

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.020



# 光热建筑一体化 Trombe 墙体系统传热性能

龙激波<sup>1</sup>, 阿勇嘎<sup>1</sup>, 王泉<sup>1</sup>, 王平<sup>1,2</sup>

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭, 411105;

2. 湖南大学 土木工程学院, 长沙, 410000)

**摘要:**为了改善建筑围护结构的保温隔热性能和利用太阳能,提出了一种光热建筑一体化 Trombe 墙体系统,建立了实验墙体和模拟计算模型,并对墙体系统的热传递性能进行了实验测试和模拟分析。研究表明:实验工况下集热板、主墙层外侧和内侧最高温度测量值分别为 91.3、57.9、23.4 °C,模拟值为 88.4、58.3、17.2 °C,墙体系统在冬季具有较好的保温性能;太阳辐射作用下,墙体系统的各材料层均产生竖向温度差,实验工况下竖向温度差为集热板 17.9 °C、主墙层外侧 31.7 °C、主墙层内侧 2.2 °C,模拟值为集热板 17.2 °C、主墙层外侧 21.9 °C、主墙层内侧 1.2 °C;墙体系统各材料表面的竖向温度差随太阳辐射照度增加而增大,随空气夹层厚度增大而减小。

**关键词:**光热利用; Trombe 墙体; 一体化; 温度差; 传热量

**中图分类号:**TK519 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)01-0141-08

## Heat transfer performance of a photo-thermal Trombe wall system integrated with building

Long Jibo<sup>1</sup>, A Yongga<sup>1</sup>, Wang Quan<sup>1</sup>, Wang Ping<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410000, P. R. China)

**Abstract:** In order to improve thermal insulation property of building envelope and make the most of solar energy, a photo-thermal Trombe wall system integrated with building was presented. Experimental wall and simulation model were established, thus heat transfer performance of the wall system was tested by experiment and analyzed by simulation. It is found that the thermal insulation property of Trombe wall performs well in winter. The measured maximum temperatures of the collector, the outside and the inside of the main layer are 91.3 °C, 57.9 °C and 23.4 °C, while the simulated figures are 88.4 °C, 58.3 °C and 17.2 °C respectively. Influenced by solar radiation, there exist vertical temperature differences on every material layers of the wall system. The measured vertical temperature differences of the collector, the outside and the inside of the main layer are 17.9 °C, 31.7 °C and 2.2 °C, while the simulated figures are 17.2 °C, 21.9 °C and 1.2 °C respectively. The vertical temperature difference of each material layer of the wall system increases with the increase of solar radiation and decreases with the increase of air interlayer

收稿日期:2017-05-04

基金项目:湖南省科技计划(2015GK3026)

作者简介:龙激波(1971-),男,副教授,博士,主要从事建筑节能研究,E-mail:longjibo2010@126.com。

Received:2017-05-04

Foundation item: Science and Technology Plan Project of Hunan Province (No. 2015GK3026)

Author brief: Long Jibo (1971-), associate professor, PhD, main research interest: building efficiency, E-mail: longjibo2010@126.com.

thickness.

**Keywords:** photo-thermal utilization; Trombe wall; integration; temperature difference; heat transfer quantity

光热建筑一体化技术是解决建筑能耗不断增长的有效途径,也是太阳能利用最成熟的技术<sup>[1]</sup>。光热利用效率和围护结构保温隔热性能是光热建筑一体化技术的两个重要热工性能指标。近年来,研究人员对集热效率的研究,可分为集热器性能研究和光热建筑一体化形式研究。集热器性能研究包括集热器材料开发与应用<sup>[2-4]</sup>、集热器的结构形式设计<sup>[5-7]</sup>、集热器的集热方式设计<sup>[8]</sup>、集热器的热能输送介质选择<sup>[9-10]</sup>等。光热建筑一体化研究,Akbarzadeh等<sup>[11]</sup>对 Trombe 墙体热循环特性进行测试,Zalewski等<sup>[12]</sup>提出的改进的复合 Trombe 墙体系统,推动了光热建筑一体化技术的发展。在此基础上,易桦<sup>[13]</sup>设计了光伏与光热结合的 PV-Trombe 墙系统,从功能上提出了太阳能建筑一体化的新形式,Gilles等<sup>[14]</sup>提出了太阳能集热器与屋顶雨水槽一体化设计,从美观上促进了光热建筑一体化技术发展。在建筑热能利用方面,光热技术主要是用来生产热水、采暖、制冷、通风。季杰等<sup>[15]</sup>研究了光伏热水与 PV-Trombe 墙组合技术的太阳能利用效率,刘斌等<sup>[16]</sup>研究了太阳能混合墙体的通风效果。张叶等<sup>[17]</sup>研究了太阳能相变蓄热地板辐射供暖的太阳能利用率,张志顺等<sup>[18]</sup>分析了相变材料对建筑围护结构蓄热能力改善和节能潜力。李金平等<sup>[19]</sup>针对西北农村建筑研究了太阳能主动供暖系统的节能效率,徐鹏等<sup>[20]</sup>研究了光伏-热泵复合主动供能系统的太阳能综合利用效率。

