

# 生物质颗粒直燃炉灶设计与试验

李亚猛<sup>1,2</sup> 周雪花<sup>1,2</sup> 胡建军<sup>1,2</sup> 朱胜楠<sup>1,2</sup> 荆艳艳<sup>1,2</sup> 张全国<sup>1,2</sup>

(1. 河南农业大学机电工程学院, 郑州 450002; 2. 生物质能源河南省协同创新中心, 郑州 450002)

**摘要:** 针对当前生物质燃烧炉灶热效率低、火力强度达不到要求、供风不充足燃烧不完全、功能单一等问题, 依据集中供餐炊事对清洁生物质颗粒燃料炉灶的需求, 研制了一种以层燃为燃烧方式, 集炒菜、蒸饭、烧水、供热等功能于一体的生物质颗粒直燃炉灶。运行性能试验结果表明: 该炉灶的炊事热效率为 42.9%, 综合热效率达 70.7%, 炊事强度为 14.1 kW, 烟气排放指标低于国家标准, 生物质颗粒燃烧较为充分, 可为以生物质颗粒为燃料的集中供餐炊事炉灶的设计与应用提供科学参考。

**关键词:** 生物质颗粒; 直燃炉灶; 设计; 试验

**中图分类号:** S216.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0280-06

## Design and Test of Direct-fired Stove Using Biomass Pellet Fuel

LI Yameng<sup>1,2</sup> ZHOU Xuehua<sup>1,2</sup> HU Jianjun<sup>1,2</sup> ZHU Shengnan<sup>1,2</sup> JING Yanyan<sup>1,2</sup> ZHANG Quanguo<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2. Collaborative Innovation Center of Biomass Energy of Henan Province, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Several issues existing in the biomass stoves, such as low thermal efficiency, substandard fire intensity, insufficient air supply, uncomplete combustion, substandard emission and unitary function. According to the requirement about the environmental cooking stoves with biomass pellet fuel for centralized food catering, a novel direct-fired cooking stove with biomass pellet fuel was designed to solve the mentioned shortcomings. An annular evaporator was installed above the furnace, the water inside the evaporator was heated by the peripheral flame and flue gas, and high temperature steam produced from evaporator was assigned to different routes to achieve the direct-fired cooking stove combined functions of stir-fry, steamed rice, boil water and thermaling. Meanwhile, in order to ensure the uniformity of air intake, a grid shaped air inlet sleeve was designed, the wind was blown into the furnace in a rotating form. Moreover, all the integrated functions can run simultaneously. According to the national standard NB/T 34015—2013, the direct-fired stove was tested. The performance test results of the redesigned cooking stove showed that the thermal efficiency for cooking reached 42.9%, and the integrated thermal efficiency was 70.7% combined with the thermal used for heating water. The fire intensity for cooking was 14.1 kW, and emission indexes of flue gas was lower than the national standard. The novel design of the cooking stoves with biomass pellet fuel realized the complete combustion of biomass particles, which can provide reference for the design and application of direct-fired pellet stove.

**Key words:** biomass pellet; direct-fired stove; design; test

## 引言

能源是经济发展和社会进步的基础,但由于常规化能源的理论存储量有限并日渐枯竭,对可再生

资源的开发利用已迫在眉睫。生物质能源作为一种可再生且环境友好的能源,受到广泛关注。我国具有丰富的农作物秸秆资源,2015年农作物秸秆理论资源量 10.4 亿 t,可收集资源量 9.0 亿 t,利用量为

收稿日期: 2017-06-14 修回日期: 2017-08-16

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51676065)、国家自然科学基金联合基金项目(U1504509)和教育部博士点基金新能源优先领域项目(20134105130001)

**作者简介:** 李亚猛(1988—),男,博士生,主要从事可再生能源工程研究,E-mail: 874750357@qq.com

**通信作者:** 张全国(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事可再生能源工程研究,E-mail: zquanguo@163.com

7.2 亿 t, 其中秸秆燃料化利用量 1.0 亿 t (折合 0.5 亿 t 标准煤), 占可收集资源量的 11.4%<sup>[1]</sup>。秸秆类生物质具有挥发性高、碳活性高、灰分低、S 含量低, 在整个碳循环过程中 CO<sub>2</sub> 零排放等优点, 是一种优质清洁燃料。因此, 将秸秆类生物质通过直接燃烧方式利用, 是其最简便高效的燃料化利用方式之一<sup>[2-4]</sup>。

