

防回火农林生物质碎料燃烧机设计与燃烧特性试验

柳善建 王帅超 李永军 刘亚亚 刘元帅

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000)

摘要: 针对农林生物质碎料在燃烧时存在连续进料及稳定燃烧困难、污染排放水平较高等问题,设计一种以玉米秸秆、碎木屑为主要燃料的农林生物质碎料燃烧机,采用水平进料方式,并进行防回火回烟、炉壁冷风压保护等设计,在不同一、二次风配比下进行了燃烧特性试验。当燃烧机进入稳定燃烧阶段,以碎木屑为燃料,一、二次风配比为0.8:0.2时,炉膛内温度在 $(1\ 200 \pm 100)$ ℃间变化,出火口烟气温度在 $(1\ 000 \pm 100)$ ℃间变化;在一、二次风配比为0.8:0.2和0.7:0.3两种工况下,烟气中 O_2 、 CO_2 、 CO 质量分数分别在 $(13 \pm 2)\%$ 、 $(7 \pm 2)\%$ 、 $(0.2 \pm 0.1)\%$ 间波动,燃烧效率分别为98.8%、98.5%。以玉米秸秆为燃料时,在相同一、二次风配比下,与燃烧碎木屑相比,炉膛内温度和出火口烟气温度均低100℃左右;在一、二次风配比为0.8:0.2和0.7:0.3两种工况下,与燃烧碎木屑相比,燃烧烟气中 O_2 平均含量约低1%, CO 含量略高, CO_2 含量相差不大,燃烧效率分别为98.7%、98.9%。与一、二次风配比为0.8:0.2相比,当一、二次风配比为0.7:0.3时,以碎木屑或玉米秸秆为燃料时的炉内温度、出火口温度均低100℃左右。经JCP-HD型林格曼黑度计观测,以玉米秸秆或碎木屑为燃料,在一、二次风配比为0.8:0.2和0.7:0.3时排放的烟气林格曼黑度小于等于1级。当一、二次风配比为0.8:0.2时,以碎木屑为燃料,烟气中 $PM_{2.5}$ 、 PM_5 、 PM_{10} 变化范围分别为 $56 \sim 72\ mg/m^3$ 、 $38 \sim 51\ mg/m^3$ 、 $43 \sim 63\ mg/m^3$,以玉米秸秆为燃料,分别为 $36 \sim 43\ mg/m^3$ 、 $21 \sim 35\ mg/m^3$ 、 $38 \sim 42\ mg/m^3$,满足锅炉大气污染物排放标准要求。

关键词: 生物质; 碎木屑; 玉米秸秆; 燃烧机; 燃烧特性; 防回火

中图分类号: TK6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0346-09

OSID:



Design and Combustion Characteristics Experiment of Biomass Crushed Aggregates Burner for Anti-tempering Maize Straw and Wood Chips

LIU Shanjian WANG Shuaichao LI Yongjun LIU Yaya LIU Yuanshuai

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: In order to solve the difficulties in continuous feeding and stable combustion, and high pollution emission level during the combustion of maize straw and wood chips, a biomass crushed aggregates burner with horizontal feeding mode, anti-tempering and cold air pressure protection of furnace wall were designed. The combustion experiments were carried out at different ratios of primary to secondary air. The main conclusions were as follows: the temperature variation range inside the furnace was varied as $(1\ 200 \pm 100)$ ℃ when the proportion of primary to secondary air (PPSA) was 0.8:0.2 and the wood chips was used as fuel in the stable combustion stage. The temperature of the flue gas at the outlet was varied at $(1\ 000 \pm 100)$ ℃. Under the conditions of PPSA was 0.8:0.2 or 0.7:0.3, the O_2 , CO_2 and CO mass fraction in the flue gas was fluctuated at $(13 \pm 2)\%$, $(7 \pm 2)\%$ and $(0.2 \pm 0.1)\%$, respectively. The combustion efficiency were 98.8% and 98.5%, respectively. When maize straw was fuel, under the same PPSA, compared with burning wood chips, the temperature in the furnace and the temperature of the flue gas was lower by about 100℃. No matter the PPSA was 0.8:0.2 or 0.7:0.3, the average O_2 content in combustion flue gas was slightly lower, about 1%. The CO content was slightly higher, but the CO_2 content was not remarkably different. The combustion efficiency was 98.7% and

收稿日期: 2019-11-26 修回日期: 2020-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51606113)、山东省重点研发计划项目(2017GGX40108)和山东省高等学校优势学科人才团队培育计划项目

作者简介: 柳善建(1982—),男,讲师,博士,主要从事生物质高效洁净燃烧与优化控制研究,E-mail: liushanjian08@163.com

通信作者: 李永军(1968—),男,高级实验师,主要从事先进燃烧设备设计与制造技术研究,E-mail: liyongjun@sdut.edu.cn

98.9%, respectively. Compared with the PPSA was 0.8:0.2, when the PPSA was 0.7:0.3, whether the wood chips or maize straw were fuel, the temperature inside the furnace and the temperature at the outlet were lower than the former by about 100°C. The blackness of exhaustion (Ringelman emittance, level) was less than or equal to 1 when the PPSA was 0.8:0.2 and 0.7:0.3. When the PPSA was 0.8:0.2, the PM_{2.5}, PM₅ and PM₁₀ in the flue gas was respectively in the range of 56~72 mg/m³, 38~51 mg/m³ and 43~63 mg/m³ with wood chips as the fuel. When corn stalk was fuel, it was respectively in the range of 36~43 mg/m³, 21~35 mg/m³ and 38~42 mg/m³, which met the emission standards of atmospheric pollutants in boilers.

