

# 太阳能炕的蓄热特性研究及其对睡眠热舒适度的影响

江清阳, 何伟, 季杰, 魏蔚

(中国科学技术大学热科学与能源工程系, 安徽合肥 230027)

**摘要:**结合北方传统火炕的特点,建立了与太阳能热水系统结合的太阳能炕理论模型,并搭建太阳能炕系统实验台,进行了实验测试,模拟计算结果与实验测试结果吻合较好.依据通过实验验证的模型,采用合肥实测的气象数据,分析了太阳能炕系统在冬天工作时对睡眠热舒适度和室内热环境的影响.结果显示:在室外平均温度 $0^{\circ}\text{C}$ 左右和炕面温度不超过 $35^{\circ}\text{C}$ 的条件下,室内空气温度维持在 $8\sim 15^{\circ}\text{C}$ 之间,在晚上21点太阳能热水系统对炕停止加热后,人所处的睡眠环境能保持在 $28.5\sim 34^{\circ}\text{C}$ 的热舒适温度区间,太阳能贡献率为34.5%.

**关键词:**太阳能炕;蓄热特性;睡眠环境;热舒适度;室内负荷

**中图分类号:**TK01 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2012.04.011

**引用格式:** Jiang Qingyang, He Wei, Ji Jie, et al. Study on thermal storage performance of solar KANG and thermal comfort for sleeping environments[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(4): 335-344.

江清阳, 何伟, 季杰, 等. 太阳能炕的蓄热特性研究及其对睡眠热舒适度的影响[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(4): 335-344.

## Study on thermal storage performance of solar KANG and thermal comfort for sleeping environments

JIANG Qingyang, HE Wei, JI Jie, WEI Wei

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** According to the traditional fire KANG characteristics, a solar heating system named solar KANG was proposed and a theoretical study of solar KANG system was presented. Experiments of the solar KANG system were conducted and experimental tests were performed. The theoretical results are in good agreement with the experiment results. Based on the validated model and real time meteorological data of Hefei, thermal comfort in sleeping environments and indoor thermal environments were studied when the solar KANG system was in operation in winter. Results show that indoor air temperature varies between  $8^{\circ}\text{C}$  to  $15^{\circ}\text{C}$  when outdoor temperature is about  $0^{\circ}\text{C}$  and KANG surface temperature is no more than  $35^{\circ}\text{C}$ . After stopping heating at 21 o'clock at night, sleeping environments can be kept at the comfortable range of  $28.5^{\circ}\text{C}$  to  $34^{\circ}\text{C}$  with thermal energy stored in KANG releasing gradually. Solar contribution rate is about 34.5%.

**Key words:** solar KANG; storage performance; sleep environments; thermal comfort; room thermal load

收稿日期:2011-12-27;修回日期:2012-04-01

基金项目:中国科学院知识创新计划(CX2090130014),国家自然科学基金(51078342)资助.

作者简介:江清阳,男,1972年生,博士生/讲师.研究方向:太阳能与建筑一体应用. E-mail: iamjqy@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:何伟,博士/副教授. E-mail: hwei@ustc.edu.cn

## 0 引言

众所周知,建筑能耗已占国民生产总能耗的三分之一左右,其中用于采暖和空调的能耗占建筑总能耗的 55%。因此建筑节能是节能减排的一个重要领域<sup>[1]</sup>。将太阳能利用和建筑一体化,是降低建筑能耗中常规能源比例的重要途径,一直是众多学者研究的一个重要方向<sup>[5-11]</sup>。

火炕作为在我国北方农村的一种与建筑一体化的采暖和睡眠设施相当普及。火炕通过炕体对炊事所生产的余热进行蓄放热,达到改善室内热环境和人的睡眠热舒适度的效果。文献[12-13]以大连地区农村住宅为对象,对被动式太阳能集热墙与新型节能灶炕耦合运行和单一节能灶炕运行进行了实验对比研究,从室内温湿度、炕表面温度、运行方式以及人为因素影响等方面对热环境进行了评价,得出前者虽然初期投资增加了 10%,但是冬季可节省供暖用煤 50%左右的结论。考虑现在农村直接燃烧生物质比例逐步降低的现状,并结合传统的火炕结构特点,与太阳能热水系统结合的太阳能炕将是炕的一个发展方向。相比传统火炕,太阳能炕具有清洁、污染少等特点;可以很好地利用炕体对太阳能进行蓄热,以改善室内热舒适度和睡眠热舒适度。因此具有重要的应用价值,同时也是太阳能与建筑一体化的一个有益探索。

本文结合北方传统炕的特点,建立了与太阳能热水系统结合的太阳能炕系统实验台,并进行了理论建模、数值分析和实验验证。并采用合肥地区实测的气象数据,利用经过实验验证的理论模型对太阳能炕的蓄放热特性、人体睡眠热舒适度和室内采暖

负荷等进行了研究,为优化设计太阳能炕系统提供了良好的依据。

## 1 太阳能炕系统实验

### 1.1 太阳能炕系统组成

太阳能炕系统(见图 1)主要由太阳能集热器、带辅助加热的蓄热水箱、水泵、水流量计及太阳能炕等组成。由太阳能集热器产生的热水通过蓄热水箱进行蓄热,然后通过水泵进行强制循环,使热水通过炕体内的盘管与炕体进行换热,从而将热量蓄积于炕体中以改善室内的热环境和睡眠热舒适度。

### 1.2 太阳能炕体结构

太阳能炕的面积为  $1.8\text{ m} \times 3.9\text{ m}$ ,占房间面积的 50%。太阳能炕内部结构共分为 5 层,从下至上分别为:混凝土支撑层(100 mm)、保温层(30 mm)、沙层(30 mm)、砖层(50 mm)、找平层(30 mm)。其中水管埋在沙层中,水管铺设采用回字形结构,进水和出水在炕的同一端,以保持炕面的温度均匀性。炕体四周侧面均采用保温板进行隔热。