由于秸秆的疏松性和分散性对其收储运和燃烧带来一些问题<sup>[5]</sup>, 采用物理、化学的方法将秸秆粘化, 在高温高压下或加粘结剂条件下, 压缩成粒状或块状等具有一定密实度的颗粒状燃料<sup>[6-8]</sup>, 便于运输和储存, 燃烧效率高<sup>[9-10]</sup>。为了使民用炉灶能够使用颗粒型燃料, 政府推动了改灶节柴等工作, 但通过对改造出的节柴灶和炉具燃烧过程进行分析, 发现其热效率为 20% 左右, 且由于供风的不均性造成燃料的不完全燃烧以及烟气排放不达标, 同时存在着功能的单一性, 达不到多种炊事和供热水以及供暖同时进行<sup>[11-12]</sup>。市场上出现的炉灶主要是一些家庭小型用炉, 不能满足一些集体供餐单位对炊事强度以及对炉灶的功能的要求。因此, 本文拟设计一种既能满足集体供餐需要、保证多项炊事同时进行, 还能够兼顾供暖供热水的生物质颗粒炉灶, 并对其运行性能进行评估。

## 1 设计依据

### 1.1 生物质颗粒燃料燃烧特性

生物质炉灶的设计需要结合生物质燃烧特性。生物质颗粒燃烧机理的实质属于静态渗透压扩散燃烧<sup>[13-14]</sup>, 其燃烧过程可分为干燥脱水、挥发分析出燃烧、焦炭燃烧和燃尽 4 个阶段<sup>[15-17]</sup>: ①生物质颗粒在燃烧炉膛内, 随着温度的升高, 水分逐渐被蒸发。②燃烧室温度上升到 250℃ 左右时, 挥发分析出, 挥发物与氧气结合, 燃烧进入过渡区与扩散区。③渗透扩散燃烧, 焦炭的燃烧占主要地位, 在颗粒表面进行一氧化碳的燃烧, 燃烧持续稳定, 炉温较高。④燃尽的灰壳不断加厚, 可燃物基本燃尽, 形成整体的灰壳, 灰壳表面看不到火焰, 燃料变成暗红色, 燃烧过程结束<sup>[18-19]</sup>。试验所用的玉米秸秆颗粒燃料粒径 5 ~ 15 mm, 长度 20 ~ 30 mm, 密度 800 kg/m<sup>3</sup>, 工业分析和元素分析结果如表 1 所示。

### 1.2 生物质颗粒燃料炉灶设计原则

由于大多数集中供餐在炊事时均需要一次生火能把炒菜、煮饭以及用热水问题解决, 依据生物质颗粒燃料的燃烧基本特性, 炉灶的设计需满足以下原则: ①点火容易, 上火快, 燃烧稳定、完全, 火力足, 空气能均匀流畅地进入炉内, 不冒黑烟, 能源利用效率

表 1 生物质颗粒燃料工业分析与元素分析

Tab.1 Industrial and elemental analyses of biomass pellets

参数	数值
含水率 $M_{ar}/\%$	4.85
灰分质量分数 $A_{ar}/\%$	5.66
挥发分质量分数 $V_{del}/\%$	71.84
碳质量分数 $C_{ar}/\%$	43.21
氢质量分数 $H_{ar}/\%$	5.35
氧质量分数 $O_{ar}/\%$	37.85
氮质量分数 $N_{ar}/\%$	0.74
硫质量分数 $S_{ar}/\%$	0.12
热值 $q_{net, ar}/(kJ \cdot kg^{-1})$	14 654

高。②功能齐全, 结构简单, 使用方便, 成本低廉, 安全可靠, 实用耐用。③热效率高, 热性能稳定。

## 2 生物质颗粒直燃炉灶设计

### 2.1 整体结构

结合生物质颗粒燃料的燃烧特性以及炊事的需要, 设计的生物质颗粒直燃炉灶结构如图 1 所示, 主要由蒸发器、燃烧炉膛、一次和二次进风风机、三次补风机、观火孔、二次装料碳化仓等组成。

