

生物质连续式分段热解炭化设备研究

赵立欣¹ 贾吉秀^{1,2} 姚宗路¹ 丛宏斌¹ 王金星² 张晓辉²

(1. 农业部规划设计研究院农业部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125;
2. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018)

摘要: 针对目前连续式炭化设备的热解温度场难以梯级调控, 不能满足多种热解温度工艺试验要求, 采用分段式加热技术, 设计了5段独立热解炭化炉, 并结合连续式输送原理, 集成生物炭循环水冷技术、热解气二次催化裂解技术和油气二级冷凝分离技术等, 研发了连续式分段热解炭化设备。以粉碎的玉米秸秆为原料开展了热解炭化试验, 结果表明, 本炭化设备实现了连续炭化和分段加热, 当5段炉温设为550℃、600℃、600℃、600℃、550℃时, 生物炭得率29.97%, 低位热值26.21 MJ/kg, 固定碳含量55.63%, 热解后的油气能较好地实现分离, 达到了设计要求, 实现了生物质的分段控温加热和连续热解。

关键词: 生物质; 连续热解; 分段加热; 炭化设备

中图分类号: TQ515 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0221-06

Equipment for Biomass Continuous Grading Pyrolysis

Zhao Lixin¹ Jia Jixiu^{1,2} Yao Zonglu¹ Cong Hongbin¹ Wang Jinxing² Zhang Xiaohui²

(1. Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agriculture Residue, Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China
2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: The five pyrolyzing furnaces which adopted grading heating technology was developed to solve the problem of bad control of temperature in the process of biomass pyrolysis. Combining with continuous conveying principle, circulating water cooling technology, secondary cracking technology of pyrolysis gas, secondary condensing collection of bio-oil and biogas, the equipment for biomass continuous grading pyrolysis was developed. Each furnace was heated by a 3 kW electric wire with PID control allowing a wide range of heating rates and a maximum temperature of 700℃. Pyrolysis test which used the crushing corn straw was completed after the pellet equipment was made, results showed that the equipment worked well and the feed throughput can be up to 12 kg/h, the yield of carbon was 29.97%, the low calorific value was 26.21 MJ/kg, the yield of fix-carbon was 55.63% and the temperature of collected carbon was 24℃ when the temperature of furnace was set at 550℃, 600℃, 600℃, 600℃ and 550℃, respectively, after separation of pyrolysis gas and bio-oil, the pyrolysis gas flow into an afterburner chamber where enough air fuelled ensured complete combustion, which conformed to the demand of grading heating and continuous pyrolysis.

Key words: biomass; continuous pyrolysis; grading heating; pyrolysis experiment

引言

生物质热解炭化技术, 是指生物质原料在绝氧

或低氧环境中加热升温引起内部分解形成生物炭、生物油和热解气的过程。多数研究结果表明^[1], 生物质的热解过程可分为3个阶段: 干燥预热阶段、挥

收稿日期: 2016-05-06 修回日期: 2016-05-31
基金项目: 引进国际先进农业科学技术计划(948计划)项目(2015-Z27)
作者简介: 赵立欣(1967—), 女, 研究员, 博士, 主要从事生物质能源技术研究, E-mail: zhaolixin5092@163.com
通信作者: 姚宗路(1980—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事生物质能源技术研究, E-mail: yaozonglu@163.com

发分析出阶段以及炭化阶段,第 1 阶段一般发生在室温到 130℃ 之间,生物质内部结构重新排列,水分大量流失;第 2 个阶段发生在 130 ~ 450℃ 之间,纤维素、半纤维素、木质素等固体物质吸收大量热量而分解,挥发分析出;第 3 个阶段主要发生在 450℃ 之后,生物炭慢慢形成,产生富炭残留物。生物炭作为一种新型的土壤改良剂,施放到土壤中既能增加土壤中的有机物,提高肥力,也能凭借其耐降解性质,提高碳在土壤里的封存时间,缓解温室效应对全球气候变化所带来的负面影响^[2-3],此外,生物炭具有较大的比表面积且表面含有较多的含氧活性基团,可以吸附土壤或污水中的重金属及有机污染物等,因生产成本较低,被许多人认为是未来活性炭的替代品^[4-6]。

