

非均匀多孔太阳能新风预热墙热性能实验研究

王登甲, 高 倩, 刘艳峰, 刘 园, 刘加平

(西部绿色建筑国家重点实验室, 西安建筑科技大学, 西安 710055)

摘 要: 该新风预热墙是一种兼顾供暖和新风预热需求的太阳能墙体,由渗透型集热板、空气夹层、出风口、保温墙体等组成。通过人工气候室实验测试的方法,分析该太阳能墙系统在不同太阳辐射强度、开孔高度和集热板高度比例、抽吸速度以及渗透孔径等工况下各运行阶段集热板、出风口等热性能。结果表明:随着太阳辐射强度、开孔高度和集热板高度比例的增加,系统的热效率和新风温度显著提升,集热效率最高达到75%,最高温升约为15.0℃;并根据风温和风量需求,给出合理的风机抽吸速度和渗透孔径取值,可为太阳能墙体的实际应用提供依据。

关键词: 太阳能供暖; 集热效率; 实验研究; 新风预热; 非均匀多孔

中图分类号: TU111.2

文献标识码: A

0 引 言

建筑物能源消耗及环境问题日益严峻^[1],寻找太阳能等可再生能源来缓解这一问题成为当下的热点。在太阳能的众多利用方式中,直接受益窗、附加阳光间及集热蓄热墙等被动式太阳能技术^[2]最为简便易行,且技术成本低,其中集热蓄热墙又以其可更好实现建筑一体化以及可塑性强等优势颇受学者青睐。目前,对于集热蓄热墙式太阳墙研究的较多,最具代表性的是法国科学家 Felix Trombe 设计的并于1967年在奥德约建造的 Trombe 墙^[3-5]。这类太阳墙的主要包括百叶式集热蓄热墙^[6,7]、热管式集热蓄热墙^[8]、花格式集热蓄热墙^[9]等类型。结果表明这几种太阳墙可有效提高室内温度,减少冬季采暖热负荷,但上述墙体结构都属于内循环式,难以兼顾冬季室内空气质量改善的问题。由此提出太阳能新风预热墙被,此类新型太阳墙可解决冬季开窗换气增加建筑能耗的实际难题。欧美一些国家已在实际应用中做了一些尝试,如加拿大的 Conversal 公司以及英国卡迪夫大学等,并且取得了不错的效果^[10,11]。Gawlik 等^[12]通过数值和实验确定了低导热性多孔太阳墙的性能。中国学者对此类墙体也做了一些研究,如王远锋^[13]分析太阳墙系统热

损失问题,并建立太阳墙板能量平衡方程。张学伟等^[14]分析太阳能多孔集热墙内传热与流动过程。

但以上研究大多基于实际工程应用,针对太阳能新风预热墙集热板均匀布孔形式,而受竖直太阳能墙体在热压作用影响下,非均匀布孔方式将更利于新风预热效果的提升。因此,本文对非均匀多孔太阳能新风预热墙热性能进行实验研究。分析该新型太阳墙系统在不同开孔高度和集热板高度比例、太阳辐射强度、抽吸速度以及渗透孔径等工况下各运行阶段太阳墙的热特性,得出各参数对新风预热效果和系统效率的影响规律,结论可为太阳能新风预热墙的设计提供一定参考。

1 太阳墙原理介绍

太阳能新风预热墙包括集热系统和气流输送系统,太阳能新风预热墙结构示意图如图1所示。集热系统包括渗透型集热板、空气腔、渗透孔,该集热板由金属材料制成,其表面涂有深色吸热层,并设置渗透孔,以增加室内的新风量。集热板与建筑外墙之间留有空气间层形成空气腔,空气腔四周密封;气流输送系统包括新风管道、可调速风机、送风口。空气腔内的空气通过热对流吸收集热板的辐射热,以达到对新风预热的目的。

收稿日期: 2018-12-11

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0700400); 国家自然科学基金(51678468; 51878532)

通信作者: 王登甲(1984—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事太阳能供暖与建筑热环境方面的研究。wangdengjia@xauat.edu.cn

