doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.036

# 氮气和含氧气氛下玉米秸秆热解气化产气规律研究

姚锡文[1,2]　周浩东[2]　齐鹏远[1]　任海芳[1]　许开立[2]

(1. 营口理工学院辽宁省菱镁矿高值利用工程研究中心, 营口 115014;
2. 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110819)

**摘要**: 为了探究秸秆类生物质在热解和气化过程中的产气规律,以我国东北地区典型的玉米秸秆为原料,基于自行建立的管式炉生物质热解气化实验装置,系统研究了玉米秸秆在氮气气氛下热解和在含氧气氛下气化过程中 CO、$H_2$、$CO_2$、$CH_4$和 $C_nH_m$等小分子生物质燃气成分的释放特性,对比分析了不同热解温度和气化温度对不同燃气组分释放规律及其产率的影响。实验结果表明:玉米秸秆热解过程中最先释放的小分子气相产物是 CO 和 $CO_2$;当温度升高时生物质燃气中逐渐出现 $CH_4$和 $H_2$,且随着热解温度升高,CO 的产率峰值最先出现且峰值出现在升温阶段,而 $CO_2$、$CH_4$和 $H_2$的产率峰值几乎同时出现在恒温阶段;热解温度升高,玉米秸秆热解产生的 CO 体积分数几乎没有变化,而 $CO_2$的占比则随着温度的升高而降低;在 400~500℃之间 $CH_4$体积分数随着热解温度的升高而增加,在 500℃以后,基本稳定在 13%。在 $O_2$体积分数为 8%、$N_2$体积分数为 92% 的含氧气氛下,随着气化温度的升高,玉米秸秆气化产生 $CO_2$气体的体积分数呈先增加后降低的趋势,而 CO 的体积分数随着温度的升高而增大,这说明高温气化条件下更有利于 CO 的释放,而低温条件下有利于 $CO_2$的产生。

**关键词**: 生物质; 玉米秸秆; 热解; 气化; 生物质燃气

**中图分类号**: TK6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2024)05-0379-07　　**OSID**:

# Gas Production Law during Corn Stalk Pyrolysis and Gasification under Pure Nitrogen and Oxygen-containing Atmospheres

YAO Xiwen[1,2]　ZHOU Haodong[2]　QI Pengyuan[1]　REN Haifang[1]　XU Kaili[2]

(1. *Liaoning Provincial Engineering Research Center for High-value Utilization of Magnesite, Yingkou Institute of Technology, Yingkou* 115014, *China*
2. *School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang* 110819, *China*)

**Abstract**: In order to reveal the law of gas evolved from the pyrolysis and gasification processes of stalk biomass, the typical corn stalk in the rural areas of northeastern China was utilized as the pyrolysis experimental material. Based on the self-established pyrolysis and gasification experiment system in tube furnace, the release characteristics of CO, $H_2$, $CO_2$, $CH_4$, $C_nH_m$ and other small-molecule biomass gas components during the pyrolysis of corn stalk in nitrogen atmosphere and gasification in oxygen-containing atmosphere were systematically studied. The effects of different pyrolysis and gasification temperatures on the release characterization and yield of each syngas component were compared. The experiment results indicated that CO and $CO_2$ were the first small molecule syngas products released during corn stalk pyrolysis. When the temperature was increased, $CH_4$ and $H_2$ gradually appeared in the syngas, and with the increase of pyrolysis temperature, the peak yield of CO first appeared in the heating stage while the peak yields of $CO_2$, $CH_4$ and $H_2$ appeared almost simultaneously in the constant temperature stage. With the increase of pyrolysis temperature, the volume fraction of CO during pyrolysis was hardly changed. However, the $CO_2$ proportion was decreased with the increase of temperature. The $CH_4$ volume fraction was increased with the increase of pyrolysis temperature between 400℃ and 500℃, and the content

收稿日期: 2023-10-03　修回日期: 2023-12-24

**基金项目**: 辽宁省菱镁矿高值利用工程研究中心基金项目(LMKKZ202301)、国家自然科学基金项目(52004055)、辽宁省自然科学基金项目(2021-MS-103)和国家重点研发计划项目(2021YFC3001300)

**作者简介**: 姚锡文(1987—),男,副教授,博士,主要从事生物质能安全和生物质灰结渣腐蚀等研究,E-mail: yxw_20061005@126.com

**通信作者**: 齐鹏远(1981—),男,副教授,博士,主要从事材料合成与制备和生物质热解气化等研究,E-mail: qipengyuan@126.com

basically stabilized at 13% after 500℃. In the oxygen-containing atmosphere with 8% $O_2$ and 92% $N_2$, the volume fraction of $CO_2$ produced by corn stalk gasification showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of gasification temperature, while the volume fraction of CO was increased with the increase of temperature, indicating that the high temperature was more conducive to the release of CO, and the low temperature was favorable to the $CO_2$ production.

