

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.01.036

# 移动式玉米秸秆热解炭化原位还田设备研究

赵立欣<sup>1,2</sup> 田利伟<sup>1</sup> 贾吉秀<sup>2,3</sup> 霍丽丽<sup>2,3</sup> 谢腾<sup>2,3</sup> 姚宗路<sup>2,3</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;  
3. 农业农村部华北平原农业绿色低碳重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 针对目前秸秆炭化还田主要以异位为主, 移动式热解设备结构复杂, 难以实现秸秆田间炭化还田等问题, 基于秸秆内热式低氧炭化原理, 建立自供热反应系统, 研制热解炭化反应器和热解气清洁燃烧室等关键部件, 集成秸秆捡拾收集、粉碎输送、烟气回用烘焙、生物炭原位还田技术, 研发移动式热解炭化原位还田设备。样机试制后, 进行了静态调试试验, 结果表明: 该设备原料处理量为 50 kg/h, 炭得率为 21%, 系统能量利用率 74.6%; 排放烟气中 NO<sub>x</sub> 质量浓度为 184 mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub> 质量浓度为 26 mg/m<sup>3</sup>, 颗粒物质量浓度为 17.8 mg/m<sup>3</sup>, 达到烟气排放要求; 生物炭中总碳、固定碳及金属元素含量符合 DB21/T 3314—2020《生物炭直接还田技术规程》中的 I 级生物炭要求。该设备能够实现低碳排放、炭化能源自给、田间作业等功能, 为秸秆还田提供支撑平台。

**关键词:** 玉米秸秆; 原位炭化; 生物炭还田; 移动式设备

中图分类号: S216

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)01-0357-07

OSID:



## Mobile Equipment Study of Corn Stalk In-situ Returning Carbonization

ZHAO Lixin<sup>1,2</sup> TIAN Liwei<sup>1</sup> JIA Jixiu<sup>2,3</sup> HUO Lili<sup>2,3</sup> XIE Teng<sup>2,3</sup> YAO Zonglu<sup>2,3</sup>

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3. Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Unreasonable utilization of stalk resources leads to environmental pollution and resource waste in rural areas. Stalk returning is one of the promising technologies to improve the physical and chemical properties of soil, soil fertility, and soil organic matter. Corn stalk could be transformed into biochar and return to the field in-situ by pyrolysis and carbonization returning technology. There are some researches on mobile pyrolysis equipment, however, the complex structure of the equipment makes it hard to realize carbonization and returning to field in-situ. Therefore, a mobile pyrolysis and carbonization returning to the field in-situ integrated equipment was developed. A self-heating reaction system was established based on the principle of stalk internal thermal low oxygen carbonization. Meanwhile, the key parts were designed such as pyrolysis and carbonization reactor, and pyrolysis gas clean combustion chamber. The equipment integrated multiple technologies and devices. Such as stalk collection and crushing and transportation mechanism, flue gas recycling, torrifaction, and biochar in situ returning technology. The power system was equipped as well. The results showed that the material handling capacity of the equipment was 50 kg/h, the yield of biochar was 21%, and the conversion efficiency was 74.6%. Furthermore, the mass concentration of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> in flue gas were 184 mg/m<sup>3</sup> and 26 mg/m<sup>3</sup>, respectively. In parallel, the mass concentration of particulate matter was 17.8 mg/m<sup>3</sup>. The emission met the flue gas emission requirements. The physical and chemical properties (total carbon, fixed carbon) of biochar, metal elements content, and the amount of biochar returned to the field met the requirements of standard of grade I biochar in DB21/T 3314—2020. The equipment could realize lower carbon emission, self-heating, and field mobile operation, which was beneficial to the utilization of corn stalk. Moreover, it was of great significance for the promotion of stalk returning technology in-situ.

**Key words:** corn stalks; in-situ charring; charring and returning to field; mobile equipment

收稿日期: 2022-11-11 修回日期: 2022-11-30

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程项目和财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-02)

作者简介: 赵立欣(1967—), 女, 博士生导师, 中国农业科学院研究员, 主要从事生物质能源技术研究, E-mail: zhaolixincaas@163.com

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

## 0 引言

据统计,2021年全国秸秆利用量为 $6.47 \times 10^5$  t,综合利用率达88.1%,秸秆还田量达 $4 \times 10^8$  t<sup>[1]</sup>。秸秆还田是资源化利用有效途径,既增加了土壤有机质,又避免因秸秆废弃霉烂和焚烧造成的环境污染,但秸秆过量还田易导致土壤墒情降低,影响出苗率<sup>[2-3]</sup>。农作物秸秆可通过热解炭化技术转化为生物炭进行还田,生物炭孔隙大、吸附性强,具有保水、保肥作用,同时兼具固碳减排能力,能够改善土壤,提升有机质含量,对于促进农民增收、环境保护、资源节约以及农业经济可持续发展意义重大<sup>[3-5]</sup>。

