

# 兼吸式移动床生物质热解炭化装置设计与试验

宋威<sup>1,2</sup> 孟海波<sup>2</sup> 陈明松<sup>2</sup> 王泽阳<sup>1,2</sup> 葛芸妤<sup>1,2</sup> 武继宁<sup>1,2</sup> 丛宏斌<sup>2</sup>

(1. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109;

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

**摘要:** 针对目前内热式移动床生物质热解炭化试验研究平台条件不足的问题, 开发了一种内加热兼吸式移动床热解炭化装置, 模拟连续式热解炭化工艺, 设计了供气系统、出炭系统、产物收集系统、气体净化系统、温度监控系统, 以稻壳作为原料, 开展了上吸和下吸式热解炭化试验, 研究了停留时间和吸气方式对内热式热解炭化产物的影响。结果表明, 随着停留时间的增加, 上吸和下吸式热解炭化变化趋势基本相同, 挥发分和固定碳含量均呈下降趋势, 灰分含量增加, 磷及氮元素含量均下降, 氧元素含量上升, 氢元素变化趋势不明显, 热值分别从 20.7 MJ/kg 和 22 MJ/kg 下降到 14.6 MJ/kg 和 15.2 MJ/kg; 表面积分别从 0.73 m<sup>2</sup>/g 和 0.78 m<sup>2</sup>/g 上升到 3.84 m<sup>2</sup>/g 和 3.95 m<sup>2</sup>/g, 生物炭孔隙结构得到了发展。该系统结构合理, 运行稳定可靠, 密封效果良好, 可有效控制进气方式、进气量、保温炭化时间等试验因素。为内加热炭化工艺参数试验研究提供了重要支撑。

**关键词:** 生物质; 热解; 炭化; 上下兼吸

中图分类号: S216.2; TK6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)06-0325-07

OSID:



## Design and Experiment of Both Updraft and Downdraft Biomass Pyrolysis Charring Device in Moving Bed

SONG Wei<sup>1,2</sup> MENG Haibo<sup>2</sup> CHEN Mingsong<sup>2</sup> WANG Zeyang<sup>1,2</sup> GE Yunyu<sup>1,2</sup> WU Jining<sup>1,2</sup> CONG Hongbin<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Mechanical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

2. Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agriculture Residue, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Academy of Agricultural Planning and Engineering, MARA, Beijing 100125, China)

**Abstract:** Aiming at the insufficient conditions of the current research platform for the internal heating mobile bed biomass pyrolysis carbonization test, an internal heating up and down suction mobile bed pyrolysis carbonization test device was proposed, the continuous pyrolysis carbonization process was simulated, and the gas supply system, carbon sampling collection system, product collection system, gas purification system and temperature monitoring system were designed. Using rice husk as raw material, up-suction and down-suction pyrolysis carbonization experiments were carried out to study the effects of residence time and inspiratory mode on internal thermal pyrolysis carbonization products. The results showed that with the increase of residence time, the volatile and fixed carbon contents of rice husk carbon were decreased, the ash content was increased, and the calorific value was decreased. The calorific value of rice husk carbon was decreased from 20.7 MJ/kg and 22 MJ/kg at 10 min to 14.6 MJ/kg and 15.2 MJ/kg at 60 min, respectively. With the increase of residence time, the content of C in rice husk carbon was decreased from 51.9% and 65.3% at 10 min to 36.5% and 54.8% at 60 min, respectively. The content of N element was decreased from 1.1% and 2.3% at 10 min to 0.5% and 0.7% at 60 min, respectively. The content of O element was increased from 46.0% and 28.7% at 10 min to 61.7% and 42.2% at 60 min, respectively. The change trend of H element was not obvious. With the increase of residence time, the specific surface area of up-suction and down-suction pyrolysis rice husk charcoal was

收稿日期: 2023-10-31 修回日期: 2023-12-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300302)和农业农村部规划设计研究院自主研发项目(QD202109、QNYC-2021-03、CHXTY-2021)

作者简介: 宋威(1998—), 男, 硕士生, 主要从事生物质能源热解利用研究, E-mail: songwei19980709@163.com

通信作者: 丛宏斌(1980—), 男, 研究员, 主要从事农村能源与生物质能源技术研究, E-mail: dabine123@163.com

increased from  $0.73 \text{ m}^2/\text{g}$  and  $0.78 \text{ m}^2/\text{g}$  at 10 min to  $3.84 \text{ m}^2/\text{g}$  and  $3.95 \text{ m}^2/\text{g}$  at 60 min, respectively, and the pore structure of biochar was developed. The test system had reasonable structure, stable and reliable operation, good sealing effect, and can effectively control the test factors such as air intake mode, air intake volume and heat preservation carbonization time. The development of the internal thermal pyrolysis charring platform provided an important condition support for the experimental research of internal heating charring process parameters.

