

文章编号: 1671-6612 (2019) 06-621-08

# 太阳能热水相变炕在不同地区的适宜性分析

李文玉 孙亮亮 袁艳平 曹晓玲 向波

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 提出一种太阳能热水相变炕的新型供暖系统,系统无需设置水箱,仅使用炕板与相变材料作为蓄热装置,可有效提高供暖效率。通过在Fluent数值模拟平台中添加自定义程序,建立了相变炕的三维非稳态传热模型,研究了其在不同地区的适宜性。结果表明,在设定工况下哈尔滨、北京和银川的太阳能热水相变炕的太阳能贡献率分别可达到49.9%、70.1%和76.5%。炕体基本保证了人体在进行睡眠活动时的夜晚炕面温度的舒适性。证明了太阳能热水相变炕在我国北方多地区均具有良好的效果。

**【关键词】** 太阳能;相变炕;适宜性;太阳能贡献率;数值模拟

中图分类号 TK512 文献标识码 A

## Suitability Analysis of Solar Phase Change Heat Kang In Different Areas

Li Wenyu Sun Liangliang Yuan Yanping Cao Xiaoling Xiang Bo

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** The system combining the solar water and phase change heat storage Kang is put forward. Instead of water tank, Kang plate and phase change material are used as heat storage devices to availably improve the heating efficiency in this system. By adding udf to Fluent, three-dimensional unsteady heat transfer model of the Kang is established. The results show that the solar energy contribution rates of the Kang in Harbin, Beijing, Yinchuan can reach 49.9%, 70.1% and 76.5% respectively under the working condition. The solar phase change Kang can guarantee the comfort of Kang at night when people are sleeping. It is proved that the solar phase change Kang have good effect in many areas of northern China.

**【Keywords】** solar energy; phase change Kang; suitability analysis; solar energy contribution rates; numerical simulation

## 0 引言

我国北方地区冬季寒冷,主要取暖方式为传统火炕<sup>[1,2]</sup>。近年来,伴随着农村经济的快速发展,人们对居住环境舒适度的要求日益提高,而传统火炕普遍存在炕面温度分布不均、室内环境差、燃料消耗量大等弊端<sup>[3-5]</sup>。因此,在能源短缺的今天,急需对传统火炕进行改造与创新。太阳能是一种清洁、免费、间歇的可再生能源,而相变储能技术可解决太阳能能量供求在时间和空间上不匹配的问题<sup>[6,7]</sup>,因此一些学者对结合这些新技术的炕体进

行了研究。

将太阳能作为炕体热源主要有两种应用形式,分别是通过集热器获得的热空气<sup>[8,9]</sup>或热水<sup>[10-15]</sup>为介质来加热炕体。目前较常见的是利用低温地板辐射采暖原理的太阳能热水炕。张蓓对上述太阳能热水炕的可行性和各种材料选择、盘管布置、太阳能集热器选型、面积和蓄水箱体积的选择都做了一个详细的调研<sup>[11]</sup>。冯国会、李刚等人在传统火炕上铺设一层热水毛细管网以辅助火炕供暖,模拟和实验均表明:该炕的炕面温度分布均匀,室内热舒适性有

作者简介:李文玉(1993.10-),女,在读硕士研究生, E-mail: lwylucy@126.com

通信作者:孙亮亮(1982.04-),女,博士,讲师, E-mail: sunliangliang@home.swjtu.edu.cn

收稿日期:2019-06-05

所提高<sup>[12,13]</sup>。江清阳研究了蓄热水箱容积对炕的太阳能贡献率的影响。结果表明,水箱容积越小,炕的太阳能贡献率越高<sup>[14]</sup>。崔玉清通过给定不同的辅热功率,研究了不同地区的炕的太阳能保证率。结果表明,若维持炕面温度全天在 28~35℃,西藏和大连的太阳能保证率可达 73.9%,每天仅需提高较少能量可维持炕面温度<sup>[15]</sup>。郑豪放通过实验测试,研究太阳能炕系统分别在晴天和阴天的运行情况。结果表明,晴天太阳辐射充足时,太阳能集热器在白天收集的热量,完全可保证夜晚睡眠环境的稳定和温暖;阴天辐射不足时,夜间炕面温度虽较晴天时有明显下降,但在运行过程中仍可保持 20℃ 以上<sup>[16]</sup>。学者们在此基础上,还进一步研究了太阳能热水相变炕体。李刚将太阳能毛细管网与相变火炕联合供暖,而系统初投资增加幅度不大<sup>[17]</sup>。郭敏、黄超等人对太阳能热水相变炕进行了设计和实验初探,还对比了它与普通炕体的热性能差异。指出这种新型炕体在炕面平均温度、下降速率和供回水温差特性上均优于普通炕体<sup>[18,19]</sup>。