发达国家生物质炭化技术发展很快,美国加利福尼亚州^[7]制造了一款利用高温气体进行内外加热的竖流式热解设备,英国爱丁堡大学研制了三代炭化装置的样机^[4],丹麦科技大学^[8-10]研制了离心热解反应器等。我国从 20 世纪 70 年代开始对生物质能源开发支持力度加大,热解主要集中在气化、液化等方面的研究^[11-12],在炭化设备方面,农业部规划设计研究院^[13]研发了内加热连续式生物质炭化中试设备,东北农业大学^[14]设计了生物质热解反应装置的变螺距螺旋输送机,华中科技大学采用移动床生物质干馏技术,设计了处理量达到 1 t/h 的连续

式热解炭化设备,另外上海交通大学、浙江大学、华中农业大学、华南农业大学等也开展了相关研究^[15],均取得了一定的研究成果。但是,此类连续式分段炭化设备存在炭化过程中热解温度场难以梯级调控,不能保证最优的产炭工艺而导致产炭品质不高的问题。

本文针对目前炭化设备的热解温度场难以进行梯级调控等问题,采用多段式控温原理,设计连续式分段热解炭化设备,并以粉碎玉米秸秆为原料进行连续热解试验。

1 工作原理和整机结构

1.1 连续炭化原理及工艺流程

连续式炭化技术主要是结合生物质原料的炭化原理和连续输送原理,采用进料口和出料口密封,保证热解炉内的密闭环境,再利用内源或外源对生物质原料进行加热,最终实现生物质的连续热解过程。其工艺流程如图 1 所示,采用粉碎的玉米秸秆为原料,生物炭生产工艺流程从整体上可分为密闭进料、分段热解炭化、油气分离、生物炭循环水冷、热解气二次裂解和尾气燃烧等 6 个环节。以生物质分段热解产炭为主路线,集成热解混合气的分离收集、二次催化裂解和热解气燃烧等工艺,既可实现炭-油-气的联产,又能实现焦油的去除和能量的高效利用。

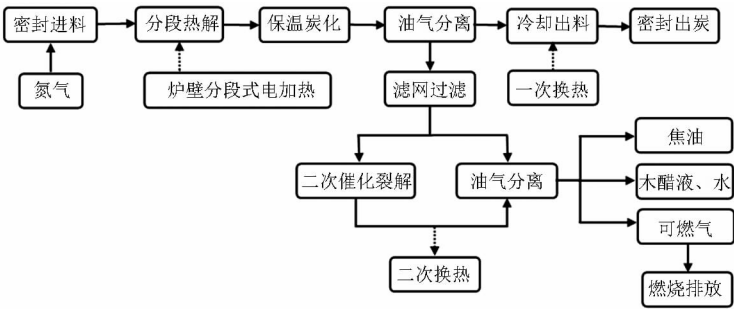


图 1 连续式生物质炭化工艺流程

Fig. 1 Process of biomass continuous pyrolysis

1.2 整机结构与工作原理

连续式分段热解炭化设备结构示意图如图 2 所示,设备工作时,先将 5 段电热炉升到设定温度,形成目标炭化温度场,利用该温度场拟合生物质炭化过程中的干燥阶段、挥发热解阶段和全面炭化阶段^[16]。再打开输料螺旋并调节转速,并开启喂料关风器开始进料,螺旋输料器推动生物质原料依次经过 5 段设定的温度场,到达最右端时完成最终炭化。炭化完成后,生物炭落入循环水冷却装置中将高温生物炭降低至燃点温度以下,收集存储。

热解气由滤网过滤器进行过滤除尘,之后经过三通可选择 2 条工艺路线,一是油气的分离和收集,热解气依次通入保温 200℃ 的油气分离器和常温的三相分离器,利用焦油、水和轻质油的液点不同实现逐级冷凝分离,不可冷凝气体如 CO、CO₂、H₂、CH₄等通过三相分离器排至尾气管道进行燃烧排空。二是热解混合气直接通入催化裂解炉,在高温和催化剂的条件下将大分子焦油催化裂解成为小分子气或轻质油^[17-19],再通入至油气分离装置中,进行催化裂解后的油气分离和收集,经油气分离后的热解气进入燃烧炉中烧掉排空。