### 1.3 可对比热箱

本实验中的太阳能炕建在一个对比热箱实验平台内。可对比热箱实验平台由大热箱和内置其中的围护结构尺寸完全相同的 3 间小热箱组成(见图 2)。大热箱采用绝热夹芯钢板制作,钢板厚 0.5 mm,内保温材料厚 100 mm。小热箱的净尺寸均为  $3.9(\text{开间}) \times 3.95(\text{进深}) \times 2.55\text{ m}^3$ ;窗户采用 5-6-5 普通中空玻璃窗,玻璃厚 5 mm,中空玻璃窗的空气层厚 6 mm,窗户面积  $1.2 \times 1.2\text{ m}^2$ ;南墙为 390 mm 厚的砖墙;小热箱的其他围护结构均采用绝热夹芯钢板制作,钢板厚 0.5 mm,其墙体及顶的内保温材料

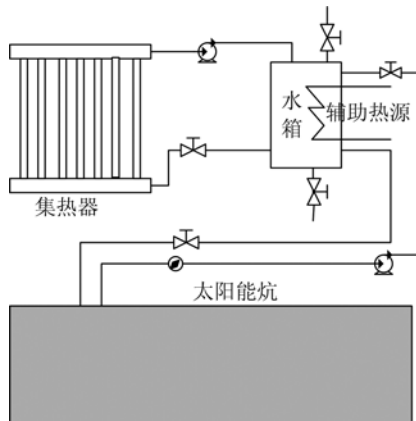


图 1 太阳能炕系统及太阳能炕实物照片

Fig. 1 Solar KANG system and solar KANG photo

料厚 50 mm,地板的内保温材料厚 300 mm. 小热箱按实验功能要求分别用作对比间、测试间 1 和测试间 2,分别记作 1#热箱、2#热箱和 3#热箱. 本实验在 3#热箱中进行,其中建一太阳能炕,见图 2.

### 1.4 测试系统

测量系统包括温度、流量测量、太阳辐射测量和室外环境气象测量.

温度测量采用若干铜-康铜热电偶和固定冰点补偿法测量方法,测量精度为  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 对太阳能炕,从炕面找平层到支撑层分别均匀分布 9,4,9,4,4 个热电偶以测量炕中各层的温度分布情况;炕中水管进口和出口温度各布局 1 个热电偶;对水管进水布局 1 个流量计以测量循环水的流量;小热箱内空气的温度测量考虑到空气分层现象,自地板到天花板垂直均匀布局 5 个热电偶;小热箱内外墙体表面各布局 1 个热电偶;窗户玻璃内外各布置 1 个热电偶;小热箱之间的夹道中分别布置 1 个热电偶以测量大热箱中的空气温度.

太阳辐射测量采用锦州阳光 TBQ-2 型总辐射表,端面与墙体平行. 室外环境气象测量采用锦州阳光 TRM-ZS2 型自动气象站,环境温度的测量精度为  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,太阳辐射的测量误差  $< 5\%$ ,风速的测

量精度为  $\pm 0.3\text{ m/s}$ .

实验是在室外环境完全动态的情况下进行的,系统中各个测试点的数据采集由数据采集仪 HP34970A 完成,实验程序设定每隔 1 min 采集 1 次数据.

### 1.5 实验条件

实验测试于 2010 年 4 月 26~27 日完成. 炕加热开始时间为 4 月 26 日早上 7:00,停止加热时间为 26 日下午 21:00. 测试时控制炕进水温度为  $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,流速为  $0.2\text{ m/s}$ (水管内径为 15 mm)的条件下进行;在实验测试期间将窗户绝热封闭,不考虑窗户的影响.

## 2 理论模型及方程离散

### 2.1 水管层换热模型

水管层以水管出水点为原点,建立坐标  $x-y$  坐标系,以水管中心间距(150 mm)划分网格,整个水管层共划分  $26 \times 12$  个节点,见图 3. 参照文献[14],为了合理简化模型,假设水的密度为定值. 不妨设图 3 右边水管控制体中水是从左到右方向流动,因为贝克来数(Péclet)很大,可以采用沿着水流动方向迎风差分格式,得到离散方程:

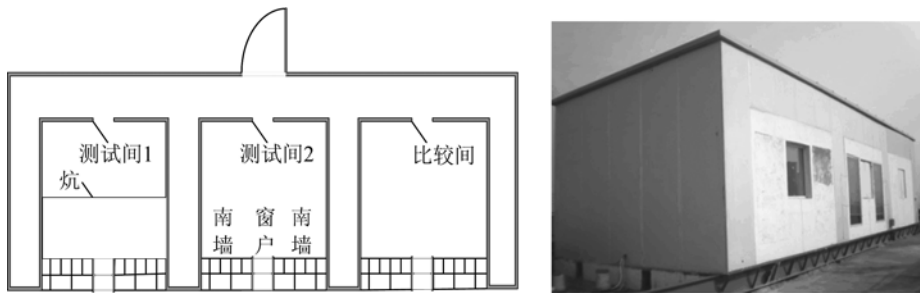


图 2 热箱平面布局图及热箱实物照片  
Fig. 2 Hot-box layout diagram and hot-box photo

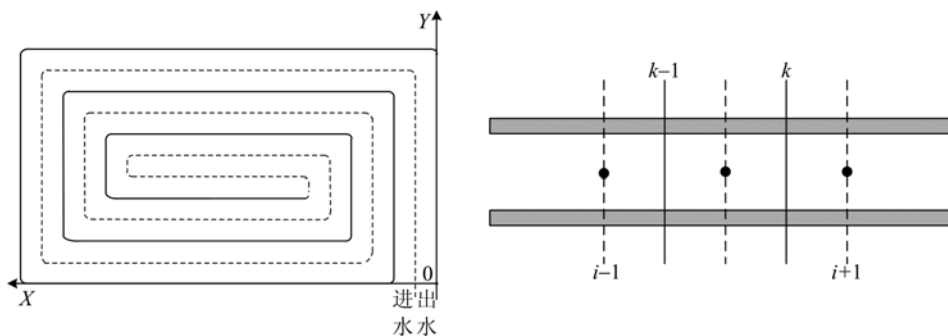


图 3 循环水的控制体  
Fig. 3 Control volume of circulating water

$$(T'_i - T_i^0) \frac{c_p \rho V_i}{\Delta t} = mc_p (T'_{i-1} - T'_i) + (H_f A_f)_i (T'_{wi} - T'_i). \quad (1)$$

