

# 石蜡复合混凝土太阳能相变蓄能炕系统的热性能研究

黄超, 郑辉, 杨振民, 马秀琴, 岳燕敏

(河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300401)

**摘要:**设计了一种以相变材料石蜡与混凝土相结合相变蓄能炕采暖系统,并将其与传统火炕、纯混凝土炕和纯石蜡炕进行了对比分析。在供热温度 35℃、供热流量 0.95 L/min 实验条件下,测试了系统炕面温度、石蜡温度、进出口温度和炕面热流密度等参数。实验结果表明:石蜡混凝土炕面温度分布均匀,其炕头、炕中和炕尾温度无明显差异,供热效果与纯石蜡炕相近,且系统初投资比纯石蜡炕节省了 30%。石蜡混凝土炕面平均温度为 33.29℃,比传统火炕高 10℃,炕面降温速率却仅为传统火炕的 15%。与纯混凝土炕相比,由于结构不同,石蜡混凝土炕体在炕面平均温度、夜间温度下降速率、炕面热流密度和供回水温差特性上均优于纯混凝土炕。

**关键词:**石蜡混凝土相变蓄能炕;经济性;炕面温度;热流密度;热舒适性

中图分类号:TK02

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2018)01-0111-06

## Study on solar-energy phase change storage kang Compositd by paraffin and concrete

HUANG Chao, ZHENG Hui, YANG Zhenmin, MA Xiuqin, YUE Yanmin

(School of Every and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:**The phase change storage kang heating system is designed by using phase change material composited by paraffin and concrete (Paraffin-concrete), and comparisons have been made of the new heating system with the traditional kang, pure concrete kang and pure paraffin kang. At the set temperature of 35℃ and the flow rate of 0.95 L/min, the temperature of each monitoring point is measured. The results show that the paraffin-concrete kang surface temperature is evenly distributed, heating effect is remarkable same as pure paraffin kang, and 30% initial investment can be saved compared with the pure paraffin kang. Paraffin-concrete kang surface average temperature can reached 33.29℃, 10℃ higher than the traditional kang, paraffin-concrete kang surface cooling rate is only 15% compared with traditional kang. For the characteristics of kang surface temperature, temperature cooling rate in the night, kang surface thermal flux and temperature difference between supply and back-water pipes, the paraffin-concrete kang is better than the pure concrete kang due to the different structures.

**Key words:**paraffin-concrete solar-energy storage kang; economical efficiency; kang surface temperature; heat flux density; thermal comfort

我国北方冬季寒冷,农村主要采暖方式有火炕、火炉和土暖气等方式<sup>[1]</sup>,传统的燃煤或燃生物质火炕具有污染严重,热效率低,炕面温度不均匀等弊端,推广节能舒适性火炕在我国农村有着重要意义。

近年来,一些学者通过利用太阳能或相变材料储热原理提出了新型炕采暖系统。张玲等<sup>[2]</sup>设计了太阳能吊炕,其蓄热填充层为细沙:黏土:水泥=4:1:1的混合材料,盘管为 $\Phi 20$ 的地暖管。通过对其进行试验研究和经济性分析,结果表明太阳能炕面温度分布均匀满足人体舒适度,经济

回收期为 5 年。冯国会等<sup>[3]</sup>设计了一种末端装置为毛细管网的太阳能炕系统,该系统在传统火炕的基础上敷设了毛细管网,采用太阳能和电辅助加热对其供暖。实验表明太阳能炕比传统火炕炕中与炕尾温差小 2℃,炕头与炕中温差小 5℃,炕面平均温度提高 3.4℃,太阳能炕温度分布均匀。李刚,池兰等<sup>[4]</sup>在传统火炕上加入了石蜡,石蜡盛装在镀锌钢板容器里,夜间依旧通过添加薪柴对其加热。该实验测试了传统火炕房间与相变火炕房间的相关温度,并对火炕热舒适性能进行了对比,测试结果显示传统火炕表面温度温差大,最

