

# 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\*

姚翔宇<sup>1</sup>, 马建斌<sup>1</sup>, 王飞娅<sup>1</sup>, 杨肖虎<sup>2</sup>

(1. 重庆水利电力职业技术学院 建筑工程学院, 重庆 402160;

2. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安 710049)

(本刊编委卢天键推荐)

**摘要:** 相变蓄热墙体能够有效降低室外温度波动对内墙面温度的干扰,提升室内热环境的稳定性并降低建筑能耗.由于冬夏季气象条件的差异,相变材料(phase change material, PCM)熔点的选择成为影响墙体热工性能的重要因素.为了实现蓄热墙体冬夏两季的高效利用,该研究构建了新型承载蓄热超结构墙体数值模型,对墙体力学性能进行检验,并模拟了冬季典型日和夏季典型日空气对流换热下墙体传热特性.结果表明,新型承载蓄热超结构墙体的力学性能满足工程应用需求,同时相较普通墙体具有良好的传热特性.其中,熔点为 20 °C 的墙体在冬季热工性能最好,峰值相变率达到 0.30,且内壁面最大温度波动为 5.8 °C,在夏季工况中,熔点为 30 °C 的墙体具有较高的相变利用率为 0.48,熔点为 24 °C 的墙体内壁面温度波动最小.最后,综合考虑相变利用率和衰减倍数,获得了夏热冬冷地区最佳相变墙体熔点为 24 °C.

**关键词:** 承载蓄热墙体; 相变材料; 力学性能; 温控效能; 数值模拟

**中图分类号:** TK02; O341 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.450172

## Investigation on Mechanical Properties and Temperature Control Efficiency of Novel Load-Bearing and Heat-Storing Metastructure Walls in Hot Summer-Cold Winter Regions

YAO Xiangyu<sup>1</sup>, MA Jianbin<sup>1</sup>, WANG Feiya<sup>1</sup>, YANG Xiaohu<sup>2</sup>

(1. School of Architectural Engineering, Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, P.R.China;

2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P.R.China)

(Recommended by LU Tianjian, M.AMM Editorial Board)

**Abstract:** A phase change material (PCM) heat-storing wall can effectively mitigate the impact of outdoor temperature fluctuations on internal wall surface temperatures, enhance the stability of the indoor thermal environment, and reduce building energy consumption. The selection of the PCM melting point is crucial due to the dif-

\* 收稿日期: 2024-06-11; 修订日期: 2024-07-11

**基金项目:** 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202303805;KJQN202103810)

**作者简介:** 姚翔宇(1987—),男,讲师,硕士(E-mail: yaoxiangyu@cqsdzy.com);

杨肖虎(1986—),男,教授,博士,博士生导师(通讯作者. E-mail: xiaohuyang@xjtu.edu.cn).

**引用格式:** 姚翔宇, 马建斌, 王飞娅, 杨肖虎. 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.

fering weather conditions in the winter and the summer. To optimize the performances of heat-storing walls for both seasons in hot summer-cold winter regions, a numerical model for a novel load-bearing and heat-storing metastructure wall incorporating multi-melting point PCMs was developed. This model was used to evaluate the mechanical properties and simulate the heat transfer characteristics of the wall under air convection heat transfer conditions on representative winter and summer days. The results demonstrate that, the mechanical properties of the phase change thermal storing wall meet the engineering application requirements, and its heat transfer characteristics surpass those of ordinary walls. Specifically, the wall with a PCM melting point of 20 °C exhibits superior thermal performance in the winter, with a peak phase transformation rate of 0.30 °C and a maximum inner wall temperature fluctuation of 5.8 °C. In the summer, the wall with a PCM melting point of 30 °C shows a higher phase transformation utilization rate of 0.48, while the wall with a melting point of 24 °C experiences the lowest temperature fluctuation. Therefore, with both the utilization ratio and the attenuation ratio considered, the optimal melting point for a phase change wall would be 24 °C.

**Key words:** load-bearing and heat-storing wall; phase change material; mechanical property; temperature control efficiency; numerical simulation

## 0 引言

随着社会经济的快速发展和人们生活水平的显著提升,大众对居住环境舒适度和节能效果的要求逐渐提高<sup>[1-2]</sup>.采取有效措施减少建筑能耗,不仅是提高居住环境质量的重要途径,也是推动社会可持续发展的重要策略<sup>[3-5]</sup>.在此背景下,各种被动式建筑围护结构被提出,成为建筑节能研究的重点<sup>[6-8]</sup>.相变材料(PCM)储能密度高,能够解决可再生能源供应与负荷需求不匹配的问题<sup>[9-11]</sup>,同时,将相变蓄热技术与围护结构相结合,既满足了现代轻质墙体需求,又提升了建筑室内环境稳定性并降低了建筑能源消耗<sup>[12-14]</sup>,众多研究也证明了蓄热墙体具有较好的节能性和舒适性.Zhou等<sup>[15]</sup>模拟了相变蓄热墙体的传热特性和节能效果,结果证明,相变蓄热墙体可降低38.2%的室内热负荷,波动幅度减小了28.5%.陈萨如拉等<sup>[16]</sup>提出将埋管夹层移至承重层外侧并用封装的相变材料复合墙来改造已有建筑,蓄热墙体可在供冷季节表现出较好热性能,为现有建筑改造降低能源消耗.