目前,生物炭还田以秸秆“离田、炭化再还田”的异位还田方式为主,异位还田存在秸秆收储运、生物炭运输以及相关还田设备配置等问题,增加了还田成本<sup>[6-7]</sup>。秸秆炭化原位还田是将秸秆就地炭化还田,有效避免了异位还田相关技术问题<sup>[8]</sup>。现有热解设备以固定式为主,如流化床、旋转锥、烧蚀反应器<sup>[9-11]</sup>等,难以实现炭化原位还田。开发移动式热解炭化原位还田设备,能够实现秸秆就地转化生物炭还田,极大减少能源投入,提高经济效益。

移动式热解设备概念是在20世纪90年代末提出的,美国提出一种移动能源工厂,系统由多个模块组成,可拆卸运输到指定地点进行发电作业。国际可再生燃油公司(ROI)、加拿大西安大略大学、美国BSI公司等<sup>[12]</sup>开展了对移动式热解设备的研究。国内王贤华<sup>[13]</sup>开发出一套安装于一台小型卡车上的移动式快速热解设备,实现了能量自给;文献<sup>[14-15]</sup>研制了移动式热解液化设备,其目的是提升反应器传热效率。国内外移动式热解设备大多数用于热解液化,通过快速升温将秸秆转化为生物油等液相产品,难以应用于秸秆热解炭化还田。目前,对移动式热解炭化还田设备研究较少,亟需研制出生物炭转化效率高、品质好、结构简单的热解反应器。本文拟开发移动式玉米秸秆热解炭化原位还田一体设备,基于内热式低氧炭化原理,研制热解炭化反应器和热解气清洁燃烧室等关键部件,集成烟气回用烘焙技术,开发热解气燃烧热能回用系统,集成秸秆捡拾粉碎与生物炭原位还田技术,研制适用于田间移动连续炭化原位还田设备。

## 1 整机设计

### 1.1 热解炭化原位还田工艺

移动式玉米秸秆热解炭化原位还田技术工艺主要包括自供热炭化、热解气燃烧热能回用和原位还田等,工艺流程如图1所示。自供热炭化工艺主要

包括低氧炭化闷烧、热解炭化、炭气分离等,热解气燃烧热能回用工艺主要包括热解气燃烧、烟气回用等,原位还田工艺主要包括生物炭冷却降温、生物炭原位还田等。采用内热式低氧炭化原理,建立自供热反应系统,结合热解气清洁燃烧回用,将复杂固相燃烧转化为气相稳定燃烧,实现清洁炭化还田,并减少外部能源输入性消耗<sup>[16]</sup>,集成秸秆捡拾粉碎、生物炭原位还田技术,从而实现秸秆炭化原位还田利用。

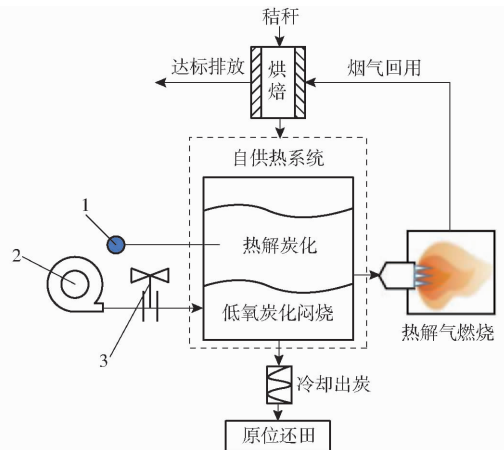


图1 移动式玉米秸秆热解炭化原位还田设备流程图

Fig. 1 Process of mobile equipment of corn stalk in-situ returning carbonization

1. 热电偶 2. 鼓风机 3. 调节阀门

### 1.2 整机结构设计与工作原理

设备主要由热解炭化系统、热解气燃烧系统、原料烘焙系统、冷却出炭系统、生物炭原位还田作业系统和控制系统等组成。结合下吸式反应器结构,采用内热式低氧炭化原理,通过控制过量空气系数从而限制反应器空气进入量,研制热解炭化系统,设计搅拌、压料、出炭结构,促进秸秆炭化,同时使热解气体、大分子焦油得到更加充分裂解;设计热解气燃烧室,将挥发分进行充分燃烧,降低污染源排放指标;集成烟气回用烘焙技术设计双筒式螺旋输料结构,回收烟气热量进行原料预干燥;热解产生的生物炭经冷却出炭系统完成降温、输送,集成秸秆捡拾粉碎、生物炭还田技术,配备动力系统,完成秸秆田间炭化原位还田,具体结构如图2所示。

