

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201801002

# 北方农宅吊炕与土暖气联合供暖系统测试分析

金鑫, 谭羽非, 于克成

(哈尔滨工业大学 建筑学院, 哈尔滨 150090)

**摘要:**为解决传统落地炕炕面温度不均、热效率低、排烟热损失大、烧炕时室内污染物体积分数超标等问题,提出一种新型吊炕与土暖气联合运行的供暖系统.为定量分析该系统的热工性能,在吉林省榆树县的一栋新建农宅两相同南向房间内,分别搭建了传统落地炕和该新型供暖系统,并对两系统炕面温度、排烟温度、室内温度及室内污染物体积分数进行测试:在相同燃料消耗量下,新型吊炕的炕面温度分布更为均匀,其炕面温度标准差比传统落地炕低 $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且炕头温度比传统落地炕炕头温度低 $9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .通过反平衡法计算得出新型供暖系统效率比传统落地炕效率高 $21.26\%$ ,同时采用新系统的房间室内温度提高了 $5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,室内CO体积分数也降低至标准范围以内.在两供暖系统取得相同室内升温效果时,每铺新型供暖系统每年可节省秸秆 $1\,972.2\text{ kg}$ ,CO<sub>2</sub>减排 $2\,603.3\text{ kg}$ ,SO<sub>2</sub>减排 $1.0\text{ kg}$ .测试与分析结果表明:吊炕与土暖气联合供暖系统不仅解决了传统落地炕炕面温度分布不均、热效率低等问题,而且使室内热环境得到很大改善,具有显著的节能减排效益;新型供暖系统的推广应用,可降低北方农宅的采暖能耗,有效改善农宅内的人居环境.

**关键词:**吊炕与土暖气联合供暖系统;北方农宅;传统落地炕;强化传热;热工测试与分析

**中图分类号:** TU832      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2019)04-0179-08

## Test and analysis of the thermal performance of combined elevated kang and radiator heating system in northern rural areas

JIN Xin, TAN Yufei, YU Kecheng

(School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** To solve the problems of traditional grounded kang, such as uneven temperature of kang-surface, low thermal efficiency, large exhaust heat loss, excessive indoor pollutant concentration, etc. this research puts forward a new combination of elevated kang and radiator heating system. A traditional grounded kang and the new heating system were built respectively in two same southern rooms of a new farm house in Yushu County, Jilin Province, to test the temperature of kang-surface, exhaust temperature, indoor temperature, and indoor pollutant concentration for the quantitative analysis of thermal performance of this new system. Under the same fuel consumption, the temperature standard deviation of the kang surface of the novel kang was  $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  lower than that of the traditional ones while the temperature at the head-side was  $9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  lower. The efficiency of the heating system was  $21.26\%$  higher than that of the traditional grounded kang based on counter-balance calculation, and the indoor average temperature increased by  $5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In addition, the CO concentration indoors decreased to the standard range. When getting the same indoor temperature, the new heating system can save  $1\,972.2\text{ kg}$  straw, which can reduce  $2\,603.3\text{ kg}$  emission of CO<sub>2</sub> and  $1.0\text{ kg}$  emission of SO<sub>2</sub> per year. The test results show that the new system can not only solve the problems of traditional grounded kang but also improve the indoor environment significantly and has significant effect on energy saving and emission reduction. Thus, the popularization and application of this new combined operation system can reduce the heating energy consumption considerably and improve the living environment of residences in northern rural areas.

**Keywords:** combined elevated kang and radiator heating system; rural residences in northern China; traditional grounded kang; heat transfer enhancement; thermal test and analysis

中国农村地区人口众多,建筑面积庞大,农村用

能主要以农宅炊事、采暖、热水、照明和家电等生活用能为主<sup>[1]</sup>.目前农村地区建筑采暖能耗已占中国建筑能耗总量的 $25\%$ <sup>[2]</sup>,而北方地区农宅冬季采暖耗能更占到农村生活用能总量的 $40\%$ <sup>[3]</sup>.由于大部分农宅仍采用热效率低的传统落地炕作为采暖方式,热能有效利用率远不及城市<sup>[4]</sup>.农村冬季室内平均室温比城市低 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但采暖用能却是

收稿日期: 2018-01-02  
基金项目: 国家自然科学基金(51578177);黑龙江省自然科学基金(E2016029)  
作者简介: 金鑫(1994-),女,硕士研究生;  
谭羽非(1962-),女,教授,博士生导师  
通信作者: 谭羽非, tanyufei2002@163.com

城市采暖用能的 1.5 倍以上<sup>[5]</sup>。

为充分掌握北方农村能耗及采暖现状,特对东北三省村镇农宅的冬季供热采暖方式进行为期两年的调研,调研结果表明 97.5% 的农户仍以传统落地炕作为主要采暖形式。传统落地炕普遍存在炕头局部温度过高,炕表面温度均匀性差;火炕热效率低,排烟热损失大,室内温度较低且室内 CO 体积分数超标等问题。