同时,为了提高墙体性能,一些学者考虑空气自然对流下相变蓄热墙体的表现.孟凡康等<sup>[17]</sup>通过周期性边界条件模拟动态室内外气象条件下墙体的逐时表现,揭示了不同相变材料排布方式对传热性能的影响规律,结果表明最优墙体结构的内壁面温度波延迟了3.8 h.张源等<sup>[18]</sup>建立了蓄热墙体对流数值模型,分析了多种环境温区的恒定中心温度下,不同相变材料相变中心温度的热工性能.王刚等<sup>[19]</sup>将相变墙体应用于办公建筑中,通过TRNSYS构建了建筑动态仿真模型,得到该地区适宜的相变温度范围在17~25 °C之间.由此可知,室外动态气象条件与相变材料熔点是影响墙体热工性能的重要因素,高熔点相变材料不利于冬季墙体传热,而低熔点相变材料会影响夏季蓄热墙体效果.

基于上述研究可以发现,综合考虑冬季与夏季空气对流换热下墙体传热特性的研究还较少,同时缺乏对力学性能以及蓄热量、内壁面温度、滞后性、相变材料利用率等热工性能的多因素评估准则.基于此,本文提出了新型承载蓄热超结构墙体,通过建立数值模型,获得了墙体力学性能,并模拟了夏热冬冷地区冬对流换热下墙体传热特性,对蓄热墙体温控效果进行综合评估,可为实际工程提供参考依据.

## 1 数值模型

### 1.1 模型描述

如图1所示,构建普通墙体与新型承载蓄热超结构墙体,所研究墙体的尺寸为0.20 m×3.00 m.普通墙体由单层墙体材料构成,新型承载蓄热超结构墙体由墙体材料(0.08 m)-微点阵力学结构内嵌相变材料(0.04 m)-墙体材料(0.08 m)构成.微点阵力学结构内嵌相变材料由相变材料与孔隙率 $\varepsilon$ 为0.97的合金钢构成,具有力学承载和强化导热的作用,复合相变材料的密度 $\rho_f$ 、弹性模量 $E$ 、Poisson比 $\nu$ 与等效导热系数 $\lambda_{\text{eff}}$ 计算如式(1)~(4)所示<sup>[20-22]</sup>:

$$\rho_f = (1 - \varepsilon)\rho_0, \tag{1}$$

$$E = E_0 \exp(-b\varepsilon), \tag{2}$$

$$\nu(\varepsilon \rightarrow 1) = \frac{1 + 5\nu_0}{9 + 5\nu_0}, \tag{3}$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\lambda_e}{\lambda_{\text{lig}}} = \frac{1 - \varepsilon}{\left(1 - e + \frac{3e}{2\alpha}\right) \left[3(1 - e) + \frac{3}{2}\alpha e\right]} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{\text{lig}}}\varepsilon. \tag{4}$$

材料性能总结在表 1 中.如图 1 所示,模型左侧为室外环境(温度为  $T_{\text{out}}$ ,对流换热系数为  $h_{\text{out}}$ ),右侧为室内环境(温度为  $T_{\text{in}}$ ,对流换热系数为  $h_{\text{in}}$ ),上下壁面视为绝热.为了研究不同熔点对墙体性能的影响,本文对 20 °C, 22 °C, 24 °C, 26 °C, 28 °C, 和 30 °C 熔点的相变材料进行研究,为控制变量,除熔点外其余参数保持不变,墙体模型案例如表 2 所示.

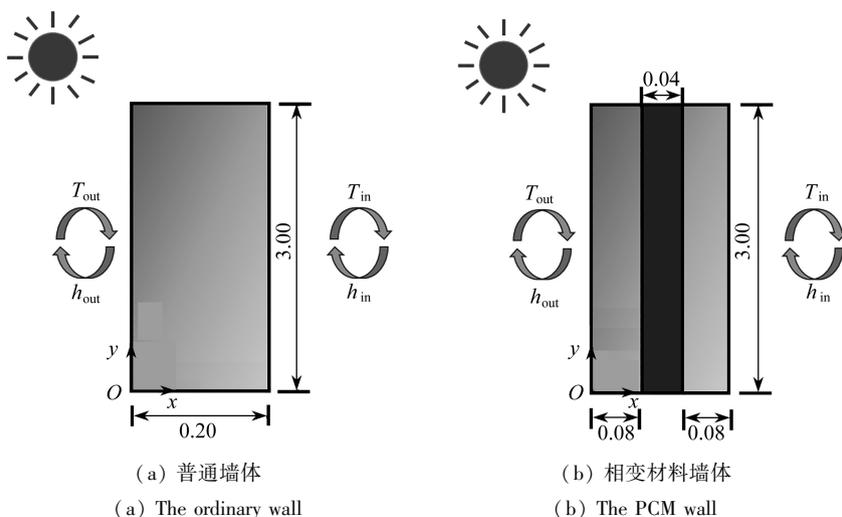


图 1 普通墙体与新型承载蓄热超结构墙体模型(单位: m)

Fig. 1 Models for the ordinary wall and the novel load-bearing and heat-storing metatructure wall (unit: m)

表 1 墙体材料和新型相变材料的物理性质

Table 1 Physical properties of wall materials and novel phase change materials

parameter	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$L / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
ordinary wall	2 400	800	2.10	-
PCM wall	1 680(S)/1 600(L)	2 000	0.54(S)/0.48(L)	180

表 2 不同熔点的蓄热墙体模型

Table2 The heat storing wall models with different melting points

case	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6
$T_m / ^\circ\text{C}$	20	22	24	26	28	30

## 1.2 数学模型

本文对墙体传热过程和蓄热墙体蓄/放热过程进行求解,仿真模型采用商用软件 ANSYS-FLUENT 18.2 计算,通过有限体积法求解控制方程.为简化计算,对模型做出如下假设<sup>[23-24]</sup>:

- 1) 墙体材料和相变材料视为各向同性,忽略温度变化产生的材料热物性参数变化;
- 2) 忽略相变过程中相变材料的体积变化以及其表面张力的影响;
- 3) 液态相变材料为不可压缩 Newton 流体,满足 Boussinesq 近似,即密度随温度变化,产生浮力作用,液相相变材料的自然对流为层流流动.

