热电偶温度传感器记录 PCMs 的温度变化。

2 结果与讨论

2.1 复合 PCMs 的形貌与结构分析

图 1 分别为埃洛石基气凝胶的实物照片和不同

放大比例下 HNT、HA 和复合相变材料 MA@HA 的 SEM 照片。由图 1a 可见,蒲公英可以支撑起气凝胶,这是由于气凝胶内部富含大量孔隙,其本身质量较轻。由图 1b 和图 1f 可见,埃洛石是管状结构,由于本研究使用的原料为天然开采的矿物,其中含有部分伴生的杂质,例如,片状高岭石。通过埃洛石的管腔

结构封装 PCMs 的效率较低,已经不能满足进一步提高复合 PCMs 储热密度的需求。由图 1c 和图 1g 可以清楚地观察到其中丰富的孔隙结构,埃洛石均匀地分布在三维网络结构当中,起到提高骨架机械性能的作用。而复合 PCMs 的 SEM 照片(图 1d 和图 1h)表面比较光滑,是因为孔隙结构中充满了十四酸。

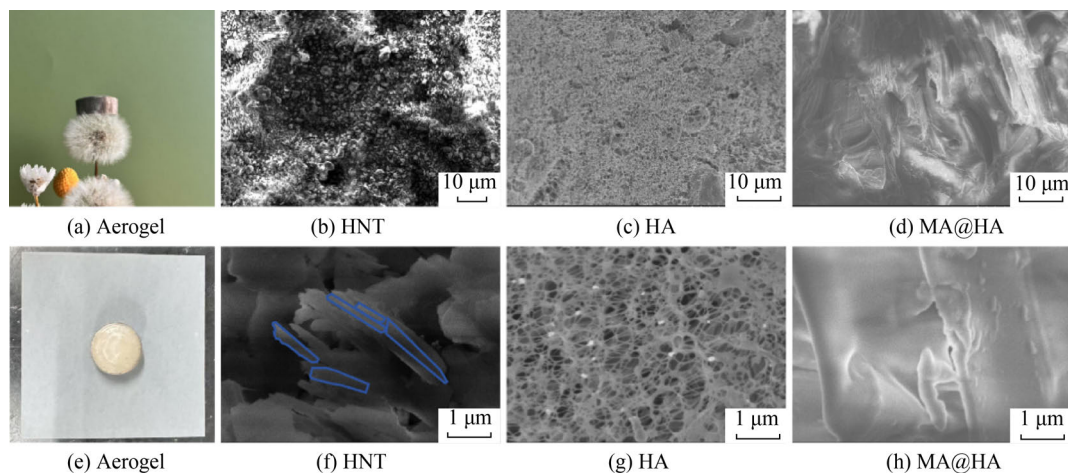


图 1 样品的宏观照片和 SEM 照片

Fig. 1 Photos and SEM diagrams of samples

图 2 为 MA 和 MA@HA 的 XRD 谱和傅里叶红外变换光谱。由图 2a 可见, MA 在 21.6° 和 24.2° 具有 2 个非常明显的特征峰,分别对应 MA 的(110)晶面和(112)晶面。MA@HA 的 XRD 谱中出现了与 MA 相同的峰,无新的衍射峰的出现,也没有衍射峰消失。进一步对比纯 MA 和气凝胶基相变复合材

料的红外光谱图(图 2b)可知,复合材料的谱图中在 3694 cm^{-1} 位置出现了新的吸收峰,结合文献^[20–21]分析可知,这一新峰代表 HNT 外部的—OH 基团的拉伸振动,表明 MA 与埃洛石气凝胶进行了复合,红外光谱中未出现除 MA 和埃洛石成分以外的振动峰,没有新物质生成。

