

秸秆生物质热解气化特性研究

郭兵艳 姚锡文 许开立 赵志成 冯靖宸 张精津 葛一霖
(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

[摘要] 生物质热解气化是生物质能利用的关键技术,研究秸秆生物质的热解气化特性对于高效利用我国农村大量的生物质秸秆资源具有重要意义。本文以我国农村典型的小麦秸秆和水稻秸秆为研究对象,基于管式炉系统自行搭建了生物质热解气化实验平台,研究了小麦秸秆和水稻秸秆在 N_2 气氛中热解气化产气规律,分析了不同热解温度对其热解产气的影响机理。研究表明,随着热解温度的升高,秸秆热解过程中依次产生 CO 、 CO 、 CH_4 和 H_2 等4种气体,合成气中 CO 的含量越来越多,且在高温阶段小麦秸秆热解出现了第二次 CO 产率峰值; CO 主要来源于纤维素热解,其次是半纤维素的热解;而 CO_2 和 CH_4 的含量出现先增加后减小的趋势, H_2 的含量则持续升高,这是因为高温时 CH_4 受热易分解生成 H_2 ,同时 $-C=C-$ 和 $-CH-$ 的断键重组及挥发分的二次裂解反应使 H_2 含量进一步升高。

[关键词] 生物质; 热解; 气化; 合成气

[中图分类号] TK6 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)04-0090-06

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.04.016

0 前言

我国农作物秸秆产量庞大,每年大约产生超过7亿t的秸秆,其中80%以上是小麦秸秆、水稻秸秆、玉米秸秆^[1]。由于秸秆是低能量密度的燃料且燃料收集困难,并且我国生物质热转化技术水平低,秸秆无法得到合理高效的利用,大量在田地中焚烧,造成浪费资源且环境污染严重。我国每年50%以上的农作物秸秆用于柴火或者直接在田地燃烧,只有极少量秸秆被制作成饲料和肥料^[2]。

生物质由纤维素、半纤维素和木质素复合构成。

[收稿日期] 2024-03-02

[基金项目] 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3001300);国家自然科学基金项目(52004055);国家级大学生创新创业训练计划项目(231129)。

[作者简介] 郭兵艳(2002—),东北大学安全工程2021级本科生在读。

[通信作者] 姚锡文(1987—),博士,副教授,研究方向为生物质能安全、生物质燃气净化等。

[引用格式] 郭兵艳,姚锡文,许开立,等. 秸秆生物质热解气化特性研究[J]. 绿色矿冶,2024,40(4):90-95,100.

GUO Bingyan, YAO Xiwen, XU Kaili, et al. Study on pyrolysis and gasification characteristics of straw biomass [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(4): 90-95, 100.

目前生物质能的利用方式主要有三种,即燃烧、热解和气化^[3]。生物质直接燃烧是最简单且普遍的使用方式,主要是将生物质能通过燃烧转化为电能和热能。热解包括解聚、异构化、脱水、芳构化、脱羧、炭化等一系列吸热反应^[4]。生物质的热解过程极其复杂,不同反应条件对热解过程中产生的生物质合成气有着重要的影响。在生物质热解过程中,随着温度的升高,原料颗粒会分解为挥发分和碳质固体残渣;原料中易冷凝的部分挥发性物质会冷凝并形成焦油。影响生物质热解的因素包括温度、压力、升温速率、停留时间、原料本身的物理化学性质(粒度、组分)、气化炉配置等^[5-6]。生物质气化是一个包括原料干燥、热解(或脱挥发)、氧化和还原4个连续步骤的综合过程^[7],各阶段的反应之间经常有重叠。热解是生物质气化过程中最基本的过程,研究生物质热解过程中小分子气体的释放特性以及不同热解温度对生物质热解特性的影响等内容,对于有针对性地优化热解温度、提高热解过程小分子可燃气体的产量及品质等具有重要的指导意义。

本文主要针对生物质热解气化机理研究中存在的不足,以常见的农村秸秆为原料,着重分析秸秆类生物质在不同热解温度下的产气规律和机理,以期为提高秸秆热解和气化过程中生物质合成气的产率及品质提供重要的理论基础和科学依据。

