

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201612128

新型太阳墙供热性能的实验研究

董建锴,孙苏雨婷,陈之华,姜益强

(哈尔滨工业大学 热泵空调技术研究所,哈尔滨 150090)

摘 要:为解决传统太阳墙在白天对空气加热存在滞后,夜间集热墙体向外散热严重等问题,设计了新型太阳墙结构,并搭建了供热性能测试实验台.通过对太阳辐射强度、室外空气温度、风口温度、集热板温度,以及室内温度场等参数测量,定量分析新型太阳墙的热性能随室外环境的变化规律.对连续 3 个典型室外环境日下的系统性能分析表明:太阳墙的送风口最高温度为 31.6 ℃,实验房间内最高温度达 24.1 ℃,最低温度 12.9 ℃,平均温度为 18.4 ℃,实验房间与对比房间最高温差为 3.3 ℃,当太阳辐照平均强度为 438.4 W/m² 时,实验房间温升速率达 1.4 ℃/h.室内温度频率分布的计算结果表明,实验房间温度在 52.8% 的时间内达到 18 ℃ 以上.因此,新型太阳墙结构在日间能够及时将得热输送到室内,并且在夜间可以维持一定的温度水平,全天将室内温度控制在人体感觉舒适的范围内,有效改善室内热环境.

关键词: 太阳墙;集热板;空气层;热性能;温度分布

中图分类号: TK51

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)02-0147-05

Experimental study on heating performance of anovel designed Trombe wall

DONG Jiankai, SUN Suyuting, CHEN Zhihua, JIANG Yiqiang

(Institute of Heat Pump and Air Conditioning of Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To solve the drawbacks of the traditional Trombe wall, such as a lag of air heating during the daytime and heat transfer from hot wall to outside at night, this paper presented a newly designed Trombe wall with the solar energy absorber inside the interlayer. The temperature variation and thermal performance of the Trombe wall were analyzed quantitatively by measuring the temperature and solar radiation intensity in the experimental room and control room with the outdoor environment. The experimental results were obtained by analyzing the data of three typical outdoor environment days in a row. The results indicated that the maximum temperature difference between the experimental room and the control room was 3.3 ℃. In the experimental room, the maximum and lowest temperatures were 24.1 ℃ and 12.9 ℃ respectively with the average temperature of 18.4 ℃, and the maximum temperature of the air supply was 31.6 ℃. The increase rate of air temperature in the experimental room reached 1.4 ℃/h under the average solar radiation intensity of 438.4 W/m². Within 52.8% of the total time, the temperature in the experimental room was above 18 ℃ according to the indoor temperature frequency distribution. The experimental results showed that the heat gain can be timely delivered to indoor during the daytime, and can maintain a certain level in the night. Therefore, human body will feel comfortable all day due to the control of the indoor temperature range and the indoor environment could be improved effectively when using this novel Trombe wall.

Keywords: Trombe wall; solar energy absorber; air layer; thermal performance; temperature distribution

建筑能耗作为中国社会总能耗的重要组成部分,到 2020 年其所占比例将达到 30% 左右^[1].面对能源逐渐紧缺的严峻现实,利用可再生能源减缓传统能源消耗越来越受到重视.太阳能是一种丰富且洁净的可再生能源,以多种形式被利用在建筑中.其中太阳墙结构具有显著的绿色节能优势,可使采暖季的建筑供暖能耗降低 20% 左右^[2],因此,受到广泛重视.传统的太阳墙结构通常是集热墙体上、下部

位分别开设风口,在墙体外表面紧贴一块金属板,并在墙体外安装玻璃盖板,使盖板与外墙间形成空气夹层.白天室内的冷空气由下风口进入空气夹层,经太阳辐射加热后热空气由上风口进入室内,同时金属板得热后为集热墙体蓄热.夜间墙体内部的热量释放并加热室内空气,达到改善室内热环境的目的^[3].传统太阳墙结构具有以下缺点:1) 冬季白天,由于部分热量被蓄存到集热墙体内部,通过空气流动直接带入室内的热量减少,重质集热墙表面温升缓慢.对于室内全天热负荷需求较大的严寒地区,重质墙体的升温非常慢,热虹吸压头小,往往到 11 点左右后室温才逐渐上升^[4].因此,传统太阳墙结构使室内空气升温时存在较大的时滞性^[5],不能满足及时充

