

上燃均衡供氧式生物质成型燃料炊事炉的设计与性能测试

荆艳艳, 李亚猛, 周雪花, 张志萍, 朱胜楠, 张全国

(河南农业大学农业部可再生能源新材料与装备重点实验室, 郑州450002)

摘要：为提高农村用能效率，依据生物质燃烧特性和热工计算标准，设计上燃均衡供氧式生物质成型燃料炊事炉。确定炊事炉的主要设计参数，构建相互独立的螺旋式分级配风系统及灰仓与风管相结合的自然进风系统，并对炊事炉的性能进行测试。结果显示炊事炉热效率为40.25%，炊事火力强度为3.32kW，烟尘、CO、SO₂、NO_x等烟气污染物排放均符合国家相关标准，可保证成型颗粒燃料的充分燃烧，提高燃烧性能。

0引言

生物质能是动植物和微生物将太阳能转换为化学能存储在生物质中的能量形式[1]，是一种可再生能源。生物质能的开发和利用是提高农村用能效率的有效途径之一[2, 3]。秸秆类生物质具有挥发分高、灰分低、碳活性高等优点，在生物质的燃料化利用方面得到了广泛关注。2015年我国农作物秸秆类生物质燃料化利用量为1.04亿t[4]，且在逐年增加。同时随着固化成型技术的发展，秸秆类生物质经粉碎、干燥，在高温高压或加粘结剂的条件下挤压而成的颗粒状燃料，不仅天然环保、便于运输和储存[5~7]，而且克服了秸秆类生物质疏松性和分散性给燃烧过程带来的问题[8~11]，因此成型燃料技术逐渐成为秸秆类生物质燃料化利用的主要方式。但因其挥发分高、灰分低，与煤的燃烧特性迥异[8]，故需设计专门的燃烧炉具才能使燃料高效、清洁地燃烧。

目前使用的节柴灶存在火力强度小、污染物排放高和热效率低等问题[12, 13]。因此探索新型燃烧模式，设计出点火容易、操作简便、火力强度大且易于控制的生物质成型燃料炊事炉是一个关键。本文针对成型燃料的特点，设计出一种上燃式均衡供氧生物质成型燃料炊事炉，该炉具采用上下独立的旋转式进风，进风量均匀无死角，保证燃料的充分燃烧，且可提高燃烧性能。

