

改善火炕炕面温度分布技术模拟

王 丹^{1,2}, 徐聪智³, 李桂文¹, 蔡洪彬¹

(1. 哈尔滨工业大学 建筑学院, 150006 哈尔滨; 2. 黑龙江大学 建筑工程学院, 150086 哈尔滨;
3. 北京市建筑设计研究院, 100045 北京)

摘 要: 为了使火炕的表面温度分布均匀, 提高室内环境的热舒适性, 提出了倾斜布置炕板来改善炕面温度分布的不均匀性. 通过对炕板倾斜程度不同的落地炕和吊炕进行数值模拟, 结果表明: 当落地炕的炕头粘土层厚度为 80 mm、炕梢粘土厚度为 20 mm 时具有相对最佳的取暖效果; 当吊炕的炕头粘土层厚度为 80 mm、炕梢粘土厚度为 20 mm 时具有相对最佳的取暖效果.

关键词: 火炕供暖; 炕面温度分布; 改善技术

中图分类号: TU241.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)04-0075-05

Simulation study on the technology for improving the temperature distribution of Kang surface

WANG Dan^{1,2}, XU Cong-zhi³, LI Gui-wen¹, CAI Hong-bin¹

(1. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, 150006 Harbin, China; 2. Dept. of Architecture Engineering, Heilongjiang University, 150001 Harbin, China; 3. Beijing Institute of Architectural Design, 100045 Beijing, China)

Abstract: To solve the problem of inhomogeneous distribution of Kang's surface temperature and poor indoor thermal comfort, this paper proposes a method to incline the Kang board. By the numerical simulation of grounded Kang and elevated Kang with different oblique degree of Kang board, it is found that when the claypan thickness at the head/end of the Kang is 80/20 mm, the Kang has the best heating effect.

Key words: Kang heating; Kang's surface temperature; improving measure

火炕是我国北方劳动人民在长期同寒冷气候作斗争的过程中创造出的一种供暖方式, 而以此为供暖方式的住宅仍是北方地区农村住宅的主要形式^[1]. 长期以来, 农村住宅火炕的建设主要是居民自建自住、分散建设的模式, 沿袭着传统工艺与手工砌筑, 砖混结构, 预制构件很少, 模块化与装配化成份低, 工艺应用水平很低. 但对这类简单的火炕结构来说, 其采暖过程却十分复杂, 涉及到蓄热、导热、辐射、室内热环境以及室内空气品质等多方面的知识^[2], 目前对农村火炕还缺乏科学的认识和系统的研究, 还处于以经验为主的阶段,

没有形成科学的搭建方法, 更没有形成统一的评价指标和准则, 此外在搭建过程中由于经验上的差异, 火炕表面温度分布不均匀. 烟气从炕头的进烟口进入炕体, 在炕体内部一边向前流动一边把热量传给炕板, 而自身温度不断降低, 与炕板温度的温差也不断减小, 释放的热量也越来越少, 最终由排烟口进入烟囱. 由于进烟口面积与炕体截面积相差悬殊, 烟气进入炕体后往往分布不均匀, 必然导致炕头温度高于炕梢温度. 炕面温度不均匀, 不仅热舒适性差, 也会影响热量向室内的传递, 因此要求炕面整体温度在一定范围内. 火炕采暖与地板辐射采暖系统原理相似, 热量从下向上传递, 足热头凉, 参考地板辐射采暖系统的地板温度规定, 炕面温度均值为 24 ~ 35 °C 适宜. 为了更加科学地研究炕面温度分布情况, 本文将采用计算流体力学方法对北方冬季普通农村住宅落地炕

收稿日期: 2011-09-19.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2008BAJ08B10; 2008BAJ08B12).

作者简介: 王 丹(1978—), 女, 讲师;

李桂文(1943—), 女, 教授, 博士生导师.

通讯作者: 李桂文, liguiwen@hit.edu.cn.

和吊炕的炕体传热和炕洞内烟气流动过程进行数值模拟,分析 2 种炕的炕面温度分布规律,提出改善炕面温度分布不均的措施.

