

文章编号：1671-6612（2025）06-805-09

# 相变墙体热湿耦合传递特性研究

张沛璐 曹晓玲 赵宁 李金伟

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 相变材料被广泛应用于建筑围护结构中，可以显著提高围护结构蓄热能力，减小室内温度波动幅度，提高屋内人的热舒适性。以往研究大多集中于相变墙体热性能，对墙体中的相变材料发生相变吸放热过程中温度变化对墙体内部湿传递的影响研究不足。建立了相变墙体热湿耦合传递模型，对比分析了单纯导热和热湿耦合模拟结果、普通墙体和相变墙体内部温湿度分布及内表面热湿流变化，研究结果表明，单纯考虑导热时的墙体交界面处温度略高于热湿耦合计算所得温度，湿耦合作用使墙体温度降低0.7%~1.86%，验证了湿传递对热缓冲的作用；较普通墙体而言，相变墙体温度衰减倍数提高了1倍多，相对湿度衰减倍数提高了近2倍，相变墙体温度和相对湿度延迟均增加了约3h，内表面热湿流量波动幅度小且峰值出现时间均延迟2个小时。而相变材料基本不具有吸湿性，导致相变墙体内外表面相对湿度大于普通墙体，但波动幅度降低37%。

**【关键词】** 相变墙体；热湿模型；相对湿度；衰减倍数

中图分类号 TU111 文献标志码 A

## Study of Heat and Moisture Coupling Characteristics of the Phase Change Wall

Zhang Peilu Cao Xiaoling Zhao Ning Li Jinwei

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** Phase change materials (PCMs) are widely used in building envelopes, which can significantly enhance the heat storage capacity of the envelopes, reduce the amplitude of indoor temperature fluctuations, and improve the thermal comfort of people indoors. Previous studies have mostly focused on the thermal performance of phase - change walls, with insufficient research on the impact of temperature changes during the phase - change heat absorption and release process of the phase - change materials in the walls on the moisture transfer inside the walls. In this paper, a heat - moisture coupled transfer model for phase - change walls was established. The temperature and humidity distributions inside ordinary walls and phase - change walls, as well as the changes in heat and moisture fluxes on the inner surface, were compared and analyzed. The research results show that, the temperature at the interface of the wall is slightly higher than the temperature calculated by the coupling of heat and humidity. The moisture coupling effect reduces the wall temperature by 0.7% to 1.86%, verifying the role of moisture transfer in thermal buffering. Compared with ordinary walls, the temperature attenuation multiple of the phase - change wall is increased by more than 1 time, the relative humidity attenuation multiple is increased by nearly 2 times, the delays of both temperature and relative humidity of the phase - change wall are increased by approximately 3 hours. The fluctuation range of the heat and moisture fluxes on the inner surface is small, and the peak appearance time is delayed by 2 hours. However, the phase - change material has basically no hygroscopicity, resulting in the relative humidity of the inner surface of the phase - change wall being greater than that of the ordinary wall, but the fluctuation amplitude is reduced by 37%.

基金项目：国家自然科学基金项目（52108097）

作者简介：张沛璐（2000.02-），女，硕士研究生，E-mail: zhangpeilu@my.swjtu.edu.cn

通讯作者：曹晓玲（1984.08-），女，博士研究生，高级工程师，E-mail: caoxl@swjtu.cn

收稿日期：2025-02-20

**【Keywords】** Phase change wall; Heat and humidity model; Relative humidity; Attenuation multiple

## 0 引言

相变潜热储存技术可以用来解决建筑物的能量供求在时间和强度上存在的不匹配问题，平衡建筑物的供暖与空调负荷，是建筑节能的一项重要措施<sup>[1-4]</sup>。将相变材料应用于建筑围护结构中可以显著提高围护结构的蓄热能力，达到减少使用甚至完全无需温度调节设备而调控室内环境温度的目的。利用相变墙体有效减小室内温度波动，提高屋内人的热舒适性，减少建筑材料和水电消耗<sup>[5]</sup>，故相变材料在建筑材料的应用上得到越来越多的重视。

在室内环境中，影响人体舒适度诸多因素中最为关键的两点是温度和湿度。墙体湿传导过程影响着建筑物能耗和使用寿命，还影响着人体舒适度，对于普通墙体热量和水分会以传导和扩散的方式高度耦合传递<sup>[6-8]</sup>。而在相变墙体中，相变材料的相态变化会影响墙体中正进行的热湿传递过程<sup>[9-11]</sup>。国内外学者在建筑墙体热湿耦合迁移特性方面取得了显著进展，建立了各种各样的热湿耦合模型，这为含相变材料的墙体内部热湿耦合研究奠定基础。赵喜龙<sup>[10]</sup>以温度和水蒸气含量为驱动势，研究了多层多孔介质界面热湿传递规律，并在不同的边界条件下进行了实验和模拟比较，分析了相变材料的加入对墙体温度和墙体内的水分传递的影响。Hou Shaodan 等<sup>[12]</sup>揭示多层节能墙体的热湿耦合机理，实验结果突出了温度和相对湿度梯度对多层墙体湿热性能的重要影响。Melin 等<sup>[13,14]</sup>及 Lu<sup>[15]</sup>建立了多孔介质材料的热湿耦合传递模型；Zhong ZP<sup>[16]</sup>以温度和水蒸气压力为驱动势，建立了墙体热湿耦合模型，但是该模型的边界条件并未考虑湿传递及其对热传递的影响。Kong FH<sup>[17]</sup>在体积平均理论的基础上，以含湿量为湿驱动势来建立数学模型，但是对该模型的验证不够充分。刘向伟<sup>[18]</sup>在多孔介质传热传质学基础下，建立了建筑围护结构热、湿、空气耦合迁移模型，该模型是以温度、相对湿度和空气压力为驱动势，考虑了液态水传递、水蒸气传递和太阳辐射作用。