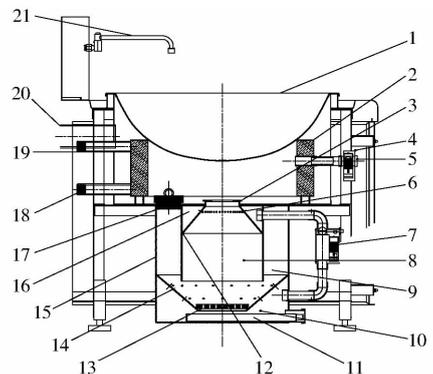


图 1 生物质颗粒直燃炉灶结构简图

Fig.1 Structural diagram of biomass multifunction stove

1. 锅 2. 蒸发器 3. 聚火口 4. 二号风机 5. 观火孔 6. 一次进风套 7. 一号风机 8. 炉膛 9. 辅料仓 10. 一次进风套容置腔 11. 抽屉式灰仓 12. 内炉膛 13. 炉篦 14. 二次进风套 15. 隔热层 16. 二次进风套容置腔 17. 进料口 18. 进水口 19. 蒸汽出口 20. 烟气出口 21. 转动式水龙头

该炉灶采用间歇进料, 燃料从聚火口以及辅料仓的进料口进料, 辅料仓的设计是确保满足炊事对燃料的需求, 当料仓的燃料不能满足炊事需要时, 可以通过辅料仓上的进料口进料, 燃料会逐渐滑入炉膛燃烧。同时炉膛燃烧时可以对辅料仓的燃料进行干燥及气化, 提高能量利用效率; 采用上点火方式, 颗粒从上往下燃烧; 灰室在炉膛的下部, 炉篦安装在抽屉式灰仓的上面; 在炉膛的正前方设有一号风机 (12 W), 可以通过调节风机上的控制旋钮, 来实现一次风和二次风的大小以及配比; 在出火口上方设

置了观火孔,观察燃烧过程中供风是否充足,并配有二号风机(12 W)来实现三次供风;在炉膛的上方设置了与锅底部紧密接触的支架式环形蒸发器,利用火焰以及烟气对蒸发器加热,水从下面的进水口进入蒸发器,蒸发器与炉灶外面的水位计相通,以确保进水量适中,燃烧过程中产生的高温蒸汽,从蒸发器上出口冒出,高温蒸汽用来蒸饭、煮粥以及供热水,实现了炒菜与蒸饭等同时进行,缩短了炊事时间,在蒸汽出口处设有蒸汽压力阀,当压力超过安全值,泄压装置自动泄压。该设备所有零部件采用模具来完成冲压、拉伸、材料自动剪切,自动卷圆焊接,炉具装配采用模块式和流水线装配工艺,保证了产品质量和外观的统一性。

## 2.2 炉膛设计

生物质颗粒燃料的燃烧特性要求确保供风的均匀性,故将炉膛的上下部分设计成锥形。炉膛的大小由炉膛的容积热负荷决定,炉膛的容积热负荷过大,则燃料在炉内停留的时间短,燃烧不充分;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。因炉具是为了满足集中供餐需要,所以燃料的消耗量取 9 kg/h,炉灶的热效率取 0.65,炉灶的容积热负荷一般在 250 ~ 400 W/m<sup>3</sup>,本设计容积热负荷取 380 kW/m<sup>3</sup>[20]。

