

# 石蜡/环氧树脂复合相变材料性能改进及耐蚀特性分析

沈思扬<sup>1</sup>, 吴志根<sup>2</sup>, 陆威<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学能动学院, 上海

<sup>2</sup>同济大学环境学院, 上海

收稿日期: 2025年4月30日; 录用日期: 2025年8月13日; 发布日期: 2025年8月22日

## 摘要

本研究通过对比石蜡/环氧树脂复合材料(Epoxy Resin-Phase Change Material, EP-PCM)与二氧化硅定形相变材料(Shape-Stabilized Phase Change Material, SSPCM)的性能差异, 证实了环氧树脂封装策略在热稳定性与化学耐受性方面的显著提升作用。EP-PCM的平均粒径为57.0  $\mu\text{m}$ , 显著高于SSPCM的0.468  $\mu\text{m}$ , 比表面积降低至124.32  $\text{cm}^2/\text{g}$ , 但其导热系数提升至0.34  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 较SSPCM的0.15  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增长126%。热稳定性测试表明, EP-PCM经30次热循环后质量损失率仅为2.23%, 远低于SSPCM的9.4%, 初始分解温度由194 $^{\circ}\text{C}$ 提升至220 $^{\circ}\text{C}$ 。化学耐受性分析显示, EP-PCM在酸、碱环境中的累计质量损失率分别为12.7%和5.4%, 表现出良好的耐化学稳定性。然而, 在醇类介质中, 由于石蜡溶解, 潜热值出现了明显下降, 降幅达25%, 研究表明, 环氧树脂通过物理包覆和化学交联的协同作用, 可以有效抑制了相变材料的泄漏, 尤其在酸碱环境下表现较为稳定。但在醇类溶剂环境下的性能退化问题仍需进一步优化。

## 关键词

相变储能, 环氧树脂封装, 耐受性检测

# Performance Improvement and Corrosion Resistance Analysis of Paraffin/Epoxy Resin Composite Phase Change Materials

Siyang Shen<sup>1</sup>, Zhigen Wu<sup>2</sup>, Wei Lu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>School of Environment, Tongji University, Shanghai

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 13<sup>th</sup>, 2025; published: Aug. 22<sup>nd</sup>, 2025

## Abstract

This study systematically compared the performance differences between paraffin/epoxy resin composites (Epoxy Resin-Phase Change Material, EP-PCM) and shape-stabilized phase change materials (SSPCM), confirming the significant enhancement of thermal stability and chemical resistance achieved through the epoxy resin encapsulation strategy. The EP-PCM demonstrated an average particle size of 57.0  $\mu\text{m}$ , substantially larger than SSPCM's 0.468  $\mu\text{m}$ , with its specific surface area reduced to 124.32  $\text{cm}^2/\text{g}$ . However, its thermal conductivity increased to 0.34  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , representing a 126% improvement over SSPCM's 0.15  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Thermal stability tests revealed that EP-PCM exhibited a mass loss rate of only 2.23% after 30 thermal cycles, significantly lower than SSPCM's 9.4%. The initial decomposition temperature of EP-PCM was elevated from 194°C to 220°C, indicating enhanced thermal resistance. Chemical tolerance analysis demonstrated that EP-PCM achieved cumulative mass loss rates of 12.7% in acidic environments and 5.4% in alkaline environments, reflecting its robust chemical stability under these conditions. However, in alcohol media, due to the dissolution of paraffin, the latent heat value showed a significant decrease of 25%. Studies have shown that epoxy resin can effectively suppress the leakage of phase change materials through the synergistic effect of physical coating and chemical cross-linking, especially in acidic and alkaline environments where it is relatively stable. However, further optimization is needed to address the issue of performance degradation in alcohol solvent environments.

## Keywords

Phase Change Energy Storage, Epoxy Resin Encapsulation, Tolerance Testing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

相变材料在储能与热管理领域潜力显著,但仍面临泄漏、循环稳定性差及腐蚀性等瓶颈问题[1]-[3]。有机相变材料易因高温挥发泄漏,无机相变材料则存在相分离和过冷现象,且长期热循环后性能显著衰减。此外,部分材料在酸碱环境中易发生化学腐蚀,导致储热密度下降与设备寿命缩短[4]-[6]。酸性介质加速材料分解,碱性环境诱发界面失效,而腐蚀产物易引发安全隐患与维护成本增加。为此,需通过微胶囊封装、多孔载体复合及功能改性提升材料稳定性[7]-[9]。

目前,多种结构的环氧树脂封装相变材料(Phase Change Material, PCM)已被开发用于储热与热管理领域,主要包括微胶囊封装、多孔载体吸附封装和三维网络结构封装等[10]。其中,微胶囊法通过界面聚合将PCM包裹于环氧树脂壳中,可有效防止泄漏,但需优化树脂类型以提升热稳定性。多孔载体吸附封装采用膨胀珍珠岩或陶粒负载PCM后以环氧树脂二次固定[11],例如蛭石吸附共晶水合盐后经环氧树脂/粉煤灰复合封装,经多次循环后,潜热损失率仍维持较低水平,体现了环氧树脂的相变材料的封装作用[12]。此外,通过添加导热填料[13]、界面改性[14]及力学改性[15]等手段可进一步优化材料性能。目前,相变材料在封装技术上仍面临显著挑战,特别是在需要小粒径材料的应用领域。虽然环氧树脂在相变材料封装领域已发展成为新型技术路线,但通过常规方法制备的封装产物通常只能形成板状或块状结构,这种单一的形态严重限制了该材料在需要小颗粒相变材料的应用场景中的使用。

