

生物质热解气燃烧装置设计与燃烧特性试验

姚宗路 仇利 赵立欣 贾吉秀 丛宏斌 胡二峰

(农业部规划设计研究院农业部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125)

摘要: 针对目前生物质热解气中焦油去除困难、焦油能量难以利用等问题, 结合现有燃气燃烧器相关技术, 开展了生物质热解气直接燃烧技术与试验。燃烧器理论耗气量为 $2 \sim 5 \text{ m}^3/\text{h}$, 通过理论计算确定了燃烧器参数, 设计了卧式燃烧室并安装烟气催化裂解装置及烟气检测装置, 搭建了热解气燃烧试验平台, 并对热解气的燃烧特性进行了试验研究。以花生壳为原料, 在碳化温度 500°C 、滞留时间 30 min 的条件下进行连续热解碳化, 产生的高温热解气直接通入燃烧设备。结果表明, 燃烧设备性能较好, 热解气燃烧过程稳定, 燃烧效率达到 98.5%, 在催化剂的作用下, 燃烧效率提高到 98.9%, 满足设计要求。

关键词: 生物质热解气; 燃烧器; 直接燃烧; 催化燃烧; 排放特性

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0299-07

Gas Burner Design and Experiment on Emission Characteristics of Biomass Pyrolysis Gas

YAO Zonglu ZHANG Li ZHAO Lixin JIA Jixiu CONG Hongbin HU Erfeng

(Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agriculture Residue, Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China)

Abstract: Tar removal and energy recovery of tar are two main problems, which hinder the development of the clean and efficient combustion technology of pyrolysis gas. Based on the combustion technology of fuel gas, the design of a new type of pyrolysis gas burner and study on the pyrolysis gas combustion and emission characteristics were focused on. According to the quantity of the pyrolysis gas, the treatment capacity of the burner was $2 \sim 5 \text{ m}^3/\text{h}$. The parameters of the burner were determined by theoretical calculation. The experiment platform consisted of gas burner, combustion chamber, catalytic cracking equipment and flue gas analyzer. Pyrolysis gas originated from peanut shell continuous carbonization flowed into gas burner without condensing. The carbonization temperature and retention time were 500°C and 30 min. The direct combustion test and catalytic combustion experiment were carried out, respectively. The experiment results indicated that the gas burner was working well. The combustion of pyrolysis gas was stable and combustion efficiency could amount to 98.5%. However, under the action of the catalyst, the combustion efficiency was increased to 98.9%, while the nitrogen oxides produced was increased by $20 \text{ mg}/\text{m}^3$. The research results provided an important reference for the development of high efficiency clean utilization technology of pyrolysis gas. The location of the catalytic cracking unit would need to be studied.

Key words: biomass pyrolysis gas; pyrolysis gas burner; direct combustion; catalytic combustion; emission characteristics

引言

以生物质为原料的热解技术能够实现能源清洁

高效地转化^[1-3], 生物质热解产生的高温气体称为生物质热解气, 经除尘、冷凝、除焦等工艺过程分别得到不可冷凝气(即生物质燃气)和可冷凝气。可

冷凝气主要为生物质焦油、木醋液和水蒸气,生物质燃气的主要成分是 CO 、 CO_2 、 H_2 、 N_2 、 CH_4 等,因还含有一定量的 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_2H_4 和 C_3H_6 等大分子高热值气体,较生物质热解气化气具有较高的热值,可以直接燃烧用于供热设备^[4]。生物质焦油作为一种热解副产物,成分十分复杂,多为苯的衍生物和多环芳烃^[5],在高温下呈气态,当温度在 200°C 以下时,大部分焦油会凝结成黑褐色粘稠状的液体,易堵塞管道,阻碍设备的正常运行,同时焦油中的有毒物质对人的身体健康也会造成极大的伤害,热解焦油的去除和再利用技术还需进一步研究。

现有生物质能源技术中,美国、加拿大和英国等发达国家的研究较为先进,尤其燃气燃烧器技术发展十分成熟,其结构设计、零部件安装方式和尺寸均有国际标准,具有代表性的有德国 DUNGS 公司、意大利 BAITE、美国 STEINEN 公司、英国 NUWAY 公司,国外的燃烧机对空燃比的掌控十分精准,使燃烧机燃烧效率平均达到 99.96%,较多用于发电和区域供热并实现了商业化应用^[6-8]。我国 20 世纪 80 年代末开始对燃气燃烧器进行开发研究,90 年代中后期,在全国范围内陆续建立了多家制造燃烧器的企业,河南农业大学农业部可再生能源重点开放实验室、河南省科学院能源研究所、东北林业大学等各