1 实验部分

1.1 实验原料及设备

本文以小麦秸秆和水稻秸秆作为研究对象,基于管式炉搭建了生物质热解气化实验平台,同时利

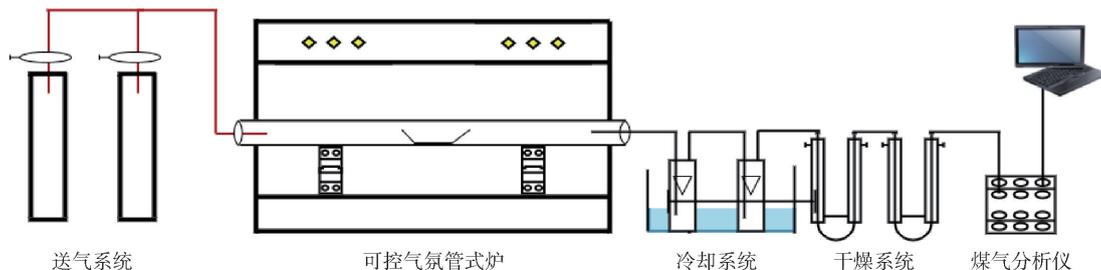


图1 基于管式炉系统建立的生物质热解气化实验平台

该实验平台主要由可控气氛的送气系统、管式炉、冷却系统、干燥系统和气体收集测试系统组成。可控气氛的管式炉是实验平台的主体部分; N_2 和 O_2 气瓶组成送气系统; 冷却系统包含异丙醇溶液瓶和水池, 秸秆在管式炉中热解产生的气体通过冷凝管进入放置在冰水中的洗气瓶, 洗气瓶中装有异丙醇溶液, 可除去其焦油、水分等杂质; 干燥系统由两个装有干燥剂的 U 型管组成, 对从冷却系统出来的气体进一步干燥吸附, 最后气体进入收集测试系统。气体收集测试系统即便携式煤气分析仪, 煤气分析仪可以分析 CO 、 CO_2 、 H_2 、 CH_4 、 C_nH_m 、 O_2 共 6 种气体。热解实验过程中, 以 N_2 为载流气体, 流量 0.3 L/min , 管式炉升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C/min}$, 煤气分析仪每 1 s 记录一次该时刻下的气体体积分数, 直到一组实验结束。

1.2 实验步骤

实验过程的热解温度分别设为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $800\text{ }^\circ\text{C}$, 具体实验流程如下:

1) 把已称重的生物质材料放入石英舟内, 然后将其放置在管式炉石英管的中间加热区域, 将实验平台中各个部分依次连接, 打开送气系统, 向管式炉内通入 N_2 , 流量 0.3 L/min , 通入时间 20 min 左右, 将石英管内的空气排出去。

2) 打开煤气分析仪, 然后调零, 观察各气体变化情况, 直到各气体数据显示为 0。

3) 设定管式炉热解温度, 升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C/min}$, 恒温 30 min 。

4) 试验开始后, 连接煤气分析仪的电脑记录各气体体积分数的变化数据。

用气体成分分析仪, 研究了秸秆生物质在 N_2 气氛中的热解特性, 分析了不同热解温度对秸秆热解产气规律的影响。实验过程中, 热解温度选定为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 。实验平台的示意图如图 1 所示。

5) 当各气体数据接近 0 时, 断开管式炉开关, 持续输入氮气, 直至石英舟温度下降至室温后, 关闭送气系统, 取出石英舟称重。

6) 保存数据, 实验结束。每组试验重复 3 次, 取 3 组实验数据平均值, 减小误差。

2 实验结果讨论与分析

2.1 不同热解温度对秸秆产气规律的影响研究

利用气氛可控的管式炉, 在 N_2 气氛下, 分析热解温度分别为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时小麦秸秆和水稻秸秆的产气规律和产气组分, 结果如图 2 ~ 图 7 所示。

