

变速升温对玉米秸秆热解产物特性的影响

王雅君¹ 李丽洁² 邓媛方¹ 姚宗路² 邱凌^{1,3} 赵立欣²

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业部规划设计研究院, 北京 100125;
3. 农业部农村可再生能源开发利用西部科学观测实验站, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过玉米秸秆的变速升温及传统匀速升温热解试验, 对不同热解形式下生成的生物炭、生物油及热解气进行检测分析, 探究升温速率对其热解产物特性的影响。试验表明, 玉米秸秆减速升温生物炭得率和热解气得率分别为 29.82% 和 27.49%, 而加速升温的产物中生物油所占比例较大。通过热重试验及气相检测, 发现不同的升温设置改变了生物质热解进程。此外对非凝气体进行气相检测分析发现, CO、CO₂ 先于 CH₄ 溢出, 而 H₂ 的溢出浓度随着热解温度的升高而增大。对生物油主要成分的检测分析发现, 减速升温所制生物油的主要成分为小分子物质, 大分子有机物含量很少, 而加速升温可以得到更加丰富的多环芳烃。通过对产物的对比分析发现, 在相同的热解时间下, 减速升温速率设置不仅可以保证热解产物中较高的生物炭得率, 且热解气得率比匀速升温试验增加 4.49%, 生物油相得率减少 4.51%, 且稠环芳烃含量较少。优化升温速率设置可提高生产效率, 从而为生物质热解工程中的炭气油联产提供新的思路。

关键词: 玉米秸秆; 变速升温; 热解; 产物

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0337-06

Effect of Variable Heating Rate on Pyrolysis Process and Product Characteristics of Corn Stalk

WANG Yajun¹ LI Lijie² DENG Yuanfang¹ YAO Zonglu² QIU Ling^{1,3} ZHAO Lixin²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China

3. Northwest Research Center of Rural Renewable Energy Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The influence of heating rate on slow pyrolysis was explored. The corn stalks were tested via two types of variable heating rate comparing with three types of constant heating rate. The products such as char, pyrolysis bio-oil and non-condensable gases at different heating rates were also detected. The pyrolysis by decreasing heating rate resulted in 29.82% char and 27.49% non-condensable gases. While the increasing heating rate caused higher bio-oil yield which was not benefit to the production of char and pyrolysis gas. Thermo-gravimetric analysis of the raw materials showed that variable heating rate significantly changed the weight loss during pyrolysis process. It was found that CO and CO₂ were released earlier than CH₄ and H₂ by performing gas chromatography test. In the higher temperature zone, the concentration of H₂ was increased. The analysis of the main components in bio-oil confirmed that less macromolecular organic matter content was detected after pyrolysis by decreasing heating rate. While the increasing heating rate produced more polycyclic aromatic hydrocarbons. The concept of variable heating rate was presented. It was found that the pyrolysis by decreasing heating rate not only made sure the yields of chars and pyrolysis gas, but also increased the char yield by 4.49%, and deduced the bio-oil yield by 4.51% and this process was more to the benefit of poly-co-production with char and pyrolysis gas as the main products. This concept would provide new ideas for the project of biomass pyrolysis.

Key words: corn stalks; variable heating rate; pyrolysis; products

收稿日期: 2017-10-28 修回日期: 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51576167)和公益性行业(农业)科研专项(201503135)

作者简介: 王雅君(1991—), 男, 博士生, 主要从事生物能源工程与技术研究, E-mail: 815885504@qq.com

通信作者: 邱凌(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事生物能源与环境工程研究, E-mail: ql2871@126.com

0 引言

日益加剧的化石燃料消耗致使全球气候变暖,寻求合适的替代能源已刻不容缓。生物质能源对大气环境的 CO₂净排放量为零,且相较于传统化石燃料,燃烧产物中的 SO_x、NO_x 较低,这使得生物质能源研究成为热点。在我国,秸秆类生物质是主要的农业废弃物,处理工艺主要分为:成型燃料燃烧、厌氧发酵及热化学处理。热化学处理中慢速热解主要的终端产物为生物炭、热解气及生物油,是较为成熟的热解工艺。