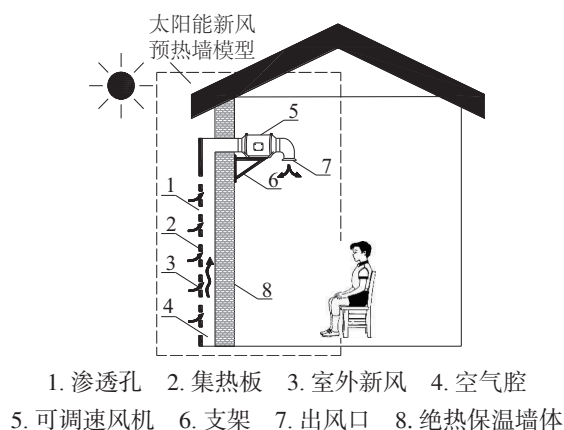


图1 太阳能新风预热墙结构示意图

Fig. 1 Solar fresh air preheating wall structure sketch

2 热性能评价指标

通过以下热性能指标来评估太阳能新风预热墙的热性能以获得最佳设计和运行参数,主要有热交换率 H_e 、集热效率 η 以及出风口最大温差 Δt 。

$$H_e = \frac{t_{ao} - t_a}{t_p - t_a} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{mc_a(t_{ao} - t_a)}{IA_p} \quad (2)$$

$$\Delta t = t_{ao} - t_a \quad (3)$$

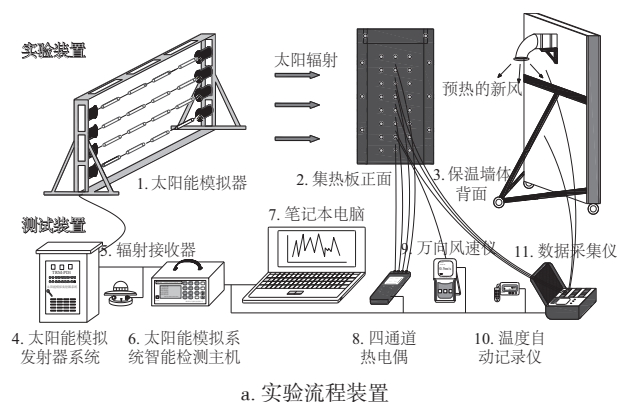
式中, H_e ——热交换效率, %; t_{ao} ——出风口空气温度, $^{\circ}\text{C}$; t_a ——环境温度, $^{\circ}\text{C}$; t_p ——集热板温度, $^{\circ}\text{C}$; m ——室外空气通过渗透孔的质量流量, kg/s ; c_a ——空气比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; I ——太阳辐射强度, W/m^2 ; A_p ——集热板面积, m^2 。

3 实验方法

3.1 实验平台

太阳能新风预热墙系统实验在西安建筑科技大学西部绿色建筑国家重点实验室中进行。实验室尺寸为 $16.0\text{ m} \times 14.0\text{ m} \times 3.1\text{ m}$, 系统实验平台以及实物图如图2所示, 为得到单因素对实验结果的影响规律, 对实验室环境进行控制, 使得每一工况在起始运行阶段环境变量保持一致, 实验室内空气温度保持在 $22.0 \pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

实验装置由集热系统、气流输送系统以及参数测量系统组成。实验中使用的光源为 TRM-PD1 矩阵式模拟光源人工太阳模拟器(称人造太阳), 模



a. 实验流程装置



b. 实验实景图

图2 系统实验装置以及实物图

Fig. 2 System experiment apparatus and photo

拟器光源采用 12 组独立的氙光灯线光源, 太阳辐射照度可调范围为 $500 \sim 1200\text{ W}/\text{m}^2$; 集热板与太阳能模拟器相距 80 cm , 集热板由金属铁板制成, 尺寸为 $1.9\text{ m} \times 0.6\text{ m}$, 厚度为 1.5 mm , 表面涂有黑色烤漆^[15], 开有不同数量的渗透孔, 孔行距和列距均为 10 cm ; 保温墙体尺寸为 $1.0\text{ m} \times 2.3\text{ m}$, 厚度为 12 cm , 采用双面 4.26 mm 厚彩钢板加 120 mm 厚聚氨酯板填充, 导热系数为 $0.24\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; 集热板和保温墙体之间留有 5 cm 厚的空气腔, 空气腔四周密封; 空气只能通过渗透孔进入腔体; 空气腔顶部开有通风口, 风口直径为 150 mm , 实验中使用的动力装置为 HF-150PZP 型轴流风机(风速可调节), 功率为 $44 \sim 54\text{ W}$ 。

