

引用本文格式 张蕾蕾, 矫云学, 黄超. 连续式生物质热解炭化设备设计与试验[J]. 农业工程, 2024, 14(7): 76-84. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.07.013. ZHANG Leilei, JIAO Yunxue, HUANG Chao. Design and experiment of continuous biomass pyrolysis carbonization equipment[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(7): 76-84.

连续式生物质热解炭化设备设计与试验

张蕾蕾, 矫云学, 黄超

(吉林省农业机械研究院, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对现有生物质热解炭化设备生产效率低、设备运行不稳定、生产连续性差及需引用外部热源加热致使耗能高等问题, 采用热解可燃气体回燃利用方案, 设计了一种双筒回转连续式生物质热解炭化设备。详细介绍了生物质热解炭化设备的结构和工作原理, 并进行热解炭化试验测试。试验表明, 热解温度 450 °C、物料平均停留时间 30 min 时, 生物质热解炭化设备纯小时生产率 103.8 kg/h、生物炭得率 34.6% 和出炭温度 47 °C, 各项性能指标均达到设计要求, 可实现连续运行生产生物炭。

关键词: 生物炭; 生物质; 秸秆; 热解; 生物质热解炭化设备

中图分类号: S216 文献标识码: A 文章编号: 2095-1795(2024)07-0076-09

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.07.013

Design and experiment of continuous biomass pyrolysis carbonization equipment

ZHANG Leilei, JIAO Yunxue, HUANG Chao

(Jilin Agricultural Machinery Research Institute, Changchun Jilin 130022, China)

Abstract: Aiming at problems of low production efficiency, unstable equipment operation, poor production continuity and high energy consumption caused by external heat source heating, a double-cylinder rotary continuous biomass pyrolysis carbonization equipment was designed and developed by using biomass pyrolysis carbonization scheme of pyrolysis combustible gas reburning. Structure and working principle of pyrolysis carbonization equipment were introduced in detail, and pyrolysis carbonization test was carried out with corn straw as raw material. Test results showed that pyrolysis temperature was 450 °C, average residence time of material was 30 min, pure hour productivity of carbonization equipment was 103.8 kg/h, biochar yield was 34.6%, and carbon temperature was 47 °C. All performance indexes met design requirements, and continuous operation of biochar production could be realized.

Keywords: biochar, biomass, straw, pyrolysis, biomass pyrolysis and carbonization equipment

0 引言

生物炭 (biochar) 是利用生物残体在缺氧的情况下, 经高温慢热解 (通常 <700 °C) 产生的一类难溶、稳定、高度芳香化和富含碳素的固态物^[1]。生物炭既可以作为高品质能源、土壤改良剂, 也可作为还原剂、肥料缓释载体及二氧化碳封存剂等, 已广泛应用于土壤改良、作物增产、环境修复和缓解温室效应等, 受到人们的高度关注^[2]。目前, 生物炭制备技术主要分为固定床式和移动床式两类, 其中传统固定床式生物炭制备技术, 从底部加热, 需要大量的外加热能 (燃

烧木材、生物质燃料、煤等), 耗能大, 同时物料不动, 反应室各部位温度梯度较大, 导致设备生产效率低、炭化质量差。而移动床式生物质热解炭化设备可以实现连续生产并且炭化质量较好, 但存在设备稳定性不高或引用外源加热为主导导致能耗高等问题。黄宇等^[3]研制一种闷烧热解间接加热的直立式生物质热解炭化设备, 炭得率 21.18%。赵立欣等^[4]研制一种连续式分段生物质热解炭化设备, 炭生产率 4.1 kg/h。朱华炳等^[5]设计了一种内燃加热固定床式生物质气化炉, 提高了燃气热值。蒋恩臣等^[6]研制一种连续式生物质热解反应装置, 处理速度 30 kg/h。目前的生物质热解

收稿日期: 2023-11-15 修回日期: 2024-02-27

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20210202009NC); 吉林省财政基本科研经费项目 (CZ202212008)

作者简介: 张蕾蕾, 副研究员, 主要从事农业废弃物无害化处理及资源化利用、生物质能技术研究

E-mail: 34948858@qq.com

矫云学, 通信作者, 正高级工程师, 主要从事农业废弃物资源化利用技术研究 E-mail: 2211380290@qq.com

在线投稿

www.d1ae.com

炭化设备多为实验室设备，炭化效率不高，仍处于试验阶段，其技术装备还有待进一步提高。

为解决以上问题，本研究生物质热解炭化采用热解可燃气回燃利用方案，并利用回转式连续输送原理、生物炭循环水冷技术，设计了一种双筒回转连续式生物质热解炭化设备，对设备的结构组成及工作原理等进行了详细介绍，并以玉米秸秆为原料进行了热解炭化试验，测试设备性能指标。