式中,  $T'_i/K$ ,  $T_i^0/K$  表示控制体  $i$  在当前时刻和前一时刻的温度;  $c_p/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$  表示水的定压比热;  $\rho/(kg \cdot m^{-3})$  表示密度;  $V_i/m^3$  表示控制体体积;  $m/(kg \cdot s^{-1})$  表示水的质量流量;  $H_f/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$  表示控制体中水和水管内表面的对流换热系数;  $A_f/m^2$  表示控制体与水管接触的表面积;  $T'_{wi}/K$  表示当前时刻水管表面温度;  $\Delta t/s$  表示时间间隔. 将式(1)进一步整理为

$$T'_i = \frac{\Delta t}{C_i} \left( \frac{T'_{i-1} - T'_i}{R_m} + \frac{T'_{wi} - T'_i}{R_h} \right) + T_i^0. \quad (2)$$

式中,  $C_i = \rho V_i c_p$ ,  $R_m = \frac{1}{mc_p}$ ,  $R_h = \frac{1}{(H_f A_f)_i}$  分别表示控制体热容(单位:  $J \cdot K^{-1}$ )、控制体间的换热热阻(单位:  $K \cdot W^{-1}$ )以及控制体与水管壁面的对流换热热阻(单位:  $K \cdot W^{-1}$ ). 根据斯卡勃罗(Scarborough)收敛法则<sup>[15]</sup>式(2)的收敛条件为

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{C_i}{\sum_j R_{i,j}^{(-1)}} \right\}. \quad (3)$$

式中,  $R_{i,j}$  表示, 所有与控制体  $i$  相连接的热阻.

## 2.2 炕中导热各层的离散和能量平衡

除水管层外, 炕中各层的能量传递主要通过导热进行, 炕面与空气进行对流换热, 与小热箱内表面进行辐射换热. 本模型考虑三维导热. 三维导热方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (4)$$

按图 4 参照文献<sup>[16]</sup>进行离散, 通过推导可得到

$$T_{i,p+1} = \frac{\Delta t}{C_i} \left\{ \left[ \frac{T_{u,p+1} - T_{i,p+1}}{R_u} + \frac{T_{d,p+1} - T_{i,p+1}}{R_d} \right] + \left[ \frac{T_{w,p+1} - T_{i,p+1}}{R_w} + \frac{T_{e,p+1} - T_{i,p+1}}{R_e} \right] + \left[ \frac{T_{f,p+1} - T_{i,p+1}}{R_f} + \frac{T_{b,p+1} - T_{i,p+1}}{R_b} \right] + q \right\} + T_{i,p}. \quad (5)$$

式中,  $T/K$  表示节点温度;  $C_i = \rho V_i c$  表示控制体的热容(单位:  $J \cdot K^{-1}$ );  $\Delta t/s$  表示时间间隔;  $R/(K \cdot W^{-1})$  表示节点之间的热阻;  $q/W$  表示热源;  $p$  表示上一时刻;  $p+1$  表示当前时刻. 式(5)的收敛条件同样为式(3).

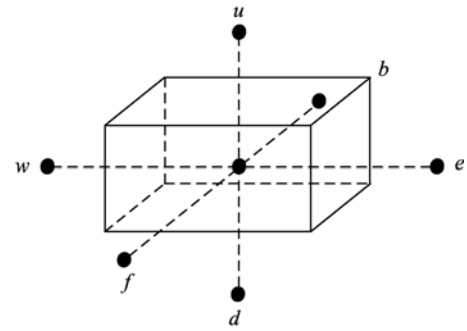


图 4 导热控制体

Fig. 4 Control volume of heat conducting

## 2.3 墙体的离散

墙体按一维导热处理, 与炕体导热部分一样, 可以得到如下离散公式(6), 式中各物理量的物理意义与式(5)一样, 其收敛条件同样为式(3).

$$T_{i,p+1} = \frac{\Delta t}{C_i} \left[ q_i + \sum \frac{T_{j,p+1} - T_{i,p+1}}{R_{i,j}} \right] + T_{i,p}. \quad (6)$$

## 2.4 室内空气温度计算

$$T_{airi,p+1} = \frac{\Delta t}{C_i} \left[ q_i + \sum \frac{T_{j,p+1} - T_{airi,p+1}}{R_{i,j}} \right] + T_{airi,p}. \quad (7)$$

式中,  $T_{airi}/K$  表示空气的温度;  $T_j/K$  表示围护结构内表面的温度及炕表面的温度;  $C_i = \rho V_i c$  表示房间空气的热容(单位:  $J \cdot K^{-1}$ );  $\Delta t/s$  表示时间间隔;  $R/(K \cdot W^{-1})$  表示空气与围护结构内表面及炕表面的换热热阻;  $q/W$  表示热源;  $p$  表示上一时刻;  $p+1$  表示当前时刻. 收敛条件同样为式(3).

## 2.5 边界条件及公式

### 2.5.1 各表面对流换热系数

由文献<sup>[17]</sup>得围护结构内表面的对流换热系数为式(8), 其中  $\Delta T/K$  表示表面与房间空气之间的温差.

$$h_{ci} = 2.03 \Delta T^{0.14}. \quad (8)$$

由文献<sup>[18]</sup>, 围护结构外表面的对流换热系数计算采用式(9), 其中  $V/(m \cdot s^{-1})$  表示环境风速.

$$h_{co} = 5.6 + 3.8V. \quad (9)$$

根据 ASHRAE(全美采暖、制冷及空调工程师协会)的推荐<sup>[19]</sup>, 炕上、下表面的对流换热系数为式(10)和(11), 其中  $\Delta T/K$  表示表面与房间空气之间的温差,  $X/m$  表示特征长度.

$$h_{cu} = 1.52 \Delta T^{(1/3)}, \quad (10)$$

$$h_{cd} = 0.59 (\Delta T/X)^{(0.25)}. \quad (11)$$

2.5.2 围护结构内表面辐射换热系数计算

考虑到室内各表面间热辐射换热存在热辐射被多次吸收反射等问题,两表面之间辐射换热系数  $h_{rj,i}$  可采用文献[20]中的表示:

$$h_{rj,i} = \frac{\epsilon_i \epsilon_j \sigma f_{i \rightarrow j} (T_j^2 + T_i^2)(T_j + T_i)}{[1 - (1 - \epsilon_i)(1 - \epsilon_j) f_{i \rightarrow j}^2 A_i / A_j]} + \epsilon_i \epsilon_j \sigma A_j (T_j^2 + T_i^2)(T_j + T_i) \cdot \sum_{k=1}^N \frac{(1 - \epsilon_k) f_{i \rightarrow k} f_{j \rightarrow k}}{A_k [1 - (1 - \epsilon_i)(1 - \epsilon_j)(1 - \epsilon_k) f_{i \rightarrow k} f_{k \rightarrow j} f_{j \rightarrow i}]} \quad (12)$$

式中,下标  $i, j$  和  $k$  分别代表对应围护结构内表面;  $A/(m^2)$  表示围护结构内表面面积,  $\epsilon$  表示围护结构内表面热发射率;  $f$  表示视角系数;  $T/K$  表示温度;  $\sigma$  为史蒂芬-波尔兹曼常数.