高可达  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而相变蓄能火炕炕面温度分布均匀，最高温差仅为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。江清阳等<sup>[5]</sup>设计了一种太阳能炕，其内部结构共分为5层，从下到上分别为：混凝土支撑层、保温层、沙层、砖层、找平层，其中水管埋在沙层中，通过对太阳能炕进行数值模拟，验证了太阳能炕在停止工作后能有效地满足人们在晚上对睡眠环境和室内温度的需求。崔玉清，季杰等<sup>[6]</sup>提出了 Trombe 墙和太阳能炕结合的采暖系统，太阳能炕结构为传统炕底部加盘管形式，对该系统的炕面温度和室内温度进行了数值模拟，得出该系统在 Trombe 墙和太阳能炕耦合运行条件下供暖效果最佳，且在有助加热工况下室内热环境更加平稳。郭敏，马秀琴等<sup>[7]</sup>对纯石蜡炕进行了实验研究，炕体底部为加热盘管，炕盒内部全部填充石蜡。实验结果显示夜间炕面温度平均保持在  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可满足夜间睡眠质量要求。

本实验系统内部蓄热层采用石蜡复合混凝土的结构，利用石蜡相变储热特性和混凝土储热性能进一步节省了能源消耗，节省了系统的初投资。另一方面，本文将石蜡混凝土炕与传统火炕、纯混凝土炕和纯石蜡炕分别进行了比较，经过实验分析对比，石蜡混凝土炕供热性价比最高，且能满足人们冬季供暖舒适性要求。

## 1 实验系统及方案

### 1.1 相变材料的选择

相变材料 (Phase Change Materials 缩写为 PCM) 是发生相态变化时伴随有能量转换和变化的物质，具体表现为物质热焓值发生增减变化。

相变材料的选择<sup>[8]</sup>要求相变材料具有储热密度大，稳定性好，无毒、无腐蚀、耐燃，相变体积变化小和相变温度合适等特点。针对本实验的要

求，我们选取了有机、固液、低温的相变材料—石蜡。

利用差示扫描量热仪 (differential scanning calorimeter, DSC) 对石蜡进行了测试，其相变特性曲线如图1所示：相变材料的两个吸热峰值表示固固相变和固液相变吸热峰，固液相变吸热峰值温度为  $34.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，吸热峰的切线与基线延长线的交点为外推熔点，图中可看到其值为  $32.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相变潜热为  $133.3\text{ J/g}$ 。

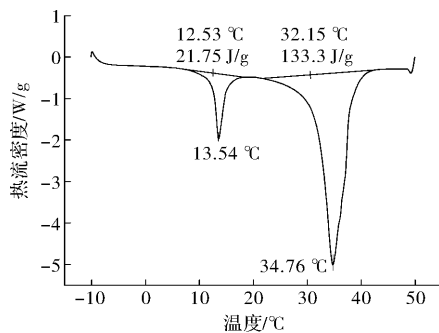


图1 石蜡 DSC 测试曲线图

Fig. 1 Paraffin DSC test curve

### 1.2 实验系统

该实验房地处天津，实验在冬季供暖季运行，运行期间房间门窗处于关闭状态。实验装置主要由热水循环系统、采暖末端和温度测试系统组成，采暖末端分为石蜡混凝土炕和纯混凝土炕两种形式，炕均为小型模型炕，供热时间为  $8:30-17:30$ ，夜间放热，供热温度为  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，供水流量为  $0.95\text{ L/min}$ 。热水循环系统采用电加热的方式模拟冬季太阳能热水系统，供水水箱经过供水管分别进入石蜡混凝土炕和纯混凝土蓄能炕采暖末端，供热完成后通过回路返回水箱，以此进行循环使用。末端装置的盘管为不锈钢材质，管径设计尺寸为  $10\text{ mm}$ ，管间距为  $50\text{ mm}$ ，实验系统图如图2所示。

