

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-019-10

# 基于实验与数值模拟的 相变双层呼吸式幕墙热性能研究

吴子桐<sup>1</sup> 赵娟<sup>1</sup> 付韵潮<sup>2</sup> 张志昌<sup>1</sup> 黄伯静<sup>1</sup> 汪明聪<sup>3</sup>

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048;

2. 四川省建筑设计研究院有限公司 成都 610093;

3. 昆明煤气(集团)控股有限公司 昆明 650041)

**【摘要】** 为改善传统双层呼吸式幕墙的不足, 将成都市某办公大楼办公室的双层呼吸式幕墙改造为相变双层呼吸式幕墙, 并与未改造的幕墙进行对比实验, 探究其热工性能优化效果, 验证所建立数学模型的准确性。结果表明: 在蓄放热工况下, 相变门板内表面峰值温度较对照门板低 1.9℃, 降温速率更缓, 且配合夜间风机运行使得相变材料与相变门板内表面温降分别为 1.03℃、0.86℃, 实现通风与散热的协同优化; 控温工况中, 相变门板温度波动幅度降低至 0.4℃; 保温工况下, 相变门板温度峰值延迟 2 小时, 且始终维持比对照门板高 0.5℃的温差。模拟对比西昌、成都与拉萨冬季 24h 温度变化: 拉萨因日照更强使得门板温升更高, 夜间释热使门板维持 20℃以上约 14h, 保温效果更优, 表明该结构适用于辐射高、温差大的地区。

**【关键词】** 双层呼吸式幕墙; 相变门板; 热工性能; 优化通风; 蓄放热工况  
中图分类号 TU398 文献标志码 A

## Thermal Performance Study of Phase Change Double Skin Facade Based on Experimental and Numerical Simulation

Wu Zitong<sup>1</sup> Zhao Juan<sup>1</sup> Fu Yunchao<sup>2</sup> Zhang Zhichang<sup>1</sup> Huang Bojing<sup>1</sup> Wang Mingcong<sup>3</sup>

(1. School of Urban Planning and Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048;

2. Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute, Chengdu, 610093;

3. Kunming General Gas Company, Kunming, 650041)

**【Abstract】** In order to improve the shortcomings of the traditional double skin facade, this paper transforms the double skin facade of an office building in Chengdu into a phase change double skin facade, and conducts a comparative experiment with the unmodified curtain wall to explore the optimization effect of its thermal performance. The results show that under the heat storage and discharge conditions, the peak surface temperature in the phase change door is 1.9℃ lower than that of the normal door panel, and the cooling rate is slower. With the operation of the night fan, the temperature of the phase change material and the surface of the phase change door panel is 1.03℃ and 0.86℃ respectively, which realizes the coordinated optimization of ventilation and heat dissipation; in the temperature control condition, the temperature fluctuation of the phase change door panel is reduced to 0.4℃; under the insulation condition, the peak temperature of the phase change door panel is delayed by 2 hours, and the temperature

作者简介: 吴子桐 (1998-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: wuzitong\_xpu@163.com

通讯作者: 赵娟 (1984-), 女, 博士, 副教授, E-mail: juanzhao@xpu.edu.cn

收稿日期: 2025-07-01

difference of 0.5°C higher than the normal door panel is always maintained.

**【Keywords】** Double skin facade (DSF); Phase change door panel; Thermal performance; Optimized ventilation; Heat storage and release condition

### 0 引言

双层呼吸式幕墙 (Double Skin Facade, 简称 DSF) 因其在通风、降噪和美观性等方面的优势, 近年来被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。然而, DSF 也存在一些问题, 如室内自然通风效果不佳和日照过量等<sup>[4,5]</sup>。在夏季, DSF 受到过量太阳辐射的影响, 会显著增加建筑的冷负荷, 可能导致腔体过热, 从而降低热性能<sup>[6]</sup>。冬季时, 由于 DSF 的综合传热系数通常高于不透明围护结构, 较大的窗墙比进一步增加了热负荷<sup>[7]</sup>。在办公大楼、商场等建筑中应用 DSF 时, 由于设计复杂, 气流路径受到限制, 导致其自然通风能力较差<sup>[8]</sup>; 其次, 内外层玻璃之间的热环境容易导致热滞留或热耗散不足<sup>[9,10]</sup>, 进而影响室内的热舒适性; 在节能方面, 由于 DSF 在不同气候条件下的表现差异较大, 若设计不当, 可能导致能源浪费, 从而限制建筑节能目标的实现。

相变材料 (Phase Change Material, 简称 PCM) 蓄热作为一种高效的能量储存技术, 尤其适用在热量供给不连续或供给与需求不协调的工况下<sup>[11-13]</sup>, 将多余热量暂时储存起来, 等需要时再释放出去<sup>[14-16]</sup>, 提高室内温度的稳定性<sup>[17-19]</sup>。这种技术通过改善复合围护结构的热工特性来调节室内环境负荷, 对实现建筑节能具有一定潜力<sup>[20]</sup>。张春霞等<sup>[21]</sup>将相变材料填入单层玻璃幕墙中, 分析其在过渡季节的热工性能, 并验证了该结构在过渡季节具有稳定室内温度波动, 提高室内舒适性的功能。肖阳等<sup>[22]</sup>设计了一种相变材料联合双层玻璃幕墙的隔热围护结构, 验证了该种结构具有一定的隔热与节能性能。M Francis Luther King 等<sup>[23]</sup>通过在双层玻璃窗的 12mm 间隔层中填充石蜡基相变材料, 研究发现这种 PCM 双层玻璃窗在夏季气候条件下通过吸收与释放太阳能, 能显著增强建筑围护结构的热惰性, 并提升其能源利用效率。Li 等<sup>[24]</sup>通过在三层玻璃窗的中空层内集成 20-30mm 厚硅气凝胶与相变材料, 得出该复合窗在中国寒冷气候条件下通过潜热储能与释放, 能显著增强建筑围护结构的保温性能并提升冬季能源利用效率的结论。然而, 目前关于相变材料与玻璃幕墙结合的研究, 多采用