生物质热解特性(反应动力学、热解得率及成分)受众多因素影响,包括:生物质类型、热解温度、升温速率、原料粒径、载气种类、保温时间等^[1]。快速热解技术主要用于生物油的生产^[2-3]。较低的热解温度及升温速率有助于生物炭的生产;较高的热解温度有助于生物质向热解气相转化^[4-5]。热解产物生物炭能量密度高于原料,固定碳含量高,因此可直接用作燃料或活性炭原料^[6]。热解液体产物中的化学物质非常复杂,包括酸类、醇类、糖类、酮类、醛类、酚类及其衍生物等。相较于燃油,生物油具有较低热值(14~18 MJ/kg),且其中成分复杂,不易分离,是慢速热解中较难处理的副产品。热解生成的热解气由大量非冷凝气体组成,包括 CO、CH₄、H₂ 及其他烃类。此外,热解气中也含有较高浓度的 CO₂,降低了热解生物质燃气的热值。

升温速率是影响生物质热解的主要因素之一。吴建霞等^[7]利用热重-红外联用对生物质热解特性的研究表明,热解失重主要发生在快速热解阶段,升温速率越高,热解初始温度和失重速率越大。付鹏等^[8]经过试验得出结论:在较低的升温速率下,挥发分析出阶段的起始温度与升温速率的对数呈线性关系,最大热解速率随着升温速率的增大呈线性增大趋势。潘萌娇等^[9]以棉秆为研究对象,认为 10℃/min 升温速率在 700℃ 下获得的生物炭有最大的碳含量。田宜水等^[10]基于多升温速率法对典型生物质进行了热动力学分析,并得出结论:典型生物质活化能随着转化率的增加而增加,在挥发分析出阶段,热解活化能介于 144.61~167.34 kJ/mol 之间,反应动力学机理均符合 Avrami-Erofeev 函数。本文在前人研究基础上探究变速升温与匀速升温在热解进程及产物得率上的区别,以期对生物质慢速热解领域针对升温速率的研究提供经验。

1 材料及方法

1.1 试验材料

试验材料选用收集自北京市大兴区农户的玉米秸秆。原料经粉碎过筛,选取 20~40 目样品进行试验,样品在 (105±5)℃ 的干燥箱中干燥 24 h。为充分了解原料性质,对玉米秸秆原料进行了工业分析(参照标准:ASTM D3173, D3174, D3175)和元素分析(EA3000 型元素分析仪),并进行了半纤维素、纤维素和木质素含量的测定。

结果表明,对于空气干燥基,玉米秸秆挥发分质量分数为 74.59%,固定碳质量分数为 14.80%,灰分质量分数为 3.34%,含水率为 7.27%;经过测定,半纤维素质量分数为 33.42%,纤维素质量分数为 36.72%,木质素质量分数为 12.29%。

1.2 试验方法

1.2.1 慢速热解

热解设备是自行设计的生物质热解炭化试验平台,如图 1a 所示。试验平台主要包括加热、副产物收集、气体计量和控制系统。反应器主要由热解炉与反应管组成;由油浴与水浴组成的四级冷凝系统实现了生物油与热解气的分离与收集;气体计量与收集系统包括氮气瓶、流量计与集气

