

生物质颗粒燃料炊事炉的性能

范欣欣¹, 吕子安², 李定凯², 于晓丽¹

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 2. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 生物质颗粒燃料作为一种清洁燃料, 需要设计能使其高效、清洁燃烧的特殊炉具。该文介绍了 3 种生物质颗粒燃料炊事炉原始样炉的热效率、燃烧特性、烟气中污染物浓度等测量结果。试验过程中以玉米秸秆颗粒为生物质颗粒燃料, 并参照国家标准 GB4363—1984《民用柴炉、柴灶热性能测试方法》, 采用烧水试验方法。试验结果显示: 这 3 种炊事炉都可以清洁地燃烧用农业、林业固体剩余物制成的颗粒燃料; 其中带有微型风机供风的炊事炉根据试验结果改进后的产品炉的热性能和大气污染物排放水平均满足北京市地方标准 DB11/T 540—2008《户用生物质炉具通用技术条件》规定的指标和限值。

关键词: 生物质, 燃料, 燃烧, 炊事炉, 热效率, 污染物排放

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.02.048

中图分类号: TK6, S210.43

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-02-0280-05

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.

Fan Xinxin, Lü Zi'an, Li Dingkai, et al. Performance of cooking stoves with biomass pellet fuel[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 280—284. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

目前, 生物质燃料的开发利用已成为世界各国的研究热点。美、日、欧等发达国家和地区已采取措施, 加大利用这些资源, 获得了良好的社会效益和经济效益^[1]。而中国开发先进且实用的技术来利用农林固体生物质燃料资源还刚刚起步, 技术、政策和市场机制还不完善^[2]。

用农林固体剩余物制成的生物质颗粒燃料是一种清洁燃料, 其挥发分质量分数约占 70%, 灰熔点较低, 燃烧特性与煤迥异^[3], 需要用专门设计的燃烧炉具才能使颗粒燃料高效、清洁地燃烧。清华大学与有关公司合作开发出了 3 种燃烧颗粒燃料炊事炉的原始样炉。国内外描述生物质颗粒燃料^[4-5]炊事炉性能的资料难以得到, 可借鉴参考的炉具性能的试验数据更少。对于曾大力推广的节能柴灶, 其热效率为 20%左右, 但节能柴灶所用燃料为原始秸秆等薪柴, 要求柴草要干, 粗细适中^[6]。原始柴灶的热效率更低, 仅 9%左右^[7]。本文中 3 种炉具点火容易、操作简便、火力强度大且易控制, 比燃煤炉具干净, 比燃烧低热值生物质燃气的炉具安全^[8]。这就可以为农村地区提供一种环保、经济、安全的炊事用能方式。为了全面评价这 3 种不同型号的生物质颗粒燃料炊事炉的性能, 笔者对其做了性能测试和分析, 并根据试验结果对炉具进行改进和完善, 以满足市场的需要。

1 仪器、材料和方法

1.1 仪器设备参数

本试验所用主要仪器的详细参数见表 1, 所测 3 种生

物质颗粒燃料炊事炉设计参数及相关特点见表 2 及图 1。

表 1 试验仪器用途和主要参数列表

Table 1 Application of the testing instrument and list of the main parameters

仪器名称	用途	主要参数
电子台秤	测量给料量	测量范围 0~10 kg, 感量 5 g
水银温度计	测量锅水温度	精确到 0.1℃ 量程: 0~50℃与 50~100℃
热电偶	测量排烟温度	量程 0~1200℃, 精度 1℃
烟气成分分析仪	烟气排放测试	O ₂ % 0~25
		CO ×10 ⁻⁶ 0~20 000
		NO _x ×10 ⁻⁶ 0~5 000
		烟气温度 ℃ 0~1 150
		环境温度 ℃ 0~100

