

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.017

# 抗结渣生物质固体颗粒燃料燃烧器研究\*

姚宗路 孟海波 田宜水 赵立欣 罗娟 孙丽英

(农业部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100125)

**【摘要】** 针对我国秸秆类生物质颗粒燃料灰含量高、灰熔点低而导致燃烧过程中易结渣、燃烧器易熄火、燃烧不稳定等问题,采用多级配风原理,设计出高效双层燃烧筒装置,实现三级配风,同时研究了螺旋清灰破渣机构,并在此基础上研制了生物质颗粒燃料燃烧器。采用玉米秸秆颗粒燃料和落叶松木质颗粒燃料进行了燃烧试验,试验结果表明,本燃烧器的多级配风结构和破渣清灰机构设计合理,燃烧效率达到91%,能够有效地将燃烧过程中产生的灰渣排出,结渣率明显下降,实现了连续稳定燃烧。与瑞典PX-20型燃烧器相比,以玉米秸秆颗粒为燃料时,本燃烧器燃烧效率提高了9%、结渣率降低了25.94%,燃料适应性广。

**关键词:** 生物质能 颗粒燃料 燃烧器 秸秆 设计 试验

中图分类号: S216 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)11-0089-05

## Design and Experiment on Anti-slagging Biomass Pellet Fuel Burner

Yao Zonglu Meng Haibo Tian Yishui Zhao Lixin Luo Juan Sun Liying

(Institute of Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China)

### Abstract

A new burner, named PB-20 biomass pellet fuel burner, was developed at the Chinese Academy of Agricultural Engineering to solve the problem of easy flameout and slagging of burner during pellet combustion as there were higher ash and lower ash melting temperature in the pellet made of crop straw in China. The double combustion cylinder efficient device which adopted multi-level wind principles, a helix device breaking slagging and cleaning ash were designed. Combustion experiment with the corn straw pellet fuel and larch wood pellet was conducted after this pellet burner was made. The results showed the burner worked well and the ash and slagging were expelled because of double combustion cylinder efficient and helix device. The slagging rate is 23% and the combustion efficiency is up to 91%. The slagging rate of PB-20 biomass pellet fuel burner decreased by 25.94% and combustion efficiency increased by 9% compared with burner made from Sweden.

**Key words** Biomass energy, Pellet fuel, Burner, Crop straw, Design, Experiment

### 引言

生物质颗粒燃料是一种典型的生物质固体成型燃料,具有高效、洁净、容易点火、CO<sub>2</sub>近零排放等优点,可替代煤炭等化石燃料应用于炊事、供暖等民用领域和锅炉燃烧、发电等工业领域,近几年来在欧盟、北美、中国得到了迅速发展<sup>[1-3]</sup>。生物质颗粒燃

料另一优点是能够应用于小型生物质锅炉、热风炉、采暖炉中,通过采用颗粒燃料燃烧器实现自动控制以及连续自动燃烧<sup>[4-5]</sup>。

经过多年的研究,生物质颗粒燃烧器已经得到了迅速发展,尤其是在瑞典,仅2006年生物质颗粒燃烧器(<25 kW)年销售量达到32 000台<sup>[6]</sup>。根据进料方式不同,燃烧器可分为3种类型:上进料式、

收稿日期: 2010-04-27 修回日期: 2010-05-04

\* 农业部引进国际先进农业科学技术项目(2008G2)

作者简介: 姚宗路,工程师,博士,主要从事生物质能技术与设备开发与利用研究, E-mail: yaozonglu@163.com

通讯作者: 田宜水,高级工程师,主要从事节能、可再生能源技术和设备开发与推广研究, E-mail: yishuit@yahoo.com

下进料式、水平进料式,目前欧洲市场上多采用上进料式颗粒燃烧器<sup>[7~8]</sup>。这些燃烧器主要采用木质颗粒作为燃料,木质颗粒具有热值高、灰分低、灰熔点较高,燃烧后不易结渣等优点,因此国外燃烧器在设计方面没有专门的破渣、清灰机构,多采用人工清灰,间隔在1~2周<sup>[9~10]</sup>。近年来我国在生物质燃气燃烧器方面进行了一些研究<sup>[11]</sup>,但在生物质固体成型燃料燃烧器方面的研究较少,同时由于我国的生物质成型燃料以农作物秸秆为主,与木质颗粒燃料相比,秸秆类颗粒燃料中的灰分高、灰熔点低、碱金属含量较高,燃烧过程中易出现结渣、碱金属及氯腐蚀、设备内积灰严重等问题<sup>[12~13]</sup>,试验表明国外的燃烧器不适合我国的秸秆类生物质颗粒燃料。

