

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2401009

热管置入式墙体供暖季传热性能分析

张志刚, 刘巧丽, 姚万祥

(天津城建大学 能源与安全工程学院, 天津 300384)

摘要: 墙体是建筑的主要组成部分之一, 其热损失占据了冬季供暖能耗的一大部分, 因此降低墙体热损失是建筑节能领域的研究重点. 热管置入式墙体(wall implanted with heat pipes, WIHP)是一种新型的太阳能被动式利用技术. 通过 TRNSYS 软件建立了一个新的 WIHP 传热部件, 并通过实验测试进行模型验证. 对 WIHP 不同方向的传热性能进行分析, 并提出两种 WIHP 的优化方式. 结果表明, 在工作期间, 南向 WIHP、西向 WIHP 和东向 WIHP 均可以提高内表面温度, 减少墙体热损失, 节能效果显著.

关键词: 热管置入式墙体; 动态传热; 热流量; 热损失; 节能率

中图分类号: TU832 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-719X(2024)01-0009-07

Analysis of Heat Transfer Performance of Wall Implanted with Heat Pipes in Heating Season

ZHANG Zhigang, LIU Qiaoli, YAO Wanxiang

(School of Energy and Safety Engineering, TCU, Tianjin 300384, China)

Abstract: The wall is one of the main components of the building, and its heat loss accounts for a large part of heating energy consumption in winter. Therefore, reducing the heat loss of the wall is the research focus in the field of building energy saving. Wall implanted with heat pipes (WIHP) is a new passive solar energy utilization technology. In this paper, a new heat transfer component of WIHP is established by TRNSYS software, and the model is verified by experimental tests. The heat transfer performance in different orientations of WIHP is analyzed, and two optimization methods of WIHP are proposed. The results show that southward WIHP, westward WIHP, and eastward WIHP can increase the inside surface temperature, reduce the heat loss of the wall and boast remarkable energy saving effects.

Key words: wall implanted with heat pipes; dynamic heat transfer; heat flux; heat loss; energy saving rate

建筑作为最大的用能领域之一, 建筑建造和运行过程的能耗及碳排放是我国社会总能耗和碳排放的重要组成部分. 2019年我国建筑运行能耗及碳排放分别占全社会总能耗的23%和总碳排放量的22%^[1]. 在建筑运行能耗中, 暖通空调占比60%以上, 提高墙体的热工性能, 可以降低建筑用于暖通空调的能耗和碳排放.

墙体保温隔热技术可以分为主动式和被动式两类, 内嵌管墙体(又称为热激活式墙体)是一种主动式墙体保温隔热的手段, 可以与低温供暖系统结合, 有效降低建筑供暖能耗. 李宪庭等^[2]研究了一种与空气源热泵结合的内嵌管墙体系统, 通过综合数值模型模

拟了系统的动态传热过程, 该系统可减少84%的内表面传热量, 仅增加很少的外表面散热量, 更适用于寒冷地区. 沈冲等^[3]提出了一种具有双层遮阳装置的内嵌管墙体结合地源热泵系统, 模拟了该系统在不同地区的传热过程及能源效率, 得出即使水温远低于室温仍可以进行辅助供暖, 且系统的性能系数高于10. 杨洋等^[4]提出一种用热激活相变材料复合墙体(TAPCW)来研究其在中国北方冬季的节能性, 结果表明TAPCW应用于北向更有效, 墙体内部温度最大提高18℃, 具有较大的节能潜力.

张志刚等提出的热管置入式墙体(WIHP)是一种新型太阳能被动式利用技术^[5], 相较于热激活式墙体

收稿日期: 2022-05-02; 修订日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(52178083); 能源清洁利用国家重点实验室开放基金课题(ZJUCEU2020024)

作者简介: 张志刚(1961—), 男, 天津人, 天津城建大学教授.

通讯作者: 姚万祥(1984—), 男, 副教授, 博士, 从事建筑节能及可再生能源利用研究. E-mail: yaowanxiang@126.com

无需额外动力装置,且热管直接加热墙体内部,在降低建筑热损失^[6]和提升室内热舒适性^[7]方面均有良好的效果.孙志健等^[8]基于稳态传热理论,提出 WIHP 的等效传热系数用于研究 WIHP 在稳态条件下的节能性.由于实际的墙体传热是一个动态过程,采用稳态方法在墙体动态热性能研究及热负荷特性分析上存在局限性.刘畅等^[9]基于 z 传递函数建立了 WIHP 动态传热模型.将 WIHP 的传热过程等效于常规墙体的传热与热管传热两部分,同时考虑了热管的即时传热量和墙体蓄热量的影响.该传热模型可以较准确地计算墙体动态传热量,但是将 WIHP 独立为常规墙体与热管两部分,对研究热管与墙体相结合的耦合传热无法实现,且传热量计算复杂,误差受传递系数的影响.