综合已有研究<sup>[6-8,12-15]</sup>，关于复合相变材料在建

筑墙体中的应用研究仍有进一步探索的空间，在实际使用中建筑围护结构始终处于热湿耦合作用的环境中，温度梯度会驱动水分迁移，而湿度变化又会影响材料导热性能，如含水率升高使混凝土导热系数增大 5%~20%<sup>[8]</sup>，忽略湿度影响可能导致热性能评估偏差达 15%以上<sup>[6,12]</sup>，可见热湿耦合传递对建筑墙体性能的影响显著。目前尚有的热湿耦合传递模型尚未充分阐明相变材料在热湿耦合过程中作用机制，而墙体中的相变材料在固-液相变时伴随的潜热吸收或释放会显著改变墙体内部的温度场分布，进而影响水蒸气的扩散速率和液态水的迁移特性，故对于热湿耦合传递特性及对相变墙体温湿度差异方面的研究要进一步开展。因此，研究相变墙体的热湿耦合特性对优化建筑节能设计具有重要意义。

本论文围绕相变墙体热湿耦合传递特性展开，建立了以相对湿度为驱动势的相变墙体热湿耦合传递数学模型，采用等效热容法处理相变过程，对比分析了普通墙体与相变墙体在热湿传递特性上的差异，评估了相变墙体对室内热湿环境的调控效果。本论文促进了对相变墙体热湿耦合作用机制的研究进展，研究发现相变墙体在建筑节能方面具有显著优势，可使墙体内外表面温湿度波动幅度减小，这对提升建筑使用舒适性具有重要价值。本论文通过建立更精确的热湿耦合模型并开展系统分析，不仅完善了相变墙体理论研究体系，也为实际工程应用提供了科学指导。

## 1 热湿耦合模型建立

本文采用 MATLAB 模拟软件进行模型求解，计算建筑墙体内部温度和相对湿度，以相对湿度为驱动势，以室内外气候为边界条件，根据相关定律，建立相变墙体热湿耦合非稳态传递模型。并对此模型做出假设：（1）墙体材料为连续均匀介质，且各向同性；（2）墙体中仅考虑水蒸气传递和液态水传递，不考虑空气渗透；（3）墙体内部的热湿传递过程均一维处理，且无其他热湿源；（4）将

水蒸气按理想气体处理, 且满足理想气体状态方程; (5) 墙体初始时刻温度和湿度分布均匀; (6) 墙体材料内部存在局部热湿平衡。

$$\frac{dw}{d\varphi} \frac{\partial}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( -\frac{\delta_v \varphi P_{sat}}{R_v (T - 273.15) \rho_w} \frac{dS}{dw} \frac{dw}{d\varphi} + \delta_v P_{sat} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \left( \delta_v \varphi \frac{dP_{sat}}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (1)$$

式中:  $w$  为墙体体积含湿量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\delta_v$  为水蒸气渗透系数,  $\text{kg}/(\text{Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s})$ ;  $P_v = \varphi P_{sat}$  为水蒸气分压力,  $\text{Pa}$ ;  $P_{sat}$  为饱和水蒸气分压力,  $\text{Pa}$ ;  $T$  为热力学温度,  $\text{K}$ ;  $\varphi$  为材料的相对湿度;  $\rho_w$  为液

$$(c_s \rho_s + c_w w) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \lambda + L(T) \delta_v \varphi \frac{dP_{sat}}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial x} + L(T) \delta_v P_{sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] \quad (2)$$

式中:  $c_s$  为墙体干燥状态下的定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $\rho_s$  为墙体的干密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_w$  为液态水的比热容, 取  $4200\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $\lambda$  为材料的有效导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $L(T) = [2500 - 2.4(T - 273.15) \times 10^3]$  为蒸发潜热, 温度的单值函数。

$$C_{p,eff} = \begin{cases} C_{p,m,s} & T_m < T_c - \Delta T \\ f_l \cdot C_{p,m,l} + (1+f_l)C_{p,m,s} + H \cdot f_l & T_c - \Delta T < T_m < T_c + \Delta T \\ C_{p,m,l} & T_m > T_c + \Delta T \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $C_{p,eff}$  为相变材料等效比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $C_{p,m,s}$  为固态相变材料比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $T_c$  为相变材料相变区间中心温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $\Delta T$  为相变区间长

$$f_l = \begin{cases} 0 & T_m < T_c - \Delta T \\ T - (T_c - \Delta T) / 2\Delta T & T_c - \Delta T < T_m < T_c + \Delta T \\ 1 & T_m > T_c + \Delta T \end{cases} \quad (4)$$