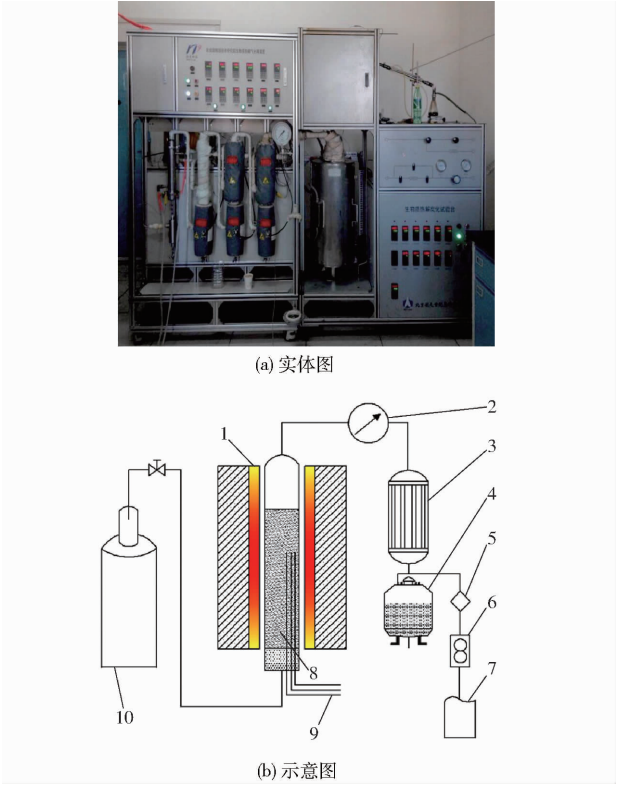


图 1 热解装置图

Fig. 1 Pyrolysis unit

1. 电阻炉 2. 压力表 3. 冷凝器 4. 液体收集装置 5. 过滤器
6. 流量计 7. 集气袋 8. 原料 9. 温度传感器 10. 氮气瓶

袋;控制系统包括计算机、温度传感器、显示器与主控软件^[11]。

由于生物质慢速热解试验的升温速率精度与温度精度要求较高,因此选用电阻炉作为外源加热方式。将电阻炉设计为 5 段式控温,可以使炉腔内轴向温度梯度影响减弱,形成恒温区。5 段炉并联,温度独立调节,每段均由控温表、固态继电器、热电偶组成闭合回路,计算机通过通讯模块控制 5 段炉。各段最大功率为 1.2 kW,因此热解炉最大功率为 6 kW。通过前期的试验台搭建与稳定性调试,保证了在变速热解试验过程中参数设定的准确性。热解区长 800 mm,内径 100 mm。在反应器前端用 N₂以 20 mL/min 的流量进行吹扫,确保气体可顺利离开反应器。

试验装置示意图如图 1b 所示。在本试验中,处理过的玉米秸秆被提前置于密闭的热解系统中,升温速率按图 2 所示的 5 种不同方式设置,初温均设定为 40℃,试验热解终温均为 520℃,达到终温后,保温 26 min。有研究认为,200 ~ 360℃ 是半纤维素与纤维素热解反应温度区,木质素反应温度较广,可从低温区一直延伸到 500℃ 以上^[12]。因此,试验 1 分别以 200℃、360℃ 为温度节点。由于较高的升温速率会导致 C 元素的溢出,降低生物炭得率的同时会增加生物油产量,因此在慢速热解的范畴内,不宜将升温速率设置过高,一般小于 30℃/min,在本试验中,3 个阶段分别以 2、10、20℃/min 的升温速率进行热解,选取这 3 组升温速率主要是因为低温慢速热解的升温速率范围内尽量区别 3 个阶段升温速率,以期探究不同升温速率在热解不同温度段产生的效果。试验 2 升温速率设置顺序相反。试验 3、4、5 分别以 4.6、2.3、9.2℃/min 的升温速率匀速升温。该试验设置保证了试验 1 ~ 3 在升温过程所用时间与保温时间相同,通过对后期的产物特性进行分析,可比较不同的变速升温方式对热解产物特性的影响。试验 3 ~ 5 为匀速升温热解试验,可比较匀速升温状态下不同的升温速率对热解产物的影

响。每组试验均做 3 次重复,产物三相分布取平均值进行分析。

1.2.2 热重分析

热重分析选用 TG-60 型岛津热重分析仪。升温条件设置(升温节点、升温速率、热解终温、载气流量)与固定床热解条件完全相同,每个样品做 3 次重复试验,取平均值。通过热重分析,可观察在不同的升温速率设置下半纤维素、纤维素及木质素的降解温度区间,相较于固定床试验,降低了物料之间传热导致的滞后效应,使热解特性分析更为准确^[13-14]。

1.2.3 产物分析

原料及生物炭的高位热值通过氧弹量热仪测得。通过热值及炭得率可得到热解前后的能量密度变化。通过元素分析仪测量样品中 C、H、O 和 N 含量。热解生成气通过气相色谱分析仪(GC)进行检测,检测的气体成分为 CO、CO₂、H₂和 CH₄。生物油部分成分检测选用带有 AB-5MS 型毛细管柱的气质联用仪(GC-MS)。

2 结果与分析

2.1 升温速率对热解过程及产物分布的影响

如表 1 所示,试验 1 的三相分布规律与试验 4 接近。试验 1 生物炭得率为 29.82%,气相得率最高(27.49%),液相得率最低(42.69%)。试验 2、试验 3 的三相分布规律与试验 5 接近,液相得率相对较大。出于提高生物炭与热解气得率的目的,相对于其他 3 组,试验 1 与试验 4 更符合生产要求,说明减速升温设置与慢速升温均可得到较高的生物炭与热解气得率,而试验 4 尽管可以得到最高的生物炭得率(31.99%),相对试验 1 增加 2.17%,但在图 2 的升温速率设置中可以看出,其所需热解时间是试验 1 的 2 倍。此外,热解气的产量试验 1 甚至比试验 4 还高出 3.19%。比较试验 1 与试验 3 发现,相同的热解时间下,试验 1 在保证热解产物中较高生物炭得率的同时,热解气得率比匀速升温试验增加了 4.49%,生物油相得率减少了 4.51%。因此,从兼顾生物炭、热解气得率与生产效率的角度,试验 1