因此,有必要在理论分析的基础上,通过 TRNSYS 软件建立一个新的 WIHP 传热部件用于分析 WIHP 在供暖季的传热性能,并通过动态测试对传热模型进行验证.本文研究不同方向 WIHP 的有效传热能力并进行优化,为建筑应用 WIHP 提供参考依据.

1 传热原理

热管是一种高效的传热元器件,具有小温差大传热量的特性. WIHP 将分离式重力热管以毛细管栅的形式分别置入墙体的外抹灰与内抹灰中.外抹灰层的蒸发段吸收太阳辐射,工质气化沸腾,上升到热管的冷凝段,内抹灰层吸收工质的冷凝热量,以对流和辐射的方式向室内传热,工质重新液化,返回蒸发段,传热原理如图 1 所示.

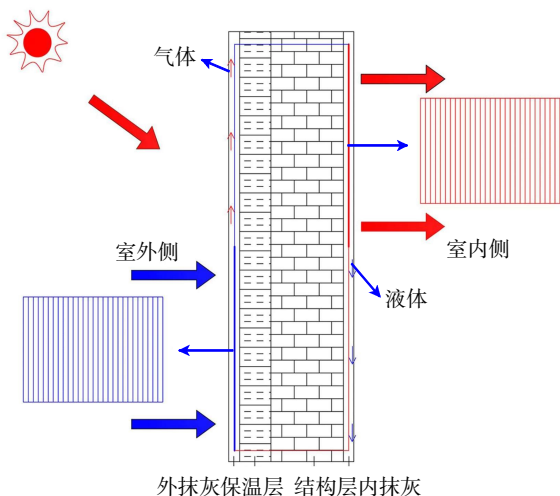


图 1 传热原理图

1.1 传热模式

WIHP 的传热模型如图 2 所示. WIHP 在太阳辐射

作用下,外表面被加热,温度升高,进而内外表面产生温度差.在有太阳辐射时,蒸发段吸收外表面接收的太阳辐射,利用热管的高效导热性;冷凝段向墙体内部及内表面释放热量,这一过程定义为工作状态.而在不具备太阳辐射时(墙体外表面温度低于内表面温度),由于热管的单向导热性,热量不会经热管向外传递,造成不必要的热损失.另一方面,在热管工作状态下蓄存于墙体内部的热量以一定形式向室内释放,此过程为蓄热释放状态.

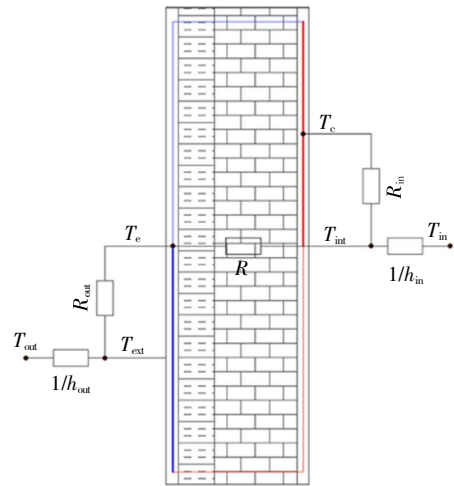


图 2 WIHP 传热模型

影响 WIHP 传热的关键因素是室外空气综合温度,室外空气综合温度是太阳辐射与室外空气综合热效应的结果,其计算公式为

$$T_z = T_{out} + \frac{aI}{h_{out}} \tag{1}$$

式中: T_{out} 为室外空气温度, $^{\circ}\text{C}$; a 为墙体的吸收率; I 为太阳辐射强度, W/m^2 ; h_{out} 为墙体外表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

内外表面温度差决定了热管工作的时间及工作强度,用式(2)描述,即

$$\Delta T = T_z - T_{int} \tag{2}$$

式中: T_{int} 为内表面温度, $^{\circ}\text{C}$.

