

文章编号:0254-0096(2019)09-2642-07

# 基于热管置入式墙体的室内热环境研究

张志刚, 于广全

(天津城建大学能源与安全工程学院, 天津 300384)

**摘要:** 以墙体传热实验数据为依据,利用数值模拟技术定量研究应用于南外墙的热管置入式墙体(WIHP)在供暖季对天津地区低能耗居住建筑室内热环境和热舒适的影响。结果表明:热管置入式墙体在其工作时能改善低能耗居住建筑的室内热环境和人体热舒适;相较于未安装热管置入式墙体的对比建筑,模拟建筑室内空气温度和平均辐射温度在热管工作时平均提高1.1℃,预测平均热感觉指标相较于对比建筑提高32.54%。

**关键词:** 被动式技术; 太阳能; 居住建筑; 室内热环境; 数值模拟; 热管置入式墙体

**中图分类号:** TU831

**文献标识码:** A

## 0 引言

创造舒适、健康的室内热环境是当代建筑设计的核心思想之一。影响室内热环境的因素包括室内外热作用、建筑围护结构、室内空气调节设备等<sup>[1]</sup>,其中建筑外墙的热工特性属于关键性因素之一。国内外学者针对建筑外墙的热工特性及其对室内热环境的影响做了大量研究工作。孙丹等<sup>[2]</sup>将相变材料(PCM)应用于保温墙体并进行实验测定和理论分析;邓安仲等<sup>[3]</sup>研究基于相变墙体的轻钢结构太阳房室内热环境问题;Laurent等<sup>[4]</sup>研究绿色生态墙对房间室内环境的影响;Pérez-Urrestarazu等<sup>[5]</sup>针对ALW(active living walls)墙体对室内热环境的改善效果进行研究与分析。

研究在特定条件下改变墙体传热特性以充分利用太阳能并改善室内热环境很有意义。张志刚等<sup>[6]</sup>已通过墙体传热实验证明热管置入式墙体(WIHP)在室外空气综合温度高于18.0℃时,能有效提高墙体的单向传热能力和室外太阳能利用率,进而降低建筑能耗。本文以墙体传热性能实验数据为基础,通过数值模拟,定量研究热管置入式墙体对低能耗居住建筑室内热环境的影响,并探讨热管置入式墙体与人体热舒适的内在联系。

## 1 低能耗居住建筑模型

### 1.1 建筑模型

本研究采用的建筑模型取自天津地区某二层独栋低能耗居住建筑,其建筑平面图如图1所示。建筑外形尺寸为16.5 m×6.9 m,建筑面积227.7 m<sup>2</sup>,建筑层高3.0 m。

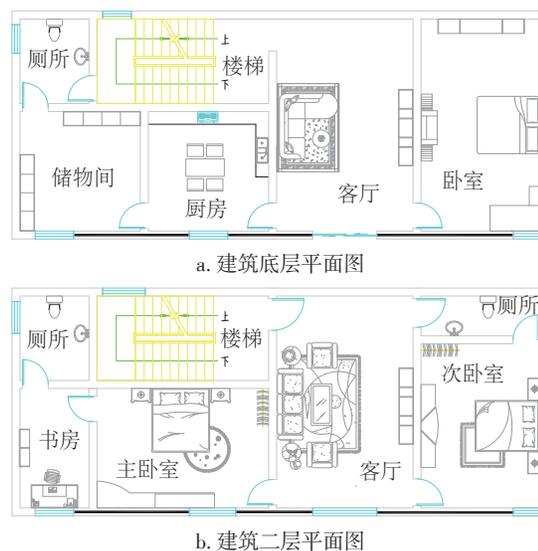


图1 建筑底层和二层平面图

Fig. 1 Building floor plan for first floor and second floor

图1中黑色粗线部位为热管置入式墙体覆盖

收稿日期: 2017-03-20

基金项目: 天津市自然科学基金(17JCYBJC21400)