科研院所对生物质燃气燃烧器进行了研究,并取得了一定进展^[9-10],但是国内外主要集中于研究热解气中可燃气的燃烧,对含有焦油的粗热解气的直接燃烧研究较少。

针对目前生物质热解气中焦油去除困难,热解技术后端产业链不健全等问题,本文结合现有燃气燃烧器相关技术,采用生物质热解气直接燃烧原理,设计一种生物质热解气燃烧设备,将热解产生的高温热解气直接通入燃烧器燃烧,此外,在燃烧过程中加入白云石催化剂,探索催化剂对生物质热解气燃烧特性的影响。

1 生物质热解气基本特性

1.1 组分分析

如表 1 所示,生物质热解气的主要成分为生物质燃气和气态下的液体产物,可燃物占气态产物的比例达到 68%。其中生物燃气为主要成分,约占 60%,生物燃气主要由 CO 、 H_2 、 CH_4 等组成,并含有一定量的 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_2H_4 和 C_3H_6 等大分子高热值气体,热值可达到 20 MJ/m^3 ,具有较好的可燃性^[11-14]。轻重油约占 8%,通过对油样检测发现,其组成多达上百种,多为苯的衍生物和多环芳烃等高分子物质,热值可达 30 MJ/m^3 。木醋液占比 33%,多为溶于水的酸性物质,成分较为复杂。

表 1 热解气组分

Tab. 1 Pyrolysis gas components

生物质燃气		重油		轻油		木醋液	
组分	体积分数/%	组分	质量分数/%	组分	质量分数/%	组分	质量分数/%
H_2	12.56	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	6.29	$\text{C}_{10}\text{H}_2\text{O}$	3.67	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	11.69
O_2	0.42	$\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$	6.43	C_9H_8	3.24	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	9.03
N_2	2.05	$\text{C}_8\text{H}_{10}\text{O}$	4.36	$\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$	6.43	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	27.97
CO_2	25.76	$\text{C}_8\text{H}_{12}\text{O}$	17.15	$\text{C}_{11}\text{H}_{22}$	6.12	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	11.57
CO	32.34	$\text{C}_{15}\text{H}_{12}$	2.58	$\text{C}_{10}\text{H}_{10}$	2.74	$\text{C}_5\text{H}_3\text{N}$	2.78
CH_4	13.95	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$	2.25	$\text{C}_8\text{H}_{10}\text{O}$	6.52	$\text{C}_5\text{H}_4\text{O}_2$	6.46
C_2H_6	3.07	$\text{C}_{17}\text{H}_{16}$	2.81	$\text{C}_8\text{H}_{12}\text{O}$	5.73	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	2.69
C_2H_4	4.86	$\text{C}_{18}\text{H}_{18}$	5.60	$\text{C}_9\text{H}_{12}\text{O}$	1.66	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	3.18
其他	4.99	其他	52.53	其他	63.89	其他	24.63

1.2 燃烧计算

进行热解气燃烧计算,首先确定燃烧所需空气量,理论空气需要量是指每立方米燃气按燃烧反应计量方程式完全燃烧所需要的空气量,也是燃气完全燃烧所需的最小空气量^[15-17]。空气量的确定用于风机的选型和阀门的选配,将热解气的组分代入

$$V_0 = \frac{1}{21} \left[0.5V_{\text{H}_2} + 0.5V_{\text{CO}} + V_{\text{CO}_2} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) V_{\text{C}_m\text{H}_n} + 1.5V_{\text{H}_2\text{S}} - V_{\text{O}_2} \right] \quad (1)$$

式中 V_0 ——理论空气需要量, m^3

V_{H_2} 、 V_{CO} 、 $V_{\text{C}_m\text{H}_n}$ 、 $V_{\text{H}_2\text{S}}$ 、 V_{O_2} ——燃气中各可燃组分体积分数, %

m 、 n ——分子数

得稳定燃烧所需空气量理论值为 1.13 m^3 。然后确定着火浓度的上限和下限,燃气燃烧极限值是由生物质热解气的化学反应速度或释放能量的速度决定的,常用体积分数(%)或体积密度(mg/L)表示。生物质热解气含量高于着火极限的上限值或低于下限值,均不能着火燃烧。将各单一可燃气体的着火浓度的上限和下限分别代入

$$L = \frac{100}{\sum \frac{X_i}{L_i} 100 + \sum \frac{X_i}{L_i} \frac{D}{100 - D}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 X_i ——不考虑惰性气体时各单一可燃气体成分的体积分数, %, 见表 1

