ⓒ 应用数学和力学编委会, ISSN 1000-0887

http://www.applmathmech.cn

相变材料空间布局对多孔砖传热过程的时空调控机理研究*

赵　瑞，　李磊磊

（郑州航空工业管理学院 土木与环境学院，郑州 450046）

摘要： 相变储能多孔砖因其在提升建筑节能与室内热舒适性方面的巨大潜力而备受关注.然而，相变材料（phase change material，PCM）在砖内多孔腔体中的空间布局策略对其热工性能的内在调控机理仍不明确，限制了其优化设计.为解决此问题，该研究依托 COMSOL Multiphysics 平台，对 8 种不同 PCM 布局构型的储能多孔砖进行系统的数值模拟，旨在揭示 PCM 空间位置与体积分数对其热工性能的耦合影响.研究发现，PCM 的空间布局，不是简单的含量，而是决定其热调控效能的核心变量.将单层 PCM 由外侧移至内侧（靠近室内），可最优化相变过程与外部温度波动的时空匹配，通过有效的热衰减与阻尼效应，使内表面温度波幅显著降低 25.7%（从 12.69 ℃降至 9.43 ℃）.此外，研究首次量化了 PCM 体积分数增加所导致的“边际效益递减”规律：与单层内侧布局（潜热利用率 0.97）相比，双层及三层布局因内层 PCM 热驱动力不足，潜热利用率分别降至 0.82 和 0.83，导致材料冗余.综合权衡热工性能与材料利用效率，该研究确定“单层内侧布局”（Case D）为最优设计方案，它在仅使用三分之一 PCM 容量的条件下实现了主要的性能改善.该发现为动态储能围护结构的设计提供了新的理论范式，即从传统的“越厚越好”转向基于时空协同的“精准布局”.

关　键　词： 相变材料；　多孔砖；　空间布局优化；　热流调控机理；　边际效益；　数值模拟

中图分类号： TB34　　**文献标志码：** A　　DOI：10.21656/1000-0887.460187

Study on the Spatiotemporal Control Mechanism for PCM Spatial Layout in the Heat Transfer Process of Porous Bricks

Zhao Rui,　Li Leilei

(*School of Civil and Environmental Engineering*, *Zhengzhou University of Aeronautics*, *Zhengzhou* 450046, *P.R. China*)

Abstract: Phase change material (PCM) filled porous bricks have garnered significant attention for enhancing building energy efficiency and indoor thermal comfort. However, the intrinsic mechanism by which the spatial layout of PCM within the porous brick regulates the thermal performance remains unclear, limiting the optimal design. To address this, the coupled effects of PCM spatial positions and contents (volume fraction) on thermal performances were investigated through numerical simulations of 8 distinct layout configurations by means of COMSOL Multiphysics. The results show that, the spatial layout, rather than mere the content, is the core variable determining the thermal regulation efficacy. Repositioning a single PCM layer from the exterior to the inte-

* **收稿日期：** 2025-10-14；**修订日期：** 2025-12-25

作者简介： 赵瑞（1974—），男，副教授，博士（通信作者. E-mail：15981840968@126.com）；
李磊磊（1998—），男，硕士生（E-mail：2807023661@qq.com）.

引用格式： 赵瑞，李磊磊. 相变材料空间布局对多孔砖传热过程的时空调控机理研究[J]. 应用数学和力学，2026，**47**(10)：1266-1285.

rior optimizes the spatiotemporal matching between the phase change process and the external temperature fluctuations. Through effective thermal attenuation and damping effects, this layout significantly reduces the inner surface temperature amplitude by 25.7% (from 12.69 ℃ to 9.43 ℃). Furthermore, this study quantifies the "law of diminishing marginal returns" associated with increasing PCM contents. Compared to the optimal single inner-layer layout (with a latent heat utilization rate of 0.97), double and triple-layer configurations exhibit reduced utilization rates of 0.82 and 0.83, respectively. This decline is attributed to insufficient thermal driving force acting on the inner PCM layers, resulting in material redundancy. In view of the trade-off between thermal performance and material efficiency, the "single inner-layer layout" (Case D) is identified as the optimal solution, achieving significant performance gains with only 1/3 of the maximum PCM capacity. These findings propose a new design paradigm for dynamic energy-storage envelopes, shifting from the conventional "thicker is better" approach to a "precise layout" strategy based on spatiotemporal synergy.

Key words: PCM; porous brick; spatial layout optimization; heat flow regulation mechanism; marginal benefit; numerical simulation

0 引　　言

随着全球气候变暖及居民生活水平的不断提高,公众对建筑室内热舒适性的需求持续增长.为维持适宜的室内热环境,暖通空调系统已成为现代建筑不可或缺的组成部分[1-3].然而,该系统能耗显著,且在用能高峰与低谷时段存在较大负荷差异,进一步加剧了能源供需矛盾[4-5].统计数据显示,我国暖通空调系统能耗已占建筑全寿命周期总能耗的 30%~50%,且比例仍呈上升趋势[6-9].在建筑能耗构成中,经由围护结构传热及空气渗透引起的冷热损失,是导致能耗长期居高不下的重要原因之一.因此,提高建筑围护结构的热惯性,以减少热损失并降低暖通空调运行能耗,不仅是改善室内环境质量的重要途径,也是推动社会可持续发展和实现节能降碳目标的关键措施[10-12].

近年来,相变储能技术作为建筑节能领域的研究前沿,通过将相变材料(PCM)集成于建筑围-护结构,可充分利用其固-液相变过程中显著的潜热蓄放特性,显著提升墙体热容量,从而有效改善保温隔热性能[13-15].与此同时,随着高层建筑快速发展,外围护结构正呈轻质化趋势,空心砖与砌块凭借优异的力学及热工性能,逐渐成为主流墙体材料[16-18].将 PCM 封装于砖孔腔内部,不仅有助于保持良好的热工性能,还能简化施工流程,规避传统集成方式中的结构复杂性与施工适配性不足等问题[19-21].这一设计思路为 PCM 在建筑节能领域的应用拓展了新路径,并为推进建筑可持续发展提供了技术支撑.

学界已对 PCM 与多孔砖的结合开展了广泛研究,进一步证实了其应用潜力.Salman 等[22]通过数值分析揭示,在混凝土砖中,采用垂直于热流方向的矩形 PCM 胶囊可实现最优的蓄热效果.Brahimi 等[23]的研究表明,将生物基 PCM 置于空心砖外层可使内表面热通量减少 58%.Rathore 等[24]则发现,将 PCM 置于外层、聚氨酯泡沫(PUF)置于内层的组合配置节能效果最佳,可使室内峰值温度降低 11.2%.然而,Mukram 等[25]的研究得出了不同结论,他们指出微胶囊 PCM 越靠近墙体中部,其降温和热延迟效果越显著,最大降温可达 8.91 ℃.此外,Gupta 等[26]的研究重点关注封装形式,证明了管状封装结构在提升建筑热惰性方面优于方形和矩形.

尽管上述研究证实了 PCM 与多孔砖结合的显著潜力,但对于 PCM 在砖体内部多孔腔体中的空间布局策略如何影响其热工性能的内在物理机制,仍缺乏系统性探究.具体而言,PCM 在不同孔层(外、中、内)的排布如何调控砖体内部的动态热流传递路径,并影响其相变过程与外部温度波动的时序匹配关系,其内在物理机制尚不明确.此外,在不同的空间配置下,各 PCM 层之间的协同或拮抗效应如何影响整体的热调控效能,也缺乏量化分析.因此,当前研究中 PCM 掺量与性能增益之间的非线性关系及饱和效应尚未得到充分揭示,导致目前仍缺乏一个能兼顾热工效益、材料利用率与经济成本的最优设计准则.

针对上述研究空白,本文以乌鲁木齐地区典型夏季气候为背景,依托 COMSOL Multiphysics 平台,对 8 种不同 PCM 空间布局的储能多孔砖进行系统的数值模拟研究.本研究旨在从机理层面揭示 PCM 空间布局的决定性作用.首先,本文从"热流路径演化"的新视角,通过对温度场及热流矢量图的动态分析,直观阐明了不

同 PCM 布局如何改变热波传递路径,从而决定相变过程的时机与效率.其次,本研究量化了多层 PCM 布局中的“协同热屏蔽”与“时序失配”效应,为优化设计提供了清晰的物理图像.最终,通过揭示 PCM 掺量的“边际效益递减”规律及其内在原因,本研究提出了兼顾热工性能、材料效率与经济成本的最优设计方案(单层内侧布局),为实际工程应用提供了明确的技术范式.

1 试 验 研 究

1.1 材料热物性表征与试件制备

本研究的基体材料选用粉煤灰多孔砖,相变芯材选用热稳定性良好的 20#低温石蜡(PCM).为精确获取数值模拟所需的相变特征参数,采用差示扫描量热仪(型号:NETZSCH DSC 214 Polyma)在氮气保护氛围下对 PCM 进行了热分析,升降温速率设定为 5.00 ℃/min,测试曲线如图 1 所示.

根据 DSC 热流曲线分析(图 1)可知:

1) 储热能力:该材料表现出显著的潜热储存优势,其熔化过程的熔融焓(潜热)实测为 114.35 kJ/kg,凝固放热焓为 158.94 kJ/kg,较高的潜热值有助于提升墙体的热容.

2) 相变温区:材料的熔化相变区间为 17.56~26.30 ℃(起始温度 T_{onset} = 17.56 ℃,终止温度 T_{end} = 26.30 ℃).这一吸热区间完全覆盖了夏热冬冷地区的典型室内热舒适温度范围,有利于通过相变吸热实现被动式室温调控.

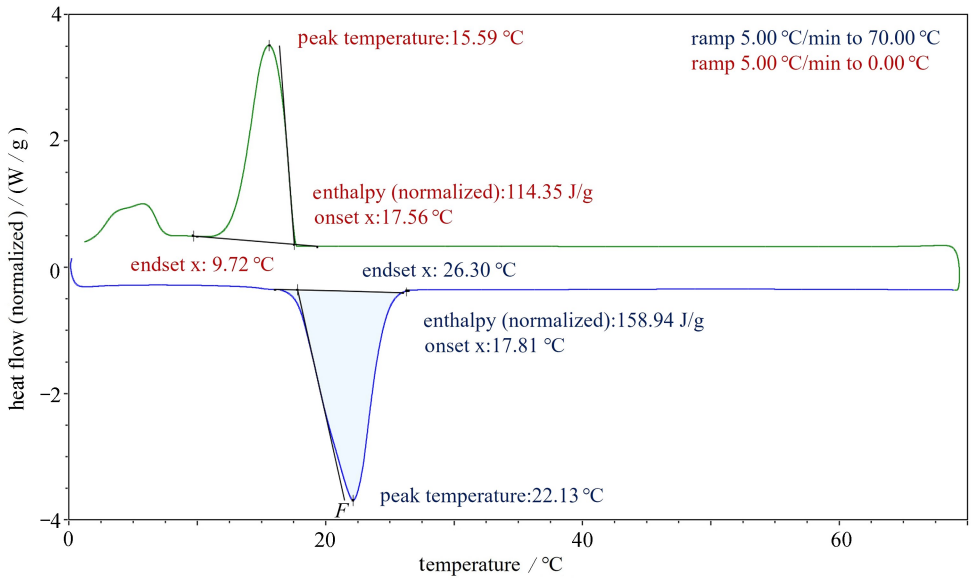


图 1 石蜡的 DSC 分析曲线(升/降温速率: 5.00 ℃/min)

Fig. 1 DSC analysis curves of the paraffin (at a heating/cooling rate of 5.00 ℃/min)

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同.