炉膛容积为

$$V_L = \frac{mq_{net,ar}\eta_L}{q_{max}} \quad (1)$$

式中  $V_L$ ——炉膛容积, m<sup>3</sup>

$m$ ——炉具每小时燃料消耗量,取 9 kg/h

$\eta_L$ ——炉具热效率,取 0.65

$q_{max}$ ——燃烧室最大容积热负荷,取 380 kW/m<sup>3</sup>

由式(1)计算出炉膛容积  $V_L$  为 0.07 m<sup>3</sup>,符合生物质炉灶的炉膛容积范围[20]。

由于上进风套体积小,可以把整个炉膛看成由下圆台风套和上部圆柱形的炉膛组成,根据

$$V_L = \frac{1}{3}\pi h(R^2 + Rr + r^2) + \pi HR^2 \quad (2)$$

式中  $r$ ——一次进风套下半径,取 8 cm

$R$ ——一次进风套上半径,取 25 cm

$H$ ——炉膛高度,取 40 cm

$h$ ——一次进风套高度, cm

计算出一次进风套高度为 19 cm。

## 2.3 进风套设计

针对大多数生物质颗粒炉供风不足与不均匀性的问题,设计了高度为 19 cm,上圆半径为 25 cm 的非结构网格锥面进风套,如图 2 所示。

在同一水平面上,相隔相同的距离设有大小一

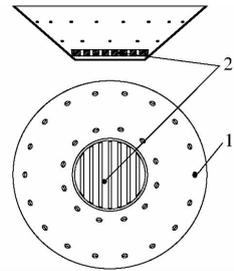


图 2 进风套结构图

Fig. 2 Structural diagram of air inlet sleeve

1. 进风孔 2. 炉篦

致的进风孔,一次进风和二次进风处都设置锥形进风套,这样风以旋转的方式通过进风孔进入炉体内,达到了每个进风孔通风量的均匀,从而保证了燃料燃烧的均匀。一次风与二次风的供给是通过 12 W 的风机来控制,它们之间的配比通过风机上的调节旋钮来控制。

## 2.4 吊火高度和聚火口设计

吊火高度指锅底与炉排之间的垂直距离。以燃烧火苗的高温区正达锅的底部为正合适,根据生物质颗粒燃料的燃烧特性,一般小型生物质炉的吊火高度在 28 ~ 30 cm[21],同时锅的尺寸会对吊火高度产生影响,本设计炉膛高度取 40 cm。由于选用燃料层燃的燃烧方式,会产生可燃性挥发性气体,本炉灶专门设计了喇叭形的聚火口(Φ14 cm),有利于聚集火焰,拔高了火苗的高度。

## 2.5 烟囱截面积计算

烟囱截面积为

$$F = \frac{mV_y(273 + T_y)}{3600 \times 273W_y} \quad (3)$$

式中  $F$ ——烟囱截面积, m<sup>2</sup>

$T_y$ ——烟气温度,取 200℃

$V_y$ ——每小时单位燃料烟气量,取 15 m<sup>3</sup>/kg

$W_y$ ——烟气流速,取 2 m/s

由式(3)计算可得  $F = 0.032$  m<sup>2</sup>,采用半径为 10 cm 的白铁皮烟囱。

## 2.6 烟囱高度的计算

烟囱高度为

$$H_1 = \frac{29.27h_1}{P \left( \frac{1}{273 + t_1} - \frac{1}{273 + t_2} \right)} \quad (4)$$

式中  $h_1$ ——炉具吸风压(9 ~ 24 Pa),取 24 Pa

$P$ ——平均大气压,当地实际大气压力,取  $1.01 \times 10^5$  Pa

$t_1$ ——年平均温度,取 20℃

$t_2$ ——烟囱烟气平均温度,取 200℃[24]

由式(4)可计算出烟囱高度  $H_1$  为 4.5 m。

### 3 生物质颗粒直燃炉灶性能试验

#### 3.1 试验依据

依据文献[22]对炉具的炊事热效率进行测试。炉具的烟气排放检测采用文献[23]的方法计算。整体试验数据采用在线仪表计量与现场计量。

#### 3.2 试验系统

采用的试验装置主要有炉灶主体(包括炉膛、蒸发器、烟道、风道等)、温度测试系统(包括温度计和热电偶)、烟气分析仪等测试系统。图 3 为测试样机。



图 3 测试样机

Fig. 3 Test prototype

#### 3.3 试验测试仪器

水桶 2 个,每个容量为  $0.01 \text{ m}^3$ ;台秤 1 台,测量范围  $0 \sim 10 \text{ kg}$ ;XK3190-A12E 型电子落地台秤,精度  $10 \text{ g}$ ;时钟 1 个,日差小于  $1 \text{ min}$ ;风速仪,测量范围  $0 \sim 10 \text{ m/s}$ ,精度为  $0.5 \text{ m/s}$ ;镍铬-镍硅 K 型热电偶,测温范围  $-200 \sim 1200^\circ\text{C}$ ,KM Quintox 9106 型烟气分析仪。

#### 3.4 试验条件和方法

试验在室内进行,环境温度为  $25^\circ\text{C}$  左右;相对湿度小于  $85\%$ ;室内风速小于  $1.0 \text{ m/s}$ ;测试工质为常温水;试验炉具远离其他热源;燃料为玉米秸秆成型燃料;引燃物为干燥的棉花秸秆。每次试验进行 3 次,求其平均值。

