

小型搅拌热解气回燃式生物质炭化炉设计与试验

张宝峰^{1,2} 司香² 辛明金¹ 邬立岩¹ 孟军^{3,4} 宋玉秋¹

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866; 2. 扬州大学机械工程学院, 扬州 225127;

3. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866; 4. 沈阳农业大学国家生物炭研究院, 沈阳 110866)

摘要: 针对传统炭化工艺温度不均、尾气净化难、能量消耗大的问题,设计了一种小型搅拌热解气回燃式生物质炭化设备。采用双螺旋带搅拌,使生物质横向对流,受热均匀;设计热解气引流装置使其回流至燃烧室引燃,减少热解气排放的同时,为生物质炭化提供能量,降低了炭化能量投入。基于计算机仿真技术建立了样机模型,并对炭化炉温度场及热流场进行了矢量分析,计算结果表明炉内温度分布均匀。设计了炭化炉样机,以稻壳为原料进行生物质炭化试验。结果表明,热解气引燃后炭化室温度能够保证生物质炭化所需条件。正交试验结果表明,最佳炭化率因素水平组合为:螺旋搅拌器转速为43 r/min、炭化室物料充满系数为88.68%、炭化时间为15 min,此时,炭化率最高为50.86%。

关键词: 生物质炭化设备; 热解气回燃式; 双螺旋带; 温度场; 炭化率

中图分类号: S216 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)09-0411-09

OSID:



Design and Experiment of Small Carbonization Kiln with Biomass Stirring and Backburning Mechanism

ZHANG Baofeng^{1,2} SI Xiang² XIN Mingjin¹ WU Liyan¹ MENG Jun^{3,4} SONG Yuqiu¹

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2. College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China

3. Agronomy College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

4. National Biochar Research Institute, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Biochar plays a significant role in improving soil properties, promoting restoration of the cultivated land, fixing carbon and reducing emissions, improving the environment, and alleviating the energy crisis. Aiming at the problems of uneven temperature, difficult purification of pyrolysis gas and high energy consumption of traditional carbonization process, a small charring kiln with biomass stirring and pyrolysis reigniting mechanism was designed. The main structure of the kiln included combustion chamber, carbonization chamber, preheating chamber, dual-spiral agitator, and motor. A dual helix auger structure was employed to facilitate the circulation of biomass. By utilizing smoke exhaust technology, the recirculation of exhaust gases back to the combustion chamber for ignition was achieved. This approach not only reduced tailpipe emissions but also decreased the energy input required during carbonization. A prototype simulation model was established and vector analysis on the temperature field and heat flow field of the carbonization furnace was performed based on computer simulation technology. The calculation results indicated that the temperature distribution inside the furnace was uniform. The biomass carbonization experiments were conducted by using rice husks with this charring kiln. The results showed that the biomass can be ignited with the leaded back combustible exhausted gases produced in charring process, and it can keep the temperature within the carbonization chamber in the range of 420°C to 470°C, which met the requirements for carbonization. Orthogonal experimental results indicated that under certain conditions, the optimal combination of factors for the highest carbonization rate were spiral mixer speed of 43 r/min, material filling coefficient of 88.68% in the carbonization chamber, and

收稿日期: 2024-03-26 修回日期: 2024-06-14

基金项目: 沈阳市科学技术计划项目(22-317-2-05)

作者简介: 张宝峰(1987—),男,讲师,博士,主要从事农业生产机械化技术及装备研究,E-mail: bf_zhang@yzu.edu.cn

通信作者: 宋玉秋(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事农业生产机械化技术及装备研究,E-mail: songyuqiu@syau.edu.cn

carbonization time of 15 min. The highest carbonization rate achieved 50.86%. These research findings can serve as a reference for biomass carbonization technology.

Key words: biomass carbonization equipment; pyrolysis gas backburning; double helix tape; temperature field; carbonization rate

0 引言

生物炭 (biochar) 是一种绿色环保的可再生资源,对土壤改良、秸秆资源化利用、促进作物生长、制备碳纳米材料等方面有积极作用^[1-5]。同时,由于明显的固炭作用,其也被认为是 21 世纪缓解全球变暖的有效途径之一^[6-8]。传统的“焖炭”方式尽管设备简单、能够实现对生物质的炭化,但其效率低、物料受热均匀性差^[9-10]。为提高炭化质量、增加炭化率,目前主流的炭化设备包括间接式、回转式、重力式、螺旋式等^[11-14]。然而重力式炭化设备易出现受热不均现象,回转式炭化炉无法保证进出料口的密封性,螺旋式物料间摩擦较大,但从炭化均匀性及综合成本角度考虑,螺旋式热解装置具有明显优势^[15]。

生物质在热解过程中会产生大量 CO 、 CH_4 、 H_2 以及焦油等可燃物质^[16],是热解气的主要污染组成部分^[17]。目前对生物质热解气多以净化后排放为主,生物质炭化热解气净化方法主要包括离心式、湿法、过滤法、静电法等方式^[18-19]。这些方法尽管可以一定程度上净化热解气,但都存在净化成本和效果的矛盾^[20]。因此,考虑将热解气回收利用为炭化过程供能,既降低了烟气排放,又降低了炭化燃料投入。如文献[21-22]设计的炭化炉将热解气中的可燃气体分离后继续燃烧为炭化炉供热,文献[23]利用返回烟道将余热进行高效利用,降低碳排放。