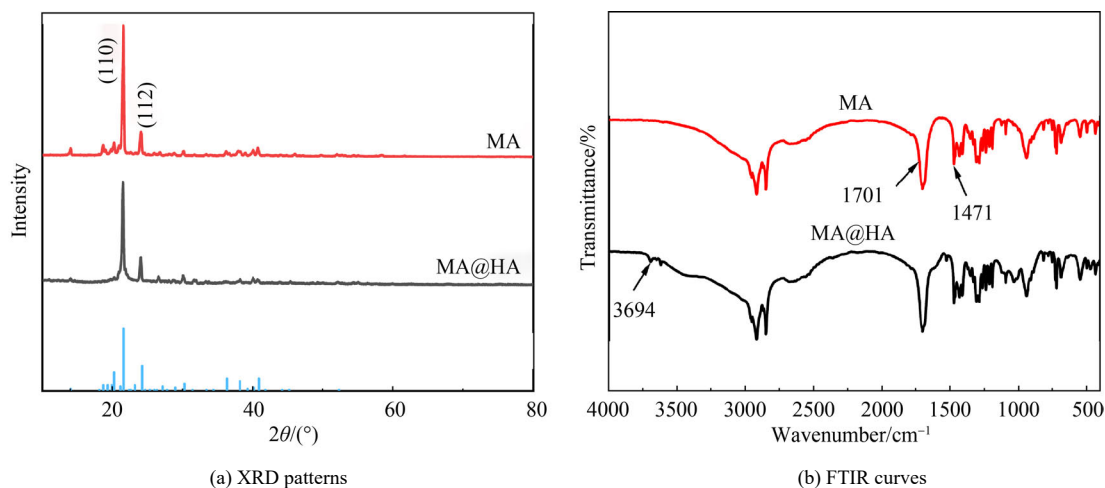


图 2 MA 和 MA@HA 的 XRD 谱和傅里叶红外变换光谱

Fig. 2 XRD patterns and FTIR curves of MA and MA@HA

2.2 气凝胶的孔结构和复合 PCMs 的负载量

使用埃洛石封装 PCMs 时, PCMs 通常进入到其管腔内赋存,但由于管腔空间有限,负载量无法进一步提升,而埃洛石基气凝胶由于其丰富的孔隙结构,有望使其 PCMs 负载量大大提升,其封装机

理示意图如图 3 所示。为了验证埃洛石气凝胶孔隙空间的提升,使用压汞法对 HCA 3:2 进行了孔隙结构表征。结果如图 4 所示,随着压力的增加,汞不断进入气凝胶的孔隙当中,最终趋于平稳。通过计算得出,气凝胶的孔隙率高达 93%,证明了对埃洛

石组装制备埃洛石气凝胶, 相比与埃洛石本身可以较大提高其对 PCMs 的封装能力。进一步探究气凝胶中碳纤维加入含量对 MA 的封装效果的影响, 使用相同的方法制备了碳纤维复合相变材料 MA@HCA 4:1 和 MA@HCA 3:2, 在控制其体积相同(均为半径 15 mm、高 11 mm 的规则圆柱体, 体积 7.78 cm^3)的前提下, 统计其负载 MA 前后的质量, 并计算其负载率。负载后的样品质量为不泄露的复合 PCMs 的质量。由图 5 可见, 3 种气凝胶由于富含孔隙, 因此其质量整体较轻, 分别为 0.577 3、0.652 6、0.627 2 g, 负载 MA 之后, 其质量分别提高至 4.164 6、4.277 2、4.164 6 g。由此说明, 气凝胶能够高效地负载相变材料。而与 MA@HA 相比, 加入碳纤维之后, 复合 PCMs 的负载率未发生明显下降, 仍然维持在 84% 左右, 说明碳纤维的掺入不会影响气凝胶的封装性能。

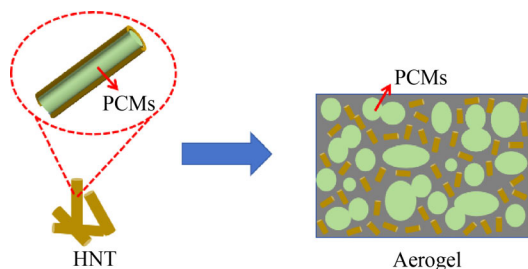


图 3 HNT 和气凝胶负载 PCMs 的机理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of HNT and aerogel-loaded PCMs

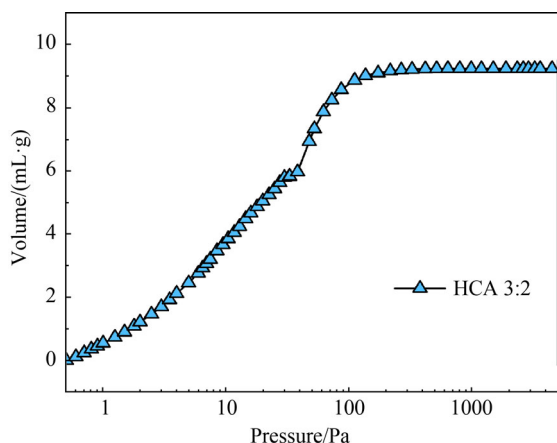


图 4 HCA 3:2 在压汞过程中累积侵入量随压力变化曲线

Fig. 4 Cumulative intrusion versus pressure curve of HCA 3:2 during mercury compression

2.3 复合 PCMs 的导热性能

为提高 MA@HA 的导热系数, 尝试使用碳纤维对 MA@HA 进行导热强化。使用导热系数仪对复合 PCMs 进行测试, 结果如图 6 所示。由图 6 可见, MA@HCA 4:1 和 MA@HCA 3:2 的导热系数分别为 $0.186 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $0.200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 相比于

MA@HA, 其导热性能有明显的改善。且随着碳纤维含量的增加, 复合 PCMs 的导热性能逐渐增强。这是因为碳纤维具有较高的导热系数, 其在复合材料中形成的连续的导热网络, 为热量提供了高效的传导路径。