表 2 3 种炊事炉的设计特点

Table 2 Design feature of the three types of cooking stoves

炉具	用途	给料方式	设计装料量/kg	供风机功率/W	特 点
一号炊事炉	户用炊事	一次性加料	1.5	6	1 次装料, 够 4 口之家做 1 顿正餐, 配微型风机, 点火方便, 上火快, 火头可控, 烟气清洁, 重量轻
二号炊事炉	户用炊事	一次性加料	1.5	无	1 次装料, 够 4 口之家做 1 顿正餐, 自然通风, 需配烟囱, 炉内带一蓄热胆
三号炊事炉	餐馆炊事	设置料斗, 重力续料	1.5	无	炉外围带水套、小料斗, 可间隔添料, 连续使用, 需配烟囱, 炉膛较前两种炊事炉均大

收稿日期: 2009-04-14 修订日期: 2009-05-14

作者简介: 范欣欣 (1984—), 女, 北京人, 主要从事燃烧学的研究。北京清华大学核能与新能源技术研究院, 100084。Email: fxxwx32@gmail.com

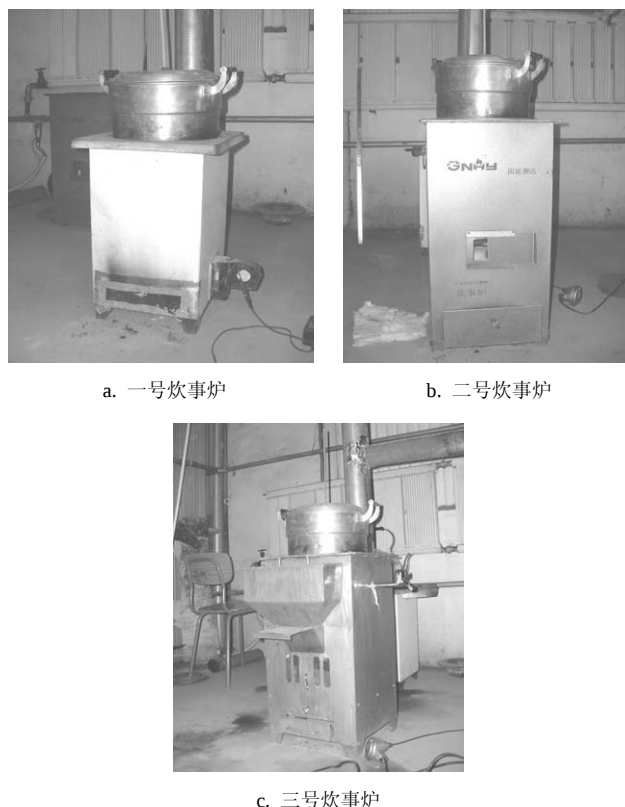


图 1 炊事炉外貌

Fig.1 Appearance of cooking stoves

1.2 测试方法

参照国家标准 GB4363—1984《民用柴炉、柴灶热性能测试方法》^[9]，采用烧水试验方法，并重复试验至两次结果相差小于或等于标准值（3%），取其平均。通过燃烧给定数量的燃料，对定量水（约 6.0 kg）加热，使之升温、蒸发，获得炉灶的热性能参数。其他所需相关试验参照的标准见表 3。试验所用燃料为秸秆颗粒燃料^[10-13]。对 3 台炊事炉的热效率、升温速度、蒸发速度、回升速度等热性能参数，燃烧性能以及污染物排放情况进行测试，以掌握炉具的性能和提出进一步优化改进的措施。

表 3 试验采用的相关标准

Table 3 Interrelated standard in the experiment

试验内容	测试方法
炊事炉热性能测试试验	GB4363—1984《民用柴炉、柴灶热性能测试方法》
生物质颗粒燃料和灰渣的工业分析	GB/T212—2001《煤的工业分析方法》
生物质颗粒燃料的元素分析	《锅炉原理及计算》冯俊凯、沈幼庭主编
生物质颗粒燃料的发热量测定	GB5186—1985《生物质燃料发热量测试方法》
烟尘浓度测试	GB9079—1988《工业炉窑烟尘测试方法》
SO ₂ 排放测试	GB13271—2001《锅炉大气污染物排放标准》
NO _x 排放测试	GB13223—1996《火电厂大气污染物排放标准》
CO 排放测试	GB3095—1996《环境空气质量标准》