太阳能利用效率是光热建筑一体化技术重要热工性能,也是近年来研究的主要内容<sup>[21]</sup>。光热建筑一体化技术的高效应用,不仅要考虑太阳能利用效率,一体化墙体的保温隔热性能是另一项需要设计的重要热工性能。尤其在中国夏热冬冷地区,建筑外墙不仅需要冬季保温和夏季隔热要求,而且,还要求过渡季节部分时间加强散热的要求,这方面的研究仍然较少<sup>[22-23]</sup>。笔者设计了一种兼顾太阳能利用与保温隔热性能的光热一体化墙体系统,并对墙体系统的传热性能进行了模拟研究。

## 1 墙体系统结构

光热一体化 Trombe 墙体系统如图 1 所示。一体化墙体系统主要由玻璃幕墙、太阳能集热板、热辐

射反射层、主墙层等构成,在玻璃幕墙与热辐射反射层间设有空气夹层,太阳能集热板安装于空气夹层内。太阳能集热板吸收太阳辐射制备生活热水,同时防止太阳能直接辐射给主墙层;主墙层外侧表面贴热辐射反射层,反射因太阳能集热板温度升高而对主墙层产生的辐射热。



图 1 实验用墙体系统

Fig. 1 Experimental wall system

实验地点为湘潭大学土木工程与力学学院大楼楼顶,实验房南北朝向,结构尺寸为  $2\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 2.3\text{ m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),内部空间尺寸为  $1.8\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 2.1\text{ m}$ ,墙体空气夹层厚  $0.5\text{ m}$ 。实验用光热一体化墙体为南向墙。

## 2 墙体系统传热实验

### 2.1 实验测试方法

实验房主墙层采用  $80\text{ mm}$  厚的聚氨酯夹芯板。实验测试采用 TBQ-2 太阳总辐射表测量实验地点水平面太阳辐射照度,PT100 贴片式热电阻测量墙体系统各材料层表面温度、室内、室外空气温度、墙体夹层空气温度,贴片式热电阻布置如图 2 和图 3 所示。测试时玻璃幕墙上下通风口关闭,各热电阻测量数据采用 XSR-70A 巡检仪记录。所研究墙体系统在太阳辐射作用下,集热板温度变化较大,且集热板空载工况温度高于制热水工况,为研究集热板高温工况下墙体系统的传热性能,对墙体系统进行空载工况实验测试。

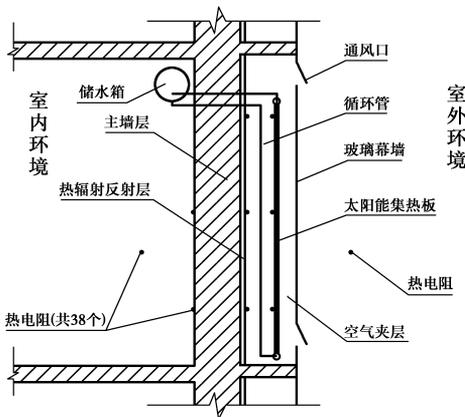


图 2 墙体系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the wall system

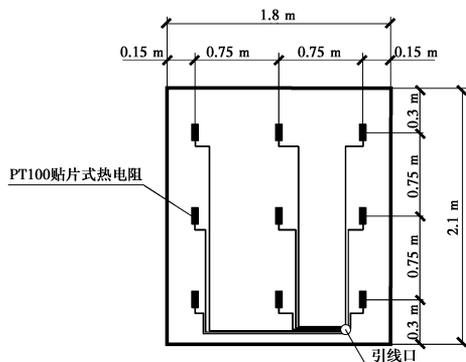


图 3 各材料层热电阻布点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of thermal resistances on each material layer