针对传统落地炕存在的上述问题,郭继业<sup>[6]</sup>结合自身多年的火炕搭建经验,设计了可上、下两个平面散热的新型高效预制吊炕,由大连市农村能源办实施推广,证明该吊炕采暖效果好于落地炕。牛叔文等<sup>[7]</sup>进一步对冬季采暖期吊炕及传统落地炕的采暖热效率进行模拟分析,结果表明吊炕热效率比传统落地炕高出 1 倍。李金平等<sup>[8]</sup>对吊炕及传统落地炕进行了热工性能的对比试验,发现吊炕可以更充分的利用烟气热量,节柴率可达 45%。上述研究表明,吊炕是提高北方农宅冬季采暖用能效率、减小供热能耗的有效途径。但由于吊炕仅是通过扩大传热面积增加了散热量,并未解决传统落地炕炕头局部温度过高,炕面温度分布不够均匀,烧炕时室内污染物超标等问题。

本文结合北方农村实际经济情况以及传统落地炕使用时存在的问题,提出了一种新型吊炕与土暖气联合供暖系统,通过在农宅内搭建该新型供暖系统与传统落地炕并对其进行热工测试,对比分析新型吊炕与土暖气联合供暖系统的炕面温度、采暖效率及室内温度等热工性能参数。测试与分析结果表明,吊炕与土暖气联合供暖系统不仅有效解决了传统落地炕炕头温度局部过高、热效率低、排烟热损失大等问题,室内热环境也得到很大改善,而且具有显著的节能减排效益。新型吊炕与土暖气联合供暖系统的推广应用,可降低北方农宅的采暖能耗,有效改善农宅内的人居环境。

## 1 吊炕与土暖气联合供暖系统

图 1 为吊炕内部结构示意图,在炕洞烧火炉膛处,安装一铸铁拱形水套,该拱形水套通过供回热水管路与室内土暖气组成了供热水循环系统。即拱形水套可吸收炉膛内燃料燃烧的部分热量,通过水循环系统传至土暖气中,并向室内供热。在原来炕洞落地燃烧炉膛内增设炉膛炉排(炉算子),将原落地燃烧改为在炉算子上燃烧以增大燃料燃烧时与氧气的接触面积。吊炕内部的烟道形式改为倒卷帘式并增设挡烟板来延长烟气流动循环通道。

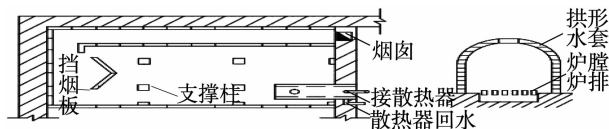


图 1 吊炕内部结构示意图

Fig. 1 Internal construction of the elevated kang

图 2 为吊炕外部结构示意图,用支柱架空炕体,使原炕体由一面散热变为上、下两面散热。吊炕侧面用导热系数较大的散热钢板外罩装饰板代替原红砖壁面以增加与室内空气的对流换热效果。吊炕炉膛新风口处设置鼓风机可为燃料燃烧提供充足氧气,并在炉膛底部增设落灰膛。

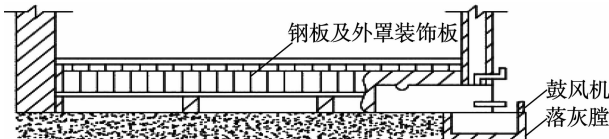
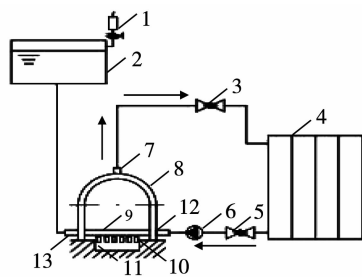


图 2 吊炕外部结构示意图

Fig. 2 External construction of the elevated kang

图 3 为吊炕与土暖气联合供暖系统示意图。吊炕内拱形水套通过供、回热水管路与室内土暖气相连,组成了拱形水套与土暖气循环热水系统。冬季供暖系统开始工作时,打开膨胀水箱 2 中上水管向系统注水至水箱漂浮阀自动关闭,表明供暖系统加满水;在炕洞内拱形水套 8 下方的炉膛中燃烧生物质燃料,燃料燃烧热量加热拱形水套内的循环水;开启调节阀 3、5 及管道循环泵 6 使系统形成机械循环;热水通过供水管 7 进入室内土暖气 4,加热土暖气向室内供热。



1—排气阀; 2—膨胀水箱; 3、5—球形调节阀;  
4—土暖气; 6—管道循环泵; 7—炕洞内拱形水套热水出口;  
8—炕洞内拱形水套; 9—炕洞内拱形水套连接管;  
10—炉膛炉排; 11—落灰膛; 12—炕洞内拱形水套回水管;  
13—炕洞内拱形水套进水管

图 3 吊炕与土暖气联合供暖系统示意图

Fig. 3 Combined elevated kang and radiator heating system

为验证吊炕与土暖气联合供暖系统的技术优势,采用测试的方法对其热工性能进行定量实测与分析。

## 2 吊炕与土暖气联合供暖系统热工性能测试

为测试吊炕与土暖气联合供暖系统的热工性

能,选取吉林省榆树县(东经127°,北纬42°)的一栋南北朝向新建农宅(建筑尺寸为20.0 m×8.5 m×2.7 m)作为测试建筑,农宅外观图如图4(a)所示.测试地区年平均气温为5.71℃,且全年采暖期为176 d.