2.6 太阳能集热器系统

根据传热学知识,太阳能集热器的瞬时得热计算公式如下:

$$Q_s = A_c I \eta \quad (13)$$

式中,  $A_c/m^2$  为太阳能集热器的集热面积;  $I/(W \cdot m^{-2})$  为太阳能集热器运行期间投射到太阳能集热器倾斜面上的太阳辐照度;  $\eta$  为太阳能集热器瞬时效率.

根据文献[21-22],  $\eta$  的瞬时效率计算公式为

$$\eta = 0.682 - 2.32 \frac{T_{in} - T_a}{I} \quad (14)$$

式中,  $T_{in}/K$  集热器进口温度;  $T_a/K$  为环境温度;  $I/(W \cdot m^{-2})$  为太阳辐照度.

3 数值模拟

3.1 物性参数

系统相关材料的物性参数见表1.

表1 物性参数表

Tab.1 Parameters of the materials' physical properties

材料	导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	比热容 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
聚苯乙烯	0.04	15	1 210
水泥砂浆	0.93	1 800	1 050
红砖	0.84	2 200	960
沙	1	1 860	780
钢板	60.5	7 854	434
混凝土	0.84	2 200	920

3.2 模型验证

为研究太阳能炕对室内热环境的影响,我们对太阳能炕实验台系统编制了数值模拟程序并进行了数值模拟计算.程序模拟过程以实验中实际测量的气象数据、太阳能炕的入水温度以及大热箱中的空气温度作为模拟输入参数.

图5所示为炕加热期间室内空气温度变化曲线(见图5(a))和炕停止加热后室内空气温度变化曲线(见图5(b)).从图中可以发现房间内空气温度的模拟结果与实验测试结果吻合很好,整个对比期间,模拟结果与测试结果的最大误差为  $0.9^\circ C$ .另外由图可以看出,夜间在炕停止加热后室内空气温度保持在  $24.1^\circ C$  至  $26.2^\circ C$ ,波动很小,整个晚上室内空气最大的温差为  $2.1^\circ C$ ,而室外温度波动为  $6^\circ C$ .这

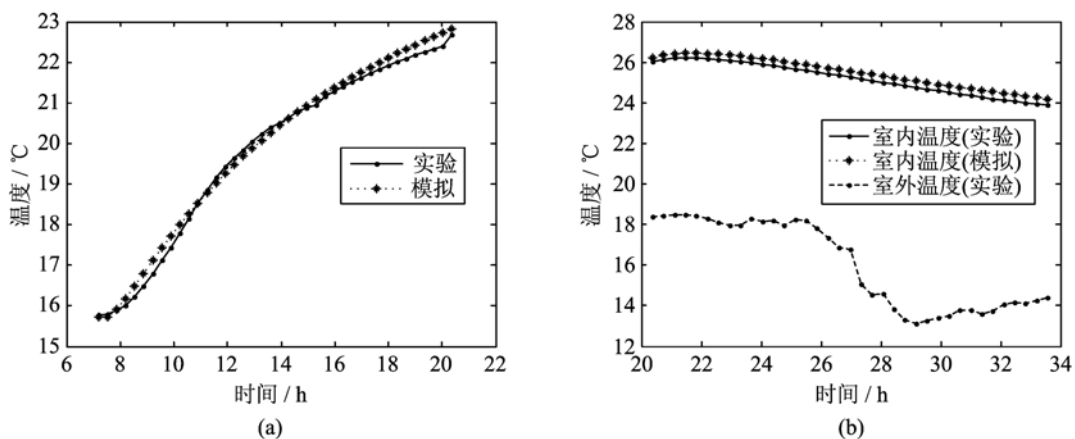


图5 炕加热阶段室内空气温度变化测量值与模拟值的对比(a), 以及炕停止加热后室内空气温度变化测量值与模拟值的对比(b)

Fig.5 Comparison between simulation values and experimental results of indoor air temperature when KANG was heated (a), and after heating KANG was stopped (b)

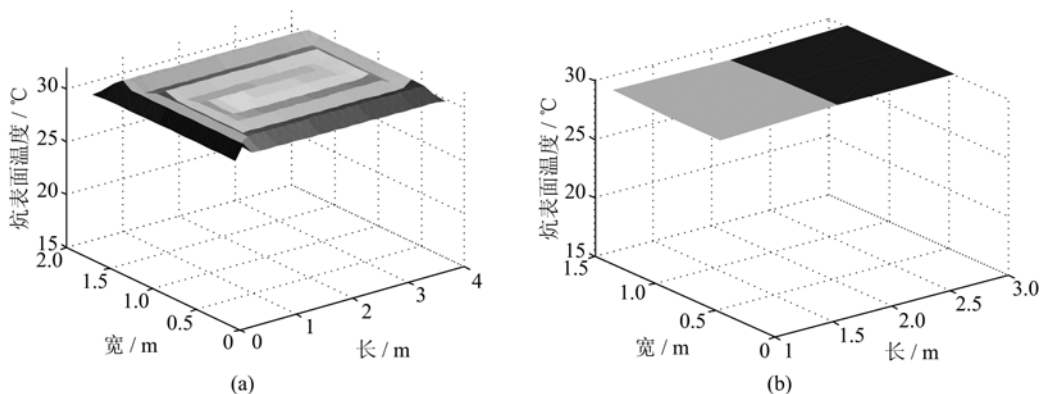


图 6 炕停止加热时炕表面温度分布模拟值(a)和测量值(b)

Fig. 6 (a) Simulation, and (b) experimental results of KANG surface temperature distribution when heating KANG was stopped

是由于炕良好的蓄放热特性,在炕停止加热后,炕表面与室内空气和围护结构内表面进行对流换热和辐射换热的结果.由此可见,炕作为一种与建筑一体化的良好蓄热设施,具有白天将太阳能进行蓄热,到晚上进行放热,从而平缓室内负荷的波动和空气温度波动,使得室内热舒适度大大提高的作用.