为确保数值模拟的物理真实性与数据闭环,本研究对各组分材料的关键热工参数进行了严格界定.表 1 汇总了模拟中采用的具体参数值.其中,PCM 的相变特性参数直接源自上述 DSC 实测;PCM 的基础物性(密度、导热系数等)及多孔砖的热工参数则依据相关权威文献[8]及国家标准《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)确定;封装材料采用标准 PVC 工程塑料参数.

PCM 的宏观封装与试件制备流程如图 2 所示.封装系统采用透明 PVC 柔性管作为载体,两端辅以实心硅胶塞密封(图 2(a)),以兼顾化学稳定性与防泄漏性能.制备过程中,将熔融态石蜡注入管内并密封,制得尺寸均一的圆柱形 PCM 储能单元(图 2(b)),所有单元均通过了严格的热循环防泄漏测试.最终,将储能单元逐一、紧密地嵌入多孔砖的预留孔洞中,构建成集成了相变储能功能的复合墙体试件(图 2(c)).

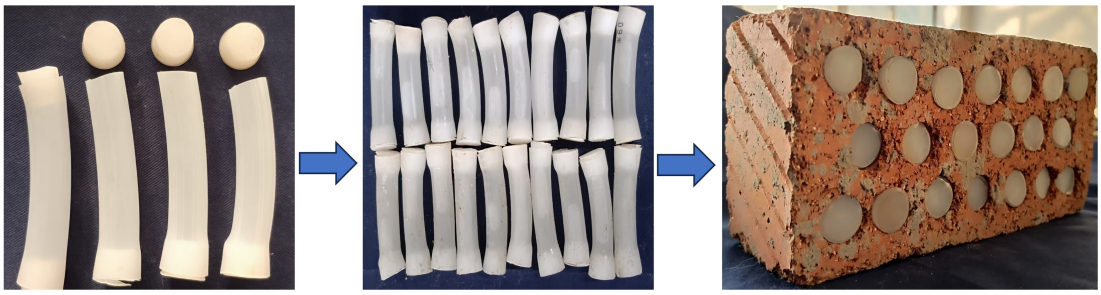
1.2 热工性能测试系统与方法

为精准评估相变储能多孔砖在非对称热边界条件下的瞬态热响应特性,本研究搭建了一套动态热性能

测试系统(如图 3 所示)。

1) 测试系统与装置

该系统核心是一个立式控温热箱,由高密度木质板材构成(1 600 mm×380 mm×380 mm)。为最大限度减少与外界环境的热交换,箱体内壁均衬有双层 40 mm 厚的聚氨酯高效保温层及高反射率铝箔。然而,在长时间的测试中,该试验系统仍不可避免地会通过对流和辐射向环境散失部分热量。多孔砖试件被精确置于箱体中部(700 mm 高度),作为分隔上部“热区”与下部“冷区”的热桥。



(a) 封装载体与密封件
(a) The encapsulation carriers and sealing components

(b) 封装完成的圆柱形 PCM 单元
(b) The assembled cylindrical PCM units

(c) 集成 PCM 单元后的相变储能多孔砖成品
(c) The final phase change energy storage porous brick with integrated PCM units

图 2　PCM 宏观封装及储能砖制备流程示意图

Fig. 2　Schematic of the PCM macro-encapsulation and the energy storage brick preparation process

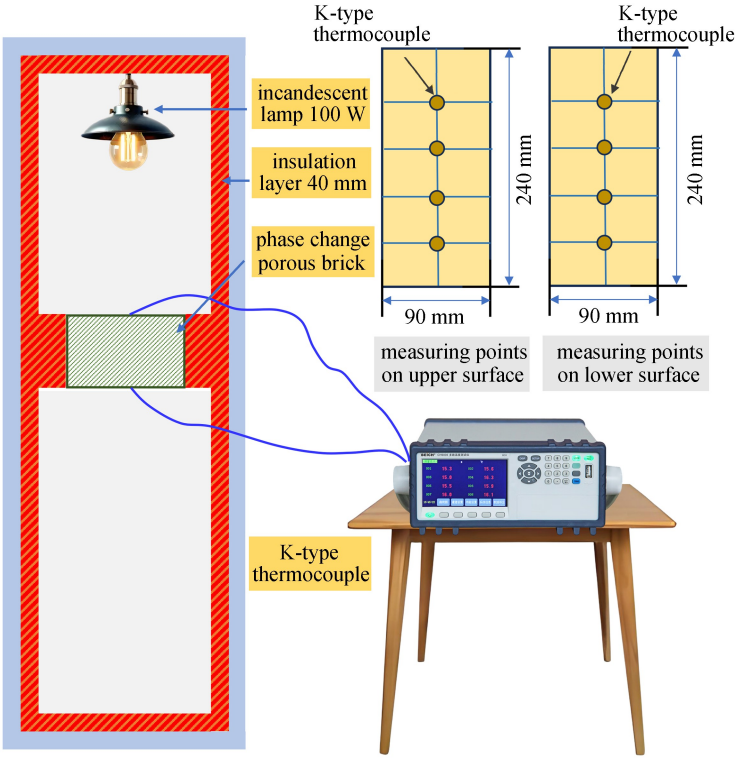


图 3　多孔砖热工性能测试系统及测点布置示意图

Fig. 3　Schematic of the thermal performance test system and thermocouple layout for the phase change energy storage porous brick

非对称热边界条件的构建方式如下:

(a) 热区(模拟室外环境):在上部空间中心安装一盏 100 W 白炽灯,通过热辐射持续加热试件上表面,以模拟太阳辐射及室外高温环境。

(b) 冷区(模拟室内环境):下部空间为一个密闭的被动式热环境.其内部温度的演变主要受通过试件传递而来的热量所驱动,以此模拟一个稳定的室内热环境.

温度演化数据由安柏 AT4524 多路温度记录仪配合 K 型热电偶进行精确监测,如图 3 所示.为全面捕捉表面温度分布,试件的上、下两个表面均采用了相同的五点式测点布局:即在表面几何中心及沿中心线对称布置共五个热电偶.

2) 测试流程

为确保初始条件一致,所有试件在测试前均在−15 ℃环境下进行 2 h 的恒温预处理.随后,采用高导热性胶带将 K 型热电偶紧密粘贴于预设测点.测试启动后,数据记录仪以 1 min 的时间间隔自动采集并存储所有测点的温度数据.整个试验在白炽灯的持续加热下进行,总时长为 720 min(12 h),以确保捕捉到完整的热响应过程.

2 有限元模型构建与验证

2.1 几何模型与材料属性

本研究的物理模型以一种标准规格的粉煤灰多孔砖为研究对象.该砖体的外形轮廓尺寸为 240 mm×115 mm×90 mm,固有孔洞率为 22.7%.如图 4 所示,砖体内部沿其厚度方向均匀布有三排共 20 个圆形贯穿孔洞,所有孔洞直径均为 20 mm .为优化其结构稳定性,孔洞布局设置为中间排 6 个,内外两侧排各 7 个.

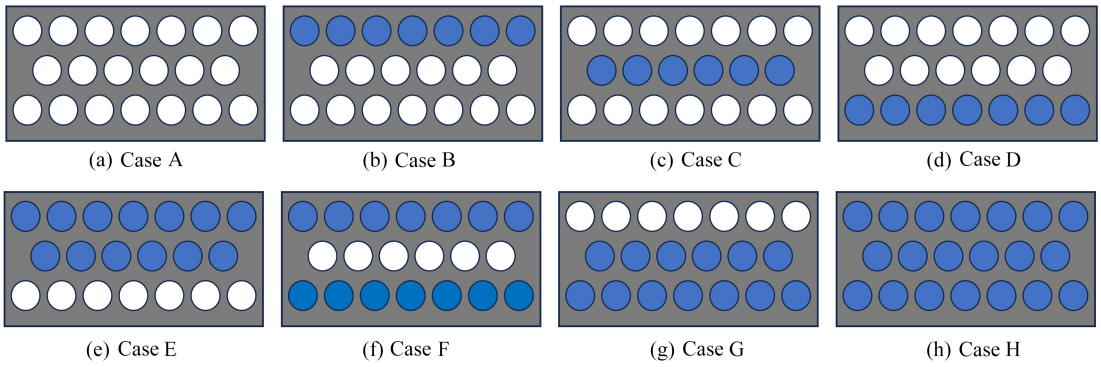


图 4 相变储能多孔砖的几何结构及 8 种 PCM 布局方案示意图

Fig. 4 Geometric structures of the phase change energy storage porous brick and schematic of the 8 PCM layout cases

相变储能砖的构建方式设定为:将 PCM 预封装于薄壁中空钢管内,形成独立的圆柱形相变胶囊单元.随后,将这些相变胶囊单元嵌入指定的砖体孔洞中,并假设单元与孔壁间为理想热接触.

为系统性地评估 PCM 空间布局策略对砖体宏观热工性能的影响,本研究设计了如图 4 所示的 8 种填充方案(定义为 Case A—Case H).这些方案旨在考察不同 PCM 体积分数(通过单层、双层及三层填充实现)及相变层在砖体内部空间位置(外侧、中间、内侧)的耦合效应,从而构成本次数值研究的系列几何模型.

数值模型所涉及的材料主要包括 RT-27 型 PCM、粉煤灰砖基体及钢制封装管.其关键热物性参数主要依据相关文献或通过试验测定,具体数值如表 1 所示.

需要指出的是,考虑到计算效率与物理精度的平衡,本研究将三维多孔砖的传热过程简化为二维模型进行求解.这一简化策略是基于以下物理特征与文献依据做出的:

1) 几何结构的平移对称性:本研究所用的多孔砖在高度方向上具有几何均一性(extruded geometry).在热工测试工况下,侧面及顶底面通常被处理为绝热边界,热流主要沿厚度方向的一维路径传递.因此,选取垂直于热流方向的典型二维截面(representative cross-section),足以捕捉主导热阻分布和相变界面的演化特征.

2) 模型精度的验证:既往针对类似多孔相变围护结构的数值研究已证实了二维简化的有效性.例如,Chihab 等[27] 系统对比了多孔砖的三维全尺寸模型与二维简化模型,结果表明两者在预测内表面温度及热流峰值方面的平均相对误差低于 5%,且二维模型能显著降低计算成本.此外,Luo 等[28] 与 Gao 等[29] 在处理类似孔洞填充结构时,也均采用了二维模型并获得了与试验高度吻合的结果.

基于此,本研究采用二维模型来评估不同 PCM 填充策略对墙体宏观热工性能(如延迟时间和衰减倍

数)的影响,这在保证工程精度的前提下实现了长周期模拟的可行性.

表 1　模型所用材料的热物性参数

Table 1　Thermophysical properties of the materials used in the model

property (unit)	PCM(validation) paraffin	PCM(simulation) RT-27	matrix porous brick	encapsulation (validation) PVC pipe	encapsulation (simulation) steel pipe
density/(kg/m^3)	850	870 (solid) 760 (liquid)	1 976	1 380	7 850
thermal conductivity/(W/(m·K))	0.20	0.24 (solid) 0.15 (liquid)	0.77	0.14	44.50
specific heat/(J/(kg·K))	2 000	1 800 (solid) 2 400 (liquid)	835	1 000	475
latent heat of fusion/(J/g)	114.35	179.0	–	–	–
melting temperature/℃	17.56 ~ 26.30	24.0	–	–	–
data source	exp. (DSC)	ref. [27,30]	ref. [27]	standard lib.	standard lib.