当 $\Delta T > 0$ 时, WIHP 墙体为工作状态. 蒸发段吸热量和冷凝段放热量如式(3)-(6)所示,即

$$q_e = \frac{(T_z - T_e)}{R_{out}} \tag{3}$$

式中: T_e 为蒸发段温度, $^{\circ}\text{C}$; R_{out} 为外抹灰层热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

$$R_{out} = \frac{\delta_o}{\lambda_o} \tag{4}$$

式中: δ_o 为外抹灰层厚度的一半, m ; λ_o 为外抹灰层导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

$$q_c = \frac{(T_c - T_{in})}{R_{in}} \quad (5)$$

式中: T_c 为冷凝段温度, $^{\circ}\text{C}$; R_{in} 为内外抹灰层热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

$$R_{in} = \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (6)$$

式中: δ_i 为内抹灰层厚度的一半, m ; λ_i 内外抹灰层导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

1.2 传热模型

(1) 外表面热平衡方程为

$$aI + h_{out}(T_{ext} - T_{out}) = \frac{(T_z - T_c)}{R_{out}} \quad (7)$$

式中: T_{ext} 为外表面温度, $^{\circ}\text{C}$.

(2) 热管热平衡方程为

$$\frac{(T_c - T_{in})}{R_{in}} = \mu \frac{(T_z - T_c)}{R_{out}} \quad (8)$$

式中: μ 为热管传热过程的瞬时热效率.

(3) 内表面热平衡方程为

$$\frac{(T_c - T_{in})}{R_{in}} = h_{in}(T_{in} - T_{int}) \quad (9)$$

式中: T_{in} 为室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$; h_{in} 为墙体内表面与室内环境辐射和对流的综合换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

2 数值模拟

2.1 模拟配置

建立除墙体外完全相同的两个建筑模型, 尺寸为

$8 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高). 典型年气象参数取中国北方寒冷地区的天津, 供暖时间为 11 月 15 日至 3 月 15 日, 室内供暖温度为 $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 所选建筑的墙体及屋顶热工参数均符合《建筑节能与可再生能源通用规范》(GB55015—2021) 的规定, 墙体结构的热物性参数如表 1 所示, 括号为屋顶保温层厚度.

表 1 墙体结构的热物性参数

结构	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	厚度/mm
外抹灰层	1 800	1 050	0.93	20
保温层	29	1 470	0.03	70(90)
结构层	1 800	880	0.81	240
内抹灰层	1 800	1 050	0.93	20

表 2 列出了 5 组对照墙体的设置, 方案 1—3 为基础对照方案. 为了满足分离式重力热管的工作条件, 墙体外抹灰层的蒸发段与内抹灰层的冷凝段之间必须维持一定的高度差. 所以, 在有限的外墙面积下, WIHP 能降低的热损失有限. 根据传热原理, 提出两种优化 WIHP 传热性能的方式. 一是增加热管管栅的面积, 优化方法为: 在管间距一定的条件下, 增加墙体外抹灰层的蒸发段毛细管栅面积为原来的 2 倍; 将冷凝段毛细管栅置于屋顶的内抹灰层中, 侧墙吸热屋顶放热模式, 如方案 4. 二是提高 WIHP 蒸发段的太阳能吸收率, 优化方法为: 在 WIHP 外墙的外抹灰层添加可忽略厚度、吸收率为 0.9 的光热吸收材料涂层, 如方案 5 所示.

表 2 对照墙体参数设置

方案	朝向	墙体类型	简称	管栅面积/ m^2	太阳能吸收率
1	南向	常规/WIHP	SCW/SWIHP	12	0.7
2	东向	常规/WIHP	ECW/EWIHP	6	0.7
3	西向	常规/WIHP	WCW/WWIHP	6	0.7
4	南向/水平	常规/WIHP+屋顶冷凝	RCW/SRWIHP	24	0.7
5	南向	常规/WIHP+光吸热膜	SCW/SPTWIHP	12	0.9

2.2 模拟方法及验证

使用 TRNSYS 的多区域建筑组件 Type56 来模拟墙体的瞬态热行为. Type56 可自主设置墙体结构材料物性参数, 输入墙体厚度自动计算传热系数. Type56 除了可以输出整个热区的空气温度和热负荷, 也可以输出墙体各个表面的温度及传热量. 基于理论分析, 本文建立了一个新的 WIHP 传热部件, 将热管冷凝段等效为一个等温加热面, 忽略绝热段的热损失 (已做保温处理). 室外空气综合温度和墙体内表面温度的瞬时值作为输入, 热管传热量作为输出添加至建筑模块 Type56, 建立热交换过程, 模拟系统如图 3 所示. 为了