现有的文献均证明了太阳能热水炕体的可行性,但对太阳能热水相变炕的研究仅为初探,未在动态的太阳辐照度下研究太阳能相变炕的供暖性能以及可达到的太阳能贡献率等。同时,我国幅员辽阔,各地区太阳能资源不均且气候条件差异较大,上述文献也未见针对太阳能热水相变炕在我国大多数地区是否具有适宜性进行研究分析。

该文通过在 Fluent 中添加太阳能集热器和电辅热层的自定义程序,建立三维太阳能热水相变炕传热数值模型,对太阳能热水相变炕在不同地区的适宜性进行了研究。

## 1 模型建立

### 1.1 物理模型

如图 1 所示,该文提出的太阳能热水相变炕,主要由太阳能平板集热器、循环水泵、炕内管道、炕体结构材料及相变材料组成。系统日间运行时,平板集热器吸收阳光,将太阳辐射转变为热能,并传递给流体通道里的循环水。循环水流经炕内管道,从而加热炕体,改善室内热环境。系统无需设置水箱,仅采用炕板和相变材料作为蓄热装置。可有效提高循环水温度并减少泵耗。夜间水泵停止运

行,依靠相变材料缓慢释放潜热来维持恒定的炕面温度。由文献[20]可知,上炕面温度在夜间无法一直维持在人体舒适的睡眠温度。并且若为了储存足够的热量以供夜晚使用,相变填充层会较厚,而热量在放热周期结束时却无法完全放出,将影响下一周期的蓄热过程。因此,该文为太阳能热水相变炕添加电辅助层,即在现有炕体上炕面层下铺设一层电加热碳纤维卷材,当夜晚炕面温度低于人体舒适值时,电辅热层自动开启,超过设定值时则自动关闭。与传统的加热电缆相比,碳纤维卷材铺设方便,加热时温度均匀,不会造成局部过热等问题。

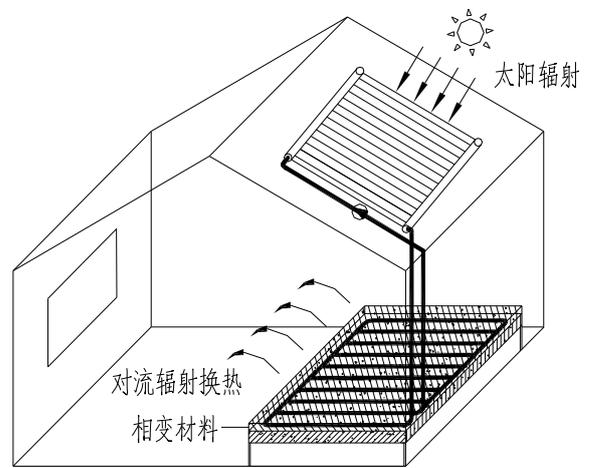


图 1 太阳能热水相变炕运行系统图

Fig.1 The System of Solar Phase Change Kang

炕体尺寸为 2.4m×2m×0.185m (长×宽×厚),太阳能热水相变炕的三维模型如图 2 所示。

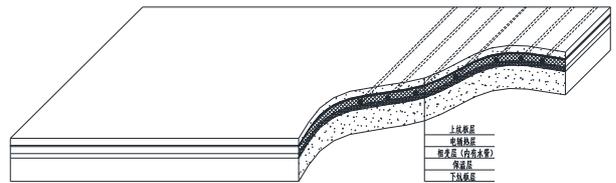


图 2 太阳能热水相变炕的三维模型图

Fig.2 Three-Dimensional Model of Solar Phase Change Kang

炕体从上至下分别是上炕板层、电辅热层、相变层、保温层和下炕板层。由文献[20]可知,下炕板温度几乎没有变化,该文对模型进行简化,不再建立下炕板部分,将保温层下边界设置为绝热条件。上炕板层、电辅热层、和保温层的材料分别使用水泥砂浆、碳纤维卷材和聚苯乙烯,材料物性参数及几何参数见表 1。

表 1 炕体材料的物性参数及几何参数

Table 1 Physical properties and geometric properties of

Kang material

材料名称	厚度/	密度/	比热/	导热系数/
水泥砂浆	30	1800	1050	0.93
碳纤维卷材	5	1760	0.79	10.46
相变材料	30	890	2090	0.149
聚苯乙烯	20	30	1380	0.042

太阳能热水相变三维炕采暖系统耦合了多个传热过程, 如果要建立精确的太阳能集热器和炕体的实际模型, 近乎不能完成。因此, 对以上的传热模型进行合理简化, 做出部分假设。