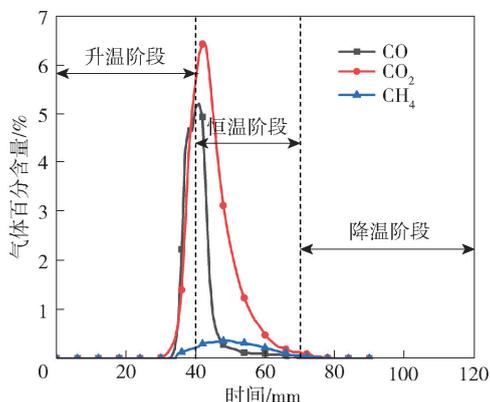
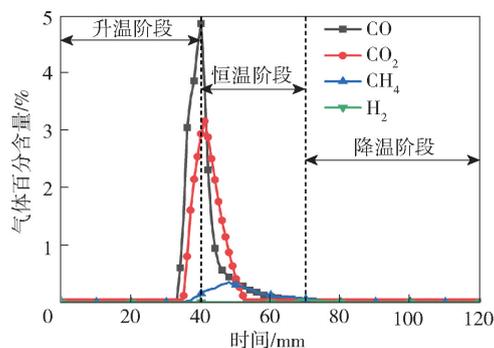
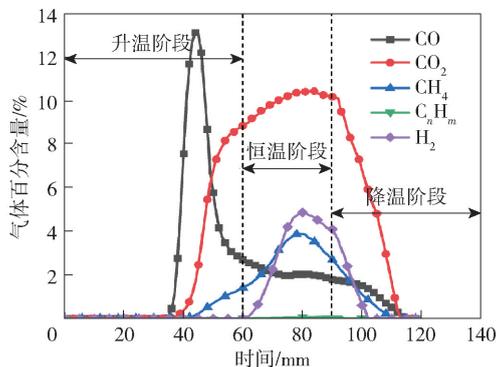
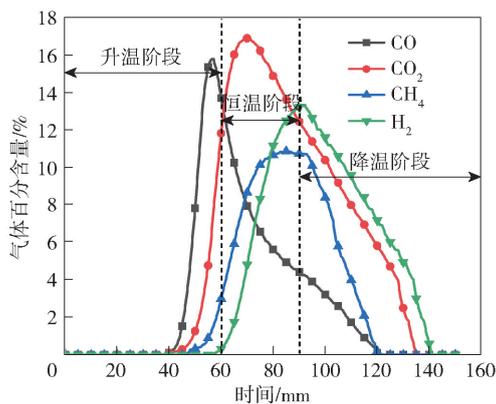


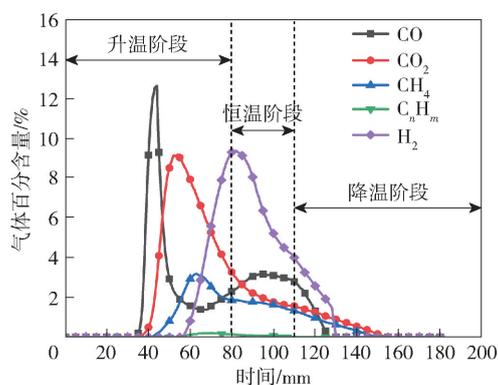
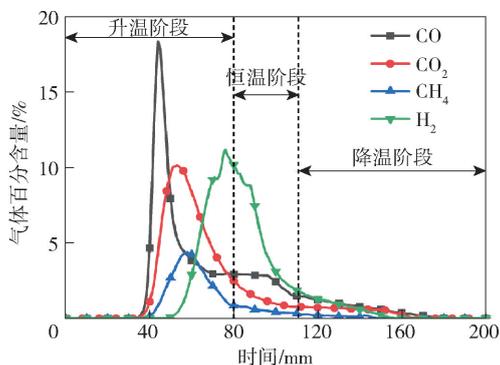
图2 N_2 气氛下 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 小麦秸秆热解产气规律

从图 2 可以看出, 在热解温度为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 的整个热解过程中, $0\sim 40\text{ min}$ 是升温阶段, $40\sim 70\text{ min}$ 是恒温阶段, 70 min 之后是降温阶段。小麦秸秆在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 下发生热解时, CO 和 CO_2 几乎同时产生, 之后有少量的 CH_4 产生, 而 C_nH_m 和 H_2 几乎没有产生,

