

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.039

# 生物质热解焦油燃烧试验系统设计与试验

贾吉秀 赵立欣 孟海波 丛宏斌 姚宗路 马腾

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

**摘要:** 生物质热解焦油作为热解炭化或气化过程的副产物,难以去除且危害较大。通过对热解焦油的理化性质分析,发现其具有较高的热值,燃烧后可以为热解设备提供热源,实现能量的循环利用。针对热解焦油雾化效果差、直接燃烧不稳定等问题,设计了二次雾化喷嘴,并提出一种生物质热解焦油伴气燃烧的工艺;采用一定量的热解气作为助燃剂,为热解焦油燃烧提供稳定的火焰,设计了热解焦油燃烧试验系统。燃烧试验表明,该燃烧器的焦油燃烧量为 20~55 kg/h,达到设计要求。当雾化空气压力为 0.6 MPa、热解焦油压力为 0.2~0.4 MPa、热解气压力为 0.3~0.5 kPa 时,燃烧器燃烧稳定,火焰明亮。通过烟气分析仪发现燃烧烟气中 CO 和 NO<sub>x</sub> 含量较高,表明在燃烧室中的一次燃烧并未达到理想的燃烧效果。

**关键词:** 生物质; 热解焦油; 伴气燃烧; 燃烧平台

**中图分类号:** S216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)12-0334-06

## Design and Experiment on Biomass Pyrolysis Tar Combustion System

JIA Jixiu ZHAO Lixin MENG Haiibo CONG Hongbin YAO Zonglu MA Teng

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

**Abstract:** Biomass tar is produced as a by-product in the pyrolysis process of biomass, which is difficult to remove and harm to human health. The physical and chemical properties of pyrolysis tar were analyzed and it was found that it had a high calorific value. After combustion, it can provide heat source for pyrolysis equipment and realize energy recycling. Aiming at the problems of poor atomization effect and unstable direct combustion of pyrolysis oil, a secondary atomizing nozzle was designed. And a mixed combustion process of biomass pyrolysis tar and pyrolysis gas was proposed. And a certain amount of pyrolysis gas was used as a combustion supporting agent to provide a stable flame for the combustion of the pyrolysis tar. And a test system for pyrolysis oil combustion was developed. The burning test of tar showed that the burning quantity of tar in the burner was 20~55 kg/h, which met the design requirement. And when the atomizing air pressure was 0.6 MPa, the pyrolysis oil pressure was 0.2~0.4 MPa, the gas pressure was 0.3~0.5 kPa, the burner was burned stably and the flame was bright. Through the analysis and test of the flue gas analyzer, it was found that the content of CO and NO<sub>x</sub> in the combustion flue gas was high, which showed that the primary combustion in the combustor did not achieve the ideal combustion effect. Therefore, it was suggested that the next step was to improve the combustion chamber and reduce CO and NO<sub>x</sub> emissions by secondary air distribution combustion of the burned flue gas.

**Key words:** biomass; biomass tar; mixed combustion; combustion platform

## 0 引言

生物质热解技术采用热化学转化的方式将生物

质转化为可燃气、生物炭和热解油等能源产品,主要分为热解炭化、热解气化和热解液化3种以不同目标产物为导向的热解技术,其中生物质热解液化技

收稿日期: 2018-08-13 修回日期: 2018-10-14

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAL04B0301-1)

作者简介: 贾吉秀(1990—),男,工程师,主要从事生物质能源技术与装备研究,E-mail: sdauidjx@163.com

通信作者: 姚宗路(1980—),男,高级工程师,博士,主要从事生物质能源技术研究,E-mail: yaozonglu@163.com

术以生物油为主要产物,产生的生物油可以进一步精制利用,热解炭化和热解气化主要以生物炭或热解气作为目标产物,同时不可避免地会产生热解焦油这一副产物。相对于生物油,热解焦油分子链更加复杂,难以提纯应用,其中挥发酚的质量浓度为 156~312 mg/L,而工业三废排放标准为 0.005 mg/L,农田灌溉水质标准为 1~3 mg/L,所以未经处理的热解焦油直接排放会对环境造成严重污染,因此制约了热解炭化和热解气化技术的发展<sup>[1-3]</sup>。