将相变材料嵌入玻璃的方式, 这样虽可实现相变功能, 却牺牲了玻璃幕墙的采光优势, 难以同时兼顾室内光环境与热环境需求<sup>[25]</sup>。本团队提出并建立了一种相变双层呼吸式幕墙理论模型<sup>[26]</sup>, 并利用 MATLAB 对其性能进行了模拟研究, 发现 PCM 相变时间对室外温度和太阳辐射等气象参数敏感, 表明在强辐射和大温差的地区, 相变双层呼吸式幕墙能在更短时间内完成蓄热和放热过程。

本研究以四川省成都市某办公大楼的双层呼吸式幕墙作为改造对象, 将该大楼某办公室的原有幕墙改造为相变双层呼吸式幕墙, 并与未改造的幕墙进行对比实验, 旨在探究相变双层呼吸式幕墙在热工性能优化方面的效果, 验证所建立数学模型与 MATLAB 数值模拟的准确性, 并探讨该结构在不同气候区的适用性, 揭示其传热机理、控温效能与节能潜力, 从而为建筑围护结构的节能改造, 提供兼顾理论与实践意义的优化方案。

### 1 实验介绍与测试内容

#### 1.1 相变双层呼吸式幕墙原理概述

##### 1.1.1 模型简介

图 1 是相变双层呼吸式幕墙及房间三维模型图和相变双层呼吸式幕墙实物现场图, 该结构主要包括双层呼吸式幕墙和可开合的相变门板。

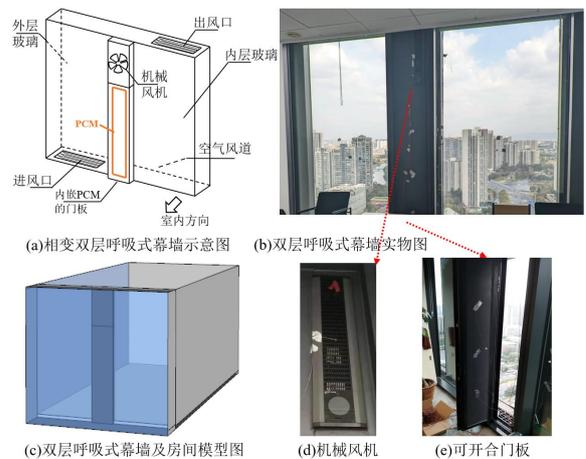


图 1 相变双层呼吸式幕墙模型与现场图

Fig.1 Phase-change double skin facade model and on-site drawing

(1) 双层呼吸式幕墙系统由内外两层镀膜的 Low-E 玻璃幕墙构成, 中间设置有空气风道, 下部设进风口, 上部设出风口。

(2) 相变门板可向室内开合, 其内部封装有相变材料, 并且整体嵌入内层玻璃幕墙中心位置。

(3) 相变门板上部配有机械动力风机, 连通室内与风道, 引导通风流向。

### 1.1.2 传热数学模型

对传热模型进行简化<sup>[25]</sup>并做以下假设:

①通过玻璃、门板、相变材料的传热过程均为一维传热过程; ②忽略相变材料内部的自然对流传热; ③相变材料的热物理性质与温度无关, 只与其形态有关; ④相变材料为各向同性; ⑤空气为不可压缩流体, 在空气幕墙中流动时为层流。

#### (1) 相变门板外表面

相变门板外表面的换热过程主要包括风道内空气的对流换热、门板外表面与相变材料间的导热以及外层玻璃的辐射换热。

$$\rho_d C_d \delta_d A_d \frac{dT_d}{dt} = h_{cv,d-a}(T_a - T_d)A_d + h_{r,d-g}(T_g - T_d)A_d + \frac{2\lambda_d}{\delta_d}(T_1 - T_d)A_d + \alpha_d \tau_g q_s A_d \quad (1)$$

式中:  $\alpha_d$  为相变门板的吸收率;  $\lambda_d$  为相变门板的导热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\delta_d$  为相变门板的厚度,  $m$ ;  $T_1$  为相变材料第一层的温度,  $K$ ;  $q_s$  为单位面积接收到太阳辐射量,  $W/m^2$ ;  $\alpha_g$  为外玻璃吸收率;  $A_d$  为相变门板面积,  $m^2$ ;  $h_{cv,d-a}$  为相变门板与空气风道内空气对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $T_g$  为外玻璃温度,  $K$ ;  $T_G$  为内玻璃温度,  $K$ ;  $T_d$  为相变门板外表面温度,  $K$ ;  $T_a$  为风道内空气温度,  $K$ ;  $t$  为时间,  $s$ 。

#### (2) 相变材料内部

相变材料的换热过程主要包括相变材料与相变门板内外表面的导热换热以及相变材料内部的换热。

$$\begin{aligned} \rho_p C_p \frac{\delta_p}{2} \frac{dT_i}{dt} &= \frac{\lambda_p}{\delta_p}(T_{i+1} - T_i) + \frac{2\lambda_d}{\delta_d}(T_d - T_i) \quad i=1 \\ \rho_p C_p \delta_p \frac{dT_i}{dt} &= \frac{\lambda_p}{\delta_p}(T_{i+1} - T_i) + \frac{\lambda_p}{\delta_p}(T_{i-1} - T_i) \quad 1 < i < n \quad (2) \\ \rho_p C_p \frac{\delta_p}{2} \frac{dT_i}{dt} &= \frac{\lambda_p}{\delta_p}(T_{i-1} - T_i) + \frac{2\lambda_d}{\delta_d}(T_D - T_i) \quad i=n \end{aligned}$$

式中:  $\lambda_p$  为相变材料的导热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\delta_p$  为相邻节点间距,  $m$ ;  $\rho_p$  为相变材料密度,

