

相变材料在建筑围护材料中的应用与研究进展

张 军

无锡城市职业技术学院建筑与环境工程学院, 江苏 无锡

收稿日期: 2026年1月13日; 录用日期: 2026年1月26日; 发布日期: 2026年2月25日

摘 要

建筑节能减碳对低碳发展具有较好的意义。为了深入了解相变材料在建筑围护材料中的应用与研究进展, 文章梳理了相变材料选择、改性方法与典型应用。考虑其在能效发挥上仍存在一定局限, 重点分析了它在导热提升、过冷抑制, 减漏增稳、梯度功能, 双能耦合、协同调控等关键性能优化上的最新进展与改进成效, 以期为进一步推动相变材料在建筑中的研究与应用提供参考。

关键词

相变材料, 建筑, 关键性能, 研究进展

Application and Research Progress of Phase Change Materials in Building Envelope Materials

Jun Zhang

School of Architecture and Environmental Engineering, Wuxi City College of Vocational Technology, Wuxi Jiangsu

Received: January 13, 2026; accepted: January 26, 2026; published: February 25, 2026

Abstract

Building energy conservation and carbon reduction have significant implications for low-carbon development. In order to gain a deeper understanding of the application and research progress of phase change materials in building envelope materials, the selection, modification methods, and typical applications of phase change materials were sorted out. Considering that there are still certain limitations in their energy efficiency performance, the latest progress and improvement effects of phase change materials in key performance optimization such as thermal conductivity enhancement, supercooling suppression, leakage reduction and stabilization, gradient function, dual energy coupling, and collaborative regulation were analyzed, in order to provide reference for further

promoting the research and application of phase change materials in buildings.

Keywords

Phase Change Materials, Architecture, Key Performance, Research Progress

Copyright © 2026 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

全球能源消耗、工业生产过程中的碳排放已增长到较高水平，其中建筑行业涉及的碳排放量已超总排放量的三分之一[1]。建筑的节能减碳对温室气体排放有着举足轻重的作用，伴随全球能源资源的日益紧张化，建筑行业节能减碳的推广和应用已迫在眉睫，而通过提升建筑围护结构的隔热保温性能，可大大降低建筑的日常运行能耗。相变储能是一种相对比较成熟的储能技术，因其储能效果好、温度波动小、能源利用率高、整体经济效益佳等优点，逐渐在建筑领域受到青睐。相变储能是利用相变材料(Phase Change Materials, PCM)在相变过程吸收、释放热量而实现能量的储存、释放，从而提高围护结构的热值，降低室内温度波动幅度，实现室内能源“调峰补谷”，进而降低建筑能耗，但在能效发挥上仍存在一定局限。本文从相变材料基础内容出发，重点分析其关键性能优化的研究进展，以为后期研究提供参考。

2. 相变材料的选择与改性处理

2.1. 相变材料选择

相变材料从不同角度可划分为不同类别，按物质类型分，可分为无机、有机、复合、离子液体等，不同物质类型的相变材料性能见表1；按相变形式分为固-固、固-液、固-气、液-气；按相变温度可分为低温、中温、高温三类[2]。为满足建筑节能减碳的实际需求，选择相变材料时应考虑热物性、物化性能以及经济性等因素，具体包括：有与环境温度相匹配的相变温度，相对较高的相变潜热、高导热性；有较强的相变可逆性、热循环性；膨胀收缩性小、密度大、比热容大、物化性能稳定；不易燃易爆、无毒、无泄漏、无腐蚀性，使用寿命长；适合批量生产、制作成本低。

Table 1. Main properties of phase change materials of different substance types

表 1. 不同物质类型相变材料的主要性能

类型	举例	优点	缺点
无机相变材料	结晶水合盐、熔融盐、金属化合物等	储热能力与导热系数高、使用温度宽、相变过程中体积变化较小、成本低	稳定性较差，具有一定的腐蚀性，容易出现过冷和相分离现象
有机相变材料	石蜡、脂肪酸、脂肪醇等	有较高相变潜热，相变温度范围广、储热能力高、循环性好、成型稳定、无过冷和相分离现象，腐蚀性较小、兼容性强	导热系数较其他材料要低、相变过程中往往体积变化较大且易燃
复合相变材料	由 2 种或 2 种以上相变材料组成，如聚乙二醇/膨胀石墨	可调整各组分的质量分数来改变相变温度、导热系数、相变潜热等物性参数	热物性能数据有限，成本相对较高，实际应用少
离子液体相变材料	烷基咪唑类离子液体	宽液程、大热熔、高热导率和高热稳定性	其应用研究还处于探索阶段，研究开发成本高