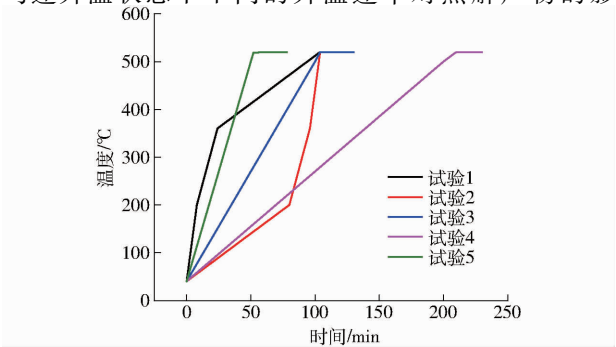


图 2 升温速率设置
Fig. 2 Styles of heating rates

表 1 玉米秸秆热解产物量			
Tab.1 Pyrolysis product of corn stalks			%
试验序号	生物炭得率	生物油得率	热解气得率
1	29.82	42.69	27.49
2	29.44	47.91	22.65
3	29.80	47.20	23.00
4	31.99	43.71	24.30
5	28.94	49.94	21.12

更符合生产需要。此外根据 5 组试验的热解规律还可以推测:处于高温区的升温方式是影响产物分布的关键因素。大量官能团的断裂与重组多发生在 360 ~ 520℃。

比较试验 3 ~ 5 的产物三相分布发现,随着升温速率的提高,玉米秸秆的生物油得率由 43. 71% 升高到 49. 94%。生物炭与热解气得率趋势与升温速率的趋势相反。因此认为,较高的升温速率不利于生物炭与热解气的生产,这与前人所得结论相似^[15-17]。

为深入探究升温速率设置对热解过程的影响,对玉米秸秆进行热重试验,这里仅列出试验 1、2 和 3 的升温设置(试验 4、5 的热重曲线与试验 3 整体趋势类似)。图 3 为 TG 以及 DTG 曲线。可以看出,不同升温速率的设置对失重过程影响明显,3 种升温方式的最大失重点均在 345 ~ 365℃,分别发生在 25. 13 min (359. 27℃)、103. 62 min (346. 66℃) 和 71. 09 min (345. 46℃),这说明玉米秸秆中大量成分在这一温度段集中裂解反应,这与 QUAN 等^[18]试验所得结果相似。

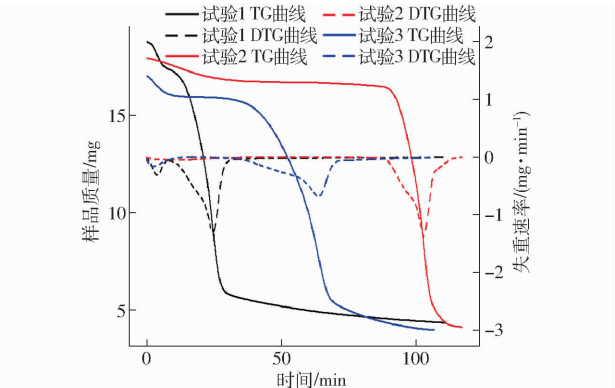


图 3 玉米秸秆热重曲线

Fig. 3 TG and DTG curves of corn stalk

2.2 升温速率对生物炭特性的影响

表 2 是原料以及 5 种升温方式获得的生物炭中元素分析的结果。从表中的数据可以看出,生物质热解是 H 和 O 元素含量剧烈降低、C 元素聚集的过程。不论何种升温方式,玉米秸秆中的 C 元素质量分数均从 44. 12% 升至 70. 00% 以上。H 元素质量分数从 6. 10% 降至 3. 00% 以下。对于玉米秸秆而言,除试验 4 以外,其余 4 种升温方式所得生物炭的 C、H、O 元素含量相差不大,而试验 4 所得生物炭的 C 元素质量分数为 72. 78%, 低于其余 4 组,O 元素质量分数为 22. 45%, 明显高于其余 4 组。氧碳比为 0. 23。其余 4 组为 0. 17 ~ 0. 18。试验 4 的 C、H、O 元素含量也使得其 HHV 值略低于其余 4 组,为 27. 24 MJ/kg。

