

# 与建筑一体化太阳能双效集热器系统在被动采暖工作模式下的模拟和实验研究

季杰\*, 罗成龙\*, 孙炜, 何伟, 裴刚, 韩崇巍

中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 230026

\* 联系人, E-mail: jijie@ustc.edu.cn; xxlong@ustc.edu

2009-05-05 收稿, 2010-01-14 接受

国家自然科学基金(批准号: 50876098)、国家“十一五”科技支撑计划(编号: 2006BAA04B04)和国家高技术研究发展计划(编号: 2006AA05Z412)资助项目

**摘要** 提出并建立了一种新型的与建筑一体化太阳能双效集热器系统, 该系统有两种工作模式: 在冬季的被动采暖工作模式和其他无需供暖的时期的集热水工作模式. 针对该新型系统的被动采暖工作模式, 实验测试了系统在被动采暖工作模式下的运行情况, 同时建立了该新型系统在被动采暖工作模式下与建筑耦合传热计算模型并进行了实验验证. 实验和模拟研究结果表明, 该新型系统在被动采暖工作模式下工作时, 对系统房间的温度提高作用明显. 在 9:00~17:00 的测试期间, 系统房间的平均温度达到 24.7℃, 而期间环境平均温度只有约 4.8℃. 研究结果还显示, 系统房间内空气存在温度分层现象. 此外, 通过验证的理论模型, 还讨论了涂层特性对系统在被动采暖模式下的性能影响情况.

## 关键词

与建筑一体化太阳能双效  
集热器系统  
太阳能被动采暖  
集热水  
建筑节能  
选择性吸收涂层  
黑镍选择性吸收涂层  
黑漆涂料

在太阳能采暖应用中, 有几种比较典型的系统, 如 Trombe 墙系统<sup>[1]</sup>、对 Trombe 墙系统进行改进的复合 Trombe 墙系统<sup>[2]</sup>、太阳能炕系统<sup>[3,4]</sup>、解决传统 Trombe 墙功能单一等问题而提出的新型光伏 Trombe 墙系统<sup>[5]</sup>、墙体蓄热系统<sup>[6]</sup>以及采用金属板作为吸热板的 Barra-Costantini 系统<sup>[7]</sup>等. 这些系统既有主动系统也有被动系统, 总的来说, 这类系统的提出和研究, 推进了在建筑中应用太阳能供暖技术的发展, 但仍然存在问题待完善. 一般来说, 在冬季, 太阳能供暖系统可以很好地满足建筑采暖需求, 但在建筑无需供暖的时期特别是夏季, 太阳能供暖系统已不必要, 造成系统全年使用率低, 影响了系统使用的经济性. 而且从已有研究来看, 目前这类采暖系统特别是被动采暖系统在建筑无需供暖时期常会导致建筑过热问题<sup>[8]</sup>. 如 Trombe 墙系统、Barra-Costantini 系统在夏季多只是以朝室外开风口方式使热量向室外

排放, 从而导致系统在该时期不能有效利用, 不仅如此, 由于玻璃盖板的温室作用, 朝室外开风口方式也只能在一定程度上缓解问题, 仍不能避免建筑过热问题.

在太阳能制热水应用方面, 由于太阳能热水系统相对简单、技术较成熟并且成本较低的特点, 从出现开始就成为太阳能热利用技术中在世界范围内发展最快和应用最为普通的技术<sup>[9]</sup>, 同时随着太阳能制热水应用的发展, 传统热水系统的一些局限性也逐渐显现: 太阳能热水系统在冬季寒冷地区应用时, 水温过低甚至系统结冻而造成系统无法有效使用; 传统安装方式将系统安装于建筑屋顶<sup>[10]</sup>, 安装不美观影响建筑美观甚至城市整体形象, 而且高层建筑屋顶面积无法满足需求等. 因此为对太阳能制热水系统进行改进, 太阳能热水墙<sup>[11]</sup>的概念被提出. 根据 Tomas 和 Borivoj<sup>[12]</sup>的相关研究结果可以看到: 太阳

**英文版见:** Ji J, Luo C L, Sun W, et al. A numerical and experimental study of a dual-function solar collector integrated with building in passive space heating mode. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-0117-3

能热水墙系统可以有效利用太阳能制热水,并且可以在一个可以接受的程度下影响室内热环境,在各种情况下的研究结果显示室内温度因为墙体热水器的原因升高不到 $1^{\circ}\text{C}$ . 该系统的提出可解决传统系统安装于建筑屋顶要遇到的屋顶面积不足的问题,并且安装方式的改进,使系统更美观,但对于热水系统在冬季使用时要出现的问题未得到根本解决. 尽管目前已有采用防冻液作为蓄热工质的太阳能集热水系统<sup>[13]</sup>,但由于防冻液工质的价格昂贵并且系统常为主动系统,系统无论安装成本和运行使用成本都很高,系统经济性差.