L_i ——不考虑惰性气体时各单一可燃气体的着火浓度极限, %

D ——惰性气体在生物质热解气中所占的体积分数, 取 2.3%

得热解气的着火浓度的下限 16.2%, 上限为 79.56%。还需确定燃气供气速度, 燃气供气速度是影响燃气燃烧过程中脱火和回火的主要原因^[18-20], 鉴于生物质燃气供气压力的波动性, 为保证稳定燃烧, 取供气速度略大于燃气燃烧时火焰传播速度。将各单一可燃气体的火焰传播速度代入

$$U_m = (1 - 0.01V_{N_2} - V_{CO_2}) \frac{\sum \frac{X_i U_i^i}{L_m}}{\sum \frac{X_i}{L_m}} \quad (3)$$

式中 U_m ——燃气的火焰传播速度, m/s

V_{N_2} ——混合气体中 N_2 的体积分数, 取 1.72%

V_{CO_2} ——混合气体中 CO_2 的体积分数, 取 24.95%

U_i^i ——各单一可燃气体的最大火焰传播速度, m/s

L_m ——对于各单一可燃气体, 达到最大火焰传播速度时, 该可燃气体占混合物的体积分数, %

可得火焰燃烧速度为 0.913 m/s。

2 工作原理和整机结构

2.1 工作原理与工艺流程

热解气燃烧试验平台的设计遵循适用性、安全性、稳定性和维修简便等原则, 如图 1 所示, 主要由 2 个燃烧系统组成: 热解气直接燃烧系统和催化燃烧系统, 催化燃烧系统是在进行催化燃烧时, 先将燃烧室温度加热至 700℃, 以便白云石发挥催化裂解的效果。在燃烧室的后端加设烟气换热装置, 用以降低烟气温度以便搭载烟气检测装置。

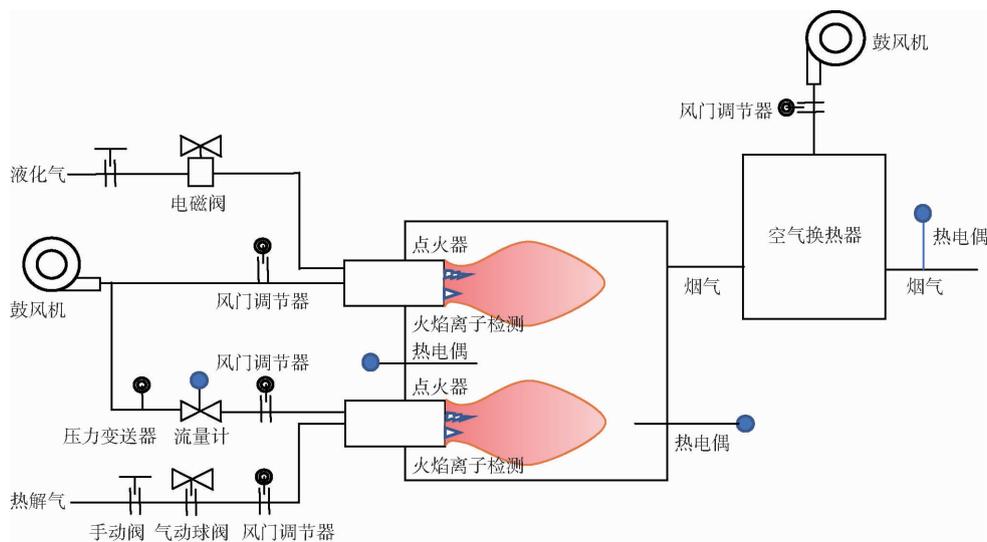


图 1 设备流程图

Fig. 1 Equipment flow chart

2.2 整机结构与工作过程

生物质热解气燃烧设备结构如图 2 所示, 主要由供风系统、燃烧器、燃烧室、催化裂解器、冷却器、排烟管道、控制柜及支架组成。供风系统由风机、液化气供风管路、生物质热解气供风管路及各管路的控制阀门组成。催化裂解装置由 310S 不锈钢加工而成, 置于火焰外焰处, 以获得较高的催化温度。换热装置采用风冷列管换热器原理将高温热烟气从 800℃ 降到 200℃ 以下, 以满足烟气分析仪采样时对温度的要求。燃气管路设置两级电磁阀门保护, 故障时及时切断燃料。整个控制系统采用 PLC 总体