**Key words**: biomass; corn stalk; pyrolysis; gasification; biomass syngas

## 0 引言

生物质能是由绿色植物通过光合作用将太阳能转化为以化学能形式储藏在生物中的一种能量形式,其作为一种可再生的清洁能源,是仅次于煤炭、石油、天然气的第四大能源,因其分布广、产量大、可储存、可再生、低氮、低硫等优点而被广泛关注[1-8]。中国的生物质资源丰富,品种多、数量大、分布广。然而这些生物质除了部分被用作饲料、燃料、化工原料外,只有少量经过热转化技术转化成清洁能源,大部分被丢弃在田间地头直接焚烧,不仅造成资源的极大浪费,产生的 $H_2S$、$NH_3$ 等气体和飞灰颗粒等也会造成大气污染[9-13]。

生物质热转化技术作为一种高效的生物质能利用途径,能够高效地利用生物质资源。例如对于农村而言,利用生物质气化站产生的燃气可以用作民用炊事,而产生的热量可为用户提供热能,既避免了农业残余物焚烧污染现象,又解决了村民冬季取暖和炊事问题,达到了节能减排的效果[14-15]。热解是生物质热转化过程中最基本的反应过程[16]。生物质的热解特性是表征热解参数对生物质热化学转化率影响的重要工具。在对生物质热解行为进行研究的过程中,通常根据研究目的,选用合理的热解参数,以制得不同形式的能源产物(如燃气、生物质油、生物质炭等)或电能、热能等[17-19]。

目前有很多学者对生物质的热解特性进行了研究[9,12,19-22],但是大部分研究主要集中在提出或发展热解动力学模型等方面,而对生物质在不同热转化过程中热解行为特性的研究仍然不够全面,尤其是对于生物质热解过程气相产物的析出规律的研究更是缺乏[20-22]。本文拟选取我国北方农村地区大量存在的、典型的玉米秸秆废弃物作为实验原料,利用自行搭建的管式炉生物质热解气化实验系统研究玉米秸秆在热解过程中产生 CO、$H_2$、$CO_2$、$CH_4$ 和 $C_nH_m$ 等主要生物质燃气成分的产气规律,以期为秸秆热转化利用过程的热解参数优化、提高秸秆气化站燃气的产量及品质等提供指导。

## 1 实验

### 1.1 实验样品

实验所用材料为辽宁省沈阳市周边农村地区典型的玉米秸秆,选择该材料的理由是玉米秸秆为我国常见的农业生物质废弃物,产量丰富、较易获得且具有代表性。实验前先将玉米秸秆在自然条件下风干,然后用破碎机破碎成粉末状,最后过 100 目筛获得粒径小于 150 μm 的颗粒作为实验原料。

### 1.2 实验设备及系统

采用自行建立的生物质热解气化实验系统对生物质进行热解气化实验研究,实验系统示意图如图 1 所示。该实验系统主要是由 $N_2$ 或 $O_2$ 气瓶、SK2B-6-12TPA3 型管式炉(上海卓的仪器公司)、冷凝装置(冰水浴)、干燥装置和煤气分析仪等组成。管式炉内为石英管,采用石英坩埚,最高热解温度可达 1 200℃,工作电压为 220 V(50 Hz),加热元件为电阻丝,升温速率为 0 ~ 20℃/min,控温精确度为 ±1℃,炉膛材质为氧化铝陶瓷纤维,炉膛结构为双层,炉壳底部装有制冷风扇[23]。冰水浴内包含多个装有极性溶剂异丙醇溶液的洗气瓶,用于吸收高温热解合成气中的焦油,同时起冷却和净化合成气的作用。冰水浴冷却净化后的合成气进入 U 形管内,

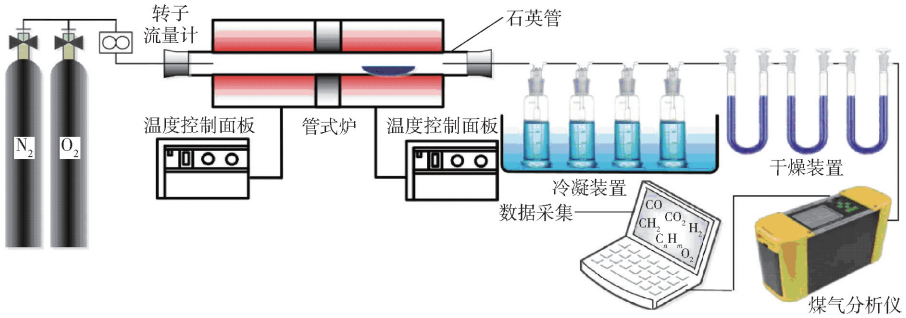


图 1 生物质热解气化实验系统

Fig. 1 Experimental system for biomass pyrolysis and gasification

进一步干燥，最后通入煤气分析仪，测定并分析生物质热解后产生气体的成分。

### 1.3　实验方法及程序

热解实验过程中，以纯 $N_2$ 或 $N_2/O_2$ 混合气体为载流气体，流量为 0.3 L/min，每次实验称取制备好的原料 10 g，设置管式炉升温速率为 10℃/min，恒温时间为 1 h，通过改变最终热解温度（400 ~ 800℃）研究不同温度下玉米秸秆的热解和气化特性，分析玉米秸秆热解和气化过程中不同温度下的产气规律。采用煤气分析仪测定玉米秸秆热解气化过程产生 CO、$CO_2$、$CH_4$、$H_2$ 和 $C_nH_m$ 等气体含量，每间隔 1 s 记录一次该时刻下产生各气体的瞬时体积分数。计算热解或气化过程各气体的总体积分数，以便分析玉米秸秆在整个热解或气化过程中小分子气体的释放规律。