综上所述,热解气中的可燃气体含有较高的热值,既可为生物质连续热解炭化提供一部分能量来源,同时也降低了热解气净化难度,减少了炭化过程中总能量的投入,降低对环境的污染^[24-25]。因此,为提高生物质炭化均匀性和热解气利用率,本文设计一种双螺旋搅拌式炭化装置,同时增设热解气回流引燃装置,为生物质炭化供能,并进行样机性能试验。

1 搅拌回燃式炭化炉结构与工作原理

1.1 炭化炉结构设计

设计的搅拌式生物质炭化炉(图 1)主要部件包括:烟囱、预热仓、热解气导管、炭化室、螺旋叶片、螺旋搅拌器、出料口、燃烧室、轴承、进料口、上盖等。炭化室顶部设置阵列小孔,用于将炭化热解气引入

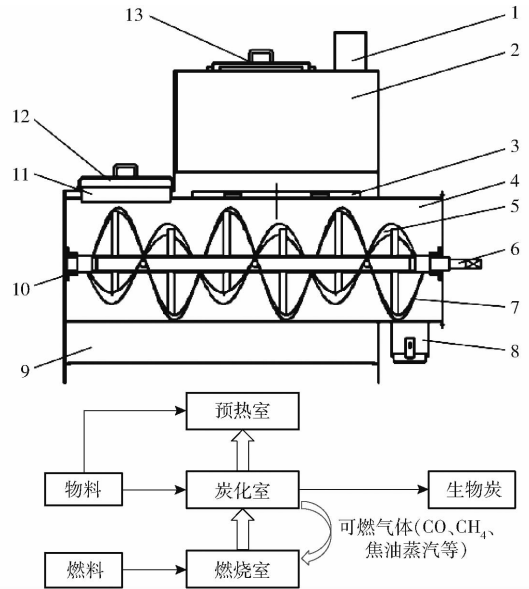


图 1 炭化炉整机结构及工作原理图

Fig. 1 Structure and working principle of carbonization kiln

1. 烟囱 2. 预热仓 3. 热解气导管 4. 炭化室 5. 内螺旋带
6. 螺旋搅拌器主轴 7. 外螺旋带 8. 出料口 9. 燃烧室 10. 轴
承 11. 进料口 12、13. 上盖

导管。

1.2 工作原理

本炭化炉采用序批模式作业,首先在燃烧室点火对炭化室进行加热,同时螺旋搅拌器在电机驱动下旋转。燃烧室温度随物料的增加不断上升,当温度达到生物质裂解温度时,生物质在燃烧室缺氧环境下发生化学反应放出大量可燃气体。可燃气体经由导烟管,回流至燃烧室被点燃。燃烧产生的大部分热量可对炭化室进行加热,同时减轻对环境的污染。未被炭化室吸收的热量通过预热室底部孔眼进入预热室对物料进行预热干燥,最后烟气进入尾气净化装置,相关研究成果见文献[18]。当炭化室内的物料炭化完成并卸料后,将预热室的物料加入炭化室,再对预热室装料,重复之前的炭化操作。

2 关键部件结构设计

2.1 炭化室结构设计

本研究设计的炭化室加热方式为外部加热,物料在炭化室内由螺旋搅拌器搅拌,炭化室为圆柱桶状,尺寸(高×底面直径)为 1 180 mm×370 mm。炭化室包括进料口、出料口、热解气导管。炭化室顶部与热解气导管连接,炭化生成的热解气沿着导管回

流至燃烧室,当浓度和流速达到燃烧条件时被点燃,热解气燃烧可对炭化室持续加热,减少有害气体排放,降低燃料投入,提高能量利用率。设计的热解气导管进口口径为 20 mm,出口口径为 10 mm。炭化炉理论生产效率计算公式为

$$W = \frac{V\psi_i\rho\eta}{t} \quad (1)$$

式中 W ——炭化炉理论生产效率,kg/h

V ——炭化室容积, m^3

ψ_i ——充满系数,%

ρ ——物料堆积密度,kg/ m^3

η ——炭化率,%

t ——单次炭化总耗时间,h

2.2 双螺旋搅拌器设计及工作原理

为使物料受热均匀,本研究采用双螺旋带对物料进行搅拌加热。该双螺旋搅拌器由主轴、短轴和正反螺旋叶片组成(图2),主轴旋转时,正反螺旋叶片分别推动物料反向运动,物料在炭化室内形成横向对流运动,保证了物料受热均匀性。