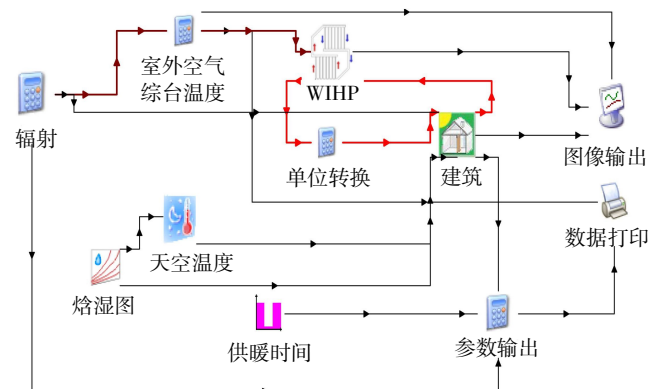


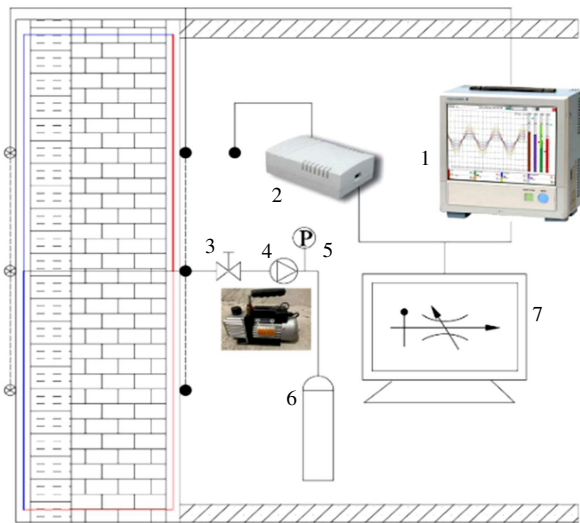
图 3 模拟系统

减少窗户带来的热影响,模拟的房间墙体不包含窗户,也没有内部收益(人、光或电气设备),仅包含渗透风量(0.2 h/次).

为了验证模型的可靠性,测试了实际条件下WIHP的动态传热过程,测试时间为 2019 年 12 月 25 日至 2020 年 3 月 15 日. 墙体尺寸为 3.2 m × 3.4 m,墙体的材料与厚度同表 1. 南墙的内、外抹灰层置入毛细管栅,面积为 1 000 mm × 800 mm,管内径和外径分别为 4.3 mm 和 2.7 mm,管间距为 42 mm,如图 4 所示. WIHP 内、外表面布置 PT100 温度传感器,并由 G10 无纸记录仪记录,温湿自记仪记录室内温度,最后通过计算机采集数据,测试仪器参数如表 3 所示.

表 3 测试仪器参数

仪器名称	型号	测量值	精确度
温度传感器	PT100	墙体表面温度	±0.1 °C
温湿自记仪	RR002	室内空气温度	±0.1 °C
无纸记录仪	GP10/20	温度	±0.01 °C



1—无纸记录仪;2—温湿自记仪;3—智能控制阀;4—真空泵;5—真空表;6—充液罐;7—计算机

图 4 测试系统

内表面温度的不确定度和相对不确定度如图 5 所示. 随着室外空气综合温度的变化,内表面温度不确定度和相对不确定度呈现先增长后减小的趋势. 但最大不确定度小于 0.15 °C, 最大相对不确定度小于 0.006, 因此实验数据的可信任度最低为 99.4%.

模拟与测试墙体相同设置的墙体,内表面温度变化直接反映 WIHP 的传热性能,因此比较了内表面温度的测试值与模拟值,如图 6 所示. 测试值与模拟值有很好的吻合度,相对误差均小于 1.5%.

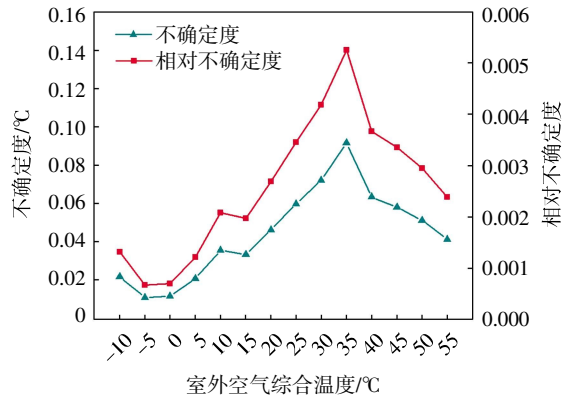


图 5 内表面温度的不确定度和相对不确定度

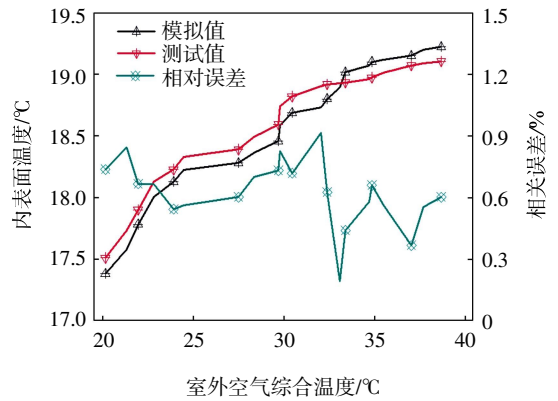


图 6 模拟值与测试值比较

3 结果与讨论

3.1 WIHP 工作条件

供暖季各朝向 WIHP 在一天内不同时刻累计工作时间与平均室外空气综合温度如图 7 所示.

