

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.252

# 模块化热激活墙体性能优化与经济性分析

陈萨如拉<sup>1</sup>, 陈天航<sup>1</sup>, 杨 洋<sup>2</sup>

(1. 安徽建筑大学 建筑与规划学院, 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 建筑与艺术学院, 合肥 230601)

**摘要:** 针对制约热激活类墙体注热效率提升的低品位热量集中堆积问题, 提出了一种内部设有特定孔道并用于填充热扩散性填料的模块化热激活墙体(modular thermo-activated wall, MTAW)。建立了 MTAW 动态传热模型, 基于寒冷地区冬季气象条件对比分析了 MTAW 与 2 种参考墙体性能差异, 探讨了填料腔倾角( $\theta$ 值)、填料腔几何尺寸( $a:b$ 值)和填料导热系数( $\lambda_f$ 值)对节能潜力与经济性的影响。结果表明:墙体内部增设填料腔并填充热扩散性材料对于总运行能耗和运行费用节省效果显著, 相比 2 种参考墙体, 当 MTAW 填料腔长轴横置且  $a:b$  为 1:2 时, 总运行能耗分别减少 2.60% 和 14.13%; 相比 2 种参考墙体, MTAW 总运行费用分别平均减少 12.41% 和 50.04%; 填料腔长轴倾向室内侧时, 供热能耗随  $\theta$  值增大呈现先减小后增加的趋势, 各项性能指标在  $\theta_L$  为 60° 时更优;  $a:b$  值和  $\lambda_f$  值与总运行能耗和运行费用成反比, 供热能耗和运行燃气费用降低率在  $\lambda_f$  为 12 $\lambda_c$  时分别为 3.03% 和 34.53%。

**关键词:** 热激活建筑系统; 模块化构造; 模拟仿真; 能源效率; 经济性分析

中图分类号: TU86

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)02-074-12

## Optimization of efficiency and energy-saving analysis of modular thermo-activated walls

CHEN Sarula<sup>1</sup>, CHEN Tianhang<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Urban Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, P. R. China;

2. College of Architecture and Art, Hefei University of Technology, Hefei 230601, P. R. China)

**Abstract:** A modular thermo-activated wall (MTAW) with specialized internal cavities for thermal diffusivity fillers was proposed to solve the problem of low-grade heat accumulation, which restricts the heat injection efficiency of thermo-activated walls. A dynamic heat transfer model of the MTAW was established, and its performance was compared with two reference walls under typical winter conditions in a cold climate zone. The study examined the effects of the filler cavity inclination angle( $\theta$ ), cavity geometry ratio( $a:b$ ), and thermal conductivity of the filling material( $\lambda_f$ ) on energy-saving potential and economic performance. Results show that incorporating filler cavities and thermal diffusing materials significantly reduces total operational energy consumption and costs. Compared with the reference walls, when the the MTAW filler cavity's long axis is oriented transversely with an  $a:b$  ratio of 1:2, the total operational energy consumption decreases by 2.60% and 14.13%, respectively. Compared with the reference walls, operational costs are reduced by 12.41% and 50.04%, respectively. When the long axis of the filler cavity is inclined toward the room side, heating energy consumption initially decreases and then increases as  $\theta$  rises, with optimal performance observed at  $\theta_L=60^\circ$ . Additionally,  $a:b$

收稿日期: 2023-10-02 网络出版日期: 2024-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(52208103); 安徽省高校优秀科研创新团队(2022AH010021)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(52208103), and Anhui Province University Outstanding Scientific Research and Innovation Team (2022AH010021).

作者简介: 陈萨如拉(1989—), 女, 博士, 讲师, 主要从事建筑节能研究, (E-mail)sarul@tju.edu.cn。

通信作者: 杨洋, 男, 博士, 讲师, 主要从事低碳建筑设计与建筑节能研究, (E-mail)yangyang@hfut.edu.cn。

and  $\lambda_f$  are inversely proportional to both total operational energy consumption and costs. For example, when  $\lambda_f$  is  $12\lambda_c$ , heating energy consumption and gas operating costs are reduced by up to 3.03% and 34.53%, respectively.

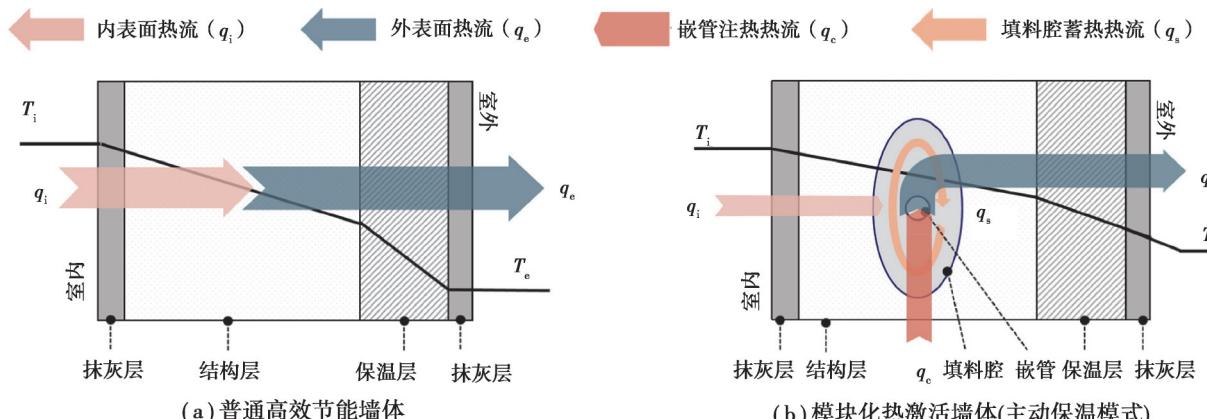
**Keywords:** thermo-activated building system; modular construction; simulation; energy efficiency; economic analysis

建筑部门约占全球能源消耗的32%,建筑节能设计在双碳背景下愈发受到关注<sup>[1]</sup>。建筑围护结构热工性能与建筑能耗之间存在密切关系,减少围护结构热损失是实现低碳节能建筑的重要途径<sup>[2-5]</sup>。针对传统建筑保温材料使用中存在空间占用、火灾隐患、性能衰减以及高隐含碳排放等弊端,近年来研究人员开始关注热激活建筑系统(thermally activated building system, TABS)<sup>[6]</sup>。Jiang等<sup>[7]</sup>提出了一种可利用低温热水减少冬季房间热损失甚至提供辅助供热的双层埋管外墙(double-layer pipe-embedded external wall, DPEW),并且研究了水温和环境温度等对DPEW传热性能的影响。张志刚等<sup>[8]</sup>研究了热管置入式墙体(the wall implanted with heat pipes, WIHP)应用于寒冷地区建筑时对室内热环境和热舒适的影响,结果表明:采用充液率为28.1%的WIHP在冬季工作时长内可将室内空气温度和平均辐射温度升高了1.1 °C,预测平均热感觉指数(predicted mean vote, PMV)指标提高32.54%。Romani等<sup>[9]</sup>基于短注热周期运行控制策略研究了热激活墙体的性能提升方法,结果表明:管间距和布置深度对内墙面温度和热流密度影响较大,缩短注热周期可有效提高墙体效率。为强化热激活墙体纵向热扩散能力,进而在墙体内部形成连续稳定的热屏障层,Shen等<sup>[10]</sup>和Biswas等<sup>[11]</sup>将流体管道与金属薄板集成入预制保温板中进而提出了热各向异性复合保温板,结果表明:采用纵向强化传热措施后可降低空调年运行费用约30%,证实了热各向异性建筑围护结构的技术可行性。