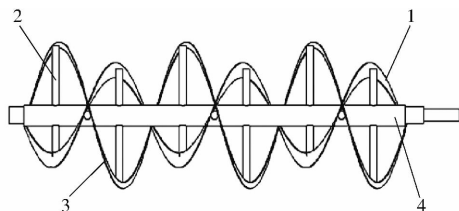


图2 螺旋搅拌器示意图

Fig.2 Spiral mixer schematic

1. 内螺旋叶片 2. 固定立柱 3. 外螺旋叶片 4. 主轴

螺旋搅拌器的工作面是由一根垂直于轴的直元线段绕轴等速回转的同时,沿轴等速移动形成螺旋面。双螺旋叶片在轴向投影示意如图2所示,工作时应保证双向输送功率一致,由文献[26]可知

$$C = \rho K_i \psi_i \pi \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right] w \quad (2)$$

式中 C ——螺旋输送机输送量,kg/s

K_i ——倾斜安装时生产率降低系数

D ——螺旋带外环直径,mm

d ——螺旋带内环直径,mm

w ——物料沿 z 轴运动速度,mm/s

设计的外螺旋带外径 D_1 为 350 mm,内径 d_1 为 320 mm,内螺旋带外径 D_2 为 250 mm,由式(2)可得 $d_2 = 206$ mm。双螺旋搅拌器其他关键参数:螺距为 350 mm,轴径为 40 mm,叶片厚度为 2 mm。

3 基于 Fluent 的炭化室温度场模拟

3.1 几何模型构建

生物质炭化空间几何模型包括炭化室、双螺旋

搅拌器,其计算区域为炭化室内除去螺旋搅拌器的空间区域,如图3所示。

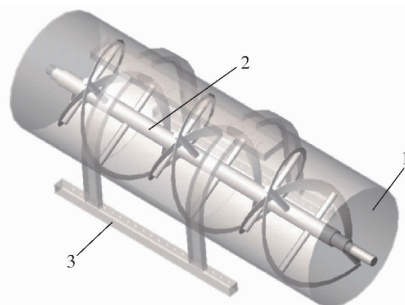


图3 搅拌式炭化炉炭化室示意图

Fig.3 Agitator charring kiln

1. 炭化室 2. 双螺旋搅拌器 3. 热解气导管

3.2 炭化炉能量分析及物料传热模型

3.2.1 生物质炭化能量分析

根据能量守恒定律可得搅拌式炭化炉能量平衡方程

$$Q_f + Q_g + Q_b = Q_s + Q_r \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} Q_f = q_f m_f \\ Q_g = \sum_{i=1}^n V_i q_i \\ Q_s = \int_{T_0}^{T_1} m_1 c_1(t) dt + \int_{T_1}^{T_e} m_2(t) c_2(t) dt \\ Q_r = S \left(\int_{T_0}^{T_1} \int_0^{t_1} \alpha \sigma dT^4 + \int_{t_1}^{t_e} \varepsilon \sigma T_i^4 dt \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中 Q_f ——炭化投入的额外燃料燃烧放热,kJ

Q_g ——生物质热解气回燃释放的热量,kJ

Q_b ——生物质炭化释放的热量,kJ(稻壳炭化释放的化学能,按稻壳低位发热量计为 14.72 MJ/kg^[27])

Q_s ——炭化结束时生物炭存留热量,kJ

Q_r ——炉体工作时对环境辐射能量,kJ

m_f ——炭化初期投入燃料质量,kg

q_f ——燃料热值,kJ

V_i ——热解气中第 i 种成分的体积^[28],L

q_i ——该种气体的热值,kJ/L

m_1 ——生物质物料质量,kg

m_2 ——生物炭质量,kg

T_0 ——生物质初始温度,K

T_1 ——生物质开始炭化时温度,K

T_e ——生物炭终止炭化时温度,K

c_1 ——生物质炭化前比热容,kJ/(kg·K)

c_2 ——炭化过程中的平均比热容,kJ/(kg·K)

S ——炉体外壁表面积, m^2

T_l ——炉体稳态时温度, K

T ——炭化温度, K

t_1 ——炉体达到稳态时所用时间, s

t_e ——炭化终止时间, s

α ——炉体比辐射率

σ ——Stefan - Boltzmann 常量

3.2.2 生物质传热模型

基于 $k - \varepsilon$ 三维紊流模型方程, 作出以下假设: 炭化室内部物料为不可压缩流体, 密度 ρ 为 $127 \text{ kg}/m^3$, 比热容 c_1 为 $0.75 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot K)$, 导热系数 λ 为 $0.12 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot K)$; 流动为稳态紊流; 忽略壁面

间的辐射; 假设流场具有高紊流数, 流体的紊流粘性具有各向同性; 热源为炭化室底部外壁 $15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 范围; 炭化室密封良好。

根据上述假设, 炭化室内物料流动与传热控制方程可写成

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial z} \right) + S_\phi \quad (5)$$

式中 Γ ——扩散系数 S_ϕ ——源项

φ ——通用变量

传递模型控制方程具体表达式如表 1 所示。

表 1 控制方程组参数

Tab. 1 Parameters of control equations

方程	φ	扩散系数 Γ	源项 S_ϕ
连续	1	0	0
x 向动量	u	$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x} \right)$
y 向动量	v	$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y} \right)$
z 向动量	w	$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$
湍动能	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k + \rho\varepsilon$
耗散率	ε	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho\varepsilon)$
能量	T	$\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}$	$\frac{q}{c_1}$