图 6 所示为炕停止加热时炕表面温度分布模拟值和测量值.由图可知,炕表面的温度均匀性较好,最高温度和最低温度之差在  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内,这能很好地满足人在睡眠环境下对炕表面温度均匀性的要求.另外从图中也可以看到,模拟得到的温度分布曲面和实验测量所得温度分布曲面所对应的温度值吻合很好,误差仅  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

图 7 所示为炕在加热期间炕中循环水进出口温度测量值与出口温度模拟值的对比.从图中可以看

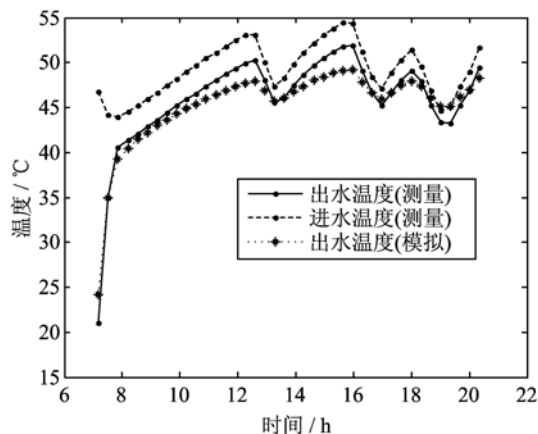


图 7 循环水出口温度模拟与实测对比

Fig. 7 Comparison between simulation values and experimental results of the temperature of circulating water outlet

出,在炕加热期间,循环水进出口温差在开始时较大,随着时间的推移,进出口温差逐渐趋向稳定.这是由于炕体温度在初始加热时与进水温度差值较大,随着加热的不断进行,炕体温度逐渐升高,因此炕体与循环水之间的温差逐步减少,从而换热量减少,因此出水温度与进水温度差值减少并逐步趋向稳定.另外从图中可以看出出水温度模拟值曲线与测量值曲线趋势吻合较好,最大温差在  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右.

综合以上结果,可以认为建立的数值模型是比较准确的.

## 4 炕的蓄放热对室内及人体睡眠热舒适度的影响

### 4.1 炕运行模式及模拟条件的设定

炕作为中国北方一种传统的采暖方式,其主要功能是保证人在睡眠环境下的热舒适度.为了研究太阳能炕对人体睡眠热舒适度的影响情况,本文将采用前已建立并验证的理论模型,模拟计算并分析炕的蓄热放热特性及其在睡眠环境下对人体热舒适度的影响.根据太阳能和炕的功能特点,设定炕的运行模式为如图 8 所示.早上 8 点至晚上 19 点,利用太阳能所采集的热水(如需要则增加辅助热源)对炕进行蓄热,同时利用炕表面进行采暖供热,以提高室内环境的舒适度;晚上 19 点至 21 点,炕继续加热但炕表面覆盖了两层棉被(一层为晚上人睡觉时覆盖的,一层为垫在炕表面的),两层棉被的厚度分别为  $20\text{ mm}$  和  $60\text{ mm}$ ,棉被主要材质是棉花,其物性为:密度  $117\text{ kg/m}^3$ ,导热系数  $0.049\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ <sup>[23]</sup>,此时不考虑人体散热;晚上 21 点到第 2 天早晨 8 点,不对炕进行加热,此时炕上依然覆盖两层

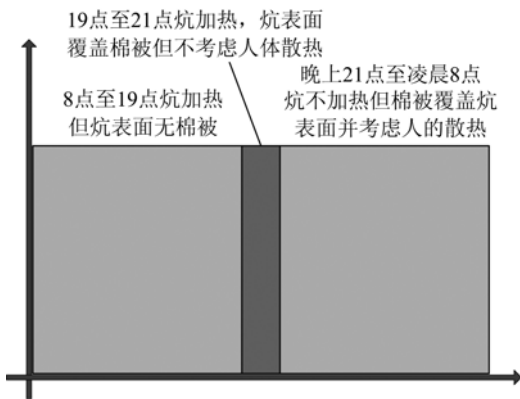


图 8 炕运行工况

Fig. 8 Operating condition of KANG

棉被并考虑睡眠条件下人体散热量  $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  [24].

所针对的房间依然是前面所描述的实验台所在房间,为了方便研究炕的特性,不考虑窗户的影响(计算时窗户用砖墙替代).图 9 所示为合肥在 2009 年 1 月 12 日至 13 日的全天实测气象数据,取 1 月 12 日 8 点至 1 月 13 日 8 点之间的气象数据作为模拟输入气象数据.炕的入水温度设定为  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,水的流量为  $0.053 \text{ kg/s}$ .对模型进行连续 7 天模拟后,变化趋于稳定,把第 7 天的模拟结果作为讨论依据.

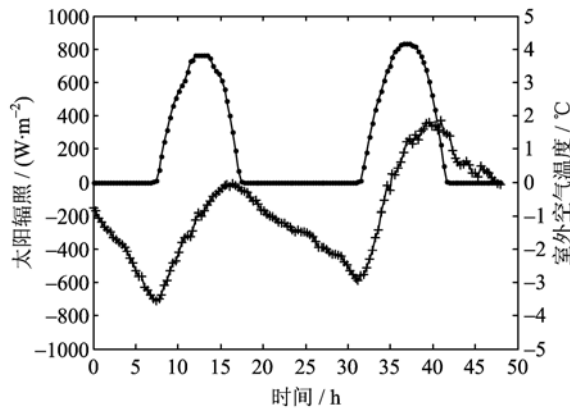


图 9 室外气象数据

Fig. 9 Outdoor meteorological data

另外在分析采暖负荷时,房间温度按  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  进行采暖负荷计算.

