

# 石蜡/SiO<sub>2</sub>/mEG 相变材料的制备与热性能探究

张 豪<sup>1</sup>, 曹姗姗<sup>1\*</sup>, 齐承英<sup>1</sup>, 吴向东<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学能源与环境工程学院, 天津 300401;

2. 河北工大科雅能源科技股份有限公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 为了提高石蜡(PW)的导热性能和改善泄露问题, 研究了一种混合尺寸膨胀石墨(mEG)和纳米二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)协同的体系。采用浸渍法制备了一种新型形状稳定的PW/SiO<sub>2</sub>/mEG复合相变材料, 并对复合相变材料的热性能、微观结构、循环稳定性等进行了研究。结果表明, 制备的PW/SiO<sub>2</sub>/EG-20目-18 μm具有丰富的三维吸附网络, 对PW吸附效果显著; 在110℃及以下温度可实现无泄漏储热, 并具有良好的形态稳定性; mEG极大地提高了相变材料的传热性能; 10% EG-20目-18 μm的加入使得PW/SiO<sub>2</sub>/mEG的导热系数提升为4.05 W/(m·K), 较纯石蜡提高了约13.1倍; 此外, 还观察到PW/SiO<sub>2</sub>/EG-20目-18 μm在经历300次熔融和凝固循环后相变温度仅变化了0.3℃, 潜热降低了2.20 J/g, 表现出良好的热循环稳定性。

**关键词:** 复合定型相变材料; 石蜡; 纳米二氧化硅; 混合尺寸膨胀石墨; 热性能

中图分类号: TB34

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)S1-0200-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.037

## Preparation and thermal properties of paraffin/SiO<sub>2</sub>/mEG phase change materials

ZHANG Hao<sup>1</sup>, CAO Shan-shan<sup>1\*</sup>, QI Cheng-ying<sup>1</sup>, WU Xiang-dong<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Hebei Gongda Keya Energy Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** In order to enhance the thermal conductivity paraffin wax (PW) and solve its leakage problem, a synergistic system comprising hybrid size-expanded graphite (mEG) and silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) nanoparticles is developed. A novel shape-stable PW/SiO<sub>2</sub>/mEG composite phase change material is prepared via the impregnation method, and its thermal properties, microstructure, and cycling stability are studied. Results show that the prepared PW/SiO<sub>2</sub>/EG-20 mesh-18 μm has a rich three-dimensional adsorption network and presents a great adsorption effect for PW. It is shown that the prepared PW/SiO<sub>2</sub>/EG-20 mesh-18 μm can achieve leak-free thermal storage at 110℃ and below temperature, showing good morphological stability. mEG greatly improves the heat transfer performance of the phase change material. The addition of 10 wt% EG-20 mesh-18 μm enhances the thermal conductivity of PW/SiO<sub>2</sub>/mEG to 4.05 W/(m·K), which is about 14.1 times that of pure paraffin. In addition, it is also observed that the phase transition temperature of PW/SiO<sub>2</sub>/EG-20 mesh-18 μm sample only changes by 0.3℃ and the latent heat decreases by 2.20 J·g<sup>-1</sup> after 300 cycles of melting and solidification, showing good thermal cyclability.

**Key words:** composite shaped phase change materials; paraffin; SiO<sub>2</sub> nanoparticles; hybrid size-expanded graphite; thermal performance

随着现代社会能源需求的不断增加, 供需不匹配的问题日益严重, 迫切需要探索高效的能源储存方法<sup>[1]</sup>。热能存储(TES)是提高能源利用率和降低能耗的重要措施<sup>[2]</sup>。其中, 应用相变材料(PCM)进行潜热储存是热能存储最有效的方法, 因为它能够在相变过程中储存大量能量<sup>[3]</sup>。常用的相变材料

包括石蜡(PW)、脂肪酸和水合盐等。其中, PW因具有价格低廉、无腐蚀性、过冷度低等特性, 而得到了广泛的应用<sup>[4]</sup>, 但低导热和易泄露等问题限制了其进一步的应用<sup>[5]</sup>。

膨胀石墨(EG)因其价格低廉、导热性好、孔隙丰富、制造简单等特点, 被广泛应用于提升PW的形

收稿日期: 2024-06-03; 修回日期: 2024-11-24

基金项目: 国家重点研发计划重点专项“市政基础设施节能低碳关键技术联合研究与应用”(2022YFE0208800)