### 2.2 实验结果与分析

选择太阳能集热板无水空载工况(2016-12-05, 晴)的测试数据进行分析,墙体系统各材料层平均温度如图 4 所示。测试日实验房室外空气 15:20 温度最高,20.9 °C、07:10 温度最低,7.1 °C。各材料层中,集热板温度变化幅度最大,空载时 07:10 温度最低,7.0 °C,13:40 温度最高,91.3 °C,温度波动幅度为 84.3 °C,相应的太阳辐射照度为 670 W/m<sup>2</sup>,此时,主墙层内、外侧逐时温差达到最大值,41.7 °C;热辐射反射层温度与主墙层外侧温度变化规律比较接近,在 13:40 温度均达到最高值,其值分别为 60.0 °C 和 57.9 °C,温度变化幅度分别为 52.9 °C 和 50.8 °C。主墙层内侧和室内空气温度变化规律比较接近,两者的温度在 16:40 达到最高,分别为 23.4 °C 和 22.9 °C,温度变化幅度分别为 13.4 °C 和 12.9 °C。

从实验数据还可以看出,墙体系统各材料层在同一高度的 3 个测点温度接近,但沿垂直方向的温度梯度较大。各材料层在空载工况下的竖向温度变

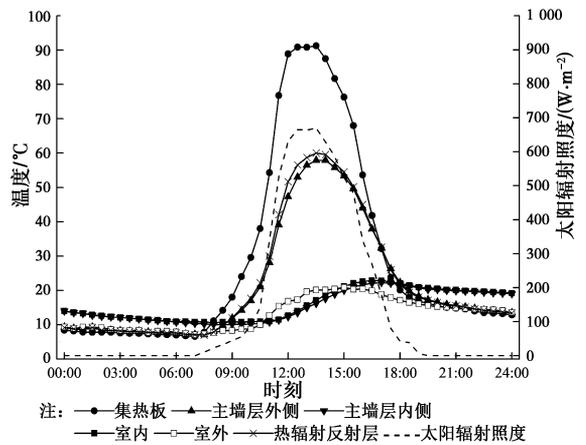


图 4 空载工况墙体系统各材料层温度

Fig. 4 The temperature of each material layer of the wall system on no-load condition

化如图 5 所示。主墙层外侧上下测点温差与辐射反射层上下测点温差变化规律接近,在 12:20 两者的上下测点温差均达到最大,分别为 31.7 °C 和 32 °C,相应的太阳辐射照度为 665.6 W/m<sup>2</sup>。集热板上下测点温差在 14:20 达到最大值 17.9 °C,相应的太阳辐射照度为 670 W/m<sup>2</sup>。主墙层内侧由于受室内空气的影响,其上下测点温差变化幅度较小,在 13:40 达到最大值,2.2 °C。

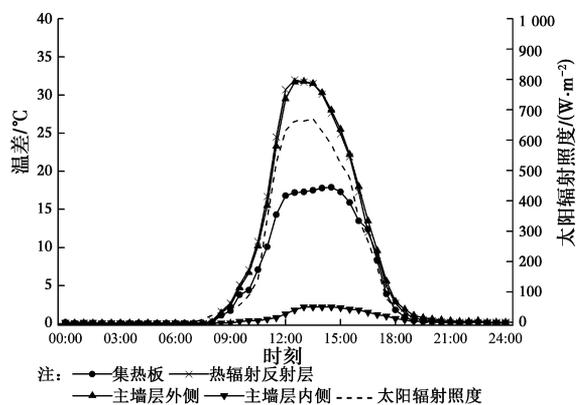


图 5 空载工况墙体系统各材料层上下测点温度差

Fig. 5 The temperature difference between top and bottom measuring point of each material layer of the wall system on no-load condition

## 3 墙体系统传热分析

### 3.1 传热模型

为了简化传热分析,计算中作以下简化:1)玻璃幕墙、集热板、热辐射反射层厚度都很小,热传递计算中不考虑这些材料层沿自身厚度方向的传热;2)模拟墙体在空载工况下传热情况,不考虑集热板与管内介质的换热。所建立墙体系统模型尺寸为

2 m×0.58 m×2.3 m(Y×X×Z),墙体系统模型如图6所示。

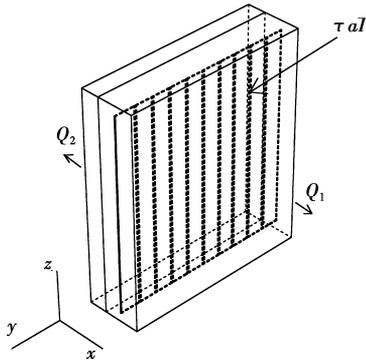


图6 墙体系统模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the wall system model

墙体系统中集热板的热平衡方程为

$$A_a \rho_a C_a \frac{\partial T_a}{\partial t} = A_a \lambda_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial y^2} + A_a \lambda_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} + \tau \alpha I A_a - Q_1 - Q_2 \quad (1)$$