表 2 生物炭及原料元素分析

元素	质量分数(空气干燥基)					
	原料	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5
C	44. 12	76. 37	77. 03	76. 70	72. 78	77. 10
H	6. 10	2. 73	2. 84	2. 86	2. 86	2. 85
N	1. 24	2. 40	2. 47	2. 24	1. 91	2. 20
O	48. 54	18. 50	17. 66	18. 20	22. 45	17. 85
氢碳比	1. 66	0. 43	0. 44	0. 45	0. 47	0. 44
氧碳比	0. 83	0. 18	0. 18	0. 18	0. 23	0. 17

对玉米秸秆 5 组试验所得的炭样进行工业分析(表 3),发现试验 1 与试验 4 挥发分质量分数较为接近,分别为 19. 52% 和 19. 73%。试验 2 与试验 5 挥发分质量分数较为接近,分别为 16. 50% 和 14. 69%。固定碳质量分数也有类似的测定结果。从燃料率的对比中可以看出试验 2 和 5 在这一指标上较优,其主要原因也是挥发分质量分数较低。通过对比匀速升温(试验 3 ~ 5)发现随着升温速率的提高,生物炭中挥发分质量分数逐渐降低,固定碳质量分数升高,燃料率提高。对 5 组升温方式获得的生物炭进行热值测定后发现,在所选择的温度范围内,随着升温速率的提高,生物炭热值随之增加,笔者认为其原因是较高的升温速率保证了生物炭内部的固定碳含量,促进了原料内含氧官能团的释放^[19-20]。通过试验 1 ~ 3 可以看出在热解时间一定的情况下,变化的升温速率对生物炭热值的影响不明显。而试验 1 和 4 具有较高的能量回收效率,分别为 55. 17% 和 55. 98%,这说明在热解高温区,较慢的升温速率有利于生物炭对能量的回收。

表 3 生物炭特性

Tab. 3 Characteristics of chars

参数	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5
挥发分质量分数/%	19. 52	16. 50	18. 13	19. 73	14. 69
固定碳质量分数/%	70. 06	73. 13	68. 17	66. 24	71. 15
灰分质量分数/%	10. 42	10. 37	13. 70	14. 03	14. 16
高位热值/(MJ·kg ⁻¹)	28. 88	27. 85	27. 75	27. 24	29. 00
燃料率	3. 59	4. 43	3. 76	3. 35	4. 84
能量密度	1. 85	1. 79	1. 78	1. 75	1. 86
能量回收效率/%	55. 17	52. 70	53. 04	55. 98	53. 83

2.3 升温速率对产气特性的影响

通过固定床玉米秸秆热解试验,对热解气进行间歇集气并检测其中几种主要成分(CO₂、CO、CH₄和 H₂)随热解进程的变化。

5 组试验均是在温度达到 90℃ 时收集第 1 袋气,后每隔 10 min 收集一次。在 20 mL/min 的载气

氛围下,出现了如图 4 所示的产气分布效果。通过 GC 进行气体检测后发现升温速率的不同设置对热解气溢出的实时浓度影响明显。除试验 4 外 CO₂ 的溢出峰值均高于 50%,最高值达到 57.44%,而 CO 的溢出峰值均低于 30%。试验 4 由于设置 2.3℃/min 的升温速率,热解时间较长,生成气溢出较慢,且被载

气稀释,故相较于其他 4 组试验,气体峰值较小。观察玉米秸秆热解的产气规律,发现无论选择何种升温方式,均是 CO₂ 与 CO 首先溢出,随后 CH₄ 在 220℃ 后溢出,在 430 ~ 520℃ 出现 CH₄ 产气高峰,除试验 4 外,CH₄ 峰值均高于 20%。H₂ 产气峰值出现在高温保温区。