1.3 数据处理方法

1) 升温速度 v_1 (°C/min)

$$v_1 = \frac{t_2 - t_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

式中： t_1 、 t_2 ——锅水的初始温度和沸点温度，°C； T_1 、 T_2 ——灶内燃料的起燃时刻和锅水温度达到沸点的时刻，min。

2) 蒸发速度 v_2 (kg/min)

$$v_2 = \frac{G_{s2} - G_{s3}}{T_3 - T_2} \quad (2)$$

式中： G_{s2} 、 G_{s3} ——温度达到和偏离沸点时锅水的质量，kg， G_{s2} 可取初加锅水的质量 G_{s1} ， G_{s1} 为锅水最初的质量； T_3 ——锅水温度偏离沸点的时刻，min。

3) 回升速度 v_3 (°C/min)

$$v_3 = \frac{t'_4 - t'_3}{T_4 - T_3} \quad (3)$$

式中： t'_3 、 t'_4 ——回升用水的初始温度和终止温度，°C； T_4 ——试验终止的时刻，且 $T_4 - T_3 = 20$ min。

4) 热效率

$$\eta(\%) = \frac{G_{s1}C_p(t_2 - t_1) + \gamma(G_{s2} - G_{s3})}{G_C Q_{DW}^Y} \times 100 \quad (4)$$

式中： C_p ——水的定压比热可取 $C_p = 4.1868$ kJ/(kg·°C)； γ ——水沸点时的汽化潜热，kJ/kg，见表 4； G_C ——燃料的质量，kg； Q_{DW}^Y ——燃料的低位发热量，kJ/kg。

表 4 水沸点时的汽化潜热

Table 4 Latent heat of vaporization at the water boiling point

沸点 $t/^\circ\text{C}$	汽化潜热 $\gamma/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
86	2 293.1
88	2 287.7
90	2 282.6
93	2 277.2
94	2 272.2
95	2 267.2
98	2 262.2
200	2 256.7

2 结果与分析

2.1 一号炉试验与分析

一号炉试验过程中燃烧状况良好，无冒烟现象。由于风机的作用，不仅增大了送风量，同时也增大了风速，即增大了送风穿透力，使空气与挥发分充分混合，燃烧较完全。

由表 5 可以看到，两次试验的热效率与平均值相差约 1.2%，说明两次试验的平行度较好，且符合国家标准的允许误差（热效率绝对误差的绝对值应小于或等于 3%^[9]）。取两次试验的算术平均值得到该炊事炉的热效率为 23.20%，说明该炉设计较合理、热效率较高。

该炉的蒸发速度平均为 0.037 kg/min 左右，炉灶的燃烧性能较稳定，操作容易，适合农户的使用条件。试验中，自起燃时刻起，仅 30 min，试验锅水就达到沸点，说明该炊事炉的启动性能好。由图 2 可以直观地看到该炉两次试验的结果。

表 5 一号炊事炉的试验结果
Table 5 Test result of cooking stove No.1

项目单位	升温时间/min	升温速度 $v_1/(\text{℃} \cdot \text{min}^{-1})$	蒸发时间/min	蒸发速度 $v_2/(\text{kg} \cdot \text{min}^{-1})$	回升速度 $v_3/(\text{℃} \cdot \text{min}^{-1})$	热效率 $\eta/\%$
第一次	28	2.889	27	0.036	0.975	24.38
第二次	32	2.494	19	0.038	1.185	22.02
平均	30	2.692	23	0.037	1.080	23.20

