

# 外加热式生物质连续热解设备 燃气净化系统的研究

兰珊<sup>1,2</sup>, 赵立欣<sup>2</sup>, 姚宗路<sup>2</sup>, 丛宏斌<sup>2</sup>, 郭占斌<sup>1\*</sup>

(1.黑龙江八一农垦大学, 黑龙江大庆163319;

2.农业部规划设计研究院, 农业废弃物秸秆资源化利用重点实验室, 北京100125)

**摘要:**以外加热式生物质热解炭气油联产中试设备为平台,以其工艺技术特点为基础,结合粗热解气的组分特性,提出了一种分级处理、逐级净化的工艺技术方案,主要包括旋风除尘、多级冷凝、静电捕焦、湿法除焦等工艺环节,同时对净化后的燃气进行清洁回用,并分析了安全预警与防爆措施、智能监测与控制系统等辅助技术。

**关键词:**外加热;热解气;净化分离;辅助技术

中图分类号:TK6

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)05-0173-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.05.039

## Research on gas separation and purification technology for biomass continuous pyrolysis facility with external heating

LAN Shan<sup>1,2</sup>, ZHAO Li-xin<sup>2</sup>, YAO Zong-lu<sup>2</sup>, CONG Hong-bin<sup>2</sup>, GUO Zhan-bin<sup>1\*</sup>

(1.Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2.Key Laboratory of Energy Resource Utilization, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China)

**Abstract:** Taking the external heating biomass pyrolysis for carbon-gas-oil pilot combination production equipment as platform, based on its technique characteristics and combined with coarse composition characteristics of pyrolysis gas, a hierarchical processing and step by step purification technology scheme is proposed. The scheme includes cyclone dust removal, multi-stage condensation, electrostatic capture of coke and wet decoking processes. Meanwhile, the fuel gas after purification is recycled, the auxiliary technologies such as safety early warning, explosion-proof measures, intelligent monitoring and control system are analyzed.

**Key words:** external heating; pyrolysis gas; purification and separation; assisting technology

生物质连续热解是过程相对繁杂的热化学,涉及到纤维、半纤维以及木质素的分解,此过程中木质素的热解会带来大量的生物炭,同时产生其他联产副产物,如热解气、焦油和木醋液等<sup>[1-3]</sup>。按加热方式一般可将热解设备分为外热式、内热式和自燃式3种,其中外热式一般采用流动的高温热烟气或电热丝间接加热,优点是温度可控性高,便于调节,操作简单,缺点是能耗较大,换热效率较低<sup>[4]</sup>。

本课题组结合外加热式炭化工作原理和连续热解炭化技术,研制开发了外加热式生物质连续热解炭气油联产中试系统<sup>[5]</sup>,并在此基础上,结合生物质原料的机理特性和粗热解气的组分特征,提出了热解气净化分离及回用的技术工艺方案,实现燃气的高纯度净化和热解副产物的高值化利用。

## 1 外加热式生物质连续热解炭化工艺与设备

### 1.1 工艺过程

外加热式生物质连续热解炭化工艺过程分为连

续热解和热解气净化分离2部分,工艺流程如图1所示。连续热解工艺主要包括密封进料、均匀布料、连续热解、保温炭化等工段。热解气净化分离工艺主要包括除尘、多级组合冷凝、洗气等。