普通热激活墙体(conventional thermo-activated wall, CTAW)在运行过程中会在嵌管周边区域形成椭圆形温度堆积场,这些孤岛状温度堆积所形成的不连续热屏障是制约该类墙体能效提升的主要原因<sup>[12]</sup>。为解决CTAW嵌管注热速率与墙体热扩散率不匹配所导致的内部热堆积问题,提出了模块化热激活墙体(modular thermo-activated wall, MTAW),其内部设有特定孔道用于填充热扩散性填料。为研究室外谐波热扰、室内温控热扰及注热热扰叠加作用下的MTAW热屏障形成特征、规律及节能潜力,基于ANSYS Fluent构建并验证了MTAW动态传热模型。在此基础上,对比分析了MTAW、CTAW及普通高效节能墙体(conventional high-performance energy-saving wall, CHEW)的节能潜力和经济性差异,探索了填料腔倾斜角度( $\theta$ 值)、几何尺寸( $a:b$ 值)和填料导热系数( $\lambda_f$ 值)对MTAW性能的影响。

## 1 模块化热激活墙体工作模式

图1为冬季条件下CHEW、CTAW及MTAW的温度与热流分布,不同运行模式下的墙体热流用不同颜色标记。MTAW预期性能提升如下:显著优化嵌管周边径向热阻,在平行于壁面方向上传递更多低品位热量,墙体内部形成的热屏障层更加连续稳定,墙体综合能量性能有效提升且额外热损失控制在较低水平。根据注入热源温度不同,MTAW有3种典型运行模式:当注入水温低于室温时(16~22 °C),可降低室内供热能耗并提升墙体内表面温度,为主动保温模式(见图1(b));当注入水温与室温接近一致时(22 °C),MTAW内墙面与室内环境间的传热温差可忽略不计,消除由围护结构热损失引起的供热能耗,为中性模式(见图1(c));当注入水温高于室温时(22~35 °C),MTAW内墙面可为室内提供辅助供热甚至直接供热,为辅助供热模式(见图1(d))。



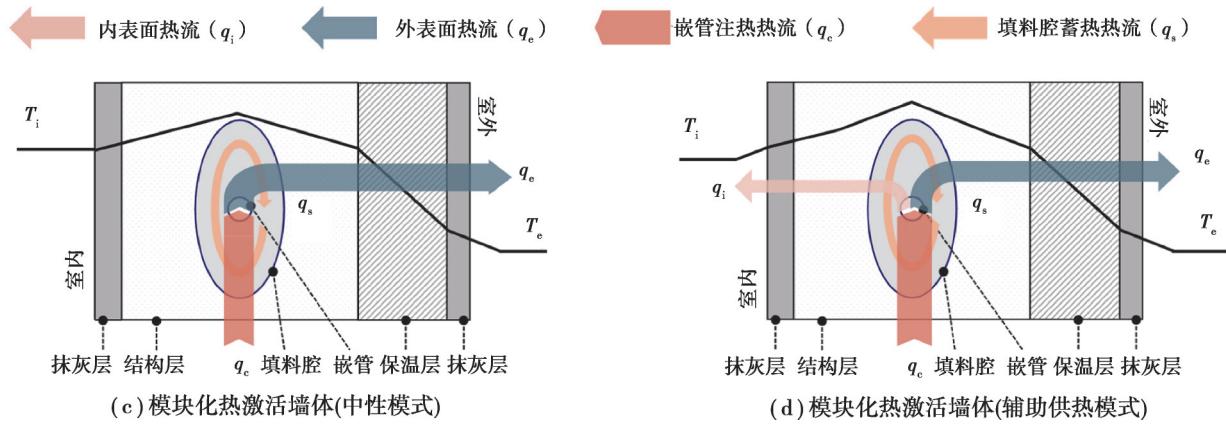


图 1 MTAW 墙冬季不同运行模式下的温度与热流分布示意

Fig. 1 Temperature and heat flux distribution of mtaw in different operation modes in winter

## 2 研究方法

### 2.1 几何模型

图 2(a)~(c) 为 3 种具有不同填料腔尺寸和倾角的 MTAW 几何模型, 图 2(d)~(e) 给出了 CTAW 与 CHEW 这 2 种参考墙体几何模型。

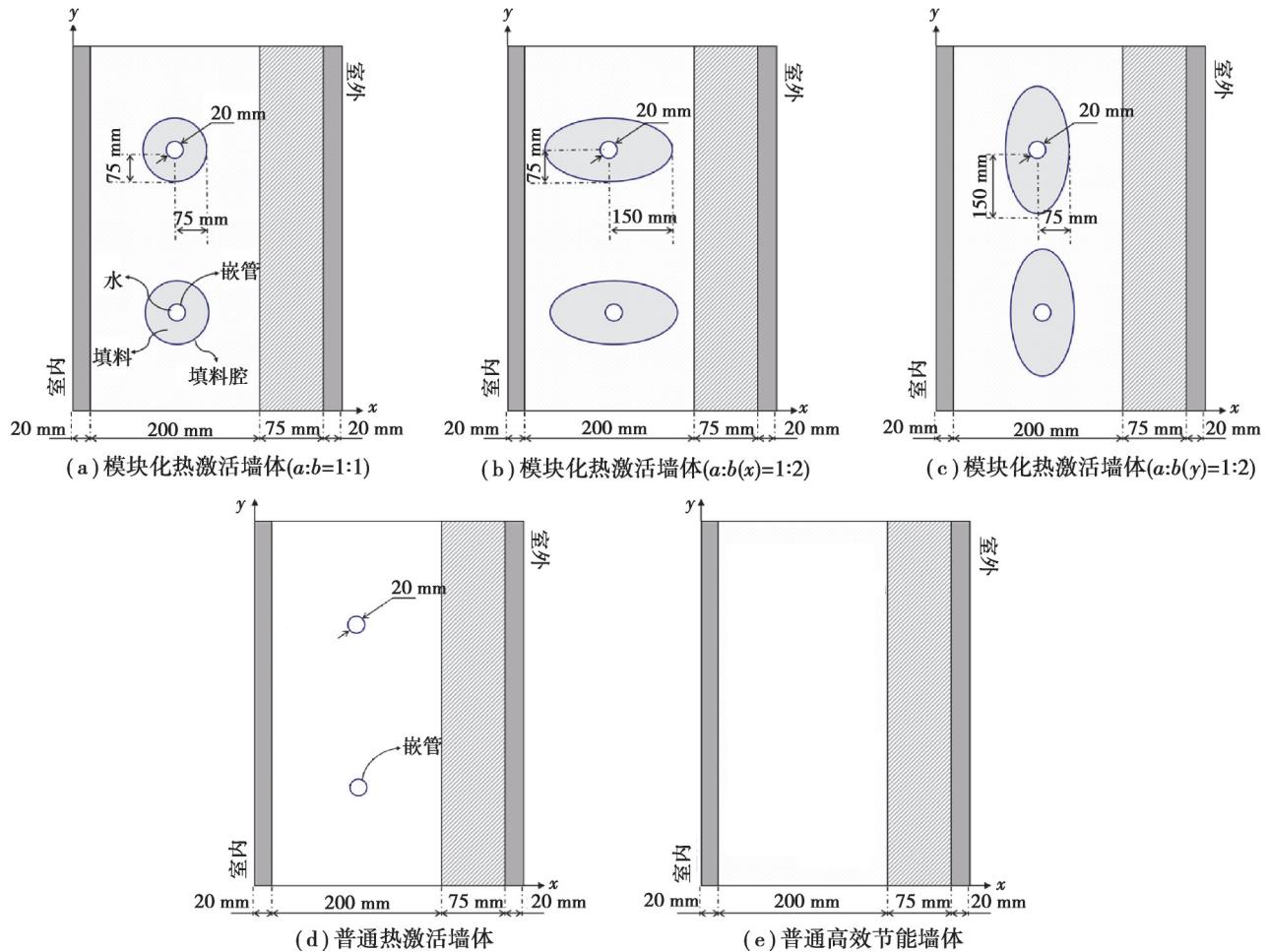


图 2 3 种 MTAW 及 2 种参考墙体二维几何模型及模型尺寸

Fig. 2 Two-dimensional geometric models and model dimensions of MTAW and two reference walls