控制方程如下:

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla(\rho_f \langle \mathbf{U} \rangle) = 0; \quad (5)$$

动量方程为

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon} \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\langle \mathbf{U} \rangle \cdot \nabla) \langle u \rangle = -\frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \nabla^2 \langle u \rangle - \left( \frac{\mu_f}{K} + \frac{\rho_f C_E}{\sqrt{K}} |\langle \mathbf{U} \rangle| \right) \langle u \rangle - A_m \langle u \rangle, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho_f}{\varepsilon} \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\langle \mathbf{U} \rangle \cdot \nabla) \langle v \rangle = \\ -\frac{\partial \langle P \rangle}{\partial y} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \nabla^2 \langle v \rangle - \left( \frac{\mu_f}{K} + \frac{\rho_f C_E}{\sqrt{K}} |\langle \mathbf{U} \rangle| \right) \langle v \rangle - A_m \langle v \rangle - \rho_f g \beta (\langle T_f \rangle - T_{ml}); \end{aligned} \quad (7)$$

能量方程为

$$[\varepsilon \rho_f c_{p,f} + (1 + \varepsilon) \rho_s c_{p,s}] \frac{\partial \langle T_f \rangle}{\partial t} + \varepsilon \rho_f c_{p,f} \langle \mathbf{U} \cdot \nabla \rangle \langle T_f \rangle = \nabla^2 \lambda_{\text{eff}} \langle T_f \rangle + S_{\text{eff}}, \quad (8)$$

$$K = \frac{\varepsilon [1 - (1 - \varepsilon)^{1/3}]}{108 [(1 - \varepsilon)^{1/3} - (1 - \varepsilon)]} d_p^2, \quad (9)$$

$$C_E = 0.095 \frac{c_d}{12} \sqrt{\frac{\varepsilon}{3(\chi - 1)}} \left( 1.18 \sqrt{\frac{1 - \varepsilon}{3\pi}} \frac{1}{G} \right)^{-1}, \quad (10)$$

式中,源项  $\left( \frac{\mu_f}{K} + \frac{\rho_f C_E}{\sqrt{K}} |\langle \mathbf{U} \rangle| \right) \langle u \rangle$  来源于 Forchheimer-Darcy 模型,描述了多孔介质中的黏性和惯性阻力,是动量方程的附加源项,与液体分数有关。

初始条件为

$$T(x, 0) = T_0, \quad x \in [0, 0.2]; \quad (11)$$

边界条件为

$$-\lambda_w \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{\text{in}} (T_w - T_{\text{in}}), \quad (12)$$

$$-\lambda_w \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0.2} = h_{\text{out}} (T_w - T_{\text{out}}), \quad (13)$$

$$-\lambda_w \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad (14)$$

$$-\lambda_w \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=3} = 0. \quad (15)$$

为保证模型初始条件边界的一致性,冬季墙体初始温度  $T_0$  为 16.7 °C,夏季为 19 °C.室内边界条件在冬季设定房间为 18 °C 的供暖温度,夏季当室外温度超过 26 °C 时,保持 26 °C 的恒定空调温度.室外边界条件考虑实测室外空气温度  $t_{\text{air}}$  与太阳辐射强度  $I$ ,并依据《民用建筑热工设计规范》(GB/T50176—2016) 确定围护结构太阳辐射吸收率  $\alpha$  与长波辐射换热量,由式(14)得出室外综合温度曲线如图 2 所示<sup>[25]</sup>.同时,根据当地风速,计算出冬季室内对流换热系数  $h_{\text{in}} = 8.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,室外对流换热系数  $h_{\text{out}} = 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;夏季室内对流换热系数  $h_{\text{in}} = 8.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,室外对流换热系数  $h_{\text{out}} = 19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

$$T_{\text{out}} = t_{\text{air}} + \frac{\alpha I}{h_{\text{out}}} - \frac{Q_{\text{lw}}}{h_{\text{out}}}, \quad (16)$$

式中,  $t_{\text{out}}$  为室外综合温度, °C;  $t_{\text{air}}$  为室外空气温度, °C;  $\alpha$  为墙体的太阳辐射吸收率;  $I$  为太阳的辐射照度,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $Q_{\text{lw}}$  为墙体与室外长波辐射换热量,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $h_{\text{out}}$  为墙体外表面的对流换热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$ .

### 1.3 网格无关性与时间步长独立性验证

本研究利用 ICEM 软件构建结构化网格,选择冬季 24 °C 新型承载蓄热超结构墙体模型进行网格独立性检验,并选取温度测点  $A(x = 0.1 \text{ m}, y = 1.5 \text{ m})$ ,测试不同网格数和时间步长在 21 600 s, 43 200 s, 86 400 s 的

温度如表 3 所示.通过对比 40 608,26 488 与 18 574 三种不同网格数量的测点温度,发现网格数为 26 488 与 40 608 的模型测点温差不超过 0.05 °C,因此选取 26 488 的网格数量进行计算,在保证数值模型准确性同时节省了计算资源.同理,对比时间步长 0.5 s,1 s,1.5 s 结果,得到时间步长为 0.5 s 与 1 s 的温差小于 0.03 °C.因此,综合考虑计算成本和精度,选取网格数为 26 488,时间步长 1 s 作为数值模型计算的选取依据.