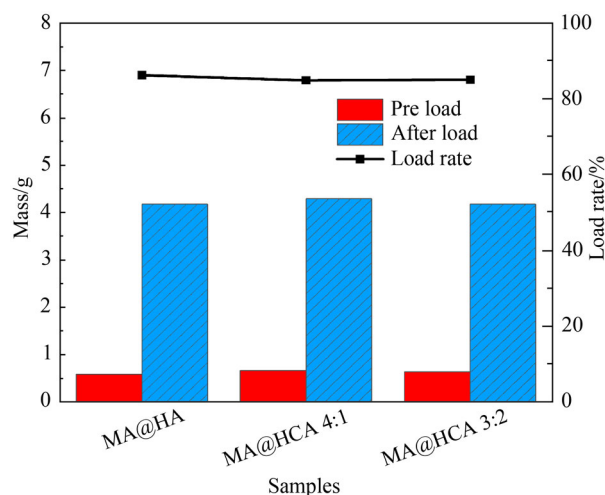


图 5 MA@HA、MA@HCA 4:1 和 MA@HCA 3:2 负载 MA 前后的质量及负载率

Fig. 5 Mass and load rate before and after MA@HA, MA@HCA 4:1 and MA@HCA 3:2 loads

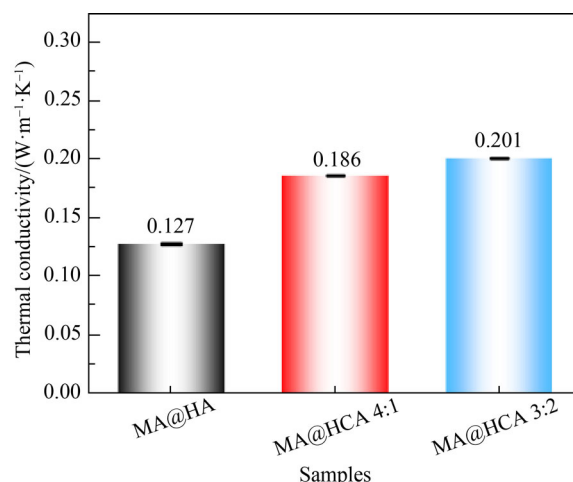


图 6 MA@HA、MA@HCA 4:1 和 MA@HCA 3:2 的导热系数柱状图

Fig. 6 Histograms of thermal conductivity for MA@HA, MA@HCA 4:1, and MA@HCA 3:2

2.4 复合 PCMs 的储热性能

通过 DSC 对 MA 和 3 种复合相变材料的相变行为进行分析(图 7)。由图 7 可见, MA 和复合相变材料表现出相似的相变特性, 这是由于复合 PCMs 具有较高的负载量, 且气凝胶与 MA 之间不发生化学反应^[22]。由 DSC 曲线推导得出 MA 与复合 PCMs 的熔化温度(T_m)、结晶温度(T_f)、熔化焓(ΔH_m)、结晶焓(ΔH_f)和过冷度(ΔT)等数据(表 1)。经过对比发

现, 复合 PCMs 的相变潜热随着碳纤维含量的增加而略微下降, 这是因为碳纤维没有埃洛石一样的内腔结构, 尽管气凝胶的整体质量不变, 但埃洛石含量的减少使负载 MA 的孔隙减少, 因此, 碳纤维增加使负载率略微下降, 但总体而言复合 PCMs 仍具有较高的负载率。此外, 复合 PCMs 的长期使用在实际应用环境中至关重要, 因此对其进行了热循环稳定性测试。如图 8 所示, MA@HCA 3:2 在进行了 50 次热循环之后, 其相变焓值不发生明显下降, 仍稳定在 140 J/g 左右, 由此说明, 该复合 PCMs 具有良好的热循环稳定性。