作者简介: 张豪(2000-), 男, 硕士生, 研究方向为多能互补及优化利用技术, 20221302010@stu.hebut.edu.cn; 曹姗姗(1986-), 女, 博士, 副教授, 主要从事低碳供热技术的研究, 通讯联系人, caoshanshan1118@sina.com。

状稳定性和导热性。相关研究<sup>[6]</sup>表明 EG 增强传热效果明显,同时可保证复合相变材料(CPCM)的形状稳定性。周丽等<sup>[7]</sup>通过真空浸渍法制备了膨胀石墨-石蜡复合相变储能材料,当膨胀石墨的质量分数为 12%时,复合相变储能材料的导热系数约为 3.25 W/(m·K),但存在较多泄露;继续提高膨胀石墨的添加比例至 15%,仍然存在较多泄露现象。类似的情况在脂肪酸<sup>[8]</sup>和醇类有机共晶复合物<sup>[9]</sup>等相变材料中也存在。泄露使 PCM 从 EG 基体中析出,长期的泄露甚至会导致分层现象,严重影响储热效果。虽然 EG 多孔基体可在相变材料内部形成吸附网络,缓解 PCM 的渗漏问题<sup>[10]</sup>,但当吸附达到饱和状态,继续添加 EG 对 PCM 的吸附效果影响较小,因此,有必要进一步提高基于 EG 为基体的防泄漏性能。田云峰等<sup>[11]</sup>发现两种不同粒径的 EG 配合可以形成镶嵌网络,达到更好的吸附效果,但对于粒径的选择问题并未研究。此外, SiO<sub>2</sub> 因具有较大的比表面积也常被用来吸附固-液相变材料,且具有优秀的防漏效果和优异的循环可靠性<sup>[12]</sup>。

因此,本文建立了以不同粒径搭配的膨胀石墨(mEG)为载体、SiO<sub>2</sub> 为吸附剂的吸附体系,与 PW 相变材料制备了复合定形相变材料,并通过热性能测试、微观结构观察、热循环性测试等检验其性能,探究 mEG 的不同粒径搭配对 PCM 性能的影响,旨在提高 PCM 的整体导热性和减少泄漏。

## 1 实验

### 1.1 材料

PW 单体(PCM-A-58H)购自广州中佳相变材料有限公司;纳米 SiO<sub>2</sub>(吸附剂,平均粒径 10 nm,比表面积 380 m<sup>2</sup>/g,类球形,白色)购自上海肴戈合金材料有限公司;膨胀石墨(吸附剂,导热添加剂,粒度 20 目、100 目、18 μm,灰分 ≤ 0.2%,膨胀体积 400~600 mL/g)购自青海岩海碳材料有限公司。

### 1.2 PW/SiO<sub>2</sub>/mEG 的制备

PW/SiO<sub>2</sub>/mEG 的制备如图 1 所示。首先,将预定质量的 PW 放置在烧杯中,并在 90℃ 的温度下恒温加热 30 min,确保 PW 完全熔化;为了使 SiO<sub>2</sub> 分布均匀,将 SiO<sub>2</sub> 放入烧杯中与熔融 PW 混合,并使用搅拌子高速磁力搅拌 30 min;向熔融物中添加一定比例的小粒径膨胀石墨 1(EG-min),使用磁力搅拌子进行 30 min 的搅拌,使纳米 SiO<sub>2</sub> 和 PW 均匀分布于 EG-min 微孔中;再加入一定比例的大粒径膨胀石墨 2(EG-max)并使用玻璃棒进行 30 min 的搅

拌,确保添加物混合均匀;最后,用小勺取出最终制品放入圆形模具中,用压片机以 10 kg 的力压制成型,待冷却至室温,PW/SiO<sub>2</sub>/mEG 样品制作完成。

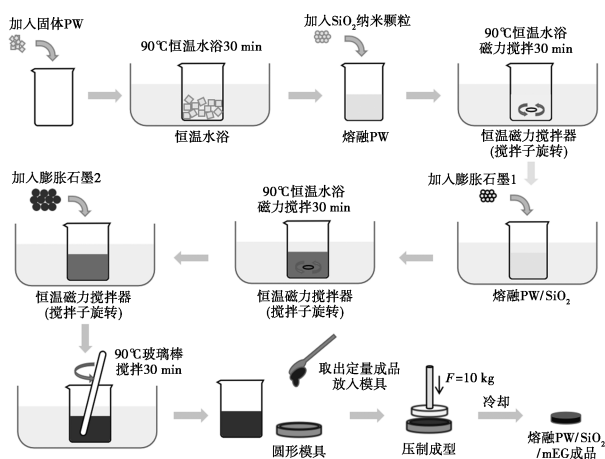


图 1 PW/SiO<sub>2</sub>/mEG 制备工艺示意图

优先制备了质量分数 0.8% SiO<sub>2</sub> 的样品 W0,分别与 mEG(EG-20 目-18 μm、EG-20 目-100 目、EG-100 目-18 μm)以一定的比例制备了复合相变材料 W1、W2 和 W3,配比如表 1 所示。