因此本文针对秸秆类生物质颗粒燃料的特性,采用多级配风原理,设计出高效双层燃烧筒装置,实现三级配风,同时研究螺旋清灰破渣装置,并在此基础上设计生物质颗粒燃料燃烧器,并分别采用秸秆颗粒燃料和木质颗粒燃料进行相关燃烧试验,并与瑞典的PX-20型上进料式燃烧器进行对比试验。

## 1 工作原理与整机结构

PB-20型生物质固体颗粒燃料燃烧器主要应用秸秆类生物质颗粒燃料,采用多级配风原理,设计出高效双层燃烧筒装置,实现三级配风,以保证颗粒燃料的充分燃烧;同时,在燃烧室内设有螺旋清灰破渣装置,由燃料推进螺旋、燃烧搅动螺旋和灰渣排出螺旋3部分组成。

工作时,生物质颗粒从落料管进入燃烧内筒之后,在燃料推进螺旋的作用下,快速、平稳的推进到燃烧室,即燃烧内筒中间位置。在颗粒燃料燃烧过程中,燃烧搅动螺旋能够将燃烧的燃料搅动,有效防止燃料结渣。整机结构如图1所示,主要由落料管6、清灰破渣装置2、燃烧内筒3、外筒4、电动机10、风机9、自动控制装置8等部分组成。

燃烧过程中,颗粒燃料从落料口进入到高效双层燃烧筒装置,该装置由燃烧内筒、燃烧外筒组成,通过风机,实现三级配风:一次空气和自动点火所需的热空气由燃烧内筒后端直接进入,二次空气通过双层套筒夹层预热后由燃烧内筒壁上的小孔进入,燃烧室顶端设有配风孔,作为三次风。螺旋清灰破渣装置安装在燃烧内筒中,通过电动机带动,转速可调,在颗粒燃料燃烧过程中,颗粒燃料通过螺旋装置向前输送,同时燃烧后的灰分、灰渣由螺旋推出。

该燃烧器采用电阻丝加热点火,不仅能够用于木质颗粒燃料,而且能够应用玉米、小麦、棉花、水稻等秸秆类颗粒燃料,外形尺寸(长×宽×高)

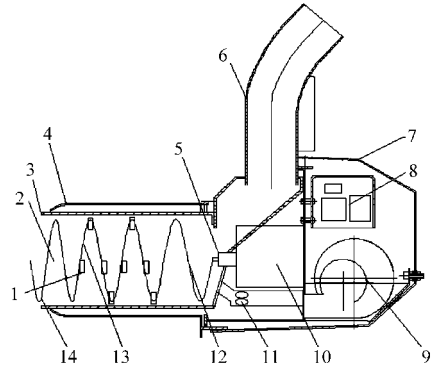


图1 PB-20型生物质颗粒燃料高效燃烧器结构简图

Fig.1 Schematic diagram of PB-20 biomass pellet fuel burner

1. 破渣齿 2. 清灰破渣装置 3. 燃烧内筒 4. 燃烧外筒 5. 活动接口 6. 落料管 7. 外壳 8. 自动控制装置 9. 风机 10. 电动机 11. 点火装置 12. 燃料推进螺旋 13. 燃烧搅动螺旋 14. 灰渣排出螺旋

525 mm × 285 mm × 520 mm, 额定功率 20 ~ 35 kW, 燃烧效率大于 90%, 螺旋清灰破渣装置电动机功率 15 W, 风机功率 30 W, 结构质量 15 kg。

## 2 关键部件的设计

### 2.1 清灰破渣装置

为解决秸秆类生物质颗粒燃料燃烧后灰分多、易结渣等问题,在燃烧室内安装了螺旋清灰破渣装置,如图2所示,由燃料推进螺旋、燃烧搅动螺旋和灰渣排出螺旋3部分组成,另外燃烧搅动螺旋上安装破渣齿,破渣齿上有锋利的锯齿,既防止螺旋上结渣,又防止燃烧内筒上结渣。