控制, 通过组态软件开发了人机界面, 操作方便, 运行安全可靠。

生物质热解气燃烧器工作时, 首先启动风机, 吹扫燃烧室, 20 s 后打开生物质热解气燃气管路阀门, 生物质热解气与空气在燃烧器喷嘴处混合, 同时高压点火器打火, 当光敏传感器检测到燃烧火焰存在时, 关闭高压点火, 并经控制器将生物质热解气电磁阀门锁死, 保证处于开启状态。在进行催化燃烧时先启动液化气燃烧系统, 达到预定温度后再进行热解气催化燃烧试验, 同时关闭液化气燃烧系统。燃烧后的高温烟气进行风冷换热, 降温后进行烟气监测

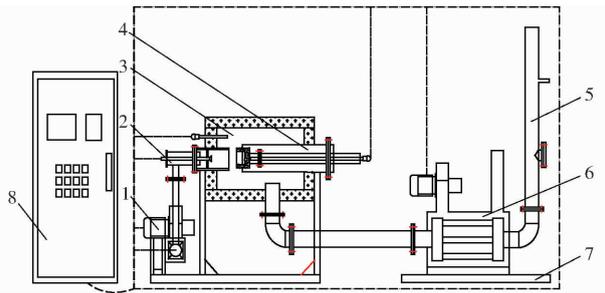


图2 生物质热解气燃烧设备结构简图

Fig. 2 Schematic diagram of combustion device of biomass pyrolysis gas

1. 供风系统 2. 燃烧器 3. 燃烧室 4. 催化裂解器 5. 排烟管道 6. 冷却系统 7. 支架 8. 控制柜

并排空。

2.3 主要技术参数

生物质热解气燃烧设备的主要技术参数如表2所示。

表2 生物质热解气燃烧设备的主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters of biomass pyrolysis gas combustion equipment

参数	数值/类型
燃烧器类型	扩散式
燃气体积/(m ³ ·h ⁻¹)	2~5
燃气管道接口尺寸/mm	DN13
点火时间/s	20
生物质热解气温度/℃	≤400
催化裂解温度/℃	700
液化气输出功率/kW	12
热解气燃烧器最大输出功率/kW	约5.2

3 关键部件设计

3.1 燃烧器

综合扩散式燃气燃烧器运行温度、不回火等优点,并结合生物质热解气本身的燃气特性,如生物质热解气温度高、压力低、燃气中含有生物质焦油等特性,生物质热解气燃烧设备采用扩散式结构。如图3所示,扩散式燃烧器主要由生物质热解气管道、空气管道、连接法兰、导流盘及稳焰板等组成。

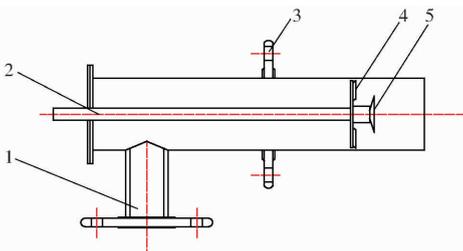


图3 生物质燃气燃烧器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of biomass gas burner

1. 空气管道 2. 燃气管道 3. 连接法兰 4. 导流盘 5. 稳焰板

如表2所示,根据热解气产量2~5 m³/h,选定燃气体积3 m³/h进行设计计算,根据式(1)可确定燃烧所需空气量为3.39 m³/h。燃气和空气出口截面速度和喷口直径计算式为

$$v = \sqrt{\frac{2PT_0}{\zeta\rho T}} \quad (4)$$

$$d = \sqrt{\frac{F}{\frac{\pi}{4}}} = \sqrt{\frac{4L}{0.0036\pi v}} \quad (5)$$

式中 v ——燃气在出口截面的流速,m/s

P ——燃烧器前燃气压力,取50 Pa

ρ ——密度,燃气取0.82 kg/m³,空气取1.29 kg/m³

T ——燃气温度,取573 K

T_0 ——开尔文温度,取273 K

ζ ——燃烧器阻力系数,取1.5

F ——燃气喷口截面积,mm²

L ——燃气体积,取3 m³/h

d ——喷口直径,mm

代入相关参数可确定燃气流速为6.2 m/s,燃气喷口直径为13.1 mm。空气流速为5.5 m/s,空气喷口直径为14.8 mm^[21]。其中,为将燃料与空气进行稀态均相预混,避免局部出现富燃料区而产生高温炽热点,设计了空气导流盘,使喷出的气体具有轴向、径向和切向3个分速度,最终形成热解气的旋转运动,形成径向和轴向压力梯度,当剧烈旋转时,气体沿轴向发生反流动,产生内部回流区,可以极大提高混合程度。引用燃气轮机旋流器叶片设计原理,叶片的轴向长度可由叶片遮盖度 K 表示,即