目前在热解炭化技术领域减少热解焦油排放的途径主要有两种,一是源头减量,即减少热解过程中热解焦油的产生,主要采用热解之前先对原料进行烘焙等预处理方式。经过烘焙预处理 30 min 后,热解焦油的产量可以降低 50%;经过烘焙 15 h 后,热解焦油的产生量由 41.9% 降低至 7.6%<sup>[4-5]</sup>。二是过程消除,即热解焦油产生后,在气态时通过催化裂解或者高温裂解的方式,直接将大分子热解焦油裂解成小分子气体。实验室研究表明,裂解除焦油率可达 98%,但是由于成本及催化剂失活等问题难以工业化应用<sup>[6-7]</sup>。因此,以上两种途径在解决焦油排放污染问题上还存在一定的缺陷。

在热解技术推广应用过程中,很多采用的是外源热解炭化技术,即采用柴油或者热解气燃烧产生的能量,经热风炉为生物质热解提供热源,而柴油作为一种精炼提纯后的高品质燃料,具有较高的成本,热解气作为一种高品质的清洁燃气,可以作为一种后端产品直接用于居民炊事。如果热解焦油能够直接燃烧,产生的高温烟气为热解设备供热,将会完善热解技术工艺链条,产生较大的经济效益和环境效益。经生物质热解焦油的理化特性分析,其热值达 30 MJ/kg,可燃性较好,因此热解焦油与木醋液分离后再燃烧回用是一种可行的技术路线,将热解产生的焦油经过分离过滤后,利用专用热解焦油燃烧器燃烧,产生的高温烟气为前端热解设备提供能量,实现热解过程的炭气联产和热解焦油的能源化利用,既解决了焦油的污染问题,同时提高了热解系统的能量利用效率<sup>[8-9]</sup>。

但是,热解焦油含水率较高<sup>[10-11]</sup>,直接燃烧稳定性较差,易出现间断性熄火现象。基于此,本文提出一种生物质热解焦油伴气燃烧的工艺路线,并设计油气混燃燃烧器。针对热解焦油粘度大、雾化效果差等问题,设计一种二次雾化喷嘴,搭建燃烧试验平台,并进行热解焦油的燃烧试验。

## 1 生物质热解焦油特性分析

不同于热解液化产生的生物油,生物质热解焦

油具有较高的粘度和热值,运动粘度 35~140 mm<sup>2</sup>/s,且随温度升高而降低,在 80℃ 左右达到最低值;通过热解焦油的元素分析,其主要元素为 C,质量分数最高可达 65%,H 元素质量分数为 10%,具有较高的能量密度;S 元素含量极少,质量分数约为 0.05%;热解焦油含水率也比较高,为 10%~20%。

生物质热解焦油的 GC-MS(气相色谱-质谱联用)图谱如图 1 所示,成分非常复杂,主要由有机酸类、酮类、酚类、醛类和稠环芳烃类物质组成,其中小分子组分主要是苯酚类,大分子物质为酰胺类和脂类。组分多为苯环结构,在燃烧过程中分子键难以断裂,因此在燃烧时需要较好的雾化效果和配风控制。

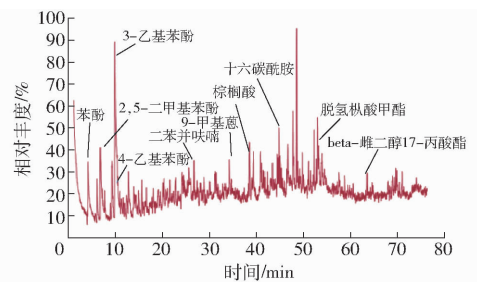


图 1 秸秆热解焦油 GC-MS 图谱

Fig. 1 GC-MS map of straw pyrolysis tar

## 2 工作原理和整机结构

### 2.1 生物质热解焦油伴气燃烧工艺流程

生物质热解焦油伴气燃烧工艺流程如图 2 所示。采用玉米秸秆在 600℃ 绝氧条件热解产生的生物质热解焦油为燃料,以生物质热解气为助燃剂,整个工艺流程分为雾化空气控制、热解焦油控制、热解气控制和燃烧烟气换热等工艺流程。