收稿日期: 2016-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51608146)

作者简介: 董建锴(1982—),男,副教授,硕士生导师;

姜益强(1973—),男,教授,博士生导师

通信作者: 董建锴,djkheb@163.com;

姜益强,jyq7245@163.com

分利用太阳能的要求;2)冬季夜间,温度较高的集热墙体向室内散热的同时,部分热量会向室外传递形成较大的热损失;3)夏季白天,集热墙体表面温度较高,室内容易产生过热现象。

针对上述缺陷,国内外的专家提出了不同的改进墙体结构,如结合相变材料的太阳墙、带有多孔陶瓷材料的蒸发式墙体以及填充高吸收率低密度流体的墙体等^[6]。此外,何伟等对带有新型竖置透明蜂窝的改进型太阳墙进行测试,发现新型墙体下室内升温更快,热利用率更高^[4];陈滨等对冬季太阳墙增设内置卷帘对墙体热性能的影响进行了定量分析,通过实验证明卷帘可以阻挡夜间墙体向外环境的辐射散热^[7];Mehran Rabani 等通过模拟及实验方法对采用三面集热形式的太阳墙热性能进行了对比,结果表明,实验房间温度可以维持在温差较小的舒适范围内^[8]。

为了有效解决传统太阳墙的缺点,本文设计了一种新型的太阳墙结构,将传统结构中紧贴墙体表面的金属板移至玻璃盖板与集热墙体之间,金属板与集热墙体间留有一定距离,以削弱日间加热的滞后并避免夜间热量散失。改进后的新型太阳墙结构可以大大减小传统太阳墙的劣势:1)由太阳辐射提供的热量有限,铝板将绝大部分得热直接加热空气,使热量实时传递到室内,减小加热室内空气的滞后性,避免铝板由导热缓慢地将热量蓄存给集热墙体导致热量不能及时利用;2)由于白天热量实时传入室内,由室内的设备及家具物品蓄存热量而非集热外墙,从根本上消除了夜间因为集热墙温度较高而向室外的散热;3)夏季在墙体与铝板间的上下盖板开设风口,并将集热墙体的上下风口关闭,铝板被加热后热量迅速由空气夹层内流动的室外空气带走而不进入室内,避免了原有结构加热墙体产生的过热现象。

为测试新型太阳墙供热性能,首先搭建了新型太阳能集热墙实验台,介绍了太阳辐射强度测点与温度测点等的布置,之后对采用新型太阳墙结构的房间温度、集热板温度、空气层温度、风口温度及室外太阳辐射强度等物理量进行监测。通过对比分析,研究了新型太阳墙结构的热性能及该系统对室内温度的影响。本文研究内容对于太阳能资源不甚丰富、需要及时将热量输送入室內的地区尤为适用,将为太阳墙供暖提供一种新的高效利用方式。

1 实 验

1.1 实验工点简况

实验地点位于哈尔滨市(东经 126.63°,北纬

45.75°),其年平均气温为 4.1℃,全年日照时数为 2 314.8 h,平均日太阳能辐射量为 $3.96\text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ^[9]。地方太阳时早于北京时间 26 分 31 秒,本次实验所涉及的时间均以北京时间为准。实验房屋选在哈尔滨工业大学市政环境工程学院顶楼搭建,可以最大程度避免其他建筑物的遮挡。该房屋采用正南正北向设计,新型太阳墙安装在房间正南向的外墙上。测试房间尺寸为 3 500 mm×2 100 mm×2 700 mm,除南侧墙为外墙外,其余均为内墙。实验房屋南墙上外窗尺寸为 1 400 mm×1 800 mm。北墙有一扇内门,实验过程中门窗始终保持关闭状态。各围护结构参数见表 1。

表 1 围护结构参数

Tab.1 Parameters of building envelopes		
结构	尺寸/mm	材料
外墙	20	抹灰
	300	加气混凝土
	120	保温苯板
外窗	20	抹灰
	1 800×1 400	双层中空玻璃窗
内门	1 300×500	夹芯板木门

1.2 新型太阳能集热墙介绍

新型太阳能集热墙主要构造为集热墙体外部的空气加热系统。图 1 为新型太阳墙外观实物图。南侧集热墙体外部窗户两侧装有玻璃盖板,玻璃盖板后 3 cm 处竖直固定 3 mm 厚铝板,铝板外表面涂有黑色选择性吸收涂层。集热外墙上下分别开设风口,进、回风口处均装有风阀。实验房间内可通过时间控制器自动控制进风口与回风口的开闭。新型太阳能集热墙总高度为 2 700 mm,集热板距外墙表面 120 mm,具体结构及相关尺寸参数见图 2。