通信作者: 张志刚(1961—), 男, 学士、教授, 主要从事建筑节能及可再生能源利用方面的研究。zhangzhigang609@163.com

区域,热管管栅总覆盖面积为  $63.0 \text{ m}^2$ (外表面蒸发段覆盖面积  $31.5 \text{ m}^2$ ,内表面冷凝段覆盖面积  $31.5 \text{ m}^2$ )。蒸发段和冷凝段管栅均由内、外径分别是  $2.7$  和  $4.2 \text{ mm}$  的毛细管均匀排列而构成,管栅内部相邻两根毛细管中心间距  $43.5 \text{ mm}$ ,外壁间距  $39.3 \text{ mm}$ 。所有功能性房间均安装夏季制冷系统和冬季供暖系统,夏季室内设计温度为  $26.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,冬季为  $18.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。建筑物采暖系统采用间歇运行的燃气壁挂炉,供水温度为  $75.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,供热效率  $0.85$ 。房间采用自然通风,通风量以人均最小新风量计。

## 1.2 围护结构的热工特性

建筑物围护结构如表 1 所示。模型建筑的内墙、外墙、楼板、屋面、外窗等围护结构符合天津地区低能耗居住建筑围护结构的一般做法,其节能性要

表 1 围护结构的构造方法及传热系数

Table 1 Structure and heat transfer coefficient of envelope structures

结构名称	构造方法	传热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
外墙	(由外及内)20 mm 抹面胶浆+双层网格布+50 mm EPS 聚苯保温板+250 mm 加气混凝土砌块+20 mm 抹面胶浆	0.329
内墙	20 mm 抹面胶浆+200 mm 加气混凝土砌块+20 mm 抹面胶浆	0.639
地面	(由下及上)80 mm 尿素甲醛泡沫+100 mm 模筑混凝土+80 mm EPS 聚苯保温板+8 mm 石灰岩地面	0.232
楼板	(由下及上)20 mm 抹面胶浆+200 mm 钢筋混凝土+20 mm 抹面胶浆+15 mm 硬实木	1.799
屋面	(由下及上)20 mm 抹面胶浆+100 mm 钢筋混凝土+80 mm EPS 聚苯保温板+20 mm 抹面胶浆	0.391
外窗	双层 Low-E 玻璃,中间充氩气, Dbl LoE(e2=0.4)Clr 3 mm/13 mm Arg	2.061
窗框	铝合金窗框,玻璃面积占窗面积的 80%	4.719

注:Dbl LoE 表示双层低发射率玻璃;Clr 表示洁净无色;Arg 表示内充氩气。

求按照《天津市居住建筑节能设计标准》(DB29-1—2013)执行,冬季单位面积热负荷小于  $50 \text{ W/m}^2$ 。

## 2 建筑传热模型

为方便分析,对模型建筑的传热模型作如下简化:

1)室内气体做 Boussinesq 假设,即认为流体的密度和压强是温度的函数,流体处于低速流动状态时,压强变化不大,密度的变化是由温度的变化引起的,可忽略压强变化对于密度的影响,只考虑温度的影响;

2)房间气体流动处于稳定的紊流状态,雷诺数的变化忽略不计;

3)空气在房间内壁面上无滑移,并将空气视作非吸收性透热介质,不影响房间辐射换热;

4)房间内部各表面均为漫射灰表面;

5)室内空气流动状态为三维、定常、不可压缩的紊流气体流动;

6)房间内部无大型设备,发热量很小,忽略房间内部得热量;

7)忽略围护结构内部的渗透影响;

故模型建筑的传热数学模型由 4 个热平衡方程组成,由室外至室内分别是外墙外表面热平衡方程、墙体导热方程、外墙内表面热平衡方程和室内空气热平衡方程。

### 2.1 外墙外表面热平衡

建筑物外表面热平衡方程为:

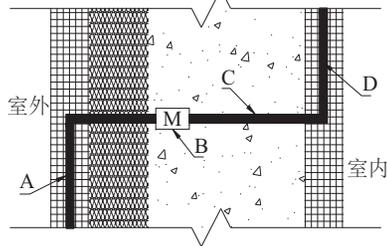
$$q_1 + q_2 + q_3 - q_4 = 0 \quad (1)$$

式中,  $q_1$  ——外表面吸收的太阳直射和散射热量,  $\text{W/m}^2$ ;  $q_2$  ——室外环境传入外表面的长波辐射热量,  $\text{W/m}^2$ ;  $q_3$  ——墙体与室外空气的对流换热量,  $\text{W/m}^2$ ;  $q_4$  ——外表面向墙体内部的导热热量,  $\text{W/m}^2$ ; +、- ——墙体外表面的热量吸收和热量释放过程。

### 2.2 墙体导热

模型建筑南外墙采用热管置入式墙体,其结构如图 2 所示。张志刚等<sup>[6]</sup>通过墙体传热性能实验发现:充液率为 28.1% 的热管置入式墙体等效传热系数变化范围为  $0.760 \sim 0.987 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,平均值为

0.901 W/(m<sup>2</sup>·K),且墙体内表面温度比未安装热管的普通墙体平均提高 1.3 ℃。



A. 蒸发段 B. 控制阀 C. 绝热段 D. 冷凝段

图2 热管置入式墙体结构示意图

Fig. 2 Structure of WIHP

为避免在炎热的夏季出现室外热量通过热管置入式墙体传入室内的不利情况,在热管绝热段安装带手动关断功能的智能控制阀,如图 2 中序号 B 所示。在冬季,当室外空气综合温度高于 18.0 ℃ 时,智能控制阀自动开启,热管置入式墙体开始工作;在夏季或其他不利条件下,则手动关闭阀门,热管置入式墙体停止工作。

### 2.3 外墙内表面热平衡方程

基于建筑物理模型及其简化处理,外墙内表面热平衡方程变为:

$$q_5 + q_6 + q_7 + q_8 = 0 \quad (2)$$

式中,  $q_5$  —— 房间内部各表面对外墙内表面的净长波辐射热流, W/m<sup>2</sup>;  $q_6$  —— 来自墙体外表面的导热, W/m<sup>2</sup>;  $q_7$  —— 被各表面吸收的太阳辐射热流, W/m<sup>2</sup>;  $q_8$  —— 内表面与房间空气的对流换热热流, W/m<sup>2</sup>。

### 2.4 室内空气热平衡

忽略围护结构渗透、内部通风以及空气比热容对传热过程的影响,室内空气温度热平衡方程可简化为:

$$q_8 + q_9 + q_{10} = 0 \quad (3)$$

式中,  $q_8$  —— 各表面之间的对流换热热流, W/m<sup>2</sup>;  $q_9$  —— 室内负荷的对流换热, W/m<sup>2</sup>;  $q_{10}$  —— 空调系统的热交换热流, W/m<sup>2</sup>。

## 3 数值模拟

数值模拟设定的初始条件尽量贴近模型建筑的实际情况,包括围护结构各表面的热量传递和室

内热辐射等过程。房间辐射状况采用表面辐射模型,并通过角系数分析房间的辐射换热量。

为方便模拟模型建筑内部的预测平均热感觉指标,通过调查天津地区供暖热用户在室内的实际着装及运动情况后,设定室内人体模型的各项参数,即人体呈静坐、放松状态,身着毛衣长裤等保暖衣物,着衣指数  $clo = 0.95$ 。

划分网格时,单个网格的最大边长定为 0.05 m,共计 4878780 个,长宽比接近于 1,网格条件符合模拟要求。数值模拟的湍流方程采用  $k-\varepsilon$  两方程模型,即纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)粘性流动方程<sup>[7]</sup>,并忽略质量扩散的影响。在模拟软件中,选择有限差分法(1-Upwind)作为微分方程的离散手段,并设定迭代计算收敛的最小均方根残差为  $10^{-6}$ 。为节省模拟时间和难度,最大迭代次数设定为 5000 次。根据研究目的和模型建筑的客观条件,边界条件设定如表 2。