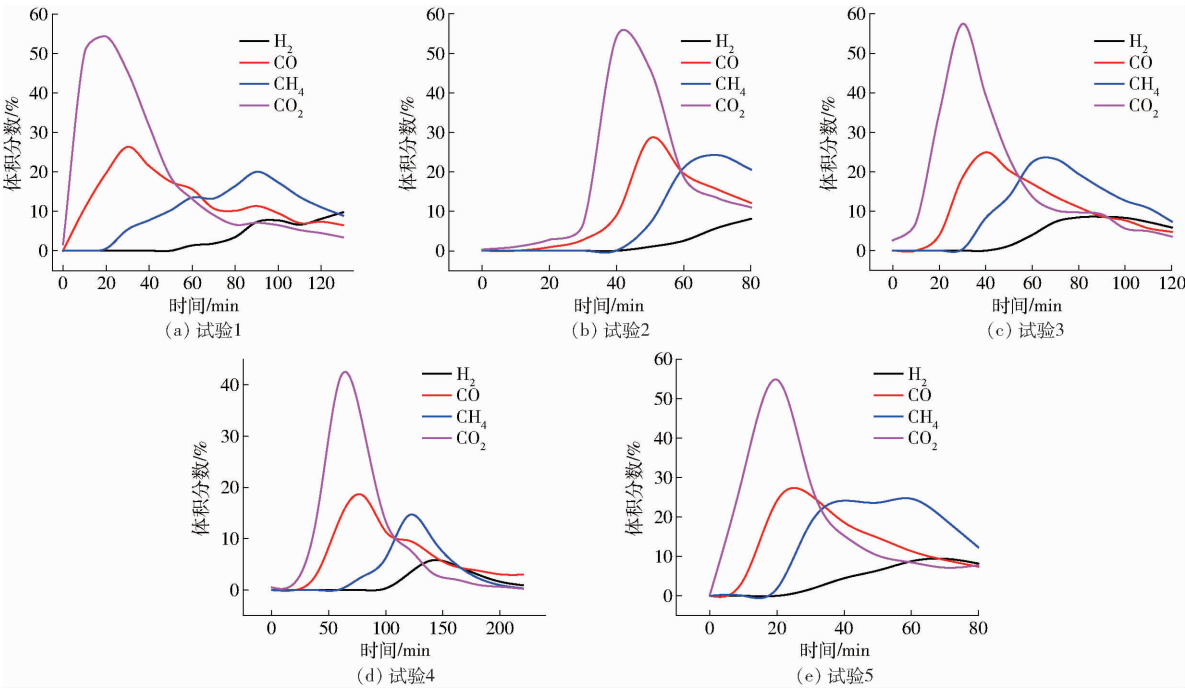


图 4 产气特性

Fig. 4 Gas generation process

2.4 升温速率对生物油特性的影响

采用 GC - MS 对各组试验的重油部分进行检测,并使用面积归一法统计生物油重油部分的主要组成成分,进而探究升温方式对生物油成分的影响。不同的升温方式对收集的生物油产物分布影响明显。对试验 1 和 2 所制得两种玉米秸秆生物油的重油部分进行分析发现,热解生物油中有机酸、酮类、酚类和稠环芳烃比重较大。对两组样品含量较高的成分进行对比,如表 4 所示,在低温区快速升温,并在高温区慢速升温的试验设定(试验 1)可以促进乙酸、丙酮、苯酚、邻苯二酚的形成。试验 1 中生物油的乙酸质量分数高达 34.95%,丙酮质量分数为 2.96%,苯酚质量分数为 3.02%,邻苯二酚质量分数为 0.45%,这些成分均高于试验 2 中生物油成分。而丙酮醇(质量分数为 8.58%)及乙酸乙烯酯(质量分数为 2.01%)含量却低于试验 2。

此外,试验 2 中产物 C₈及以上有机物含量普遍高于试验 1,如对乙基苯酚、2-甲氧基-4-甲基苯酚等,并出现了结构式更加复杂的稠环芳烃类物质。出现这种区别的原因是试验 1 的升温设置使得小分子有机物在低温区快速升温的情况下被大量析出,

表 4 生物油成分

成分	Tab.4 Composition of bio-oil %		
	质量分数(收到基)		
	试验 1	试验 2	试验 3
乙酸	34.95	29.32	30.79
丙酮	2.96	2.47	1.12
丙酮醇	8.58	10.67	12.32
乙酸乙烯酯	2.01	5.30	2.70
甲基异丙烯基酮	3.51	6.72	4.78
糠醛	17.39	20.99	15.24
苯酚	3.02	2.18	2.63
邻苯二酚	0.45	0.15	0.59
对乙基苯酚	0.88	1.24	1.01
2-甲氧基-4-甲基苯酚	0.59	2.59	0.77
p-乙基愈创木酚	0.80	1.49	1.17

而在高温区木质素及纤维素热解生成大分子有机物时,由于高温区缓慢升温,气相有机物释放缓慢,使得大分子有机物有足够时间进行进一步的裂解,而形成结构更为简单的物质,最终被载气带出。试验 2 的温度设定使得在高温热解区大量大分子有机物在一定时间段内迅速生成,还未进行再裂解便被其他生成气及载气迅速带出并冷凝,故最终检测出