$$V_i = \int_0^t Q_{N_2} v_i \mathrm{d}t \tag{1}$$

式中　$V_i$——生物质燃气总体积产量，L

$Q_{N_2}$——$N_2$ 流量，L/min

$v_i$——气体瞬时体积分数，%

$i$——煤气分析仪检测到的气体类别

$t$——热解气化反应时间，min

## 2　实验结果与分析

### 2.1　不同热解温度对玉米秆热解产气规律影响

以热解温度 400、600、800℃ 为例，不同热解温度下玉米秸秆热解产气的变化情况如图 2 所示。为了便于分析玉米秸秆热解过程的产气规律，根据实验设置的升温速率和热解最终温度，将同一热解温度下进行实验对应的加热温度换算成相应的时间变化，本实验中升温速率设为10℃/min，达到最终热解温度 400、600、800℃ 所需的时间分别约为 38、58、78 min，实验误差忽略不计。达到设定的最终热解温度后保温时间设为 1 h，因此对于同一次热解实验而言，其热解阶段大致可以划分为升温阶段（温度未达到设定的热解温度）、恒温阶段（温度达到设定的热解温度且保温 1 h）和降温阶段（温度降至室温）。

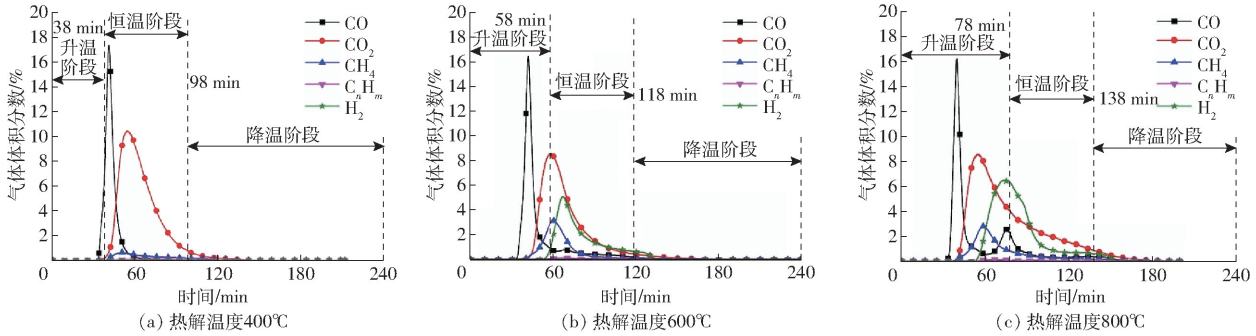


图 2　玉米秸秆热解产气变化曲线

Fig. 2　Syngas production law of corn stalk pyrolysis

图 2a 为玉米秸秆在 400℃ 下发生热解的产气规律图。从图 2a 可以看出，热解过程中最先产生的气体组分为 CO，随后产生 $CO_2$，并伴随有少量 $CH_4$ 产生，$C_nH_m$ 和 $H_2$ 在该条件下几乎未产生。CO 的产量峰值在升温阶段结束后达到最高峰；$CO_2$ 的产量峰值出现在恒温阶段。观察图 2b 可知，600℃ 热解时 CO 和 $CO_2$ 产率峰值均出现在加热阶段，而 $CH_4$ 和 $H_2$ 的产率峰值出现在恒温阶段，且 $H_2$ 的峰值超过了 $CH_4$ 的峰值。在恒温阶段，可以观察到热解产生 CO 过程中，CO 产量有小幅波动。

热解温度为 800℃ 时（图 2c），CO、$CO_2$、$CH_4$ 和 $H_2$ 的产率峰值均出现在升温阶段，其中 CO 的产率峰值最先出现且存在 2 个峰值，其次是 $CO_2$ 和 $CH_4$，而 $H_2$ 的产率峰值与 CO 的第 2 次产率峰值几乎同时出现。从图 2c 还可看出，所有气体产率在达到 800℃ 之前均已开始下降，这说明绝大多数的热解产气反应发生在温度低于 800℃ 的升温阶段。

由图 2 可知，玉米秸秆热解过程中最先释放的小分子气相产物为 CO 和 $CO_2$，而当温度进一步升高，生物质燃气中逐渐出现 $CH_4$ 和 $H_2$，且随着热解温度升高，CO 产率峰值最先出现于反应时间 45 min 左右；而 $CO_2$ 和 $CH_4$ 产率峰值几乎同时出现在反应时间 60 min 左右；热解温度为 400℃ 时几乎无 $H_2$ 产生，而当温度升高至 600℃ 和 800℃ 时，$H_2$ 释放产率逐渐升高且产率峰值基本同时出现在反应时间 70 ~ 80 min；综合分析图 2 也可看出，随着热解温度升高，生物质燃气中 $CH_4$ 和 $H_2$ 的占比明显升高，但是在该实验条件下，无论热解温度升至多少，玉米秸秆热解全过程产生 $C_nH_m$ 的产率均较低，几乎可以忽略不计。