Key words: biomass; wood chips; maize straw; burner; combustion characteristics; anti-tempering

0 引言

生物质燃料具有环境友好、可再生、燃尽率高等优点,我国农林类生物质资源分布广、且相对丰富,利用废弃生物质资源发展清洁供暖、供热是农民增收和实现绿色乡村的有效途径。然而,秸秆类生物质中碱金属、挥发分含量较高,当炉内温度较高时,容易出现结渣现象,影响燃烧时的合理布风,造成稳定燃烧困难^[1-5]。因此,开发适应性广的生物质清洁高效燃烧设备对于降低燃料及热源成本、推动生物质能源的规模化利用具有重要意义。

农林生物质碎料指农作物秸秆、薪材、木屑、果壳等,经过或者未经铡切、粉碎处理,平均长度在50 mm以下,当量直径在10 mm(木质类)或30 mm(秸秆类)以下,单种或者多种类型生物质的混合物。当农林生物质燃烧不充分时,往往会产生较多的烟尘、CO、挥发性有机化合物(VOC)和多环芳烃(PAH),造成对环境的严重污染^[6-11]。因此,有必要合理设计农林生物质碎料的燃烧设备及燃烧工况,以实现清洁高效燃烧。

孙建涛等^[12]设计了一种固定炉排生物质锅炉,由固定式水冷炉排、一二次风管、进料系统、除尘器、过热器等组成,燃料给料量由给料机和进料风量调整,锅炉运行状况表明,锅炉热效率达到设计指标。张丽娜等^[13]设计了一种新型户用生物质直燃炉,该炉以秸秆、木柴、柴草、树枝等为燃料,主要包括配风系统、星型给料机、燃烧炉膛等部件,采用一次风和二次风系统分开的方式使生物质燃料可以充分燃烧,实际运行表明,热能利用率达到50%以上,其产生的粉尘和焦油等污染物明显减少。目前,生物质碎料燃烧设备存在连续进料易出现回火回烟、稳定燃烧困难、污染物排放高等问题。为此,本文研制一种额定功率为1 900 MJ/h的农林生物质碎料燃烧机,对燃烧机的炉膛结构、喂料系统、防回火结构等关键部件进行设计计算,以实现农林生物质碎料的长时间连续稳定进料,降低进料过程中回火回烟等问题,并进行不同一、二次风配比(Proportion of

primary and secondary air, PPSA)下的燃烧特性试验,以得到较优的燃烧工况条件。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

设计的农林生物质碎料燃烧机额定功率为1 900 MJ/h,采用水平进料方式,炉排为固定炉排形式,燃烧机整体结构如图1所示。

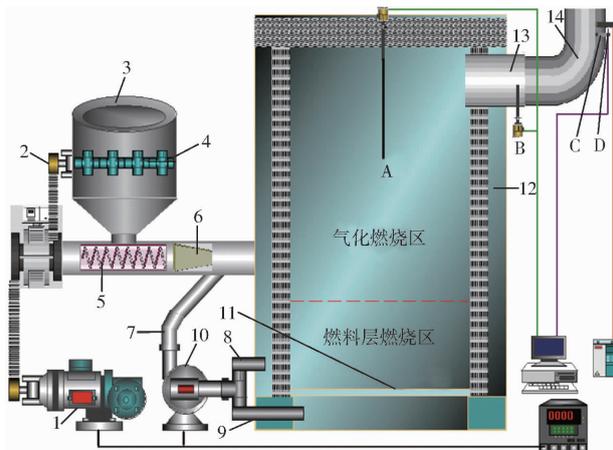


图1 农林生物质碎料燃烧机结构示意图

Fig.1 Design drawing of biomass crushed aggregates burner

1.调速电机 2.链轮 3.料仓 4.拨料辊 5.螺旋输送器
6.防回火罩 7.二次风管 8.炉壁风管 9.一次风管 10.风机
11.炉排 12.冷风层 13.出口烟筒 14.外接烟筒 A.炉膛测温点 B.出口测温点 C.粉尘检测点 D.出口烟气测点

农林生物质碎料燃烧机由料仓、螺旋喂料器、防回火部件、送风系统、燃烧室、温度及烟气测量系统等构成。由于农林生物质碎料尺寸不规则,枝叶较多,切边不平整,喂料器连续稳定进料比较困难,经常发生缠绕堵塞、料仓搭桥等现象,为此设计一种双对辊螺旋喂料器,见图2。料仓中有一对同向旋转的拨料辊,拨料辊及螺旋输送器在电机带动下转动,可有效防止物料搭桥,利于农林生物质碎料的连续稳定输送。

1.2 工作原理

农林生物质碎料燃烧机工作流程:①启动进料电机及送风机,使农林生物质碎料随输送器转动而

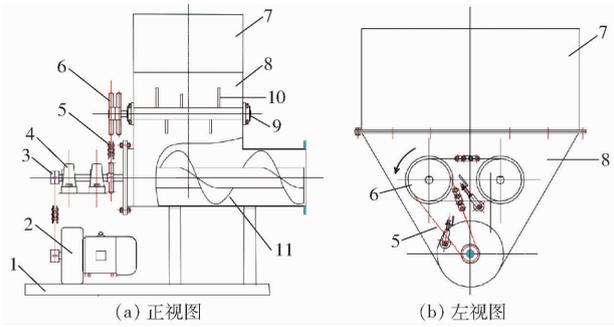


图2 农林生物质螺旋喂料器结构示意图

Fig.2 Design drawing of biomass crushed aggregates burner feeder

1. 机架 2. 调速电机 3. 联轴器 4. 轴承座 5. 链条 6. 双排链轮 7. 上料箱 8. 料仓 9. 端面轴承座 10. 拨料辊 11. 螺旋输送机

稳定地进入炉膛。②启动自动点火装置点燃农林生物质碎料,对炉膛进行预热,预热时间为20~30 min。③预热完成后,系统进入稳定燃烧阶段,高温火焰由出口口喷出,并配合后续的锅炉或换热器等装置。运行过程中每隔2~3 h向料斗加一次料,同时清空集灰室。④需要停机时,先停止螺旋喂料器,送风机继续保持送风,当炉膛内不出现火焰并且炉膛温度降至200℃时,送风机停止工作。