表2 数值模拟边界条件

Table 2 Boundary defaults

项目	条件
内墙的内表面温度/℃	16.0
外墙的内表面温度/℃	16.0
外窗玻璃的内表面温度/℃	12.0
建筑物内部平均空气温度/℃	18.0
边界条件类型	第 1 类

## 4 结果与讨论

应用热管置入式墙体的建筑物定义为模拟建筑,未采用热管置入式墙体的建筑物定义为对比建筑。本文通过控制变量的方法,设定 2 种建筑的燃气壁挂炉水温和流量始终相同,使 2 个建筑的变量仅有南向墙体传热系数。通过对数值模拟的结果进行分析,发现热管置入式墙体利用其在特定条件下的高效导热能力,能将更多的太阳辐射热量传热室内,改善室内热环境及热舒适性。

### 4.1 室外空气综合温度

外墙外表面温度(室外空气综合温度)是影响热管置入式墙体工作性能的主要因素之一。室外空气综合温度是指室外空气温度在原来的数值基础上增加一个代表太阳辐射的等效温度值<sup>[8]</sup>,代表

建筑墙体吸收、利用太阳能的可能性,表达式为:

$$t_z = t_a + \frac{\rho I}{\alpha_{out}} - \frac{Q_{lw}}{\alpha_{out}} \quad (4)$$

式中,  $t_z$ ——室外空气综合温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_a$ ——室外空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho$ ——外表面直射辐射吸收率;  $I$ ——室外太阳辐射强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\alpha_{out}$ ——墙体外表面对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $Q_{lw}$ ——围护结构与室外环境的长波辐射换热量,  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

根据天津地区典型年气象资料<sup>[9]</sup>, 室外空气温度  $t_a$  取逐时室外干球温度, 且  $I$  取天津地区供暖季南向太阳辐射强度为计算依据。模型建筑南外墙涂有深色外墙涂料, 其对太阳直射辐射的吸收率  $\rho = 0.8$ , 冬季外表面对流换热系数  $\alpha_{out} = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 并忽略墙体与室外环境之间的长波辐射换热量, 即  $Q_{lw} = 0$ 。天津地区的供暖季为 11 月 15 日~次年 3 月 15 日, 共 121 d, 2904 h, 将其转变为 0~2904, 步长为 1 的区间, 由此得到整个采暖季两建筑南外墙室外空气综合温度  $t_z$  逐时变化曲线如图 3 所示。

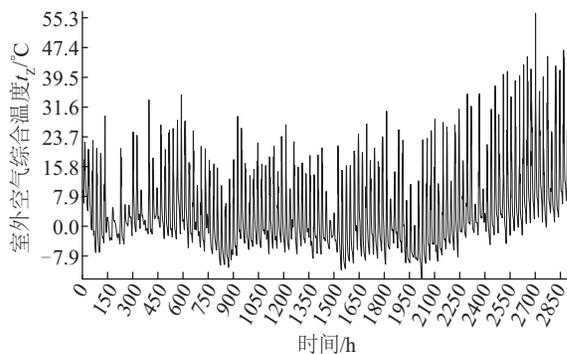


图3 采暖季南外墙室外空气综合温度逐时变化规律

Fig. 3 Outside surface temperature of south external wall during heating season

在整个供暖季, 室外空气综合温度最小值为  $-13.9^{\circ}\text{C}$ , 出现在 2 月 7 日 08:00, 此时室外空气干球温度为  $-13.9^{\circ}\text{C}$ , 南向太阳辐射强度为  $0 \text{ W}/\text{m}^2$ ; 最大值为  $56.5^{\circ}\text{C}$ , 出现在 3 月 7 日 14:00, 此时室外空气干球温度为  $18.1^{\circ}\text{C}$ , 南向太阳辐射强度为  $960 \text{ W}/\text{m}^2$ , 在温度的数值上提高  $38.4^{\circ}\text{C}$ 。室外空气综合温度是控制热管置入式墙体工作的“开关”, 即当室外空气综合温度高于  $18.0^{\circ}\text{C}$  时, 热管置入式墙体开始工作, 且室外空气综合温度越高, 建筑可利用的太阳能越多, 热管置入式墙体的工作效果越

