

基于 Aspen Plus 的沙柳水蒸气气化模拟研究

甄正^{1,3}, 江砚池^{1,3}, 杜锴欣^{1,3}, 苏紫^{1,3}, 李尧^{1,3},
朱志祥^{3,4}, 乌晓江^{2,3}, 张忠孝^{2,3}

(1. 上海交通大学 智慧能源创新学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;
3. 上海非碳基能源转换与利用研究院, 上海 200240; 4. 岐阜大学 机械工程系, 岐阜 501-1193)

摘要: 沙柳的大规模气化是实现其生态和能源效益综合利用的重要技术。基于 Aspen Plus 构建了固定床、流化床和气流床气化模型, 深入对比了沙柳与典型生物质的原料和气化特性, 系统探究了温度、气化剂通入量和压力等工艺参数对沙柳气化过程的影响。结果表明, 沙柳具有热值高、灰分含量低的优点, 相同条件下气流床气化中合成气有效组分(CO + H₂)含量(体积分数)为 83.82%, 碳转化率为 97.87%, 高于固定床和流化床气化过程。气化温度和 $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 是影响沙柳高温气流床气化结果的主要因素, 高温气化过程对压力响应不显著。气化温度低于 1400 °C 时, 气化温度升高有助于增大合成气有效组分产量, 但对合成气中 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$ 影响更大, 通入水蒸气可有效调节合成气中 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$, 但有效合成气组分产量明显减小。在相同气化条件下, 沙柳高温气化合成气生产绿甲醇的成本低于玉米秸秆, 且通过沙柳气化合成的甲醇产量较玉米秸秆高 45.97%。

关键词: 沙柳; 水蒸气气化; Aspen Plus; 工艺参数

中图分类号: TK6 文献标志码: A 文章编号: 2097-2547(XXXX)XX-001-09

Simulation study on steam gasification of Salix psammophila based on Aspen Plus

ZHEN Zheng^{1,3}, JIANG Yanchi^{1,3}, DU Kaixin^{1,3}, SU Zi^{1,3}, LI Yao^{1,3}, ZHU Zhixiang^{3,4}, WU Xiaojiang^{2,3}, ZHANG Zhongxiao^{2,3}
(1. College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Research Center for Non-Carbon Energy Conversion and Utilization, Shanghai 200240, China; 4. Department of Mechanical Engineering, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan)

Abstract: The large-scale gasification of Salix psammophila is a crucial technology for realizing the comprehensive utilization of its ecological and energy benefits. Gasification models of fixed bed, fluidized-bed, and entrained-flow bed were constructed based on Aspen Plus. The raw materials and gasification characteristics of Salix psammophila and typical biomass were deeply compared, and the effects of process parameters such as temperature, gasification agent feed rate and pressure on the gasification process of Salix psammophila were systematically studied. The results show that Salix psammophila exhibits advantages of high calorific value and low ash content. Under the same conditions, the proportion (volume fraction) of effective components (CO + H₂) in syngas in the gas flow bed gasification is 83.82%, and the carbon conversion rate is 97.87%, which is higher than that in fixed bed and fluidized bed gasification processes. Gasification temperatures and $m(\text{steam})/m(\text{biomass})$ are the main factors influencing the outcomes of the gasification results of Salix psammophila in the high-temperature gas flow bed, and the high-temperature gasification process is not significantly responsive to pressure. When the gasification temperature is lower than 1400 °C, increasing temperature enhances the yield of effective syngas components but has a greater impact on $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$. Introducing steam effectively adjusts $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$ in syngas, though it leads to a more significant decline in the yield of effective syngas components. Under the same gasification conditions, the cost of producing green methanol from high-temperature gasification of Salix psammophila is lower than that from corn stover, and the methanol yield from Salix gasification is 45.97% higher than that from corn stover.