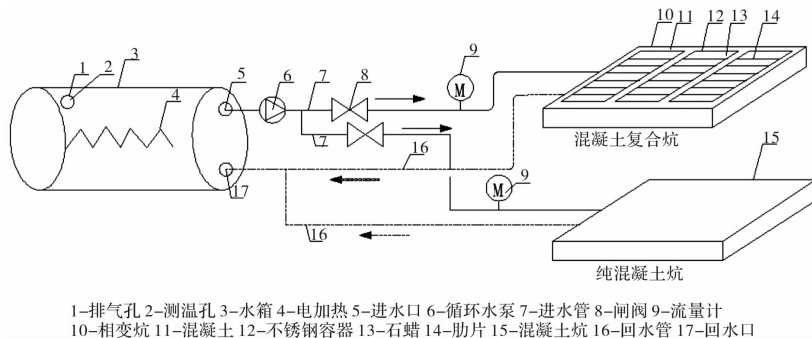


图2 相变蓄热采暖实验系统

Fig. 2 Phase change heat storage heating system of experiment

相变蓄热炕系统的核心工作区为蓄热炕体，炕体内部为混凝土和石蜡混合物。该实验炕模型

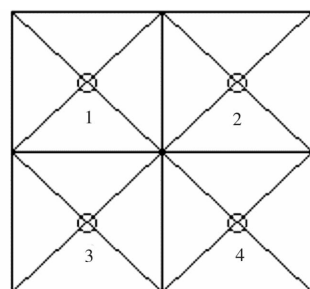
长和宽均为  $1\,000\text{ mm}$ ，高为  $100\text{ mm}$ ，框架材料为木质板，炕内部定制了不锈钢供热容器。供热容

器的长、宽和高分别为 900 mm、900 mm 和 50 mm,该容器底部敷设了直径为 10 mm 管间距为 50 mm 的盘管. 不锈钢供热容器底部和四周均铺设了 50 mm 厚的挤塑板保温材料,底部保温板上铺设了反射膜来减少热量的损耗. 石蜡混凝土炕的石蜡放置在定制的密封不锈钢容器中,该容器内部定间距的制作了肋片以增强传热效果,容器数量有 3 个,长、宽和高分别为 700 mm、230 mm 和 33 mm.

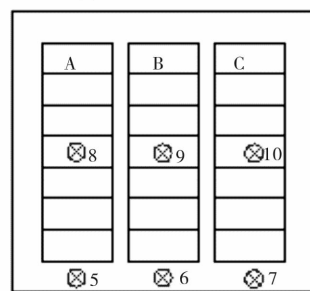
### 1.3 测试元件的布置

测点布置方式采用均匀有效的布置方法,在水箱测温口,蓄能炕和混凝土炕进出口、室内、室外、相变蓄能炕底部、石蜡层、肋片、炕面、睡眠环境和混凝土蓄能炕面底部、中部、炕面、睡眠环境均布置了 T 型热电偶. 测温设备为安捷伦和红外热成像仪.

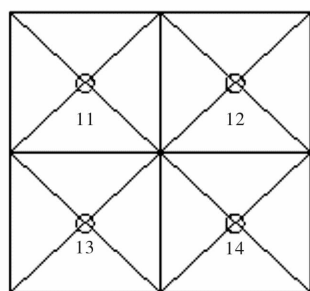
为了更加准确的测量晚上睡眠环境温度,在石蜡混凝土炕和纯混凝土炕表面安装了热流密度计来监测实时热流密度.