### 1.3 定解条件

#### (1) 初始条件

墙体中初始温度和相对湿度如式(5) (6) 所示。

$$\varphi(x, t)|_{t=0} = \varphi_0 \quad (5)$$

$$T(x, t)|_{t=0} = T_0 \quad (6)$$

### 1.1 湿传递模型

根据质量守恒定律、Darcy 定律及 Fick 定律<sup>[6,16]</sup>建立湿传递模型:

态水密度, 取  $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 1.2 热传递模型

根据能量守恒定律、Fourier 定律<sup>[20]</sup>建立热传递模型:

考虑相变材料相变传热过程中常用的方法是等效热容法<sup>[3,20]</sup>, 其思想是将材料比热容根据材料所处相态划分为不同的等效值。假设相变材料的相变区间为  $[T_c - \Delta T, T_c + \Delta T]$ , 则其等效比热容可以表示为:

$$\begin{aligned} & T_m < T_c - \Delta T \\ & T_c - \Delta T < T_m < T_c + \Delta T \\ & T_m > T_c + \Delta T \end{aligned} \quad (3)$$

度的一半,  $^\circ\text{C}$ ;  $H$  为相变潜热,  $\text{J}/\text{kg}$ ;  $C_{p,m,l}$  为液态相变材料比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

对于相变材料区域任一节点, 液相分数  $f_l$ <sup>[3,20]</sup> 定义为:

### (2) 边界条件

墙体的内外表面与室内外空气以对流形式同时传热湿, 热湿交换量取决于墙体壁面与空气间的温差、水蒸气分压力差以及对流换热传质系数。

内表面 ( $x=0$ ) 边界条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\left( -\frac{\delta_v \varphi P_{sat}}{R_v(T-273.15)\rho_w} \frac{dS}{dw} \frac{dw}{d\varphi} + \delta_v P_{sat} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \left( \delta_v \varphi \frac{dP_{sat}}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{m,in} (\varphi_{in} P_{sat,in} - \varphi_{x=0} P_{sat,x=0}) \\ -\left( \lambda + L(T) \delta_v \varphi \frac{dP_{sat}}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - L(T) \delta_v P_{sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{in} (T_{in} - T_{x=0}) \end{array} \right. \quad (7)$$

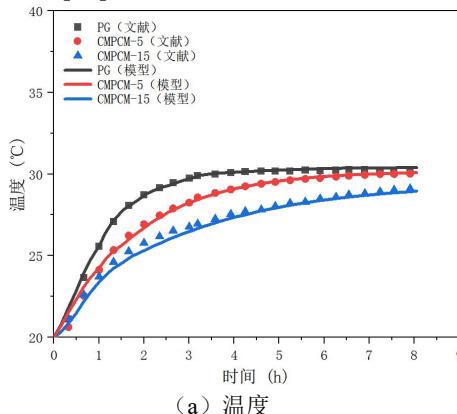
外表面 ( $x=1$ ) 边界条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\left( -\frac{\delta_v \varphi P_{sat}}{R_v(T-273.15)\rho_w} \frac{dS}{dw} \frac{dw}{d\varphi} + \delta_v P_{sat} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \left( \delta_v \varphi \frac{dP_{sat}}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{m,out} (\varphi_{x=1} P_{sat,x=1} - \varphi_{out} P_{sat,out}) \\ -\left( \lambda + L(T) \delta_v \varphi \frac{dP_{sat}}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - L(T) \delta_v P_{sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{out} (T_{out} - T_{x=1}) \end{array} \right. \quad (8)$$

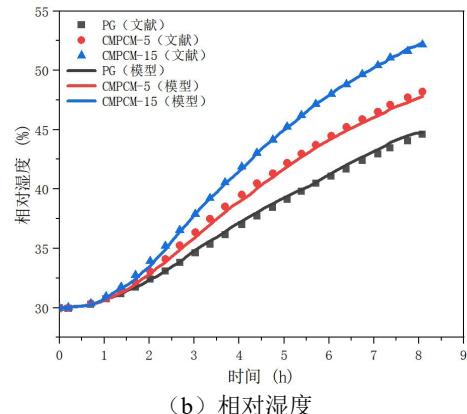
式中:  $h_{m,in}$ 、 $h_{m,out}$  为墙体内外表面对流传质系数,  $\text{s/m}$ ;  $h_{in}$ 、 $h_{out}$  为墙内外表面对流传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $P_{sat,in}$ 、 $P_{sat,out}$  为室内外饱和水蒸气分压力,  $\text{Pa}$ ;  $T_{in}$ 、 $T_{out}$  为室内外温度,  $\text{K}$ ;  $T_{x=0}$ 、 $T_{x=1}$  为墙内外表面温度,  $\text{K}$ ;  $\varphi_{in}$ 、 $\varphi_{out}$  为室内外空气相对湿度;  $\varphi_{x=0}$ 、 $\varphi_{x=1}$  为墙内外表面相对湿度。