Keywords: Salix psammophila; steam gasification; Aspen Plus; process parameters

收稿日期: 2026-01-26; 修回日期: 2026-03-01。

基金项目: 内蒙古自治区 上海交通大学科技合作专项“科技兴蒙”上海交通大学行动计划专项。

第一作者: 甄正(2001—), 博士研究生, 研究方向为生物质气化技术, E-mail: zhenzheng@sjtu.edu.cn。

通信作者: 江砚池(1990—), 博士, 副教授, 研究方向为生物质气化、CO₂捕集, E-mail: chichi2@sjtu.edu.cn。

沙柳是中国内蒙古地区的典型沙漠作物,兼具耐旱、抗风沙和繁殖力强的特点,广泛用于中国荒漠地区的沙化土地修复。基于沙柳的生长特性,每年需对其进行平茬管理,仅鄂尔多斯一地的沙柳年产量可达 150×10^4 t,因此有必要探索合适的沙柳转化路径,实现生物质资源的高效利用。现有研究主要聚焦于以沙柳为原料制备活性炭、乙酸和呋喃等增值化学品^[1-3]。相关技术存在处理量小、生产工艺有待完善等问题,难以实现沙柳的规模化利用。生物质气化是极具规模化应用潜力的沙柳利用技术,通过气化反应能够将沙柳富含的纤维素、半纤维素和木质素等有机成分转化为合成气(CO 、 H_2 等),过程清洁且转化高效^[4-5]。值得注意的是,气化技术可与当地丰富的风光资源耦合,借助风光发电的廉价电力和电解水制取绿氢,气化所得合成气可进一步参与甲醇等绿色燃料的合成,极大提高了资源利用效率和产品经济价值^[6-8]。研究发现生物质气化过程的设计与操作条件通常受气化炉类型、反应温度和物料特性等因素影响^[9-10],尽管目前已在工程试验中进行了少量沙柳气化测试,但对其气化反应机理、工艺调控机制认识不够深入,难以指导工业规模生产。因此,有必要深入研究沙柳气化过程,探索适配的工艺方法,为工业化生产提供理论基础。

近年来,基于热力学平衡计算的 Aspen Plus 工业流程模拟软件在生物质气化特性研究中得到广泛应用,且模拟数据和实验数据拟合较好^[11-15]。黄秀辉等^[12]采用 Aspen Plus 研究了玉米秸秆与煤共气化过程,考察了 O_2 流量、水蒸气流量、气化温度和气化压力等不同因素对气化过程中合成气组分、 H_2 产量等的影响。SENEM 等^[13]使用 Aspen Plus 构建了生物质流化床气化模型,并基于 30 种生物质原料的气化数据集训练了 ANN 模型,模型预测精度较好。

表 1 不同生物质的工业分析、元素分析结果和低位发热量

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis results and low calorific values of different biomass

| 生物质 | 工业分析 /% | | | | | 元素分析 /% | | | 低位发热量 $(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$ |
|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|--|
| | M_{ad} | A_{d} | V_{d} | C_{d} | H_{d} | O_{d} | N_{d} | $S_{\text{c,d}}$ | |
| 沙柳 | 5.40 | 2.29 | 79.75 | 50.21 | 6.10 | 40.84 | 0.51 | 0.05 | 19.43 |
| 玉米秸秆 | 10.90 | 4.11 | 79.75 | 51.41 | 4.90 | 41.32 | 2.35 | 0 | 15.26 |
| 红麻 | 11.59 | 4.16 | 75.42 | 47.12 | 6.15 | 41.32 | 1.11 | 0.14 | 14.99 |

注: M 代表水分, A 代表灰分, V 代表挥发分; 元素分析结果中氧含量由差减法计算获得; 表中百分数均为质量分数; 表中下标 ad、d 分别代表测试基准为分析基、干燥基, $S_{\text{c,d}}$ 代表干燥基全硫分。

1.2 生物质气化模型建立

Aspen Plus 是常用的化工流程模拟软件, 选用热力学平衡模型对气化过程进行模拟计算, 预测气化产物的组成、热值及转化率等参数。在生物质气

KE 等^[14]利用 Aspen Plus 开发了一维稳态动力学模型, 以探讨压力、气化温度、含水量、当量比和氧含量对气化过程的影响, 并借助灵敏度分析优化了气化过程参数。