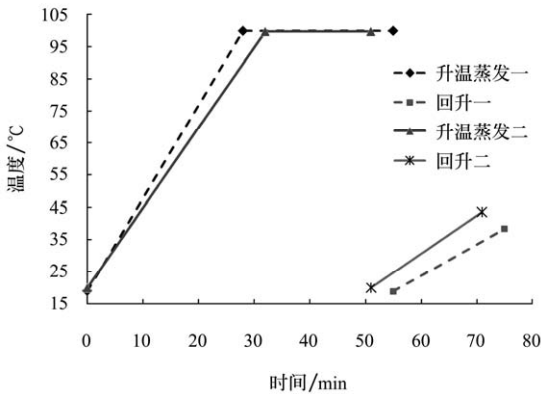


图 2 一号炉灶热性能曲线
Fig.2 Thermal performance curve of stove No.1

在试验进行到 9 min 和 16 min 左右时，分别测量了烟气排放。结果显示，9 min 左右时燃烧状况尚未完全稳定，烟气中的 CO（约 $1\,200 \times 10^{-6}$ ）、NO_x（约 320×10^{-6} ）浓度均较 16 min 左右时（CO 浓度约 490×10^{-6} 、NO_x 浓度约 287×10^{-6} ）的高。这与冷炉点火有关。点火后炉膛

表 6 二号炊事炉的试验结果
Table 6 Test result of cooking stove No.2

项目单位	升温时间/min	升温速度 $v_1/(\text{℃} \cdot \text{min}^{-1})$	蒸发时间/min	蒸发速度 $v_2/(\text{kg} \cdot \text{min}^{-1})$	回升速度 $v_3/(\text{℃} \cdot \text{min}^{-1})$	热效率 $\eta/\%$
第一次	62	1.292	28	0.018	1.25	14.04
第二次	66	1.215	22	0.018	1.36	12.94
平均	64	1.254	25	0.018	1.305	13.49

该炉热效率低的原因有以下 3 点。第一，自然通风的风量不足；一、二次风共用 1 个进风口，分配比例不好。这使燃烧强度不高，且燃烧不充分，火焰温度偏低，导致传热强度也较低；第二，炉膛内设置了 1 个为二次风起导流作用的蓄热体，在冷炉启动时，其蓄热作用减慢了炉子的升温速度；第三，由于升温速度慢，整个试验过程时间长，造成散热损失大。

两次试验的热效率绝对误差在允许误差范围内，符合试验标准的要求。图 3 是二号炉的热性能试验曲线，直观显示两次试验结果吻合较好。但升温时间持续 1 个多小时，蒸发阶段近半小时，这对于炊事炉来讲，是需要加以改进的。

该炉点火升温慢，而且在点火过程中存在冒黑烟现象。此炉为自然通风炉，在点火启动阶段烟囱自生通风力弱，供风不足，造成燃料燃烧不完全。同时，炉内火焰中心位置偏低，只到炉子的 1/2 处，锅底吸收的热流密度小。

需要一段升温时间，才能使燃烧状况趋于稳定，故初时 CO 浓度会高些。在 1×10^{-6} 的仪器检测精度下，没有监测到 SO₂ 排放。这是由于在颗粒燃料的燃烧过程中，气相和灰中的碱性元素（K、Na、Ca）起吸收 SO₂ 的作用^[14]。由于样炉的送风量较大，及风量调控设计的缺陷，试验中排烟过量空气系数达到 3 左右，造成热效率偏低。试验结果表明，一号炉的设计思路是正确的，结构比较合理，不仅燃烧充分，而且能够达到低排放的标准，热效率也达到了可接受的水平。

2.2 二号炉试验与分析

二号炉试验结果如表 6 所示，其热效率仅 13.5% 左右；升温（上火）速度 $v_1 = 1.25 \text{℃/min}$ ，比一号炉低一倍左右；炊事火力强度（锅水蒸发阶段，单位时间锅水蒸发的热量，表明炊事炉的炊事供热能力）为 0.68 kW，刚刚接近煤炉标准值 0.7 kW^[15]。同时，该炉升温过程较长，升温速度及蒸发速度均较小，回升速度较高，原因是炉膛内蓄热胆的蓄热能力较大。对于农村炊事来说，升温速度和蒸发速度是最重要的，是衡量炊事炉热性能的重要指标，该炉具在这方面有待改进。