南向 WIHP(SWIHP)的工作时间段在 8:00—17:00. 8:00 和 17:00 的累计工作时间非常少,共 4 h. 所以 SWIHP 的工作时间段主要为 9:00—16:00, 除 9:00 和 16:00 工作时间分别为 16 h 和 14 h 外, 每个时刻的累计工作时间高于 30 h. 12:00 的累计工作时间最多,为 73 h. SWIHP 供暖季累计工作时间为 388 h.

东向 WIHP(EWIHP)的工作间段为 7:00—17:00. 主要工作时段为 8:00—15:00, 每个时刻的累计工作时间在 5 h 以上. 累计工作时间最多在 10:00 为 21 h. EWIHP 在供暖季累计工作时间为 88 h.

西向 WIHP(WWIHP)的工作时间段在 9:00—17:00. 但 9:00—11:00 累积工作时间仅 4 h. 因此 WWIHP 工作时间集中在 12:00—17:00, 各时刻累计工作时间高于 8 h, 14:00 累计工作时间最多为 37 h. 整个供暖季 WWIHP 累计工作时间为 142 h.

供暖季期间 SWIHP 的累积工作时间远高于 WWIHP 和 EWIHP,分别为 WWIHP 和 EWIHP 的 2.7 倍和 4.4 倍。

室外空气综合温度即 WIHP 的工作温度,直接影响 WIHP 的传热性能. SWIHP 的平均室外空气综合温度在 8:00—12:00 逐渐增大,12:00 到达最大值(25.0 °C),随后在 12:00—17:00 逐渐降低。

EWIHP 的各时刻平均室外空气综合相差较小,在 8:00 最大为 22.1 °C,在 12 点最小为 19.1 °C,说明不同时刻 EWIHP 的传热性能变化较小。

WWIHP 的平均室外空气综合温度在 12:00—16:00 持续升高,16:00 达到最大值(25.5 °C),17:00 略有下降,表明 WIHP 在累计工作时间较长的期间有较好的传热性能。

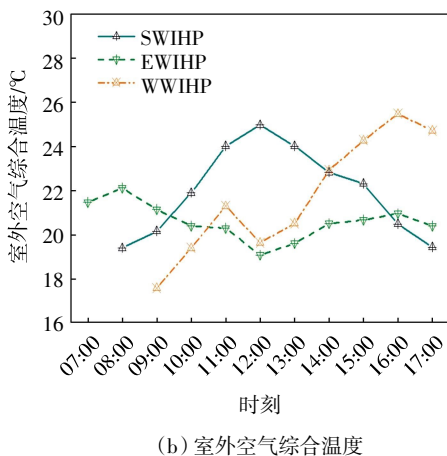
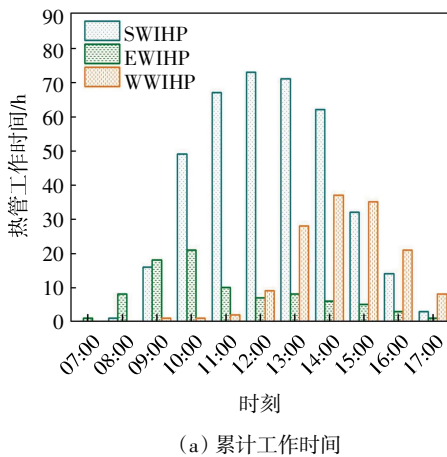


图7 WIHP 不同时刻工作时间和室外空气综合温度

3.2 传热性能分析

南向常规墙体(SCW)、SWIHP 及添加光吸热膜的 SWIHP(SPTWIHP)内表面温度和热流量如图 8 所示. 内表面热流量是内表面与室内环境的对流和辐射换热. 墙体热损失是指当室内温度高于室外温度时,通过墙体向外传递的热量. 由热平衡可知,内表面热

