

太阳能复合相变蓄能炕的设计及热性能研究

刘长昊, 马秀琴, 窦一帆, 石月

(河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300401)

摘要:为解决我国北方农村冬季采暖过程中能源浪费及环境污染的问题,设计了一种以太阳能为热源,石蜡为相变蓄能材料的蜂窝活性炭-石蜡复合相变蓄能炕采暖系统。在供水温度为40℃的条件下,通过对比试验,分析了纯石蜡蓄能炕、蜂窝活性炭孔密度分别为20,30以及40 PPI的复合蓄能炕的热性能。实验结果表明:新型蓄能炕可以满足人体对于夜间睡眠的热舒适性需求。蜂窝活性炭孔密度为20 PPI的复合蓄能炕升温及降温速度最快,分别为0.35和0.39℃;炕面层温度标准差最低,为0.39℃,比30 PPI的低18.75%,比40 PPI的低23.53%,比纯石蜡的低41.79%;睡眠层平均温度以及炕面热流密度最高,分别为28.10℃和11.88 W/m²。可见蜂窝活性炭的加入有助于提高蓄能炕的热性能,且蜂窝活性炭的孔密度越小,复合蓄能炕的热性能就越好。与传统火炕相比,纯石蜡蓄能炕在经济性方面也占优势。

关键词:太阳能;复合相变蓄能炕;热性能;蜂窝活性炭;孔密度

中图分类号:TU111.2 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.12.019

[引用本文格式]刘长昊,马秀琴,窦一帆,等.太阳能复合相变蓄能炕的设计及热性能研究[J].热能动力工程,2021,36(12):126-133. LIU Chang-hao, MA Xiu-qin, DOU Yi-fan, et al. Design and thermal performance research of solar energy composite phase change energy storage kang[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(12):126-133.

Design and Thermal Performance Research of Solar Energy Composite Phase Change Energy Storage Kang

LIU Chang-hao, MA Xiu-qin, DOU Yi-fan, SHI Yue

(College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, Post Code:300401)

Abstract: In order to solve the problems of energy waste and environmental pollution in the heating process of rural areas in northern China in winter, the composite phase change energy storage kang heating system of honeycomb activated carbon and paraffin was designed with solar energy as heat source and paraffin as phase change energy storage material. Under the condition of water supply temperature of 40℃, the thermal properties of pure paraffin energy storage kang and composite energy storage kang with the honeycomb activated carbon pore density of 20 PPI, 30 PPI and 40 PPI were analyzed through comparative test. The experimental results show that the new type of energy storage kang can meet the human body's thermal comfort requirements for night sleep. The composite energy storage kang with the honeycomb activated carbon pore density of 20 PPI has the fastest heating and cooling speeds, which are 0.35℃ and 0.39℃ respectively. The temperature standard deviation of 0.39℃ for the kang surface layer of 20 PPI is the lowest, which is 18.75% lower than that of 30 PPI, 23.53% lower than that of 40 PPI, and

收稿日期:2021-03-17; 修订日期:2021-04-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978231);河北省科技计划项目(14214304D);河北省创新能力提升计划软科学研究专项(19453713D)

Fund-supported Project: General Project of National Natural Science Foundation of China(51978231); Science and Technology Program Project of Hebei Province(14214304D); Soft Science Research Special Project of Innovation Capability Enhancement Program of Hebei Province(19453713D)

作者简介:刘长昊(1995-),男,河北沧州人,河北工业大学硕士研究生。

通讯作者:马秀琴(1963-),女,天津人,河北工业大学教授。

41.79% lower than that of pure paraffin. The average temperature of 28.10 °C for the sleeping layer and the heat flux density of 11.88 W/m² for the kang surface are the highest respectively. It can be seen that the addition of honeycomb activated carbon helps to improve the thermal performance of the energy storage kang, and the smaller the pore density of the honeycomb activated carbon is, the better the thermal performance of the composite energy storage kang is. Compared with traditional heated brick kang, pure paraffin energy storage kang is also superior in terms of economy.