3.2 实验测试方法

实验中分别对集热板前面、空气腔里面、保温墙体背面空气温度, 其表面温度和热流密度, 以及渗透孔口和出风口风速和风温进行测量。空气腔里面的温度和集热板前面空气、保温墙体背面空气温

度的测量分别采用 DS1922L 纽扣式温度记录仪和 TR-72ui 自记式温湿度计, 测量精度均为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 其余温度测量采用四通道热电偶 CENTER309 测试, 测量精度为 $\pm 0.3\%$ 显示值 $+0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$; 热流密度采用 R70B 温度热流巡回采集记录仪测试; 风速测量采用 WFWZY-1 型万向风速风温记录仪, 测量精度为 $\pm 1\%$ 。针对 3 种不同的开孔高度与集热板高度比例 H^* , 在垂直方向上均匀分布, 各个仪器均 1 min 自动记录一次。测点布置如图 3 所示。

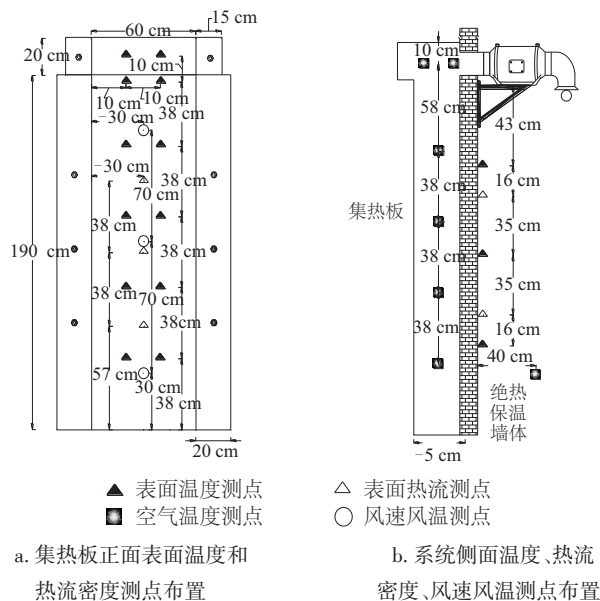


图 3 测点布置示意

Fig. 3 Schematic diagram of measuring point layout

4 实验结果与分析

实验工况为在不同开孔高度和集热板高度比例 H^* (0.3、0.6、0.9)、孔径 D (2、4、6 mm)、太阳辐射强度 I (500、600、700 W/m^2)、风机抽吸速度 v (0.00、0.50~0.55、0.70~0.75、0.90~0.95 m/s) 下进行。

4.1 集热板温度及热流密度

不同 H^* 时集热板外表面平均温度随时间的变化规律如图 4 所示。从图 4 可看出, 随着 H^* 的增大集热板表面温度有所升高。当 H^* 为 0.6 时, 集热板表面温度最高, 可达到 $61.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对 H^* 为 0.3 和 0.9 时分别提高 $14.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当 H^* 继续增大时, 集热板表面温度并未继续升高, 这是由于越靠近空气腔上部, 在风机抽吸的作用下使得空气和集热板换热增强得更加明显。

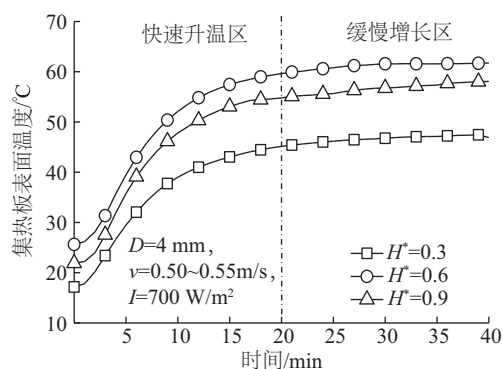


图 4 不同开孔高度和集热板高度比例下集热板表面平均温度

Fig. 4 Average surface temperature of heat collecting plate for different height ratios