注: u, v 分别为 x, y 方向的速度, μ_{eff} 为有效粘性系数, μ_t 为湍动粘度, μ 为层流粘性系数, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_\varepsilon, \sigma_k, \sigma_T$ 为经验常数, $\mu = \rho \nu L / Re, Pr$ 为普朗克数, q 为热流密度, G_k 为紊流动能产生项, p 为时均压力。

3.3 网格划分及边界条件设定

在直角坐标系下划分计算网格, 以体积为 32 mm^3 的正四面体为计算单元对炭化室进行网格划分, 单元数 \times 面数 \times 节点数为 $1\ 112\ 639 \times 2\ 276\ 699 \times 210\ 721$, 采用基于交错网格的高斯容积法对控制方程进行离散, 压力为标准压力, 动量、湍流动能、湍流耗散均采用一阶迎风差分格式。

炭化炉工作时, 炭化室及内部搅拌器边界包括: 流动进口边界、流动出口边界、静态壁面边界、动态壁面边界。温度界面连续, 满足能量守恒方程。进口边界: 速度定义为垂直于边界, $v = 0.01 \text{ m}/s$, $T = 1\ 123 \text{ K}$, $k = 0.022\ 5$, $\varepsilon = 0.007\ 92$ 。出口边界: 出口压力为 0, k, ε 为自由滑动。固定壁面边界: 选取炭化室内壁为固定墙壁, 切变条件选择无滑移, 温度条件为对流换热, 材料为钢铁, 壁厚 3 mm , 无内热源。移动壁面边界: 选取螺旋叶片为移动墙壁, 运动方式选择旋转。旋转角速度为 $0.05 \text{ rad}/s$, 切变条件无滑移, 材料钢铁, 无内热源, 壁厚 0.002 m 。

3.4 数值计算结果与分析

对搅拌式生物质炭化炉炭化室内的物料流场和

温度场进行数值模拟, 应用 SIMPLE 算法求解离散控制方程, 计算结果如图 4 所示。由图 4c 可知, 炭化室温度分布基本均匀, 符合生物炭生产温度分布要求, 与传统“焖炭”工艺制作生物炭相比, 温度均匀性具有明显的优势; 由图 4a、4d 可知, 产生的热解气能够在导烟管的引导下回流至燃烧室, 且气体流速与进出口孔径和进口压力有关; 图 4b 表明导烟管左右两侧温度存在显著差异, 根据其内部的速度矢量图可知物料在做顺时针旋转, 产生的热解气也在进行顺时针旋转, 当经过炭化室顶端开口时, 气体会更多地进入右侧导烟管, 为导烟管结构设计提供理论依据。模拟分析结果显示, 温度云图中出现了温度亮斑, 这与模拟计算时进口热源位置设置有关, 当螺旋搅拌器转速增加时, 温度亮斑明显减小, 由此说明炭化室温度分布对螺旋搅拌器的影响显著。

4 搅拌回燃式炭化炉性能试验

4.1 试验材料与仪器

本试验所使用的生物质材料为稻壳, 含水率为 6.49% , 使用设备为设计的搅拌回燃式炭化炉。

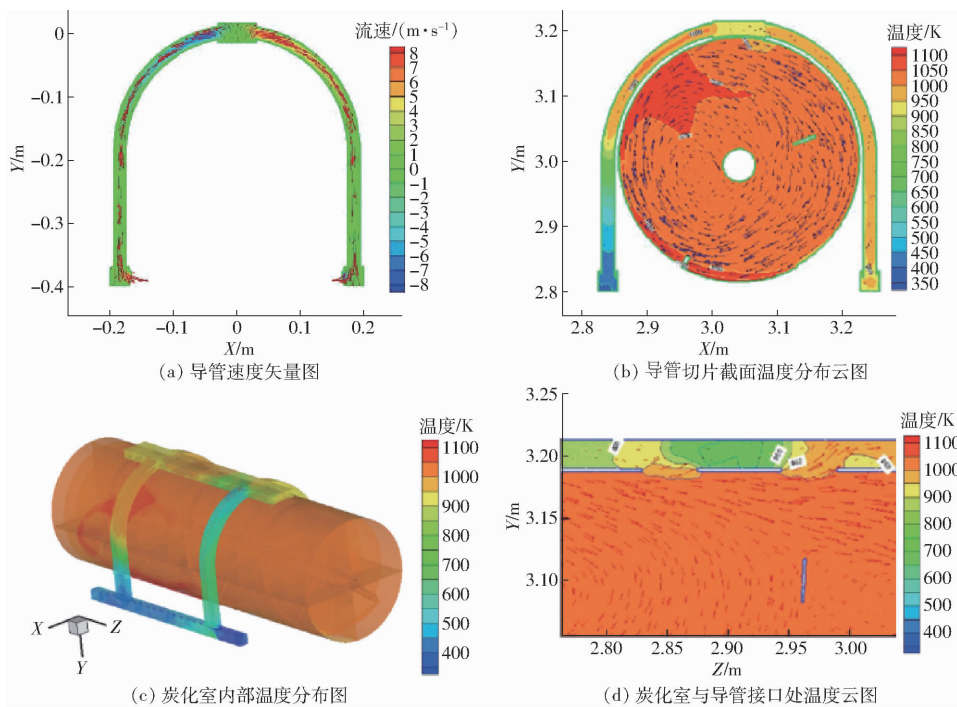


图 4 数值计算结果

Fig. 4 Numerical simulation results

试验装置包括: 自制搅拌回燃式炭化炉、三相异步电动机(额定功率 3 000 W)、变频器(额定功率 3 kW)、电子秤(量程 50 kg)和电子温度计(量程 -50 ~ 1 300℃)。