#### 1.4 模型验证

采用文献[21]的模拟结果对本论文相变墙体热



(a) 温度



(b) 相对湿度

图 1 模型验证结果

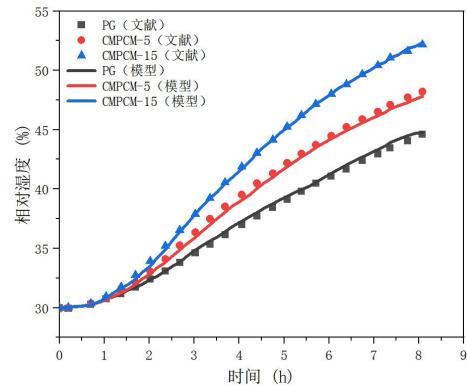
Fig.1 Model verification results

观察图 1, 对于 CMPCM-15 墙体在 4h 内温度的计算结果有一定差距, 但最大误差仅 0.5%左右, 总体来说, 文献和模型计算的温度和相对湿度吻合度较高, 验证了本文模型对单层相变材料传热传湿结果计算的准确性。

## 2 热湿耦合传递特性

以建立的相变墙体热湿耦合传递数学模型为基础, 对相变墙体的传热过程进行数值模拟计算,

湿耦合传递模型验证, 文献给出在室内室外温度和相对湿度均恒定的情况下, 对比探究了不同相变调湿墙体中心处 ( $x=0.065$ ) 温度和相对湿度变化曲线。根据文献的设定, 室内温湿度为 20 °C 和 30%RH, 室外温湿度为 40 °C 和 70%RH, 墙体初始温湿度为 20 °C 和 30%RH, 对流传热系数 3.4W/(m²·K), 对流传质系数  $2.06 \times 10^{-8}$ s/m, 计算 9h 内墙体温湿度变化, 材料物性参数详见文献[21], 本文数学模型计算结果和文献结果对比如图 1 所示。



(b) 相对湿度

以外侧交变温湿度, 内侧恒定温湿度为边界条件, 研究相变墙体热湿耦合传递特性。

#### 2.1 墙体构造与热湿物性参数

本文以 0.2m 厚的普通墙体和相变墙体为研究对象, 普通墙体为混凝土材质, 相变墙体模型从外向内依次为 50mm 混凝土层+100mm 相变材料层+50mm 混凝土层, 墙体模型如图 2 所示, 图中 A、B、C、D、E 为温湿度测点, 墙体材料热湿物性参数详如表 1 所示。

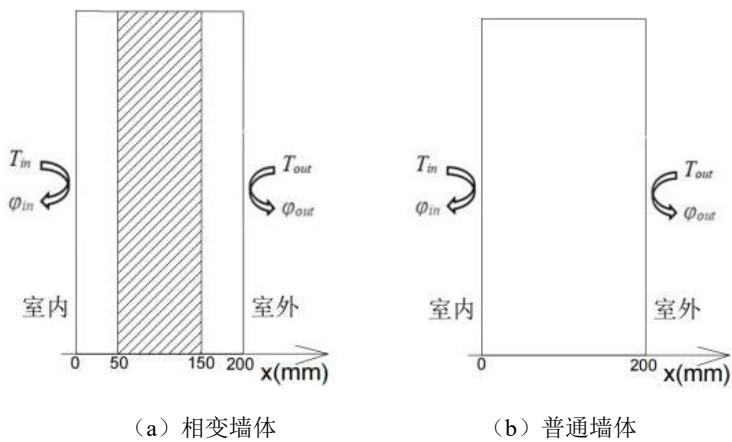


图2 墙体模型图

Fig.2 Wall model diagram

表1 材料热湿物性参数表

Table 1 Material heat and moisture physical property parameter table

参数	材料		参数	材料	
	复合相变材料	混凝土		复合相变材料	混凝土
密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	753	1800	导热系数 /W/(m·K)	0.451	$1.5 + \frac{15.8}{1000}w$
比热 /J/(kg·°C)	固 1568 液 2138	879	体积含湿量 /(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_w \begin{pmatrix} 1.01 \times 10^{-4} e^{\phi/0.2279} \\ -2.01 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$	$\frac{146}{\left(1 + \left(-8 \times 10^{-8} \cdot \frac{RT_{pw}}{M_w} \ln \phi\right)^{1.6}\right)^{0.375}}$
相变区间 /°C	26~32	—	水蒸气渗透系数 /kg/(m·s·Pa)	$2.078 \times 10^{-11}$	$\frac{M_w}{RT} \frac{26.1 \times 10^{-6}}{200} \frac{1 - \frac{w}{146}}{0.5 \left(1 - \frac{w}{146}\right)^2 + 0.5}$
相变潜热 /(J/g)	215	—	液态水传导系数 /kg/(m·s·Pa)	$\frac{\delta_v \varphi P_{sat}}{R_v (T - 273.15) \delta_v \varphi P_{sat}}$	$\exp \left[ \begin{array}{l} -39.26 + 0.07(w - 73) - 1.74 \times 10^{-4}(w - 73)^2 \\ -2.8 \times 10^{-6}(w - 73)^3 - 1.16 \times 10^{-7}(w - 73)^4 \\ -2.6 \times 10^{-9}(w - 73)^5 \end{array} \right]$

