

生物质颗粒燃烧器燃料适应性试验

王月乔^{1,2,3}, 田宜水^{1,3}, 侯书林², 赵立欣^{1,3}, 孟海波^{1,3}

(1.农业部规划设计研究院, 北京100125; 2.中国农业大学工学院, 北京100083; 3.农业部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京100125)

摘要: 为深入研究生物质颗粒燃料的燃烧特性, 探讨自动燃烧器的燃料适应性, 该文基于PB-20型生物质颗粒燃烧器, 选择了5种灰分小于25% (空气干燥基) 的颗粒燃料, 分别研究了燃烧工况中进料量和空气量对燃烧性能的影响。试验结果表明灰分含量大于20%的颗粒燃料燃烧不充分, 工况不稳定, 效率低, 结渣大, 易熄火, 不适用于此类生物质颗粒燃烧器; 灰分含量为12.40%的颗粒燃料推荐参数为进料量4kg/h, 风机转速2600~2800r/min, 清渣速度为3r/min, 转5s/停35s; 灰分在7.21%的颗粒燃料推荐控制参数为进料量3~4kg/h, 风机转速2600~2800r/min, 清渣速度相对应为3r/min, 转5s/停60~55s; 灰分值低于1%的颗粒燃料均以进料量3~4kg/h, 风机转速2600~2800r/min, 不需清渣为推荐参数。该研究总结了生物质颗粒燃烧器的燃料适用控制参数, 为燃烧器的推广应用提供了数据支持。

引言

生物质能具有环境友好和可再生的双重属性, 其中, 生物质固体成型燃料取之于农林废弃物, 燃烧特性明显改善, 成为生物质能的主要利用方向之一^[1-5]。

生物质颗粒燃料作为一种典型的生物质固体成型燃料, 直径小于25mm, 体积只有压缩前的1/8~1/6, 且体积和质量较为均匀, 流动性较强。燃烧使用过程中, 点火容易, 燃烧高效, 易于自动控制, 且CO₂零排放, SO₂低排放^[6-10]。

生物质颗粒燃料燃烧器是一种典型的燃烧生物质颗粒的设备, 在日本及欧洲一些国家应用比较成熟, 已经实现产业化经营^[11-14]。

国外的颗粒燃料以木质为主, 种类单一^[15]

。但是中国生物质颗粒燃料原料种类多样化^[16]

, 理化特性差异大, 不同颗粒燃料的燃烧特性有所不同, 使得生物质颗粒燃料燃烧器的燃料适应性不佳, 造成生物质颗粒燃料燃烧器使用范围不广等问题。

目前, 国内生物质颗粒燃

料燃烧方面的文献多为研究颗粒燃料本身的燃烧特性,

王惺等^[17]、王翠苹等^[18]

利用热重分析技术研究了多种生物质颗粒的点火及燃烬特性, 苏俊林等^[19]重点研究了玉米秸秆颗粒的热工特性, 罗娟等^[20]

研究了生物质颗粒燃料的燃烧特性及污染物排放特性

, 侯中兰等^[21]、袁海荣等^[22]

研究了点火的影响因素, 徐飞等^[23]研究了生物质颗粒燃料的热风点火性能, 总结了最佳点火控制条件。

由于农作物秸秆具有周期性, 为保证周年生产, 一般采取原料来源多元化的方式, 而同一地区不同种类的秸秆其特性差异较大^[24]

, 造成同一燃烧设备需要适应多种生物质燃料。但是, 设备制造后, 一般难以调整。因此, 需要针对生物质燃料燃烧设备的燃料适应性方面开展研究, 明确运行工况。

罗娟等^[20]、姚宗路等^[25]

的文章中均指出颗粒燃料的灰熔融点、灰分值对燃烧的结渣情况等有影响, 同时, 实际燃烧中, 发现不同灰含量的生物质颗粒燃料的燃烧状态有很大不同。因此, 本文将灰分值作为选择燃料的主要依据, 探讨不同灰分的颗粒燃料的适应性。

本文拟基于农业部规划设计研究院研制

的PB-20型生物质颗粒燃料燃烧器^[26-28]

, 使用多种不同灰分的生物质颗粒燃料, 选取不同进料量, 不同风机转速, 测试燃烧器的热工性能, 分析生物质颗粒燃料燃烧的效率变化以及其成因, 得出适用于15~25kW生物质颗粒燃料燃烧器的燃料最佳匹配进料和进风, 为今后

生物质颗粒燃烧设备的推广研究提供数据支持。

1原料及试验设备

1.1试验原料

本试验所用的生物质颗粒燃料依据燃料灰分值介于0~25%之间依次选择了秸秆和木质共5种。所有颗粒燃料均采用环模成型工艺^[2,29]

，基本外形尺寸为直径6~8mm，长度10

~30mm，颗粒密度约为1.2~1.8g/cm³

。5种生物质颗粒燃料的工业分析、元素分析以及热值见表1。其中，颗粒1的灰份偏高，为24.41%，主要原因可能为收获和加工过程混入土壤等杂质。

表 1 5 种生物质颗粒燃料的工业分析、元素分析和低位发热量
Table 1 Proximate analysis, ultimate analysis and net calorific value of 5 kinds of biomass pellets

