

中国传统火炕非均质设计与性能优化

李洪强^{1,2,3†}, 毕名达^{1,2,3}, 阳小华⁴, 刘丽芳⁵, 周彦^{1,2,3}, 徐峰⁶, 张国强^{1,2,3}

- [1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082;
2. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082;
3. 湖南大学 国家级建筑安全与环境国际联合研究中心, 湖南长沙 410082;
4. 湖南大学设计研究院有限公司, 湖南长沙 410082;
5. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南湘潭 411201;
6. 湖南大学 建筑与规划学院, 湖南长沙 410082]

摘要:针对中国传统火炕(Heated Kang)设计不合理导致的炕面温度不均、热舒适性差、热效率低等问题,提出了一种传统火炕的非均质设计方法.为更好地揭示新型火炕设计原理与分析火炕热均衡性、热舒适性等性能,通过CFD模拟平台建模,研究火炕的竖洞率(竖洞区域占火炕整体区域的比例)、炕板蓄热层厚度以及入口烟气温度、出入口相对位置等关键参数对炕板表面温度均衡度的影响.结果表明,竖洞率为83%,炕板蓄热层厚度为80-50-20 mm(I区80 mm, II区50 mm, III区20 mm),入口烟气温度为275 °C,出入口形式为倒卷帘时炕面温度最为均匀,此时炕面温度标准差为5.6 °C,而且具有较高的平均温度,为36.4 °C.通过采用内部结构非均质设计方法,火炕的表面热均衡性显著提高50%.倒卷帘形式的出入口相对位置在优化炕面温度均匀性的同时,显著提高炕面最低温度9.1 °C.该研究结果为传统火炕节能、提高热效率提供新思路,对传统火炕的创新改进具有重要指导意义.

关键词:农村供暖;乡村振兴;中国传统民居;热舒适性

中图分类号:TU111.4;TU241.4 **文献标志码:**A

Research on Heterogeneous Design and Performance Optimization of Chinese Traditional Heated Kang

LI Hongqiang^{1,2,3†}, BI Mingda^{1,2,3}, YANG Xiaohua⁴, LIU Lifang⁵,
ZHOU Yan^{1,2,3}, XU Feng⁶, ZHANG Guoqiang^{1,2,3}

- [1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education (Hunan University), Changsha 410082, China;
3. National Center for International Research Collaboration in Building Safety and Environment, Hunan University, Changsha 410082, China;
4. Hunan University Design and Research Institute Co., Ltd., Changsha 410082, China;
5. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
6. School of Architecture and Planning, Hunan University, Changsha 410082, China]

* 收稿日期:2022-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008166, 5200082163), National Natural Science Foundation of China(52008166, 5200082163);
湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30256), Natural Science Foundation of Hunan Province(2021JJ30256)

作者简介:李洪强(1980—),男,河北唐山人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail:lhq@hnu.edu.cn

Abstract: Aiming at the problem that the unreasonable design of the traditional Heated Kang leads to uneven surface temperature, worse thermal comfort, and low thermal efficiency, a heterogeneous design method for traditional Heated Kang was proposed in this study. Meanwhile, in order to better reveal the design principle of this new Heated Kang and analyze its thermal equilibrium and thermal comfort, the influence of the vertical hole rate (VHR—the proportion of the vertical hole area to the overall area of Heated Kang), the thickness of the heat storage layer, the temperature of the inlet flue gas, and inlet and outlet positions of Heated Kang on the thermal uniformity and thermal comfort were investigated by CFD. The results showed that the combination with the vertical hole rate of 83%, the thickness of the heat storage layer of 80–50–20 mm (80 mm in Zone I, 50mm in Zone II, and 20 mm in Zone III), the inlet flue gas temperature of 275 °C, the inlet and outlet positions in the form of turn-around is optimum ones. A uniform Kang surface temperature can be obtained with a standard deviation of 5.6 °C and a higher average temperature of 36.4 °C. Additionally, the surface heat balance of the Heated Kang is significantly improved by 50% by adopting the heterogeneous design method of the internal structure. The design of the turn-around not only makes the temperature of the Kang surface more uniform but also increases the temperature of the Kang tail by 9.1 °C. This work provides a new idea for the energy-saving design and improvement of thermal efficiency of traditional Heating Kang and has important reference value for the further research and development of Heating Kang.

Key words: rural heating; rural revitalization; traditional dwellings in China; thermal comfort

随着人民生活水平的提高,人们对建筑室内环境的要求越来越高,极大地增加了建筑能源消耗.其中,全国建筑业一次能源消耗占全国能源消耗的36%,而城市居民住房和农村住房占到了总建筑的1/4^[1].根据中国居住建筑采暖规范相关说明,集中采暖主要在北方地区,截至2020年城市集中供热面积已达98.82亿m²^[2],集中供热大幅度改善了城市居民的生活、工作环境,但并未完全覆盖农村地区.

农村居民分布具有人口密度低、居住分散等特点.南方部分地区冬季室内温度低,使用火桶等取暖设备^[3-4].北方农村地区主要采用分散式的局部供暖形式——火炕、土暖气等,此类供暖方式存在能效低、污染严重等诸多问题.如:土暖气主要使用煤炭作为能源,而农村居民所获得的煤炭大多是劣质散煤,使用低质量的散煤被认为是北方农村大气污染的主要原因之一^[5-6].

中国北方农村供暖应用范围更广的是传统火炕,该种供暖方式具有较多优势:传统火炕的制作简单,可以就地取材,且主要由土质构成,热惰性,拥有一定的热舒适性^[7];传统火炕及其配套炉灶可以满足烹饪、就寝、供暖的多重需求^[8].当前,我国农村建筑虽然有多种采暖方式,传统火炕依然是中国北方乡村重要的文化符号,发挥着不可替代的作用^[9].

相关学者对传统火炕进行了大量研究工作.He等^[10]优化太阳能炕的性能,并基于预测平均投票对

太阳能炕的睡眠热舒适环境进行了评估.戴天钊^[11]提出一种相变蓄热式太阳能炕,并运用Fluent对炕进行优化,通过试验得出合理的太阳能炕运行参数.Gao等^[12]运用热力学理论建立炕供暖房间的动态热数学模型,并运用其预测房间温度.Bian^[13]基于Fluent建模获得不同外界条件下,炕供暖室内的温度场变化情况.

但目前传统火炕应用尚存一定问题^[14],如:热效率低、环境污染大、炕面温度分布不均^[15].其中,炕面温度的均衡度是直接影响农村居民生活的关键因素.由于传统火炕结构、烟气温度、制作材料等因素的限制,炕头温度可达60~70 °C,炕尾温度又过低,使人产生极大的不舒适感,农村的围护结构保温性能不佳,在这样的情况下,传统火炕的供暖效果进一步降低^[8].