为解决以上问题,我们提出了与建筑一体化太阳能双效集热器系统,该系统可以选择采用其两种工作模式之一:被动采暖工作模式和集热水工作模式. 在全年建筑需供暖的时期如冬季,系统以被动采暖工作模式运行以为室内房间供暖,在全年其他时期特别是夏季,系统转换成集热水工作模式以提供生活用热水. 从功能上讲,该新型系统在冬季时是一太阳能被动采暖系统,在无需供暖时期相当于一太阳能热水墙系统,但既不是单独的太阳能被动采暖系统也不是单独的集热水系统,而是有很多独特之处的新型系统:该新型系统可以区分季节气候的不同,而采取合理的工作方式,从而可避免单独应用太阳能被动采暖系统在夏季易造成的建筑过热问题和单独应用集热水系统屋顶面积不够及在冬季易结冻等问题,并且在各个时期都能有效利用太阳能,因此系统全年的利用率得到大大提高;从结构上讲,该新型系统比太阳能热水墙多一个与建筑室内房间相连的风口结构,比常用被动采暖系统少一个夏季用于朝室外环境开启的风口结构;系统在全年都可以以被动方式运行,运行成本低.

为对本文所提出的新型系统进行研究,我们搭建了该新型系统的实验测试平台. 本文是特别针对该新型的与建筑一体化太阳能双效集热器系统在被动采暖工作模式下的性能进行研究,建立了该系统在被动采暖工作模式下的与建筑耦合传热计算模型,同时进行了实验对比验证和研究,通过验证的理论模型,讨论了涂层特性对系统在被动采暖模式下的性能影响.

## 1 与建筑一体化太阳能双效集热器实验测试系统

为了对与建筑一体化太阳能双效集热器系统进

行研究,我们在合肥以热箱为基础搭建了该新型系统的实验测试平台. 如图1和2所示,该平台包括热箱房间、与建筑一体化太阳能双效集热器模块、上下风口、蓄热水箱、阀门和管路等. 热箱房间尺寸为南北宽 $2.90\text{ m}$ 、东西长 $2.97\text{ m}$ 和高 $2.60\text{ m}$ . 所有墙体为轻质保温墙体,墙体结构参数参见表1.

与建筑一体化太阳能双效集热器模块是本系统的核心部件,该模块是在普通管板型平板集热器的原理基础上改造而成,其区别于普通平板集热器的特点是双效集热器里有一个特别加宽的空气间隙空间,并且集热器背面上下位置开有两个矩形开口. 集热



图1 与建筑一体化太阳能双效集热器系统实验平台

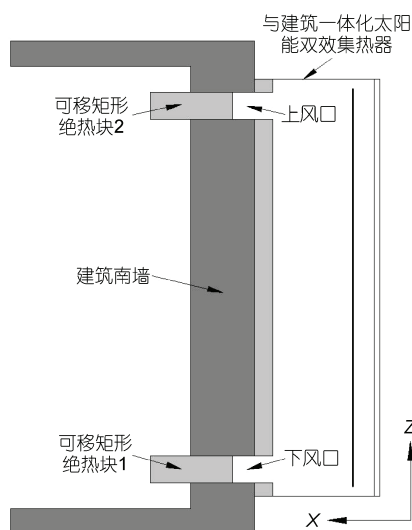


图2 与建筑一体化太阳能双效集热器系统结构剖面图

表1 热箱围护结构参数

| 结构简图                                                                              | 层 | 材料   | 厚度/m             | 导热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | 密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 热容/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | 发射率  | 吸收率  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---|------|------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------|------|------|
|  | 1 | 钢板   | 0.004            | 60.5                                                     | 7854                                | 434                                                     | 0.91 | 0.58 |
|                                                                                   | 2 | 聚苯乙烯 | 0.1(南墙)/0.05(其他) | 0.04                                                     | 15                                  | 1210                                                    | —    | —    |
|                                                                                   | 3 | 钢板   | 0.004            | 60.5                                                     | 7854                                | 434                                                     | 0.91 | —    |

