 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9311

Application and Thermal Performance Testing of New Phase Change Energy Storage Materials in Building Exterior Wall System

Jian Cheng Xiaofan Chen

United Testing Inspection & Certification Technology Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213000, China

Abstract

With the growing urgency of building energy efficiency, phase change materials (PCM) have emerged as a research hotspot in building exterior energy conservation due to their ability to regulate temperature fluctuations and reduce energy consumption through latent heat exchange. This paper systematically reviews the classification and modification techniques of novel PCM materials, focusing on their integration methods and application scenarios in building exterior systems. It also analyzes key indicators and methods for thermal performance testing. Through experimental testing and numerical simulations, the thermal buffering effect and long-term stability of PCM exterior walls are validated. Finally, the study proposes current challenges and development recommendations. The research demonstrates that synergistic design of PCM materials with exterior wall systems can significantly enhance thermal comfort and reduce peak energy consumption. Thermal performance testing should consider both the intrinsic properties of the materials and their dynamic service environments.

Keywords

phase change energy storage materials; building exterior walls; thermal performance testing; energy-saving retrofit; dynamic thermal response

新型相变储能材料在建筑外墙系统中的应用与热性能检测

程建 陈小凡

联检（江苏）科技股份有限公司，中国·江苏 常州 213000

摘 要

随着建筑节能需求的日益迫切，相变储能材料（PCM）因可通过潜热交换调节温度波动、降低建筑能耗的特性，成为建筑外墙节能领域的研究热点。本文系统梳理了新型相变储能材料的分类与改性技术，重点探讨其在建筑外墙系统中的集成方式与应用场景，并针对热性能检测的关键指标与方法展开分析。结合实验测试与数值模拟，验证了相变外墙的热缓冲效果及长期稳定性，最后提出当前应用中的挑战与发展建议。研究表明，新型相变材料与外墙系统的协同设计可显著提升建筑热舒适性，降低峰值能耗，其热性能检测需兼顾材料本征特性与动态服役环境。

关键词

相变储能材料；建筑外墙；热性能检测；节能改造；动态热响应

1 引言

建筑能耗占全球总能耗的 30%~40%，其中外墙传热导致的空调负荷占比高达 40%~60%[1]。传统外墙通过增加保温层厚度降低传热系数（K 值），但单纯“隔热”模式难以应对昼夜温差、季节交替引起的室内温度波动，导致空调频繁启停，能耗与舒适性矛盾突出。相变储能材料（Phase Change Material, PCM）利用材料相变过程（固 - 液或液 - 固）吸收或释放潜热，可实现热量的“时间转移”，平抑室内温度波动，降低峰值能耗 [2]。近年来，纳米复合、多孔封装等改性技术的突破，使 PCM 的热稳定性、循环寿命及与建筑材料的兼容性显著提升，为其在建筑外墙的大规模应用奠定了基础。

【作者简介】程建（1995–），男，中国安徽合肥人，硕士，工程师，从事建筑节能与建筑物理研究。

2 新型相变储能材料的分类与改性技术

2.1 材料分类与特性

新型相变材料可分为有机类、无机类及复合类三大体系（表 1）。有机 PCM（如石蜡、脂肪酸）具有化学稳定性高、无过冷现象等优点，但导热系数低（0.1~0.3 W/(m·K)）、易燃；无机 PCM（如结晶水合盐）导热系数较高（0.5~1.2 W/(m·K)），但易过冷、相分离；复合 PCM 通过多孔介质（如膨胀石墨、硅藻土）或聚合物基体封装，可兼顾高潜热、良好导热性及稳定性 [3]。

表 1 材料分类与特性

类型	典型材料	潜热（kJ/kg）	导热系数（W/(m·K)）	优势	局限性
有机 PCM	石蜡、硬脂酸丁酯	150~250	0.1~0.3	化学稳定、无过冷	导热低、易燃
无机 PCM	十水硫酸钠、六水氯化镁	180~280	0.5~1.2	导热高、成本低	过冷、相分离
复合 PCM	石蜡 / 膨胀石墨、水合盐 / 硅藻土	120~200	1~5	高导热、抗泄漏	工艺复杂、成本较高