式中: $A_a$ 为集热板面积, $m^2$ ; $\rho_a$ 为集热板密度, $kg/m^3$ ; $C_a$ 为集热板热容, $J/kg \cdot K$ ; $T_a$ 为集热板温度, $^{\circ}C$ ; $\lambda_a$ 为集热板导热系数, $W/m \cdot K$ ; $\tau$ 为玻璃幕墙透光率; $\alpha$ 为集热板吸收率; $I$ 为太阳辐射照度, $W/m^2$ ; $Q_1$ 为集热板向室外传热量, $W$ ; $Q_2$ 为集热板向室内传热量, $W$ 。

其中,集热板通过玻璃幕墙向室外传热量为

$$Q_1 = \frac{A_a (T_a - T_w)}{\frac{1}{h_{cov1} + h_{r1}} + \frac{1}{h_{cov2} + h_{r2}}} \quad (2)$$

集热板通过主墙层向室内传热量为

$$Q_2 = \frac{A_a (T_a - T_n)}{\frac{1}{h_{cov3} + h_{r3}} + \frac{1}{h_{cond}} + \frac{1}{h_{cov4} + h_{r4}}} \quad (3)$$

式中: $T_w$ 为室外温度, $^{\circ}C$ ; $T_n$ 为室内温度, $^{\circ}C$ ; $h_{cov1}$ 为玻璃幕墙与外界环境的对流换热系数, $W/m^2 \cdot K$ ; $h_{r1}$ 为玻璃幕墙与外界环境的辐射换热系数, $W/m^2 \cdot K$ ; $h_{cov2}$ 为玻璃幕墙与集热板的对流换热系数, $W/m^2 \cdot K$ ; $h_{r2}$ 为玻璃幕墙与集热板的辐射换热系数, $W/m^2 \cdot K$ ; $h_{cov3}$ 为集热板与主墙层的对流换热系数, $W/m^2 \cdot K$ ; $h_{r3}$ 为集热板与主墙层的辐射换热系数, $W/m^2 \cdot K$ ; $h_{cov4}$ 为主墙层内侧与室内环境的对流换热系数, $W/m^2 \cdot K$ ; $h_{r4}$ 为主墙层内侧与室内环境的辐射换热系数, $W/m^2 \cdot K$ ; $h_{cond}$ 为主墙层内、外侧的换热系数, $W/m^2 \cdot K$ 。

因在主墙层外侧设置热辐射反射层,集热板对

主墙层的热辐射被反射,若忽略进入主墙层的辐射热,则式(3)变为

$$Q_2 = \frac{A_a (T_a - T_n)}{\frac{1}{h_{cov3}} + \frac{1}{h_{cond}} + \frac{1}{h_{cov4} + h_{r4}}} \quad (4)$$

若不考虑太阳辐射的影响,则在室内、室外温差作用下,通过一体化墙体系统的热量等于通过玻璃幕墙的热量,也等于通过主墙层传入室内的热量,即

$$Q_T = Q_1 = Q_2 \quad (5)$$

式中: $Q_T$ 为通过一体化墙体系统的热量, $W$ 。

### 3.2 模拟条件设置

采用FLUENT对所研究一体化墙体系统进行逐时数值传热模拟,各材料层厚度及物性参数如表1所示。空气夹层在进行自然对流换热时流体存在密度随温度的变化,采用Boussinesq假设进行处理,并设置空气热膨胀系数 $\beta$ 为0.003/K。太阳辐射采用软件内太阳辐射计算器进行计算,使用DO辐射模型,地理信息中设置为东经112.91°、北纬27.82°、东8时区,时间为12月5日。模型中所设置的边界条件如表2所示。计算时压力差值方案选择PRESTO!格式,压力速度耦合方程选用PISO算法,动量、能量方程选用二阶迎风格式。模拟初始气温为10 $^{\circ}C$ 。

表1 墙体系统各材料层物性参数

Table 1 Physical parameters of each material layer of the wall system

材料层	厚度/ mm	密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	定压比热容/ ( $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ )	导热系数/ ( $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ )
玻璃幕墙	2	2 500	840	0.76
空气夹层	500		1 006.4	0.024
集热板	1	2 719	871	202.4
主墙层	80	50	1 380	0.037

表2 模型边界条件设置

Table 2 Boundary condition setting of the model

边界	类型	备注
玻璃幕墙	对流换热面	透光材料,辐射透射率为0.8,吸收率为0.12,对流空气温度为10 $^{\circ}C$
集热板	耦合面	辐射吸收率为0.95
主墙层外侧 (辐射反射层)	耦合面	辐射吸收率为0(辐射反射层作用)
主墙层内侧	对流换热面	对流空气温度为15 $^{\circ}C$
上下表面及侧面	绝热面	忽略上下表面及侧面影响