试验地点: 沈阳农业大学生物炭试验中心。试验装置如图 5 所示。



图 5 试验炭化炉实物图

Fig. 5 Test carbonizing furnace

4.2 试验设计

4.2.1 炭化室温度试验

为探究搅拌回燃式炭化炉工作性能, 当可燃气体引燃后, 用温度计监测炭化室内部温度变化。选取螺旋搅拌器转速为试验变量进行单因素试验, 试验水平分别为: 20、30、40、50、60 r/min。

4.2.2 炭化率试验

选取螺旋搅拌器转速、炭化室物料充满系数、可燃气体引燃后的计时时间(炭化时间)为试验因素, 以炭化率为该装置的性能指标, 进行三元二次回归旋转组合试验。根据单因素试验结果, 对各因素进行编码, 得到因素编码如表 2 所示。每组试验重复 3 次取平均值。通过响应面分析法, 进行回归方程拟合度检验和显著性检验, 建立炭化率的回归模型, 根据拟合模型绘制的响应面, 分析各因素及交互作用对炭化指标的影响规律。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Test factor codes

编码	因素		
	螺旋搅拌器转速/(r·min ⁻¹)	物料充满系数/%	炭化时间/min
1. 682	50.0	95.0	30.0
1	42.9	87.9	26.0
0	32.5	77.5	20.0
-1	22.1	67.1	14.0
-1. 682	15.0	60.0	10.0

4.2.3 试验指标与方法

炭化室温度测量方法: 当炭化生成的热解气被引燃后, 在炭化室内部插入探针式温度计, 记录温度变化曲线。

炭化率 η 计算方法为

$$\eta = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (6)$$

4.3 试验结果与分析

4.3.1 炭化室温度试验

对研制的搅拌回燃式炭化炉进行炭化室温度试验,热解气回流引燃及炭化室温度曲线如图6所示。结果表明,生物质炭化产生的可燃气体经过导烟管回流至燃烧室后可以被点燃,起到降低尾气排放和减少炭化燃料投入的作用。炭化室温度主要集中在420~470℃之间,符合物料炭化所需温度。当螺旋搅拌器转速提高,可燃气体被点燃时的炭化室温度略有降低,炭化室峰值温度增加,且提前达到温度稳定期。这是由于转速加快导致可燃气体溢出浓度增加,更容易被引燃,且单位时间内燃烧释放的热量增加,导致炭化室温度更早地进入稳定期。随着产生的可燃气体逐渐减少,导烟管出口不再有火焰喷出,炭化室温度开始逐渐下降。



(a) 热解气回流燃烧情况

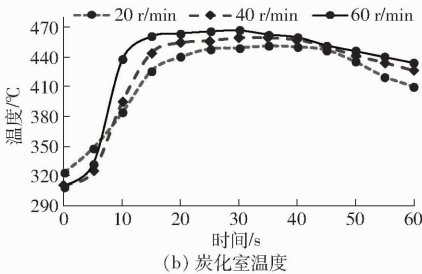


图6 热解气燃烧及炭化室温度曲线

Fig.6 Combustion and carbonization chamber temperature curves of combustible gas

4.3.2 炭化率试验

采用三因素二次回归旋转组合试验,结果如表3所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为转速、充满系数和炭化时间编码值。

4.3.3 回归方程建立与显著性分析

对炭化率进行回归分析,可求得该模型四元二次回归方程为

$$\eta = 48.09 + 2.55X_1 + 1.52X_2 - 1.54X_3 + 0.855X_1X_2 - 0.3425X_1X_3 - 1.15X_2X_3 - 1.43X_1^2 - 1.89X_2^2 - 1.73X_3^2 \quad (7)$$

在 $\alpha = 0.05$ 显著水平下,对回归方程进行显著性检验与方差分析,分析结果见表4。

对试验数据进行回归分析,得到回归方程模型

表3 二次回归旋转组合设计及炭化率试验结果

Tab.3 Quadratic regression rotation combination experimental design and carbonization ratio test results

序号	因素			炭化率 $\eta/\%$
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	40.09
2	1	-1	-1	43.26
3	-1	1	-1	42.15
4	1	1	-1	50.32
5	-1	-1	1	39.39
6	1	-1	1	42.77
7	-1	1	1	38.45
8	1	1	1	43.67
9	-1.682	0	0	40.36
10	1.682	0	0	49.24
11	0	-1.682	0	40.03
12	0	1.682	0	46.96
13	0	0	-1.682	46.78
14	0	0	1.682	41.12
15	0	0	0	47.65
16	0	0	0	47.92
17	0	0	0	48.44