炊事火力强度为

$$P_c = \frac{CG_1(t_4 - t_3) + (G_1 - G_2)\gamma}{T_1} \quad (5)$$

式中  $P_c$ ——炊事火力强度, kW

$G_1$ ——锅内初始水质量, kg

$G_2$ ——试验结束时剩余水质量, kg

$t_3, t_4$ ——锅水初始温度和沸腾温度,  $^\circ\text{C}$

$\gamma$ ——平均蒸发温度下锅水汽化潜热,  $\text{kJ/kg}$

$C$ ——水的比热容,取  $4.18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$T_1$ ——试验时间, s

炊事热效率为

$$\eta_c = \frac{4.18G_1(t_4 - t_3) + (G_1 - G_2)\gamma}{BQ_{net, ar} + B_1Q_{net, ar1}} \times 100\% \quad (6)$$

式中  $\eta_c$ ——炊事效率, %

$B$ ——生物质燃料质量, kg

$Q_{net, ar}$ ——生物质燃料收到基低位发热量,  $\text{kJ/kg}$

$B_1$ ——自然风干引火柴质量, kg

$Q_{net, ar1}$ ——自然风干引火柴收到基低位发热量,  $\text{kJ/kg}$

综合热效率指炉灶输出的所有有效热与投入炉灶内生物质颗粒燃烧发热量的百分比。综合热效率为

$$\eta = \frac{4.18G_1(t_4 - t_3) + (G_1 - G_2)\gamma + Q_y}{BQ_{net, ar} + B_1Q_{net, ar1}} \times 100\% \quad (7)$$

其中  $Q_y = 4.18G_3(t_6 - t_5) + (G_3 - G_4)\gamma$  (8)

式中  $\eta$ ——综合热效率, %

$Q_y$ ——蒸发器热利用量, kJ

$G_3$ ——蒸发器水箱初始水质量, kg

$G_4$ ——试验结束蒸发器水箱内水剩余质量, kg

$t_5, t_6$ ——蒸发器水箱内水初始温度和试验结束后温度,  $^\circ\text{C}$

#### 3.5 结果与分析

生物质颗粒炉灶的性能试验数据如表 2 所示。

表 2 炉灶性能试验数据

Tab. 2 Data of stove performance test

参数	数值
燃料加入质量 $B/\text{kg}$	8.00
引火柴质量 $B_1/\text{kg}$	0.11
燃料低位热值 $Q_{net, ar}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	14 654
引火柴低位热值 $Q_{net, ar1}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	15 480
初始锅水质量 $G_1/\text{kg}$	21.5
试验结束锅水质量 $G_2/\text{kg}$	2.2
初始蒸发器水质量 $G_3/\text{kg}$	15.0
试验结束蒸发器水质量 $G_4/\text{kg}$	2.2
初始水温 $t_3/^\circ\text{C}$	16.5
沸腾温度 $t_4/^\circ\text{C}$	100.0
蒸发器初始水温 $t_5/^\circ\text{C}$	16.5
试验结束蒸发器水温 $t_6/^\circ\text{C}$	94
试验时间 $T_1/\text{s}$	3 600
汽化潜热 $\gamma/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	2 256

炉灶的热性能和烟气排放的试验结果如表 3 所示,该生物质颗粒直燃炉灶的炊事热效率达到  $42.9\%$ ,高于一般家用颗粒炊事炉的效率<sup>[24-25]</sup>,环形蒸发器的设计有效地利用外围火焰和烟气所携带的热量,提高了炉灶的综合热效率,达到  $70.7\%$ ,炊事火力强度  $14.1 \text{ kW}$ ,符合国家标准生物质炊事炉灶的热效率( $\geq 35\%$ )、炊事火力强度( $\geq 10 \text{ kW}$ )<sup>[26]</sup>

表3 炉灶热性能和烟气排放试验结果

Tab.3 Results of stove performance and flue gas emissions test

参数	数值	指标
炊事热效率/%	42.9	$\geq 35$ <sup>[26]</sup>
综合热效率/%	70.7	
炊事火力强度/kW	14.1	$\geq 10$ <sup>[26]</sup>
SO <sub>2</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	13.45	$\leq 30$ <sup>[26]</sup>
CO体积分数/%	0.087	$\leq 0.2$ <sup>[26]</sup>
NO质量浓度+NO <sub>2</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	103.27+4.11	$\leq 150$ <sup>[26]</sup>
林格曼黑度	<1	<1 <sup>[26]</sup>