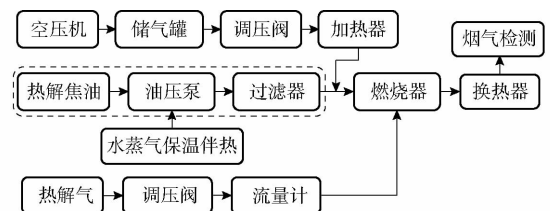


图 2 生物质热解焦油伴气燃烧工艺流程

Fig. 2 Process flow of biomass pyrolysis tar with gas combustion

(1) 热解焦油控制:由热解焦油的运动粘度可以看出,其在室温(20℃)下流动效果极差,在 80℃ 时具有较好的流动性,因此在热解焦油输送的整个过程中采用水蒸气进行保温伴热,保证其较好的流动性。利用油压泵将热解焦油增压到 0.5 MPa,旁路设置调压阀门可调节油压,热解焦油进入燃烧器之前先经过篮式过滤器清除大粒径(大于等于 0.5 mm)的杂质,防止喷头堵塞,篮式过滤器采用并

联设计,可切换使用<sup>[12-13]</sup>。

(2)雾化空气控制:由于热解焦油等重油粘度较大,采用传统压力雾化方式难以达到理想的雾化效果,因此本文采用二次空气雾化原理,提高热解焦油液滴的雾化效果。采用空压机将空气压缩到储气罐中提供一个稳定高压气源,压力最大为0.8 MPa,再通过调压阀设置不同的空气压力,达到理想的雾化效果,最后经过加热器将雾化空气加热到80℃后进入雾化喷嘴对热解焦油实施雾化,加热雾化空气是避免热解焦油雾化过程中由于温度降低而影响雾化效果。

(3)热解气控制:热解气主要作为助燃剂使用,为热解焦油燃烧提供稳定的火焰,主要进行压力控制和流量控制,用以调节助燃火焰的大小。

(4)燃烧烟气换热:主要是采用变频的高压风机对燃烧室直接进行空气换热降温,再通过列管换热器,对热解焦油燃烧产生的高温烟气换热降温,降温后的烟气控制为200℃以下,以便进行烟气检测分析。

## 2.2 整机结构及工作过程

热解焦油燃烧器的整体结构如图3所示,主要由空气供气装置、热解焦油供油装置、热解气供气装置、燃烧器、燃烧腔、换热器以及采样装置组成。其中燃烧器主要包括鼓风机、高压点火器和雾化喷头;燃烧室设有火焰观察孔,用于观测火焰长度和查看燃烧状态;燃烧室和烟气换热室一体化设计,烟气换热室采用列管换热原理,热烟气流经列管内侧,冷空气流经列管外侧,该结构很大程度减少了安装空间,实现了烟气的高效换热。

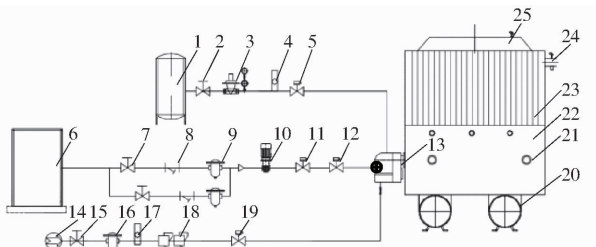


图3 生物质焦油燃烧试验平台结构示意图

Fig.3 Schematic of combustion platform for biomass tar combustion

1. 高压气体罐 2、15. 手动阀 3. 调压器 4. 空气流量计 5. 空气电磁阀 6. 储油罐 7. 焦油手动阀 8. Y型过滤器 9. 篮式过滤器 10. 油泵泵 11、12. 焦油电磁阀 13. 燃烧器 14. 热解气 16. 过滤器 17. 燃气流量计 18. 减压阀 19. 燃气电磁阀 20. 鼓风机 21. 观察孔 22. 高压风机 23. 列管换热器 24. 烟气出口 25. 换热空气出口

设备工作时,将热解焦油加入储油罐,并设定加热温度为80℃,连接燃气管路;打开空气供气装置系统阀门,调节空气压力,进行管路吹扫;之后打开

燃气阀门,将压力减小至0.3 kPa,开始点火启动,当光敏传感器检测到燃烧火焰存在时,关闭高压点火,并将燃气配气电磁阀锁死,之后再打开油路阀门和油压泵,调节热解焦油雾化压力,之后通入燃烧器进行燃烧;开启高压风机对燃烧器和烟气换热,高压风机与温度信号采用闭环控制原理,保证烟气出口温度在200℃以下;将烟气分析仪插入烟气出口处进行烟气成分检测,燃烧结束后,利用雾化空气对热解焦油管路吹扫清理,关闭各项电源。