(a) 盘管找平层测点



(b) 炕面温度测点



(c) 睡眠环境温度测点

图3 石蜡混凝土炕测点布置

Fig. 3 The monitoring points of the paraffin-concrete kang

## 2 实验数据与分析

### 2.1 石蜡混凝土炕热特性分析

在供热温度 35 °C, 供水流量 0.95 L/min 实验条件下, 对各布置点进行了数据采集. 本文从炕面平均温度、炕面升温 and 降温速率<sup>[9]</sup> 和炕面热流密度多方面对石蜡混凝土炕进行了热特性分析. 下列图中石蜡混凝土炕以蜡代称, 纯混凝土炕以混代称.

(1) 炕面平均温度: 炕面平均温度是评价炕热舒适性的评价指标, 经查阅相关文献, 其最适宜温度范围为 24~35 °C. 石蜡混凝土炕面平均温度为炕面几个测点的平均值, 其计算结果如图 4 所示. 从图中看出, 热水系统开启后, 炕面温度快速上升, 并于 3 小时左右趋于稳定. 白天平均温度均保持在 35 °C 左右, 夜间石蜡混凝土炕由于石蜡固液相变放热的作用, 温度下降速率慢, 均保持在 31 °C 以上.

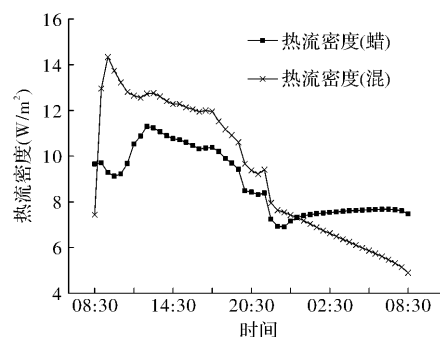


图4 炕面温度

Fig. 4 The temperature of kang surface

(2) 炕面升温 and 降温速率: 石蜡混凝土炕在供热温度 35 °C, 供水流量 0.95 L/min 实验条件下, 炕面升温速率为 1.8 °C/h, 炕面降温速率为 0.22 °C/h, 均满足炕热舒适度指标.

(3) 炕面热流密度: 石蜡混凝土炕热流密度变化情况如图 5 所示. 白天炕面热流密度保持在 12 W/m<sup>2</sup>, 夜间炕面热流密度下降缓慢最低为 7 W/m<sup>2</sup>.

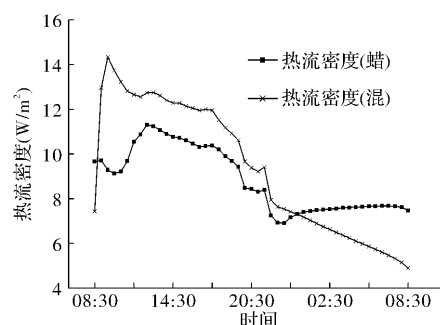


图5 炕面热流密度

Fig. 5 The heat flux density of kang surface

## 2.2 石蜡混凝土炕与其他三种炕的比较研究

### 2.2.1 石蜡混凝土炕与传统火炕

众所周知传统火炕使用的能源一般为煤炭和生物质能,其燃烧热效率低、污染大,而石蜡混凝土炕采用清洁的可再生能源,大大减少了冬季

采暖的碳排放量。

根据文献[5],传统火炕炕面温度分布不均,火炕炕面降温速率过快,炕面温度标准差大<sup>[10]</sup>,热舒适性差,表1为石蜡混凝土炕和传统火炕热性能对比。

表1 石蜡混凝土炕与传统火炕热性能对比

Tab. 1 Comparison of paraffin concrete with traditional kang in thermal characteristic

炕类别	炕面平均温度/℃	炕面升温速率/℃·h <sup>-1</sup>	炕面降温速率/℃·h <sup>-1</sup>	炕面温度标准差最大值/℃
传统火炕	23.3	2	1.46	6.42
石蜡混凝土炕	33.29	1.8	0.22	2.99