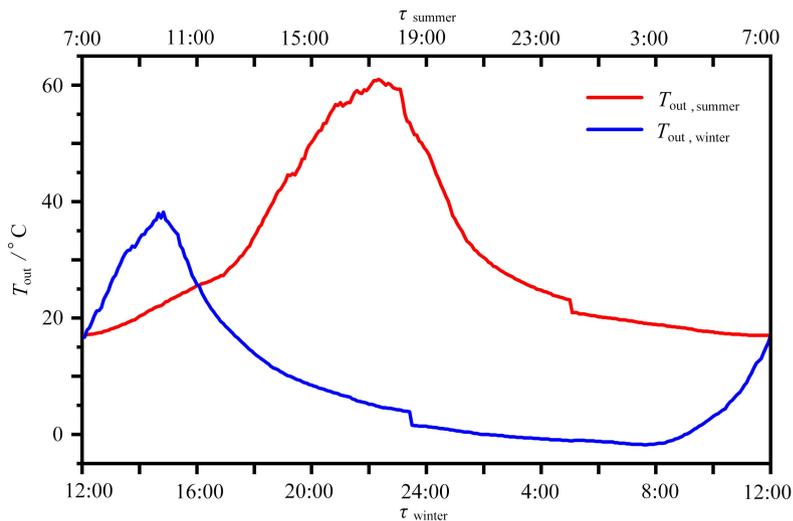


图 2 冬夏季室外空气综合温度变化曲线

Fig. 2 Comprehensive temperature change curves of outdoor air in the winter and the summer

表 3 网格无关性与步长独立性验证

Table 3 Grid and time step independence verifications

grid number	time step $\Delta t$ /s	$T_{A,21\ 600}$ /°C	$T_{A,43\ 200}$ /°C	$T_{A,21\ 600}$ /°C
40 608	1	22.98	14.96	9.76
26 488	1	22.93	14.99	9.77
18 574	1	22.23	15.13	9.89
26 488	0.5	22.90	14.98	9.75
26 488	1.5	22.81	14.85	9.70

### 1.4 数值模型验证

为了保证数值模型的准确性,我们根据张源等<sup>[26]</sup>的墙体模型实验工况,建立了数值模型并与文献[26]中的实验进行对比.同时,选取 12 mm 处测点熔化和凝固过程的温度进行比较,量化模拟结果和实验结果差异,对比结果如图 3 所示.

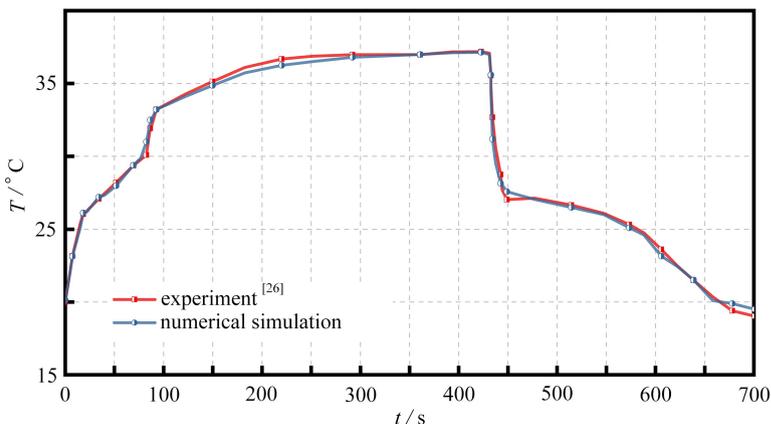


图 3 模型实验验证

Fig. 3 Experimental verification of the numerical model

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.

可以发现,测点的实验结果与仿真结果吻合较好,最大误差小于2%。基于验证结果,保证了数值模型的准确性和可靠性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 新型承载蓄热超结构墙体力学性能分析

本研究采用 ANSYS Mechanical 2021 R1 模拟新型承载蓄热超结构墙体的力学性能,根据《砌体基本力学性能实验方法标准》(GB/T 50129—2011),对墙体的承载力等进行分析,在 ANSYS 静态结构模块,建立普通墙体 case 1 和新型承载蓄热超结构墙体 case 2,蓄热墙体由孔隙率 0.97 的微点阵结构芯体内嵌固液相变材料构成,具有很好的力学承载与强化传热特性。采用尺寸为 0.05 m 的单元进行有限元网格划分,建立两端固定的边界条件,并施加不同大小侧向压力。根据数值结果可以发现,两种墙体的压力位移曲线规律大体一致,墙体 case 1 的最大变形量为 5.74 mm,极限承载力为 284.47 kN,墙体 case 2 的最大变形量为 4.56 mm,极限承载力为 262.58 kN,经过对比,相变材料墙会减少墙体的变形,使墙体结构更加稳定。同时,如图 4 所示,施加荷载时,数值模拟墙体 case 1 的侧向最大位移( $\chi$ )和最大剪切应力( $\tau$ )均大于墙体 case 2,且随施加荷载的增大,相变蓄热墙体优势更加明显,在施加荷载为 200 kN 时,相变墙体的侧向最大位移与最大剪切应力仅约为普通墙体的 39.3%和 53.9%。因此,数值模拟墙体 case 1 的侧向最大位移和最大剪切应力均大于墙体 case 2,加入微点阵力学结构相变材料后的墙体有更强的抵抗剪切变形和破裂的能力,满足工程应用需求。