设备工作时,秸秆收集系统将田间秸秆进行收集粉碎并输送至设备进料斗内,经螺旋进料器输送至上端,在重力作用下进入热解炭化系统,控制过量空气系数使反应器保持低氧环境,过量空气系数为0.8~1.0,将热电偶固定在距离反应器底部25 cm处,实时监测内部温度变化,炭化温度控制在500~600℃之间,设备稳定运行情况下,根据热电偶插入不同深度获得炭化中心与靠近壁面区温度差为 $\pm 15$ ℃。滞留时间为15~20 min。在炭化反应阶段

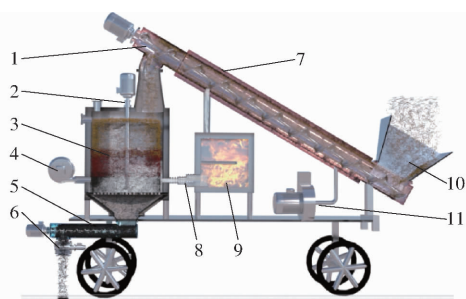


图 2 移动式玉米秸秆热解炭化原位还田设备结构图  
Fig. 2 Structure diagram of mobile equipment of corn stalk in-situ returning carbonization

1. 螺旋进料器 2. 搅拌压实器 3. 热解炭化反应器 4. 鼓风机  
5. 螺旋出料器 6. 关风器 7. 夹层 8. 燃烧器 9. 热解气燃烧室 10. 进料斗 11. 引风机

随着温度的升高,纤维素中纤维素糖基分热解生成左旋葡萄糖,左旋葡萄糖中 C—O、C—C 键断裂生成 CO、H<sub>2</sub>、焦油,芳香族化合物转化成少量的炭。温度大于 400℃ 时,秸秆中木质纤维素结构发生变化和重构,C—C 键、O—H 键和 C—H 键发生断裂,木质纤维素分解为小分子化合物,其中一部分通过重整、脱羧、脱水和缩聚形成苯酚类化合物,同时伴随产生 CH<sub>4</sub>、CO 和 H<sub>2</sub> 等气体;另一部分随着温度的升高继续分解形成水、甲醇等挥发性产物,而大量含苯自由基则形成多环芳香族化合物,最终转化为炭<sup>[17]</sup>。热解产生的挥发分气体由出口排出,进入热解气燃烧系统进行二次充分燃烧,产生的高温烟气经历螺旋进料器内壁间夹层完成排烟,通过热传递达到对原料预干燥的效果;生物炭经搅拌通过炉排落入集炭箱中冷却,冷却后生物炭由螺旋输料器、关风器完成出料;生物炭撒落地面后经历旋耕系统,实现生物炭与土壤均匀混合还田。

### 1.3 设备主要技术参数

设备主要技术参数如表 1 所示,其中生物炭品质应符合生物炭还田技术指标,烟气排放应满足大气污染物排放标准,设备运行应具有较高稳定性和实用性。根据设备工艺要求和工作条件,综合评价生物炭品质、系统能耗和经济性等方面影响,优化系

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 430×1 200×2 170
秸秆进料粒度/cm	<3
原料处理量/(kg·h <sup>-1</sup> )	50
设备消耗电能/(MJ·h <sup>-1</sup> )	≤10
生产率/(kg·h <sup>-1</sup> )	≥10
生物炭得率/%	≥20
生物炭固定碳质量分数/%	≥50
生物炭总碳质量分数/%	≥60

统结构和工艺参数。

## 2 关键部件设计

### 2.1 连续热解炭化反应器设计

热解炭化反应器结构设计为圆柱结构,底部为低氧闷烧区,中部为热解炭化区,上部为预热解区,反应器设计为双壁结构,两壁之间填充保温材料,反应器具有配风、搅拌压实和出炭等装置。反应器最初工作时在其内部点火配风,过量空气系数控制在 0.8~1.0 之间,使秸秆少部分缓慢燃烧供能热解炭化。内部温度控制在 500~600℃ 之间,热电偶实时监测内部温度变化,当温度降低时则调控配风,增加氧气,提升炭化程度,从而控制进出料使内部持续升温。为防止秸秆蓬松架料,进料同时需增施压力,搅拌结构设置 3 层压实叶片,其中底层叶片与炉排配合完成出炭,结构及原理如图 3 所示。