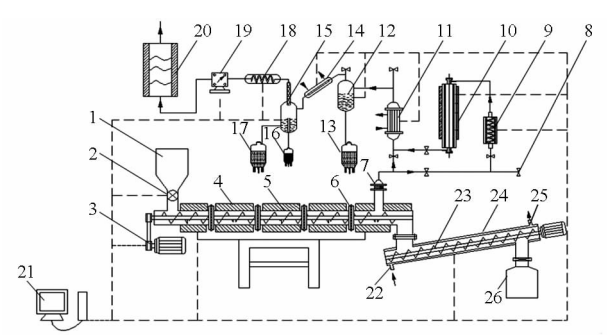


图 2 设备结构示意图

Fig. 2 Sketch of biomass continuous pyrolysis experiment
1. 料斗 2. 关风器 3. 调频电动机 4. 加热炉 5. 输料螺旋
6. 绝热环 7. 过滤网 8. 安全阀 9. 预热炉 10. 热解气裂解器
11. 换热器 12. 油气分离器 13. 储油罐 14. 套管冷凝器
15. 三相分离器 16. 轻油收集罐 17. 储水罐 18. 盘管冷凝器
19. 气体流量计 20. 热解气燃烧器 21. 控制系统 22. 进风口
23. 斜螺旋 24. 循环水套筒 25. 出水口 26. 集炭箱

1.3 主要技术参数

连续式分段热解炭化设备主要技术参数如表 1 所示。

表 1 连续式分段热解炭化设备的主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters of pyrolysis experiment

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 000×3 000×2 600
原料处理量/(kg·h ⁻¹)	0~30
设备总功率/kW	45.5
炭化温度/℃	≤700
催化/高温裂解温度/℃	≤1 200
热解升温时间/min	5~60
加热方式	电阻丝外源加热

2 关键部件设计

2.1 分段式热解炭化炉

分段式炭化炉作为设备的核心部件,其设计包含炭化炉的多段式设计及螺旋输料器的尺寸计算。热解炉的多段式控温目的就是形成所设定的温度场,使生物质原料在热解过程中以可控的升温速率进行热解炭化,模拟符合热解机理的温度场,提高生物炭得率和品质。因此,理论上在热解筒壁设计过程中分段越多热解温度场的变化趋势越趋于平缓,但是考虑筒壁导热、热解气对流传热等误差影响和连接处的密闭性等问题,最终选择将筒壁分为 5 段,各段之间采用法兰连接,法兰之间加有绝热板以减少筒壁的导热,结构示意图如图 3 所示。

热解炉为生物质原料热解炭化过程提供热源,热解过程中总的能量消耗可分为生物质的炭化升温、液相产物的潜热和显热、挥发分析出带走的热量

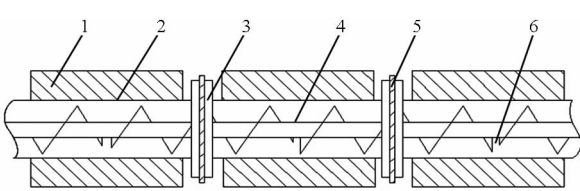


图 3 分段式炭化炉示意图

Fig. 3 Sketch of grading heating furnaces

1. 加热炉 2. 热解筒壁 3. 连接法兰 4. 螺旋输送机 5. 绝热环 6. 螺旋缺口

和炉体的散热等^[13],由于炉体外部的保温棉使得炉体散热所占比重很少,此处忽略不计,由能量守恒可得

$$Q = Q_i + Q_s + Q_g \tag{1}$$

$$Q_i = CM_i(T_2 - T_1) \tag{2}$$

$$Q_s = M_s\gamma + cM_s(T_2 - T_1) \tag{3}$$

$$Q_g = M_g(T_2 - T_1)c_p \tag{4}$$

式中 Q ——热解炉提供的热量,J
 Q_i ——生物质炭化升温需要的热量,J
 Q_s ——液相产物的潜热和显热,主要成分是水,J
 Q_g ——挥发分的显热,J
 M_i ——生物质总质量,kg
 M_s ——液相产物质量,kg
 M_g ——挥发分质量,kg
 γ ——液相产物汽化热,2 596 kJ/kg
 C ——生物质原料比热容,1.5 kJ/(kg·K)
 c ——水蒸气比热容,4.18 kJ/(kg·K)
 c_p ——挥发分吸热,按产物的加权平均数计算,3.10 kJ/(kg·K)
 T_2 ——热解过程中最高温度,取 600℃
 T_1 ——环境温度,取 20℃

