

文章编号: 1671-6612 (2026) 02-260-10

基于辐射制冷的相变 Trombe 墙热性能优化研究

张铭驿 王晨平 丁卫科

(中通服咨询设计研究院有限公司 南京 210000)

【摘要】 传统 Trombe 墙是一种无机械动力、无传统能源消耗、仅仅依靠被动式收集太阳能为建筑供暖的集热墙体,具有构造简单、便于与建筑结合的优点受到了各专家学者的广泛关注。但这种结构在使用过程中还存在夏季过热的缺点。为了解决这一问题,有学者在相变 Trombe 墙的结构基础上做出改进,提出了一种基于辐射制冷的相变 Trombe 墙新型结构,意在解决传统 Trombe 墙和相变 Trombe 墙存在的夏季过热问题。采用数值模拟的方法分析了该新型结构主要影响参数及其对热性能的影响。结果表明:热管数量的增加有利于减少室内得热量;室内设定温度越高该墙体的节能效率越高;相变材料的厚度的增加有利于减少室内得热量;在保证相变材料能完全相变的情况下,应尽量选择相变潜热大、相变温度高的相变材料;此外,室外环境风速的增大,不利于辐射铝板在夜间的散热。

【关键词】 Trombe 墙;相变材料;热管;热性能;数值模拟

中图分类号 TK121 文献标志码 A

Study on Thermal Performance Optimization of a Radiative-cooling-based Phase Change Trombe Wall

Zhang Mingyi Wang Chenping Ding Weike

(China Information Consulting & Designing Institute Co., Ltd, Nanjing, 210000)

【Abstract】 The traditional Trombe wall is a type of heat-collecting wall that relies solely on passive solar energy collection for building heating, requiring no mechanical power or conventional energy consumption. It has garnered widespread attention from experts and scholars due to its simple construction and ease of integration with buildings. However, this structure still suffers from the drawback of overheating in summer during use. To address this issue, some scholars have made improvements based on the structure of the phase-change Trombe wall and proposed a novel phase-change Trombe wall structure based on radiative cooling, aiming to resolve the summer overheating problems associated with both traditional and phase-change Trombe walls. This paper employs numerical simulation methods to analyze the main influencing parameters of this new structure and their impact on thermal performance. The results indicate that increasing the number of heat pipes helps reduce indoor heat gain; the energy efficiency of the wall improves with higher indoor set temperatures; increasing the thickness of the phase-change material is beneficial for reducing indoor heat gain; under the condition that the phase-change material can fully undergo phase transition, materials with high latent heat and high phase-change temperature should be selected whenever possible; additionally, higher outdoor wind speeds hinder the nighttime heat dissipation of the radiative aluminum plate.

【Keywords】 Trombe wall; Phase change material; Heat tube; Thermal performance; Numerical simulation

0 引言

1966 年,法国太阳能实验室主任 Felix Trombe

发明了一种能够吸收太阳能的蓄热墙体,并将其命名为 Trombe 墙。传统 Trombe 墙凭借其特殊的结

构设计, 无需机械动力或传统能源消耗, 仅通过被动收集太阳能即可实现建筑供暖^[1]。然而, 由于太阳能本身具有间歇性和波动性, 加之传统 Trombe 墙只能被动获取能量, 其在运行过程中仍存在一定问题, 尤其突出的是夏季因太阳辐射导致热通道内温度过高、热量难以消散, 从而引起建筑过热现象^[2]。因此, 如何对传统 Trombe 墙进行结构改进与优化, 以提高太阳能利用率, 增强被动式太阳能建筑在不同季节和地区的适应性, 已成为当前研究的核心^[3,4]。

Dong 和 Zhang 等人^[5,6]提出了一种结构优化型 Trombe 墙, 通过在玻璃盖板与墙体之间加设一块涂有选择性吸收涂层的铝板, 使改进后的 Trombe 墙在特定条件下的热效率提高了 50%。Mehran Rabani 等人^[7]则在 Trombe 墙的集热壁上安装了不同数量和材质的翅片, 研究结果表明, 翅片的导热系数越高, 热通道内空气流速越快, 通道及室内温度也相应提高; 翅片数量越多, 室内得热量越大, 热性能也越优。邓仁洁等人^[8]将相变板与 Trombe 墙相结合, 基于 TRNSYS 软件建立了相变 Trombe 墙的传热模型, 模拟显示相变 Trombe 墙的年总负荷较传统形式降低了 13.5%。Zalewski 等^[9]在传统 Trombe 墙的内侧添加相变材料并进行实验, 发现相变材料可吸收 50%~56% 的太阳辐照量, 并将热量由外向内传递的时间延长了 2.5 倍。

在多种结构优化方案中, 相变 Trombe 墙不仅能提高冬季墙体的蓄热能力、延长放热时间, 还可减少夏季的得热量, 表现出良好的综合性能。然而, 该结构仍存在相变材料再生率低以及凝固阶段向室内散热的不足。为此, Liu 等人^[10]提出了一种结合夜间辐射制冷技术并嵌入热管的相变 Trombe 墙结构 (RC-PCM Trombe 墙), 通过辐射铝板向低温外太空辐射散热, 为系统提供了这一关键冷源, 并通过实验初步验证了其在缓解夏季室内过热方面的可行性。在此基础上, 本文采用 MATLAB 数值模拟方法, 重点剖析“辐射制冷”环节与相变材料、热管的耦合工作机制, 进一步分析相变材料与热管等结构参数, 以及室外和室内环境参数对该新 Trombe 墙体热性能的影响, 为墙体结构的优化提