2.2　物理模型与基本假设

本研究旨在揭示相变储能多孔砖在非稳态环境下的热湿耦合传递机理.鉴于该过程涉及复杂的固液相变与多尺度传热,为了在保证物理保真度的前提下实现高效计算,本研究基于几何特征与热力学量级分析,对物理模型进行了以下关键简化与假设:

1) 维度的合理简化

考虑到多孔砖试件在高度方向上具有显著的几何平移对称性(translational symmetry),且在热工测试及实际墙体传热工况下,热流主要沿厚度方向(即室内外温差方向)传递,侧面及顶底面可视作绝热边界.因此,选取垂直于高度方向的典型二维截面进行模拟足以捕捉主导热阻分布与相变界面的演化特征.既往针对类似多孔砖结构的数值研究[4,27-28]已证实,相较于全尺寸三维模型,二维简化模型在预测内表面温度及热流峰值方面的偏差通常小于 5%,具有良好的工程适用性.

2) 传热模式的简化(忽略自然对流)

模型假设 PCM 区域的传热主要由热传导控制,忽略液相区的自然对流效应.这一简化基于两点考量:① 几何尺度限制:既往研究[30]表明,PCM 熔化过程中的自然对流强度表现出强烈的尺寸依赖性.本研究中封装孔径较小(22 mm),显著抑制了浮力驱动对流环流的发展.② 模型精度验证: Chihab 等[27]的对比研究指出,在类似受限空间尺度下,忽略自然对流引入的计算误差在工程允许范围内.因此,为了兼顾跨气候区长周期模拟的计算效率,本文采用纯导热模型.

3) 界面接触模型(理想热接触)

模型假设 PCM 封装层与多孔砖基体之间为理想热接触.这一假设基于热阻量级分析(scale analysis):在本研究的宏观尺度(厘米级)下,材料本体的热阻(bulk thermal resistance,$R \sim L/k$)远大于典型的界面接触热阻($R_c \sim 10^{-4}$ m^2·K/W).由于传热过程处于"本体热阻主导"区域,忽略界面接触热阻不会改变温度场的整体演化趋势,且能显著降低计算不确定性.这一处理方法也与 Gao 等[29]相关研究保持一致.

基于上述简化策略,本数值模型还包含以下基本假设:

(a) 材料属性:假定多孔砖基材与 PCM 均为均匀且各向同性材料.除相变过程中的等效热物性随温度动态变化外,其余物性参数视为常数.

(b) 相变行为:PCM 的相变发生在一个特定的温度区间(糊状区),而非单一温度点.忽略相变过程中的体积膨胀或收缩,且不考虑过冷(supercooling)效应.

2.3　数学模型与控制方程

本研究采用等效热容法(effective heat capacity method)对相变储能多孔砖内部的非稳态传热过程,特别是包含固液相变的传热行为,进行理论建模.该方法的核心思想是将相变潜热的影响等效为在相变温度区间内比热容的急剧变化,从而可以用一个统一、连续的瞬态热传导方程来描述整个计算域,有效避免了对固液界面的直接追踪.

2.3.1 瞬态传热控制方程

在不考虑内部对流的情况下,整个相变储能多孔砖(包括砖体基材和 PCM)的瞬态热传导控制方程可以统一表示为

$$\rho C_{\mathrm{p}} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla\cdot(-k_{\mathrm{p}}\nabla T) = 0, \tag{1}$$

式中,ρ 为材料的密度(kg/m^3);C_{p} 为材料的等效比热容(J/(kg·K));k_{p} 为材料的导热系数(W/(m·K));T 为温度(K);t 为时间(s);∇为 Hamilton 算子.对于多孔砖基材,ρ,C_{p},k_{p} 均为常数;而对于 PCM,这些物性参数则是与温度相关的函数.

2.3.2 相变过程的物性模型

为了在方程(1)中精确描述 PCM 的相变行为,我们引入了与温度相关的液相分数函数 $B(T)$.该函数表征了 PCM 在相变温度区间内的熔化程度:

$$B(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{\mathrm{m}} - \Delta T/2, \\ \dfrac{T - T_{\mathrm{m}} + \Delta T/2}{\Delta T}, & T_{\mathrm{m}} - \Delta T/2 \leqslant T \leqslant T_{\mathrm{m}} + \Delta T/2, \\ 1, & T > T_{\mathrm{m}} + \Delta T/2, \end{cases} \tag{2}$$

式中,T_{m} 为 PCM 的中心相变温度(K);ΔT 为相变发生的温度区间宽度(K).$B(T) = 0$ 表示 PCM 处于完全固态,$B(T) = 1$ 表示其处于完全液态,而在相变区间内,$B(T)$ 从 0 到 1 线性过渡.

基于液相分数 $B(T)$,PCM 在相变过程中的有效密度 $\rho(T)$ 和有效导热系数 $k(T)$ 可通过固、液两相物性的加权平均计算得出:

$$\rho(T) = \rho_{\mathrm{s}}(1 - B(T)) + \rho_{\mathrm{l}}, \tag{3}$$

$$k(T) = k_{\mathrm{s}}(1 - B(T)) + k_{\mathrm{l}}, \tag{4}$$

式中,下标 s 和 l 分别代表固相和液相.

PCM 的等效比热容 $C_{\mathrm{p}}(T)$ 是整个等效热容法的核心,它由显热部分和潜热部分构成:

$$C_{\mathrm{p}}(T) = C_{\mathrm{p,s}}(1 - B(T)) + C_{\mathrm{p,l}}B(T) + L_{\mathrm{m}}D(T), \tag{5}$$

式中,$C_{\mathrm{p,s}}$ 和 $C_{\mathrm{p,l}}$ 分别为固、液相比热容;L_{m} 为相变潜热(J/kg).第一项是显热比热容的加权平均,第二项 $L_{\mathrm{m}}D(T)$ 代表了相变潜热的影响.其中,$D(T)$ 是一个分布函数,物理意义上是液相分数 $B(T)$ 对温度的导数,其表达式为

$$D(T) = \frac{\mathrm{d}B(T)}{\mathrm{d}T} = \begin{cases} \dfrac{1}{\Delta T}, & T_{\mathrm{m}} - \Delta T/2 \leqslant T \leqslant T_{\mathrm{m}} + \Delta T/2, \\ 0, & \text{otherwise}. \end{cases} \tag{6}$$

该函数确保了相变潜热 L_{m} 仅在温度区间 ΔT 内被平滑地吸收或释放,其在整个相变区间内的积分为 1.

2.4 初始与边界条件

为确保对不同填充方案热性能评估的公正性,本研究对所有 8 种相变储能多孔砖模型设定了统一的初始与边界条件.

2.4.1 初始条件

假设模型在初始时刻($t = 0$)处于均匀的温度场中,其温度设定为乌鲁木齐地区夏季典型的夜间最低温度.数学表达式如下:

$$T(x,y,z,0) = T_0 = 289.45\ \mathrm{K}(16.3\ ^{\circ}\mathrm{C}). \tag{7}$$

2.4.2 边界条件

根据物理模型的几何特征与热流方向,设定了如下边界条件.

1) 绝热边界:模型的上、下、前、后四个表面被设定为理想绝热边界,表示在这些方向上没有热量传递.

$$-\boldsymbol{n}\cdot(k\nabla T) = 0. \tag{8}$$

2) 外表面边界(左侧界面):此界面代表与室外环境的交互,承受动态变化的温度作用.为综合考虑室外空气温度与太阳辐射的共同影响,采用第三类边界条件,并引入室外空气综合温度($T_{\mathrm{sol\text{-}air}}$)的概念.其表达

式如下:

$$T\big|_{\text{left}} = T_{\text{sol-air}}\,. \tag{9}$$

3) 内表面边界(右侧界面):此界面与室内环境进行对流换热,同样采用第三类边界条件.

$$-\boldsymbol{n}\cdot(k\nabla T)\big|_{\text{right}} = h_{\text{in}}(T_{\text{w,in}} - T_{\text{in}})\,, \tag{10}$$

式(8)—(10)中, T_0 为初始温度; $\boldsymbol{n}$ 为边界的法向向量; k 为材料导热系数; $T_{\text{sol-air}}(t)$ 是随时间变化的室外空气综合温度; h_{in} 为室内表面对流换热系数; $T_{\text{w,in}}$ 为内表面温度; T_{in} 为室内设定温度.

2.4.3　参数设定

本研究的模拟背景设定于中国乌鲁木齐地区典型的夏季气候条件,该地区以其显著的昼夜温差而著称.具体参数设定如下:

1) 初始与室内温度:基于当地夏季夜间最低气温,设定模型的初始温度 T_0 为 16.3 ℃(289.45 K).为维持舒适的室内环境,室内恒定温度 T_{in} 设定为 18 ℃(291.15 K).

2) 对流换热系数:依据《民用建筑热工设计规范》(GB50176—2016),室外表面对流换热系数 h_{out} 取值为 19 W/(m^2·K),室内表面对流换热系数 T_{in} 取值为 8.7 W/(m^2·K).

3) 室外空气综合温度 $T_{\text{sol-air}}$: 该温度是驱动整个模型热量传递的核心边界条件,它综合了实测的室外气温 $T_{\text{out}}(t)$ 和太阳总辐射强度 $I(t)$.其计算公式如下:

$$T_{\text{sol-air}}(t) = T_{\text{out}}(t) + \frac{\alpha I(t)}{h_{\text{out}}}, \tag{11}$$

式中,墙体外表面的太阳辐射吸收系数 α 取值为 0.56.基于当地 7 月份的气象数据计算得到的 $T_{\text{sol-air}}$ 动态变化曲线如图 5 所示.该曲线呈现周期性波动,峰值达到 318 K(44.85 ℃),谷值降至 290 K(16.85 ℃),精准地反映了当地剧烈的日照与温度变化特征.

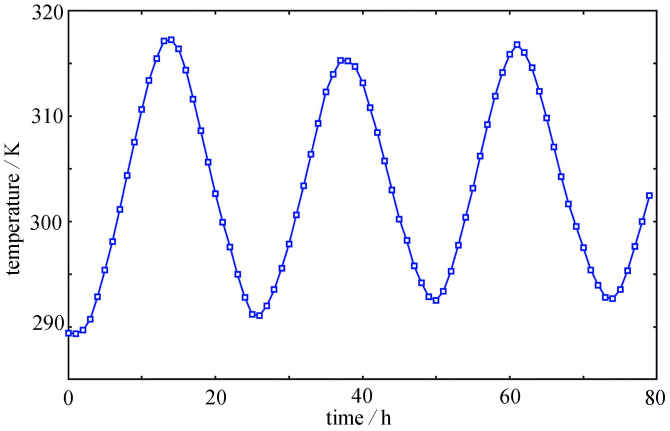


图 5　乌鲁木齐夏季典型日的室外空气综合温度变化曲线

Fig. 5　The diurnal variation of the sol-air temperature on a typical summer day in Urumqi

2.5　数值方法独立性验证

为确保数值解的准确性并消除离散化误差的干扰,本研究在进行正式模拟前,对计算网格的收敛性与时间步长的独立性进行了系统性验证.所有验证均基于三层相变储能多孔砖模型,并在 COMSOL Multiphysics 平台中进行.

2.5.1　网格收敛性分析

采用结构化网格对计算域进行离散化.我们设计了三种不同密度的网格方案:粗糙(60 688 个单元)、适中(187 451 个单元)与精细(347 531 个单元).以墙体内表面的平均温度作为关键监测指标,在相同的边界条件与时间步长(60 s)下进行计算,结果如表 2 所示.