表 1 PW/SiO<sub>2</sub>/mEG 样品配比表 wt%

样品	PW	SiO <sub>2</sub>	EG-20 目	EG-100 目	EG-18 μm
PW	100	—	—	—	—
W0	99.20	0.80	—	—	—
W1	89.28	0.72	9	—	1
W2	89.28	0.72	—	9	1
W3	89.28	0.72	9	1	—

## 2 表征

采用傅里叶变换红外光谱仪(Bomem SRG1100G S/N)在 400~4 000 cm<sup>-1</sup> 的波长范围内,以 4 cm<sup>-1</sup> 分辨率表征 CPCM 的化学相容性。采用场发射扫描电子显微镜(FESEM)对样品的微观结构进行表征。使用差示扫描量热仪(DSC, 204 F1 型,德国耐驰),在氮气流速为 50 mL/min、实验温度为 0~150.00℃、加热速率为 10℃/min 的条件下,测定了 CPCM 的热性能。使用热常数分析仪(Hot Disk TPS 2500S,瑞典),通过瞬态平面热源法测量 CPCM 在室温下的热导率。

## 3 结果与讨论

### 3.1 DSC 分析

图 2 为 PW 和 W0 的 DSC 曲线。由图 2 可知,

W0 的 DSC 曲线因添加了质量分数 0.8% 的 SiO<sub>2</sub> 而向高温偏移,焓值没有明显变化。PW 在熔融过程中的相变温度为 57.3℃,W0 的相变温度较纯 PW 高出 1.3℃。原因是由于 SiO<sub>2</sub> 中存在着表面吸附力等微观力使 W0 熔化延迟<sup>[13]</sup>。

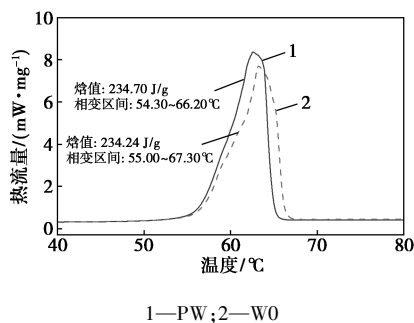


图 2 PW 和 W0 的 DSC 曲线

样品 W1~W3 的 DSC 测试结果见图 3。由图 3 可知,W1~W3 相变区间较 W0 没有出现明显的偏移,样品 W1~W3 的熔融潜热较理论值 210.8 J/g 也相差不大。因此,mEG 的加入对 PW/SiO<sub>2</sub> 的焓值和相变温度无明显影响。

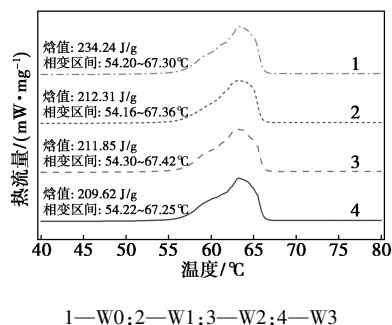
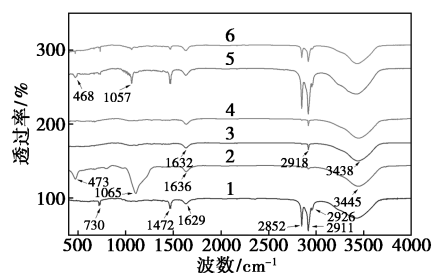


