

文章编号: 1671-6612 (2026) 04-519-10

竖壁贴附射流夜间通风 耦合相变墙体降温特性及热工参数影响分析

曹启程 季文慧

(西南交通大学 成都 610031)

【摘 要】 竖壁贴附射流夜间通风 (WANV) 耦合相变墙体 (PCMw) 系统, 能有效增强夜间通风降温效果并延缓室内温度波动。然而, 目前对于两者耦合作用下的动态传热机理仍缺乏解析, 并且墙体关键热工参数对系统整体性能的影响机制尚未明确。因此, 研究聚焦夏热冬冷地区轻质围护结构建筑, 通过建立相变墙体传热数值模型, 重点分析了相变温度和 PCMw 层厚度两个关键热工设计参数对系统降温特性的影响规律, 为 WANV-PCMw 耦合系统的优化设计与工程应用提供了理论依据。结果表明: WANV-PCMw 耦合系统强化了 PCMw 蓄热调控与夜间协同降温的作用, 开启 WANV 相比关闭使内壁面平均温度降低 0.62°C , 壁面降温效率提高 13.94%; 对于西向内侧 PCMw, 最佳相变温度区间为 $26\sim 28^{\circ}\text{C}$; 增加 PCMw 厚度可提升热惰性, 但超过 10mm 后系统降温性能改善减缓。

【关键词】 竖壁贴附射流夜间通风; 相变墙体; 轻质围护结构建筑; 墙体热工设计参数
中图分类号 TU111.4 文献标志码 A

Analysis of the Cooling Characteristics and the Influence of Thermal Parameters in the Wall-Attached Night Ventilation Combined with Phase Change Material Wallboard

Cao Qicheng Ji Wenhui

(Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The integrated system that combines wall-attached night ventilation (WANV) with phase change material wall (PCMw) can effectively enhance the cooling effect of night-time ventilation and mitigate indoor temperature fluctuations. However, the dynamic heat transfer mechanisms involved in the interaction between these two systems are not currently well understood, and the mechanisms by which key thermal parameters of the wall influence the overall performance of the system remain unclear. Consequently, this study focuses on buildings with lightweight envelope structures in regions characterised by hot summers and cold winters. A numerical model of heat transfer in PCMw is used to analyse the influence of two key thermal design parameters — the phase-change temperature and the thickness of the PCMw - on the system's cooling performance in detail. This provides a theoretical basis for optimising the design and engineering application of the WANV-PCMw coupled system. The results indicate that the WANV-PCMw coupled system enhances the thermal storage regulation of the PCMw and its night-time cooling effect. Compared to when the WANV is closed, opening it reduces the average interior wall surface temperature by 0.62°C and improves cooling efficiency by 13.94%. For west-facing inner PCMw, the optimal phase-change temperature range is $26\sim 28^{\circ}\text{C}$. Increasing the PCMw thickness enhances thermal inertia, however, improvements in the system's cooling characteristics slow down once the

基金项目: 国家自然科学基金 (52108096); 四川省自然科学基金 (2022YFSY0051)

作者简介: 曹启程 (2001-), 男, 硕士研究生, E-mail: cq13283871309@163.com

通讯作者: 季文慧 (1990-), 女, 博士, 副教授, E-mail: wenhuiji@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2026-04-02

thickness exceeds 10 mm.

【Keywords】 Wall-attached night ventilation; Phase change material wall; Lightweight building envelopes; Thermal design parameters for walls

0 引言

近年来,在全球能源紧缺与可持续发展的双重驱动下,被动式建筑节能技术因其能够有效利用自然资源调节室内热环境、降低建筑运行能耗,日益成为建筑环境领域的研究热点^[1]。其中,夜间通风作为一种典型的被动冷却技术,通过对流作用排除室内蓄热构件在白天积累的热量,从而缓解次日室内的升温幅度^[2]。然而,该技术的实际效果受制于当地气候条件与建筑围护结构特性,在夏季日较差小、相对湿度高的地区,如我国夏热冬冷地区城市,常规通风方式难以充分排除墙体蓄热,限制了其应用潜力^[3]。为此,当前研究趋势逐渐转向主动式夜间通风方式或将夜间通风与其他节能技术的联合研究中,旨在通过系统耦合提升整体能效与气候适应性^[4]。

在通风策略优化方面,竖直壁面贴附式送风作为一种新型送风模式,结合了混合通风与置换通风的优点,具有气流贴附壁面流动、不占用室内有效空间、易于布置等特点,并能以较低能耗提升空气品质^[5]。邱少辉等人^[6]研究了该模式下射流送风速度对气流流场的影响,结果表明,当射流送风速度增加时,其形成的贴附射流距离变长,射流对周围空气的卷吸能力增强,影响区域变得更大。尹海国等人^[7]开展全尺寸实验,研究测试了不同送风速度下竖直向贴附区和水平向空气湖区的三维速度场特性,并得到这两个区域的送风轴线速度衰减、送风主体断面速度分布和送风沿运动方向厚度扩展的计算式。而将竖壁贴附射流与夜间通风相结合,形成竖壁贴附射流夜间通风(WANV),可显著增强气流与墙体表面的对流换热,从而在不利气候条件下强化夜间通风的降温效率。季文慧^[8]于夏季在重庆地区开展了大量有关竖壁贴附射流夜间通风系统的实验,之后结合理论分析和数值模拟对竖壁贴附射流夜间通风墙体耦合动态热过程进行分析,得到了墙体动态蓄放热特性。