供理论依据。

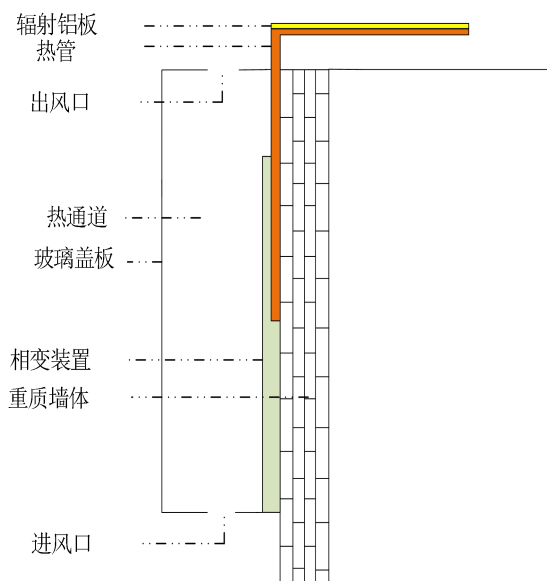


图 1 基于辐射制冷的相变 Trombe 墙系统结构示意图

Fig.1 Schematic of the radiative-cooling-based phase change trombe wall system

1 数值模拟方法

1.1 物理模型

本研究基于某房间南外墙, 构建了一种新型相变 Trombe 墙体系统。该系统由 Trombe 墙、辐射铝板、热管以及相变装置组成, 其物理模型如图 1 所示。Trombe 墙构筑于南外墙上, 外侧覆盖玻璃盖板; 辐射铝板水平安装于屋顶上方, 表面敷有 0.1 mm 厚的聚四氟乙烯薄膜; 相变装置固定于南墙外表面, 内部填充石蜡作为相变材料。热管的蒸发段嵌入相变装置内部, 冷凝段则与辐射铝板相连。

1.2 数学模型

1.2.1 传热模型的假设

传统 Trombe 墙的传热过程如图 2 (a) 所示, 主要包含玻璃盖板的传热过程、热通道内的传热过程以及南墙墙体的传热过程; 相变 Trombe 墙则是在此基础上在墙体加了相变装置, 如图 2 (b) 所示, 其传热过程增加了相变装置的传热过程; 基于辐射制冷的相变 Trombe 墙的传热过程如图 2 (c) 所示, 增加了热管以及辐射铝板的传热过程。

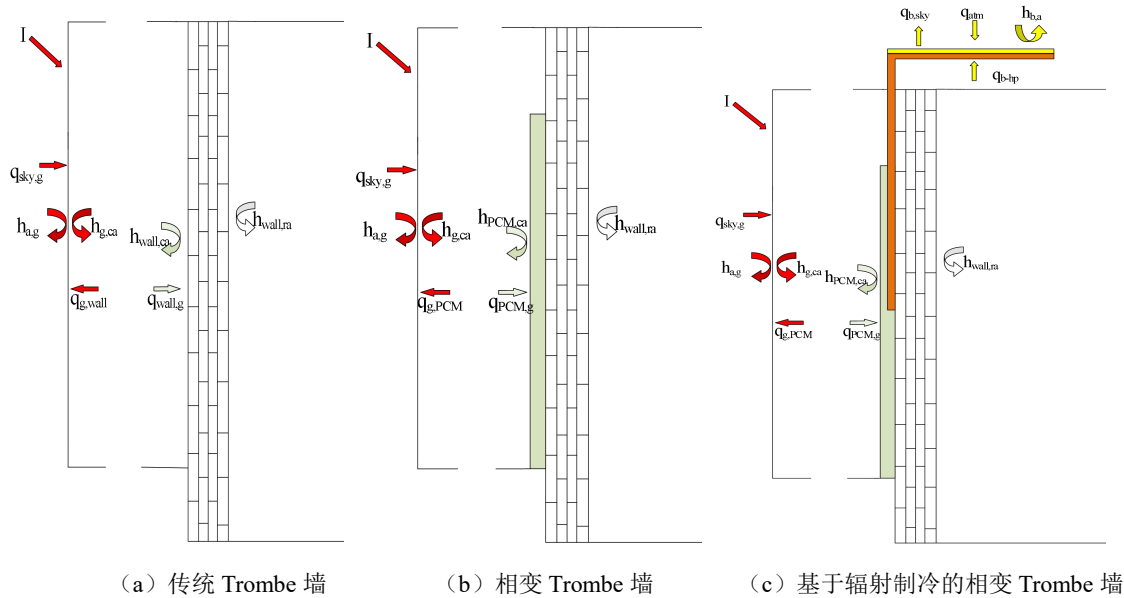


图 2 传热过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of heat transfer process

本节依据能量守恒定律，为该新型结构建立了各节点的热平衡方程。为明确墙体的传热机理并便于模型求解，需对物理模型进行合理简化，现提出如下假设：

- (1) 所有材料的物性参数均为定值，不随温度变化；
- (2) 相变材料的相变温度与相变潜热为恒定值，不随温度变化；
- (3) 忽略地面对该结构的热辐射影响；
- (4) 忽略玻璃盖板沿垂直方向的导热；

$$m_g c_g \frac{dT}{dt} = h_{sky-g} A_g (T_{sky} - T_g) + h_{al-g} A_g (T_{al} - T_g) + h_{a-g} A_g (T_a - T_g) + h_{ca-g} A_g (T_{ca} - T_g) + LA_g a \quad (1)$$