图 3 PW/SiO<sub>2</sub>/mEG 的 DSC 曲线

### 3.2 FT-IR

PW、SiO<sub>2</sub>、EG、PW/SiO<sub>2</sub>、PW/SiO<sub>2</sub>/mEG 的 FT-IR 谱图如图 4 所示。PW 在波长 2 926、2 911 cm<sup>-1</sup>和 2 852 cm<sup>-1</sup>处的特征峰分别是由—CH<sub>3</sub>及—CH<sub>2</sub>中的 C—H 单键的拉伸振动引起的<sup>[14]</sup>。而 1 472 cm<sup>-1</sup>和 1 629 cm<sup>-1</sup>的特征峰分别对应于 C—H 单键的弯曲振动和伸缩振动<sup>[15]</sup>。此外,在 730 cm<sup>-1</sup>处出现—CH<sub>2</sub>的摇摆振动吸收峰<sup>[16]</sup>。在 EG 光谱中,两种不同规格的 EG 曲线相似。在 3 438 cm<sup>-1</sup>的吸收峰是由 H—O—H 单键的弯曲振动引起的。在 2 918 cm<sup>-1</sup>的吸收峰是由—CH<sub>2</sub>的反对称伸缩振动引起的<sup>[17]</sup>,在 1 632 cm<sup>-1</sup>的吸收峰与吸附水分后的弯曲振动有关<sup>[18]</sup>。SiO<sub>2</sub> 在 3 445 cm<sup>-1</sup>和 1 636 cm<sup>-1</sup>处的特征峰是由羟基的拉伸振动引起的<sup>[19]</sup>。此外,在 1 065 cm<sup>-1</sup>和 473 cm<sup>-1</sup>处观察到的

吸收峰,分别是 Si—O—Si 的不对称拉伸振动和弯曲振动。由 PW-SiO<sub>2</sub> 的 FT-IR 吸收谱图可以看出,PW-SiO<sub>2</sub> 与 PW 和 SiO<sub>2</sub> 具有相似的吸收峰,但是在 468 cm<sup>-1</sup>和 1 057 cm<sup>-1</sup>处的 Si—O—Si 吸收峰有所减弱,这是因为 SiO<sub>2</sub> 的含量较低。此外,PW、SiO<sub>2</sub>、EG-20 目、EG-18 μm 的吸收峰也都存在于 PW/SiO<sub>2</sub>/EG-20 目-18 μm 的曲线上,未观察到新的特征峰。该结果表明材料之间的作用力为物理吸附,没有发生化学反应,也没有产生新物质。

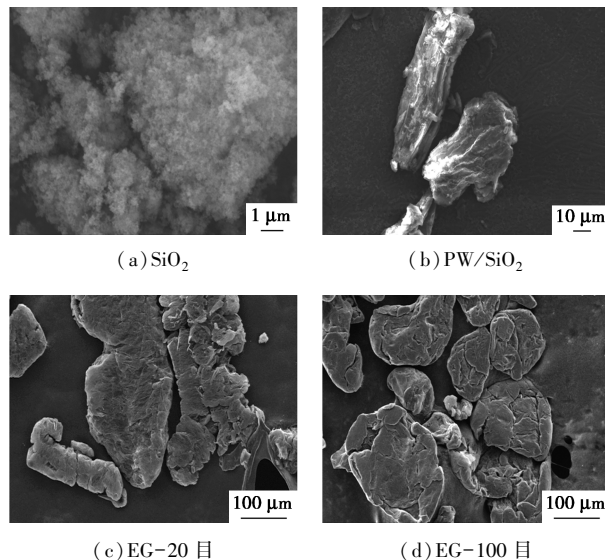


1—PW;2—SiO<sub>2</sub>;3—EG-20 目;4—EG-18 μm;  
5—PW/SiO<sub>2</sub>;6—PW/SiO<sub>2</sub>/EG-20 目-18 μm

图 4 FT-IR 谱图

### 3.3 微观结构和形貌分析

图 5 描绘了 SiO<sub>2</sub>、PW/SiO<sub>2</sub>、EG、PW/SiO<sub>2</sub>/mEG 断裂面的微观结构和形貌特征。从图 5(a)可见, SiO<sub>2</sub> 微观结构为絮状球体;图 5(b)可知,含有质量分数 0.8% SiO<sub>2</sub> 的 PW/SiO<sub>2</sub> 体系中的 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒分布均匀;图 5(c)~5(e)中,EG 粒径依次减小,EG-20 目依然保持蠕虫状,EG-18 μm 即为粉碎状。从图 5(f)~5(h)可以看出,PW/SiO<sub>2</sub>/EG-20 目-18 μm 表面充实,质地紧密,复合效果好。这主要是因为 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒和 EG-18 μm 可与 PW 一同填补