$$K = \frac{S_x}{S_f} \quad (6)$$

式中 S_x ——单个叶片在根圆上所遮盖的弧长

S_f ——邻近2个叶片根部之间弧长

根据相关设计经验^[22-26],当旋流器叶片遮盖度为1.0~1.5,叶片角度为40°~55°,叶片数目为8~12时能够获得较好的燃烧性能,结合燃烧器实际尺寸,取导流盘的叶片为12片,叶片倾角40°,遮盖度为0.94。

3.2 控制系统

生物质热解气燃烧平台的控制系统流程如图4所示,根据设备需求开发两种控制模式,模式1为热解气直燃系统,即在常温状态下,直接通入高温热解气直接燃烧;模式2为热解气催化燃烧系统,其中先用液化气将燃烧室温度加热至700℃后再接入热解气,以达到较好的催化燃烧效果。控制系统选用三

菱 FN1N-14MR-001 PLC, 用于检测火焰信号、控制燃气阀门的开合以及流量计量等, 通信线信息传输采用 485 串行总线通信, 人机交互系统采用组态软件 MCGS 开发的便于操作的设备画面, 用于数据的实时显示和数据存储及导出, 手动控制系统主要是用于阀门的本地操作, 防止因通信故障而造成设备损坏。

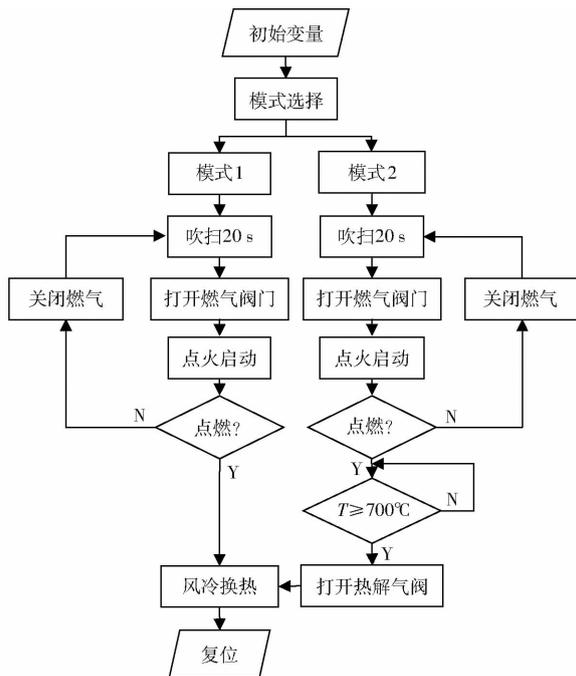


图 4 燃烧器控制系统流程图

Fig. 4 Control system flow chart of burner

4 燃烧试验与结果分析

4.1 试验材料与测试方法

试验设备加工完成后, 在农业部农业废弃物能源化利用重点实验室进行燃烧试验, 图 5 所示为设备三维图及燃烧试验图。

以花生壳为热解炭化原料, 在温度 500℃ 的条件下, 热解时间为 30 min 产生的热解气为燃气原料, 产生的高温热解气约为 3 m³/h。选择粒径为 6~10 mm 白云石为催化剂, 进行催化裂解试验, 试



图 5 设备三维图及燃烧试验图

Fig. 5 3D and test diagrams for combustion equipment

验过程中需要用的测试仪器有马弗炉、电子水分分析仪、快速水分测量仪、英展计重防水秤、德国 rbr 益康多功能烟气分析仪和崂应 3012H 型自动烟尘(气)测试仪等检测仪器。