**Key words:** biomass; pyrolysis; carbonization; both updraft and downdraft

## 0 引言

生物质热解炭化技术能有效促进生物质资源化利用,国内外学者对此进行了深入探讨和研究<sup>[1-4]</sup>。根据不同的受热方式,热解炭化技术可分为内热和外热两种。外热式炭化技术工艺参数易于控制、普及率高,但其传热效果差。内热炭化技术具有较高的传热效果,但其工艺参数难以控制<sup>[5-6]</sup>。

研究温度、停留时间、气氛、压力、催化剂等因素对生物质热解反应的影响,对于改善产出的焦炭品质,提高气化和燃烧反应效率,降低污染物排放具有重要意义<sup>[7-13]</sup>。在外热式研究方面,李丽洁等<sup>[14]</sup>开发了一种固定床外加热式生物质热解炭化实验平台,研究了生物质在热解作用下的炭化规律,为生物质热解炭化设备开发提供基础数据与参考。尚春民等<sup>[15]</sup>采用热解气回用燃烧的生物质热解炭化方案,设计一种新型回转连续式炭化设备。在内热式研究方面,黄宇等<sup>[16]</sup>以粉碎的生物质颗粒料为炭化原料,创新采用分步加热炭化的工艺路线,设计了一种直立式移动床生物质炭化设备。设备采用闷烧热解方式,并利用螺旋输送器、旋转炉篦等结构实现了生物质的连续炭化。丛宏斌等<sup>[17]</sup>针对目前生物质炭化设备生产率较低、能源消耗大、原料适应性较差等问题,提出生物质连续炭化生产工艺路线,采用内加热热解原理,研发内加热连续式生物质炭化设备。马中青等<sup>[18]</sup>研究了下吸式固定床气化系统中当量比(ER)对樟子松木片气化性能的影响,结果表明,气化最优ER为0.251。相关研究成果为热解技术开发提供了重要数据支撑,但在基础研究方面,管式炉装备种类丰富,外热式热解炭化的设备和机理研究都已较为成熟,而内热式热解炭化多为大型设备,不同的内热式热解炭化工艺对产物的影响研究仍存在不足,尤其是针对内加热移动床热解炭化装置设计与开发鲜见报道。

为解决上述问题,本文在前期研究的基础上,模拟连续式热解炭化工艺,开发供气系统、出炭系统、产物收集系统、气体净化系统、温度监控系统,设计一种内加热兼吸式移动床热解炭化装置;以稻壳为原料,开展上吸和下吸式热解炭化试验,研究停留时

间和吸气方式对内热式热解炭化产物的影响。旨在对内热式炭化炉的工艺参数优化、热解炭化技术装备升级提供支持和参考。

## 1 整体设计

### 1.1 系统组成与工作原理

内加热兼吸式移动床热解炭化装置结构如图1所示,主要由上下炉体、气瓶、管路、冷凝收集装置、气体干燥过滤装置、活塞排料装置、流量计、气袋、集灰器、传感器组成。炉体外观为筒状,主体是保温层及中间的圆柱形炉膛,通气管道设置于炉膛中间,为炉膛内的炭化反应提供氧气,管道可以上下移动,空气从最底部开始参与氧化反应,经氧化反应后进入还原阶段,氧化反应区可随通风管移动,实现模拟连续炭化过程;底部设有活塞推料装置,在炭化完成后,可将生物炭从上方推出,逐层采样;后方设有冷却系统及气袋,用于冷凝和收集热解油、热解气。

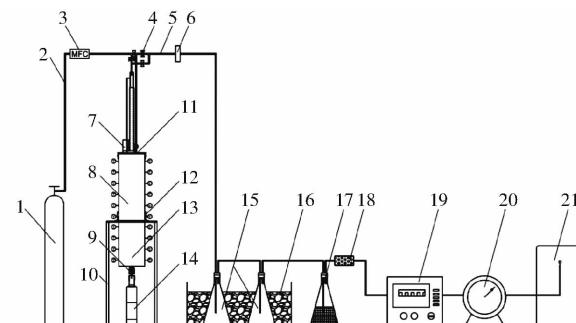


图1 兼吸式移动床热解炭化装置结构简图

Fig. 1 Schematic of both updraft and downdraft biomass pyrolysis charring device in moving bed

- 1. 气瓶 2. 通气管道 3. 流量计 4. 通气阀门 5. 耐热通气管道
- 6. 集灰器 7. 上推杆 8. 上炉体 9. 弹簧减震器 10. 机架
- 11. 炉盖 12. 搭扣 13. 下炉体 14. 下推杆 15. 冷凝装置
- 16. 冷凝介质 17. 洗气装置 18. 气体干燥器 19. 气体组分在线检测仪 20. 湿式流量计 21. 气袋

装置采用内加热炭化方式,可进行不同送气量、炭化时间以及吸气方式的试验,具有实时温度监测、操作简便等特点。

### 1.2 主要技术参数

内加热兼吸式移动床热解炭化装置主要技术参数如表1所示。

表1 兼吸式移动床热解炭化装置主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of up-suction and down-suction moving bed pyrolysis charring test equipment

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 700×750×2 150
炉体最大外径/mm	233
炉体入料口内径/mm	120
炉体装填量/g	2 000