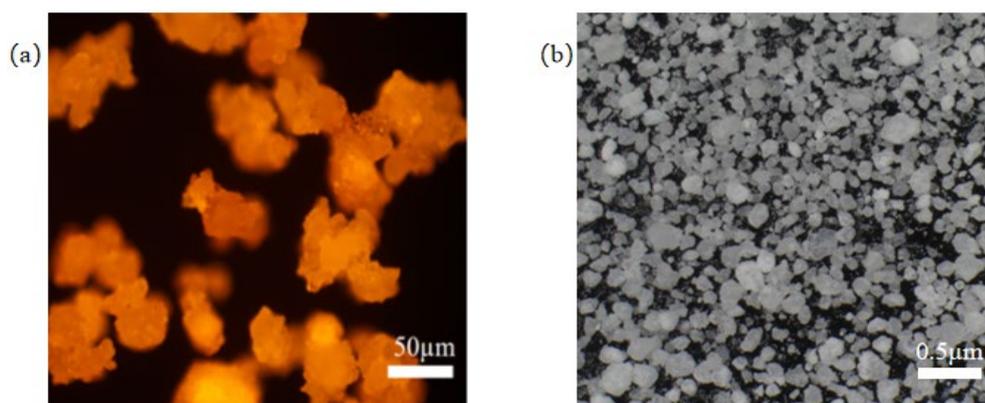
本研究通过系统实验方法,对比分析了石蜡/环氧树脂复合材料(Epoxy Resin-Phase Change Material, EP-PCM)与石蜡/二氧化硅复合相变材料(Shape-Stabilized Phase Change Material, SSPCM)的性能特征。采用热重分析、差示扫描量热法等测试手段,考察了两种材料的热稳定性差异。同时,通过模拟酸碱及有机溶剂环境,开展了多周期浸泡实验,系统评估了 EP-PCM 在不同化学介质中的耐受性能。

## 2. SSPCM 与 EP-PCM 的性能对比

在本人前期研究中[16],采用真空浸渍结合溶剂诱导相分离法制备 EP-PCM。首先将熔融石蜡通过真空浸渍法渗入二氧化硅(Mesoporous Silica, SiO<sub>2</sub>)多孔骨架内部,形成 SSPCM 中间体。随后将 SSPCM 分散于环氧树脂/甲醇溶液中,通过去离子水诱导相分离使环氧树脂在 SSPCM 颗粒表面选择性析出。最后经固化及抽滤干燥,获得 EP-PCM。

为系统评估环氧树脂封装对相变材料性能的改善作用,本研究选取 EP-PCM 和 SSPCM 进行对比分析。重点考察两种材料在热传导性能、热稳定性及循环耐久性等关键参数的差异,以验证环氧树脂封装在增强稳定性方面的优势。

### 2.1. 形貌特征对比



**Figure 1.** Characterization by optical microscope. (a) EP-PCM characterization [16]; (b) SSPCM characterization  
**图 1.** 光学显微镜表征。(a) EP-PCM 表征[16]; (b) SSPCM 表征

本研究通过光学显微镜对比分析了 SSPCM 和 EP-PCM 的微观形貌特征,具体情况如图 1 所示。其中 SSPCM 表现为表面光滑、边缘清晰的银白色颗粒,这得益于二氧化硅骨架的纳米限域效应,使熔融石蜡均匀填充孔隙,形成规则分散相。EP-PCM 则表现为淡黄色不规则颗粒,表面形成连续的淡黄色环氧树脂包覆层,具有光滑致密的特征和明显的界面过渡区。两种材料的结构差异显著,SSPCM 依靠二氧化硅的物理限域作用维持形貌稳定性,而 EP-PCM 通过化学包覆实现双重保护。这种环氧树脂包覆结构不仅提供机械支撑,其表面致密封装层更能有效防止相变材料泄漏。

### 2.2. 粒径分布

本研究通过粒径分析对比了 SSPCM 和 EP-PCM 两种相变材料的物理特性。从表 1 中可以发现,SSPCM 具有 0.468  $\mu\text{m}$  的较小平均粒径和 379.44  $\text{cm}^2/\text{g}$  的较大比表面积,这种特性有利于提高热传导和相变效率。从表 2 中可以发现,EP-PCM 由于环氧树脂包覆作用,平均粒径增大至 57.0  $\mu\text{m}$ ,比表面积降低至 124.32  $\text{cm}^2/\text{g}$ 。这种差异主要源于环氧树脂在复合过程中引起的颗粒团聚现象。虽然 EP-PCM 比表面积减小,但其较大的颗粒尺寸和环氧树脂交联网络提升了材料的机械强度和热稳定性,使其更适合需要