### 4.2 模拟结果讨论

#### 4.1.1 相关参数的定义

##### (I) 房间瞬时负荷

$$q = \sum h_{c,i} A_i (T_L - T_{\text{indoor}}). \quad (15)$$

式中,  $q/\text{W}$  表示房间的瞬时采暖负荷;  $h_{c,i}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$  代表围护结构内表面与室内空气的换热系数;  $T_L/\text{K}$  表示围护结构内表面温度;  $T_{\text{indoor}}/\text{K}$  表

示室内空气温度(本模拟设定为  $291 \text{ K}$ ).

##### (II) 炕瞬时蓄热或放热

$$q_s = \sum_{z=1}^Z \sum_{y=1}^Y \sum_{x=1}^X \rho_{xyz} c_{xyz} V_{xyz} \frac{T_{xyz}^{\text{new}} - T_{xyz}^{\text{old}}}{\Delta t}. \quad (16)$$

式中,  $q_s/\text{W}$  表示炕的蓄热或者放热;  $\rho_{xyz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$  表示控制体的密度;  $c_{xyz}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$  表示控制体的比热容;  $V_{xyz}/\text{m}^3$  表示控制体的体积;  $T_{xyz}^{\text{new}}/\text{K}$  表示当前时刻的控制体的温度;  $T_{xyz}^{\text{old}}/\text{K}$  表示上一时刻控制体的温度;  $\Delta t/\text{s}$  表示时间间隔.

##### (III) 太阳能贡献率的定义及计算条件

太阳能贡献率为运行期间炕加热所需总能量和辅助电加热所耗能量之差与炕加热所需总能量之比.本模拟中设蓄热水箱的体积为  $1 \text{ m}^3$ ,水箱的初始温度为  $39 \text{ }^\circ\text{C}$ (为前一天运行结束后水箱中的水考虑夜间散热损失后的温度),假定不考虑蓄热水箱中的水的分层;集热器的面积设定为  $6 \text{ m}^2$ ;集热器的入口温度取水箱瞬时平均温度;太阳辐照取早上 8 点至下午 17 点的实测气象数据.按式(13)和式(14)可得水箱从太阳能集热器所获瞬时得热,由水箱瞬时平均温度与炕瞬时出口温度可以得到水箱的瞬时失热,从而可以得到水箱的瞬时平均温度.由上述分析,辅助电加热的瞬时功率和炕所需的瞬时功率为

$$q_{\text{fu}} = \dot{m} c_p (50 - T_{\text{pi}}), \quad (17)$$

$$q_{\text{kang}} = \dot{m} c_p (50 - T_{\text{out}}). \quad (18)$$

式中,  $q_{\text{fu}}/\text{W}$  和  $q_{\text{kang}}/\text{W}$  分别为辅助电加热功率和炕所需的瞬时功率;  $\dot{m}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$  为炕循环水的质量流量;  $T_{\text{pi}}/^\circ\text{C}$  和  $T_{\text{out}}/^\circ\text{C}$  为水箱中水的平均温度和炕循环水出口温度.

#### 4.1.2 结果讨论

图 10 所示为房间瞬时采暖负荷的变化曲线.由

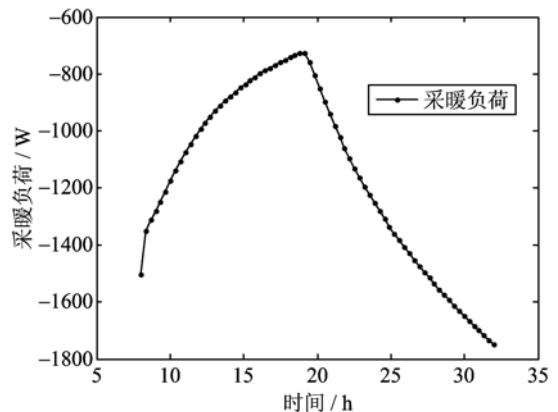


图 10 房间瞬时负荷曲线

Fig. 10 Instantaneous heating loads of the room

图 10 可见,在节 4.1 所设定模式下炕无法完全承担室内采暖负荷的需要,但可以提供部分采暖负荷,尤其在炕表面直接散热的情况下(8 点至 19 点).当炕表面盖上棉被后(晚上 19 点至次日 8 点),由于棉被是良好的保温隔热材料,所以由炕向空气的瞬时放热量急剧减少.因此房间的采暖负荷快速变大.考虑到这时人主要是在床上休息,所以不影响人体的舒适度.另外,对于白天炕不能完全提供采暖负荷的情况,可以考虑太阳能被动采暖作为补充,通过与炕相结合的方式,满足白天室内采暖负荷的需要.

图 11 所示为房间空气温度、炕表面温度和室外空气温度变化曲线.从图中可以看出,室外温度在 0℃左右情况下,室内空气温度维持在 8℃至 15℃,而炕面温度在 23℃至 35℃之间变化.在炕面没覆盖棉被的情况下,室内空气温度平缓升高至 15℃,而在炕停止加热后的 13 h 内,室内温度最低也可以达到 8℃,比室外温度高 8℃,这说明炕在加热阶段的蓄热和停止加热后的放热大大促进了室内舒适度的提高.如果将太阳能被动采暖与炕耦合作用,白天室内热舒适度将会更好.

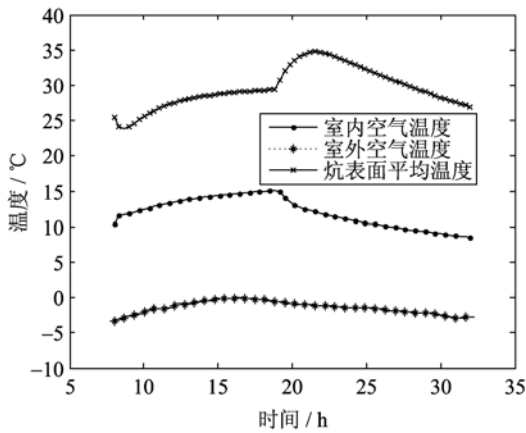


图 11 房间空气温度、炕表面平均温度和室外空气温度变化曲线  
Fig. 11 Temperature curves of indoor air, KANG surface and outdoor air

图 12 所示为炕覆盖上棉被后(晚上 19 点至次日早晨 8 点)人睡眠所处环境的温度变化曲线及室内室外空气温度变化曲线.从图中可以看出,在室外温度在 0℃左右的情况下,人体睡眠所处的环境在人体散热和炕放热双重耦合作用下,温度在 28.5℃至 35℃之间波动.根据文献[24],人体在睡眠环境下的舒适温度范围为 29℃至 34℃之间,因此,炕在夜间的放热能很好地保障人的睡眠热舒适度.