1 物理模型及数学模型建立

本文选用哈尔滨市某住宅的火炕采暖房间为研究对象,分别研究不同火炕的炕面温度分布规律,并提出改善炕面温度分布不均的措施.落地炕长、宽、高分别为 3.3、1.8、0.65 m,垄墙宽、厚分别为 0.3、0.06 m,进口宽、高分别为 0.12、0.26 m,出口宽、高分别为 0.2、0.2 m,炕面板蓄热层厚为 0.02 m、混凝土厚为 0.05 m,靠墙隔热层厚为 0.12 m,炕底板隔热层厚为 0.1 m.落地炕长、宽、高分别为 3.3、1.8、0.65 m,支柱长、宽、高分别为 0.24、0.24、0.25 m,进口宽、高分别为 0.2、0.26 m,出口宽、高分别为 0.2、0.2 m,炕面板蓄热层厚为 0.02 m、混凝土厚为 0.05 m,靠墙隔热层厚为 0.12 m,炕底板混凝土厚为 0.05 m.

由于炕体传热以及烟道中高温烟气流动特性受炉灶燃烧条件、炕体传热、室内对流、辐射换热和室外环境等多种因素的影响,而影响炕面温度分布的主要因素包括炕体的结构和材料、烟道布置形式、烟气温度及其分布等^[3]. 为了对炕面温

度的分布情况进行分析研究,本文将炕体部分从整个房间中分离出来,单独进行数值模拟,落地炕和吊炕炕体部分结构分别如图 1,2 所示. 炕体材料物理参数见表 1.

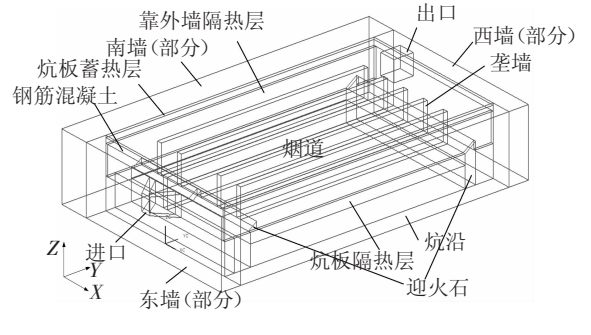


图 1 落地炕炕体部分结构

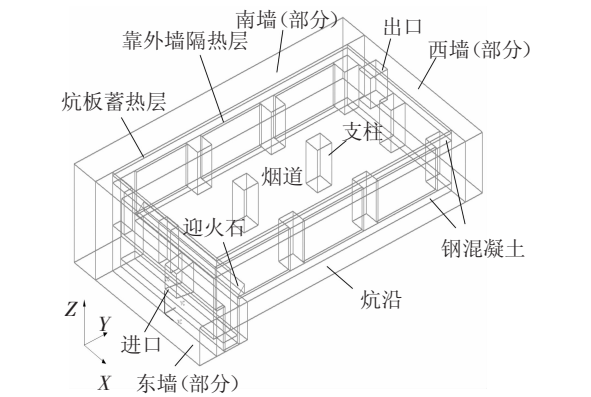


图 2 吊炕炕体部分结构

表 1 炕体材料物理参数

名称	材料	密度/ (kg · m ⁻³)	导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	比热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
炕板蓄热层	加草粘土	1 600	0.76	1 010.0
炕板混凝土板	钢筋混凝土	2 500	1.69	920.0
炕板隔热层	炉渣混凝土	1 500	0.71	1 050.0
吊炕柱墩	红砖	1 700	0.58	1 051.6
落地炕垄墙	红砖	1 700	0.58	1 051.6
落地炕填土	夯实粘土	2 000	1.11	1 010.0
迎火石	红砖	1 700	0.58	1 051.6
炕沿	红砖	1 700	0.58	1 051.6
靠外墙隔热层	炉渣加红砖	500	0.16	1 050.0

炕体的传热过程是无内热源的固体导热问题,其能量控制方程为^[4]

∂ / ∂ t (ρ c p T) = ∂ / ∂ x i (λ ∂ T / ∂ x i). (1)

式中: T 为温度, K; λ 为导热系数, W/(m · K); c_p 为定压比热, J/(kg · K).

炕板和烟气之间的换热过程的能量控制方程为^[4]

∂ / ∂ t (ρ E) + ∂ / ∂ x i [u i (ρ E + p)] =

∂ / ∂ x i (λ e f f ∂ T / ∂ x i) - ∑ j h j J j + u j (τ i j) e f f + S h. (2)

式中: E 为流体微团的总能, J/kg, 包含内能、动能

和势能之和; $\lambda_{\text{eff}} = \lambda_t + \lambda$ 为有效导热系数, W/(m · K); J_j 为组分 j 的扩散通量; $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$; 对于不可压缩气体 $h = \sum_j m_j h_j + \frac{p}{\rho}$, m_j 为组分 j 的质量分数; h_j 为组分 j 的焓, J/kg, 定义为 $h_j = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,j} dT$, 其中 $T_{\text{ref}} = 298.15 \text{ K}$; S_h 为包括化学反应热和其他体积热源项.