长期稳定性的应用场景。

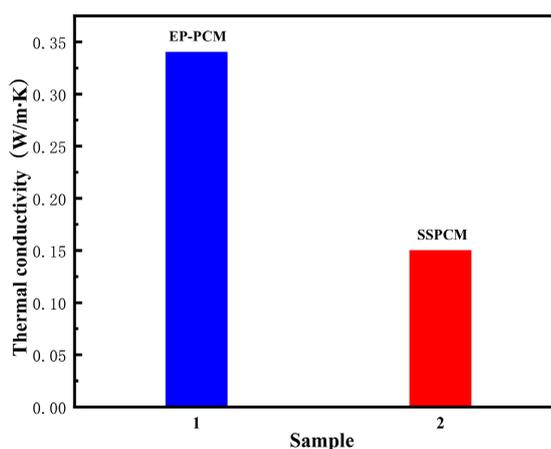
**Table 1.** SSPCM particle size distribution  
**表 1.** SSPCM 粒径分布情况

| 编号      | 粉重(g)  | 比表面积( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) | 平均粒径( $\mu\text{m}$ ) |
|---------|--------|--------------------------------|-----------------------|
| SSPCM-1 | 3.4001 | 380.18                         | 0.464                 |
| SSPCM-2 | 3.4004 | 379.23                         | 0.469                 |
| SSPCM-3 | 3.4030 | 378.92                         | 0.471                 |
| 平均值     | 3.4012 | 379.44                         | 0.468                 |

**Table 2.** Particle Size Distribution of EP-PCM  
**表 2.** EP-PCM 粒径分布情况

| 编号       | 粉重(g)  | 比表面积( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) | 平均粒径( $\mu\text{m}$ ) |
|----------|--------|--------------------------------|-----------------------|
| EP-PCM-1 | 0.8501 | 125.31                         | 56.3                  |
| EP-PCM-2 | 0.8502 | 123.55                         | 57.6                  |
| EP-PCM-3 | 0.8504 | 124.11                         | 57.1                  |
| 平均值      | 0.8502 | 124.32                         | 57.0                  |

### 2.3. 导热系数对比



**Figure 2.** Comparison of thermal conductivity between EP-PCM and SSPCM  
**图 2.** EP-PCM 与 SSPCM 导热系数对比图

本研究对比分析了 SSPCM 和 EP-PCM 的导热性能差异。测试结果如图 2 所示。其中，SSPCM 的导热系数为  $0.15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，相较于纯石蜡有所下降，这主要受限于  $\text{SiO}_2$  较低的导热性能。而 EP-PCM 的导热系数提升至  $0.34 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，这得益于环氧树脂的加入：一方面，环氧树脂优异的界面结合能力改善了复合材料内部的热传导路径；另一方面，其分子结构有效填充了石蜡颗粒间的空隙，减少了气泡等热阻因素，形成了更连续的热传导通道。这一结果表明，环氧树脂的包覆不仅增强了材料的机械性能，还通过优化微观结构提升了热传导效率。

### 2.4. 循环稳定性对比

本研究通过 30 次热循环测试对比了 EP-PCM 和 SSPCM 的热稳定性。实验结果如图 3 所示。该结果表明，SSPCM 由于缺乏封装保护，在循环过程中石蜡分子易脱离二氧化硅骨架，导致 9.4 wt% 的质量损

失。而 EP-PCM 得益于环氧树脂形成的致密封装结构, 仅出现 2.23 wt% 的质量损失, 展现出显著优越的热循环稳定性。这种差异主要源于环氧树脂的双重保护机制: 一方面通过化学交联增强界面结合力, 另一方面通过物理包覆有效阻隔石蜡的迁移扩散。

测试过程中采用 0.01 mg 精度天平进行三次重复称量, 确保了数据的可靠性。研究结果证实, 环氧树脂包覆不仅能显著提升相变材料的机械性能, 更能有效改善其在多次相变循环中的稳定性, 为相变材料的实际应用提供了重要保障。

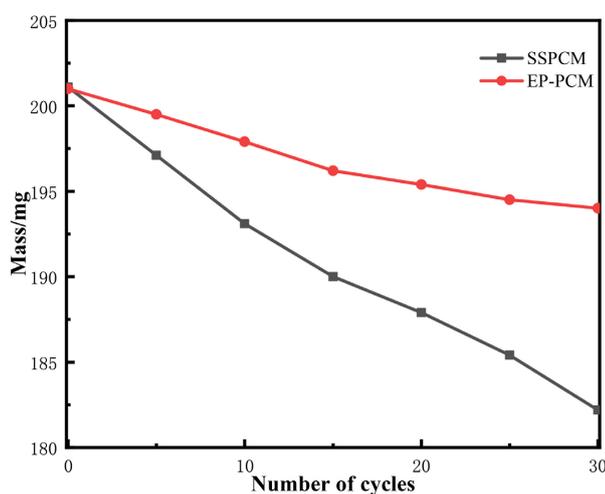


Figure 3. Mass change curves of EP-PCM and SSPCM after 30 cycles

图 3. 循环 30 次后 EP-PCM 与 SSPCM 的质量变化曲线图

## 2.5. 高温稳定性对比

本研究通过热重分析对比了 EP-PCM 和 SSPCM 的热稳定性差异。具体 TGA 曲线如图 4 所示。该数据表明 EP-PCM 表现出两阶段分解过程: 第一阶段在 275.79°C 为石蜡挥发, 质量损失 20%; 第二阶段在 410.43°C 为环氧树脂分解, 总质量损失 70%, 最终残留 9% 的 SiO<sub>2</sub> [16]。相比之下, SSPCM 在 286.97°C 呈现单阶段快速分解, 其分解速率明显快于 EP-PCM, 且在相同温度区间内总质量损失达 80%, 最终仅残留 5% 的 SiO<sub>2</sub>, 显示出较差的耐热性能。