式中： T_g 、 T_{sky} 、 T_{al} 、 T_a 和 T_{ca} 分别为玻璃盖板温度、天空温度、相变装置外壁面温度、室外环境空气温度及热通道内空气温度，K； m_g 为玻璃盖板质量，kg； c_g 为玻璃盖板比热容，J/(kg·K)； I 为太阳辐照度，W/m²； A_g 为玻璃盖板面积，m²； a 为玻璃盖板吸收率； h_{sky-g} 为玻璃盖板与天空之间的辐射换热系数，W/(m²·K)，计算公式如式(2)(3)所示。

$$h_{sky-g} = \sigma \varepsilon_g (T_{sky} + T_g) (T_{sky}^2 + T_g^2) \quad (2)$$

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (3)$$

式中： ε_g 为玻璃盖板的发射率； σ 为

(5) 忽略墙体沿垂直方向的导热，只考虑其厚度方向的导热过程。

1.2.2 基于辐射制冷的相变 Trombe 墙传热模型

(1) 玻璃盖板的能量守恒方程

玻璃盖板的传热过程包括：吸收太阳辐射热量、与外界空气对流换热、与通道内空气的对流换热、与天空的辐射换热以及与相变装置外壁面的辐射换热。基于上述过程，玻璃盖板的能量守恒方程如式(1)所示。

Stefan-Boltzmann 常数。

h_{al-g} 为玻璃盖板与相变装置外壁面的辐射换热系数，求解公式如式(4)(5)所示。

$$h_{al-g} = \xi_{al-g} \sigma (T_{al} + T_g) (T_{al}^2 + T_g^2) \quad (4)$$

$$\xi_{al-g} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{al}} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1} \quad (5)$$

式中： ε_{al} 为相变装置外壁面的发射率。

h_{a-g} 为室外环境空气与玻璃盖板的对流换热系数，求解公式如式(6)所示。

$$h_{a-g} = 6.5 + 3.3V \quad (6)$$

式中: V 为室外环境空气流速, m/s。

h_{ca-g} 为玻璃盖板与热通道内空气的对流换热系数, 求解公式如式 (7) - (9) 所示。

$$h_{ca-g} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (7)$$

$$Nu = 0.12 \left(Gr \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \right) \quad (8)$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_g - T_{w1})d^3}{\nu^2} \quad (9)$$

$$m_6 c_a \frac{dT}{dt} = m_6 c_a (T_5 - T_6) + h_{al-ca} A_6 (T_{al} - T_6) + h_{g-ca} A_6 (T_g - T_6) \quad (10)$$

$$m_n c_a \frac{dT}{dt} = m_n c_a (T_{n-1} - T_n) + h_{al-ca} A_n (T_{al} - T_n) + h_{g-ca} A_n (T_g - T_n) \quad (11)$$

$$m_1 c_a \frac{dT}{dt} = m_1 c_a (T_a - T_1) + h_{al-ca} A_1 (T_{al} - T_a) + h_{g-ca} A_1 (T_g - T_1) \quad (12)$$

式中: h_{g-ca} 和 h_{al-ca} 分别为通道内空气与玻璃盖板和相变装置外壁面的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; m_n 为第 n 节点空气质量, kg; c_a 为空气比热容, $J/(kg \cdot K)$; T_a 为通道入口空气温度, K。

(3) 南墙的能量守恒方程

南墙外壁与相变装置内壁接触, 内壁与室内空气直接接触。假设南墙为一维导热体, 并将其沿厚度方向划分为 6 个节点, 能量守恒方程如式 (13) 所示。

$$\rho_w c_w \frac{dT}{dt} = k_w \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \quad (13)$$

最左侧节点边界条件如式 (14) 所示。

$$-\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x=0} = \frac{k_{al}}{\delta_{al}} (T_{pcm} - T_{w1}) \quad (14)$$

最右侧节点边界条件如式 (15) (16) 所示。

$$-\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x=0.23} = h_{ra-w6} (T_{ra} - T_{w6}) \quad (15)$$

$$h_{ra-w6} = 2.03 (T_{w6} - T_{ra})^{0.14} \quad (16)$$

式中: k_{al} 为相变装置壁面导热系数, $W/(m \cdot K)$; δ_{al} 为厚度, m; h_{ra-w6} 为室内空气与墙体内表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_{ra} 为室内空气温度, K; T_{w1} 、 T_{w6} 分别为墙外和内表面节点温度, K。

(4) 相变装置的能量守恒方程

相变装置壁面的能量守恒方程如式 (17) 所示。

式中: λ 为空气导热系数, $W/(m \cdot K)$; d 为通道厚度, m; β 为体积膨胀系数; ν 为空气运动粘度, m^2/s 。

(2) 热通道内空气的能量守恒方程

系统运行时, 空气从热通道下方流入、上方流出。将通道沿竖直方向划分为 6 个节点, 每个节点空气的能量变化包括: 与玻璃盖板的对流换热、与相变装置外壁面的对流换热以及相邻节点空气的换热。能量守恒方程如式 (10) - (12) 所示。

$$\rho_p c_g \frac{dT}{dt} = I\alpha\beta_{al} + h_{g-al} (T_g - T_{al}) + \quad (17)$$

$$h_{ca-al} (T_{ca} - T_{al}) + \frac{k_{al}}{\delta_{al}} (T_p - T_{al})$$

相变材料的能量守恒方程如式 (18) 所示。

$$\rho_p \frac{dH}{dt} = k_p \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{Q_{hp}}{V_p} \quad (18)$$