颗粒 编号 No.	颗粒原料 Pellet material	工业分析 Proximate analysis				元素分析 Ultimate analysis					低位发热量 Net calorific value/ (kJ·kg ⁻¹)
		灰分 Ash/%	全水分 Total moisture/%	挥发分 Volatile/%	固定碳 Fixed carbon/%	碳 C/%	氢 H/%	氧 O/%	氮 N/%	硫 S/%	
1	玉米秸秆（高灰）	24.41	7.33	60.14	8.12	34.81	5.67	34.22	0.59	0.45	11501
2	玉米秸秆	12.40	8.44	70.67	8.49	40.32	5.75	31.06	0.70	0.52	13537
3	红松	7.21	9.23	69.70	13.86	42.78	6.00	39.69	0.14	0.54	14729
4	锯末	0.87	8.91	77.68	12.54	45.09	6.63	44.93	0.09	0.57	15158
5	橡木	0.32	5.52	86.53	7.63	48.69	6.53	35.33	0.06	0.54	16712

注：试验依据标准：NY/T 1881.1-2010 生物质固体成型燃料试验方法^[30]；测定颗粒原料制样后的空气干燥基；表中数据均为质量分数。

Note: According to the standard of NY / T 1881.1-2010: Biomass solid fuel test methods; Air dried basis samples were used in the test; Data in the table are the mass fraction.

1.2试验装置及平台

1.2.1试验仪器及装置

试验仪器：GJ-2封装式化验制样粉碎机（河南省天弘仪器有限公司）、6100氧弹热量计（Parr公司）、SA223S-CW型分析天平（赛多利斯科学仪器（北京）有限公司）、101-1A型电热鼓风干燥箱（河南省天弘仪器有限公司）、XL-1箱型高温炉（河南省天弘仪器有限公司）、2400Series II CHNS/O元素分析仪（PE公司）、3012H型烟尘/烟气分析仪（青岛崂山应用技术研究）、KM9106烟气分析仪（英国凯恩公司）、6mm孔径筛（安平分样筛厂）、热电偶（0~1200℃，定做）。

试验装置：农业部规划设计研究院研究

制作的PB-20型生物质颗粒燃烧器^[26-28]

，设计热功率为15~25kW，点火丝300W，风机25W，进料电机25W，清渣电机15W。如图1所示，该燃烧器为上进料式，主要由点火丝、风机、清渣电机及进料电机（位于落料管上方，通过耐热软管与落料管连接，图中未画出）组成，点火时间、进料量、风机转速及清渣频率等控制参数可通过生物质燃烧设备监控平台进行调节。

1.2.2试验平台

本文试验是在农业部规

划设计研究院依据《工业锅炉热工性能试验规程G

B/T10180-2003》^[31]研发的生物质燃烧设备监控平台^[32]

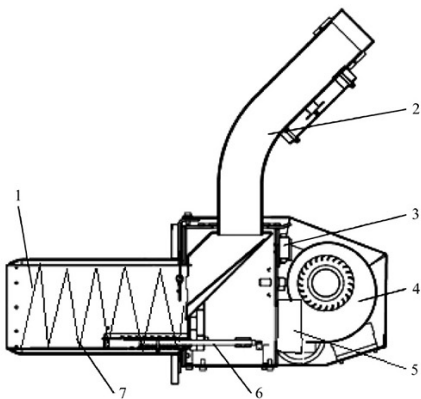
上完成，如图2所示。本生物质燃烧设备监控平台包括上位机、燃烧器和锅炉系统以及多个数据采集传感器，可对生物质颗粒

燃烧器的燃烧控制

参数进行调节，也对生物质锅炉的进

出水温、进出冷热空气温、循环水流量、O₂/CO等多个燃烧性能热工参数进行采集和处理。

表 2 为拟测量的热工参数。

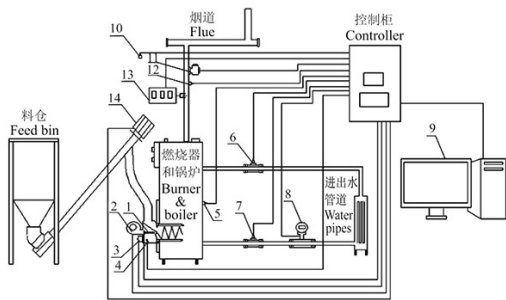


1.清渣螺旋 Slag spiral 2.落料管 Blanking tube 3.控制盒 Control box
4.风机 Fan 5.清渣电机 Slag motor 6.点火丝 Igniter 7.燃烧室
Combustion chamber

注：引自参考文献[26-28]。

Note: Cited reference [26-28].