对比表 2 中的数据,从粗糙网格到适中网格,内表面平均温度的相对偏差为 1.78%,差异显著.然而,当网格从适中加密至精细时,温度仅变化了 0.12 ℃,相对偏差骤降至 0.33%.如此微小的差异表明,计算结果已收敛,进一步加密网格对求解精度无显著提升,反而会大幅增加计算成本.因此,“适中”网格方案(187 451 个单元)被确认为满足网格收敛性要求,并用于后续所有模拟研究.该网格方案的具体划分情况如图 6 所示.

2.5.2　时间步长独立性分析

在已确定的“适中”网格基础上,我们进一步考察了时间步长对计算结果的影响.选取了三个数量级的时间步长:1 s,60 s 和 600 s 进行测试.如表 2 所示,当时间步长从 1 s 增加到 60 s 时,内表面平均温度的相对偏差仅为 0.047%,可以认为结果已不依赖于时间步长的选择.综合权衡计算精度与求解效率,本研究最终采用 60 s 作为数值模拟的时间步长.

表 2 网格收敛性与时间步长独立性研究结果

Table 2 Results of the grid convergence and time-step independence study

grid density	time step/s	avg. inner surface temp./℃	relative deviation/%
347 531(refined)	60	37.367 4	0.33 (vs. moderate)
187 451(moderate)	60	37.489 6	baseline for grid
60 688(coarse)	60	38.157 0	1.78 (vs. moderate)
187 451 (moderate)	1	37.507 4	baseline for time step
187 451(moderate)	60	37.489 6	0.047 (vs. 1 s)
187 451 (moderate)	600	37.460 5	0.125 (vs. 1 s)

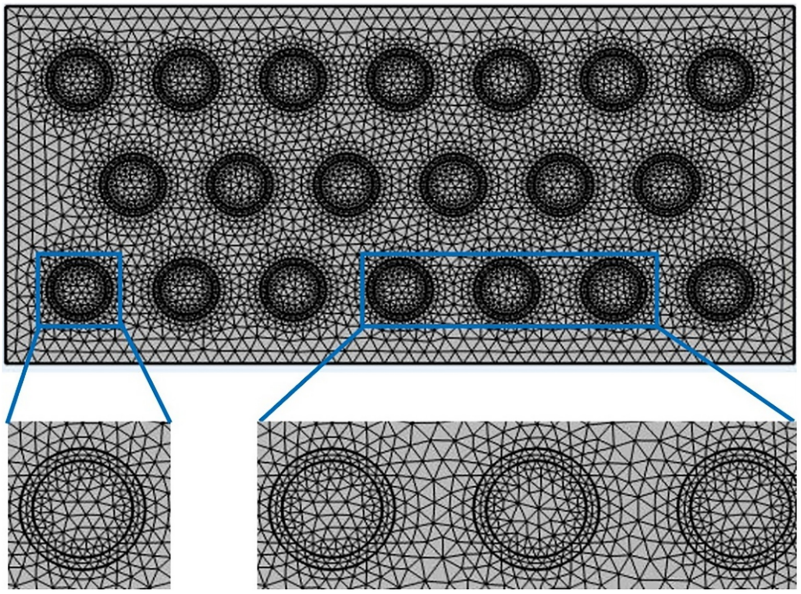


图 6 三层相变储能砖数值模型的网格划分

Fig. 6 The meshing of the numerical model for the 3-layer phase change energy storage brick

2.6 热性能评价指标

为定量评估相变储能多孔砖在动态热环境下的隔热与调温性能,本文选取以下四个关键指标进行分析.

1) 衰减倍数 (decrement factor, δ_{DF})

衰减倍数表征了建筑围护结构对室外周期性温度波动的衰减能力.其定义为在周期性热作用下,室外空气综合温度波幅与内表面温度波幅的比值.该值越大,表明墙体对外界热波的衰减作用越强,计算公式为

$$\delta_{\mathrm{DF}}=\frac{T_{\mathrm{e,max}}-T_{\mathrm{e,min}}}{T_{\mathrm{i,max}}-T_{\mathrm{i,min}}}, \tag{12}$$

式中, $T_{\mathrm{e,max}}$, $T_{\mathrm{e,min}}$ 分别为室外空气综合温度的峰值与谷值(℃); $T_{\mathrm{i,max}}$, $T_{\mathrm{i,min}}$ 分别为相变储能砖内表面温度的峰值与谷值(℃).

2) 延迟时间(time lag, t_{TL})

延迟时间反映了建筑围护结构的热惰性(thermal inertia),即阻滞热波穿透的能力.其定义为内表面温度波峰出现时刻滞后于室外空气综合温度波峰的时间差,计算公式为

$$t_{\mathrm{TL}}=t_{\mathrm{i,max}}-t_{\mathrm{e,max}}, \tag{13}$$

式中, $t_{\mathrm{i,max}}$, $t_{\mathrm{e,max}}$ 分别为相变储能砖内侧和外侧表面达到波峰温度的时间.

3) 相变潜热利用率(latent heat utilization rate, η)

该指标用于定量评估 PCM 在动态相变过程中实际发挥作用的程度.其物理含义为在一个完整的热作用周期内,实际参与相变(熔化或凝固)的 PCM 体积占其总量的比例.基于数值模拟获得的液相分数 (B) 演变,其计算公式为

$$\eta = (B_{\max} - B_{\min}) \times 100\%, \tag{14}$$

式中, $B_{\max}$, $B_{\min}$ 分别为相变材料液相体积分数最大值与最小值.

4) 热流振幅(heat flux amplitude, A_{HFA})

热流振幅描述了通过围护结构进入室内的热流密度随时间的波动范围,直接反映了室内热负荷的稳定性.其定义为同一波动周期内,内表面热流密度的最大值与最小值之差,计算公式为

$$A_{\mathrm{HFA}} = q_{\mathrm{i,max}} - q_{\mathrm{i,min}}, \tag{15}$$

式中, $q_{\mathrm{i,max}}$, $q_{\mathrm{i,min}}$ 分别为相变储能砖内表面的最大和最小热通量值.

3　结果与讨论

3.1　验证模型

为确保本研究数值模型的物理真实性与预测精度,我们将模型计算结果与试验测量数据进行了严格的时空演变对比.为了定量评估模拟值 (T_{sim}) 与试验值 (T_{exp}) 之间的吻合度,引入了最大相对误差 δ_{MRE} 和平均绝对相对误差 δ_{MRAE} 作为评价指标:

$$\delta_{\mathrm{MRE}} = \max\left(\left|\frac{x_{\mathrm{sim}} - x_{\mathrm{exp}}}{x_{\mathrm{exp}}}\right|\right) \times 100\%, \tag{16}$$

$$\delta_{\mathrm{MRAE}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{x_{\mathrm{sim}} - x_{\mathrm{exp}}}{x_{\mathrm{exp}}}\right| \times 100\%. \tag{17}$$

验证结果如图 7 所示.图 7(a)展示了下表面温度的模拟曲线与试验数据点的对比,图 7(b)则进一步引入了模拟获得的液相分数(liquid fraction)与热流密度(heat flux)演变曲线,以揭示温度变化背后的物理机制.依据液相分数的演变特征 ($B = 0 \sim 1$),我们将整个 720 min 的热响应过程划分为三个典型的热力学阶段:

1) 固态显热升温阶段(sensible heating phase,0~15 min)

在加热初期,PCM 处于完全固态 ($B = 0$).此时,热流密度迅速跃升(图 7(b)蓝色实线),驱动砖体温度快速升高.模拟曲线精准捕捉到了这一瞬态启动特征,与试验数据高度重合.

2) 相变潜热恒温平台区(phase change plateau,15~294 min)

当温度达到相变起始点,PCM 开始熔化,液相分数从 0 逐渐攀升至 1(图 7(b)红色虚线).在此区间,PCM 吸收大量潜热,导致热流密度增长放缓,下表面温度曲线呈现出显著的"平缓台阶"特征.模拟结果显示相变持续时间约为 279 min,这与试验观测到的温度平台期在时间跨度与形态上均保持了极高的一致性,证明模型准确反映了 PCM 的潜热蓄能机制.

3) 液态显热升温阶段(post-melting heating phase,294~720 min)

随着液相分数达到 1,PCM 完全熔化,系统重新进入显热传热模式,温度与热流密度继续稳步上升.

从宏观统计看, 模拟曲线在全周期内表现出优异的拟合度, 绝大部分模拟数据点均落在试验值±10%的误差带内.经计算, 全过程的 δ_{MARE} 为 3.53%, δ_{MRE} 为 8.82%, 均满足工程热物理模拟通常要求的精度阈值(<10%).这有力地证明了该数值模型能够可靠捕捉相变储能多孔砖内部的非稳态传热规律.

尽管整体吻合良好,但细致审视揭示了在相变后期及液态升温阶段(约 300 min 后),模拟值略微高于试验值.我们认为这种系统性微小偏差主要源于以下物理现实与模型理想化假设之间的矛盾:

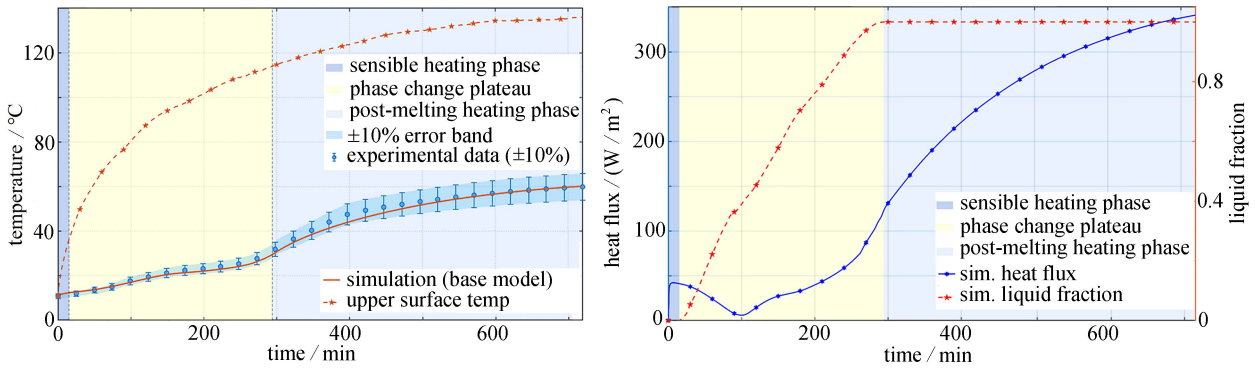
1) 理想热边界与累积热耗散:数值模型采用了理想绝热边界假设,而试验系统在长达 12 h 的运行中,不可避免地通过自然对流和辐射向环境发生热耗散.图 7(a)显示,随着时间推移(尤其是进入高温段的第三阶段),这种未经模型补偿的热损失累积效应逐渐显现,导致试验温升速率略低于无损耗的模拟预测值.

2) 界面接触热阻效应:试验中温度传感器与砖体表面存在微观接触热阻,这在热传递路径上引入了额外的阻尼.特别是在热流密度较大的相变初期,该效应可能导致测量信号相对于真实表面温度产生微小的幅值衰减与响应滞后.

3) 相变本构关系的简化:模型采用恒定潜热值的简化处理,而实际材料(根据 DSC 分析)的熔化是一个包含过冷与非线性比热容变化的渐进过程.这种简化可能导致模拟曲线在相变结束的转折点(约 294 min

处)表现得比试验曲线更为尖锐.

综上所述,图 7 中的多维验证结果表明,尽管存在由边界简化带来的微小系统误差,该数值模型已证实具备足够的物理保真度与计算精度,能够作为一种可靠的工具用于后续对相变储能砖热性能的参数化研究.