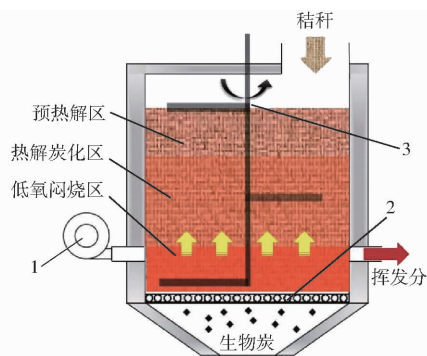


图 3 连续热解炭化反应器结构及原理图  
Fig. 3 Structure and reaction mechanism of continuous pyrolysis carbonization reactor  
1. 风机 2. 炉排 3. 搅拌压实器

设计设备处理量为 50 kg/h,秸秆堆积密度为 70 kg/m<sup>3</sup>,物料平均滞留时间设定为 0.3 h,考虑本试验装置的稳定性,设计炭化室直径取 0.7 m,高度取 0.8 m。采用鼓风机配风,配风管道配有气体流量控制阀门,可控制风量,秸秆炭化所需空气量主要取决于原料中可燃元素成分的含量,可燃元素完全燃烧所需的空气量即理论空气量,根据

$$V_1 = \frac{1}{0.21} (1.883C_{ar} + 0.7S_{ar} + 5.56H_{ar} - 0.7O_{ar}) \quad (1)$$

式中  $C_{ar}$ 、 $S_{ar}$ 、 $H_{ar}$ 、 $O_{ar}$ ——试验玉米秸秆中的元素 C、S、H、O 质量分数, %

$V_1$ ——炭化理论所需空气量, m<sup>3</sup>/kg

计算,设备实际运行时,通过控制过量空气系数控制配风量,维持秸秆发生热分解反应,实际配风量根据

$$V_2 = \alpha_1 V_1 \quad (2)$$

$$V_3 = qV_2 \quad (3)$$

式中  $V_2$ ——实际空气需要量, m<sup>3</sup>/kg

$V_3$ ——每小时实际空气需要量,  $m^3/h$

$q$ ——设备处理量,  $kg/h$

$\alpha_1$ ——过量空气系数, 取 0.8

计算<sup>[18]</sup>。秸秆炭化所用理论空气量  $3.64 m^3/kg$ , 秸秆炭化实际所需空气量  $2.91 m^3/kg$ , 则设备工作时实际所需空气量为  $145.6 m^3/h$ 。

## 2.2 热解气燃烧室设计

热解气燃烧室配备燃烧器, 提供二次风对挥发分进行充分燃烧, 产生的热量约占生物质总热量的 70%<sup>[19]</sup>, 燃烧后内部温度达  $600 \sim 800^\circ C$ , 燃烧室需耐高温并具备保温作用, 部件材质选用普通碳素钢, 选用高温耐火材料贴于内外壁, 并且做保温。内部设置烟气挡板, 可改变烟气流动路径, 实现烟气定向流动调控, 增加与氧气接触时间, 从而提高挥发分燃烧效率, 燃烧示意图如图 4 所示。

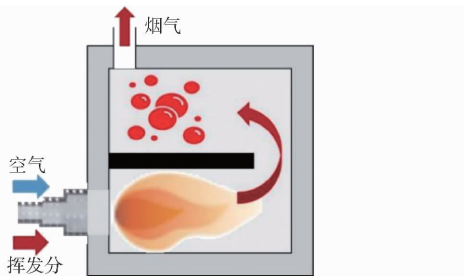


图 4 热解气燃烧室燃烧示意图

Fig. 4 Schematic of combustion in pyrolysis gas combustion chamber

挥发分中可燃气体主要有  $CH_4$ 、 $CO$  和  $H_2$ , 占挥发分气体的 55%<sup>[20]</sup>。燃烧所需空气量根据

$$V = \alpha_1 V_r \quad (4)$$

其中  $V_r = \frac{1}{21}(0.5R_{H_2} + 0.5R_{CO} + 2R_{CH_4} - R_{O_2})$  (5)

式中  $V_r$ ——理论燃烧所需空气量,  $m^3/m^3$

表 2 玉米秸秆原料特性参数

Tab. 2 Corn stalk raw material properties

原料名称	工业分析			元素分析			
	$A_{ad}$ 质量分数	$V_{ad}$ 质量分数	$FC_{ad}$ 质量分数	$C_{ad}$ 质量分数	$H_{ad}$ 质量分数	$O_{ad}$ 质量分数	$N_{ad}$ 质量分数
玉米秸秆	19.56	50.89	14.23	37.37	5.15	37.16	0.67