2.1 测试概况

为进行吊炕与土暖气联合供暖系统与传统落地炕的热工性能测试比较,分别在该农宅两间朝南卧室(卧室面积均为25.76 m<sup>2</sup>,由走廊隔开)内根据所设计的新型供暖系统的结构,搭建吊炕与土暖气联合供暖系统和传统落地炕.

测试火炕尺寸均为4 600 mm×2 200 mm×400 mm.两火炕炕板由50 mm钢筋混凝土板和30 mm加草黏土蓄热层构成.火炕炉膛的添柴口尺寸均为200 mm×200 mm.其中吊炕底部架空距离地面200 mm,吊炕支柱采用红砖砌造且炕支柱尺寸为120 mm×120 mm×600 mm,传统落地炕底部垫土层高200 mm.吊炕侧墙由钢板及外罩装饰板构成,传统落地炕侧墙则由红砖砌造.吊炕及传统落地炕实物图如图4(b)、(c)所示,两火炕所使用的材料及物性参数见表1.



图4 实物图

Fig.4 Pictures of rural residence, elevated kang, and traditional grounded kang

表1 炕体使用材料及物性参数

Tab.1 Materials and physical parameters of kang

| 名称        | 材料    | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> ) | 比热容/(J·(kg·K) <sup>-1</sup> ) |
|-----------|-------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 炕板混凝土板    | 钢筋混凝土 | 2 500                    | 1.69                          | 920                           |
| 炕板蓄热层     | 加草黏土  | 1 600                    | 0.76                          | 1 010                         |
| 靠外墙隔热层    | 炉渣加红砖 | 500                      | 0.16                          | 1 050                         |
| 火炕侧墙及吊炕支柱 | 红砖    | 1 500                    | 0.57                          | 816                           |
| 吊炕侧面钢板    | 钢     | 7 800                    | 54.00                         | 390                           |

2.2 测试方案

本次测试采用短期连续的测试方法,测试时间为2017年1月19日,当日室外最高气温为-10℃,最低气温为-21℃.为保证测试期间火炕热工参数的相对稳定,从早晨7:50开始向两炕体炉膛内添加燃料并点火,待预热1 h10 min后开始测试相关的热工参数.测试时间段为上午9:00-11:50,11:50后停止向炉膛内添加燃料,随即停止测试.

为对比考查吊炕与土暖气联合供暖系统的节能性,本次火炕热工性能测试需要测量的参数为:火炕炕面温度、烟气出口温度、供暖系统供回水温度、热水流量、灰渣可燃物百分比及火炕消耗燃料量.火炕炕面温度测点布置如图5所示,根据炕体结构尺寸参数,利用等距离法在火炕表面布置6个温度测点,烟气出口温度测点布置在火炕出烟口的截面中心.

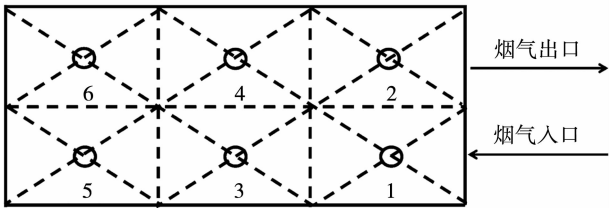


图5 炕面温度测点布置

Fig.5 Temperature measuring point arrangement of the kang surface

此外,室内热环境的测量参数为室内空气温度及室内空气污染物体积分数.室内热环境测试在两火炕所在的房间内进行,图6为室内热环境测试测点布置图.室内空气温度和污染物浓度测点布置在距地面1.1 m高的水平面上,室内空气温度测点1个,污染物体积分数测点2个.

## 2.3 测试方法

火炕热工性能的测试采用对比分析的方法,在火炕点火后以固定的速率向两炉膛内缓慢添加相同质量的燃料,测试过程中对吊炕与土暖气联合供暖系统及传统落地炕炕面温度、排烟温度、所在房间内温度及室内 CO 体积分数进行测试记录,同时测试期间将每次消耗的燃料称重并记录<sup>[9]</sup>。

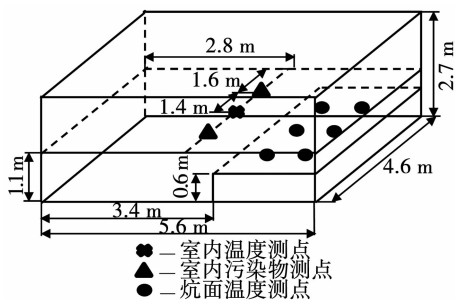


图 6 室内热环境测点布置

Fig. 6 Indoors thermal environment measuring point arrangement

炕面温度测点数据由 T 型热电偶四氟测温线获取,并通过 BES-G 智能多路温度检测仪 10 min 自动采集和存储记录一次<sup>[10]</sup>。其中炕面温度标准差为

$$S = \frac{\sum_{\tau=1}^m \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{i\tau} - \bar{t}_{\tau})^2}{n}}}{m}.$$

式中:  $S$  为火炕炕面温度标准差;  $\tau$  为测温次数,  $\tau = 1, 2, \dots, m$ ;  $i$  为测点数,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $\bar{t}_{\tau}$  为火炕表面在第  $\tau$  次采样的温度均值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{i\tau}$  为火炕表面不同测点在第  $\tau$  次采样的温度值,  $^{\circ}\text{C}$ 。