的要求。排烟中 SO<sub>2</sub> 的平均质量浓度为 13.45 mg/m<sup>3</sup>, CO 的平均体积分数为 0.087%, NO 平均质量浓度为 103.27 mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>2</sub> 平均质量浓度为 4.11 mg/m<sup>3</sup>,

格林曼黑度小于 1。设计的直燃式颗粒炉灶的排放烟气指标均符合国家相关规定<sup>[23,26]</sup>, 具有较好的社会环境效益。

## 4 结论

(1) 生物质颗粒直燃炉灶的炊事热效率为 42.9%, 综合热效率为 70.7%, 炊事火力强度为 14.1 kW, 符合生物质炊事大灶的要求, 能够满足集中供餐用能的需要。

(2) 生物质颗粒直燃炉灶的排烟中 NO 的平均质量浓度为 103.27 mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>2</sub> 的平均质量浓度为 4.11 mg/m<sup>3</sup>, CO 的平均体积分数为 0.087%, SO<sub>2</sub> 的平均质量浓度为 13.45 mg/m<sup>3</sup>, 烟气格林曼黑度小于 1, 均符合炉灶的相关规定, 能够实现清洁燃烧。

## 参 考 文 献

- 1 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. 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. (in Chinese)
- 2 姚宗路, 吴同杰, 赵立欣, 等. 生物质成型燃料燃烧挥发性有机物排放特性试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 235-240. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151031&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151031&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.031. YAO Zonglu, WU Tongjie, ZHAO Lixin, et al. Emission characteristic of VOCs from biomass emission characteristic of VOCs from biomass molding fuel combustion[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 235-240. (in Chinese)
- 3 马常耕, 苏晓华. 生物质能源概述[J]. 世界林业研究, 2005, 18(6): 32-38. MA Changeng, SU Xiaohua. The review on issues of biomass quality energy[J]. World Forestry Research, 2005, 18(6): 32-38. (in Chinese)
- 4 刘圣勇, 王小二, 王森. 不同形态生物质燃烧技术现状与展望[J]. 农业工程技术: 新能源产业, 2007(4): 23-28. LIU Shengyong, WANG Xiao'er, WANG Sen. Current situation and prospect of combustion technologies for different form of biomass[J]. Agricultural Engineering Technology: New Energy Industry, 2007(4): 23-28. (in Chinese)
- 5 徐亚云, 田宜水, 赵立欣, 等. 不同农作物秸秆收储运模式成本和能耗比较[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 259-267. XU Yayun, TIAN Yishui, ZHAO Lixin, et al. Comparison on cost and energy consumption with different straw's collection-store-transportation modes[J]. Transactions of CSAE, 2014, 30(20): 259-267. (in Chinese)
- 6 陈树人, 段建, 姚勇, 等. 环模式成型机压缩水稻秆成型工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 32-41. CHEN Shuren, DUAN Jian, YAO Yong, et al. Optimization of technique parameters of annular mould briquetting machine for straw briquette compressing[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 32-41. (in Chinese)
- 7 徐广印, 沈胜强, 胡建军, 等. 秸秆冷态压缩成型微观结构变化的实验研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(3): 273-278. XU Guangyin, SHEN Shengqiang, HU Jianjun, et al. Experimental study on the microstructure changes of cold molding with straw[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(3): 273-278. (in Chinese)
- 8 朱金陵, 王志伟, 师新广, 等. 玉米秸秆成型燃料生命周期评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 262-266. ZHU Jinling, WANG Zhiwei, SHI Xinguang, et al. Life cycle assessment of corn straw pellet fuel[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 262-266. (in Chinese)
- 9 孙启新, 陈书法, 董玉平. 秸秆类生物质成型热黏塑性本构模型构建[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 221-226. SUN Qixin, CHEN Shufa, DONG Yuping. Establishment of thermo viscoplastic constitutive model for straw biomass briquetting[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 221-226 (in Chinese)
- 10 宁鹏辉. 环模式秸秆压机块致密成型机理研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2011. NING Penghui. Study on solidification mechanism of circular mould briquetting machine[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2011. (in Chinese)
- 11 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[J]. 可再生能源, 2010, 28(2): 118-122. 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. (in Chinese)