太阳辐射强度对集热板表面的平均温度、热流密度影响如图 5 所示。随着太阳辐射强度的增加, 集热板外表面平均温度和热流密度均会有所升高 (图 5a)。系统运行约 20 min 后进入平稳区, 太阳辐射强度由 $500\text{ W}/\text{m}^2$ 增至 $700\text{ W}/\text{m}^2$ 时, 集热板外表面平均温度分别可增加 $3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。热流密度随着时间的变化有下降的趋势 (图 5b)。当系统运

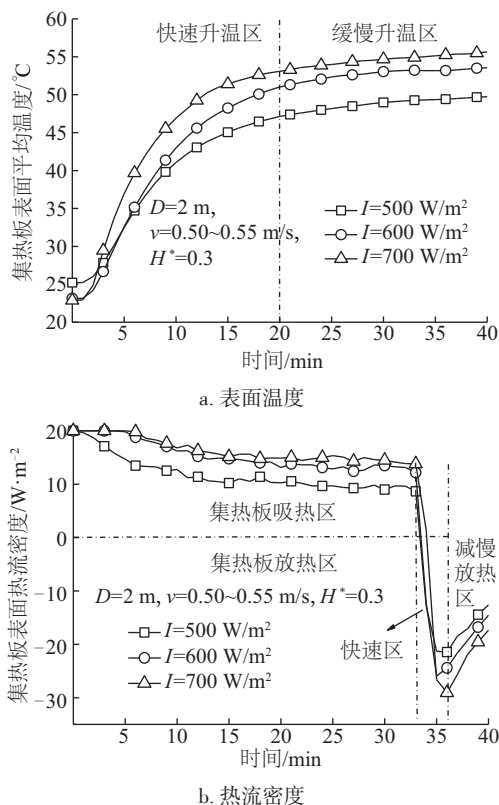


图 5 不同太阳辐射强度下集热板表面温度和

Fig. 5 Average surface temperature and heat flux density of heat collecting plate for different solar radiation intensities

行约 30 min 后,集热板表面热流急剧减小,经历减小吸热的过程,这是因为随时间的推移,集热板外表面与太阳能模拟器处的温差相对于和环境的温差逐渐减小,即换热温差减小。之后,集热板外表面与太阳能模拟器处的温差小于与环境的温差,此时热流反向传递,即传热方向相反。系统运行 36 min 后,传热强度逐渐降低。

4.2 出风口最大温差

出风口温差 Δt 在不同抽吸速度、 H^* 下随时间的变化规律如图 6 所示。由图 6a 可知,抽吸速度对出风口温差的影响较为明显,随着抽吸速度的增加,出风口温度呈减小趋势。虽然风速的增加有利于空气腔的换热,但对空气的预热效果不利。系统运行前的 7.5 min,系统处于初始阶段, Δt 呈下降的趋势。这是因为系统开始运行时,靠近集热板正面一侧的空气吸收太阳能模拟器的辐射热直接被加热,而出风口空气吸收集热板的热量后,通过热压和风压作用才被送到出风口,升温路径增大,因此

升温速度比环境空气慢。抽吸速度为 0 m/s 时,夹层内空气依靠纯热压的作用通过送风管道和风机到达出风口,由于阻力过大使得预热的空气不能顺利到达出风口。随着抽吸速度的增加,在低风速 (0.50~0.55 m/s) 时,出风口温差可达约 5.6 $^{\circ}\text{C}$;继续提高抽吸速度,因为夹层内空气还未来得及与集热板换热就被带到出风口;在中风速 (0.70~0.75 m/s) 和高风速 (0.90~0.95 m/s) 时,出风口的温差无太大差异,说明对于风速在 0.70~0.95 m/s 时,风速对出风口的温差影响较小,基本可稳定在约 2.8 $^{\circ}\text{C}$ 。