表4 回归方程方差分析

Tab.4 Regression equation analysis of variance

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	232.19	9	25.8	17.5	0.0005
X_1	89.06	1	89.06	60.4	0.0001
X_2	31.48	1	31.48	21.35	0.0024
X_3	32.47	1	32.47	22.03	0.0022
X_1X_2	5.85	1	5.85	3.97	0.0867
X_1X_3	0.9385	1	0.9385	0.6365	0.4512
X_2X_3	10.49	1	10.49	7.11	0.0321
X_1^2	22.99	1	22.99	15.59	0.0055
X_2^2	40.25	1	40.25	27.3	0.0012
X_3^2	33.69	1	33.69	22.85	0.0020
残项	10.32	7	1.47		
失拟项	10	5	2	12.4	0.0763
误差项	0.3225	2	0.1612		
总误差	242.51	16			

注: $R^2 = 0.96$,调整 $R^2 = 0.90$,信噪比为13.09。

$F = 17.5 > F_{0.01}(9,7) = 6.72$, $P = 0.0005$,表明回归模型极显著; $R^2 = 0.96$,失拟 $F = 12.4 < F_{0.05}(5,2) = 19.03$, $P = 0.0763 > 0.05$,表明预测值与试验值之间相关性较好,可用于炭化率的预测。各因素对炭化率的影响极显著,影响顺序从大到小依次为:转速、炭化时间、充满系数。交互作用中,充满系数与炭化时间对炭化率的影响显著($P < 0.05$)。剔除 $\alpha = 0.05$ 的不显著项,简化回归方程为

$$\eta = 48.09 + 2.55X_1 + 1.52X_2 - 1.54X_3 - 1.15X_2X_3 - 1.43X_1^2 - 1.89X_2^2 - 1.73X_3^2 \quad (8)$$

4.3.4 因素的响应面分析及优化结果

对表4的试验结果进行响应面分析可得,各因素对炭化率的影响如图7所示。结果表明,当螺旋搅拌器转速为0水平(32.5 r/min),炭化室充满系数一定时,炭化率随着炭化时间的增加而降低;当炭化时间一定时,随充满系数增加,炭化率先增加后降低。根据多元函数极值理论,对总炭化率回归方程求偏导得到最优参数组合:螺旋搅拌器转速为42.91 r/min,充满系数为86.68%,炭化时间为15.02 min,预测炭化率为51.05%。

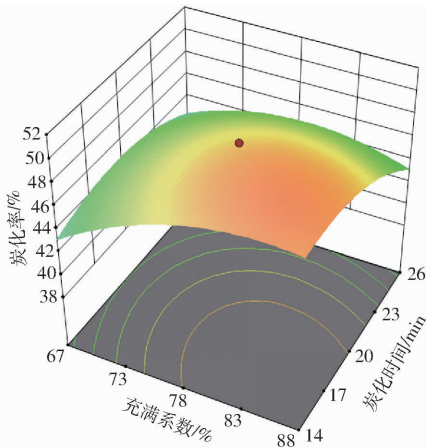


图7 充满系数及炭化时间对炭化率影响的响应曲面

Fig.7 Influence of filling coefficient and carbonization time on carbonization rate

4.4 炭化率验证试验

考虑到试验的操作性,对优化条件进行调整:螺旋搅拌器转速为43 r/min,充满系数为86.68%,炭化时间为15 min,试验重复3次。得炭化率为50.86%,与预测值51.05%接近,误差为0.37%,说明二项式优化区域与设计目的相符,响应面模型与试验设计具有可靠性和重现性。

4.5 燃料节约量分析

由式(3)可知,采用回燃式炭化方案理论上需要投入的燃料质量为

$$m_f = (Q_s + Q_r - Q_b - Q_g) / q_f \quad (9)$$

若采用常规方式进行炭化,不进行热解气的回燃利用,则理论上需要投入的燃料质量为

$$m'_f = (Q_s + Q_r - Q_b) / q_f \quad (10)$$

因此,采用回燃式炭化技术,每次炭化作业燃料投入节约量为

$$\Delta m_f = m'_f - m_f = \frac{Q_g}{q_f} \quad (11)$$

式中 Δm_f ——炭化炉燃料投入减少量,kg

以稻壳为生物质原材料、秸秆为炭化燃料为例,由图6b可知炭化室温度主要集中在420~470℃之间,此时,稻壳热解气主要产物为 H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_4 以及 CO_2 ^[25]。按照充满系数为86.68%、秸秆低位热值、散热损失相同的情况计算,采用本文研究的回燃式炭化装备每次炭化将节省约0.64 kg水稻秸秆。