## 2 关键部件设计

### 2.1 兼吸式移动床热解炉

炉体部分是装置的核心,分上、下两部分,形成总长度1 000 mm的热解炉腔,上、下炉体均为圆柱型双壁结构,两壁之间填充有保温材料。上下炉体通过搭扣连接,移动式通气管贯穿其中,为热解过程提供所需气化剂;炉壁上装有热电偶,实时监测温度,如图2所示。热解反应时从底部向上依次为炭化区、热解区和干燥区<sup>[19]</sup>。在启动时,配风点火使物料缓慢燃烧,控制气化剂的速率,通过热电偶实时监测内部温度;压实定位片压实物料,防止物料过于蓬松;热解完成后,推炭活塞与炉体配合实现排炭。

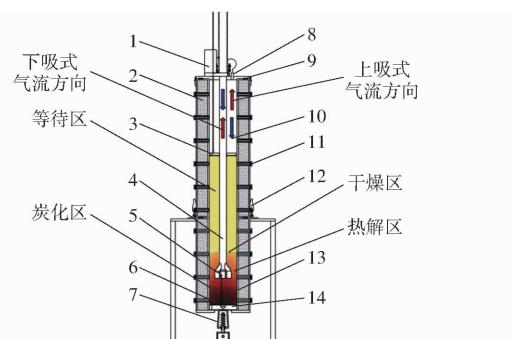


图2 兼吸式移动床热解炉炉体结构图

Fig. 2 Structure diagram of up-suction and down-suction moving bed pyrolysis furnace

1. 上推杆
2. 保温层
3. 压实定位器
4. 移动通气管道
5. 点火口
6. 耐高温密封垫
7. 弹簧减震器
8. 通气口
9. 炉盖
10. 上炉腔
11. 温度传感器
12. 搭扣
13. 下炉腔
14. 推炭活塞

移动式通气管可在炉体内腔中同轴上下移动,移动式通气管可以解决炉体较长、物料自行反应时供氧不足、熄火或反应时间过长等问题,实现模拟连续热解。该管道穿过炉盖,并通过石墨盘根实现与炉盖之间的密封。

移动式通气管顶部通过连接件与电动推杆相连,电动推杆固定在炉盖上,为通气管的移动提供动力。移动式通气管的移动时间区间由电动推杆及其编程控制系统决定,最大区间为1 h。

炉体设计内径为219 mm,当炉体内径与高度分别取119 mm和1 000 mm时,以稻壳为例,原料压实

堆积密度ρ为48.40~200 kg/m<sup>3</sup>,则该炉一次装料量计算公式为

$$m = \pi \left[ \left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} \right)^2 \right] L \rho \quad (1)$$

式中 D——炭化炉内径,mm

d——移动通气管道外径,mm

L——炭化炉填料长度,mm

计算得出内热式热解炭化炉单次拟处理量m为0.5~2.08 kg,可以满足试验要求。

在试验时,炉体需要密封,其中包括炉盖与上炉体之间的密封、移动式通气管道与炉盖之间的密封、上炉体与下炉体之间的密封和下炉体底部的密封,如图3所示。

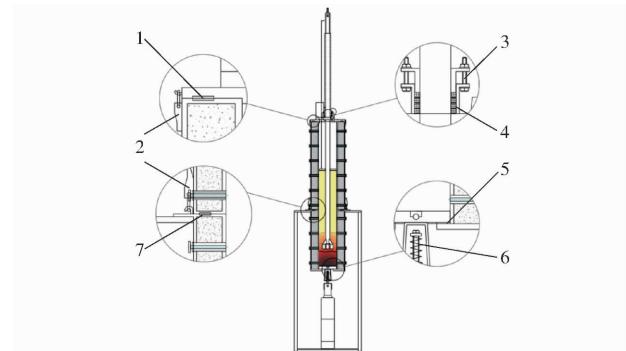


图3 炉体密封结构图

Fig. 3 Sealing structure diagram of furnace body

1. 弹性密封垫片
2. 搭扣
3. 紧固螺栓
4. 石墨盘根
5. 耐高温密封垫片
6. 弹簧减震器

炉盖与上炉体之间、上炉体与下炉体之间和下炉体底部为静密封,采取夹紧密封垫片的方式进行密封,炉盖与上炉体以及上炉体与下炉体之间均采用搭扣连接压紧;下炉体的底部则使用耐高温的密封垫片,依靠二级推杆拉动推炭活塞,压紧耐高温密封垫片实现密封。移动式通气管道与炉盖之间为动密封,采用多层石墨盘根,通过调节螺栓的松紧实现移动式通气管道与炉盖之间的密封。

生物质原料中包含碳、氢、氧、氮、硫等元素,其如果在空气中充分燃烧和气化,单位质量(1 kg)消耗空气量计算公式为

$$L_0 = \frac{1}{0.21} (1.866C + 5.55H + 0.7S - 0.7O) \quad (2)$$

式中 L<sub>0</sub>——单位质量原料燃烧消耗空气量,m<sup>3</sup>/kg

C——原料中碳元素质量分数,%

H——原料中氢元素质量分数,%

S——原料中硫元素质量分数,%

O——原料中氧元素质量分数,%

以稻壳为例,其中碳元素质量分数为40%~46%、氢元素质量分数为5%~6%、氧元素质量分数为43%~50%、氮元素质量分数为0.6%~

1.1%、硫元素质量分数为0.1%~0.2%，此外还包含一些含量很少的元素，如磷、钾等；取碳元素质量分数为45%、氢元素质量分数为5%、氧元素质量分数为45%、硫元素质量分数为0.1%<sup>[20]</sup>；则其单位质量原料完全燃烧消耗空气量为3.82 m<sup>3</sup>/kg。