以上 5 种墙体将在 3.1 节中用来进行 MTAW、CTAW 和 CHEW 的节能潜力和经济性差异对比。对于 MTAW 墙特有的椭圆形填料腔, 其短半轴和长半轴分别用  $a$  和  $b$  表示, 且短轴尺寸固定为 75 mm。图 2(a)~(c)

中3种MTAW墙的填料腔形状和尺寸可通过 $a:b$ 值和填料腔长轴所在方向定义,即 $a:b=1:1$ , $a:b(x)=1:2$ 和 $a:b(y)=1:2$ 。表1总结了MTAW墙和参考墙体的几何参数和材料的热物性参数。

表1 MTAW及2种参考墙体几何参数与材料热物性参数

Table 1 Geometric parameters and thermal properties of MTAW and two reference walls

构造层次(材料)	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	厚度/直径/mm
覆面层(水泥砂浆)	1 050	1 800.0	0.930	20
结构层(混凝土)	1 050	2 100.0	1.740	200
保温层(XPS)	1 380	30.0	0.042	75
填料腔	—	—	—	150/75
工质(水)	4 182	998.2	0.600	—
嵌管(PE)	2 300	2 000.0	1.600	20
填料	1 050	2 100.0	1.740	—

## 2.2 网格划分

所有算例均在ANSYS Workbench平台完成仿真计算。首先,使用Design Modeler创建几何模型并导入Mesh模块,随后采用扫描网格生成算法进行网格划分。对于网格划分,优先设定模型末端边界特别是嵌管和填料腔边界分割份数以生成高质量面网格,随后控制沿流动方向几何边界分割份数并通过指定源面和目标面生成六面体网格。为捕捉嵌管内部流动换热特性及嵌管与填料腔两侧传热特性,对相关边界进行局部网格加密。在完成典型算例网格独立性验证后,采用总网格数量为255 980的几何模型网格划分方法,所有算例网格质量均大于0.5且无负体积。图3以MTAW- $a:b(y)=1:1$ 的模型为例给出了网格划分结果,同时提供了其他4种 $a:b$ 值( $1:1.5$ 、 $1:2$ 、 $1:2.5$ 和 $1:3$ )的填料腔区域局部网格划分结果以供参考。

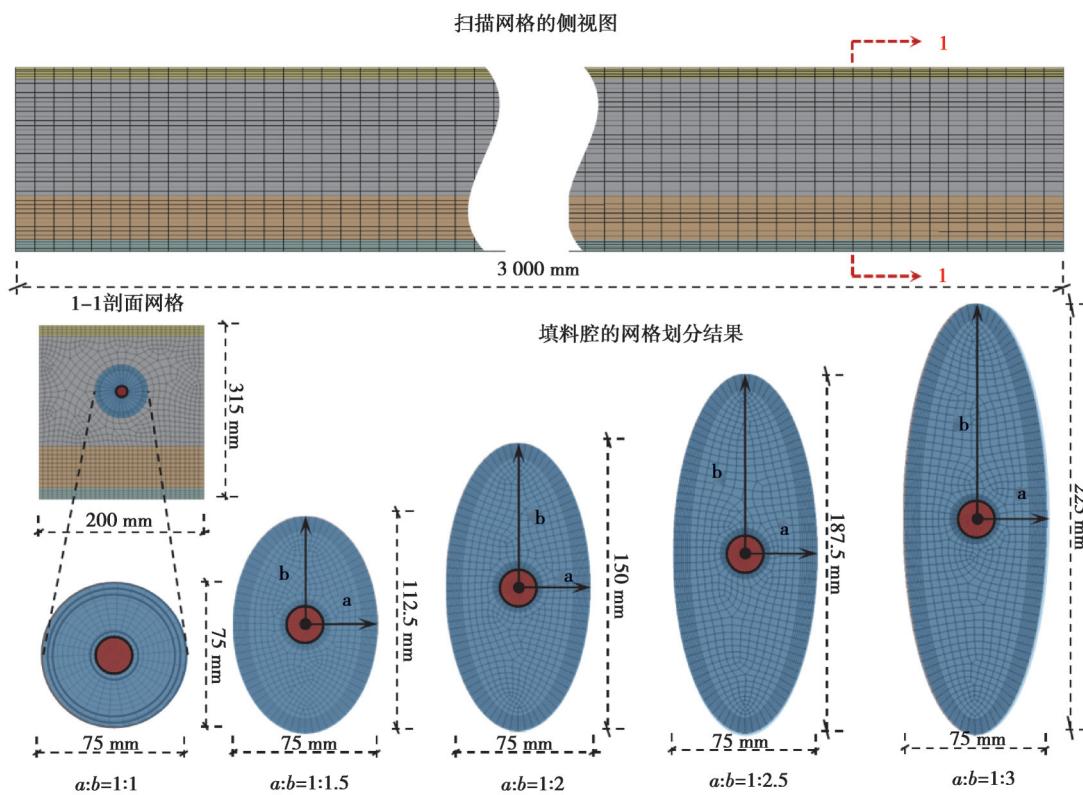


图3 MTAW墙扫略网格划分方法及5种不同尺寸填料腔区域局部网格划分结果

Fig. 3 Schematic meshing method of MTAW wall and local meshing results of 5 different sizes of filler cavities

## 2.3 模型简化与边界条件

建立MTAW墙瞬态传热模型时采用以下假设:嵌管内工质(水)和内/外表面参与对流换热的空气均为不

可压缩流体,热物性参数在模拟过程中保持不变;表1所列固体材料均为各向同性均质材料,除填料导热系数外,其他热物性参数在模拟过程中保持不变;MTAW墙内部各构造层次间热接触良好,忽略接触热阻;注热系统采用并联管道配置,相邻管道之间的界面视为对称边界。

基于以上相关假设,固体区域能量方程为

$$(\rho C_p)_j \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad j=1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

式中: $j=1$ 为抹灰, $j=2$ 为XPS, $j=3$ 为混凝土, $j=4$ 为填料; $\rho$ 为密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $C_p$ 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{°C})$ ; $T$ 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

液体区域能量方程为

$$\frac{\partial(\rho_x \Phi)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{U} \Phi) = \nabla(\Gamma_\phi \text{grad} \Phi) + S_\phi, \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为液体的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $t$ 为时间; $\Phi$ 为温度或速度; $\Gamma_\phi$ 为扩散系数; $\mathbf{U}$ 为速度向量; $S_\phi$ 为源项。

MTAW墙内表面传热边界为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{in}(T_{in} - T_{x=0}), \quad (3)$$

式中: $\lambda_0$ 为内抹灰层导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{°C})$ ; $T_{in}$ 为室内设定温度,取 $22\text{ °C}$ ; $T_{x=0}$ 为与室内接触的内抹灰层表面温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $\alpha_{in}$ 为室内侧对流换热系数,取 $8.7\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{°C})$ <sup>[13]</sup>。

MTAW墙外表面传热边界为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_{ex}(T_a - T_{x=L}) + \rho_s I - R_{es}, \quad (4)$$