生物质热解的液相产物中,焦油约占 12%,水和醋酸约占 88%^[20-21],水的比热容最大,因此液相产物的热量按水的潜热和显热计算。设定原料处理量为 20 kg/h,根据热解炭化产物的大致比例生物炭 35%、液相产物 30%、挥发分 30%,可得 $M = 20$ kg, $M_i = 7$ kg, $M_s = 6$ kg, $M_g = 6$ kg。由式(1)~(4)可得总能量消耗 $Q = 43\,074.9$ kJ,所需热解炉功率为 11.97 kW,为保证功率余量,选择热解炉功率为 15 kW。

参照螺旋输送机的设计标准^[22],水平螺旋的输料计算公式为

$$I_m = I_v\rho = Av\varphi\rho = \frac{\pi D^2 L}{4t}\varphi\rho \tag{5}$$

其中
$$v = S \frac{n}{60} \tag{6}$$

$$S = 0.8D$$

式中 I_m ——生产率,取 20 kg/h
 L ——加热段长度,m

D ——螺旋外径, m
 t ——加热时间, 取 5 ~ 60 min
 φ ——填充系数, 取 0. 4
 ρ ——堆积密度, 取 500 kg/m³
 S ——螺距 n ——转速, r/min

考虑到热解过程中温度较高, 对螺旋输送器的强度要求高, 螺旋长度过长易产生挠度而造成输送器和筒壁的磨损, 综合前人经验^[14], 设计螺旋输送器的加热段长度为 2 m。按成型颗粒的物理参数进行计算, 堆积密度为 500 kg/m³, 填充系数设为 0. 4, 热解时间平均为 30 min, 代入式(5)、(6)可得螺旋输送器的外径应为 0. 179 m, 设计过程为保证余量, 取 $D=0. 2$ m, 时间为 5 ~ 60 min, 可得螺旋转速 n 为 0. 21 ~ 2. 5 r/min。根据此设计尺寸, 可以得到试验常用生物质的理论处理量如表 2 所示。

表 2 各生物质原料的理论处理量					
Tab. 2 Theory capacity of bio-feeds					
参数	玉米 秸秆	稻壳	稻壳 粉末	花生 壳	成型 颗粒
堆积密度/(kg·m ⁻³)	120	130	390	145	500
填充系数	0. 35	0. 35	0. 50	0. 30	0. 40
加热时间/min	5 ~ 60	5 ~ 60	5 ~ 60	5 ~ 60	5 ~ 60
理论处理量/(kg·h ⁻¹)	2. 1 ~ 25. 2	2. 3 ~ 27. 3	9. 7 ~ 117	2. 2 ~ 26. 1	10 ~ 120

2. 2 油气分离装置设计

热解炉产生的热解混合气中含有水、焦油和不可凝气体等成分, 因此要对热解副产物进行分离和收集, 根据混合成分的凝固点不同, 采用分级冷凝原理进行逐步分离。通过程序控温的电热套保证分离罐的温度在 200℃ 左右, 在此温度下水和一些轻质油以气相存在, 而焦油成分复杂, 其主要成分在 200℃ 时会冷凝至液相^[23], 因此大部分焦油会通过油气分离罐收集到储油罐中; 经油气分离后的热解气中主要成分是水、不可凝气体和少许的轻质油, 再通过循环水冷却降至室温并通入至三相分离器中。利用三相分离器的结构原理将水、不可凝气体和轻质油进行分离。三相分离器采用非标设计, 结构如图 4 所示, 主要由进气口、出气口、油腔和水腔组成, 初级净化后的热解气通过进气口进入容器空腔, 在室温状态下由气相变为水相, 由于密度不同, 轻质油漂浮在水的上层, 经中间的浮斗进入油腔排出, 水则经出水口排出。