2.2. 相变材料改性

目前常见的相变储能材料通常由单一物质组成，相变温度、相变潜热、导热性能等特性往往无法满足建筑材料应用的实际需求[3]。因此，国内外学者不断探索复合型改性相变材料，以克服单一相变材料在相关特性上存在的缺陷。复合型相变材料往往潜热可以大大提高，且与改性前材料相比，具有更好的热渗透性、热储存能力与稳定性。膨胀石墨是常见的复合改性基质，改性后具有较好的储热性能和导热效率，且可通过调整膨胀石墨、石蜡的比例来调整相变潜热，以更好地满足其建筑节能减碳的应用要求。

3. 相变材料的处理方法

3.1. 直接混合

直接混合法是将相变材料与石膏直接混合制成相应的建筑材料，以提高建筑材料储热性能。该方法处理工艺相对简单、成本较低，然而制成的材料化学稳定性相对较差，相变材料容易泄漏，且与多孔吸附法相比，制成的产品相变材料含量相对较低，因此蓄热储能能力相对有限。

3.2. 宏封装

它是将相变材料通常由金属、塑料等封装材料固定在球体、圆柱体、长方体、平板中，以提高其强度、导热性、耐久度等。与胶囊法类似，该方法可以避免利用直接混合法、浸渍法处理时产生的相变泄漏问题，但是在成品设计安装时应考虑现场实际相对复杂的尺寸与碰撞等因素，以更好地适应现场实际需求。

3.3. 相变胶囊

相变胶囊法利用壳层材料或嵌入材料形成包覆性外层将相变材料包裹起来，形成单核、多核、多壳的微胶囊或纳胶囊，以此提高相变材料的换热面积与稳定性，并能防止其泄漏。前期以有机壳层材料研究居多且以石蜡为主，近年来无机和复合壳层材料研究逐渐增多，然而该处理工艺相对复杂，生产成本较高，一定程度上影响了其实际应用。

3.4. 多孔材料吸附

它是比表面积大的多孔材料作载体，利用常压或抽真空将相变材料更多地吸入孔隙材料之中，从而形成形状稳定的相变材料，减少泄漏。多孔材料的尺寸、形状、比表面积、界面特性、导热性能等对改善相变材料的导热性能有一定影响，目前常用的多孔材料包括活性炭、硅藻土、膨胀石墨、膨胀珍珠岩等，相比其他处理方法，该方法处理工艺简单、应用相对广泛。

4. 相变材料在围护结构上的典型应用

将相变材料与墙板复合制备的相变储能墙板同样具有较好的储能潜力。利用 SiO_2 纳米粒子、聚苯乙烯-二乙烯基苯共聚物等制备的相变微胶囊，并与石膏混合制成的相变墙板，其比热容提高了近一倍，储热性能提高了 66%，可节省电能 $10 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，大约可减少 1.3 kg 的二氧化碳排放量。相变储能墙板在制备成本、阻燃性能、受力强度等方面后期仍需进一步完善。相变材料与屋顶材料混合可制成相变屋顶，兼具蓄热、保温作用。夏季时，相变屋顶可储存夜间的低温热量，用于缓冲白天的高温热量。研究表明，相变屋顶不仅可调蓄热量，还可透光，大大提高了建筑物室内亮度，降低了室内的照明用电。然而，后期相变屋顶的材料改性、屋顶构造、通风速率、耐久性能等仍需进一步研究。此外，将相变微胶囊掺入建筑涂料可制备相变涂料。该涂料可以直接涂刷在墙上，也可以涂刷在壁纸上，起到隔热保温、装饰美

化甚至防火作用。针对传统相变微胶囊外壁耐热性差、相变过程中易泄漏等缺陷,可通过引入热辐射材料加以改善:利用辐射散热形成一次热阻,再结合相变材料的二次吸热,实现协同热管理。此类涂料还可作为木材、钢结构及混凝土表面的防火涂层——火灾发生初期相变材料可吸收其燃烧所需热量以达到熄灭小火的目的;火势较大时,膨胀防火涂料会在膨胀材料作用下发泡形成隔离层,以隔绝空气减缓火势蔓延的效果。后期防火涂料仍旧会在隔热保温、耐火防火中重点研究,以应用于更多领域。