由表1可知,石蜡混凝土炕面平均温度为33.29℃相比较传统火炕可高达10℃。其炕面升温速率与传统火炕相比较慢,其原因是石蜡有热惰性強和吸热延迟的特点,此特点在炕面降温速率上优势明显,石蜡混凝土炕的炕面降温速率仅为传统火炕的15%。炕面温度标准差为炕面各点温度偏离炕面温度均值的平均数的大小,其反映了炕面温度的均匀性,其值越小,说明炕面温度分布越均匀,其值越大,则均匀性越差。由表1可看出石蜡混凝土炕面温度标准差最大值为2.99℃,而传统火炕为6.42℃,说明石蜡混凝土炕炕面温度分布均匀。

### 2.2.2 石蜡混凝土炕与纯混凝土炕

本文从以下几个方面比较了石蜡混凝土炕和纯石蜡炕的热性能特性:

(1)炕体结构:石蜡混凝土炕与纯混凝土炕体底部结构相同,不同之处为石蜡混凝土炕体内等间隔布置了3个石蜡模块,该模块集中铺设在炕中部区域,石蜡模块通过白天蓄热夜间相变放热的方式改善睡眠环境。石蜡供暖蓄能炕体结构如图6所示。

(2)炕面平均温度:图4给出了石蜡混凝土炕和纯混凝土炕炕面平均温度与时间关系曲线图。从图中可以看出系统启动后长时间内纯混凝土炕炕面温度一直处于较高水平,但两者炕面温度相差很小,这是由于混凝土导热性能较石蜡好。热水系统关闭后,石蜡混凝土炕降温速率明显低于纯混凝土炕,两者温度于2:00左右达到一致,随后石蜡混凝土炕炕面温度高于纯混凝土炕,这是因为石蜡显热和潜热放热的原因。夜间石蜡混凝土炕面和纯混凝土炕面温度差最高可达5℃,表明

了石蜡混凝土炕面保温性能较好,确保了炕面温度13个小时内处于人体舒适度范围内,而纯混凝土炕夜间供热效果较弱。

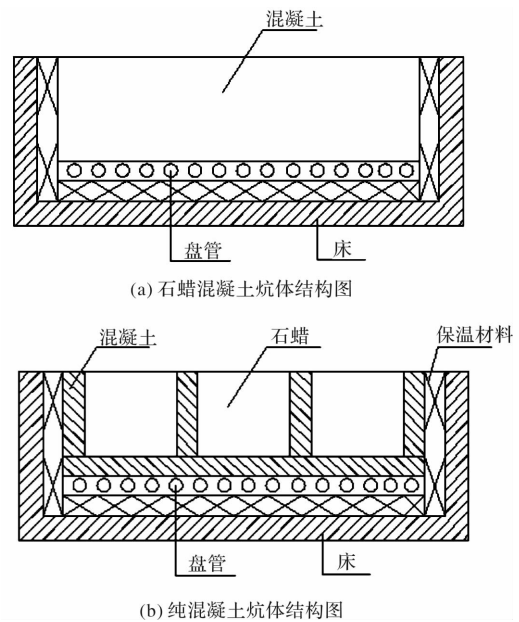


图6 蓄能炕体结构图

Fig. 6 Heat storage kang body structure

(3)炕面热流密度:图5给出了炕面热流密度随时间变化曲线,该曲线变化趋势与炕面平均温度相似。系统启动时由于室内温度和炕面温差大,混凝土炕面热流密度快速升高,加热阶段热流密度均值为12 W/m<sup>2</sup>。石蜡混凝土炕由于温差较小和石蜡导热系数小的原因导致其上升速度较慢,其加热阶段热流密度均值为10 W/m<sup>2</sup>。夜间,石蜡混凝土炕发挥了其供热优势,热流密度下降速率明显低于纯混凝土炕,其热流密度值稳定在8 W/m<sup>2</sup>而纯混凝土炕热流密度可低至4.7 W/m<sup>2</sup>。