1设计依据

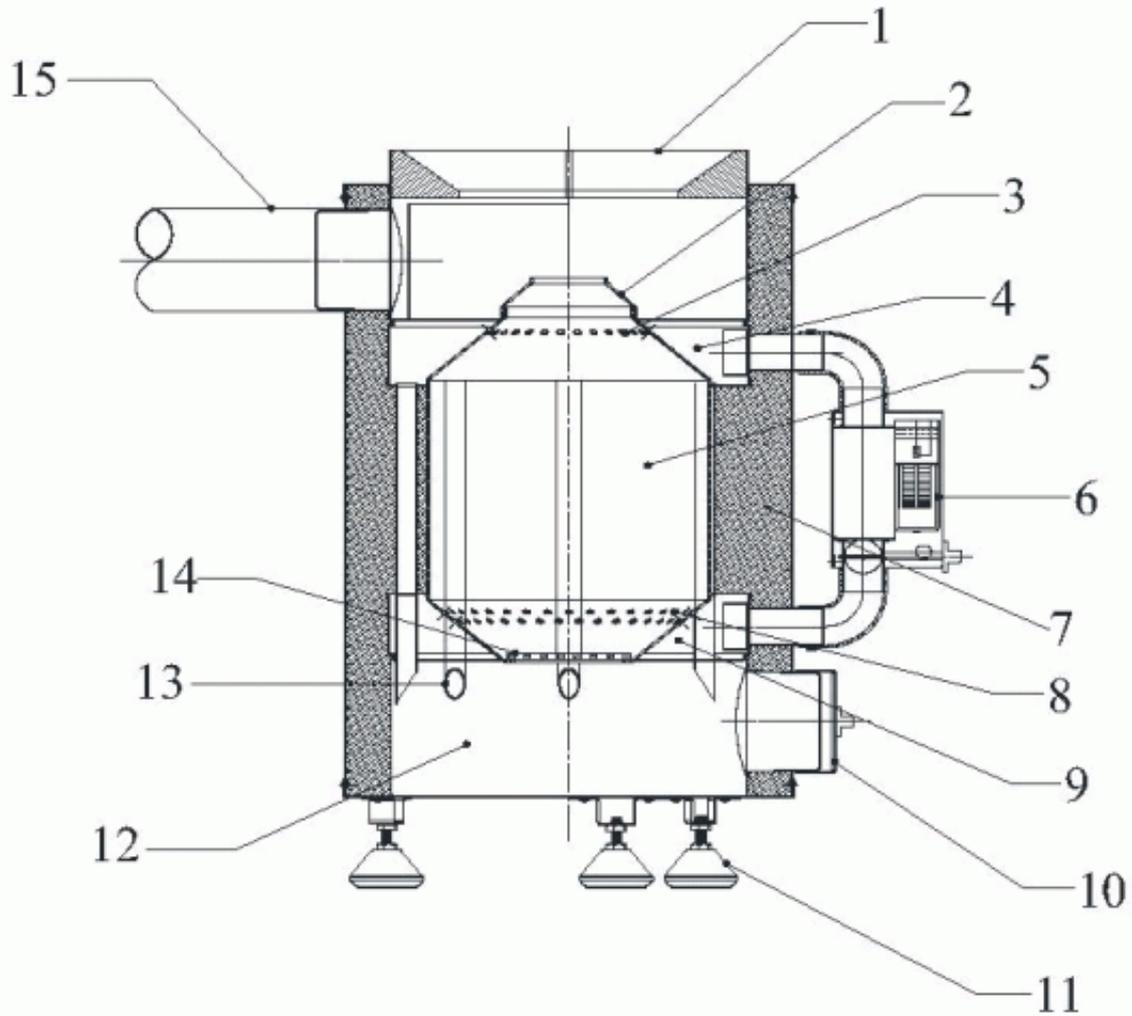
依据生物质颗粒成型燃料静态渗透式扩散燃烧的基本特性[14]，结合地区用能习惯和经济条件，炉具设计遵守以下原则：1) 使用方便、易点火、上火快；2) 安全卫生、热性能稳定；3) 适应农民生活习惯和燃料要求；4) 造价低、实用耐用。

对生物质成型燃料炉具的设计还需考虑：1) 充分利用生物质产生的挥发性物质和燃烧过程中碳化物质的热辐射能量；2) 空气能均匀流畅地进入炉内，实现连续稳定燃烧；3) 燃烧完全，能源利用效率高。

2结构与设计

2.1炊事炉的整体结构

生物质颗粒燃料炊事炉主要由燃烧单元、供风单元、隔热单元、支撑单元等组成，结构如图1所示。生物质成型燃料炊事炉的进料口设置在炉灶外侧，和出火口为同一位置，出火口处装有聚火环，炉膛内的成型颗粒燃料采用上点火的引燃方式从上往下燃烧，使生物质气化和燃烧一体化。该炊事炉设计2套二级进风系统，其中螺旋式分级配风系统的送风管与风机相连通，通过风机配风组件实现二次供风，且风机配风阀手柄旋钮可调节一次风和二次风的大小以及配比，同时一次风和二次风进风处设计有带进风孔的锥形进风套，采用的风机功率为8W，送风管直径为30mm。自然进风系统由出灰组件的灰窗盖、灰窗进风阀手柄和灰窗调风板组成，自然风由出灰口经炉篦进入炉膛实现一次供风，二次供风则由与自然进风管相连通的灰仓和二次进风系统实现。



1. 锅圈 2. 聚火口 3. 二次进风孔 4. 二次进风套
5. 燃烧炉膛 6. 风机 7. 隔热层 8. 一次进风孔
9. 一次进风套 10. 出灰组件 11. 可调式炉脚
12. 灰仓 13. 自然进风管 14. 炉篦 15. 排烟口