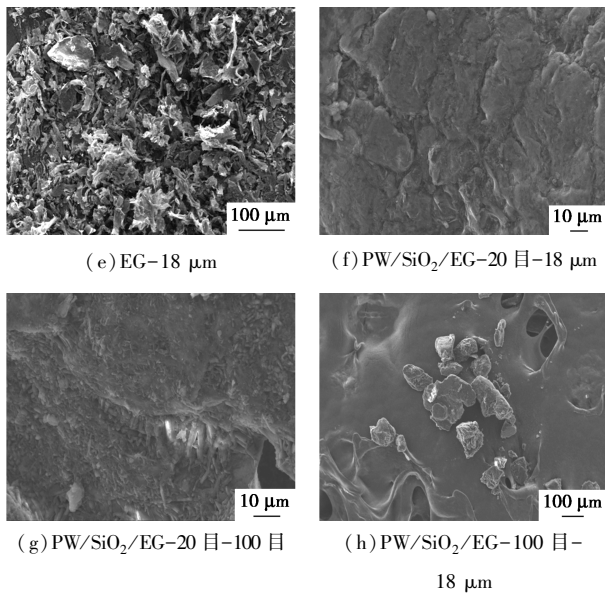


图 5 SEM 扫描图像

于 EG-20 目的空隙中,内部形成 SiO<sub>2</sub>、EG-18 μm、EG-20 目三重吸附,使内部吸附网络更加丰富,结构更加稳固。PW/SiO<sub>2</sub>/EG-20 目-100 目断裂面呈现颗粒状且结构松散,这种现象可能是由于 EG-20 目与 EG-100 目镶嵌效果差导致的,EG-20 目和 EG-100 目吸附 PW 后镶嵌不完全而进行堆叠,最终形成块状结合体。PW/SiO<sub>2</sub>/EG-100 目-18 μm 样品表面呈现出与 PW 相似的微观特性,这是由于 SiO<sub>2</sub> 和 EG-100 目-18 μm 组成的吸附网络难以完全吸附 PW,当 PW 完全填充 EG 蜂窝孔时,多余的 PW 会粘附在 EG 表面。

### 3.4 形态稳定性及泄露特性分析

对 PW/SiO<sub>2</sub>/mEG 复合物进行热处理,以检查形状稳定性和泄露性。选取两块相同配比的 PW/SiO<sub>2</sub>/mEG 为一组,在不同的温度下恒温加热 5 h,待自然冷却至室温,记录加热前后的质量变化和形态变化。由于 W3 在热处理后泄露严重,故不再做泄露分析。W1、W2 泄露结果如图 6 所示。由图 6 可知,W1 和 W2 的泄露率随着加热温度的升高呈现先平稳后上升的趋势。这主要是因为 PW 的熔化体积随温度的升高而增大,因此升高到一定的温度后,PW 的总体积会突破 mEG 和 SiO<sub>2</sub> 体系的吸附阈值,从而泄露开始增加。在同等温度下,W1 的泄露率始终低于 W2,这得益于 W1 体系中 EG-18 μm 和 EG-20 与 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的镶嵌结构,形成由内到外的三重吸附作用,保证 PW 结构紧密,不易泄露。W1 和 W2 在热处理后虽都有一定的泄露,但形态几乎没有变化,以 150℃ 加热前后的形态图作为参考,见

图 7。综上,mEG 的添加对 PW 的形貌稳定性和防泄露均有所提高,但因 mEG 的组成成分不同,表现出的效果有所差异。其中 W1 在保持形态稳定性的同时拥有优秀的防泄漏性,在 110℃ 以下泄露率 < 0.3%,对于低温领域的无泄漏储热研究具有重大意义。

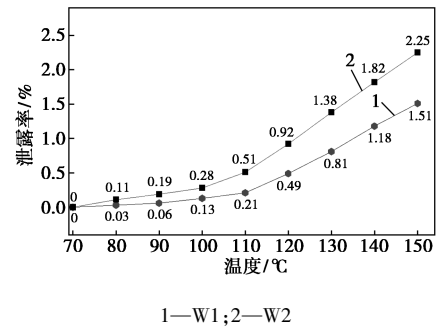
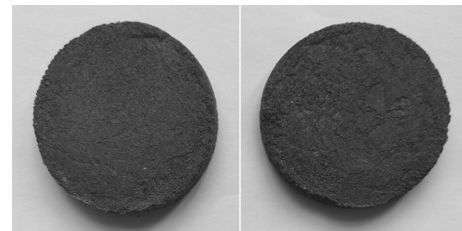
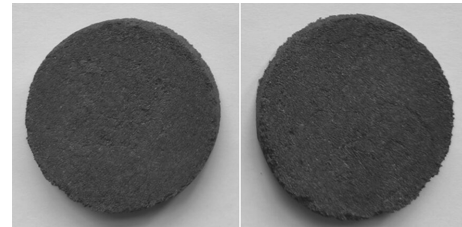