式中: ρ_p 为相变材料的密度, kg/m^3 ; c_p 为相变材料的比热容, $J/(kg \cdot K)$; α 为玻璃盖板的透过率; β_{al} 为相变装置表面的吸收率; k_{al} 为相变装置壁面所用材料的导热系数, $W/(m \cdot K)$; δ_{al} 为相变材料壁面厚度, m; h_{g-al} 为相变装置表面与玻璃盖板的辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$, 求解方法已列出; h_{ca-al} 为相变装置表面与通道内空气的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$, 求解方法已列出; k_p 为相变材料的导热系数, $W/(m \cdot K)$; V_p 为相变材料的体积, m^3 ; Q_{hp} 为热管传热量, W; H 为相变材料的焓值, J/kg, 如式 (19) 所示。

$$H = h_{ref} + rL + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (19)$$

液相百分比由式 (20) 确定。

$$r = \begin{cases} 0, & T \leq T_m - \Delta T \\ 1, & T \geq T_m + \Delta T \\ (T - T_m) / 2\Delta T, & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \end{cases} \quad (20)$$

式中： h_{ref} 为参考温度为 T_{ref} 下的焓值，J/kg； L 为相变潜热，J/kg； T_m 为相变温度，K； ΔT 为相变半径； T_p 为相变材料内部温度，K，计算公式如式(21)所示。

$$r = \begin{cases} \frac{H_p}{c_p} + T_m, & H_p \leq H_s \\ \frac{(H_p - L)}{c_p} + T_m, & H_p \geq H_l \\ T_m, & H_s < H_p < H_l \end{cases} \quad (21)$$

式中： H_s 为相变材料开始融化的焓值， H_l 为相变材料完全融化的焓值。

(5) 热管的能量守恒方程

本文中使用的扁平热管，其传热过程复杂，涉及纵向与横向传热。为简化建模，工程中常将其等效为常导热系数体。热管能量守恒方程如式(22)所示。

$$m_{hp} c_{hp} \frac{dT}{dt} = Q_{hp} + U_{b-hp} (T_{hpln} - T_{hp}) \quad (22)$$

式中： m_{hp} 为热管的质量，kg； c_{hp} 为热管的比热容，J/(kg·K)； T_{hpln} 为冷凝端温度，K； T_{hp} 为热管的温度，K； U_{b-hp} 为热管与辐射铝板间的换热系数，W/m²，求解过程如式(23)所示。

$$m_b c_b \frac{dT}{dt} = I A_b \beta_b + h_{sky-b} A_b (T_{sky} - T_b) + \frac{k_{hp}}{\delta_{hp}} A_{b-hp} (T_{hpln} - T_{hp}) + h_{a-g} A_b (T_a - T_b) \quad (24)$$

式中： m_b 为铝板质量，kg； c_b 为铝板比热容，J/(kg·K)； β_b 为铝板吸收率； h_{sky-b} 为铝板与天空的辐射换热系数，W/(m²·K)； A_b 为铝板面积，m²； k_{hp} 为热管导热系数，W/(m·K)； δ_{hp} 为热管厚度，m； h_{a-g} 为铝板与空气的对流换热系数，W/(m²·K)； T_b 为铝板表面温度，K。

1.3 模型求解

在建立好三种 Trombe 墙体的传热模型后，分别将每个部分的能量守恒方程进行离散，并且取实验期间所测的室内外气象参数作为该模型的边界条件^[6]，其中包括南向太阳辐照量、室外空气温度、室外空气流速、室内空气温度，最终将其编写成 MATLAB code 文件导入 MATLAB 软件进行计算，计算流程如图 3 所示。各部分材料温度参数初始值取实验开始前测量的温度值，计算所用到的所有物性参数如表 1 所示。

$$U_{b-hp} = \frac{A_{b-hp}}{R_{b-hp}} \quad (23)$$

式中： A_{b-hp} 为热管与辐射板的接触面积，m²； R_{b-hp} 为热管与辐射板的接触热阻，K·m²/W。

(6) 辐射铝板的能量守恒方程

辐射铝板是本系统实现辐射制冷功能的核心部件，其表面敷设的聚四氟乙烯 (PTFE) 薄膜具有高发射率，能够有效地通过辐射将热量散失到接近绝对零度的宇宙深空，从而维持铝板表面温度低于环境温度，形成一个天然“冷源”。在对辐射铝板建立能量守恒方程之前，为了节省计算时间，对辐射铝板进行了以下假设：

①辐射铝板的热物性参数(密度、比热、发射率、吸收率等)恒定不变；

②忽略地面对辐射铝板产生的影响，仅考虑太阳辐照、天空辐射、周围空气以及热管对辐射铝板的影响。

故辐射铝板的热量变化主要有以下几个部分：白天吸收的太阳辐照、通过热管传递的热量、辐射铝板与周围空气进行对流换热、辐射铝板与天空进行辐射换热。根据以上条件，列出辐射铝板的能量守恒方程如式(24)所示。

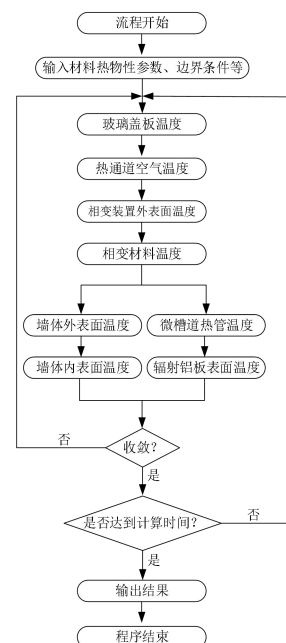


图 3 MATLAB 计算流程图

Fig.3 Flowchart of Matlab calculation process

表 1 模拟计算所用材料的物性参数

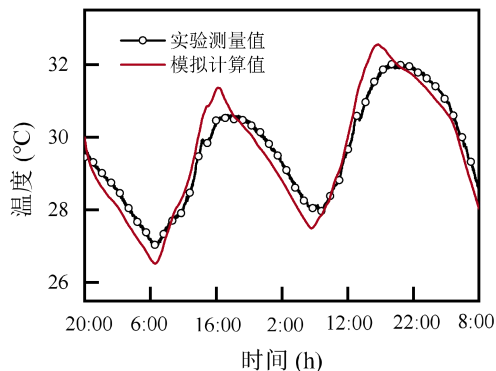
Table 1 Physical property parameters used in simulations