综上所述, 基于热力学平衡和物料守恒原理建立气化流程模型有助于灵活、迅速地了解沙柳气化过程的影响因素和不同工艺的气化效果。然而, 目前相关研究主要聚焦秸秆等常见生物质原料的气化, 关于沙柳资源化利用的研究仍停留在化工产品制造等层面, 缺乏以沙柳为气化原料的模拟研究以及缺少对沙柳具体气化工艺参数影响和不同气化床型可行性的研究。因此, 本研究拟聚焦沙柳气化过程, 使用 Aspen Plus 构建固定床、流化床和气流床气化模型, 选取水蒸气为气化剂, 优选适配沙柳的气化方案, 并对比沙柳与玉米秸秆、红麻的理化特性, 系统研究温度、气化剂通入量和压力对气化过程中合成气组分的影响, 以期对沙柳气化工艺流程的设计和 optimization 提供参考。

1 基于 Aspen Plus 的气化炉建模

1.1 物料组成

本研究以沙柳、玉米秸秆和红麻为生物质原料, 3 类生物质分别取自内蒙古鄂尔多斯、山东济宁和上海横沙岛。将生物质原料粉碎至粒径为 100 目后在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱干燥 2 h, 对上述所得物质进行了工业分析、元素分析和发热量测量, 结果见表 1。其中工业分析采用 GB/T 28731—2012 方法, 元素分析采用 GB/T 28732—2012、GB/T 30728—2014 和 GB/T 28734—2012 方法, 发热量测量采用 GB/T 30727—2014 方法。由表 1 可知, 玉米秸秆是目前使用较为广泛的生物质气化作物, 红麻是广泛分布在江浙地区的作物, 其低位发热量与玉米秸秆接近。

化模拟中, 采用 SRK 物性方法计算常规组分 (H_2 、 N_2 、 CO 、 CO_2 和 CH_4 等), 生物质和灰分为非常规组分, 依据表 1 的工业分析和元素分析结果单独定义。不同气化模型的模块组成及其功能见表 2。

表 2 不同气化模型的模块组成及其功能

Table 2 Module compositions and functionalities of different gasification models

| 模型 | 模块组成 | 模块名称 | 模块类型 | 功能 | 作用 |
|-----|--------|---------|--------|--------|--------------------------------|
| 固定床 | 干燥反应器 | DRY | RYield | 产量反应器 | 干燥生物质中水分 |
| | 气化反应器 | GSF | RGibbs | 吉布斯反应器 | 生物质气化过程 |
| | 灰分分离器 | CYCLONE | SSplit | 子流股分流器 | 分离气化产物中的灰分 |
| | 水分分离器 | SEP | Sep | 组分分离器 | 分离合成气中的水蒸气 |
| | 干燥反应器 | DRY | RYield | 产量反应器 | 干燥生物质中水分 |
| 流化床 | 热解反应器 | PRY | RGibbs | 吉布斯反应器 | 生物质热解过程 |
| | 分流器 | SPL-1 | FSplit | 流股分离器 | 按比例分离水蒸气 |
| | 分离器 | S1 | Sep | 组分分离器 | 分离不参与反应的气体和一定量 CH ₄ |
| | 气化反应器 | GSF | RGibbs | 吉布斯反应器 | 生物质气化过程 |
| | 混合器 | M1 | Mixer | 流股混合器 | 混合两股合成气 |
| | 换热器 | COOL-1 | Heater | 换热器 | 将混合气体加热保温 |
| | 分离器 | S2 | Sep | 组分分离器 | 分离气化产物中的灰分 |
| 气流床 | 混合器 | M1 | Mixer | 流股混合器 | 混合生物质和载气 |
| | 干燥反应器 | DRY | RYield | 产量反应器 | 干燥生物质中水分 |
| | 热解反应器 | COMBU | RGibbs | 吉布斯反应器 | 生物质热解过程 |
| | 气化反应器 | GSF | RGibbs | 吉布斯反应器 | 生物质气化过程 |
| | 气固相分离器 | CYCLONE | SSplit | 子流股分流器 | 分离气化产物中的灰分 |