## 2.3 关键技术参数

生物质热解焦油燃烧器的焦油设计燃烧量为20~55 kg/h,热解气设计燃烧量为2~4 m<sup>3</sup>/h,雾化空气设计压力为0.3~0.8 MPa,燃烧室的设计尺寸为长2 m、宽1.5 m、高1 m。热解焦油采用二次空气雾化原理,焦油压力在0.2~0.5 MPa之间可调控。

## 3 关键部件设计

### 3.1 燃烧器设计

如图4所示,燃烧器主要由热解焦油燃烧支路和热解气燃烧支路组成,其中热解气管路通过三通阀门将总气路分为2个并联的支路,分别位于燃油燃烧器喷头的上下两侧,为热解焦油的燃烧提供稳定火源。

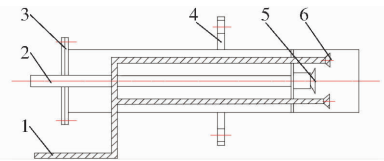


图4 燃烧器结构示意图

Fig.4 Schematic of burner structure

1. 热解气管路 2. 热解焦油管路 3. 连接法兰 4. 支撑架 5. 热解焦油喷头 6. 热解气喷头

设计的热解气燃烧仅作为伴气燃烧,因此设计流量不宜过高,为了保证试验要求,设计的热解气供气量为2~4 m<sup>3</sup>/h,压力为0.2~0.6 kPa,热解气流速和喷口截面积计算公式为

$$v = \sqrt{\frac{2pT_0}{\zeta\rho T}} \quad (1)$$

$$F_1 = \sqrt{\frac{L}{0.0036v}} \quad (2)$$

式中  $v$ ——燃气在出口截面的流速, m/s

$p$ ——燃烧器前燃气压力, 400 Pa

$\rho$ ——燃气密度, 取 0.82 kg/m<sup>3</sup>

$T$ ——燃气温度, 取 1 173 K

$T_0$ ——开尔文温度, 取 273 K

$\zeta$ ——燃烧器阻力系数, 取 1.5

$F_1$ ——燃气喷口截面积,  $\text{mm}^2$

$L$ ——燃气用量, 取  $3 \text{ m}^3/\text{h}$

取热解气流量为  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ , 压力为  $0.4 \text{ kPa}$ , 代入式(1)、(2)可得燃气流速为  $12.3 \text{ m/s}$ , 燃气喷口截面积为  $2.6 \text{ mm}^2$ , 即每个单独燃气喷口截面积为  $1.3 \text{ mm}^2$ <sup>[14-16]</sup>。

### 3.2 热解焦油雾化喷头设计

空气雾化主要分为外混式雾化和内混式雾化, 外混式喷嘴的雾化介质从喷嘴喷出后, 与燃油开始瞬间混合, 雾化介质的效用迅速下降, 加长了雾化、混合、燃烧的过程, 难以达到较好的雾化效果。内混式高压介质雾化喷嘴的燃油与雾化介质在混合室内充分混合后, 油气混合物再喷射出去, 克服了外混式喷嘴的缺点, 较外混喷嘴更适合热解燃油的雾化<sup>[17-19]</sup>。

本设计采用内混式雾化原理, 如图 5 所示, 整体结构分为雾化空气外腔、油腔和雾化空气内腔, 最外层为雾化空气外腔, 中间层为油腔, 最内层为雾化空气内腔, 其中油腔的缩口端斜面四周均匀布置 12 个旋流喷头。第 1 次雾化发生在雾化空气外腔与油腔之间, 热解焦油经过油腔后由环形布置的旋转喷头喷出, 每个喷头两侧设置旋流槽, 雾化空气外腔的高压空气经过旋流槽与旋转喷头喷出的热解焦油液滴相撞, 形成一次雾化; 第 2 次雾化发生在雾化空气内腔与外壳之间, 高压空气经过雾化空气内腔后与一次雾化的液滴相混合, 对液滴进行二次雾化, 再经总喷头喷出, 该结构设计迫使热解焦油滴经历两次雾化过程, 达到较好的雾化效果。