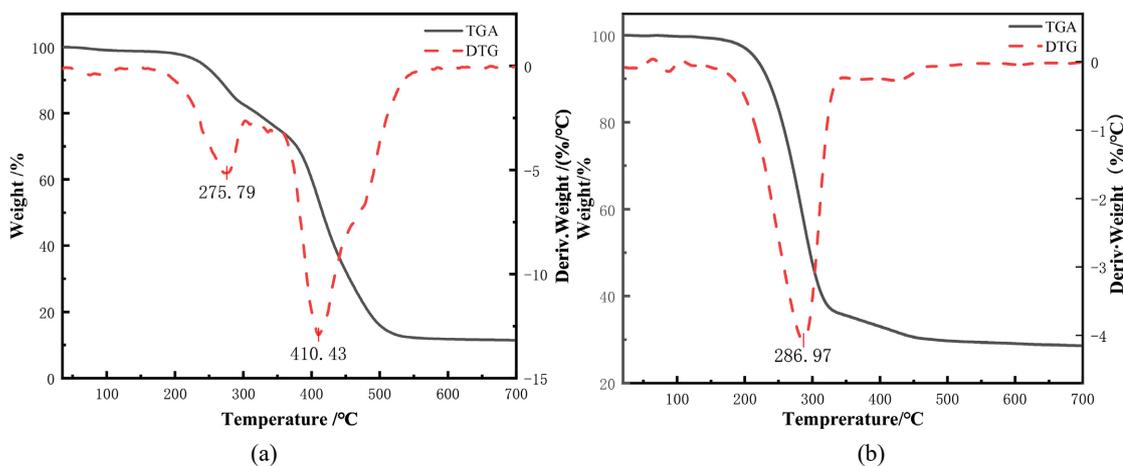


Figure 4. Thermogravimetric analysis curve. (a) EP-PCM [16]; (b) SSPCM

图 4. 热重分析曲线。(a) EP-PCM [16]; (b) SSPCM

对比图 4(a)和图 4(b)可以发现,环氧树脂包覆使石蜡的初始挥发温度从 194℃提升至 220℃,显著改善了材料的热稳定性。这种提升主要得益于环氧树脂形成的三维网络结构:一方面通过物理包覆阻隔石蜡挥发,另一方面通过化学交联增强分子间作用力。研究证实,EP-PCM 的双重保护机制使其在高温环境下具有更优异的性能保持能力,为相变材料在高温应用场景中的可靠性提供了重要保障。

### 3. 介质中耐受性分析

封装后的 EP-PCM 凭借其优异的稳定性,在相变流体领域展现出一定的应用价值。然而在实际应用中,材料可能面临多种化学环境的严峻考验,这些环境因素会直接影响其长期工作性能和使用寿命。

为系统评估 EP-PCM 在实际工况下的可靠性,本研究开展了化学耐受性测试。通过模拟典型酸碱及有机溶剂环境,重点考察材料在腐蚀性介质中的性能变化情况。测试结果将为 EP-PCM 在相变流体系统中的工程应用提供关键数据支持,同时为材料配方的进一步优化指明方向。

#### 3.1. 实验流程

针对低密度 EP-PCM 表面疏水涂层导致的浸润失效问题,本研究提出添加十二烷基苯磺酸钠(sodium dodecyl benzene sulfonate, SDBS)的浸润优化策略。通过向混合溶液中添加 5 wt%的 SDBS,利用其两亲分子结构破坏疏水涂层的低表面能特性,促使酸液与 EP-PCM 表面充分接触。本研究采用系统化的实验流程开展化学耐受性评估,具体包括四个关键步骤:(1) 基于化学计量学原理进行比例计算,通过质量守恒定律精确确定混合溶液中各组分的质量比和浓度,同时考虑溶质守恒和体积变化的影响因素。最终使用 10wt%的硫酸溶液,10 wt%的氢氧化钠溶液和 95%乙醇作为测试溶液;(2) 在恒温条件下进行溶液配制,首先准确量取去离子水作为溶剂基质,然后定量加入表面活性剂,采用匀速磁力搅拌使溶质沿容器内壁缓慢加入,确保反应体系均匀混合并避免局部过热,所有操作均需穿戴标准防护装备,废液经中和处理后规范排放;(3) 采用浸泡法进行样品处理,将试样完全浸没于测试溶液中并置于避光环境中,设置 3/6/9/12/15 天多个取样时间点,每次取样后依次进行 pH 调节、乙醇超声清洗和真空干燥的处理流程,确保试样表面清洁;(4) 对处理后的样品开展多维度性能测试,包括质量变化分析、热性能测试和结构完整性评估等综合表征。