图 1 生物质颗粒燃烧器
Fig.1 Biomass pellet burner



1.点火丝 Igniter slag spiral 2.风机 Fan 3.清渣电机 Slag motor 4.火焰
传感器 Flame sensor 5.炉膛温度传感器 Temperature sensor in furnace
6.出水温度传感器 Temperature sensor in water-outlet 7.进水温度传感器
Water-inlet temperature sensor 8.循环水流量传感器 Circulating water
flow sensor 9.计算机 Computer 10.入炉冷空气温度传感器 Temperature
sensor of air into the furnace 11.烟道压力传感器 Flue pressure sensor
12.排烟温度传感器 Gas-in-flue temperature sensor 13.C/O\N/S 传感器
C/O\N/S sensor 14.进料电机 Feed motor

注：引自参考文献[32]

Note: Cited reference [32]

图 2 生物质燃烧设备监控平台示意图

Fig.2 Diagram of biomass combustion
equipment-monitoring platform

表 2 试验中需要测试的热工参数
Table 2 Main thermodynamic parameters

热工参数 Thermodynamic parameters	测试传感器/仪器 Test sensor/instrument	备注 Remark
热水锅炉循环量 $G/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	脉冲型水流量计	进水管 1 m 内
热水锅炉进水温度 $t_{\text{进}}/^\circ\text{C}$	PT1000 热敏电偶	进水管 1 m 内
热水锅炉出水温度 $t_{\text{出}}/^\circ\text{C}$	PT1000 热敏电偶	出水管 1 m 内
燃料消耗量 $B/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	电子台秤	测试标定
输入热量 $Q_r/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	Parr 6100 氧弹热量计	为低位发热量
炉渣质量 $G_{\text{灰}}/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	电子台秤	
炉渣可燃物含量 $C_{\text{灰}}/\%$	XL-1 箱型高温炉、 SA223S-CW 型分析天平	
排烟处 RO_2 含量 $R/\%$	KM9106 烟气分析仪	排烟道 1 m 内
排烟处 O_2 含量 $O/\%$	KM9106 烟气分析仪	排烟道 1 m 内
排烟处 CO 含量 $E/\%$	KM9106 烟气分析仪	排烟道 1 m 内
入炉冷空气温度 $t_{\text{R}}/^\circ\text{C}$	PT1000 热敏电偶	为室温
排烟温度 $t_{\text{排}}/^\circ\text{C}$	PT1000 热敏电偶	排烟道 1 m 内
燃烧室排出炉渣温度 $t_{\text{灰}}/^\circ\text{C}$	PT1000 热敏电偶	

注：引自参考文献[31,33]； RO_2 为二氧化物，一般为 CO_2 与 NO_2 含量之和。

Note: Cited references [31,33]. RO_2 is dioxide, $\text{RO}_2 = \text{CO}_2 + \text{NO}_2$.

1.3 试验方法

1.3.1 测试燃烧特性

PB-20型生物质颗粒燃烧器设计功率为15~25kW，所以每种颗粒均分别选择3种进料量，为3、4、5kg/h，颗粒燃料的热输入如表3所示；风机转速分为0~9等，正弦波调速，0~2800r/min，5级以下风量过小，不适用于正常燃烧状态。通过前期试验我们发现，由于风量与压力有关，微调风机转速，风量及过量空气系数变化不敏感，因此选择了5、7和9共3种转速，为2600、2700、2800r/min，做3×3种工况测试。

表 3 5 种颗粒燃料的理论输入功率

Table 3 Theoretical input power of 5 kinds of pellet fuel

颗粒编号 No.	不同进料量的理论输入功率 Theoretical input power of 3 kinds of feed rate/kW		
	3 kg·h ⁻¹	4 kg·h ⁻¹	5 kg·h ⁻¹
1	9.58	12.78	16.00
2	11.28	15.04	18.80
3	12.27	16.37	20.46
4	12.63	16.84	21.05
5	13.93	18.57	23.21

每种工况单独测试，清渣电机则在燃烧过程中多次调试，取燃烧状况最好的情况下的电机转速和停机占空比；待燃烧稳定后，连续测试1h。每隔1min记录测试参数，烟尘排放每隔15min测量1次。

1.3.2 测试灰渣特性

试验开始前，将炉膛内底灰清理干净，试验结束后，使用热电偶测量灰渣温度，并取出全部底灰及渣块，迅速平摊散热，防止在空气中继续燃烧，称量灰渣质量。将全部灰渣研磨成粒径小于100目的粉末，取空气干燥基测取底灰可燃物含量。

2 性能指标

锅炉热工性能是指锅炉的热力学效率，用来评判锅炉性能。由于国家未发布生物质颗粒燃烧器测试标准，可测试配套锅炉热工性能，反推燃烧器性能。本文依据《工业锅炉热工性能试验规程GB/T10180-2003》[31]重点考察燃烧器的燃烧效率、其中的各项热损失以及烟尘排放，通过分析可以得到不同灰分值的燃料在不同风机转速下的燃烧状态及原因，为研究燃料的适应性和燃烧器及燃烧系统的改进优化提供参考。