流量等于墙体热损失。

SWIHP 和 SPTWIHP 内表面热流量随天气变化较大且迅速,SPTWIHP 较 SWIHP 的幅值进一步加大. 这是因为 WIHP 对太阳辐射的依赖性较大,而南向的太阳辐射较为强烈且随时间变化较大.SWIHP 和 SPTWIHP 内表面热流量与常规墙体有显著区别,SWIHP 内表面热流量在供暖季开始和结束时较多时间小于 0,SPTWIHP 负值更低,表明 WIHP 向室内放热而不是从室内吸热。

SCW 热损失最大值为 9.4 W/m²,平均值为 6.3 W/m². SWIHP 热损失是 6.4 W/m²,而平均值为 2.6 W/m². 平均减少热损失 59%,表明 SWIHP 可以降低较多用于供暖系统的能量. 热管工作期间,SWIHP 平均热损失为 0.7 W/m²,降低了 89%。

SCW 内表面温度低于室内温度 1~2.5 °C. SWIHP 和 SPTWIHP 平均提高内表面温度分别为 0.5 °C 和 0.6 °C,且在开始和结束时 SWIHP 温度接近室温,SPTWIHP 高于室温 0.5~1.5 °C. 表明 SWIHP 和 SPTWIHP 可以提高内表面平均辐射温度及室内热舒适感。

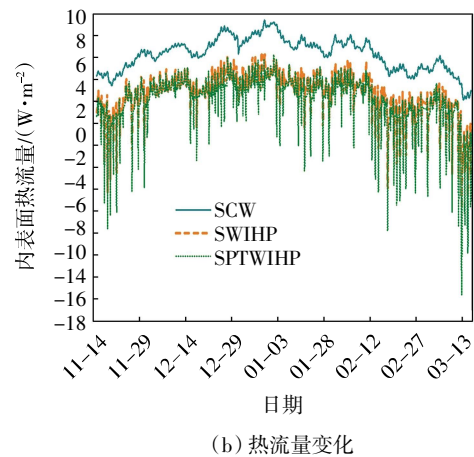
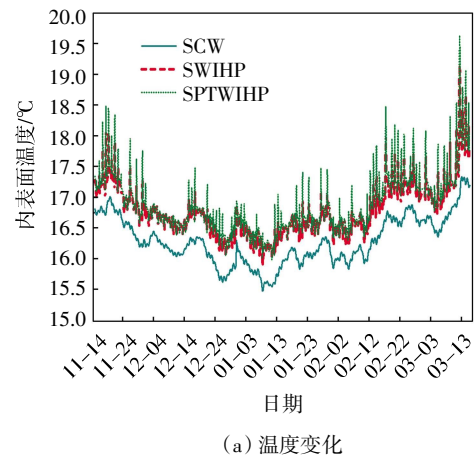


图8 南向墙体内表面温度和热流量变化

增加 SWIHP 传热面积(SRWIHP)和常规屋顶(RCW)

内表面温度及热流量变化如图 9 所示. RCW 内表面热流量曲线变化十分平缓且值较小, 因为屋顶的保温层厚度较大, 所以基础热损失较小. SRWIHP 内表面热流量在 0 上下波动, 且更多时间为负值, 表明 SRWIHP 基本没有热损失.

SRWIHP 平均提高内表面温度 0.8 °C, 除供暖开始和结束的时候, 高于室温 1~2.5 °C, 在供暖中期温度曲线变化较为平缓, 仅低于室温 0.5~1 °C 左右, 明显提高了温度的峰值. 这是因为, SRWIHP 受太阳辐射的限制较小, 当太阳辐射强度较低时, SRWIHP 仍然可以向内表面传递较多的热量.