1 工艺方案

1.1 设计要求

为提高生物质热解炭化设备处理效率，保证生物炭产出率和出炭品质，兼顾能源节约和环保的需求，生物质热解炭化设备需遵循以下4项设计要求。

(1) 生物质热解炭化设备能够连续稳定运行生产，生物质热解炭化过程均匀受热，保证出炭品质和生物炭得率。

(2) 热解可燃气回收用于生物质热解炭化，节约外部能源消耗的同时有效避免环境污染，实现能源的循环利用。

(3) 生物质原料的进料量可调控，并确保进料过程的密封性。

(4) 热解获得的生物炭具有较高温度，直接出料遇空气便会氧化燃烧，为此出料时需要对生物炭进行冷却处理，以保证出炭品质。

1.2 生物质热解炭化工艺流程

采用秸秆、稻壳、花生壳等为原材料制备生物炭，工艺流程如图1所示。

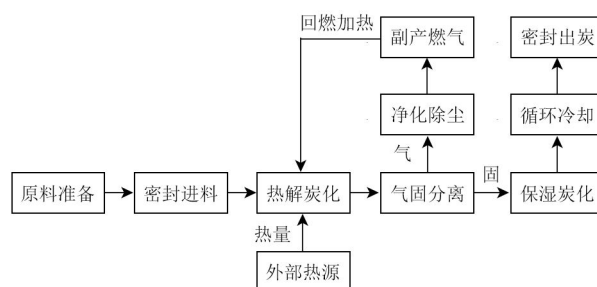


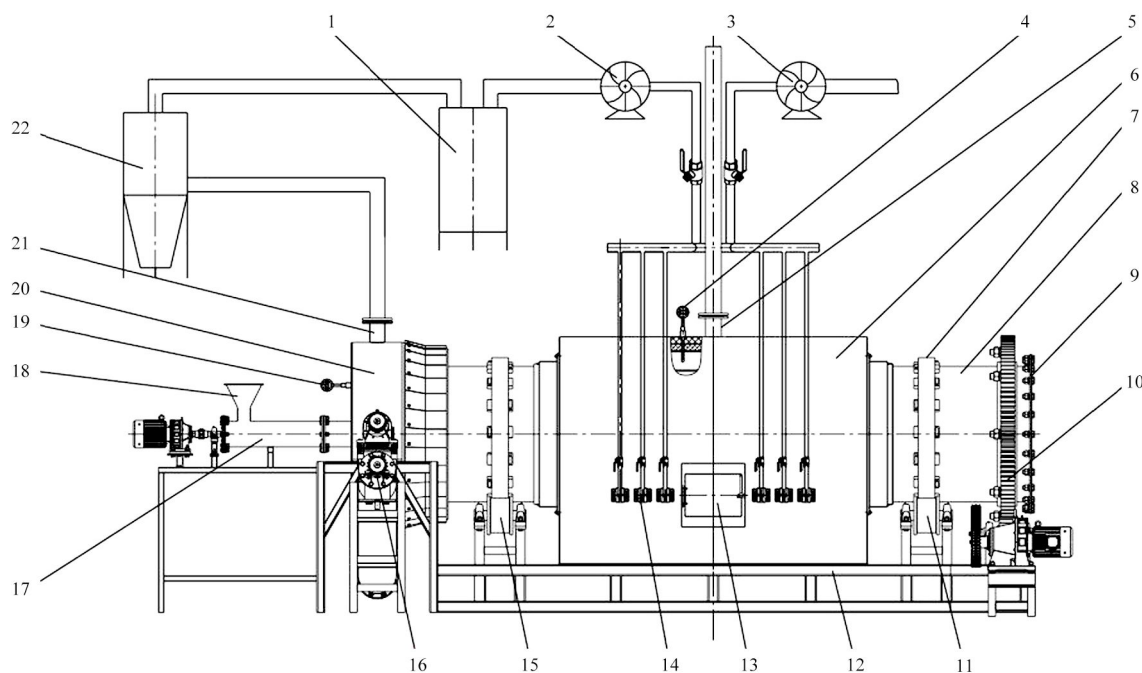
图1 生物质热解炭化工艺流程

Fig. 1 Biomass pyrolysis carbonization process

2 结构与工作原理

2.1 整体结构

双筒回转连续式生物质热解炭化设备整体结构如图2所示，由螺旋进料输送机、温度传感器、炭化筒、可燃烟气回收处理装置、燃烧室、燃烧器、出料螺旋输送机、托轮机构及传动机构等组成。生物质热解炭化设备进、出料采用螺旋输送机完成；炭化筒为双层套筒回转式结构，内外筒之间设有支柱连接固定，同步转动，内、外筒分别设有导流叶片，并且导流叶片方向相反；可燃烟气回收处理装置包括一级烟气净化装置、二级烟气净化装置和引风机，实现可燃烟气的



1. 二级烟气净化装置 2. 引风机 3. 增压风机 4. 温度传感器II 5. 燃烧室烟口 6. 燃烧室 7. 轮带 8. 炭化筒 9. 窑尾盖 10. 齿圈传动机 11. 托轮机构I 12. 机架 13. 炉门 14. 燃烧器 15. 托轮机构II 16. 出料螺旋输送机 17. 进料螺旋输送机 18. 进料斗 19. 温度传感器I 20. 窑头罩 21. 炭化筒出烟口 22. 一级烟气净化装置

图2 生物质热解炭化设备整体结构

Fig. 2 Overall structure of biomass pyrolysis carbonization equipment

净化和输送；炭化室和燃烧室分别设有温度传感器；炭化筒设有托轮支撑机构，炭化筒的回转利用齿圈传动机构来实现。

2.2 工作原理

设备工作时，原料经进料斗落入进料螺旋输送机，被连续送入炭化筒的内筒中；调速电机驱动，通过链传动、齿轮传动机构带动炭化筒转动，炭化筒由内筒和外筒构成，内、外筒同步转动，由于内、外筒分别设有导流叶片，并且导流叶片方向相反，因此物料进入内筒后先向前缓慢运动进行干化并逐渐热解，再落到外筒反向运动进行炭化。物料热解炭化过程中，采用沼气与热解可燃气联合提供热能，并单独设有供气管路，生物质热解炭化设备启动时，利用增压风机将沼气送入燃烧室内通过燃烧器进行燃烧，为物料热解提供初始热能加热，物料随着炭化筒转动向前运动逐渐热解炭化。在此过程中，伴随有 CH_4 、 CO 和 H_2 等可燃气体的混合热解气生成，热解气经回收净化后，由引风机送入燃烧器回燃作为物料热解炭化的热源，燃烧室和炭化室内分别设有温度传感器，通过温度监测以调控炭化温度的稳定。热解后的高温生物炭通过与外筒连接的出料口落入出料螺旋输送机，出料螺旋输送机设有循环水冷装置，生物炭经冷却后排出收集。