2.2 关键改性技术

2.2.1 纳米增强技术

通过在 PCM 基体中引入高导热纳米颗粒（如铜、氧化铝或石墨烯），构建微观导热网络以提升热传导效率。以石蜡基 PCM 为例，纯石蜡导热系数仅 0.1~0.3 W/(m·K)，而添加石墨烯纳米片后，复合 PCM 导热系数可跃升至 5.2 W/(m·K)，较原材提高 20 倍以上 [4]。纳米颗粒的高比表面积与界面效应不仅加速了热量传递，还缩短了相变响应时间，使墙体蓄放热效率显著提升。

2.2.2 多孔封装技术

则聚焦于解决液态 PCM 的泄漏问题，利用膨胀石墨（EG）、介孔二氧化硅（MSN）等材料的三维网络结构，通过物理吸附或毛细作用固定 PCM 分子 [5]。以膨胀石墨为例，其内部发达的孔隙（比表面积＞ 100 m²/g）可高效负载石蜡，形成“基质 -PCM”复合体系。实验表明，EG 负载石蜡的潜热保持率仍达 95% 以上，且相变过程无可见泄漏，彻底避免了传统封装方式的渗漏风险 [6]。

2.2.3 聚合物基复合技术

针对 PEG 等有机 PCM 形状稳定性差的痛点，通过与聚氨酯（PU）等刚性聚合物共混，利用聚合物基体的三维交联网络提供机械支撑。例如，将 PEG 与 PU 按比例共混后发泡成型，形成的复合材料既保留了 PEG 的高潜热（约 150 kJ/kg），又具备 PU 的刚性结构，常温下保持固态，高温相变时无明显形变。这种改性赋予材料优异的加工性能，可通过模压制成板材或颗粒，便于外墙施工安装 [7]。

3 相变储能材料在建筑外墙系统中的应用

3.1 集成方式与构造设计

相变材料在建筑外墙中的应用主要通过以下形式实现：

（1）相变墙体：将 PCM 板或颗粒嵌入外墙保温层（如 EPS/XPS 板）与结构层之间，形成“结构层 -PCM 层 - 保温层 - 饰面层”复合体系。PCM 层厚度通常为 20~50 mm，可根据气候区调整 [7]。例如，在夏热冬冷地区，20 mm 厚石蜡基 PCM 可使室内温度波动幅度降低 3~5℃，减少空调运行时间 20%~30%[8]。

（2）相变石膏板：将 PCM 微胶囊与石膏浆混合制成板材，用于内隔墙或吊顶。其优势是施工便捷，且可与现有墙体系统兼容。研究表明，相变石膏板可使夜间室内温度降低 2~4℃，减少峰值负荷 15%[9]。

（3）相变涂料：通过溶胶 - 凝胶法将 PCM 封装于纳米颗粒中，涂覆于外墙表面。该方式厚度仅为 0.5~2 mm，不占用额外空间，但需解决涂层耐候性与长期稳定性问题。

3.2 应用场景与节能效益

不同气候区的外墙 PCM 应用需针对性设计：（1）寒冷地区：侧重冬季蓄热，选择相变温度 18~25℃的 PCM，延缓室内热量向室外传递，降低采暖能耗；（2）夏热冬暖地区：侧重夏季蓄冷，选择相变温度 22~28℃的 PCM，吸收白天太阳辐射热，减少空调制冷需求；（3）过渡气候区：需兼顾冬夏需求，采用梯度相变温度（如 20℃与 25℃双组分 PCM）或多层 PCM 结构。