图 1 新型太阳墙墙体外观实物

Fig.1 Actual appearance of new designed Trombe wall

1.3 测试方法

本实验主要测量物理量为温度和太阳辐射强度。实验过程中采用 Pt1000 对室内环境温度、空气层温度、集热板表面温度及风口处空气温度进行测量。室内及墙体表面温度测点布置如图 3 所示。利用

等距离法将房间内部高度四等分,并在每一个高度层面布置4个温度测点,以测试房间内空气温度变化.室内空气平均温度取12个温度测量值的平均值.铝板与墙体间的空气夹层及铝板内表面均沿高度方向各布置3个测点,左右两侧太阳墙结构内部共计12个测点.4个风口处各布置1个测点,共计4个测点.各温度测点数据采用Agilent 34972A数据采集器自动记录.实验过程中采样周期为10 min.

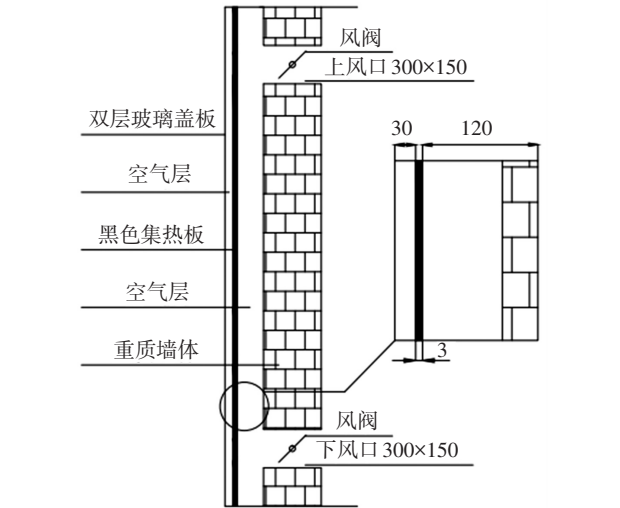


图2 新型太阳墙墙体结构示意图(mm)

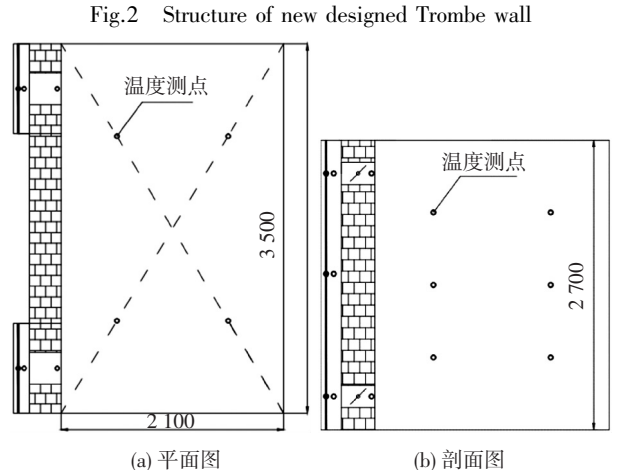


图3 太阳墙及室内温度测点布置示意

Fig.3 Temperature measuring site arrangement of Trombe wall and indoor

太阳辐射强度及室外空气温度采用Solar Survey 200 太阳总辐射日照仪测量并自动记录,采样周期为10 min,其端面与太阳墙墙体外表面保持平行.

1.4 实验方案

考虑到本次实验房屋内无其他辅助热源,即新型太阳墙墙体为单一热源,故本次实验选在采暖末期进行.采用短期连续的测试方法,相关参数的测试时间段为2016年4月19日00:00—2016年4月22日00:00.实验过程中进、回风口每天通过时钟控制

器实现自动开闭,根据哈尔滨地区的日出和日落时间,早上6点自动开启所有风口,晚上6点自动关闭所有风口.实验过程中,对装有太阳墙结构的实验房间及对比房间室内温度进行测量,分析外墙加装新型太阳墙对室内热环境产生的影响.