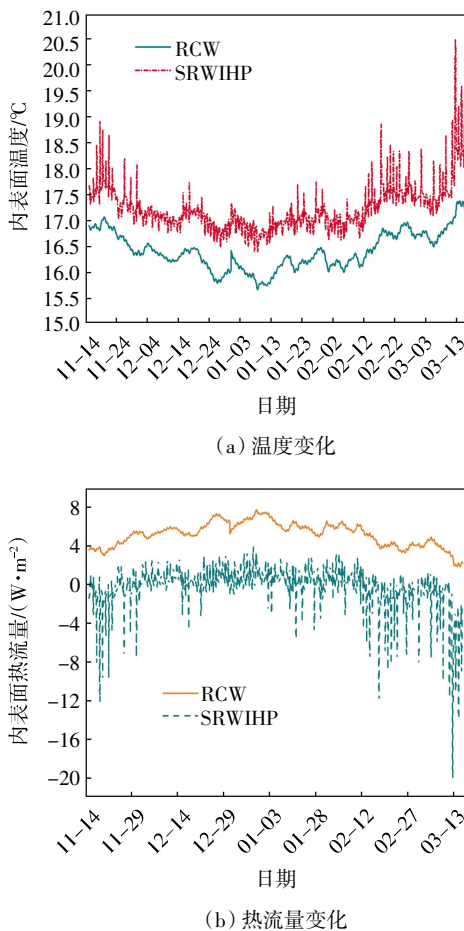


图 9 屋顶内表面温度和热流量变化

EWIHP 与东向常规墙体(ECW)内表面温度和热流量如图 10 所示. EWIHP 和 ECW 的温度变化趋势相似, EWIHP 仅在供暖结束时有较大峰值. EWIHP 内表面温度始终高于 ECW, 平均提高 0.37 °C.

ECW 内表面热流量随天气变化较大, 最大热损失为 9.7 W/m², 平均为 6.5 W/m². EWIHP 内表面热流量变化较为平缓, 仅在供暖结束时有明显下降. EWIHP 热损失最大为 6.1 W/m², 平均为 3.4 W/m², 表明 EWIHP 可以利用的太阳辐射较少.

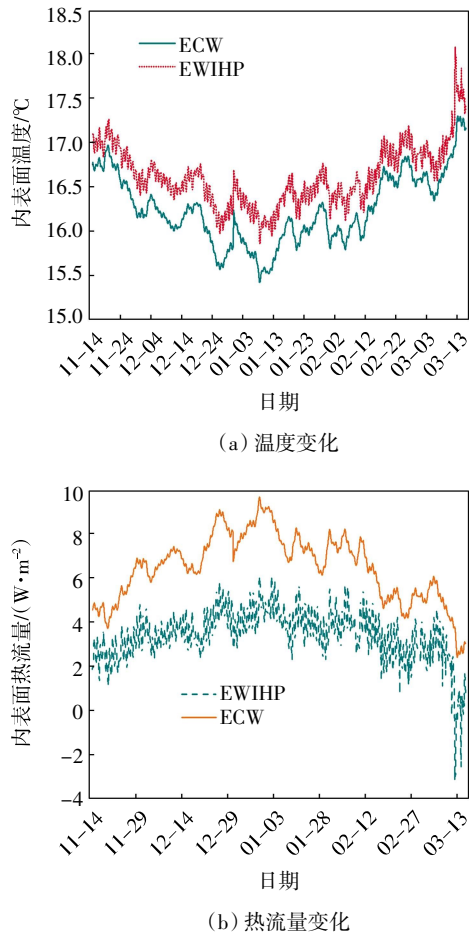


图 10 东向墙体内表面温度和热流量变化

WWIHP 与西向常规墙体(WCW)内表面温度和热流量如图 11 所示. WCW 与 ECW 内表面热流量变化基本一致且平均值相等, WWIHP 热损失平均为 3.2 W/m², WWIHP 与 EWIHP 内表面热流量仅在供暖开始和结束略有区别. 因为 WWIHP 较 EWIHP 的太阳辐射强度较大, 有较好的工作条件.

WWIHP 平均提高内表面温度 0.4 °C, 虽然与 EWIHP 相差很小, 但存在本质的区别. WWIHP 提高了内表面温度的峰值, 而 EWIHP 提升了内表面温度的平均值.

3.3 节能性分析

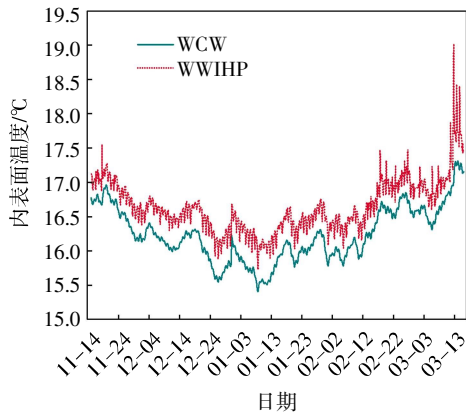
WIHP 较常规墙体降低的热损失量与常规墙体热损失的比值, 即为 WIHP 的节能率, 其表达式为

$$\varepsilon = \frac{Q_{con} - Q_{wihp}}{Q_{con}} \tag{10}$$

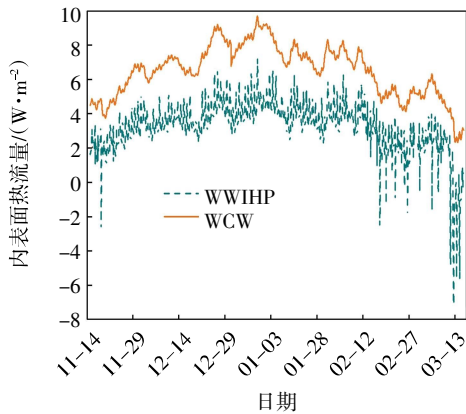
式中: Q_{con} 为常规墙体热损失, W/m²; Q_{wihp} 为 WIHP 墙体热损失, W/m².