### 2.2　不同热解温度对单一气体释放规律的影响

通过对比不同温度对同一气体成分释放的影响

规律,可以更加有针对性地分析最高温度对某一特定气体的影响规律,有利于理解玉米秸秆的热解机理,从而为热解过程获取某种特定的小分子气体提供科学指导。图 3 为不同温度下玉米秸秆热解产生 CO、$CO_2$、$CH_4$和 $H_2$气体产率。

从图 3a 可以看出,当热解温度升到 700℃以

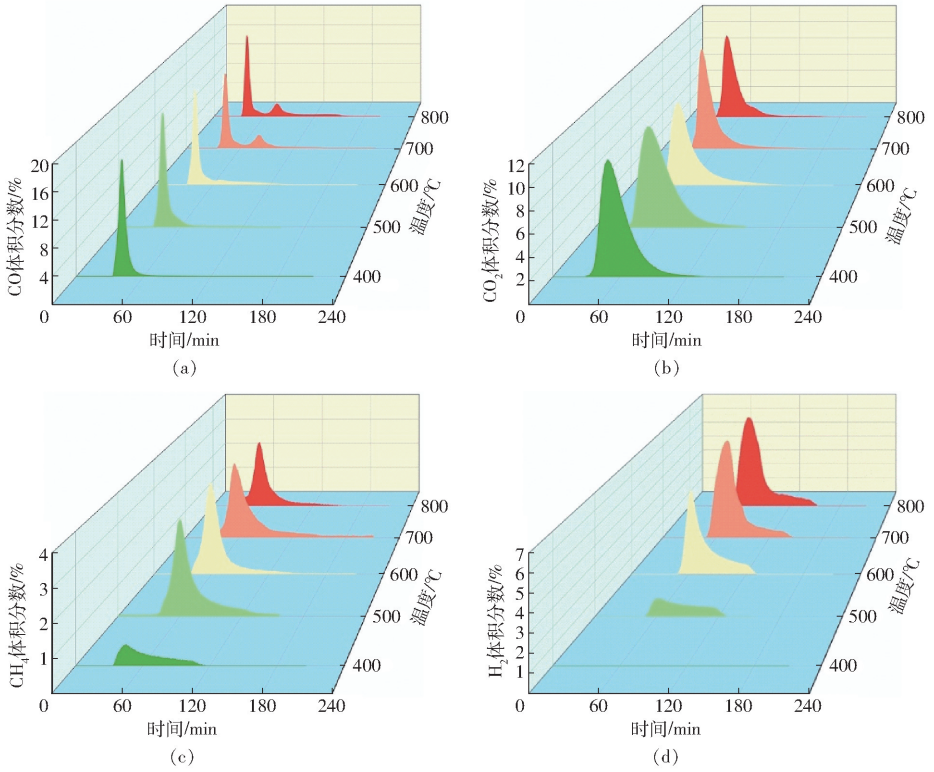


图 3 不同温度下玉米秸秆热解过程中的气体产率

Fig. 3 Gas yield of corn stalk pyrolysis at various temperatures

后,玉米秸秆热解产生的 CO 出现双峰现象。而且随着温度升高,CO 的双峰提前出现,这说明热解温度越高,玉米秸秆内的有机物解聚反应越剧烈,而且高温会加速秸秆内有机成分的裂解。相关研究表明,秸秆类生物质中主要有机物为半纤维素、纤维素和木质素,木质素降解主要发生在 250 ~ 750℃,半纤维素降解主要发生在 325 ~ 425℃,纤维素降解主要发生在 225 ~ 400℃[24]。

从图 3b 可以看出,$CO_2$在热解温度为 400℃时就可产生,且随着热解温度的升高无明显变化。而从图 3c 可看出,400℃时,$CH_4$体积分数瞬时峰值不到 1%,而随着温度升高,$CH_4$体积分数的瞬时峰值最高可达 3%。由此可见高温促进了 $CH_4$的生成,而且温度大于 400℃时产生显著影响,而当温度达到 500℃时继续升高温度,则无明显变化。热解过程中 $CH_4$、$C_nH_m$的生成,主要是由于焦油和重烃在气相中的重整和裂解反应。

从图 3d 可看出,玉米秸秆在 400℃下热解时,无 $H_2$产生;当热解温度达到 500℃时,$H_2$的产生几乎持续了整个恒温过程(时间为 60 ~ 120 min)。当热解温度升至 600℃时,与 400℃和 500℃的热解情形相比,该温度下玉米秸秆热解产生的 $H_2$含量明显升高,而且出现了明显的峰值。当温度升至 700℃时,生物质燃气中 $H_2$的含量进一步提高,而温度升至 800℃时,$H_2$的产气规律与 700℃情形类似。