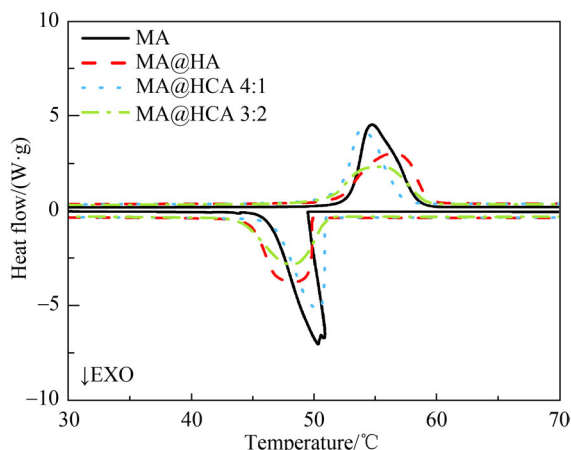


图 7 MA 和复合相变材料的 DSC 图

Fig. 7 DSC diagram of MA and the composite phase change material

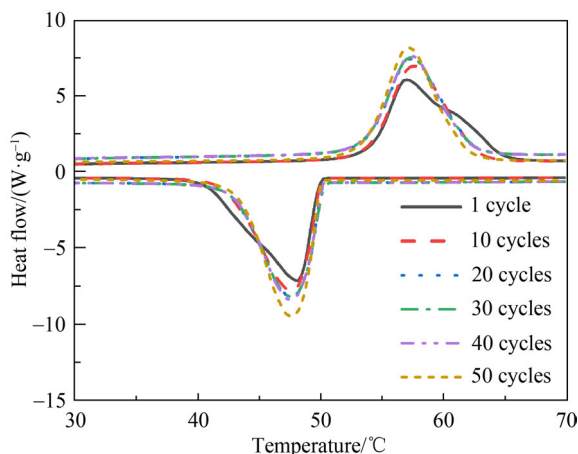


图 8 不同热循环次数的 MA@HCA 3:2 的 DSC 图

Fig. 8 DSC diagram of MA@HCA 3:2 for different thermal cycles

纯 MA 的过冷度大约为 3.23 °C, 对比发现, 复合 PCMs 均表现出低于纯相变材料的过冷度, 且随着碳纤维含量的增加, 过冷度逐步降低, 这是因为气凝胶与碳纤维部分作为杂质掺入到相变材料之中, 可充当 PCMs 的一直成核剂, 起到促进成核和降低能量势垒的作用, 使 MA 结晶所需的能量更低,

更易于发生液相到固相的转变。

2.5 复合 PCMs 的光热转换性能

图 9 为复合相变材料的温度变化曲线。由图 9a 可见, MA@HCA 3:2 在光照 1 h 后表面温度为 58.3 °C, 高于 MA@HCA 4:1 和 MA@HA 的表面温度。这是因为聚多巴胺的包覆和碳纤维的加入对复合 PCMs 的光热转换性能起到了增强作用。3 种复合 PCMs 的温度变化曲线都出现了明显的平台区域, 说明发生了相变。除此之外, MA@HCA 3:2 的曲线的升温 and 降温速度明显高于其他 2 种材料, 这是因为 MA@HCA 3:2 的导热系数最高, 其热响应速度最快。

由图 9b 可见, 在 1 个太阳光强度下照射 3 h 后, MA@HA、MA@HCA 4:1 和 MA@HCA 3:2 的内部温度分别为 44.7、53.9、54.9 °C, 其中, MA@HCA 4:1 和 MA@HCA 3:2 表现出较高的温度, 且温度曲线都出现了平台区域, 说明热量从表面传递到了相变材料内部, 使其内部区域发生了相变。MA@HA 的升温速度较慢, 且最高温度未达到 MA 的相变温度, 升降温曲线中也未见相变过程中的恒温平台期, 因此, 可以判断 MA@HA 的内部未发生相变, 无法起到储热的功能。出现上述结果的原因是碳纤维的加入增强了复合 PCMs 的光热性能和导热系数, 提高了复合 PCMs 的表面温度和传热效率, 从而使其实现直接光热转化和热能存储成为可能。

表 1 纯 MA 及埃洛石气凝胶复合 PCMs 储热性能参数
Table 1 Detailed melting solidification temperature and latent heat of pure MA and PCMs

Composite PCMs	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_f/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Delta H_f/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Delta T/^\circ\text{C}$
MA	52.74	49.51	181.21	182.57	3.23
MA@HA	51.77	49.90	158.59	157.43	1.87
MA@HCA 4:1	51.68	51.01	159.35	158.35	0.67
MA@HCA 3:2	51.52	51.12	140.65	136.12	0.40

2.6 基于复合 PCMs 的 SIE 夜间产水性能

由于复合 PCMs 具有优异的光热转换性能和导热性, 因此白天可通过光照进行热能储存, 夜晚将热量放出继续用以水蒸发, 从而缓解传统 SIE 技术只能白天高效产水的瓶颈。基于上述理论设计了基于复合 PCMs 的 SIE 蒸发器, 如图 10 所示。基于上述装置, 测试了 MA@HA、MA@HCA 4:1 和 MA@HCA 3:2 3 种不同复合 PCMs 的夜间水蒸发量。首先将复合 PCMs 置于 1 个太阳光强度 ($1.0 \text{ kW}/\text{m}^2$) 下照射 3 h, 进行储能。然后在无光条件下模拟夜间水蒸发, 通过测量质量变化来判断水蒸发量并计算