模块直接安装在热箱房间南墙上,其结构尺寸为高 1.945 m × 宽 0.945 m, 空气层厚度为 0.16 m. 模块的绝热背板厚度 0.05 m, 绝热材料导热系数 0.036  $\text{W/m} \cdot \text{K}$ . 为增强模块的集热性能, 模块的铜铝复合吸热板正面喷涂有可吸收涂层(涂层吸收率 0.95, 发射率 0.15), 背面不作处理.

系统的工作原理是: 在被动采暖工作模式下, 阀门关闭, 系统的上下风口开启, 从而使建筑房间与集热器相通, 集热器特别设计的加宽的空气间隙层成为通风流道, 流道内空气在集热器加热而造成的热虹吸作用下自下而上流动, 从而向建筑室内供暖; 在集热水工作模式下, 系统上下风口关闭, 阀门开启, 蓄热水箱中的水通过管路和集热水管相通, 系统作为以自然循环方式工作的热水系统使用.

## 2 被动采暖模式下的理论模型

与建筑一体化太阳能双效集热器系统工作于被动采暖工作模式下时, 其传热过程涉及到建筑围护结构、房间空气和模块等部分. 针对本系统在被动采暖工作模式下的特点, 本文只针对与建筑一体化太阳能双效集热器模块部分特别给出其传热计算模型, 而关于其他所涉及到的建筑围护结构和房间空气等的传热计算参照文献[14].

当系统工作在被动采暖模式下时, 集热模块的工作介质是流道内的空气, 这不同于集热水模式下集热模块的工作介质是铜管中的水. 集热模块的玻璃盖板的作用是透过太阳辐射以被吸热体吸收, 同时阻止吸热体的热辐射直射透过. 吸热体吸收的热量通过两种方式传入室内: 通过热传导透过绝热背板附着的墙体进入室内和加热流道内空气直接带入房间内. 因此, 在被动采暖工作模式下, 集热模块的传热计算需涉及四个主要部分: 玻璃盖板、吸热体、流道和绝热背板. 在本文中, 绝热背板是当作所附着的墙体的另一附加的材料层, 因此绝热背板的传热计算是当作墙体来计算, 同样参见文献[14].

玻璃盖板作沿厚度方向的一维传热假设, 其热

传导方程为

$$\rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + s_{\text{solar}}, \quad (1)$$

外表面边界条件:

$$-\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \bigg|_{x=0} = q_L + h_{a,g} (T_a - T_g), \quad (2)$$

内表面边界条件:

$$-\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \bigg|_{x=d_g} = h_{g,d} (T_d - T_g) + h_{r,pt,g} (\overline{T_{pt}} - T_g), \quad (3)$$

其中  $\rho_g$ ,  $C_g$  和  $\lambda_g$  分别代表玻璃盖板的密度( $\text{kg/m}^3$ )、热容( $\text{J/kg}$ )和导热系数( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ );  $T_g$ ,  $T_a$ ,  $T_d$  和  $\overline{T_{pt}}$  分别表示玻璃盖板节点温度、环境温度、流道内空气温度和吸热体沿高度方向的平均温度(K);  $h_{a,g}$  和  $h_{g,d}$  分别表示玻璃盖板外表面的对流换热系数和处于流道内的玻璃盖板内表面的对流换热系数( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ );  $h_{r,pt,g}$  表示玻璃盖板内表面与吸热铝板间的辐射换热系数( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ );  $q_L$  表示玻璃盖板外表面与环境的热辐射换热( $\text{W/m}^2$ );  $s_{\text{solar}}$  表示玻璃盖板吸收太阳辐射产生的内热源( $\text{W/m}^3$ ):

$$s_{\text{solar}} = (1 - \tau_g) q_{\text{solar}} / d_g, \quad (4)$$

其中  $q_{\text{solar}}$  表示投射在玻璃盖板上的太阳辐射强度( $\text{W/m}^2$ ),  $\tau_g$  表示玻璃盖板透过率,  $d_g$  代表玻璃盖板厚度(m).