### 2.2.3 石蜡混凝土炕与纯石蜡炕

基于经济性考虑,设想了一种与纯石蜡炕相

比可以节约石蜡用量的石蜡混凝土炕。本文从经济性和热舒适性两方面对石蜡混凝土炕和纯石蜡炕进行了对比分析，纯石蜡炕数据来源于本课题组。

(1)经济性

石蜡混凝土炕选取了蓄热性能良好的混凝土作为辅助蓄热材料，这不仅节省了成本，而且混凝土的支撑作用使炕体更加结实稳定。本文研究的石蜡复合混凝土太阳能相变储能炕系统的太阳能采暖系统收益部分来自能源的节省，忽略系统的折旧、成本投资的时间价值<sup>[11-12]</sup>。

本系统花费造价如表 2 所示。

表 2 太阳能蓄能炕系统初投资汇总表  
Tab. 2 Summary of initial investment of solar energy storage kang system

系统部件	纯石蜡炕	石蜡混凝土炕
盘管	300	300
不锈钢供热容器	350	350
水箱	300	300
加热器	20	20
水泵	120	120
管路	75	75
相变材料	1212	475
挤塑聚苯板	10	10
混凝土	0	15
总计/元	2 387	1 665

据表 2 所示，石蜡混凝土炕造价相比较纯石蜡炕节约了 722 元，占纯石蜡炕总价的 30%。根据实验结果石蜡混凝土炕冬季供热效果良好，不仅可以满足冬季供暖需求，还可大大降低成本。

(2)热舒适性

从炕面平均温度、炕面升温和降温速率和炕面温度标准差三个方面分析比较两者的热舒适性，两者比较结果如表 3 所示。

表 3 石蜡混凝土炕与纯石蜡炕热性能对比  
Tab. 3 Comparison of paraffin concrete kang with pure paraffin Kang in thermal characteristic

炕类别	炕面平均 温度/℃	炕面升温 速率 /℃·h <sup>-1</sup>	炕面降温 速率 /℃·h <sup>-1</sup>	炕面温度 标准差最 大值/℃
石蜡混凝土炕	33.29	1.8	0.22	2.99
纯石蜡炕	33.72	1.83	0.2	2.8

由表 3 可看出，在供热温度 35℃，供水流量 0.95 L/min 工况下，两者炕面平均温度仅相差 0.43℃，炕面升温和降温速率及炕面温度标准差最大值也基本一致，所以石蜡混凝土炕供热效果与纯石蜡炕相近。

3 结论

通过蓄能炕实验研究，得出以下结论：

(1)石蜡混凝土炕结构简单，初投资成本低，相比较纯石蜡炕可节约 30%的造价费用，能满足冬季供暖热舒适度要求，供热性价比最高。

(2)石蜡混凝土炕与传统火炕相比较，其炕头、炕中和炕尾温度分布均匀，炕面平均温度为 33.29℃相比较传统火炕可高达 10℃，炕面降温速率仅为传统火炕的 15%，保温性能优势明显，炕面温度标准差最大值相比较传统火炕低 3.43℃。石蜡混凝土炕冬季供热效果明显优于传统火炕。

(3)石蜡混凝土炕在炕面平均温度、夜间温度下降速率和炕面热流密度特性上均优于纯混凝土炕。夜间石蜡混凝土炕面温度可比纯混凝土炕高 5℃，其热流密度值稳定在 8 W/m<sup>2</sup> 而纯混凝土炕热流密度可低至 5 W/m<sup>2</sup>，说明石蜡混凝土炕面保温性能较好，夜间相变放出的热量减缓了炕面温度下降速率，改善了冬季供暖效果。

(4)石蜡混凝土炕不仅系统初投资成本低而且炕面平均温度、炕面温度标准差最大值与纯石蜡炕数值相差很小，两者供热效果相近。夜间供暖时石蜡混凝土炕面炕面温度能在 13 小时内维持在 31℃以上，供热效果优势显著，性价比高，能满足人体舒适性的要求。

参考文献 References

[1] 赵文元,刘泽勤. 我国寒冷地区农村供暖方式及节能技术解析[J]. 建筑节能,2017(4):14-19.  
ZHAO Wenyuan,LIU Zeqin. Analysis of heating mode and energy saving technology in rural areas in cold regions of China[J]. Journal of Building Energy Conservation,2017(4): 14-19.