式中: $\lambda_L$ 为外抹灰层导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{°C})$ ; $T_a$ 为室外空气温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $T_{x=L}$ 为与室外接触的外抹灰层表面温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $\rho_s$ 为外墙面辐射热吸收系数,取 $0.65$ ; $I$ 为水平面或各朝向太阳辐射, $\text{W}/\text{m}^2$ ; $R_{es}$ 为电热阻, $\text{K}/\text{W}$ ; $\alpha_{ex}$ 为室外侧对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{°C})$ , $\alpha_{ex}$ 计算方法为<sup>[14]</sup>

$$\alpha_{ex} = 5.62 + 3.9v, \quad (5)$$

式中: $v$ 为室外风速, $\text{m}/\text{s}$ 。

MTAW墙外表面太阳辐射吸收以及墙体与室外环境间的对流换热作如下考虑,

$$T_0 = \frac{I \cdot \rho_s}{\alpha_{ex}} + T_a, \quad (6)$$

式中: $T_0$ 为室外空气综合温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $I$ 为太阳辐射强度, $\text{W}/\text{m}^2$ 。

Fluent求解器中压力-速度解采用SIMPLE算法,采用二阶迎风格式对所有扩散项进行离散化,连续性、动量和能量控制方程的收敛准则分别为 $10^{-5}$ 、 $10^{-6}$ 和 $10^{-8}$ 。假定注入MTAW和CTAW的低品位热水由空气源热泵提供,嵌管入口温度设为 $26\text{ °C}$ ,入口速度设置为 $0.5\text{ m/s}$ ,湍流强度为 $5\%$ ,室内温度设定为 $22\text{ °C}$ 。所有模拟算例均采用北京地区气象数据<sup>[15]</sup>,北京市冬季典型气象日室外空气综合温度,地表温度和对流换热系数对应逐时数据如图4所示。

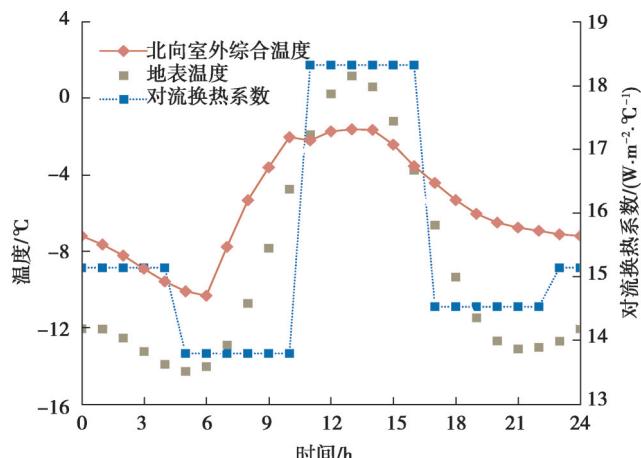


图4 北京地区冬季典型气象日室外综合温度,地表温度和对流换热系数逐时数据

Fig. 4 Hourly outdoor comprehensive temperature, surface temperature, and convective heat transfer coefficient data on typical meteorological days in winter in Beijing area

为避免墙体初始温度分布对模拟结果产生干扰,所有模拟案例对应工况均重复计算7 d并仅提取最后1 d的稳态数据进行数据分析。

## 2.4 模型验证

上述动态传热模型是在前期有关CTAW墙的研究基础上考虑MTAW墙的构造特征与传热特点建立的,相关模型已在前期研究中得到详细验证<sup>[16]</sup>。MTAW与CTAW仅在构造上存在略微差异,即前者在嵌管周边设置了用于填充热扩散性填料的填料腔来替代CTAW中相同部位的混凝土,以达到强化平行于墙面方向上的热扩散能力的目的,但二者主要传热过程与传热边界条件一致。在围护结构传热仿真模拟中,非相变的材料替换通常不会对传热模型本身可靠性产生不利影响<sup>[16]</sup>,从而确保了研究的一致性和可靠性。

## 2.5 模拟方案

MTAW依靠填料腔内部热扩散性填料优化其热量注入与传递过程,针对MTAW的仿真方案如下:首先,以CHEW和CTAW为参照,对比3种墙体的节能潜力与经济性差异;其次,依次研究填料腔倾角( $\theta$ 值)、填料腔尺寸( $a:b$ 值)和填料导热系数( $\lambda_f$ 值)对一次能源消耗和运行费用影响。3.2节中涉及7种不同 $\theta$ 值算例,包括填料腔朝向室内侧布置的3种算例( $\theta_L=90^\circ, 60^\circ, 30^\circ$ ),填料腔垂直布置的1种算例( $\theta=0^\circ$ )和填料腔朝向室外布置的3种算例( $\theta_R=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ )。3.3节中进一步探索 $a:b$ 值对MTAW墙的性能影响,所研究的4种 $a:b$ 值为1:1.5、1:2、1:2.5和1:3。3.4节中以混凝土材料(导热系数为1.74 W/(m·°C), $1\lambda_c$ )为基准填料研究了不同 $\lambda_c$ 值倍数的填料(2、3、5、8、12倍)对MTAW性能影响。

## 2.6 评价指标

### 2.6.1 一次能源消耗

采用单位墙体面积供热能耗( $PE_{heat}$ , MJ/m<sup>2</sup>)、水泵能耗( $PE_{pump}$ , MJ/m<sup>2</sup>)和总运行能耗( $PE_{oper}$ , MJ/m<sup>2</sup>)对不同类型墙体节能潜力进行评价。其中,  $PE_{oper}$  定义为

$$PE_{oper} = PE_{heat} + PE_{pump} \circ \quad (7)$$

$PE_{heat}$  和  $PE_{pump}$  计算方法为

$$PE_{heat} = \left( \frac{Q_{pipe} \cdot \tau}{EER_{pipe} \cdot \eta_{power}} + \frac{Q_{room} \cdot \tau}{\eta_{boil}} \right) / 3.6 \times 10^{-6}, \quad (8)$$

$$PE_{pump} = \frac{P_{pipe}}{\eta_{power}}, \quad (9)$$

$$PE_{CHEW} = \left( \frac{P_{CHEW}}{\eta_{power}} + \frac{Q_{CHEW}}{\eta_{boil}} \right) / 3.6 \times 10^{-6}, \quad (10)$$

式中: $Q_{CTAW}$  和  $Q_{room}$  分别为 CHEW 和 MTAW 墙单位面积日累计热负荷,MJ/m<sup>2</sup>。 $Q_{pipe}$  为嵌管单位面积日累计注热量,MJ/m<sup>2</sup>;  $EER_{pipe}$  为空气源热泵能效比,取4.5; $\tau$  为运行时间; $\eta_{power}$  为燃煤发电效率,取0.37; $\eta_{boil}$  为燃气锅炉效率,取0.9<sup>[17]</sup>。

而 MTAW 和 CTAW 的日累计输水能耗( $P_{pipe}$ , MJ/m<sup>2</sup>)和 CHEW 日累计输水能耗( $P_{CHEW}$ , MJ/m<sup>2</sup>)由以下公式得到。

$$P_{pipe} = \frac{(Q_{pipe} EHR_{pipe} + Q_{room} EHR_{CHEW}) \cdot \tau}{3.6 \times 10^6}, \quad (11)$$

$$P_{CHEW} = Q_{room} EHR_{CHEW} \cdot \tau / 3.6 \times 10^{-6}, \quad (12)$$

式中: $P$  为单位墙体面积日累计输水能耗,MJ/m<sup>2</sup>;  $EHR$  为供暖系统耗电输热比。

### 2.6.2 运行费用

MTAW 和 CHEW 墙运行费用( $C_{oper}$ , CNY/m<sup>2</sup>)为

$$C_{oper} = C_{elec} + C_{boil} \circ \quad (13)$$

注热系统与房间供热系统的水泵运行电费( $C_{elec}$ , CNY/m<sup>2</sup>)以及房间燃气供热费用( $C_{boil}$ , CNY/m<sup>2</sup>)为

$$C_{elec} = \left( \frac{Q_{pipe}}{EER_{pipe}} + P_{pipe} \right) E_{elec}, \quad (14)$$

$$C_{boil} = \frac{Q_{room} E_{fuel} \times 10^3}{\eta_{boil} \cdot H_{fuel}}, \quad (15)$$

$$C_{\text{CHEW}} = \frac{Q_{\text{CHEW}} E_{\text{fuel}} \times 10^3}{\eta_{\text{boil}} \cdot H_{\text{fuel}}} + P_{\text{CHEW}} \cdot E_{\text{elec}}, \quad (16)$$