铜铝复合吸热板由若干组包含用于吸收太阳辐射的铝板和作为集热水模式下水管的铜管组成, 由于本系统在被动采暖模式下铜管中并没有介质, 而且铝板和铜管导热性能很好, 故可以用一组铝板和铜管的结合体代表吸热板整体, 并可作其温度分布沿高度方向的一维假设. 此外, 考虑到铜铝复合吸热板的铜管表面积很小, 而未作处理的铝板背面具有高反射率, 铜铝复合板背面有关的辐射换热可以忽略, 可得吸热板热平衡方程为



$$(\rho_p c_p d_p + \phi \rho_t c_t d_t) \frac{\partial T_{pt}}{\partial t} = d_p \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_p \frac{\partial T_{pt}}{\partial z}) + \phi d_t \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_t \frac{\partial T_{pt}}{\partial z}) + \alpha \tau_g q_{solar} + (2 + \phi) h_{pt,d} (T_d - T_{pt}) + h_{r,pt,g} (\overline{T_{pt}} - T_g), \quad (5)$$

其中 $\rho_p$ 和 $\rho_t$ 分别表示铝板和铜管密度( $\text{kg/m}^3$ );  $c_p$ 和 $c_t$ 分别表示铝板和铜管热容( $\text{J/kg}$ );  $\lambda_p$ 和 $\lambda_t$ 分别表示铝板和铜管导热系数( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ );  $\alpha$ 是涂层太阳吸收率;  $T_{pt}$ 表示吸热体节点温度(K);  $h_{pt,d}$ 表示吸热体表面对流换热系数( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ );  $h_{r,pt,g}$ 表示吸热体与玻璃盖板的辐射换热系数( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ );  $\phi$ 是定义的单根铜管与单片铝板的面积之比, 为

$$\phi = \frac{\pi D_t}{w_p}, \quad (6)$$

其中 $D_t$ 是铜管管径(m),  $w_p$ 是单片铝板宽度(m).

对于流道, 参见文献[14], 其温度分布作沿高度方向的一维假设:

$$\rho_d D_{gap} c_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = \rho_d V_d D_{gap} c_d \frac{dT_d}{dz} + (2 + \phi) h_{pt,d} (T_{pt} - T_d) + h_{g,d} (T_g - T_d) + h_{in,d} (T_{in} - T_d), \quad (7)$$

其中 $\rho_d$ ,  $c_d$ ,  $\lambda_d$ 分别表示流道内空气的密度( $\text{kg/m}^3$ )、热容( $\text{J/kg}$ )、导热系数( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ );  $D_{gap}$ 表示流道深度(m);  $T_{in}$ 表示处于流道内的绝热背板表面温度(K);  $h_{in,d}$ 表示绝热背板表面在流道内的对流换热系数( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ );  $V_d$ 表示流道内空气流速(m/s).

速度 $V_d$ 通过下式求解<sup>[15]</sup>:

$$V_d = \frac{\sqrt{2\beta g H (\bar{T}_d - T_r)}}{\sqrt{C_1 \left(\frac{A_g}{A_v}\right)^2 + C_2}}, \quad (8)$$

其中 $\beta$ 表示热扩散率( $\text{K}^{-1}$ );  $g$ 表示重力加速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $H$ 表示流道高度(m);  $\bar{T}_d$ ,  $T_r$ 分别表示流道内空气平均温度、房间空气温度(K);  $A_g$ 表示流道截面积( $\text{m}^2$ );  $A_v$ 表示风口面积( $\text{m}^2$ );  $C_1$ ,  $C_2$ 是常量参数.

### 3 结果和讨论

#### 3.1 实验和模型验证

为研究系统在被动采暖模式下的性能, 我们对工作于被动采暖模式下的系统进行了实验测试(2008年1月2号, 冬季, 合肥). 实验测试期间为9:00~17:00, 期间外环境平均温度为 $4.8^\circ\text{C}$ , 投射于南向竖

直墙的平均太阳总辐照强度为 $524.2 \text{ W/m}^2$ , 环境数据详见图3所示. 整个实验期间风口处于开启状态.

通过图4给出的上风口空气温度实验测试结果和理论计算结果的对比曲线, 可以发现采用本文所提的理论模型模拟计算的上风口空气温度变化曲线与实测数据吻合较好. 对比结果表明了本文针对于工作在被动采暖模式下的与建筑一体化太阳能双效集热器模块所建立的理论模型的正确性.