与此同时,PCM作为一种高效蓄热调温材料,在建筑围护结构中的应用也日益广泛。现有研究表

明,将PCM集成于墙体、屋顶等构件中,能够有效抑制日间得热、延缓峰值负荷,若与夜间通风结合,可加速PCM蓄冷凝固再生,为次日提供持续的冷却能力^[9]。Corgnati等人^[10]研究了相变耦合通风系统的蓄放热特性,通过实验对比不同空气流速和温度对相变材料耦合通风系统蓄放热特性的影响,并建立了有限差分模型和实验结果进行相互印证。而对于现代广泛采用相变墙体(PCMW)的轻质围护结构,其热惰性较小、蓄热能力不足的问题突出,与夜间通风的耦合正是提升其热质量、改善室内热稳定性的有效途径^[11]。李百战等人^[12]利用夜间通风技术,开展是否含有相变材料层的轻质房间的室内热环境对比实验,结果表明,应用相变材料能增强围护结构的热惰性,提高室内的热舒适性,与夜间通风技术相结合,可以有效地将日间的蓄热量散至室外。

因此,将竖壁贴附射流夜间通风与相变墙体相结合,构成一种新型复合被动冷却系统,成为进一步挖掘节能潜力的重要方向。前期实验已证实,该耦合系统能显著提升夜间通风的降温效果,延长室内舒适时间^[8]。然而,目前对于二者协同作用下的传热机理尚缺乏深入解析,墙体关键热工设计参数对系统性能的影响机制仍未明确,制约了该技术的优化设计与广泛应用。

基于此,本研究在夏热冬冷地区针对轻质围护结构建筑,通过建立相变墙体传热模型,采用数值模拟分析,系统探究了WANV与PCMW耦合作用下的墙体传热过程与协同降温特性,重点分析了相变温度和PCMW厚度对耦合系统降温特性的影响规律,为该耦合系统的工程设计与性能优化提供理论依据。

1 WANV-PCMW 耦合系统传热过程分析

对于轻质围护结构建筑,采用相变墙体耦合竖壁贴附射流通风方式,可以有效强化通风气流与墙体的热交换,从而提升系统的整体热调控性能和自然能源利用效率,其白天和夜间时段的工作原理示意如图1所示。所研究的WANV-PCMW耦合系统

传热过程^[13]分析如下: 白天时段(关闭 WANV), 墙体受到室外太阳辐射和室内热源辐射作用, 相变材料熔化吸收室内外得热, 抑制室内温升并降低空调负荷; 夜间时段(开启 WANV), 在室内外温差为 5~10℃时, 引入室外凉爽空气并通过贴附射

流强迫对流作用带走墙体蓄热, 驱动相变材料释放潜热。该运行模式有助于改善相变材料蓄放热速率慢的问题, 通过相变潜热存储夜间低温空气的冷量, 从而在提升建筑热惯性的同时, 有利于降低次日空调能耗。

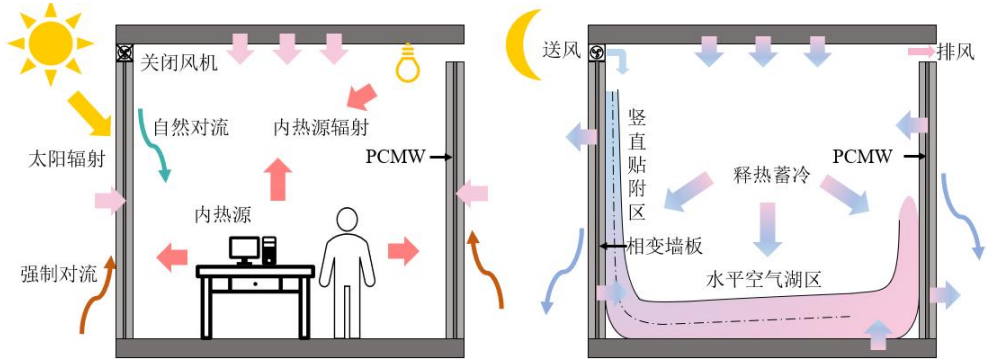


图 1 WANV-PCMW 耦合系统日间(左)和夜间(右)传热过程

Fig.1 Daytime (left) and nighttime (right) heat transfer processes in the WANV-PCMW coupled system

2 数值模型建立与验证

2.1 物理模型

本研究所建立的数值模型如图 2 所示。墙体高度设定为 3m, 沿墙体厚度方向设置多层材料, 包括外层 OSB、保温层 EPS 板和内层 OSB 及 10mmPCMW 层。模型中所用材料的热物性参数如表 1 所示, 墙体结构的热惰性指标为 1.1, 总传热系数为 0.6W/(m²·K), 满足《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB 55015-2021)^[14]。PCMW 采用复合相变材料, 包括熔融降温盐、硫酸钠、硼酸钠、纤维以及高分子量聚合物^[9]。

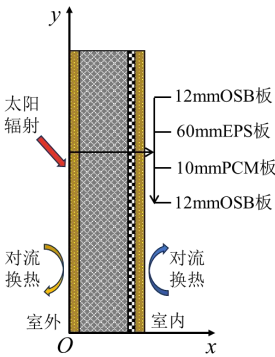


图 2 WANV-PCMW 数值分析模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the WANV-PCMW numerical analysis model

表 1 墙体材料的物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of wall materials

材料	相变潜热 L_p /(kJ/kg)	密度 ρ /(kg/m ³)	热导率 λ /[W/(m·K)]	比热容 c_p /[J/(kg·K)]	厚度 d /mm
OSB	—	593	0.105	1400	12
EPS	—	30	0.042	1380	60
PCM	180	1510	0.8	1800	10