式中:  $E_{\text{elec}}$  为单位电价, 取 0.136 CNY/MJ<sup>[18]</sup>;  $E_{\text{fuel}}$  为单位燃气价格, 取 2.61 CNY/m<sup>3</sup><sup>[19]</sup>;  $H_{\text{fuel}}$  为天然气热值, 取 3.9 × 10<sup>5</sup> kJ/Nm<sup>3</sup><sup>[17]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 节能潜力与经济性对比

探讨了 3 种具有不同填料腔形状和大小的 MTAW ( $a:b=1:1$ 、 $a:b(x)=1:2$  和  $a:b(y)=1:2$ ) 的节能潜力和经济性, 并与 2 种参考墙体进行比较。3.1~3.3 节中, 填料导热系数为  $5\lambda_c$ , 室内设定温度为 22 °C, 注热系统开启状态且注热温度为 26 °C, 墙体朝向为北。图 5 为 3 种典型 MTAW 与 2 种参考墙体在模拟工况下的水泵能耗、供热能耗和总运行能耗对比。与 CHEW 相比, MTAW 和 CTAW 水泵能耗明显增加, 分别增加 2 倍和 1.8 倍, 且 MTAW 水泵能耗相比 CTAW 增加 8.27%~12.03%。填料腔尺寸越大的 MTAW 水泵能耗更高, 且填料腔倾角也会影响水泵能耗。MTAW- $a:b(x)=1:2$  的水泵能耗 (0.15 MJ/m<sup>2</sup>) 最大, 相比 CTAW 和 MTAW- $a:b=1:1$ , 水泵能耗分别增加 12.03% 和 2.93%。MTAW 水泵能耗变高主要是因为热扩散性填料强化了嵌管周边热传递, 热量在平行于墙面方向上可传递更多热量, 从而对注热系统运行提出更高需求。由于通过注热系统注入到嵌管层中的热量显著增多, 且在平行于墙面方向上可形成更加稳定连续的热屏障, MTAW 所需供热能耗得到有效降低。因此, MTAW 相较于 2 种参考墙体, 供热能耗和总运行能耗的节约更为显著。供热能耗最小的 MTAW- $a:b(x)=1:2$  所需供热量为 1.01 MJ/m<sup>2</sup>, 相比 CTAW 和 CHEW 分别减少 14.43% 和 29.35%。填料腔尺寸越大, MTAW 供热能耗也越小。MTAW- $a:b(x)=1:2$  的供热能耗与总运行能耗最小, 分别比 MTAW- $a:b=1:1$  降低 1.29% 和 0.78%, MTAW- $a:b(x)=1:2$  比 CHEW 和 CTAW 总运行能耗分别可降低 2.60% 和 14.13%, 节能潜力更为显著。

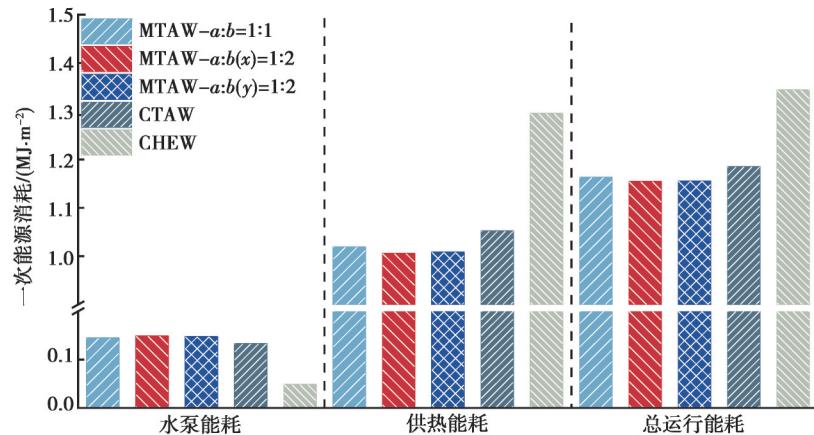


图 5 3 种典型 MTAW 和 2 种参考墙体能耗指标对比

Fig. 5 Comparison of energy consumption indicators for 3 typical MTAWs and 2 reference walls

图 6 为 3 种典型 MTAW 与 2 种参考墙体的运行电费、运行燃气费用及总运行费用对比。由于 MTAW 和 CTAW 均需要消耗电力驱动低品位热源(文中为空气源热泵)及注热系统输配水泵运行, 二者运行电费相较 CHEW 增加明显。在热扩散性填料作用下, 应用填料腔会使得运行电费进一步增加, 且填料腔尺寸越大增加越为明显, 这是墙体可注入更多热量的直接结果。由于注热温度略高于室温, MTAW 和 CTAW 实质上处于辅助供热模式, 二者运行燃气费用显著降低。由于 MTAW- $a:b(x)=1:2$  算例填料腔较大且填料腔横置, 其运行电费虽然最高, 但可向室内传递更多的热量而使得运行燃气费用最低, 最终该算例的总运行费用最低。MTAW- $a:b(x)=1:2$  运行电费为 0.15 CNY/m<sup>2</sup>, 运行燃气费用为 -0.1 CNY/m<sup>2</sup>, 总运行费用为 0.05 CNY/m<sup>2</sup>, 相比 MTAW- $a:b=1:1$ 、MTAW- $a:b(y)=1:2$  和 CTAW, 其运行电费分别增加 4.22%、1.14% 和 17.37%, 运行燃气费用分别下降 8.71%、2.1% 和 40.84%。与 CHEW 相比, MTAW 和 CTAW 总运行费用明显降低, 降低率分别为 94.99%~103.92% 和 75.31%。结果证实 MTAW 总运行费用明显低于 CTAW 和 CHEW, 填料腔尺寸越大的 MTAW 总运行费用越低, 且填料腔横置相较于竖置的运行费用节省效果更为明显。

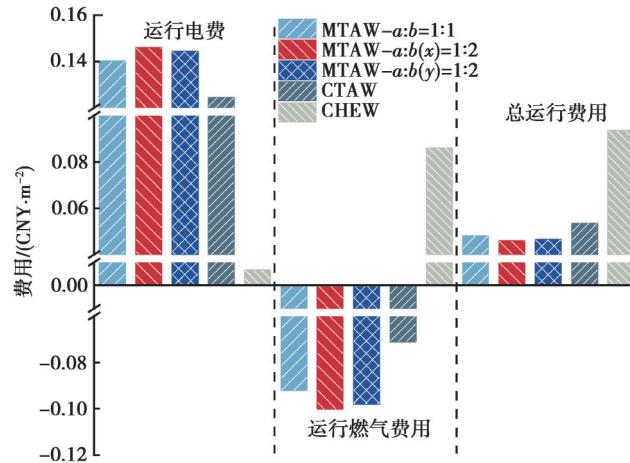


图6 3种典型MTAW和2种参考墙体运行经济性指标对比

Fig. 6 Comparison of operational economic indicators for 3 typical MTAWs and 2 reference walls