针对火炕炕面温度均衡性问题,王丹等^[16]提出采用倾斜炕板来改善炕面温度的不均匀性,并对不同倾斜度炕板的落地炕和吊炕进行数值模拟研究,结果表明:炕头黏土厚度80 mm,炕梢黏土厚度20 mm时具有相对最优的换热性能与采暖效果.芦欣^[17]通过试验得出节能型吊炕的热工性能,建立数值模型并对节能型吊炕的性能进行研究.结果表明,炕板倾斜放置、炕头炕尾不同的蓄热层厚度均可以降低炕面温度的不均匀性.张茜^[18]对东北传统民居少数民族弯曲炕、满屋炕建模并进行数值模拟,研究

得到满屋炕、弯曲炕的合理运行参数. Yu等^[9,19]对目前的炕的形式、烟道结构、换热性能进行总结分析,客观评价近年来新提出的炕形式,并提出若干研究点. 尽管很多学者对传统火炕的传热过程^[20-22]分析建模,但并未定量地对传统火炕的内部结构与上散热面进行研究,传统火炕还存在炕面温度不均、热舒适性差等问题^[23].

为此,本文提出中国传统火炕非均质设计方法,通过传统火炕内部结构与炕板蓄热层的非均质设计与烟气流场的优化,使传统火炕的炕面温度更加均匀,以提高传统火炕供暖的舒适性. 借助计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析平台,对非均质设计中国传统火炕进行建模,分析关键设计参数——竖洞率、炕板蓄热层厚度、入口烟气温度、烟气出入口位置对烟气流动和传统火炕热性能的影响规律. 本文对传统火炕的改进提出了定量分析方法,为中国传统火炕供暖改进提供了新思路.

1 中国传统火炕非均质设计方法

1.1 传统火炕温度场失衡影响因素

传统火炕内部烟气流动的同时向炕体传热,使火炕温度升高,烟气温度降低. 由基本传热规律可知,炕板表面温度场必然出现炕头温度高、炕尾温度低的情况. 由此可以分析,传统火炕的失衡因素有以下几点:

1)火炕内部结构不合理,导致烟气局部滞留,炕面产生局部的高温区.

2)火炕上散热面厚度不合理,合适厚度的散热面有助于降低炕头的高温,提高炕尾的温度,提高炕面温度均衡性.

3)火炕蓄热能力不强,加热后很快冷却,无法长时间供热.

本文针对上述问题提出两种优化方法:传统火炕内部结构非均质设计和传统火炕上散热面非均质设计. 并运用统计学原理,使用炕面温度标准差来评价炕面温度的均匀程度^[15]:

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

式中: D 为炕面温度标准差, $^{\circ}\text{C}$; x_i 为炕面测点温度, $^{\circ}\text{C}$; \bar{x} 为炕面温度平均值, $^{\circ}\text{C}$; n 为炕面测点个数.

1.2 传统火炕温度场优化——非均质设计方法

1.2.1 传统火炕非均质设计——内部结构非均质设计

传统火炕具有竖洞、横洞、花洞等内部结构形

式,如图1所示. 传统火炕的内部支柱具有支撑炕板、蓄热、改变烟气流场的作用. 其中,改变烟气流场可以进一步影响火炕的热过程,因此合理安排支柱的摆放位置,可以改善火炕的温度场.

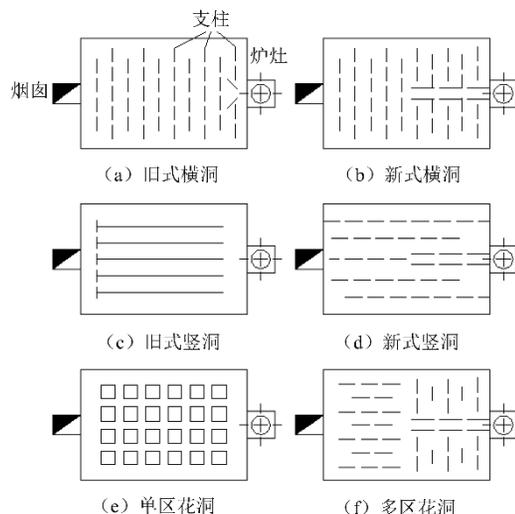


图1 传统火炕内部结构^[18]

Fig.1 Internal structure models of traditional heated Kang

本文提出内部结构非均质设计方法:在烟气入口附近(炕体前端)降低烟气流动阻力,烟气快速通过该区域,减少传热时间,可以降低炕头温度;在烟气出口附近(炕体后端)适当地增加流动阻力,增强传热,利用炕支柱的蓄热特性,可以提高炕尾的温度. 竖洞区域的支柱摆放方向与烟气流动方向相同,阻力较小,横洞区域的支柱摆放方向与烟气流动方向垂直,阻力较大,所以将竖洞区域集中在烟气入口,横洞区域集中在烟气出口,有效地控制烟气在传统火炕中的流动过程,改善火炕表面的温度均衡性.

由图1可知,花洞形式为横洞与竖洞以一定的比例组合而成,本研究将竖洞区域占火炕整体区域的比例称为竖洞率,如图2所示,计算公式见式(2).

$$\text{竖洞率} = \frac{S}{L} \times 100\% \quad (2)$$

式中: S 为火炕中竖洞区域的长度, m ; L 为火炕的总长度, m .

根据上散热面分区和内部结构非均质设计方法综合考虑,本文对上述花洞火炕模型进行适当的简化,图3为简化后的新型多区花洞火炕模型,并且用作后续研究.

1.2.2 传统火炕非均质设计——上散热面非均质设计

传统火炕最大的散热面是上散热面,上散热面也是直接与人体接触、对人体影响最大的散热面,因此本文优先研究上散热面的非均质设计,权衡考虑

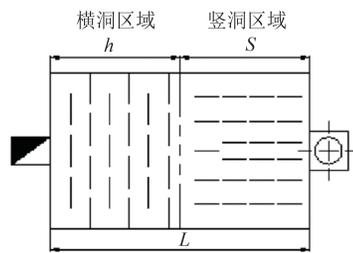


图2 传统火炕内部结构非均质设计方法

Fig.2 Heterogeneous design method for the internal structure of the traditional Kang