4 热性能检测关键技术

4.1 检测指标体系

相变外墙的热性能需从材料本征特性与系统动态响应两方面检测（表 2）：

4.2 检测方法与设备

4.2.1 材料本征特性检测

材料本征特性是相变储能材料（PCM）能否在建筑外墙中稳定发挥作用的基础，其检测需精准量化核心热物性参数并评估长期服役可靠性。针对相变温度与潜热，采用差示扫描量热法（DSC）是最直接的手段：测试时以 10℃ /min 的速率升温，氮气氛围（50 mL/min）可隔绝氧气避免氧化，温度范围覆盖 -20~80℃以匹配多数气候区的昼夜温差与季节波动。DSC 曲线中吸热峰的起始与终止温度对应相变温度区间，峰面积则直接换算潜热值，该参数决定了 PCM 能否在目标温度区间内有效蓄放热。

表 2 检测指标体系

检测维度	关键指标	检测目的
材料本征特性	相变温度（T_p）、潜热值（ΔH）	评估能量储存能力与适用温度区间
	导热系数（λ）、比热容（c）	分析材料传热效率与蓄热速率
	循环稳定性（潜热衰减率）	验证长期使用后的性能保持能力
系统动态响应	传热系数（K 值）	衡量外墙整体保温性能
	室内温度波动幅度	评价热缓冲效果与热舒适性
	峰值能耗削减率	量化节能效益

导热系数检测选用瞬态热线法（如 Hot Disk TPS 2500S），在 25℃标准温度下通过探头（直径 12.7 mm）发射高频热脉冲并监测温度响应，计算材料的热扩散能力——低导热系数虽利于蓄热，但会延缓响应速度，因此需在潜热与导热间寻求平衡。循环稳定性则通过加速老化试验验证：模拟 1000 次熔融 - 凝固循环（如 45℃熔融 8 h、25℃凝固 16 h），对比循环前后 DSC 曲线，若潜热衰减率＜ 5% 则表明材料结构稳定，可避免长期使用后性能失效。这些检测共同构成了 PCM“能不能用”“好不好用”的本征评价体系。

4.2.2 系统动态响应检测

系统动态响应检测聚焦于 PCM 与外墙整体协同工作的实际效果，需从传热效率、热舒适性及长期节能效益三方面展开。传热系数采用热流计法（GB/T 13475-2008），在外墙两侧对称布置热流计与铂电阻温度传感器，同步采集热流密度与内外表面温度，通过傅里叶定律计算传热系数 K 值——该指标直接反映外墙阻止热量传递的能力，K 值越低则保温性能越优。

室内温度波动检测通过搭建 1:10 缩尺实验房模拟真实居住环境，利用高精度温湿度记录仪（±0.5℃）连续监测 24 小时温度变化：夏季正午高温时段，PCM 吸热可延缓室内升温；冬季夜间低温时，PCM 放热能减缓热量流失，实验数据直观展现其对温度波动的平抑效果。数值模拟验证则借助 EnergyPlus 或 TRNSYS 软件，输入材料热物性参数（如潜热、导热系数）与当地气象数据，模拟全年 8760 小时的动态热响应，将模拟结果与实验数据对比校准模型，可预测不同气候区、不同 PCM 配置下的节能潜力，为工程应用提供理论支撑。三者结合，实现了从材料到系统、从静态参数到动态性能的全面评估。

5 实验研究与结果分析

为验证新型相变储能材料（PCM）在建筑外墙中的实际效能，本研究针对我国夏热冬暖地区气候特征（夏季高温高湿、冬季温和少雨），设计 1:10 缩尺实验房开展对比测试。实验选取两组典型外墙构造：对照组采用传统单一保温体系（200 mm EPS 板 +20 mm 水泥砂浆饰面层，实测传热系数 K=0.45 W/(m²・K)）；实验组则在 EPS 板与结构层间嵌入 20 mm 厚石蜡 / 膨胀石墨（EG）复合 PCM（PCM 层 K=0.18 W/(m²・K)，整体外墙 K=0.42 W/(m²・K)）。实验周期覆盖夏冬两季典型工况，通过温湿度记录仪（精度 ±0.5℃）、红外热像仪及数据采集系统，同步监测室内外温度场、外墙表面热流密度及 PCM 层温度变化。测试重点关注 PCM 对室内温度波动的平抑效果、空调负荷削减率及长期服役稳定性，为工程应用提供实证数据支撑。夏季典型日室内温度变化曲线如下图 1 所示。