4.6 生物炭理化性质测定

对该炭化炉炭化验证试验制备的生物炭进行理化性质测定,检测指标包括:灰分质量分数、挥发分质量分数、pH值、表面特征、固定碳质量分数等关键指标。试验设备包括:比表面积分析仪、电子显微镜、分析天平、pH计等设备。采用国家标准GB/T 212—2001的方法对生物炭进行工业分析,3次测量取平均值。分析结果表明,本文研制的炭化炉所生产的稻壳炭灰分质量分数为37.5%,挥发分质量分数为18.1%,固定碳质量分数为42.4%,热值为18.9 MJ/kg,pH值为8.51,孔容为0.18 cm^3/g ,孔径为5.8 nm,比表面积为2.57 m^2/g 。其中灰分质量分数、挥发分质量分数、固定碳质量分数等指标与文献[29-30]的研究结果具有相同趋势,符合稻壳炭化产物基本特征,该稻壳炭可作为制备改性生物炭的原材料。

5 结论

(1)针对现有炭化设备存在受热不均匀、能量利用率低的问题,设计了一种双螺旋带搅拌热解气回燃式炭化炉。设计的双螺旋搅拌器可提高物料炭化均匀性;热解气导管能够将炭化生成的热解气引流至燃烧室并使其燃烧,持续对炭化室进行加热,提高了能量利用率。确定了螺旋搅拌器、炭化室、热解气导管等关键结构参数。

(2)进行了炭化室温度试验,生物质炭化产生的热解气回流燃烧后能够使炭化室温度维持在420~470℃之间,满足生物质炭化需求。

(3)进行了样机性能试验,建立了螺旋搅拌器转速、充满系数以及炭化时间对炭化率的回归方程,通过方差分析对回归模型进行了拟合度和显著性检验。各因素对炭化率影响极显著($P < 0.01$),影响程度从大到小依次为:转速、炭化时间、充满系数。获得最优组合参数:螺旋搅拌器转速为43 r/min、充满系数为86.68%、炭化时间为15 min,此时炭化率为50.86%。

参 考 文 献

- the soil environment: a critical review[J]. *Biochar*, 2024, 6(1):9.
- [2] FAN C, CUI Y, ZHANG Q, et al. A critical review of the interactions between rhizosphere and biochar during the remediation of metal (loid) contaminated soils[J]. *Biochar*, 2023, 5(1):87.
- [3] 田学坤, 王霞, 苏凯, 等. 生物质材料炭化的研究进展及其应用展望[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(12):2026–2036. TIAN Xuekun, WANG Xia, SU Kai, et al. Research progress and application prospects of the carbonization of biomass materials [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(12):2026–2036. (in Chinese)
- [4] 程龙生, 陈蓉, 朱根民, 等. 生物质炭的制备、改性以及在挥发性有机物吸附方面的应用[J]. *化学通报*, 2024, 87(1): 56–66, 35. CHENG Longsheng, CHEN Rong, ZHU Genmin, et al. Preparation and modification of biochars and its application in VOC adsorption [J]. *Chemistry*, 2024, 87(1):56–66, 35. (in Chinese)
- [5] 于诗杰, 陈欣雨, 文思棋, 等. 浒苔生物炭负载纳米零价铁激活过硫酸盐去除水中环丙沙星的研究[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2024, 27(2):49–57. YU Shijie, CHEN Xinyu, WEN Siqi, et al. Removal of ciprofloxacin from water by activating persulfate with nano zero-valent iron loaded on *Enteromorpha prolifera* biochar [J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Edition)*, 2024, 27(2):49–57. (in Chinese)
- [6] 杨慧华, 刘红叶, 张哈, 等. 果菜秸秆生物炭吸附设施土壤硝态氮性能与机制研究[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(5):386–394. YANG Huihua, LIU Hongye, ZHANG Han, et al. Adsorption of nitrate nitrogen by solanaceous vegetables straw-derived biochar [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(5):386–394. (in Chinese)
- [7] 张继宇, 张鲜鲜, 孙会峰, 等. “双碳”背景下生物炭基肥的研究现状及展望[J]. *浙江农业科学*, 2023, 64(12):2825–2830. ZHANG Jinying, ZHANG Xianxian, SUN Huifeng, et al. Current states and prospect of biochar-based fertilizer under the background of carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2023, 64(12):2825–2830. (in Chinese)
- [8] 薛里, 张忠学, 齐智娟, 等. 节水灌溉下秸秆还田形式对黑土区稻田 N_2O 排放与产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(4):280–289. XUE Li, ZHANG Zhongxue, QI Zhijuan, et al. Effects of straw returning on N_2O emission and yield under water-saving irrigation in black soil paddy field [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(4):280–289. (in Chinese)
- [9] 许惠, 夏志鹏, 冯勇, 等. 生物质连续热裂解设备开发现状及发展前景[J]. *现代制造技术与装备*, 2017(3):152–155. XU Hui, XIA Zhipeng, FENG Yong, et al. The research status and development prospects of biomass continuous-pyrolysis equipments [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2017(3):152–155. (in Chinese)
- [10] 武术. 玉米秸秆余热焖炭式炭化试验装置设计及试验[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2023. WU Shu. Design and experiment of carbonization device with afterheat for corn stalk [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [11] 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 Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(8):435–440. (in Chinese)
- [12] 袁小伟, 张学军, 吕慧捷, 等. 单釜间歇式生物质炭化热解设备的结构设计研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(5):405–412. YUAN Xiaowei, ZHANG Xuejun, LÜ Huijie, et al. Study on biomass carbonization and pyrolysis with single kettle intermittent equipment [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(5):405–412. (in Chinese)
- [13] 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]. *农业机械学报*, 2016, 47(8):221–226, 220. ZHAO Lixin, JIA Jixiu, YAO Zonglu, et al. Equipment for biomass continuous grading pyrolysis [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8):221–226, 220. (in Chinese)
- [14] 李新. 农作物秸秆连续回转式炭化技术研究[D]. 长春:长春理工大学, 2022. LI Xin. Study on continuous rotary carbonization technology of crop straw [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [15] 崔凯青. 生物质秸秆炭化工艺及设备研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2023. CUI Kaiqing. Study on the technology and equipment of biomass straw carbonization [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023. (in Chinese)
- [16] 陈天佑. 秸秆炭化烟气两级净化装置设计及试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2019. CHEN Tianyou. Design and experimental research on two stage purification device of straw carbonization flue gas [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [17] 刘阳, 靳晨生, 张海亚, 等. 秸秆生物炭的固碳减排潜力及其环境影响[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(1):396–403. LIU Yang, JIN Chensheng, ZHANG Haiya, et al. Carbon sequestration and emission reduction potential of straw biochar and its environmental impacts [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(1):396–403. (in Chinese)
- [18] 辛明金, 迟博文, 陈天佑, 等. 秸秆炭化热解气旋风分离器-指杆轮两级净化装置研制[J]. *农业工程学报*, 2019,