材料名称	玻璃	相变石蜡	红砖	铝	空气
密度/(kg/m ³)	2500	880	1668	2702	1.16
比热容/J/(kg·K)	840	2500	775	903	1005
导热系 /[W/(m ² ·K)]	1.4	0.4	0.4	237	0.026
厚度/m	0.002	0.02	0.23	0.001	—
吸收率	—	—	0.07	0.2	—
发射率	—	—	0.8	0.06	—
透过率	0.8	—	—	—	—

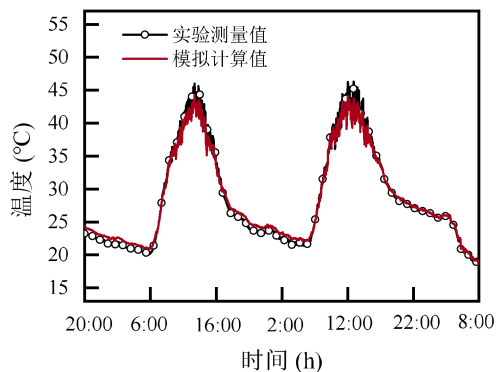
1.4 模型验证

为评价基于辐射制冷的相变 Trombe 墙在夏季的热性能, Liu 等人^[10]已在前期开展了相关实验研究以测试评价其夏季的热性能。因此, 本文将以实验数据为基准, 验证数值计算模型预测结果的准确性。

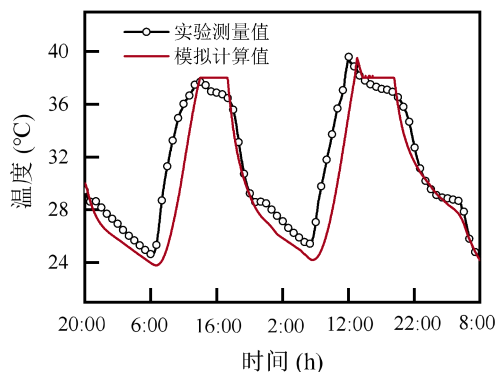
图 4 所示分别为房间南墙、辐射铝板表面温度以及相变材料内部温度的模拟计算值与实验测量值的对比。结果表明, 本研究所建立模型的预测结果与实验测试结果高度一致, 温度误差均处于合理的误差范围内。



(a) 南墙表面温度



(b) 辐射铝板表面温度



(c) 相变材料内部温度

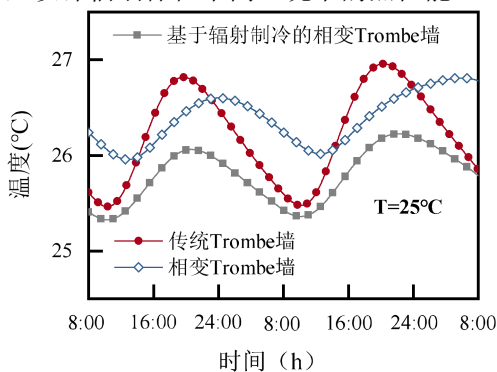
图 4 模拟结果与实测结果对比

Fig.4 Comparison between the simulated and tested values

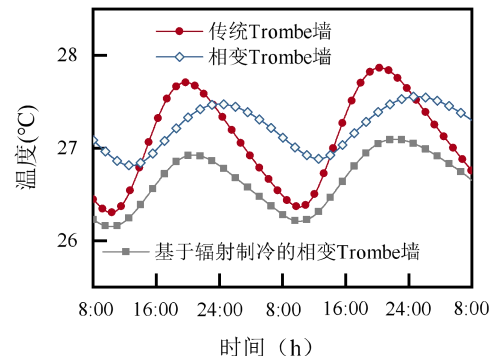
2 结果分析

2.1 室内设定温度变化

在实际应用中, 室内热环境通常受到人员、设备及照明负荷的综合影响。根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736-2012)^[11], 夏季室内空调舒适温度的取值范围为 24~28°C。为此, 本文在保持其他参数不变的情况下, 分别将模型中的室内空气温度设置为 25°C, 26°C, 27°C 和 28°C, 以评估墙体在不同工况下的热性能。



(a) 25°C



(b) 26°C

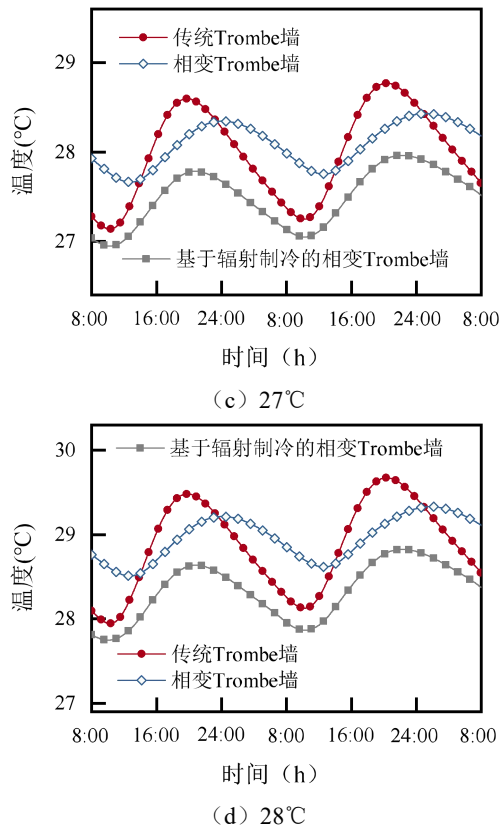


图 5 不同室内设定温度下南墙内表面温度变化

Fig.5 Variation of inner surface temperature of south wall under different indoor set temperatures