2.3 技术参数

生物质热解炭化设备主要相关技术参数如表 1 所示。

表 1 生物质热解炭化设备主要相关技术参数

Tab. 1 Main related technical parameters of biomass pyrolysis carbonization equipment

技术参数	数值
外形尺寸（长×宽×高）/mm	6 950×3 590×3 750
配套总动力/kW	12.75
原料处理量/（kg·h ⁻¹ ）	300
炭化温度/°C	450~650
升温时间/min	5~60
加热方式	可燃气燃烧加热

2.4 生物质热解炭化影响因素

2.4.1 原料

生物质原料的含水量对热解炭化效果会产生一定影响，直接影响到炭化速率和生物炭得率，为此含水量高的原料需干燥处理，将秸秆水分含量控制在 15% 以下。生物质原料粒径大小对生物炭产量影响并不十分明显，本研究采用玉米秸秆为原料，考虑到装料量和便于进料输送，对秸秆原料进行破碎处理，破碎后秸秆粒度 5~10 mm。

2.4.2 热解温度

热解温度是影响生物炭品质和产量的重要影响因素，热解温度越高越利于优化生物炭性质。研究表明，

在 400~600 °C 条件下，秸秆炭的孔隙相对较为丰富，具有较高的阳离子交换量，玉米秸秆的最佳热解温度 400~500 °C，此温度下制备的生物炭得率相对较高，氮、碳养分损失少，生物炭的理化性能和养分利用均达到最优^[7]。本研究生物质热解炭化设备热解温度 450 °C。

2.4.3 升温速率

依据升温速率可将热解分为快速、慢速热解。升温速率对生物炭的理化性质和生物炭得率影响较大，较高的升温速率和反应温度可以提高生物油气产量，而较慢的升温速率和较低的温度可以提高生物炭产量，同时升温速率对生物炭的表面积、孔隙体积等形态特性也有影响。考虑到本研究生物质热解炭化设备采用回转式结构，原料受热比较均匀，升温速率可适当提高，采用升温速率 20 °C/min，因此将原料从常温 20 °C 提升至 450 °C 的炭化温度，整个过程需时 21.5 min。

2.5 热工计算

2.5.1 生物质热解过程

生物质热解一般指生物质热裂解，包括 4 个阶段。第 1 阶段为预加热和干燥阶段，为物理变化，一般炉温在 150 °C 以下，原料所含水分逐渐蒸发；随着温度的上升，进入了干馏热解的预炭化阶段。第 2 阶段为预炭化阶段，温度 150~275 °C，原料中的半纤维素等不稳定成分开始分解，副产物主要是 CO_2 、 CO 和少量的醋酸，以上两个阶段都是吸热反应^[8]。当温度继续上升，超过 275 °C 时，原料开始加快分解，进入炭化阶段。第 3 阶段为放热反应的炭化阶段，可保持到 450 °C，这一阶段不用外加热就可以使反应进行下去，考虑到温度较高时炉体会向外界散热造成热量损失，为此可以设置外保温结构以维持热解温度的稳定上升，出于环保和能源节约的目的，倘若热解气回收利用装置设计合理，热解炭化的副产可燃气即可满足后续炭化过程的热源供应^[9]。第 4 阶段为需要外部热源供给的煅烧阶段，排除残留在生物炭中的各种杂质，提高含碳率。

生物质热解过程的吸热量包括生物质预加热所需热量和发生热解反应所需热量，将质量为 1 kg 的生物质秸秆从常温 20 °C 升至 450 °C 的炭化温度，需要的热量按 397 kJ 进行计算，质量 1 kg 的水由常温升至 450 °C 水蒸气吸收的热量按 2 984.29 kJ/kg 计算^[10-11]。得出 1 kg 秸秆完成热解反应吸收总热量 Q_{P450} 为 622.09 kJ/kg（秸秆含水率按 8.7% 计）。

2.5.2 热解炭化产物

秸秆热裂解产物主要由生物炭、焦油、木醋液和生物质可燃气等组成。加热条件的变化可改变热裂解的实际过程及反应速率，从而影响热裂解产物生成量^[12]。以玉米秸秆为例，炭化温度 450 °C 条件下，1 kg 玉米

秸秆可产约 0.35 kg 生物炭，同时可产木醋液 0.308 kg、焦油 0.072 kg、生物质可燃气体 0.3 m³，可燃气体主要成分（体积百分比）包括 CO₂（46.3%）、CO（31.2%）、H₂（13.7%）和 CH₄（8.8%）^[13-14]。

3 关键部件设计

3.1 进料螺旋输送机

进料螺旋输送机用于生物质热解炭化设备连续进料使用，其结构示意图如图 3 所示。进料斗下方设有关风器，用于进料过程密封，工作时，减速电机驱动螺旋轴转动并带动螺旋叶片旋转，进料螺旋轴为分段式结构，由螺旋叶片 I、光轴、螺旋叶片 II 构成，进料时，物料由进料斗加入，经关风器落入螺旋输送机，在螺旋叶片 I 推动下向前运动，经光轴段压实，隔绝空气进入炭化筒内，再经螺旋叶片 II 破开压实的物料送入炭化筒中实现连续进料，采用关风器及分段式螺旋轴压实密封的双重密封结构，以确保进料密封可靠。