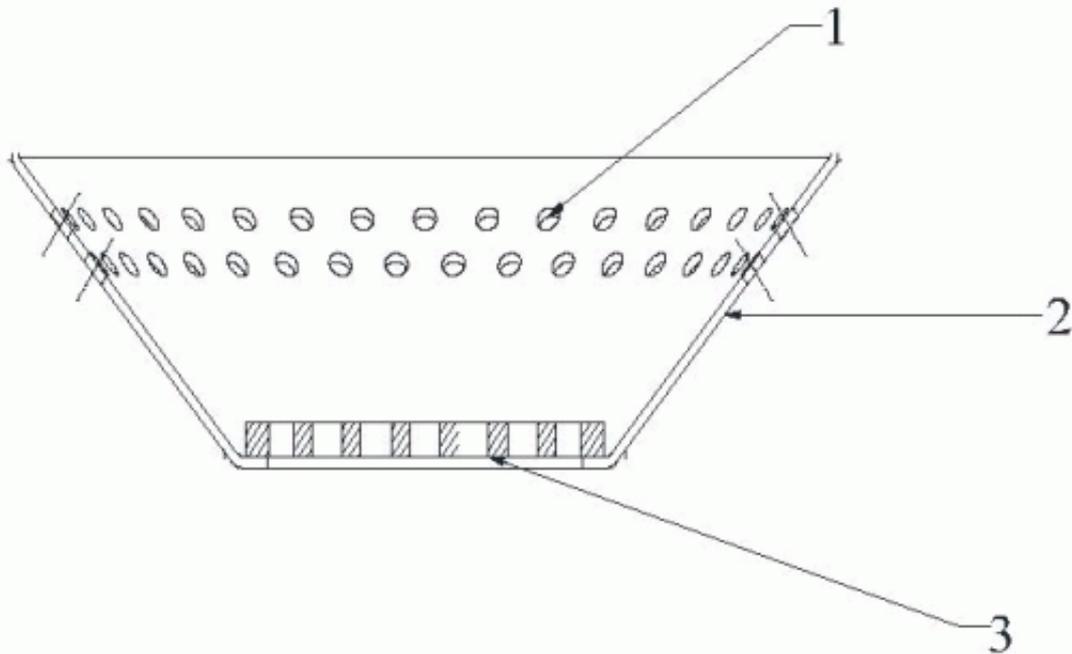
图1 生物质颗粒燃料炊事炉结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of biomass pellet fuel cooking stove

2.2 供风系统的设计

2.2.1 相互独立的螺旋式分级配风系统

一次风和二次风进风设计成上下独立的炉体结构。一次风从炉膛下部鼓入，有利于提前预热及燃料与空气的充分混合；二次风从炉膛上部鼓入，可改善挥发性可燃气体与空气混合的均匀度，提高燃烧温度。为保证进风量的均匀性，一次风和二次风进风系统处设有圆锥形或弧面型的进风套，进风套上有流线型的进风孔，其结构如图2所示。该结构可促使从进风孔流出的风形成螺旋式流动，达到进风均匀、无死角，降低整体过量空气系数，减少不完全燃烧污染物的排放的作用。