2.1 燃烧效率

燃烧效率取反平衡效率，通过确定锅炉各项热量损失，根据热平衡方程确定锅炉效率：

$$\eta=100\%-(q_2+q_3+q_4+q_5+q_6) \quad (1)$$

式中： η 为燃烧效率，%； q_2 为排烟热损失，%； q_3 为气体不完全燃烧热损失，%； q_4 为固体不完全燃烧热损失，%； q_5 为散热损失，%； q_6 为灰渣物理热损失，%。

其中 q_2 排烟热损失主要与排烟温度和冷空气温度差相关，排烟温度由锅炉的热交换决定， q_5 散热损失同样主要由锅炉大小决定，因此可不考虑 q_2 和 q_5 。燃烧器的燃烧效率为公式（2）：

$$\eta=100\%-(q_3+q_4+q_6) \quad (2)$$

2.2热损失

2.2.1 气体未完全燃烧热损失 q_3

$$q_3 = (1 - q_4) \times V_{gy} \times 12636 \times E / Q_r \times 100\% \quad (3)$$

式中: V_{gy} 为排烟干烟气体积, m^3/kg ; E 为 CO 排放量, %; Q_r 为输入热量, 即低位发热量, kJ/kg 。

2.2.2 固体未完全燃烧热损失 q_4

$$q_4 = [a_{lz} \times C_{lz} / (1 - C_{lz}) + a_{fh} \times C_{fh} / (1 - C_{fh})] \times 32866.4 \times A_{ar} / Q_r \times 100\% \quad (4)$$

式中: a_{lz} 为炉渣含灰量占总灰量百分比, 与炉渣质量和炉渣可燃物含量有关, %; C_{lz} 为炉渣可燃物含量, %; a_{fh} 为飞灰含量占总灰量百分比, 取经验值, %; C_{fh} 为飞灰可燃物含量, 取经验值, %; A_{ar} 为灰分含量, %。

2.2.3 灰渣物理热损失 q_6

$$q_6 = a_{lz} \times (ct)_{lz} \times A_{ar} / (Q_r \times (1 - C_{lz})) \times 100\% \quad (5)$$

式中: $(ct)_{lz}$ 为炉渣焓, 与炉渣温度相关, 炉渣温度基本为 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 之间, 炉渣焓变化较小, kJ/kg 。

2.3 过量空气系数

过量空气系数 α 为锅炉运行中实际空气消耗量与理论空气量的比值, 其公式为

$$\alpha = 21 / (21 - 79 \times (O - 0.5 \times E) / (1 - R - O - E)) \quad (6)$$

式中: O 为 O_2 排放量, %; R 为 RO_2 (二氧化物, 一般为 CO_2 与 NO_2 含量之和) 排放量, %。

2.4烟尘排放

测量烟尘排放浓度，观测烟气黑度。由于国家未出台生物质燃料燃烧的相关污染物排放标准，因此根据《锅炉大气污染物排放标准GB13271-2001》^[34]

，选取自然通风燃煤锅炉的排放要求。燃烧器所处地区为二类区，因此烟尘最高排放浓度为120mg/m³，烟气黑度（林格曼黑度）为1级。

通过上述多组试验，得到燃烧试验结果。除对比各个工况的燃烧效率外，根据各项热损失的成因，重点选取气体不完全燃烧热损失、固体不完全燃烧热损失、灰渣物理热损失3种热量损失，从中分析热量损失成因。

3结果与分析

3.1不同颗粒的燃烧热损失分析

3.1.1颗粒1的燃烧性能指标分析

试验发现，颗粒1不管进料量、进风机转速，清渣量如何改变，燃烧均不能持续到1h以上，燃烧状态变化较大，不能稳定测量热损失，初步测定效率在60%甚至少于50%，甚至在进料5kg/h的情况下，燃烧约15min即熄灭，没有试验数据。原因是颗粒1属于高灰燃料（24.41%），发热量低，燃烧时热量传导差，结渣严重，使得火焰不能持续，如表4所示。这说明此类燃烧器并不适用于燃用高灰分燃料，需要优化调整燃烧器结构。

3.1.2颗粒2的燃烧性能指标分析

颗粒2燃烧时的清渣电机均为3r/min，启停间断时间分别为：进料量3kg/h，转5s/停40s；进料量4kg/h，转5s/停35s；进料量5kg/h，转5s/停30s。颗粒2的9种工况结果如表4所示。

试验结果显示，颗粒2在进料3和4kg/h时的燃烧效率 η 均在90%以上，且不同风机转速时相差不大；进料5kg/h的 η 下降到70%左右，且随风机转速增加而增加。

进料3和4kg/h的气体未完全燃烧热损失 q_3
在0.10%~0.27

%之间，其过量空气系数 α 在

1.48以上，与进料量匹配较好，热损失较小。进料5kg/h的 q_3

，高至18%以上，主要原因在于其进料量较高， α 在0.92~1.13之间，空气量明显偏小，与颗粒燃料之间燃烧不充分，造成烟气中CO含量偏高，进而造成其燃烧效率 η 较低。