[2] 张玲. 寒冷地区农居太阳能炕采暖系统设计研究[D]. 济南:山东建筑大学,2010.  
ZHANG Ling. Study on the heating system design of solar bed in rural areas in cold regions of China[D]. Jinan:Shandong University of Architecture,2010.

- [3] 冯国会,王茜,李刚,等. 太阳能炕采暖系统的试验研究[J]. 可再生能源,2013(3):11-13.  
FENG Guohui, WANG Qian, LI Gang, et al. Experimental Study on Heating System of Solar Kang[J]. Renewable Energy, 2013(3):11-13.
- [4] 李刚,池兰,冯国会,等. 相变蓄能火炕热舒适性的试验[J]. 农业工程学报,2016(11):244-249.  
LI Gang, CHI Lan, FENG Guohui, et al. Experiment on thermal comfort of phase change energy storage bed [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2016(11): 244-249
- [5] 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(4):335-344.  
JIANG Qingyang, HE Wei, JI Jie, et al. Research on thermal storage characteristics of solar bed and its effect on sleep thermal comfort[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012(4): 335-344.
- [6] 崔玉清,季杰,何伟,等. 太阳能炕和 Trombe 墙相结合的新型太阳能采暖系统的数值研究[J]. 太阳能学报,2011(1):66-71.  
Cui Yuqing, JI Jie, HE Wei, et al. Numerical study of a new solar heating system combined with solar Kang and Trombe wall[J]. Journal of Solar Energy, 2011(1):66-71.
- [7] 郭敏,马秀琴,葛梦媛,等. 太阳能相变材料蓄能炕设计与实验初探[J]. 能源与节能,2017(2):62-64,99.  
GUO Min, MA Xiuqin, GE Mengyuan, et al. Design and experiment of phase change materials for solar energy storage bed[J]. Energy and Energy Conservation,2017(2): 62-64, 99.
- [8] 张仁远,相变材料与相变储热技术[M]. 北京:科学出版社,2009.  
ZHANG Renyuan. Phase change materials and phase change heat storage technology[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [9] 王芳,方修睦,刘婷婷,等. 火炕热工性能评价指标及检测方法的试验验证分析[J]. 建筑科学,2014(6): 124-127.  
WANG Fang, FANG Xiumu, LIU Tingting, et al. Experimental verification and analysis of thermal performance evaluation index and test method of fire Kang [J]. Architectural Science, 2014(6): 124-127.
- [10] 端木琳,赵洋,王宗山. 火炕热工性能的研究及其评价方法[J]. 建筑科学,2009,25(12):30-38.  
DUANMU Lin, ZHAO Yang, WANG Zongshan. Study on the thermal properties of fire Kang and its evaluation method[J]. Architectural Science, 2009,25(12):30-38.
- [11] 李安桂,石金凤. 村镇住宅建筑太阳能供热系统技术经济分析[J]. 太阳能学报,2010,12(31):1615-1620.  
LI Angui, SHI Jinfeng. Technical and economic analysis of solar heating systems for residential buildings in villages and towns[J]. Journal of Solar Energy, 2010, 12(31):1615-1620
- [12] 卢梅,王贤君. 太阳能热水系统在建筑全寿命期的经济效益评价研究[J]. 建筑经济,2013(1): 98-101.  
LU Mei, WANG Xianjun. Study on the Economic benefit Evaluation of Solar Water heating system in the whole Life of build-ings[J]. Construction Economy, 2013(1): 98-101.

(编辑 桂智刚)