注:  $\rho_w$  为水的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $M_w$  为水的摩尔质量, kg/mol。

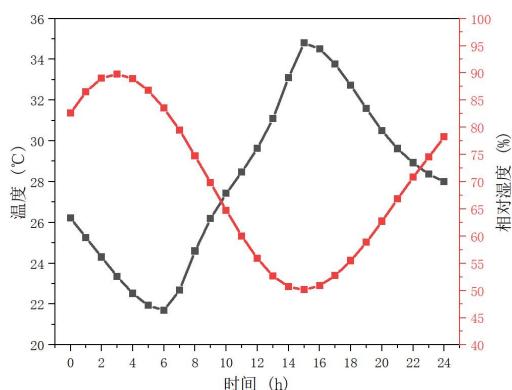


图3 成都某日室外温湿度

Fig.3 Outdoor temperature and humidity on a day in Chengdu

选取成都地区某日室外温湿度为边界条件, 如图3所示, 最高温度为34.8°C, 最低温度为21.7°C, 平均温度为30.68°C。模拟设置墙体初始温湿度23°C、50%RH, 室内侧空气温湿度恒为23°C、50%RH, 室内外侧对流换热系数分别为8W/(m<sup>2</sup>·K)和4.8W/(m<sup>2</sup>·K), 对流传质系数分别为 $6.16 \times 10^{-8}$ kg/(m<sup>2</sup>·s)和 $3.96 \times 10^{-8}$ kg/(m<sup>2</sup>·s)。

能体现建筑墙体隔热性能特征的基本指标是衰减倍数和延迟时间, 衰减倍数 $v$ 是交变温湿度波在墙体传递过程中波幅的衰减率, 其计算公式为:

$$v = \frac{\Theta_e}{\Theta_i} \quad (9)$$

延迟时间  $t_{lag}$  表示建筑墙体内表面温湿度谐波最高值(或最低值)出现时间与墙体外侧空气温湿度最高值(或最低值)出现的时间差。

## 2.2 热湿耦合传递特性分析

由图 4 可知, 热湿耦合时的温度波动幅度比单纯传热时小, 分析原因是墙体内部的湿传递与积累能增加相变墙体热容, 减小其内部温度的波动。单纯传热时, 相变墙体各界面处峰值温度被高估了 0.7%~1.86%, 单纯考虑导热时的相变墙体各交界面处温度略高于热湿耦合计算所得温度, 由此可见湿迁移在实际气象条件下可使墙体温度略微降低, 湿传递的存在时增加了相变墙体的热缓冲作用。

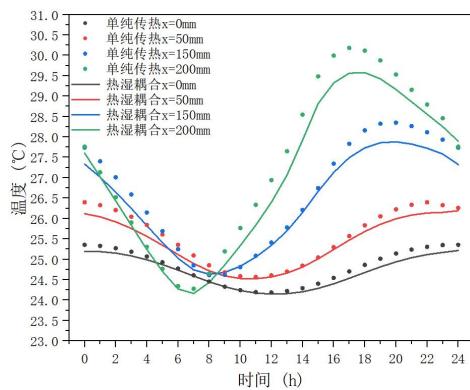
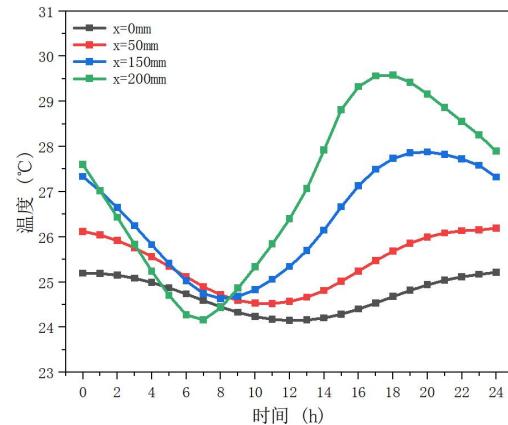


图 4 单纯传热与热湿耦合模拟结果对比

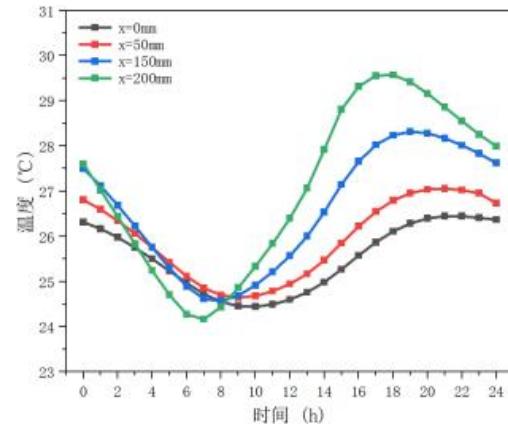
**Fig.4 Comparison of simulation results of simple heat transfer and coupled heat and humidity**