4.2 结果分析

4.2.1 过剩空气系数对燃烧效率的影响

燃烧效率是指燃气燃烧后实际放出的热量占其完全燃烧后放出热量的比值, 是反映燃气燃烧程度的重要指标。图 6a、6b 分别为热解气直接燃烧和催化燃烧条件下不同过剩空气系数与生物质热解气燃烧效率的关系曲线。由图 6a 看出, 随过剩空气系数增大, 燃烧效率先升高后降低, 当过剩空气系数从 1 增加到 1.16 时, 燃烧效率从 93% 增加到 98.5%, 达到峰值, 随着过剩空气系数继续增大时, 燃烧效率呈下降趋势, 当过剩空气系数为 1.5 时, 燃烧效率降落至 93.5%。分析可知, 随着空气的供给增加, 燃烧反应越完全, 效率越高。但过多的空气进入燃烧室, 表现为空气流速过快, 而将部分未充分燃烧的燃料带走, 进而导致燃烧效率降低。

由图 6b 看出, 在催化剂作用下曲线规律与图 6a 类似, 不同的是燃烧效率的峰值出现了向右偏移, 即当过剩空气系数为 1.21 时催化燃烧效率达到最大, 为 98.9%。由此推断部分生物质热解气与催化剂反应, 大分子焦油等被裂解为小分子易燃物质, 进而增加了燃烧所需的空气量。因此, 白云石作为催化剂促进了生物质热解气的催化燃烧反应, 燃烧效率提高了 0.4 个百分点, 在加入催化剂后供风量相应调大, 保证燃烧过程的充分进行。

4.2.2 过剩空气系数对 NO_x 排放的影响

图 7a、7b 为热解气的过剩空气系数与 NO_x 排放量关系曲线, 由 7a 可以看出, 随着 α 的增大, 燃烧越充分, 火焰温度随之增加, 烟气中 NO_x 的含量也逐渐增多, 当 α 为 1.16 时, NO_x 的质量浓度由 130 mg/m³ 达到最大, 为 170 mg/m³, 之后随过剩空气系数 α 增大而减小。由此可以看出, 当过剩空气系数达到

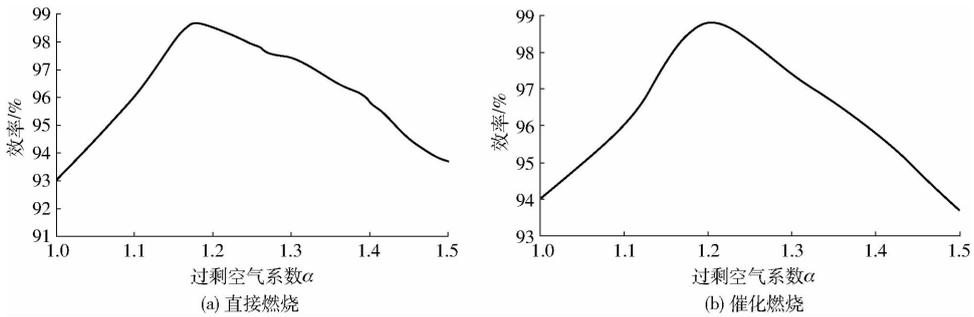
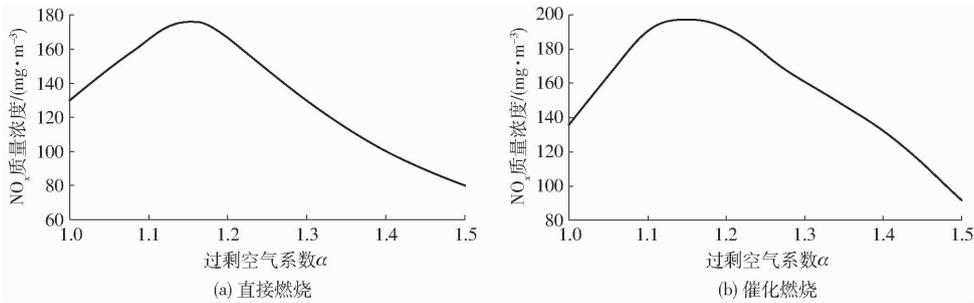


图6 生物质热解气的过剩空气系数与燃烧效率关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between excess air coefficient and thermal efficiency of biomass pyrolysis gas

图7 生物质热解气的过剩空气系数与NO_x排放量关系曲线Fig. 7 Relationship between excess air coefficient of biomass pyrolysis gas and NO_x emission

1.16时,燃烧最充分,使得燃烧室温度升高,造成NO_x达到最大值,但随着供给的冷空气量增加,降低了燃烧温度,从而减少了NO_x的产生量。

对比催化燃烧反应,催化剂作用下当过剩空气系数在1.15时(图7b),NO_x排放量达到最大值,为190 mg/m³,且 α 在1.0~1.4区间内整体催化燃烧的NO_x排放量高于直接燃烧。分析其原因主要是催化裂解装置安装在火焰的外焰处,致使局部高温,从