### 3.1.2 试验方法

设备稳定运行后记录数据, 分析计算设备能耗、生产率、炭得率及系统能量利用率等关键性能指标; 采用热电偶安装在反应器内部能实时监测温度变化, 热电偶量程为  $0 \sim 1000^\circ C$ , 测量误差为  $\pm 2.5^\circ C$ , 安装点分别位于反应器中下部、烟气回流入口和出口; 按照辽宁省地方标准 DB21/T 3314—2020《生物炭直接还田技术规程》<sup>[22]</sup> 进行生物炭技术指标测定, 采用 GB/T 28731—2012 进行生物炭工业分析, 根据 GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》

$V$ ——燃烧所需实际空气量,  $m^3/m^3$

$R_{H_2}$ 、 $R_{CO}$ 、 $R_{CH_4}$ 、 $R_{O_2}$ ——热解气中可燃气体  $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ 、 $O_2$  体积分数, %

计算<sup>[21]</sup>, 热解气燃烧室燃烧原理如图 4 所示。

得出热解气燃烧所需理论空气量为  $1.1 m^3/m^3$ , 秸秆热解气产量取  $0.3 m^3/kg$ , 则设备产生的热解气燃烧所需实际空气量为  $19.8 m^3/h$ 。

## 2.3 其他部件设计

其他部件包括原料烘焙系统、冷却出炭系统和生物炭原位还田作业系统等。高温烟气通入双筒式螺旋进料器内外壁之间的夹层, 经过换热, 进料器内壁温度保持在  $200 \sim 250^\circ C$ , 输料器内部原料被加热  $80 \sim 100^\circ C$ , 实现原料预干燥。冷却出炭系统由集炭箱、螺旋输送器和关风器组成, 高温炭在集炭箱滞留时间为  $10 \sim 15 min$ , 冷却后经过螺旋输送机输送至关风器完成出炭。设备配有动力系统, 将玉米秸秆就地转化为生物炭抛撒到地面, 经过后端配备的旋耕部件旋耕之后, 完成生物炭与土壤的碎混覆土还田; 集成秸秆收集、粉碎、输送技术, 从而实现设备连续进料、炭化、出炭目标。

## 3 设备性能试验

### 3.1 材料与方法

#### 3.1.1 试验材料

热解炭化性能试验在设备加工企业进行, 原料取自北京市顺义区, 经加工粉碎后秸秆长度  $2 \sim 3 cm$ , 低位发热量为  $15.19 MJ/kg$ , 含水率为 15.23%, 原料的工业分析、元素分析如表 2 (表中  $A_{ad}$ 、 $V_{ad}$ 、 $FC_{ad}$  以及  $C_{ad}$ 、 $H_{ad}$ 、 $O_{ad}$ 、 $N_{ad}$  分别表示空气干燥基灰分、挥发分、固定碳以及分析样中碳、氢、氧、氮) 所示。

进行烟气排放监测, 测试烟气成分参数分别为  $CO$ 、 $NO_x$ 、 $SO_2$  浓度, 以及颗粒物浓度、烟气林格曼黑度等, 采用主要仪器有 Multilyzer ST(M60) 型手持式烟气分析仪 (精确度  $\pm 5\%$ )、林格曼黑度图、崂应 3072 型智能双路烟气采样器等设备<sup>[23-24]</sup>。

#### 3.1.3 设备性能评价方法

##### (1) 设备能耗

设备运行动力依靠电能提供, 电能消耗量是设备评价的重要指标之一, 设备玉米秸秆处理量为  $50 kg/h$ , 则设备运行所需电能计算公式为

$$G = \frac{W}{I} \quad (6)$$

式中  $G$ ——处理每千克秸秆所需电能, MJ/kg  
 $W$ ——设备消耗总电能, MJ/h  
 $I$ ——玉米秸秆处理量, kg/h

### (2) 生产率

在关风器处收取生物炭, 收取时间为 1 h, 则生产率计算公式<sup>[25]</sup>为

$$P = \frac{Q(1-H)}{(1-M)t} \quad (7)$$

式中  $P$ ——生产率, kg/h  
 $Q$ ——生物炭质量, kg  
 $H$ ——生物炭含水率, %  
 $M$ ——原料含水率, %  
 $t$ ——收取生物炭时间, h