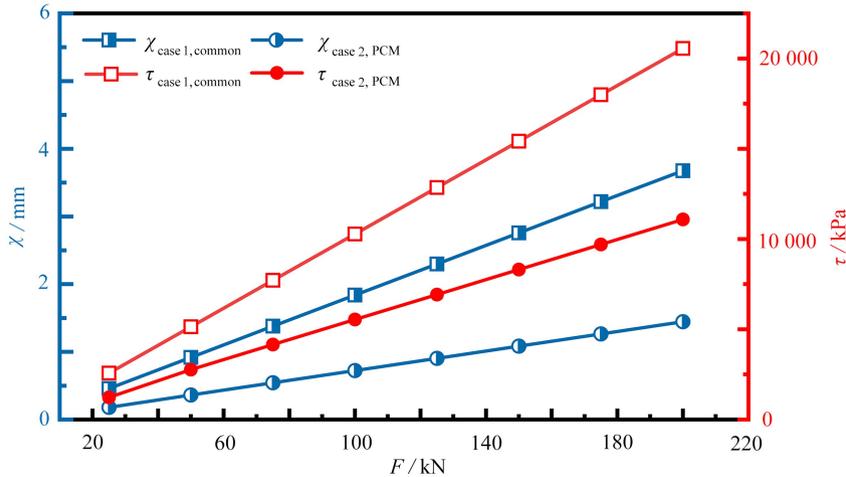


图 4 不同荷载下两种墙体侧向最大位移与最大剪力对比

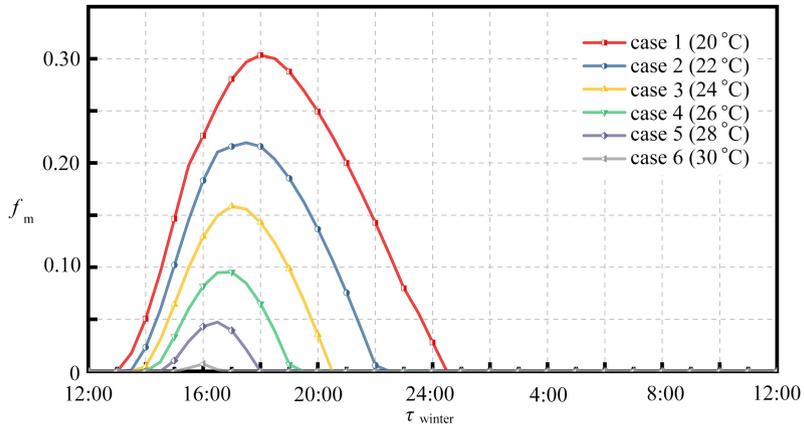
Fig. 4 Comparison of maximum lateral displacements and maximum shear forces of 2 kinds of walls under different loads

### 2.2 墙体相变率与蓄热量

相变率是衡量墙体热利用情况的重要参数,图 5 展示了新型承载蓄热超结构墙体在冬季和夏季典型日熔化率随时间变化的情况。在冬季典型日中,墙体相变过程主要发生在 24:00 之前,不同熔点墙体的液相率曲线随时间变化趋势一致,但在液相率峰值和相变时间上存在较大差异。当熔点越小时,墙体液相率峰值越高,相变过程持续时间越长,效果也越好。熔点为 20 °C 的相变蓄热墙体相变过程从当天下午 13:00 持续到 24:00,前期在高温室外空气对流换热下,熔化率在 18:00 左右达到峰值 0.30,后室外气温下降,墙体逐渐开始凝固。当墙体熔点升高为 22 °C, 24 °C, 26 °C 和 28 °C 时,液相率依次降低为 0.21, 0.16 与 0.10 与 0.05,相变峰值点也随熔点的增加前移,且墙体熔点为 30 °C 时,基本不发生相变。

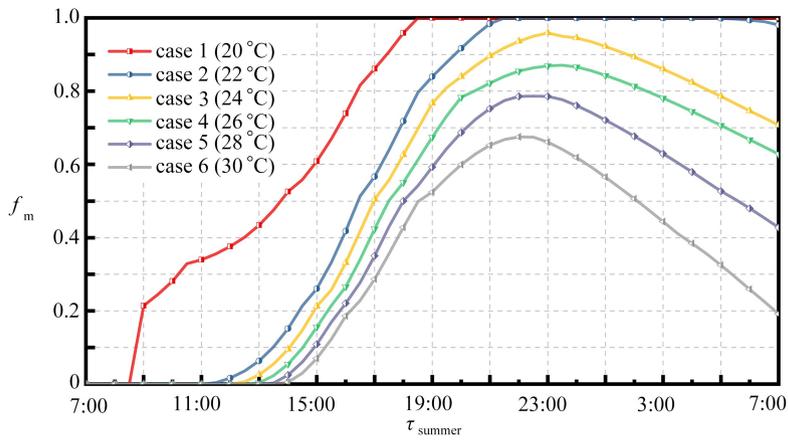
在夏季典型日中,可以发现墙体的相变利用率远超出冬季,熔化峰值均超过 0.65。当墙体相变温度为 20 °C 和 22 °C 时,墙体完全熔化,但是由于墙体熔点接近室外温度,在次日墙体难以凝固,导致墙体无法持续性使用。随着相变熔点的升高,相变利用率虽有所下降,但次日恢复量提升。24 °C, 26 °C, 28 °C 和 30 °C 相变材料熔化率峰值分别为 0.96, 0.87, 0.79 和 0.68,峰值时间也随熔点升高前移,次日的液相率分别恢复到 0.71, 0.63,

0.42 与 0.19. 综上, 30 °C 熔点的墙体在冬季基本不发挥作用, 20 °C 和 22 °C 熔点的墙体在夏季的表现难以满足需求.