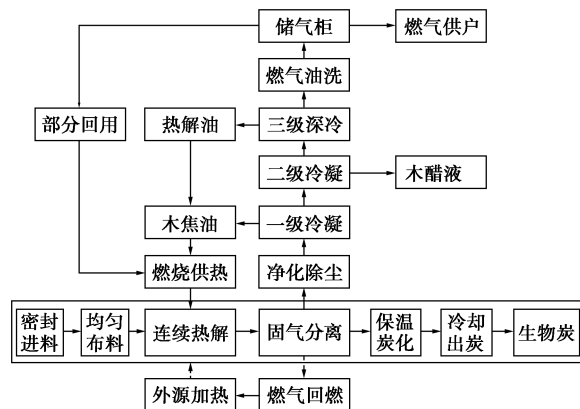


图1 外加热式生物质连续热解炭化技术工艺

(1)密封进料:是指在尽量避免携带空气的情况下,将生物质原料从进料仓密封送入热解反应器内。为保证反应过程的低氧环境及微负压状态,在

上料机内安装料位计,并于进料仓之间建立反馈调节,通过上料机中物料高度来调控进料节奏,达到密封进料的目的。

(2)均匀布料:是指尽可能均匀地将物料由料斗推送至热解反应器内。物料输送的均匀性影响着设备的稳定运行以及成品炭的炭得率和炭品质,同时不同品种的物料由于粒径、含水率和组成形态的不同,需要对应不同的进料转速。

(3)连续热解:是设备工作和工艺流程的核心阶段,物料在热解回转筒内翻转推进,采取外加热的换热方法,多级旋流梯级换热的导热系统,经历烘干脱水和分裂热解 2 个阶段,反应温度的调控、热解时间的长短、换热效率的高低对生物炭的得率和品质均有较大影响。

(4)保温炭化:该阶段处于连续热解和冷却出炭之间,是指生物炭在热解反应后继续保温熟化一段时间,完全反应后再进入到冷却出炭部分。该缓冲阶段能够使生物炭始终保持在较为恒定的温度,避免因温度骤降而导致热解油附着在生物炭上。

(5)冷却出炭:经热解反应和保温炭化后,生物炭处于较高温度,需要适当冷却降低温度,避免与空气直接接触引起自燃。此过程应尽量保持密封状态,减少空气进入前端热解系统,影响炭的品质和系统运行的安全性。

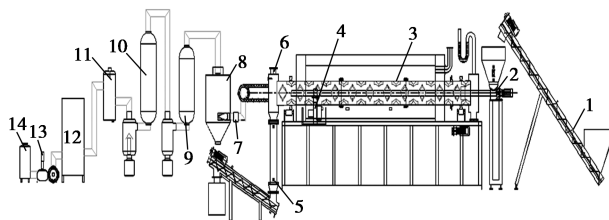
(6)固气分离:采用多级净化、分级冷凝的除杂方法,通过旋风除尘、多级冷凝和洗气等进行组合式除尘脱焦,简洁高效,避免传统工艺和化学方法造成的二次污染<sup>[6]</sup>。

(7)燃气回用:经过前端净化分离,除生物炭外,热解副产品主要包括热解气、焦油和木醋液等,净化后的热解气和焦油可通过燃气燃烧器与燃油燃烧器燃烧加热,为前端换热系统提供热源,既节约能源,又解决了焦油的净化处理等问题。

## 1.2 设备结构与工作原理

如图 2 所示,外加热式生物质连续热解炭气油联产中试系统主要由生物质连续热解炭化系统、热解气分级净化冷凝系统、热解气/焦油燃烧再利用系统、密封均匀布料系统、保温冷却出炭系统,以及在线监测与安全预警系统等组成。

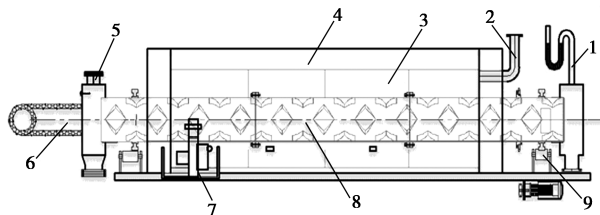
连续热解炭化系统是该设备的主体核心部分,主要由四线螺旋抄板输料结构、多腔旋流梯级换热系统、去尘除焦保温出炭装置、链条齿轮传动机构和密封保温层组成。热解反应区采用双层套筒结构,内层为炭化室,炭化室内壁设有四线螺旋抄板结构,



1—上料机;2—螺旋喂料机;3—炭化设备;4—热风炉;5—冷却出炭装置;6—防爆装置;7—金属阻火器;8—除尘器;9—一级冷凝器;10—二级冷凝器;11—静电捕焦;12—洗气装置;13—鼓风机;14—水封阻火器