### (3) 炭得率

炭得率是评价设备运行稳定性的重要标准, 计算公式为<sup>[26]</sup>

$$Y = \frac{Q(1-H)}{R(1-M)} \times 100\% \quad (8)$$

式中  $Y$ ——炭得率, %  
 $R$ ——原料质量, kg

### (4) 系统能量利用率

系统能量利用率为系统投入能量与产出能量、回用能量之和的百分比, 是评价设备实用性的关键指标, 公式为

$$\eta = \frac{P_h + P_c}{P_b + P_e} \times 100\% \quad (9)$$

式中  $\eta$ ——系统能量利用率, %  
 $P_h$ ——回用能量, MJ/h  
 $P_c$ ——生物炭低位发热量, MJ/h  
 $P_b$ ——玉米秸秆低位发热量, MJ/h  
 $P_e$ ——设备运行消耗电能, MJ/h

### (5) 田间性能评价

生物炭质量是评价设备田间性能的主要依据, 根据辽宁省地方标准 DB21/T 3314—2020《生物炭直接还田技术规程》进行生物炭元素分析, 分析比较生物炭中总碳、固定碳及金属元素 Cd、Pb、Ni、Cr、Cu、Zn 含量与 I 级生物炭中含量差异<sup>[22]</sup>。

## 3.2 结果分析

### 3.2.1 设备性能及排放分析

设备稳定运行后进行性能试验, 主要性能及排放指标见表 3。控制反应器内部物料滞留时间为 15 ~ 20 min, 测试时间间隔 1 h, 结果表明设备实现了连续性生产, 玉米秸秆处理量为 50 kg/h, 生物炭得率 21%。经过研究, 热解气中 CO 初始质量浓度为 34 661 mg/m<sup>3</sup>, 经过燃烧后, 烟气中 CO 质量浓度

减小至 1 024 mg/m<sup>3</sup>, 表明热解气燃烧效果较好, 热解气燃烧室工作效率较高, 达到预期效果, 同时设备烟气排放中 NO<sub>x</sub> 质量浓度为 184 mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub> 质量浓度为 26 mg/m<sup>3</sup>, 颗粒物质量浓度为 17.8 mg/m<sup>3</sup>, 根据 GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》, 符合国家排放要求, 颗粒物浓度与烟气林格曼黑度也均符合环保要求。由表 3 可知, 设备各项性能及排放指标均满足设计要求, 具有耗能少、稳定性高、低碳排放、环保无污染等特点。

表 3 设备性能及排放指标

Tab. 3 Equipment performance and emissions indicators

参数	数值
秸秆进料粒度/cm	2 ~ 3
原料处理量/(kg·h <sup>-1</sup> )	50
设备消耗电能/(MJ·h <sup>-1</sup> )	9
产率/(kg·h <sup>-1</sup> )	10
生物炭得率/%	21
排烟中 NO <sub>x</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	184
排烟中 SO <sub>2</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	26
颗粒物质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	17.8
烟气林格曼黑度/级	< 1

### 3.2.2 系统能量利用率分析

能量投入和产出是评价设备性能的重要指标。对设备运行的能量流动数值进行理论计算, 构建能流与物质能量流动图, 如图 5 所示。系统投入能量主要为秸秆化学能和消耗电能, 转化生成的生物炭能量与回用热量为产出能量, 系统能量利用率则是单位时间内产出能量与投入能量的比值, 是评价设备实用性与经济性的主要依据。设备运行投入能量(秸秆化学能和电能)折算后总能量为 759 MJ/h, 测得生物炭低位发热量为 22 MJ/kg, 则热解产生的生物炭能量为 220 MJ/h, 热解气燃烧后回用热量为 346 MJ/h, 经过计算系统能量利用率为 74.6%。系统回用热量约占总产出能量的 60%, 是影响系统能量利用率的关键因素, 随着秸秆水分的增加, 系统能

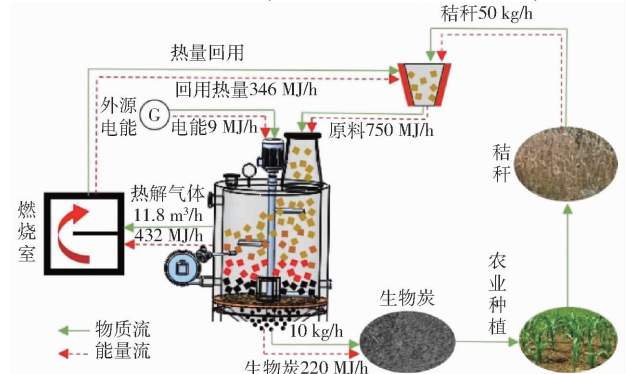


图 5 系统能流物流图

Fig. 5 Energy and mass flow of equipment

量产出减少,生物炭得率降低,该设备可处理秸秆含水率在 20% ~ 30% 之间。由于运行初期设备未达到稳定状态,反应器内部消耗热量较多;随着反应器内部温度升高,设备运行趋于稳定,能量产出与能量投入达到动态平衡。设备正常工作时,能量损失以散热为主,如何提升能量回用效率仍是后续研究重点。