各模型建立过程中做如下假设:(1)气化炉在运行中保持稳定状态;(2)反应过程中干燥、热解和气化等阶段互不影响;(3)将生物质中灰分视为惰性物质,不参与气化过程;(4)气化介质与生物质颗粒在气化炉内瞬间完全混合;(5)所有气相反应均快速反应,且均达到平衡;(6)气化反应后的合成气组分仅包括 H₂、N₂、CO、CO₂、CH₄、H₂O 和 H₂S,不考

虑其他气体^[12,16-17]。

在气化反应过程中,固定床气化炉内生物质原料沿反应器自上而下移动并落在炉膛上^[18]。生物质固定床气化流程模型见图 1。由图 1 可知,生物质原料先进入 DRY 模块中干燥,随后同 O₂、H₂O 分别进入 GSF 模块发生高温气化反应。反应后的产物经依次 CYCLONE 和 SEP 模块分离产物中的灰分和水分。

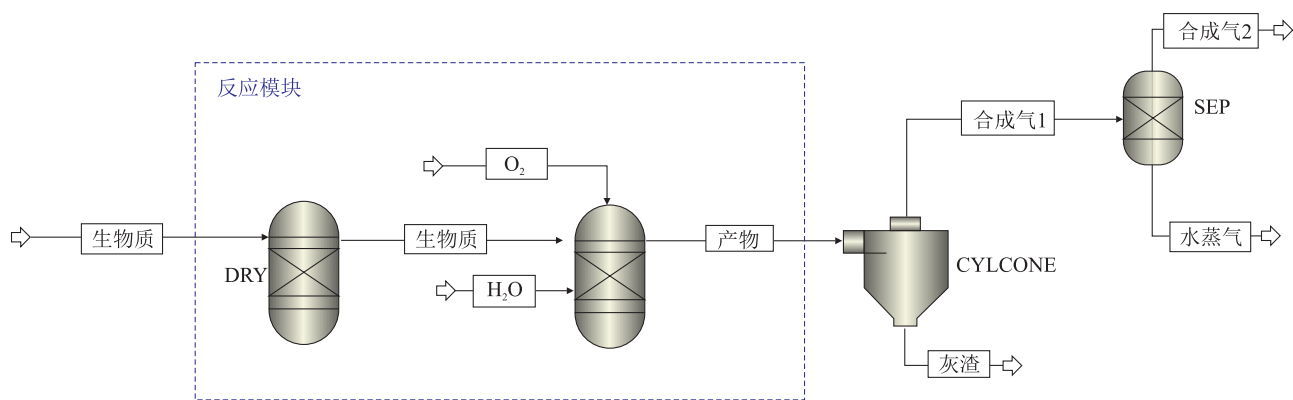
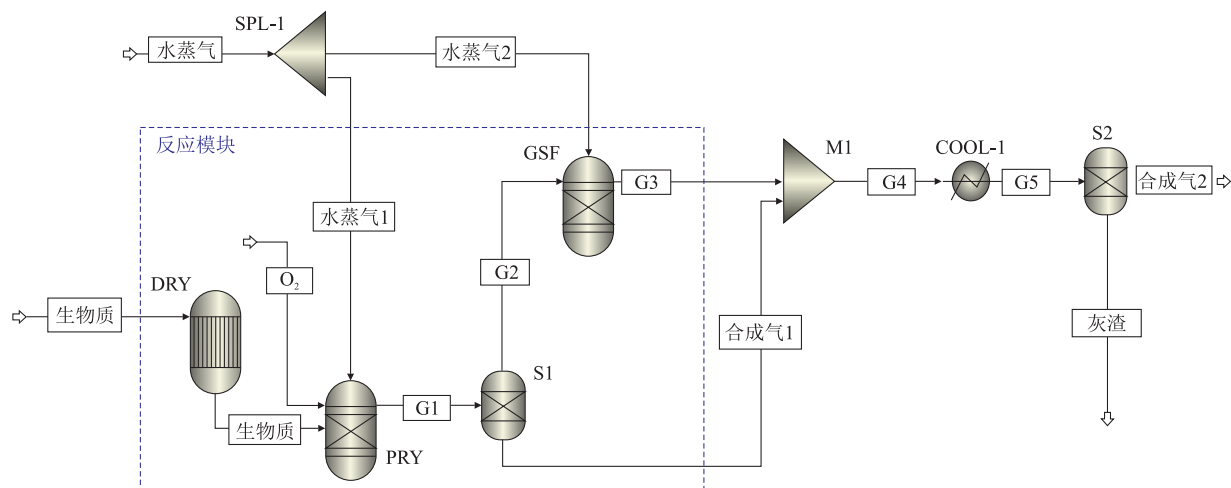


