

柔性 MXene 基复合相变薄膜的制备与性能研究

黄孝笑^{1,2}, 王亚雄^{1,2*}, 严新帅^{1,2}, 杨立薇^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学化学与化工学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 内蒙古自治区煤炭与煤化工综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘要:采用物理共混方法制备了具有交联结构的聚乙二醇/聚乙烯醇/MXene-Cu 纳米线柔性复合相变薄膜 MXene:xCu。由于 MXene 纳米片具有丰富的表面官能团, 提供了额外的氢键结合位点, 从而促进了交联, 提高了薄膜柔韧性; 而 Cu 纳米线有效提高了薄膜的光热转换效率和导热性能。其中, MXene:0.75Cu 初始焓值为 200.1 J/g, 经过 200 次加热冷却循环后, 焓值为 185.7 J/g, 具有良好的热循环稳定性。其光热转换效率可达 93.9%, 具有良好的光驱动可恢复性, 60 s 内恢复率接近 100%。因此, MXene:xCu 具有可重复的光-热转换稳定性, 优异的光驱动形状可恢复性, 良好的化学相容性、亲水性、结晶性能, 良好的热稳定性和热可靠性, 具有潜在应用前景。

关键词:柔韧性; 热稳定性; 复合材料; 太阳能; 传热

中图分类号: TB34

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)01-0165-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.01.028

Preparation and performance study of flexible MXene-based composite phase change films

HUANG Xiao-xiao^{1,2}, WANG Ya-xiong^{1,2*}, YAN Xin-shuai^{1,2}, YANG Li-wei^{1,2}

(1. School of Chemistry & Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Coal Chemical Engineering & Comprehensive Utilization, Baotou 014010, China)

Abstract: Flexible composite phase change films MXene:xCu with cross-linked structure were prepared by a physical blending method using polyethylene glycol (PEG), polyvinyl alcohol (PVA), and MXene-Cu nanowires. Due to the abundant surface functional groups of MXene nanosheets, additional hydrogen bond binding sites were provided, which promoted cross-linking and improved the flexibility of the film. Meanwhile, Cu nanowires effectively enhanced the photothermal conversion efficiency and thermal conductivity of the film. The initial enthalpy of MXene:0.75Cu was 200.1 J/g, and after 200 heating-cooling cycles, the enthalpy was 185.7 J/g, demonstrating good thermal cycling stability. Moreover, its photothermal conversion efficiency could reach 93.9%, and it also had good photo-driven recoverability, with a recovery rate approaching 100% within 60 seconds. Therefore, MXene:xCu has repeatable photothermal conversion stability, excellent photo-driven shape recoverability, good chemical compatibility, hydrophilicity, crystallization performance, and good thermal stability and reliability, showing potential application prospects.

Key words: flexibility; heat stability; composites; solar energy; heat transfer

相变材料 (PCMs) 被广泛认为是一种很有前途的储能和热管理材料, 以解决各种储热系统中能源供需不匹配的问题^[1]。相变材料具有在相变过程中保持近乎恒定的温度、系统温度可控、能源可回收等优点, 可以显著提高能源效率。因此, 它们被广泛应用于太阳能^[2-3]、热能储存和电池^[4-6]、电子设备^[7]、航空航天^[8]等领域。有机相变材料包括石蜡、脂肪酸和聚乙二醇 (PEG), 具有潜热高、稳定性好、过冷可忽略、无毒、无腐蚀等优点^[9]。但有机相变材料存在着超过熔点容易泄漏的缺陷, 限制了它

们的大规模应用。为了解决这一问题, 研究者提出了许多制备形状稳定复合相变材料的方法。Cao 等^[10]利用醋酸钠三水合物的潜热存储和热化学储能, 使用多孔膨胀石墨吸附乙酸钠三水合物, 用于锂离子电池的多级热管理。Li 等^[11]利用独特的核壳结构制备了 Al@Al₂O₃ 相变微球, 随后在其表面涂覆 Fe₂O₃/Al₂O₃ 形成具有热存储功能的催化剂, 这种催化剂能够在某些复杂的化学反应中防止热失控现象发生。然而, 这些复合相变材料在固态下通常是刚性的, 不能很好地弯曲折叠以及变形。因此将

收稿日期: 2025-03-31; 修回日期: 2025-11-02

基金项目: 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目 (2023QNJS060, 2023QNJS050); 内蒙古自治区重大科技创新示范项目 (2023JBS0012)

作者简介: 黄孝笑 (1998-), 女, 硕士, 研究方向为相变储能材料, 2750264133@qq.com; 王亚雄 (1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为相变储能材料, 通讯联系人, yaxiong@hotmail.com。