### 3.2.3 还田性能

为获得设备所产生生物炭还田性能,开展秸秆炭化原位还田静态模拟试验。根据辽宁省地方标准 DB21/T 3314—2020《生物炭直接还田技术规

程》进行生物炭元素分析,生物炭理化特性如表 4 所示。由表可知,生物炭中总碳(C)、固定碳(FC)含量均大于 I 级生物炭中标准值,测得金属元素含量也均在 I 级生物炭金属元素含量的范围之内,研究发现生物炭中 Cd、Pb、Ni 元素含量较少,可忽略不计;通过以上分析该生物炭属 I 级,由此说明该设备固碳能力强,具备田间炭化秸秆能力。此外,生物炭还田具有节水保肥特性,设备稳定运行所产生生物炭比表面积为 2.69 m<sup>2</sup>/g、总孔体积为 0.01 cm<sup>3</sup>/g,能够提升土壤固碳能力,对农作物生长具有重要作用。

表 4 生物炭理化特性

Tab. 4 Physical and chemical characteristics of biochar

类别	工业分析/%			元素分析/%				金属元素质量比/(mg·kg <sup>-1</sup> )			比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	总孔体积/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )
	A <sub>ad</sub> 质 量分数	V <sub>ad</sub> 质 量分数	FC <sub>ad</sub> 质 量分数	H <sub>ad</sub> 质量分数	O <sub>ad</sub> 质量分数	N <sub>ad</sub> 质量分数	C <sub>ad</sub> 质量分数	Cr	Cu	Zn		
试验值	22.95	22.68	54.37	2.00	10.88	1.26	62.32	20.30	2.65	47.50		
标准值	≥50(固定碳)			≥60(总碳)				≤90(Cr)	≤50(Cu)	≤200(Zn)	2.69	0.01

## 4 结论

(1)设计移动式玉米秸秆热解炭化原位还田设备,创新设计秸秆低氧炭化闷烧高效传热及固-气相转化清洁燃烧技术,集成秸秆捡拾粉碎输送、热解气回用及生物炭还田技术,实现秸秆炭化原位还田,具有结构简单、炭化能源自给、能量利用率高等特点。

(2)经测试,设备原料处理量为 50 kg/h,炭得

率为 21%,系统能量利用率 74.6%;排烟中 NO<sub>x</sub> 质量浓度为 184 mg/m<sup>3</sup>,SO<sub>2</sub> 质量浓度为 26 mg/m<sup>3</sup>,颗粒物质量浓度为 17.8 mg/m<sup>3</sup>,达到 GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》;生物炭中总碳、固定碳及金属元素含量均符合 DB21/T 3314—2020《生物炭直接还田技术规程》中 I 级生物炭要求,其他各项指标也均满足设备性能设计及排放要求,具备田间移动连续炭化还田能力,且达到环保无污染,具有较好的技术应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 《全国农作物秸秆综合利用情况报告》发布:2021 年我国农作物秸秆综合利用率达 88.1% [J]. 中国农业综合开发, 2022(10):32.
- [2] 史乃煜,陈海涛,魏志鹏,等. 玉米原茬地秸秆还田比例调节装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020,36(21):11-22. SHI Naiyu, CHEN Haitao, WEI Zhipeng, et al. Design and experiment of stalk returning proportion adjusting device for corn original stubble[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21):11-22. (in Chinese)
- [3] 蔡洪梅,吴宇,于敏,等. 长期秸秆全量还田对砂姜黑土区冬小麦幼苗生长质量的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(10):1266-1272. CAI Hongmei, WU Yu, YU Min, et al. Effects of long-term straw returning to field on seedling growth quality of winter wheat in lime concretion black soil area[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(10):1266-1272. (in Chinese)
- [4] KHOSRAVI A, ZHENG Hao, LIU Qiang, et al. Production and characterization of hydrochars and their application in soil improvement and environmental remediation[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430:133142.
- [5] 邓华,高明,龙翼,等. 生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(11):5481-5490. DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, et al. Effects of biochar and straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land[J]. Environmental Science, 2021, 42(11):5481-5490. (in Chinese)
- [6] 李昕,郭丽华. 河北省玉米秸秆离田利用现状与发展建议[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(5):145-148. LI Xin, GUO Lihua. Present situation and development suggestions on the utilization of corn stalk in Hebei Province[J]. Food Science and Technology and Economy, 2020, 45(5):145-148. (in Chinese)
- [7] 王金武,唐汉,王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5):1-21. WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5):1-21. (in Chinese)