### 3.3 模拟结果

由图 7 可知,集热板平均温度、主墙层内侧平均温度、主墙层外侧平均温度等随时间的变化规律基本相同,各温度均随太阳辐射强度增大而升高。12:00 太阳辐射强度达到最大值  $625 \text{ W/m}^2$ ,此时,集热板温度达最高值  $88.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、温度升高  $78.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。受集热板温度的影响,主墙层外侧温度和主墙层内侧温度均同时达到最大值,分别为  $58.3$ 、 $17.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,温升值分别为  $48.3$ 、 $2.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

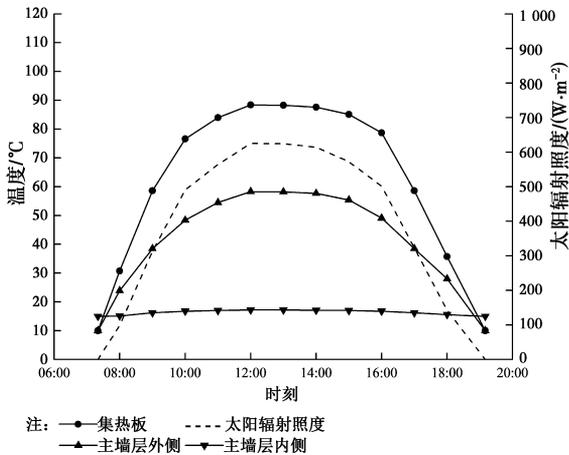


图 7 空载工况墙体系统各材料层温度模拟值  
Fig. 7 The simulation temperature of each material layer of the wall system on no-load condition

集热板平均温度与主墙层内、外侧平均温度模拟值与实验测量温度值相比,变化趋势基本相同。太阳辐射照度达到最大时,集热板温度模拟值比实验值低  $2.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ;主墙层外侧温度模拟值比实验值高  $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ;主墙层内侧温度模拟值比实验值高  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 8 的模拟结果显示,空气夹层内形成了明显的速度环流与温度分层效应,使集热板、主墙层外侧和主墙层内侧都产生了垂直方向的温度梯度。随太阳辐射照度的增加,集热板、主墙层外侧、主墙层内侧的上下温差均增大,在 12:00 太阳辐射照度最高时各材料层的上下温差达到最大值,分别为  $17.2$ 、 $21.9$ 、 $1.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

与图 5 实验结果对比,集热板上下温差、主墙层内侧上下温差的模拟结果与实验结果相似,均在太阳辐射最大时温差达到最大,且温差值接近。主墙层外侧的上下温差模拟值与实验存在差别,其原因是模拟为稳态条件,且模拟中室内温度为定值,而实验中主墙层外表面温度会受室内温度与墙体蓄热性的影响。

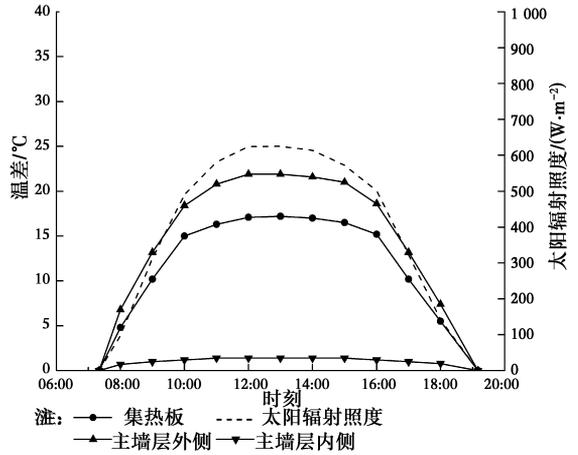


图 8 空载工况墙体系统各材料层上下温差模拟值  
Fig. 8 The simulation temperature difference between top and bottom of each material layer of the wall system on no-load condition

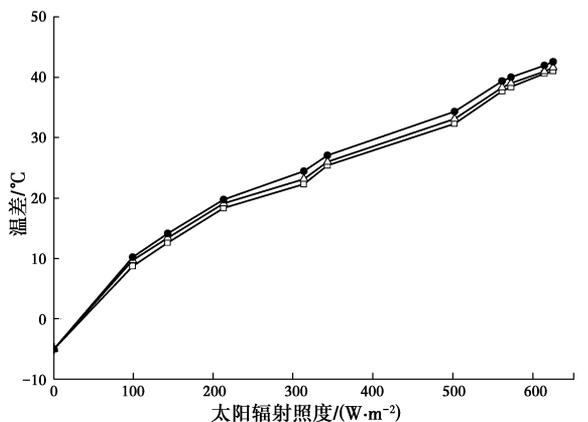
## 4 墙体系统优化分析

从以上模拟与实验结果比较可知,研究建立的一体化墙体分析模型可用于墙体的传热性能分析。为了进一步研究空气夹层厚度对墙体传热性能的影响,分别对空气夹层厚度为  $500 \text{ mm}$ (模型 A)、 $300 \text{ mm}$ (模型 B)、 $120 \text{ mm}$ (模型 C)3 种模型,在不同太阳辐射照度下进行模拟分析。