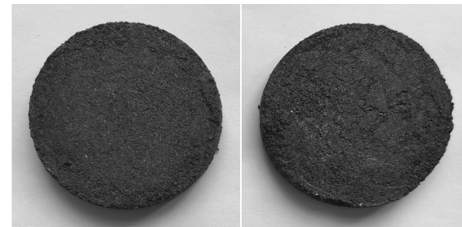
图 6 PW/SiO<sub>2</sub>/mEG 泄露率随加热温度变化曲线



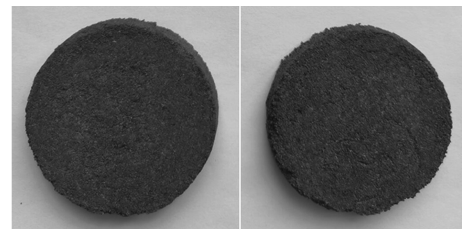
(a) W1 加热前



(b) W2 加热前



(c) W1 150℃ 加热后



(d) W2 150℃ 加热后

图 7 W1、W2 加热前后形态对比

### 3.5 导热性能分析

图 8 显示了复合相变材料的热导系数测试结果。由图可知,添加 0.8% 的  $\text{SiO}_2$  纳米颗粒后, W0 导热系数达到了  $0.295 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 相较纯 PW 提高约 2.5%。这表明  $\text{SiO}_2$  不仅在吸附和成型中起了作用,而且略微增强了 PW 的导热系数,而这种热导率的增强可归因于  $\text{SiO}_2$  的均匀分散为热传导提供了更好的路径。当添加 10% 的 EG-20 目- $18 \mu\text{m}$ 、EG-20 目-100 目和 EG-100 目- $18 \mu\text{m}$  后, W1、W2 和 W3 的导热系数相较于纯 PW 分别提升了 13.1、12.4 倍和 2.9 倍。这表明 mEG 可大幅度提升 PCM 的导热系数,但受到尺寸搭配的影响较大, mEG 中 EG-max 粒径的增大和 EG-min 粒径的减小均有利于导热性能的提升。其中, EG-20 目与 EG- $18 \mu\text{m}$  的搭配使用增强导热性能最佳。因此,在工程实践中,需要综合考虑应用要求和实际材料性能,合理选择 mEG 的尺寸搭配。

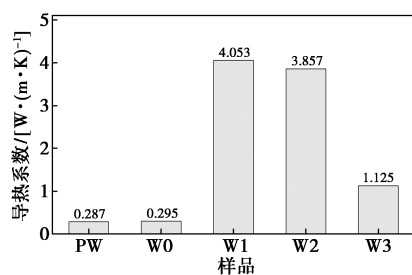
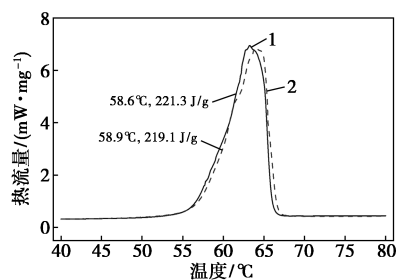


图 8 导热系数测试结果

### 3.6 循环稳定性分析

由于 W1 在以上测试中均表现良好,因此本节选用 W1 测试其循环稳定性,结果见图 9。由图 9 可知, W1 在经历了 300 次储热循环后的 DSC 曲线与循环前并无明显变化。循环后的熔化温度升高了  $0.3^\circ\text{C}$ , 潜热降低了  $2.20 \text{ J/g}$ , 两者均变化较小。由此可见, W1 在实际储热/释放循环应用中相变温度和相变潜热可基本保持稳定,具有优异的化学和晶体结构稳定性,可在较长时间内稳定使用。



1—W1; 2—W1 经 300 次循环后

图 9 W1 热循环前后的 DSC 曲线

## 4 结论

(1) mEG 和  $\text{SiO}_2$  的协同吸附体系效果显著,使得 W1 在各种测试温度下都具有良好的形态稳定性,且在一定温度下具有良好的防漏性能。W1 在  $110^\circ\text{C}$  以下泄漏率  $< 0.3\%$ , 可作为低温储热的候选材料。