(a) 冬季

(a) The winter

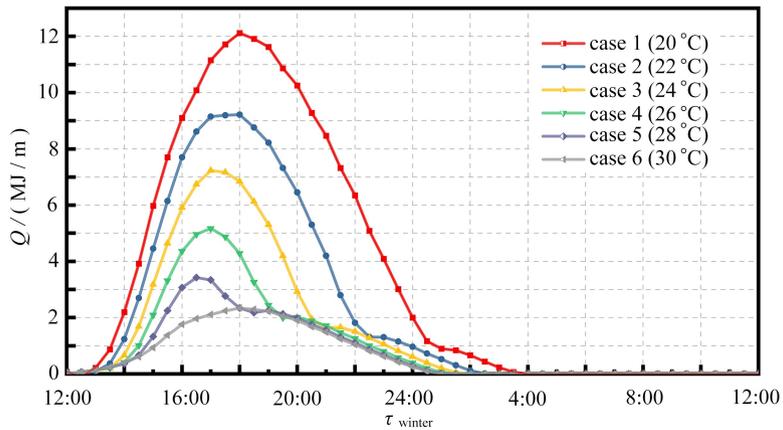


(b) 夏季

(b) The summer

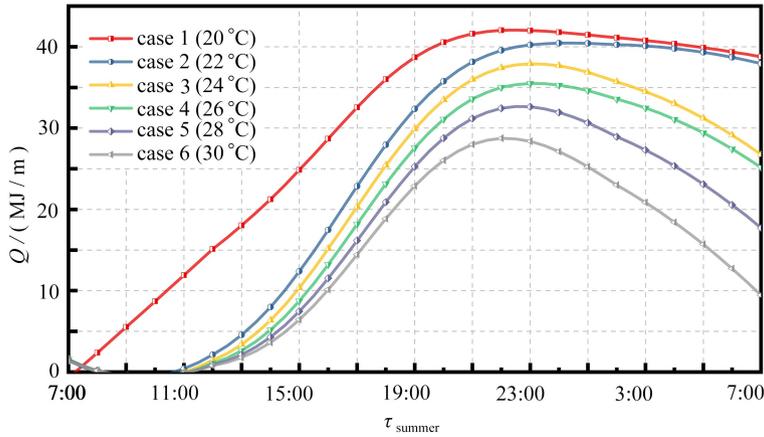
图 5 冬夏两季不同熔点墙体液相率随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of wall liquid phase ratios with different melting points in the winter and the summer over time



(a) 冬季

(a) The winter



(b) 夏季

(b) The summer

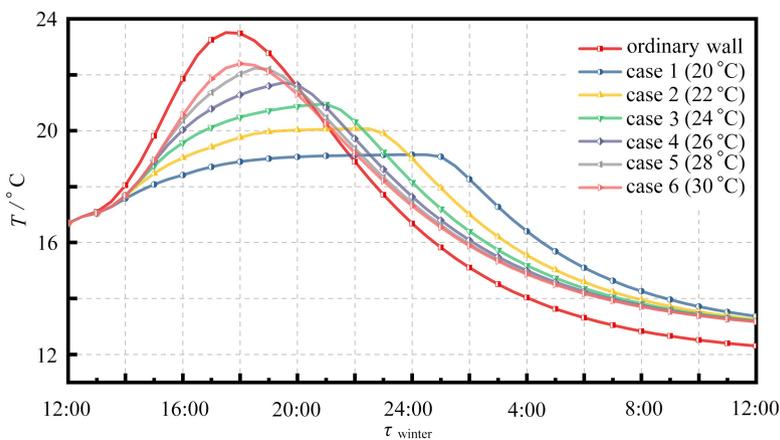
图6 冬夏两季不同熔点墙体蓄热量随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of wall heat storages per unit length with different melting points in the winter and the summer over time

图6为不同熔点相变蓄热墙体在冬夏两季单位长度下蓄热量随时间的变化曲线,蓄热量包括墙体显热和潜热两部分。如图所示,蓄热量与液相率的变化趋势基本一致。在冬季时,由于低熔点的相变材料达到在室外空气对流条件下达到相变温度的时间较长,所以蓄热量相对较高,20℃的相变蓄热墙体单位长度蓄热量最高达12.12 MJ/m,后随熔点的升高,峰值蓄热量分别降低了23.91%,40.34%,57.23%,71.71%和80.69%。在夏季时,高熔点的蓄热量虽低于低熔点的复合相变蓄热材料,但低熔点的相变材料有较大的潜热不能释放,这是因为高熔点的相变材料熔化时间少于低熔点材料,但被冷却的时间更长,有利于次日的循环使用,因此,夏季需要同时关注蓄热量和积蓄在墙体的蓄热量,可以得到30℃熔点的相变材料综合两点具有较好的表现,峰值蓄热量为28.74 MJ/m,次日积累蓄热量为9.43 MJ/m。

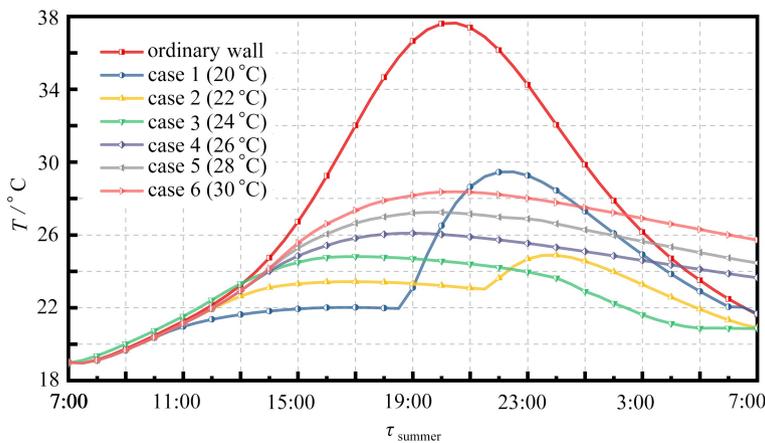
### 2.3 墙体温度分布

为了进一步分析室外空气自然对流条件下,相变蓄热墙体对室内热环境稳定性的影响,绘制内壁面温度随时间变化曲线如图7所示。在冬季工况中,可以发现纯墙体内壁面波动较大,温度差约为11℃,相变材料提升了室内环境的稳定性,内壁面温度波动显著减缓,且随着相变蓄热墙体熔点的升高,波动减缓趋势更加明显,20℃,22℃,24℃,26℃,28℃和30℃的相变蓄热墙体内壁温度的温差分别为5.8℃,6.8℃,7.74℃,8.53℃,9.06℃和9.67℃。可以发现,当相变蓄热材料熔点为20℃时,室内壁面温度变化趋于平缓,近12h维持在18℃左右,说明冬季接近室内温度熔点的相变材料无论在相变率还是内壁面温度上都有较好的表现。