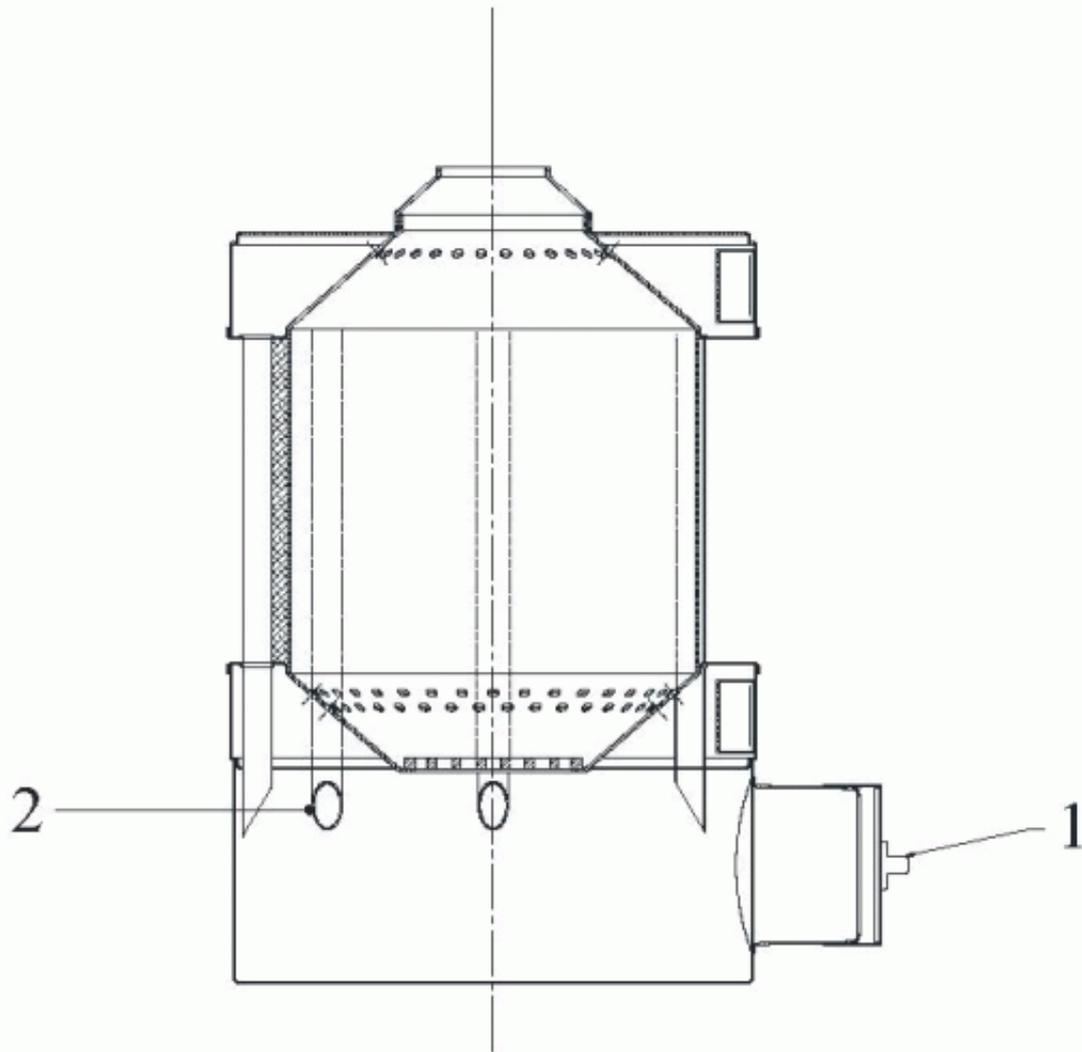
1. 进风孔 2. 锥形套 3. 炉篦

图2 锥形进风套结构图

Fig. 2 Structural diagram of air inlet sleeve

2.2.2 灰仓和风管结合的自然进风系统

自然进风系统如图3所示，由出灰组件控制进风量，自然风通过进风口（即出灰口）进入灰仓后，经炉篦为炉膛燃烧提供一次风。灰仓上方设置与其相连的45°斜角的自然进风管，风管上端与二次进风套相连通，自然进风系统的二次风则经自然进风管由二次进风孔提供，以保证断电时炊事炉正常工作。



1. 灰窗进风阀手柄 2. 自然进风管

图3 自然进风系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of natural air intake system

2.3炊事炉的设计计算

2.3.1生物质燃料消耗量

中国农村基本为3~5口之家，日常生活平均每天所需热量 Q_1 为12000kJ[15]，做饭时间约1h，设计生物质成型燃料炊事炉的热效率为45%，玉米秸秆成型燃料热值约为14600kJ/kg，则生物质燃料消耗量为：

$$B_L = \frac{Q_1}{Q_{\text{net.ar}} \cdot \eta \cdot m \cdot n} \quad (1)$$

式中， B_L ——燃料消耗量，kg/h； Q_1 ——每日炊事所需的热量，取 12000 kJ/d； $Q_{\text{net.ar}}$ ——生物质低位发热量，取 14600 kJ/kg； η ——炉具设计的热效率，取 45%； m ——每天做饭所需时间，h； n ——每天做饭次数，取 $n=3$ 。