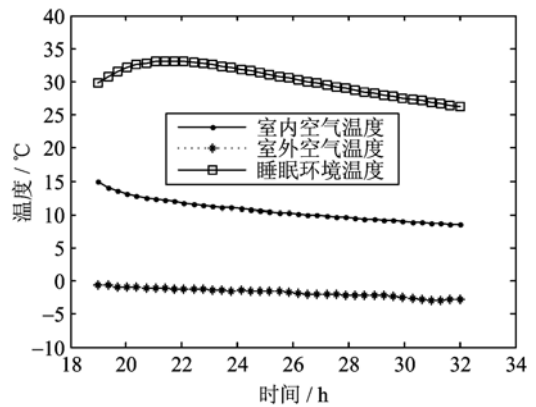


图 12 人所处睡眠环境温度和室内室外空气温度变化曲线  
Fig. 12 Temperature curves of indoor air, outdoor air and human sleeping environment

图 13 所示为整个炕体在运行期间的瞬时蓄热放热曲线,图中正表示蓄热,负表示放热.由图可知,炕在加热开始阶段炕蓄热功率较大,最大达到 2 100 W,随着加热时间的推移,炕瞬时蓄热量逐渐变小,直至零.这是由于炕表面向室内放热与炕本身所得到热量达到平衡所致.但当炕表面在 19 点覆盖了棉被后,由于棉被的良好隔热作用,使得炕找平层温度升高,从而整个炕体的瞬时蓄热量突然由 0 变化为 700 W 左右,然后逐渐下降.在 21 点关掉炕加热后,炕体开始放热,从图中可以看出炕体最大瞬时放热为 700 W 左右,最小为 250 W 左右.炕放热过程开始较大,逐渐减少,但趋势与蓄热过程比较为平缓,这样有利于保持人体所处睡眠环境的热舒适度.

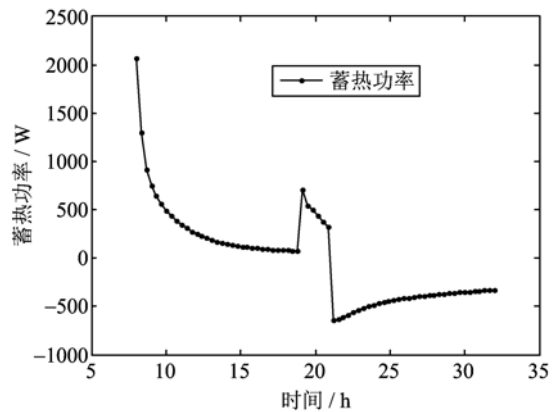


图 13 炕蓄热放热率随时间变化曲线  
Fig. 13 Curve of energy storage or release rate of KANG with the time

图 14 所示为炕出水温度的变化曲线及炕所需热源随时间变化曲线.由图 14(a)可知,炕进水温度保持在 50℃的情况下,出水温度在 30℃至 47.5℃



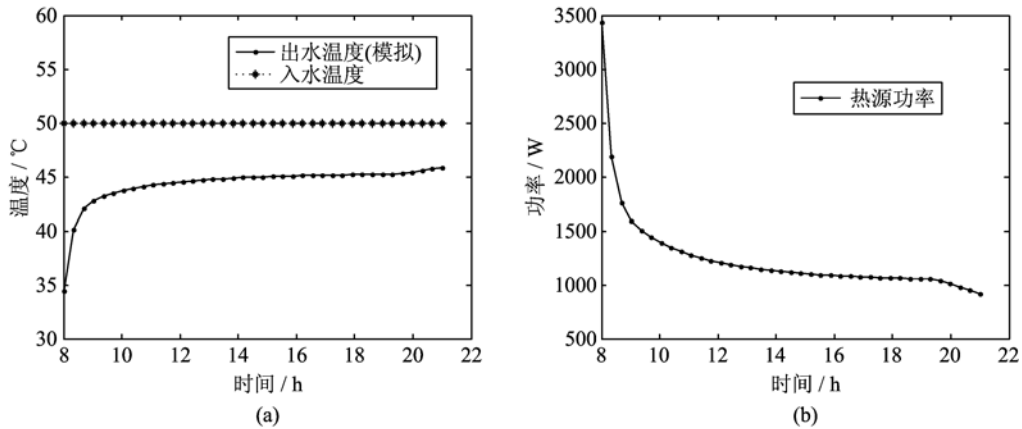


图 14 循环水出口温度的变化曲线(a),及炕所需热功率变化曲线(b)

Fig. 14 Curves of circulating water outlet temperature (a), and thermal power supplied to KANG (b)

之间变化,炕加热初始,出水温度较低,随后逐渐趋向平稳,在 19 点炕表面覆盖了棉被后,炕出水温度有所升高.由图 14(b)可知,炕所需的热源功率开始阶段较高,达到 3 400 W,随着时间的推移,所需热源功率逐渐降低并趋于平稳,在 19 点炕表面覆盖了棉被后,所需热源功率逐渐下降,最低达 900 W 左右.另外由图 14 及所对应的时间关系可以得到在炕加热期间共需要热量为  $5.87 \times 10^4$  kJ.

图 15 表示炕所需功率与辅助加热功率的关系.由图中可以看出,在早晨刚开始加热的时候辅助加热所需功率较大,甚至大于炕所需加热功率.这是由于在炕循环水入口温度一定的情况下,水箱中水温度升高速度较慢,所以开始阶段辅助加热提供的热量不光提供给了炕,还部分提供给水箱.随着时间推移,水箱平均温度逐渐提高,所需辅助功率逐渐减少.到下午 16 点后随着太阳辐照减弱,辅助功率又

逐渐增加.根据计算,在该模式下运行,太阳能的贡献率为 34.5%.

## 5 结论

本文针对太阳能炕系统建立了数值模型,并通过实验测试进行了验证.模拟结果和实验测试结果对比表明,房间空气温度变化曲线、炕表面温度分布曲面和水管出水温度变化模拟曲线都与实验结果吻合较好,房间空气温度、炕表面温度分布和出水温度模拟结果与实测值最大绝对误差分别为 0.9,1.1 和 2 °C.