### 4.1 墙体各材料层平均温度

由图 9 可以知,空气夹层厚度一定时,太阳辐射照度越大,则主墙层内、外侧温差越大,表明通过主墙层传入室内的热量随太阳辐射照度的增加而增大。由图 9 还可以看出,不同空气夹层厚度的主墙层内、外侧温差变化趋势基本相同,太阳辐射照度一定时,主墙层内、外侧温度差随空气夹层厚度增大而略有减小。当太阳辐射照度为  $625 \text{ W/m}^2$  时,模型 C 的主墙层内、外侧温差为  $42.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,模型 B 为  $41.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,模型 A 为  $41.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。表明通过主墙层传入室内的热量随空气夹层厚度增大而略有减小。

由模拟结果可以看出,墙体系统的光热转换主要集中在太阳能集热板,太阳辐射照度越高,集热板温度越高,导致主墙层内、外侧温差越大。因此,在一定的太阳辐射照度下,为了减少通过主墙层传入室内的热量,可以增大集热板内水流量和降低集热板进水温度来降低集热板表面温度,从而降低主墙层内、外侧温度差,达到减少通过主墙层传入室内热量的目的。而变化墙体系统空气夹层厚度来改变通过主墙层进入室内的热量,作用不明显。



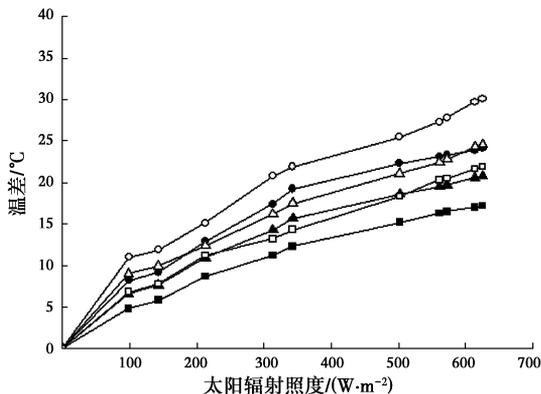
注: ●—120 mm空气夹层 □—300 mm空气夹层 ○—500 mm空气夹层

图 9 空气夹层厚度对主墙层内、外侧温度差的影响

Fig. 9 The influence of air interlayer thickness on temperature difference between inside and outside of the main layer

### 4.2 墙体各材料层的上下温度差

由图 10 可以看出,空气夹层厚度一定时,太阳辐射照度越高,则墙体各材料层上下温差越大。因主墙层内侧温差变化不大,太阳辐射照度增加时,主墙层不同高度处进入室内的热量差别将越大。



注: ■—500 mm空气夹层集热板 ▲—300 mm空气夹层集热板  
●—120 mm空气夹层集热板 □—500 mm空气夹层主墙层外侧  
△—300 mm空气夹层主墙层外侧 ○—120 mm空气夹层主墙层外侧

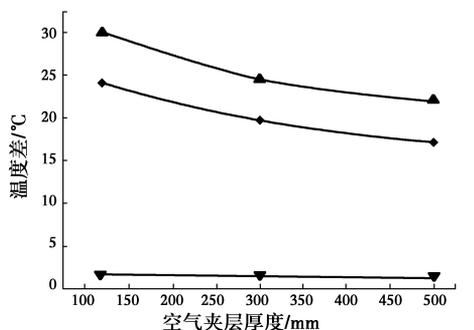
图 10 太阳辐射照度对各材料层上下温度差的影响

Fig. 10 The influence of solar radiation on temperature difference between top and bottom of each material layer

由图 11 可知,墙体各材料层上下温度差随空气夹层厚度增大而减小,当太阳辐射照度为 625 W/m<sup>2</sup> 时,模型 A 的集热板、主墙层外侧的上下温差分别为 17.2 °C 和 21.9 °C,模型 B 的集热板、主墙层外侧的上下温度差分别为 19.8 °C 和 24.6 °C,模型 C 的集热板、主墙层外侧的上下温度差分别为 24.1 °C 和 30.1 °C。而空气夹层厚度变化对墙体内侧温度差的影响不大。