由式(1)计算可得生物质颗粒炊事炉的燃料消耗量为 0.61 kg/h。

2.3.2 炉膛参数的确定

炉膛（燃烧室）指从炉篦到炉口下部之间的部分，恰当选择炉膛参数是燃料完全燃烧的根本保证。

1) 炉膛容积

决定炉膛容积的主要指标是炉膛容积热负荷。炉膛容积热负荷过大,炉膛容积较小,则燃料在炉内的停留时间短,不易完全燃烧;反之,炉膛容积热负荷过小,炉膛容积过大,燃烧分散,火力不集中。

炉膛容积可按式(2)计算,可得出炉膛容积为 0.01 m^3 。

$$V_L = \frac{B_L \cdot Q_{\text{net,ar}} \cdot \eta}{q_{\text{max}}} \quad (2)$$

式中, V_L ——炉膛容积, m^3 ; q_{max} ——燃烧室的最大容积热负荷,取 $q_{\text{max}} = 400 \text{ kW/m}^3$ ^[15]。

2) 炉排面积和炉排热负荷

炉排安装在炉膛下部,可由炉膛体积公式得出炉膛下部圆的半径,从而计算出炉排的面积。

炉膛体积为:

$$V = \frac{1}{3} \pi \cdot h \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2) + \pi \cdot H \cdot R^2 \quad (3)$$

式中, h ——下炉膛高,取 $h = 10 \text{ cm}$ ^[16,17]; R ——上炉膛半径,取 $R = 11 \text{ cm}$; r ——下炉膛半径, cm ; H ——上炉膛高,取 $H = 20 \text{ cm}$ 。

由式(3)可得下炉膛半径 6.2 cm ,为设计方便选取下炉膛半径为 6 cm ,则炉排总面积 $A = 0.011 \text{ m}^2$ 。

生物质颗粒炊事炉炉排热负荷公式为:

$$q_a = \frac{B_L \cdot Q_{\text{net,ar}} \cdot \eta}{3600 \cdot A} \quad (4)$$

由式(4)可得生物质炊事炉的炉排热负荷为 101.20 kW/m^2 。

3) 炉篦面积

炉篦用于支撑燃料并起到通风助燃的作用,空气与燃料接触面积的大小由炉篦空隙大小决定,因此炉篦面积过大或过小均直接影响燃料燃烧效果^[15]。本设计中炉篦的炉条面积与炉条空隙面积比约为 $1:1$,即炉篦面积为 $S = A/2 = 0.0055 \text{ m}^2$ 。

2.3.3 烟囱参数的确定

烟囱的主要作用是在炉膛内产生负压，将空气从进风口抽入炉膛，使燃料和空气充分接触，尽量实现完全燃烧，同时将炉膛内的烟尘抽出。

1) 烟囱高度

$$L = \frac{29.27 \cdot p}{P \cdot \left(\frac{1}{273 + t_1} - \frac{1}{273 + t_2} \right)} \quad (5)$$

式中, L ——烟囱高度, m; p ——炉具的吸风压, 取 0.11 mm Hg; P ——平均大气压力, 取 760 mm Hg; t_1 ——大气中的年平均温度, 20 °C; t_2 ——烟囱内烟气平均温度, 200 °C^[18]。

由式(5)可计算出烟囱高度为 2.41 m, 为保证实际应用中的烟囱的抽力, 常取烟囱高度为 2.5 m。

2) 烟囱截面积

$$F = \frac{B_L \cdot V_y \cdot (273 + t_y)}{3600 \cdot W_y \cdot 273} \quad (6)$$