本文采用离散坐标辐射模型 (DO) 来进行辐射换热过程的数值模拟^[5].

烟道进口边界条件为速度入口边界条件, 速度大小为 1 m/s, 方向垂直于进口平面, 进口烟气

温度由前期实验测得,设定为 523 K. 烟道出口设置为自由出流边界条件.

2 炕面温度标准差及火炕实验数据

结合本文的研究内容和方法,文中选用炕面温度标准差作为评价标准^[6-8]. 炕面温度标准差为炕面各点温度偏离炕面温度平均值的平均数,其计算公式为

$$t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_i (t_{ix} - t_p)^2}{A}}. \quad (3)$$

式中: t 为炕面温度标准差,℃; n 为将炕面分成的份数; t_{ix} 为炕面上各小分块面积上的温度平均值,℃; t_p 为炕面在 τ 时刻的温度平均值,℃; A_i 为炕面上各小分块的面积,m²; A 为炕面的总面积,m².

通常用 t 的大小来表征炕面温度分布的均匀性. t 越小,则说明此刻炕面温度分布越均匀, t 随时间变化的曲线越平缓; t 越大,则炕面温度均匀性越差,其相应的变化曲线越陡直^[6].

以本文原型落地炕为基础,在哈尔滨城郊某民居内搭建一火炕,具体尺寸见图 1. 实验时室外温度为 -20 ℃,从早晨 8:00 加煤 5 kg,后在 9:00 ~ 17:00 每隔 1 h 加煤 1 kg. 监测到的炕头最高温度、炕中平均温度及炕梢最低温度分布见表 2.

表 2 炕不同位置的温度℃

时刻	炕头最高温度	炕中最高温度	炕梢最低温度
9:30	85.07	46.59	26.63
10:30	80.01	45.74	28.11
11:30	76.91	40.05	22.83
12:30	79.46	44.65	28.56
13:30	79.94	39.61	21.10
14:30	82.16	40.17	21.96
15:30	84.22	42.02	23.12
16:30	77.11	41.92	21.08
17:00	86.18	50.64	18.99

3 落地炕及吊炕炕面温度分布规律

根据数值模拟结果发现,在烟气进口速度 1 m/s,烟气温度 523 K 的工况下,普通农村住宅落地炕的炕面面积加权平均温度为 324.6 K,炕面温度标准差为 7.44 K. 炕面最高温度为 357.31 K,位于炕头靠烟气进口处;炕面最低温度为 310.20 K,位于炕梢靠墙区域. 此模拟结果与上述实验所得数据基本一致. 综合考虑人体能接触的范围,温度为 350 ~ 310 K. 从炕面温度分布图 3 中可以看出,炕面温度分布存在明显的不均匀性,炕头烟气进口区域温度过高,接近 353 K,而

炕梢温度仅有 303 K 左右.

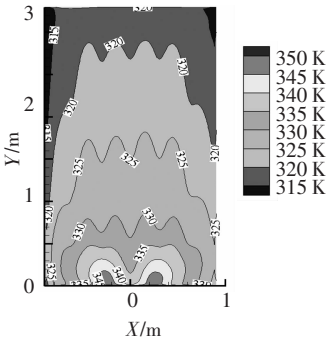


图 3 落地炕炕面温度分布

在烟气进口速度 1 m/s,烟气温度 523 K 的工况下,普通农村住宅吊炕炕面的温度分布如图 4 所示. 根据数值模拟结果发现,吊炕上炕面的面积加权平均温度为 325.10 K,炕面温度标准差 8.468 K. 炕面最高温度为 370.17 K,位于炕头烟气入口处. 炕面最低温度为 304.48 K,位于炕极边缘处且面积极小,人体感觉不明显,可忽略. 上炕面最高温度为 350 K,最低温度为 310 K.