由以上模拟结果可以得到,空气夹层厚度和太

阳辐射照度变化,对主墙层内侧上下温度差变化的影响不明显,而对集热板上下温度差、主墙层外侧上下温度差变化的影响均较大,其中,太阳能辐射照度变化的影响更明显。主墙层外侧上下温度差越大,造成主墙层上部的内、外侧温度差增幅大于主墙层下部,主墙层上部、下部温度场越不均匀,上部、下部传热量也越不相等。由于太阳辐射照度直接作用于集热板,因此,增大空气夹层厚度和减小集热板上下温度差,可以减小主墙层上部、下部传热量的不均匀性,尤其减小集热板上下温差的影响更明显。集热板上下温度差可以通过改变集热板内水流速和改变空气夹层内的空气流通状况来调节。



注: ●—集热板 ▲—主墙层外侧 ▽—主墙层内侧

图 11 空气夹层厚度对各材料层上下温度差的影响

Fig. 11 The influence of air interlayer thickness on temperature difference between top and bottom of each material layer

## 5 结论

设计了一种兼顾太阳能利用与保温隔热相结合的 PT-Trombe 墙体系统,墙体系统由玻璃幕墙、太阳能集热板、热辐射反射层、主墙层等材料层组成。通过实验测试和模拟计算,对墙体系统的传热性能进行了分析,得出以下结论:

1)在太阳辐射作用下,集热板空载工况温度较高,对墙体系统的传热影响较大。在冬季的实验工况下测得墙体系统的集热板最高温度可达 91.3 °C,集热板温度高于室内环境温度,墙体系统冬季能够对室内起到较好的保温作用;主墙层外侧温度与内侧温度最高分别为 57.9、23.4 °C,主墙层内、外侧逐时温差最大值为 41.7 °C,墙体系统具有较好的隔热性能。

2)墙体系统各材料层表面平均温度的模拟值与实验值变化趋势相同,空气夹层厚度变化对墙体系统各材料层表面平均温度影响不大;太阳辐射照度

变化对各材料层表面平均温度影响较大,实验工况下,集热板温度变化幅度为实验值 84.3 °C、模拟值 78.4 °C,主墙层外侧为实验值 50.8 °C、模拟值 48.3 °C。

3)在太阳辐射作用下,墙体系统各材料层表面均产生竖向的温度差,空气夹层厚度和太阳辐射照度对竖向温度差的影响均较大,实验工况下集热板和主墙层外侧竖向温度差分别为 19.8、24.6 °C,模拟值为 17.2、21.9 °C;墙体系统各材料表面的竖向温度差随太阳辐射照度增加而增大,随空气夹层厚度增大而减小。