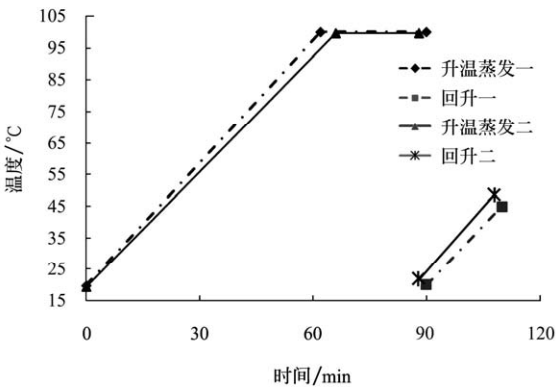


图 3 二号炉灶热性能曲线
Fig.3 Thermal performance curve of stove No.2

2.3 三号炉试验与分析

由表 7 和图 4 可以看到，两次试验的平行度很好，完全符合国家标准允许的误差范围，该炉的试验炊事热效率为 9.58%。与二号炉相比，其升温、蒸发阶段的特性

相似，同样存在升温过程较长的问题，炉子的启动性能较差。

表 7 三号炊事炉的试验结果

Table 7 Test result of cooking stove No.3

项目单位	升温时间/min	升温速度 $v_1/(\text{℃} \cdot \text{min}^{-1})$	蒸发时间/min	蒸发速度 $v_2/(\text{kg} \cdot \text{min}^{-1})$	回升速度 $v_3/(\text{℃} \cdot \text{min}^{-1})$	热效率 $\eta/\%$
第一次	62	1.276	22	0.030	0.845	9.24
第二次	66	1.205	21	0.028	0.555	9.91
平均	64	1.241	22	0.029	0.700	9.58

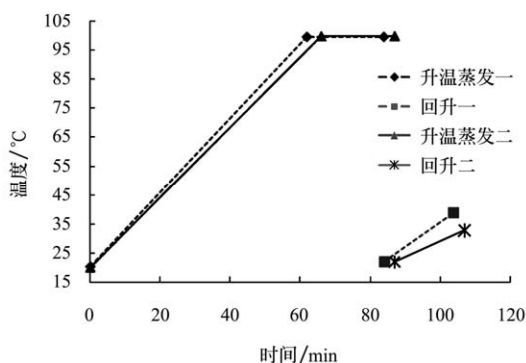


图 4 三号炉灶热性能曲线

Fig.4 Thermal performance curve of stove No.3

与一、二号炉一次装料的方式不同，三号炉采用靠重力连续给料的方式，而且可以调节进入燃烧层的给料量。只要料斗不空，炉子就能持续燃烧，并且可以调节火头大小。三号炉的炉膛较大，点火容易；炉膛用异形耐火砖砌成，重量大，使点火升温过程慢。为了和一、二号炉比较，三号炉的试验过程也是从冷炉点火开始计量，且给料量有限，这是该炉的试验热效率最低的根本原因。三号炉的进风控制也存在缺陷，烟气中氧含量过高，排烟损失偏大，也使热效率降低。

但是如果经过一定时间的燃烧，当炉膛温度足够高时，燃烧状况会大大改善，其依靠重力连续给料的方式将发挥作用，且炊事火力强度远大于一、二号炉，热效率会明显提高，烟囱不再冒黑烟。因此三号炉适合小餐馆使用。