图 4 为不同温度下玉米秸秆热解产气的体积分数。由图 4 看出,随着热解温度升高,产生的生物质燃气中 CO 体积分数几乎没有变化;而 $CO_2$体积分数则随着温度升高,不断降低;$CH_4$在 400 ~ 500℃时,随着热解温度升高,其体积分数增加,而在 500℃以后,随着温度升高,其体积分数基本稳定在 13%。热解温度升至 500℃后,出现 $C_nH_m$和 $H_2$,其

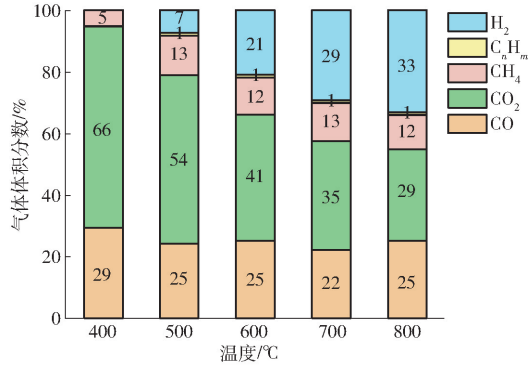


图 4 不同温度下玉米秸秆热解产气的体积分数

Fig. 4 Volume fractions of syngas components in corn stalk pyrolysis at different temperatures

中 $H_2$ 体积分数随着温度的升高而不断增大，由 500℃时的 7% 上升到 800℃时的 33%，而 $C_nH_m$ 体积分数无明显变化，上升约 1%。

### 2.3　含氧气氛下不同温度对玉米秆气化产气影响

生物质在少氧或有其他还原性气体存在的条件下发生的一系列反应即为气化过程。热解是生物质气化过程中必不可少的初始步骤。传统的生物质热解应用主要是发生在氮气气氛下，由于热解的吸热性质，需要大量的外部供热，这是扩大热解应用规模的主要挑战。而通过引入一定数量的氧气或空气，可以利用氧化反应过程释放出的大量热量，进而有效地克服传热瓶颈。为了进一步探究含氧气氛下不同气化温度对玉米秸秆气化产气规律的影响，通过改变管式炉内气氛组成，控制 $O_2$ 体积分数为 8%、$N_2$ 体积分数为 92%，分析含氧气氛下不同气化温度对玉米秆气化产气规律的影响。

图 5a 表示 $O_2$ 体积分数为 8% 的含氧气氛下，气化温度为 400℃时玉米秸秆气化的产气规律图。从图中可以看出，在升温过程中，玉米秸秆发生热解反应，由于 $O_2$ 的加入，导致玉米秸秆在热解气化过程中产生 $CO_2$ 含量明显增多，且 $CO_2$ 体积分数在恒温阶段呈现下降一定程度后，保持恒定。这表明玉米秸秆开始时的 $CO_2$ 由 2 部分组成：玉米秸秆热解产生的 $CO_2$ 和由 $O_2$ 与玉米秸秆发生非均相氧化反应产生的 $CO_2$。

图 5b 为温度 500℃时玉米秸秆的气化产气规律图。同 400℃相比，当温度为 500℃时，$CO_2$ 体积分数进一步增加，然而在整个恒温阶段，$CO_2$ 体积分数呈不断下降趋势，这是因为当温度升高，加快了 $O_2$ 与玉米秸秆直接的非均相反应，导致参与氧化反应的玉米秸秆有机物不断减少，进而造成 $CO_2$ 瞬时体积分数不断减小。与此同时，$CH_4$ 瞬时体积分数也比 400℃条件下大，而大部分 $CH_4$ 是由玉米秸秆内部热解反应产生的，由此说明温度升高不但有利于玉米秸秆内有机物的热解，同时也有利于玉米秸秆发生氧化反应。

图 5c 为温度 600℃时玉米秸秆的气化产气规律图。与气化温度为 500℃时相比，在 600℃时的恒温阶段，$CO_2$ 瞬时体积分数呈先增加、后降低的趋势。同时 CO 在恒温阶段末期有一个逐渐升高的趋势。$CH_4$ 的瞬时体积分数则无明显变化，这说明温度升高进一步加快了 $O_2$ 与玉米秸秆的氧化反应，促进了 $CO_2$ 的生成，而随着参与反应的碳元素的减少，$CO_2$ 瞬时气体体积分数逐渐下降。

图 5d 为温度 700℃时玉米秸秆的气化产气规律图。从图 5d 可以看出，$CO_2$ 瞬时体积分数在恒温阶段时达到了峰值（约 7%），这说明气化温度的升高会进一步扩大玉米秸秆和 $O_2$ 的反应速率，加快 $CO_2$ 的产生。从图 5d 还可看出，CO 的瞬时体积分数出现双峰，第 1 个峰值出现在升温阶段，而第 2 个峰值出现在恒温阶段。第 1 个峰值主要是由玉米秸秆内部热解而产生，而第 2 个可能是在高温条件下碳与 $O_2$ 反应生成 $CO_2$，之后 $CO_2$ 与碳发生还原反应产生 CO 所致[25-28]。在恒温阶段末期，$CO_2$ 和 CO 瞬时体积分数下降，这主要是由于玉米秸秆内的有机物质反应完全而导致的下降。