$kg/m^3$ ;  $C_p$  为相变材料的比热容,  $J/(kg \cdot K)$ 。

$$C_p = \begin{cases} C_{p,s} & T < (T_m - \Delta T) \\ \frac{h}{2\Delta T} + \frac{C_{p,s} + C_{p,l}}{2} & (T_m - \Delta T) \leq T \leq (T_m + \Delta T) \\ C_{p,l} & T > (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (3)$$

$$2\Delta T = T_l - T_s \quad (4)$$

式中:  $C_{p,s}$  为固体相变材料的比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;

$C_{p,l}$  为液体相变材料的比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $T_m$  为相变材料的相变温度,  $K$ ;  $\Delta T$  为相变材料的相变温度半径,  $K$ ;  $h$  为相变材料的相变潜热,  $J/kg$ ;  $T_l$  为相变材料的相变温度上限,  $K$ ;  $T_s$  为相变材料的相变温度下限,  $K$ ;  $T_i$  为相变材料第  $i$  层的温度,  $K$ ;  $T_D$  为相变门板内表面的温度,  $K$ 。

#### (3) 相变门板内表面

相变材料的换热过程主要包括与相变材料的导热换热以及和室内环境的综合换热。

$$\rho_d C_d \delta_d A_d \frac{dT_D}{dt} = U_{ins-D}(T_{ins} - T_D)A_d + \frac{2\lambda_d}{\delta_d}(T_n - T_D)A_d \quad (5)$$

式中:  $U_{ins-D}$  为相变门板内表面与室内环境的总传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ 。

采用 MATLAB 编程语言软件求解相变双层玻璃幕墙的传热微分方程, 选用有限差分法对传热模型进行离散。例如: 将相变门板外表面传热模型对时间区域离散化。

$$\begin{aligned} T_{d(n+1)} &= \frac{\Delta t}{\rho_d C_d \delta_d} [h_{cv,d-a}(T_{a(n)} - T_{d(n)}) + h_{r,d-g}(T_{g(n)} - T_{d(n)}) + \frac{2\lambda_d}{\delta_d}(T_{n(n)} - T_{d(n)}) + \alpha_d \tau_g q_s] + T_{d(n)} \end{aligned} \quad (6)$$

### 1.1.3 运行工况

为应对全年季节变化, 为相变双层呼吸式幕墙设计不同实验工况以应对室外天气变化。

(1) 蓄放热工况: 蓄热时, 室外温度高于相变区间上限  $2^\circ C$ ; 放热时, 室外温度低于相变区间下限  $2^\circ C$ 。PCM 经历完整蓄放热周期。日间, PCM 吸收室外热量熔化, 有效阻隔热流向室内传递; 夜间, PCM 在通风冷却下凝固, 将所储潜热通过门板释放并由流动空气带出, 为次日循环运行做好准备。

(2) 控温工况: 室外温度在相变区间温度的  $\pm 1^\circ C$ 。利用 PCM 在相变区间附近吸放热的特点, 平稳门板温度的微小波动, 维持其热稳定。

(3) 保温工况: 室外温度低于相变区间下限

2℃以下。该工况下 PCM 温度低于相变区间, 但因其热惰性形成“热屏障”, 强化建筑“保温性能”。

成都处于我国夏热冬冷地区, 夏季日间最高气温常在 30 至 35℃之间, 极端高温可达 37℃, 而夜间最低气温通常降至 22℃至 26℃, 形成显著的昼夜温差。在过渡季节, 气温变化更加显著, 白天多为 20℃至 25℃, 夜间降至 10℃至 15℃, 呈现出早晚凉爽、中午温暖的特点。冬季较为寒冷, 气温波动相对不大。白天气温通常在 5℃至 10℃之间, 偶尔气温会降至 0℃以下, 但持续时间较短。总体而言, 成都夏季炎热潮湿, 过渡季节昼夜温差较大, 冬季则阴冷潮湿, 阳光较少。

根据成都的气候特点, 本实验设计以下三种工况并与季节进行对应, 对应情况如表 1 所示。

表 1 季节与工况对应表

Table 1 Correspondence table between seasons and working conditions

	夏季	过渡季	冬季
蓄放热工况	√	√	—
控温工况	√	√	—
保温工况	—	√	√

## 1.2 实验方案

### 1.2.1 实验设计

通过设立实验组(内嵌相变材料的门板)和对照组(原有门板), 在相同实验条件下, 验证相变双层呼吸式幕墙的热工性能。实验中监测参数如表 2 所示。

表 2 监测参数名称表

Table 2 Monitoring parameter name table

	实验组	对照组
风道平均温度	√	√
风道进风口温度	√	√
风道出风口温度	√	√
内门板温度	√	√
外门板温度	√	√
相变材料温度	—	√

现对以下实验工况进行说明与解释:

本次测试从 2024 年 8 月 15 日持续至 2024 年 10 月 22 日, 以下分析工况选取期间较有代表性的时间段进行分析。

蓄放热工况: 实验组和对照组同时在 2024 年 10 月 18 日 08:00 至 2024 年 10 月 19 日 11:30 期间

进行测试, 该工况通过加热设备模拟自然条件下室外温度的上升。加热设备于 2024 年 10 月 18 日 08:00 开启, 模拟室外温度的上升; 而在 2024 年 10 月 18 日 15:00 时关闭加热设备, 以模拟室外温度的下降过程。

基于这一工况, 进一步补充了夜间风机开启工况的测试: 风机开启的测试时段在 2024 年 9 月 1 日 22:30-2024 年 9 月 2 日 06:30, 风机关闭的测试在 2024 年 8 月 20 日-2024 年 8 月 21 日同一时间段。原双层呼吸式幕墙结构中, 在可开合门板的上方安装了一个动力风机, 风机开启时能够以 0.1m/s 的速度将幕墙风道中的新风引入室内。其原本主要的作用是在不打开门板的情况下, 仍能为室内提供一定量的新风, 避免频繁开启门板带来的不便。在夜间开启风机, 探究该措施对相变门板强化对流放热效果及其与蓄放热工况的配合优化作用。