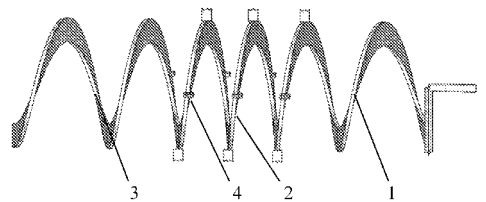


图2 燃烧器螺旋清灰破渣装置

Fig.2 Schematic diagram of helix device breaking slagging and cleaning ash

1. 推进螺旋 2. 搅动螺旋 3. 灰渣排出螺旋 4. 破渣齿

螺旋清灰破渣装置安装在燃烧内筒中,在整个输送长度的任一对应点都产生相同的轴向推力和离心力,其形式类似于弹簧螺旋输送机。螺旋清灰破渣装置的转速对物料的输送、燃烧、灰渣的排出有较大的影响,速度过大,导致燃烧不充分,过小将导致灰渣堆积在燃烧筒内,影响燃烧性能。该螺旋装置输送能力为<sup>[14]</sup>

$$Q = 0.06\pi rKnS \left[ \left( \frac{D_1}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_0}{2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中  $Q$ ——输送能力, kg/h  
 $r$ ——颗粒密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$        $K$ ——系数  
 $n$ ——螺旋转速,  $\text{r}/\text{min}$   
 $S$ ——螺旋螺距,  $\text{cm}$        $D_0$ ——螺旋内径,  $\text{cm}$   
 $D_1$ ——螺旋外径,  $\text{cm}$

不同种类的秸秆颗粒燃料燃烧后产生的灰分、灰渣差异较大, 试验表明, 每千克玉米秸秆颗粒燃料燃烧后的灰渣量为 65 ~ 250 g、小麦为 68 ~ 180 g、棉秆为 216.2 ~ 430 g、红松为 50.9 ~ 135 g, 该燃烧器设计的最大进料量为 10 kg/h, 由于燃烧过程中, 存在于燃烧器内筒中是灰渣与未燃尽燃料的混合物, 因此, 燃烧器运行时, 清灰破渣装置的输送能力应在 0.65 ~ 12 kg/h 之间。

颗粒密度能够影响燃烧特性, 颗粒密度越大, 燃烧持续时间越长, 不同种类的秸秆颗粒燃料的密度差异较大, 而且不同批次的燃料, 其密度也存在差异。一般在 1 ~ 1.3  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

不同用途的弹簧螺旋系数  $K$  不同, 垂直和倾斜输送时  $K = 0.8$ , 水平输送时  $K = 1.6 \sim 1.8$ , 本装置中取  $K = 1.7$ 。

在燃烧内筒中螺旋清灰破渣装置的直径越大, 越容易将燃烧后的灰渣排出, 对燃烧器的进风影响越小, 燃烧器内筒直径为 125 mm, 考虑到螺旋的安装空间以及加工精度, 本螺旋的直径为 120 mm。

螺旋装置的转速与其直径、螺距有关, 螺旋螺距越大, 燃料、灰渣的输入速度越快, 为保证颗粒燃料的快速输送、燃烧充分以及燃烧后灰渣的快速排出, 燃料推进螺旋、搅动螺旋、灰渣排出螺旋的螺距分别为 7.5、6.0、9.0 cm。

将各参数代入式(1)可得螺旋转速与螺距的关系, 如表 1 所示。

表 1 螺旋转速与螺距的对应关系

Tab. 1 Corresponding relations of speed and screw pitch

颗粒密度 $r/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	螺距 $S/\text{cm}$	转速 $n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$
1.0	6.0	0.58
	7.5	0.46
	9.0	0.39
1.2	6.0	0.48
	7.5	0.39
	9.0	0.32
1.3	6.0	0.45
	7.5	0.36
	9.0	0.30

由此可见, 由于燃烧过程中螺旋的输送量比较小, 螺旋的转速较低。虽然燃料推进螺旋、搅动螺

旋、灰渣排出螺旋 3 部分螺距不同, 但 3 部分螺旋同轴, 转速相同, 根据以上分析, 设计螺旋的转速为 0.5  $\text{r}/\text{min}$ , 即可满足要求。