(1) 炕体的各层材料紧密接触, 不考虑接触热阻。

(2) 相变材料均匀且各向同性, 其熔化时的自然对流为二维层流流动。同时对相变材料采用 Boussinesq 近似。

(3) 将碳纤维卷材层视为均匀发热的体热源

(4) 忽略炕体与太阳能集热器之间的连接管道的传热损失。

(5) 忽略炕体外部总管沿排管方向的散热, 即每根排管的进出口水温均相同。

(6) 假设炕体外部环境温度保持恒定为 15℃。

基于以上假设, 本章选取两管之间的 1/2 的炕体结构层作为基本传热单元。如图 3 所示, 整个模型纵向长度为炕体长度, 为 2.4m。热水管直径为 10mm, 两管间距为 100mm。上炕板层、电辅热层, 相变层、保温层的厚度分别为 30mm、5mm、30mm 和 20mm。

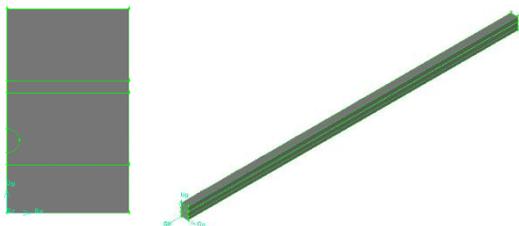


图 3 基本传热单元模型图

Fig.3 The Basic Heat Transfer Unit Model

## 1.2 数学模型

### 1.2.1 炕体各层材料控制方程

利用焓法建立炕体各层的非稳态传热模型。

$$\rho_i \frac{\partial H_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

式中  $\rho_i$ 、 $c_i$  与  $\lambda_i$  为分别代表不同材料层的密度、比热和导热系数。对常物性材料, 焓与温度关系满足  $H_i = c_i \times T_i$ ; 对于相变材料, 焓与温度的关系式为:

$$H = \begin{cases} c_s (T - T_s) & T \leq T_s \\ H_s + \frac{\Delta H (T - T_s)}{T_l - T_s} & T_s \leq T \leq T_l \\ H_l + c_l (T - T_l) & T \geq T_l \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $c_s$  和  $c_l$  分别为相变材料为固相和液相时的定压比热容,  $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ ;  $T_s$  和  $T_l$  分别为相变材料熔化时的起始和终止温度,  $K$ ;  $H_s$  和  $H_l$  分别为相变材料在  $T_s$  和  $T_l$  点时所对应的比焓值,  $J \cdot kg^{-1}$ ;  $\Delta H$  是为相变材料潜热,  $J \cdot kg^{-1}$ 。

### 1.2.2 太阳能集热器内换热介质温度方程

假设集热器水管内水沿径向分布均匀, 仅考虑其沿轴向的一维传热和太阳辐射传热。其基本方程如下:

$$\rho c \frac{\pi d^2}{4} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{AG\eta}{l} \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为水的密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $c$  为水的定压比热容,  $J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$ ;  $d$  为集热器的水管直径,  $m$ ;  $u$  为集热器水管流速,  $m$ ;  $l$  为集热器内水管的总长度,  $m$ 。

经核算, 本文可忽略扩散项的影响, 对流项近似采用上风差分<sup>[21]</sup>。将基本方程离散成  $n$  段, 每段长度为  $\Delta x$ 。除首尾点外, 每段节点中心定义为  $P$ , 其相邻的前后段的中心点分别为  $W$  和  $E$ 。除首尾点外, 离散方程的形式如:

$$T_P^{k+1} = \frac{\Delta x}{\Delta x + u\Delta t} T_P^k + \frac{u\Delta t}{\Delta x + u\Delta t} T_W^{k+1} + \frac{\Delta x \Delta t}{\Delta x + u\Delta t} M \quad (4)$$

### 1.2.3 定解条件

(1) 初始条件: 假设在初始时刻  $\tau=0$  时, 炕体内各层材料及太阳能集热器内流体温度一致。

$$T(x, y, \tau)|_{\tau=0} = T_{water} = T_{init} \quad (3)$$

(2) 边界条件

① 炕体上表面为对流辐射换热边界<sup>[22]</sup>:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q_r + q_c = \alpha \times (t_f - t_a) \quad (4)$$