(a) 冬季

(a) The winter



(b) 夏季

(b) The summer

图 7 冬夏两季不同熔点墙体内壁面温度随时间变化曲线

Fig. 7 Curves of internal wall temperatures with different melting points in the winter and the summer over time

在夏季工况中新型承载蓄热超结构墙体的优势更加明显,普通墙体的温度波动与室外来流温度关联度较大,且温度波动剧烈,最高温差达到了 18 °C,相变蓄热材料将壁面温差控制在了 10 °C 以内.熔点为 20 °C 和 22 °C 的墙体由于在后期完全相变,限制了相变材料的潜热作用,分别在 19 : 00 与 23 : 00 附近产生了较大的温度波动.24 °C ,26 °C ,28 °C 和 30 °C 的相变蓄热墙体温度波动都能将壁面温度维持在稍低于熔点的温度附近,其中,24 °C 墙体的温度波动最小为 5.9 °C .

### 2.4 相变利用率和衰减倍数分析

基于 2.2 与 2.3 小节的研究结果,为了综合评估相变材料熔点影响,我们对新型承载蓄热超结构墙体的相变利用率  $E_p$  和温度衰减倍数  $A_m$  进行分析,如图 8 所示.

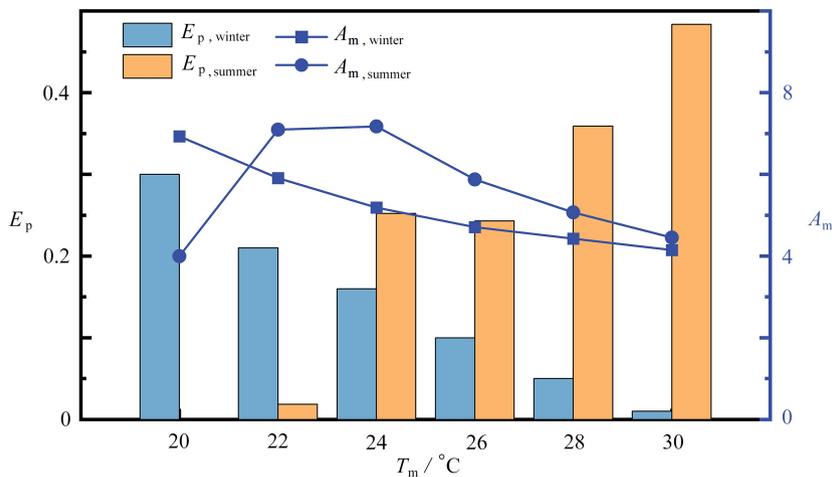


图 8 冬夏两季不同熔点新型承载蓄热超结构墙体的相变利用率和衰减倍数

Fig. 8 Phase change utilizations and decay ratios of the novel load-bearing and heat-storing metastructure wall with different melting points in the winter and the summer

墙体相变利用率为相变层最高融化体积去除 24 h 后的积蓄融化体积,与相变层材料的体积之比,反映了相变材料的利用效果.衰减倍数为作用于建筑围护结构外表面的室外综合温度波的波幅与该内表面温度波波幅之比,用于衡量室内热环境的稳定性.从相变利用率来看,28 °C 和 30 °C 的冬季利用率以及 20 °C 和 22 °C 的夏季利用率低于 0.05,难以满足冬夏两季条件.因此,24 °C 和 26 °C 的相变蓄热墙体在相变利用率上更符合需求.且 24 °C 材料的冬季利用率和温度衰减倍数显著高于 26 °C 材料,因此,综合相变利用率与衰减倍

数,相变蓄热墙体最佳熔点为 24 ℃.

### 3 结 论

本文建立了新型承载蓄热超结构墙体模型,分析了墙体的力学性能与夏热冬冷地区空气自然对流下的传热特性.主要结论如下:

1) 通过力学性能分析,获得新型承载蓄热超结构墙体的最大变形量为 4.56 mm,极限承载力为 262.58 kN.经过对比可知,相变墙体结构较为稳定,满足工程应用需求.

2) 在冬季工况下,熔点为 20 ℃的墙体具有较好的传热性能,相变率和单位长度蓄热量分别为 0.30 和 12.12 MJ/m,内壁面最大温度波动为 5.8 ℃;夏季工况中,熔点为 30 ℃的墙体的相变率高且当日积蓄的融化体积小,熔点为 24 ℃的墙体内壁面温度较为稳定.

3) 综合分析了冬夏两季相变利用率与衰减倍数,获得夏热冬冷地区新型承载蓄热超结构墙体最佳熔点为 24 ℃.

致谢 本文作者衷心感谢重庆水利电力职业技术学院科研项目(K202329)对本文的资助.