图 1 生物质固定床气化流程模型

Fig. 1 Model of biomass gasification process in fixed bed

生物质流化床气化流程模型见图 2^[13]。对于常规鼓泡流化床而言,气化剂通常由气化炉底部输入,生物质原料输入到热料床后和气化剂接触反应,在床体材料中呈现鼓泡状态,从而实现对床体材料的不断搅拌,保证气化反应均匀发生^[19-21]。因此在本模型中,生物质原料首先进入 DRY 模块进行干燥,而后同 O₂ 分别进入 PRY 模块发生热解反应。其中,水蒸

气由 SPL-1 模块按比例分别进入 PRY 和 GSF 模块建立蒸汽氛围。热解产物经 S1 模块分离出不参与气化反应的气体组分以及少量 CH₄,以避免 CH₄ 在后续高温气化反应中完全反应,导致合成气中无法检出,其他产物进入 GSF 模块发生气化反应。气化反应产物与分离气在 M1 中混合,并进入 COOL-1 模块保温至 500 °C,最后经 S2 模块分离合成气和灰渣。



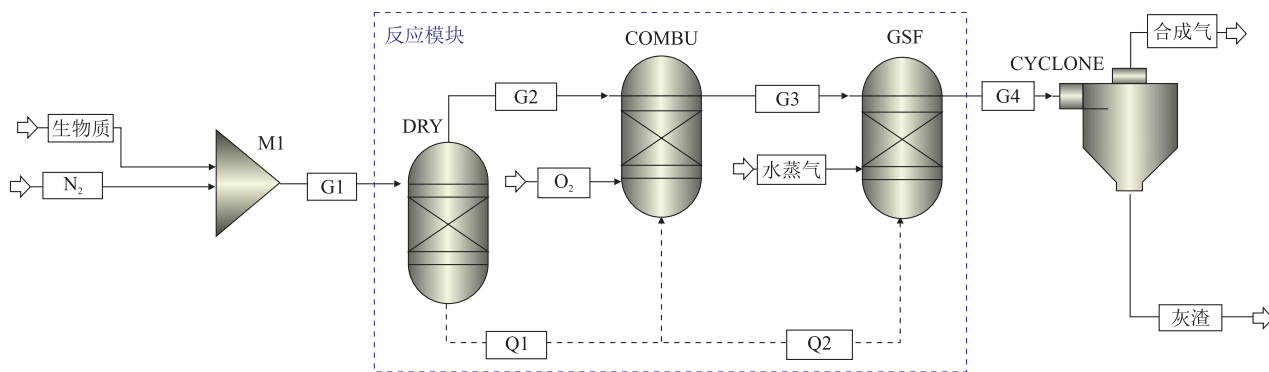
G—反应流股。

图2 生物质流化床气化流程模型^[13]

Fig. 2 Model of biomass gasification process in fluidized bed^[13]