(a) 10%误差范围验证 (b) 机制分析

(a) The validation with 10% error bars (b) The mechanism analysis

图 7 模拟与试验测得的下表面温度演化曲线

Fig. 7 Evolution curves of the lower surface temperature: simulation vs. experiment

3.2 PCM 空间布局对相变储能多孔砖传热性能的影响

为系统阐明 PCM 在多孔砖内的空间布局对其热调控性能的影响机制,本研究设计了不同层级的 PCM 填充构型(单层与双层构型).通过对周期性热边界条件下砖体动态热响应的数值模拟,采用衰减倍数、延迟时间、相变潜热利用率和热流振幅等关键热工性能指标,对不同空间布局策略的热工性能进行量化评估与对比分析.

3.2.1 单层 PCM 构型的影响分析

本小节旨在探究在单层 PCM 构型中,相变层于多孔砖不同深度(外、中、内三层)的布局对墙体热工性能的调控规律.研究设置了三种工况:Case B(PCM 层置于外层)、Case C(PCM 层置于中层)和 Case D(PCM 层置于内层),其具体构造如图 4(b)、4(c)、4(d)所示.

图 8(a)与表 3 的量化数据显示,PCM 层的空间位置对砖体内表面的温度波动具有决定性影响.

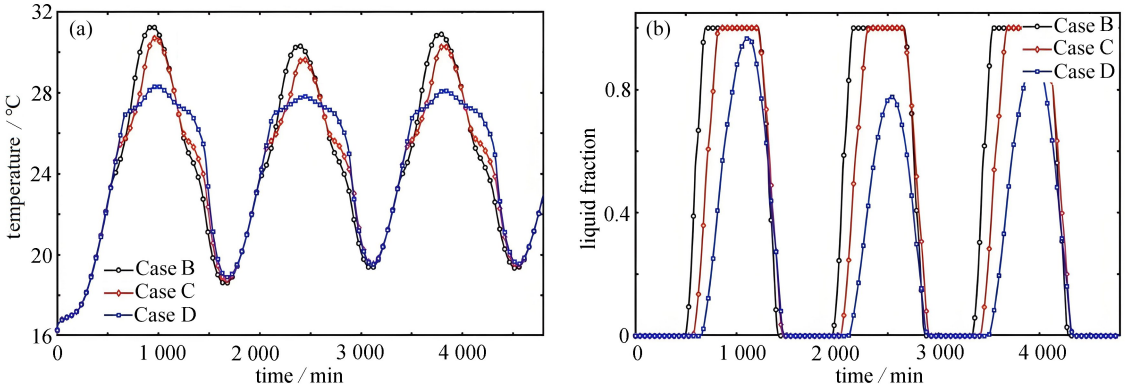


图 8 单层 PCM 构型中不同相变层布局下的内表面温度与液相分数演化

Fig. 8 The internal surface temperature and liquid fraction evolution of porous bricks with different PCM layer layouts in a single-layer configuration

当 PCM 层由外侧(Case B)移至内侧(Case D)时,内表面峰值温度从 31.27 ℃显著降低至 28.31 ℃(降幅达 9.5%),而谷值温度则从 18.58 ℃微幅提升至 18.88 ℃.这一“削峰填谷”效应使得内表面温度振幅由 12.69 ℃大幅缩减至 9.43 ℃,降幅高达 25.7%.在热延迟与衰减特性方面,内移的 PCM 层同样表现出优越性能.Case D 的延迟时间(t_{TL})达到了 146 min,相比 Case B(102 min)增加了 43.1%;其衰减倍数(δ_{DF})也从 2.06 提升至 2.77,增幅为 34.5%.从热流角度分析(图 9),Case D 的内表面峰值热流密度(89.47 W/m^2)相较于

Case B(115.15 W/m^2)降低了 22.3%.综上所述,当单层 PCM 构型中的相变层布局于内侧(Case D)时,相变储能多孔砖展现出最优的保温隔热与热稳定性.

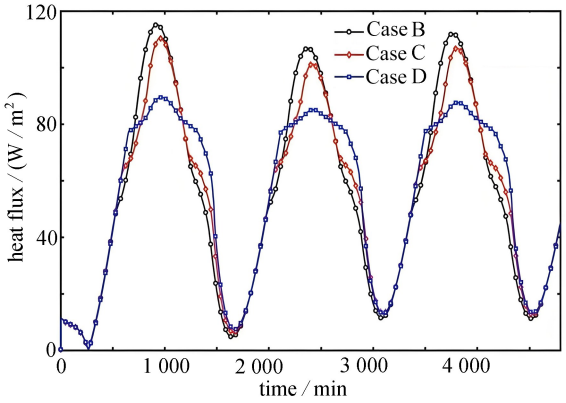


图 9　不同相变层布局下的内表面热流密度

Fig. 9　Internal surface heat flux densities of porous bricks with different PCM layer layouts in a single-layer configuration

表 3　不同单层 PCM 构型对相变储能多孔砖热工性能指标的影响

Table 3　Effects of different single-layer PCM configurations on the thermal performance indicators of the phase change energy storage porous brick

evaluation index	Case B	Case C	Case D
maximum temperature of the inner surface/ ℃	31.27	30.71	28.31
minimum temperature of the inner surface/ ℃	18.58	18.75	18.88
internal surface temperature amplitude/ ℃	12.69	11.96	9.43
attenuation multiple	2.06	2.19	2.77
delay time /min	102	135	146
latent heat utilization of the PCM	1.00	1.00	0.97

上述热工性能的差异源于 PCM 层在不同空间位置所处的局部热环境及其对相变过程的调控机制.图 10 直观地展示了熔化过程中砖体内部的温度场和热流通量分布,为揭示其内在机理提供了视觉证据.

1) 熔化过程("削峰"机制):如图 8(b)所示,PCM 的相变启动时间随其向内移动而推迟(Case B: 488 min; Case C: 566 min;Case D: 645 min).从图 10 的温度云图可以看出,在 Case B 中,热波迅速穿透外壁,使得外层 PCM 过早启动相变.热流矢量图显示,热量在绕过正在熔化的 PCM 单元后,仍有相当一部分继续向内传递.相比之下,在 Case D 中,热波在到达内层 PCM 时已显著衰减,热驱动力减弱.这使得其熔化过程(645 ~1 117 min)被显著拉长, 且熔化阶段完美地覆盖了外部温度峰值时段.图 10(c)清晰地显示, 在 1 000 min 至 1 080 min,内层 PCM 单元周围的温度梯度平缓,热流矢量密集地汇入 PCM 区域,表明潜热吸收效应在此期间被激活到最大程度,有效阻断了热量向内表面的传递,从而实现了最强的峰值温度削减能力.

2) 凝固过程("填谷"机制):对凝固过程的分析表明,三种工况的凝固时长分别为 197 min(Case B), 250 min(Case C)和 355 min(Case D).图 11 的温度场分布为此提供了物理解释.在凝固阶段,PCM 单元成为内部热源,向周围释放储存的潜热.热流矢量图显示,热量从 PCM 层同时向较冷的外侧和较暖的内侧扩散.然而,由于所有工况的凝固过程均在室外温度达到谷值(1 555 min)之前完成,这意味着储存的潜热被过早释放,未能有效补偿夜间最低温时段的热量损失.因此,"填谷"效果有限,仅使内表面谷值温度提升了约 0.3 ℃.

综上所述,将单层 PCM 构型中的相变层布局于靠近内表面的位置,通过优化相变过程与外部温度波动的时序关系,能够最有效地发挥其潜热调控作用,实现日间"削峰"与夜间"填谷"的双重目标,从而显著改善围护结构的热稳定性.

3.2.2　双层 PCM 构型的影响分析

为深入探究 PCM 层间协同作用及其空间布局对热性能的耦合影响,本小节设计了三种双层 PCM 构型: Case E(1~2 层布局)、Case F(1~3 层布局)和 Case G(2~3 层布局),具体构造如图 4(e)、4(f)、4(g)所示.

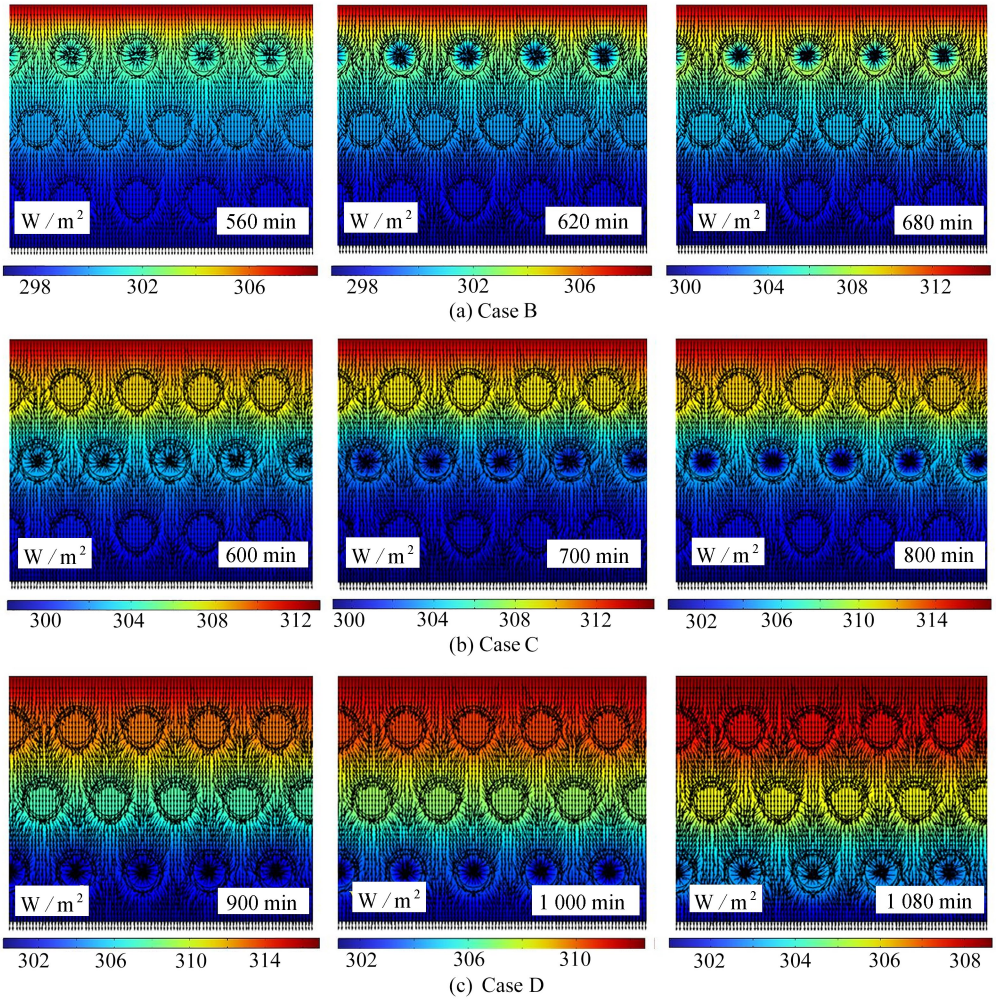


图 10 单层 PCM 构型在熔化过程中的温度场与热流矢量分布

Fig. 10 Temperature fields and heat flux vector distributions during the melting process for single-layer PCM configurations

相较于单层构型,增加 PCM 掺量至双层普遍提升了砖体的热工性能.由图 12(a)和表 4 可知,随着 PCM 层的几何中心向内迁移(从 Case E 到 Case G),热调控效果愈发显著.Case G(2~3 层布局)表现出最优性能,其内表面峰值温度低至 27.71 ℃,温度振幅为 8.48 ℃,相较于性能最弱的 Case E(1~2 层布局),峰值温度降低了 2.56 ℃,振幅减小了 24.5%.在热惯性方面,Case G 的衰减倍数(3.09)和延迟时间(191 min)均为最高.热流分析(图 13)同样印证了此趋势,Case G 的峰值热流(84.29 W/m^2)和热流振幅(73.66 W/m^2)均为最低.