2.2 控制方程

对于内外层以及保温层, 其传热过程为:

$$\rho_i c_{pi} \frac{\partial T_i(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i(x, \tau)}{\partial x^2} + \lambda_i \frac{\partial^2 T_i(y, \tau)}{\partial y^2} \quad (1)$$

式中: i 为不同墙体材料层; ρ 为材料的密度, kg/m³; λ 为材料的导热系数, W/(m·K); c_p 为材料的比热容, J/(kg·K); T 为温度, °C; τ 为模拟时间, s。

本研究中, 采用 Fluent 中的凝固与熔化模型, 并使用显热容法定义 PCM, 将 PCMW 视为具有可变比热容的固体层, 因此, PCMW 层的传热过程为:

$$\rho_{PCM} c_p(T)_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_{PCM} \frac{\partial^2 T_{PCM}(x, \tau)}{\partial x^2} + \lambda_{PCM} \frac{\partial^2 T_{PCM}(y, \tau)}{\partial y^2} \quad (2)$$

式中: $c_p(T)_{PCM}$ 是有效比热容^[15], 如式 (3) 所示:

$$c_p(T)_{PCM} = \begin{cases} c_{p,s} & (T < T_1) \\ \frac{L_p}{(T_2 - T_1)} + \frac{c_{p,s} + c_{p,l}}{2} & (T_1 < T < T_2) \\ c_{p,l} & (T_2 < T) \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_1 和 T_2 分别为熔化过程的起点和终点; L_p 为相变潜热; 下标 s 和 l 分别为固态和液态。

对于墙体模型的边界, 分为两部分, 底部和顶部表面 ($y=0$ 和 $y=h$) 为绝热壁面, 外侧和内侧表面 ($x=0$ 和 $x=\delta$) 为对流换热壁面, 其传热过程为:

$$-\lambda \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial y} \bigg|_{y=0} = -\lambda \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial y} \bigg|_{y=h} = 0 \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \bigg|_{x=0} = h_{out} (T_{out} - T_{w,out}) \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \bigg|_{x=\delta} = h_{in}(y) (T_{w,in} - T_{in}) \quad (6)$$

式中: $T_{w,out}$ 、 $T_{w,in}$ 分别为外侧和内侧的壁面温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{out} 、 T_{in} 分别为外侧和内侧的空气温度, $^{\circ}\text{C}$; h_{out} 、 $h_{in}(y)$ 分别为外侧和内侧壁面的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 其中 $h_{in}(y)$ 取值与高度有关。

2.3 边界条件设置

在本研究中, 室内空气温度始终保持在 26°C , 不考虑内热源影响。室外空气情况选取成都地区夏季典型气象日参数作为输入参数, 由于在实际情况中, 建筑墙体的外壁面热边界条件不仅受室外空气对流换热的影响, 还需考虑太阳辐射和长波辐射的共同作用。因此, 为更准确描述墙体外壁面的热交换过程, 采用室外空气综合温度作为边界条件输入, 以综合反映对流、短波辐射和长波辐射的等效热作用^[16]。

室外空气综合温度 T_z 如式 (7) 所示:

$$T_z = T_{out} + \frac{\alpha I}{h_{out}} - \frac{Q_{lw}}{h_{out}} \quad (7)$$

式中: α 为围护结构外表面对太阳辐射的吸收率; I 为太阳辐射照度, W/m^2 ; Q_{lw} 为围护结构外表面与环境的长波辐射换热量, W/m^2 。对于西朝向, 其综合空气温度如图 3 所示。

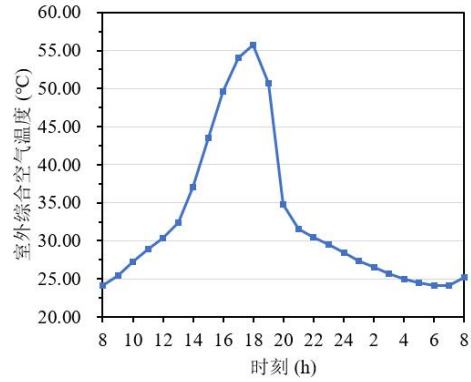


图 3 成都夏季典型日西向室外综合空气温度

Fig.3 Comprehensive outdoor air temperature facing west on the typical summer day in Chengdu

对于外壁面的对流换热系数 h_{out} , 根据规范^[17]取 $22.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。对于内壁面的对流换热系数 h_{in} , 在此分别讨论关闭和开启 WANV 两种情况。在关闭 WANV 时, 墙体内壁面与室内空气以自然对流换热为主, 此时壁面与流体之间的温差及流体流速均较小, 因此自然对流换热系数 $h_{in,n}$ 取 $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[17]。在开启 WANV 时, 墙体内壁面与室内空气以强制对流换热为主, 此时对流换热系数主要受送风气流流速影响。课题组前期研究^[18]表明, WANV 的送风速度为 4 m/s , 其降温性能最佳。因此, 本节首先以送风速度 4 m/s 为例, 具体分析 WANV 条件下竖直向沿程内壁面对流换热系数的变化规律。

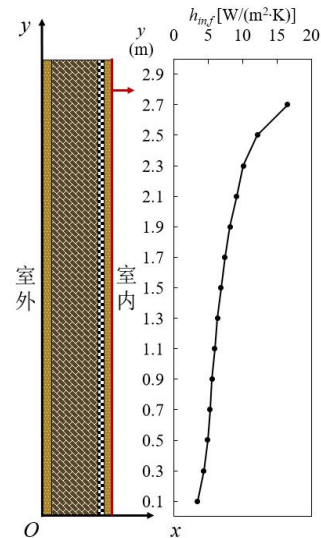


图 4 内壁面强制对流换热系数的沿程变化

Fig.4 Variation of the forced convective heat transfer coefficient along the inner wall surface