生物质在气流床气化炉气化过程中,载气携带生物质原料进入气化炉内,利用内部高温使原料瞬

间反应,释放热能并生成合成气^[22]。基于此构建了气流床模型(图3)。



Q—热量流股。

图3 生物质气流床气化流程模型

Fig. 3 Model of biomass gasification process in entrained-flow bed

由图3可知,生物质原料与载气经M1模块混合后输入DRY模块进行干燥,随后与O₂一同进入COMBU模块发生热解和氧化反应并释放大量热量,反应产物与气化剂在GSF模块发生气化反应,产物经由CYCLONE模块分离合成气和灰渣。由于气流床气化反应迅速,生物质原料的干燥、热解和气化等反应趋于同时发生,因此在各级反应器间不仅有物料流股传输,同时引入热量传输以模拟瞬时反应对气化过程的供热。

1.3 模型验证

对于所建立的模型,本文选用已有文献中生物质在固定床、流化床以及气流床反应器的气化实验结果^[23-25],保持输入物料特性、反应条件与文献所述条件一致进行了模型验证模拟,结果见表3。

表3 不同气化床的模拟值和实验值对比

Table 3 Comparison of Simulation values and experimental values of different gasification beds

| 气化床类型 | 组别 | 合成气组成 /% | | | |
|-------|-----|----------------|-------|-----------------|-----------------|
| | | H ₂ | CO | CO ₂ | CH ₄ |
| 固定床 | 实验值 | 49.79 | 19.91 | 18.45 | 4.33 |
| | 模拟值 | 51.47 | 21.92 | 20.77 | 4.59 |
| | 偏差值 | 1.68 | 2.01 | 2.32 | 0.26 |
| 流化床 | 实验值 | 21.56 | 17.50 | 56.56 | 4.38 |
| | 模拟值 | 23.32 | 18.98 | 53.04 | 4.57 |
| | 偏差值 | 1.76 | 1.48 | 3.52 | 0.19 |
| 气流床 | 实验值 | 55.00 | 35.00 | 7.50 | ≈ 0 |
| | 模拟值 | 53.13 | 37.62 | 8.44 | ≈ 0 |
| | 偏差值 | 1.87 | 2.62 | 0.94 | ≈ 0 |

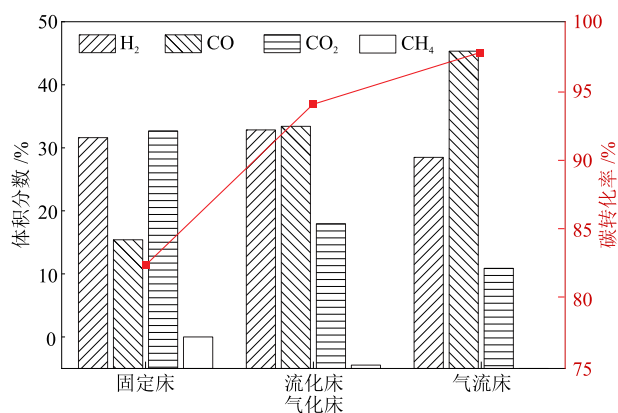
注:表中数据均为体积分数。

由表3可知,模拟值与实验值之间具有良好的 consistency,偏差值均小于5%,在可接受范围之内,以上结果证明了所建模型的可行性。

2 模拟结果与讨论

2.1 沙柳在不同气化床的水蒸气气化结果

以沙柳为生物质原料分别输入固定床、流化床和气流床气化模型,气化温度分别设定为600 °C、900 °C和1400 °C,反应压力为0.1 MPa,沙柳进料流量为1000 kg/h,以水蒸气为气化剂($m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质}) = 0.2$),模拟结果见图4。