农林生物质碎料种类繁多,燃烧特性差异大,要实现完全、稳定燃烧,以及较低的污染物排放水平,最重要的是配以适量的空气。系统采用一、二次配风方式,其中一次风口布置在炉排下部,提供燃料层燃烧区稳定燃烧所需的氧气;二次风口布置在进料口处,主要实现农林生物质碎料气化燃烧区挥发分的扰动及充分燃烧。通过设置一、二次配风,既可以保证燃料层燃烧区以低温燃烧的方式降低结渣现象,又可以保证气化燃烧区充分燃烧,降低烟气颗粒物浓度和 NO_x 、CO等污染物排放水平。

为分析不同一、二次配风对燃烧过程中炉内温度、出火口温度、烟气成分的影响,得到优化的燃烧控制方案,在炉膛内设置温度测点,位置在炉膛顶端中心,将长度为500 mm的S型热电偶插入。出火口温度测点设置在距离出火口500 mm处,选用型号为WRP-230的S型热电偶。同时,在出火口外接烟筒上,距出火口中心2500 mm处接激光粉尘检测仪,距出火口中心3000 mm处接红外烟气分析仪,将收集到的烟气成分、颗粒物浓度进行检测,将测量结果传输到计算机数据采集设备,实时进行数据采集记录。

2 关键部件设计

根据设计的农林生物质碎料燃烧机的设计额定

功率 $Q=1900\text{ MJ/h}$,确定两种典型生物燃料(玉米秸秆及碎木屑)的消耗量,为炉膛及喂料机构的设计提供依据,其计算公式为^[13]

$$B_0 = \frac{Q}{Q_{net}\eta} \quad (1)$$

式中 B_0 ——燃料喂入量,kg/h
 Q ——燃烧机设计额定功率,kJ/h
 Q_{net} ——燃料低位发热量,kJ/kg
 η ——燃烧机设计热效率,%

炉排面积的计算公式为

$$S = \frac{B_0 Q_{net}}{3600q_R} \quad (2)$$

式中 S ——炉排面积, m^2
 q_R ——炉排面积热强度, kW/m^2

炉膛容积的计算公式为

$$V = \frac{B_0 Q_{net}}{3600q_v} \quad (3)$$

式中 V ——炉膛容积, m^3
 q_v ——炉膛容积热强度, kW/m^3

通常, q_R 、 q_v 取值范围分别为300~400 kW/m^2 和250~500 kW/m^3 ^[13-14],考虑到秸秆类生物质碱金属含量高,过高的热强度容易发生结渣现象,为此分别取 $q_R=375\text{ kW}/\text{m}^2$ 、 $q_v=350\text{ kW}/\text{m}^3$,计算出 $S=1.55\text{ m}^2$ 、 $V=1.66\text{ m}^3$ 。

炉膛高度与烟气在炉膛内停留时间密切相关,若炉膛太低会造成烟气中某些可燃气体以及微小颗粒未完全燃尽即被排出,造成不必要的热损失。炉膛太高又会增加材料的消耗造成不必要的浪费,因此选择合适的炉膛高度是设计农林生物质燃烧设备的关键。炉膛高度计算公式为

$$H = \frac{V}{S} \quad (4)$$

式中 H ——炉膛高度,m
 计算得出 $H=1.071\text{ m}$,设计时取 H 为1.1 m。

螺旋喂料器关键参数计算公式为^[13,15]

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \varphi \quad (5)$$

其中 $D \geq K^{2.5} \sqrt{\frac{B_0}{\varphi \rho}}$ (6)

$$B_0 = 3600 A v_0 \rho \quad (7)$$

式中 A ——机槽内燃料横断面积, m^2
 v_0 ——燃料的轴向推进速度, m/s
 ρ ——燃料密度, kg/m^3
 D ——螺旋叶片直径,m
 φ ——机槽满载系数
 K ——综合特性系数,取0.049

机槽满载系数 φ 越大,物料输送时滑移面越陡,会增加能量消耗降低输送速度,不利于物料运输,而满载系数过小又易导致物料堆积,通常 φ 的取值范围为 0.25 ~ 0.35,设计时取 $\varphi = 0.3$,计算得出 $D = 0.12 \text{ m}$, $A = 0.0034 \text{ m}^2$, $v_0 = 0.11 \text{ m/s}$ 。

农林生物质碎料的结构比较松散,密度低、质量轻,着火温度低,在燃烧机低负荷运行下容易引起料仓回火回烟现象,为此设计防回火回烟部件,结构如图3所示。

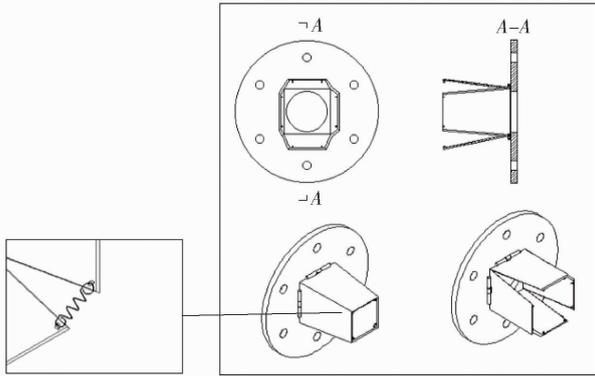


图3 防回火回烟部件示意图

Fig.3 Schematic of fire protection cover

防回火回烟部件由4块梯形板组合成一锥型结构,梯形板两侧采用弹簧连接,目的是当物料密集而阻力较大时,梯形板受物料挤压适当张开,确保物料顺利通过。当锥筒内物料松散时,则梯形板恢复至闭合状态,并对物料起到一定的压缩作用,使物料压实后进入炉内,不致因炉内高温烟气反窜至进料系统内而发生回烟回火现象。因此,该防回火回烟部

件既可以有效防止物料堵塞,又能降低因生物质碎料过于松散而导致的回火回烟现象。另外,在喂料过程中引入的二次风,配合防回火回烟部件,可以进一步降低回火回烟现象的发生,使高温烟气不致反吹进料仓。