对于竖壁贴附通风方式,当气流沿壁面流动时,由于沿程流动阻力及空气卷吸作用,射流核心区轴线速度沿竖直向衰减^[19],导致内壁面对流换热系数沿竖直向呈现明显的梯度分布特征。为准确表征 WANV 的影响,利用课题组前期建立的三维 WANV 数值分析模型^[20],求解沿竖直方向的对流换热系数分布规律。计算结果如图4所示。

2.4 数值模型验证

2.4.1 网格数和时间步长独立性验证

本研究通过非稳态数值模拟,开展了网格与时间步长的独立性验证。采用网格数分别为 10800、70500 和 282000 三种结构化网格以及 1s、30s、120s、300s 三种时间步长进行对比。结果表明,网格数增至 282000 时,内壁面平均温度整体差异约 0.05℃;时间步长缩减至 1s 或 30s 时,与 120s 时的差异小于 0.04℃。为保证计算精度并兼顾计算资源,选取中等网格数量 70500 和时间步长 120s 进行后续模拟。

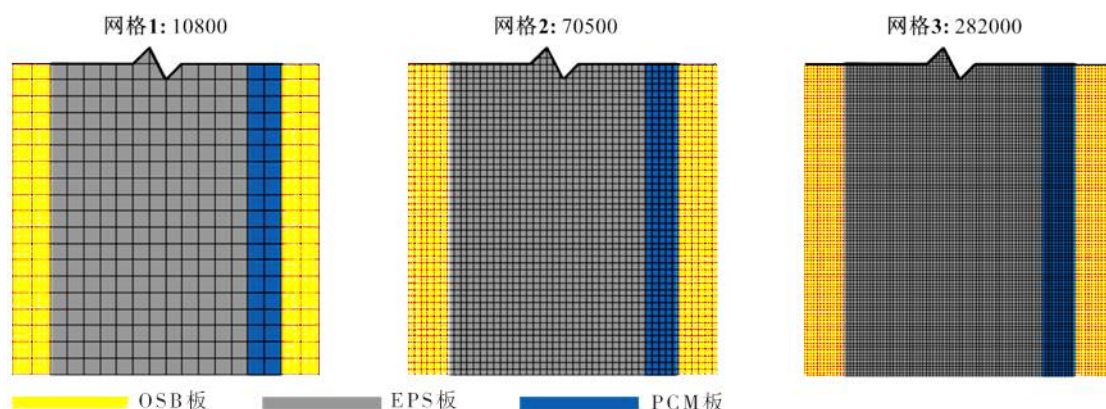


图5 局部网格划分示意图

Fig.5 Schematic diagram of local meshing

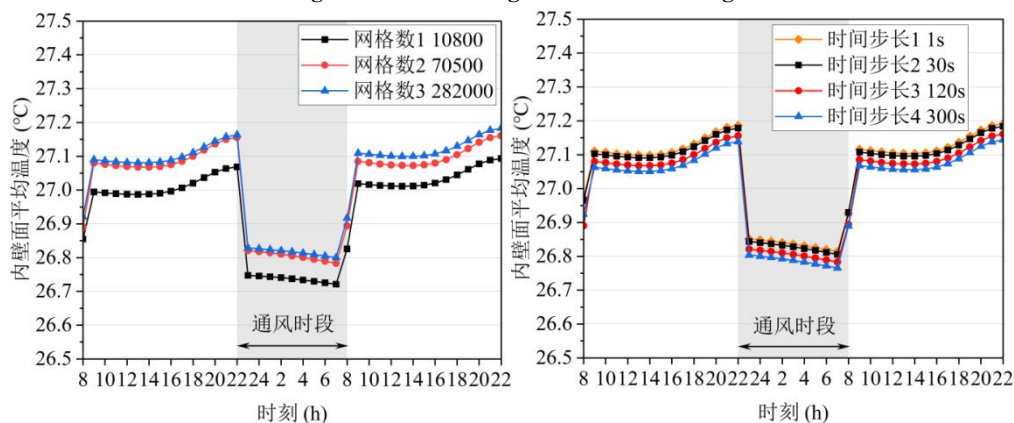


图6 不同网格数和时间步长下的内壁面平均温度

Fig.6 Average temperature on the inner wall surface at different mesh sizes and time steps

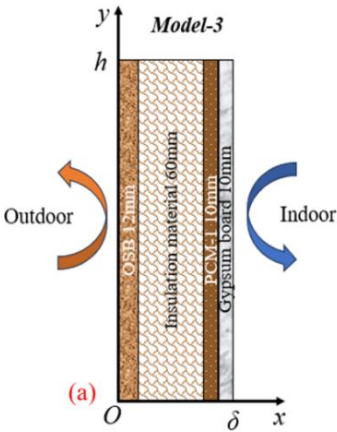
2.4.2 模拟方法验证

为确保数值模拟方法的可靠性与准确性,采用 Liu 等人^[21]的相关研究模型及结论作为本研究计算模型对比验证的基准。如图7(a)所示,为标准二维轻质建筑墙体的数值模型示意图。墙体模型包括外边界层(12mm OSB)、绝缘材料(60mm 玻璃棉)、PCM-1(10mm)和内部夹层(10mm 石膏板)。表2给出了各材料的热物理参数。图7(b)