图3 N₂气氛下400 °C水稻秸秆热解产气规律图4 N₂气氛下600 °C小麦秸秆热解产气规律图5 N₂气氛下600 °C水稻秸秆热解产气规律

CO产率在升温结束时达到峰值,而CO₂产率依然在增加,直到进入恒温阶段才到达峰值,CH₄产率也在恒温阶段达到峰值。CO和CO₂的产生大致在400 °C左右就结束,这主要是由于产生CO和CO₂的半纤维素和纤维素的降解主要发生在低温区。半纤维素的降解主要发生在325~425 °C,纤维素的降解主要发生在225~400 °C。

由图3可以看出,水稻秸秆在400 °C下发生热解时,CO和CO₂气体大量产生,之后有少量的CH₄产生,几乎没有H₂产生,这是由于H₂主要由木质素

图6 N₂气氛下800 °C小麦秸秆热解产气规律图7 N₂气氛下800 °C水稻秸秆热解产气规律

降解产生的,而木质素裂解发生在高温阶段。热解温度400 °C条件下,水稻秸秆和小麦秸秆的产气规律曲线相似,气体含量的不同主要是秸秆生物质内部的纤维素、半纤维素和木质素的含量不同所致。

小麦秸秆在600 °C下热解的产气规律如图4所示。从图4可以看出,在升温阶段,CO最先开始出现,且产率最快达到峰值;CO₂在CO出现后的1~3 min出现,之后迅速增长,但CO₂的产率峰值出现在恒温阶段,几乎到降温阶段CO₂产率才发生下降;在600 °C温度下,CO的产率峰值超过了CO₂;CH₄同样是在CO₂出现后1~3 min产生,其产率峰值同样出现在恒温阶段;不同于以上三种气体,H₂在恒温阶段才开始出现,并且其产率峰值超过了CH₄产率峰值,同样发生在恒温阶段;整个过程几乎没有C_nH_m产生。

从图5可以看出,在温度600 °C条件下,热解时水稻秸秆与小麦秸秆热解产气的相同点是CO产率最先出现且达到峰值,且峰值出现在升温阶段;在1~3 min之后CO₂开始出现,其产率峰值出现在恒温阶段;H₂的产率峰值高于CH₄,且出现在恒温阶段;热解过程几乎没有C_nH_m产生。区别于600 °C小

麦秸秆热解的是, CO_2 的产率峰值高于 CO , 并且 CO 、 CO_2 、 H_2 、 CH_4 的产率峰值较高, 其中水稻秸秆合成气中的 H_2 和 CH_4 的产率峰值大幅度增长, H_2 在升温阶段就开始出现, 出现时间提前, 说明提高热解温度, 有助于水稻秸秆释放 H_2 。

小麦秸秆在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 下热解的产气规律如图 6 所示。从图 6 可以看出, CO 、 CO_2 和 CH_4 的产率峰值均发生在升温阶段, H_2 产率峰值几乎也是发生在升温阶段, 并且 CO 在恒温阶段出现了第二次产率峰值; 随着热解温度从 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $800\text{ }^\circ\text{C}$, H_2 的产率越来越高, 在温度 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 下几乎高于 CO_2 的产率峰值。

水稻秸秆在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 下发生热解的产气规律如图 7 所示。与图 6 相比, 水稻秸秆和小麦秸秆的产气规律曲线大致一样, 但水稻秸秆在恒温阶段没有出现 CO 的第二次产率峰值。

从以上气相产物释放规律图中可以看到, 小麦秸秆和水稻秸秆热解过程中, 在低温阶段最开始产生的气体是 CO 和 CO_2 ; 当温度逐渐升高时, 气相产物 CH_4 和 H_2 出现。Qin 等^[8] 研究表明木质素的降解主要发生在 $250\sim 750\text{ }^\circ\text{C}$, 半纤维素的降解主要发生在 $325\sim 425\text{ }^\circ\text{C}$, 纤维素的降解主要发生在 $225\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$ 。纤维素在 $280\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下 C—C 或 C—O 键断裂生成气体 CO 和 CO_2 , 随着热解温度升高, 内部会发生二次裂解生成 CH_4 , 在高温段—C—H—进一步断裂重组产生; 半纤维素在温度低于 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 的低温阶段会生成 CO 和 CO_2 , 随着热解温度升高, 会有 CH_4 和 H_2 产生, 在温度 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 产生的气体体积远远超过 $400\text{ }^\circ\text{C}$, 这主要是因为半纤维素中的葡聚糖等含氧化合物发生二次裂解反应产生气体。