明显。

在我国北方地区建筑的外墙往往会铺设保温材料以减少内部热量损耗。从图 3 可看出, 供暖季外墙外表面温度在某些时刻高于室内供热温度  $18.0^{\circ}\text{C}$ , 此时外墙恒定不变的低传热系数反而会“妨碍”建筑利用这部分太阳辐射热量。热管置入式墙体利用重力热管强大的单向导热能力, 突破传统“热阻”的限制, 提高建筑对太阳能的利用率, 进而降低建筑能耗。此外, 热管置入式墙体的传热量不仅与室内外温差有关, 还与传热面积有关。在允许的条件下, 增大热管蒸发段在建筑外墙的覆盖面积大大有利于发挥热管置入式墙体的节能效果以及对室内热环境的改善作用。

按典型年气象资料统计分析, 天津地区室外空气综合温度高于  $18.0^{\circ}\text{C}$  的时间为 256 h, 即热管置入式墙体的“工作小时”为 256 h, 占整个采暖季日照时间的 21.6%。其中, 采暖季后 2 个月(1 月 15 日~3 月 15 日)共有 187 个“工作小时”, 占热管置入式墙体总工作时间的 73.1%。热管置入式墙体在供暖季的后半段具有更加理想的工作条件。

#### 4.2 热管置入式墙体对平均室内空气温度的影响

应用热管置入式墙体的模拟建筑逐时平均室内空气温度在采暖季变化曲线如图 4 所示。模拟建筑平均室内空气温度的最高值为  $21.6^{\circ}\text{C}$ , 出现在 3 月 14 日 16:00 和 17:00; 最低值为  $16.5^{\circ}\text{C}$ , 出现在 2 月 7 日 07:00。在采暖季大部分的时间, 热管置入式墙体的热管处于“休眠状态”, 不工作。模拟建筑与对比建筑的平均室内空气温度也趋于一致。当室外空气综合温度高于  $18.0^{\circ}\text{C}$  时, 智能控制阀开启, 热管工作, 将室外太阳辐射热量室内。模拟结果显示, 应用热管置入式墙体的模拟建筑平均室内空气温度为  $18.5^{\circ}\text{C}$ , 相较于对比建筑平均提高  $0.2^{\circ}\text{C}$ , 证明热管置入式墙体能提高外墙内表面温度和平均内部空气温度, 改善室内热环境。

室外空气综合温度是决定热管工作性能的关键性因素。模拟建筑平均室内空气温度最高值出现的时刻, 环境温度为  $18.1^{\circ}\text{C}$ , 太阳辐射强度为  $525 \text{ W}/\text{m}^2$ , 室外空气综合温度达到  $39.1^{\circ}\text{C}$ , 大量太阳辐射热量被建筑通过热管置入式墙体加以利用。