图 5 展示了不同室内设定温度下, 各类墙体内表面温度的变化趋势。可以看出, 随着室内设计温度的升高, 墙体内表面平均温度和峰值温度均相应上升。日间, 相变 Trombe 墙因相变材料吸收热量, 其温度明显低于传统 Trombe 墙; 而夜间, 相变材料的凝固放热过程则延缓了墙体温度的下降。对于引入热管和辐射铝板的新型 Trombe 墙, 其日间温度进一步降低, 且夜间降温速率显著加快, 表明该结构有效强化了相变材料的散热与再生过程。

与之相对, 墙体的得热量随设定温度升高呈下降趋势, 如表 2 所示。其原因在于, 室内温度升高导致其与墙体内表面的温差减小, 尽管内表面温度有所上升, 但其增幅小于室内空气温度, 使得净传热驱动力减弱, 得热量相应降低。值得注意的是, 基于辐射制冷的相变 Trombe 墙在室内温度升高时, 得热量降幅更为显著。这是由于较高的墙体温度延长了热管的有效工作时长, 促使更多的热量经由热管传递至辐射铝板并散至外界。

上述结果表明, 基于辐射制冷的相变 Trombe

墙有效解决了传统相变墙体在夏季的过热问题, 表现出良好的热性能, 有助于降低室内热负荷。

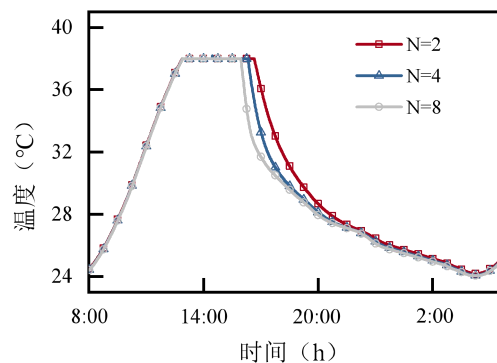
表 2 不同室内设计温度对用的墙体得热量变化

Table 2 Acquired heat of the wall under various indoor setting temperatures

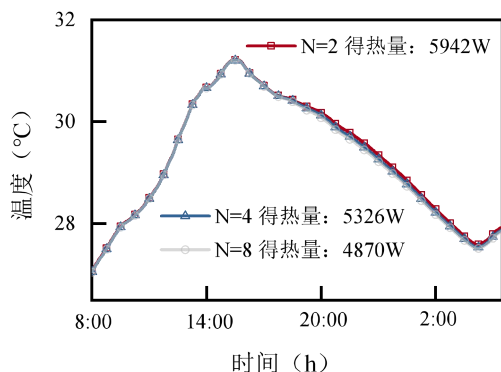
墙体	参数	室内设计温度/°C			
		25	26	27	28
传统 Trombe 墙	得热量 /W	10509	9555	8579	7565
	得热量 /W	8893	7858	7009	6190
相变 Trombe 墙	减少量 /W	1616	1696	1570	1375
	降低率/%	15.4	17.8	18.3	18.2
基于辐射制冷的相变 Trombe 墙	得热量 /W	4383	3593	2760	1882
	减少量 /W	6126	5962	5819	5683
	降低率/%	58	62.3	67.8	75.1

2.2 热管数量变化

热管在基于辐射制冷的相变 Trombe 墙中作为关键传热介质, 承担将相变材料中所蓄热量传递至辐射制冷装置的重要作用, 热管作为连接相变材料(热源)与辐射铝板(冷源)的桥梁, 其数量直接决定了夜间将相变材料中蓄积的热量输送至辐射铝板、并最终通过辐射制冷方式散失至外太空的速率。在热管类型确定的条件下, 热管数量决定了单位时间内从相变材料向辐射铝板传递热量的多少。本节在固定相变材料厚度为 0.02m、室外风速为 0m/s、辐射铝板发射率为 0.9, 且不改变墙体与热通道等其他结构参数的基础上, 分析热管数量对复合墙体夏季热性能的影响。



(a) 相变材料内部温度



(b) 南墙内表面温度

图 6 不同热管数量下 Trombe 的温度变化

Fig.6 Temperature variation of south wall with different heat tube numbers

图 6 分别展示了不同热管数量下相变材料内部温度和南墙内表面的温度随时间的变化情况。由图可知,在太阳的照射下,相变材料的温度逐渐上升至相变温度并产生相变,相变装置内为固液共存态,此时热管数量对相变材料的温度变化无影响;进入夜间后,相变材料自身开始向外界散热,同时也通过热管将热量传递至辐射铝板进行散热,此时热管数量的增加有利于相变材料内部温度的下降。

对于南墙内表面而言,其温度随着热管数量的增加而降低,但下降幅度并不显著,夜间最低温度值较为接近。根据式(25)计算,当热管数量 N 由 2 增加至 4 和 8 时,室内得热量分别降低了 10.4% 和 18%。其原因在于热管本身导热性能优异,其导热系数远高于相变材料。根据传热学原理,在墙体厚度不变的情况下,导热系数越大,热阻越小。因此,热管数量的增加反而降低了整体热阻,在一定程度上促进了通过墙体向室内的传热。尽管如此,由于热管吸热能力的增强总体上超过了因热阻减小所带来的额外得热,内表面温度仍呈现下降趋势,只是变化幅度较小。

$$q_l = \lambda_w \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad (25)$$