由于燃烧机炉内燃烧温度较高,最高达 1300°C ,为保证长时间运行炉体结构不受破坏,设计双层炉外壁冷风压保护,内外炉壁间为 30 mm 的冷风层,内壁内侧再加上厚度为 80 mm 的耐火泥层,冷风层内通冷却风,使风绕内炉壁环绕一周后由出风口排出,风量设计为 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。燃烧机的出火口为套筒结构形式,内侧为炉膛燃料燃烧喷出的高温火焰,内外套筒间为炉壁冷却风,既可以再对出火口进行冷却保护,延长使用寿命,又可以为出火口未燃尽挥发分提供氧气,确保充分燃烧。

3 原料制备与燃烧效率计算

选用的玉米秸秆及碎木屑均取自山东省淄博市,碎木屑为花卉林木修剪部分。采用 93ZRG-680 型多功能粉碎机将两种原料切成 $0 \sim 30 \text{ mm}$ 的碎料,首先进行自然晾晒,用 JSP-100 型高速多功能粉碎机进行一级粉碎,在干燥箱内 105°C 下干燥 24 h ,用于工业分析。再取部分原料,经 POLYMIX 数字式超细研磨仪进行二级研磨,用于原料的元素分析及热值分析。

表1为经 93ZRG-680 型多功能粉碎机处理后,总质量各为 5 kg 的碎木屑及玉米秸秆碎料在不同筛网孔径下的筛分数据。

表1 不同筛网孔径下的物料筛分数据

Tab.1 Material screening data with different mesh sizes

燃料种类	参数	筛网孔径/mm									
		0~2	2	3	4	6	8	10	12	14	≥ 20
碎木屑	筛孔上剩余质量/kg	0.53	0.51	0.4	0.91	0.68	0.25	0.28	0.45	0.56	0.43
	占总质量百分比/%	10.6	10.2	8.0	18.2	13.6	5.0	5.6	9.0	11.2	8.6
玉米秸秆	筛孔上剩余质量/kg	0.3	0.17	0.25	0.54	0.37	0.19	0.48	0.60	1.22	0.88
	占总质量百分比/%	6.0	3.4	5.0	10.8	7.4	3.8	9.6	12.0	24.4	17.6

由表1可知:碎木屑在筛网孔径 $4 \sim 6 \text{ mm}$ 之间最多,占总质量的 31.8% ,其他孔径筛网之间物料质量占总质量之比大体相当。玉米秸秆在筛网孔径 14 mm 以上的物料质量占总质量的 42% ,这是由于相比于碎木屑,玉米秸秆所含纤维素、半纤维素更高,不易粉碎且秆叶间相互连接,造成大块物料所占比重较大^[16]。

表2为试验所用碎木屑及玉米秸秆碎料的工业分析与元素分析。从表2可以看出,两种燃料的挥发分含量、低位热值大体相同,其中挥发分占总质

量的 70% 以上。玉米秸秆灰分含量为 4.41% ,高于含量为 3.42% 的碎木屑,说明玉米秸秆燃烧后易形成飞灰,造成燃烧机及后续受热面的结渣、积灰、磨损及腐蚀等问题。两种燃料的 C、O 含量较高,之和约占总质量的 90% ,其次为 H 含量,且玉米秸秆的 H 含量略高于碎木屑。两种燃料的 S 元素含量较少,尤其碎木屑仅为 0.06% ,可知两种燃料燃烧后产生的烟气中 SO_2 含量较少。玉米秸秆的 N 元素含量几乎是碎木屑的 3 倍,达到 0.87% ,因此需要注意烟气脱 NO_x 处理,以满足相关大气污染物排放标准。

表2 生物质燃料的工业分析与元素分析(空气干燥基)

Tab.2 Industrial analysis and element analysis of maize straw and wood chips

燃料种类	工业分析(质量分数)/%				元素分析(质量分数)/%					低位热值/ (kJ·kg ⁻¹)
	水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	S	N	O	
玉米秸秆	6.08	4.41	73.62	15.89	41.12	5.71	0.25	0.87	47.64	15 622
碎木屑	6.32	3.42	73.46	16.80	39.66	4.88	0.06	0.34	51.64	16 247

注:O含量通过差减法得到。

1 kg 喂料量下,燃烧机燃烧所需的理论空气量为^[17]

$$V_0 = \frac{V_{O_2}}{0.21} = \frac{1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 5.56 \frac{H_{ar}}{100} - 0.7 \frac{O_{ar}}{100}}{0.21} \quad (8)$$

式中 C_{ar} 、 H_{ar} 、 O_{ar} ——燃料(收到基)的碳、氢、氧元素的质量百分比

V_{O_2} ——理论需氧量

燃烧效率是燃料在炉膛内燃烧充分程度的重要指标,在一定程度上可以反映玉米秸秆、碎木屑在农林生物质燃烧机中不同工况下的燃烧效果^[18]。

$$\eta_c = 1 - q_1 - q_2 \quad (9)$$

$$\text{其中 } q_1 = 3.2\alpha\varphi(\text{CO}) \quad (10)$$

式中 η_c ——燃烧效率, %

q_1 ——可燃气体不完全燃烧热损失率, %

q_2 ——固体不完全燃烧热损失率, %

α ——过量空气系数

$\varphi(\text{CO})$ ——烟气中的 CO 质量分数, %

对于生物质燃烧机而言,未燃尽的灰分主要残留在灰渣内,则此时 q_2 的计算公式^[18]可简化为

$$q_2 = \frac{33\,727A_{ar}C_z}{Q_r(100 - C_z)} \quad (11)$$

式中 A_{ar} ——原料收到基灰分质量分数, %

C_z ——灰分中未燃尽的炭质量分数, %

Q_r ——原料收到基热值, kJ/kg

4 燃烧特性试验

4.1 炉膛内及出火口温度变化分析

生物质热态配风试验是在 70% 的额定进料量下,配合 1.2 倍过量空气系数的空气,通过调节一、二次风配比分别为 0.9:0.1、0.8:0.2、0.7:0.3 时,研究燃烧机炉膛内温度、出火口温度以及烟气中 CO、CO₂、O₂ 含量和颗粒物浓度的变化,以得到较优的燃烧工况条件。