$$q_r = \sigma F_r \left[ (t_f + 273)^4 - (t_s + 273)^4 \right] \quad (5)$$

$$q_c = 2.42 \times \frac{(t_f - t_a)^{1.31}}{D_e^{0.08}} \quad (6)$$

式中,  $q_r$  为辐射换热量,  $W \cdot m^{-2}$ ;  $q_c$  为对流换热量,  $W \cdot m^{-2}$ ;  $\alpha$  为综合对流换热系数,  $W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$ , 约为<sup>[23]</sup> $10 W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$ ;  $t_f$  为炕体上表面平均温度,  $^\circ C$ ;  $t_a$  为空气的温度,  $^\circ C$ ;  $\sigma$  为斯蒂芬玻尔兹曼常数,  $W \cdot (m^2 \cdot K^4)^{-1}$ ,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W \cdot (m^2 \cdot K^4)^{-1}$ ;  $F_r$  为辐射换热系数, 无量纲, 由 Hottel 方程确定, 此处取 0.87<sup>[22]</sup>;  $t_s$  为除辐射面外的其余表面的加权平均温度, 根据[24]取  $(t_a - 1.1)$ ,  $^\circ C$ ;  $D_e$  为辐射板的当量直径,  $D_e = 4A/L$ , m。

②两侧为绝热边界: 由于相邻计算单元的温度场呈对称分布, 可近似将计算单元的左右两面看成是绝热面。

$$k_f \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=ac, eg, bd, fh} = 0 \quad (7)$$

③水管的进出口面: 炕体水管的进出口的温度值是不断变化的, 其进口温度为太阳能集热器的出口水温, 由自定义程序计算给出, 其出口温度为 Fluent 自身内部计算得到。

## 2 模拟工况及参数确定

### 2.1 太阳能热水相变炕的性能参数

太阳能热水相变炕在进行动态运行时, 分别涉及到太阳能集热器、相变炕以及电辅热层等多个部分。因此, 在分析太阳能热水相变炕的供暖性能时, 应考虑它的多项性能参数。该文主要关注的性能参数为集热器的集热效率、相变材料的液相率、炕的上炕面温度以及炕的太阳能贡献率。其中, 相变材料的液相率和炕的上炕面温度可通过 Fluent 软件提供的监测设置直接得出。集热器集热效率与太阳能贡献率则使用下式进行计算得出。

太阳能集热器的瞬时集热效率定义为: 稳态(或准稳态)条件下, 集热器在规定时间输出的能量与规定的集热器面积和同一时段内入射在集热器上的太阳辐照度的乘积之比<sup>[25]</sup>, 即为:

$$\eta = \frac{Q_U}{AG} \quad (8)$$

式中,  $Q_U$  为集热器在规定时间输出的能量,

$W$ ;  $A$  为集热器总面积,  $m^2$ ;  $G$  为太阳辐照度,  $W \cdot m^{-2}$ 。

由集热器的瞬时能量平衡方程, 通过归一化温差的计算, 可推导得出集热器的集热效率用集热系统的进口水温来表示<sup>[25]</sup>。可见, 集热效率不是恒定不变的常数值, 会受到外界环境变化而变化。在外界太阳辐照度较大或环境温度较高时, 具有较高的值, 反之, 则比较低。根据《平板型太阳能集热器热性能试验方法》通过测试数据的统计拟合, 得到集热器的瞬时效率主要与集热器传热工质的进口温度、太阳辐照度和空气温度均有关。

$$\eta = \eta_0 - \mu \frac{t_{in} - t_a}{G} \quad (9)$$

式中,  $\eta_0$  为集热器光效率, %;  $\mu$  为集热器热损系数, %;  $t_{in}$  为集热器的传热工质进口温度,  $^\circ C$ ;  $t_a$  为集热器外环境温度,  $^\circ C$ 。

太阳能热水相变炕的太阳能贡献率定义为: 炕在运行期间从太阳得到的热量与从太阳得到的热量与夜间炕电加热消耗的的热量的之和的比值<sup>[14]</sup>。

$$f = \frac{Q_{solar}}{Q_{solar} + Q_{aux}} \quad (10)$$

式中,  $Q_{solar}$  为炕运行期间从太阳得到的能量, kJ;  $Q_{aux}$  为夜间电辅热层开启时所消耗的能量, kJ。

### 2.2 不同地区的选取

选取哈尔滨, 北京、银川三个城市, 可分别看作东北地区, 华北地区和西北地区的代表城市。三个地区均属于严寒或寒冷地区, 都有使用炕体的习俗; 三个地区都属于太阳资源 II、III 区, 是我国大多数的太阳能资源区域; 其经纬度有一定差距, 气候条件不同, 采暖期时间长短也不相同。因此, 将这三个地区选做典型研究地区。

表 2 不同地区的地理参数

类型	哈尔滨	北京	银川
纬度/ $^\circ$	45°45'	39°57'	38°35'
经度/ $^\circ$	126°38'	116°3'	106°16'
年平均气温/ $^\circ C$	4.2	12.3	9.0
太阳能资源区	III	II	II
采暖期	10.20~	11.15~	11.01~
	4.20	3.15	3.31
水平面年总辐照量/kJ	4636.58	5570.32	6041.84
倾斜面年总辐照量	5780.8	6582.78	7159.46