Key words: solar energy, composite phase change energy storage kang, thermal performance, honeycomb activated carbon, pore density

引言

在我国北方农村的冬季,传统的火炕和土暖气等供暖方式不仅严重污染环境,而且极大地消耗不可再生能源。如果将太阳能与农村的火炕采暖系统结合起来,可以在一定程度上解决农村冬季供暖存在的问题。

Yang 等人^[1]通过建立动态传热模型模拟新型太阳能炕的动态特性,然后利用模拟验证,发现该模型可以正确呈现炕的瞬态行为,为太阳能炕的设计和应用提供了理论支持。由于太阳能的利用具有间歇性,崔玉清等人^[2]将太阳能炕和具有加热效果的 Trombe 墙耦合,结果得出该系统与单独太阳能炕系统相比室温提高了 5 °C 左右。除此之外,有学者把太阳能炕采暖系统和太阳能空气集热器相结合^[3-6],白天太阳能空气集热器对室内环境加热,太阳能炕储存热量,到了夜间,太阳能炕向室内释放热量,结果显示供暖效果比较理想。Li 等人^[7]将相变材料石蜡应用到传统火炕中,结果表明,室内平均温度比传统火炕采暖房间高 2.94 °C,并且显著延长了加热时间。由于石蜡等相变材料自身导热性不是特别理想,单独使用具有一定的局限性,而复合相变材料可以起到强化传热的作用。Abhay 等人^[8]为了提高相变材料与外界环境的换热效果,对多种复合相变材料进行了大量的研究和分析。有学者将石蜡与膨胀石墨^[9]、金属泡沫^[10]及纳米^[11]等制备成复合相变材料,从而起到强化石蜡传热性能的效果。陆威等人^[12]将纳米铝粉与液体石蜡相混合,再利用膨胀石墨吸附性能较高的特点,制备出了纳米铝粉/石蜡/膨胀石墨复合相变材料,当纳米铝粉质量分数为

2% 时,复合相变材料的热性能较好。

本文以火炕为原型,太阳能为主要热源,石蜡为相变材料,水为载体流体,同时基于复合相变材料具有强化传热的效果,设计了一种蜂窝活性炭-石蜡复合相变蓄能炕采暖系统,利用实验结果分析该系统的热性能以及蜂窝活性炭孔密度对它的影响。此外,还对纯石蜡蓄能炕和传统火炕进行了经济性的对比分析。

1 实验系统及方案设计

1.1 实验材料的选取

相变蓄热材料蕴含着极高的相变潜热,依靠自身发生相态变化来吸收和释放热量。选取 35 号石蜡作为此次实验的储热介质,表 1 为 35 号石蜡的热物性参数。

表 1 石蜡的热物性参数

Tab. 1 Thermophysical parameters of paraffin

熔点温度/°C	凝固点温度/°C	凝固潜热量/J·g ⁻¹	融化潜热量/J·g ⁻¹
35.99	33.56	220.94	220.65

常温下石蜡为固态,达到熔点后为液态,且流动性较强,存在泄露的危险。而蜂窝活性炭具有稳固的骨架支撑,且其中的很多介质还具有良好的导热性^[13],实验选择尺寸为 0.9 m × 0.9 m × 15 mm,孔隙率为 95%,孔密度(长度上的平均孔洞数)分别为 20,30 和 40 PPI(PPI:孔密度的单位)的蜂窝活性炭,如图 1 所示。采用浸渍法^[14]将 3 种不同孔密度的蜂窝活性炭分别与相同质量的石蜡制备成复合相变材料,如图 2 所示。

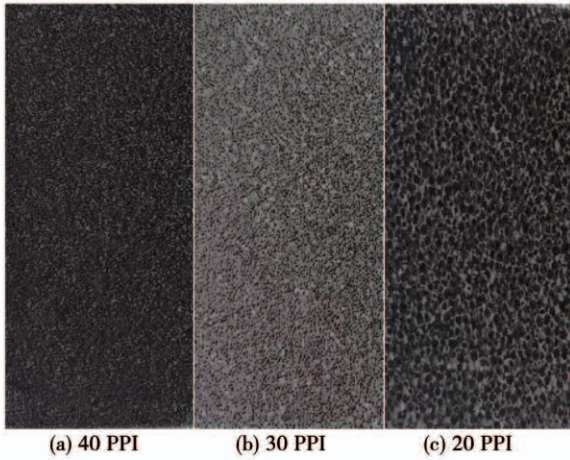


图1 蜂窝活性炭

Fig.1 Honeycomb activated carbon

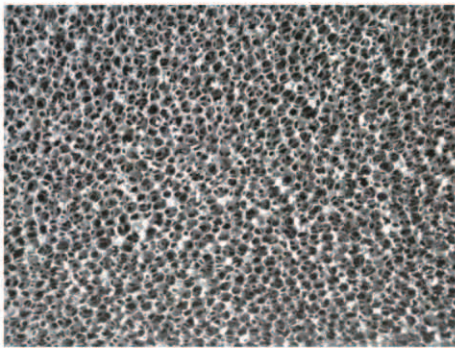


图2 蜂窝活性炭与石蜡相结合

Fig.2 Combination of honeycomb activated carbon and paraffin

1.2 实验系统设计

蓄能炕炕体结构采用散热效果良好、外形较为美观的架空炕。供热方式借鉴太阳能低温地板辐射采暖技术^[15],在炕体内的不锈钢盘管间隙添加相变材料,构成相变蓄能炕系统,通过供回水管道连接保温水箱,与太阳能集热系统结合,组合成一套可以独立供热的循环采暖系统,如图3所示。