农林生物质燃烧机的炉膛内最高温度在 1 300℃ 以上^[19-20],选用型号为 WRP-230 的 S 型热电偶进行温度测量。利用型号为 GASBOARD-3100 红外烟气分析仪对燃烧烟气中 CO、CO₂、O₂ 含量进行检测,利用 LB-5C 型激光粉尘检测仪对烟气中的颗粒物浓度 PM2.5、PM5 和 PM10 进行检测。

图 4、5 为燃烧机进入稳定燃烧阶段后,出火口未加外接烟筒时,试验所用碎木屑、玉米秸秆在一、二次风配比分别为 0.9:0.1、0.8:0.2、0.7:0.3 时出火口的火焰情况。



图 4 不同一、二次风配比下碎木屑燃烧效果图

Fig.4 Combustion of wood chips with different PPSAs



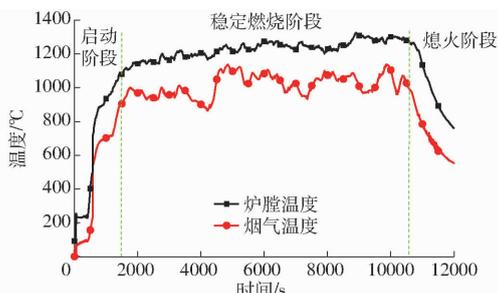
图 5 不同一、二次风配比下玉米秸秆燃烧效果图

Fig.5 Combustion of maize straws with different PPSAs

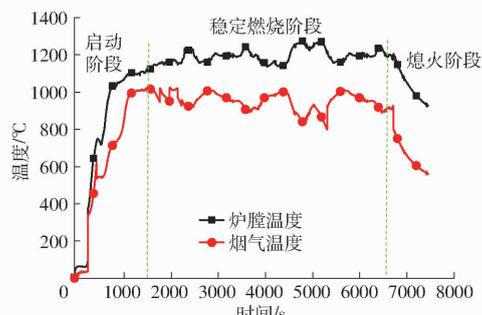
可以明显看出,当一、二次风配比为 0.9:0.1,不管是碎木屑还是玉米秸秆,其燃烧机出火口处的火焰束较短,并且伴有大量的烟尘,说明燃烧效果不好。当一、二次风配比为 0.8:0.2 时两种燃料的出火口火焰最好,可见火焰较长且黑烟较少,并且碎木屑燃烧的火焰束相较于玉米秸秆的更加饱满。当一、二次风配比为 0.7:0.3 时,也可在出火口处见到明显火焰,但火焰长度不及一、二次风配比为 0.8:0.2 时。

图 6、7 分别为碎木屑、玉米秸秆在一、二次风配比分别为 0.8:0.2 和 0.7:0.3 时的温度变化情况。

由图 6、7 可以看出,试验过程中在稳定的碎木屑、玉米秸秆碎料进料量下,燃烧过程大致可分为 3 个阶段:启动阶段、稳定燃烧阶段和熄火阶段。燃烧机开始运行后,由于炉膛温度较低需不断吸热,造成炉膛内温度和出火口温度逐渐上升。进入稳定燃烧阶段后,农林生物质碎料燃烧机的炉内温度均比出火口温度高,如以碎木屑为燃料,一、二次风配比为 0.8:0.2 时,炉膛内温度在 (1 200 ± 100)℃ 间变化,出火口烟气温度在 (1 000 ± 100)℃ 间变化,炉内平均温度比出火口温度高 200℃ 左右,且出火口温度与炉膛内温度的变化趋势一致。



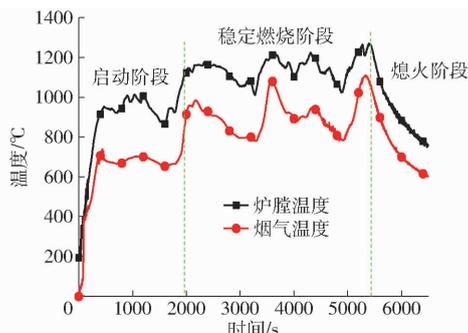
(a) 碎木屑



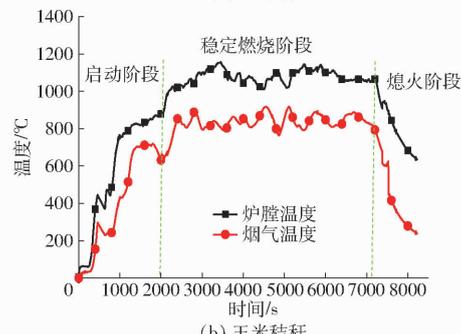
(b) 玉米秸秆

图 6 一、二次风配比为 0.8:0.2 时碎木屑、玉米秸秆燃烧温度变化曲线

Fig. 6 Changes in combustion temperature of wood chips with PPSA of 0.8:0.2



(a) 碎木屑



(b) 玉米秸秆

图 7 一、二次风配比为 0.7:0.3 时碎木屑、玉米秸秆燃烧温度变化曲线

Fig. 7 Changes in combustion temperature of wood chips with PPSA of 0.7:0.3

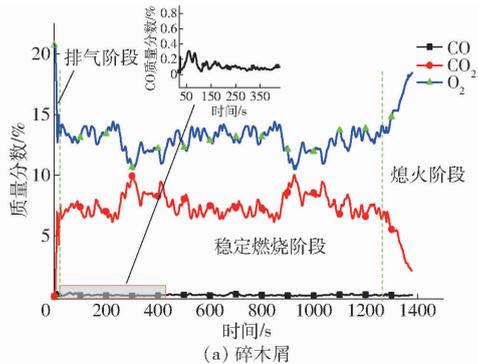
另外,进入稳定燃烧阶段后,与燃烧碎木屑相比,以玉米秸秆为燃料时,在相同一、二次风配比下,不论炉膛内温度还是出火口烟气温度均低 100℃左右。这是由于虽然碎木屑、玉米秸秆的低位热值相当,但是由于碎木屑较密实,单位质量大,燃烧过程