相变墙体和普通墙体温度变化模拟结果如图 5 所示。由两种墙体 24h 内的温度变化可知, 墙体内表面温度曲线波动幅度没有外表面大, 分析原因为: 墙体会减缓室外温度变化对室内环境的影响, 使得墙体内层温度波动较小。当相变墙体内外传递由外表面经过相变材料区域且温度上升至相变点 26℃时, 发生相变吸热反应, 相变墙体内外温度随时间缓慢上升, 而普通墙体内外温度按原先趋势继续上升, 故在相变墙体  $x=50\text{mm}$ 、 $x=150\text{mm}$  处温度波动幅度较普通墙体小。相变墙体外表面温度在 24.16℃~30.01℃ 之间波动, 普通墙体外表面温度在 24.16℃~29.57℃ 之间波动, 最高温度增大 0.44℃; 相变墙体内外表面温度在 24.14℃~25.22℃ 之间波动, 普通墙体内外表面温度在 24.44℃~26.45℃ 之间波动, 最高温度降低 1.23℃, 可见能有效降低墙体内表面温度, 减小温度波动幅度。在相同的模拟工况下, 相变墙体和普通墙体温度衰减倍数分别为 5.52 和

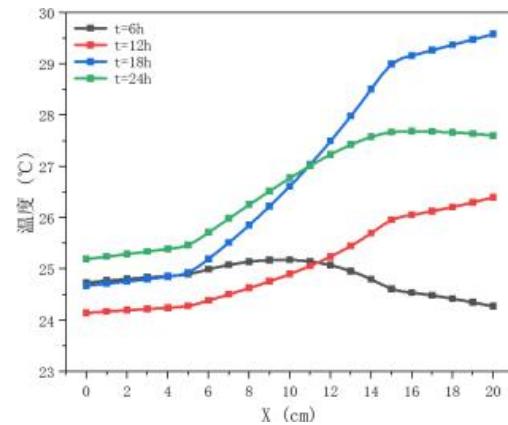
2.69, 相变墙体温度衰减倍数提高了 1 倍多; 相变墙体和普通墙体温度延迟时间分别为 7h 和 4h, 相变墙体温度延迟增加了约 3h。结合图 5(c) 可知, 相变材料的存在影响墙体内部热传递过程。与普通墙体相比, 相变墙体因内部相变材料的相变反应延缓了内表面温度上升, 降低了墙体内部温变幅度。



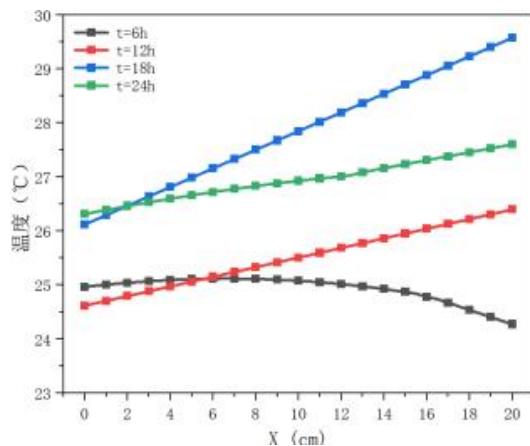
(a) 相变墙体温度随时间变化



(b) 普通墙体温度随时间变化



(c) 相变墙体沿厚度方向温度变化



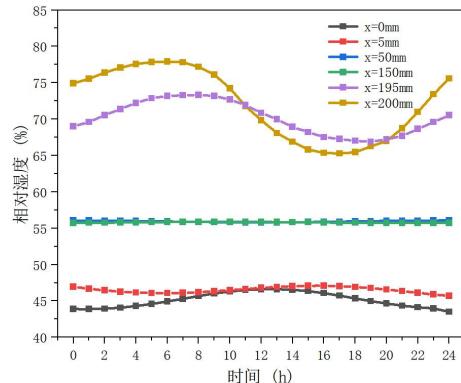
(d) 普通墙体沿厚度方向温度变化

图5 墙体温度变化

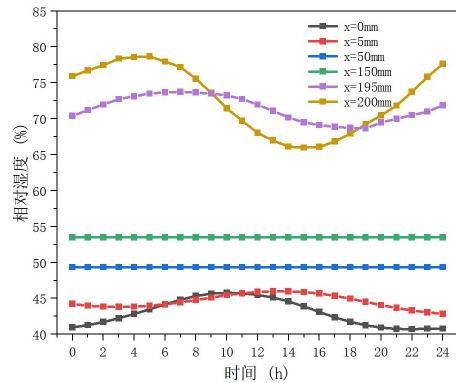
**Fig.5 Wall temperature changes**

相变墙体和普通墙体相对湿度变化模拟结果如图6所示。墙体外表面相对湿度受室外湿度影响波动幅度最大, 内表面受热传递影响温度周期性变化引起内表面放湿量变化, 温度降低时内表面放湿