螺旋清灰破渣的电机为齿轮减速电动机, 功率为 15 W, 电压为 220 V, 固定转速为 7  $\text{r}/\text{min}$ , 额定转矩为 1.18  $\text{kg}\cdot\text{cm}$ , 配上调速装置, 电动机的输出转速可在 0 ~ 7  $\text{r}/\text{min}$  之间无极变速。

螺旋清灰破渣装置需要在高温下工作, 因此材质选择耐热不锈钢, 并进行了相关调质处理, 耐高温达到 1 200℃ 以上。

## 2.2 双层燃烧筒

针对秸秆颗粒燃料挥发份高的特性, 本燃烧器的燃烧筒采用多级配风原理, 设计了双层燃烧筒结构, 如图 3 所示, 由燃烧内筒和燃烧外筒组成。燃烧外筒套在内筒上, 有 3 ~ 5 mm 间隙, 但在燃烧外筒最外端有倒角, 与内筒紧密连接, 也保证配风从燃烧内筒的进风口进入, 同时也能预热二次风。其中在燃烧内筒后端、低端和圆筒周围开有不同的进风孔。

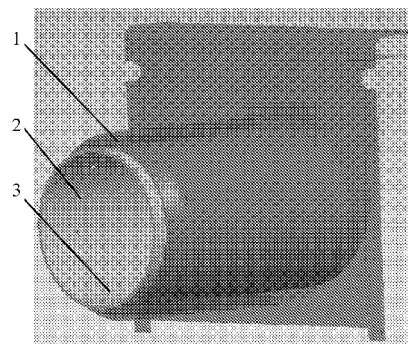


图 3 燃烧器双层燃烧筒

Fig. 3 Double combustion cylinder efficient device

1. 燃烧外筒 2. 燃烧内筒 3. 进风孔

在燃烧内筒的后端开有一排进风孔, 截面形状是 5 mm × 10 mm 的方孔, 能够提供自动点火时所需要的热空气, 同时也提供一次进风, 与挥发份发生反应。在燃烧内筒低端开有 6 列进风孔, 间隔为 25 mm, 其中每列 5 个进风口, 间隔为 20 mm, 二次空气通过双层套筒夹层预热后由这些小孔进入, 与燃料中析出的挥发分、未燃尽的固定碳等发生燃烧反应。在燃烧筒前端设有配风孔, 呈圆周排料, 作为三次风与挥发份充分混合在燃烧筒外燃烧, 从而提高燃烧效率。

## 2.3 其他部件

燃烧器的进料采用螺旋输送原理, 设计了可调式进料装置, 通过料仓能够将颗粒燃料平稳地输送到燃烧器的落料口, 然后进入燃烧内筒。

燃烧器采用离心式风机, 具有工作可靠、运转平

稳、噪音小、操作简单等特点。采用电阻丝加热点火。同时,初步设计了进料量、燃烧温度以及进风量等的自动控制系统,能够根据不同的进料量、燃烧温度来控制进风量。

### 3 燃烧试验

#### 3.1 试验材料

样机制造后,在北京大兴区进行了燃烧试验。

表2 试验生物质颗粒燃料特性

Tab.2 Physical characterization of biomass pellets

燃料 类型	颗粒密度 /g·cm <sup>-3</sup>	机械耐 久性/%	全水分 /%	挥发份 /%	灰分 /%	低位发热量 /MJ·kg <sup>-1</sup>	软化温 度/°C	元素分析/%			
								C <sub>ad</sub>	H <sub>ad</sub>	N <sub>ad</sub>	S <sub>ad</sub>
玉米秸秆颗粒	1.2	97.5	10.2	63.79	18.45	13.01	1 167	44.92	5.77	0.98	0.21
落叶松木质颗粒	1.18	97.5	7.63	85.55	1.01	16.83	1 332	48.89	6.19	0.12	0.09