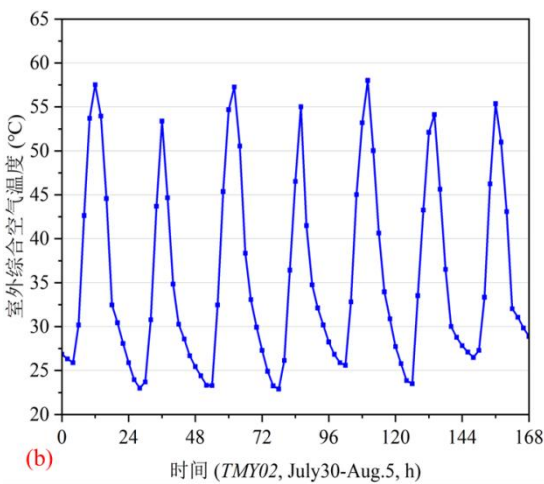
为验证模拟时的天气条件,为 TMY2 中 7 月 30 日至 8 月 5 日室外综合空气温度,该温度由室外空气温度和太阳辐射强度通过公式(7)得出^[21]。内表面和外表面的对流传热系数分别为 $8.7\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 和 $19\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

图8为将模拟得到的室内壁面平均温度与 Liu 的研究结果进行比较,为了确保验证精度,使用了两个指标衡量:相对平均误差(RME)和均方根误

差（RMSE）。通过计算可得，RME 和 RMSE 分别为 0.14%和 0.05℃。结果表明，所建立的数值模型可以用于后续模拟分析。



(a) 标准二维轻质建筑墙体数值模型示意图



(b) 室外综合空气温度

图 7 验证模型信息

Fig.7 Model verification

表 2 墙体材料热物性参数

Table 2 Thermophysical parameters of wall materials

材料	潜热 $L_p/(\text{kJ/kg})$	相变温度 $t_m/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	导热系数 $\lambda/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$,	比热 $c_p/[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	厚度 d/mm
				Solid (Liquid)		
PCM-1	216	18-28	1300	0.5 (0.25)	1785	10
OSB	—	—	593	0.105	1400	12
石膏板	—	—	1050	0.33	1050	10
玻璃棉	—	—	40	0.035	1220	60

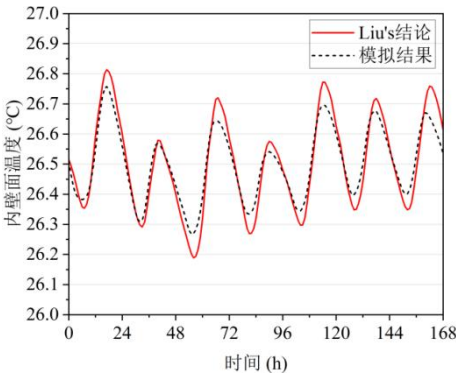


图 8 内壁面平均温度的对比验证

Fig.8 Comparison and verification of average inner wall surface temperature

2.5 模拟工况设置

本研究中设置 WANV 的运行时段为 22:00 至次日 8:00，模拟计算周期为 38 小时（8:00 至次日夜间通风开启时刻 22:00），评估夜间蓄冷对次日白天供冷能力的影响。为研究 PCMW 热工设计参数对耦合系统降温特性的影响，采用单变量分析法，考察相变温度和 PCMW 厚度两个关键因素。

所有工况均设置合理的初始温度，待计算达到准稳态再进行模拟分析计算，并设定能量方程残差 $<10^{-6}$ 作为收敛标准。通过分析内壁面平均温度、热流密度及相变材料液相分数等关键参数，结合评价指标，综合评价系统性能。各工况均设置夜间开启/关闭 WANV 作为对比分析。

表 3 模拟工况设置

Table 3 Simulated operating conditions setup

工况	PCMw 相变温度区间/ $^\circ\text{C}$	PCMw 厚度/mm
1-5	24-26、25-27、26-28、 27-29、28-30	10
6-10	26-28	0、5、10、15、20

3 结果分析与讨论

3.1 评价指标

针对夜间通风降温效果的评价，Artmann 等^[22]采用“壁面温度效率”（ η ）作为评估夜间通风对壁面冷却效果的指标，该指标以夜间通风的送排风温度、室内空气温度及室内壁面温度为计算依据，

定义与取值均基于存在夜间通风气流的实际房间。而对于本研究简化的相变墙体传热模型,调整 η 以适用 WANV-PCMw 耦合系统的特性,并进一步提出“壁面降温效率增量”以表征 WANV 开启相较于关闭状态下 η 的增量。同时,提出采用“通风释热量”(Q_{vent})作为量化 WANV-PCMw 系统释热能力的评价指标。两个评价指标的数学表达式如式(8)(9)所示:

$$\eta = \frac{T_{in}^* - T_a^*}{T_{w,in}^* - T_a^*} \times 100\% \quad (8)$$

$$Q_{vent} = \int_{\tau_0}^{\tau_1} [q_{vent}(\tau) - q_0(\tau)] d\tau \quad (9)$$

式中: T_{in}^* 为室内空气温度, °C; $T_{w,in}^*$ 为夜间通风时段内壁面的平均温度, °C; T_a^* 为夜间通风时段室外空气温度平均值, °C; τ_0 和 τ_1 分别为 WANV 的开启和结束时刻, h; q_{vent} 和 q_0 分别为开启/关闭 WANV 时的内壁面平均热流密度, W/m²。