2.2 热解温度对不同气体组分析出规律的影响

通过对比分析不同热解温度对同一气体释放的影响, 可以更有针对性地确定不同温度对各气体组分的影响规律。小麦秸秆和水稻秸秆在氮气气氛下热解产生的 CO 体积分数在不同热解温度下随时间变化规律分别如图 8 和图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出, 在温度 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 下 CO 产率远高于 $400\text{ }^\circ\text{C}$, 并且温度 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 下小麦秸秆热解产生的 CO 出现第二次峰值。 CO 主要来源于纤维素热解, 其次是半纤维素的热解。低温阶段时, 小麦秸秆和水稻秸秆热解气相产物中主要成分是 CO 和 CO_2 , 这是由于半纤维素中羧基(— COO —)和羰基(— $\text{C}=\text{O}$ —)断裂, 以及纤维素

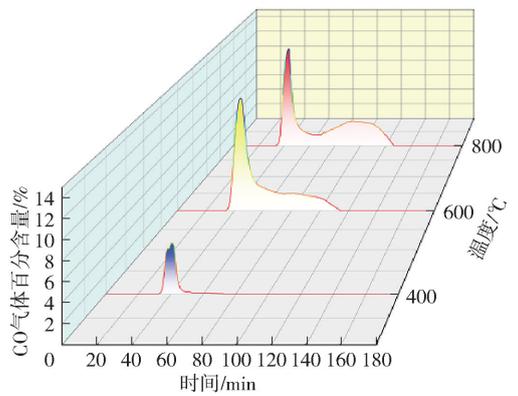


图 8 不同温度下小麦秸秆热解产生 CO 气体产率

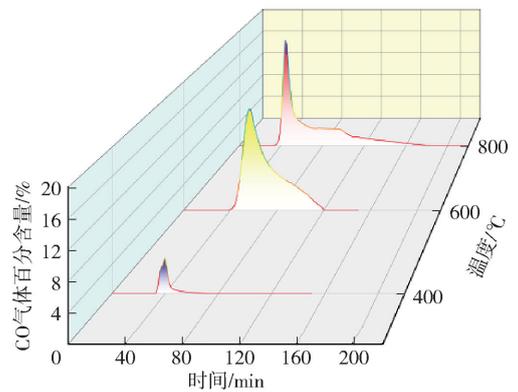
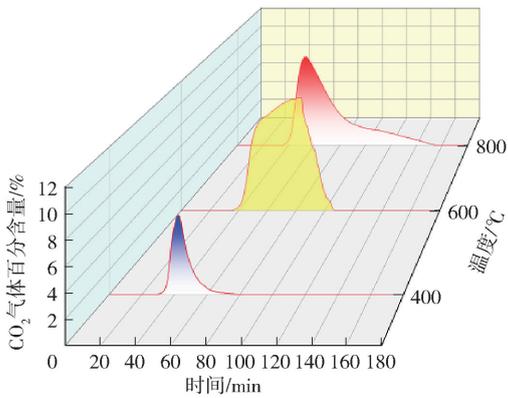
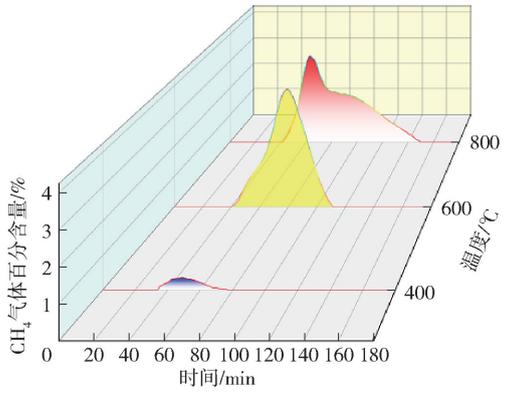
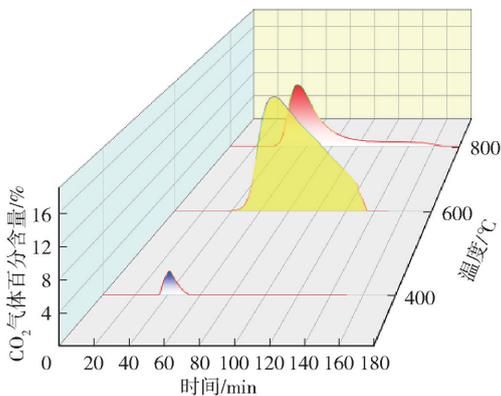
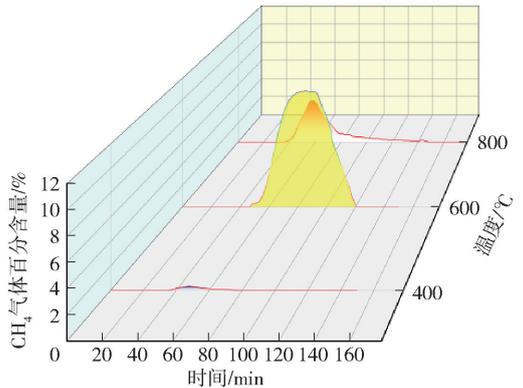