太阳能集热系统通过收集太阳能转换成热量,加热保温水箱中的水,水箱通过水泵将热水供给蓄能炕,通过管件上的流量装置和温控器控制供水的流速和温度。白天太阳能集热器工作时,产生的高温水进入蓄能炕盘管中,加热相变材料,石蜡吸热融化。当石蜡全部融化后,高温水继续加热蓄能炕,石蜡开始储存潜热。晚上太阳能集热器停止工作后,蓄能炕的温度逐渐降低,石蜡渐渐由液态变为固态,在凝固过程中释放出潜热,继续保持炕面的温度稳

定。这样不断地循环,进行着热量的储存和释放。

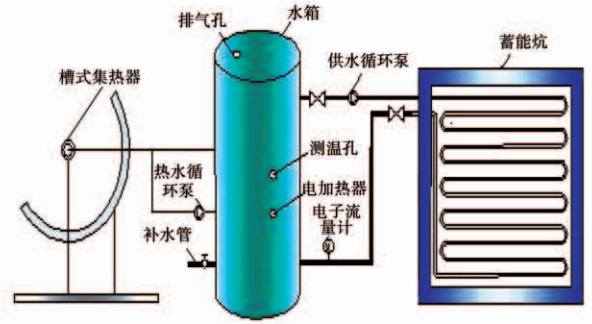


图3 相变蓄能炕系统图

Fig.3 System diagram of phase change energy storage kang

1.3 实验方案设计

实验所在地为天津市,是典型的温带季风型气候,年平均气温在13℃左右,冬季为4~5个月。

实验分别在石蜡层、炕面层和睡眠层同等的竖直位置布置4个温度测点,在炕面层布置1个热流密度测点。利用安捷伦数据采集仪与T型热电偶测试相变蓄能炕的石蜡层温度、炕面层温度和睡眠层温度。热流密度计测量炕体的热流密度。睡眠层的舒适温度范围为27.0~31.5℃^[16],通过比较3组不同供水温度的实验结果之后,最终确定了供水温度为40℃。根据炕体温度变化趋势大致将整个过程划分为4个阶段:升温阶段(8:30~13:30),热稳定阶段(13:30~17:30),降温阶段(17:30~21:30)及睡眠阶段(21:30~8:30)。

2 实验结果与分析

蓄能炕的内部各层结构如图4所示,由下到上依次为反射膜层、石蜡层、炕面层和睡眠层。

2.1 石蜡层温度变化分析

在供水温度40℃条件下,4种蓄能炕的石蜡层温度变化趋势如图5所示。4种蓄能炕石蜡层的平均温度变化趋势大体相同。对系统加热,温度上升,到达一个相对稳定的状态后停止加热,温度开始下降,下降到一定温度,曲线趋于平缓。在整个过程中,复合蓄能炕的温度明显高于纯石蜡蓄能炕,且随着蜂窝活性炭孔密度的减小,石蜡层的平均温度增大。孔密度为20 PPI的蜂窝活性炭复合蓄能炕的平均温度最高,热稳定阶段可达38.61℃,睡眠阶段为36.39℃,纯石蜡蓄能炕的平均温度最低,热稳定

阶段为 37.40 ℃,睡眠阶段为 35.11 ℃。而且 3 种复合蓄能炕在睡眠阶段的温度变化趋势相对于纯石蜡蓄能炕更加平缓一些,说明蜂窝活性炭复合相变材料储存的热量较多,夜间潜热的释放量充足。