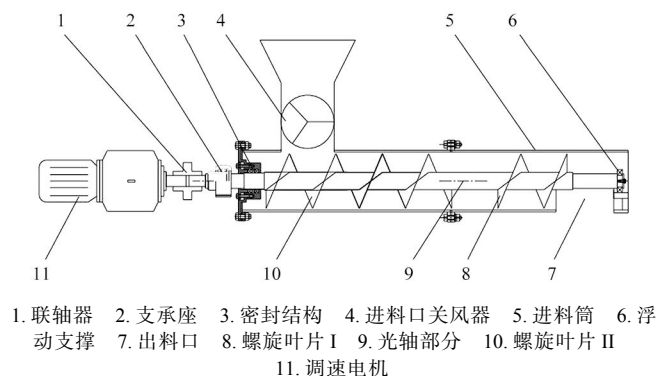


图 3 进料螺旋输送机结构

Fig. 3 Structure of feed screw conveyor

生物质热解炭化设备设计原料处理量 300 kg/h，根据输送量，进料螺旋输送机选用 LS200 型，功率 1.1 kW。进料螺旋输送机螺旋轴转速 n 取决于输送量的大小，可由螺旋输送机输送量按式（1）计算^[15]。

$$I_m = 47D^2 S n \rho \Phi C \quad (1)$$

式中 I_m ——输送量，kg/h
 D ——螺旋叶片直径，m
 S ——螺距，m
 n ——螺旋轴转速，r/min
 ρ ——物料堆积密度，t/m³
 Φ ——填充系数
 C ——倾角系数

将 LS200 型螺旋输送参数 $S=0.2$ m、 $D=0.2$ 、 $\rho=0.1$ t/m³、 $\Phi=0.33$ 、 $C=1$ （水平输送）和 $I_m=300$ kg/h 代入式（1），求得进料螺旋输送机螺旋轴转速 $n=25$ r/min。

3.2 炭化筒及燃烧室

炭化筒及燃烧室结构示意图如图 4 所示。炭化筒用

于生物质原料的热解炭化反应，炭化筒选用耐高温不锈钢材质，主要由内筒、外筒、支柱、窑尾盖、导流叶片 I、导流叶片 II 和挡料板等构成，采用内外双筒回转式结构，内筒前端设有挡料板，外筒后端设有窑尾盖，内筒与外筒同轴，内外筒筒壁上沿周向四线螺旋形式均匀布置设有导流叶片，导流叶片直径 300 mm、高度 80 mm、间距 240 mm 和倾角 25°，因此在内外筒转动过程中，筒内物料在叶片推送作用下缓慢前行，同时物料会被导流叶片掀起翻落到筒壁，实现物料均匀受热。

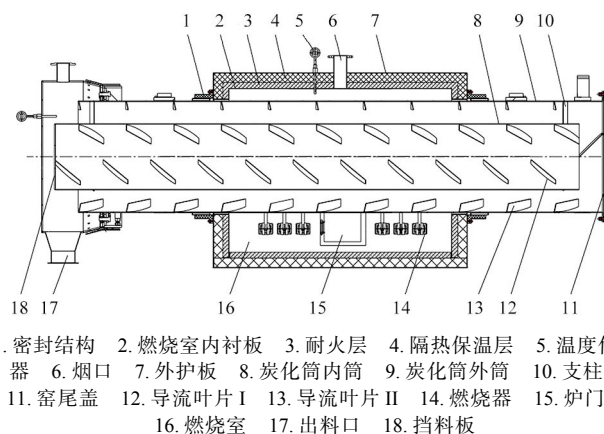


图 4 炭化筒及燃烧室结构

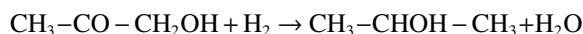
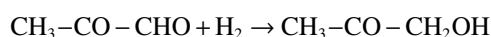
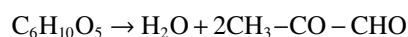
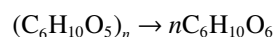
Fig. 4 Structure of charring cylinder and combustion chamber

工作时，物料由进料螺旋输送机送入内筒前端，在导流叶片 I 的作用下向前缓慢运动进行预热干化并逐渐开始热解，物料行至内筒末端再落入外筒，并在导流叶片 II 的作用下反向运动进行炭化，双层筒结构与单筒相比大大缩短生物质热解炭化设备长度，节约占地空间；另外可通过控制炭化筒转速来控制物料滞留时间，保证炭化质量和产率。

燃烧室位于炭化筒中部外侧，如图 4 所示。燃烧室两侧面设有燃烧器和炉门，燃烧室顶部设有燃烧室烟口和温度传感器，考虑能源节约，在燃烧室的外部设有保温结构，主要由内衬板、耐火层、隔热保温层、外护板和密封结构等构成，通过设置保温结构可减少热量散失，维持炭化温度的稳定，保证出炭质量。

3.3 可燃气体燃烧器热计算

生物质热解包含了分子键的断裂、异构，以及原子或者小分子之间的相互聚合成键的过程，其热解炭化过程遵循以下热解反应方程^[16]。



本研生物质热解炭化设备在初始运行预加热过程需少量外部热源供应外,连续热解炭化过程中所消耗热量为热解可燃气体回燃产生的高温烟气,需要确定可燃气体的热值、燃烧所需空气量、燃烧产生的烟气体量及燃烧温度。

3.3.1 可燃气体热值计算

热解可燃气体主要由 CH_4 、 H_2 、 CO 等气体组成,则依照混合法则,热解可燃气体的低位热值按照式(2)计算^[17]。

$$H_L = \sum H_i r_i \quad (2)$$

式中 H_L ——热解可燃气体低位热值, kJ/m^3

H_i ——热解可燃气体中不同成分气体的低位热值, kJ/m^3

r_i ——热解可燃气体中不同成分气体体积占比, %

通过式(2)求得 $H_L=8.63 \text{ MJ/m}^3$ (干燃气)。热解产生的可燃气体按 $0.3 \text{ m}^3/\text{kg}$ 计算,可求出秸秆热解获得的可燃气其总热值 2.589 MJ/kg ,因此,完全能够满足发生热解反应 1 kg 玉米秸秆吸收的热量 (622.09 kJ/kg)。