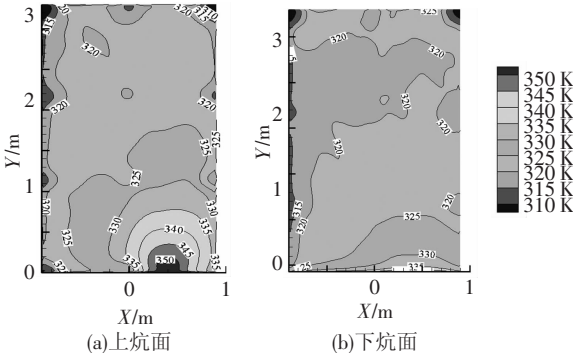


图 4 吊炕上、下炕面温度分布

4 倾斜布置炕板改善炕面温度分布

在保持原有炕洞下部结构不变的情况下,将上炕板倾斜放置,炕头略低,炕梢略高,炕面用加草粘土填平. 倾斜布置炕板改善炕面温度分布数值模拟计算模型是在原有炕面温度分布的计算模型基础上,在保证炕梢处加草粘土层厚度不变(20 mm)的情况下,增大炕头炕板上到炕面的距离,如图 5 所示. 炕头加草粘土层厚度用 H 表示,炕体材料由上至下依次是加草粘土炕面、混凝土炕板、炕洞由砖砌垒墙支撑、炉渣隔热层、夯土层,除粘土炕面的厚度以及炕板安放的角度改变外,其余结构均与原型相同. 对于吊炕虽然吊炕具有上下 2 个炕面,但下炕面温度较低且均匀性较好,同时考虑炕洞内粉尘堆积等问题,因此不进行倾斜布置. 同落地炕一样,吊炕炕梢处依然保持 20 mm 厚度的加草粘土层不变,炕头粘土层增厚,如图 6 所示.

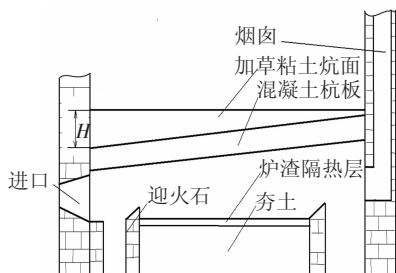


图5 倾斜布置炕板落地炕结构示意图

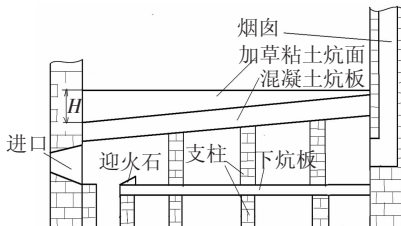


图6 倾斜布置炕板吊炕结构示意图

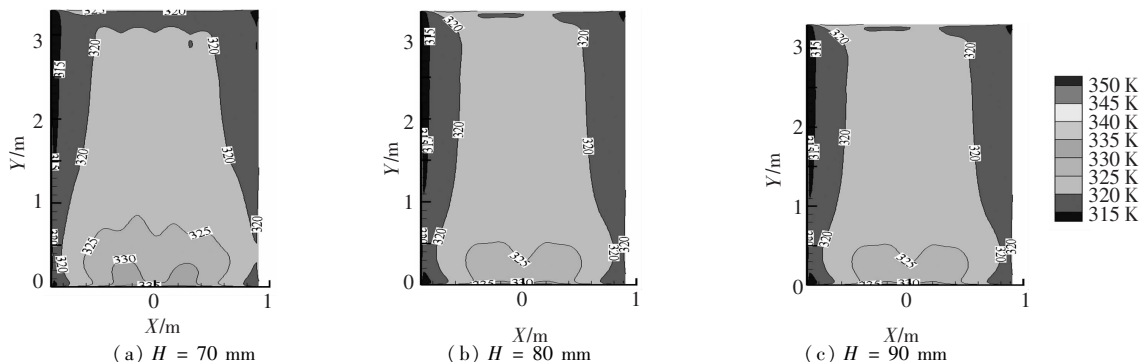


图7 不同倾斜度的落地炕的炕面温度分布

倾斜布置炕板,导致了炕面前半部分的传热热阻增大,高温烟气向炕面传热的阻力增大,传热量减少,炕头的局部高温区基本消失,取而代之的是温度略低的高温区面积的增大.高温烟气温度降低的梯度减小,炕面后半部分所接触到的烟气温度相应升高,由于炕板后半部分热阻较前半部分小,二者综合作用,使传热增强,炕面所得到的热量增大,炕面温度升高.同时,由于烟气温度降低较慢,向四周扩散的趋势增大,因此边缘处的低温区的温度升高.