更多的大分子有机物。

2.5 优化后的工艺路线

经过对变速热解试验三相产物的分析,可以看出减速热解在三相产物得率及生物油成分上的优势,进而得出了如图 5 所示的优化后的工艺路线。经过粉碎干燥后的玉米秸秆原料经过减速升温热解,生成的未冷凝热解气经过四级冷凝系统分级收集生物油,其余热解气经过干燥过滤后进行收集。这样的工艺路线较传统的匀速升温热解可实现炭气得率较高,生物油中稠环芳烃较少的效果。

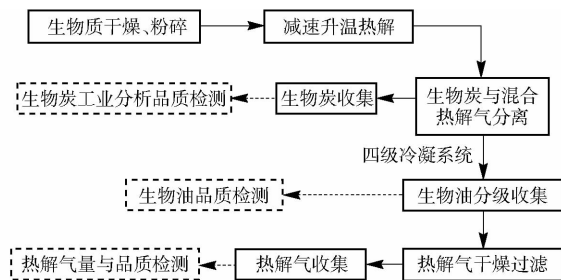


图 5 优化后工艺路线

Fig. 5 Optimized process

3 结论

(1)在热解终温 520℃、保温 26 min 情况下,兼

顾炭、气得率以及生产效率,减速升温是所提供的升温方式中最为可行的热解方案,可得到生物炭 29.82%、热解气 27.49% 以及生物油 42.69% 的三相分布。在保证热解产物中较高的生物炭得率的同时,热解气得率比匀速升温试验增加了 4.49%,油相得率减少了 4.51%,更符合以生物炭和热解气为主要产物的多联产生产要求。

(2)通过热重曲线分析,可以看出升温方式对原料失重过程影响明显。在生物炭的特性分析中,对比匀速升温测试结果,发现随着升温速率的提高,生物炭中挥发分含量逐渐降低,固定碳含量升高。而通过元素分析,发现热解过程是原料碳富集以及脱氢脱氧的过程,而升温方式对焦炭中 C、H、O、N 的影响不大,热解温度是决定这一参数的关键因素。

(3)通过连续的热解气检测发现在同一升温方式下,玉米秸秆气体溢出顺序均是 CO₂ 与 CO 首先溢出,随后 CH₄ 在 220℃ 后开始溢出,在 430 ~ 520℃ 出现 CH₄ 产气高峰, H₂ 产气峰值出现在高温保温区。对比减速升温与加速升温两种升温方式生成的生物油的重油部分,发现前者的小分子有机化合物含量高,稠环芳烃类含量少。

参 考 文 献

- 1 PARK Y K, YOO M L, LEE H W, et al. Effects of operation conditions on pyrolysis characteristics of agricultural residues[J]. Renewable Energy, 2012, 42: 125 - 130.
- 2 樊永胜, 蔡忆昔, 李小华, 等. 真空热解工艺参数对生物油产率的影响研究[J]. 林产化学与工业, 2014, 34(1): 79 - 85. FAN Yongsheng, CAI Yixi, LI Xiaohua, et al. Influence of process parameters on bio-oil yield by vacuum pyrolysis[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2014, 34(1): 79 - 85. (in Chinese)
- 3 张俊姣, 叶小宁, 张润禾, 等. 甘蔗渣两级快速热解特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 190 - 196. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140830&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.030. ZHANG Junjiao, YE Xiaoning, ZHANG Runhe, et al. Study on two-step fast pyrolysis of bagasse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 190 - 196. (in Chinese)
- 4 PAETHANOM A, YOSHIKAWA K. Influence of pyrolysis temperature on rice husk char characteristics and its tar adsorption capability[J]. Energies, 2012, 5(12): 4941 - 4951.
- 5 AGIRRE I, GRIESSACHER T, ROESLER G, et al. Production of charcoal as an alternative reducing agent from agricultural residues using a semi-continuous semi-pilot scale pyrolysis screw reactor[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 106: 114 - 121.
- 6 WANNAPERA J, FUNGTAMMASAN B, WORASUWANNARAK N. Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011, 92(1): 99 - 105.
- 7 吴建霞, 武成利, 李寒旭, 等. 利用热重-红外联用对生物质热解特性研究[J]. 应用化工, 2015, 44(2): 236 - 242. WU Jianxia, WU Chengli, LI Hanxu, et al. Study of bio-mass pyrolysis characteristic by using TG - FTIR[J]. Applied Chemical Industry, 2015, 44(2): 236 - 242. (in Chinese)
- 8 付鹏, 胡松, 向军, 等. 农业废弃物的热解特性分析及动力学模拟[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊): 155 - 161. FU Peng, HU Song, XIANG Jun, et al. Pyrolysis characteristics analysis and kinetic modelling of agricultural residues[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(Supp.): 155 - 161. (in Chinese)
- 9 潘萌娇, 孙皎, 贺强, 等. 热解终温和加热速率对棉秆热解生物炭的影响研究[J]. 河北工业大学学报, 2014, 43(5): 60 - 66. PAN Mengjiao, SUN Jiao, HE Qiang, et al. The effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of cotton stalk[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2014, 43(5): 60 - 66. (in Chinese)
- 10 田宜水, 王茹. 基于多升温速率法的典型生物质热动力学分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 234 - 240. TIAN Yishui, WANG Ru. Thermokinetics analysis of biomass based on model-free different heating rate method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 234 - 240. (in Chinese)