图 2 外加热式生物质连续热解炭气油联产中试系统组成示意图

通过调速电机控制回转速度来调控物料的输送速度;反应器外层为高温热烟气套筒,材料选用 316L 耐高温不锈钢,套筒内置环形折流板,2 个半环形折流板交错布置,将加热室分成 4 个腔,并在半环形折流板底部设有烟气流出口,套筒外壁设有燃烧器和引风机,采用间壁式逆流加热。安全防爆装置采用 U 形水封或防爆阀门,当系统内进入大量空气或运行状态异常导致反应室内气压骤变时,可紧急泄压。如图 3 所示。



1—安全防爆装置;2—烟气通道;3—多腔换热系统;  
4—密封保温层;5—去尘除焦出炭装置;6—出口;  
7—燃烧器;8—四线螺旋板抄送结构;9—齿轮传动系统

图 3 回转连续热解设备结构示意图

设备工作时,生物质原料由上料螺旋输送到喂料机中,均匀有序地批次进入到炭化设备,在四线螺旋抄板的推送下,与外层热燃气形成间壁式逆流换热,经过烘干脱水等预处理,在高温下进行分裂热解,在保温炭化区进一步熟化后,经由冷却出炭系统完成炭化。热解副产物经后端净化分离及冷凝装置处理,洁净的热解气和焦油通过燃油/燃气燃烧器进行燃烧,为前端热解反应提供热源。

## 2 热解气净化分离及回用设计

### 2.1 外加热式炭化工艺特点

外加热式连续生物质炭化特点和燃气组分特性是热解气净化分离结构设计的基础和关键。综合前

文可知,外加热式连续生物质炭化工艺特点如下:

①加热方式为外加热,热源由可燃气体燃烧提供,反应室处于缺氧微正压状态;②热解原料主要为粗粉碎的农业生物质废弃物,如玉米秸秆、棉花秸秆、稻壳、花生壳、木屑和果木剪枝等,得到的粗热解气中含粉尘颗粒;③根据热解设备定点温度测控仪实时采集的数据显示,粗热解气由热解回转炉进入后端净化装置时的温度在 200~230℃,此时木醋液与水蒸汽仍处于液化状态,但部分焦油已经开始沉积附着于生物炭上。

稻壳的主要成分包括半纤维素、木质素、纤维素和二氧化硅等,其中 C 元素以及大部分的 H、O 主要存在于纤维素、木质素等有机物中,其他一些金属元素如 K、Ca、Mg、Al、Fe、Mn、P、Na、Zn、Cu 等所占百分比极低,可以忽略不计,不同产地的稻壳,因其气候环境、土壤肥力的不同,内在元素的含量也有所差异,以产地分别为湖北黄冈(表 1<sup>[7]</sup>)和山东济南(表 2<sup>[8]</sup>)的稻壳组分做比较,可知其 C、H、O 等主要元素含量差值较小,N、S 含量极低可忽略不计,因此,后续净化分离阶段可不考虑脱氮去硫等问题,挥发分含量最高接近 70%,燃烧产生的主要气体为 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 等。

表 1 稻壳元素及组分(湖北黄冈产) %

元素	C	H	O	N	S
质量分数	39.71	4.49	34.07	0.49	0.08
组分	水分	灰分	挥发分	固定碳	热值
质量分数	4.04	16.67	63.37	15.92	15718.6

表 2 稻壳元素及组分(山东济南产) %

元素	C	H	O	N	S
质量分数	44.03	4.98	38.39	0.43	0.04
组分	水分	灰分	挥发分	固定碳	热值
质量分数	10.86	12.13	70.62	—	13400

## 2.2 工艺过程及方法选择

粗热解气组分十分复杂,包含大量的粉尘颗粒物,气化的焦油、木醋液和水蒸汽,以及一些成分多样的不可冷凝气体,采用单一传统的方法处理所得的热解气已不能满足少杂质、高热值的纯净热解气要求。因此,采取分级处理、逐级净化的处理方案,物理化学相结合的技术手段,深层去除粗热解气中所含的粉尘颗粒、焦油、木醋液、水蒸汽和不可冷凝气体,进一步提高燃气品质。