### 参考文献(References):

- [1] HAFEZ F S, SA' DI B, SAFA-GAMAL M, et al. Energy efficiency in sustainable buildings: a systematic review with taxonomy, challenges, motivations, methodological aspects, recommendations, and pathways for future research[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2023, **45**: 101013.
- [2] LIU Z, ZHANG X, SUN Y, et al. Advanced controls on energy reliability, flexibility and occupant-centric control for smart and energy-efficient buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2023, **297**: 113436.
- [3] SELVARAJ R, KUTHADI V M, BASKAR S. Smart building energy management and monitoring system based on artificial intelligence in smart city[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, **56**: 103090.
- [4] PAN Y, ZHU M, LV Y, et al. Building energy simulation and its application for building performance optimization: a review of methods, tools, and case studies[J]. *Advances in Applied Energy*, 2023, **10**: 100135.
- [5] ZHU W, HUANG B, ZHAO J, et al. Impacts on the embodied carbon emissions in China's building sector and its related energy-intensive industries from energy-saving technologies perspective: a dynamic CGE analysis [J]. *Energy and Buildings*, 2023, **287**: 112926.
- [6] BALALI A, YUNUSA-KALTUNGO A, EDWARDS R. A systematic review of passive energy consumption optimisation strategy selection for buildings through multiple criteria decision-making techniques[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, **171**: 113013.
- [7] SU X, HUANG Y, CHEN C, et al. A dynamic life cycle assessment model for long-term carbon emissions prediction of buildings: a passive building as case study[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, **96**: 104636.
- [8] 吴赛, 赵均海, 李楠, 等. 被动围压下混凝土的动态力学性能研究[J]. 应用力学学报, 2015, **32**(6): 992-998. (WU Sai, ZHAO Junhai, LI Nan, et al. Dynamic behavior of concrete under passive confinement[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, **32**(6): 992-998. (in Chinese))
- [9] 黄河, 高佳徐, 任智彬, 等. 内三角管式快速蓄放热单元的肋片拓扑优化[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(11): 1238-1248. (HUANG He, GAO Jiaxu, REN Zhibing, et al. Topology optimization of fins for rapid heat storage and release in triangular-inside tube units[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(11): 1238-1248. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 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 met-

- al foam composite phase change materials under cavity effects[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, **45**(1): 85-96. (in Chinese))
- [12] LI C, WEN X, CAI W, et al. Phase change material for passive cooling in building envelopes: a comprehensive review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, **65**: 105763.
- [13] CHEN J, GONG Q, LU L. Evaluation of passive envelope systems with radiative sky cooling and thermally insulated glazing materials for cooling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, **398**: 136607.
- [14] 杨立杰. 相变储能材料在建筑工程建设中的应用[J]. 储能科学与技术, 2024, **13**(5): 1471-1473. (YANG Lijie. Research on the application of phase change energy storage materials in construction engineering[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, **13**(5): 1471-1473. (in Chinese))
- [15] ZHOU S, SONG M, SHAN K, et al. Effects of the position and melting point of the PCM layer on the comprehensive thermal performance of a Trombe wall under mixed dry climate[J]. *Energy and Buildings*, 2024, **307**: 113932.
- [16] 陈萨如拉, 常甜馨, 杨洋, 等. 既有建筑嵌管式相变复合墙体夏季热特性研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2021, **51**(11): 840-856. (CHENG Sarula, CHANG Tianxin, YANG Yang, et al. Summer thermal performance study on pipe-embedded PCM composite wall in existing buildings[J]. *Journal of University of Science and Technology*, 2021, **51**(11): 840-856. (in Chinese))
- [17] 孟凡康, 褚琦, 王朔, 等. 周期性边界条件下 PCM 填充墙体空间分布形式的传热影响[J]. 太阳能学报, 2019, **40**(10): 2851-2856. (MENG Fankang, CHU Qi, WANG Shuo, et al. Effect of spatial distribution of PCM filling wall on heat transfer under periodic boundary conditions[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2019, **40**(10): 2851-2856. (in Chinese))
- [18] 张源, 戴晓丽. 相变温度对相变蓄能墙体热性能影响特性[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, **39**(6): 671-677. (ZHANG Yuan, DAI Xiaoli. Influencing characteristics of phase change temperature on thermal performance of phase change energy storage wall[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2018, **39**(6): 671-677. (in Chinese))
- [19] 王刚, 李祥立. 相变墙体应用于办公建筑的多目标优化设计[J]. 暖通空调, 2024, **54**(6): 82-88. (WANG Gang, LI Xiangli. Multi-objective optimization design of phase-change walls in office buildings[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2024, **54**(6): 82-88. (in Chinese))
- [20] WANG J C. Young's modulus of porous materials[J]. *Journal of Materials Science*, 1984, **19**(3): 801-808.
- [21] LUTZ M P, ZIMMERMAN R W. The effect of pore shape on the Poisson ratio of porous materials[J]. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 2021, **26**(8): 1191-1203.
- [22] YANG X H, BAI J X, YAN H B, et al. An analytical unit cell model for the effective thermal conductivity of high porosity open-cell metal foams[J]. *Transport in Porous Media*, 2014, **102**(3): 403-426.
- [23] SHARSHIR S W, JOSEPH A, ELSHARKAWY M, et al. Thermal energy storage using phase change materials in building applications: a review of the recent development[J]. *Energy and Buildings*, 2023, **285**: 112908.
- [24] ANTER A G, SULTAN A A, HEGAZI A A, et al. Thermal performance and energy saving using phase change materials (PCM) integrated in building walls[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, **67**: 107568.
- [25] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (ZHU Yingxin. *Built Environment*[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese))
- [26] 张源, 吴志伟, 葛凤华, 等. 夏热冬冷地区双层相变材料墙体热工性能分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, **40**(4): 465-471. (ZHANG Yuan, WU Zhiwei, GE Fenghua, et al. Thermal performance analysis of a double-layer phase change material wall in hot summer and cold winter area[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2019, **40**(4): 465-471. (in Chinese))