element method [D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)

25 方会敏, 姬长英, AHMED A T, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60 – 67. http://www.j-csam.org/jesam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160109&journal_id=jesam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009.

FANG Huimin, JI Changying, AHMED A T, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):60 – 67. (in Chinese)

26 UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. 3D DEM tillage simulation: validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 144(4): 220 – 227.

27 UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298 – 306.

28 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.

29 依艳丽. 土壤物理研究法[M]. 北京:北京大学出版社, 2009.

30 ABDENACER M, KAHINA B I, AÏCHA N, et al. Sequential optimization approach for enhanced production of glutamic acid from *Corynebacterium glutamicum* 2262 using date juice[J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2012, 17(4): 795 – 803.

31 JOB J, SUKUMARAN R K, JAYACHANDRAN K. Production of a highly glucose tolerant β -glucosidase by *Paecilomyces variotii* MG3: optimization of fermentation conditions using Plackett – Burman and Box – Behnken experimental designs[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2010, 26(8): 1385 – 1391.

32 KALKAN F, KARA M. Handling, frictional and technological properties of wheat as affected by moisture content and cultivar [J]. Powder Technology, 2011, 213(1): 116 – 122.

33 UNAL H, ISIK E, IZLI N, et al. Geometric and mechanical properties of mung bean (*Vignaradiata* L.) grain: effect of moisture [J]. International Journal of Food Properties, 2008, 11(3): 585 – 599.

34 SOLOGUBIK C A, CAMPAÑONE L A, PAGANO A M, et al. Effect of moisture content on some physical properties of barley [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 43(5): 762 – 767.

(上接第 342 页)

11 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(5):305 – 310.

LI Lijie, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Design and experiment biomass pyrolysis carbonization experiment setup [J]. Renewable Energy Resources, 2016,34(5):305 – 310. (in Chinese)

12 BURHENNE L, MESSMER J, AICHER T, et al. The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013,101: 177 – 184.

13 PARK D K, KIM S D, LEE S H, et al. Co-pyrolysis characteristics of sawdust and coal blend in TGA and a fixed bed reactor [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(15): 6151 – 6156.

14 STEFANIDIS S D, KALOGIANNIS K G, ILIOPULOU E F, et al. A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014,105: 143 – 150.

15 WU C, BUDAEIN V L, GRONNOW M J, et al. Conventional and microwave-assisted pyrolysis of biomass under different heating rates[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014,107: 276 – 283.

16 CHEN C, WANG J, LIU W, et al. Effect of pyrolysis conditions on the char gasification with mixtures of CO₂ and H₂O [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34: 2453 – 2460.

17 GUIZANI C, SANZ F J E, SALVADOR S. Effects of CO₂ on biomass fast pyrolysis: reaction rate, gas yields and char reactive properties[J]. Fuel, 2014, 116: 310 – 320.

18 QUAN C, GAO N B, SONG Q B. Pyrolysis of biomass components in a TGA and a fixed-bed reactor: thermochemical behaviors, kinetics, and product characterization[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2016, 121:84 – 92.

19 PARK J, LEE Y, RYU C, et al. Slow pyrolysis of rice straw: analysis of products properties, carbon and energy yields[J]. Bioresource Technology, 2014,155:63 – 70.

20 WEI L, LIANG S, GUHO N M, et al. Production and characterization of bio-oil and biochar from the pyrolysis of residual bacterial biomass from a polyhydroxyalkanoate production process[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015,115: 268 – 278.