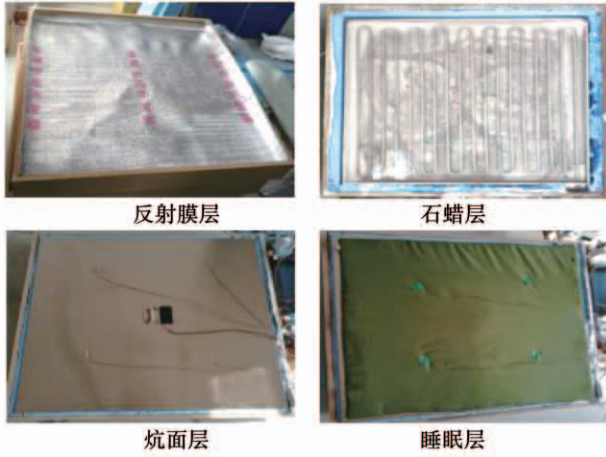


图 4 蓄能炕各结构层

Fig. 4 Various structural layers of energy storage kang

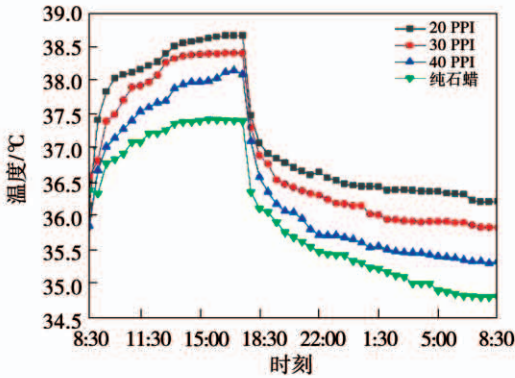


图 5 蓄能炕石蜡层温度变化趋势

Fig. 5 Temperature change trends of paraffin layer of energy storage kang

蓄能炕石蜡层的升温速度和降温速度可以代表石蜡融化与凝固的快慢。3 种复合相变蓄能炕和纯石蜡蓄能炕的石蜡层升温曲线与降温曲线如图 6 和图 7 所示。可以看出,在升温阶段,孔密度为 20 PPI 的复合相变蓄能炕经过 1.5 h 的加热可以达到相对热稳定状态,而纯石蜡蓄能炕加热到热稳定状态大约需要 3.5 h;降温阶段,孔密度为 20 和 30 PPI 的复合相变蓄能炕经过 2 h 达到相对稳定状态,而纯石蜡和孔密度为 30 PPI 的蓄能炕则需 4 h。从升温 and 降温的时间变化曲线均可看出,蜂窝活性炭复合相变蓄能炕比纯石蜡蓄能炕的升温 and 降温速度都

快,表明蜂窝活性炭复合相变材料的导热性好,有效地改善了石蜡的热惰性。

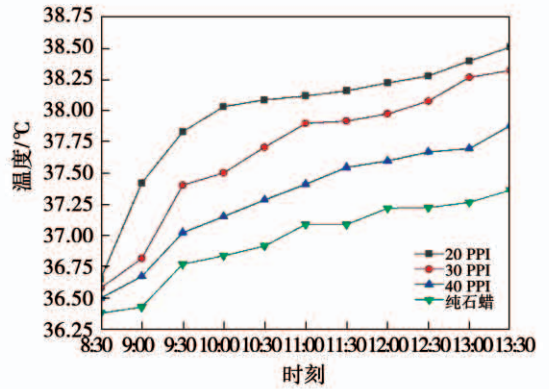


图 6 石蜡层升温曲线

Fig. 6 Heating curves of paraffin layer

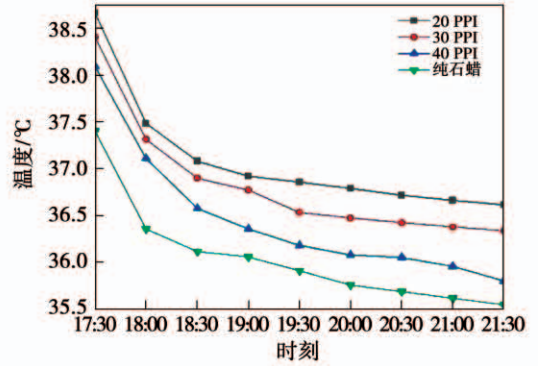


图 7 石蜡层降温曲线

Fig. 7 Cooling curves of paraffin layer

炕面平均升温速度为:

$$\varphi = \frac{t_{km}^{T_1} - t_{km}^{T_0}}{T_1 - T_0} \quad (1)$$

式中: φ —炕面平均升温速度,℃/h; $t_{km}^{T_0}$ —检测初始时刻 T_0 时的平均温度,℃; $t_{km}^{T_1}$ —检测持续时间内 T_0 到 T_1 时刻的平均温度,℃; $T_1 - T_0$ —蓄热炕升温阶段的实验时间,h。

炕面平均降温速度为:

$$\phi = \frac{t_{km}^{T_2} - t_{km}^{T_3}}{T_3 - T_2} \quad (2)$$

式中: ϕ —炕表面平均降温速度,℃/h; $t_{km}^{T_2}$ —蓄能炕降温阶段结束时 T_2 时刻的炕面平均温度,℃; $t_{km}^{T_3}$ —蓄能炕开始降温时 T_3 时刻的炕面平均温度,℃; $T_3 - T_2$ —蓄能炕降温阶段的持续时间,h。