图 9 不同温度下水稻秸秆热解产生 CO 气体产率

中—C—O—断裂生成的气体; 高温阶段, 秸秆中热解液相产物焦油继续发生分子内的断链、脱水等二次裂解反应, 生成双原子气体 H_2 和 CO , 这也是小麦秸秆 CO 产率出现第二次峰值的主要原因。另外, 在温度 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时出现第二次 CO 产率峰值也表明小麦秸秆内部发生了剧烈的解聚。

图 10 和图 11 分别表示小麦秸秆和水稻秸秆在氮气气氛下热解时 CO_2 析出规律。在热解温度 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 小麦秸秆和水稻秸秆热解产生气体中 CO_2 的含量最多, 说明在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时小麦秸秆和水稻秸秆内可以产生 CO_2 的有机物解聚完成; 当热解温度升高到 $800\text{ }^\circ\text{C}$, CO_2 含量降低, 表明可能参与其他的热解反应。热解开始约 30 min 后(温度在 $300\text{ }^\circ\text{C}$), CO_2 开始生成, 40 min 左右到达峰值, 之后随着温度的升高, 含量急速下降。 CO_2 主要来源于半纤维素热解, 其次是纤维素的热解。

图 12 和图 13 分别表示小麦秸秆和水稻秸秆热解时 CH_4 析出规律。由图 12 和图 13 可知, 当热解温度是 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 小麦秸秆和水稻秸秆热解产生的合成气中 CH_4 的含量峰值不到 1% ; 当热解温度升

图 10 不同温度下小麦秸秆热解产生 CO₂ 气体产率图 12 不同温度下小麦秸秆热解产生 CH₄ 气体产率图 11 不同温度下水稻秸秆热解产生 CO₂ 气体产率图 13 不同温度下水稻秸秆热解产生 CH₄ 气体产率

高到 600 °C, 小麦秸秆热解产生的 CH₄ 气体百分含量峰值达到 4% 左右, 水稻秸秆热解产生的 CH₄ 气体百分含量峰值达到 10% 左右; 当热解温度升高到 800 °C, 小麦秸秆和水稻秸秆热解产生的 CH₄ 百分含量峰值略有下降, 表明随着热解温度的升高, CH₄ 气体含量先升高后下降, 这一结果和杜晓佳等^[9] 的实验结果基本相符。在低温阶段, 半纤维素和木质素发生降解生成 CH₄; 当温度升高至 600 °C 左右, CH₄ 的体积分数增加主要是因为碳链—CH₂—和甲氧基(—OCH₃—)受热断裂, 重新排列生成小分子 CH₄, 同时木质素中具有较多的甲氧基官能团, 高温时仍然能产生足量的甲烷; 当热解温度为 800 °C 时, CH₄ 体积分数下降可能是因为高温下 CH₄ 不再稳定, 会发生分解反应生成氢气和碳, 这是 H₂ 在热转化过程开始 80 min 之后增加的部分原因, 同时也是小麦秸秆、水稻秸秆热解气相产物中 CH₄ 体积分数降低的主要原因。

图 14 和图 15 分别表示小麦秸秆和水稻秸秆热解时 H₂ 析出规律。从图 14 和图 15 中可以看到, 热解温度是 400 °C 时, 小麦秸秆和水稻秸秆均没有 H₂