2 结果与分析

2.1 室外测试条件

测试周期内的天气情况如表2所示.4月19日早晚温差达到15.5℃,但太阳辐照充足,最高值为679.7 W/m²,为太阳墙集热提供了较好的实验条件;4月20日与前一天最高气温仅相差0.5℃,气温波动幅度较小,午后温度下降缓慢;4月21日太阳辐射强度较小,平均值低于19日平均值的80%,天气以阴天为主,但室外气温较高.图4为测试期间南墙竖直面的总太阳辐射强度以及室外空气温度变化.太阳辐照度与室外气温变化趋势基本相同,室外气温波动稍有滞后,且温度下降比较缓慢.测试期间室外环境比较接近,提供了较为稳定的实验条件.

表2 测试周期内气象条件

Tab.2 Meteorologic condition during the test period

测试时间	天气情况	风向 风力	室外温度/℃		太阳辐射强度/ (W·m ⁻²)	
			最高	最低	最高	平均
4.19	多云转晴	西南风 4~5级	21.0	5.5	679.7	327.0
4.20	晴	西南风 4~5级	20.5	9.0	663.7	325.3
4.21	多云有时阴	西风 4~5级	23.6	10.8	554.3	254.8

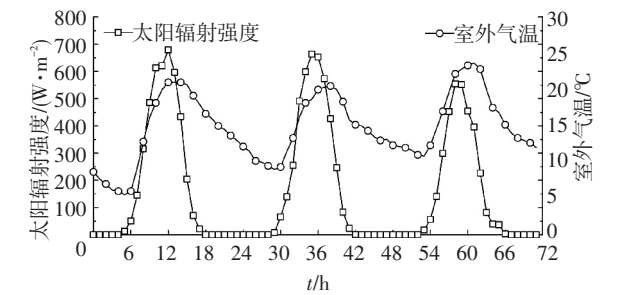


图4 室外温度及太阳辐射变化

Fig.4 Variation characteristics of outdoor temperature and solar radiation

2.2 室内温度对比分析

图5为实验房间与对比房间室温变化.虽然室外温度有一定波动,但实验房间室内温度升降趋势相对稳定.测试过程中,实验房间内最高温度达24.1℃,最低温度12.9℃,平均温度达18.4℃,因此,在多数时间内均能满足室内环境温度的需要.并且,实验房间温升迅速,4月19日6:00—13:00对比房间温升速率为1.0℃/h,而实验房间温升速率达1.4℃/h,此时室外太阳辐射平均强度为

483.4 W/m².测试期间实验房间室内平均温度比对比房间室内温度高 2.9 ℃,比室外环境平均温度高 3.7 ℃.每天在 13:00 前后室内温度达到峰值,实验房间温度明显高于对比房间,最高温差达 3.3 ℃,主要是由于太阳供给的热量通过加热铝板后及时地传送到房间内部,并将热量蓄积在室内环境里.夜间,由于白天蓄存在墙体内部的热量很少,且铝板对墙体向外的热量传递有很好的阻隔作用,故墙体基本不向外散失热量,并依靠白天蓄存在室内环境及设备内的大部分热量保持一定的温度水平,最低温度维持在 12 ℃.实验结果表明,无论是白天还是夜间,实验房间温度始终高于对比房间温度,说明在哈尔滨地区的过渡季采用新型太阳墙结构可以有效提高白天室内温度,同时在夜间仍能维持一定的室内温度水平.

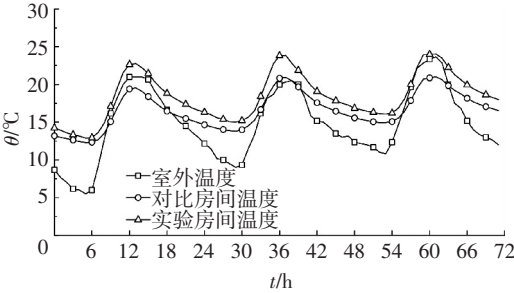


图 5 实验房间与对比房间室温变化

Fig.5 Temperature changes in test room and contrast room

2.3 室内温度分布频率分析

图 6 为测试期间实验房间与对比房间室内温度分布频率比较.在连续测试的 3 d 内,实验房间有 48.61%的时间室温在 16~18 ℃,52.78%的时间室温超过 18 ℃,仅有 9.72%的时间温度低于 14 ℃.同时,对比房间有 69.44%的时间室温低于 18 ℃,所占频率达到实验房间的 1.5 倍,并且仅有 9.72%的时间温度大于 20 ℃.测试期间,实验房间最低室温大于 12 ℃,最高室温小于 25 ℃,且室内温度在多数时间均位于人体较为舒适的 18 ℃附近,与对比房间形成显著差异.说明在无其他辅助热源条件下,对于哈尔滨地区的过渡季,新型太阳墙供热系统可以将室内温度维持在人体适宜的范围内.