不同 WIHP 供暖季的累积热负荷减少量及节能率见图 12. EWIHP 累积减少热损失为 8.95 kW·h/m², 节能率为 48%, 节能效果较差. WWIHP 累积减少热损失 9.66 kW·h/m², 节能率为 54%, 节能效果较好.

SWIHP 累积减少热损失 $10.65 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, 节能率为 63%, 节能效果显著. 而 SPTWIHP 和 SRWIHP 累积减少热损失分别为 $12.57 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 和 $16.07 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, 节能率分别为 75%, 116%, 较 SWIHP 提升率分别为 18% 和 51%. 表明 SPTWIHP 对太阳能的利用率进一步提升, 且 SRWIHP 不仅可以减少墙体热负荷, 还可以进行辅助供暖, 是一个净得热构件.



(a) 温度变化



(b) 热流量变化

图 11 西向墙体内部表面温度和热流量变化

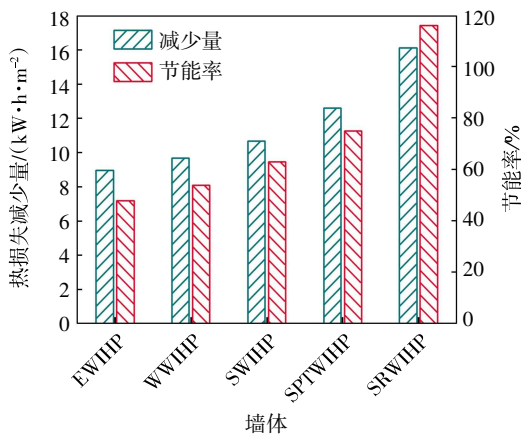


图 12 累积热损失减少量及节能率

不同 WIHP 单位面积平均热损失减少量随太阳

能辐射强度的变化如图 13 所示. 热损失减少量随太阳辐射强度的增加近线性增长, 单位面积减少热损失均高于 $3 \text{ W}/\text{m}^2$. 当太阳辐射强度小于 $800 \text{ W}/\text{m}^2$ 时, SRWIHP 减少的热损失高于 SPTWIHP, 尤其在太阳辐射强度低于 $400 \text{ W}/\text{m}^2$ 时更为显著. 而 SPTWIHP 在太阳辐射强度较大时对提升墙体的热工性能较好.

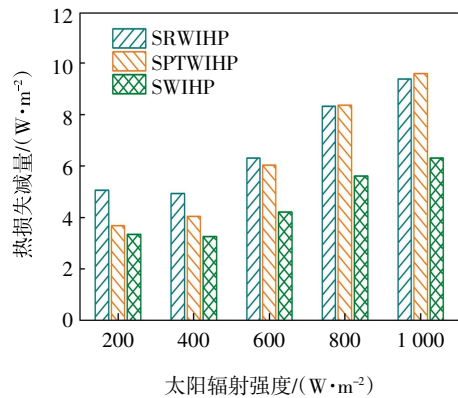


图 13 热负荷减少量随太阳辐射强度的变化

4 结论

对 WIHP 传热性能分析, 得出以下几个主要结论.

(1) SWIHP 有较长的工作时间, WWIHP 次之, EWIHP 最少. SWIHP 与 WWIHP 对内表面温度有较大的提高, 在供暖季中分别平均提高 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 而 EWIHP 对墙体温度提升效果较差.

(2) WIHP 内表面热流量均小于常规墙体, 且表现出与常规墙体不同的变化规律. WIHP 可以利用太阳辐射提高墙体内表面温度, 降低墙体热损失.

(3) 经优化的 WIHP 在某些地区供暖季可以成为净得热构建, 如增加 SWIHP 热管传热面积和提高 SWIHP 太阳能吸收率的节能率分别为 75% 和 116%. 建议根据不同地区的太阳辐射强度选择合适的 WIHP 优化方式, 以最大限度地发挥 WIHP 的优势.

参考文献:

[1] 江 亿. 中国建筑节能年度发展研究报告 2021[R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[2] SHEN C, LI X T. Energy saving potential of pipe-embedded building envelope utilizing low-temperature hot water in the heating season[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 318-31.

(下转第 71 页)