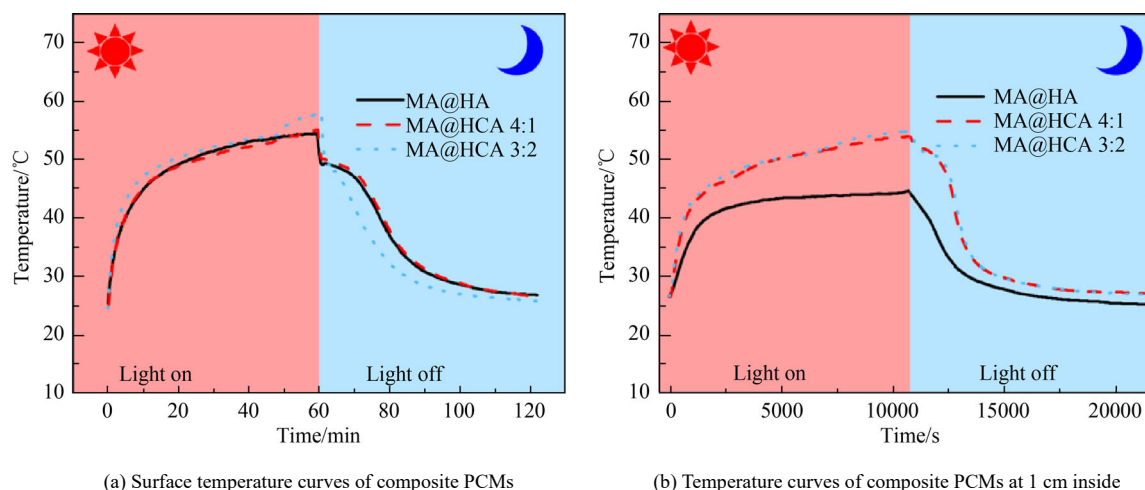


图 9 复合相变材料的温度变化曲线

Fig. 9 Temperature curves of composite PCMs

蒸发速率。如图 11a 和图 11b 所示, 3 种复合 PCMs 对应的水蒸发量关系为 $\text{MA@HA} < \text{MA@HCA 4:1} < \text{MA@HCA 3:2}$, 其中 MA@HCA 3:2 在无光条件下 1 h 的水蒸发量达到 $1.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这是因为在相同光照时间下, 不同复合 PCMs 的储热量不同, 光热转换性能良好的材料能转化更多的太阳能, 而导热性能则直接影响材料的储热速度。这一结果与上述复合 PCMs 的导热系数结果相同, MA@HCA 3:2 的水蒸发量最高。根据图 11b, 复合 PCMs 蒸发水的速率在前 20 min 趋于平稳, 之后表现出快速下降的趋势。这是因为复合 PCMs 在开始阶段释放能量维持系统的工作, 20 min 后 PCMs 的热量释放完全, 因此蒸发速率呈现下降的趋势。由于 MA@HCA 3:2 的储热量高于另外 2 种复合 PCMs, 其续航能力最优。经过计算, 在相同时间下, 与纯水的蒸发速率相比, MA@HCA 3:2 的水蒸发效率提高了 4.21 倍。为了证明夜间水蒸发主要是复合 PCMs 在起主要作用, 测试了无光条件下纯水和吸水布的水蒸发量及蒸发速率。如图 11c 和图 11d 所示, 纯水与吸水布的蒸发量几乎

相同, 且蒸发速率均在 $0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右, 远低于 MA@HCA 3:2 加吸水布的蒸发速率。图 12 为太阳能界面水蒸发器的工作机理图, 其中吸水布起到水传输的作用, 将水源源不断的传输到空气-水界面处, 为蒸发器提供需要蒸发的水分。将气凝胶置于吸水布上方, 是为了使水分进入孔隙当中, 这样做是因为孔隙中的小团簇水分子的蒸发速率远高于大块水体的蒸发速率。白天在阳光充足的情况下, PCMs 部件充分吸收太阳能转化为热能, 温度达到其相变点后, PCMs 利用相变机制进行热量的存储, 当太阳下山后, 温度降低低于其相变点以下, PCMs 又可以通过反向相变将白天存储的热能释放出来, 为夜间保持高效的水蒸发效率提供热驱动力。其中, 聚四氟乙烯材质的容器用于放置复合 PCMs, 由于聚四氟乙烯良好的保温性能, 能有效防止热量往系统外部散失, 使复合 PCMs 释放的热量更多用于水蒸发, 提高系统整体能量利用率。总之, 复合 PCMs 能一定程度上解决水蒸发系统在夜间等无光或弱光环境下工作效率低下的问题, 具有实际应用价值。