3.2 WANV-PCMw 耦合系统降温特性

本节以工况3为例,对 WANV-PCMw 系统降温特性开展初步分析,PCMw 布置在西向内侧、PCMw 层厚度为10mm、相变温度区间为26~28°C。图9为通风时段 PCMw 的温度云图,在射流作用下墙体内部形成了弧形带状换热区域,冷量渗透从顶端到底部逐渐衰减。结果表明, WANV 开启后,射流显著提升了内壁面的对流换热系数,强化了对流换热过程,有效促进了相变材料的凝固和潜热释放。这一过程不仅增强了系统的蓄热能力,还通过降低墙体次日的显热得热,改善了室内热环境。

图10为模拟时段(8:00~次日22:00)内,开启/关闭 WANV 时内壁面平均温度、平均热流密度以及相变材料的液相体积分数变化。通过对比发现,在 WANV 作用下,内壁面平均温度和相变材料液相分数均下降,且调控效应可持续至次日白天;通风时段内壁面热流密度显著增加,表明强制对流有效促进了墙体蓄热散失。量化结果显示,夜间内壁面平均温度为27.43°C,壁面降温效率为37.56%;而在竖壁贴附射流夜间通风的作用下,通风时段内壁面平均温度为26.81°C,壁面降温效率为51.50%。相比之下,在 WANV 作用时,夜间内壁面平均温度降低0.62°C,壁面降温效率提高了

13.94%,表明 WANV-PCMw 耦合强化了壁面降温效果。在 WANV 夜间通风时段内累计带走墙体蓄热约68.95kJ/m²。

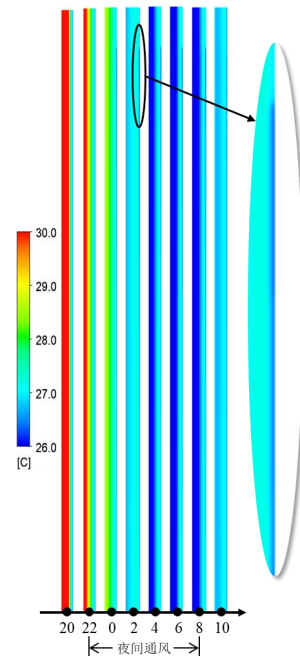


图9 夜间通风时段墙体温度变化

Fig.9 Variation of wall temperature during nighttime ventilation

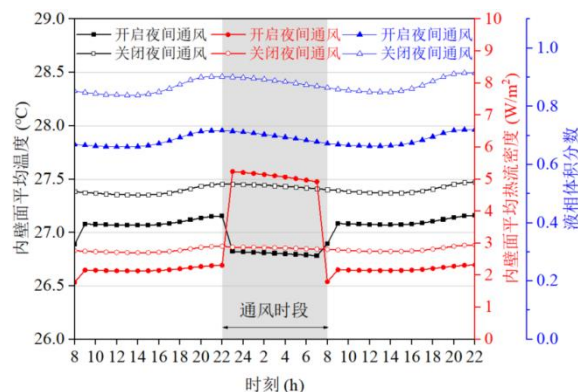


图10 开启/关闭 WANV 时内壁面平均温度、平均热流密度以及 PCM 的液相体积分数变化(相变温度区间:26~28°C、PCMw 层厚度:10mm)

Fig.10 Variations in the average inner wall temperature, average heat flux density, and liquid fraction of PCM when WANV is turned on/off (phase-change temperature range: 26~28°C, PCMw thickness: 10mm)

3.3 相变温度的影响

相变温度是决定 PCMw 相变过程的关键参数,其取值的合理确定需要考虑墙体朝向与安装位

置的综合影响。本节以西向内侧布置 10mmPCMW 层的墙体（工况 1-5）为例展开分析，内壁面平均温度、热流密度、相变材料液相体积分数以及夜间通风释热量、壁面降温效率计算结果如图 11 所示。

从图 11 中可以看出，当未开启通风时，内侧 PCMW 因外保温作用，全天内壁面平均温度仍处于较高水平。开启 WANV 后，墙体内部平均温度和液相体积分数均下降，但降幅不同；而内壁面平均热流密度显著上升，说明通风能更有效地移除此处蓄积的热量。相变温度区间对潜热利用具有关键影响，计算结果显示：相变温度区间为 24~26℃ 与 25~27℃ 时，材料几乎完全熔

化，仅依靠显热传热，内壁面温度在 20:00 分别达到峰值 30.03℃ 和 29.68℃；相变温度区间为 28~30℃ 时 PCMW 层几乎不发生相变，墙体内部壁面温度全天范围内较高。相变温度区间为 26~28℃ 时，壁面温度全天波幅最小为 0.12℃，开启 WANV 后，内壁面平均温度峰值最低为 26.81℃，夜间平均温度降低 0.63℃，壁面降温效率提高 13.94%，且夜间通风释热量为 68.95kJ/m²；相变温度区间为 27~29℃ 时性能与之相近。综上，对于西向内侧布置 10mmPCMW 层的墙体，相变温度区间为 26~28℃ 时耦合系统的整体热性能较好。