由图 6b 可知, H^* 从 0.3 增至 0.6 时,出风口温差有较大变化,出风口温差增加约 5.8 $^{\circ}\text{C}$,继续增加开孔高度温差只提升了 1 $^{\circ}\text{C}$,这是因为当 H^* 为 0.6 时,继续增加开孔高度,从上部渗透孔吸入的空气,在空腔中停留时间缩短,来不及与集热板和下部空气充分换热。当 H^* 为 0.9 时,温差最大可达约 14.8 $^{\circ}\text{C}$ 。

4.3 集热效率和热交换效率

太阳辐射强度分别为 500、600、700 W/m^2 ,风机抽吸速度分别为低风速 (0.50~0.55 m/s)、中风速 (0.70~0.75 m/s)、高风速 (0.90~0.95 m/s),孔径分别为 2、4、6 mm,开孔高度与集热板高度比例分别为 0.3、0.6、0.9 时的单位面积集热效率和热交换效率变化情况如图 7 所示。从图 7 可看出,随着太阳辐射强度的增加,集热效率和热交换效率均有所增加。当太阳辐射强度为 500 和 600 W/m^2 时,集热效率和热交换效率较接近,分别约为 40% 和 30%;当太阳辐射强度为 700 W/m^2 时,集热效率和热交换效率明显提高。当太阳辐射强度为 600 W/m^2 时,集热效率为 43%,热交换效率为 39%;当太阳辐射强度为 700 W/m^2 时,集热效率约为 52%,热交换效率约为 39%。集热效率和热交换效率分别提高约 8% 和 6%。

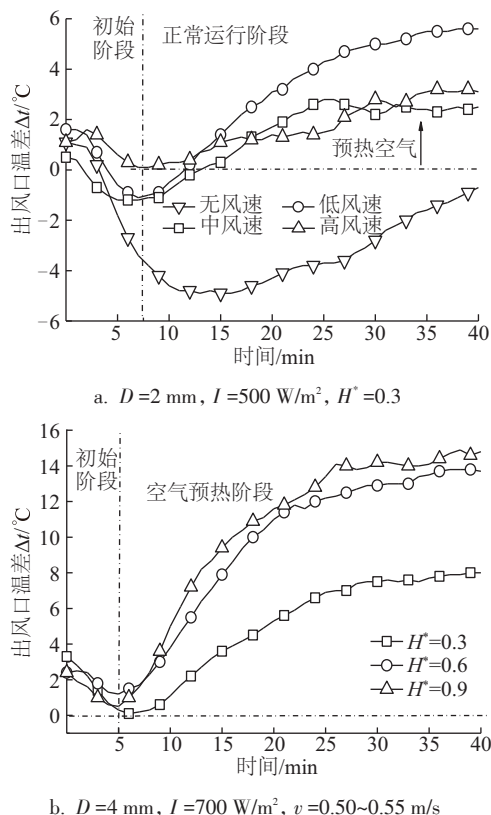
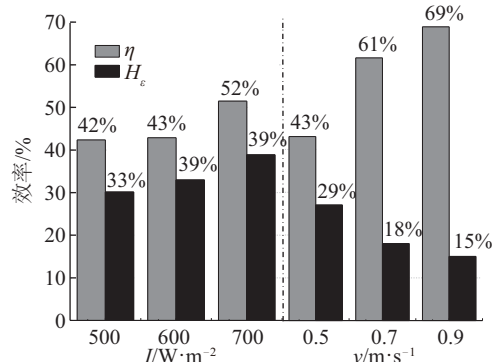
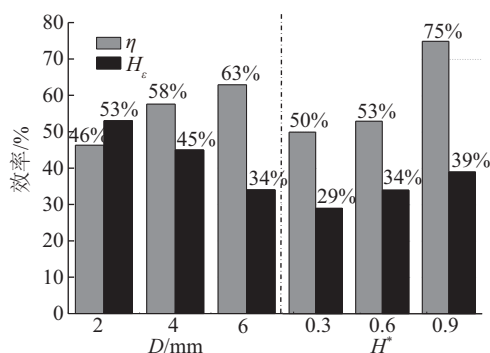