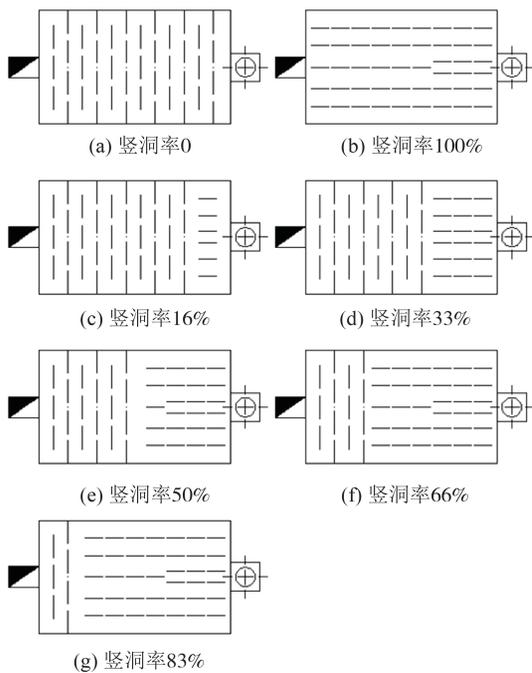


图3 新型多区花洞火炕模型

Fig.3 Models of the new mixed-mode flue Kang

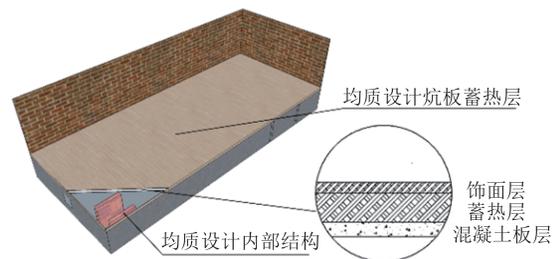
火炕的经济性与施工的容易度,本文提出了将上散热面分成三个区域进行非均质设计.

图4为本文所提出的新型火炕上散热面非均质设计结构示意图.本文提出上散热面非均质设计方法:将火炕炕面分为三个区域,分别是距离烟气入口较近的I区、中间区域II区和距离烟气出口较近的III区.增加I区的炕板蓄热层厚度,减小III区的炕板蓄热层厚度,使得I区炕板具有更大的传热热阻,降低I区炕面温度,III区炕板具有更小的传热热阻,提高III区炕面温度,最终达到控制炕面温度均衡性的目的.

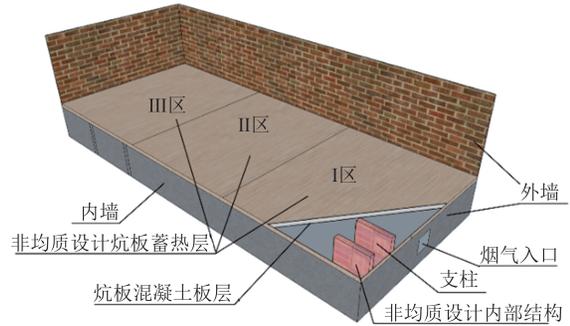
2 非均质设计中国火炕模型建立及求解方法

2.1 物理模型

本文以中国典型火炕的尺寸为案例进行建模,



(a)传统火炕物理模型



(b)新型非均质设计传统火炕物理模型

图4 传统火炕与非均质设计火炕物理模型对比图

Fig.4 Physical model of a traditional Kang and the Kang for new heterogeneous design

非均质设计中国火炕内壁尺寸为长(L)×宽(W)×高(H)=5 m×2.1 m×0.5 m.

根据中国传统火炕的使用情况,它与周围环境的热量交换主要是通过火炕与室内空气的自然对流、炕与炕内烟气的对流、炕与室内外物体的热辐射、炕与地面的导热,因为中国火炕内部的传热条件比较复杂,本文对火炕的热过程进行如下假定:

- 1)忽略烟气夹带的杂质固体颗粒;
- 2)烟气入口流量相对固定;
- 3)忽略火炕的炉灶和烟囱部分;
- 4)火炕的传热过程为稳态过程;
- 5)火炕下垫面为绝热;
- 6)火炕围护结构的传热系数恒定;
- 7)忽略烟气的辐射作用.

2.2 数学模型及求解

2.2.1 控制方程

火炕烟气的流动遵循着质量、动量和能量守恒定律.

- 1)质量守恒方程可以写成如下形式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = S_m \quad (3)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; \mathbf{v} 为速度向量, m/s ; S_m 为广义源项, W/m^3 .

- 2)惯性参考系中的动量守恒方程可以写成如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho g + F. \quad (4)$$

式中: p 为静压力,Pa; τ 为应力张量,Pa; ρg 与 F 分别为重力与外力,N.

式(4)中应力张量 τ 为:

$$\tau = \mu \left[(\nabla v + \nabla v^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot v I \right]. \quad (5)$$

式中: μ 为动力黏度,Pa·s; I 是单位张量,Pa.

3)Fluent求解的能量方程为以下形式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \\ \frac{\lambda}{c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_m. \end{aligned} \quad (6)$$

式中: T 为温度,K; λ 为导热系数,W/(m·K); S_m 为广义源项,W/m³; u 、 v 、 w 分别为烟气在 x 、 y 、 z 方向上的速度,m/s; c_p 为定压比热,J/(kg·K).

2.2.2 求解方法

采用限制较小的DO辐射模型,采用Realizable- $k-\varepsilon$ 湍流模型,选择标准壁面函数.离散化方法为二阶迎风格式,压力速度耦合算法为SIMPLE算法.

2.3 边界条件及热物性参数设置

2.3.1 边界条件设置

火炕与外界环境的换热主要由与围护结构的辐射和与空气的对流传热两部分组成.

火炕的对流换热系数可以用公式(7)计算.

$$h_c = Nu \frac{\lambda}{l}. \quad (7)$$

式中: Nu 为火炕自然对流换热的努谢尔特数; l 为特征长度,m; λ 为定性温度下的空气导热系数,W/(m·K).

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n. \quad (8)$$

式中: C 和 n 为由实验确定的常数; Gr 为定性温度下的格拉晓夫准则数; Pr 为定性温度下空气的普朗特准则数.

$$Gr = \frac{g\alpha\Delta t l^3}{\nu^2}. \quad (9)$$

式中: g 为重力加速度,m/s²; α 为流体容积膨胀系数,1/K; Δt 为流体与壁面温度差,K; ν 为定性温度下空气运动黏度,m²/s.

由牛顿冷却公式可以得到火炕辐射换热系数的计算公式:

$$h_r = \frac{\varepsilon C_b \left[\left(\frac{T_m}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{am}}{100} \right)^4 \right]}{t_m - t_f}. \quad (10)$$

式中: h_r 为辐射换热系数,W/(m²·K); C_b 是黑体辐射系数,取5.67 W/(m²·K⁴); ε 为火炕体表面发射率; T_m 为散热面外表面温度,K; T_{am} 为环境中围护结构温度,K; t_m 为散热面外表面温度,K; t_f 为室内空气温度,K.

对流换热系数与辐射换热系数可以综合为复合换热系数:

$$h_m = h_c + h_r. \quad (11)$$

经上述过程计算,中国火炕的室内侧面复合换热系数为9.18 W/(m²·K),室外侧面复合换热系数为8.26 W/(m²·K),炕面复合换热系数为10.81 W/(m²·K).入口边界为速度入口,出口采用自由出流边界,下垫面为绝热表面.

2.3.2 材料物性参数设置

材料热物性参数如表1所示.