选用空气作为试验的气化剂，则需考虑其当量比，当量比是气化时实际空气量与生物质原料充分燃烧理论所需空气量的比。当量比反映原料的燃烧程度，在选择气化当量比时应充分考虑到生物质原料的含水率、气化方式等诸多因素。根据国内外有关学者的经验，提出了生物质气化当量比0.2~0.4为最佳选择<sup>[21]</sup>。单位质量原料气化所需空气量计算公式为

$$L_q = L_0 D \quad (3)$$

式中  $L_q$ ——单位质量原料气化所需空气量，m<sup>3</sup>/kg  
 $D$ ——当量比

取  $D$  为 0.2 时，单位质量原料气化所需空气量为 0.76 m<sup>3</sup>/kg；取  $D$  为 0.4 时，单位质量原料气化所需空气量为 1.53 m<sup>3</sup>/kg，选取合适气瓶和阀门，保证供气充足和稳定。

热解产生的气体依次经过冷凝装置、洗气装置、气体干燥器、气体组分在线检测仪和湿式流量计，进入到气袋中收集。冷凝装置用于冷凝高温热解气，分离出其中的焦油和木醋液，洗气装置用于进一步净化气体，气体干燥器用于气体脱水干燥，气体组分在线检测仪实现气体组分的实时监控，湿式流量计用于记录气体累计流量。

## 2.2 上下吸切换系统

上下吸切换系统是为了实现该装置上吸式热解方式与下吸式热解方式的切换，由原料与气化剂的接触过程区分上吸和下吸，气化剂由下方进入，原料和气化剂之间呈对向流动形式的为上吸式，反之则为下吸式<sup>[22]</sup>。上吸式和下吸式热解方式的气体流动路径及阀门开关情况如图4所示。

开启第一、三阀门，关闭第二、四阀门时，气化剂

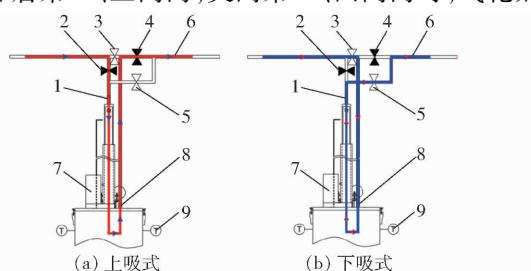


图4 上吸式与下吸式热解方式气体流动路径

Fig. 4 Gas flow path diagram of up-suction and down-suction pyrolysis mode

1. 上通气口
2. 第一阀门
3. 第二阀门
4. 第三阀门
5. 第四阀门
6. 通气管道
7. 上推杆
8. 下通气口
9. 温度传感器

通过通气管道由上通气口进入，流经移动通气管后，在炉底与生物质原料发生热解反应，产生的热解气原料对向流动，然后通过下通气口排出热解炉，实现上吸式热解。开启第二、四阀门，关闭第一、三阀门时，气化剂从下通气口进入，气化剂与原料顺向流动，并在炉底与生物质原料发生热解反应，产生的热解气通过移动通气管排出，热解气不与物料接触，实现下吸式热解。通过以上设计，在不改变管路连接的情况下，即可实现上吸式和下吸式热解方式切换。

## 2.3 排炭分层取样系统

为保证从炉体中取出的炭化产物炭化层结构不被破坏，采用由下推杆及推炭活塞将炭化产物向上推出的方式，搭配了冷却分层机构和逐层取样器，组成了排炭分层取样系统，如图5、6所示。

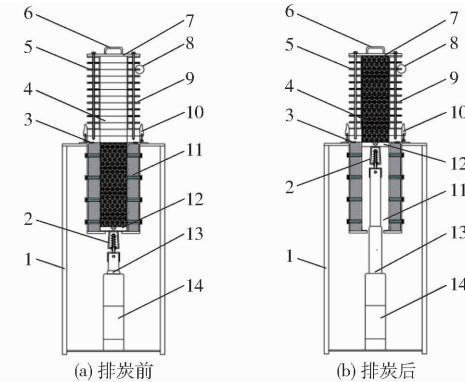


图5 排炭分层取样系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of carbon discharging stratified sampling system

1. 台架
2. 弹簧减震器
3. 密封垫圈
4. 单层取样节
5. 密封螺栓
6. 端盖把手
7. 端盖
8. 定位倒角
9. 外延散热片
10. 搭扣
11. 下炉体
12. 推炭活塞
13. 推杆内杆
14. 二级推杆