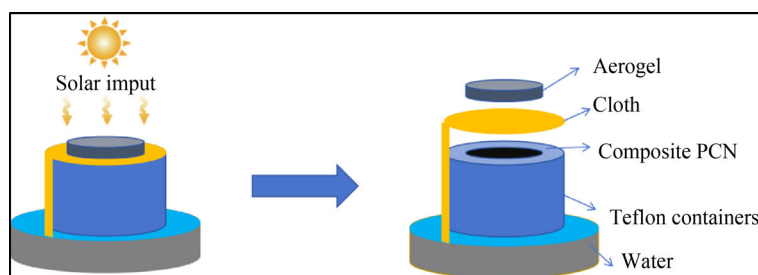


图 10 基于复合相变材料的太阳能界面水蒸发器器件示意图

Fig. 10 Photothermal conversion model of composite phase change materials

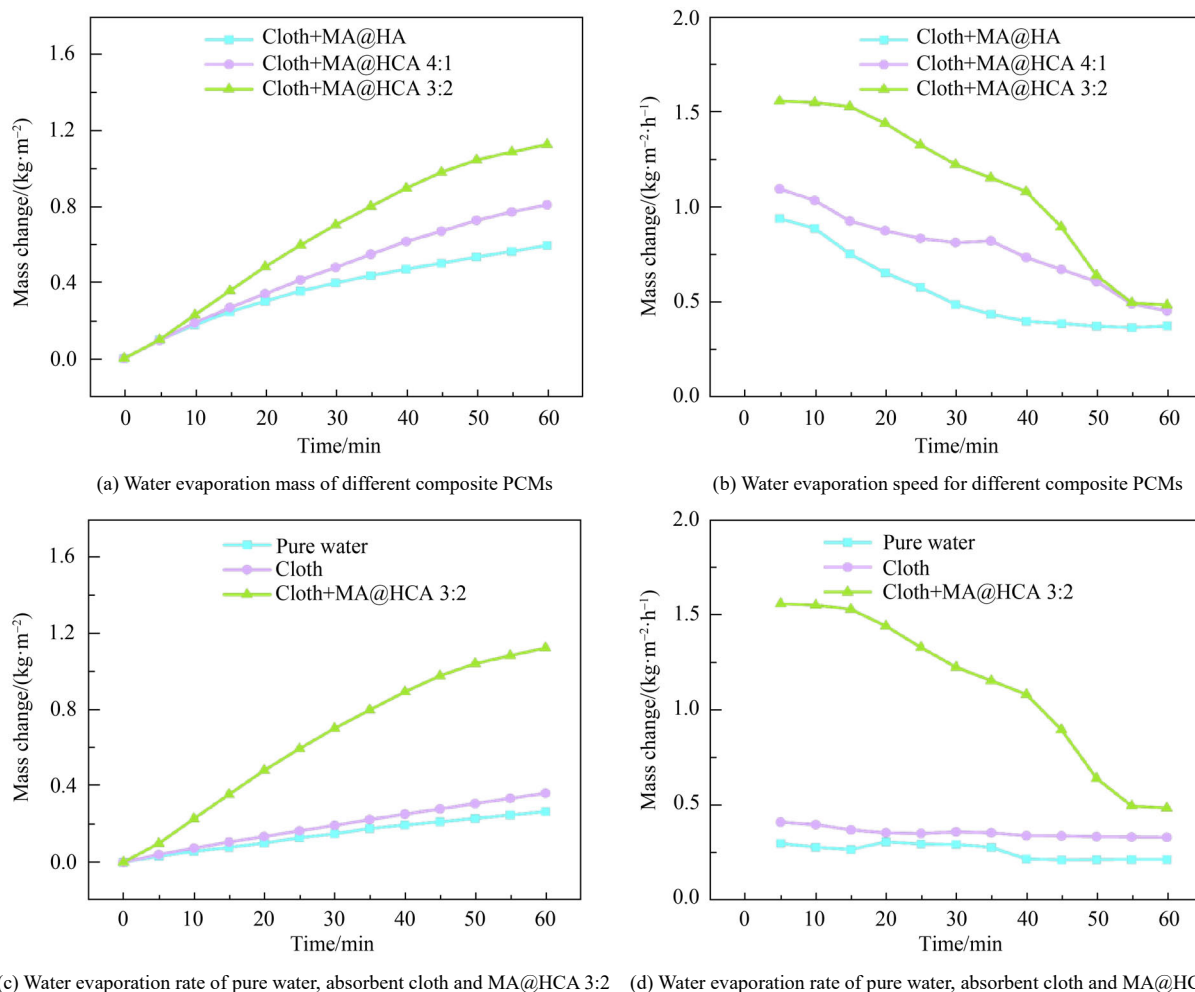


图 11 复合相变材料的水蒸发性能

Fig. 11 Water evaporation performance of composite phase change materials

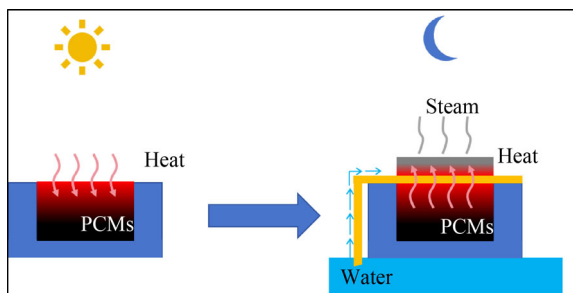


图 12 太阳能界面水蒸发器件的工作原理图

Fig. 12 Diagram of the working principle of a water evaporation device at the solar interface

3 结论

通过利用埃洛石制备了一种多孔隙气凝胶并用于封装 MA，在此基础上，以碳纤维为导热增强剂对复合相变材料进行了改性，制得了具有良好热性能的复合 PCMs。其中，MA@HCA 3:2 的负载率高达 84%，潜热可达到 140.65 J/g。且碳纤维的加入将复合 PCMs 的导热系数提高了 58%；基于上述理论所设计的光热转换模型可使 PCMs 所储存的

热量更多用于水蒸发，在夜间或弱光环境下也具有较好的工作效率，其中 MA@HCA 3:2 样品在 1 个太阳光强度照射下储能 3 h 后，其水蒸发速率相较于纯水提高了 4.21 倍，从而实现了太阳能界面蒸发器的全天候高效蒸发，在太阳能高效利用和海水淡化方面具有一定的应用潜力。

参考文献:

- [1] ARAMESH M, SHABANI B. Experimental evaluation of a self storage integrated evacuated tube solar thermal collector[J]. J Energy Storage, 2023, 62: 106920.
- [2] ALSHUKRI M J, EIDAN A A, NAJIM S I. Thermal performance of heat pipe evacuated tube solar collector integrated with different types of phase change materials at various location[J]. Renew Energy, 2021, 171: 635–646.
- [3] SENOBAR H, ARAMESH M, SHABANI B. Evacuated tube solar thermal collector with enhanced phase change material thermal storage: An experimental study[J]. J Energy Storage, 2022, 46: 103838.
- [4] GUO H, XU Y J, CHEN H S, et al. Corresponding-point methodology for physical energy storage system analysis and application to compressed air energy storage system[J]. Energy, 2018, 143: 772–784.