为了更直观地比较和分析，将 3 台颗粒燃料炊事炉的试验结果均值统一表示在图 5 中。

由图 5 可知，一号炉点火后 30 min，试验锅水开始

沸腾，持续沸腾时间 23 min；二号炉、三号炉的锅水温度曲线相似，点火后 64 min 锅水开始沸腾，二号炉持续沸腾时间为 25 min，三号炉较短，为 22 min。3 台炉子中，二号炉颗粒燃尽后的余热使冷水的温升最大，说明该炉炉膛的蓄热量最大。从户用炊事炉的实用性角度看，显然一号炉优于一号炉。所以一号炉用微型风机供风的设计方案是成功的，同时其结构设计也更加合理。为了达到产品级水平，值得对一号炉做进一步的优化设计，以提高其热效率。二号炉的大蓄热量特点，使其适合于长时间连续燃烧使用。

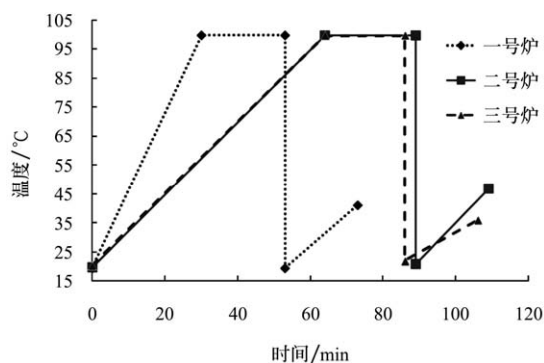


图 5 3 种炉型的热性能曲线对比

Fig.5 Compared with the thermal performance curve of three stoves

在上述试验结果的基础上，设计人员对一号炊事炉作了优化定型设计，优化目标主要是易于调控过量空气系数，大幅减少排烟损失。2007 年 8 月，北京市某有检测资质的单位对优化后的产品炉进行了性能检验，结果全部指标都满足 2008 年 5 月 1 日在北京郊区开始实施的最新标准值（北京市地方标准 DB11/T 540-2008《户用生物质炉具通用技术条件》），具体数据见表 8。

表 8 优化后产品炉的检测值与标准值对比

Table 8 Compared with the detected value of the optimized stove and the standard value

指标单位	热效率/%	炊事火力强度/ kW	烟尘体积质量/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	SO ₂ 体积质量/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	NO _x 体积质量/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	CO/%	烟气黑度*	过量空气系数
标准值	≥35	2.00	30	30	150	0.20	1	1.8 (折算基准)
检测值	35.6	2.03	16	0	65	0.03	<1	1.78

注：* 林格曼等级。

3 结 论

本文试验得到如下结论：带微型风机供风的炊事炉，其性能在优化设计后达到了合格产品的水平。炉内带一

蓄热胆的炊事炉，由于其蓄热胆的作用，具有大蓄热量的特点，使其适合于长时间连续燃烧使用。炉外围带小料斗、可间隔添料的炊事炉，由于其依靠重力连续给料，且自然通风，适合于农村地区的餐馆使用。

[参 考 文 献]