4 种蓄能炕石蜡层的热性能参数如表 2 所示,复合蓄能炕石蜡层的升温、降温速度及平均温度均

高于纯石蜡蓄能炕。孔密度为 20 PPI 的蓄能炕升温速度最快,为 0.35 °C/h,比 30 PPI 快 0.07 °C/h,比 40 PPI 快 0.13 °C/h,比纯石蜡快 0.24 °C/h;降温速度也最快,为 0.39 °C/h,比 30 PPI 快 0.06 °C/h,比 40 PPI 快 0.09 °C/h,比纯石蜡快 0.11 °C/h。可见蜂窝活性炭的加入能加快石蜡的融化与凝固,即可以增强石蜡的导热能力。

表 2 4 种蓄能炕石蜡层的热性能参数

Tab.2 Thermal performance parameters of four kinds of energy storage kang paraffin layers

蓄能炕种类	升温速度/ °C · h ⁻¹	稳定阶段平均温度/°C	降温速度/ °C · h ⁻¹	睡眠阶段平均温度/°C
20 PPI	0.35	38.61	0.39	36.39
30 PPI	0.28	38.38	0.33	36.01
40 PPI	0.22	38.02	0.30	35.50
纯石蜡	0.11	37.40	0.28	35.11

2.2 炕面层热稳定性分析

蓄能炕的热稳定性可以根据炕面层的温度指标来判断,包括炕面层热稳定阶段平均温度以及炕面温度标准差。炕面层温度变化趋势如图 8 所示,4 种蓄能炕炕面层温度的整体变化趋势和石蜡层大体是一致的,但整体温度比石蜡层的温度降低 2 °C 左右。

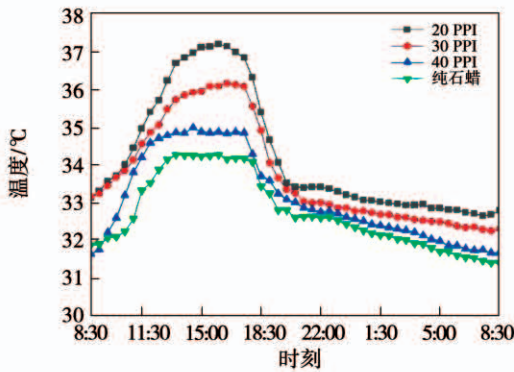


图 8 蓄能炕炕面层温度变化趋势

Fig.8 Variation trends of temperature in the surface layer of energy storage kang

蓄能炕炕面层在热稳定阶段的温度变化趋势如图 9 所示。可以看出,在热稳定阶段,孔密度为 20 PPI 的复合蓄能炕炕面层平均温度最高,为 37 °C,30 和 40 PPI 的依次为 36 和 34.88 °C;纯石蜡蓄能炕炕面层的平均温度最低,为 34.23 °C。炕

面层平均温度为:

$$\bar{t}_{km} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{t}_{km,j}}{n} \tag{3}$$

式中: \bar{t}_{km} —炕面的平均温度;°C, n —测温次数; $\bar{t}_{km,j}$ —炕面的瞬时平均温度,°C。

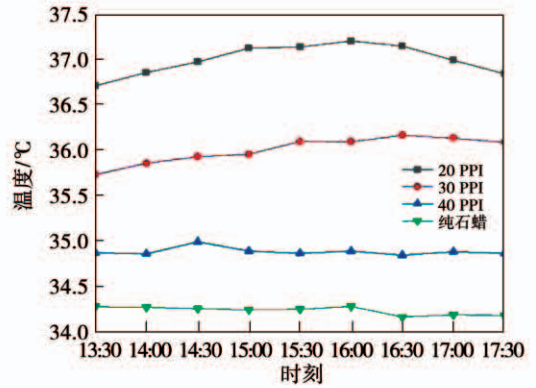


图 9 热稳定阶段温度变化趋势

Fig.9 Variation trends of temperature in the thermal stabilization stage

炕面层温度标准差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_i (t_{ir} - t_p)^2}{A}} \tag{4}$$

式中: σ —炕面层温度标准差,°C; t_{ir} — τ 时刻每个小单元的炕面温度平均值,°C; t_p —炕面在 τ 时刻的平均温度,°C; A_i —炕面层每个小单元的面积, m²; A —炕面总面积, m²。