控温工况: 实验组和对照组同时在 2024 年 10 月 17 日 06:00 至 2024 年 10 月 17 日 14:40 期间进行测试, 评估自然室外温度变化对系统性能的影响。

保温工况: 实验组和对照组同时在 2024 年 10 月 21 日 07:30 至 2024 年 10 月 21 日 21:00 期间进行测试, 评估自然室外温度变化对系统性能的影响。

### 1.2.2 相变材料的选用

选用相变温度区间为 26℃至 27℃的石蜡作为实验相变材料, 并掺入膨胀石墨以优化其导热性能。该材料具体热物性参数如表 3 所示。

表 3 相变材料热物性参数

Table 3 Thermal and physical parameters of PCM

	导热系数 /(W/m·K)	相变潜热 /(J/g)	相变区间 /℃
参数值	3.1	193.3	26~27

### 1.2.3 测点布置及测试仪器

相变材料的测点实际布置图及定位尺寸示意图如图 2 所示, 将中空门板内部安装用于支撑的固定龙骨, 将 12 个热电偶测点分别缠绕并固定于龙骨上, 随后填充相变材料并完成门板封装。12 个测点既能分别反映不同空间区域的温度特征, 也可以全面呈现内部相变材料的温度变化情况, 最终将各测点采集数据的均值作为相变材料的特征温度值。

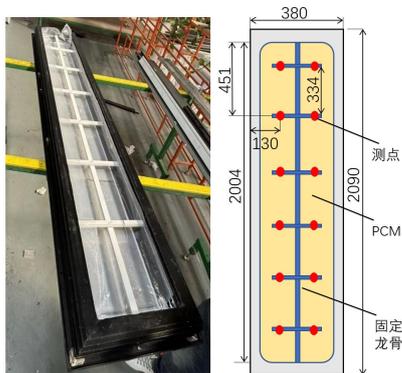


图 2 相变材料测点布置图

Fig.2 Layout of measuring points of PCM

如图 3 所示, 门板结构尺寸为 2090mm×380mm×85mm, 在门板内外表面分别布置 3 个测点, 取其数据平均值来观察内、外门板温度变化趋势。采用 Omega/TT-T-30 型热电偶, 在门板内表面中心位置设置一个测点, 命名为  $T_{\text{内门板-中}}$ ; 分别在  $T_{\text{内门板-中}}$  的上、下方 520mm 处布置 2 个测点并命名为  $T_{\text{内门板-上}}$ 、 $T_{\text{内门板-下}}$ ; 门板外表面相同位置分别布置  $T_{\text{外门板-上}}$ 、 $T_{\text{外门板-中}}$ 、 $T_{\text{外门板-下}}$ 。所有的热电偶都采用锡纸覆盖住, 避免太阳光照射及其他因素影响, 以尽可能的减小误差。

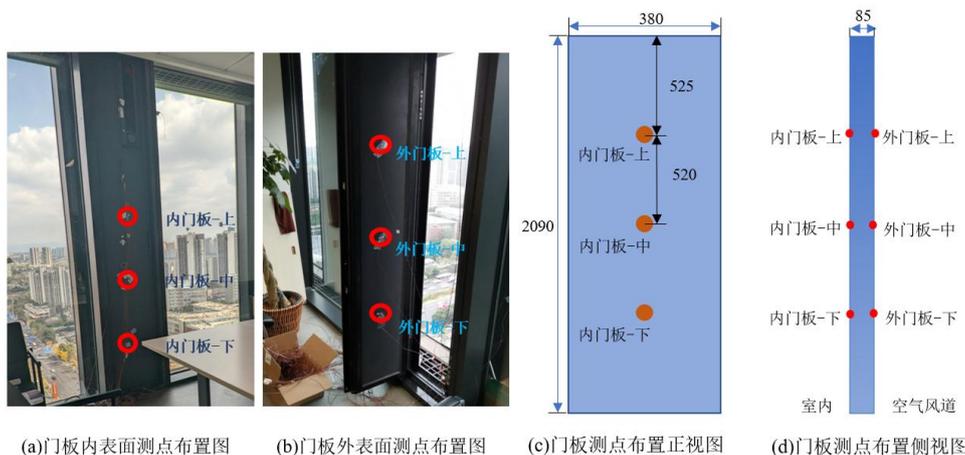


图 3 门板表面测点布置图

Fig.3 Layout of the measuring point on the surface of the door panel

$T_{\text{外门板-下}}$  等高, 命名为  $T_{\text{风道-上}}$ 、 $T_{\text{风道-中}}$ 、 $T_{\text{风道-下}}$ 。

所有热电偶温度数据自动收集并使用 Agilent 34972A 数据记录仪记录, 数据记录频率 60 秒/次, 用于温度测点布设及数据采集的仪器设备参数如表 4 所示。

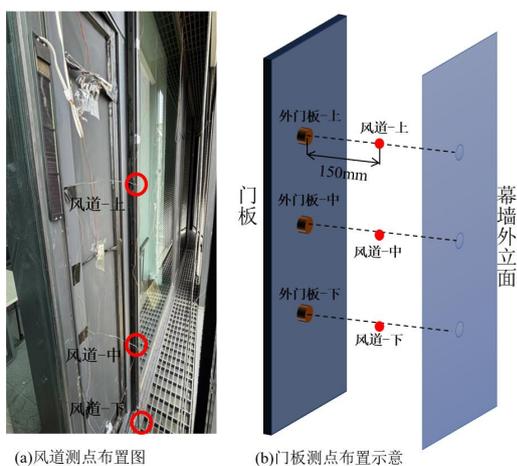


图 4 风道测点布置图

Fig.4 Air duct measuring point layout

如图 4 所示, 在风道内设置 3 个温度测点, 将每条热电偶线距测点 150mm 处粘贴固定在门板外门框上。使三个测点分别与  $T_{\text{外门板-上}}$ 、 $T_{\text{外门板-中}}$ 、