- [1] 蒋剑春. 生物质能源应用研究现状与发展前景[J]. 林产化学与工业, 2002, 22(2): 75—80.
Jiang Jianchun. Prospect on research and development of biomass energy utilization[J]. Chemistry & Industry of Forest Products, 2002, 22(2): 75—80. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘圣勇, 陈开璇, 张百良. 国内外生物质成型燃料及燃烧设备研究与开发现状[J]. 可再生能源, 2002, (4): 14—15.
Liu Shengyong, Chen Kaixuan, Zhang Bailiang. Research and development of biomass SDBF and combustion equipment at home and abroad[J]. Renewable Energy Sources, 2002, (4): 14—15. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王惺, 李定凯, 倪维斗, 等. 生物质压缩颗粒燃烧特性实验[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(1): 86—90.
Wang Xing, Li Dingkai, Ni Weidou, et al. Combustion properties of pelletized biomass[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(1): 86—90. (in Chinese with English abstract)
- [4] 何晓峰, 雷霆宙, 李在峰, 等. 生物质颗粒燃料冷成型技术试验研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(9): 937—941.
He Xiaofeng, Lei Tingzhou, Li Zaifeng, et al. Research of biomass fuel cold compression molding technic[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(9): 937—941. (in Chinese with English abstract)
- [5] 余珂, 胡兆吉, 刘秀英. 国内外生物质能利用技术研究进展[J]. 江西化工, 2006, (4): 30—33.
Yu Ke, Hu Zhaoji, Liu Xiuying. Development of study on biomass energy utilization technologies at home and abroad[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2006, (4): 30—33. (in Chinese with English abstract)
- [6] 马兴儒. 节柴灶日常使用和管理[J]. 河南农业, 1999, (1): 30.
Ma Xingru. Daily used and management of firewood stoves [J]. Journal of Henan Agricultural, 1999, (1): 30. (in Chinese with English abstract)
- [7] 程桂兰. 北山林区节柴改灶技术[J]. 青海环境, 1999, 9(1): 28—30.
Cheng Guilan. Technology of changing cooking stoves and saving firewood in North Mountain[J]. Journal of Qinghai Environment, 1999, 9(1): 28—30. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李海军. 家用生物质颗粒燃料炉的效益分析[J]. 节能技术, 2007, 25(6): 566—568.
Li Haijun. Benefit evaluation of domestic biomass pellet fuel stove[J]. Energy Conservation Technology, 2007, 25(6): 566—568. (in Chinese with English abstract)
- [9] GB 4363-1984. 民用柴炉、柴灶热性能测试方法[S].
- [10] Markku Makela. Case Stories on Pellet Technology. [EB/OL]. <http://www.pelletcentre.info/CMS/site.aspx?p=2548>, 2009-05-14.
- [11] 刘圣勇, 张百良, 张全国, 等. 玉米秸秆成型燃料锅炉的设计与试验研究[J]. 热科学与技术, 2003, 2(2): 173—177.
Liu Shengyong, Zhang Bailiang, Zhang Quanguo, et al. Design and study of cornstalk briquette boiler[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2003, 2(2): 173—177. (in Chinese with English abstract)
- [12] 岳峰, 雷霆宙, 朱金陵, 等. 家用生物质颗粒燃料炉的研制[J]. 可再生能源, 2005, (6): 42—46.
Yue Feng, Lei Tingzhou, Zhu Jinling, et al. Design of domestic biomass pellet fuel stove[J]. Renewable Energy, 2005, (6): 42—46. (in Chinese with English abstract)
- [13] CASE STUDY: Woodfuelled mini district heating system at Camphill Jerpoint. System commissioned[R]. Ireland: Clearpower case study. Camphill Jerpoint, 2004.
- [14] 刘圣勇, 王淮东, 康艳, 等. 玉米秸秆成型燃料结渣特性试验与分析[J]. 河南农业大学学报, 2006, 40(6): 649—652.
Liu Shengyong, Wang Huaidong, Kang Yan, et al. Experiment and analysis on the slagging characteristics of corn straw briquette[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2006, 40(6): 649—652. (in Chinese with English abstract)
- [15] GB 16154-2005. 民用水暖煤炉通用技术条件[S].

Performance of cooking stoves with biomass pellet fuel

Fan Xinxin¹, Lü Zi'an², Li Dingkai², Yu Xiaoli¹

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Biomass pellet fuel as a clean fuel, it needs to design special stoves to make them burning more efficient and cleanly. It will present three kinds of pellets-fired original stoves for cooking of farmer households in this paper. Performances of the stoves, such as thermal efficiency, combustion characteristics, and pollutants in flue gas are experimentally studied. The biomass pellet fuel is corn stalks in the course of the trial. The test procedure is according to the national standard GB4363-1984 which method is water heating test. The experimental results show that these stoves can use the pellet fuel which is made from the agricultural and forest residues more efficiently and clearly. Then, the thermal efficiency and pollutants in flue gas of the new cooking stove, which is improved in accordance with the results of the cooking stove that with a mini-fan for the wind, satisfy the level and limits of the local standard in Beijing DB11/T 540-2008.

Key words: biomass, fuels, combustions, cooking stove, thermal efficiency, pollutants