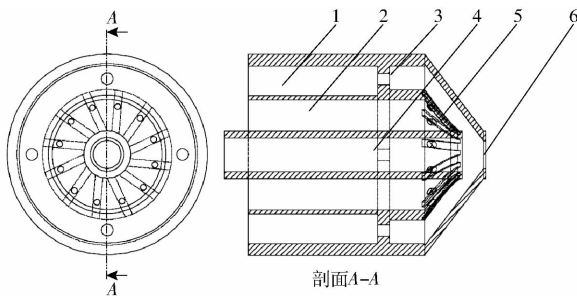


图 5 燃烧喷头设计图

Fig. 5 Design drawing of combustion nozzle

1. 雾化空气外腔 2. 油腔 3. 雾化空气通路 4. 雾化空气内腔
5. 旋流喷头 6. 总喷头

#### (1) 燃油喷口参数计算

燃油喷口设计参数包括喷口直径和截面积, 主要与流量和压差有关。计算公式为<sup>[20-21]</sup>

$$D_1 = 1.13 \sqrt{\frac{707q_{mf}}{u_1 \sqrt{\Delta p p_1}}} \quad (3)$$

$$S_1 = \frac{S}{12} = \frac{1}{48} \pi D_1^2 \quad (4)$$

式中  $D_1$ ——燃油喷口直径,  $\text{mm}$

$q_{mf}$ ——热解焦油流量,  $\text{kg/s}$

$u_1$ ——油嘴出口流量系数, 取  $0.3$

$p_1$ ——热解焦油在工作温度时的密度, 取  $1100 \text{ kg/m}^3$

$\Delta p$ ——燃油绝对压力与混合室临界压力之差, 取  $0.1 \text{ MPa}$

$S$ ——喷油口总截面积,  $\text{mm}^2$

$S_1$ ——旋流喷头截面积,  $\text{mm}^2$

根据工程实际要求, 设计热解焦油流量为  $20 \text{ kg/h}$ , 代入式(3)、(4)可得燃油喷口直径为  $1.25 \text{ mm}$ , 即喷油口总的截面积为  $1.22 \text{ mm}^2$ , 每个小的旋流喷头截面积为  $0.1 \text{ mm}^2$ 。

#### (2) 压缩空气出口参数计算

压缩空气出口主要包括压缩空气内腔出口和外腔出口, 总的截面积计算公式为

$$F_2 = \frac{707q_{ma}}{u_2 \varphi \sqrt{\frac{p_2}{V}}} \quad (5)$$

式中  $F_2$ ——压缩空气喷口总截面积,  $\text{mm}^2$

$q_{ma}$ ——压缩空气流量,  $\text{kg/s}$

$u_2$ ——雾化介质的流量系数, 取  $0.67$

$\varphi$ ——临界截面流量计算系数, 取  $0.48$

$p_2$ ——喷嘴入口处压缩空气的绝对压力, 取  $0.8 \text{ MPa}$

$V$ ——压缩空气比容, 取  $1.2 \text{ m}^3/\text{kg}$

设计过程中将压缩空气内腔喷口截面积  $F_3$  和外腔喷口截面积  $F_4$  取相同数值<sup>[17]</sup>, 即

$$F_3 = F_4 = \frac{F_2}{2} \quad (6)$$

根据空气配比, 取压缩空气流量为  $3 \text{ kg/h}$ , 将各参数代入式(5)、(6)可得压缩空气喷口总截面积为  $2.24 \text{ mm}^2$ , 内腔和外腔截面积各为  $1.12 \text{ mm}^2$ 。

## 4 热解焦油燃烧试验

### 4.1 试验材料与测试方法

燃烧试验平台加工完成后, 在北京市双桥农业农村部农业废弃物资源化利用重点实验室进行燃烧试验, 图 6 为设备试验现场。试验所用的热解焦油和热解气均为  $600^\circ\text{C}$  条件下的玉米秸秆热解产生, 分析热解焦油理化特性, 可知 C、H、N、S 的质量分数分别为  $64.07\%$ 、 $7.56\%$ 、 $2.36\%$  和  $0.67\%$ , 运动粘度  $80 \text{ mm}^2/\text{s}$ , 热值  $29 \text{ MJ/kg}$ , 密度  $1080 \text{ kg/m}^3$ , 含水率  $12\%$ ; 分析热解气的主要组分是  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$ , 质量分数分别为  $32.65\%$ 、 $26.02\%$ 、 $14.26\%$ 、 $14.14\%$  和  $2.43\%$ , 热值为  $18 \text{ MJ/m}^3$ 。经