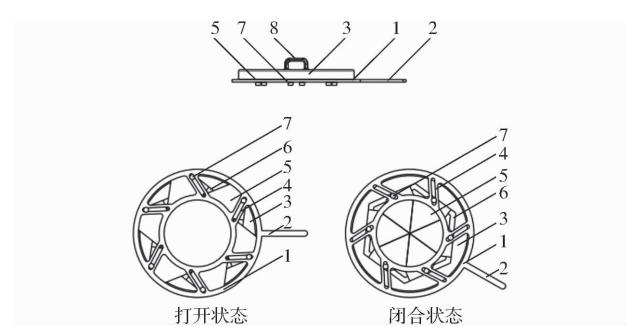


图6 逐层取样器结构图

Fig. 6 Layer by layer sampler structure diagram

1. 驱动架
2. 手柄
3. 取样盒
4. 第一滑槽
5. 开合叶片
6. 第二滑槽
7. 滑柱
8. 把手

热解完成后，将上炉体拆下，通过搭扣将冷却分层机构连接在下炉体上，冷却分层机构取代上炉体与推炭机构形成整体。利用二级推杆将炭化产物全部推入到冷却分层机构中，进行冷却。

冷却完成，卸下密封螺栓，取下端盖，使用独立的逐层取样器进行分层取样，逐层取样器上有旋转

开合机构,可将相邻两节冷却取样节及其内部生物炭分离,从上至下依次完成取样。

### 3 调试运行与试验

#### 3.1 平台调试与运行

设备在设计制造过程中,结构合理,运行稳定可

靠,空运行无异响,密封效果良好,使用该试验平台进行的上吸和下吸式热解试验,整体炭化效果较好,未出现夹生现象。

#### 3.2 试验方案与测试方法

本试验选取内蒙古自治区兴安盟的稻壳,其空气干燥基<sup>[23]</sup>工业分析及元素分析如表 2 所示。

表 2 稻壳的基本理化性质及元素组成

Tab. 2 Physico-chemical properties and elemental composition of rice husk

%

原料	工业分析					元素分析			
	含水率	挥发分质量分数	固定碳质量分数	灰分质量分数	碳质量分数	氢质量分数	氧质量分数	氮质量分数	
稻壳	5.16	63.75	13.32	17.77	41.74	5.17	52.52	0.57	

注:元素分析采用无灰干燥基,并假设水稻秸秆炭仅由 C、H、N、O 元素组成。

试验采用自行研制的内加热兼吸式热解炭化装置,如图 7 所示。



图 7 兼吸式移动床热解炭化装置实物图

Fig. 7 Up-suction and down-suction moving bed pyrolysis charring test equipment picture of real products

试验方案如下:

试验启动:确定试验的进气方式,由上下吸切换系统进行切换,随后在气化炉膛内加入( $1 \pm 0.1$ ) kg 稻壳料,保持点火口与大气连通,点燃物料,最下方温度传感器温度升高,将炉盖和点火口关闭,打开气瓶阀门通气。

试验阶段:调节每分钟入炉空气量( $12.6 \pm 0.5$ ) L,洗气瓶内出气稳定后,启动电机,带动移动式通气管上移,设定移动度为 9 s/mm,整体上移 400 mm,总用时 60 min。

取样阶段:试验结束后移开上炉体,安装排炭分层取样装置,将生物炭通过二级推杆送入取样装置中进行冷却,待冷却完成,完成分层取样,并依次编号。

### 3.3 结果与分析

#### 3.3.1 生物炭基础特性

不同停留时间制备的上吸及下吸式热解稻壳炭基础物理特性分析结果如表 3 所示。两种工艺下生产出的稻壳炭的基础特性变化趋势基本一致,随着

停留时间的延长,挥发分质量分数逐渐减小,上吸式和下吸式分别从 15.1% 和 30.6% 减小到 7.7% 和 15.5%;灰分质量分数逐渐增加,上吸式和下吸式分别从 33.3% 和 22.9% 增加到 48.5% 和 40.5%,固定碳质量分数小幅减小,整体处于 40.8% ~ 48.9% 之间。随着停留时间的延长,上吸式和下吸式热解碳元素质量分数分别从 51.9% 和 65.3% 下降到 36.5% 和 54.8%;氮元素质量分数分别从 1.1% 和 2.3% 下降到 0.5% 和 0.7%。而氧元素质量分数分别从 46% 和 28.7% 增加到 61.7% 和 42.2%;氢元素的变化趋势不明显,但上吸式热解稻壳炭的氢元素水平低于下吸式。两种工艺下制备的稻壳炭的热值也随停留时间的延长逐渐降低,停留时间从 10 min 延长到 60 min,上吸式和下吸式稻壳炭热值分别从 20.7 MJ/kg 和 22 MJ/kg 下降到 14.6 MJ/kg 和 15.2 MJ/kg,表明在内热式炭化过程中,较长的停留时间会使稻壳炭的成分逐步向灰分转化<sup>[24~26]</sup>。

#### 3.3.2 生物炭孔隙结构

不同停留时间制备的稻壳炭的电镜扫描图像(SEM)如图 8 所示。稻壳炭截面呈现多孔结构,随着停留时间的延长,上吸式和下吸式热解稻壳炭表现出了相似的变化,稻壳炭光滑致密的结构被破坏,挥发性成分的析出导致生物炭内部产生大量孔隙。表面微孔数量明显增多,特别是细小孔径已打开,随着停留时间的延长,秸秆热解更加充分,生物炭的孔隙结构也得到了发展<sup>[27]</sup>。