图 6 不同风机抽吸速度、开孔高度和集热板高度比例下出风口温度

Fig. 6 Difference in air temperature at outlet for different fan suction speeds and height ratios



a. $D=2$ mm, 低风速, $H^*=0.3$ b. $D=2$ mm, $H^*=0.3$, $I=500$ W/m^2



c. 低风速, $H^*=0.9$, $I=600 \text{ W/m}^2$ d. $D=2 \text{ mm}$, $I=700 \text{ W/m}^2$

图7 不同工况下集热效率和热交换效率

Fig. 7 Heat collection efficiency and heat exchange efficiency for different operating conditions

说明较低的太阳辐射强度对集热效率和热交换效率的影响不大。

随着抽吸速度和孔径的增加,集热效率和热交换效率趋势相反,两者差距越来越大。当抽吸速度为高风速(0.90~0.95 m/s)时,热交换效率只能达到15%,而集热效率可达69%。这是因为抽吸速度的增加使得出风口温差降低,但同时渗流速度增加,从而导致进入空气腔的空气量增加,由式(1)和式(2)可知,出风口温差会影响热交换效率,而集热效率同时受出风口温差和空气量影响。抽吸速度由0.50 m/s变化到0.95 m/s,集热效率提高26%,热交换效率降低14%。说明空气量的增加速率远大于出风口温差的下降速率。集热效率随着孔径的增大逐渐增大,而热交换效率相反。当孔径为6 mm时集热效率最大可达约63%。当孔径为2 mm时热交换效率最大达到约53%。孔径由2 mm增至6 mm,热交换效率基本呈均匀下降的趋势,降幅约为9.5%。集热效率的增加较明显,提高5%~12%,这主要与出风口温差和空气量有关。

从整体上来看,集热效率和热交换效率随开孔高度的变化趋势相同,从增加幅度上来看,集热效率较为显著,集热效率可达75%,提高了22%;而热交换效率只能达到39%,提高了5%。虽然当 H^* 为0.6时出风口温差和集热板面温度达到最大,但两者的比值未必能达到最大。而且随着 H^* 的增大,空气量在风机的抽吸速度下增加得更多。

5 结论

针对非均匀多孔太阳能新风预热墙结构,分析

太阳辐射强度,抽吸风速以及渗透孔径大小对该系统的热特性的影响,主要结论如下:

1)开孔高度与集热板高度比例,太阳辐射强度对集热效率和热交换效率的影响具有正相关性;渗透孔径和风机抽吸速度对集热效率和热交换效率的影响呈负相关,随着渗透孔径和风机抽吸速度的增大,集热效率和热交换效率有降低趋势。在最佳的运行参数和结构参数下,集热效率和热交换效率分别可达75%和53%。

2)集热板表面温度与太阳辐射强度的变化趋势一致,辐射强度越强,集热板吸收的热量越多,集热板表面温度越高; H^* 的变化对集热板的影响受换热面积和抽吸速度两方面的影响。

3)在低风速,较高太阳辐射强度以及最优的集热板结构参数下,新风预热效果良好,出风口最高温升可达14.8℃。

4)本文采用黑漆而未采用选择性涂层,造成高温时集热板表面发射率很高,使得集热板表面的辐射热损失偏大,但基本不影响整体热特性规律。

本研究可为该太阳墙技术在西部高原太阳能富集区的应用提供设计依据。

[参考文献]

- [1] 张雨. 城市污水热能资源化的研究及应用[D]. 吉 长春: 吉林大学, 2008.
- [1] Zhang Yu. Study of urban sewage heat energy utilization and its application[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [2] 刘勇, 李卓. 被动式太阳能利用建筑技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2015, 5(31): 2167—2168.
- [2] Liu Yong, li Zhuo. Research on passive solar energy utilization building technology[J]. Urban Construction Theory Research (Electronic Edition), 2015, 5(31): 2167—2168.
- [3] 陈其针. 被动式太阳能建筑结合相变墙体在沈阳地区的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [3] Chen Qizhen. Application research of passive solar building with phase change wallboard in Shenyang area [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [4] Torcellini P, Pless S. Trombe walls in low-energy buildings: Practical experiences[A]. Proceeding of World Renewable Energy Congress VIII[C], Colorado, 2004.
- [5] Safer N, Woloszyn M, Roux J J. Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a venetian