依据分级处理、逐级净化的基本净化思路,外加热式生物质连续热解炭气油联产中试系统热解气净

化分离及回用技术的工艺路线如图 4 所示,整体可分为去除粉尘颗粒、木醋液焦油分离、燃气干燥及热解气回用等。

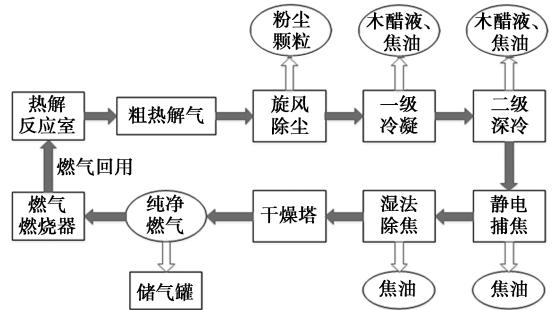


图 4 外加热式生物质热解系统粗燃气净化分离与回用流程图

(1)旋风除尘:旋风除尘的基本原理是使含粉尘颗粒的气流在离心力的作用下做旋转运动,将尘粒从气流中分离并附着于器壁,再借助重力作用使尘粒下落,在机械除尘器中,旋风除尘器效率相对较高,而且操作简单、成本较低<sup>[9]</sup>,主要适用于>3 μm 的非黏性粒子,且可在 1 000℃ 以下高温条件工作。该中试平台粗热解气的初始温度在 270~300℃,含尘气体的黏度较室温(25℃)时有所升高,离心力作用在运动尘粒上的黏性阻力增加,导致分离效率降低,但由于温度较高,尘粒的热聚团作用更为显著,团聚作用下,细微颗粒有形成大颗粒的趋势,有利于分离效率的提高,且除尘的过程会将部分焦油一同去除,因此旋风分离在该净化阶段较为合理高效。

(2)多级冷凝:通过降低粗热解气的温度,使焦油和木醋液转变为液相析出,从而达到净化燃气的目的<sup>[10]</sup>。一级冷凝采用列管式冷凝器,由于此时燃气仍处于较高温度,而木醋液的冷凝温度一般低于 100℃,焦油的冷凝温度一般低于 170℃,但其黏着性较高,所以一级冷凝达到的温度条件只能分离出部分木醋液和焦油。二级深冷是将一级冷凝中没有完全去除的焦油和木醋液进一步净化,同时将粗热解气中的 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 等冷凝成液态氧和液态氮,从而提高燃气质量和纯度。

(3)静电捕焦:是指通过施加高压电场,将空气电离,使燃气中吸附了负离子的杂质在电场力的作用下附着于阳极,当附着在阳极上的杂质自身重力过大时,将会自动落下并从底部流出,达到净化除焦的目的。当氧气体积分数≤1.5%时,静电捕焦的去焦率极高<sup>[11]</sup>。

(4)湿法除焦:选用文丘里洗涤法,是指通过燃

气与旋转喷嘴雾化形成的液滴、液膜或气泡发生碰撞,并将其中的焦油捕捉分离的过程<sup>[12]</sup>。冷凝过程仅是表面上将能冷凝下来的焦油除去了,但液滴和烟雾还不能有效去除,文丘里法利用压力突变的原理,能够将燃气中的焦油做深层处理和清洁。

(5) 热解气回用:是指将净化分离后的纯净热解气,通过燃气燃烧器进行燃烧,为前端的热解炭化提供热源。当设备开始运行至产气量稳定后,纯净的热解气将替代天然气成为热源动力燃料,节约能耗,高效利用热解炭化副产品。

### 2.3 处理后热解气组分分析

在该中试平台进行热解试验,依次为旋风除尘器、一级列管冷凝器、二级深冷器、电捕焦、文丘里洗涤塔、干燥塔等。

将净化处理后的热解气进行组分检测,结果如表 3。测试地点为清华大学热能工程实验室,使用仪器为气相色谱仪(Perkin Elmer 公司,美国),试验原料为稻壳(黑龙江省齐齐哈尔市)。

表 3 处理后热解气组分 %

元素	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>
质量分数	8.54	0.51	2.89	39.32	15.12
元素	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
质量分数	23.36	1.38	2.56	0.17	1.09