/kJ

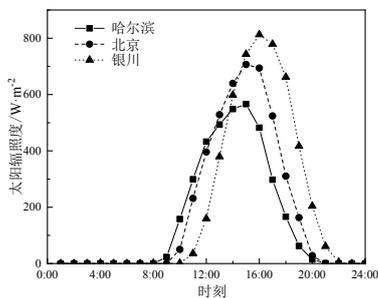
由于该文各地区太阳辐照度差异不大, 因此集热器面积均使用估算得到 3 块面积为 2m<sup>2</sup> 的集热器。不同地区由于其地理位置的不同, 其采暖期开始时间和长短也各不相同。该文根据各地区采暖期的集热器倾斜面上的总辐照量和估算的集热效率, 可计算得到相变层的厚度。计算过程中使用的参数及结果如表 3 所示。

表 3 不同地区的计算参数

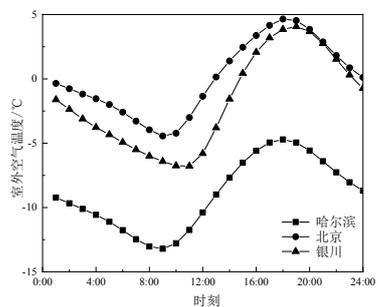
Table 3 Calculating parameters in different areas

类目	哈尔滨	北京	银川
采暖期总辐照量/kJ·m <sup>-2</sup>	2355137.3	1864765.5	2652061
采暖期日均辐照量/kJ·m <sup>-2</sup>	12799.7	15411.3	17563.3
日均集热效率/%	45	55	55
相变层厚度/mm	25	40	45

为考察太阳能热水相变炕在采暖期的供暖效果, 该文使用各地区在典型年采暖期平均的逐时数据进行模拟。图 4 所示分别为三个地区采暖期平均逐时的太阳辐照度和室外空气温度变化图。



(a) 太阳辐照度



(b) 室外空气温度

图 4 三个地区的气象参数

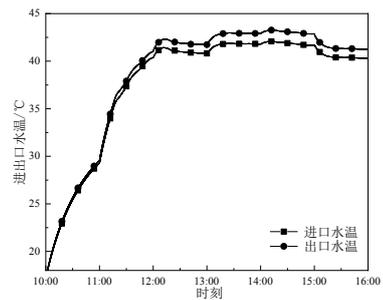
Fig.4 Meteorological parameters in three areas

### 3 不同地区的模拟结果及分析

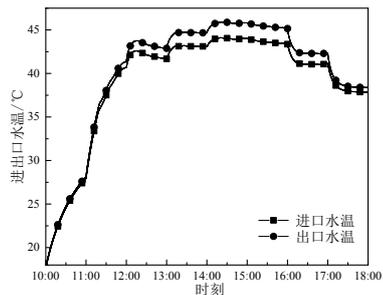
#### 3.1 集热器效率

太阳能集热器的效率与其进出口水温关系较为密切, 所以以下将先对集热器进出口水温分析, 再对集热器效率的变化进行说明。观察图 5 的不同地区集热器进出口水温, 发现其水温变化情况基本与太阳辐照度大小相对应。哈尔滨地区 9 点时太阳开始升起, 但由于此时太阳辐照度低导致的集热器效率较低, 采暖系统并未开始运行。10 点后系统开始运行, 水温随时间逐渐上升。当水温高于相变材料的相变温度时, 相变材料开始熔化, 炕体储热能力增强, 炕内水管出口水温先缓慢升高再降低, 集热器进出口水温随之变化。在 13-14 点间, 由于太阳辐照度的增大, 循环水在集热器中吸收了更多热量, 温度较之前更高。在 15-16 点间, 水温随着太阳辐照度的降低略有降低。16 点后的太阳辐照度较弱, 系统停止不运行。全天仅 6 个小时的辐射为有效辐射时间, 其余时间炕体仅进行放热。

北京地区集热器的进出口水温呈阶梯状逐渐上升, 这是由于本文的太阳辐照度和室外空气温度均采用的是每小时变化一次。北京在 16-18 点, 水温呈较大幅度地下升趋势。这是由于北京地区在 16 点后, 太阳辐照度迅速减小。但炕体仍在不断吸收循环水的热量, 因此集热器内循环水温度急剧下降。银川地区集热器的进口出水温度变化规律与北京地区相似, 仅太阳辐射持续时间较长, 在此不过多叙述。