式中: q_l 为墙体向室内的导热热量, W/m^2 ; λ_w 为墙体的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; t_{w1} 、 t_{w2} 分别为南墙外、内表面温度, K ; δ 为南墙厚度,取 0.23m。

此外还可观察到,热管数量从 2 变为 4 时所引起的温降,大于从 4 增至 8 时的温降。这表明热管数量过多时,墙体热阻的减小所带来的负面效应逐渐显著,不利于进一步降低室内得热。因此,在实

际工程应用中,应综合考虑热管数量对制冷效果与建造成本的影响,选择适宜的热管数量,以实现最佳节能经济效益。

值得注意的是,热管数量增加所带来的室内得热量降幅,远高于南墙内表面温度的下降幅度。这一现象主要源于热管的单向传热特性与墙体的热惯性:热管在夜间将相变材料中蓄积的热量持续导向辐射铝板并散至外环境,有效减少了墙体内部的热量;而具有较大热容的相变层与南墙主体则显著平滑了内表面温度的波动。因此,热管系统在得热指标上比在内表面温度上体现得更为直接和显著。

2.3 相变材料变化

相变材料是该复合墙体的核心部件,主要承担吸收太阳辐射能量的作用。在冬季,其可增强墙体蓄热能力、延长放热时间并提高供热稳定性;而在夏季,相变材料在日间所吸收的热量能否在夜间有效释放,则关键依赖于热管与辐射铝板协同工作的辐射制冷过程。相变材料的用量(厚度)、相变温度及潜热值均直接决定墙体的热性能。材料过少将限制温控效果,过多则会增加成本并影响结构设计。为此,有必要系统研究相变材料厚度、潜热与相变温度的影响机制。本节在固定热管数量为 1、室外风速 $0\text{m}/\text{s}$ 、辐射铝板发射率 0.9,且不改变墙体与热通道结构参数的条件下,分析相变材料参数变化对墙体热性能的影响。

2.3.1 相变材料厚度

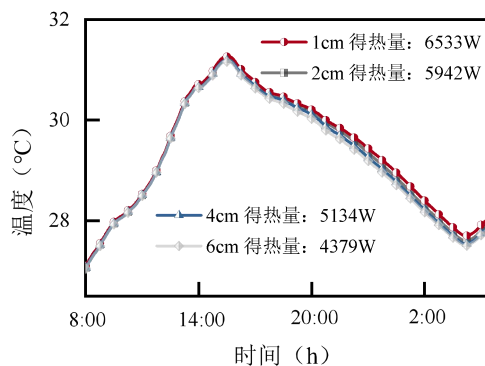


图 7 不同相变材料厚度下南墙内表面温度变化

Fig.7 Variation of inner surface temperature of south wall with different PCM thicknesses

图 7 展示了不同相变材料厚度下南墙内表面温度的变化情况。随着厚度从 1cm 增加至 6cm,内表面最低温度下降约 0.2°C ,表明增加材料厚度有助于降低内表面温度。以基准厚度 2cm 为参照

进行的热量分析显示：厚度为 1cm 时，墙体得热量增加 10%；而厚度为 4cm 和 6cm 时，得热量分别降低 13.6%和 26.3%。这说明适当增加相变材料厚度可有效减少室内得热。

2.3.2 相变潜热

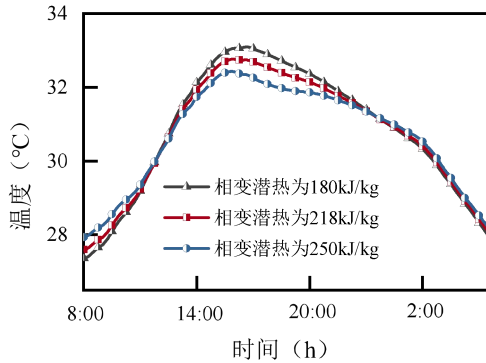


图 8 不同相变潜热下南墙内表面温度变化

Fig.8 Variation of inner surface temperature of south wall with different PCM latent heats

图 8 展示了相变温度 38℃条件下，不同相变潜热对墙体内部温度的影响。晨间时段，潜热较大的材料对应的内表面温度较高，原因在于其在前一夜凝固过程中释放更多潜热，增大了墙体得热。至日间吸热融化阶段，潜热越大，材料吸热能力越强，温度峰值相应降低。具体而言，当相变潜热为 180kJ/kg、218kJ/kg 和 250kJ/kg 时，墙体内部峰值温度分别为 33.1℃、32.8℃和 32.4℃，最低温度分别为 27.3℃、27.6℃和 27.9℃。结果表明，提高相变潜热有助于平抑内表面温度波动，降低峰值温度，从而改善室内热舒适性。

2.3.3 相变温度

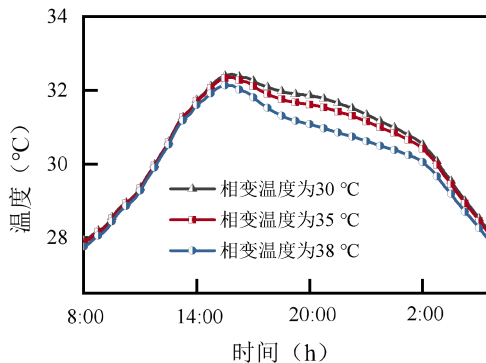


图 9 不同相变温度下南墙内表面温度变化

Fig.9 Variation of inner surface temperature of south wall with different PCM phase change temperatures