4 种蓄能炕炕面层热稳定性参数如表 3 所示。在热稳定阶段,复合蓄能炕炕面层的温度高于纯石蜡,且温度标准差更小。孔密度为 20 PPI 的蓄能炕平均温度最高,为 37 °C;炕面温度标准差最低,为 0.39 °C,比 30 PPI 的低 0.09 °C,比 40 PPI 的低 0.12 °C,比纯石蜡的低 0.28 °C。可见复合蓄能炕炕面层热稳定性更好。

表 3 炕面层温度参数

Tab.3 Temperature parameters of kang surface layer

蓄能炕种类	平均温度/°C	炕面温度标准差/°C
20 PPI	37.00	0.39
30 PPI	36.00	0.48
40 PPI	34.88	0.51
纯石蜡	34.23	0.67

2.3 睡眠层热舒适性分析

蓄能炕睡眠层在睡眠阶段的热舒适性参数直接影响着夜间睡眠质量。蓄能炕睡眠层温度变化趋势如图 10 所示。蓄能炕睡眠层温度变化趋势同样经历 4 个阶段,但整体温度相较于石蜡层低 6 °C 左右,由于睡眠层与外界环境距离更近,因此在睡眠阶段,蓄能炕睡眠层温度受外界环境温度影响较大一些。

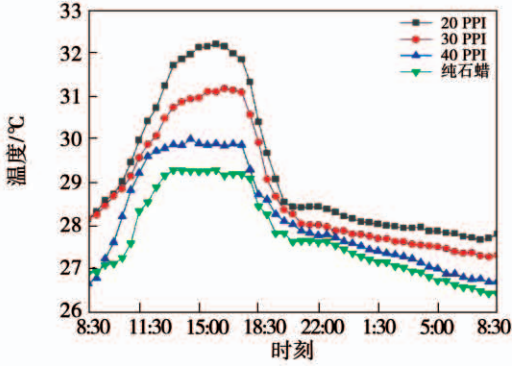


图 10 蓄能炕睡眠层温度变化趋势

Fig. 10 Variation trends of temperature in the sleep layer of energy storage kang

在加热条件下,可以认为睡眠层的热舒适温度范围是 27 ~ 31.5 °C。蓄能炕睡眠层在睡眠阶段的温度变化趋势如图 11 所示。可以看出,孔密度为 20 PPI 的复合蓄能炕睡眠阶段平均温度最高,为 28.10 °C,30 PPI 的为 27.25 °C,二者在整个睡眠阶段温度都处于热舒适温度范围;40 PPI 的为 27.23 °C。纯石蜡蓄能炕睡眠阶段平均温度为 27.02 °C,虽然二者平均温度处于热舒适温度处于热舒适温度范围,但在睡眠阶段后半部分无法达到热舒适温度。

热流密度是指单位时间内通过炕体单位横截面积的热量,单位为 W/m^2 。4 种蓄能炕热流密度的变化趋势如图 12 所示,在升温阶段、热稳定阶段和降温阶段,热流密度随着相变材料融化吸热和凝固放热而出现高低起伏,此时相变材料开始释放潜热,随着相变潜热的不断释放,热流密度的值逐渐增大。在睡眠阶段,3 种复合相变蓄能炕的热流密度均在 $10 W/m^2$ 以上,而纯石蜡蓄能炕的热流密度在 $10 W/m^2$ 以下。其他 3 个阶段,孔密度为 20 PPI 和 30 PPI 的复合相变蓄能炕的热流密度最高,40 PPI