产生; 当热解温度升到 600 °C, 小麦秸秆和水稻秸秆热解产生的合成气中 H₂ 的含量显著增加并且出现了峰值; 当热解温度升高到 800 °C, 热解产生的气体中 H₂ 的百分含量进一步升高, 这表明随着热解温度升高, H₂ 的百分含量明显增大, 这一规律与 Jin 等^[10] 的研究结果基本相符。H₂ 主要来源于高温下—C=C—和—CH—的断键重组及挥发分的二次裂解反应, 因此低温下 H₂ 没有产生或者含量较小, 而随着热解温度升高, CH₄ 进一步分解, 促进了 H₂ 的生成, 同时 CH₄ 的含量减少。在热解开始 60 ~ 75 min, 温度 600 ~ 750 °C, H₂ 体积分数增长速率最快, 之后达到最高点逐渐下降。

综上所述, 在氮气气氛下小麦秸秆和水稻秸秆热解产气规律基本相似, 这一规律与周浩东^[11] 研究的玉米秸秆热解产气规律基本符合, 说明不同秸秆生物质的热解产气规律具有相似性。

3 结论

本文利用基于管式炉系统自行搭建的生物质热解气化实验平台和气体成分分析仪, 研究了在 N₂ 气

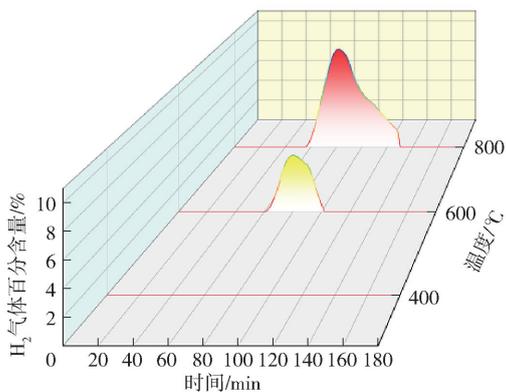


图 14 不同温度下小麦秸秆热解产生 H_2 气体产率

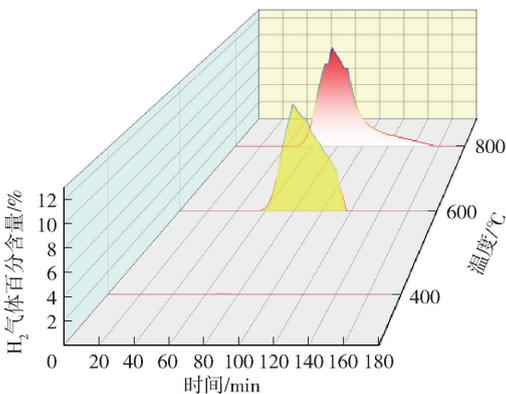


图 15 不同温度下水稻秸秆热解产生 H_2 气体产率

氮下不同热解温度对小麦秸秆和水稻秸秆热解产气规律和机理的影响,得出如下结论:

1) 在 N_2 气氛下,随着热解温度的升高,秸秆热解过程中依次产生 CO 、 CO_2 、 CH_4 和 H_2 等 4 种气体,并伴随产生少量的 C_nH_m 。随着温度的升高,合成气中 CO 的含量越来越多,并且在高温阶段小麦秸秆出现了第二次产率峰值。焦油分子的断链、脱水等二次裂解反应产生 CO 和 H_2 ,可能是 CO 出现第二次产率峰值的原因。

2) 随着热解温度的升高,合成气中 CO_2 和 CH_4 的含量均出现先增加后减小的趋势,而 H_2 的含量则持续升高,该结果说明低温有利于 CH_4 的产生,而高温有利于 H_2 的产生,在温度 $600 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 CH_4 体积分数达到最高点,而在温度 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, H_2 的体积分数最高。这是因为高温时 CH_4 受热易分解生成

H_2 ,同时 $-C=C-$ 和 $-CH-$ 的断键重组及挥发分的二次裂解反应使得 H_2 含量进一步升高。

[参考文献]