(2) mEG 的镶嵌协同结构具有优秀的导热增强作用。由 EG-20 目- $18 \mu\text{m}$  制备的 W1 的导热系数达到了  $4.053 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 较纯 PW 提高了约 13.1 倍。导热系数受 mEG 中 EG 粒径组合的调控, EG-max 粒径的增大和 EG-min 粒径的减小均有利于导热性能的提升。因此可根据实际需要,合理选择 mEG 的尺寸搭配。

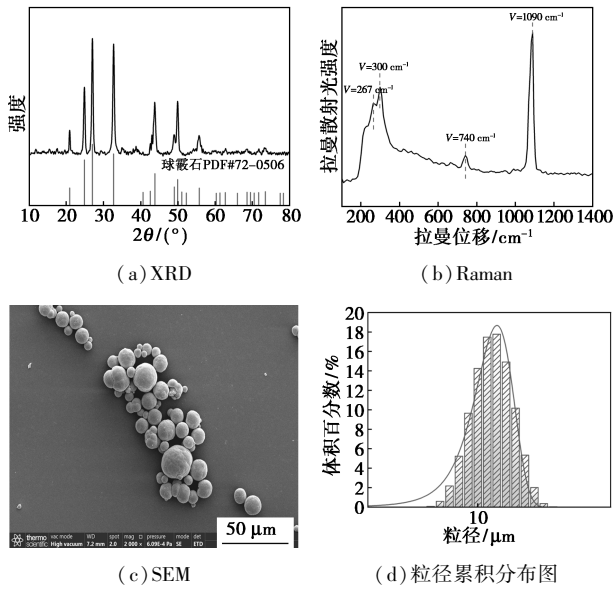
(3) W1 在 300 次熔融和凝固循环后相变温度变化了  $0.3^\circ\text{C}$ , 潜热降低了  $2.20 \text{ J/g}$ , 说明 PW/ $\text{SiO}_2$ /EG-20 目- $18 \mu\text{m}$  具有良好的循环稳定性。

本研究使用  $\text{SiO}_2$  和 mEG 吸附体系制备了一种新型防泄漏的低温高导热储热定型相变材料,并研究得出 mEG 的最佳粒径搭配,提供优秀导热性能的同时减少泄露。研究为后续 mEG 的使用提供理论数据支撑。但不足之处在于本研究的 mEG 只由两种不同尺寸的 EG 组成,未来还需进一步对更多 mEG 进行研究,以此来探究其潜在应用价值。

## 参考文献

- [1] Sun C, Wang C, Ha T, *et al.* A brief review of characterization techniques with different length scales for hydrogen storage materials [J]. *Nano Energy*, 2023, 113: 108554.
- [2] Perera A T D, Soga K, Xu Y, *et al.* Enhancing flexibility for climate change using seasonal energy storage (aquifer thermal energy storage) in distributed energy systems [J]. *Applied Energy*, 2023, 340: 120957.
- [3] 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.
- [4] Dashtizadeh Z, Abdeali G, Bahramian A R, *et al.* Enhancement of thermal energy absorption/storage performance of paraffin wax (PW) phase change material by means of chemically synthesized ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber network [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 103646.
- [5] Bose P, Amirtham V A. A review on thermal conductivity enhancement of paraffin wax as latent heat energy storage material [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 81-100.

(下转第 209 页)

图 5 产物 CaCO<sub>3</sub> 的物相表征

### 3 结论

(1) NH<sub>4</sub>Cl 浓度为 3 mol/L, 反应液固比 50:1, 反应温度 50℃, 反应时间 60 min, 最优相转移效率为 67.02%。

(2) 氨水添加量 10 mL, CO<sub>2</sub> 流速 100 mL/min, 反应温度 30℃, 反应时间 40 min, 最优矿化效率为 99.18%。

(3) 矿化反应温度升高、反应时间延长均会使

(上接第 204 页)

[6] Zhang J, Zhu T, Lan F, *et al.* Constructing a novel porous skeleton based on polycarbonate/expandable graphite for phase change materials with improved flame retardancy and shape stability [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 81: 110334.

[7] 周丽, 刘杨. 膨胀石墨基相变储能材料的制备及性能研究 [J]. *功能材料*, 2024, 55(3): 3206-3212.