### 3.2 填料腔倾斜角度变化的影响

探讨了填料腔倾角( $\theta$ 值)对MTAW节能潜力与经济性影响。图7展示了 $\theta$ 值变化对MTAW水泵能耗、供热能耗和总运行能耗指标的影响,可以看出, $\theta$ 值变化并未对MTAW水泵能耗产生明显影响,但对供热能耗和总运行能耗有显著影响。当填料腔长轴由偏向室外侧( $\theta_R=90^\circ, 60^\circ$ 和 $30^\circ$ )转室内侧( $\theta_L=90^\circ, 60^\circ$ 和 $30^\circ$ )时,供热能耗和总运行能耗均有所减小,这主要是由于更多的注入热量向室内扩散减少了供热能耗。当填料腔长轴向室外侧倾斜,供热能耗和总运行能耗随着倾角减小( $\theta_R=90^\circ \rightarrow \theta_R=0^\circ$ )而逐渐减小。反之,向室内侧倾斜时,MTAW供热能耗先减小( $\theta=0^\circ \rightarrow \theta_L=60^\circ$ )后增加( $\theta_L=60^\circ \rightarrow \theta_L=90^\circ$ )。模拟结果反映出:当填料腔向室内侧倾斜时,节能效果更好,特别是 $\theta_L=60^\circ$ 对应算例的供热能耗和总运行能耗在所有工况中最小。在该条件下,MTAW供热能耗仅 $0.99 \text{ MJ/m}^2$ ,总运行能耗为 $1.14 \text{ MJ/m}^2$ ,相比CTAW算例分别减少了5.78%和3.66%。

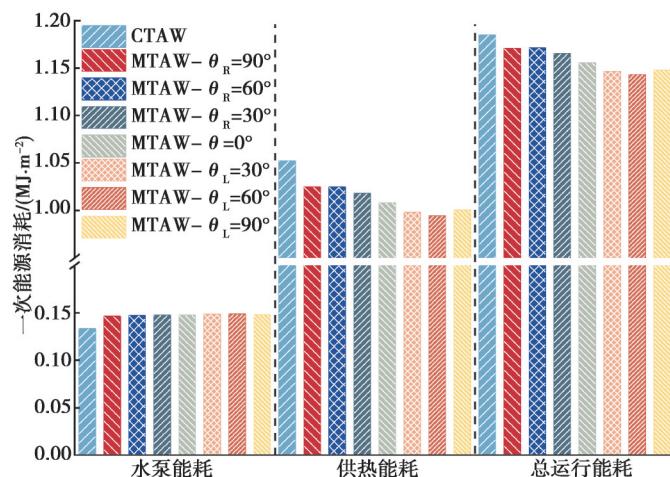
图7 填料腔倾角( $\theta$ 值)变化对MTAW能耗指标的影响Fig. 7 Influence of filler cavity inclination angle ( $\theta$  value) variation on energy consumption indicators of MTAW

图8展示了 $\theta$ 值变化对MTAW运行电费,运行燃气费用和总运行费用指标的影响。当填料腔从室外侧逐渐向室内侧倾斜( $\theta_R=0^\circ \rightarrow \theta_L=60^\circ$ )时,运行电费随之增加,并在 $\theta_L=60^\circ$ 时达到峰值,而在 $\theta_L=60^\circ$ 和 $90^\circ$ 时降低。 $\theta_L=60^\circ$ 时运行电费为 $0.15 \text{ CNY/m}^2$ ,比 $\theta_R=90^\circ$ 时增加3.33%。模拟结果证实调整 $\theta$ 值有助于显著减少MTAW运行燃气费用和运行费用。运行燃气费用为负值,反映了MTAW在辅助供热模式下可节约燃气费用。随着填料腔从室外向室内侧倾斜,节省的运行燃气费用逐渐增加而运行费用逐渐减少。特别在 $\theta_L=60^\circ$ 时节省的运行燃气费用最多且运行费用也最小,分别为 $-0.34 \text{ CNY/m}^2$ 和 $0.18 \text{ CNY/m}^2$ ,相较于 $\theta_R=90^\circ$ 分别减少8.31%和4.66%。

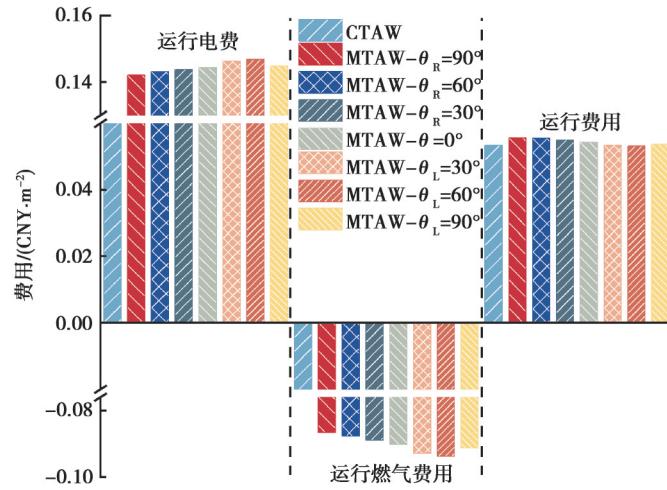


图8 填料腔倾角变化(θ值)对MTAW经济性指标的影响

Fig. 8 Influence of filler cavity inclination angle ( $\theta$  value) variation on economic indicators of MTAW

### 3.3 填料腔尺寸变化的影响

探讨了MTAW在4种填料腔倾斜角度( $\theta_L=90^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $30^\circ$ 和 $0^\circ$ )和4种填料腔大小( $a:b=1:1.5$ 、 $1:2$ 、 $1:2.5$ 和 $1:3$ )下的节能潜力和经济性。图9显示了4种不同 $a:b$ 值和4种不同 $\theta_L$ 值下MTAW的节能潜力。结果表明,填料腔倾角和填料腔尺寸对MTAW水泵能耗影响不大,对供热能耗和总运行能耗有显著影响。具体来说,不同 $a:b$ 值和 $\theta_L$ 值组合下的MTAW的水泵能耗均略高于CTAW,而供热能耗则显著下降。供热能耗和总运行能耗随 $a:b$ 值增加而减小,而运行电费几乎不随填料腔增加而增加。当 $\theta_L=60^\circ$ 时, $a:b=1:3$ 相比 $a:b=1:1.5$ 的供热能耗和总运行能耗分降低3.00%和2.09%。随着 $a:b$ 值增加,改变 $\theta$ 值带来的性能提升也更为明显。与CTAW相比,MTAW- $a:b=1:3$ 的供热能耗可进一步降低7.58%,而 $a:b=1:1.5$ 的供热能耗可降低3.73%。这反映了在较大的 $a:b$ 值下优化 $\theta_L$ 值可获得更好效果。不同 $a:b$ 值下的MTAW供热能耗和总运行能耗均随着 $\theta_L$ 值增大均先减后增,最佳 $\theta$ 值均为 $60^\circ$ 。当 $a:b=1:3$ 、 $\theta_L=60^\circ$ 时,MTAW供热能耗和总运行能耗最小,分别为 $1.13 \text{ MJ/m}^2$ 和 $2.03 \text{ MJ/m}^2$ ,相比CTAW分别减少了7.57%和4.87%。