原型落地炕的炕面温度面积加权平均值为 324.6 K,炕板倾斜度 $H = 70$ mm 时炕面温度面积加权平均值为 321.74 K,炕板倾斜度 $H = 80$ mm 时炕面温度面积加权平均值为 321.32 K,炕板倾斜度 $H = 90$ mm 时炕面温度面积加权平均值为 320.98 K.将炕板倾斜布置后,由于在炕头处粘土层较厚,与原型相比传热热阻增大,导致炕面面积加权平均温度有所降低,约下降 3°C ,但其温度仍满足人员舒适性要求.且随着 H 的增大,炕面面积加权平均温度逐渐降低,但整体降低

考虑到今后生产实际情况,以炕头处加草粘土蓄热层的厚度 H 为参考量,通过不同的 H 确定不同的炕板倾斜角度,为了便于计算同时受实际尺寸的限制并考虑得到适宜的炕面温度分布,本文取 H 分别为 70、80、90 mm 工况进行计算.

5 倾斜炕板后落地炕及吊炕模拟

根据数值模拟结果发现,在烟气进口速度 1 m/s ,烟气温度 523 K 的工况下,倾斜炕板落地炕 3 种工况的炕面温度分布如图 7 所示.与水平布置炕板的原型落地炕相比较,首先,烟气进口处的炕面对应的局部高温明显降低,高温区面积减少;其次,炕面后半部分温度明显升高,甚至在炕面中间区域出现相对较高的温度区;再次,炕面靠近炕沿和墙的边缘区域温度明显升高.

幅度很小.从图 7 可以看出,炕面温度分布的不均匀性得到了明显的改善,在炕面大部分区域温度均为 $40 \sim 50^{\circ}\text{C}$,在人体感觉舒适的范围内,局部的高温区基本消失,使用的舒适性明显增强.

根据上述各工况的数值计算结果,可以获得炕板倾斜布置后落地炕炕面温度分布规律.原型落地炕的炕面温度标准差为 7.44 K,炕板倾斜度 $H = 70$ mm 时炕面温度标准差为 4.7 K,炕板倾斜度 $H = 80$ mm 时炕面温度标准差为 4.41 K,炕板倾斜度 $H = 90$ mm 时炕面温度标准差为 4.24 K.与原型落地炕相比,炕板倾斜布置后,炕面温度标准差有了明显下降,下降比例近一半,同时随着 H 的增大即倾斜度的增大,炕面温度标准差逐渐减小,但下降幅度不大,降低缓慢,这也与图 7 观察到的现象相一致.

通过比较 3 种不同倾斜度的炕板布置工况,炕面面积加权平均温度和炕面温度标准差的变化均不大,且均逐渐下降.考虑到热效率和实际情况,确定落地炕的炕头加草粘土层最佳厚度为 $H = 80$ mm.

图8给出了在烟气进口速度 1 m/s,烟气温度 523 K 的工况下,3 种不同炕板倾斜度工况下吊炕上炕面的温度分布.从图中可见,炕头部分的局部高温区域基本消失,吊炕后半部分炕面温度

得到了明显的提高,炕体后半部分立柱对于炕面温度的影响减少.由于倾斜布置炕板的倾斜度较大,粘土层厚度最大相差为 70 mm,故炕梢温度与炕头温度相差不多.