进一步对不同停留时间下稻壳炭的比表面积进行分析,结果如图 9 所示。停留时间 10 min 时,上吸式和下吸式热解稻壳炭比表面积分别为  $0.73 \text{ m}^2/\text{g}$  和  $0.78 \text{ m}^2/\text{g}$ ,保温时间为 60 min 时,上吸式和下吸式热解稻壳炭比表面积分别为  $3.84 \text{ m}^2/\text{g}$  和  $3.95 \text{ m}^2/\text{g}$ ,在该试验条件下,随着停留时间的延长,比表面积增加 4 倍左右。这表明保温时间的延

表 3 不同停留时间制备的稻壳炭基础理化特性参数

Tab. 3 Physicochemical properties of rice husk charcoal prepared with different residence times

处理	工业分析			元素分析				热值/ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
	挥发分质量 分数/%	固定碳质量 分数/%	灰分质量 分数/%	碳质量 分数/%	氢质量 分数/%	氧质量 分数/%	氮质量 分数/%	
上吸 10 min	15.1	47.6	33.3	51.9	1.0	46.0	1.1	20.7
上吸 20 min	14.4	45.6	40.0	42.4	1.2	55.5	0.9	18.0
上吸 30 min	12.6	40.9	45.5	45.4	1.1	52.8	0.7	17.3
上吸 40 min	10.2	43.0	46.8	41.2	1.1	57.0	0.7	16.6
上吸 50 min	9.2	44.5	46.3	38.9	1.2	59.3	0.6	15.9
上吸 60 min	7.7	40.8	48.5	36.5	1.3	61.7	0.5	14.6
下吸 10 min	30.6	46.5	22.9	65.3	3.7	28.7	2.3	22.0
下吸 20 min	29.6	40.6	29.8	60.7	2.8	35.4	1.1	21.4
下吸 30 min	29.6	48.3	22.1	64.5	3.6	30.4	1.5	21.7
下吸 40 min	23.7	48.9	27.4	66.6	3.0	28.9	1.5	20.3
下吸 50 min	16.2	48.6	35.2	62.9	2.6	33.2	1.3	18.7
下吸 60 min	15.5	44.0	40.5	54.8	2.3	42.2	0.7	15.2

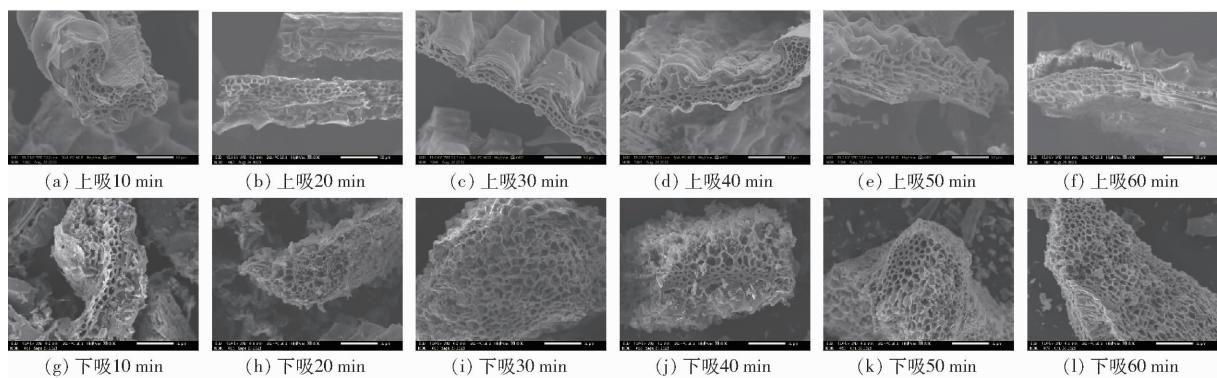


图 8 不同停留时间制备的稻壳炭的 SEM 图

Fig. 8 SEM images of biochars produced at different residence times

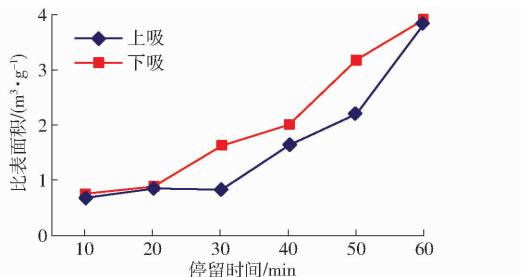


图 9 停留时间对稻壳炭比表面积的影响

Fig. 9 Specific surface area of rice husk carbon at different residence times

长增加了秸秆生物炭内部的孔隙结构,与 SEM 分析一致。

## 4 结论

(1) 模拟连续式热解炭化工艺,设计了供气系统、出炭系统、产物收集系统、气体净化系统、温度监控系统,并据此进行了加工,在整个设计制造过程中,设备尺寸控制良好,在设备装配过程中,结构合理,运行稳定可靠,空运行无异响;在试验运行过程中,炉体无白烟冒出,密封效果表现良好。

可以切换上下吸方式、控制炭化时间、分层取样等,操作方便。

(2) 内加热兼吸式热解炭化装置将生物质的炭化试验过程分为原料准备、系统设置、氧化热解、保温炭化、产物收集等环节。炭化装置可针对不同进气方式、通气量、保温炭化时间等多种变量进行试验,有效减少试验次数,为内热式炭化炉工艺参数优化、热解炭化技术装备升级提供支持和参考。