#### 3.2. 酸碱醇耐受性分析

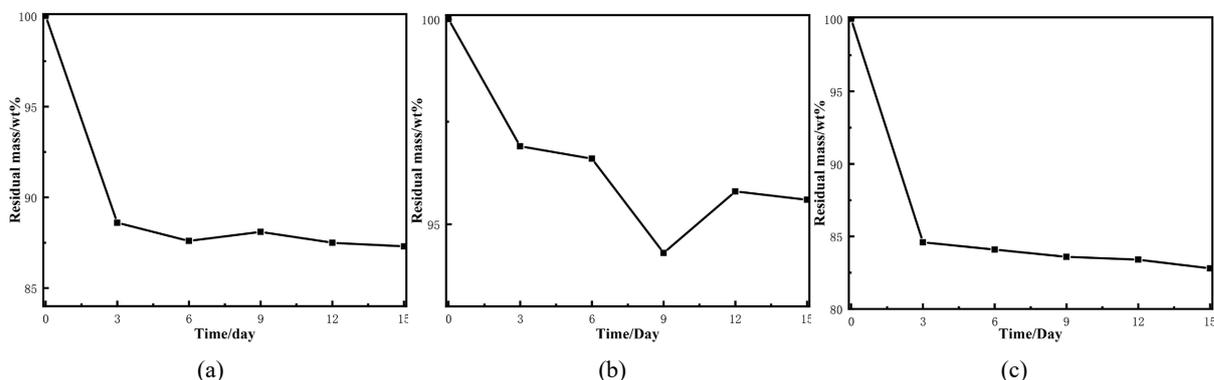
本研究对 EP-PCM 材料在三种典型化学介质中的质量变化行为进行了系统测试与对比分析,具体情况如图 5 所示。实验数据表明,在 15 天的浸泡周期内,不同化学介质导致的质量损失呈现明显梯度差异。其中,乙醇环境导致的累计质量损失最高,达到 17.2%,硫酸环境次之,为 12.7%,氢氧化钠环境下质量损失最低,为 5.4%。

通过耐受性实验测试,所有介质环境均呈现出典型的双阶段质量损失模式,即初期快速下降阶段与后期渐趋稳定阶段。不同介质的侵蚀动力学参数存在一定区别。在初始侵蚀阶段即前 3 天,乙醇介质表现出较明显的侵蚀作用,其日均质量损失速率为 5%,累计质量损失达到 15%。硫酸环境次之,日均损失率为 3.8%,累计损失为 11.4%。氢氧化钠环境最为温和,日均损失率为 1.03%,累计损失为 3.1%。

进入稳定阶段即第 4 天至第 15 天,三种介质的侵蚀速率均有所降低。其中乙醇环境的日均损失率降至 0.025%,硫酸和氢氧化钠环境均降至约 0.11%。观察发现,乙醇环境下后期质量仍保持缓慢下降趋势,而酸碱环境下的质量则趋于相对稳定状态。

分析表明,这种差异化的质量变化规律与各介质的物理化学特性存在关联。乙醇作为有机溶剂,凭借其小分子特性能够渗透材料微孔结构,溶解石蜡组分,从而引起质量损失。硫酸中的氢离子通过质子化作用影响环氧树脂的交联网络,但由于受离子扩散速率限制,其侵蚀作用相对缓慢。氢氧化钠主要通

过表面羟基化反应产生作用,对材料本体的影响程度较小。后期质量变化趋缓现象表明,材料在不同介质环境中会形成具有差异性的表面钝化层,其中在酸碱环境中形成的保护层表现出更好的防护效果。这些研究发现为理解 EP-PCM 材料的化学稳定性机制提供了理论依据。

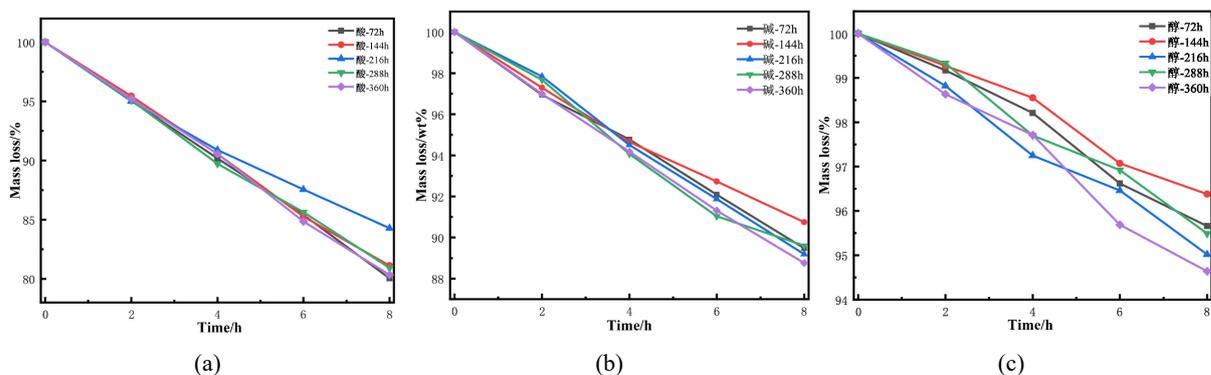


**Figure 5.** The effect of acid soaking time on the quality of EP-PCM. (a) Acid soaking quality change chart; (b) Alkali soaking quality change chart; (c) Alcohol soaking quality change chart