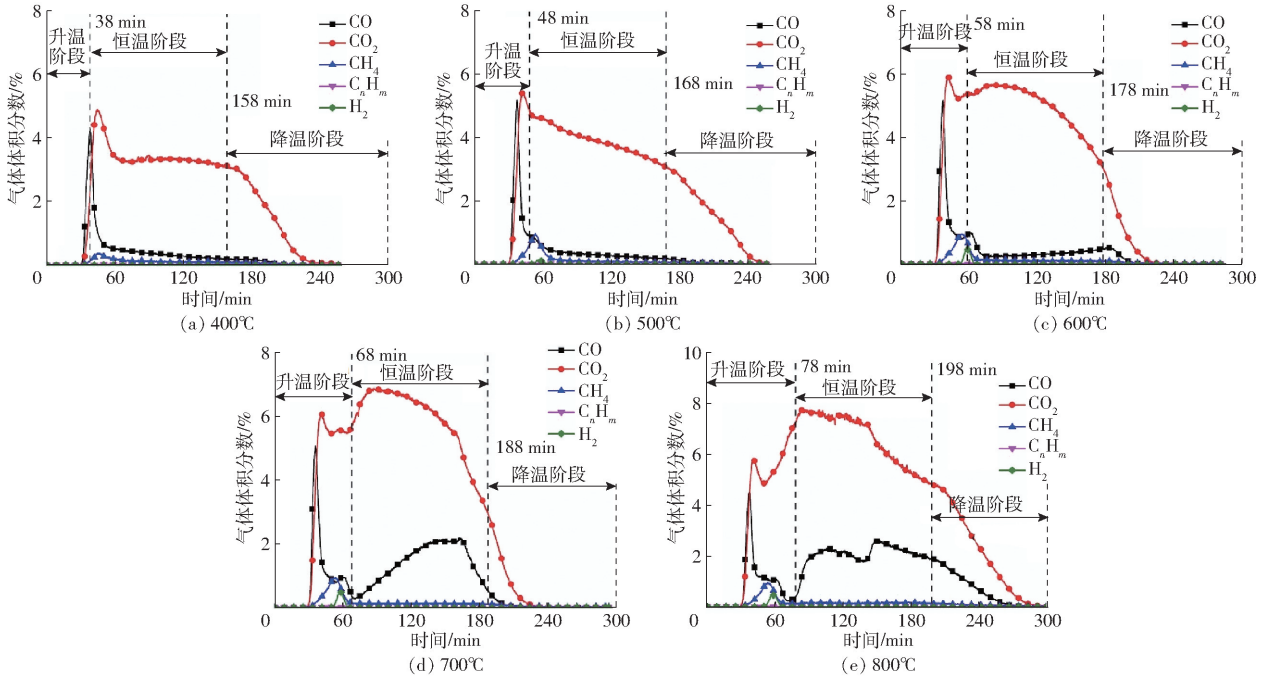


图 5　含氧气氛下玉米秸秆气化产气规律

Fig. 5　Syngas production law of corn stalk gasification under oxygen-containing atmosphere

图 5e 为温度 800℃时玉米秸秆气化过程的产气规律图。从图 5e 中可以看出，$CO_2$瞬时体积分数在恒温阶段时达到了峰值，大于 700℃时的瞬时体积分数，约 8%。进一步说明 $CO_2$产生速率随着温度的升高而增加。与此同时，800℃时 CO 瞬时体积分数相比于 700℃条件下呈现逐渐增加的趋势，且在恒温阶段相对恒定。而在降温阶段，随着温度的降低，$CO_2$和 CO 瞬时体积分数均出现明显下降，且 CO 比 $CO_2$提前消失，这是因为高温条件下更有利于 CO 的产生，而低温条件下，更有利于 $CO_2$的产生。

基于式(1)，计算 $O_2$ 体积分数为 8% 时不同气化温度下玉米秸秆气化过程各气体的总体积分数，结果如图 6 所示。分析该结果可知，当 $O_2$体积分数为 8%，温度为 400 ~ 600℃时，由于反应气氛中 $O_2$的存在，导致秸秆气化产生的合成气中以 $CO_2$为主。而随着温度的进一步升高，在温度为 700℃或 800℃时，可以看出 CO 的占比逐渐增加。由此可见，当温度大于 700℃时，热解反应生成的 $CO_2$会与生物质内的碳元素发生还原反应，进一步提高 CO 产率，该过程反应方程为

$$C + CO_2 \uparrow \rightarrow 2CO \uparrow \quad (2)$$

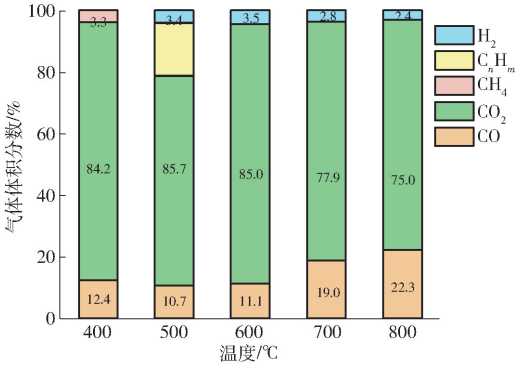


图 6 $O_2$体积分数为 8% 时不同温度下产气体积分数

Fig. 6 Volume fractions of various gases from different temperatures under 8% $O_2$ atmosphere