#### 3.2 试验方法

由于目前没有燃烧器的检测标准,因此测试燃烧器的相关参数时,将其安装热水锅炉中,然后进行测试。本试验是将燃烧器安装在功率20 kW的生物质颗粒锅炉中,测试内容包括燃烧效率、污染物排放、底灰结渣率以及燃烧后的清渣情况、正常运行时间等,测试标准参考GB/T10180—2003《工业锅炉热工性能试验规程》。燃烧效率:通过测试进出水温度、进料量、热值以及测试燃烧后灰渣可燃物含量和烟气中一氧化碳的含量等进行正平衡、反平衡两种方法计算。污染物排放特性:采用综合烟气分析仪(KM9106)对烟气进行实时分析和记录,烟气的采样点在距烟囱与热水锅炉相接2倍烟囱直径处。底灰结渣率:燃烧器停止后,冷却,将燃烧内筒内底灰全部取出,称质量并记为 $m_1$ ,筛分灰渣中粒度大于6 mm的渣块,称质量并记为 $m_2$ ,则粒度大于6 mm的渣块占总灰渣质量的百分数,称为该试样的底灰结渣质量率 $C$ ,即 $C = m_2/m_1 \times 100\%$ 。清渣情况:燃烧后,将燃烧筒内的灰渣清出、称量。

试验仪器主要包括数字温度表、流量计、KM9106型综合烟气分析仪、GJ-2密封式化验制样粉碎机、XL-1箱型高温炉、101-1A型电热鼓风干燥箱、ZDHW-5型微机全自动量热仪、Vario EL元素分析仪、VISTA-MPX型等离子发射光谱仪、BSA223S-CW型分析天平、PL2002型电子天平、SZ11-4型往复式自动振筛机等。

### 3.3 结果与分析

#### 3.3.1 PB-20型燃烧器性能测试

按照试验要求,该生物质颗粒燃烧器在匹配生物质热水锅炉,使用玉米秸秆颗粒为燃料,正常运行3 h后,进行测试相关参数。

所用生物质颗粒燃料为玉米秸秆颗粒燃料和落叶松木质颗粒燃料,在大兴礼贤生物质颗粒燃料公司生产,由农业部规划设计研究院研制的485型生物质颗粒燃料成型机压制成圆柱型颗粒燃料,直径8 mm,长度10~30 mm,为保证进料均匀,颗粒燃料处理为长度15 mm左右,采用螺旋上料机均匀进料,进料量为6.67 kg/h。两种颗粒燃料收到基的主要特性如表2所示。

燃烧过程中发现,螺旋清灰破渣装置能够平稳地将颗粒燃料推送到燃烧室,且能够有效地排出燃烧后的灰分和灰渣,在燃烧室中未发现灰分、灰渣堆积现象,保证了燃烧器的连续稳定运行。

额定负荷下,该燃烧器的正平衡热效率为83.07%,反平衡热效率为84.84%,平均热效率达83.9%,经折算,该燃烧器燃烧效率为91%。结果表明该燃烧器设计的多级配风机构能够改善颗粒燃料燃烧质量,保证充分燃烧。此外,该燃烧器在燃烧过程中的污染物排放量较低,在标态下NO<sub>x</sub>的排放量为74 mg/m<sup>3</sup>,SO<sub>2</sub>排放浓度小于1 mg/m<sup>3</sup>,烟尘排放浓度为40 mg/m<sup>3</sup>,林格曼黑度小于1级,污染物排放符合国家标准。这表明在燃烧过程中,该燃烧器的多级配风结构以及螺旋清灰破渣装置能够使颗粒燃料与空气充分混合,使燃烧更加充分,提高了燃烧效率。

燃烧后将灰渣全部取出,称量、筛分、再称量,经计算,底灰结渣率为23%,结果表明在燃烧过程中,螺旋清灰破渣装置的搅动,不仅能提高燃烧效率,同时也能够降低燃烧过程中的结渣量。

#### 3.3.2 两种燃烧器对比试验

试验中采用玉米秸秆颗粒燃料和落叶松木质颗粒燃料,与瑞典的PX-20型上进料式燃烧器进行了对比试验,测试结果如表3所示。

在燃用落叶松木质颗粒燃料时,由于该木质颗粒燃料灰含量低、灰熔点高,燃烧过程中无结渣现象、灰分较少,使用两种燃烧器燃烧时底灰结渣率均为零,燃烧效率都在90%以上,均能够连续稳定运行。