为了测量房间空气温度变化的详细特征, 实验测量系统在测试房间内沿高度方向(房间顶部附近、中部和底部附近)布置了三个铜-康铜热电偶. 图5所示是房间空气温度变化的模拟结果和实验结果的对比关系. 房间空气温度的实验测试结果显示: 期间房间空气平均温度达到 $24.7^\circ\text{C}$ , 而外环境平均温度仅

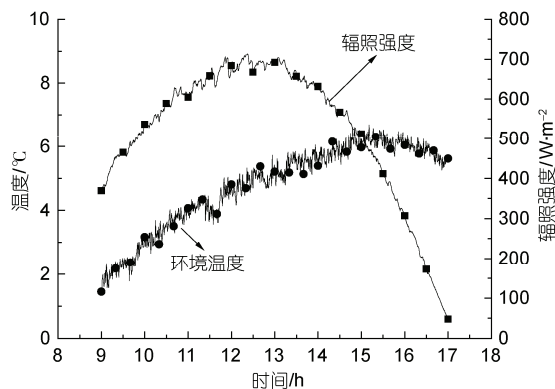


图3 被动采暖工作模式下, 环境温度及投射于南向竖直墙的太阳总辐照强度随时间变化曲线

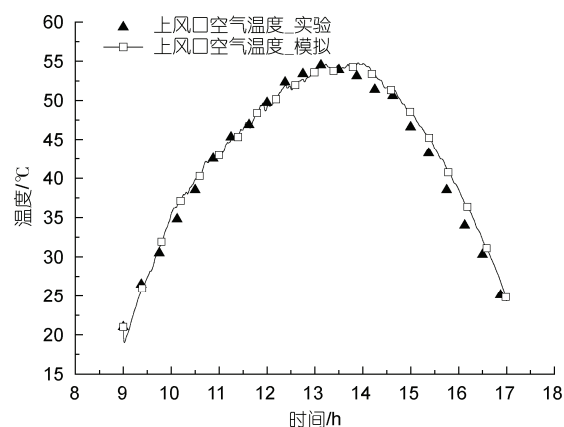


图4 被动采暖模式下, 上风口空气温度的计算结果和实测结果的对比关系

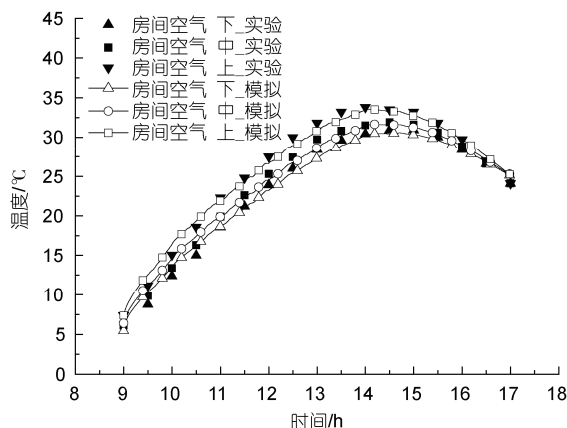


图5 房间空气温度变化的计算结果和实验结果的对比关系

为4.8℃, 这表明在被动采暖工作模式下, 系统对房间空气温度的提升作用很明显; 房间空气存在温度分层现象, 表现为房间上部空气温度高, 下部空气温度低, 期间上下位置最大温差为4.2℃, 平均温差约为2.7℃. 对比模拟结果和实验结果, 可以发现模拟结果也显示了与实验结果相同的房间空气温度分层现象, 并且各对应位置房间空气温度的模拟结果与实验结果吻合很好. 这进一步验证了本文关于系统在被动采暖模式下工作时所建立的理论模型的准确性.

### 3.2 涂层特性对系统性能的影响

实验系统的集热器模块的吸热板正面覆盖有黑镍选择性吸收涂层, 该涂层吸收率为0.95, 发射率为0.15. 另以同样具有高太阳吸收特性的普通黑漆涂料作为研究对象, 普通黑漆涂料的吸收率为0.95, 发射率为0.95. 图6所示是测试实验系统得到的房间平均温度随时间的变化曲线及在实验测试相同的环境条件下模拟得到的系统采用普通黑漆涂料时的房间平均温度随时间的变化曲线. 在与实验测试相同的环境条件下, 模拟得到的采用普通黑漆涂料的系统房间的期间平均温度为20.5℃, 比实验测试系统的低4.2℃, 其瞬时平均温度比实验测试系统低最大达到6.4℃, 而期间环境平均温度仅为4.8℃. 对比结果显示, 系统采用黑镍选择性吸收涂层可以极大地提高系统集热性能, 利于建筑房间获得更多的太阳得热.