2. 3 其他部件设计

催化裂解炉的接入使得热解设备更具系统性, 通过三通阀的切换, 使得热解炉产生的气体可以分

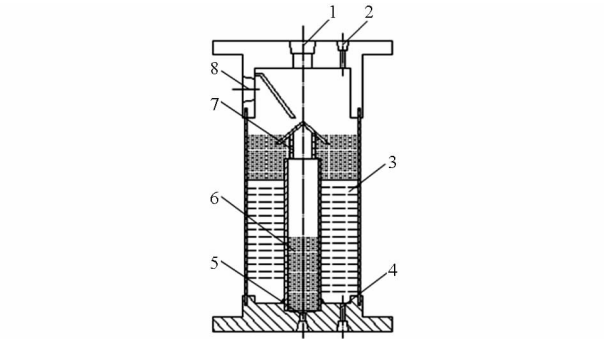


图 4 三相分离器

Fig. 4 Separator of water, oil and light oil
1. 出气口 2. 液位计回流口 3. 水腔 4. 出水口 5. 出口口
6. 油腔 7. 浮斗 8. 进气口

别通入冷凝分离装置进行冷凝分离或催化裂解炉进行催化裂解。催化裂解炉采用 5 段炉设计, 每段单独控温 20 ~ 1 100℃, 加热管总长为 80 cm, 总功率 7. 5 kW, 催化裂解炉内设有方便拆卸的支撑板用以装填催化剂, 热解气由催化裂解炉的上端通入, 经过催化剂的催化裂解后在催化裂解炉的下端排出, 催化裂解炉的前后端设有取样口, 以便对比分析热解气的催化裂解效果。

炭化炉后端连接生物炭水冷装置, 斜螺旋套筒内通入循环水对热解完全后的生物炭进行换热降温, 以生物炭初始温度为 500℃ 进行计算, 利用流量为 0. 048 1 m³/h 的循环水将生物炭降温至 60℃, 使其低于着火点并收储, 循环水经换热后由 20℃ 升至 40℃。

炭化炉内的测温热电偶采用插入式安装, 在螺旋绞龙布置热电偶的位置处对绞龙叶片进行环切, 得到的螺旋叶片缺口用以将热电偶插入到物料层 1 cm 处进行测温, 避免以往测温过程中由于炉壁的热阻产生的误差, 使得在生物质热解过程中测温更加准确。

3 热解炭化试验

3. 1 试验材料与测试方法

样机制造后, 在北京市大兴区农业部规划设计研究院重点实验室进行了热解试验, 如图 5 所示。



图 5 连续式分段热解炭化设备试验图
Fig. 5 Test figures of pyrolysis experiment

样机调试完成后,可进行如花生壳、成型颗粒和玉米秸秆等粒径小于 3 cm,水分在 15% 内不同原料的热解试验,现以粉碎后的玉米秸秆为试验原料,原料的物理特性如表 3 所示。

表 3 试验生物质原料特性
Tab.3 Properties of test material

燃料类型	密度/(g·cm ⁻³)	全水分/%	挥发分/%	灰分/%	固定碳含量/%	低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)	粒径/cm
玉米秸秆	120	7.68	82.44	3.85	6.03	16.82	≤2

测试指标主要包括纯小时炭、油、气的生产率、生物炭得率、出炭温度等。设备纯小时炭、油、气的产率计算公式分别为

$$Q_{tan} = \frac{W_{tan}(1-H)}{0.88t_1} \tag{7}$$

$$Q_{ta} = \frac{N}{V} \times 100\% \tag{8}$$

$$S_1 = \frac{M}{V(1-H)} \tag{9}$$

式中 Q ——纯小时生产率,kg/h
 W_{tan} ——生物炭质量,kg
 H ——生物炭含水率,%
 t_1 ——试验时间,h
 S_1 ——产气率
 V ——原料质量,kg
 M ——产生气体的体积,m³
 N ——油的质量,kg