支撑基体掺入相变材料中,再通过模具对混合物进行塑化即可制备出柔性复合相变薄膜。柔性复合相变薄膜具有广泛的应用范围,例如电子设备的热管理^[12]、热能存储^[13]、可穿戴设备^[14]和冷链物流的储能^[15]等。其中,PEG 因其黏度可调、热容量高和周期性循环稳定的特性而广泛应用于众多领域^[16-17]。

引入共轭或超共轭结构填料(MXene、碳纳米管和石墨烯等)是同时解决有机 PCMs 光热转换性能差和导热系数低等问题的有效途径^[18]。具有高导热性的填料可以增强光的吸收,然后通过 π 电子的激发和弛豫将热量辐射到环境中,同时增强传热。MXene 是一种新开发的 2D 亲水性纳米材料,具有卓越的定制特性,例如机械陶瓷性质、丰富的化学性质和亲水性等,其通式为 $M_{n+1}X_nT_x$,由 $n+1$ 层 3~6 种早期过渡金属的族元素组成,由 n 层碳和/或氮原子交错;—F、—OH 和—O 等表面终止用 T_x 表示^[19]。自 2011 年被发现以来, MXene 已广泛应用于各领域,从复合材料^[20]、储能和催化转化^[21-22]、电磁和电子^[23]、机械应用到基础研究^[24]。此外, MXene 具有良好柔韧性,结合其 2D 形态和层状结构,很容易与其他材料形成复合材料,这为以互补方式整合不同材料的优异性能提供了机会。然而,含有 MXene 的复合 PCMs 的机械强度可能会降低。例如, Hu 等^[25]制备了光驱动聚乙二醇/水性聚氨酯/MXene 气凝胶复合 PCMs,光热转换效率达到 91.3%,但抗拉强度仅为 0.152 MPa。由于 MXene (尤其是气凝胶)的脆性断裂,复合 PCMs 具有很强的刚性^[26-27],其储热性能容易受到 MXene 表面特性的影响。因此,设计和制造具有可变形性、可定制性和可折叠性的柔性相变复合薄膜(MXene: x Cu)具有重要意义。

聚乙烯醇(PVA)是一种可生物降解的聚合物,具有良好的水溶性、优异的成膜性能和柔韧性^[28],可与 MXene 形成交联结构,提高(MXene: x Cu)的柔韧性,是一种具有良好力学性能的有效材料。在各种导电纳米材料中,具有显著导电性和大宽比的金属纳米线(NWS)是与 MXene 纳米片结合以产生新复合材料的理想选择。而 Cu 不仅导电率高,而且成本低廉,资源丰富。因此,铜纳米线(CuNWS)被认为是未来电子技术中最有前途的导电材料之一。

基于上述背景,本研究采用物理共混法制备具有交联结构的 PEG/PVA/Mxene 和 CuNWS 的复合柔性相变薄膜 MXene: x Cu,以实现性能的协同强化。主要研究其柔性、机械强度、储热性能、光热转

换性能和导热性能,并对其结构、化学相容性、结晶行为、光驱动形状可恢复性、热可靠性和稳定性等方面进行详细研究。预期 MXene: x Cu 具有较高的抗拉强度、光热转换效率、导热系数和较大的潜热,从而可以在在热管理应用中实现光吸收-光热转换-蓄热-热利用的一体化。

1 材料和方法

1.1 材料

盐酸(37%)、甘油、无水乙醇,由天津风船化学试剂有限公司提供。聚乙二醇(分子量 4 000)、聚乙烯醇(分子量 13 500)、钛碳化铝($\geq 90.0\%$, 400 目)、高锰酸钾,由上海麦克林生化科技股份有限公司提供。无水四硼酸钠(99.9%)、氟化锂(99.9%)、硝酸钠,由上海阿拉丁试剂提供。

1.2 实验仪器

X 射线衍射仪(XRD, JEM-1200EX, 荷兰帕纳科),测试条件为铜靶衍射源($Cu\ k\alpha, \lambda = 1.5406\ \text{\AA}$),管道压力 40 kV,管流 40 mA,扫描速度 $2^\circ/\text{min}$,步长 0.02° ,扫描模式 $\theta/2\theta$,扫描方式为连续;傅里叶红外光谱仪(FT-IR, Nicolet iS5, 美国 Thermo Fisher),测试范围 $550\sim 4\ 000\ \text{cm}^{-1}$;差式扫描量热计(DSC, DSC6000, 美国 PerkinElmer);热重分析(TGA, DSC3+, METTLER TOLEDO);自制太阳能热转换实验模拟太阳光发射和探测装置(太阳模拟器+数据采集器);导热系数仪(C-THERM/TCI 型);红外热成像仪(EVERTE, EN60825-1)。