图 9 展示了在潜热为 218kJ/kg 条件下，不同相

变温度对墙体内部温度的影响。上午时段，因夜间放热量相近，不同相变温度所对应的内表面温度基本一致。随着时间推移，相变温度为 30℃的材料最先完全液化，其温度持续上升至三者中最高值（峰值 32.5℃）；而相变温度为 35℃和 38℃的材料所对应的峰值温度分别为 32.3℃和 32.1℃。由此可见，在确保材料完全发生相变的前提下，选择较高的相变温度有利于抑制墙体内部温度的峰值温度。

2.4 室外环境风速

Trombe 墙作为被动式太阳能集热墙体，其热性能受室外气象参数的显著影响。本节在保持热管数量为 1、相变材料厚度为 2cm、辐射铝板发射率为 0.9，且墙体与热通道等结构参数不变的条件下，分析室外风速为 0m/s、1m/s 与 2m/s 时系统热性能的变化规律。

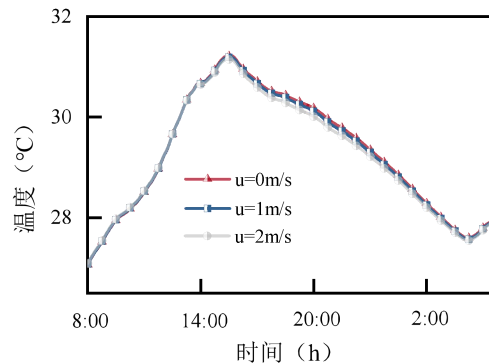


图 10 不同室外风速下南墙内表面温度变化

Fig.10 Variation of inner surface temperature of south wall under different outdoor wind speeds

由图 10 可知，室外风速变化对南墙内表面温度影响较为有限。理论上，风速增大会强化玻璃盖板与空气的对流换热，从而减少墙体得热并降低内表面温度。然而，其根本原因在于风速增大对系统存在双重作用机制：一方面增强玻璃盖板散热，另一方面也加剧了辐射铝板与周围空气的对流换热。由于辐射铝板在夜间通过辐射制冷使其表面温度通常低于环境温度，此时增强的对流换热反而使铝板从空气中获得热量，严重削弱其辐射制冷效能，最终导致系统整体散热效果该县不显著。因此，建议在实际应用中采取加装挡风板或盖板等措施，以抑制辐射铝板夜间的对流得热，提系统散热性能。

3 结论

本文通过建立基于辐射制冷的相变 Trombe 墙

传热模型,系统研究了墙体结构参数与室内外环境参数对其热性能的影响,为优化墙体构造与运行策略提供了理论依据。研究表明:适当增加热管数量可有效降低相变材料与墙体温度,加快夜间冷却速率,从而减少室内得热;然而,热管过多会导致整体热阻下降,反而削弱其节能调控效果。增大相变材料厚度有助于进一步抑制墙体温升和室内热负荷;在保证材料完全相变的前提下,选择高相变潜热与高相变温度的材料,能够显著平抑内表面温度波动,提升室内热舒适性。此外,提高室内设定温度可增强该系统在夏季的节能潜力;而室外风速的增加则会强化辐射铝板夜间的对流得热,削弱其辐射制冷效果,因此建议在实际应用中采取防风措施以优化系统散热性能。

综上所述,该新型墙体通过耦合相变材料的蓄热特性与辐射铝板的制冷作用,实现了能量的时空调配与跨时段利用。其中,辐射制冷作为关键的夜间冷源,显著提升了相变材料的再生效率与墙体的夏季热性能,有效解决了传统 Trombe 墙的过热问题,为被动式太阳能建筑的热环境调控提供了一种可行且高效的技术路径。

参考文献:

- [1] 肖兰,张雨晴,吴双应,等.翅片型中置式光伏 Trombe 墙性能的数值模拟[J].工程热物理学报,2024,45(7):1917-1923.
- [2] Behrooz M, Nima K, Sadegh A, et al. Enhancing building energy efficiency using a hybrid Trombe wall with PV and reflective mirrors[J]. Journal of Building Engineering, 2025,111:113376.
- [3] 马兵善,王佳龙,漆小兵,等.内置翅片型 Trombe 墙对寒冷地区供暖房间内热环境的影响[J/OL].重庆大学学报,2026:1-14.
- [4] 李佩家,刘慧芳,余本东,等.高效双通道型 Trombe 墙冬季热性能分析[J].太阳能学报,2022,43(12):112-118.
- [5] Dong J, Chen Z, Zhang L, et al. Experimental investigation on the heating performance of a novel designed trombe wall[J]. Energy, 2019,168:728-736.
- [6] Zhang L, Dong J, Sun S, et al. Numerical simulation and sensitivity analysis on an improved Trombe wall[J]. SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENTS, 2021,43:100941.
- [7] Rabani Mehran, Rabani Mehrdad. Heating performance enhancement of a new design trombe wall using rectangular thermal fin arrays: An experimental approach[J]. Journal of Energy Storage, 2019,24:100796.
- [8] 邓仁洁,朱娜,胡平放,等.相变特朗贝房关键影响因素优化研究[J].建筑节能,2020,48(10):102-108,121.
- [9] Zalewski L, Joulin A, Lassue S, et al. Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material[J]. Solar Energy, 2012,86(1):208-219.
- [10] Liu H, Tan Q, Shi Y, et al. Enhancing indoor thermal comfort and energy efficiency: A comparative study of RC-PCM Trombe wall performance, Renewable Energy, 2024,227:120542.
- [11] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.