式中, F ——烟囱的截面积, m²; V_y ——燃料产生烟气量, $V_y = 4.27 \text{ m}^3$ (燃料完全燃烧产生的烟气量)^[15]; t_y ——烟气的温度, $t_y = 200 \text{ °C}$; W_y ——烟气流速, 取 $W_y = 1 \text{ m/s}$ 。

由式(6)可得出烟囱截面积为 $F = 0.0013 \text{ m}^2$, 采用直径为 5.0 cm 的白铁皮烟囱。

3 性能试验

3.1 性能测试主要依据

户用生物质炊事炉具性能试验方法（NB/T2370—2013）[19]和户用生物质炊事炉具通用技术条件（NB/T2369—2013）[20]。

3.2 试验系统

试验装置主要有炉具主体（炉膛、烟道等）、温度测试系统、烟气分析系统等。图4为测试样机。



图4 测试样机

Fig. 4 Test prototype

3.3测试仪器和设备

水桶2个，容量 0.01m^3 ；台秤1台，测量范围 $0\sim 10\text{kg}$ ，精确 0.005kg ；磅秤1台，测量范围 $0\sim 50\text{kg}$ ，

精确 0.02kg ；时钟1个，日差小于 1min ；温度计2支，测量范围 $0\sim 100$ ，分度值 0.2 ；干湿球温度计1支；风速计1个，测量范围 $0\sim 10\text{m/s}$

，精度0.5m/s；镍铬-

镍硅K型热电偶，测温范围-200~1200；KMQuintO_x

9106型烟气分析仪；贝克曼表面温度计，测量范围0~300，分度值2；直径30cm蒸发铝锅1个。

3.4 试验条件

试验在室内进行，生物质成型燃料炊事炉远离热源，环境温度为16.5，相对湿度小于85%，风速小于1.0m/s；燃料为玉米秸秆压缩成型颗粒燃料，粒径5~15mm，长度20~30mm，其工业性分析和元素分析如表1所示。引燃物为干燥的棉花秸秆，每次实验做2次平行实验。

表1 生物质成型颗粒燃料的工业分析与元素分析

Table 1 Industrial analysis and elemental analysis of biomass pellets

项目	数值	项目	数值
燃料粒径 r/mm	5~15	$[\text{C}]_{\text{ar}}/\%$	45.43
燃料长度 L/mm	20~30	$[\text{H}]_{\text{ar}}/\%$	6.15
水分 $M_{\text{ar}}/\%$	4.87	$[\text{O}]_{\text{ar}}/\%$	47.14
灰分 $A_{\text{ar}}/\%$	5.90	$[\text{N}]_{\text{ar}}/\%$	0.78
挥发分 $V_{\text{del}}/\%$	71.84	$[\text{S}]_{\text{ar}}/\%$	0.13
热值 $Q_{\text{net. ar}}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	14600	—	—

炊事火力强度：

$$P_c = \frac{4.18 \cdot G_1 \cdot (t_4 - t_3) + (G_1 - G_2) \cdot \gamma}{T_2 - T_1} \quad (7)$$

炊事热效率：

$$\eta_c = \frac{4.18 \cdot G_1 (t_4 - t_3) + (G_1 - G_2) \gamma}{B \cdot Q_{\text{net.ar}} + B_1 \cdot Q_{\text{net.ar1}}} \quad (8)$$

式中， P_c ——炊事火力强度，kW；4.18——水的比热容，kJ/kg·℃； G_1 ——蒸发锅内初始水量，kg； t_3 、 t_4 ——锅水初始温度和沸腾温度，℃； G_2 ——试验结束时剩余水量，kg； T_1 、 T_2 ——点火时刻和试验结束时刻； γ ——锅水在平均蒸发温度下汽化潜热，kJ/kg； η_c ——炊事热效率，%； B ——生物质燃料质量，kg； B_1 ——引火燃料量，kg； $Q_{\text{net.ar1}}$ ——引火燃料收到基低位发热量，kJ/kg。

3.5 结果与分析

生物质颗粒炊事炉具的炊事火力强度和炊事热效率试验数据如表2所示。根据表2所示数据可得出上火时间、旺火时间和可用火时间占整个燃烧试验时间的2.57%、68.23%和85.71%，各时间段的占有百分量优于以前文献报道[21]。从占有时间百分量可看出整个炉具上火较快、燃烧较稳定。