1.3 实验步骤

1.3.1 MXene 的制备

用 LiF/HCl 混合溶液刻蚀 Ti_3AlC_2 (MAX 相)中的 Al 层,得到 $Ti_3C_2T_x$ 。首先将 6.00 g LiF 溶解于预先配制好的 9 mol/L HCl 溶液中,然后将 6.00 g Ti_3AlC_2 粉末缓慢加入上述混合溶液中,在 35°C 下搅拌 36 h。然后用去离子水以 10 000 r/min 的速度离心 10 min,直至 pH 约为 7。然后,超声 2 h 促进多层 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的剥离。最后,将上述混合物以 3 500 r/min 离心 10 min,得到 $Ti_3C_2T_x$ 胶体。 $Ti_3C_2T_x$ 胶体浓度可以通过在 -45°C 下冷冻干燥 48 h 得到的 $Ti_3C_2T_x$ 固体的质量来计算。

1.3.2 复合相变薄膜的制备

采用简单的物理共混法制备 MXene: x Cu。首先,将 0.04 g $Na_2B_4O_7$ 和 0.06 g MXene 混合加入到 20 mL 去离子水中,在 90°C 搅拌 10 min。然后,将上述混合物超声 15 min,在 90°C 搅拌 3 h,将不同

MXene 与铜纳米线比例的 $x\text{CuNWS}$ ($x = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$), 同时加入 1.0 g PVA 与 1.0 g PEG, 将获得的溶胶倾倒在聚四氟乙烯板上, 然后将其转移到 35°C 的烤箱中干燥 25 h, 获得具有交联结构的 $\text{MXene}:x\text{Cu}$, 制备过程如图 1 所示。

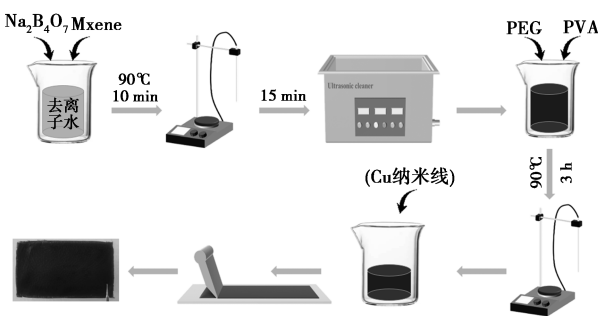


图 1 复合相变薄膜的制备过程

1.4 材料的结构表征及性能测试

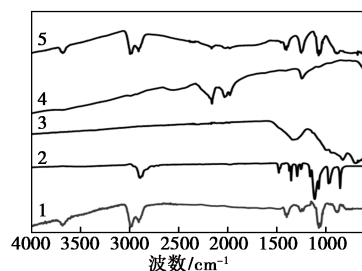
采用傅里叶变换红外光谱分析了 $\text{MXene}:x\text{Cu}$ 的交联结构和化学相容性, 测试波数范围为 $4000 \sim 550 \text{ cm}^{-1}$ 。采用 X 射线衍射仪在 580° 的 2θ 范围内收集 $\text{MXene}:x\text{Cu}$ 的衍射图, 扫描速率为 $5^\circ/\text{min}$ 。采用差示扫描量热计测定 $\text{MXene}:x\text{Cu}$ 在熔化和凝固过程中相变循环前后的相变参数, 所有样品在氮气气氛下以 $5^\circ/\text{min}$ 的速率加热 ($0 \sim 80^\circ\text{C}$) 和冷却 ($80 \sim 0^\circ\text{C}$), 采用热重分析评估相变复合材料的热稳定性。通过自制太阳能热转换实验模拟太阳光发射和探测装置(太阳模拟器+数据采集器), 对复合相变材料的光热转换性能进行分析, 计算光热转换效率。采用导热系数仪和红外热成像仪测量样品的导热系数及其热成型分布, 评估其光驱动可恢复性。

2 结果与讨论

2.1 FT-IR 分析

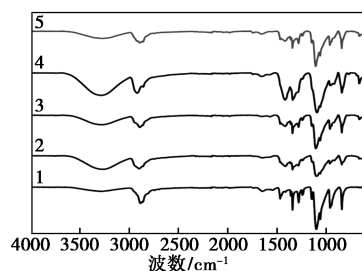
采用 FT-IR 法测定 $\text{MXene}:x\text{Cu}$ 的交联结构和化学相容性。PEG、PVA、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 、 Ti_3AlC_2 、MXene 的 FT-IR 光谱图如图 2(a) 所示, $\text{MXene}:x\text{Cu}$ 的 FT-IR 光谱图如图 2(b) 所示。PEG 的吸收谱带在 2885 cm^{-1} 和 932 cm^{-1} 处为烷烃的 C—H 伸缩振动、 1635 cm^{-1} 和 1115 cm^{-1} 处分别为 C=O 和 C—O 的伸缩振动峰、 1462 cm^{-1} 和 1338 cm^{-1} 处为 C—H 的振动峰、 1276 cm^{-1} 和 1242 cm^{-1} 处为 O—H 的弯曲振动峰^[29]。 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 光谱中, 1645 、 1419 cm^{-1} 和 1302 cm^{-1} 处的吸收峰属于 B—O 特征吸收峰。MXene 光谱中可以清晰地观察到 2430 cm^{-1} 处的吸收峰, 这主要归因于 O—H 基团的拉伸振动。上述