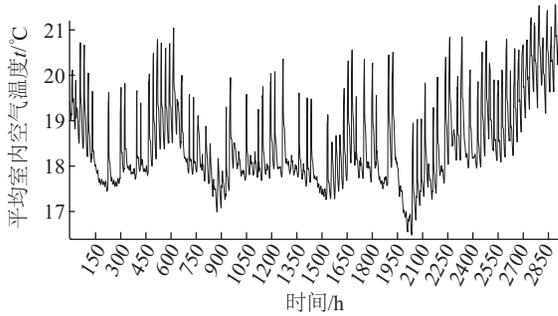


图4 模拟建筑平均室内空气温度变化规律

Fig. 4 Mean indoor air temperature of case building

在热管工作的 256 h 内,模拟建筑与对比建筑的室内空气温度的变化趋势大体相同,如图 5 所示。这是因为 2 个建筑的室内空气温度主要受建筑物内部供热系统的影响,而不是室外环境。但供暖系统对建筑物室内空气温度的调节能力不会“抵消”热管置入式墙体的工作效果。在室外空气综合温度高于 18.0 °C 的 256 h 内,模拟建筑平均室内气温较对比建筑高出 1.1 °C,有利的工作条件帮助热管置入式墙体将更多的太阳能传入室内,提高建筑太阳能利用率,改善室内热环境。

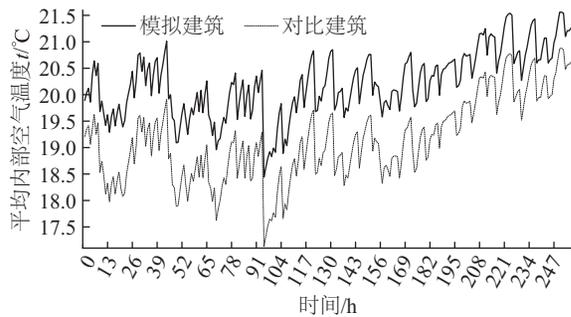


图5 热管工作时间内室内空气温度逐时变化规律

Fig. 5 Mean indoor air temperature during WIHP working time

选取太阳辐射强度高和热管置入式墙体工作条件较为理想的 3 月 6 日为典型日,研究热管置入式墙体对平均室内空气温度的影响规律,如图 6 所示。从凌晨开始到 07:00,热管置入式墙体处于“休眠状态”,2 个建筑的平均室内空气温度基本相同。从 08:00 开始,室外空气综合温度开始逐渐高于 18.0 °C,热管置入式墙体开始工作,使模拟建筑平均室内气温高于对比建筑,增长趋势一直持续到 19:00,平均提高 1.0 °C。08:00~12:00,随着室外空气综合温度的升高,两建筑的温差保持增大趋势直到

14:00。从 14:00 开始,2 个建筑的平均室内空气温度均大致保持稳定,且两者的温差也基本保持不变或者有缩小的趋势,则是由于室外空气综合温度到达峰值进而开始下降的原因。

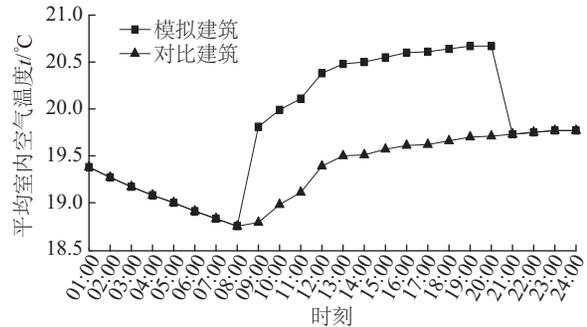


图6 3月6日平均室内空气温度逐时变化规律

Fig. 6 Mean indoor air temperature on March 6

### 4.3 热管置入式墙体对平均辐射温度的影响

平均辐射温度(mean radiation temperature)代表建筑内各表面对人体热辐射作用的强弱<sup>[10]</sup>,是室内热环境重要组成部分之一。整个采暖季室内平均辐射温度的模拟结果显示,模拟建筑与对比建筑的平均辐射温度在大多数时刻并无差异。如图 7 所示,在热管置入式墙体工作的 256 h 内,有热管的模拟建筑内部平均辐射温度的平均值为 20.2 °C,无热管的对比建筑为 19.1 °C,相对提高 1.1 °C。平均辐射温度的提高有助于提高人体的体感温度,使人体感觉更暖和、舒适。热管置入式墙体属于新型被动式太阳能利用技术,在特定条件下提高墙体的传热性能,使更多的外部太阳辐射热量进入室内,提高墙体内部表面温度,进而提高室内空气温度和平均辐射温度,改善室内热环境。