进料3kg/h在转速2800r/min时，固体未完全燃烧热损失 q_4 有所增长，可能原因是进料量少，转速大，将部分燃料或燃烧中的颗粒物吹出燃烧筒，造成飞灰中未燃尽的碳增加。此外，进料5kg/h的 q_4 在转速2600r/min时，高于其他2种进料4%以上，且随转速增多而减小。主要是因为进料量增大，且颗粒燃料含灰量比较高，空气与固定碳混合不均匀，燃烧不完全，产生较多的灰渣；转速增加，则空气和固定碳混合的越好，使得 q_4 下降。

颗粒2的灰渣物理热损失 q_6 整体较高，进料3和4kg/h均在0.05%~0.08%之间，进料5kg/h在0.08%~0.10%之间，主要是因为灰含量较大。

颗粒2在进料3kg/h时烟尘排放量很高，转
速2800r/min时，高达393mg/m³

。颗粒2灰分大，同时进料3kg/h时燃烧较为完全，灰分结成渣块较小，飞灰较多，由烟气夹带飞灰排出，造成烟尘量大，转速大夹带飞灰更多，建议在烟道添加排烟过滤装置。进料4和5kg/h的烟尘排放和烟气黑度在国家排放标准之内。

3.1.3颗粒3的燃烧性能指标分析

颗粒3燃烧时的清渣电机均为3r/min，启停间断时间分别为：进料量3kg/h，转5s/停60s；进料量4kg/h，转5s/停55s；进料量5kg/h，转5s/停50s。颗粒3的9种工况结果如表4所示。

试验结果显示,针对 η 而言,有随着进料量增大而减小的趋势,进料3和4kg/h的 η 均在90%以上,转速对其影响较小,进料5kg/h的 η 随转速增大而提高,在85.01%~87.76%之间。

颗粒3的 α 值均在1.45以上,相较于同等工况的其他颗粒是最大的,主要原因在于颗粒3通过化学元素组成计算出的理论空气量是最小的。进料量3和4kg/h的 α 均大于2,其 q_3 在1%以下,说明空气量与进料量比较匹配。进料5kg/h的 α 则在1.5左右,相对空气量较少, q_3 在3%左右,比进料3和4kg/h稍高,但不是影响 η 的主要因素。

进料3kg/h时, q_4

随转速增加而减小,因为转速增加,空气量增加,燃料燃烧更加充分,灰渣可燃物含量下降,灰渣量也有所减少。进料4kg/h在转速2700r/min时, q_4 有所突变,也是造成该工况效率降低的主要因素,主要原因是转速2700r/min的灰渣可燃物含量相较于转速2600和2800r/min偏高7%左右,可能是在燃烧过程中清渣电机速度有所波动,清出较多的未完全燃烧颗粒物。进料5kg/h的 q_4

在10%上下,明显高于进料3和4kg/h,且均随转速增大而减小,固体未完全燃烧热损失是影响燃烧效率的变化的主要原因。可能原因是进料量增大,加之空气量不够,固定碳与氧气接触不充分,导致燃烧不充分,灰渣中可燃物含量会有所提高。

3种进料量的 q_6

均在0.04%以下,主要由于颗粒燃料灰含量减小,灰渣物理热损失也均相应减小。颗粒3的烟尘排放量和烟气黑度均符合国家排放要求。

3.1.4颗粒4的燃烧性能指标分析

颗粒4燃烧时无需清渣。颗粒4的9种工况结果如表4所示。试验结果显示,进料3kg/h时, η 最高,其次是4kg/h,并且均在95%以上,进料5kg/h时, η 最低,不同转速对其影响较大,随转速增大而增大,从86.91%增长到96.45%。

进料3和4kg/h的 α 在1.2

~1.7之间,进风量比较适合,燃烧相对完全,CO

排放值小,使得 q_3

均小于1.5%,同时

风机转速变化对其影响较小。而进料

5kg/h在转速2600r/min和转速2700r/min时, q_3

较大,最高达到4.29%,主要原因是空气量相对小,颗粒的可燃部分燃烧非常不充分,转速2600r/min时的空气流速小,与固定碳接触时间长,CO排放值少于转速2700r/min,而转速2800r/min的空气量增大,CO排放值也少于转速2600和2700r/min。

针对 q_4

,进料3和4kg/h的整体燃烧充分,灰渣量小,灰渣

可燃物含量小, q_4

低于4%,而进料5kg/h在转速2600r/min时 q_4 高达9.88%,也是造成该工况 η 仅为86.91%的主要原因,该工况灰渣量为0.226kg/h,其他工况的灰渣量仅为0.04~0.05kg/h,可能由于颗粒4灰分含量较小,燃烧过程中几乎没有结到一起的渣块,无需清渣,灰渣均为进风吹出的灰沉积而得,测量的灰渣量会稍有偏差,另外也有带出的未完全燃烧的颗粒,密度大于飞灰,使得灰渣量与灰渣可燃物含量稍大。3种进料