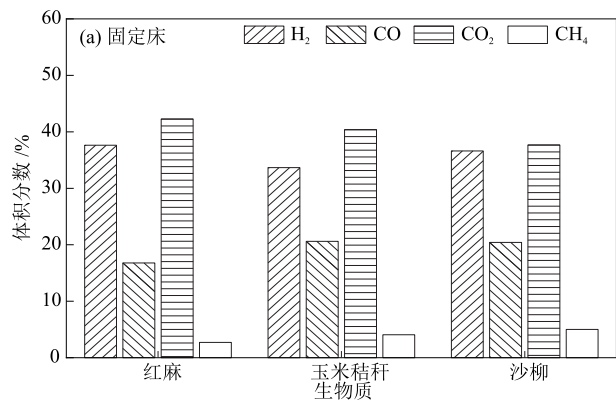


碳转化率为合成气中碳元素质量与生物质原料中碳元素质量之比。

图4 沙柳在不同气化床气化的模拟结果

Fig. 4 Simulation results of *Salix psammophila* in different gasification beds

由图4可知,在沙柳的固定床气化产物中,CH₄体积分数大于5%;流化床气化产物中CH₄体积分数小于1%;而气流床气化产物中基本不存在CH₄。这主要归因于气化温度升高抑制了甲烷化反应发生,导致沙柳在固定床、流化床和气流床产物中CH₄含量依次减小。沙柳在流化床和气流床中气化的合成气有效组分(CO和H₂)含量相对更大,H₂和CO体积分数总和分别为76.25%和83.82%,显著大于固



定床(57.03%)。此外,沙柳在固定床、流化床和气流床气化的碳转化率依次增大,且合成气中H₂体积分数差异不大,而气流床气化产物中CO体积分数为50.33%,显著大于固定床、流化床,CO₂体积分数最小(15.89%),表明沙柳在气流床气化过程有效合成气产量更高。这是由于高温在促进沙柳热解和残炭气化反应的同时,抑制了CO的燃烧反应和水煤气变换反应,致使CO₂和H₂产量减小,CO产量增大。

2.2 生物质原料特性对气化结果的影响

由表1可知,沙柳的低位发热量最高(19.43 MJ/kg),灰分含量最低(2.29%),其灰分含量仅为玉米秸秆的55.72%,而热值相较于玉米秸秆则高出27.33%,这表明沙柳作为生物质原料具有较高的能量密度和气化转化潜力,是理想的生物质气化原料。红麻组分含量和发热量与玉米秸秆相近的,其中,碳元素含量相对玉米秸秆偏小,氢元素含量偏大。

为了对比沙柳与其他地区广泛使用的生物质原料气化特性和适用床型的差异,选用红麻和玉米秸秆为生物质原料,分别输入固定床、流化床和气流床气化模型,气化温度设定为1400 °C,反应压力为0.1 MPa,3种生物质进料流量均为1000 kg/h,以水蒸气为气化剂($m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质}) = 0.2$),结果见图5。由图5可知,红麻、玉米秸秆在3种气化床型中的合成气组分变化趋势基本与沙柳一致,3种生物质在气流床气化的产物均表现出相对最高的有效组分含量及产出质量。在相同物料输入条件下,气流床中气化合成气的有效组分产量更大。在同一气化条件下,沙柳在不同气化床的合成气有效组分产量均大于玉米秸秆和红麻。值得注意的是,尽管生物质在气流床气化的结果较好,但由于反应温度较高,在实际生产过程中依赖原料燃烧放热维持炉内高温,因而更适用于沙柳等高热值、低灰分的生物质原料。