烟气出口温度的测定是在测点上布置耐高温的 K 型测烟温热电偶,并通过 K 分度热电偶温度采集仪 10 min 自动采集和存储记录一次。

火炕排烟口处烟气成分的测定选用 HS23-YQ3000 全自动烟气测试仪,仪器可测试  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  体积分数,10 min 自动采集和存储记录一次。

土暖气热量的测定是将热量表嵌入土暖气供回水管中,通过两种传感器采集测定热载体物理量,并由超声波热量表记录循环热水流量及温度,利用记录数据即可计算求得测试期间土暖气内循环水的热流量。

火炕热效率采用锅炉效率反平衡测试方法<sup>[11]</sup>,采用灰渣取样四分法,称量每次向火炕炉膛内添加的燃料质量并对燃料进行取样化验<sup>[12]</sup>。火炕工作结束后,清扫落灰膛内的灰渣,称量记录灰渣质量并对灰渣进行取样化验。其中吊炕与土暖气联合供暖系统效率  $\eta$  为

$$\eta = 100\% - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6),$$

火炕热效率  $\eta_k$  为

$$\eta_k = \eta - \eta_w,$$

土暖气供暖系统效率  $\eta_w$  为

$$\eta_w = \frac{q_w}{Q_{\text{net},v,\text{ar}} m_f} \times 100\%.$$

式中:  $q_w = 3\,600\rho_w \frac{\pi d^2}{4} v_w c_w (t_{\text{sw}} - t_{\text{rw}})$ ;  $\eta$  为吊炕与土暖气联合供暖系统效率,%;  $\eta_k$  为火炕热效率,%;  $\eta_w$  为土暖气供暖系统效率,%;  $q_6$  为灰渣物理热损失,%,取 0.5;  $q_5$  为炉灶散热损失,%,不计;  $q_4$  为固体未完全燃烧热损失,%;  $q_3$  为气体未完全燃烧热损失,%;  $q_2$  为排烟热损失,%;  $q_w$  为土暖气供暖系统散热量,  $\text{kJ}$ ;  $\rho_w$  为供回水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $d$  为供回水管直径,  $\text{m}$ ;  $v_w$  为供回水管流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $t_{\text{sw}}$  为供水温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{rw}}$  为回水温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $Q_{\text{b},\text{net},v,\text{ar}}$  为燃料收到基低位发热量,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;  $m_f$  为燃料消耗质量,  $\text{kg}$ ; 其中管道循环泵消耗电能仅占总燃料收到基低位发热量的 0.69%,计算中忽略不计。

其中固体未完全燃烧热损失  $q_4$  为

$$q_4 = \alpha_{\text{hz}} \times \frac{C_{\text{hz}}}{100 - C_{\text{hz}}} \times \frac{328.664A_{\text{ar}}}{Q_{\text{net},v,\text{ar}}}.$$

式中:  $C_{\text{hz}}$  为灰渣可燃物质量分数,%;  $\alpha_{\text{hz}}$  为灰渣灰量占燃料总灰量的质量百分比,%;  $A_{\text{ar}}$  为燃料收到基灰分,%。

气体未完全燃烧热损失  $q_3$  为

$$q_3 = 126.36 \times \text{CO}' \times \frac{V_{\text{gy}} K_{q4}}{Q_{\text{net},v,\text{ar}}} \times 100.$$

式中:  $\text{CO}'$  为排烟处 CO 体积分数,%;  $K_{q4}$  为修正系数,%;  $V_{\text{gy}}$  为排烟处干烟气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

排烟热损失  $q_2$  为

$$q_2 = \frac{K_{q4}}{Q_{\text{net},v,\text{ar}}} (H_{\text{py}} - H_{\text{lk}}) \times 100.$$

式中:  $H_{\text{py}}$  为排烟处烟气焓,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;  $H_{\text{lk}}$  为冷空气焓,  $\text{kJ}/\text{kg}$ 。

供暖系统年均秸秆消耗量  $m_j$  为

$$m_j = \frac{q \times S_g \times T_d \times T_y}{1\,000 \times Q_{\text{net},v,\text{ar}} \times \eta}.$$

式中:  $m_j$  为供暖系统年均秸秆消耗量,  $\text{kg}$ ;  $q$  为供暖室内温度  $18^{\circ}\text{C}$  时,农宅供暖能耗指标,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $S_g$  为供暖面积,  $\text{m}^2$ ;  $T_d$  为每日供暖时长,  $\text{s}$ ;  $T_y$  为全年供暖期,  $\text{d}$ 。

折算成标煤消耗量  $m_b$  为

$$m_b = \frac{m_j \times Q_{\text{net},v,\text{ar}}}{Q_{\text{b},\text{net},v,\text{ar}}}.$$

式中:  $m_b$  为供暖系统年均标煤消耗量,  $\text{kg}$ ;  $Q_{\text{b},\text{net},v,\text{ar}}$  为标煤收到基低位发热量,  $\text{kJ}/\text{kg}$ 。测试过程中所用测量仪器及其数量、类型、范围、精度、位置及采样周期见表 2。