- [1] 张溪,张立龙,李瑞,等. 基于能量集成的秸秆生物质快速热解生命周期评价[J]. 化工学报,2021,72(5):2792-2800.
- [2] 姚锡文,许开立,闫放,等. 不同农业生物质废弃物的热解特性及动力学对比[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(11):1593-1597.
- [3] LI H, WANG Y, ZHOU N, et al. Applications of calcium oxide-based catalysts in biomass pyrolysis/gasification—a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 291.
- [4] KUMAR A, SAINI K, BHASKAR T. Hydrochar and biochar: Production, physicochemical properties and techno-economic analysis [J]. Bioresource Technology, 2020, 310.
- [5] VARMA A K, MONDAL P. Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: effects of process parameters on product yields and characterization of products [J]. Industrial Crops and Products, 2017, 95: 704-717.
- [6] 史训旺,辛馨,刘照,等. 不同作物秸秆热解及其差异性分析[J]. 太阳能学报,2020,41(1):166-171.
- [7] YOU S M, OK Y S, TSANG D C W, et al. Towards practical application of gasification: A critical review from syngas and biochar perspectives [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2018, 48(22-24): 1165-1213.
- [8] QIN L Y, WU Y, HOU Z W, et al. Influence of biomass components, temperature and pressure on the pyrolysis behavior and biochar properties of pine nut shells [J]. Bioresource Technology, 2020, 313: 123682.
- [9] 杜晓佳. 生物质管式炉热解特性研究[D]. 北京:北京化工大学,2019.
- [10] JIN Q, WANG X, LI S, et al. Synergistic effects during co-pyrolysis of biomass and plastic: gas, tar, soot, char products and thermogravimetric study [J]. Journal of the Energy Institute, 2019; 92(01): 108-117.
- [11] 周浩东. 生物质热解气化特性及残余灰分沾污结渣规律研究[D]. 沈阳:东北大学,2021.

(下转第 100 页)

Market Research and Analysis of Ammonium Sulfate in China

LIU Zhaobo¹, FU Yunfeng¹, CHEN Songxuan¹, QIN Bo¹, ZHANG Tianhao², ZHAI Wenyang²

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;

2. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China)

Abstract: The main supply sources of ammonium sulfate in China are coking grade and caprolactam grade, accounting for 70% – 85% of the total supply, and the others are cyanuric acid grade, methyl methacrylate grade, acrylonitrile grade, power plant and various chemical by-products. In order to better understand the current market situation of ammonium sulfate, this paper summarized the current market supply and demand of ammonium sulfate based on a large number of data and literature analysis, and analyzed the problems existing in the ammonium sulfate industry and the market operation trend in the next five years, and put forward some suggestions for the development of the ammonium sulfate industry.

Key words: ammonium sulfate; production capacity; coking grade ammonium sulfate; caprolactam grade ammonium sulfate; market

(上接第 95 页)

Study on Pyrolysis and Gasification Characteristics of Straw Biomass

GUO Bingyan, YAO Xiwen, XU Kaili, ZHAO Zhicheng, FENG Jingchen, ZHANG Jingjin, GE Yilin

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Biomass pyrolysis and gasification is the key technology of biomass energy utilization. It has great significance to study the pyrolysis and gasification characteristics of straw biomass for the efficient utilization of a large number of biomass straw resources in rural areas of China. In this paper, the typical wheat straw and rice straw in rural areas of China were taken as the research objects. Based on the tube furnace system, a biomass pyrolysis and gasification experimental platform was built to study the pyrolysis and gasification of wheat straw and rice straw in N₂ atmosphere. The law of gas production was analyzed, and the influence mechanism of different pyrolysis temperatures on its pyrolysis gas production was analyzed. The results show that with the increase of pyrolysis temperature, four kinds of gases such as CO, CO₂, CH₄ and H₂ are produced in the pyrolysis process of straw. The content of CO in syngas is more and more with the increase of temperature, and the second CO yield peak appears in the pyrolysis of wheat straw at high temperature stage. CO mainly comes from cellulose pyrolysis, followed by hemicellulose pyrolysis. The content of CO₂ and CH₄ increases first and then decreases with the increase of the temperature, while the content of H₂ continued to increase. This is because CH₄ is easily decomposed into H₂ at high temperature, and the broken bond recombination of —C=C— and —CH— and the secondary cracking reaction of volatiles further increase the content of H₂.

Key words: biomass; pyrolysis; gasification; syngas