由表 3 可以看出,稻壳热解炭化后,产生的粗热解气经净化处理后,O<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 含量较低,CO 和 CH<sub>4</sub> 含量较高,总体热值达到 15.523 MJ/m<sup>3</sup>。

## 3 热解气净化分离及回用辅助措施

### 3.1 安全预警与防爆措施

净化分离系统与前端热解炭化部分相联通,整个系统处于微正压状态,工作时设备温度最高可达 850℃,且热解气为可燃性气体,若进风控制不当或出现空气进入的状况,有发生爆炸的潜在危险,因此,在净化装置入口处安装阻火器,各接口处安装压力监测仪,氧气含量监测装置和气体温度定点测控装置,并采取可靠的防爆措施。

### 3.2 热解联产物清洁回用

热解联产物主要包括热解气、焦油和木醋液等,若直接排放对空气和环境将造成危害,可以从以下几方面进行改进:提高设备密封性,减少气体泄漏,对联产物进行有效处理,达到变废为宝、高效回用的目的。其中粗热解气经过后端净化分离系统的处理可变为纯净燃气,能够代替天然气成为新型热源;木

醋液可以改良土壤,做肥料和杀虫剂等;焦油经乳化处理,也可作为燃料燃烧。

### 3.3 智能监测与控制系统

精准、全面、可控性好的监测控制系统是设备安全稳定运行的关键,生产情况反馈、安全预警提示、紧急情况处理以及各单元协作调节等均需智能监测与控制系统的支持。控制界面主要显示系统压力、温度、进风量、燃气组分、工作时间等,且能够做到在线实时调控。

## 4 结论

本研究以外加热式生物质热解炭气油联产中试设备为平台,以其工艺技术特点为基础,结合粗热解气的组分特性,提出了一种分级处理、逐级净化的工艺技术方案,并说明了具体实施方法。粗热解气成分复杂,单一传统的方案无法将其彻底净化,本研究设计了分级处理、逐级净化的工艺技术方案,主要包括旋风除尘、多级冷凝、静电捕焦、湿法除焦等工艺环节,同时对净化后的燃气进行燃烧回用。为保障设备的安全稳定运行,还需结合其他辅助技术,如安全预警与防爆措施、智能监测与控制系统等。

## 参考文献

- [1] Shrestha G, Traina S J, Swanston C W. Black carbon's properties and role in the environment: A comprehensive review[J]. Sustainability, 2010, 2(1): 294-320.
- [2] 刘标, 陈应泉, 何涛, 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.
- [3] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.
- [4] 魏伟, 张绪坤, 祝树森, 等. 生物质能开发利用的概况及展望[J]. 农机化研究, 2013, 35(3): 7-11.
- [5] 丛宏斌, 姚宗路, 赵立欣, 等. 生物质连续热解炭气油联产中试系统开发[J]. 农业工程学报, 2017, (18): 173-179.
- [6] 吕友军, 冀承猛, 郭烈锦. 农业生物质在超临界水中气化制氢的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(3): 238-243.
- [7] 伊晓路, 刘贞贞, 郭东彦, 等. 生物质颗粒度对燃烧特性影响[J]. 现代化工, 2006, 26(2): 230-235.
- [8] 董玉平, 董磊, 强宁, 等. 旋风分离器内生物质焦油湍流特性的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 171-175, 385.
- [9] 付双成, 赵予兵, 袁惠新, 等. 一种新型生物质气化焦油分离器的实验研究[J]. 现代化工, 2012, 32(6): 74-76.
- [10] 郭东彦, 伊晓路, 闫桂焕, 等. 电捕焦油器用于生物质燃气净化及燃气允许最高氧含量的研究[J]. 可再生能源, 2012, 30(10): 52-54.
- [11] 吴悠, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物质热解焦油脱除方法研究进展[J]. 化工环保, 2016, 36(1): 17-21.
- [12] Anchan P, Shota N, Masataka K, et al. Performance of tar removal by absorption and adsorption for bio-mass gasification[J]. Fuel Process Technol, 2012, 104(12): 144-154. ■