3.3.2 燃气完全燃烧所需空气量计算

所需理论空气量 V_0 按式(3)计算^[17]。

$$V_0 = \frac{1}{21} [0.5r_{\text{H}_2} + 0.5r_{\text{CO}} + 2r_{\text{CH}_4} - r_{\text{O}_2}] \quad (3)$$

计算求得 $V_0=1.859 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (此处及后面涉及的气体体积计算均指干燃气)。

实际空气量 V 按 $V=\alpha V_0$ 计算,对于工业设备,过剩空气系数 α 一般控制在 $1.05 \sim 1.20$,本研究取 $\alpha=1.2$,求得 $V=2.231 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

3.3.3 燃气完全燃烧生成烟气体量计算

总的理论烟气体量 V_f^0 ($\alpha=1$ 时) 按式(4)计算^[17]。

$$V_f^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0 \quad (4)$$

式中 V_{RO_2} ——三原子气体理论烟气体量, m^3/m^3

$V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ ——水的理论烟气体量, m^3/m^3

$V_{\text{N}_2}^0$ ——氮气的理论烟气体量, m^3/m^3

RO_2 、 H_2O 、 N_2 的理论烟气体量按式(5)、式(6)和式(7)计算^[17]。

$$V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} = 0.01(r_{\text{CO}_2} + r_{\text{CO}} + r_{\text{CH}_4}) \quad (5)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0.01[r_{\text{H}_2} + 2r_{\text{CH}_4} + 126.6(d_g + V_0 d_a)] \quad (6)$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0.79V_0 + 0.01r_{\text{N}_2} \quad (7)$$

式中 V_{CO_2} ——燃气完全燃烧后所产生 CO_2 的体积, m^3/m^3 (干燃气)

V_{SO_2} ——燃气完全燃烧后所产生 SO_2 的体积, m^3/m^3 (干燃气)

d_g ——燃气含湿量, kg/m^3 (干燃气)

d_a ——空气含湿量, kg/m^3

忽略燃气含湿量,取值空气含湿量 0.01 kg/m^3 ,水蒸气基态时的比体积 $1.266 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。求得 $V_{\text{RO}_2}=0.863 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $V_{\text{H}_2\text{O}}^0=0.346 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $V_{\text{N}_2}^0=1.572 \text{ m}^3/\text{m}^3$,代入式(4)求出 $V_f^0=2.781 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

实际烟气体量 V_f ($\alpha=1.2$ 时) 按式(8)计算^[17]。

$$V_f = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \quad (8)$$

RO_2 体积与过剩空气无关,体积量不变, $V_{\text{RO}_2}=0.863 \text{ m}^3/\text{m}^3$; H_2O 的实际烟气体量按式(9)计算^[17]。由于过剩空气带入了 N_2 , N_2 的实际烟气体量按式(10)计算^[17];实际烟气中含有 O_2 , O_2 实际烟气体量按式(11)计算^[17]。

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0.01 \times 126.6(\alpha-1)V_0 d_a \quad (9)$$

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^0 + 0.79(\alpha-1)V_0 \quad (10)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0.21(\alpha-1)V_0 \quad (11)$$

求得 $V_f=3.157 \text{ m}^3/\text{m}^3$,则有 1 kg 玉米秸秆实际产生的烟气体总量 0.947 m^3 。

3.3.4 燃气燃烧温度计算

设空气温度 $T_a=20^\circ\text{C}$,燃气温度 $T_g=100^\circ\text{C}$ 。 20°C 时空气和水的体积定压热容分别为 $c_a=1.2573 \text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ 、 $c_{\text{H}_2\text{O}}=1.4367 \text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$;燃气在 0 和 100°C 时的体积定压热容 c_g 分别为 1.4165 和 $1.4791 \text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$;由于随着温度改变平均比热容也会随之变化,因此理论燃烧温度要经过多次试算才可确定。理论燃烧温度假设为 1500°C ,依照式(12)计算理论燃烧温度 t_{th} ,求得 $t_{th}=1516.39^\circ\text{C}$,比较发现理论燃烧温度的计算值与假设值的误差 $<1.1\%$ ^[18]。

$$t_{th} = \frac{H_f + (c_g + 1.266c_{\text{H}_2\text{O}}d_g)t_g + \alpha V_0(c_a + 1.266c_{\text{H}_2\text{O}}d_a)t_a - Q_4}{V_{\text{RO}_2}c_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}c_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}c_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}c_{\text{O}_2}} \quad (12)$$

式中 H_f ——干燃气热值, kJ/m^3

c_g 、 c_a 、 $c_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 c_{RO_2} 、 c_{O_2} 、 c_{N_2} ——燃气、空气、水、三原子气体、氧气和氮气平均体积定压热容(温度由 $0 \sim T_f^\circ\text{C}$), $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$

1.266 ——水蒸气基态时比体积, m^3/kg

t_g 、 t_a ——燃气和空气温度, $^\circ\text{C}$

V_{RO_2} 、 $V_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 V_{N_2} 、 V_{O_2} —— 1 m^3 干燃气完全燃烧后所产生的三原子气体、水蒸气、氮气和氧气的体积, m^3/m^3