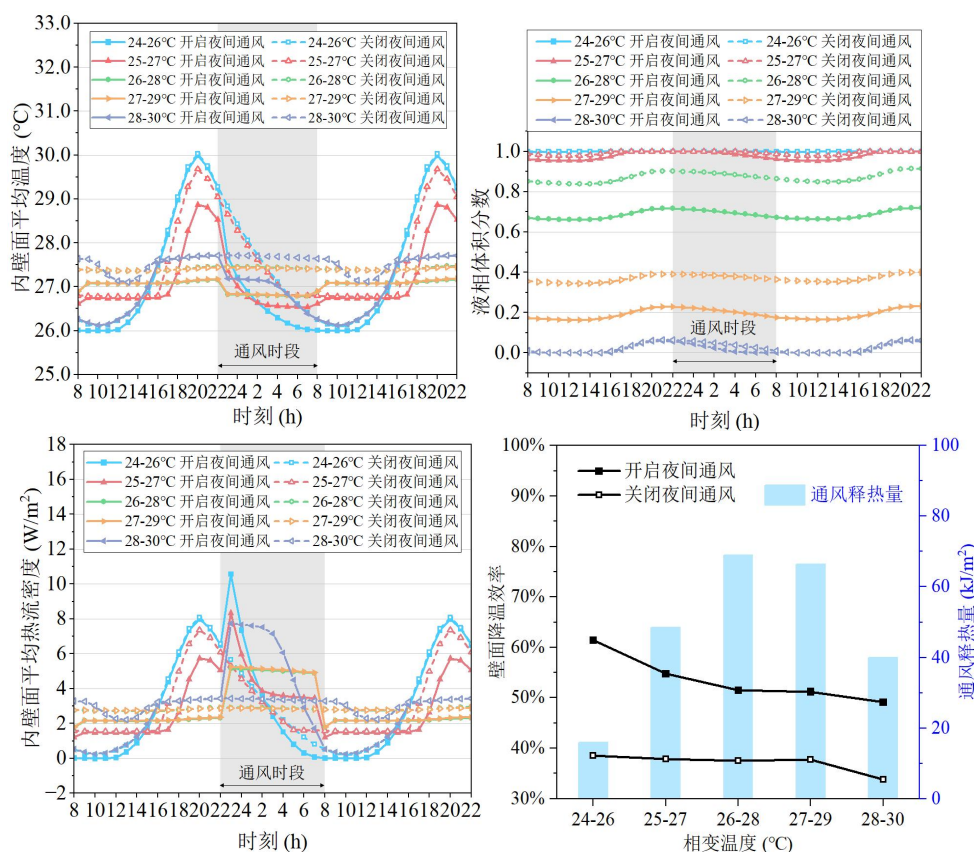


图 11 不同相变温度的降温特性分析

Fig.11 Analysis of cooling characteristics at different phase-change temperatures

3.4 PCMW 层厚度的影响

在 WANV-PCMW 系统的研究中，PCMW 厚度的选择对耦合系统性能同样重要。PCMW 层厚度增大可提升墙体的总蓄热量与调温能力，但 PCMW 层厚度过大会导致墙体蓄放热难以有效进行。本节重点分析（工况 6-10）PCMW 层厚度对 WANV-PCMW 耦合系统降温特性的影响，计算得

出内壁面平均温度、热流密度、相变材料液相体积分数以及夜间通风释热量、壁面降温效率计算结果如图 12 所示。

结果表明，当 PCMW 层厚度从 0 mm 增至 20 mm 时，内壁面温度波幅由 6.36℃ 降至 0.05℃，平均温度和液相体积分数逐渐降低，而壁面降温效率基本稳定在 38% 左右，说明厚度增加增强了相变材

料的潜热蓄放能力, 提升了围护结构的热惰性, 但这种提升并非线性, 超过 10mm 后温度波幅、液相分数及热流密度等指标的改善幅度降低。

夜间开启 WANV 后, 全天内壁面平均温度和液相体积分数均有所降低, 壁面降温效率升至 53.09% 后随厚度增加缓慢下降至 50.29%, 通风释

热量从 71.30kJ/m^2 降至 63.55kJ/m^2 , 表明较厚的 PCMW 层虽能储存更多热量, 却降低了墙体传递热量的速度。因此, 存在一个最佳厚度区间 (约 10mm), 在此区间内蓄热能力与通风排热能力可实现最高效匹配, 从而以最经济的材料用量获得最优的降温效果。