结果表明, PVA/ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 、PVA/MXene 和 $\text{MXene}/\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 之间可以形成具有氢键的交联结构。同时, 在 $\text{MXene}:x\text{Cu}$ 的光谱中观察到 PEG 为主吸收峰, 说明 PEG 与其他组分通过物理作用成功结合, 没有产生新的官能团, 证实了 PEG 的化学结构没有发生变化, 表明 $\text{MXene}:x\text{Cu}$ 具有良好的化学相容性^[30]。



1—PVA; 2—PEG; 3— $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$; 4—MXene; 5— Ti_3AlC_2

(a) 各组分



1—MXene:1.5Cu; 2—MXene:1.25Cu; 3—MXene:1.0Cu;

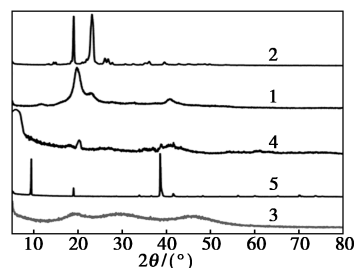
4—MXene:0.75Cu; 5—MXene:0.5Cu

(b) 不同 Cu 含量复合相变薄膜

图 2 各组分及不同 Cu 复合相变薄膜的红外光谱图

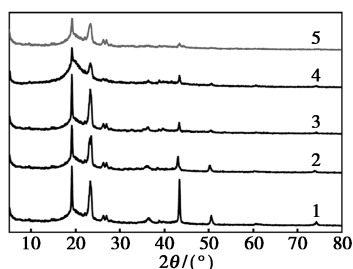
2.2 X 射线衍射分析

采用 XRD 分析 PVA 和 $\text{MXene}:x\text{Cu}$ 的结晶行为, 结果如图 3 所示。PEG 的 XRD 谱图在 20.0° 和 24.8° 处显示出 2 个强烈而尖锐的衍射峰, 表明 PEG 具有良好的结晶度。在 $\text{MXene}:x\text{Cu}$ 中观察到 2 个 PEG 的衍射峰, 并且衍射峰的位置没有明显的移位, 说明 PEG 在 $\text{MXene}:x\text{Cu}$ 中仍处于结晶状态, 这是潜热释放的保证。同时, Cu 纳米线分别在 43° 、



1—PVA; 2—PEG; 3— $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$; 4—MXene; 5— Ti_3AlC_2

(a) 各组分



1—MXene:1.5Cu;2—MXene:1.25Cu;3—MXene:1.0Cu;
4—MXene:0.75Cu;5—MXene:0.5Cu
(b)不同 Cu 含量复合相变薄膜

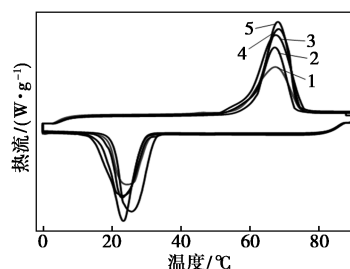
图 3 各组分与复合相变薄膜 XRD 图

50.5°、74.5°左右出现很强的特征峰。MXene:*x*Cu 的 XRD 谱图包含了 PEG 和基体的所有峰,没有观察到新的峰,表明 Cu 纳米线和 MXene:*x*Cu 是物理结合在一起的,没有发生化学变化。