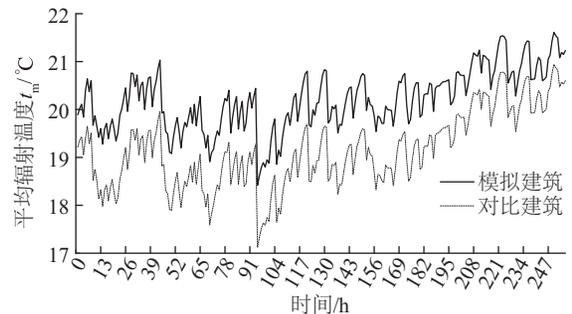


图7 热管工作时间内平均辐射温度逐时变化规律

Fig. 7 Mean radiation temperature in building during

WIHP working time

#### 4.4 热管置入式墙体对预测平均热感觉指标的影响

预测平均热感觉指数  $PMV$  是表征人体热舒适状况的参数<sup>[11]</sup>。图 8 是采暖季热管置入式墙体的工作时间内 2 个建筑内部的  $PMV$  逐时变化规律。模拟数据表明,当热管置入式墙体工作时,对比建筑内部平均  $PMV = -1.26$ ,模拟建筑内部平均  $PMV = -0.85$ ,相对提高 32.54%。结合 4.2 节和 4.3 节的研究结果可知,热管置入式墙体对模拟建筑平均室内空气温度和平均辐射温度具有提升效果(均提高  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),从人体热舒适的角度来看,模拟建筑内部  $PMV$  值提高 32.54%,热管置入式墙体明显有助于提升和改善建筑内部环境的热舒适性和人体热感觉。

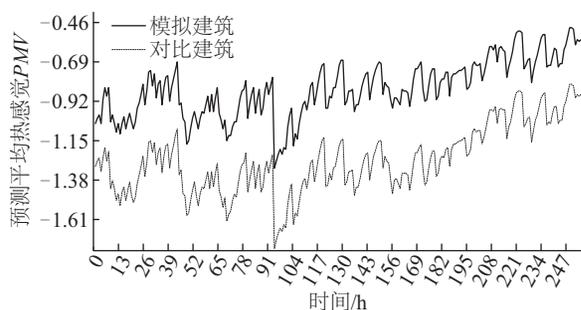


图8 热管工作时间内建筑物  $PMV$  逐时变化规律

Fig. 8  $PMV$  in building during WIHP working time

#### 4.5 热管置入式墙体的经济性与节能性分析

相较于常规墙体,热管置入式墙体单位面积所增加的费用为  $113\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}^2$ 。考虑到墙体传热实验所需的材料较少,若热管置入式墙体大规模应用在实际工程中,造价仍会减少约 50%。张志刚等<sup>[6]</sup>已针对热管置入式墙体墙体的节能潜力进行系统研究,并发现在天津地区典型年冬季工况下,热管置入式墙体累计传入室内的热量可达  $8889.62\text{ kJ}/\text{m}^2$ ,外墙热损失降低 8.72%,即墙体本身的节能率为 8.72%。热管置入式墙体的应用能增加建筑成本,但综合考虑其对低能耗居住建筑室内热环境的改善效果及其节能潜力,可认为热管置入式墙体仍具有一定的推广和应用价值。

## 5 结论

在热管置入式墙体传热性能实验研究的基础上,通过构建天津地区低能耗居住建筑模型和传热

模型,利用数值模拟技术,定量研究热管置入式墙体在供热季对室内热环境和热舒适的影响,得到以下主要结论:

1)热管置入式墙体在天津地区供暖季具有较为理想的工作条件,总工作时间为 256 h,占整个供暖季日照时间的 21.6%。

2)热管置入式墙体在工作时能改善低能耗居住建筑的室内热环境。相较未安装热管的对比建筑,应用热管置入式墙体的模拟建筑平均室内空气温度和平均辐射温度均提高  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3)热管置入式墙体在工作时能提高居住建筑的热舒适性。应用热管置入式墙体之后,模拟建筑的预测平均热感觉指标平均提高 32.54%。

4)通过优化热管置入式墙体的工质、充液率、结构等参数,墙体节能率还具有较大的提升空间。将其应用于室外环境条件更为理想的过渡季节,有助于更好地发挥热管置入式墙体对室内热环境和热舒适的改善作用。

#### [参考文献]

- [1] 徐小林,李百战. 室内热环境对人体热舒适的影响[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2005, 28(4): 102—105.
- [1] Xu Xiaolin, Li Baizhan. Influence of indoor thermal environment on thermal comfort of human body[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(4): 102—105.
- [2] Sun Dan, Wang Lijiu. Research on heat transfer performance of passive solar collector-storage wall system with phase change materials[J]. Energy and Buildings, 2016, 119: 183—188.
- [3] 邓安仲,庄春龙,李胜波,等. 相变墙体应用于轻钢结构太阳房的研究[J]. 太阳能学报, 2011, 31(2): 160—164.
- [3] Deng Anzhong, Zhuang Chunlong, Li Shengbo, et al. Study on applying PCM wall to the light weight envelope solar energy[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 31(2): 160—164.
- [4] Laurent M, Marjorie M, Christian I. Direct and indirect impacts of vegetation on building comfort, a comparative study of lawns, green walls and green roofs[J]. Energies, 2016, 9(1): 32.
- [5] Pérez-Urrestarazu L, Fernández-Cañero R, Franco A, et al. Influence of an active living wall on indoor

- temperature and humidity conditions[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 120—124.
- [6] 张志刚, 孙志坚. 热管置入式墙体实验研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(3): 684—689.
- [6] Zhang Zhigang, Sun Zhijian. Experimental investigation on the wall implanted with heat pipes[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(3): 684—689.
- [7] 安德森约翰D.(美), 吴颂平, 刘赵森(译). 计算流体力学基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 51—53.
- [7] Anderson J D, Translation by Wu Songping, Liu Zhaosen. *Computational fluid dynamics—The basics with applications*[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 51—53.
- [8] 朱颖心, 张寅平, 李先庭, 等. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 49—50.
- [8] Zhu Yingxin, Zhang Yinping, Li Xianting, et al. *Built environment*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 49—50.
- [9] 中国气象局气象中心资料室, 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.
- [9] Meteorological Center of China Meteorological Administration, Department of Building Technology and Science School of Architecture Tsinghua University. *Meteorological data set for analysis of thermal environment in China*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [10] Owen M S, Kennedy H E, Thysell N F, et al. *ASHRAE handbook fundamentals*[M]. Atlanta GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009.
- [11] Fanger P O. *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*[M]. New York: McGraw Hill, 1970.

## STUDY OF INDOOR THERMAL ENVIRONMENT USING WALL IMPLANTED WITH HEAT PIPES

Zhang Zhigang, Yu Guangquan

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

**Abstract:** As a new technology of solar energy, the wall implanted with heat pipes (WIHP) is well suited to improve indoor thermal environment during heating season in north China. Based on data of wall heat-transfer experiment, the influence of WIHP installed on south wall on indoor thermal environment and thermal comfort is studied using numerical simulation. The results of research indicate that WIHP can improve indoor thermal environment and comfort of a low-energy resident building during working hours. Compared with traditional building, the indoor air temperature and mean radiant temperature of case building with heat pipes can be both increased by an average of 1.1 °C, and predicted mean vote value is improved by 32.54% during working hours of WIHP.

**Keywords:** passive technique; solar energy; residential building; indoor thermal environment; numerical simulation; WIHP