- blind[J]. *Solar Energy*, 2005, 79(2): 193—203.
- [6] 何 伟, 王臣臣, 季 杰. 百叶型集热墙不同百叶倾角对室内温度影响研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(3): 673—677.
- [6] He Wei, Wang Chencheng, Ji Jie. Study on the effect of Trombe wall with venetian blind structure on indoor temperature in different blade angle [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(3): 673—677.
- [7] 陈 晨, 刘艳峰, 王登甲, 等. 集热蓄热墙保温构造形式优化及适应性分析[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(11): 2889—2895.
- [7] Chen Chen, Liu Yanfeng, Wang Dengjia, et al. The optimization and adaptation analysis on the Insulation structure of the Trombe wall [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(11): 2889—2895.
- [8] Zhang Zhang, Xiang Shengchang, Zhang Yongfan, et al. A new type of hybrid magnetic semiconductor based upon polymeric iodoplumbate and metal-organic complexes as templates[J]. *Inorganic Chemistry*, 2006, 45(5): 1972—1977.
- [9] Wang Weiliang, Tian Zhe, Ding Yan. Investigation on the influencing factors of energy consumption and thermal comfort for a passive solar house with water thermal storage wall [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 64(5): 218—223.
- [10] Conservall Engineering Inc. Solar-wall SW150/SW250 profile [EB/OL]. <http://solarwall.com/en/products/solar-wall-air-heating/architects-and-engineers.php>, 2010-04-26.
- [11] Saxena A, Varun, El-Sebaei A A. A thermodynamic review of solar air heaters[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43(C): 863—890.
- [12] Gawlik K M, Christensen C, Kutscher C F. A numerical and experimental investigation of low-conductivity unglazed, transpired solar air heaters[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, 127(1): 47—55.
- [13] 王远锋. 太阳墙系统热性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [13] Wang Yuanfeng. Research on the thermal performance of the solar wall system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [14] 张学伟, 刘 伟, 徐 冬. 太阳能多孔集热墙内传热与流动特性分析[J]. *建筑节能*, 2007, 35(12): 54—56.
- [14] Zhang Xuewei, Liu Wei, Xu Dong. Investigation on heat transfer and flow characteristics in the perforated metal cladding of solar-wall system[J]. *Building Energy Conservation*, 2007, 35(12): 54—56.
- [15] 张术坤, 张 岚, 蔡 静. 材料红外光谱发射率特性研究[J]. *计测技术*, 2016, (sup1): 50—52.
- [15] Zhang Shukun, Zhang Lan, Cai Jing. Study on infrared spectral emissivity of materials[J]. *Measuring Technology*, 2016, (sup1): 50—52.

EXPERIMENTAL STUDY ON THERMAL PERFORMANCE OF NON-UNIFORM POROUS SOLAR FRESH AIR PREHEATING WALL SYSTEM

Wang Dengjia, Gao Qian, Liu Yanfeng, Liu Yuan, Liu Jiaping

(Western State Key Laboratory of Green Building, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The fresh air preheating wall is a kind of solar wall considering the heating and fresh air preheating requirements. It consists of an air-infiltrating heat collecting plate, an air layer, an air outlet, and an insulation wall. In this study, the thermal performance of the solar wall system was analyzed under different hole-opening height and heat collecting plate height ratios, solar radiation intensities, fan suction speeds and infiltration hole diameters which were tested in the artificial climate chamber. Results show that, with the increase of solar radiation intensity and the hole-opening height and heat collecting plate height ratio, the efficiency of the whole system and air temperature are improved. The collector efficiency can reach 75%, the increase of air temperature at outlet 15 °C. The optimal range of the fan suction speed and infiltration hole diameter are determined, according to the demand of fresh air temperature and volume. The work provides the basis for the practical application of the solar wall.

Keywords: solar heating; collector efficiency; experiments; fresh air preheating; non-uniform porous