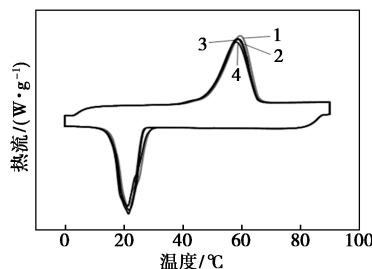
2.3 热稳定性分析

表 1 为不同比例材料的相变参数以及失重率,其中 ΔH_s 代表熔融焓,为材料完全融化时所吸收的热量; ΔH_m 代表结晶焓,是指材料从液体状态凝固结晶成固态时吸收的热量;失重率为材料在升温过程中失去的重量与原始重量之比。DSC 法测定的储热容量是 MXene:*x*Cu 的重要参数之一^[31]。在复合相变材料中,PEG 作为相变芯材,其含量决定了材料储热容量的大小。利用 DSC 分析 PEG 与复合相变材料的热性能(熔点起始温度、熔点峰值温度、熔点结束温度和焓值)。图 4(a)为 MXene:*x*Cu 的 DSC 曲线,表 1 列出了各复合相变材料的 DSC 测试数据以及 MXene:0.75Cu 不同循环次数的焓值变化,其中 MXene:0.5Cu 的熔融焓为 206.1 J/g, MXene:0.75Cu 的熔融焓为 200.1 J/g,相比于 MXene:0.5Cu, MXene:0.75Cu 的熔融焓略有下降,这是因为铜纳米线为非相变成分,随着铜纳米线比例的增加,复合相变薄膜中发生相变的比例减少,因此焓值降低。另外 MXene:0.75Cu 经过 200 次循环前后熔融焓分别为 200.1 J/g 与 185.7 J/g,循环后的焓值为循环前焓值的 92.8%,表明 MXene:0.75Cu 具有良好的热循环稳定性与热能容量。

对样品 MXene:0.75Cu 在 0~80℃内进行 DSC 循环测试,如图 4(b)所示,1 次、50 次、100 次、200 次循环后其熔融焓分别为 200.1、192.5、188.9、185.7 J/g,平均焓值为 191.8 J/g。样品循环后的熔融温度和结晶温度没有发生明显的位移,其焓值无明显变化,说明 MXene:0.75Cu 具有良好的热循环稳定性。



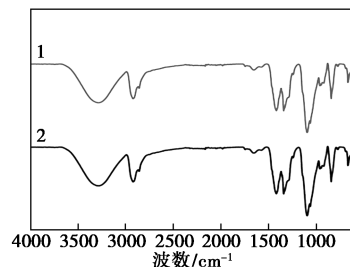
1—MXene:1.5Cu;2—MXene:1.25Cu;3—MXene:1.0Cu;
4—MXene:0.75Cu;5—MXene:0.5Cu
(a)不同 Cu 含量复合相变薄膜的 DSC 曲线



1—循环 1 次;2—循环 50 次;3—循环 100 次;4—循环 200 次
(b)MXene:0.75Cu 循环不同次数的 DSC 曲线

图 4 复合相变薄膜的 DSC 曲线

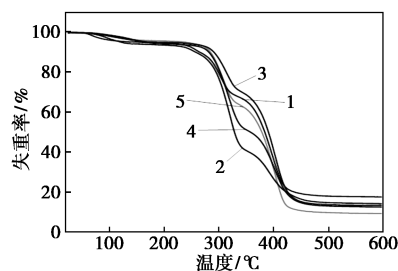
对 MXene:0.75Cu 在 1 次、200 次循环后进行了 FT-IR 光谱分析,如图 5 所示。200 次循环试验后其特征峰没有明显变化,说明其在循环过程中化学结构稳定有良好的热循环稳定性。



1—循环 1 次;2—循环 200 次

图 5 MXene:0.75Cu 循环前后的 FT-IR 图

对 MXene:*x*Cu 的热稳定性进行 TGA 分析, TG 曲线和失重率分别如图 6 和表 1 所示。由于热分解



1—MXene:1.5Cu;2—MXene:1.25Cu;3—MXene:1.0Cu;
4—MXene:0.75Cu;5—MXene:0.5Cu

图 6 复合相变材料的热重曲线

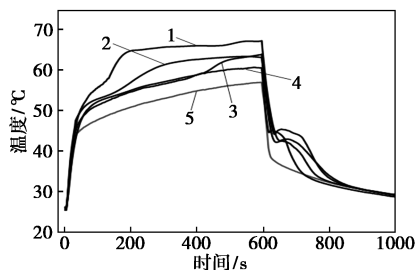
表 1 不同 Cu 含量的 MXene:*x*Cu 在熔化和凝固过程中相变参数及失重率

样品	融化				凝固				失重率/%
	$T_{on}/^{\circ}\text{C}$	$T_m/^{\circ}\text{C}$	$T_{end}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_s/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$T_{on}/^{\circ}\text{C}$	$T_m/^{\circ}\text{C}$	$T_{end}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_M/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	
MXene:0.5Cu	57.53	67.43	74.38	206.1	30.45	24.17	19.08	196.7	90.57
MXene:0.75Cu	55.59	67.27	73.01	200.1	28.97	23.00	19.31	192.9	87.29
循环 50 次	49.61	59.60	65.69	192.5	28.15	21.50	17.07	191.6	
循环 100 次	49.71	58.95	64.56	188.9	27.01	21.33	16.76	182.7	
循环 200 次	48.92	58.30	65.22	185.7	26.43	22.00	17.00	181.2	
MXene:1.0Cu	58.95	67.57	75.13	201.4	30.19	23.17	17.45	199.9	86.50
MXene:1.25Cu	61.12	68.37	73.32	196.0	32.22	25.67	20.75	190.5	85.62
MXene:1.5Cu	61.51	68.17	74.22	196.8	28.30	23.33	17.59	191.5	82.26