Q_4 ——烟气中的水和二氧化碳在高温下分解所消耗的热量, kJ/m^3

实际燃烧温度 t_{act} 按经验公式(13)计算,求得 $t_{act}=1213.11^\circ\text{C}$ ^[19]。

$$t_{act} = \mu t_{th} \quad (13)$$

式中 μ ——高温系数，对一般燃气工业炉窑可取 $\mu=0.65\sim 0.85$ ，本研究取值 0.8

3.3.5 传热温差及传热面积计算

本研究生物质热解炭化设备原料处理量 300 kg/h，则每小时的热流量 Q_1 按式 (14) 计算，求得 $Q_1 = 186.63 \text{ MJ/h}^{[20]}$ 。

$$Q_1 = 300Q_{P450} \quad (14)$$

式中 Q_{P450} ——1 kg 玉米秸秆发生热解反应所需热量，取 622.09 kJ/kg

按照纯逆流计算，平均传热温差 Δt_m 按式 (15) 计算，求得 $\Delta t_m = 403.65 \text{ }^\circ\text{C}^{[20]}$ 。

$$\Delta t_m = \frac{\Delta(t_1 - t_4) - \Delta(t_3 - t_2)}{\ln[\Delta(t_1 - t_4) / \Delta(t_3 - t_2)]} \quad (15)$$

式中 t_1 、 t_2 ——热、冷流体在进口处温度， $^\circ\text{C}$ ，取 $t_1 = 1213 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

t_3 、 t_4 ——热、冷流体在出口处温度， $^\circ\text{C}$ ，取 $t_3 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $t_4 = 450 \text{ }^\circ\text{C}$

传热面积按式 (16) 计算，传热面积 $A = 6.42 \text{ m}^2^{[20]}$ 。

$$A = \frac{Q_1}{K\Delta t_m} \quad (16)$$

式中 A ——传热面积， m^2

K ——传热系数，取 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

炭化筒壁厚 8 mm，实际传热面积 $A = 8.58 \text{ m}^2 > 6.42 \text{ m}^2$ ，满足要求。综上，炭化筒为外筒内径 960 mm、内筒内径 560 mm、长度 4500 mm 的双层筒状结构，燃烧室长度 2800 mm，燃烧室内设有高温燃气燃烧器，燃烧室顶部设有烟口和温度传感器，燃烧室侧壁设有耐火隔热保温层，减少热量散失，节约能源消耗。

3.4 传动机构

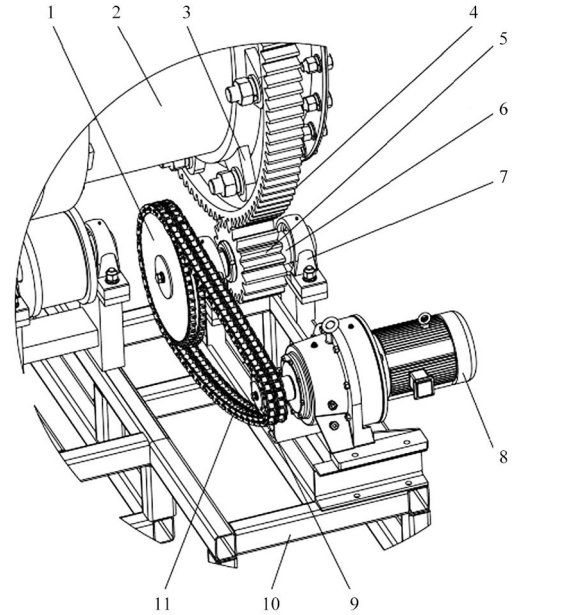
3.4.1 结构及原理

生物质热解炭化设备传动机构结构示意图如图 5 所示，主要由链轮、大齿圈、小齿轮、转轴、轴承座、调速电机和传动链等构成。沿炭化筒外侧均匀分布设有若干固定板，固定板与大齿圈内侧用螺栓连接固定，因此大齿圈旋转的同时可以带动炭化筒一起转动，大齿圈下方设置有小齿轮，小齿轮与大齿圈啮合，小齿轮通过转轴与从动链轮连接固定，从动链轮与主动链轮之间通过传动链传动，主动链轮固定安装在调速电机转轴上，因此工作时，在调速电机的驱动下，会逐级带动主动链轮、从动链轮、小齿轮和大齿圈转动，从而驱动炭化筒回转工作。

3.4.2 传动功率计算

炭化筒回转所需传动功率按式 (17) 计算^[21]。

$$N_{总} = \frac{1}{\eta(N_1 + N_2 + N_3)} \quad (17)$$



1. 从动链轮 2. 炭化筒 3. 固定板 4. 大齿圈 5. 小齿圈 6. 转轴
7. 轴承座 8. 调速电机 9. 主动链轮 10. 支架 11. 传动链

图 5 传动机构结构

Fig. 5 Structure of moving mechanism

式中 $N_{总}$ ——传动总功率

N_1 ——物料在炭化筒内运动消耗功率

N_2 ——齿轮运动的滚动摩擦消耗功率

N_3 ——克服轴承摩擦消耗功率

η ——传动装置传动效率

炭化筒回转过程中，受摩擦力作用物料随筒内壁升起，当物料表面与水平面的夹角大于物料休止角 ψ 时，受重力作用物料向下滑落，物料此时因重心偏移，其重力 P 会产生一反转力矩，欲克服这一力矩所需功率 N_1 按式 (18) 计算^[21-22]。

$$N_1 = 0.000086 \sum D^3 L \sin^3 \theta n \gamma \sin \psi \quad (18)$$

式中 D ——炭化筒内径，m

L ——炭化筒长度，m

n ——筒体转速，取 1 r/min

γ ——物料堆积重度，取 $200 \text{ kg}/\text{m}^3$

ψ ——物料休止角，取 $\psi = 35^\circ$

θ ——物料截面对应中心角的一半

$\sin \theta$ 是与炭化筒内物料负荷率 φ 有关的系数，可由 φ 与 $\sin \theta$ 关系曲线图查得，筒内物料负荷率 φ 为物料的截面积与占筒净空截面积之比。

$$\varphi = \frac{4.2Q\sqrt{\psi}}{\beta n D_e^3} \quad (19)$$

式中 Q ——单位时间内通过炭化筒内物料质量，t/h

β ——筒体斜度，取 $\beta = 3.5\% (2.0045^\circ)$

利用式 (19) 求出 φ 值，查 φ 与 $\sin \theta$ 关系曲线图得到 $\sin \theta$ 值并带入式 (18)，求得 N_1 为 0.013 kW。