- 35(4):218-224.
- XIN Mingjin, CHI Bowen, CHEN Tianyou, et al. Development on cyclone-finger roller two-stage purification device of pyrolysis gas from straw carbonization[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4):218-224. (in Chinese)
- [19] 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.
- DONG Yuping, DONG Lei, QIANG Ning, et al. Numerical simulation of biomass gas and tar torrential flow characteristics in cyclone separator[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9):171-175, 385. (in Chinese)
- [20] 袁艳文, 田宜水, 赵立欣, 等. 卧式连续生物炭炭化设备研制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13):203-210.
- YUAN Yanwen, TIAN Yishui, ZHAO Lixin, et al. Design and manufacture of horizontal continuous biomass carbonization equipment[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13):203-210. (in Chinese)
- [21] ROUSSET P, FIGUEIREDO C, DE SOUZA M, et al. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: a statistical analysis approach[J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92(10):1890-1897.
- [22] SHETH P N, BABU B V. Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(12):3127-3133.
- [23] 杨忠福, 魏英华, 张振武, 等. 炭化炉返回烟道模拟优化研究[J]. 选煤技术, 2022, 50(5):19-23.
- YANG Zhongfu, WEI Yinghua, ZHANG Zhenwu, et al. Study on numerical simulation of the return-gas flue duct of carbonization furnace for optimization of flue design parameters[J]. Coal Preparation Technology, 2022, 50(5):19-23. (in Chinese)
- [24] 王丹青, 陈昊翔, 李顺滢, 等. 白酒酒糟稻壳基生物炭的制备及吸附应用[J]. 中国酿造, 2023, 42(12):123-129.
- WANG Danqing, CHEN Haoxiang, LI Shunying, et al. Preparation and adsorption application of biochar from *Baijiu* distiller's grains husk[J]. China Brewing, 2023, 42(12):123-129. (in Chinese)
- [25] 谢滨, 张志成, 宋中建, 等. 农业废弃物快速好氧发酵设备设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(1):62-70.
- XIE Bin, ZHANG Zhicheng, SONG Zhongjian, et al. Design and experiment of rapid aerobic fermentation equipment for agricultural waste[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(1):62-70. (in Chinese)
- [26] 王鹰. 连续输送机械设计手册[M]. 北京:中国铁道出版社, 2001:737-743.
- [27] 林贵英, 陈伟, 刘文质, 等. 热解温度对稻壳生物炭特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(4):456-461.
- LIN Guiying, CHEN Wei, LIU Wenzhi, et al. Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar from rice husk[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(4):456-461. (in Chinese)
- [28] 王明峰, 蒋恩臣, 李伯松, 等. 稻壳连续热解特性研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(1):168-172.
- WANG Mingfeng, JIANG Enchen, LI Bosong, et al. Study on continuous pyrolysis of rice husk[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(1):168-172. (in Chinese)
- [29] 宋威, 孟海波, 陈明松, 等. 兼吸式移动床生物质热解炭化装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6):325-331, 364.
- SONG Wei, MENG Haibo, CHEN Mingsong, et al. Design and experiment of both updraft and downdraft biomass pyrolysis charring device in moving bed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6):325-331, 364. (in Chinese)
- [30] 吕娟, 王明峰, 蒋恩臣, 等. 不同热解温度下稻壳炭的理化特性分析[J]. 可再生能源, 2017, 35(10):1448-1453.
- LÜ Juan, WANG Mingfeng, JIANG Enchen, et al. Analysis on the physicochemical properties of the rice husk carbon produced at different pyrolysis temperature[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(10):1448-1453. (in Chinese)