图 5 测试仪器

Fig.5 Test instrument

表 4 测试仪器用途表  
Table 4 Test instrument usage table

设备名称	型号	技术参数	单位	数量	用途
T 型热电偶	Omega/TT-T-30	温度范围: -200℃~150℃	根	40	将热电偶放置或粘贴在指定测点,采集该测点的温度
数据采集仪	34972A	配置 2 块 40 通道数据接口; DC 转换到 20GHz、数字 I/O、D/A 转换器及计数器/总数计数器等功能; 内置以太网, USB2.0 和 GPIB 连通性	台	1	用于采集各热电偶测点温度数据,并将数据记录在电脑上
温湿度记录仪	建大仁科 Cos-03-*USB	仪表量程: 温度 -40℃至 80℃、湿度 0%~100%RH; 精度: 温度±0.1℃、湿度±1.5%RH; 记录容量: 208 万组; 检测类型: 探头外延型; 测量更新时间: 2~255s; 记录间隔: 5s~18h	台	4	用于补充测试空气风道的温度数据
可调温恒温电烙铁套装	广乾 (CNZGGQ)	功率: 60W; 温度: 200~480℃	个	1	焊接热电偶铜线

## 2 结果与讨论

### 2.1 相变门板蓄放热工况

#### 2.1.1 相变门板蓄放热工况

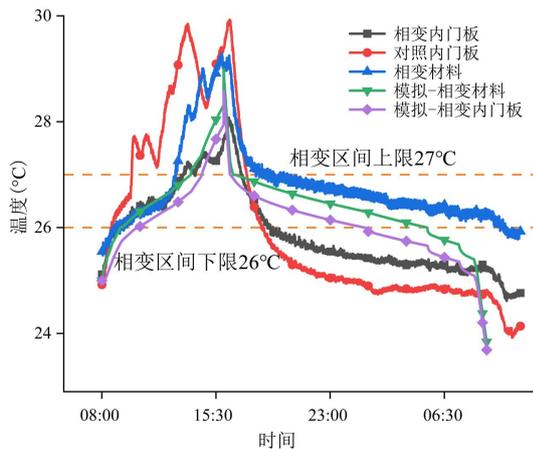


图 6 相变门板蓄放热工况

Fig.6 The heat storage and release conditions of the PCM door

图 6 是蓄放热工况下,相变双层呼吸式幕墙门板内表面、相变材料及对照双层呼吸式幕墙门板内表面的温度测试变化;同时给出相变内门板、相变材料温度变化的数值模拟情况与实测数据进行对比验证。

8:00 开始,相变门板内表面、对照门板内表面、相变材料三者温度急速上升,这一现象主要是模拟室外温度上升,使相变双层呼吸式幕墙各部件的温

度随之升高。在 08:00 至 12:30 期间,相变材料温度上升至 26℃以上并进入相变区间,此时相变材料的升温曲线变得平缓,受其热物性影响,相变门板内表面的升温曲线也随之平缓。然而,当相变材料温度超过 27℃后,其相变过程完成,相变材料及相变门板内表面的温度开始再次快速上升。约在 16:20 时,三者温度分别达到峰值,其中对照门板内表面的峰值温度最高,为 29.9℃,其次为相变材料的 29.2℃,相变门板内表面的峰值温度最低,为 28.0℃。对照门板内表面温度比相变门板高约 1.9℃。

峰值之后,三者温度逐渐下降。当相变材料温度降至 27℃时,其再次进入相变区间,此时相变材料的降温曲线变得平缓,相变门板内表面温度同样因受相变材料影响而降温速度变缓。相变材料温度峰值到自然减温至相变区间下限 26.0℃时,共历时 17 小时 40 分钟,此时是次日早晨 10:00,对照门板内表面的温度则下降较快,此时温度为 24.5℃。相变门板降温速率相较之下较缓,该时刻温度为 25.1℃,比对照门板内表面温度高约 0.6℃。

通过将相变内门板、相变材料温度的数值模拟与实测数据进行对比,二者在温度变化趋势上的高度一致,验证了数值模型在热工性能预测上的准确性与可靠性;因此,该模型可应用于不同地区或气候条件下相变双层呼吸式幕墙的预测与分析。

### 2.1.2 夜间开启风机辅助散热

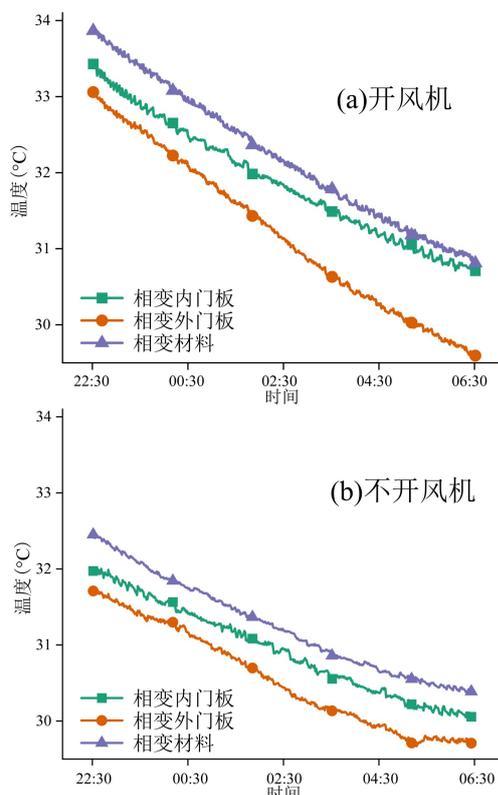


图 7 风机辅助散热

Fig.7 Fan-assisted heat dissipation

图 7 (a) 显示了机械风机夜间开启, 辅助散热的工况下, 相变门板内表面、相变材料及对照门板内表面的温度测试 8 小时数据; 图 7 (b) 则是室外天气参数类似情况下, 未开启风机的另一天进行的对比数据。