齿轮运动的滚动摩擦所消耗的功率 N_2 按公式 (20) 计算, 求得 $N_2=0.012 \text{ kW}$ 。

$$N_2 = \frac{G \cos\beta n (D_1 + D_2)}{975000 D_2 \cos\alpha} \quad (20)$$

式中 G ——回转炭化筒的质量, 取 $G=1\ 328 \text{ kg}$

D_1 ——大齿圈直径, 取 $D_1=1.392 \text{ m}$

D_2 ——小齿圈直径, 取 $D_2=0.24 \text{ m}$

A ——小齿圈中心和大齿圈中心连线与垂直线的夹角, 取 $\alpha=35^\circ$

克服托轮轴承摩擦所消耗功率 N_3 按公式 (21) 计算, 求得 N_3 为 1.22 kW 。

$$N_3 = 0.593 n f G \frac{D_3}{D_4} d \quad (21)$$

式中 f ——托轮轴承的摩擦系数, 由于滚动轴承其摩擦系数一般为 $0.001\sim 0.005$, 取 $f=0.005$

D_3 ——轮带外径, 取 $D_3=1.084 \text{ m}$

D_4 ——托轮外径, 取 $D_4=0.245 \text{ m}$

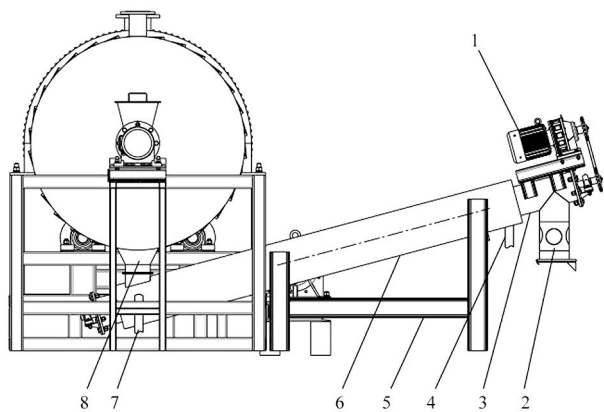
d ——托轮轴轴颈直径, 取 $d=0.07 \text{ m}$

轮带与托轮间的滚动摩擦也消耗一部分功率, 但与 N_3 相比要小得多, 可忽略不计。

传动效率 η 取 0.88 , 则, 利用式 (17) 求得传动总功率 $N_{\text{总}}=1.415 \text{ kW}$, 因此, 炭化筒回转选用 1.5 kW 驱动电机。

3.5 冷却出炭装置

由于热解制得的生物炭温度较高, 与空气接触极易产生自然, 为保证出炭质量, 设计了冷却出炭装置, 如图 6 所示。出炭用螺旋输送机设有冷却循环水套, 冷却通道内设有隔栅, 起到阻流作用, 可使冷却水与循环冷却通道充分接触。将循环水通入斜螺旋水套内对制得的高温生物炭进行换热降温, 按照生物炭初始温度 450°C 进行计算, 利用流量 $0.472 \text{ m}^3/\text{h}$ 的循环水将生物炭降温至 50°C , 使生物炭低于着火点排出并收



1. 调速电机 2. 出炭口关风器 3. 出料螺旋输送机 4. 冷却水出口
5. 支架 6. 冷却循环水套 7. 冷却水入口 8. 炭化筒出口

图 6 冷却出炭装置结构

Fig. 6 Structure of cooling carbon device

储, 水套入口处水温 20°C 、水套出口处水温 45°C , 此装置设计可提高出炭质量, 实现常温出炭。

4 试验测试

4.1 试验条件

生物质热解炭化设备样机制造完工后, 进行了秸秆热解炭化试验, 试验地点在松原市乾安县让字镇实验基地, 试验用玉米秸秆从让字镇农户处获取, 并对秸秆原料进行粉碎处理, 粉碎至粒径 5 mm 左右, 测得玉米秸秆原料含水率 8.93% 。试验样机如图 7 所示。



图 7 生物质热解炭化设备样机

Fig. 7 Prototype of biomass pyrolysis carbonization equipment

4.2 试验方法

热解炭化过程中, 利用温度传感器实时监测炭化室和燃烧室内温度, 燃烧室内温度在 500°C 以上, 炭化室内温度维持在 450°C 左右, 保持热解温度的稳定, 连续炭化试验 3 h , 以出料螺旋输送机开始出炭时计时开始, 直到生物炭完全排出时计时结束。生物质热解炭化设备性能测试如下。

设备纯小时生产率计算公式为

$$Q = \frac{W(1-H)}{(1-J)t} \quad (22)$$

式中 Q ——设备纯小时生产率, kg/h

W ——生物炭质量, kg

H ——生物炭含水率, $\%$

J ——原料含水率, $\%$

T ——出炭总时长, h

生物炭得率计算公式为

$$D = \frac{W(1-H)}{M(1-J)} \times 100\% \quad (23)$$

式中 D ——生物炭得率, $\%$

M ——原料质量, kg

4.3 试验结果与分析

炭化试验测试表明, 秸秆炭化能够实现连续生产运行, 炭化试验测试时长 180 min 、总出炭量 307.4 kg , 生物质热解炭化设备性能测试结果及制得的生物炭特性如表 2 和表 3 所示。