下标 tan 表示炭,ta 表示油。

生物炭得率指生物炭产量与所需原料量的质量比,其计算公式为

$$D_1 = \frac{W_{tan}(1-H)}{V(1-J)} \times 100\% \tag{10}$$

表 5 样机试验测试结果
Tab.5 Test results of pyrolysis prototype

原料	炭生产率/(kg·h ⁻¹)	生物炭得率/%	产油率/%	产气率/(m ³ ·kg ⁻¹)	木醋液产率/%	出炭温度/℃	功耗/kW
玉米秸秆	4.1	29.97	2.44	0.20	4.32	24	6.14

玉米秸秆热解各组分及产率如表 5 所示。当设备稳定出炭时计量时间,并通过电子秤测定生物炭质量,由式(7)、(10)得生物炭生产率 为 4.1 kg/h,生物炭得率为 29.97%;通过热解气的二级冷凝和三相分离器的静置分层得到生物质焦油和木醋液等组分含量,并采用液位计测量焦油和木醋液的含量,由式(8)得其产率分别为 2.44%、4.32%;在设备连续运行过程中采用电能质量分析仪进行功率测定,换算成产炭耗能为 1.50 kW/kg,由于该设备平台的研制主要用于探索连续热解试验优化工艺,为保证试验参数的精准度,各部件的保温和加热均采用电热丝完成,因此能耗较高。

式中 D_1 ——生物炭得率,%
 J ——原料含水率,%

3.2 结果分析

在设备正常工作状态下,测试时长为 4 h,设定物料的加热时间为 30 min,设备性能测试和试验结果如表 4~6 所示。

表 4 分段热解温度设定
Tab.4 Temperature setting of pyrolyzing furnace

	温度	第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 4 段	第 5 段
设定炉温		550	600	600	600	550
实测炉温		550	601	603	601	553
物料温度		520	583	656	609	575

如表 4 所示,5 段炉独立采用 PID 程序控温,使其稳定在设定温度,在连续热解过程中,生物质原料依次经过 5 段炉进行升温热解,通过表中温度对比显示可以看出出设备的分段控温效果良好。第 3 段和第 4 段的料温高于炉温说明在生物质原料在这一阶段的热解过程中存在放热反应,当热电偶检测到由于放热反应使得环境温度大于炉温时,该段炉会停止加热,以保证热解环境的稳定性。

表 6 热解气组分测试结果
Tab.6 Test results of pyrolysis gas components

成分	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	其他
含量/%	32.65	26.02	14.26	14.14	2.43	10.50

通过罗茨流量计计量气体流量,由式(9)得热解气产率为 0.20 m³/kg,主要组分如表 6 所示,经过热解产生的高温生物炭通过循环水冷凝将温度降至其燃点以下,采用红外热像仪进行测量,结果显示生物炭的出炭温度为室温,达到设计效果。对生产的生物炭采样可得其工业分析如表 7 所示,在该热解温度环境下生物炭的固定碳含量达到 55.63%,低位热值 26.21 MJ/kg。

表 7 生物炭特性测试结果

Tab.7 Test results of biochar characteristics

参数	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	全水 分/%	挥发 分/%	灰分/ %	固定碳 含量/%	低位热值/ ($\text{MJ}\cdot\text{kg}$)
数值	0.13	9.63	20.10	14.66	55.63	26.21

4 结论

(1)采用分段式加热技术,并结合了连续式输送原理、生物炭循环水冷技术和油气分离等技术,设

计了连续式分段热解设备,通过调节 5 段炉温方便的调整热解炭化的温度环境,为生物质连续热解炭化的优化工艺探索提供了平台支持。

(2)试验结果表明,该设备实现了分段加热,在文中工艺条件下,炭生产率为 4.1 kg/h,炭得率、产油率、产气率和固定碳含量分别为 29.97%、2.44%、0.20 m³/kg 和 55.63%,出炭温度为常温,实现了生物质的连续热解炭化和炭-油-气的联产。

参 考 文 献

1 王冠,赵立欣,孟海波,等.我国生物质热解特性及工艺研究进展[J].节能技术,2014,32(2):120-124.
WANG Guan, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Biomass pyrolysis characteristics and technology progress [J]. Energy Conservation Technology, 2014,32(2):120-124. (in Chinese)

2 BARROW C J. Biochar: potential for countering land degradation and for improving agriculture[J]. Applied Geography, 2012, 34: 21-28.