的 q_6 除进料5kg/h在转速2600r/min时在0.03%外,其余工况均在0.01%以下,得益于颗粒4的低灰含量。

颗粒4的进料3和4kg/h的烟尘烟气排放符合国家排放标准,其中,进料3kg/h在转速2800r/min时,烟尘排放大可能是因为测量的时段燃烧稍有不稳定,排放颗粒物较多。而进料5kg/h的烟尘排放量均超出国家标准,烟气黑度均为林格曼黑度2级,主要是进料量大,同时灰含量小、可燃物多,燃烧相对不完全,烟气夹带的飞灰多所致。

3.1.5颗粒5的燃烧性能指标分析

颗粒5燃烧时无需清渣。颗粒5的9种工况结果如表4所示。试验结果表明,颗粒5在进料3kg/h时, η 在不同风机转速下持平,进料4kg/h的 η 则随转速增长有所提高,进料5kg/h为最低,但也在91%以上。

同为低灰颗粒,且燃烧效率相差不多的情况下,对比表4中颗粒5和颗粒4的热损失数值,发现,颗粒5的 q_3 要比颗粒

4的低，可能原因是颗粒5单颗颗粒短小且轻，较为松散，不如颗粒4单颗颗粒紧实，留在燃烧筒内的燃料与空气接触的更为充分，燃烧得较为彻底。

同时，排除个别工况，颗粒5的 q_4 整体比颗粒4要高，主要原因也在于颗粒5的单颗颗粒比颗粒4长度短、质量小，特别是进料量小时，有些颗粒未完全燃烧就被风吹出燃烧筒，构成灰渣，使得灰渣可燃物含量高达80%~90%。进料4kg/h在转速2800r/min时比进料3kg/h在转速2800r/min时的 η 值高主要也是由于进料4kg/h比3kg/h进料量要多，压在进风口的颗粒多，被吹出的燃料要少于进料3kg/h，使得 q_4 较小。因此，在燃烧此类颗粒燃料时可在燃烧器上添加相应的拦网类配件。

颗粒4和5的 q_6 均在0.03%以下，也得益于灰含量非常低。颗粒5的烟尘排放量表明，进料3和4kg/h的燃烧工况均能满足国家标准，烟尘排放量在 $40\text{mg}/\text{m}^3$ 左右。但进料5kg/h的烟尘量较高，林格曼黑度也为2级，其原因同颗粒4的进料5kg/h一样。

3.2不同颗粒燃料的效率与烟气排放分析及结果分别对5种颗粒燃料的 3×3 种工况的燃烧状态汇总分析，均为两因素

三水

平，3个

观测值，观测值

中重点考察燃烧效率，越高越好

。《工业锅炉热工性能试验规程GB/T10180—2003》^[31]

中指出符合标准的锅炉最低效率为69%，本文考察燃烧器的燃烧效率水平，相较于锅炉热效率中的排烟热损失和散热损失，燃烧器的排烟热损失和散热损失可按常规排烟温度 140°C 计算排烟热损失为8%，散热损失为2.9%，排除锅炉系统的影响因素，计算可知：燃烧器燃烧效率低于70.9%为不符合标准，烟尘排放和烟气黑度两个观测值满足国家排放标准^[34]（ $120\text{mg}/\text{m}^3$ 、林格曼黑度1级）即可。