(a) 哈尔滨



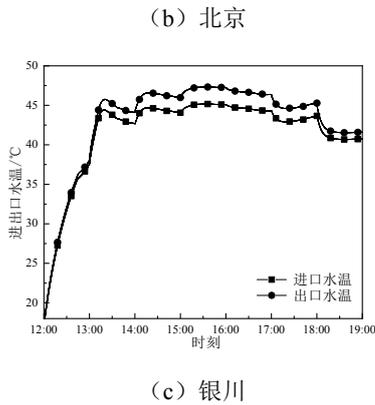


图5 不同地区集热器的进出口水温

Fig.5 Water temperature at inlet and outlet of collector in different areas

由于清晨和傍晚的太阳辐照度较弱,集热器效率较低,系统并未启动运行。从表4可以看出,哈尔滨、北京和银川的太阳能集热系统全天分别运行了6、8、7个小时。哈尔滨地区由于其太阳辐照度弱,同时室外空气温度也很低,向外界散失了较多能量,其集热器的全天平均效率为三个地区内最低仅为40.2%。表4中给出的是集热器每小时的平均效率,实际中集热效率会随入口水温的变化时时刻刻地进行变化,随着入口水温的升高而降低,但水温稳定后降低幅度较小。通过对比太阳辐照度和室外空气温度值以及表4,可得到集热器效率主要受太阳辐照度影响较大,受入口水温和室外空气温度影响小的结论。

表4 不同地区集热器的时均集热效率

Table 4 Hourly collector efficiency in different areas

时刻	哈尔滨	北京	银川
10:00	32.1	34.2	—
11:00	37.1	41.9	—
12:00	39.9	48.2	44.2
13:00	44.1	53.5	50
14:00	45.9	55.9	52.9
15:00	42.1	56.2	58.1
16:00	—	51.4	58
17:00	—	37.2	56.8
18:00	—	—	52.8

### 3.2 相变材料的液相率

从图6(a)可得,哈尔滨、北京和银川的在集热结束时刻相变材料液相率分别达到48.7%、81.1%、92.3%。北京和银川地区的相变材料均几乎完全熔化,可见根据采暖期日均辐照量和集热器效率估算

得到的相变层厚度较为合理,几乎可将日间得到的太阳能全部储存在相变材料和炕板中,以供夜晚使用。而哈尔滨由于早晚集热效率过低,集热器全天运行时间短,所以较估算设计时得到的热量少,相变材料仅熔化了一半左右。若相变材料填充过多,在集热结束后熔化的较少,不仅会造成相变材料的浪费,还会使得上炕面温度上升的过于缓慢。若填充过少,会使得相变材料过早完全熔化。之后集热器吸收的太阳能只能由炕体各层材料以显热的方式吸收,将导致上炕面温度过高,超出人体舒适范围。