表2 测量仪器基本信息表  
Tab.2 List of testing and monitoring devices

| 设备            | 型号          | 数量 | 测量对象    | 测试范围                      | 误差范围                  | 位置   | 周期/min |
|---------------|-------------|----|---------|---------------------------|-----------------------|------|--------|
| 温湿度自动采集记录仪    | BES-02      | 1  | 温度      | -30℃~50℃                  | ≤0.5℃                 | 室内   | 10     |
| T型测烟温热电偶      | T-type      | 6  | 温度      | -250℃~300℃                | ±0.1℃                 | 炕面   | —      |
| 智能多通路温度、热流检测仪 | BES-G       | 1  | 温度、热流密度 | -40℃~100℃、<br>0~±20 mV    | ≤0.3℃<br>≤0.02 mV     | 室内   | 10     |
| K型测烟温热电偶      | K type      | 1  | 温度      | -250℃~300℃                | ±0.1℃                 | 排烟口  | —      |
| K分度热电偶温度采集仪   | K type      | 1  | 温度      | -100℃<br>1~200℃           | ±0.5℃                 | 室内   | 10     |
| 超声波热量表        | ZRN-100     | 1  | 热流密度    | 0.01~±32 m/s              | —                     | 供回水管 | —      |
| CO检测仪         | GT-1000-CO  | 2  | CO体积分数  | 0~1 000 mg/m <sup>3</sup> | ±0.1×10 <sup>-6</sup> | 室内   | 10     |
| 全自动烟气测试仪      | HS23-YQ3000 | 1  | CO等体积分数 | 0~5 000 mg/m <sup>3</sup> | ±0.2×10 <sup>-6</sup> | 排烟口  | 10     |

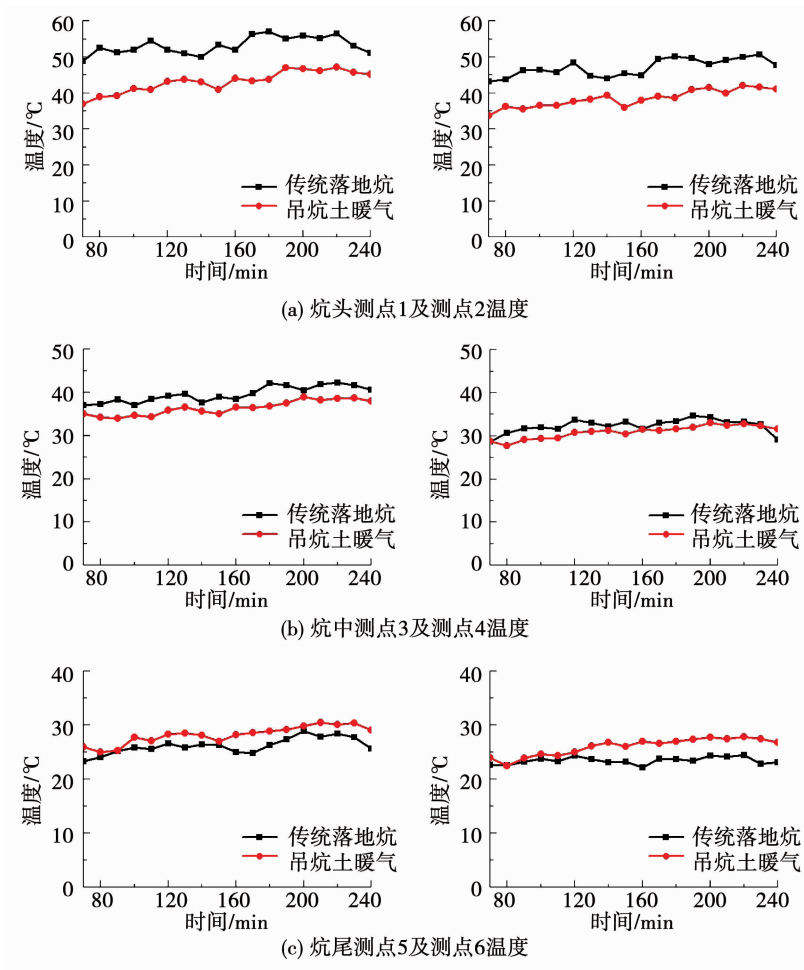


图7 两火炕炕面温度变化  
Fig.7 Temperature curves of two kangs

3 测试结果分析

3.1 炕面温度分布

图7为两火炕炕面温度变化曲线图。由图7(a)可知,传统落地炕炕头温度较高,最高温度可达57.4℃,平均温度为50.9℃。而吊炕炕头温度相对

较低,最高温度仅为46.8℃,平均温度为41.5℃,两火炕炕头平均温度相差9.4℃。上述分析可知,传统落地炕的炕头温度高于吊炕炕头温度是由于炕头下方即为炉膛,传统落地炕直接受到燃料燃烧产生的热辐射使得炕头局部温度过高,而吊炕内增设的拱形水套可吸收炉膛内燃料燃烧的部分热量,使