在燃用玉米秸秆颗粒燃料时,由于秸秆类颗粒燃料灰含量高、灰熔点低,燃烧后结渣严重、灰分较

表 3 两种燃烧器燃烧测试对比  
Tab.3 Combustion test of two biomass burners

燃烧器类型	燃料类型	燃烧效率/%	底灰结渣率/%	清灰破渣情况	运行时间
PB-20 型燃烧器	玉米秸秆	91	23	能有效清灰破渣	连续稳定运行
	落叶松	90 以上	0	能有效清灰	连续稳定运行
PX-20 型燃烧器	玉米秸秆	82	48.94	无法清灰破渣	正常运行 15~20 min, 自动熄火
	落叶松	90 以上	0	能有效清灰	连续稳定运行

高, PX-20 型燃烧器由于无清灰装置以及配风不完善等问题, 正常运行 15~20 min 后, 由于燃烧室内的灰渣较多, 燃烧器自动停止工作。在正常运行期间, 测试的燃烧效率为 82%, 底灰结渣率为 48.94%。PB-20 型燃烧器, 由于采用螺旋清灰破渣装置, 能够有效地清理灰渣, 保证了连续稳定运行, 在燃烧过程中, 未出现自动熄火现象。另外由于螺旋清灰破渣装置的搅动以及多级配风机构, 燃烧后底灰结渣率比 PX-20 型燃烧器有明显降低, 燃烧效率也明显提高。

结果表明, 瑞典 PX-20 型燃烧器是针对灰含量低、灰熔点高的木质颗粒燃料设计的, 并不适应灰含量高、灰熔点低的秸秆类颗粒燃料。

## 4 结论

(1) PB-20 型生物质固体颗粒燃料燃烧器采

用高效双层燃烧筒和螺旋清灰破渣装置, 实现了三级配风, 提高了燃烧效率, 燃烧过程中能够有效将灰渣排出, 实现了连续稳定燃烧, 解决了秸秆颗粒燃料由于灰含量高、灰熔点低导致燃烧过程中易结渣, 燃烧器易熄火、燃烧性能差等问题。

(2) 试验结果表明, 该燃烧器采用玉米颗粒燃料, 燃烧效率达到 91%, 结渣率为 23%, 污染物排放能够满足国家标准要求。与瑞典 PX-20 型燃烧器相比, 两种燃烧器都能应用于木质颗粒燃料, 但以玉米秸秆颗粒为燃料时, 本燃烧器燃烧效率提高了 9%, 燃烧后底灰结渣率明显降低了 25.94%, 燃料适应性更广泛。

(3) 本燃烧器能够与热风炉、采暖锅炉等设备匹配, 应用木质颗粒燃料和秸秆类颗粒燃料, 满足供热采暖等需求, 有利于促进我国生物质固体成型燃料的产业化发展。

## 参 考 文 献

- 王久臣, 戴林, 田宜水, 等. 中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 276~282.  
Wang Jiuchen, Dai Lin, Tian Yishui, et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 276~282. (in Chinese)
- 吴创之, 周肇秋, 阴秀丽, 等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 91~99.  
Wu Chuangzhi, Zhou Zhaoqiu, Yin Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 91~99. (in Chinese)
- European Commission. Energy for the future: renewable sources of energy [R]. White Paper for a Community Strategy and Action Plan, COM(97) 599 Final, 1997.
- 田宜水. 生物质固体成型燃料产业发展现状与展望[J]. 农业工程技术·新能源产业, 2009(3): 20~26.
- Frank Fiedler. The state of the art of small-scale pellet-based heating system and relevant regulations in Swede, Austria and Germany [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2004, 8(3): 201~221.
- Jonas Höglund. The Swedish fuel pellets industry: production, market and standardization [R]. Swedish University of Agricultural Sciences, Examarbete Nr 14, 2008.
- Haslingerx W, Friedlx G, Wopienkax E, et al. Small-scale pellet combustion technology: state of the art, recent development, improvements and challenges for the future [C] // Proceedings of the 14th European Biomass Conference, Paris, France, 2005.
- David E, Marie R, Jessica S, et al. Optimization of efficiency and emissions in pellet burners [J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27(6): 541~546.
- 罗娟, 侯书林, 赵立欣, 等. 生物质颗粒燃料燃烧设备的研究进展 [J]. 可再生能源, 2009(6): 90~95.  
Luo Juan, Hou Shulin, Zhao Lixin, et al. The research progress of pellet burning equipments [J]. Renewable Energy Resources, 2009(6): 90~95. (in Chinese)

- Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2006, 6(1): 429 ~ 436. (in Chinese)
- 2 袁越锦,徐英英,党新安,等. 板栗脱壳技术与破壳机理研究现状及发展趋势[J]. 食品工业科技, 2008,29(10):301 ~ 305.  
Yuan Yuejin, Xu Yingying, Dang Xin'an, et al. Current situation and development trend of chestnut shelled technology and cracked mechanism [J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(10): 301 ~ 305. (in Chinese)
  - 3 伍冬生,任奕林,廖庆喜,等. 碱液脱板栗涩皮的试验研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(5): 118 ~ 119.
  - 4 Kim J H, Park J B, Choi C H. Development of chestnut peeling machine[J]. Korean Soc. Agric. Machinery, 1997,22(3): 289 ~ 294.
  - 5 党新安,张昌松,葛正浩. 板栗真空爆壳技术与设备的研究[J]. 轻工机械, 2001(2): 19 ~ 21.  
Dang Xin'an, Zhang Changsong, Ge Zhenghao. Study of technology and equipment on the vacuum burst opening of the Chinese chestnut shell[J]. Light Industry Machinery, 2001(2): 19 ~ 21. (in Chinese)
  - 6 Hwang J Y, Hwang I K, Park J B. Analysis of physicochemical factors related to the automatic pellicle removal in Korean chestnut (*Castanea crenata*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(12): 6 045 ~ 6 049.
  - 7 Moreira R, Chenlo F, Chaguri L, et al. Mathematical modelling of the drying kinetics of chestnut (*Castanea sativa* mill) influence of the natural shells [J]. Food and Bioproducts Processing, 2005, 83(4): 306 ~ 314.
  - 8 王武,张莉,方红美,等. 预设应力对板栗微波爆壳的影响研究[J]. 食品科学, 2005, 26(9): 333 ~ 336.  
Wang Wu,Zhang Li, Fang Hongmei, et al. Study on technology of microwave shelling of cut Chinese chestnut [J]. Food Science, 2005, 26(9): 333 ~ 336. (in Chinese)
  - 9 Gao Zhenjiang, Lin Hai, Xiao Hongwei. Air-impingement de-shelling of chestnuts (*C. mollissima*): process parameter optimization[J]. International Journal of Food Engineering, 2008, 4(2): 15 ~ 16.
  - 10 张荣荣,李小昱,王为,等. 基于有限元方法的板栗破壳力学特性分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 84 ~ 88.  
Zhang Rongrong, Li Xiaoyu, Wang Wei, et al. Analysis of mechanical properties of Chinese chestnut cracking based on the FEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9): 84 ~ 88. (in Chinese)
  - 11 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
  - 12 郑传祥. 板栗干燥特性试验研究[J]. 食品工业科技, 2000,21(5): 8 ~ 10.
- 

(上接第 93 页)

- 10 Verma V K, Bram S, De Ruyck J. Small scale biomass heating systems: standards, quality labeling and market driving factors—an EU outlook[J]. Biomass & Bioenergy, 2009, 33(10): 1 393 ~ 1 402.
- 11 李刚,杨群发,炊密杏,等. BCT-1 型生物质燃气燃烧器的研制[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 107 ~ 109.  
Li Gang, Yang Qunfa, Chui Mixing, et al. Research and development of the BCT-1 biomass gas burner[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 107 ~ 109. (in Chinese)
- 12 袁艳文,林聪,赵立欣,等. 生物质固体成型燃料抗结渣研究进展[J]. 可再生能源, 2009(5): 54 ~ 57.  
Yuan Yanwen, Lin Cong, Zhao Lixin, et al. The research process of anti-slagging for biomass pellet fuel[J]. Renewable Energy Resources, 2009(5): 54 ~ 57. (in Chinese)
- 13 白红春,孙清,周鹏,等. 碱处理水稻秆对成型工艺的影响分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 121 ~ 124.  
Bai Hongchun, Sun Qing, Zhou Peng, et al. Effect of alkali treatment on straw forming technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 121 ~ 124. (in Chinese)
- 14 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:机械工业出版社, 1988: 185 ~ 190.