**图 5.** 酸浸泡时间对 EP-PCM 质量的影响。(a) 酸浸泡质量变化图; (b) 碱浸泡质量变化图; (c) 醇浸泡质量变化图

### (1) 泄漏量分析

本研究对 EP-PCM 材料在不同化学介质处理后的高温质量变化进行了系统测试,具体情况如图 6 所示。酸处理样品表现出最显著的质量损失,最大质量损失率达到 19.99 wt%,各时间点质量变化率分别为 19.96 wt%、18.89 wt%、15.73 wt%、19.08 wt%和 19.67 wt%,变化幅度从 15.73 wt%到 19.96 wt%。碱处理样品显示中等程度的质量损失,最大质量损失率为 11.24 wt%,各时间点质量变化率为 10.52 wt%、9.25 wt%、10.81 wt%、10.39 wt%和 11.24 wt%,变化幅度介于 9.25 wt%至 11.24 wt%之间。醇处理样品最大质量损失率为 5.36 wt%,各时间点质量变化率分别为 4.34 wt%、3.62 wt%、4.98 wt%、4.51 wt%和 5.36 wt%,变化幅度维持在 3.62 wt%至 5.36 wt%范围内。实验数据表明,三种化学处理条件下 EP-PCM 材料的质量损失呈现明显的梯度差异:酸处理样品 > 碱处理样品 > 醇处理样品。同时,质量变化的波动性分析显示,酸处理样品表现出最大的波动范围( $\Delta = 4.23$  wt%),碱处理样品次之( $\Delta = 1.99$  wt%),而醇处理样品展现出最优的稳定性( $\Delta = 1.74$  wt%)。这种差异化的质量变化特征表明,不同化学处理条件对 EP-PCM 材料的高温稳定性具有显著影响。



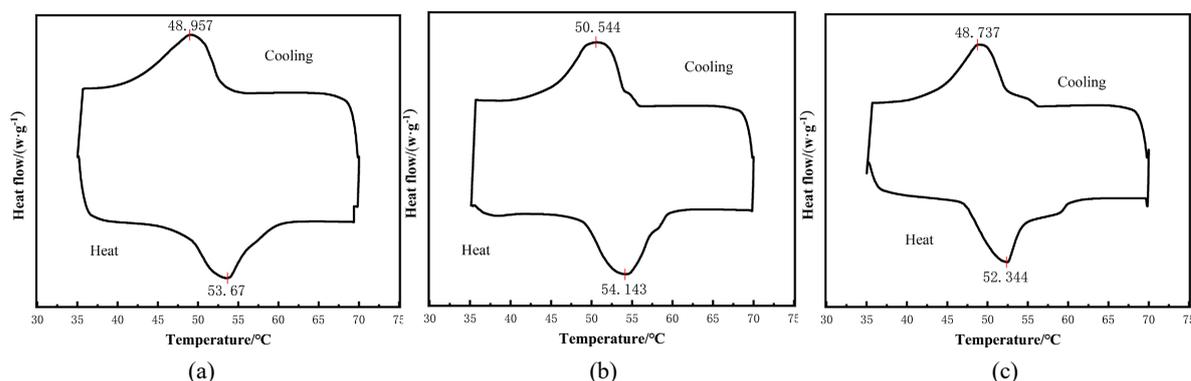
**Figure 6.** Changes in thermal mass loss after EP-PCM acid soaking. (a) Heat loss change chart after acid soaking; (b) Heat loss change chart after alkali soaking; (c) Heat loss change chart after alcohol soaking

**图 6.** EP-PCM 酸浸泡后热质量损失变化情况。(a) 酸浸泡后热损失变化图; (b) 碱浸泡后热损失变化图; (c) 醇浸泡后热损失变化图

本研究揭示了 EP-PCM 在不同化学处理后高温泄漏行为的独特规律。从泄漏机理分析, 酸处理样品的高泄漏量主要源于硫酸对表面环氧树脂的选择性侵蚀, 导致部分包覆层出现破损, 形成泄漏通道使石蜡析出[17]。相比之下, 碱处理样品因氢氧化钠在表面生成致密的氧化保护层, 有效阻隔了内部石蜡的渗出。而醇处理样品表现出最低的泄漏量, 这是由于乙醇已在前处理阶段溶解了部分不稳定的石蜡组分, 剩余的石蜡具有更高的结晶度和热稳定性。泄露特性的差异性证实, 不同的化学处理条件对材料热稳定性具有不同的作用机制。

### (2) 前后潜热变化分析

本研究通过差示扫描量热法系统分析了不同处理条件下 EP-PCM 的热性能特征, 具体情况如图 7 所示。该数据显示, 未处理样品的相变潜热为 46.16 J/g, 而酸、碱、醇处理后的样品分别降至 42.92 J/g、43.61 J/g 和 34.62 J/g, 其中醇处理样品的下降幅度最为显著。该现象揭示了不同化学介质对 EP-PCM 的作用机理存在本质差异。