得吊炕炕头温度峰值较低。

由图 7(b)、(c) 可知,传统落地炕的炕中平均温度降至 36.1 ℃,炕尾平均温度降至 24.6 ℃. 吊炕的炕中平均温度降至 33.7 ℃,炕尾平均温度降至 26.9 ℃. 上述分析可知,吊炕的炕面温度降幅较小且温度分布较为稳定,这是由于吊炕内设置的支撑柱及挡烟板增加了烟气流动阻力,采用的倒卷帘烟道形式延长了高温烟气的流程,使得烟气在烟道内充分换热后才排出,烟气热量得以充分利用。

图 8 为测试期间两火炕炕面不同部位与炕面平

均温度变化曲线图. 由图 8(a)、(b) 可知,吊炕的炕头、炕中及炕尾与炕面平均温度的偏差范围比传统落地炕小,且经过炕面温度标准差计算可得吊炕炕面温度标准差比传统落地炕低 4.8 ℃,即吊炕的炕面温度分布更为均匀. 这是由于吊炕采用倒卷帘的烟道形式以及挡烟板,增加了高温烟气在烟道内的停滞时间,使得烟气与炕板换热更为充分,从而改善了炕面温度分布的不均匀性. 而传统落地炕烟道相对较短,燃料燃烧产生的高温烟气与炕板间换热不够充分使得各测点间温度分布不均匀。

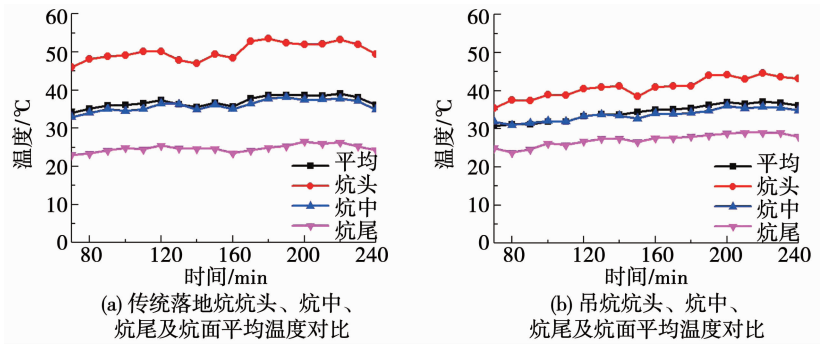


图 8 两火炕炕面不同部位与炕面平均温度对比

Fig. 8 Different parts' temperature and average temperature of two kangs

综上所述分析可知,该新型供暖系统内添置的拱形水套可有效降低炕体炉膛上方温度,且避免了炕头直接被火焰炙烤导致的表面过热及炕头水泥板强度低的问题. 同时吊炕的炕面温度更能满足人体热舒适性的需求<sup>[13]</sup>,具有更好的热稳定性。

3.2 烟道出口烟气温度

图 9 为测试期间两火炕烟道出口烟气温度的变化情况. 由实测数据可知,新型供暖系统中吊炕的烟道出口烟气平均温度为 56.1 ℃,而传统落地炕烟道出口烟气平均温度为 89.6 ℃,即吊炕的烟气排烟平均温度比传统落地炕低 33.5 ℃,这是由于吊炕内烟道结构的改善,提升了烟气在炕洞内的换热效果. 同时部分高温烟气热量通过吊炕底板及侧壁钢板散至室内,使得烟气余热得以充分利用. 从而降低了烟道出口排烟温度且大大降低了排烟热损失。

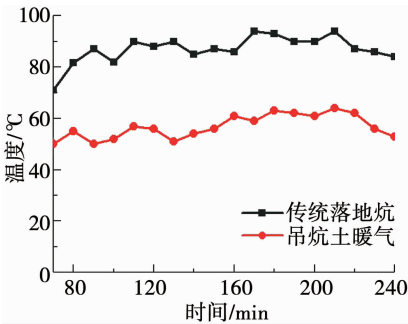


图 9 两种火炕烟道出口烟气温度

Fig. 9 Outlet temperature of flue gas of two kangs

3.3 热效率

测试期间燃料总消耗量为 9.47 kg,燃料消耗速率为 2.368 kg/h,根据燃料元素分析及灰渣可燃物含量测试结果计算得出两种火炕的热效率及各项损失见表 3<sup>[12]</sup>。

表 3 两供暖系统热效率及各项热损失数据

Tab. 3 Heat efficiency and other heat loss data of two heating systems %

| 供暖系统   | 系统效率  | 炕本体效率 | 土暖气效率 | 排烟热损失 | 气体未完全燃烧<br>热损失 | 固体未完全燃烧热<br>损失 | 灰渣物理热<br>损失 |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------------|----------------|-------------|
| 传统落地炕  | 43.45 | 43.45 | —     | 26.34 | 27.92          | 1.79           | 0.50        |
| 吊炕与土暖气 | 64.71 | 55.39 | 9.32  | 14.93 | 18.42          | 1.44           | 0.50        |

从表3中数据对比分析可知,吊炕与土暖气联合供暖系统比传统落地炕供暖系统效率提高21.26%,其中土暖气效率为9.32%。此外,吊炕排烟热损失降低11.41%,燃料未完全热损失降低9.85%,这是由于吊炕炉膛底部新风口的改造,为秸秆等燃料提供充足的氧气,保持炉膛内气压稳定,使得燃料燃烧更为充分,解决了燃料在落地燃烧时所形成的室内负压、燃烧不完全、呛烟的问题。