2.3.3 网格划分及无关性验证

表2为不同网格数下的炕面温度情况.本研究划分了网格数为136 896、286 740、903 900(网格尺寸分别为0.04 m、0.03 m、0.02 m)三套结构化网格,相对误差小于2%.经计算,本文认为模拟结果与网格尺寸无关.

表1 热物性参数取值表

Tab.1 Values of thermophysical parameters

结构名称	材料	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
蓄热层	黏土	1 600	1 500	0.85
炕板混凝土层	混凝土	2 400	970	1.28
支柱	实心黏土砖	1 800	840	0.69
外(内)墙	实心黏土砖	1 800	840	0.69
烟气	空气	1.2	1 006	0.024

表2 网格无关性验证

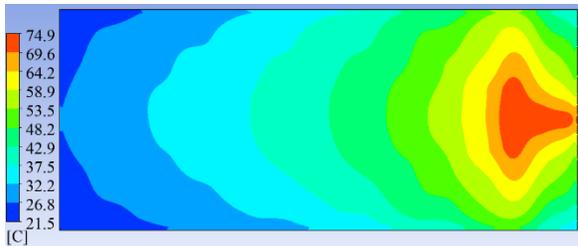
Tab.2 Grid independence verification

网格尺寸/m	炕面最高温度/°C	相对误差/%	炕面最低温度/°C	相对误差/%	炕面平均温度/°C	相对误差/%
0.04	53.34	—	20.53	—	35.77	—
0.03	54.07	1.37	20.68	0.73	36.25	1.35
0.02	53.53	-0.98	20.55	-0.65	36.13	-0.33

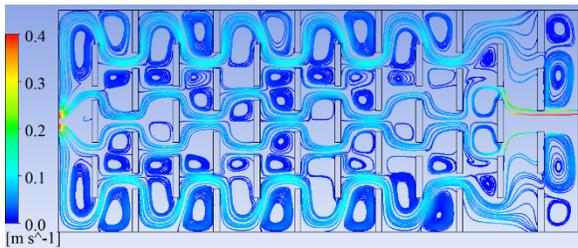
3 计算结果与讨论

3.1 烟道竖洞率与炕内烟气流和炕面温度关联特性

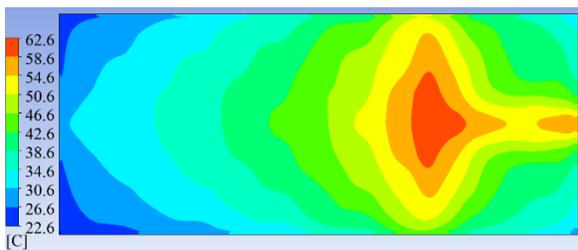
图5为不同竖洞率下的炕面温度云图及高度为0.32 m的平面上的烟气流线图. 炕面高温区主要集中在竖洞刚刚转变为横洞的区域(以下称为转变区)以及炕头烟气入口附近的区域. 转变区炕面温度较高是因为炕支柱的蓄热特性, 以及烟气被横洞区域的支柱阻挡、扰动, 烟气在转变区堆积加强传热, 最终导致转变区炕面温度升高. 炕头烟气入口附近炕面温度较高的原因是烟气入口处烟气温度最高, 换热温差最大.



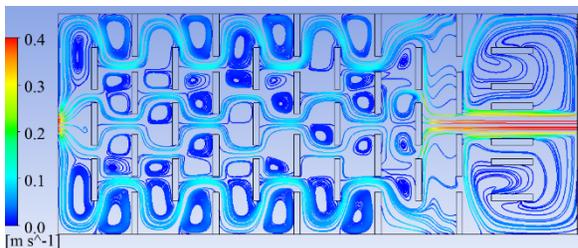
(a)竖洞率为0时炕面温度云图



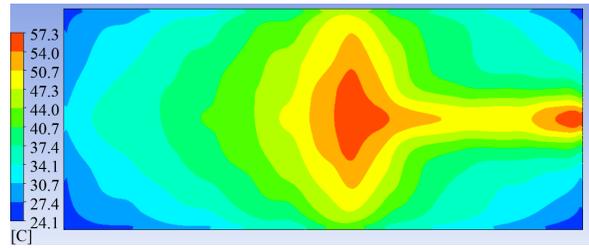
(b)竖洞率为0时烟气流线图(流线平面高0.32 m)



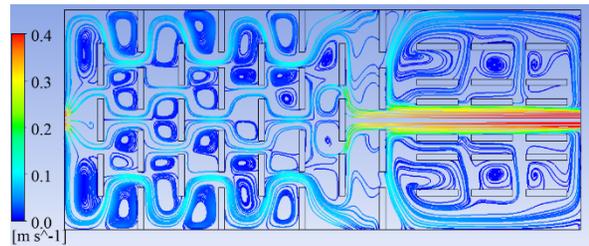
(c)竖洞率为16%时炕面温度云图



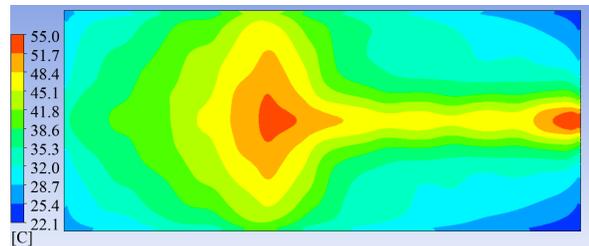
(d)竖洞率为16%时烟气流线图(流线平面高0.32 m)



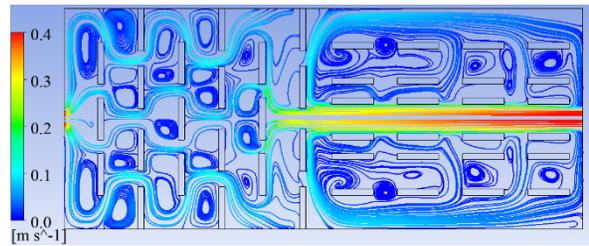
(e)竖洞率为33%时炕面温度云图



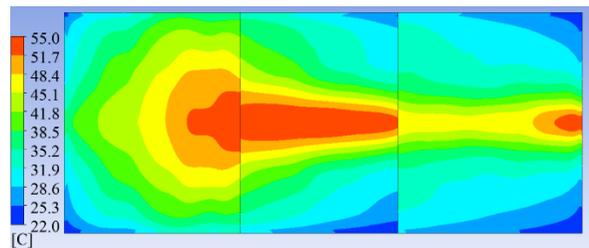
(f)竖洞率为33%时烟气流线图(流线平面高0.32 m)