(3) 以稻壳为原料研究了炭化停留时间(10~60 min)对上吸和下吸内热式热解炭化产物特性的影响,试验表明:随着停留时间的延长,上吸及下吸内热式热解炭化变化趋势基本相同,挥发分和固定碳含量均呈下降趋势,灰分增加,碳及氮元素含量均下降,氧元素含量上升,氢元素变化趋势不明显,热值分别从 20.7 MJ/kg 和 22 MJ/kg 下降到 14.6 MJ/kg 和 15.2 MJ/kg;比表面积分别从 0.73 m<sup>2</sup>/g 和 0.78 m<sup>2</sup>/g 上升到 3.84 m<sup>2</sup>/g 和 3.95 m<sup>2</sup>/g,生物炭孔隙结构得到了发展。

## 参 考 文 献

- [1] JIN S C, SUNG H P, SANG C J, et al. Production and utilization of biochar: a review [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2016, 40: 1–15.
- [2] MANDU I, ERIC D. The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: a review [J]. Chemosphere, 2015, 134: 232–240.
- [3] TAN Xiaofei, LIU Yunguo, ZENG Guangming, et al. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions [J]. Chemosphere, 2015, 125: 70–85.
- [4] AGHDAS H, RALPH S, HABIBOLLAH Y, et al. Effect of process conditions on product yield and composition of fast pyrolysis of *Eucalyptus grandis* in fluidized bed reactor [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(4): 2594–2602.
- [5] 丛宏斌,赵立欣,姚宗路,等. 我国生物质炭化技术装备研究现状与发展建议[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(2): 21–26.  
CONG Hongbin, ZHAO Lixin, YAO Zonglu, et al. Research status of biomass carbonization technical equipment and proposals for its development in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(2): 21–26. (in Chinese)
- [6] ANTONIO M, SIMEONE C, DINO M. Biomass gasification technology. The state of the art overview [J]. Journal of Energy Chemistry, 2016, 25(1): 10–25.
- [7] ONDREJ M, PETER B, ANDREW C, et al. Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar [J]. Fuel, 2013, 103: 151–155.
- [8] ZHANG Jie, LIU Jia, LIU Rongle. Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate [J]. Bioresource Technology, 2015, 176: 288–291.
- [9] AYHAN D. Effects of temperature and particle size on bio char yield from pyrolysis of agricultural residues [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2004, 72(2): 243–248.
- [10] 韦思业. 不同生物质原料和制备温度对生物炭物理化学特征的影响[D]. 广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2017.  
WEI Siye. Influence of biomass feedstocks and pyrolysis temperatures on physical and chemical properties of biochar [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [11] SABIO E, ÁLVAREZ-MURILLO A, ROMAN S, et al. Conversion of tomato peel waste into solid fuel by hydrothermal carbonization: influence of the processing variables [J]. Waste Management, 2016, 47: 122–132.
- [12] 崔喜彬,李志合,李永军,等. 下降管式生物质快速热解实验装置设计与实验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 113–116.  
CUI Xibin, LI Zhihe, LI Yongjun, et al. Design and experiments of a down-flow tube reactor for the pyrolysis of biomass [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 113–116. (in Chinese)
- [13] 刘啸天,于洁,孙路石. 温度与粒径对生物质热解特性影响实验研究[J]. 能源研究与管理, 2022(1): 57–64.  
LIU Xiaotian, YU Jie, SUN Lushi. Experimental study on effects of temperature and particle size on biomass pyrolysis characteristics [J]. Energy Research and Management, 2022(1): 57–64. (in Chinese)
- [14] 李丽洁,赵立欣,孟海波,等. 生物质热解炭化实验平台设计与实验[J]. 可再生能源, 2016, 34(2): 305–310.  
LI Lijie, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Design and experiment biomass pyrolysis carbonization experiment setup [J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(2): 305–310. (in Chinese)
- [15] 尚春民,李新,付为杰,等. 生物质连续热解炭化设备研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 435–440.  
SHANG Chunmin, LI Xin, FU Weijie, et al. Study on continuous pyrolysis and carbonization equipment of biomass [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(8): 435–440. (in Chinese)
- [16] 黄宇,樊啟洲,汪烈,等. 闷烧热解及间接加热直立移动床生物质炭化设备设计研究[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(11): 69–78.  
HUANG Yu, FAN Qizhou, WANG Lie, et al. Design of biomass carbonization equipment for vertical moving bed [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(11): 69–78. (in Chinese)
- [17] 丛宏斌,赵立欣,姚宗路,等. 内加热连续式生物质炭化设备的研制[J]. 太阳能学报, 2014, 35(8): 1529–1535.  
CONG Hongbin, ZHAO Lixin, YAO Zonglu, et al. Development of internal heating continuous type biomass carbonization equipment [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(8): 1529–1535. (in Chinese)
- [18] 马中青,叶结旺,赵超,等. 基于下吸式固定床的木片气化试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊1): 267–274.  
MA Zhongqing, YE Jiewang, ZHAO Chao, et al. Experimental investigation of wood chip gasification using downdraft fixed bed gasifier [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 1): 267–274. (in Chinese)
- [19] 马中青,张齐生,周建斌,等. 下吸式生物质固定床气化炉研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 139–145.  
MA Zhongqing, ZHANG Qisheng, ZHOU Jianbin, et al. Research progress of downdraft biomass fixed-bed gasifier [J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences), 2013, 37(5): 139–145. (in Chinese)