汇总试验结果，优选出其中推荐的控制参数，如表5所示。

表 4 5 种颗粒燃料的燃烧性能指标汇总
Table 4 Performance index of 5 kinds of pellet fuels

颗粒编号 No.	性能指标 Performance index	进料量 Feed rate 3 kg·h ⁻¹			进料量 Feed rate 4 kg·h ⁻¹			进料量 Feed rate 5 kg·h ⁻¹		
		转速 Speed 2 600 r·min ⁻¹	转速 Speed 2 700 r·min ⁻¹	转速 Speed 2 800 r·min ⁻¹	转速 Speed 2 600 r·min ⁻¹	转速 Speed 2 700 r·min ⁻¹	转速 Speed 2 800 r·min ⁻¹	转速 Speed 2 600 r·min ⁻¹	转速 Speed 2 700 r·min ⁻¹	转速 Speed 2 800 r·min ⁻¹
1	燃烧效率 $\eta/\%$	65.66	63.74	64.23	50.51	49.87	50.28	--	--	--
	烟尘排放/(mg·m ⁻³)	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	烟气黑度等级	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2	过量空气系数 α	1.83	1.97	2.13	1.48	1.66	1.73	0.92	1.02	1.13
	气体未完全燃烧热损失 $q_3/\%$	0.10	0.24	0.27	0.26	0.23	0.16	18.29	19.37	19.59
	固体未完全燃烧热损失 $q_4/\%$	5.15	3.28	8.17	7.25	6.3	6.69	12.99	7.80	6.86
	灰渣物理热损失 $q_6/\%$	0.07	0.08	0.05	0.06	0.07	0.07	0.10	0.09	0.08
	燃烧效率 $\eta/\%$	94.68	96.40	91.51	92.43	93.40	93.08	68.62	72.74	73.47
	烟尘排放/(mg·m ⁻³)	198.0	186.0	393.0	74.2	78.5	86.1	80.1	75.8	77.7
	烟气黑度等级	2	2	2	1	1	1	1	1	1
3	过量空气系数 α	2.68	2.76	3.07	2.07	2.11	2.86	1.45	1.60	1.80
	气体未完全燃烧热损失 $q_3/\%$	0.55	0.57	0.70	0.14	0.05	1.00	3.12	2.74	2.55
	固体未完全燃烧热损失 $q_4/\%$	5.83	2.90	1.86	4.92	7.09	4.18	11.84	10.75	9.66
	灰渣物理热损失 $q_6/\%$	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
	燃烧效率 $\eta/\%$	93.59	96.49	97.40	94.90	92.82	94.78	85.01	86.48	87.76
	烟尘排放/(mg·m ⁻³)	75.9	60.0	82.3	70.0	69.4	65.0	87.0	90.0	104.0
	烟气黑度等级	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	过量空气系数 α	1.50	1.53	1.69	1.24	1.28	1.29	1.04	1.06	1.10
	气体未完全燃烧热损失 $q_3/\%$	0.74	0.76	0.91	0.89	1.31	0.40	3.18	4.29	0.98
	固体未完全燃烧热损失 $q_4/\%$	0.22	0.29	0.71	2.43	3.5	1.25	9.88	2.26	2.57
	灰渣物理热损失 $q_6/\%$	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0
	燃烧效率 $\eta/\%$	99.04	98.95	98.37	96.67	95.18	98.34	86.91	93.44	96.45
	烟尘排放/(mg·m ⁻³)	114.0	96.6	183.0	79.2	73.8	60.4	154.0	136.0	162.0
	烟气黑度等级	1	1	2	1	1	1	2	2	2
5	过量空气系数 α	2.03	2.17	2.45	1.44	1.49	1.52	1.21	1.25	1.33
	气体未完全燃烧热损失 $q_3/\%$	0.09	0.12	0.16	0.08	0.20	0.04	2.52	2.11	2.09
	固体未完全燃烧热损失 $q_4/\%$	2.10	2.06	1.99	3.70	1.40	0.13	6.05	3.70	3.50
	灰渣物理热损失 $q_6/\%$	0	0.01	0.01	0.01	0	0	0.02	0.01	0.01
	燃烧效率 $\eta/\%$	97.81	97.81	97.84	96.21	98.40	99.83	91.41	94.18	94.40
	烟尘排放/(mg·m ⁻³)	45.0	39.0	42.0	68.0	64.0	48.0	165.0	180.0	142.0
	烟气黑度等级	1	1	1	1	1	1	2	2	2

注：“--”为试验持续时间较短，没有数据或数据无意义

Note: ‘—’ is meaningless, because the test time is too short.

表 5 5 种颗粒的推荐控制参数

Fig.5 Control parameters recommended for burner with 5 kinds of pellets

颗粒 编号 No.	进料量 Feed rate/ (kg·h ⁻¹)	风机转速 Fan speed/ (r·min ⁻¹)	清渣电机转速 和启/停时间 Slag speed and time of turn on/off/ (r·min ⁻¹ , s·s ⁻¹)	燃烧器效率 Burner efficiency/ %
1	—	—	—	—
2	4	2 600~2 800	3, 5/35	>92
3	3~4	2 600~2 800	3, 5/60~55	>92
4	3~4	2 600~2 800	0	>95
5	3~4	2 600~2 800	0	>96

注：“—”为没有推荐参数。

Note: “—” means that there is no best parameters.

4结论及建议

基于15~25kW生物质颗粒燃烧器，测试不同灰分的5种颗粒燃料的燃烧情况，可得以下结论：

1) 颗粒2（灰分12.40%）进料量3kg/h，颗粒4（灰分0.87%）、颗粒5（灰分0.32%）在进料量5kg/h时需要添加排烟过滤装置，降低烟尘浓度；燃烧颗粒5（灰分0.32%）时，可以添加拦网类配件，减少未完全燃烧的颗粒的被吹出率；

2) 灰分含量大于20%的颗粒燃料燃烧不充分，工况不稳定，效率低，结渣大，易于熄火，不适用小型生物质颗粒燃烧器；灰分含量为12.40%的颗粒燃料推荐参数为进料量4kg/h，风机转速2600~2800r/min均可，清渣速度为3r/min，转5s/停35s；灰分在7.21%的颗粒燃料的推荐控制参数为进料量3~4kg/h，风机转速2600~2800r/min，清渣速度相对应为3r/min，转5s/停60~55s；灰分值低于1%的颗粒燃料均以进料量3~4kg/h，风机转速2600~2800r/min，不需清渣为推荐参数。

建议：1) 对高灰分的颗粒燃料展开更为详细的燃料适应性试验；2) 对生物质颗粒燃料燃烧的影响因素很多，颗粒水分、大小、密度，清渣速度，分级进风等，可从其他角度多次试验燃料的适应性。

[参考文献]

[1]Juan F.Gonz á leZ, Carmen M.Gonz á lez-Garc í a, Antonio Ramiro, et al.Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler[J].Biomass and Bioenergy, 2004, 27(2) : 145—154.