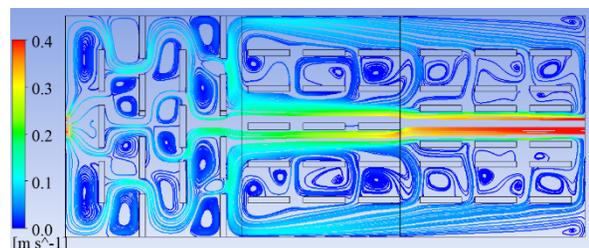
(g)竖洞率为50%时炕面温度云图



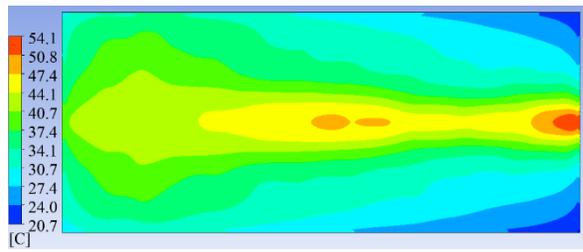
(h)竖洞率为50%时烟气流线图(流线平面高0.32m)



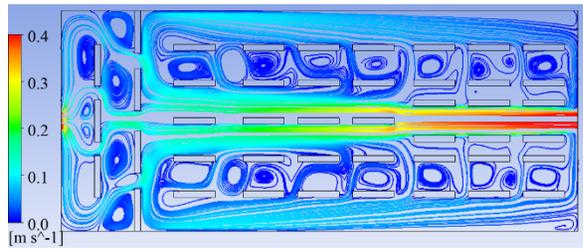
(i)竖洞率为66%时炕面温度云图



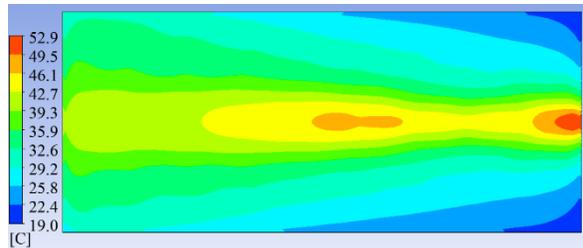
(j)竖洞率为66%时烟气流线图(流线平面高0.32 m)



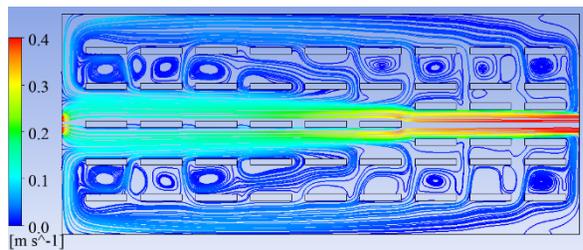
(k) 竖洞率为 83% 时炕面温度云图



(l) 竖洞率为 83% 时烟气流线图(流线平面高 0.32 m)



(m) 竖洞率为 1 时炕面温度云图



(n) 竖洞率为 1 时烟气流线图(流线平面高 0.32 m)

图 5 不同竖洞率炕面温度云图和烟气流线图
(流线平面高 0.32 m)

Fig.5 Temperature cloud diagram and flue gas streamline diagram of Kang surface with different VHR
(streamline plane height is 0.32 m)

在竖洞率为 0~50% 时,炕面的低温区域集中在炕尾部分;而竖洞率为 50%~100% 时,炕面的低温区域集中在炕头部分,低温区域在火炕长度方向上的分布刚好与转变区的分布相反。

在烟气入口、出口处具有较大流速,其余部分烟气流速较小。在各个模型中的横洞区域均具有旋涡,竖洞区域存在回流。结合温度云图与烟气流线图,可得 II 区中间位置的炕支柱发挥较强的蓄热作用,提高了 II 区的炕面温度。

图 6 为不同竖洞率情况下的炕面最低温度与平均温度情况。竖洞率从 0~100%,炕面平均温度从 42.2 °C 降低到 34.2 °C,降幅为 19%。炕面最低温度先升后降,在竖洞率为 33% 时达到最大值 24.1 °C。竖洞率从 0 增至 33%,炕面最低温度从 21.5 °C 升高到 24.1 °C,增幅为 12.1%;竖洞率从 33% 增至 100%,炕面最低温度从 24.1 °C 降低到 19 °C,降幅为 21.2%。

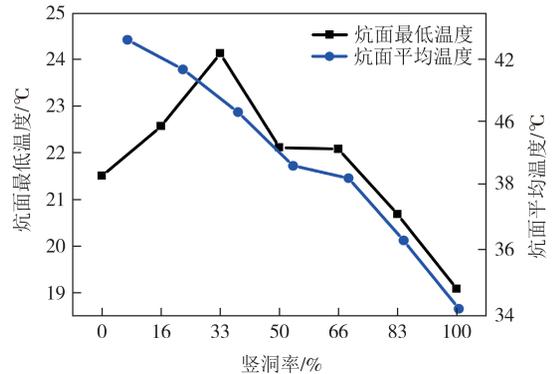


图 6 竖洞率与炕面平均温度和炕面最低温度的关联特性
Fig.6 Influence of VHR on average temperature and minimum temperature of Kang surface

结合图 5 和图 6,可得竖洞率较低时,炕面最低温度出现在炕尾,竖洞率越低,炕面最低温度越低。相反,竖洞率较高时,炕面最低温度出现在炕头,竖洞率越高,炕面最低温度越低。

图 7 为不同竖洞率情况下,炕面温度标准差和炕面最高温度的变化图。随着竖洞率的增大,炕面最高温度从 74.9 °C 降低到 52.9 °C,降幅为 29.4%;炕面温度标准差从 12.2 °C 先降低到最小的 6 °C,随后升高到 6.5 °C,在竖洞率为 83% 时达到最小值。

竖洞率为 0~50% 的情况下,炕内的横洞支柱会使烟气在炕头区域长时间停留,导致炕头区域温度过高,且炕面温度标准差也会很高。而竖洞率为

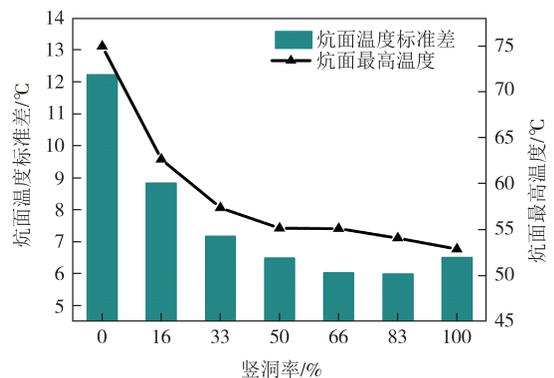


图 7 竖洞率与炕面温度标准差和炕面最高温度的关联特性
Fig.7 Effect of VHR on the standard deviation of Kang surface temperature and the maximum temperature of Kang surface

1时,烟气在烟道内的滞留时间过短,导致炕尾温度较低,炕面温度不如83%竖洞率的情况均匀.83%竖洞率的情况炕面温度均匀性最优,本文采用83%竖洞率进行后续的研究.