[8] 胡明玉, 李东旭, 吴琼, 等. LA-SA 复合相变材料的制备与性能研究 [J]. *现代化工*, 2023, 43(9): 97-103.

[9] 陈红兵, 刘宇航, 王聪聪, 等. 添加膨胀石墨的二十二烷-十二醇复合定形相变材料的性能研究 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(2): 396-404.

[10] Choure B K, Alam T, Kumar R. A review on heat transfer enhancement techniques for PCM based thermal energy storage system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108161.

[11] 田云峰, 李珍, 王洋, 等. 石蜡/不同粒径膨胀石墨复合相变储热材料的制备和性能 [J]. *材料研究学报*, 2015, 29(4): 262-268.

[12] Yin S, Lu M, Liu C, *et al.* Fabrication and thermal properties of capric-stearic acid eutectic/nano-SiO<sub>2</sub> phase change material with expanded graphite and CuO for thermal energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 77: 110025.

[13] Jiang Z, Palacios A, Zou B, *et al.* A review on the fabrication methods for structurally stabilised composite phase change materials and their impacts on the properties of materials [J]. *Renewable and*

晶型向方解石转换; 氨水添加量、CO<sub>2</sub> 流速过大也会使已成型的球霰石向方解石转换。在最优条件下可以制备出单一的球霰石型 CaCO<sub>3</sub> 晶体, 产物纯度为 96.15%。

### 参考文献

- [1] Buure K, Kainiemi L, Levänen J. Uncovering opinions on the unfamiliar: Investigating the attitude atmosphere around CCUS through media discourses [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, (447): 141558.
- [2] 陈语, 姜大霖, 刘宇, 等. 煤电 CCUS 产业化发展路径与综合性政策支持体系 [J]. *中国人口资源与环境*, 2024, (1): 59-70.
- [3] 翟明洋, 周长波, 张永波, 等. 二氧化碳捕集利用与封存项目纳入碳市场的现状、挑战与对策 [J]. *中国环境管理*, 2023, (15): 87-93.
- [4] Sha F, Zhu N, Bai Y, *et al.* Controllable synthesis of various CaCO<sub>3</sub> morphologies based on a CCUS idea [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016, (4): 3032-3044.
- [5] Li C, Liu X, Li Y, *et al.* The interactions between olivine dissolution and phytoplankton in seawater: Potential implications for ocean alkalization [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, (912): 168571.
- [6] Msila X, Billing D G, Barnard W. Capture and storage of CO<sub>2</sub> into waste phosphogypsum: The modified Merseburg process [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2016, (18): 2709-2715.
- [7] Kang C U, Ji S W, Jo H. Recycling of industrial waste gypsum using mineral carbonation [J]. *Sustainability*, 2022, (14): 13.
- [8] 兰培强. 磷石膏反应结晶制备纳米 CaCO<sub>3</sub> 及其用作 CO<sub>2</sub> 捕集 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [9] Ding W, Sun H, Peng T. Modified phosphogypsum sequestering CO<sub>2</sub> and characteristics of the carbonation product [J]. *Energy*, 2019, (182): 224-235. ■
- [10] Sustainable Energy Reviews, 2022, 159: 112134.
- [14] Abdeali G, Farhang Z, Bahramian A R. Enhancing paraffin wax crystallization and investigating thermo-physical properties of ethylene-propylene-diene monomer/paraffin wax/silica phase change system: The influence of silica nanoparticles [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 76: 109795.
- [15] Kalidasan B, Pandey A K, Saidur R, *et al.* Energizing organic phase change materials using silver nanoparticles for thermal energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 58: 106361.
- [16] 陈丽梅, 赵梦菲, 陈琳, 等. 石蜡/碱性硅藻土/膨胀石墨复合相变储热材料的制备及性能 [J]. *无机化学学报*, 2024, 40(3): 533-543.
- [17] Fei H, Du W, Gu Q, *et al.* The phase change characteristics of Capric acid-based binary low eutectic mixtures adsorbed in expanded graphite [J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(11): 14893-14901.
- [18] Fei H, He Q, Du W, *et al.* Structural characteristics and thermal performances of capric acid-stearic acid-octadecanol adsorbed into porous expanded graphite under vacuum condition [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108326.
- [19] Younes Y A, Kospa D A, Salama R S, *et al.* Hydrophilic candle wastes microcapsules as a thermal energy storage material for all-day steam and electricity cogeneration [J]. *Desalination*, 2023, 550: 116377. ■