从图 6 中还可看出，在该实验条件下，当玉米秸秆的气化温度高于 600℃(600 ~ 800℃)时，温度越高越有利于还原反应进行，促使生成更多的 CO。然而，高温虽然有利于 CO 产生，但是也会延长有机物的氧化反应时间，促使秸秆热解过程中有机物反应更加彻底。进一步地对比分析图 5c ~ 5e 可知，随着气化温度升高，$CO_2$和 CO 气体释放时间延长，例如，当气化温度为 700℃时，不同小分子气体在反应时间为 240 min 时已经产气结束(图 5d)，而当气化温度为 800℃时在 240 min 时热解反应过程仍在进行，仍有少量 CO 和 $CO_2$产生。从总体产气量来看(图 6)，在该实验条件下，当气化温度高于 600℃时，整个热解过程 CO 气体产量占比明显升高，而 $CO_2$的体积分数下降，由此表明在该实验条件下，气化温度的升高有利于 CO 气体产量的升高。此外，反应温度的升高对 $CH_4$的体积分数并无明显影响，这是因为 $CH_4$的产生主要发生在玉米秸秆的升温阶段，该阶段温度较低，不足以引起 $CH_4$与 $O_2$的氧化反应。随着气化温度升高，$H_2$和 $C_nH_m$的产量变化可忽略不计，这说明反应气氛中 $O_2$在某种程度上可能抑制 $CH_4$、$H_2$和 $C_nH_m$的产生，促进 $CO_2$和 $H_2O$ 的产生。

## 3 结论

(1)玉米秸秆热解过程中最先释放的小分子气相产物为 CO 和 $CO_2$，当温度升高时逐渐释放 $CH_4$和 $H_2$，且随着热解温度升高，CO 产率峰值最先出现在升温阶段，而 $CO_2$、$CH_4$和 $H_2$产率峰值几乎同时出现在恒温阶段，且随着温度升高，生物质燃气中 $CH_4$和 $H_2$占比明显升高。

(2)$N_2$气氛下，随着热解温度升高，玉米秸秆热解产生 CO 体积分数几乎没有变化，而 $CO_2$体积分数明显降低；在 400 ~ 500℃之间 $CH_4$体积分数随着热解温度的升高而增加，温度升至 500℃以后，其体积分数基本稳定在 13%，且在 500℃后，出现 $C_nH_m$和 $H_2$，且 $H_2$体积分数随着温度的升高而不断增加，说明热解气氛中低温热解有利于 $CH_4$产生，而高温有利于 $H_2$产生。

(3)在 $O_2$体积分数为 8%、$N_2$体积分数为 92% 的含氧气氛下，随着气化温度的升高，玉米秸秆气化产生 $CO_2$的体积分数呈先增加后降低的趋势，而 CO 体积分数随着温度的升高而增大，这说明高温气化条件下更有利于 CO 释放，而低温条件下有利于 $CO_2$产生。

## 参 考 文 献

[1] 姚锡文，许开立. 玉米芯的热解特性及气相产物的释放规律[J]. 农业工程学报，2015，31(3)：275 - 282.
YAO Xiwen，XU Kaili. Pyrolysis characteristics of corn cob and release rule of gas products[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(3)：275 - 282. (in Chinese)

[2] 姚锡文，许开立，徐晓虎. 灰化温度对生物质灰特性与沾污结渣的影响[J]. 农业机械学报，2016，47(1)：182 - 189.
YAO Xiwen，XU Kaili，XU Xiaohu. Influence of ashing temperature on slagging and fouling characteristics of biomass ash[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(1)：182 - 189. (in Chinese)

[3] 吴创之，周肇秋，阴秀丽，等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报，2009，40(1)：91 - 99.
WU Chuangzhi，ZHOU Zhaoqiu，YIN Xiuli，et al. Current status of biomass energy development in China[J]. Transactions of the

Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(1):91 – 99. (in Chinese)
[4] YAO Xiwen,ZHOU Haodong,ZHAO Zhicheng,et al. Research on dependence of concentration and transformation of inorganics in biomass gasification ashes upon particle size classification[J]. Powder Technology, 2020,371:1 – 12.
[5] 王韦韦,汤君杰,周国安,等. 生物质颗粒机组远程监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(12):402 – 410.
WANG Weiwei,TANG Junjie,ZHOU Guoan,et al. Design and experiment of remote monitoring system for biomass briquetting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(12):402 – 410. (in Chinese)
[6] RIOS M,GONZALEZ A,LORA E,et al. Reduction of tar generated during biomass gasification: a review[J]. Biomass and Bioenergy,2018,108:345 – 370.
[7] 张世红,杨子旭,王贤华,等. 烟秆流化床燃烧结渣特性实验[J]. 农业机械学报, 2012,43(6):97 – 101.
ZHANG Shihong, YANG Zixu, WANG Xianhua, et al. Experiment on agglomeration characteristics during fluidized bed combustion of tobacco stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(6):97 – 101. (in Chinese)
[8] YAO Xiwen,ZHAO Zhicheng,XU Kaili,et al. Determination of ash forming characteristics and fouling/slagging behaviours during gasification of masson pine in a fixed-bed gasifier[J]. Renewable Energy, 2020,160:1420 – 1430.
[9] DHYANI V,BHASKAR T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass[J]. Renewable Energy, 2018, 129:695 – 716.
[10] VASSILEV S V,BAXTER D,ANDERSEN L K,et al. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilization, technological and ecological advantages and challenges[J]. Fuel, 2013,105(3):19 – 39.
[11] HERNANDEZ J,LAPUERTA M,MONEDERO E. Characterisation of residual char from biomass gasification: effect of the gasifier operating conditions[J]. Journal of Cleaner Production, 2016,138:83 – 93.
[12] 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.
YAO Xiwen,XU Kaili,YAN Fang,et al. Comparative study on pyrolysis characteristics and dynamics of different agriculture biomass wastes[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016,37(11):1593 – 1597. (in Chinese)
[13] 王久臣,戴林,田宜水,等. 中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2007,23(9):276 – 281.
WANG Jiuchen,DAI Lin,TIAN Yishui,et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(9):276 – 281. (in Chinese)
[14] ROBERT P A,ANDY A,FEROZ K K,et al. Techno-economic comparison of biomass to transportation fuels via pyrolysis, gasification, and biochemical pathways[J]. Fuel,2010,89(Supp. 1):29 – 35.
[15] 陈曦,韩志群,孔繁华,等. 生物质能源的开发与利用[J]. 化学进展,2007,19(7/8):1091 – 1096.
CHEN Xi,HAN Zhiqun,KONG Fanhua,et al. Exploitation and utilization of bio-energy[J]. Progress in Chemistry, 2007, 19(7/8):1091 – 1096. (in Chinese)
[16] SHARMA A,PAREEK V,ZHANG D K. Biomass pyrolysis—a review of modelling, process parameters and catalytic studies [J]. Renewable and Sustainable Energy, 2015,50(10):1081 – 1096.
[17] YAO X W, ZHAO Z C, CHEN S K, et al. Migration and transformation behaviours of ash residues from a typical fixed-bed gasification station for biomass syngas production in China[J]. Energy, 2020, 201: 117646.
[18] 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.
ZHOU Haodong. Pyrolysis and gasification characteristics of biomass and slagging law of residual ash contamination[D]. Shenyang:Northeastern University,2021. (in Chinese)
[19] GAI C,ZHANG Y H,CHEN W T,et al. Thermogravimetric and kinetic analysis of thermal decomposition characteristics of low-lipid microalgae[J]. Bioresource Technology, 2013,150(11):139 – 148.
[20] CARLOS A,GONZALEZ D,SANDOVAL L P. Sustainability aspects of biomass gasification systems for small power generation [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020,134:110180.
[21] AMENAGHAWON A N, ANYALEWECHI C L, OKIEIMEN C O, et al. Biomass pyrolysis technologies for value-added products: a state-of-the-art review[J]. Environment Development and Sustainability, 2021(3):1 – 55.
[22] YAO Xiwen,HU Yonglu,GE Ji,et al. A comprehensive study on influence of operating parameters on agglomeration of ashes during biomass gasification in a laboratory-scale gasification system[J]. Fuel, 2020,276:118083.
[23] 李季硕. 生物质热解产物生成规律及催化脱除焦油研究[D]. 沈阳:东北大学,2023.
LI Jishuo. Study on the generation law of biomass pyrolysis products and catalytic tar removal[D]. Shenyang: Northeastern University,2023. (in Chinese)
[24] PATUZZI F,BASSO D,VAKALIS S,et al. State-of-the-art of small-scale biomass gasification systems: an extensive and unique monitoring review[J]. Energy, 2021,223:120039.
[25] DU Chunhua,WU Xianli,YU Guansuo,et al. Investigation into the flow behavior of high-temperature ash and low-temperature ash of high calcium coal[J]. Journal of the Energy Institute, 2020,93(5):1951 – 1959.
[26] YUAN T, TAHMASEBI A, YU J, et al. Comparative study on pyrolysis of lignocellulosic and algal biomass using a thermogravimetric and a fixed-bed reactor[J]. Bioresource Technology, 2015,175:333 – 341.
[27] YAO Xiwen,LIU Qinghua,KANG Zijian,et al. Quantitative study on thermal conversion behaviours and gas emission properties of biomass in nitrogen and in $CO_2/N_2$ mixtures by TGA/DTG and a fixed-bed tube furnace[J]. Energy, 2023,270:126904.
[28] AMUTIO M,LOPEN G,ARTETXE M,et al. Influence of temperature on biomass pyrolysis in a conical spouted bed reactor [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012,59:23 – 31.