双层 PCM 构型的性能差异核心在于不同空间布局所导致的“热屏蔽”与“相变协同”效应的差异,图 14 和图 15 所呈现的熔化阶段和凝固阶段的温度与热流分布清晰地揭示了这一点.

1) Case E (1~2 层布局):PCM 层集中于外侧,虽能吸收部分初始热冲击,但如图 14(a)和图 15(a)所示,热量可以轻易绕过第二层 PCM,继续向内渗透,导致其对内部热环境的保护作用有限.

2) Case F (1~3 层分离布局):此构型下,外层 PCM(第 1 层)过早相变,而内层 PCM(第 3 层)因所处位置温度较低,相变不完全(潜热利用率仅 0.93),未能形成有效的协同作用.图 14(b)和图 15(b)显示,在 850 min 时,外层 PCM 已接近熔化终点,而内层 PCM 仍有大量固相存在,两者相变时序失配,削弱了整体的储热调峰能力.

3) Case G (2~3 层布局):将两层 PCM 均置于内侧,构成了最有效的热阻区域.如图 14(c)和图 15(c)所示,在 900 min 至 1 050 min 的热流高峰期,热波在到达第二层时已被初步削弱,随即被正在发生相变的第

三层进一步吸收,形成了“串联式”的协同热屏蔽效应.尽管其潜热利用率最低(0.82),但由于其相变过程与热负荷高峰期高度同步,实现了对热流最有效的阻滞.

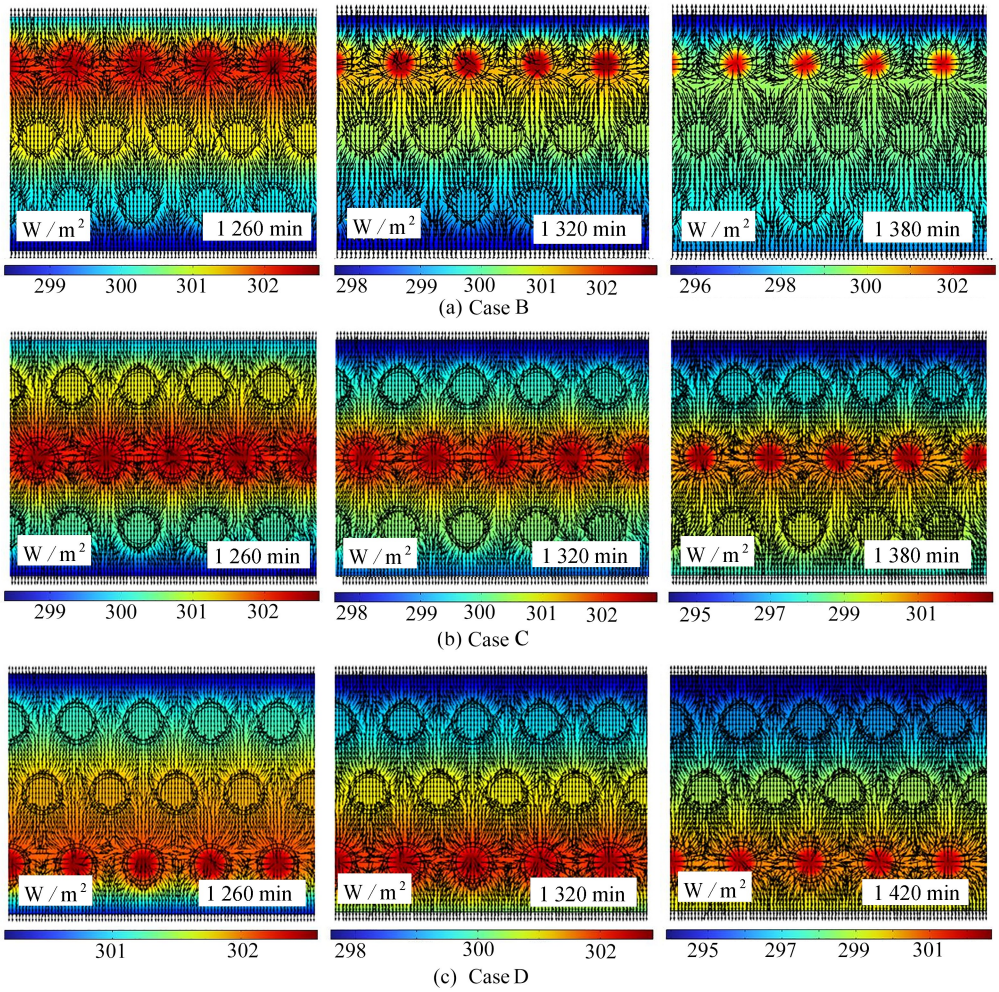
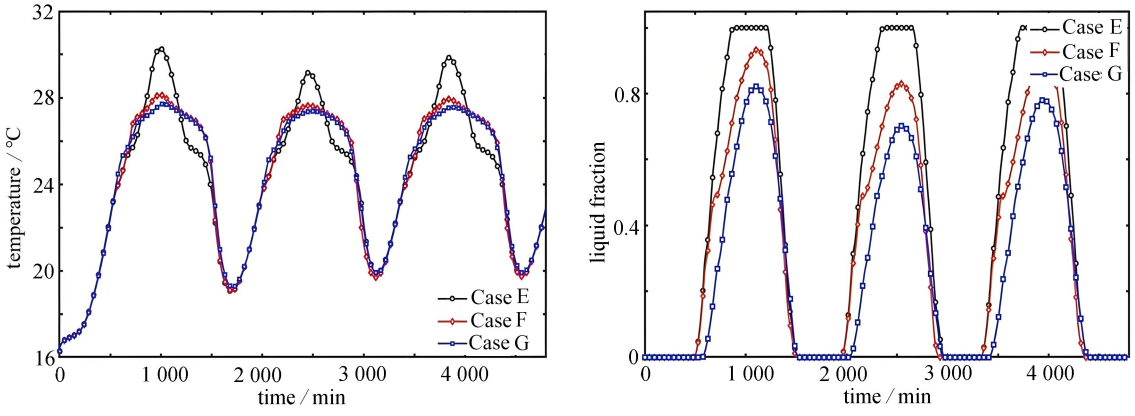


图 11　单层 PCM 构型在凝固过程中的温度场与热流矢量分布

Fig. 11　Temperature fields and heat flux vector distributions during the solidification process for single-layer PCM configurations



(a) 表面温度　　(b) 液体分数

(a) The surface temperature　　(b) The liquid fraction

图 12　不同 PCM 填充位置下相变储能多孔砖内表面温度与液体分数

Fig. 12　The internal surface temperature and the liquid fraction of the PCM porous brick with different PCM filling positions

表 4 双层相变层位置对相变储能多孔砖的影响

Table 4 Effects of the phase change layer position on phase change energy storage porous bricks

evaluation index	Case E	Case F	Case G
maximum temperature of the inner surface/ ℃	30.27	28.12	27.71
minimum temperature of the inner surface/ ℃	19.05	19.08	19.24
internal surface temperature amplitude / ℃	11.23	9.04	8.48
attenuation multiple	2.33	2.89	3.09
delay time /min	158	156	191
latent heat utilization of the PCM	1.00	0.93	0.82

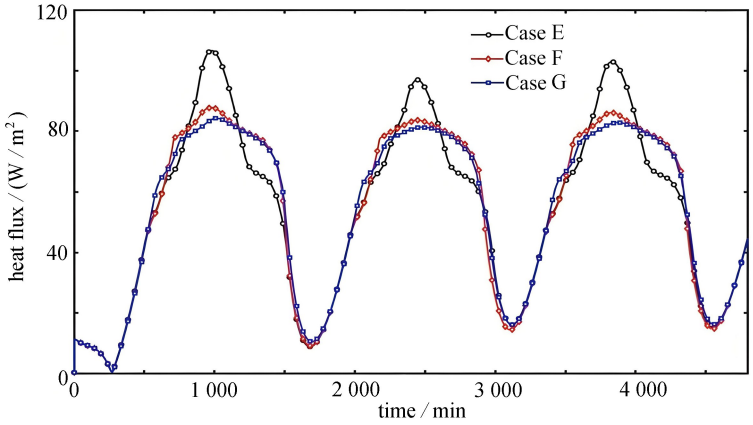


图 13 不同 PCM 填充位置下相变储能多孔砖内表面热流

Fig. 13 The internal surface heat flux of the PCM porous brick with different PCM filling positions

在双层 PCM 构型中,将 PCM 层集中布置于靠近室内的位置(Case G),能够最大化其协同热屏蔽效应,通过优化相变时序与热负荷的匹配,实现最优的热调控性能.

3.3 PCM 体积分数对热工性能的优化及饱和效应分析

为精准评估 PCM 体积分数对多孔砖热工性能的净效应,并确定最优经济体积分数,本小节选取了四种代表性工况进行对比分析:无 PCM 的基准砖(Case A)、单层最优构型(Case D)、双层最优构型(Case G)以及三层全填充构型(Case H).

如图 16 与表 5 所示,随着 PCM 体积分数的增加,砖体的热调控性能呈非线性增强趋势.从无 PCM(Case A)到单层最优(Case D),热工性能获得了质的飞跃:内表面温度振幅骤降了 3.52 ℃(从 12.95 ℃至 9.43 ℃),降幅达 27.2%;延迟时间增加了 54 min .这是性能改善最显著的阶段.

当体积分数由单层增至双层(Case D→Case G),性能继续提升,但增益幅度开始减小.温度振幅进一步降低了 0.95 ℃,延迟时间增加了 45 min .而当体积分数从双层增至三层(Case G→Case H)时,性能提升已趋于饱和,温度振幅仅微降 0.49 ℃,延迟时间增加 25 min .结合热流分析(图 17)可见,热性能增益主要集中在无 PCM(Case A)到单层最优(Case D)的初始阶段,该阶段的峰值热流降幅(26.73 W/m^2)和热流振幅降幅(30.52 W/m^2)远超后续阶段.这种“边际效益递减”规律清晰地表明,无限增加 PCM 体积分数并非提升热工性能的经济有效策略.

潜热利用率的分析为上述饱和效应提供了根本解释.如表 5 所示,单层最优构型(Case D)的潜热利用率高达 0.97.然而,随着 PCM 层数增加,内层 PCM 因处于更弱的热驱动环境中而难以完全相变,导致双层(Case G)和三层(Case H)构型的平均潜热利用率分别下降至 0.82 和 0.83.这意味着增加的 PCM 并未被充分利用,造成了材料的冗余和投资的浪费.

值得注意的是,三层构型(Case H)的平均潜热利用率(0.83)略高于双层构型(Case G, 0.82),表现出微小的数值逆转.这并非违背了边际效益递减规律,而是由层间热驱动力差异导致的统计结果:Case G 仅由热驱动力较弱的内两层(第 2 和 3 层)组成,其单层利用率普遍偏低;而 Case H 虽然也包含利用率低的内层,但其引入了热驱动力最强、利用率最高的首层(第 1 层)PCM .首层 PCM 的高贡献率在加权计算中显著拉升了

整体平均值.这一现象反过来证实了外层 PCM 在相变响应上的主导地位.