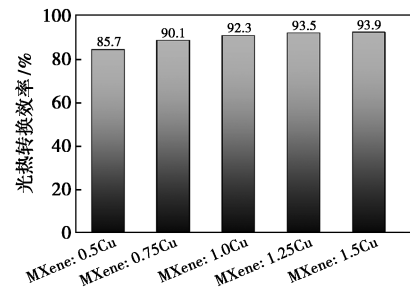
几乎完全,30~600℃内 PEG 的失重率达到 90.79%。MXene:*x*Cu 在 30~600℃内表现出两步失重(83.54%~87.98%),表明了相似的热稳定性特征,这主要归因于 PEG 和 PVA 的联合热分解。30~350℃内吸附水的去除为第一步分解,350℃以上 PVA 的氧化降解为第二步分解。重要的是, MXene:*x*Cu 的失重起始温度远高于其相变温度范围(50~60℃),这表明 MXene:*x*Cu 在相变工作温度范围内具有合理且可接受的热稳定性。

2.4 光热转换效率测试

Cu 纳米线在提高 MXene:*x*Cu 光热转换性能方面发挥了重要作用。利用时间-温度曲线评价 Cu 纳米线对 MXene:*x*Cu 光热转换的影响,在辐照度为 1 000 mW/cm²(1 Sun)的模拟太阳光源下所得曲线及数据如图 7 所示。结果表明, MXene:*x*Cu 的升温速率和平台温度随 Cu 掺量的增加而增加。Cu 纳米线的改性使得 MXene:*x*Cu 复合相变材料的相变温度有所上升,使其热导率增加,从而加快了光照下材料中 PEG 的吸热;而铜纳米线具有较高的光反射率,铜纳米线比例过大,相变材料对光的吸收会减弱,导致材料吸收的光能减少,进而减少了材料的温



1—MXene:1.5Cu;2—MXene:1.25Cu;3—MXene:1.0Cu;
4—MXene:0.75Cu;5—MXene:0.5Cu
(a) 光热转换效率曲线



(b) 光热转换效率数据

图 7 各复合相变薄膜光热转换效率

度升高。在冷却过程中,可以清楚地观察到 MXene:*x*Cu 的热量释放平台^[32]。

根据所制备的复合材料储存热能与入射太阳能的比值,计算了其在太阳光辐照下的光热转换效率(η)见下式^[33]:

$$\eta = Q_s/Q = \left(\int_{T_i}^{T_m} mC_{ps}dT + m\Delta H_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_{pf}dT \right) / (P \times A \times t)$$

其中, Q_s 为储存的热能,J; Q 为复合材料吸收的入射太阳光能,J; m 为测量所用样品的质量,g; P 为入射太阳光的功率强度,kW; A 为暴露在太阳光照下的方形复合材料的顶表面积,m²; t 为将复合材料从较低温度 T_i 加热到较高温度 T_f 的太阳辐照的平台时间,s; ΔH_m 为复合材料在温度差之间的熔融焓,J/g; C_p 为材料比热容,J/(g·℃)。

在灯光关闭后,5种样品在敞开的环境下受低温环境的影响散热速度较快,其中温度下降曲线的恒温平台不明显,主要为载体中 PEG 储存的热能不能满足导热骨架的散热速率。因此复合相变材料中存在的 Cu 为热量的传导提供了更多的通道,有效地提高了热量从光吸收区域分布到相变材料中的速度,从而提高光热转换效率。

2.5 导热系数分析

导热系数是复合相变材料的关键性能指标之一。对比分析了不同 Cu 纳米线含量的复合材料的导热系数,如图 8 所示。由于 MXene:0.5Cu 的导热系数为 $0.706 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$,随 Cu 纳米线含量的增加,复合相变材料的导热性能提升,其中 MXene:1.5Cu 的导热系数为 $0.951 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$,提升 34.7%。这与光热转换效率结果一致,即 MXene: x Cu 的导热系数