3 张阿凤,潘根兴,李恋卿,等.生物黑炭及其增汇减与改良土壤意义[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2459-2463.
ZHANG Afeng, PAN Genxing, LI Lianqing, et al. Biochar and the effecton C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. Journal of Agro-Environment Science,2009,28(12):2459-2463. (in Chinese)

4 ONDREJ Mašek, PETER Brownsort, AHDREW Cross. Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar[J]. Fuel, 2013,103:151-155.

5 王明峰,陈晓堃,蒋恩臣,等.基于扫描图像 RGB 分析的生物质炭吸附特性研究[J].农业机械学报,2015,46(12):212-217.
WANG Mingfeng, CHEN Xiaokun, JIANG Enchen, et al. Biochar absorption characteristics based on RGB analysis of scanned images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery ,2015,46(12):212-217. (in Chinese)

6 赵世翔,姬强,李忠徽,等.热解温度对生物质炭性质及其在土壤中矿化的影响[J].农业机械学报,2015,46(6):183-192.
ZHAO Shixiang, JI Qiang, LI Zhonghui, et al. Characteristics and mineralization in soil of apple-derived biochar produced at different temperatures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(6):183-192. (in Chinese)

7 BOATENG A A, MULLEN C A. Fast pyrolysis of biomass thermally pretreated by torrefaction[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 100:95-102.

8 BECH N, JENSEN P A, DAM-JOHANSEN K. Ablative flash pyrolysis of straw and wood: bench-scale results[C]//Proceedings of 15th European Biomass Conference and Exhibition,2007:1276-1284.

9 NIELS Bech, MORTEN Boberg Larsen, PETER Arendt Jensen. Modelling solid-convective flash pyrolysis of straw and wood in the pyrolysis centrifuge reactor[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(6-7):999-1011.

10 ESBEN W Bruun, HENRIK Hauggaard-Nielsen, NORAZANA Ibrahim. Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(3):1182-1189.

11 陈冠益,颜蓓蓓,贾佳妮,等.生物质二级固定床催化热解制取富氢燃气[J].太阳能学报,2008,29(3):360-364.
CHEN Guanyi, YAN Beibei, JIA Jiani, et al. Production of hydrogen-rich gas through pyrolysis of biomass in a two-stage reactor [J]. ACTA Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(3):360-364. (in Chinese)

12 刘荣厚,袁海荣,徐璐,等.玉米秸秆热解反应动力学的研究[J].太阳能学报,2007,28(5):527-530.
LIU Ronghou, YUAN Hairong, XU Lu, et al. Kinetic study of maize straw pyrolysis[J]. ACTA Energiae Solaris Sinica, 2007, 28(5):527-530. (in Chinese)

13 丛宏斌,赵立欣,孟海波,等.内加热移动床生物质炭化中试设备监控系统开发[J].农业工程学报,2015,31(3):268-274.
CONG Hongbin, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Monitoring and control system development for pilot-scale moving bed biomass carbonization equipment with internal heating[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(3):268-274. (in Chinese)

14 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. (in Chinese)

15 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. Developement of internal heating continuous type biomass carbonization equipment[J]. ACTA Energiae Solaris Sinica, 2014,35(8):1529-1535. (in Chinese)

16 朱锡锋.生物质热解原理与技术[M].北京:科学出版社,2013:130-135.

17 Peter Alexander Broensort. Performance parameters and their influence on biochar system benefits[D]. Scotland:University of Edinburgh, 2009.