3.4 室内热环境

图10为吊炕与土暖气联合供暖系统和传统落地炕所在房间室内温度变化曲线。图中对比分析可知,测试期间,新型供暖系统所在房间的室内平均温度为18.6℃,传统落地炕所在房间的室内平均温度为12.9℃,两房间室内温差均值为5.7℃。新型供暖系统所在房间室内温度明显高于传统落地炕所在房间室内温度,这是由于燃料燃烧加热拱形水套内的循环水,并通过土暖气向室内散热。同时吊炕的架空底部以及增设的散热钢板增加了散热面积,使得吊炕与土暖气联合供暖系统的供热能力得到提升。因此吊炕与土暖气联合供暖系统可以有效提高室内温度。

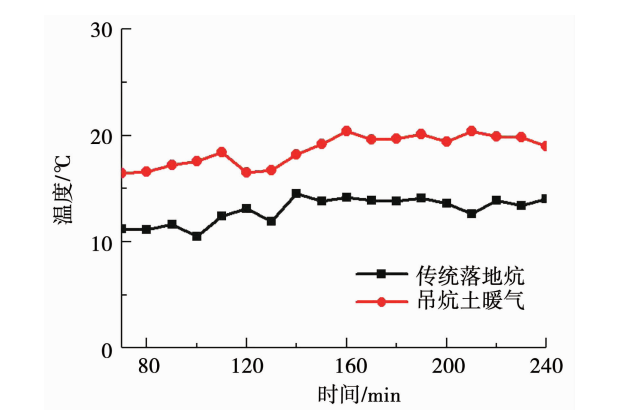


图10 两种火炕室内温度变化

Fig. 10 Indoor temperature changes of two rooms

表4为测试期间两火炕所在房间的室内CO平均体积分数。对比分析可知,采用吊炕的房间室内CO体积分数比采用传统落地炕的房间室内CO体积分数低 $6\times 10^{-6}$ ,且已经降低至标准范围以内<sup>[14]</sup>。这是由于新型供暖系统将落地燃烧改为在炉算子上燃烧,同时采用鼓风机送入新风,可以为燃料提供充足氧气保证其燃烧充分,使得未完全燃烧氧化物质量分数降低,提高了室内空气品质。综合上述分析可知吊炕与土暖气联合供暖系统明显改善了室内热环境。

表4 室内CO的标准值及实测平均体积分数数据

Tab.4 Measured average indoor CO pollutant concentrations and the standard values

| 类型                   | 传统落地炕 | 吊炕与土暖气 | 标准范围 |
|----------------------|-------|--------|------|
| CO/ $\times 10^{-6}$ | 10.3  | 4.3    | 6.0  |

3.5 节能减排效益

根据两供暖系统的热效率分别计算出农宅室内温度维持在18℃时吊炕与土暖气联合供暖系统和传统落地炕的年均燃料消耗量,计算结果见表5。

表5 两供暖系统年均燃料消耗量

Tab.5 Annual fuel consumption of two heating systems

| 供暖系统   | 秸秆消耗量/kg | 标煤消耗量/kg |
|--------|----------|----------|
| 传统落地炕  | 6 003.1  | 3 188.2  |
| 吊炕与土暖气 | 4 030.9  | 2 140.8  |

从表5中数据对比分析可知,每铺吊炕与土暖气联合供暖系统年均秸秆消耗量为4 030.9 kg,折算成标煤消耗量为2 140.8 kg。计算结果说明,吊炕与土暖气联合供暖系统与传统落地炕取得相同的室内升温效果时,新型供暖系统比每铺传统落地炕每年节省秸秆1 972.2 kg,标煤1 047.4 kg。按照秸秆燃烧时CO<sub>2</sub>排放因子为1 320 g/kg,SO<sub>2</sub>排放因子为0.53 g/kg,NO<sub>x</sub>排放因子为1.07 g/kg,PM<sub>10</sub>排放因子为7.83 g/kg,PM<sub>2.5</sub>排放因子为7.20 g/kg计算<sup>[15]</sup>,可得每铺吊炕与土暖气联合供暖系统比传统落地炕年均减排CO<sub>2</sub> 603.3 kg,SO<sub>2</sub> 1.0 kg,NO<sub>x</sub> 2.1 kg,PM<sub>10</sub> 15.4 kg以及PM<sub>2.5</sub> 14.2 kg。因此,吊炕与土暖气联合供暖系统的应用推广可以大大节省燃料能源,提高环境效益,也可有效维护农户身体健康。

4 结 论

1)传统落地炕炕头平均温度为50.9℃,而吊炕炕头平均温度仅为41.5℃。同时吊炕炕面温度标准差比传统落地炕低4.8℃,即吊炕的炕头温度峰值较低且炕面温度分布更为均匀。

2)由于新系统采用联合土暖气的供暖形式以及架空底部、安装侧面钢板等强化传热的措施,使得吊炕与土暖气联合供暖系统效率比传统落地炕效率高21.26%。

3)使用吊炕与土暖气联合供暖系统的房间室内平均温度比仅使用传统落地炕的房间室内平均温度高5.7℃,室内CO体积分数已降低至标准范围以内,即该新型供暖系统可以改善农宅冬季室内热环境。

4)两供暖系统取得相同供暖效果时,每铺吊炕与土暖气联合供暖系统年均秸秆消耗量比传统落地

炕节省 1 972. 2 kg, CO<sub>2</sub> 减排 2 603. 3 kg, SO<sub>2</sub> 减排 1. 0 kg, 充分说明吊炕与土暖气联合供暖系统具有显著的节能减排效益.