- [5] LE T H, KIM M P, PARK C H, et al. Recent developments in materials for physical hydrogen storage: A review[J]. *Materials*, 2024, 17(3): 666.
- [6] YAN T, WANG R Z, LI T X, et al. A review of promising candidate reactions for chemical heat storage[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2015, 43: 13–31.
- [7] KOOHI-FAYEGH S, ROSEN M A. A review of energy storage types, applications and recent developments[J]. *J Energy Storage*, 2020, 27: 101047.
- [8] GHOSH D, GHOSE J, DATTA P, et al. Strategies for phase change material application in latent heat thermal energy storage enhancement: Status and prospect[J]. *J Energy Storage*, 2022, 53: 105179.
- [9] RATHORE P K S, SHUKLA S K. Enhanced thermophysical properties of organic PCM through shape stabilization for thermal energy storage in buildings: A state of the art review[J]. *Energy Build*, 2021, 236: 110799.
- [10] RAMAKRISHNAN S, SANJAYAN J, WANG X M, et al. A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites[J]. *Appl Energy*, 2015, 157: 85–94.
- [11] ZHANG D Y, LI C C, LIN N Z, et al. Enhanced properties of mica-based composite phase change materials for thermal energy storage[J]. *J Energy Storage*, 2021, 42: 103106.
- [12] ZHANG B, LI C C, LIU Q X. N-eicosane/multilayer graphene composite phase change materials for electro-thermal conversion and storage[J]. *Therm Sci Eng Prog*, 2021, 25: 101039.
- [13] LV P Z, LIU C Z, RAO Z H. Experiment study on the thermal properties of paraffin/Kaolin thermal energy storage form-stable phase change materials[J]. *Appl Energy*, 2016, 182: 475–487.
- [14] SONG S K, DONG L J, CHEN S, et al. Stearic-capric acid eutectic/activated-attapulgite composite as form-stable phase change material for thermal energy storage[J]. *Energy Convers Manag*, 2014, 81: 306–311.
- [15] ZOU F X, BUDTOVA T. Polysaccharide-based aerogels for thermal insulation and superinsulation: An overview[J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 266: 118130.
- [16] SOZCU S, VENKATARAMAN M, WIENER J, et al. Incorporation of cellulose-based aerogels into textile structures[J]. *Materials*, 2023, 17(1): 27.
- [17] SHARMA P, BIRLA S K. Simulation and experimental analysis of PCM-enhanced solar stills using CMS[J]. *J Energy Storage*, 2024, 103: 114318.
- [18] GU X B, DONG K J, PENG L H, et al. Round-the-clock interfacial solar vapor generator enabled by form-stable phase change materials with enhanced photothermal conversion capacity[J]. *Energy Convers Manag*, 2023, 277: 116634.
- [19] DONG W X, CAO X L, YAN J Y, et al. Preparation of phase-change composite aerogel materials and its application in solar saline-alkali water desalination[J]. *Macromol Chem Phys*, 2024, 225(3): 2300346.
- [20] LI C Y, GONG W G, CAO Q M, et al. Enhancement of cardanol-loaded halloysite for the thermo-oxidative stability and crystallization property of polylactic acid[J]. *Appl Clay Sci*, 2022, 216: 106357.
- [21] LI M, SHAN J Q, HU Y Q, et al. Lignin demethylation for modifying halloysite nanotubes towards robust phenolic foams with excellent thermal insulation and flame retardancy[J]. *J Appl Polym Sci*, 2022, 139(17): 52019.
- [22] WANG W W, CAI Y B, DU M Y, et al. Ultralight and flexible carbon foam-based phase change composites with high latent-heat capacity and photothermal conversion capability[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11(35): 31997–32007.

Halloysite Aerogel Phase Change Composite Based All-Weather Interfacial Solar Interfacial Evaporation

GU Xiaobin¹, MU Yunan², HAN Yujing¹

(1. Qinghai Institute of Salt Lake, Chinese Academy of Science, Xining 810008, China;

2. Chinese University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Extended Abstract

Introduction For a challenge of global water scarcity, the development of efficient and sustainable freshwater production technologies is urgently needed. Solar-driven interfacial water evaporation (SIE) technology has attracted recent attention due to its eco-friendly and low-energy-consumption characteristics. However, the inherent intermittency of solar energy availability, both temporally and spatially, prevents SIE systems to maintain a high efficiency during nighttime, severely limiting further performance improvements. The introduction of phase change materials (*i.e.*, PCMs) is generally considered as an effective approach to address the intermittency of solar water evaporation systems and enhance evaporation efficiency. Nevertheless, leakage issues associated with PCMs during their phase transition process significantly restrict their application scope. To overcome this problem, researchers are dedicated to developing porous mineral-based supporting materials. However, the performance of mineral carriers encapsulating PCMs in some existing studies still requires a further enhancement. Furthermore, the problem of low thermal conductivity in composite PCMs also hinders their application progress in SIE systems.