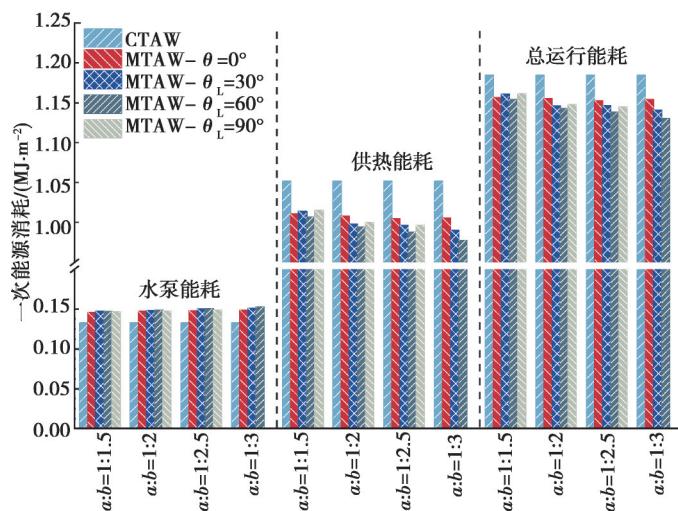
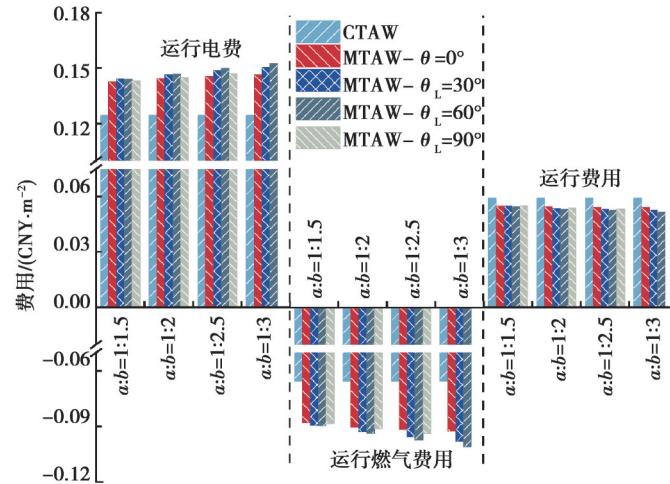
图9 不同填料腔倾角下填料腔尺寸( $a:b$ 值)变化对MTAW能耗指标的影响Fig. 9 Energetic impact of filler cavity size ( $a:b$  value) variation under different inclination angles in MTAW

图10给出了MTAW的3个经济性能指标在不同 $a:b$ 值和 $\theta_L$ 值下的变化。当 $\theta_L$ 固定而增加 $a:b$ 值时,MTAW运行电费逐渐增加而运行燃气费用和运行费用减少,这种变化趋势随 $a:b$ 值增加而更加明显。 $a:b=1:3$ 时,运行电费相比CTAW增长17.63%~22.46%,运行燃气费用节省29.30%~35.23%。 $a:b=1:1.5$ 时,运行电费增加14.61%~15.65%,燃气费用节省25.74%~27.10%。因此,在更大的 $a:b$ 值下优化 $\theta_L$ 值可获得更高的效益。随着 $\theta_L$ 增加,3个指标在不同 $a:b$ 值下均呈现出先增大后减小的趋势。 $a:b=1:3$ 且 $\theta_L=60^\circ$ 时运行燃气费用和总运行费用最小,分别为 $-0.10 \text{ CNY/m}^2$ 和 $0.05 \text{ CNY/m}^2$ ,相比CTAW分别减少54.40%和14.78%。

图 10 不同填料腔倾角下填料腔尺寸( $a:b$ 值)变化对 MTAW 经济性指标的影响Fig. 10 Economic impact of filler cavity size ( $a:b$  value) variation under different inclination angles in MTAW

### 3.4 填料导热系数变化的影响

探讨了填料导热系数和对 MTAW 节能潜力和经济性的影响。图 11 显示了不同  $\theta_L$  条件下  $\lambda_f$  值变化对 MTAW 能耗指标的影响。由图 11 可知,水泵能耗受  $\lambda_f$  和  $\theta_L$  变化影响较小,但  $\lambda_f$  变化显著地影响了供热能耗和总运行能耗。随着  $\lambda_f$  的增加,改变  $\theta_L$  带来的性能改善效果也更为明显。在较低的  $\lambda_f$  值 ( $2\lambda_c$ ) 下,  $\theta_L=60^\circ$  与 CTAW 相比供热能耗和总运行能耗分别减少 3.03% 和 1.91%,而这 2 项指标在  $\lambda_f=12\lambda_c$  时分别减少 7.37% 和 4.71%,说明提升  $\lambda_f$  值能显著提高 MTAW 能源利用效率。在较低的  $\lambda_f$  值 ( $2\lambda_c$ ) 下,  $\theta_L=60^\circ$  与  $\theta=0^\circ$  相比供热能耗和总运行能耗分别减少 0.54% 和 0.41%,而这 2 项指标在  $\lambda_f=12\lambda_c$  时分别减少 1.94% 和 1.50%,这说明随着  $\lambda_f$  值的增大,  $\theta$  值的优化带来的改善效果也会更加明显。

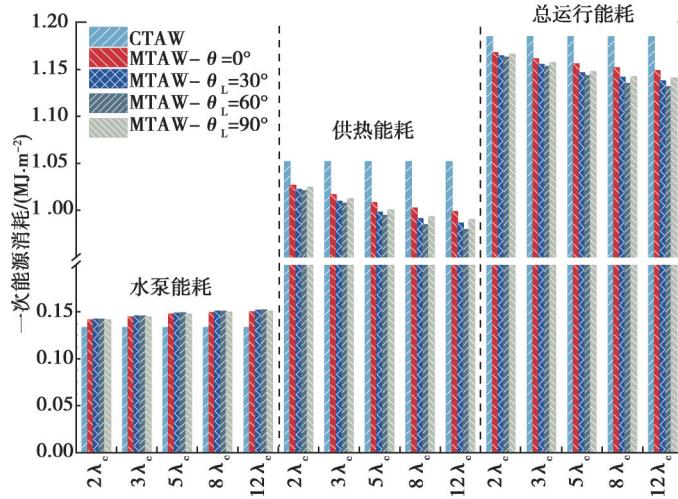
图 11 不同填料腔倾角下填料导热系数( $\lambda_f$ 值)变化对 MTAW 能耗指标的影响Fig. 11 Energetic impact of filler thermal conductivity ( $\lambda_f$  value) variation under different inclination angles in MTAW

图 12 为 MTAW 的经济性能指标在不同  $\lambda_f$  值和  $\theta_L$  值下的变化。MTAW 运行电费随  $\lambda_f$  增加而增加,而运行燃气费用和总运行费用有所减小。MTAW 运行电费在  $2\lambda_c$ ~ $5\lambda_c$  范围上升较快且运行燃气费用和运行费用下降迅速,在  $5\lambda_c$ ~ $12\lambda_c$  增加缓慢且运行燃气费用和运行费用也降低缓慢,合理增加填料导热系数可有效提高 MTAW 经济性。固定  $\theta_L$  值不变,  $\lambda_f$  增加对运行电费增加和运行燃气费用减少十分显著。相比 CTAW, MTAW 在  $2\lambda_c$  时的运行燃气费用降低 17.76%~19.39% 而在  $12\lambda_c$  时减少 31.14%~34.53%,表明较高的  $\lambda_f$  值配合适当的  $\theta_L$  值可获得更好效果。此外,各  $\lambda_f$  值工况下指标均随  $\theta_L$  增加先增大后减小,且在  $\theta_L=60^\circ$  时运行电费最大,运行燃气费用和总运行费用最小,相比 CTAW 分别增加 21.69%,减少 34.70% 和 24.38%。

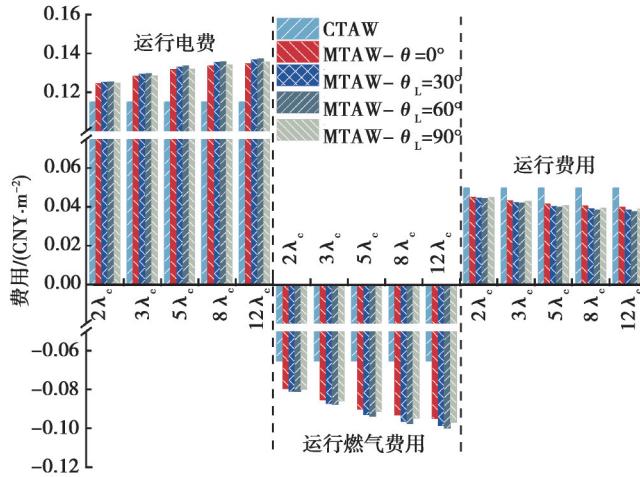


图 12 不同填料腔倾角下填料导热系数( $\lambda_r$ 值)变化对 MTAW 经济性指标的影响

Fig. 12 Economic impact of filler thermal conductivity ( $\lambda_r$  value) variation under different inclination angles in MTAW