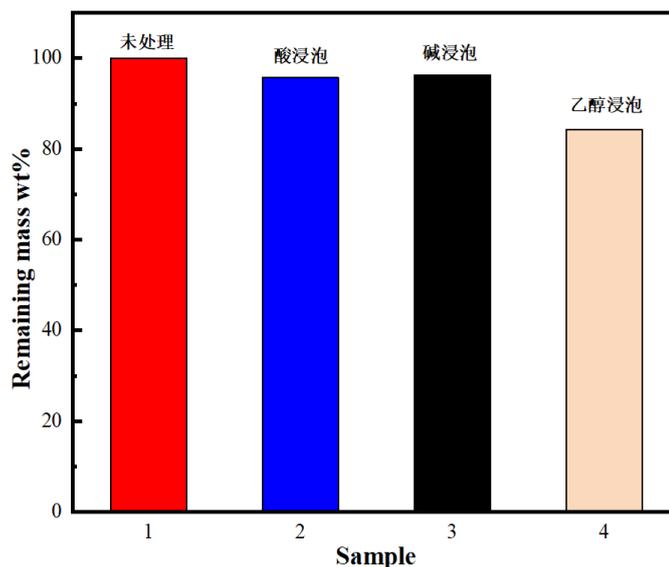
**Figure 7.** DSC curve of EP-PCM after 15 days of acid soaking. (a) DSC curve after acid soaking; (b) DSC curve after alkali soaking; (c) DSC curve after alcohol soaking

**图 7.** 酸浸泡 15 天后 EP-PCM 的 DSC 曲线。(a) 酸浸泡后 DSC 曲线图; (b) 碱浸泡后 DSC 曲线图; (c) 醇浸泡后 DSC 曲线图

深入分析表明, 通过结合材料的质量变化分析, 发现酸性环境侵蚀主要的损失部分来源于外壳结构, 而非内核部分。这一结果表明, 壳体在相变过程中可能经历了较为显著的热解或物理结构的破坏, 从而影响了整体的热性能表现。碱处理对整体结构的影响较小, 损失的质量可能源于混合溶液中未完全包裹的组分含有少量未固化材料, 导致相变过程中质量减少。这种结构缺陷可能与制备过程中溶剂挥发不充分或固化反应不完全有关, 进而影响材料的整体热性能表现。而醇处理虽然整体质量损失小, 但乙醇分子能选择性溶解石蜡组分, 直接破坏相变材料的晶体结构。与质量变化情况相对照, 发现该现象的主要原因在于石蜡被乙醇溶解。乙醇分子因极性较强, 能与石蜡分子形成氢键等弱相互作用, 渗透进 EP-PCM 内部后, 破坏其晶体结构, 导致石蜡分子间作用力减弱、排列紊乱。随着浸泡时间和乙醇浓度增加, 石蜡逐渐溶解, EP-PCM 质量变化, 进而使其热性能显著下降。这表明, EP-PCM 在醇类介质中的耐受性明显不及酸碱环境。这种差异化的作用机理解释了为何质量损失与热性能衰减并非简单的线性关系。特别是醇处理样品, 其较小的质量损失掩盖了相变材料内部结构的严重破坏。

(3) 图 8 显示了 SSPCM 在酸碱盐溶液中浸泡三天后的质量变化情况。实验结果表明, 酸性和碱性溶液浸泡后的质量变化较小, 分别为 4.3% 和 3.7%, 这主要归因于溶液作用导致材料团聚现象。相比之下, 乙醇浸泡后的质量损失达到 15.7%, 表明材料对醇类耐受性较差。通过与 EP-PCM 的数据对比分析发现: EP-PCM 在酸性环境中的破坏机制主要是表面涂层受损, 而碱性环境则主要引起溶胀和团聚作用, 但环氧树脂涂层的加入在一定程度上抑制了团聚效应。SSPCM 和 EP-PCM 对醇类溶剂均表现出较差的稳

定性, 这一结果提示后续研究需要加强材料的封装保护措施。



**Figure 8.** Mass change chart of SSPCM after soaking in different solutions for 3 days  
**图 8.** 不同溶液中浸泡 3 天后 SSPCM 的质量变化图

#### 4. 总结

本研究系统对比了环氧树脂封装相变材料 EP-PCM 与二氧化硅定形相变材料 SSPCM 的结构与性能差异。光学显微镜观察显示, SSPCM 呈现表面光滑的银白色颗粒, 而 EP-PCM 则表现为淡黄色不规则颗粒形态, 具有明显的环氧树脂包覆层。粒径分析表明, EP-PCM 的平均粒径  $57.0\ \mu\text{m}$  显著大于 SSPCM 的  $0.468\ \mu\text{m}$ , 这主要归因于环氧树脂引起的颗粒团聚效应。在热性能方面, EP-PCM 展现出更优异的导热系数  $0.34\ \text{W/mK}$  和循环稳定性, 30 次循环后仅 2.23% 质量损失, 明显优于 SSPCM 的  $0.15\ \text{W/mK}$  导热系数和 9.4% 的质量损失。为进一步评估 EP-PCM 的实际应用性能, 本研究考察了其在酸碱环境中的耐受性。实验结果显示, 在 15 天的浸泡周期内, EP-PCM 在硫酸、氢氧化钠和乙醇环境中的累计质量损失分别为 12.7%、5.4% 和 17.2%。值得注意的是, 虽然醇处理导致的质量损失最大, 但酸处理对材料热性能的影响更为显著, 使相变潜热从  $46.16\ \text{J/g}$  降至  $42.92\ \text{J/g}$ 。这些发现为理解 EP-PCM 在不同化学环境中的失效机制提供了重要依据, 也为相变材料的封装设计提供了依据。