未开启风机的条件下, 相变材料的温降为  $2.11^{\circ}\text{C}$ , 相变门板内表面温降  $1.94^{\circ}\text{C}$ , 相变门板外表面温降为  $2.0^{\circ}\text{C}$ ; 然而开启风机使得相变材料的温降达到了  $3.14^{\circ}\text{C}$ , 相变门板内表面温降  $2.8^{\circ}\text{C}$ , 相变门板外表面温降为  $3.5^{\circ}\text{C}$ 。从图 7 (a) 中可以看出, 开启风机后, 门板的温降速率相比于图 7 (b) 中未开风机的情况更快, 这表明风机的辅助散热作用能够提高门板的散热效率。

这是因为该工况下风机吸入新风的过程, 可以强化风道空气与相变门板的对流换热, 从而促进相变材料的散热, 这使得改造后的相变双层呼吸式幕墙系统的风机在为室内夜间补充新风的同时, 又可以为相变材料的散热提供一定的辅助。若夜间打开风机, 分析表明风机辅助门板散热具有积极作用,

实现了通风与门板散热的双重功效。

### 2.2 相变门板控温工况

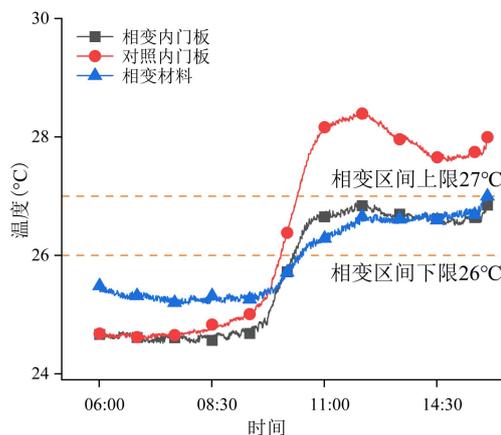


图 8 相变门板控温工况

Fig.8 Temperature control condition of the PCM door

图 8 是控温工况下, 相变门板内表面、相变材料及对照门板内表面的温度测试情况。

实验设置二者内表面温度从同一初始温度  $24.7^{\circ}\text{C}$  开始。从图 8 中可以看出, 对照门板内表面温度随着太阳辐射的增强, 温度在上午 9:30 后快速升高, 并在 12:00 左右达到峰值, 为  $28.5^{\circ}\text{C}$ ; 相变门板内表面温度也在这期间升温, 但从图 8 中反映出其升温速率较慢, 也在 12:00 左右达到峰值, 为  $26.9^{\circ}\text{C}$ , 比对照门板低  $1.6^{\circ}\text{C}$ 。随后二者温度随着太阳辐射减弱产生下降趋势。在降温阶段, 对照门板内表面温降速率明显大于相变门板内表面。降温期间对照门板内表面温度谷值为  $27.6^{\circ}\text{C}$ , 波动温度为  $0.9^{\circ}\text{C}$ ; 而相变门板内表面温度谷值为  $26.5^{\circ}\text{C}$ , 波动温度为  $0.4^{\circ}\text{C}$ 。实验过程中对照门板内表面表现出更大的温度波动, 这表明对照门板的热调节能力相对于相变门板较弱, 对外界温度变化响应显著。

这是因为相变门板内嵌相变材料后, 温度波动明显减小。嵌入的相变材料始终保持温度在相变区间, 通过自身物性缓解了外界温度波动对系统的影响, 这使得相变门板内表面温度随时间变化更加平稳, 并且最高温度未超过  $27^{\circ}\text{C}$ , 同时 12:00 后当对照门板进入降温波动趋势时, 相变门板降温速度较慢, 且过程中始终高于  $26^{\circ}\text{C}$ 。

综上所述, 在控温工况下相变门板利用相变材料的热缓冲有效抑制了门板内表面的温度波动, 使其温度变化更加平稳, 表现出了显著的控温效果。

与对照门板相比,添加相变材料的门板能更好地适应外界温度变化。

### 2.3 相变门板保温工况

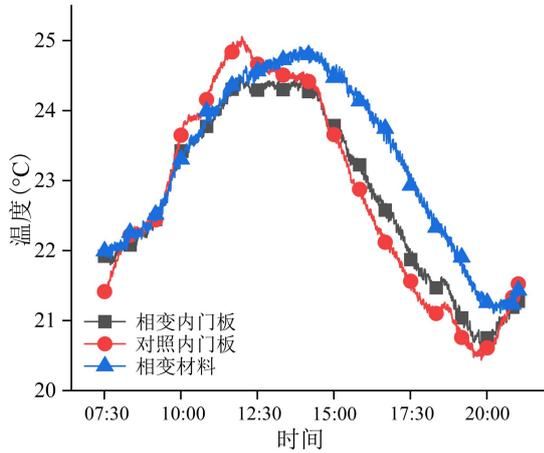


图 9 相变门板保温工况

Fig.9 Insulation conditions of the PCM door

图 9 是保温工况下,相变门板内表面、相变材料及对照门板内表面的温度测试情况。

两个系统同时在 07:30-20:00 开始进行测试。在 12:00 时,室外太阳辐射量达到最高值,此时对照门板内表面温度达到峰值 25.1°C,随后温度开始下降。相比之下,由于相变门板内嵌相变材料的热惰性,使其内表面温度未在此时达到峰值,而是在 14:00 时达到最高值,分别为 24.9°C (相变材料温度)和 24.5°C (相变门板内表面温度),延迟峰值时间 2 小时。