主要在炉膛底部容易燃尽,而玉米秸秆结构松散,燃烧过程容易出现压火焰现象,造成上层物料难以接触高温火焰,燃烧不充分,且质量轻容易被吹出炉膛外,从而因燃烧不充分而造成炉内温度低。

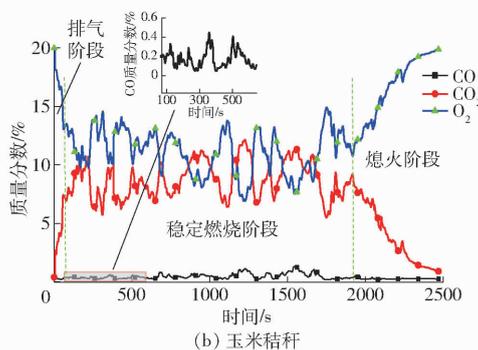
与一、二次风配比为 0.8:0.2 相比,当一、二次风配比为 0.7:0.3 时,进入稳定燃烧阶段后,无论以碎木屑或玉米秸秆为燃料,炉内温度、出火口温度均比前者时低,约低 100℃左右,并且温度变化区间大,不稳定。由此可知,当一、二次风配比为 0.8:0.2 时,玉米秸秆与碎木屑燃烧较充分,燃烧效果好,这是由于当一、二次风配比为 0.7:0.3 时,虽然二次风所占比例增大,有利于挥发分燃烧,但同时二次风扰动能力加强,导致大量燃料未充分燃烧即被吹出炉膛外,造成炉内温度、出火口温度较低。经试验测量,农林生物质碎料燃烧机的最长火焰距离可达 2 000 mm,连续运行 24 h 未发生堵塞与回火现象。

4.2 烟气组分含量及颗粒物浓度变化分析

图 8 和图 9 分别为碎木屑、玉米秸秆在进入稳定燃烧阶段后,一、二次风配比分别为 0.8:0.2、0.7:0.3 时烟气中 CO、CO₂、O₂ 含量变化情况。



(a) 碎木屑



(b) 玉米秸秆

图 8 一、二次风配比为 0.8:0.2 时碎木屑、玉米秸秆燃烧烟气变化曲线

Fig. 8 Changes of flue gas from wood chips combustion with PPSA of 0.8:0.2

由图 8、9 可以看出,在稳定燃烧阶段测量烟气,以碎木屑、玉米秸秆为燃料,无论一、二次风配比为 0.8:0.2 还是 0.7:0.3,开始时都出现了 O₂、CO、CO₂ 含量快速变化的现象,主要是由于红外烟气分析仪的气体收集管内存在一部分空气,进行烟气成

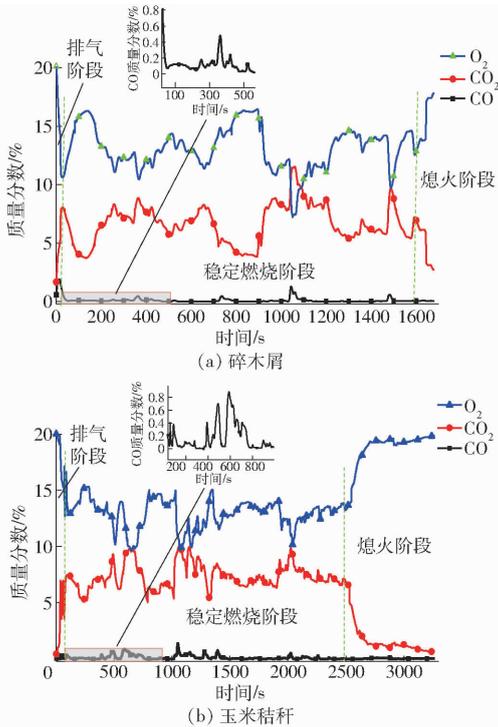


图9 一、二次风配比为0.7:0.3时碎木屑、玉米秸秆燃烧烟气变化曲线

Fig.9 Changes of flue gas from wood chips combustion with PPSA of 0.7:0.3

分检测时这部分空气被迅速排出。

在稳定燃烧阶段,当以碎木屑为燃料时,在一、二次风配比为0.8:0.2和0.7:0.3两种工况下,烟气中 O_2 含量在 $(13 \pm 2)\%$ 间波动, CO_2 含量在 $(7 \pm 2)\%$ 间波动, CO 含量在 $(0.2 \pm 0.1)\%$ 间波动,可见进入稳定燃烧阶段,排放的烟气中 O_2 、 CO 、 CO_2 含量相对稳定。烟气中 CO_2 与 CO 含量的变化趋势一致,这是由于当 CO_2 浓度过高时与未燃尽的炭反应,从而导致 CO 含量升高^[21]。与一、二次风配比为0.8:0.2相比,当一、二次风配比为0.7:0.3时,烟气中的 O_2 、 CO 、 CO_2 变化幅度更大,变化周期变长,也说明了该工况条件下燃烧机内燃烧不稳定。与燃烧碎木屑相比,当以玉米秸秆为燃料时,一、二次风配比为0.8:0.2或0.7:0.3时,燃烧烟气中 O_2

表4 生物质灰成分质量分数

Tab.4 Biomass ash composition mass fraction

试样	成分								%
	SiO_2	Al_2O_3	P_2O_5	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	
碎木屑灰	6.90	1.76	3.60	2.03	71.90	5.96	4.93	0.32	
玉米秸秆渣	53.30	3.26	3.77	2.05	13.40	5.33	16.00	0.50	
玉米秸秆灰	39.90	2.87	3.75	1.82	15.70	6.00	11.60	0.43	

由于玉米秸秆的碱金属含量较高,容易造成较严重的灰分结渣问题,影响炉内配风,由图10可见,设计的农林生物质碎料燃烧机燃烧玉米秸秆碎料产生的结渣硬度低,易破碎,利于自动排灰设计。