3.2 入口烟气温度与炕面温度关联特性

图8为入口不同烟气温度下,炕面温度标准差、炕面最高温度和炕面最低温度情况.随着烟气温度升高,炕面温度标准差、炕面最高温度和炕面最低温度均增加.烟气温度从200℃增加到350℃过程中,炕面温度标准差从4.2℃增加到7.9℃,增幅为88.1%;炕面最高温度从38.6℃增加到74℃,增幅为91.7%;炕面最低温度从17.9℃增加到23.3℃,增幅为30.2%.综合考虑炕面最高温度与最低温度,本文采用275℃的烟气温度,此时炕面最高温度为54.1℃,最低温度为20.7℃.

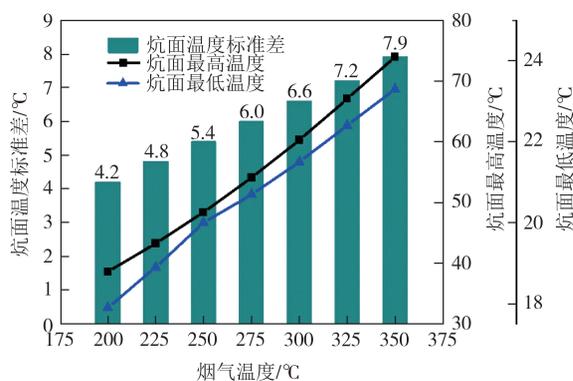


图8 入口烟气温度与炕面温度标准差、炕面最高温度、炕面最低温度的关联特性

Fig. 8 Influence of inlet flue gas temperature on the standard deviation, maximum temperature and minimum temperature of Kang surface

3.3 炕板蓄热层厚度与炕面温度关联特性

本文将炕头I区的炕板蓄热层厚度增加,炕尾III区的炕板蓄热层厚度减小.本文进行多组研究,在其中选择最具有代表性的三组数据进行说明,为60-50-40 mm(I区炕板蓄热层厚度为60 mm,II区炕板蓄热层厚度50 mm,III区炕板蓄热层厚度为40 mm,简称60-50-40 mm)、70-50-30 mm(I区炕板蓄热层厚度为70 mm,II区炕板蓄热层厚度50 mm,III区炕板蓄热层厚度为30 mm,简称70-50-30 mm)、80-50-20 mm(I区炕板蓄热层厚度为80 mm,II区炕板蓄热层厚度50 mm,III区炕板蓄热层厚度为20 mm,简称80-50-20 mm).

图9为不同炕板蓄热层厚度情况下,炕面温度标准差、炕面最高温度和炕面最低温度情况.随着炕

板蓄热层厚度从50-50-50 mm变化到80-50-20 mm,炕面最高温度从54.1℃降低到45.7℃,降幅为15.5%;炕面最低温度从20.7℃降低到17.5℃,降幅为15.5%;炕面温度标准差从6℃降低到5.8℃.随着炕板蓄热层厚度每次变化,炕面最高温度的变化值为1.7~4.7℃,炕面最低温度的变化值为0.1~2.8℃.

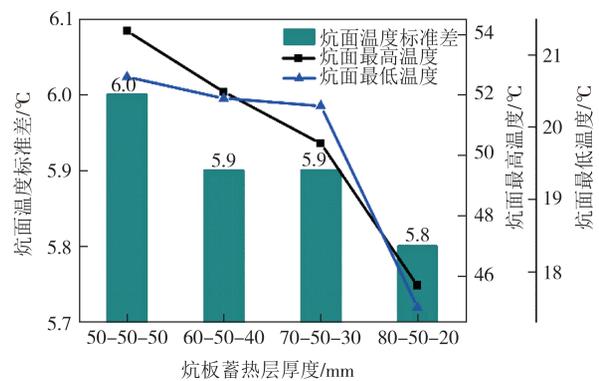


图9 炕板蓄热层厚度与炕面温度标准差、炕面最高温度、炕面最低温度的关联特性

Fig. 9 Influence of the thickness of the thermal storage layer on the standard deviation of Kang surface temperature, the maximum temperature of Kang surface and the minimum temperature of Kang surface

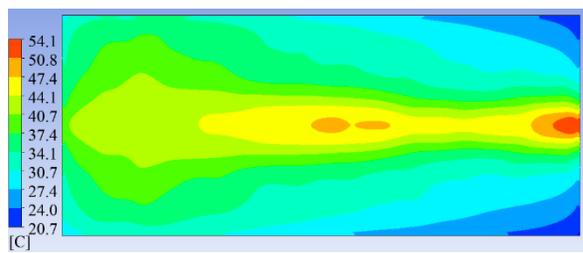
结果表明,炕板蓄热层厚度对于炕面温度标准差的影响较小,对炕面最高温度与最低温度的影响较大,本研究选择80-50-20 mm的炕板蓄热层厚度进行后续研究.

图10为不同炕板蓄热层厚度下的温度云图.图中表明,不同的炕板蓄热层厚度情况下,炕头温度最高.随着I区炕板蓄热层厚度的增加与III区炕板蓄热层厚度的减小,炕头温度明显降低,炕尾温度明显升高,炕尾高温区增大.但炕面最低温度出现于炕头,因此炕面最低温度也有所降低.

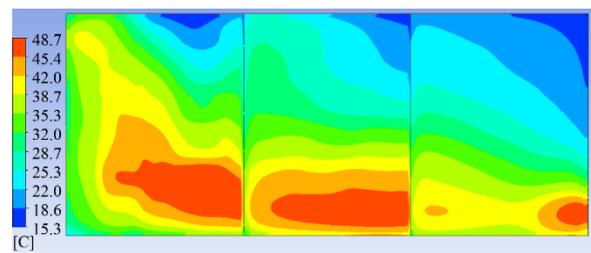
3.4 烟气出入口位置与炕内烟气流动和炕面温度关联特性

根据农村居民火炕使用习惯,火炕出入口位置大致具有图11所示的4种形式,本文计算中进中出、中进侧出、侧进侧出、倒卷帘^[18]四种形式并对炕面温度进行分析.