### 参考文献:

- [1] ZHANG X X, SHEN J C, LU Y, et al. Active solar thermal facades (ASTFs): From concept, application to research questions [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 32-63.
- [2] DORFLING B, HORNING C H, HALLMARK B. The experimental response and modeling of a solar heat collector fabricated from plastic micro capillary films [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2010, 94: 1207-1221.
- [3] YANG Y G, CAO S L, XU J H, et al. A building integrated solar collector: all-ceramic solar collector [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 62: 15-17.
- [4] SUN X Y, SUN X D, LI X G, et al. Performance and building integration of all-ceramic solar collectors [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 75: 176-180.
- [5] RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ D, BELMONTE J F, IZQUIERDO-BARRIENTOS M A, et al. Solar energy captured by a curved collector designed for architectural integration [J]. *Applied Energy*, 2014, 116: 66-75.
- [6] 翟桂珍,陈威.泡沫金属平板式太阳能集热器传热性能的研究[J].*太阳能*, 2015(1):22-30.  
ZHAI G Z, CHEN W. Study on heat transfer performance of foamed metal flat-plate solar collector [J]. *Solar Energy*, 2015(1):22-30. (in Chinese)
- [7] HE W, HONG X Q, LUO B Q, et al. CFD and comparative study on the dual-function solar collectors with and without tile-shaped covers in water heating mode [J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 1205-1214.
- [8] 季杰,罗成龙,孙炜,等.一种新型的与建筑一体化太阳能双效集热器系统的实验研究[J].*太阳能学报*, 2011, 32(2):149-153.  
JI J, LUO C L, SUN W, et al. Experimental study on a dual-functional solar collector integrated with building [J]. *ACTA Energetica Solaris Sinica*, 2011, 32(2):149-153. (in Chinese)
- [9] 王崇杰,管振忠,薛一冰,等.渗透型太阳能空气集热器集热效率研究[J].*太阳能学报*, 2008, 29(1):35-39.  
WANG C J, GUAN Z Z, XUE Y B, et al. Simulation study on unglazed transpired solar air collector [J]. *ACTA Energetica Solaris Sinica*, 2008, 29(1):35-39. (in Chinese)
- [10] 万峰,夏清,姚文杰,等.纳米材料对太阳能集热器应用的影响[J].*陶瓷*, 2011(6):16-18.  
WAN F, XIA Q, YAO W J, et al. Effect of nano-materials on application of solar collector [J]. *Ceramics*, 2011(6):16-18. (in Chinese)
- [11] AKBARZADEH A, CHARETERS W W S, LESSLIE D A. Thermocirculation characteristics of a Trombe wall passive test cell [J]. *Solar Energy*, 1982, 28(6): 461-468.
- [12] ZALEWSKI L, CHANTANT M, LASSUE S, et al. Experimental thermal study of a solar wall of composite type [J]. *Energy and Buildings*, 1997, 25(1):7-18.
- [13] 易桦.新型 PV-Trombe 墙系统的理论与实验研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2007.  
YI H. Theoretical and experimental study of a novel PV-Trombe wall system. [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [14] GILLERS N, FABRICE M, CHRISTIAN C, et al. New patented solar thermal concept for high building integration: Test and modeling [J]. *Energy Procedia*, 2013, 42:43-52.
- [15] 季杰,于志,孙炜,等.多种太阳能技术与建筑一体化的应用研究[J].*太阳能学报*, 2016, 37(2):489-493.  
JI J, YU Z, SUN W, et al. Study of multiple solar technologies integrated with building [J]. *ACTA Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(2): 489-493. (in Chinese)
- [16] 刘斌,申志远,党超,等.太阳能混合墙体的实验研究[J].*太阳能学报*, 2015, 36(2): 490-494.  
LIU B, SHEN Z Y, CHANG C, et al. Experimental study of solar hybrid-wall [J]. *ACTA Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(2):489-493. (in Chinese)
- [17] 张叶,陈超,王万江,等.太阳能相变蓄热地板辐射供暖系统应用于乌鲁木齐地区办公建筑的实验研究[J].*暖通空调*, 2016, 46(6): 101-109.  
ZHANG Y, CHEN C, WANG W J, et al. Experimental study on solar phase change storage floor radiant heating system application to an office building in Urumqi [J]. *Heating Ventilating & Air*

- Conditioning, 2016, 46(6): 101-109. (in Chinese)
- [18] 张志顺, 吴语欣. 基于太阳能结合相变储能技术在建筑围护结构节能改造中的实践运用[J]. 建筑技术, 2015, 46(Sup): 156-158.
- ZHANG Z S, WU Y X. Application of energy conservation reconstruction based on solar energy combined with phase change energy storage technology in building envelope [J]. Architecture Technology, 2015, 46(Sup): 156-158. (in Chinese)
- [19] 李金平, 王磊, 李修真, 等. 西北新农村建筑太阳能主动供暖试验研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(11): 1680-1685.
- LI J P, WANG L, LI X Z, et al. Experimental study on active solar heating for new rural residence in northwest China [J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(11): 1680-1685. (in Chinese)
- [20] 徐鹏, 全贞花, 赵耀华, 等. 新型太阳能光伏-热泵复合建筑供能系统及其性能实验研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(6): 99-105.
- XU P, QUAN Z H, ZHAO Y H, et al. New-type solar photovoltaic and heat pump combined building energy supply system and experimental study of its performance [J]. Building Science, 2015, 31(6): 99-105. (in Chinese)
- [21] 吴伟东, 高辉, 邢金城, 等. 零能耗太阳能建筑主动技术优化评价方法研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2204-2210.
- WU W D, GAO H, XING J C, et al. Research on evaluation method of the active technology of zero energy solar building [J]. ACTA Energetica Sinica, 2015, 36(9): 2204-2210. (in Chinese)
- [22] 桑国臣, 韩艳, 朱轶韵, 等. 自然运行下乡村太阳能建筑热工参数对室内空气温度的影响[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(1): 30-34.
- SANG G C, HAN Y, ZHU Y Y, et al. Effect of thermal parameters of rural solar buildings on indoor air temperature under natural operating conditions [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(1): 30-34. (in Chinese)
- [23] 张冷, 卢豪, 刘忠兵. 一种太阳能隔热墙体的实验研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(7): 1731-1736.
- ZHANG L, LU H, LIU Z B, et al. Experimental investigation on a type of solar thermal insulation wall [J]. ACTA Energetica Sinica, 2015, 36(7): 1731-1736. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)