5. 关键性能优化及改性策略

5.1. 材料性能优化技术

5.1.1. 导热增强改性

由于大多数相变材料的导热系数较低,限制了其在实际应用中的热响应速度和能量传递效率。为增强相变材料的导热性能,目前研究较多的是向本体中添加高导热改性填料。纳米碳管因其优异的力学性能和导热性能(3000~6000 W/(m·K)),成为理想导热填料之一。当在有机相变材料中添加质量比为0.5%的纳米碳管时,改性填料构建的热传导通路将本体的导热能力可提升至2倍以上[4]。膨胀石墨因其高比表面积,能有效促进热量传导;其三维网状结构在增强导热能力基础上还能起到一定支撑作用。河北工业大学利用纳米碳管、膨胀石墨改性的柔性复合相变材料,在材料弯曲变形10%时仍保持稳定的导热性能[5],这为相变材料在曲面围护结构及其他建筑场景中的应用提供了新的解决方案。

5.1.2. 过冷抑制与稳定提升

由于一些相变材料其温度要远低于理论相变温度才会发生相变,导致其不能及时释放潜热,从而大大影响了储能和控温效果,无机水合盐类相变材料就是其中之一。为有效抑制无机水合盐的过冷现象,研究人员引入成核剂作为相变晶核,加速相变发生,以增稠剂提高体系粘稠度,从而减少溶质扩散来抑制过冷发生。此外,硼酸成核剂与增稠剂的复配加入,可将 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的过冷度抑制在 3°C 以内,显著提高了相变效率和温控精度,且反复循环试验发现,复配剂引入后相变焓整体衰减率小于5% [6],表明改良后的无机水合盐类相变材料可在长期使用中保持性能稳定,显著提高了系统使用寿命,有望在建筑围护结构中大规模应用。

5.2. 复合工艺与结构设计创新

5.2.1. 多孔基材吸附技术

相变材料在液态时易发生泄漏,研究人员往往利用多孔基材材料吸附固定来降低泄漏率。目前,发现硅藻土、膨胀珍珠岩等多孔材料因具备丰富的孔隙结构及较大的比表面积,能将液态相变材料吸附稳固在固态骨架中,从而制备出泄漏率低于0.1%的复合相变材料。西安建筑科技大学基于多孔基材吸附技术,利用膨胀珍珠岩等多孔材料吸附相变材料,并通过优化材料配方和制备工艺,研发出一种石膏基复合相变材料,其抗压强度达到15 MPa [7],满足了墙体力学性能的要求。在吸附技术、材料优配等组合下,复合工艺使得相变材料减漏增稳,既确保储能调温,又增强结构稳定。

5.2.2. 梯度功能设计

传统单一相变材料通常难以满足不同季节对应工况的热能需求,为此研究人员提出了“外冷内热”双层结构的相变材料。它可在夏季高温环境下利用低相变温度材料(相变温度 $18^\circ\text{C} \sim 22^\circ\text{C}$)吸收外界传入的热量,起到阻隔热作用;冬季时则利用内侧高相变温度材料(相变温度 $24^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$)释放储存的热量,来实现冬季蓄热保温。EnergyPlus模拟分析表明,这种“外冷内热”双层结构,令全年建筑能耗降低近三成[8]。这一梯度功能设计打破了传统的单一结构,充分发挥了不同相变温度材料的优势,为满足人们对

室内环境需求与节能减排提供了新思路，有助于推动建筑节能技术向更加精细化、智能化的方向发展。

5.3. 双能耦合与系统集成

5.3.1. 太阳能相变材料联合供能

太阳能作为一种清洁、可再生能源，选择性吸收涂层可高效吸收太阳能。将相变材料与太阳能集热系统相结合(如图 1)，构建的耦合系统在白天阳光充足时，吸收涂层捕获的太阳能传递给相变储热单元；当夜间或阴天太阳能不足时，相变材料释放储存热量维持室内温度。吸收涂层与相变材料的耦合运行，不仅为相变材料提供了能量来源，也将太阳能利用效率从传统的 65% 提高到 82%。研究发现该耦合系统在保持室内温度 20℃ 时，比传统系统时长多 4 h [9] [10]，且在不同天气条件下稳定性、可靠性更高，可进一步推动现代建筑向绿色低碳方向发展。