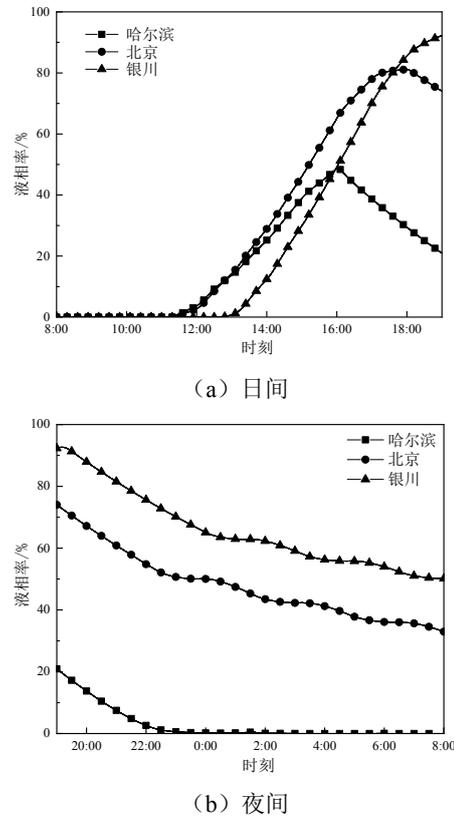


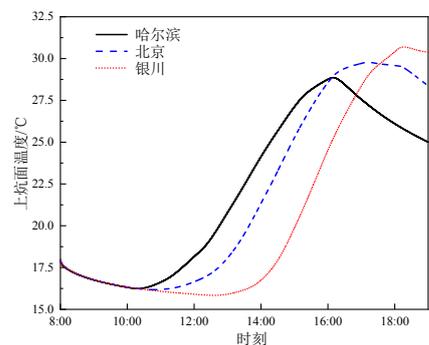
图6 不同地区相变材料的液相率

Fig.6 Liquid phase ratio of phase change materials in different areas

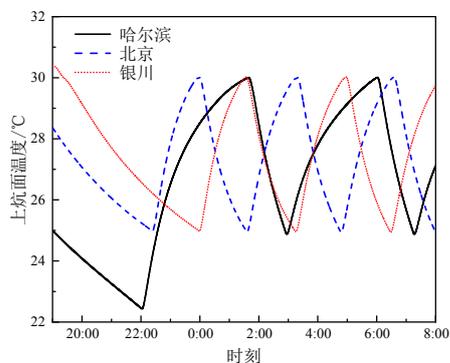
图6(b)显示了夜间相变材料液相率的变化情况。由于22:00前,电辅热层未开启,炕体散热主要依靠相变材料的凝固放热,此阶段内相变材料液相率下降快。在22:00后,由于电辅热层的开启,上炕板层的温度较之前有所升高,影响了相变材料的凝固速度。一旦电辅热层处于加热状态,相变材料的液相率几乎维持不变,其余时间液相率变化较之前缓慢一些,但仍在下降。在次日8:00时,哈

尔滨、北京和银川的液相率分别降至 0、32.9 和 50.8%。因为哈尔滨地区蓄热时间仅有 6 个小时,而在电辅热层开启前相变材料又已经进行了 6 小时的放热,所以在次日清晨相变材料几乎完全凝固。而银川地区白天蓄热时间长达 7 小时,电辅热层开启前仅放热了 3 小时,后期受电辅热影响相变材料凝固放热缓慢。同时,银川地区本身相变材料层较厚,储存了较多的能量,因此在次日 8:00 点时热量未被完全释放。但是考虑早晨太阳辐照度较弱且日间不开启辅助热源,炕体温度较低,相变材料可依旧继续凝固放热,可在次日开始运行时留有部分余量。但余量过多时,将造成相变材料的浪费且影响下一周期的蓄热过程。因此,针对某些地区太阳能热水相变炕的相变材料夜晚凝固缓慢,次日留有过多余量的问题,应从相变材料自身放热性能和电辅热层的运行模式上进行优化,使得将日间储存的热量可以及时放出,才能最大程度利用太阳能资源。

### 3.3 上炕面温度



(a) 日间



(b) 夜间

图 7 不同地区的上炕面温度

Fig.7 Temperature of upper surface of Kang in different areas

图 7 (a) 可知,上午由于太阳辐照度弱和相变材料导热系数低等原因,上炕面温升速度缓慢,下午温升速度有所提高。哈尔滨、北京和银川的日间上炕面平均温度分别可以达到 22.13、21.95 和 20.43°C,温度均在地板辐射采暖的最高限制范围内<sup>[22]</sup>,可作为低温热源向室内进行散热。银川地区的日间总辐照量虽然高于哈尔滨,但由于其相变层较厚,上炕面温度上升更加缓慢,因此银川地区的上炕面日间平均温度要低于哈尔滨。

图 7 (b) 可以看出,在 22:00 时,哈尔滨、北京和银川地区的上炕面温度已分别降至 22.45、25.25 和 26.59°C,因此哈尔滨电辅热层立即启动。而北京和银川地区分别在 22:22 时和 23:57 时上炕面温度才降至 25°C,电辅热层才启动。三个地区夜晚的电辅热启动时长分别为 7.5、5.7 和 4.9h,夜晚的上炕面平均温度分别可达到 26.67、27.30 和 27.50°C,可见太阳能资源丰富的地区不仅夜间电辅热运行的时间短,夜间上炕面平均温度也较其他地区更高。

表 5 不同地区的上炕面平均温度

Table 5 The average temperature of upper surface of Kang in different areas

	日间平均温度/°C	夜间平均温度/°C
哈尔滨	22.13	26.67
北京	21.95	27.30
银川	20.43	27.50

### 3.4 太阳能贡献率

由图 8 所示,哈尔滨、北京和银川地区的炕体日间得热量与其太阳能资源相关,因此银川地区得热量最大,全天可达 49189.8kJ。但其夜晚电加热量的减小幅度并不如得热量增大的幅度显著。这是因为电辅热层开启后会影响到相变材料的放热,所以相变材料在日间储存的热量在周期结束时未能完全有效放出。哈尔滨、北京和银川的太阳能贡献率分别为 49.9、70.1 和 76.5%,较其他文献更高一些,是由于本文的太阳能热水相变炕仅保证了人体在进行睡眠活动时的夜晚炕面温度的舒适性。白天室内采暖需采用其他有效方式,相变炕仅作为低温热源辅助,并未对炕面温度进行设定。因此,电辅热仅夜间开启消耗电量较小,则太阳能贡献率较大。证明了太阳能热水相变炕在我国北方多地区均具有良好的效果。