随着室外太阳辐射的减弱,14:30 后系统进入降温阶段,由图 9 可见对照门板内表面的温降速度大于相变门板,导致对照门板内表面温度低于相变门板内表面,并且在测试结束前,相变门板内表面温度始终高于对照门板内表面,温差约维持在 0.5°C。

这是由于传统双层呼吸式幕墙系统虽然在室外气温较低时,有利用温室效应进行保温的作用,但其性能容易受到室外气象参数变化的影响,导致对室内温度调节效果不稳定。在该相变双层呼吸式幕墙系统中尽管相变材料未发生相变过程,但较高的比热容使其在显热升温过程中能够吸收更多的热量。同时,由于相变材料的热导率较低,热传导较为缓慢。这意味着热量传递到相变门板内表面的速度较慢,进而导致温度的延迟升高。因此,相变门板内表面温度的变化过程中,温度峰值会出现延

迟现象,显示出相较传统双层呼吸式幕墙更优的保温性能。

### 2.4 基于数值模拟的冬季工况

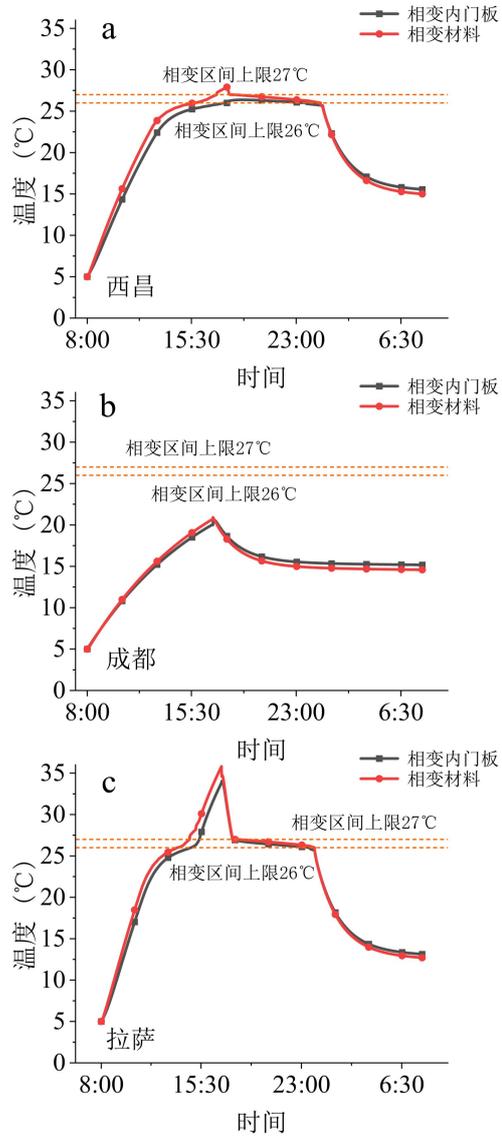


图 10 不同地区的冬季工况数值模拟

Fig.10 Numerical simulation of winter conditions in different regions

图 10 (a)、(b)、(c) 分别代表相变内门板与相变材料,在西昌、成都、拉萨三地冬季 24h 周期内的温度变化情况。这三座城市分别代表温和气候区、夏热冬冷区以及严寒气候区,模拟参数依据各地冬季气候条件设定<sup>[12]</sup>。

从图 10 可观察到,相较于西昌与成都,拉萨地区的相变材料在冬季展现出更显著的蓄放热特性。该地气候条件下,室外气象参数使相变门板内

表面温度约 14h 维持在 20℃ 以上; 门板内表面及相变材料温度的峰值分别达到 33.8℃ 与 35.8℃。

这表明, 在拉萨地区冬季条件下, 该结构具有更优异的保温性能。原因是拉萨冬季白天的太阳辐射强度高于另外两地, 使得门板在日间能够吸收并储存更多热量, 与此同时, 借助相变材料的蓄热特性, 白天所吸收的热量可在夜间缓慢释放, 从而实现持续性的保温效果。研究证明该结构适用于拉萨这类冬季太阳辐射强且昼夜温差大的严寒地区。

### 3 结论

通过对实测数据的分析, 得出以下结论:

(1) 在蓄放热工况下, 相变材料有效减缓了室外温度变化对门板温度波动的影响。在升温阶段, 相变门板内表面峰值比对照门板低 1.9℃, 且温升速率较慢。降温阶段, 相变门板内表面谷值比对照门板高 0.6℃; 这种“日间削峰、夜间放热”的模式, 验证了相变材料通过相变潜热实现了对系统热缓冲与周期循环策略。夜间风机开启后, 相变材料与相变门板内表面温度分别降低 1.03℃ 和 0.86℃, 证明对于相变双层呼吸式幕墙而言, 风机不仅夜间为室内补充新风, 还能促进相变材料的散热, 实现了通风与门板散热的双重功效。

MATLAB 数值模拟与实测数据在温度变化趋势上高度吻合, 验证了所建数学模型的准确性与可靠性; 该模型可应用于不同地区与气候条件下的温度场预测与分析, 为该结构冬季工况测试部分的缺失提供理论预测与补充。

(2) 在控温工况下, 相变门板内表面因为内嵌相变材料使得温度波动明显减小。升温阶段, 相变门板内表面与对照门板内表面温度均在 12:00 达到峰值, 但相变门板比对照门板低 1.6℃。降温阶段对照门板呈现 0.9℃ 的波动幅度, 相变门板则仅波动 0.4℃。相比之下, 相变双层呼吸式幕墙在控制温度波动方面表现更平稳。

(3) 在保温工况下, 相变门板内嵌相变材料后, 内表面温度变化更为平稳。在 12:00 时, 对照门板内表面温度达到峰值 25.1℃, 而相变门板的内表面温度在 14:00 时达到最高值 24.5℃, 较对照门板延迟约 2 小时。降温阶段, 相变门板内表面降温速度较慢, 且始终高于对照门板约 0.5℃, 显示出较传统双层呼吸式幕墙更优的保温性能。