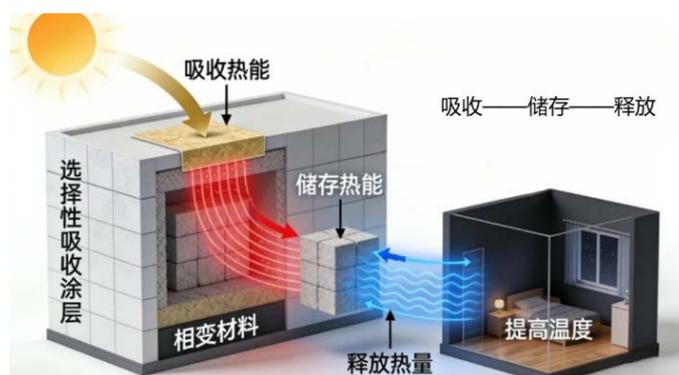


Figure 1. Working principle diagram of dual energy coupling system
图 1. 双能耦合系统工作原理图

5.3.2. 通风与相变协同调控

办公、商场、车站等场所人员密集，设备散热量大，往往室内热环境复杂，能耗消耗量高。为改善室内热环境，提高能源效用，研究人员开发了相变墙体——贴附射流通风耦合系统，实现了通风与相变的协同调控。相变材料在吸收或释放热量时有一定的热滞后，这使得相变墙体能够延迟热流传递 3 h~5 h [11]，贴附射流通风则通过优化送风口的位置、形状和风速，使送风气流沿相变墙内壁面高速流动，形成贴附效应，增强气流与相变墙体之间的换热效率，可及时带走墙体的蓄存热量[12]，同时也降低了工作区的空气龄，确保了室内空气的新鲜度。相变技术与通风系统的优势互补，为高密度场所的室内环境优化和节能降耗提供了一种创新的解决方案。

6. 结语

相变材料应用于建筑围护结构，能调控室内温度，降低热量损失，节约能耗成本，对建筑节能减碳具有较强的积极意义，但在能效发挥上仍有一定局限，目前相变材料在导热提升、过冷抑制、减漏增稳、梯度功能、双能耦合、协同调控等复合工艺与结构设计创新取得了显著进展，并在多能耦合与系统集成领域实现了技术突破，有力提升了关键性能。相信后期随着研究的深入，相变材料在建筑中的应用将更加广泛，也将愈加成熟，更好地提高建筑的绿色价值与居住体验。

参考文献

- [1] Wei, X. and Dou, X. (2022) Application of Sustainable Supply Chain Finance in End-of-Life Electric Vehicle Battery Management: A Literature Review. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, **34**, 368-385.

<https://doi.org/10.1108/meq-02-2022-0031>

- [2] Lu, S., Xu, B. and Tang, X. (2020) Experimental Study on Double Pipe PCM Floor Heating System under Different Operation Strategies. *Renewable Energy*, **145**, 1280-1291. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.086>
- [3] Yu, J., Yang, H., Tao, J., Zhao, J. and Luo, Y. (2023) Performance Evaluation and Optimum Design of Ventilation Roofs with Different Positions of Shape-Stabilized PCM. *Sustainability*, **15**, Article 8721. <https://doi.org/10.3390/su15118721>
- [4] 谷丰, 王收, 潘丽. 碳基材料对脂肪酸复合相变材料导热性能影响的研究进展[J]. 中国油脂, 2024, 49(11): 72-80.
- [5] 术晴晴. 水泥乳化沥青阶梯型复合相变材料的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2025.
- [6] 张雨彤, 廖志泓, 梅文勇. 相变材料改性保温砂浆研究进展[J]. 建筑节能(中英文), 2025, 53(7): 87-95.
- [7] 张吉雄, 周楠, 刘恒凤, 等. 煤基固废功能材料井下利用研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 1-28.
- [8] 杨昕鹏. 相变蓄能玻璃围护结构长周期光热特性仿真及优化研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2024.
- [9] 杨玉潮. 日光温室显热蓄热供热系统的热性能试验与其运行控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [10] 孟凡康, 彭栋坤, 蔡鹏. 严寒地区相变日光温室蓄放热性能模拟研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2532-2539.
- [11] 张婕. 超低能耗模块墙装配式建筑体系相变墙体传热特性研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2025.
- [12] 陈萨如拉, 陈天航, 杨洋. 模块化热激活墙体性能优化与经济性分析[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(2): 74-85.