平均含量均略低,约低1%, CO 含量略高,而 CO_2 含量相差不大。

生物质燃烧产生的烟气中 $PM_{2.5}$ 、 PM_5 、 PM_{10} 颗粒物会对农业生产、大气环境和人体健康产生重要危害,其燃烧产生的颗粒物主要是碱金属和碱土金属化合物通过均质/异质凝结产生^[22]。当一、二次风配比为0.8:0.2时,设计的农林生物质碎料燃烧机以碎木屑为燃料时,检测的烟气中 $PM_{2.5}$ 、 PM_5 、 PM_{10} 变化范围分别为 $56 \sim 72 \text{ mg/m}^3$ 、 $38 \sim 51 \text{ mg/m}^3$ 、 $43 \sim 63 \text{ mg/m}^3$ 。以玉米秸秆为燃料时,烟气 $PM_{2.5}$ 、 PM_5 、 PM_{10} 的变化范围分别为 $36 \sim 43 \text{ mg/m}^3$ 、 $21 \sim 35 \text{ mg/m}^3$ 、 $38 \sim 42 \text{ mg/m}^3$,检测结果低于GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》中所规定的排放标准。

4.3 燃烧灰分及结渣成分分析

对燃烧机燃烧后炉膛内残留的碎木屑灰分、玉米秸秆灰分以及玉米秸秆结渣(图10)的表面物质进行含碳率检测、灰分成分含量检测,结果如表3、4所示。



图10 玉米秸秆碎料燃烧后结渣

Fig.10 Combustion slagging of maize stalks scrap

表3 炉渣含碳率检测结果

Tab.3 Carbon content rate of slag

样品	碎木屑灰分	玉米秸秆灰分	玉米秸秆结渣
含碳率/%	3.59	5.51	0.22

从表3可以看出,玉米秸秆燃烧所得灰分的含碳率最高,其次为碎木屑灰分,玉米秸秆碎料燃烧所得结渣的含碳率最低,这表明碎木屑燃烧更加充分,燃尽效果优于玉米秸秆,而玉米秸秆碎料燃烧所得

结渣,因碱金属与 SiO_2 形成低熔点化学物,造成结渣表面含碳率很低。

由表4可知,玉米秸秆、碎木屑燃烧所得的灰分,主要化学成分有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 等,其中 K、Na、Si 等是导致积灰、结渣的主要元素。生物质燃烧灰分中的 Si 与 K 等碱金属含量越高,其燃烧时越容易结渣,而当 Ca 等碱土金属元素含量较高时,则不易结渣。由表4可以看出,玉米秸秆燃烧所得灰分中 SiO_2 含量高达 39.9%,玉米秸秆渣中的 SiO_2 含量更达到了 53.3%,同时其 K_2O 含量也远大于碎木屑,这与玉米秸秆燃烧易结渣的特性相符。碎木屑燃烧所得灰分 CaO 含量高达 71.9%,远大于玉米秸秆燃烧所得灰分以及结渣中的含量,也说明了碎木屑不易结渣的原因。

根据式(9)~(11),结合表3和不同工况条件下排放的 CO 平均含量,可计算出:当以玉米秸秆为燃料时,在一、二次风配比为 0.8:0.2 和 0.7:0.3 两种工况下燃烧效率约为 98.7%、98.9%;当以碎木屑为燃料时,在一、二次风配比为 0.8:0.2 和 0.7:0.3 两种工况下燃烧效率约为 98.8%、98.5%。

在农林生物质燃烧机烟筒出口处使用 JCP-HD 型林格曼黑度计进行观测,1 min 观测 3 次,连续观测 30 min 并拍照记录。无论是以玉米秸秆还是碎木屑为燃料,在一、二次风配比为 0.8:0.2 和 0.7:0.3 两种工况下烟气的林格曼黑度小于等于 1 级,符合 GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》要求。

5 结论

(1)设计了一种额定功率为 1 900 MJ/h 的农林生物质碎料燃烧机,其炉膛容积 $V = 1.66 \text{ m}^3$,炉膛高度 $H = 1.071 \text{ m}$,炉排有效面积为 1.55 m^2 ,进料口采用防回火罩设计,冷风压保护技术保护炉壁。

(2)农林生物质碎料燃烧机进入稳定燃烧阶段后,以碎木屑为燃料,一、二次风配比为 0.8:0.2 时,炉膛内温度在 $(1\ 200 \pm 100)^\circ\text{C}$ 间变化,出火口烟气温度在 $(1\ 000 \pm 100)^\circ\text{C}$ 间变动;在一、二次风配比为 0.8:0.2 和 0.7:0.3 两种工况下,烟气中 O_2 、 CO_2 、CO 质量分数分别在 $(13 \pm 2)\%$ 、 $(7 \pm 2)\%$ 、 $(0.2 \pm 0.1)\%$ 间波动。以玉米秸秆为燃料时,在相同一、二次风配比下,与燃烧碎木屑相比,炉膛内温度和出火口烟气温度均低 100°C 左右;在一、二次风配比为 0.8:0.2 和 0.7:0.3 两种工况下,与燃烧碎木屑相比,燃烧烟气中 O_2 平均含量约低 1%,CO 含量略高,而 CO_2 含量相差不大。

(3)玉米秸秆燃烧所得灰分中 SiO_2 含量达 39.9%,玉米秸秆渣中 SiO_2 含量高达 53.3%,同时其 K_2O 含量也远大于碎木屑,说明玉米秸秆在设计农林生物质碎料燃烧机中燃烧更容易结渣。同时,当一、二次风配比为 0.8:0.2 时,以碎木屑和玉米秸秆为燃料,烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 变化范围分别为 $56 \sim 72 \text{ mg/m}^3$ 、 $38 \sim 51 \text{ mg/m}^3$ 、 $43 \sim 63 \text{ mg/m}^3$ 和 $36 \sim 43 \text{ mg/m}^3$ 、 $21 \sim 35 \text{ mg/m}^3$ 、 $38 \sim 42 \text{ mg/m}^3$,满足锅炉大气污染物排放标准要求。