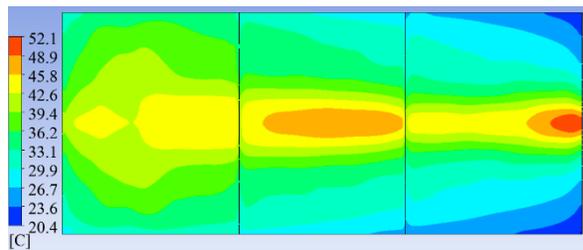
图12是四种出入口位置的炕面温度分布云图.侧进侧出形式的高温区分布在炕的一侧,而炕头位置有很大的烟气流通死角,导致炕头低温区域过大,最低温度达15.3℃.中进侧出形式的温度分布与中进中出形式的相差不大,炕尾的高温区偏向烟气出口一侧.倒卷帘形式的炕面温度整体更高,烟气流通



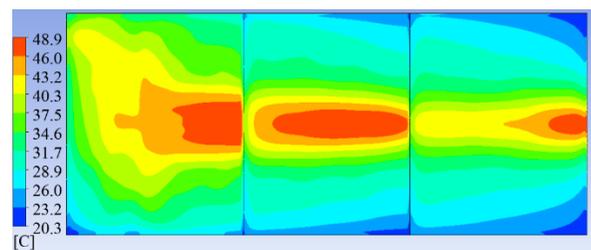
(a) 50-50-50 mm



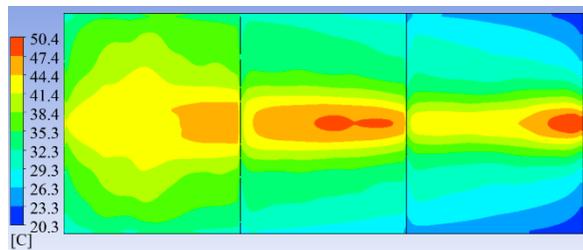
(a) 侧进侧出



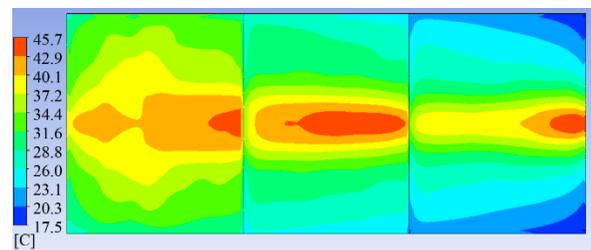
(b) 60-50-40 mm



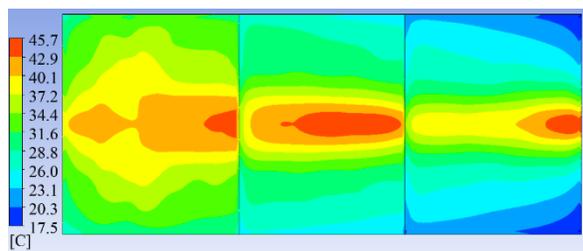
(b) 中进侧出



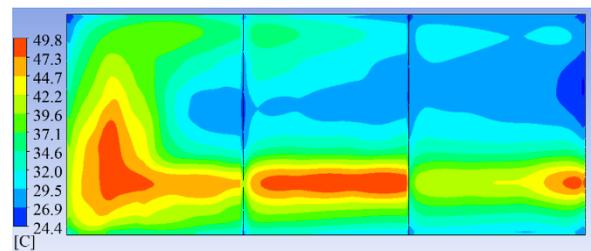
(c) 70-50-30 mm



(c) 中进中出



(d) 80-50-20 mm



(d) 倒卷帘

图 10 不同炕板蓄热层厚度炕面温度云图

Fig.10 Temperature cloud diagram of Kang surface with different thickness of thermal storage layer

图 12 不同出入口位置的炕面温度云图

Fig.12 Temperature cloud diagram of Kang surface at different inlet and outlet positions

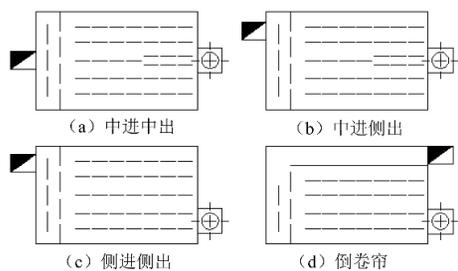


图 11 烟气出入口相对位置^[18]

Fig.11 Relative position of inlet and outlet

死角较少,高温区集中在烟气入口的一侧,最高温度为 49.8 °C,炕头的低温区也有 24.4 °C.

图 13 为不同烟气出入口位置炕面温度标准差和炕面平均温度的对比情况.倒卷帘形式的炕面温度标准差为 4 种方式中最低的 5.6 °C,侧进侧出形式的炕面温度标准差是最高的 7.7 °C,两种形式炕面温度标准差相差 2.1 °C,倒卷帘形式炕面温度分布最均匀.倒卷帘形式的炕面平均温度是四种情况中最高的 36.4 °C,中进中出形式为最低的 32.6 °C,两种情况相差 3.8 °C,倒卷帘形式炕面平均温度最高.

图 14 是四种入口位置形式的炕面最高温度与炕面最低温度情况.四种形式中,倒卷帘形式炕面最高温度最高,为 49.8 °C;中进中出形式炕面最高温度

最低,为45.7℃.倒卷帘形式炕面最低温度最高,为24.4℃,侧进侧出形式炕面最低温度最低,为15.3℃.

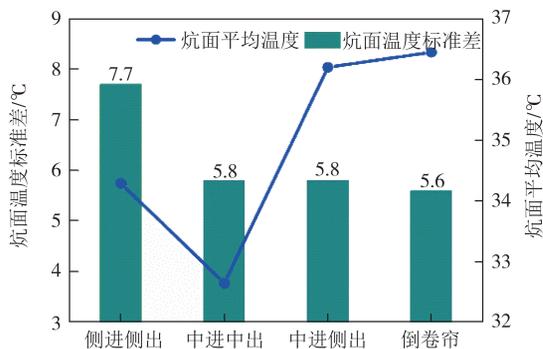


图13 烟气出入口位置与炕面温度标准差和炕面平均温度的关联特性

Fig.13 Influence of flue gas inlet and outlet positions on standard deviation and average temperature of Kang surface

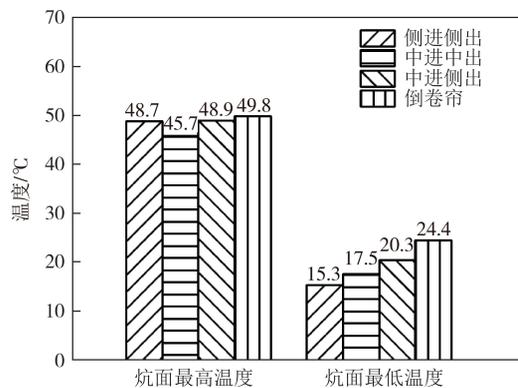


图14 不同烟气出入口位置的炕面最高温度和炕面最低温度情况

Fig.14 Maximum temperature and minimum temperature of Kang surface at different inlet and outlet positions

综合上述4种形式,倒卷帘形式具有更高的炕面最高温度、炕面最低温度和炕面平均温度,炕面温度分布也更加均匀。

4 结论

本文提出了传统火炕非均质设计方法,采用CFD软件对中国传统火炕建立了数值模型,分析不同的关键设计参数——竖洞率、炕板蓄热层厚度、烟气温度、出入口相对位置对传统火炕上散热面温度的影响特性,得出如下结论:

1)竖洞率从0增至33%,炕面最低温度增幅为12.1%;竖洞率从33%增至1,炕面最低温度降幅为21.2%。随着竖洞率的增大,炕面平均温度、炕面最高温度均降低,炕面平均温度降幅为19%,炕面最高温