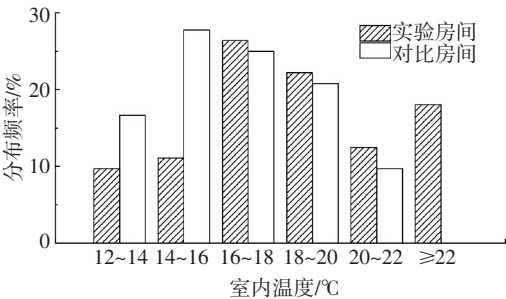


图 6 室内温度分布频率

Fig.6 Distribution frequency of indoor temperature

2.4 空气层温度分析

图 7 为太阳墙内铝板与集热墙体间空气层的温度变化.空气层内温度变化趋势与太阳辐射强度变化基本相同.由测试数据可以看出,在测试周期内,每天在中午 12:00 前后温度达到峰值.空气层上测点最高可达 45.7 ℃,下测点最高为 38.2 ℃,上下测点平均温差为 2.9 ℃.装有新型太阳墙的实验房间空气层温度曲线从 6:00 左右就具有较大的上升斜率,4 月 19 日 6:00—13:00 空气层上部温升速率为 5.4 ℃/h,说明铝板吸收太阳辐射后,能快速将热量传递到铝板与集热墙体间的空气层,使内部空气温度迅速提升.

由于白天多数热量被及时送入房间内部被利用,蓄存在墙体内部的热量很少,削弱了原有太阳墙体加热室内空气时存在的滞后性.对于原本集热面积不足且热负荷较大的房间,新型太阳墙的蓄热模式会发挥更好的供热效果.在夜间,太阳墙上下风口关闭,此时玻璃盖板与铝板间 3 cm 的密闭空气为铝板加设了一层保温层,最大限度地减弱室内及墙体向外散热.新型太阳墙体在白天迅速为房间提供热量的同时,在夜间也能起到阻碍热量的散失的作用.

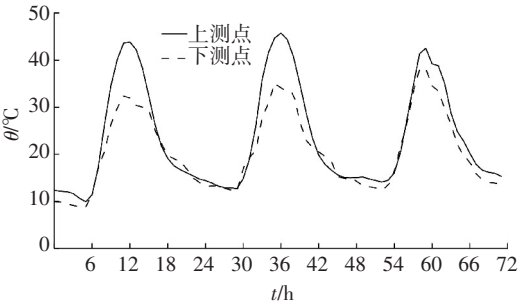


图 7 空气层温度变化

Fig.7 Temperature curves of air layer

2.5 集热铝板内表面温度分析

图 8 为太阳墙集热板的内表面温度变化.可以看出,集热板上侧最高温度可达 59.0 ℃,下侧最低温度达 6.6 ℃,白天上下测点最大平均温差为 8.4 ℃.在太阳照射较为充足的时间段内,集热板与空气层有 5~10 ℃的温差,集热板对由室内进入夹层内的空气有一定的加热作用,集热板背面的凸起增大了板子与空气间的换热面积,使空气迅速升温.午间集热板温度随太阳辐照强度的增加达到峰值,随后温度迅速下降,直至日落以后缓慢降至最低点.夜间,集热板表面温度与室外环境温度基本一致,进一步说明墙体几乎不会向集热板传递热量,而是将热量在白天实时供入室内.通过图 5 和 7 的对比可知,室内温度、空气层温度与铝板内表面温度变化趋势基本相同,集热板早晚波动幅度最为明显,集热铝