综合评估,虽然三层全填充(Case H)在绝对热工参数上表现最佳(温度振幅最低,延迟时间最长),但其相较于单层构型(Case D)的性能提升与其增加两倍的材料成本不成正比,且材料利用率显著降低.因此,Case D(内层单层 PCM 构型)被确定为最优设计方案.该方案在仅使用三分之一 PCM 的条件下,实现了最主要的性能改善,达到了热工效益、材料利用效率与经济成本之间的最佳平衡,最具实际工程应用价值.

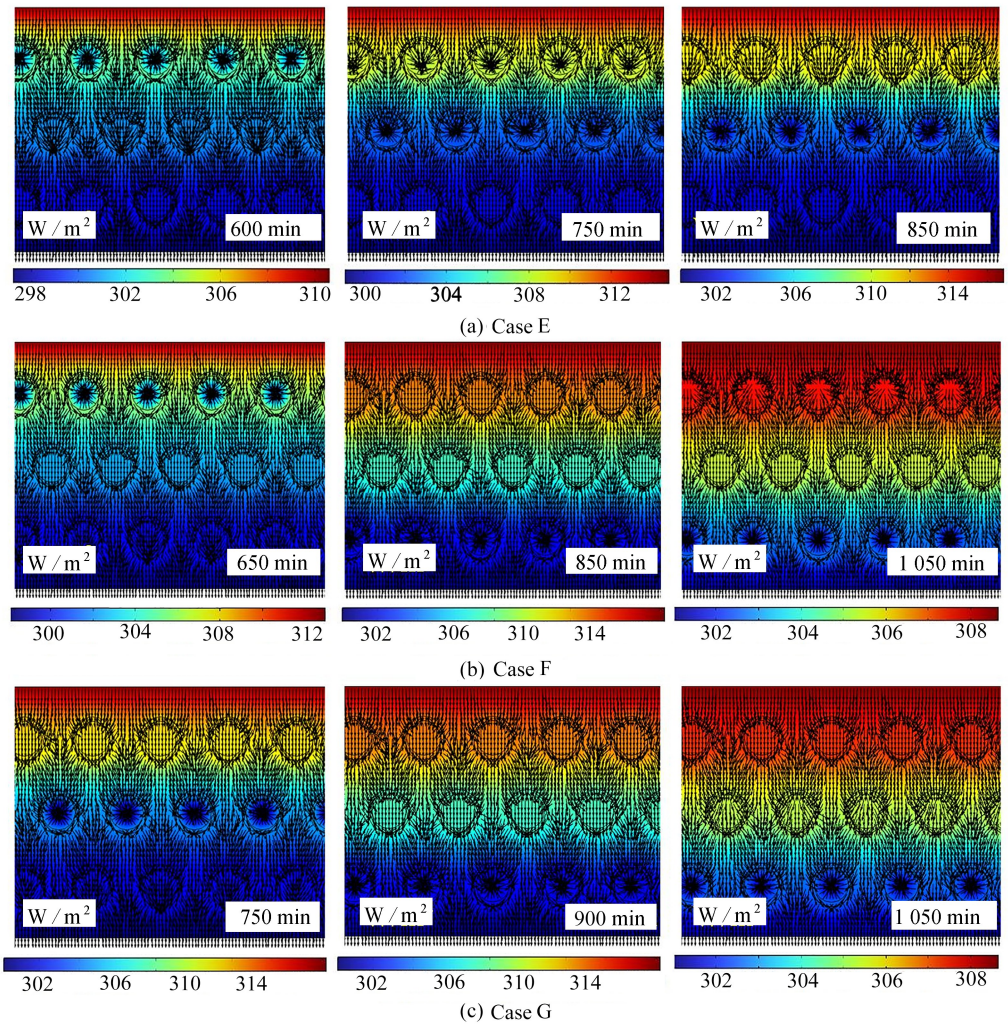


图 14　三种工况下相变储能多孔砖熔化过程的温度场分布

Fig. 14　Temperature field distributions of the phase change energy storage porous brick during melting under 3 working conditions

3.4　气候适用性与研究局限

本研究通过数值模拟确立了相变储能多孔砖的最优布局策略,为了明确该结论的推广边界与潜在限制,本小节从气候适应性与材料长期稳定性两个维度进行讨论.

1) 本研究结论主要基于具有显著昼夜温差的大陆性干旱气候(以乌鲁木齐夏季典型日为例)得出,这种气候条件为 PCM 的被动式相变循环提供了理想的热力学驱动力.

① 布局的普适性:只要目标气候区具备“夏季供冷需求”且存在“能触发 PCM 发生相变的昼夜温差”,“内侧布局”利用 PCM 直接缓冲室内空气温度波动的物理机制依然成立.因此,该布局策略对于类似的炎热干燥或半干旱地区具有重要的参考价值.

② 季节限制:然而,在昼夜温差较小的温和地区,或以保温需求为主的冬季工况下,PCM 可能因驱动力不足而无法完成充分的相变循环,或长期处于“冻结”状态.在此类场景下,该最优布局结论可能不再适用.未来的工作将进一步拓展至多气候区及全年能耗模拟,以建立全季节维度的 PCM 布局优化图谱.

2）本研究基于 PCM 热物性恒定的假设，确立了理想状态下的最优布局基准.在实际长期服役中，PCM 可能面临多次熔融-凝固循环引起的热物性退化（如潜热衰减、相分离等）.现有文献[31]表明，本研究采用的宏观封装结构在物理上具备较好的防泄漏与抗相分离能力，能有效提升系统的循环稳定性.尽管如此，长周期的性能衰减仍可能削弱系统的整体热工效益.未来的研究将引入材料老化动力学模型，评估不同布局策略在 PCM 性能非线性退化条件下的长期有效性与鲁棒性.

3）针对研究中观测到的“夜间填谷效果有限（仅提升 0.3 ℃）”现象，主要归因于单一 PCM 的相变温度设定主要匹配日间吸热需求.在夜间大温差驱动下，PCM 发生过早凝固，潜热未能保留至室外温度最低的时刻释放.为突破这一瓶颈，未来的优化布局将不再局限于单一材料的空间移动，而是向“梯度相变温度”或“级联布局”方向演进.即：在墙体不同深度配置不同熔点的 PCM（例如：外层采用高熔点 PCM 拦截日间热浪，内层采用低熔点 PCM 延迟夜间放热），通过多级相变材料的接力作用，实现“日间高效削峰”与“夜间长效填谷”的协同增强.

4）需指出，本文确定的“最优”方案主要基于热工性能增益与材料体积投入量的物理权衡（即材料利用效率），尚未包含基于具体市场价格的全生命周期成本分析（LCCA）.虽然单层布局在物理上显著降低了材料冗余，但未来的研究仍需结合实际材料单价、施工成本及全寿命周期的节能收益，开展系统的财务经济性评估，以进一步验证该布局策略在工程造价层面的可行性.

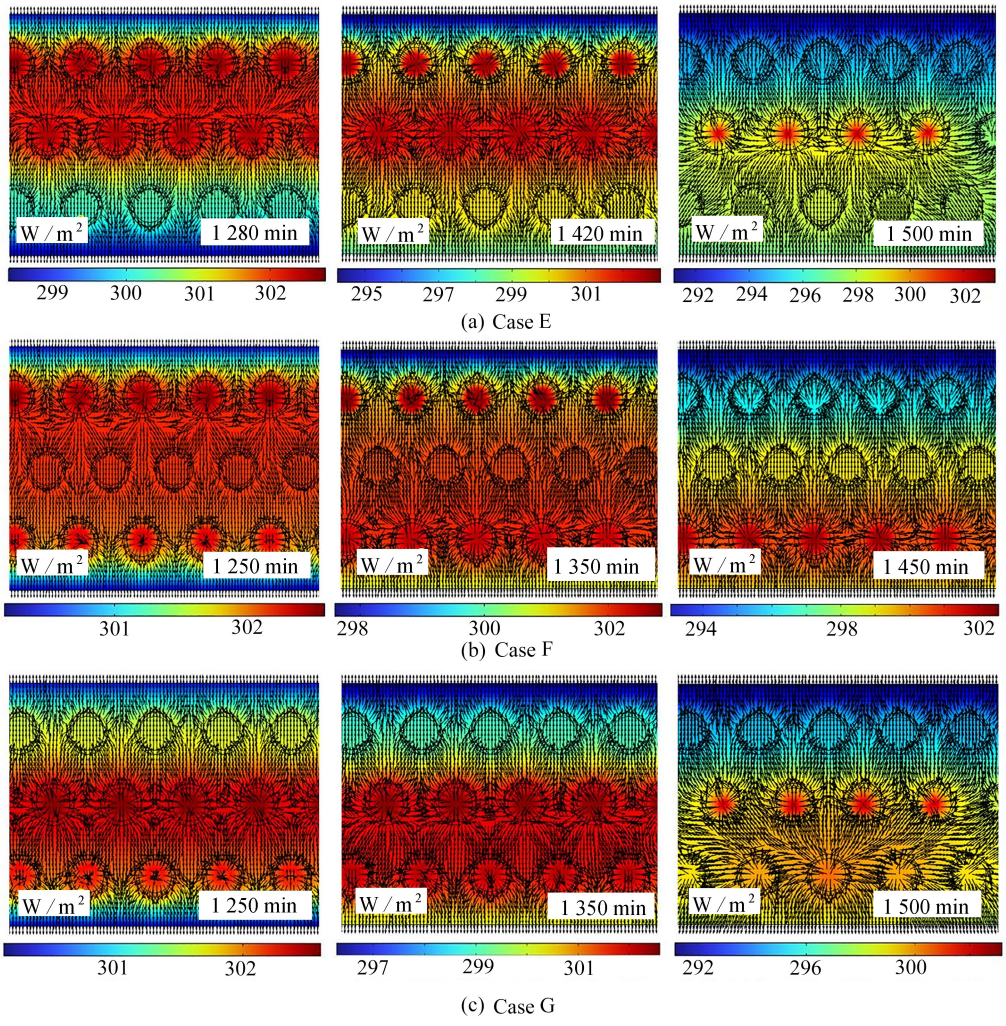
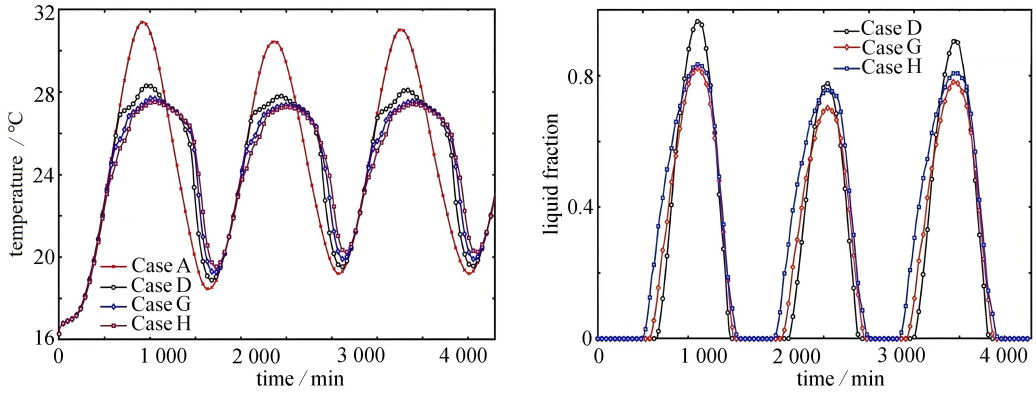