表2 炉具热性能试验

Table 2 Date of stove performance test

参数	数值
燃料加入量 B/kg	2.328
引火柴量 B_1/kg	0.045
燃料低位热值 $Q_{\text{net.ar}}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	14600
引火柴低位热值 $Q_{\text{net.ar1}}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	15435
初始水量 G_1/kg	7
结束时剩余水量 G_2/kg	1.95
初始水温 $t_3/^\circ\text{C}$	12.5
沸腾温度 $t_4/^\circ\text{C}$	100
上火时间 T_i/s	108
旺火时间 T_w/s	2866
可用火时间 T_k/s	3600
试验时间 $(T_2-T_1)/\text{s}$	4200
汽化潜热 $\gamma/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	2257.6

上燃均衡供氧式生物质成型燃料炊事炉的热性能见表3。炊事炉热效率为40.25%，炊事火力强度为3.32kW，符合国家户用炉具标准（热效率 35%、炊事火力强度 $P \leq 2\text{kW}$ [20]）。炊事炉燃烧正常后，经测定出烟口排烟平均温度为186℃，烟气黑度小于1级，烟尘平均排放浓度18.5mg/m³，CO平均排放浓度0.18%，SO₂平均排放浓度14.5mg/m³，NO_x平均排放浓度105.5mg/m³，各指标均符合炊事炉大气污染物排放标准要求[20]，具有良好的环境效益。

表3 炉具性能和烟气排放试验结果

Table 3 Results of stove performance and flue gas emissions test

参数	数值	指标 ^[19]
炊事火力强度/kW	3.32	≥ 2
炊事热效率/%	40.25	≥ 35
烟尘平均排放浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	18.5	≤ 50
CO平均排放浓度/%	0.18	≤ 0.2
SO ₂ 平均排放浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	14.5	≤ 30
NO _x 平均排放浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	105.5	≤ 150
林格曼黑度	<1	≤ 1

4结论

1) 上燃均衡供氧式生物质成型燃料炊事炉设计了2套二级供风系统，构建一次风和二次风相互独立的螺旋式分级配风系统，实现漩涡式进风，进风均匀、无死角。自然进风系统采用灰仓和风管相结合的分级进风形式，有利于供风系统的正常运行。

2) 通过分析计算，确定了炊事炉燃料消耗量、炉膛容积、炉排和炉篦面积、炉排热负荷、烟囱高度和面积等成型燃料炊事炉的主要设计参数。

3) 设计的上燃

均衡供氧式生物质成型燃料炊事炉

的炊事热效率、炊事火力强度及烟尘、CO、SO₂、NO_x等烟气污染物排放均符合国家户用生物质炊事炉的相关标准。

[参考文献]

- [1] 吕指臣. 我国主要农作物生物质能开发潜力与策略研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2016.
- [1] Lyu Zhichen. Research on biomass energy development potential and strategy of main crops in China [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2016.

- [2] 王德元. 生物质能利用系统综合评价研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [2] Wang Deiyuan. Comprehensive evaluation of biomass utilization system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [3] 赵 军, 王述洋. 我国生物质能资源与利用[J]. 太阳能学报, 2008, 29(1): 90—94.
- [3] Zhao Jun, Wang Shuyang. Bio-energy resource and its utilization in china [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2008, 29(1): 90—94.
- [4] 杨 华, 刘石彩, 赵佳平, 等. 生物质棒状成型燃料的物理特性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(2): 114—118.
- [4] Yang Hua, Liu Shicai, Zhao Jiaping, et al. Study on physical properties of biomass rod-shaped molding fuel [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(2): 114—118.
- [5] 王翠苹, 李定凯, 王凤印, 等. 生物质成型颗粒燃料燃烧特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 174—177.
- [5] Wang Cuiping, Li Dingkai, Wang Fengyin, et al. Experimental study on the combustion characteristics of biomass pellets [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 174—177.
- [6] 姚宗路, 田宜水, 孟海波, 等. 生物质固体成型燃料加工生产线及配套设备[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 280—285.
- [6] Yao Zonglu, Tian Yishui, Meng Haiibo, et al. Production line and corollary equipment of biomass solid fuel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 280—285.
- [7] 朱 杰. 混合调质生物质成型颗粒燃烧及热解特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- [7] Zhu Jie. A study on the pyrolysis and combustion properties of moulded hybrid biomass [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015.
- [8] 李亚猛, 周雪花, 胡建军, 等. 生物质颗粒直燃炉灶设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 280—285.
- [8] Li Yameng, Zhou Xuehua, Hu Jianjun, et al. Design and test of direct-fired stove using biomass pellet fuel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 280—285.
- [9] 张宜升, 张厚勇, 栾胜基, 等. 生物质露天焚烧及家