研究结果显示由于工艺、材料等的差异, 不同黑镍选择性吸收涂层材料的特性并非固定, 具有一定的变化范围: 涂层吸收率变化区间为0.92~0.97, 发射率变化区间为0.11~0.225<sup>[16]</sup>. 不同特性的黑镍选择

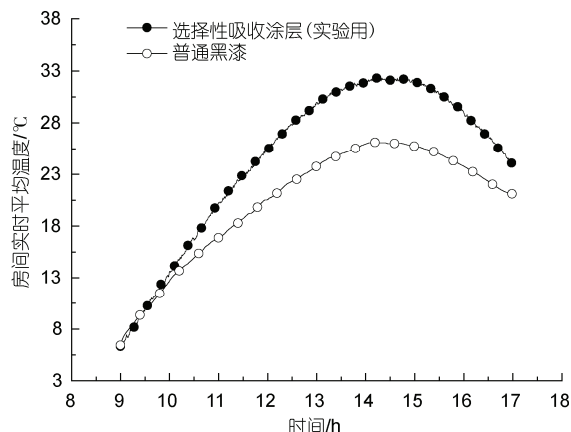


图6 在实验条件下, 分别采用实验用选择性吸收涂层和普通黑漆的系统的房间平均温度随时间变化的对比曲线

性涂层对系统性能的影响见图7所示. 结果所示, 涂层吸收率越高、发射率越低越有利于提高系统房间的空气温度. 其中, 涂层吸收率为0.97, 发射率为0.11时, 房间空气温度最高, 约为25.5℃; 涂层吸收率为0.92, 发射率为0.225时, 房间空气温度最低, 约为23.6℃. 图示结果还显示, 各条等涂层吸收率线基本为线性变化, 并且相互间平行且相邻两线间距基本相等. 这表明: 当涂层吸收率相同时, 系统房间空气的期间平均温度随涂层发射率线性变化; 当涂层发射率相同时, 系统房间空气的期间平均温度随涂层吸收率线性变化. 以涂层吸收率为0.95时为类, 系统房间空气的期间平均温度随涂层发射率的变化关系可表示为

$$T_r = 26.09798 - 8.972\varepsilon \quad (0.11 \leq \varepsilon \leq 0.225, \alpha = 0.95), \quad (9)$$

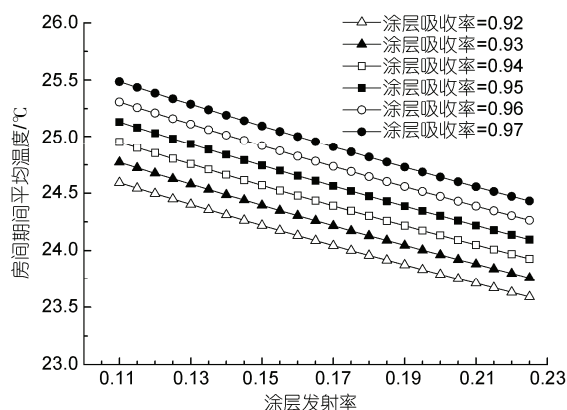


图7 在实验条件下, 房间空气期间平均温度随黑镍选择性涂层特性的变化关系

当涂层发射率为 0.15 时, 系统房间空气的期间平均温度随涂层吸收率的变化关系可表示为

$$T_r = 8.1546 + 17.46286\alpha \quad (0.92 \leq \alpha \leq 0.97, \varepsilon = 0.15), (10)$$

其中  $T_r$  表示房间空气期间平均温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\varepsilon$ 代表涂层发射率,  $\alpha$ 代表涂层吸收率.