图 15 三种工况下相变储能多孔砖凝固过程的温度场分布

Fig. 15 Temperature field distributions of the phase change energy storage porous brick during solidification under 3 working conditions



（a）表面温度　　（b）液相分数

（a）The surface temperature　　（b）The liquid fraction

图 16　不同 PCM 体积分数下内表面温度与液相分数对比

Fig. 16　Comparison of internal surface temperatures and liquid fractions under different PCM volume fractions

表 5　不同 PCM 体积分数对相变储能多孔砖热工性能指标的影响

Table 5　Effects of different PCM volume fractions on the thermal performance indicators of the phase change energy storage porous brick

evaluation index	Case A	Case D	Case G	Case H
maximum temperature of the inner surface/ ℃	31.39	28.31	27.71	27.51
minimum temperature of the inner surface/ ℃	18.44	18.88	19.24	19.53
internal surface temperature amplitude / ℃	12.95	9.43	8.48	7.99
attenuation multiple	2.02	2.77	3.09	3.27
delay time /min	92	146	191	216
latent heat utilization of the PCM	–	0.97	0.82	0.83

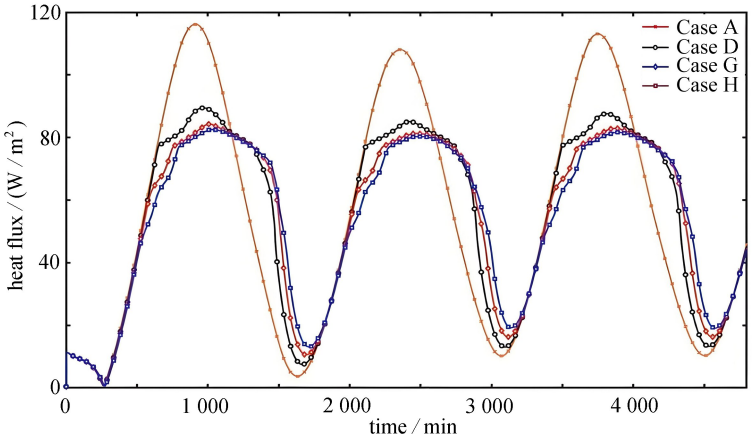


图 17　不同 PCM 体积分数下内表面热流密度对比

Fig. 17　Comparison of internal surface heat flux densities under different PCM volume fractions

4　结　　论

本研究基于数值模拟揭示了 PCM 空间布局与体积分数对多孔砖热工性能的耦合机理，得出了以下主要结论：

1）空间布局的主导机制：PCM 的空间布局是决定热调控效能的核心变量.研究证实，单层内侧布局通过优化相变过程与外部热波的时空匹配关系，最大化了潜热激活深度.这一发现修正了传统保温材料“越厚越好”的直观认知，确立了基于时空协同的“精准布局优先”设计原则.

2）边际效益递减规律：性能增益随 PCM 体积分数增加呈非线性饱和趋势.其物理机制在于外层热阻的屏蔽效应导致深层 PCM 热驱动力不足，潜热利用率从单层的 0.97 显著降至多层的 0.82，证实了盲目增加填

充量会导致严重的材料冗余.

3) 最优设计方案:综合权衡热工性能与材料效率,“单层内侧布局”(Case D)被确定为最优解.该方案在仅使用 1/3 材料用量(相较于全填充)的条件下,实现了主要的波幅衰减与热延迟,达到了“性能-投入比”的数学极值.这为大温差地区提供了兼顾高效能与低冗余的工程范式.

4) 局限性与展望:针对本研究在气候适用性与材料长期性上的局限,未来工作将聚焦于 ① 拓展至全气候区(含冬季)的适用性评估; ② 引入材料老化动力学模型以验证全生命周期鲁棒性; ③ 针对夜间保温瓶颈,开展相变温度 (T_m) 的级联优化研究(如梯度熔点布局),以实现相变时序与昼夜热负荷的精准协同.

参考文献(References):

[1] 陈振湘. 建筑暖通空调节能问题及对策分析[J]. 中国设备工程, 2021(12): 217-218.(Chen Zhenxiang. Analysis of energy conservation issues and countermeasures in building HVAC[J]. *China Plant Engineering*, 2021(12): 217-218. (in Chinese))

[2] 姚翔宇, 马建斌, 王飞娅, 等. 针对夏热冬冷地区的新型承载蓄热超结构墙体力学性能与温控效能研究[J]. 应用数学和力学, 2024, **45**(8): 1047-1057.(Yao Xiangyu, Ma Jianbin, Wang Feiya, et al. Investigation on mechanical properties and temperature control efficiency of novel load-bearing and heat-storing metastructure walls in hot summer-cold winter regions[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, **45**(8): 1047-1057. (in Chinese))

[3] Salman R, Aljabair S. “Energy storage technology: the growing role of phase change materials in the construction industry” a review[J]. *International Journal of Thermofluids*, 2024, **23**: 100712.

[4] 潘涵婷, 许多, 徐洪涛, 等. 空穴效应下泡沫金属复合相变材料热性能数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2024, **45**(1): 85-96.(Pan Hanting, Xu Duo, Xu Hongtao, et al. Numerical analysis on thermal performances of metal foam composite phase change materials under cavity effects[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, **45**(1): 85-96. (in Chinese))

[5] Abdullah A A, Ahmed O K, Aziz N M. Performance comparison of PV/Trombe wall utilizing porous media and phase change materials: experimental study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, **129**: 117316.

[6] 肖力光, 李赫. 相变储能材料在建筑围护结构领域的应用及研究进展[J]. 化工新型材料, 2024, **52**(4): 228-232.(Xiao Liguang, Li He. Application and research progress of phase change energy storage materials in building envelope structures[J]. *New Chemical Materials*, 2024, **52**(4): 228-232. (in Chinese))

[7] 黄钦, 余凌峰, 陈凯. 相变材料耦合冷板电池热管理系统的优化设计[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(11): 1195-1202.(Huang Qin, Yu Lingfeng, Chen Kai. Design of the battery thermal management system with phase change material coupled cold plates[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(11): 1195-1202. (in Chinese))

[8] Meng D, Dang X, Wang A, et al. Optimization of double-layer shaped phase change wallboard in buildings in two typical climate areas in China[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, **61**: 106698.

[9] 杨小虎, 李少丹, 陈凯. 第二类边界条件下固液相变问题的改进型准稳态近似解[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(11): 1249-1258.(Yang Xiaohu, Li Shaodan, Chen Kai. Improved quasi-steady-state approximation analysis of stefan problems under 2nd-kind boundary conditions[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(11): 1249-1258. (in Chinese))

[10] Fan M, Hu M, Suo H, et al. Preferred method and performance evaluation of heterogeneous composite phase change material (CPCM) wallboard in different seasons[J]. *Renewable Energy*, 2024, **220**: 119537.

[11] 孟凡康, 岳扬皓. 孔洞分布形式对部分 PCM 填充轻质墙体的传热影响[J]. 热科学与技术, 2024, **23**(3): 241-248.(Meng Fankang, Yue Yanghao. Effect of hole distribution form on heat transfer of partially PCM filled light weight wall[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2024, **23**(3): 241-248. (in Chinese))

[12] Duan S, Huang C, Meng C. Numerical investigation on thermal performance of the solar wall integrated with phase change material[J]. *Energy and Buildings*, 2025, **336**: 115519.

[13] 高伟业, 张赛, 张杰, 等. 含湿相变粗糙多孔材质的热质耦合分形研究[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(5): 561-568.(Gao Weiye, Zhang Sai, Zhang Jie, et al. Thermo-mass coupling fractal study of wet phase-change rough porous materials[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(5): 561-568. (in Chinese))

[14] Gao Y, Meng X. A comprehensive review of integrating phase change materials in building bricks: methods, performance and applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, **62**: 106913.

[15] Yu Z, Feng D, Feng Y, et al. Thermal conductivity and energy storage capacity enhancement and bottleneck of shape-stabilized phase change composites with graphene foam and carbon nanotubes[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, **152**: 106703.

[16] 张源, 胡自成, 葛风华, 等. 复合相变材料空心砌块的研制及热性能实验分析[J]. 建筑科学, 2016, **32**(2): 29-35.(Zhang Yuan, Hu Zicheng, Ge Fenghua, et al. Development of composite phase change material hollow block and experimental analysis of its thermal performance[J]. *Building Science*, 2016, **32**(2): 29-35. (in Chinese))

[17] Rashid F L, Dhaidan N S, Al-Obaidi M, et al. Latest progress in utilizing phase change materials in bricks for energy storage and discharge in residential structures[J]. *Energy and Buildings*, 2025, **330**: 115327.

[18] Abbas H M, Jalil J M, Ahmed S T. Experimental and numerical investigation of PCM capsules as insulation materials inserted into a hollow brick wall[J]. *Energy and Buildings*, 2021, **246**: 111127.

[19] 倪金鹏, 罗祝清, 屈治国, 等. 不同气候条件下相变屋顶传热性能数值分析[J]. 化工进展, 2022, **41**(1): 104-112.(Ni Jinpeng, Luo Zhuqing, Qu Zhiguo, et al. Numerical analysis on heat transfer performance of phase change roofs under different climates[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, **41**(1): 104-112. (in Chinese))

[20] Tunçbilek E, Arıcı M, Bouadila S, et al. Seasonal and annual performance analysis of PCM-integrated building brick under the climatic conditions of Marmara region[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, **141**(1): 613-624.

[21] Hassan R, Ali A B M, Al-Khatib O, et al. Incorporation of nano-encapsulated PCM in clay hollow blocks and cement layer for improving energy efficiency in buildings: a numerical approach[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, **73**: 106526.

[22] Salman R, Aljabair S, Jalil J M. Enhancing thermal performance and energy efficiency in concrete bricks with phase change materials: a numerical study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, **125**: 116937.

[23] Brahimi M E, Maliki M, Laredj N, et al. Investigation of the thermal efficiency of hollow bricks filled with bio-organic phase change material mixture[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, **122**: 116667.

[24] Rathore P K S, Patel B, Gupta M K, et al. Experimental analysis of thermal energy efficient clay brick incorporated with phase change material and insulation[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, **190**: 529-541.

[25] Mukram T A, Daniel J. Performance evaluation of a novel cement brick filled with micro-PCM used as a thermal energy storage system in building walls[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, **77**: 109910.

[26] Gupta M K, Rathore P K S, Kumar R, et al. Experimental analysis of clay bricks incorporated with phase change material for enhanced thermal energy storage in buildings [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, **64**: 107248.

[27] Chihab Y, Bouferra R, Garoum M, et al. Thermal inertia and energy efficiency enhancements of hollow clay bricks integrated with phase change materials[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, **53**: 104569.

[28] Luo Z, Xu H, Lou Q, et al. GPU-accelerated lattice Boltzmann simulation of heat transfer characteristics of porous brick roof filled with phase change materials[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, **119**: 104911.

[29] Gao Y, He F, Meng X, et al. Thermal behavior analysis of hollow bricks filled with phase-change material (PCM)[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, **31**: 101447.

[30] Hou F, Cao S, Wang H. New equivalent thermal conductivity model for size-dependent convection-driven melting of spherically encapsulated phase change material[J]. *Materials*, 2021, **14**(16): 4752.

[31] Reyez-Araiza J L, Pineda-Piñón J, López-Romero J M, et al. Thermal energy storage by the encapsulation of phase change materials in building elements: a review[J]. *Materials*, 2021, **14**(6): 1420.