5) 新型吊炕与土暖气联合供暖系统可有效解决传统落地炕炕头温度局部过高及供暖热效率低的问题, 同时可以改善农宅室内热环境, 具有明显的节能减排效益. 可见吊炕与土暖气联合供暖系统是提高农村住宅冬季采暖能源利用效率, 改善居民热舒适性的有效途径, 可以推广应用.

## 参考文献

- [1] GAO Xiangxiang, LIU Jiaping, HU Rongrong, et al. A simplified model for dynamic analysis of the indoor thermal environment of rooms with a Chinese kang [J]. Building & Environment, 2017, 111: 265 – 278. DOI:10. 1016/j. buildenv. 2016. 10. 012
- [2] ZHUANG Zhi, LI Yuguo, CHEN Bin. Thermal storage performance analysis on Chinese kang [J]. Energy and Buildings, 2009, 41(4): 452. DOI:10. 1016/j. enbuild. 2008. 1. 006
- [3] 赵洋. 北方村镇火墙式火炕采暖系统热性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009  
ZHAO Yang. Thermal performance of heating system of hot wall kang in northern rural areas[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009
- [4] ZHUANG Zhi, LI Yuguo, CHEN Bin. Chinese kang as a domestic heating system in rural northern China—A review[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(1): 111. DOI:10. 1016/j. enbuild. 2008. 07. 013.
- [5] 住建部科技发展中心. 关注农村建筑节能[EB/OL]. (2009-02-20). <http://www. chinagb. net/zt/jishu/ncjn/>  
The Ministry of Science and Technology Development Center: Pay Attention to Building Energy Efficiency of Rural Areas. [EB/OL]. (2009-02-20) <http://www. chinagb. net/zt/jishu/ncjn/>
- [6] 郭继业. 高效美化的新型炕灶——北方高效预制组装架空炕灶[J]. 农民科技培训, 2002(4): 9  
GUO Jiye. A high-performance and beautiful kang: prefabricated high-performance assembled elevated kang-cooking-stove unit of northeast China[J]. Technological Training of Farmers, 2002(4): 9
- [7] 牛叔文, 钱玉杰, 胡莉莉, 等. 甘肃庄浪县农户吊炕的热效率模拟分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 193  
NIU Shuwen, QIAN Yujie, HU Lili, et al. Model analysis on thermal efficiency of suspended Kang of rural households in

- Zhuanglang county, Gansu province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(6): 193. DOI:10. 3969/j. issn. 1002 – 6819. 2013. 06. 024
- [8] 李金平, 李红博, 郑健, 等. 架空炕与传统落地炕热性能对比试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 210  
LI Jinping, LI Hongbo, ZHENG Jian, et al. Contrast test of thermal properties of suspended kang and traditional landed kang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(14): 210. DOI:10. 11975/j. issn. 1002 – 6819. 2017. 14. 029
  - [9] 方修睦, 王芳, 李桂文. 火炕热工性能评价指标及检测方法研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(6): 118  
FANG Xiumu, WANG Fang, LI Guiwen. Discussion on evaluation indices and test method for civil kang's thermal performance[J]. Building Science, 2014, 30(6): 118. DOI:10. 13614/j. cnki. 11 – 1962/tu. 2014. 06. 020
  - [10] 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, 30(6): 124  
WANG Fang, FANG Xiumu, LIU Tingting, et al. Experimental verification for evaluation indices and test method of civil kang's thermal performance[J]. Building Science, 2014, 30(6): 124. DOI:10. 13614/j. cnki. 11 – 1962/tu. 2014. 06. 021
  - [11] 中国农村能源行业协会节能炉具专业委员会. 民用火炕性能试验方法: NY/T 58-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
  - [12] 国家质量监督检验检疫总局. 工业锅炉热工性能试验规程: GB/T10180—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
  - [13] 徐策. 火墙式火炕热性能实验研究及传热模型的建立[D]. 大连: 大连理工大学, 2015  
XU Ce. Experiment research on thermal properties and the establishment on heat transfer model of hot-wall kang [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015
  - [14] ALNES L W H, MESTL H E S, BERGER J, et al. Indoor PM and CO concentrations in rural Guizhou, China [J]. Energy for Sustainable Development, 2014, 21(1): 51. DOI: 10. 1016/j. esd. 2014. 05. 004
  - [15] 胡莉莉, 牛叔文. 黄土丘陵区农村节能吊炕的环境经济效益分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 208  
HU Lili, NIU Shuwen. Analysis on environmental and economic benefits of suspended kang of rural households in loess hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(15): 208. DOI:10. 11975/j. issn. 1002 – 6819. 2015. 15. 029

(编辑 张 红)