的热流密度次之,纯石蜡蓄能炕的热流密度最小。

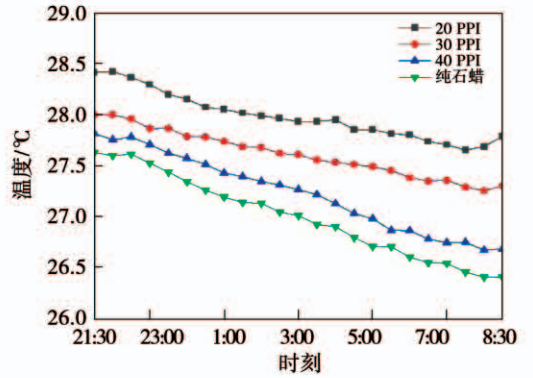


图 11 睡眠阶段温度变化趋势

Fig. 11 Variation trends of temperature in the sleep stage

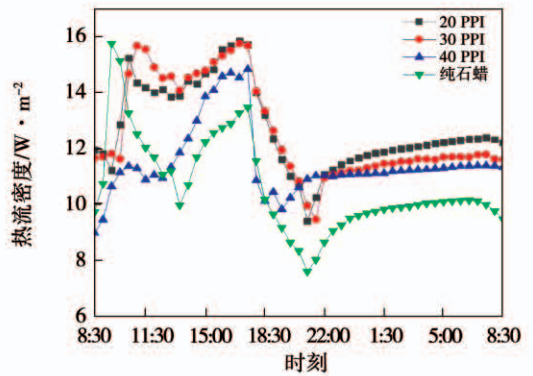


图 12 蓄能炕热流密度

Fig. 12 Heat flux densities of energy storage kang

4 种蓄能炕睡眠层热舒适性参数如表 4 所示。在睡眠阶段,复合蓄能炕睡眠层的平均温度高于纯石蜡蓄能炕,孔密度为 20 PPI 的复合蓄能炕睡眠层睡眠阶段平均温度最高,为 28.10 °C,比 30 PPI 的高 0.85 °C,比 40 PPI 的高 0.87 °C,比纯石蜡的高 1.08 °C;热流密度平均值也最高,为 $11.88 W/m^2$,比 30 PPI 的高 $0.48 W/m^2$,比 40 PPI 的高 $0.67 W/m^2$,比纯石蜡的高 $1.19 W/m^2$ 。由此可见,复合蓄能炕睡眠层热舒适性更优。

表 4 睡眠层热舒适性参数

Tab. 4 Thermal comfort parameters of sleep layer

蓄能炕种类	睡眠阶段平均温度/°C	热流密度平均值/ $W \cdot m^{-2}$
20 PPI	28.10	11.88
30 PPI	27.25	11.40
40 PPI	27.23	11.21
纯石蜡	27.02	9.69

2.4 经济性分析

传统火炕与纯石蜡蓄能炕二者造价如表5和表6所示。表5是以4 m²规格传统火炕为例计算出的火炕成本,表6是散热面积为4 m²的纯石蜡蓄能炕成本。传统火炕的主要燃料是煤炭和秸秆等,因为秸秆消耗量统计较为困难,所以仅以煤炭消耗量来计算火炕的能源成本。据统计,冬季采用火炕供暖的农户平均每年煤炭成本约800元,而蓄能炕热源采用太阳能,与直接电加热相比节省了系统运行的电费,而且太阳能作为可再生清洁能源,更环保。蓄能炕每年有一定的维护费用,为成本的5%。经计算纯石蜡蓄能炕每年的维护费用为169.75元,回收期为3.72年,即运行4年可收回成本,以后每年可节省成本630.25元。

表5 传统火炕造价表

Tab.5 Cost table of the traditional heated brick kang

系统部件	总价/元
实心耐火砖	300
水泥炕面板及黄土	400
铸铁火门	50
人工费	300
总造价	1 050

表6 蓄能炕造价表

Tab.6 Cost table of the energy storage kang

系统部件	总价/元
集热器	500
管路	75
水箱	300
水泵	120
石蜡	960
木质外盒	400
保温板	40
不锈钢内盒、盘管、盖板	1 000
总造价	3 395

3 结论

为了探究蜂窝活性炭-石蜡复合相变蓄能炕的热性能,设计并搭建了实验台,通过实验得出如下结论。

(1) 对比分析4种蓄能炕石蜡层的温度参数,

得出蜂窝活性炭复合蓄能炕升温及降温速度高于纯石蜡蓄能炕,蜂窝活性炭可以增强石蜡的导热能力。

(2) 对比分析4种蓄能炕炕面层的热稳定性参数,得出孔密度为20 PPI的复合蓄能炕炕面层温度标准差最小,为0.39℃,比30 PPI的低18.75%,比40 PPI的低23.53%,比纯石蜡的低41.79%。

(3) 对比分析4种蓄能炕睡眠层的热舒适性参数,得出孔密度为20 PPI的复合蓄能炕睡眠层平均温度为28.10℃,比30 PPI的高3.12%,比40 PPI的高3.2%,比纯石蜡的高4.00%。

(4) 对比分析纯石蜡蓄能炕和传统火炕的经济性,得出蓄能炕前期投资较高,但投资回收期短,仅需4年。

(5) 蜂窝活性炭复合相变蓄能炕可以有效改善睡眠环境,与纯石蜡蓄能炕相比整体也更占优;而且蜂窝活性炭孔密度越小,蓄能炕的热性能越好;且与传统火炕相比,长远来看,蓄能炕采暖系统既经济又节能,适合在北方农村地区推广使用。

参考文献:

[1] YANG M, YANG X D, WANG P S, et al. A new Chinese solar kang and its dynamic heat transfer model[J]. Energy & Buildings, 2013, 62: 539-549.