## 4 总 结

MTAW 内部设有特定形状孔道用于填充热扩散性填料以提升热激活类墙体热屏障稳定性,介绍了 MTAW 瞬态传热模型并借助数值模拟在冬季气候条件下填料腔倾斜角度、填料腔尺寸和填料导热系数对 MTAW 墙体的性能提升以及经济性进行深入研究,得到以下结论:

1) MTAW 相较于 CTAW 和 CHEW 具有供热能耗和总运行能耗节约效果。相较于 CTAW 和 CHEW,3 种具有不同填料腔形状和大小的 MTAW( $a:b=1:1$ 、 $a:b(x)=1:2$  和  $a:b(y)=1:2$ )对应供热能耗/总运行能耗分别平均降低了 3.93%/2.31% 和 21.99%/13.88%,初步验证了 MTAW 技术有效性。MTAW 总运行费用明显低于 CTAW 和 CHEW,填料腔尺寸越大总运行能耗和运行费用越低,且填料腔横置相较于竖置总运行能耗和运行费用节省效果更为明显。

2) 填料腔长轴向室外侧倾斜时,供热能耗和总运行能耗随填料腔倾角减小而逐渐减小;填料腔长轴向室内侧倾斜时,供热能耗随填料倾角增大呈现先减小后增加的趋势。填料腔倾角为  $\theta_r=60^\circ$  时可获得更好的节能效果和经济性,此时相较于 CTAW 运行费用增加了 0.47%,总运行能耗减少 3.66%。

3) MTAW 总运行能耗和运行费用随填料腔尺寸增加而减小,在较大的  $a:b$  值下优化  $\theta_r$  值综合效果更好。 $a:b=1:3$ 、 $\theta_r=60^\circ$  时 MTAW 节能经济性更好,MTAW 总运行能耗和总运行费用最小,相比与 CTAW 分别降低了 4.87% 和 14.78%。

4) MTAW 总运行能耗和运行费用随  $\lambda_r$  值增加而减小,说明强化填料腔区域热扩散能力可改善 MTAW 节能经济性,且优化  $\theta_r$  值产生改善效果随  $\lambda_r$  值增大也更加明显。 $12\lambda_c$  时 MTAW 节能经济性最好,其总运行能耗和运行费用分别减少了 4.72% 和 24.38%。

## 参考文献

- [1] Nagaoka A, Ota Y, Sakai K, et al. Performance evaluation and spectrum-based analysis of a wall-mounted photovoltaic system for zero-energy building[J]. Renewable Energy, 2021, 174:147-156.
- [2] Wei H, Yang D, Du J, et al. Field experiments on the effects of an earth-to-air heat exchanger on the indoor thermal environment in summer and winter for a typical hot-summer and cold-winter region[J]. Renewable Energy, 2021, 167: 530-541.
- [3] 张志刚, 苏珂, 姚万祥. 热管置入式墙体在实际建筑中的传热特性研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 1-6.  
Zhang Z G, Su K, Yao W X. Study on heat transfer characteristics of wall implanted with heat pipes in actual buildings[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(10): 1-6. (in Chinese)
- [4] 朱丽, 杨洋, 陈萨如拉, 等. 热激活相变复合墙体动态热特性与节能潜力[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(11): 42-52.  
Zhu L, Yang Y, Chen S, et al. Thermal performance and energy saving potential study on a thermo-activated PCM building system[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(11): 42-52. (in Chinese)
- [5] 王厚华, 吴伟伟. 居住建筑外墙外保温厚度的优化分析[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(8): 937-941.  
Wang H H, Wu W W. Optimizing insulation thickness of external walls for residential buildings[J]. Journal of Chongqing

- University, 2008, 31(8): 937-941. (in Chinese)
- [6] Altin M, Yildirim G S. Investigation of usability of boron doped sheep wool as insulation material and comparison with existing insulation materials[J]. Construction and Building Materials, 2022, 331: 127303.
- [7] Jiang S H, Zha F H, Zhao Y X, et al. Thermal performance of double-layer pipe-embedded envelope with low-grade energy for heating[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 77: 107489.
- [8] 张志刚,于广全.基于热管置入式墙体的室内热环境研究[J].太阳能学报,2019,40(9): 2642-2648.  
Zhang Z G, Yu G Q. Study of indoor thermal environment using wall implanted with heat pipes[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(9): 2642-2648. (in Chinese)
- [9] Romaní J, Cabeza L F, de Gracia A. Development and experimental validation of a transient 2D numeric model for radiant walls[J]. Renewable Energy, 2018, 115: 859-870.
- [10] Shen Z L, Shrestha S, Howard D, et al. Machine learning-assisted prediction of heat fluxes through thermally anisotropic building envelopes[J]. Building and Environment, 2023, 234: 110157.
- [11] Biswas K, Shrestha S, Hun D A, et al. Thermally anisotropic composites for improving the energy efficiency of building envelopes[J]. Energies, 2019, 12(19): 3783.
- [12] Chen S, Yang Y, Chang T X. Uncertainty and parameter ranking analysis on summer thermal characteristics of the hydronic thermal barrier for low-energy buildings[J]. Building Simulation, 2023, 16(1): 27-49.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑供暖通风与空气调节设计规范附条文说明:GB 50736—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [14] Zhu L, Yang Y, Chen S, et al. Numerical study on the thermal performance of lightweight temporary building integrated with phase change materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 138: 35-47.
- [15] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.  
Meteorological Data Department of the Meteorological Information Center of China Meteorological Administration, Department of Building Science, Tsinghua University. Special meteorological data set for thermal environment analysis of buildings in China[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese)
- [16] 杨洋,陈萨如拉.嵌管式热激活复合墙体综合能量特性全局敏感性研究[J].太阳能学报,2023,44(7): 248-256.  
Yang Y, Chen S. Global sensitivity analysis on thermal performances of pipe-embedded thermo-activated composite wall[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(7): 248-256. (in Chinese)
- [17] Wu W, Li X T, You T, et al. Combining ground source absorption heat pump with ground source electrical heat pump for thermal balance, higher efficiency and better economy in cold regions[J]. Renewable Energy, 2015, 84: 74-88.
- [18] 北京市发展和改革委员会.北京市发展和改革委员会关于调整本市销售电价有关事项的通知[EO/OL].(2020-11-30)[2023-08-15].[https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202012/t20201201\\_2153982.html](https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202012/t20201201_2153982.html).  
Beijing Municipal Commission of Development and Reform. Notice on adjusting electricity prices of Beijing Municipal Commission of Development and Reform[EO/OL]. (2020-11-30) [2023-08-15]. [https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202012/t20201201\\_2153982.html](https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202012/t20201201_2153982.html). (in Chinese)
- [19] 北京市发展和改革委员会.关于调整本市居民用天然气销售价格的通知[EO/OL].(20119-11-07)[2023-08-15].[https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201911/t20191108\\_484529.html](https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201911/t20191108_484529.html).  
Beijing Municipal Commission of Development and Reform. Notice on adjusting the prices of natural gas for residents[EO/OL]. (20119-11-07) [2023-08-15]. [https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201911/t20191108\\_484529.html](https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201911/t20191108_484529.html). (in Chinese)

(编辑 郑洁)