- [8] 魏伟业. 农作物秸秆还田技术应用及前景[J]. 种子科技, 2021, 39(16): 42-43.  
WEI Weiye. Application and prospect of crop straw returning technology[J]. Seed Science, 2021, 39(16): 42-43. (in Chinese)
- [9] 余永, 韦林, 王德成, 等. 秸秆生物质旋转床反应器热解载气试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 305-310.  
YU Yong, WEI Lin, WANG Decheng, et al. Straw biomass pyrolysis experiment in rotating bed reactor with different carrier gas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 305-310. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] ALVAREZ J, AMUTIO M, LOPEZ G, et al. Sewage sludge valorization by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 273: 173-183.
- [12] 王娜娜, 李萍, 司慧. 移动式生物质快速热裂解装置设计与性能研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 288-293.  
WANG Na'na, LI Ping, SI Hui. Design and performance study of biomass mobile fast pyrolysis equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 288-293. (in Chinese)
- [13] 王贤华. 生物质流化床热解液化实验研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.  
WANG Xianhua. The experimental study and application of biomass fast pyrolysis with fluidized bed[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [14] 司慧, 王霄. 移动式生物质快速热解反应器的设计及流态化模拟[J]. 科技导报, 2011, 29(33): 47-51.  
SI Hui, WANG Xiao. Reactor design of mobile fast pyrolysis apparatus and its simulation for fluidization[J]. Science and Technology Review, 2011, 29(33): 47-51. (in Chinese)
- [15] 李永浩. 第二代移动式快速热解反应器及供热系统设计[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.  
LI Yonghao. Design of the second generation mobile fast pyrolysis reactor and heating system[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [16] 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, 33(18): 173-179.  
CONG Hongbin, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Development of carbon, gas and oil poly-generation pilot system based on biomass continuous pyrolysis[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 173-179. (in Chinese)
- [17] 李敏, 赵立欣, 孟海波, 等. 慢速热解条件下生物炭理化特性分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(3): 248-253.  
LI Min, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Analysis of biochar physical and chemical properties under the condition of slow pyrolysis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(3): 248-253. (in Chinese)
- [18] 贾吉秀, 姚宗路, 赵立欣, 等. 秸秆捆烧锅炉设计及其排放特性研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 148-153.  
JIA Jixiu, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Design and emission characteristics of straw bales fuel combustion-boiler[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 148-153. (in Chinese)
- [19] 胡二峰, 赵立欣, 吴娟, 等. 生物质热解影响因素及技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 212-220.  
HU Erfeng, ZHAO Lixin, WU Juan, et al. Research advance on influence factors and technologies of biomass pyrolysis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 212-220. (in Chinese)
- [20] 陈登宇, 张鸿儒, 刘栋, 等. 烘焙预处理对秸秆热解产物品质及能量分布的影响[J]. 太阳能学报, 2017, 38(2): 565-570.  
CHEN Dengyu, ZHANG Hongru, LIU Dong, et al. Effect of torrefaction pretreatment on properties of pyrolysis product and energy distribution of corn stalk[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(2): 565-570. (in Chinese)
- [21] 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]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 299-305.  
YAO Zonglu, ZHANG Li, ZHAO Lixin, et al. Biomass pyrolysis gas combustion—gas burner design and emission characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 299-305. (in Chinese)
- [22] DB21/T 3314—2020 生物炭直接还田技术规程[S]. 2020.
- [23] 刘恩海, 刘圣勇, 白冰, 等. 玉米秸秆打捆燃料燃烧动力学模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 218-226.  
LIU Enhai, LIU Shengyong, BAI Bing, et al. Development of dynamic model of cornstalk bale combustion[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 218-226. (in Chinese)
- [24] 邓云, 贾吉秀, 姚宗路, 等. 秸秆捆烧系统设计与试验研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12): 320-325.  
DENG Yun, JIA Jixiu, YAO Zonglu, et al. Design and experiment of baled straw combustion system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(12): 320-325. (in Chinese)
- [25] 丛宏斌, 姚宗路, 赵立欣, 等. 内加热连续式生物质炭化中试设备炭化温度优化试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 235-240.  
CONG Hongbin, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Carbonization temperature optimization experiment of pilot-scale continuous biomass carbonization equipment with internal heating[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 235-240. (in Chinese)
- [26] 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)