[2] 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,2011,32(1):66-71.

CUI Yu-qing,JI Jie,HE Wei,et al. Numerical study of the new solar heating system combining solar kang and Trombe walls[J]. Journal of Solar Science,2011,32(1):66-71.

[3] ZHAO D S,JI J,YU H C,et al. Numerical and experimental study of a combined solar Chinese kang and solar air heating system based on Qinghai demonstration building[J]. Energy & Buildings, 2017,143: 61-70.

[4] FENG G H,WANG Q,LI G,et al. Study on solar kang heating system for cold areas [J]. Procedia Engineering, 2016, 146: 536-540.

[5] 郑豪放,季杰,郭超,等.基于太阳能炕的主被动复合采暖建筑的实验研究[J].太阳能学报,2018,39(4):940-945.

ZHENG Hao-fang,JI Jie,GUO Chao,et al. Experimental research on the main passive composite heating building based on solar kang [J]. Solar Science Journals,2018,39(4): 940-945.

[6] 魏蔚,季杰,罗成龙,等.复合太阳能炕系统运行模式的实验研究[J].太阳能学报,2017,38(3):806-812.

WEI Wei,JI Jie,LUO Cheng-long,et al. Experimental research on the operating mode of the composite solar kang system[J]. Solar

- Journal,2017,38(3):806-812.
- [7] LI G, BI X X, FENG G H, et al. Phase change material Chinese kang: design and experimental performance study[J]. Renewable Energy,2020,150: 821-830.
- [8] ABHAY D, MADHU A, AGARWAL G D. Heat storage materials, geometry and applications: a review[J]. Journal of the Energy Institute,2017,90(1): 1-11.
- [9] MATHEW G, PANDEY A K, NASRUDIN A R, et al. A novel poly-aniline (PANI) / paraffin wax nano composite phase change material: superior transition heat storage capacity, thermal conductivity and thermal reliability[J]. Solar Energy,2020,204: 448-458.
- [10] MAXIMILIAN G, ABISHEK S, RYAN M H, et al. Total enthalpy-based lattice Boltzmann simulations of melting in paraffin / metal foam composite phase change materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2020:119870.
- [11] 高丽媛,杨 宾,郝梦琳,等. 石蜡基纳米金属复合相变材料热性能的实验研究[J]. 河北工业大学学报,2019,48(1): 51-56.
- GAO Li-yuan, YANG Bin, HAO Meng-lin, et al. Experimental research on the thermal properties of paraffin-based nano-metal composite phase change materials[J]. Journal of Hebei University of Technology,2019,48(1): 51-56.
- [12] 陆 威,吴永卫. 纳米铝粉/石蜡/膨胀石墨复合相变材料的制备及性能研究[J]. 热能动力工程,2017,32(2):101-105, 140-141.
- LU Wei, WU Yong-wei. Preparation and properties of nano-aluminum powder / paraffin / expanded graphite composite phase change material [J]. Thermal Energy and Power Engineering, 2017,32(2): 101-105,140-141.
- [13] 吴干学,郭家秀,韩东升,等. 蜂窝活性炭制备技术的研究进展及趋势[C]//2011 中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷). 北京:中国环境科学学会,2011.
- WU Gan-xue, GUO Jia-xiu, HAN Dong-sheng, et al. Research progress and trends in cellular activated carbon preparation technology[C]//2011 China Society of Environmental Science Annual Conference Papers (Volume 2). Beijing: China Society of Environmental Science,2011.
- [14] 李彦山,汪树军,史 全,等. 储能相变材料制备方法研究进展[J]. 功能材料,2015,46(6):6008-6014,6019.
- LI Yan-shan, WANG Shu-jun, SHI Quan, et al. Progress in the preparation of energy storage phase change materials[J]. Functional Materials,2015,46(6): 6008-6014,6019.
- [15] 杜海存,张小兵,于 娜,等. 相变蓄热式太阳能低温地板辐射采暖系统性能实验[J]. 科学技术与工程,2013,13(26): 7884-7888.
- DU Hai-cun, ZHANG Xiao-bing, YU Na, et al. Phase variant solar low-temperature floor radiation heating system performance experiment[J]. Science Technology and Engineering,2013,13(26): 7884-7888.
- [16] 李 净. 西北乡域住宅冬季睡眠热环境调查分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
- LI Jing. Survey and analysis of winter sleep heat environment in northwest rural residential areas[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2016.

(姜雪梅 编辑)