依据验证的理论模型,根据实测气象数据模拟了炕在定温供暖模式下的运行特性.根据模拟结果得到如下结论:

(I) 考虑炕的使用特点,炕能够部分承担室内采暖负荷.室外温度在 0 °C 左右的情况下,室内空气温度维持在 8 °C 至 15 °C,有效提高了室内环境的热舒适度.

(II) 晚上 21 点炕停止加热后,在人体散热与炕放热耦合作用下,人所处的睡眠环境能保持在 28.5 °C 至 34 °C 的舒适温度,这正是人体睡眠所需要的舒适环境.这说明炕的蓄热特性可以和太阳能的特点很好地耦合,充分利用白天有太阳时对炕进行蓄热用于晚上保证人体所处的睡眠环境的热舒适度.

(III) 在实测气象数据条件下的模拟结果表明太阳能炕的太阳能贡献率为 34.5%,这表明太阳能炕可以减少常规能源的利用.下一步拟进一步研究该系统的结构设计、运行控制模式等以提高太阳能贡献率,使其在太阳能资源较好的农村具有更好的

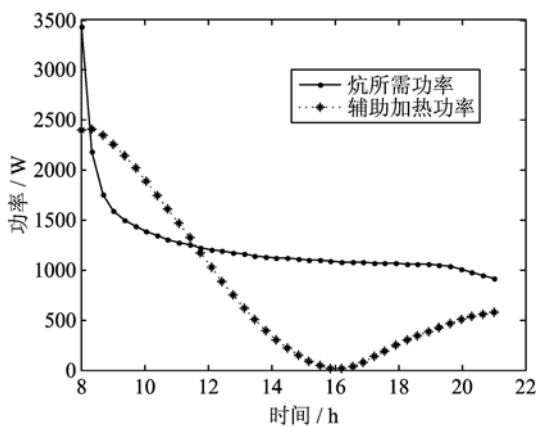


图 15 炕所需功率与辅助加热功率

Fig. 15 Thermal power supplied to KANG and auxiliary heating power

推广价值.

#### 参考文献(References)

- [1] 王秀明. 建筑节能的重要途径:太阳能利用与建筑一体化[J]. 建筑节能, 2006, 3: 38-39.
- [2] 易桦. 新型 PV-Trombe 墙系统的理论和实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2007.
- [3] 葛新石, 龚堡, 陆维德, 王义方. 太阳能工程:原理和应用[M]. 学术期刊出版社, 1988.
- [4] Tyagi V V, Buddhi D. PCM thermal storage in buildings: A state of art [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(6): 1 146-1 166.
- [5] Chow T T, Fong K F, He W, et al. Performance evaluation of a PV ventilated window applying to office building of Hong Kong[J]. Energy and Buildings, 2007, 39: 643-650.
- [6] Han Jun, Lu Lin, Yang Hongxing. Thermal behavior of a novel type see-through glazing system with integrated PV cells[J]. Building and Environment, 2009, 44: 2 129-2 136.
- [7] Pei Gang, Ji Jie, Jiang Aiguo, et al. Performance analysis of PV double-glazed window [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(4): 441-444.  
裴刚, 季杰, 蒋爱国, 等. 光伏双层窗的综合性能研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(4): 441-444.
- [8] Yang Hongxing, Ji Jie. Study on the heat gain of a PV wall[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 1999, 20(3): 270-273.  
杨洪兴, 季杰. BIPV 对建筑墙体得热影响的研究[J]. 太阳能学报, 1999, 20(3): 270-273.
- [9] Ji Jie, He Wei. Dynamic prediction of the annual heat gain and power output of a PV-wall[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(3): 311-316.  
季杰, 何伟. 光伏墙体年发电性能及年得热动态预测[J]. 太阳能学报, 2001, 22(3): 311-316.
- [10] Chen Yuxiang, Galal K, Athienitis A K. Modeling, design and thermal performance of a BIPV/T system thermally coupled with a ventilated concrete slab in a low energy solar house: Part 2, ventilated concrete slab [J]. Solar Energy, 2010, 84(11): 1 908-1 919.
- [11] Wang Xin, Zhang Yinping, Xiao Wei, et al. Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope[J]. Chinese Sci Bull, 2009, 54(6): 920-928.
- [12] 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 [J]. Solar Energy, 2007, 81: 781-790.
- [13] Chen Bin, Zhuang Zhi, Yang Wenxiu. Indoor thermal environment of rural residences in a coupled heating pattern of passive solar-collected wall and oven-kang combination [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2006, 36(2): 20-24.  
陈滨, 庄智, 杨文秀. 被动式太阳能集热墙和新型节能灶炕耦合运行模式下农村住宅室内热环境的研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(2): 20-24.
- [14] MacArthur J W, Grald E W. Unsteady compressible two-phase flow model for predicting cyclic heat pump performance and a comparison with experimental data [J]. International Journal of refrigeration, 1989, 12(1): 29-41.
- [15] 潘阳. 计算传热学理论及其在多孔介质中的应用[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [16] Athienitis A K. Numerical model of floor heating system[J]. ASHRARE Transactions, 1994, 13(3): 1 024-1 029.
- [17] Khalifa A J N, Marshall R H. Validation of Heat transfer coefficients on interior building surfaces using a real-sized indoor test cell[J]. Heat mass transfer, 1990, 33: 2 219-2 236.
- [18] Ong K S, Chow C C. Performance of a solar chimney [J]. Solar Energy, 2003, 74(7): 1-17.
- [19] ASHRAE Handbook fundamentals [M]. Atlanta, USA: ASHREA, 1993.
- [20] Clarke J A. Energy simulation in building design [M]. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2001: 254.
- [21] Huang B J, DU S C. A performance test method of solar thermosyphon systems[J]. Transactions of the ASME, 1991, 113: 172-179.
- [22] He Zinian, Jiang Fulin, Ge Hongchuan, et al. Study on thermal performances of heat pipe evacuated tubular collectors[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 1994, 1(15): 73-82.  
何梓年, 蒋富林, 葛洪川, 等. 热管式真空管集热器的热性能研究[J]. 太阳能学报, 1994, 1(15): 73-82.
- [23] 杨世铭, 陶文全. 传热学[M]. 第五版. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [24] Lin Zhongping, Deng Shiming. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics-Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics[J]. Building and Environment, 2008, 43: 905-916.