板与空气层温度达到峰值比房间温度达到峰值的时间稍早。

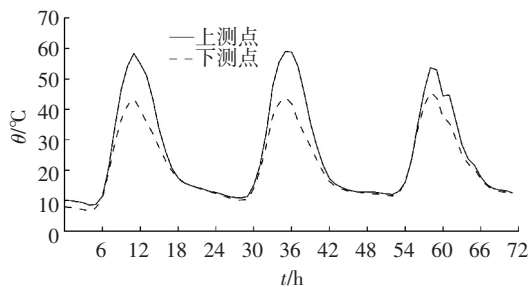


图8 铝板温度比较曲线

Fig.8 Temperature curves of aluminum plate

2.6 风口温度分析

图9为集热墙体内风口处温度变化。实验过程中上风口温度始终高于下风口,说明没有发生冷空气倒灌现象,始终为室内冷空气从下风口进入经铝板加热后由上风口返回。日出以后,上风口温度迅速升高,最高可达31.6℃,与室内温差最大为9.6℃,可见新型太阳墙能通过对流迅速将热量传递到房间内部,对室内空气有显著的加热作用。在夜间,上下风口于18:00以后均处于关闭状态,防止冷空气倒灌。由于测试风口温度的测点布置在靠近室内的一侧,夜晚在室内热压的作用下,存在温度梯度分层现象,所以,上下风口仍有较小温差。

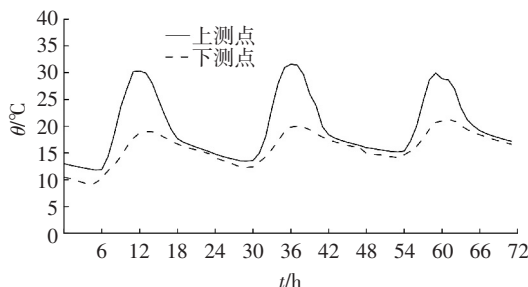


图9 风口温度变化

Fig.9 Temperature curves of tuyeres

3 结 论

1)在哈尔滨地区过渡季安装新型太阳墙对房间温度有一定的提升作用,与对比房间最高温差为3.3℃,且有52.8%的时间温度在18℃以上。

2)新型太阳墙白天加热效果明显,送风温差最高为9.6℃,热量能迅速传递到室内,夜间避免集热墙体向外的散热,实验房间温度始终高于对比房间。

3)新型太阳墙系统的集热板对太阳能的集热效果明显,在室外温度较高、太阳辐射强度较大时,集热板的热交换效率较高。

参考文献

- [1] 龙惟定.建筑能耗比例与建筑节能目标[J].中国能源,2005,27(10):23-27.
LONG Weiding. Building energy consumption proportion and target of building energy saving[J]. China Energy News, 2005,27(10): 23-27.
- [2] BOJIC M, JOHANNES K, KUZNIK F. Optimizing energy and environmental performance of passive Trombe wall[J]. Energy Build, 2014,70: 279-286.
- [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.
CHEN Qizhen. Application research on passive solar building with phase change wallboard in Shenyang Area [D]. Chongqing: Chongqing University,2010.
- [4] 何伟,季杰,张爱凤,等.带改进型 Trombe 墙体的热箱热性能的实验测定和分析[J].中国科学技术大学学报,2003,33(5): 567-572.
HE Wei, JI Jie, ZHANG Aifeng, et al. Experimental test and data analyze of thermal performance of a solar house with improved trombe-wall[J]. Journal of University of Science and Technology of China,2003, 33(5): 567-572.
- [5] 杨昭,徐晓丽,韩金丽.太阳墙热特性分析[J].太阳能学报,2007,28(10):1092-1096.
YANG Zhao, XU Xiaoli, HAN Jinli. Study on the thermal performance of solar wall[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2007, 28(10):1092-1096.
- [6] OMIDREZA S, SOPIAN K, LIM C, et al. Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012,16: 6340-6351.
- [7] 陈滨,陈星,丁颖慧,等.冬季特朗贝墙内卷帘对墙体热性能的影响[J].太阳能学报,2006,27(6):564-569.
CHEN Bin, CHEN Xing, DING Yinghui, et al. Experimental study of the shadingdevice's thermal performance of the air-gap of the trombe wall during the winter[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2006,27(6):564-569.
- [8] RABANI M, KALANTAR V, DEHRHAN A, et al. Experimental study of the heating performance of a Trombe wall with a new design [J]. Solar Energy, 2015, 118: 359-374.
- [9] 哈尔滨市统计局.哈尔滨统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2013.
Harbin Municipal Bureau of Statistics. Harbin statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press,2013.
- [10] 王天成.无盖渗透型太阳能空气加热系统热性能的实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
WANG Tiancheng. Experimental research on the thermal performance of unglazed transpired collector based solar air heating system[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2011.

(编辑 刘 彤)