- 12 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.  
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(Supp.):516-520. (in Chinese)
- 13 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.  
MIN Haifei, ZHANG Mingxu. Study on combustion model and combustibility of biomass[J]. Journal of China Coal Society, 2005,30(1):104-108. (in Chinese)
- 14 刘敏敏. 生物质成型燃料炊事炉的设计与研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2008.  
LIU Minmin. Design and research for home-furnace of biomass briquette fuel[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2008. (in Chinese)
- 15 王翠萍,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):175-177.  
WANG Cuiping, LI Dingkai, Wang Fengyin, et al. Experimental study on the combustion characteristics of biomass pellets[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(10):175-177. (in Chinese)
- 16 刘圣勇,张百良,杨群发,等. 双层炉排生物质成型燃料锅炉设计与研究[J]. 农业工程学报,2003,19(6):268-271.  
LIU Shengyong, ZHANG Bailiang, YANG Qunfa, et al. Design and study of biomass briquette boiler[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(6):268-271. (in Chinese)
- 17 赵廷林,侯中兰,陈夫进,等. 生物质成型燃料炉具[J]. 可再生能源,2006(3):66-67.  
ZHAO Tinglin, HOU Zhonglan, CHEN Fujin, et al. Biomass pellet fueled stove[J]. Renewable Energy, 2006(3):66-67. (in Chinese)
- 18 张全国. 燃烧学[M]. 北京:中国农业出版社,2015.
- 19 马孝琴,李刚. 小型燃煤锅炉改造成秸秆成型燃料锅炉的前景分析[J]. 农村能源,2001(5):20-22.  
MA Xiaolin, LI Gang. Prospect analyse of reforming small-scale coal boiler to straw forming fuel boiler[J]. Rural Energy, 2001(5):20-22. (in Chinese)
- 20 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.  
SHU Wei. Study of high efficient biomass briquette fuel cookstove[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2007. (in Chinese)
- 21 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.
- 22 NB/T 34014—2013 生物质炊事大灶试验方法[S]. 2013.
- 23 GB13271—2014 锅炉大气污染物排放标准的计算方法[S]. 2014.
- 24 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.  
TAN Wenyong, XU Yong, WANG Shuyang, et al. Design and performance test of multi-function stove for biomass fuel[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15):10-17. (in Chinese)
- 25 石毅新,蒋蕪,彭才望. 小型生物质直燃炉结构设计[J]. 时代农机,2015(1):25-27.  
SHI Yixin, JIANG Pin, PENG Caiwang. A research on structure design of small biomass direct-fired stove [J]. Hunan Agricultural Machinery, 2015(1):25-27. (in Chinese)
- 26 NB/T 34015—2013 生物质炊事大灶通用技术条件[S]. 2013.

(上接第 147 页)

- 16 DONG Jinwei, XIAO Xiangming, MENARGUEZ M A, et al. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine[J]. Remote Sensing of Environment, 2016,185:142-154.
- 17 LIU Huiqing, HUETE A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995,33(2):457-465.
- 18 白亮亮,蔡甲冰,刘钰,等. 灌区种植结构时空变化及其与地下水相关性分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):202-211. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160929&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160929&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.029.  
BAI Liangliang, CAI Jiabing, LIU Yu, et al. Temporal and spatial variation of crop planting structure and ITS correlation analysis with groundwater in large irrigation area[J/OL]. Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):202-211. (in Chinese)
- 19 刘勇洪,牛铮. 基于 MODIS 遥感数据的宏观土地覆盖特征分类方法与精度分析研究[J]. 遥感技术与应用,2004,19(4):217-224.  
LIU Yonghong, NIU Zheng. Regional land cover image classification and accuracy evaluation using MODIS Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004,19(4):217-224. (in Chinese)
- 20 刘毅,杜培军,郑辉,等. 基于随机森林的国产小卫星遥感影像分类研究[J]. 测绘科学,2012,37(4):198-200.  
LIU Yi, DU Peijun, ZHENG Hui, et al. Classification of China small satellite remote sensing image based on random forests[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012,37(4):198-200. (in Chinese)