- WANG L Q, CHEN Z S. Exergy analysis on gas production from biomass gasification [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 143–148. (in Chinese)
- 5 潘贤齐, 苏德仁, 周肇秋, 等. 生物质流化床气化中试实验研究 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 175–179.
PAN X Q, SU D R, ZHOU Z Q, et al. Experimental investigation of biomass gasification in a pilot-scale fluidized bed gasifier [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 175–179. (in Chinese)
- 6 FLORIN N H, HARRIS A T. Enhanced hydrogen production from biomass with in situ carbon dioxide capture using calcium oxide sorbents [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(2): 287–316.
- 7 FRANCO C, PINTO F, GULYURTLU I, et al. The study of reactions influencing the biomass steam gasification process [J]. Fuel, 2003, 82(7): 835–842.
- 8 李斌, 陈汉平, 杨海平, 等. 生物质水蒸气气化制氢模拟研究 [J]. 可再生能源, 2012, 30(2): 58–61.
LI B, CHEN H P, YANG H P, et al. Simulation study of biomass steam gasification for hydrogen production [J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(2): 58–61. (in Chinese)
- 9 LI B, WEI L, YANG H, et al. The enhancing mechanism of calcium oxide on water gas shift reaction for hydrogen production [J]. Energy, 2014, 68: 248–254.
- 10 LI B, CHEN H, YANG H, et al. Modeling and simulation of calcium oxide enhanced H_2 production from steam gasification of biomass [J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2011, 5(3): 378–384.
- 11 PRÖLL T, HOFBAUER H. H_2 rich syngas by selective CO_2 removal from biomass gasification in a dual fluidized bed system-process modelling approach [J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89(11): 1207–1217.
- 12 HEJAZI B, GRACE J R, BI X, et al. Steam gasification of biomass coupled with lime-based CO_2 capture in a dual fluidized bed reactor: a modeling study [J]. Fuel, 2014, 117, Part B: 1256–1266.
- 13 HAN L, WANG Q, YANG Y, et al. Hydrogen production via CaO sorption enhanced anaerobic gasification of sawdust in a bubbling fluidized bed [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(8): 4820–4829.
- 14 乔春珍. 含碳能源直接制氢中 CO_2 吸收剂的研究 [D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2006.
QIAO C Z. Study on the CO_2 sorbents in the single-step hydrogen production from carbonaceous energy [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- 15 SOLIEMAN A A A, DIJKSTRA J W, HAIJE W G, et al. Calcium oxide for CO_2 capture: operational window and efficiency penalty in sorption-enhanced steam methane reforming [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(4): 393–400.
- 16 COURSON C, UDRON L, ŚWIERCZYŃSKI D, et al. Hydrogen production from biomass gasification on nickel catalysts: tests for dry reforming of methane [J]. Catal Today, 2002, 76(1): 75–86.
- 17 MIN Z H, ASADULLAH M, YIMSIRI P, et al. Catalytic reforming of tar during gasification. Part I. Steam reforming of biomass tar using ilmenite as a catalyst [J]. Fuel, 2011, 90(5): 1847–1854.
- 18 BRETADO M A E, VIGIL M D D, GUTIÉRREZ J S, et al. Hydrogen production by absorption enhanced water gas shift (AEWGS) [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 35(21): 12083–12090.
- 19 ACHARYA B, DUTTA A, BASU P. Chemical-looping gasification of biomass for hydrogen-enriched gas production with in-process carbon dioxide capture [J]. Energy & Fuels, 2009, 23(10): 5077–5083.
- 20 HAN C, HARRISON D P. Simultaneous shift reaction and carbon dioxide separation for the direct production of hydrogen [J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(24): 5875–5883.
- 21 WU C F, WILLIAMS P T. Effects of gasification temperature and catalyst ratio on hydrogen production from catalytic steam pyrolysis-gasification of polypropylene [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(6): 4125–4132.

(上接第 226 页)

- 18 KA Leung Lam, ADETOYESE Olajire Oyedun, CHI Wai Hui. Experimental and modelling studies of biomass pyrolysis [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(3): 543–550.
- 19 BRUUN E W, HAUGGAARD-NIELSEN Henrik, IBRAHIM Norazana. Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil [J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(3): 1182–1189.
- 20 王明峰, 蒋恩臣, 李柏松, 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 rich husk [J]. ACTA Energiæ Solaris Sinica, 2012, 33(1): 168–172. (in Chinese)
- 21 李波. 生物质焦油催化裂解的实验研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
LI Bo. Experimental of the catalytic cracking of biomass tar [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 22 JB/T 7679—1995 螺旋输送机的基本参数与技术要求 [S]. 1995.
- 23 PARK Jinje, LEE Yongwoon, RYU Changkook. Slow pyrolysis of rice straw: analysis of products properties, carbon and energy yields [J]. Bioresource Technology, 2014, 155: 63–70.