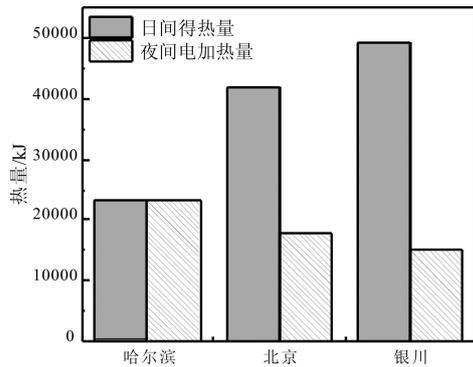


图 8 不同地区炕体日间得热量和夜间电加热量

Fig.8 Heat release of day and night in different areas

表 6 不同地区的太阳能贡献率

Table 6 The Solar energy contribution rate in different

regions			
地区	哈尔滨	北京	银川
太阳能贡献率/%	49.9	70.1	76.5

#### 4 结论

该文建立了三维太阳能热水相变炕的传热模型，研究了其不同地区的适宜性。选取了具有代表性的典型地区，并根据其采暖期的日均辐射量对不同地区的炕体的相变层厚度进行了设计计算，后使用各地区采暖期的平均逐时数据对太阳能热水相变炕进行了模拟，得到以下结论：

(1) 太阳能集热器效率受太阳辐射度影响较大，受入口水温和室外空气温度影响小。因此，哈尔滨地区由于太阳辐射度和室外空气温度低，其全天的太阳能集热器平均效率在三个地区内最低为 40.2%，全天仅有 6 小时集热系统开启。

(2) 相变材料的凝固速度受辅助热源影响较大。当夜晚电辅热层开始加热后，相变材料的液相率将几乎不变化，电辅热层停止加热时，相变材料的液相率缓慢下降。因此，可能会导致炕内相变材料次日未完全凝固而留有过多余量的问题。应从相变材料自身放热性能和电辅热层的运行模式上进行改进优化，使得将日间储存的热量可以及时放出，才能最大程度利用太阳能资源。

(3) 哈尔滨、北京和银川的太阳热水相变炕在模拟工况下太阳能贡献率分别可达到 49.9%、70.1%和 76.5%。炕体基本保证了人体在进行睡眠活动时的夜晚炕面的舒适性。证明了太阳能热水相

变炕在我国北方多地区均具有良好的效果。

#### 参考文献：

- [1] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告(2008)[M].北京:中国建筑工业出版社,2008: 173.
- [2] Zhuang Z, Li Y G, Chen B, et al. Chinese Kang as a domestic heating system in rural northern China-A review[J]. Energy and Buildings, 2009,41(1):111-119.
- [3] Qian H, Li Y G, Zhang X S, et al. Surface temperature distribution of Chinese kangs[J]. International Journal of Green Energy, 2010,7(3):347-360.
- [4] 高翔翔,胡冗冗,刘加平等.北方炕民居冬季室内热环境研究[J].建筑科学,2010,26(2):37-40.
- [5] 刘满,夏晓东.辽宁省农村住宅的采暖方式与能耗研究[J].建筑节能,2007,35(7):56-59.
- [6] 张寅平,胡汉平,孔祥冬,等.相变储能—理论和应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1996:1-5.
- [7] 袁艳平,向波,曹晓玲,等.建筑相变储能技术研究现状与发展[J].西南交通大学学报,2016,51(3):585-598.
- [8] Yang M, Yang X D, Wang P S, et al. A new Chinese solar kang and its dynamic heat transfer model[J]. Energy and Buildings, 2013,62(3):539-549.
- [9] Yang M, Yang X D, Wang Z F, et al. Thermal analysis of a new solar kang system[J]. Energy and Buildings, 2014,75(2):531-537.
- [10] 王崇杰,管振忠,张蓓,等.传统火炕的生态技术改造—太阳炕系统[C].北京:中国建筑工业出版社,2006: 566-569.
- [11] 张蓓.寒冷地区农居新型太阳能采暖技术设计研究[D].济南:山东建筑大学,2007.
- [12] 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,2013,31(3):11-13.
- [13] 李刚,李小龙,李世鹏,等.太阳能辅助火炕供暖系统热工性能[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(2): 305-311.
- [14] 江清阳.与新型百叶集热墙结合的复合太阳能炕系统实验和理论研究[D].合肥:中国科学技术大学,2012.
- [15] 崔玉清.太阳能炕和 Trombe 墙相结合的新型采暖系统的数值研究[D].合肥:中国科学技术大学,2009.
- [16] 郑豪放.太阳能炕主被动复合采暖系统在青海的应用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2016.

(下转第 659 页)