- [33] 林泽鉅, 白卫东, 刘巧瑜, 等. 微波-超声辅助乳清分离蛋白糖基化工艺优化[J]. 中国调味品, 2023, 48(10): 98–104,21.  
LIN Zeqian, BAI Weidong, LIU Qiaoyu, et al. Optimization of microwave – ultrasound assisted glycosylation process of whey protein isolate[J]. China Condiment, 2023, 48(10): 98 – 104 ,21. (in Chinese)
- [34] 薛丽莹, 田泽鹏, 陈若桐, 等. pH 处理对 EGCG 与大豆蛋白相互作用的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(7): 121 – 128.  
XUE Liying, TIAN Zepeng, CHEN Ruotong, et al. Effect of pH treatment on the interaction between EGCG and soy protein [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(7): 121 – 128. (in Chinese)
- [35] JANIN J, MILLER S, CHOTHIA C. Surface, subunit interfaces and interior of oligomeric proteins[J]. Journal of Molecular Biology, 1988, 204(1): 155 – 164.
- [36] 周麟依, 王辰, 王中江, 等. 空化微射流对米糠蛋白热聚集体结构及特性的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 341 – 349.  
ZHOU Linyi, WANG Chen, WANG Zhongjiang, et al. Effect of cavitation microjet on structure and properties of rice bran protein thermal aggregates[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 341 – 349. (in Chinese)
- [37] LINLIN H, JINWEI S, MENGQI P, et al. Impact of non-covalent bound polyphenols on conformational, functional properties and in vitro digestibility of pea protein[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132623.
- [38] 李亚丽, 许玉娟, 徐幸莲. 多酚对肌原纤维蛋白结构与功能特性的影响研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(19): 296 – 306.  
LI Yali, XU Yujuan, XU Xinglian. Research progress on the effect of polyphenols on the structural and functional properties of myofibrillar protein[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(19): 296 – 306. (in Chinese)
- [39] SUBRAMANIAN R, SUBBRAMANIYAN P, RAJ V. Antioxidant activity of the stem bark of *Shorea roxburghii* and its silver reducing power[J]. SpringerPlus, 2013, 2(1): 1 – 11.

(上接第 331 页)

- [20] 牛智有,李晓金,高海龙. 高光谱成像技术快速检测生物质秸秆元素含量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 181 – 187.  
NIU Zhiyou, LI Xiaojin, GAO Hailong. Rapid detection of element content in straw biomass using hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(22): 181 – 187. (in Chinese)
- [21] 石海波. 固定床生物质热解炭化系统设计与实验研究[D]. 天津:河北工业大学, 2013.  
SHI Haibo. The design and test research on biomass pyrolysis carbonization in fixed-bed[D]. Tianjin: Hebei University of Technology , 2013. (in Chinese)
- [22] 肖陆飞,哈云,孟飞,等. 生物质气化技术研究与应用进展[J]. 现代化工, 2020, 40(12): 68 – 72, 76.  
XIAO Lufei, HA Yun, MENG Fei, et al. Research and application progress on biomass gasification technologies[J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(12): 68 – 72, 76. (in Chinese)
- [23] 杨敏. 水稻秸秆生物质炭在稻田土壤中的稳定性及其机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.  
YANG Min. Stability of rice straw-derived biochar and its mechanism in paddy soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [24] 赵立欣,田利伟,贾吉秀,等. 移动式玉米秸秆热解炭化原位还田设备研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 357 – 363.  
ZHAO Lixin, TIAN Liwei, JIA Jixiu, et al. Mobile equipment study of corn stalk in-situ returning carbonization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 357 – 363. (in Chinese)
- [25] 牛文娟,阮桢,钟菲,等. 保温时间与粒度对稻秆和棉秆热解产物组成及能量转化影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 212 – 219.  
NIU Wenjuan, RUAN Zhen, ZHONG Fei, et al. Effects of holding time and particle size on physicochemical properties and energy conversion of pyrolysis product component of rice straw and cotton stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 212 – 219. (in Chinese)
- [26] 刘朝霞,刘鸣,牛文娟,等. 保温时间对不同秸秆生物炭肥料化利用理化特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 182 – 192.  
LIU Zhaoxia, LIU Ming, NIU Wenjuan, et al. Effects of holding time on physical and chemical properties of utilizing different straw biochar fertilizer[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 182 – 192. (in Chinese)
- [27] 姚锡文,周浩东,齐鹏远,等. 氮气和含氧气氛下玉米秸秆热解气化产气规律研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 375 – 385.  
YAO Xiwen, ZHOU Haodong, QI Pengyuan, et al. Gas production law during corn stalk pyrolysis and gasification under pure nitrogen and oxygen-containing atmospheres[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 375 – 385. (in Chinese)