Halloysite-based aerogels represent a highly promising supporting material capable of preparing composite PCMs with high loading rates, good stability, and large thermal energy storage density. Carbon fiber can be incorporated at different ratios to enhance the thermal conductivity of the composite PCMs. This study was to investigate the thermal properties, photothermal conversion efficiency, and water evaporation rate within an SIE system for the composite PCMs, and analyze the enhancement mechanisms responsible for the improved water evaporation performance.

Methods Dopamine was firstly used to coat halloysite to obtain dopamine-coated halloysite powder (HNTP), and then 1 g of the prepared HNTP powder was added into 40 mL of deionized water. After stirring uniformly, the mixture was ultrasonicated for 30 min. Afterwards, 1 g of sodium alginate (SA) was added to the resulting suspension under continuous stirring until the SA was completely dissolved. The mixture was evenly divided into four portions and transferred into molds. The samples were snap-frozen in a freezer until completely solidified and then freeze-dried (lyophilized) for 72 h. The aerogels were then washed with anhydrous ethanol and dried in an oven, ultimately yielding the halloysite-based aerogel HA. Halloysite-based aerogels with different carbon fiber contents were prepared via replacing HNTs proportionally with carbon fiber (CF). These aerogels were named as HCA 4:1 and HCA 3:2 based on a mass ratio of halloysite to carbon fiber.

The composite phase change materials (PCMs) were fabricated by a vacuum impregnation method. Myristic acid (MA) was placed in an oven and heated beyond its phase transition temperature until it completely melted into its liquid state. The prepared aerogels (*i.e.*, HA, HCA 4:1, HCA 3:2) were then submerged in a liquid MA. Under vacuum conditions, the MA gradually infiltrated into the pores of the aerogels. After complete adsorption, the composite phase change materials (*i.e.*, MA@HA, MA@HCA 4:1, and MA@HCA 3:2) were obtained.

Results and discussion The SEM images of the halloysite aerogel (HA) clearly reveal its abundant porous structure. HNTs are uniformly distributed within the three-dimensional network framework. This highly porous structure provides ample space for encapsulating the phase change material. The results of leakage tests confirm a high phase change material loading rate of up to 84% within the composite. A significant supercooling reduction also occurs. The latent heat of the sample MA@HCA 3:2 measured is 140.65 J/g. The XRD patterns and FTIR spectra show no emergence of new peaks, indicating a superior compatibility between the MA and the aerogel without chemical reactions. This ensures the core thermal energy storage functionality of the MA remains unaffected. To enhance the thermal conductivity of MA@HA, carbon fiber (CF) is introduced as a thermal conductivity enhancer. The results measured by a thermal conductivity analyzer demonstrate that compared to MA@HA, the thermal conductivity of the composites with the incorporation of carbon fiber is increased by 158%. This significant improvement is attributed to a high intrinsic thermal conductivity of carbon fiber, which forms a continuous and oriented thermally conductive network within the composite, providing highly efficient pathways for heat transfer.

The composite PCMs can efficiently store thermal energy through sunlight absorption during the day and release this stored heat to drive water evaporation during the night due to their superior photothermal conversion and thermal conductivity properties. This effectively mitigates the bottleneck of conventional SIE technology, which relies solely on daytime solar energy for high-efficiency water production. Based on this principle, a novel SIE evaporator incorporating the halloysite aerogel composite PCMs can be designed. The results show that under one sun illumination after 3-h energy storage, the water evaporation rate of the MA@HCA 3:2 sample is 4.21 times greater than that of pure water. The mechanisms behind this enhanced water evaporation performance are investigated. This work provides valuable insights and a reference basis for enhancing the efficiency of solar energy utilization and improving the effectiveness of seawater desalination.

Conclusions This study fabricated a highly porous aerogel using halloysite for encapsulating myristic acid (MA). Carbon fiber was incorporated as a thermal conductivity enhancer to modify the composite phase change materials (PCMs). The resulting composite PCMs exhibited a high loading rate, significantly reduced supercooling, and markedly improved photothermal conversion and thermal conductivity properties. The photothermal conversion model designed based on this strategy ensured that more of the heat stored within the PCMs could be utilized for water evaporation. This enabled an efficient operation under various conditions, including nighttime and low-light environments, achieving all-weather high-efficiency evaporation in the solar-driven interfacial evaporator. These results could demonstrate promising applications for enhancing solar energy utilization efficiency and seawater desalination performance.

Keywords halloysite; aerogel; phase change materials; interfacial evaporation; enhancement mechanism