- 庭燃用的多环芳烃排放特征研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 387—395.
- [9] Zhang Yisheng, Zhang Houyong, Luan Shengji, et al. Emission characteristics of PAHs from open and residential biomass burning[J]. China Environmental Science, 2015, 35(2): 387—395.
- [10] 李海熹. 生物质半气化炉性能影响因素及设计改进[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [10] Li Haixi. The performance influence factors and improvement of biomass semi-gasified furnace[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [11] 杨新兴, 尉鹏, 冯丽华, 等. 大气颗粒物PM_{2.5}及其源解析[J]. 前沿科学, 2013, (2): 12—19.
- [11] Yang Xinxing, Wei Peng, Feng Lihua, et al. Atmospheric particulate matter PM_{2.5} and its sources[J]. Frontier Science, 2013, (2): 12—19.
- [12] 陈晓夫, 张伟豪, 刘广青, 等. 我国户用生物质炉灶的发展和应[用]. 可再生能源, 2010, 28(2): 118—122.
- [12] Chen Xiaofu, Zhang Weihao, Liu Guangqing, et al. The development of household biomass stove in China[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(2): 118—122.
- [13] 张伟豪, 陈晓夫, 刘晓英, 等. 中国生物质炉灶技术和应用进展[J]. 化工进展, 2009, 28(增刊): 516—520.
- [13] Zhang Weihao, Chen Xiaofu, Liu Xiaoying, et al. Advances in technology and application of biomass stoves in China[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(Sup): 516—520.
- [14] 闵海飞, 张明旭. 生物质燃烧模式及燃烧特性的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(1): 104—108.
- [14] Min Fanfei, Zhang Mingxu. Study on combustion model and combustibility of biomass[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(1): 104—108.
- [15] 舒伟. 高效生物质成型燃料炊事炉设计与试验[D]. 郑州: 河南农业大学, 2007.
- [15] Shu Wei. Study of high efficient biomass briquette fuel cookstove[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2007.
- [16] 刘圣勇. 农村节能工程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [16] Liu Shengyong. Energy saving project in country[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.
- [17] 中国农村能源行业协会. 省柴节煤炉灶炕实用技术一点通[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [17] China Association of Rural Energy Industry. Practical technology of energy-saving stove[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [18] 谭文英, 许勇, 王述洋, 等. 生物质燃料多功能炉设计与性能测试[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 10—17.
- [18] Tan Wenying, Xu Yong, Wang Shuyang, et al. Design and performance test of multi-function stove for biomass fuel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 10—17.
- [19] NB/T 2370—2013, 户用生物质炊事炉具性能试验方法[S].
- [19] NB/T2370—2013, Test performance of domestic biofuel cooking stove[S].
- [20] NB/T 2369—2013, 户用生物质炊事炉具通用技术条件[S].
- [20] NB/T 2369—2013, General technical specification of domestic biofuel cooking stove[S].
- [21] 范欣欣, 吕子安, 李定凯, 等. 生物质颗粒燃料炊事炉的性能[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 280—284.
- [21] Fan Xinxin, Lyu Zian, Li Dingkai, et al. Performance of cooking stoves with biomass pellet fuel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 280—284.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/176190.html>