(4) 利用模拟数据对比西昌、成都与拉萨冬季 24h 温度变化情况: 拉萨因日照强度高, 使得门板内表面与相变材料温度分别达 33.8℃、35.8℃, 夜间缓慢释放热量维持门板内表面 20℃ 以上约 14h, 在冬季有更好的保温效果, 证实相变双层呼吸式幕墙适用于太阳辐射强且昼夜温差大的地区。

本研究通过实验与模拟, 证实相变双层呼吸式幕墙“日间削峰、夜间填谷”的热缓冲作用。所建传热模型经验证可靠, 为该结构在适宜地区的应用与优化提供了直接的理论与实践依据。同时, 本文还存在一些不足之处, 由于实验场地条件的限制, 对于不同地区该结构与该类相变材料的有效性存在继续研究的空间。未来, 将在昼夜温差大、太阳辐射强的地区进一步研究和分析该结构的表现。

### 参考文献:

- [1] Smith J, Peter Q. Double skin facades (DSF) and building integrated photovoltaics (BIPV): A review of configurations and heat transfer characteristics[J]. *Journal of Building Performance Studies*, 2019,12(3):45-66.
- [2] LIU X, SHEN C, WANG J, et al. Static and dynamic regulations of photovoltaic double skin facades towards building sustainable:A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023,1:19-23.
- [3] Yadav S, Hachem-Vermette C. Comprehensive assessment of double skin façades: A mathematical model for evaluating influence of KL ratio on electrical and thermal performances, and indoor conditions[J]. *Energy and Buildings*, 2024,15:16-17.
- [4] SUN Q, DU Y, YAN X, et al. A control optimization model for a double-skin facade based on the random forest algorithm[J]. *Buildings*, 2024,14:3045.
- [5] 陈友明,王衍金,郭猛. 双层皮幕墙传热计算理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2021.
- [6] NASIR O, KAMAL M A. An appraisal of double skin facade in building design: architectural intervention and sustainability[J]. *International Journal of Architecture and Urbanism*, 2023,7(1):158-172.
- [7] 刘猛,刘福玲,张小怀. 基于联合仿真的 DSF 建筑能耗敏感性分析[J]. *制冷与空调*, 2022,36(5):714-720.
- [8] POURSHAB N, TEHRANI M D, TOGHRAIE D, et al.

- Application of double glazed facades with horizontal and vertical louvers to increase natural air flow in office buildings[J]. *Energy*, 2020,200:117486.
- [9] KIM G-H, KWON H-M, YANG J-H. Ventilation Rate and Thermal Environment Properties of Double Skin Facade Considering Wind Profile and Direction[J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2017,16(3):675-682.
- [10] BARBOSA S, IP K. Predicted thermal acceptance in naturally ventilated office buildings with double skin facades under Brazilian climates[J]. *Journal of Building Engineering*, 2016,8:1-15.
- [11] Zhao J, Gao J, Liao J, et al. An experimental study of the heat storage and the discharge performance and an economic performance analysis of a flat plate phase change material (PCM) storage tank[J]. *Energies*, 2022,15(11):4023.
- [12] XIE Y, ZHAO J, GAO J, et al. Study on thermal storage performance and heat transfer blind area of multi-tube phase change heat storage tank [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025,119.
- [13] 赵合瑾,万贤,路佳慧,等.相变储能材料在建筑领域的发展和应[J].*中国塑料*,2023,37(11):46-61.
- [14] 胡孝彭,常允艳,郭建军.相变材料在建筑墙体中的应用分析[J].*水利与建筑工程学报*,2023,21(6):51-55.
- [15] 孙婉纯,冯锦新,张正国,等.相变储热技术用于被动式建筑节能的研究进展[J].*化工进展*,2020,39(5):1824-1834.
- [16] Lin W, Yao X, Zhao W, et al. Pathways to Carbon Neutrality in the Built Environment: Phase Change Materials[J]. *Green Carbon*, 2024.
- [17] 郑晨潇,刘嘉淇,崔彦岗,等.相变蓄热地板的研究现状与展望[J].*中国塑料*,2024,38(10):70-74.
- [18] 蒋聪,蒋达华,陈璞,等.相变材料在围护结构中的应用及热工性能研究进展[J].*化工新型材料*,2024,52(2):282-287,293.
- [19] LUO Z Q, XU H T, et al. Experimental study on the thermal performance characteristics of a PCM-enhanced hut in Shanghai[J]. *Energy and Buildings*, 2025,281:115418.
- [20] 蔡阳,刘子瑞,黄颖茜,等.相变蓄热对光伏相变复合围护结构隔热及发电性能的影响[J].*西安工程大学学报*,2024,38(5):117-125.
- [21] 张春霞,李栋,杨瑞桐,等.新型保温相变玻璃幕墙室内热环境研究[J].*工程热物理学报*,2023,44(9):2560-2566.
- [22] 肖阳,许志慧,田耀月,等.通风相变双层玻璃幕墙的隔热性能研究[J].*科技与创新*,2023,(17):73-75.
- [23] KING M F L, RAO P N, SIVAKUMAR A, et al. Thermal performance of a double-glazed window integrated with a phase change material[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021,50(1):1516-1521.
- [24] LI D, ZHANG C J, LI Q, et al. Thermal performance evaluation of glass window combining silica aerogels and phase change materials for cold climate of China[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019,114:547.
- [25] ISMAIL K A R, LINO F A M, TEGGAR M, et al. A Comprehensive Review on Phase Change Materials and Applications in Buildings and Components[J]. *ASME Open Journal of Engineering*, 2022,1,011049:1-26.
- [26] 付韵潮,吴子桐,赵予,等.新型相变双层呼吸式幕墙热性能模拟研究[J].*西安工程大学学报*,2024,38(5):126-135.