## 4 结论

针对新型的与建筑一体化太阳能双效集热器系统的被动采暖工作模式, 本文建立了系统在该工作模式下与建筑耦合传热计算模型, 给出了系统在该工作模式下的实验测试结果, 并利用实验测试结果验证了模型的准确性, 此外, 还通过验证的理论模型, 模拟研究了系统性能受涂层特性的影响情况. 研究结论如下:

(1) 系统以被动采暖工作模式运行时, 与建筑一体化太阳能双效集热器系统在被动采暖工作模式下工作时对房间温度的提高作用明显. 实验测试结果显示, 在实验测试期间 9:00~17:00, 系统房间期间平均温度达到  $24.7^{\circ}\text{C}$ , 而外环境期间平均温度仅为  $4.8^{\circ}\text{C}$ .

(2) 实验测试结果显示, 系统房间内空气存在温度分层现象, 表现为房间上部空气温度高, 下部空气温度低, 期间上下位置最大温差为  $4.2^{\circ}\text{C}$ , 平均温差约为  $2.7^{\circ}\text{C}$ .

(3) 对比系统上风口空气温度随时间变化的模拟结果和实验结果, 可以发现模拟结果与实验测试结果吻合较好; 对比系统房间空气温度随时间变化的模拟结果和实验结果, 可以得到模拟结果得到了与实验结果相同的房间空气温度分层现象, 并且各对应位置房间空气温度的模拟结果与实验结果吻合很好. 这些结果表明了本文所建立的系统在该工作模式下与建筑耦合传热计算模型的准确性.

(4) 对比实验用黑镍选择性涂层与普通黑漆涂料对系统房间空气温度的影响情况, 可以发现, 系统采用黑镍选择性吸收涂层可以极大地提高系统集热性能, 利于建筑房间获得更多的太阳得热.

(5) 模拟研究表明, 不同特性的黑镍选择性涂层对系统性能的影响情况为: 当涂层吸收率相同时, 系统房间空气的期间平均温度随涂层发射率增大而线性降低; 当涂层发射率相同时, 系统房间空气的期间平均温度随涂层吸收率增大而线性升高.

## 参考文献

- 1 Smolec W, Thomas A. Some aspects of Trombe wall heat transfer models. *Energy Conv Manag*, 1991, 32: 269—277
- 2 Zalewski L, Chantant M, Lassue S, et al. Experimental thermal study of a solar wall of composite type. *Energy Build*, 1997, 25: 7—18
- 3 Chen B, Zhang Z, Chen X, et al. Field survey on indoor thermal environment of rural residences with coupled Chinese Kang and passive solar collecting wall heating in Northeast China. *Solar Energy*, 2007, 81: 781—790
- 4 Li Y G, Zhuang Z, Liu J P. Chinese Kangs and building energy consumption. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54: 992—1002
- 5 Ji J, Yi H, He W, et al. Modeling of a novel Trombe wall with PV cells. *Build Envir*, 2007, 42: 1544—1552
- 6 Wang X, Zhang Y P, Xiao W, et al. Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54: 920—928
- 7 Luca B, Roberto D, Marco S. Energy analysis of a passive solar system. *Rev Gen Therm*, 1998, 37: 411—416
- 8 Gan G. A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings. *Energy build*, 1998, 27: 37—43
- 9 Jan F K, Frank K. *Solar Heating and Cooling: Active and Passive Design*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1982
- 10 Al-Ajlan S A, Faris H Al, H Khonkar. A simulation modeling for optimization of flat plate collector design in Riyadh, Saudi Arabia. *Renew Energy*, 2003, 28: 1325—1339
- 11 Rockendorf G, Janssen S, Felten H. Transparently insulated hybrid wall. *Solar Energy*, 1996, 58: 33—38
- 12 Tomas M, Borivoj S. Facade solar collectors. *Solar Energy*, 2006, 80: 1443—1452
- 13 Norton B, Edmonds J E J. Aqueous propylene-glycol concentrations for the freeze protection of thermosyphon solar energy water heaters. *Solar Energy*, 1991, 47: 375—382
- 14 Ji J, Luo C L, Sun W, et al. An improved approach for the application of Trombe wall system to building construction with selective thermo-insulation facades. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54: 1949—1956
- 15 Duffie J A, Beckman W A. *Solar Engineering of Thermal Process*. New York: Wiley-Interscience, 1980
- 16 Wazwaz A, Salmi J, Hallak H, et al. Solar thermal performance of a nickelpigmented aluminium oxide selective absorber. *Renew Energy*, 2002, 27: 277—292