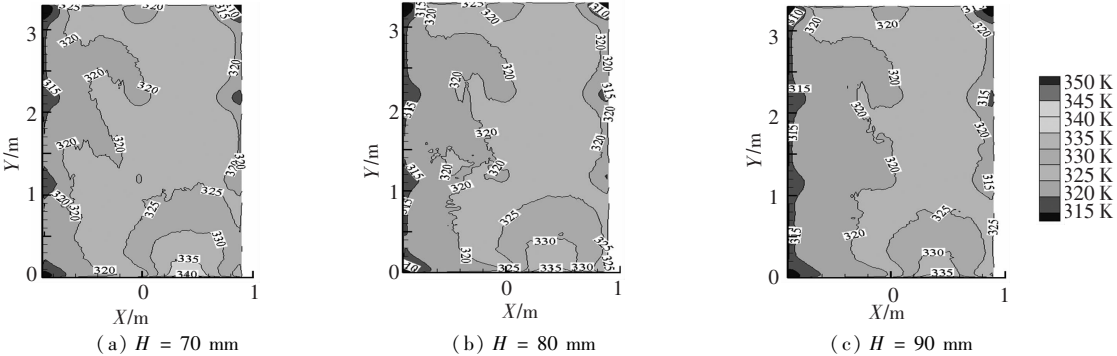


图8 不同倾斜度的吊炕的炕面温度分布

原型吊炕的上炕面温度面积加权平均值为 325.1 K,炕板倾斜度 $H = 70\text{ mm}$ 时上炕面温度面积加权平均值为 321.67 K,炕板倾斜度 $H = 80\text{ mm}$ 时上炕面温度面积加权平均值为 321.05 K,炕板倾斜度为 $H = 90\text{ mm}$ 时上炕面温度面积加权平均值为 320.53 K. 炕板倾斜布置后,炕面面积加权平均温度下降约 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,但炕面平均温度仍满足人员热舒适要求.且随着 H 的增大,温度逐渐下降但下降幅度不大.原型吊炕的上炕面温度标准差为 8.468 K,炕板倾斜度 $H = 70\text{ mm}$ 时上炕面温度标准差为 4.73 K,炕板倾斜度 $H = 80\text{ mm}$ 时上炕面温度标准差为 4.091 K,炕板倾斜度 $H = 90\text{ mm}$ 时上炕面温度标准差为 3.844 K. 倾斜布置炕板后,炕面温度标准差明显下降,与落地炕相似,下降近一半. $H = 90\text{ mm}$ 时,炕面温度标准差为 3.844 $^{\circ}\text{C}$,为所有计算工况中炕面温度标准差的最小值.

下炕面的面积加权平均温度随 H 增大而升高,原型吊炕下炕面温度面积加权平均值为 321.44 K,炕板倾斜度 $H = 70\text{ mm}$ 时下炕面温度面积加权平均值为 324.3 K,炕板倾斜度 $H = 80\text{ mm}$ 时下炕面温度面积加权平均值为 324.66 K,炕板倾斜度为 $H = 90\text{ mm}$ 时下炕面温度面积加权平均值为 325.09 K. 比较炕板倾斜度不同的 3 种工况,无论是炕面面积加权平均温度还是炕面温度标准差,三者变化均不大,且均逐渐下降.考虑到实际应用情况以及热效率,吊炕炕头加草粘土层最佳厚度 $H = 80\text{ mm}$.

6 结 论

1)针对炕面温度分布不均匀,提出一种操作简单同时成本相对低廉的改善措施,即将炕板倾斜布

置,炕头处略低,炕梢处略高,炕面用加草粘土填平.

2)对于落地炕,通过倾斜布置炕板导致炕面面积加权平均温度有所下降,但下降幅度不大,炕面大部分区域温度均为 $40\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足人的舒适性要求,使得炕面温度分布的不均匀性得到改善.炕头处加草粘土层厚 80 mm 时,炕面温度以及均匀性的综合效果最好.

3)对于吊炕,将上炕板倾斜放置后,炕头部分的局部高温区域基本消失,吊炕后半部分炕面温度得到了明显的提高,炕体后半部分立柱对于炕面温度的影响减少.炕头处加草粘土层厚为 80 mm 时炕面温度及均匀性的综合效果最好.

参考文献:

[1] 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 Building. 2009, 41(1): 111-119.

[2] 李玉国, 杨旭东. 北方农村火炕的科学问题及火炕的现状和未来[C]//第四届全国制冷空调新技术研讨会. 南京: 东南大学出版社, 2006: 82-87.

[3] 张培红, 夏福龙, 符靖宇. 火炕采暖效果影响因素的数值模拟和分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25(2): 342-346.

[4] MOIN P. Progress in large eddy simulation of turbulent flows[J]. AIAA paper, 1997: 97(1): 57-61.

[5] Fluent Inc. Fluent 6.3 user's guide [M]. New Hampshire: Lebanon, 2003.

[6] 端木琳, 赵洋, 王宗山, 等. 火炕热工性能的研究及其评价方法[J]. 建筑科学, 2009 (12): 30-38.

[7] 蔡洪彬, 李桂文. 东北地区传统火炕节能改造技术解析[J]. 沈阳建筑大学学报, 2007(11): 36-39.

[8] 徐聪智, 李桂文. 人居建筑与环境需要精准化设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(5): 594-596.

(编辑 魏希柱)