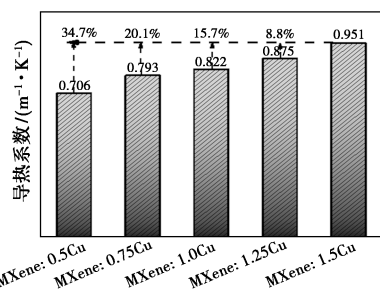


图 8 不同 Cu 比例复合相变柔性薄膜导热系数

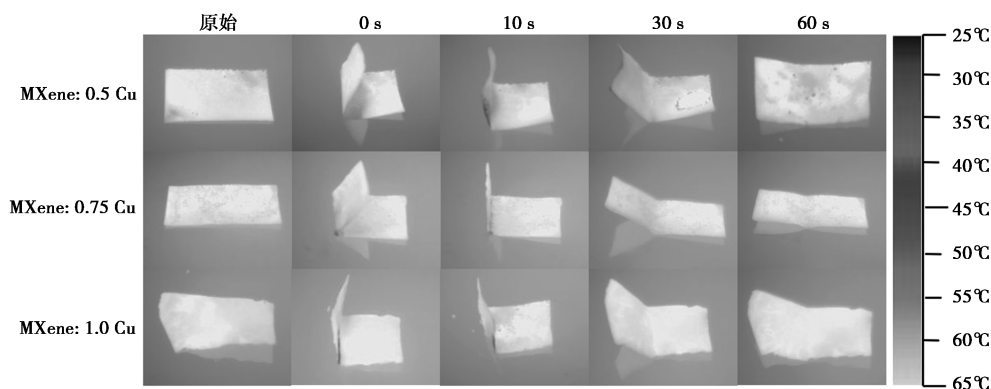


图 9 MXene: x Cu 的能量分布与光驱动可恢复性热成像

3 结论

本研究设计制造了同时增强机械性能、光热转换及传热的复合柔性相变薄膜 MXene: x Cu,研究了 Cu 纳米线添加量对 MXene: x Cu 潜热的影响,分析了 MXene 对 MXene: x Cu 机械性能和柔韧性的积极作用。但 Cu 纳米线含量过多,则发生团聚,影响潜热,所以选择 MXene:0.75Cu 最为合适。对 MXene:0.75Cu 进行循环稳定性测试,其初始焓值为 200.1 J/g ,经过 200 次加热冷却循环后,焓值为 185.7 J/g ,因此,材料具有良好的热循环稳定性。且 MXene: x Cu 具有良好的化学相容性、结晶性、优异的光驱动形状可恢复性和良好的热稳定性,可用于电池热管理、柔性电子元件等,具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] Wu M Q, Wu S, Cai Y F, *et al.* Form-stable phase change compos-

随着 Cu 添加量增加而增加。

2.6 光驱动可恢复性

采用 MXene:0.5Cu 和 MXene:0.75Cu 以及 MXene:1.0Cu 分析光驱动下的形状恢复性,结果如图 9 所示。矩形样品在室温 (25°C) 下可折叠成“V”形,通过模拟太阳光 ($100 \text{ mW}/\text{cm}^2$) 照射,光驱动形状恢复比随着照射时间的增加而增加。当照射时间达到 60 s 时,材料从“V”形恢复到原来的矩形平面状态,恢复率几乎达到 100%,表现出良好的光热转换性能。由于 PEG 的高粘度以及 Cu 纳米线的连接, MXene: x Cu 在室温下可以长时间保持折叠形状。在模拟阳光照射下, MXene: x Cu 具有良好的光热转换能力,能快速转换吸收的热量,使其表面温度高于相变温度。因此,相变过程中材料的结构变化是其具有优异光驱动形状可恢复性的原因。

ites; Preparation, performance, and applications for thermal energy conversion, storage and management [J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 42: 380-417.

[2] Do Nascimento F C, De Aguiar L C V, Costa L A T, *et al.* Formulation and characterization of crosslinked polyvinyl alcohol (PVA) membranes; Effects of the crosslinking agents [J]. *Polymer Bulletin*, 2021, 78(2): 917-929.

[3] Olfian H, Ajarostaghi S S M, Farhadi M, *et al.* Melting and solidification processes of phase change material in evacuated tube solar collector with U-shaped spirally corrugated tube [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 182(1).

[4] Adibpour S, Raisi A, Ghasemi B, *et al.* Experimental investigation of the performance of a sun tracking photovoltaic panel with Phase Change Material [J]. *Renewable Energy*, 2021, 165: 321-333.

[5] Zhu C, Lu X, Wu H, *et al.* Constructing heat conduction path and flexible support skeleton for PEG-based phase change composites through salt template method [J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 226: 109532.