度降幅为29.4%;炕面温度标准差先减小后小幅度增加,在竖洞率为83%时达到最小值6℃.综合考虑选择竖洞率取83%为最佳。

2)入口烟气温度从200℃增加到350℃,炕面温度标准差、炕面最高温度和炕面最低温度均升高,炕面温度标准差介于4.2~7.9℃,炕面最高温度介于38.6~74℃,炕面最低温度介于17.9~23.3℃.综合考虑炕面最高温度与最低温度,本文采用275℃的烟气温度。

3)炕板蓄热层厚度从50-50-50mm变化到80-50-20mm,炕面最高温度、炕面最低温度、炕面温度标准差均降低,炕面最高温度介于54.1~45.7℃,炕面最低温度介于20.7~17.5℃,炕面温度标准差介于6~5.8℃.综合考虑施工难度与炕面温度标准差,炕板厚度取80-50-20mm为最佳。

4)火炕出入口相对位置形式采用倒卷帘时,具有最合理的炕头温度与最高的炕尾温度,炕面温度最为均匀,炕面温度标准差为最低的5.6℃,炕面平均温度是四种形式中最高的36.4℃.倒卷帘为最佳形式。

本文为传统火炕设计参数优化、节能改造提供了新思路,对传统火炕热效率提高具有参考作用。

参考文献

- [1] 樊新颖,陈滨,张雪研,等.基于灶炕采暖方式北方某农宅热传输特征与环境影响分析[J].建筑科学,2019,35(2):9-15.
FAN X Y, CHEN B, ZHANG X Y, et al. Field study on heat transfer and pollutant diffusion paths characteristics of overall rural houses based on stove Kang in Northern China[J]. Building Science, 2019, 35(2): 9-15. (in Chinese)
- [2] YUAN X L, WANG X J, ZUO J. Renewable energy in buildings in China—a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 24: 1-8.
- [3] 陈金华,赵福滔,李文强,等.重庆市中低海拔村镇旅游区住宅热湿环境实测与热舒适研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(7):128-134.
CHEN J H, ZHAO F T, LI W Q, et al. Field study of thermal and humidity environment and thermal comfort study of residences in mid and low altitude rural tourism area of Chongqing[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(7): 128-134. (in Chinese)
- [4] 李念平,方雪苗,卫兆欣,等.湘西地区冬季住宅热环境与老年人热舒适研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(7):123-128.
LI N P, FANG X M, WEI Z X, et al. Research on thermal environment of residences and thermal comfort sensation of elderly

- in rural areas of western Hunan in winter[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(7): 123-128. (in Chinese)
- [5] 刘亚非. 民用采暖炉具性能及污染减排效果评估分析[D]. 北京:北京化工大学, 2018.
- LIU Y F. Evaluation and analysis on the performance and emissions reduction of residential heating stoves [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018. (in Chinese)
- [6] 刘亦文. 碳减排约束政策对中国城市空气质量的影响研究[J]. 湖南大学学报(社会科学版), 2022, 36(2): 73-81.
- LIU Y W. Effect of carbon emission restriction policies on air quality in China's key cities [J]. Journal of Hunan University (Social Sciences), 2022, 36(2): 73-81. (in Chinese)
- [7] ZHAI Z J, YATES A P, DUANMU L, et al. An evaluation and model of the Chinese Kang system to improve indoor thermal comfort in northeast rural China - Part-1: model development [J]. Renewable Energy, 2015, 84: 3-11.
- [8] 周子洋. 基于多能互补的农村火炕供暖系统[D]. 济南:山东建筑大学, 2020: 1-18.
- ZHOU Z Y. Rural Kang heating system based on multi-energy complement [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020: 1-18. (in Chinese)
- [9] YU K C, TAN Y F, ZHANG T T, et al. The traditional Chinese Kang and its improvement: a review [J]. Energy and Buildings, 2020, 218: 110051.
- [10] HE W, JIANG Q Y, JI J, et al. A study on thermal performance, thermal comfort in sleeping environment and solar energy contribution of solar Chinese Kang [J]. Energy and Buildings, 2013, 58: 66-75.
- [11] 戴天钊. 复合相变蓄热式太阳能炕的供暖性能分析与实验研究[D]. 太原:太原理工大学, 2020: 1-20.
- DAI T Z. Heating performance analysis and experimental research of compound phase change regenerative solar Kang [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020: 1-20. (in Chinese)
- [12] GAO X X, LIU J P, HU R R, et al. A simplified model for dynamic analysis of the indoor thermal environment of rooms with a Chinese kang [J]. Building and Environment, 2017, 111: 265-278.
- [13] BIAN M L. Numerical simulation research on heat transfer characteristics of a Chinese Kang [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 25: 100922.
- [14] 赵洋, 端木琳, 王宗山, 等. 火墙式火炕炕体传热特征及内部烟气流动特性实验研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(4): 17-26.
- ZHAO Y, DUANMU L, WANG Z S, et al. Experimental study on heat transfer and internal smoke flow of hot-wall Kang [J]. Building Science, 2010, 26(4): 17-26. (in Chinese)
- [15] ZHAI Z J, YATES A P, DUANMU L, et al. An evaluation and model of the Chinese Kang system to improve indoor thermal comfort in northeast rural China - Part-2: result analysis [J]. Renewable Energy, 2015, 84: 12-21.
- [16] 王丹, 徐聪智, 李桂文, 等. 改善火炕炕面温度分布技术模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(4): 75-79.
- WANG D, XU C Z, LI G W, et al. Simulation study on the technology for improving the temperature distribution of Kang surface [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(4): 75-79. (in Chinese)
- [17] 芦欣. 北方农村节能型吊炕的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016: 11-20.
- LU X. Study of energy saving Chinese kang in northern rural areas [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 11-20. (in Chinese)
- [18] 张茜. 东北传统民居火炕内烟气的流动换热模拟分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017: 34-42.
- ZHANG Q. Flue gas flow and thermal performance of kang in northeast traditional dwellings [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 34-42. (in Chinese)
- [19] YU K C, BAI L, ZHANG T N, et al. Improving the thermal performance of the traditional Chinese Kang system by employing smoldering combustion and mechanical ventilation: an experimental study [J]. Energy and Buildings, 2022, 256: 111736.
- [20] 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.
- [21] 庄智. 中国炕的烟气流动与传热性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009: 77-99.
- ZHUANG Z. Smoke flow and thermal performance of Chinese kang [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009: 77-99. (in Chinese)
- [22] 任洪国. 东北地区村镇住宅火炕技术设计研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008: 26-43.
- REN H G. Design of Kang technology in rural dwelling of northeastern area [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 26-43. (in Chinese)
- [23] LI G, BI X, FENG G, et al. Phase change material Chinese Kang: design and experimental performance study [J]. Renewable Energy, 2020, 150: 821-830.