[2]霍丽丽，侯书林，赵立欣，等.生物质固体成型燃料技术及设备研究进展[J].安全与环境学报，2009，9(6)：27—31.

[3]张百良，樊峰鸣，李保谦，等.生物质成型燃料技术及产业化前景分析[J].河南农业大学学报，2005，39(1)：111—114.

- [4]姚向军, 田宜水.生物质能资源清洁转化利用技术[M].北京：化学工业出版社, 2005.
- [5]陈永生, 沐森林, 朱德文, 等.生物质成型燃料产业在我国的发展[J].太阳能学报, 2006(4): 16—18.
- [6]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, 27(6): 90—95.
- [7]徐飞, 侯书林, 赵立欣, 等.生物质颗粒燃料燃烧技术发展现状及趋势[J].安全与环境, 2011, 11(1): 70—74.
- [8]张百良, 樊峰鸣, 李保谦, 等.生物质成型燃料技术及产业化前景分析[J].河南农业大学学报, 2005, 39(1): 111—114.
- [9]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.
- [10]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.
- [11]Pallav Purohit, Arun Kumar Tripathi, Tara Chandra Kandpa.Energetics of coal substitution by briquettes of agricultural residues[J].Energy, 2006, 31(8/9): 1321-1331.
- [12]Margaret K Mann, Pamela L Spath.Life cycle assessment of a biomass gasification combined-cycle power system[M].Beijing: China Environmental Science Press,2000.
- [13]姚宗路, 崔军, 赵立欣, 等.瑞典生物质颗粒燃烧产业发展现状与经验[J].可再生能源, 2010, 28(6): 28—32.
- [14]European Commission.White paper: Energy for the future-renewable sources of energy, 51991DC0599[R].Europe: European Commission, 1997.
- [15]田宜水, 孟海波.农作物秸秆开发利用技术[M].北京：化学工业出版社, 2007.
- [16]田宜水.我国农业生物质能发展战略思考[J].中国能源, 2006, 28(9): 16—18.
- [17]王惺, 李定凯, 倪维斗, 等.生物质压缩颗粒的燃烧特性[J].燃烧科学与技术, 2007, 13(1): 86—90.
- [18]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.
- [19]苏俊林, 戴文仪, 矫振伟, 等.玉米秸秆颗粒燃料的热工热性[J].吉林大学学报工学版, 2010, 40(2): 386—390.
- [20]罗娟, 侯书林, 赵立欣, 等.典型生物质颗粒燃料燃烧特性试验[J].农业工程学报, 2010, 26(5): 220—226.
- [21]侯中兰, 贾孟立, 郭前辉.影响生物质成型燃料点火性能的因素分析[J].可再生能源, 2007, 25(1): 71—72.
- [22]袁海荣, 左晓宇, 李秀金, 等.影响秸秆固化成型燃料点火过程的因素分析[J].农业工程学报, 2009, 25(6): 224—228.
- [23]徐飞, 赵立欣, 田宜水, 等.生物质颗粒燃料热风点火性能的试验研究[J].农业工程学报, 2011, 27(7): 288—294.
- [24]田宜水, 姚宗路, 欧阳双平, 等.切碎农作物秸秆理化特性试验[J].农业机械学报, 2011, 42(9): 89—93.
- [25]姚宗路, 赵立欣, Ronnback M, 等.生物质颗粒燃料特性对其燃烧的影响分析[J].农业机械学报, 2010, 41(10): 97—102.
- [26]姚宗路, 孟海波, 田宜水, 等.抗结渣生物质固体颗粒燃料燃烧器研究[J].农业机械学报, 2010, 41(11): 124—128.

- [27]田宜水, 赵立欣, 孟海波, 等.自动高效生物质颗粒燃料燃烧器[P].中国专利：201010126437.1, 2010-08-04.
- [28]田宜水, 赵立欣, 孟海波, 等.一种生物质颗粒燃料燃烧器清灰破渣装置[P].中国专利：201020188012.9, 2011-01-05.
- [29]霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 等.模辊式生物质颗粒燃料成型机性能试验[J].农业机械学报, 2010, 41(12): 121—125.
- [30]NY/T1881.1-2010, 生物质固体成型燃料试验方法[S].
- [31]GB/T10180-2003, 工业锅炉热工性能试验规程[S].
- [32]田宜水, 姚宗路, 王月乔, 等.生物质燃烧设备监控平台[P].中国专利：201220496574.9, 2013-03-13.
- [33]苏超杰, 罗志华, 李文雅, 等.生物质成型燃料燃烧设备热力特性参数测试[J].节能技术, 2006, 24(3): 220—224.
- [34]GB13271-2001, 锅炉大气污染物排放标准[S].

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/107264.html>