[6] Jiang X, Deng C, Xu D, *et al.* Epoxy composites based on phase

- change microcapsules with high thermal conductivity and storage efficiency by dispersing with cellulose nanofibrils[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 74:109382.
- [7] Mehling H, Brütting M, Haussmann T. PCM products and their fields of application-An overview of the state in 2020/2021 [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51:104354.
- [8] Zhao Z, Chen G, Liu X, *et al.* Minireview on design of flexible composite phase change materials to various energy applications: Progresses and perspectives[J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(9):6348–6364.
- [9] Chinnasamy V, Heo J, Jung S, *et al.* Shape stabilized phase change materials based on different support structures for thermal energy storage applications-A review[J]. *Energy*, 2023, 262:125463.
- [10] Cao J, Ling Z, Lin S, *et al.* Thermochemical heat storage system for preventing battery thermal runaway propagation using sodium acetate trihydrate/expanded graphite [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433:133536.
- [11] Li K, Cheng X, Li N, *et al.* A yolk/shell strategy for designing hybrid phase change materials for heat management in catalytic reactions[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(46):24232–24246.
- [12] Salmon F, Lacanette D, Duquesne M, *et al.* 3D fluid-structure simulation of innovative composites for the design and thermal management of electronic devices [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 280:116824.
- [13] 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]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 53:105179.
- [14] Zhu S, Miao L, Peng Y, *et al.* Persistently self-powered wearable thermoelectric generator enabled by phase-change inorganics as the heat sink[J]. *Materials Today Physics*, 2023, 32:101011.
- [15] He Z, Guo W, Song L, *et al.* Techno-economic analysis of a refrigerated warehouse equipped with on-shelf phase change material for cold storage under different operating strategies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 283:116922.
- [16] Xu X, Sun Y, Wang W, *et al.* An overview of polyethylene glycol composite phase change materials: Preparation, physicochemical properties and application [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 104:114581.
- [17] Xu C, Wang W, Zhang H, *et al.* Polyethylene glycol/polyvinyl butyral/graphene nanoplates as composite phase-change materials with high thermal conductivity[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 250:112093.
- [18] Zhang H, Wang L, Xi S, *et al.* 3D porous copper foam-based shape-stabilized composite phase change materials for high photothermal conversion, thermal conductivity and storage[J]. *Renewable Energy*, 2021, 175:307–317.
- [19] Lim K R G, Shekhirev M, Wyatt B C, *et al.* Fundamentals of MXene synthesis[J]. *Nature Synthesis*, 2022, 1(8):601–614.
- [20] Malaki M, Varma R S. Mechanotribological aspects of MXene-reinforced nanocomposites [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(38):2003154.
- [21] Anasori B, Lukatskaya M R, Gogotsi Y. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage[M]. *Jenny Stanford Publishing*, 2023:677–722.
- [22] Shi Z, Khaledialidusti R, Malaki M, *et al.* MXene-based materials for solar cell applications[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(12):3170.
- [23] Aghayar Z, Malaki M, Zhang Y. MXene-based ink design for printed applications[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(23):4346.
- [24] Kamysbayev V, Filatov A S, Hu H, *et al.* Covalent surface modifications and superconductivity of two-dimensional metal carbide MXenes[J]. *Science*, 2020, 369(6506):979–983.
- [25] Hu W, Shi X, Gao M, *et al.* Light-actuated shape memory and self-healing phase change composites supported by MXene/waterborne polyurethane aerogel for superior solar-thermal energy storage[J]. *Composites Communications*, 2021, 28:100980.
- [26] Shao Y, Hu W, Gao M, *et al.* Flexible MXene-coated melamine foam based phase change material composites for integrated solar-thermal energy conversion/storage, shape memory and thermal therapy functions[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 143:106291.
- [27] Lee G S, Yun T, Kim H, *et al.* Mussel inspired highly aligned $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene film with synergistic enhancement of mechanical strength and ambient stability[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(9):11722–11732.
- [28] Van Nguyen S, Lee B K. Polyvinyl alcohol/alkyl ketene dimer films with excellent water resistance and water vapor barrier properties [J]. *Materials Letters*, 2022, 307:131045.
- [29] Wang C, Wang W, Xin G, *et al.* Phase change behaviors of PEG on modified graphene oxide mediated by surface functional groups[J]. *European Polymer Journal*, 2016, 74:43–50.
- [30] Qian T, Li J, Ma H, *et al.* The preparation of a green shape-stabilized composite phase change material of polyethylene glycol/SiO₂ with enhanced thermal performance based on oil shale ash via temperature-assisted sol-gel method[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 132:29–39.
- [31] Zhao W, Zhang D, Yang Y, *et al.* A fast self-healing multifunctional polyvinyl alcohol nano-organic composite hydrogel as a building block for highly sensitive strain/pressure sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(38):22082–22094.
- [32] Sharshir S W, Elsheikh A H, Edreis E M A, *et al.* Improving the solar still performance by using thermal energy storage materials: A review of recent developments [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2019, 165:1–15.
- [33] Luo X, Zhu L, Wang Y C, *et al.* A flexible multifunctional triboelectric nanogenerator based on MXene/PVA hydrogel[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(38):2104928. ■