#### 基金项目

国家自然科学基金青年项目(51406121)。

#### 参考文献

- [1] Zhang, K., Hu, C., Huang, H., Li, B., Huang, C. and Wang, S. (2024) Achieving Efficient Energy Utilization by PCM in the Food Supply Chain: Encapsulation Technologies, Current Applications, and Future Prospects. *Journal of Energy Storage*, **79**, Article ID: 110214. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110214>
- [2] Islam, A., Pandey, A.K., Saidur, R., Aljafari, B. and Tyagi, V.V. (2023) Advancements in Foam-Based Phase Change Materials: Unveiling Leakage Control, Enhanced Thermal Conductivity, and Promising Applications. *Journal of Energy Storage*, **74**, Article ID: 109380. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109380>
- [3] Liu, K., Yuan, Z.F., Zhao, H.X., Shi, C.H. and Zhao, F. (2023) Properties and Applications of Shape-Stabilized Phase Change Energy Storage Materials Based on Porous Material Support—A Review. *Materials Today Sustainability*, **21**,

Article ID: 100336. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100336>

- [4] Wang, G., Xu, J., Peng, S., Xie, Z. and Munroe, P. (2023) High-Entropy Carbides Designed to Resist Cavitation Erosion-Corrosion in an Acidic Environment: Surface Engineering Guided by First-Principles Calculations and Experiments. *Vacuum*, **211**, Article ID: 111974. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111974>
- [5] Conradt, R. (2001) A Proposition for an Improved Theoretical Treatment of the Corrosion of Multi-Component Glasses. *Journal of Nuclear Materials*, **298**, 19-26. [https://doi.org/10.1016/s0022-3115\(01\)00574-8](https://doi.org/10.1016/s0022-3115(01)00574-8)
- [6] Huanbutta, K., Terada, K., Sriamornsak, P. and Nunthanid, J. (2013) Advanced Technologies for Assessment of Polymer Swelling and Erosion Behaviors in Pharmaceutical Aspect. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, **83**, 315-321. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2012.10.002>
- [7] Gao, Y., Liu, H., Gui, H., Yao, C., Zhang, G. and Liang, F. (2024) Solid-Liquid Phase Change Materials Microcapsules: Synthesis Strategies, Thermal Storage and Beyond. *Progress in Natural Science: Materials International*, **34**, 615-631. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2024.06.011>
- [8] 伍潇. 三水乙酸钠基柔性复合相变材料的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2024.
- [9] 郑科扬. 基于正十二醇的相变微胶囊及有机凝胶的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [10] Mombeki Pea, H.J., An, Z., Du, X., Fu, B., Zhang, D. and Wang, X. (2024) Epoxy Resin/Aluminium Hydroxide/Expanded Graphite Synergistic Effects on Advancing Flame Retardancy, Mechanical Structure and Thermal Management of Octadecanoic Acid and Octadecanol-Based Eutectic Phase Change Materials. *Chemical Engineering Journal*, **490**, Article ID: 151558. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151558>
- [11] Fan, Y., Li, Y., Tang, X., Zhang, J., Cheng, J. and Lian, Q. (2024) Adjustable Comb/Bottlebrush Fast Uv-Curable Epoxy-Based Form-Stable Phase Change Materials with High Encapsulation Rates and Ultralow Enthalpy Loss. *Polymer Chemistry*, **15**, 276-291. <https://doi.org/10.1039/d3py00851g>
- [12] Zhang, Y., Zhang, G., Yao, J., Min, C., Liu, C. and Rao, Z. (2025) Investigation on Thermal Performance of Epoxy Resin Encapsulated Eutectic Hydrated Salt/Expanded Perlite Composite Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **283**, Article ID: 113453. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113453>
- [13] 叶明昊. 通过构建界面热传导网络合成高导热酚醛环氧树脂电子封装材料[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- [14] 刘蓉, 陈杰, 孙立昊, 等. 氢氧化钴-聚多巴胺协同界面改性碳纤维/环氧树脂复合材料[J/OL]. *复合材料学报*, 1-9. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250612.002>, 2025-08-15.
- [15] 荆素航, 张京旺, 刘千立, 等. 硅烷偶联剂改性纳米 SiO<sub>2</sub> 对拉挤用环氧树脂性能的影响[J]. *功能高分子学报*, 2025, 38(4): 356-362.
- [16] 陆威, 沈思扬, 吴志根, 等. 石蜡/SiO<sub>2</sub> 复合相变材料环氧树脂封装及热性能研究[J]. *广州化工*, 2025, 53(7): 37-40+50.
- [17] 冯敏, 张学双, 王剑平, 等. 不同固化剂对酚醛环氧树脂耐硫酸腐蚀性性能影响的研究[J]. *全面腐蚀控制*, 2014, 28(2): 61-62+71.