表 2 设备性能测试结果

Tab. 2 Test results of equipment performance

测试指标	测量值
原料处理量/(kg·h ⁻¹)	300
设备纯小时生产率/(kg·h ⁻¹)	103.8
生物炭得率/%	34.6
物料平均滞留时间/min	30
出炭温度/°C	47

表 3 生物炭特性测试结果

Tab. 3 Biochar characteristics test results

单位：%			
工业分析		元素分析	
成分	测试结果	成分	测试结果
全水分	7.74	C	62.32
灰分	13.63	H	2.64
挥发分	17.81	O	12.38
固定碳	56.39	N	1.17

生物质热解炭化设备纯小时生产率 103.8 kg/h、生物炭得率 34.6%，实现了常温出炭。所得生物炭固定碳含量 56.39%、总碳质量分数 62.32%，碳含量达到 I 级生物炭（总碳≥60%、固定碳≥50%）标准。利用烟气分析仪进行热解可燃气体成分分析，其中 CO₂ 为 39.3%、CO 为 34.7%、H₂ 为 8.5%、CH₄ 为 9.2% 及其他为 8.3%，作为主要燃烧成分的 CO、H₂ 和 CH₄ 占总气体质量百分比为 52.4%，与设计参考值 53.7% 相吻合。

综上所述，生物质热解炭化设备设计较为合理，可实现连续生产运行，生物炭得率高，出炭品质较好，达到预期设计效果。

5 结束语

采用热解可燃气体回收利用方案，同时结合回转式连续输送原理、生物炭循环水冷技术，设计了双筒回转连续式生物质热解炭化设备，利用热解可燃气体回燃供热，实现了热解气的循环利用，减少污染排放，节约能源消耗，采取的双筒回转连续输送技术方案，实现了生物炭的连续生产，使传统炭化炉生产工艺中生产效率不高、物料受热不均等问题得以解决，提高出炭品质。

试验结果表明，生物质热解炭化设备能够连续稳定运行生产生物炭，设备原料处理量 300 kg/h、纯小时生产率 103.8 kg/h、生物炭得率 34.6% 和出炭温度 47 °C，所得生物炭固定碳含量 56.39%、总碳质量分数为 62.32%，达到 I 级生物炭标准，生物质热解炭化设备生物炭得率高，出炭品质较好，总体达到预期目标。

参考文献

[1] 蔡艳荣, 蒋伟丽, 常春. 海洋废弃生物质基吸附材料去除水中重

金属离子的研究进展[J]. 轻工学报, 2022, 37(4): 100-110.

CAI Yanrong, JIANG Weili, CHANG Chun. Research progress on removal of metal ions from water by marine waste biomass based adsorbent[J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(4): 100-110.

[2] 闫双娇. 制备条件对秸秆生物炭理化性质和稳定性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.

YAN Shuangjiao. Research on the physicochemical properties and stability of biochar pyrolysis at different condition[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.

[3] 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热解炭化设备设计研究[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.

[4] 赵立欣, 贾吉秀, 姚宗路, 等. 生物质连续式分段生物质热解炭化设备研究[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.

[5] 朱华炳, 胡孔元, 陈天虎, 等. 内燃加热式生物质气化炉设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 96-102.

ZHU Huabing, HU Kongyuan, CHEN Tianhu, et al. Design of an internal combustion type heating biomass gasifier[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 96-102.

[6] 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]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 121-124.

JIANG Enchen, SU Xulin, WANG Mingfeng, et al. Design of variable pitch spiral conveyor for biomass continual pyrolysis reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 121-124.

[7] 叶协锋, 周涵君, 于晓娜, 等. 热解温度对玉米秸秆炭产率及理化特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1268-1275.

YE Xiefeng, ZHOU Hanjun, YU Xiaona, et al. Physicochemical properties and yields of corn-stalk-biochar under different pyrolyzed temperatures[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(5): 1268-1275.

[8] 张彦娜. 生物质炭气油集成转化生产系统技术经济研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.

ZHANG Yanna. Technology and economic research on biomass carbon gas and oil integrated production system[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013.

[9] 丁兆军. 生物质制氢技术综合评价研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2009.

DING Zhaojun. Study on comprehensive evaluation of hydrogen production technology from biomass[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2009.

[10] 巴苏. 生物质气化与热解: 实用设计与理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[11] 严家騷, 徐晓福, 王永青, 等. 水和水蒸气热力性质图表[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2021.

[12] 袁艳文, 田宜水, 赵立欣, 等. 卧式连续生物炭生物质热解炭化设备研制[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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13): 203-210.
- [13] 朱金陵, 何晓峰, 王志伟, 等. 玉米秸秆颗粒热解制炭的试验研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(7): 789-793.
- ZHU Jinling, HE Xiaofeng, WANG Zhiwei, et al. Experimental study on pyrolysing and producing charcoal with corn straw pellet[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2010, 31(7): 789-793.
- [14] 成洁. 基于棉秆热解产物特性分析的炭基缓释肥制备及其性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- CHENG Jie. The synthesis and properties of biochar-based slow-release fertilizer based on the pyrolysis byproducts of cotton stalk[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [15] 王鹰, 陈宏勋, 王国华, 等. 连续输送机械设计手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [16] 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, LV Huijie, et al. Study on biomass carbonization and pyrolysis with sigle kettle intermittent equipment[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2022, 43(5): 405-412.
- [17] 刘蓉, 刘文斌. 燃气燃烧与燃烧装置[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [18] ROUSSET P, FIGUEIREDO C. 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.
- [19] 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.
- [20] 连之伟, 陈宝明. 热质交换原理与设备[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [21] 《回转窑》编写组. 回转窑(设计、使用与维修)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1978.
- [22] 金光海. 回转窑内物料性质及运动状态引起的窑电流变化实验研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- JIN Guanghai. Experimental study on the change of kiln current caused by the properties and movement state of the material in the rotary kiln[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.