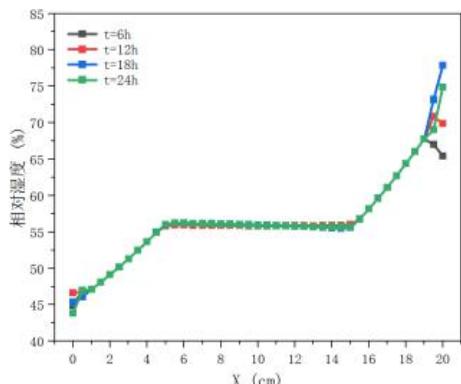
量增加, 墙体内部相对湿度幅值存在延迟和衰减, 越远离表面相对湿度波幅越小, 峰值越低且峰值出现时间越晚。相变墙体  $x=195\text{mm}$  和 D 点处相对湿度略低于普通墙体,  $x=0\text{mm}$ 、 $x=5\text{mm}$ 、 $x=50\text{mm}$ 、 $x=150\text{mm}$  处相对湿度高于普通墙体, 相变墙体  $x=50\text{mm}$ 、 $x=150\text{mm}$  点处相对湿度基本不变, 普通墙体  $x=150\text{mm}$  处相对湿度大于  $x=50\text{mm}$  处, 结合图6(c) (d), 说明相变材料基本不具有吸湿性, 导致相变墙体内外表面相对湿度大于普通墙体。相变墙体和普通墙体内外表面波幅分别为 3.13%、5.06%, 相变墙体内外表面相对湿度曲线波动较普通墙体小, 说明相较普通墙体, 相变墙体因为其内部相变材料吸放热过程对墙体湿传递的影响对室内环境具有调湿作用。在相同的模拟工况下, 相变墙体和普通墙体相对湿度衰减倍数分别为 4.04 和 2.51, 相变墙体衰减倍数提高了近 2 倍; 相变墙体和普通墙体相变湿度延迟时间分别为 10h 和 7h, 相变墙体相对湿度延迟增加了约 3h。



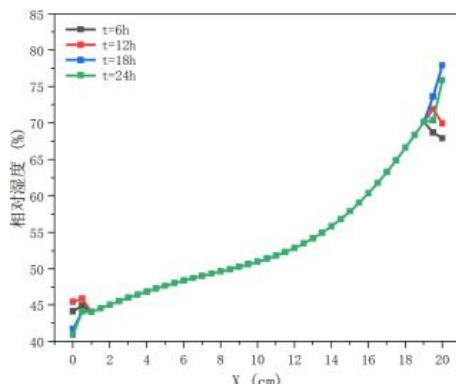
(a) 相变墙体相对湿度随时间变化



(b) 普通墙体相对湿度随时间变化



(c) 相变墙体沿厚度方向相对湿度变化



(d) 普通墙体沿厚度方向相对湿度变化

图6 墙体相对湿度变化

**Fig.6 Changes in relative humidity of the wall**

墙体内表面热湿流随时间变化如图 7 所示, 室内空气温度始终低于墙体内表面温度, 墙体向室内温度放热, 相变墙体内外表面热流在  $-5.51\text{W/m}^2$ ~ $-10.41\text{W/m}^2$  之间波动, 普通墙体内外表面热流在  $-6.93\text{W/m}^2$ ~ $-16.55\text{W/m}^2$  之间波动, 说明相较普通墙体, 相变墙体向室内放热量少, 波动幅度小且峰值出现时间延迟近 2 个小时。随墙体内表面温度降低, 水蒸气分压力低于室内空气, 墙体内表面向室

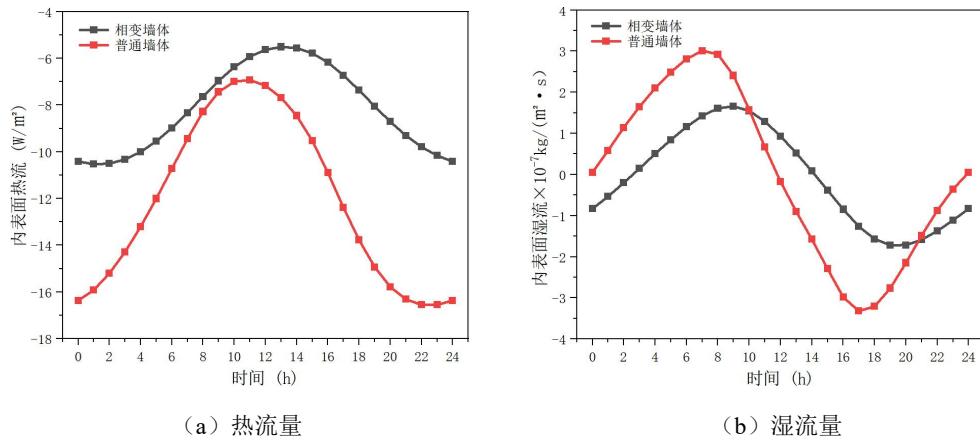


图 7 墙体内表面热湿流变化

Fig.7 Change of hot and wet flow on the inner surface of the wall

### 3 结论

本文以相对湿度为驱动势建立相变墙体热湿耦合传递模型, 利用 MATLAB 进行模型求解, 以成都地区某日气象条件作为室外边界条件, 对相变墙体进行热湿模拟, 得到的结果如下:

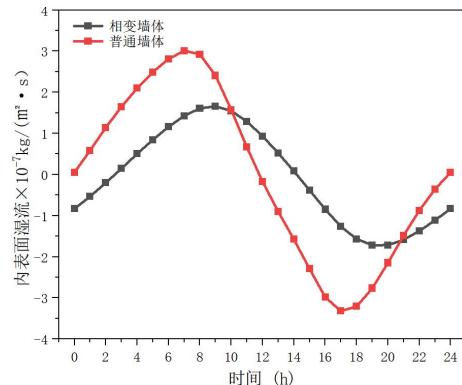
(1) 单纯考虑导热时的墙体交界面处温度略高于热湿耦合计算所得温度, 热湿耦合作用使墙体温度降低 0.7%~1.86%, 验证了湿传递对热缓冲的作用。

(2) 相变墙体对内表面温湿度具有衰减和延迟作用。在相同的模拟工况下, 较普通墙体而言, 相变墙体温度衰减倍数提高了 1 倍多, 相对湿度衰减倍数提高了近 2 倍; 相变墙体温度和相对湿度延迟均增加了约 3h。

(3) 相变材料基本不具有吸湿性, 故导致相变墙体内外表面相对湿度大于普通墙体, 但波动幅度降低 37%。

(4) 较普通墙体, 相变墙体向室内放热量少, 相变墙体内外表面热湿流量波动幅度小且峰值出现时间均延迟 2 个小时。

内吸湿, 至内表面水蒸气分压力高于空气时, 内表面开始放湿, 相变墙体内外表面湿流在  $-1.72 \times 10^{-7}\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ~ $1.66 \times 10^{-7}\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间波动, 普通墙体内外表面湿流在  $-3.21 \times 10^{-7}\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ~ $3.01 \times 10^{-7}\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间波动, 说明相较普通墙体, 相变墙体内外表面湿流量波动幅度小且峰值出现时间延迟 2 个小时。



### 参考文献

- [1] 张正松,何嘉鹏,张博,等.相变石膏板应用于外墙表面夏季隔热的相变温度分析[J].建筑科学,2012,28(6):102-105,109.
- [2] 周莹,王双喜,刘中华,等.基于 ANSYS 的日光温室复合相变保温墙体的模拟研究[J].太阳能学报,2020,41(4):113-122.
- [3] 孔祥飞,刘少宁,钟俞良,等.相变蓄能墙多因素热特性分析及优化研究[J].建筑科学,2016,32(8):40-46.
- [4] 王靖文,王烨,孙鹏宝.基于谐波法的建筑围护结构非稳态传热分析[J].兰州交通大学学报,2015,34(3):153.
- [5] 王娟,曹祥.相变储能材料的研究进展[J].广州化工,2008,35(6):75.
- [6] HAUPL P. Coupled heat air and moisture transfer in building structures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997,40(7):1633-1642.
- [7] 冯伟.复合砌块墙体二维热湿耦合传递特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [8] CHO B, KIM Y, LEE S. Study on the heat-moisture transfer in concrete under real environment[J].

- Construction and Building Materials, 2017,132:124-129.
- [9] 张明杰,秦孟昊,陈智.复合相变调湿材料对室内热湿环境影响的研究[J].建筑科学,2016,32(12):72-79.
- [10] 赵喜龙.建筑多孔相变墙体材料热湿传递理论分析及试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [11] JIANG D H, XU Y Z, CHEN C Y, et al. Preparation and properties of phase change energy storage building materials based on capric acid-octadecanol/fly ash-diatomite[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(46):1-15.
- [12] HOU S D, LI H, ZHANG G Q, et al. Coupled heat and moisture transfer in hollow concrete block wall filled with compressed straw bricks[J]. Energy and Buildings, 2017,135:74-84.
- [13] MELIN C, JANSSON R, SVENSSON S. Simulations of moisture gradients in wood subjected to changes in relative humidity and temperature due to climate change[J]. Geosciences, 2018,8(10):378.
- [14] MELIN C, JANSSON R. Moisture gradients in wood subjected to relative humidity and temperatures simulating indoor climate variations[J]. Journal of Cultural Heritage, 2017,25:157-162.
- [15] LU X S. Modelling of heat and moisture transfer in buildings - I. Model program[J]. Energy and Buildings, 2002,34(10):1033-1043.
- [16] ZHONG Z P. Combined heat and moisture transport modeling for residential buildings[D]. Indiana: Purdue University, 2008:18-24.
- [17] KONG F H, LIU J P, ZHANG Y, et al. Heat and mass coupled transfer combined with freezing process in building materials[J]. Energy and Buildings, 2011,43(10): 2850-2859.
- [18] 刘向伟.夏热冬冷地区建筑墙体热、空气、湿耦合迁移特性研究[D].长沙:湖南大学,2015.
- [19] RAO Z H, WANG S F, ZHANG Y P, et al. Energy saving latent heat storage and environmental friendly humidity-controlled materials for indoor climate[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012,16(5): 3136-3145.
- [20] 田国华.相变储能建筑墙体传热特性及能耗影响研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [21] 王晓宇.相变调湿墙体内部热湿传递特性研究[D].南京:东南大学,2021.