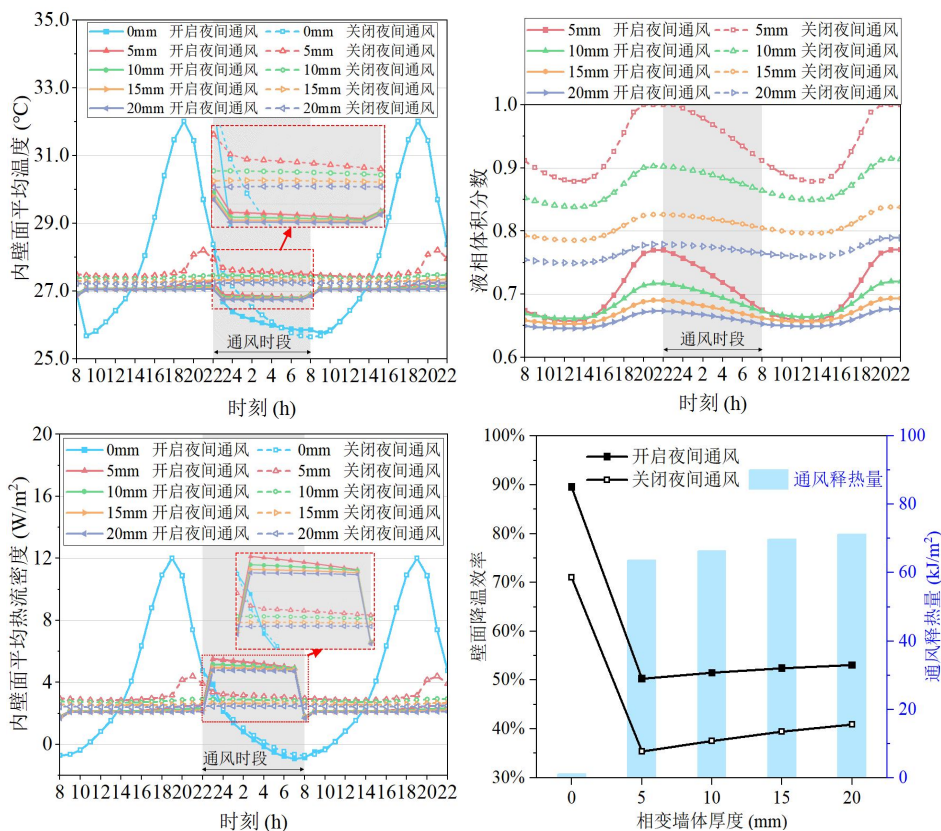


图 12 不同 PCMW 层厚度的降温特性分析

Fig.12 Analysis of cooling characteristics for different PCMW thicknesses

4 结论

本文系统探究了采用 WANV-PCMW 耦合系统的轻质围护结构夜间通风降温特性, 分别讨论了相变温度和 PCMW 层厚度对耦合系统降温特性的影响规律, 并给出了 WANV-PCMW 耦合系统热工设计参数的合理取值范围。本文得出的主要结论如下:

(1) 对比开启/关闭 WANV, 研究结果表明贴附射流有效强化了 PCMW 内壁面对流换热, 促进了相变材料的凝固和潜热释放。量化分析结果显示, 内壁面平均温度降低 0.62°C , 壁面降温效率提高 13.94%, 墙体在夜间通风时段的热流密度显著增加, 促进了墙体蓄热的散发, 通风释热量可达

68.95kJ/m^2 。分析结果证实了 WANV-PCMW 耦合系统对墙体蓄热调控与夜间协同降温的强化作用。

(2) 相变温度区间对系统性能具有关键影响, 对于西向内侧布置 10mm PCMW 层的墙体, 相变温度区间为 $26\text{--}28^\circ\text{C}$ 时 WANV-PCMW 耦合系统性能最优。

(3) 适当增加 PCMW 层的厚度可增强墙体热惰性, 但当厚度超过 10mm 后, WANV-PCMW 耦合系统的降温特性改善幅度显著降低。在本研究范畴内, PCMW 层的最佳厚度为 10mm。

参考文献:

[1] 王立雄. 建筑节能 (第 3 版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社

- 版社,2015.
- [2] 朱新荣,杨柳,刘加平.建筑夜间通风降温研究进展[J].暖通空调,2010,40(6):111-116.
- [3] 龙展图.夏热冬冷地区夜间通风降温特性及优化控制方法研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [4] 王汉青,李端茹,王飒枫,等.夜间通风技术应用与研究进展[J].建筑热能通风空调,2012,31(2):1-6.
- [5] 王瑞乐,尹海国,刘志永,等.非等温竖直壁面贴附式送风流场及温度场研究[J].暖通空调,2015,45(10):97-103.
- [6] 邱少辉,李安桂.条缝型送风口形成的竖壁贴附射流通风模式研究:送风速度的影响[J].暖通空调,2010,40(1):101-105.
- [7] 尹海国,李安桂.竖直壁面贴附式送风模式气流组织特性研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(6):879-884.
- [8] 季文慧.办公建筑竖壁贴附射流夜间通风动态热过程研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [9] 吕亚军.相变材料在轻质围护结构中的应用研究-以天津地区为例[D].天津:天津大学,2013.
- [10] Corgnati S P, Kindins A, Perino M. Phase change materials with ceiling ventilation system to reduce summer cooling loads Compendex[C]. 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings: Sustainable Built Environment, IAQVEC 2007, Sendai, Japan, 2007:1077-1084.
- [11] 张源,魏燕丽,许锦峰.相变材料物性与轻质相变围护结构节能研究进展[J].江苏大学学报(自然科学版),2021,42(3):354-360.
- [12] 李百战,庄春龙,邓安仲,等.相变墙体与夜间通风改善轻质建筑室内热环境[J].土木建筑与环境工程,2009,31(3):109-113.
- [13] Ji W, Yuan Y, Li Y, et al. Wall-Attached Night Ventilation Combined with Phase Change Material Wallboard in Hot Summer: An Experimental Study on the Thermal Performance[J]. Journal of Thermal Science, 2022,31(2):318-331.
- [14] GB 55015-2021,建筑节能与可再生能源利用通用规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [15] 潘艾刚,王俊彪,张贤杰.基于等效热容法和焓法的相变传热数值分析[J].计算机仿真,2014,31(2):315-319.
- [16] 朱颖心.建筑环境学(第4版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [17] ASHRAE. ASHRAE Handbook, Fundamentals[M]. US: SI Edition, 2021.
- [18] Li Y, Ji W, Jiang F, et al. Investigation of the influence of jet supply configurations on the thermal and flow behaviors of the wall-attached night ventilation system[J]. Sustainable Cities and Society, 2022,83:103957.
- [19] Yin H, Li A. Airflow characteristics by air curtain jets in full-scale room[J]. Journal of Central South University, 2012,19(3):675-681.
- [20] 李亚军.非等温竖壁贴附射流夜间通风降温特性研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [21] Liu Z, Hou J, Huang Y, et al. Influence of phase change material (PCM) parameters on the thermal performance of lightweight building walls with different thermal resistances[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022,31:101844.
- [22] Artmann N, Jensen R L, Manz H, et al. Experimental investigation of heat transfer during night-time ventilation[J]. Energy and Buildings, 2010,42(3):366-374.