参 考 文 献

- [1] 白阳,闫文刚,刘志刚. 生物质燃料致密成型方式的发展现状与展望[J]. 林业机械与木工设备, 2018, 46(9): 10-15.
BAI Yang, YAN Wengang, LIU Zhigang. Development status and prospects of biomass briquette fuel dense molding method[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2018, 46(9): 10-15. (in Chinese)
- [2] 李安心,张传佳,涂德浴,等. 水稻秸秆热压成型工艺参数试验研究[J]. 中国农业气象, 2016, 37(1): 26-35.
LI Anxin, ZHANG Chuanjia, TU Deyu, et al. Lab-scale experimental study on the compressing molding parameters under hot condition for rice straw pellets[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(1): 26-35. (in Chinese)
- [3] WANG Xuebin, HU Zhongfa, WANG Guogang, et al. Influence of coal co-firing on the particulate matter formation during pulverized biomass combustion[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(3): 450-458.
- [4] 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/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 280-285.
LI Yameng, ZHOU Xuehua, HU Jianjun, et al. Design and test of direct-fired stove using biomass pellet fuel[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 280-285. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171035&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.035. (in Chinese)
- [5] WAN Kaidi, WANG Zhihua, XIA Jun, et al. Numerical study of SO_2 impact on potassium emissions in pulverized-biomass combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2019, 193: 19-30.
- [6] NIELSEN I E, ERIKSSON A C, LINDGREN R, et al. Time-resolved analysis of particle emissions from residential biomass combustion-emissions of refractory black carbon, PAHs and organic tracers[J]. Atmospheric Environment, 2017, 165: 179-190.
- [7] BOHLEER L, GORTLE G, KRAIL J, et al. Carbon monoxide emission models for small-scale biomass combustion of wooden pellets[J]. Applied Energy, 2019, 254(15): 1-12.

- [8] MELONI E, CALDERA M, PALMA V, et al. Soot abatement from biomass boilers by means of open-cell foams filters[J]. *Renewable Energy*, 2019, 131: 745 – 754.
- [9] 王毅, 杜金宇, 张全国, 等. 生物质锅炉多效烟气净化装置设计与性能研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 313 – 318.
WANG Yi, DU Jinyu, ZHANG Quanguo, et al. Research on multiple purification device design and performance of biomass boiler flue gas[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 313 – 318. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180240&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.040. (in Chinese)
- [10] MUSTAFAB G, KIAH M H M, IRSHAD A, et al. Rich biomass combustion: gaseous and particle number emissions[J]. *Fuel*, 2019, 248: 221 – 231.
- [11] KOVACS H, DOBO Z, KOOS T, et al. Influence of the fuel gas temperature on the behavior of metals during biomass combustion[J]. *Energy Fuels*, 2018, 32(7): 7851 – 7856.
- [12] 孙建涛, 潘宇峰, 冯敏芹. 一种固定炉排生物质锅炉的设计[J]. *工业锅炉*, 2013(3): 8 – 10, 14.
SUN Jiantao, PAN Yufeng, FENG Minqin. Design of one kind of biomass-fired boiler with stationary grate[J]. *Industrial Boiler*, 2013(3): 8 – 10, 14. (in Chinese)
- [13] 张丽娜, 文美纯, 李真西, 等. 高效生物质直燃炉的设计[J]. *装备制造技术*, 2017(5): 72 – 73, 90.
ZHANG Li'na, WEN Meichun, LI Zhenxi, et al. Design of high efficiency biomass direct fired furnace[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2017(5): 72 – 73, 90. (in Chinese)
- [14] 夏许宁, 刘圣勇, 刘洪福, 等. 生物质颗粒燃烧器的设计与性能测试[J]. *农机化研究*, 2017, 39(1): 227 – 231.
XIA Xuning, LIU Shengyong, LIU Hongfu, et al. Design and performance test of biomass pellet burner[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(1): 227 – 231. (in Chinese)
- [15] 郝铎. 生物质燃料燃烧机的设计与试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
HAO Duo. Design and test of biomass fuel combustion furnace[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [16] 赵绘婷, 刘振, 任秋鹤, 等. 玉米秸秆纤维素高效分离工艺研究[J]. *河南科学*, 2019, 37(8): 1328 – 1333.
ZHAO Huiting, LIU Zhen, REN Qiuhe, et al. Efficient separation technique of cellulose from corn straw[J]. *Henan Science*, 2019, 37(8): 1328 – 1333. (in Chinese)
- [17] 姜戎雅, 张昌超, 李余康, 等. 户用智能多功能生物质采暖炉的设计与燃烧实验[J]. *可再生能源*, 2019, 37(2): 173 – 178.
JIANG Xuya, ZHANG Changchao, LI Yukang, et al. Design and experiment of intelligent multi-functional biomass heating furnace[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(2): 173 – 178. (in Chinese)
- [18] 汪军. 工程燃烧学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [19] 王建伟, 刘宁, 蒋登辉, 等. 生物质直燃与气化对碳化硅石墨坩埚腐蚀的影响[J]. *可再生能源*, 2019, 37(6): 809 – 813.
WANG Jianwei, LIU Ning, JIANG Denghui, et al. Corrosion effect of graphite-sic crucible heated by direct combustion/gasification of biomass[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(6): 809 – 813. (in Chinese)
- [20] FEBRERO L, GRANADA E, PATINO D, et al. A comparative study of fouling and bottom ash from woody biomass combustion in a fixed-bed small-scale boiler and evaluation of the analytical techniques used[J]. *Sustainability*, 2015, 7: 5819 – 5837.
- [21] JAN M, JIRÍ B. Heating and emission properties of waste biomass in burner furnace[J]. *Research in Agricultural Engineering*, 2017, 63(1): 16 – 22.
- [22] 成伟, 陈汉平, 杨海平, 等. 棉秆燃烧过程中的颗粒物排放特性[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 223 – 228.
CHENG Wei, CHEN Hanping, YANG Haiping, et al. Emission characteristics of particulate matter during combustion of cotton stalk[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(19): 223 – 228. (in Chinese)