过燃烧调试,发现当雾化空气压力为 0.6 MPa,热解焦油压力为 0.2 ~ 0.4 MPa,热解气压力为 0.3 ~ 0.5 kPa 时,燃烧器燃烧稳定,火焰明亮,连续稳定燃烧时间达 4 h 以上。

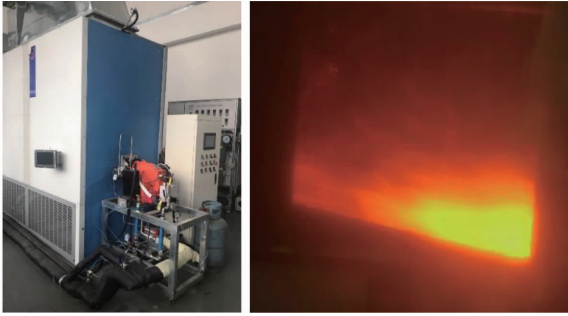


图6 热解焦油燃烧试验平台现场

Fig. 6 Site of pyrolysis tar combustion test platform

#### 4.2 参数标定测试

在稳定燃烧状态下,进行了设备的处理量标定,分别设定热解焦油压力为 0.2 MPa 和 0.4 MPa,设定热解气压力为 0.3 kPa 和 0.5 kPa,共 4 组试验,进行燃油燃烧量和热解气处理量的参数标定,试验结果如表 1 所示,由表 1 可知该燃烧器的热解焦油燃烧量和热解气燃烧量与设计值基本吻合。

表 1 燃烧参数测定结果

Tab. 1 Measurement results of combustion parameters

热解焦油压力/ MPa	热解气压力/ kPa	热解焦油燃烧 量/(kg·h <sup>-1</sup> )	热解气燃烧量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
0.2	0.5	21.6	3.1
0.2	0.3	24.0	2.2
0.4	0.5	50.2	3.0
0.4	0.3	45.6	2.3

#### 4.3 燃料配比燃烧试验

为了探索最佳温度燃烧工况的热解油、气配比,进行了热解焦油与热解气配比的燃烧试验,在稳定燃烧情况下采用德国 rbr 益康烟气分析仪进行烟气组分检测,试验结果如表 2 所示。

燃烧过程中,炉膛外壁采用变频风机进行降温调控,所以 4 组试验过程中炉膛外壁的温度和烟气温度的变化不大。从燃料配比情况来看,随着油气燃料比的增大,CO 排放量和 NO<sub>x</sub> 排放量均是增大的趋势,而且当油气燃料比大于 10.9 kg/m<sup>3</sup> 时,氮氧

表 2 不同燃料配比下燃烧情况

Tab. 2 Combustion conditions at different fuel ratios

油气 燃料比/ (kg·m <sup>-3</sup> )	过剩 空气 系数	CO 排放量/ (mg·m <sup>-3</sup> )	NO <sub>x</sub> 排放量/ (mg·m <sup>-3</sup> )	炉膛 外壁 温度/℃	烟气 温度/ ℃
6.9	1.74	163.44	175.77	403	165
10.9	1.85	257.30	218.83	381	162
16.7	1.40	282.51	234.46	422	178
19.8	1.72	290.57	378.88	425	185

化物已经超过了国家标准,说明在该配比情况下由于热解焦油的燃烧量较大时火焰温度会急剧升高,造成 NO<sub>x</sub> 排放增高,并且热解焦油采用的预混式雾化原理,雾化空气的提前预热也会使 NO<sub>x</sub> 的排放升高。另外,从试验结果看,燃烧过程中即使保持充足的氧气,CO 的排放浓度仍然过高,分析原因一是热解焦油中含有 C 元素占 64.07%,且通过 GC-MS 分析其多为大分子的苯环结构,燃烧过程中分子链难以断裂为小分子结构,其自身特性导致一次燃烧不充分,未能达到较好的燃烧效果;二是由于燃烧室为单烟道设计,结构较为简单,燃烧后的烟气直接排空,导致了燃料与火焰的接触时间不充分,未能将烟气中的 CO 再次燃烧,而造成了 CO 排放量较高的问题。