由图 1 可知，相变外墙的节能优势与技术可行性。夏季正午（14:00）高温时段，实验组室内温度峰值较对照组低 3.2℃，且峰值出现时间延迟 2.5 小时——PCM 通过熔融吸热将室内热量“储存”于材料内部，延缓了热量向室内传递的速度，有效降低了空调高频运行时长。冬季夜间（22:00）低温阶段，实验组室内温度较对照组高 2.8℃，结合当地采暖负荷计算，单户每日采暖能耗减少约 18%。更关键的是，经 500 次加速热循环（模拟 10 年服役）后，PCM 潜热衰减率仅 3.7%，远低于 5% 的性能失效阈值，表明石蜡 /EG 复合 PCM 具备优异的长期稳定性。数据印证了相变外墙通过“蓄放热动态调节”机制，既能缓解夏季峰值热负荷，又能提升冬季热舒适性，且材料耐久性满足实际需求，为夏热冬暖地区建筑节能改造提供了可复制的技术方案。

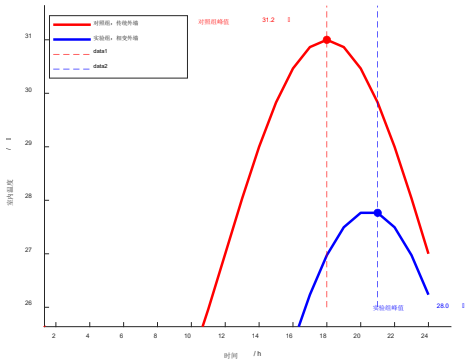


图 1 夏季典型日室内温度变化曲线

6 结论

新型相变储能材料通过潜热交换机制，可有效平抑建筑外墙的温度波动，降低峰值能耗，是建筑节能的重要发展方向。其热性能检测需兼顾材料本征特性与系统动态响应，结合实验测试与数值模拟验证长期稳定性。未来，随着材料改性技术与标准化体系的完善，相变储能外墙将在绿色建筑中发挥更关键的作用。

参考文献

[1] 刘成员, 介朝洋, 高哲, 孙嘉豪, 于江玉, 刘智伟. 生物质衍生材料在相变储能应用中的研究进展[J]. 河南化工, 2025, 42 (09): 1-5.

[2] 王恩典, 张生. 新型节能墙体材料在绿色建筑转型中的功能革新研究[J]. 佛山陶瓷, 2025, 35 (07): 81-83.

[3] 张志毅. 相变储能材料在节能房屋外墙中的应用研究[J]. 合成材料老化与应用, 2025, 54 (03): 97-100.

[4] 李泽源, 李众, 于建芳. 木基相变储能材料制备与应用研究进展[J]. 林产工业, 2025, 62 (06): 1-8.

[5] 周新宇, 陈思佗, 周雨婷, 王正云, 栾道成, 胡志华. 相变储能材料在建筑领域的研究进展[J]. 佛山陶瓷, 2025, 35 (06): 1-6.

[6] 倪明龙, 乐小龙, 陈振乾, 王磊, 施娟, 刘明涛, 盛帮明, 李晓琪, 李志远. 新型有机脂肪酸复合相变储能材料及应用前景[J]. 电力科技与环保, 2025, 41 (03): 477-487.

[7] 张庆平. 储能技术助力农产品电商冷链物流配送的优化策略[J]. 储能科学与技术, 2025, 14 (05): 2078-2080.

[8] 张爱芳. 相变储能材料在冷链物流运输中的热效应作用分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14 (05): 1943-1945.

[9] 周振华, 王海健, 张波. 新型相变储能材料在T/R组件设计中的应用[J]. 丝网印刷, 2025, (10): 42-45.