而增加了NO_x的排放量,因此催化裂解装置的安装位置还需要进行研究改进。

4.2.3 生物质热解气燃烧设备基本性能指标

对生物质热解气燃烧设备进行测试,结果如表3所示,在正常燃烧状态和催化燃烧状态下,燃烧设备性能较好,火焰为淡蓝色、燃烧稳定,燃烧效率可达到98.5%,在催化剂的作用下,燃烧效率提高到98.9%,满足设计负荷。

表3 燃烧设备基本性能指标

Tab. 3 Basic performance indexes of combustion equipment

是否添加催化剂	着火温度/℃	燃烧效率/%	点火持续时间/s	$L_{O_2}/\%$	$L_{CO}/\%$	$L_{NO_x}/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	$L_{CO_2}/\%$
否	常温	98.5	≤20	2.1	0.016	186	26.8
是	700	98.9	≤20	2.4	0.014	194	27.2

5 结论

(1)进行了生物质热解气直接燃烧的研究,研制了热解气直燃燃烧器,安装烟气催化裂解装置及烟气检测装置,搭建了热解气燃烧试验平台,测试结果表明该设备燃烧效率能够达到98.9%,能稳定运行并满足设计负荷。

(2)通过生物质热解气直接燃烧试验,得到了过量

空气系数与燃烧效率、NO_x排放量的关系曲线,测试结果表明,当过剩空气系数为1.16时燃烧效率达到最大,为98.5%,同时NO_x的排放量也为最高值170 mg/m³。

(3)对比有/无催化催化剂(白云石)燃烧试验,结果表明在催化剂作用下燃烧效率有一定程度提高,由98.5%提高到98.9%,但是由于催化裂解装置附近产生局部高温,导致了NO_x的大幅增加,这也是该设备需要改进研究的重点。

参 考 文 献

- 袁振宏,雷廷宙,庄新姝,等.我国生物质能研究现状及未来发展趋势分析[J].太阳能,2017(2):12-19.
YUAN Zhenhong, LEI Tingzhou, ZHUANG Xinshu, et al. Present situation and future development trend of biomass energy research[J]. Solar Energy, 2017(2):12-19. (in Chinese)
- 吴创之,阴秀丽,刘华财,等.生物质能分布式利用发展趋势分析[J].中国科学院院刊,2016,31(2):191-198.
WU Chuangzhi, YIN Xiuli, LIU Huacai, et al. Perspective on development of distributed bioenergy utilization[J]. Bulletin of

- Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(2):191-198. (in Chinese)
- 3 王明峰, 陈晓堃, 蒋恩臣, 等. 基于扫描图像 RGB 分析的生物质灰吸附特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12):212-217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151228&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.028.
- WANG Mingfeng, CHEN Xiaokun, JIANG Enchen, et al. Biochar absorption characteristics based on RGB analysis of scanned images[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):212-217. (in Chinese)
- 4 葛慧, 郭志强, 杨林. 农林生物质替代城镇煤炭供热发展研究[J]. 农业工程, 2016, 6(5):44-48.
- 5 周劲松, 王铁柱, 骆仲决, 等. 生物质焦油的催化裂解研究[J]. 燃料化学学报, 2003, 31(2):144-148.
- ZHOU Jinsong, WANG Tiezhu, LUO Zhongyang, et al. Catalytic cracking of biomass tar[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2003, 31(2):144-148. (in Chinese)
- 6 HU E, ZHU C, ROGERS K, et al. Coal pyrolysis and its mechanism in indirectly heated fixed-bed with metallic heating plate enhancement[J]. Fuel, 2016, 185:656-662.
- 7 NOGENMYR K J, KIEFER J, LI Z S, et al. Numerical computations and optical diagnostics of unsteady partially premixed methane/air flames[J]. Combust Flame, 2010, 157(5):915-924.
- 8 WEI Zheng, MING Xinguo, TERESA Chowa, et al. Sorption properties of greenwaste biochar for two triazine pesticides[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(181):121-126.
- 9 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, CUAN 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)
- 10 崔鹏飞. 富氢生物质气气化燃烧器的结构设计与燃烧特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- CUI Pengfei. Structural design and combustion characteristics study of burners for hydrogen-rich biomass gasification[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- 11 丛宏斌, 赵立欣, 姚宗路, 等. 玉米秸秆连续干馏条件下能量平衡分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7):206-212.
- CONG Hongbin, ZHAO Lixin, YAO Zonglu, et al. Energy balance analysis of corn straw continuous distillation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7):206-212. (in Chinese)
- 12 刘标, 陈应泉, 陈汉平, 等. 农作物秸秆热解多联产技术的应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16):213-219.
- LIU Biao, CHEN Yingquan, CHEN Hanping, et al. Application of cogeneration technology of gas-liquid-solid products pyrolyzed from crop straw[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16):213-219. (in Chinese)
- 13 高英, 袁巧霞, 陈汉平, 等. 生物质水热过程中水热炭理化结构演变特性[J]. 太阳能学报, 2016, 37(12):3226-3232.
- GAO Ying, YUAN Qiaoxia, CHEN Hanping, et al. Structure evolution of hydrochar obtained from hydrothermal treatment of biomass[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(12):3226-3232. (in Chinese)
- 14 陈冠益, 刘聪, 颜蓓蓓, 等. 生物质焦油热解动力学分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(3):529-534.
- CHEN Guanyi, LIU Cong, YAN Beibei, et al. Kinetic analysis of corn-cob tar pyrolysis[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(3):529-534. (in Chinese)
- 15 NARVAEZ I, CORELLA J, ORIO A. Fresh tar elimination over a commercial steam-reform catalyst: kinetics and effect of different variable of operation[J]. Ind Eng Chem Res, 1997, 36(2):317-327.
- 16 HU E, ZENG X, MA D, et al. Effect of the moisture content in coal on the pyrolysis behavior in an indirectly heated fixed-bed reactor with internals[J]. Energy and Fuels, 2017, 31(2):1347-1354.
- 17 侯斌, 吕子安, 李晓辉, 等. 生物质热解产物中焦油的催化裂解[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(1):70-75.
- HOU Bin, LÜ Zian, LI Xiaohui, et al. Catalytic cracking of tar derived from biomass pyrolysis[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2001, 29(1):70-75. (in Chinese)
- 18 刘明. 生物质气化及其燃气燃烧试验研究与分析[D]. 天津:天津大学, 2008.
- LIU Ming. Experimental research and analyse on biomass gasification and biogas combustion[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- 19 袁隆基, 罗彬. 燃煤锅炉改造中的燃气燃烧器设计研究[J]. 煤炭科技, 2002(2):35-36.
- YUAN Longji, LUO Bin. Research on design of gas burner in coal fired boiler reconstruction[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2002(2):35-36. (in Chinese)
- 20 YAN B, LI B, BAUDOIN E, et al. Structures and stabilization of low calorific value gas turbulent partially premixed flames in a conical burner[J]. Exp. Therm. Fluid Sci., 2010, 34(3):412-419.
- 21 姜正候. 燃气燃烧与应用[M]//金志刚. 燃气燃烧计算. 北京:中国建筑工业出版社, 2014:114-123.
- 22 黄行良, 朱志, 叶文. 燃气轮机燃烧室预混结构性能的数值研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(9):697-703.
- HUANG Xingliang, ZHU Zhi, YE Wen. Numerical study on the in a gas performance of premixing structure turbine combustor[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(9):697-703. (in Chinese)
- 23 高玉宽, 陈炳荣, 朱小云, 等. 卧式内燃燃油和燃气锅炉的结构和设计[J]. 热能动力工程学报, 1999, 14:122-125.
- GAO Yukuan, CHUEN Bingrong, ZHU Xiaoyun, et al. Structure and design of horizontal internal combustion oil and gas fired boiler[J]. Journal of Thermal Energy and Power Engineering, 1999, 14:122-125. (in Chinese)
- 24 赵立欣, 贾吉秀, 姚宗路, 等. 生物质连续式分段热解炭化设备研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8):221-226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160828&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.028.
- ZHAO Lixin, JIA Jixiu, YAO Zonglu, et al. Equipment for biomass continuous grading pyrolysis[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8):221-226. (in Chinese)
- 25 蒋恩臣, 苏旭林, 王明峰, 等. 生物质连续热解反应装置的变螺距螺旋输送机设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2):121-124. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130223&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.023.
- JIANG Enchen, SU Xulin, WANG Mingfeng, et al. Design of variable pitch spiral conveyor for biomass continual pyrolysis reactor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):121-124. (in Chinese)
- 26 HU E, ZENG X, WANG F, et al. Effects of metallic heating plates on coal pyrolysis behavior in a fixed-bed reactor enhanced with internals[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(3):2716-2721.