## 5 结论

(1) 热解焦油燃烧回用工艺技术完善了整个热解系统工艺链条,实现了热解焦油的能源化利用,有效推动了外源式热解工程技术的推广。针对焦油含水率较高、难以稳定燃烧的问题,提出了一种生物质焦油伴热解气燃烧的技术工艺,设计了油气混合燃烧器及热解焦油二次雾化喷头,并搭建了生物质焦油燃烧试验平台。

(2) 燃烧试验表明,在雾化空气压力为 0.6 MPa、热解焦油压力为 0.2 ~ 0.4 MPa、热解气压力为 0.3 ~ 0.5 kPa 时,燃烧器可以持续稳定燃烧。燃料配比燃烧试验表明,热解焦油在伴热解气燃烧过程中,热解焦油的比重不宜过大,建议油气燃料比小于 10.9 kg/m<sup>3</sup>。

(3) 通过燃烧试验过程中的烟气成分分析发现,CO 排放量和 NO<sub>x</sub> 排放量都较大,表明在燃烧室中的一次燃烧并未达到理想的燃烧效果。

## 参 考 文 献

- 1 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)
- 2 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)
- 3 王素兰. 生物质热解油热物理特性与燃气净化装置的研究[D]. 郑州:河南农业大学,2000.  
WANG Sulan. Experiment study of the thermophysical characteristics of tar and the purifier of biomass gasification system [D]. Zhengzhou:Henan Agricultural University,2000. (in Chinese)
- 4 JANEWIT W, BUNDIT F, NAKORN W. Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011, 92:99-105.
- 5 ROBERT J S, COLIN E S, WILL M. The impact of hydrothermal carbonisation on the char reactivity of biomass [J]. Fuel Processing Technology,2018,177:152-158.
- 6 周劲松,王铁柱,骆仲浚,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)
- 7 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.
- 8 丛宏斌,赵立欣,孟海波,等. 生物质热解多联产在北方农村清洁供暖中的适用性评价[J]. 农业工程学报,2018,34(1):8-14.  
CONG Hongbin, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Applicability evaluation of biomass pyrolytic poly-generation technology on clean heating in northern rural of China[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(1):8-14. (in Chinese)
- 9 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](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)
- 10 朱锡锋,郭涛,陆强,等. 生物油雾化燃烧特性试验[J]. 中国科学技术大学学报,2005,35(6):856-860.  
ZHU Xifeng, GUO Tao, LU Qiang, et al. Research on the characteristics of bio-oil combustion[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2005,35(6):856-860. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 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 Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(3):529-534. (in Chinese)
- 13 赵志峰. 生物质焦油热解特性的实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.  
ZHAO Zhifeng. Research on high temperature pyrolysis of biomass-tar using experiments [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2010. (in Chinese)
- 14 姚宗路,仇利,赵立欣,等. 生物质热解气燃烧装置设计与燃烧特性试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):299-305. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20171236&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171236&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.036.  
YAO Zonglu, ZHANG Li, ZHAO Lixin, et al. Gas burner design and experiment on emission characteristic of biomass pyrolysis gas[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):299-305. (in Chinese)
- 15 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(2):122-125.  
GAO Yukuan, CHEN 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(2):122-125. (in Chinese)
- 16 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.
- 17 WEI Zheng, MING Xinguo, TERESA C, et al. Sorption properties of greenwaste biochar for two triazine pesticides [J]. Journal of Hazardous Materials,2010,181:121-126.
- 18 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 performance of premixing structure turbine combustor[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2016,36(9):697-703. (in Chinese)
- 19 NIU S L, HAN K H, LU C M. Characteristic of coal combustion in oxygen carbon dioxide atmosphere and nitricoxide release during this process[J]. Energy Conversion& Management, 2011,52(1):532-537.
- 20 侯凌云,侯晓春. 喷嘴技术手册[M]. 2版. 北京:中国石化出版社,2010:67-69.
- 21 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)