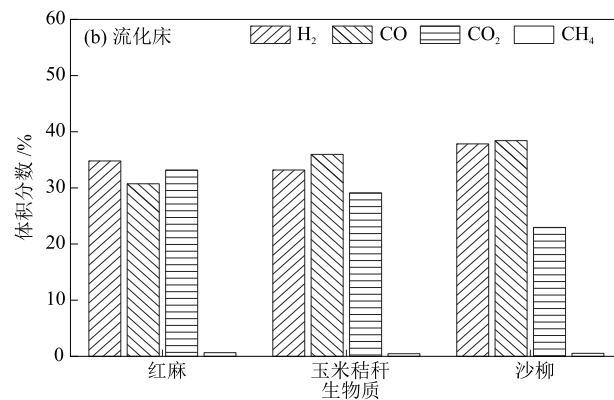


图5 生物质在不同气化床气化的模拟结果

Fig. 5 Simulation results of biomass gasification in different gasification beds

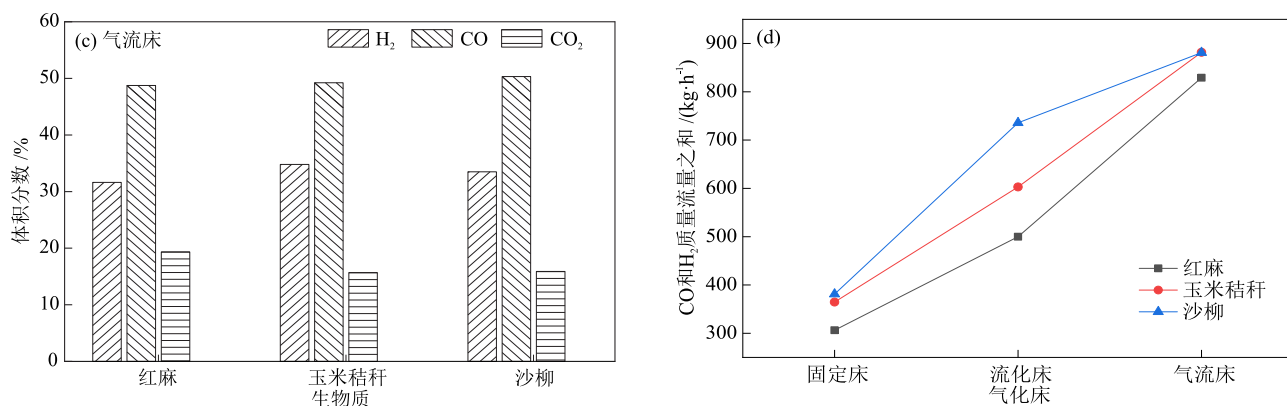


图5 生物质在不同气化床气化的模拟结果(续)

Fig. 5 Simulation results of biomass gasification in different gasification beds (continued)

2.3 工艺参数对沙柳气流床气化结果的影响

气化温度、压力和气化剂通入量是影响气流床气化的重要工艺参数。ZHOU等^[25]以稻壳等为生物质原料,在小型气流床中进行了高温气化实验,发现温度升高有助于有效合成气生成,但能量消耗升高,并发现其研究的 $m(\text{氧气})/m(\text{生物质})$ 最佳取值为0.4。冯宜鹏等^[26]探究了松针在气流床气化过程,发现随着 $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 从0增大至0.58,碳转化率、合成气产量和合成气热值均呈现先增大后减小的趋势。大量研究表明,尽管温度、气化剂通入量等因素对生物质气化效果的影响趋势类似,但针对不同生物质原料和工业需求,最佳的气化工艺参数范围存在差异^[5,10]。本节将进一步探究以水蒸气为气化剂时各工艺参数对沙柳气流床气化结果的影响。

2.3.1 气化温度

在沙柳进料流量为1000 kg/h,以用水蒸气为气化剂($m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质}) = 0.2$),反应压力为0.1 MPa条件下,探究了气化温度对沙柳气流床气

化结果的影响,结果见图6。由图6可知,当气化温度低于1400 °C时,随气化温度升高,合成气中 H_2 、 CO_2 的体积分数分别由43.98%、16.70%减小至33.49%、15.89%, CO 体积分数则随之增大,同时合成气中 CO 与 H_2 质量流量之和由835.49 kg/h增大至881.18 kg/h,合成气平均产量变化为 $7.615 \times 10^{-2} \text{ kg}/(\text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,表明在该温度范围内,气化温度升高有助于增大合成气有效组分产量,这主要归因于高温促进了逆水煤气变换等吸热反应的进一步发生,与ZHOU等^[25]结果一致。当气化温度为1600 °C时,此时维持气化反应的耗氧量较大,沙柳中含碳组分更多发生完全氧化放热反应,生成大量 CO_2 ,导致合成气中 CO_2 体积分数增大至18.05%,此时合成气中有效组分产量反而减小。此外,气化温度由800 °C升至1600 °C时,合成气中 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$ 由1.13减小至0.60,表明对于沙柳气流床气化过程而言,并非维持气化反应温度越高越有利于增大合成气有效组分产量,实际生产过程还需综合考虑维持高温产生的额外燃料成本和合成气提产收益,以确定最佳气化温度。

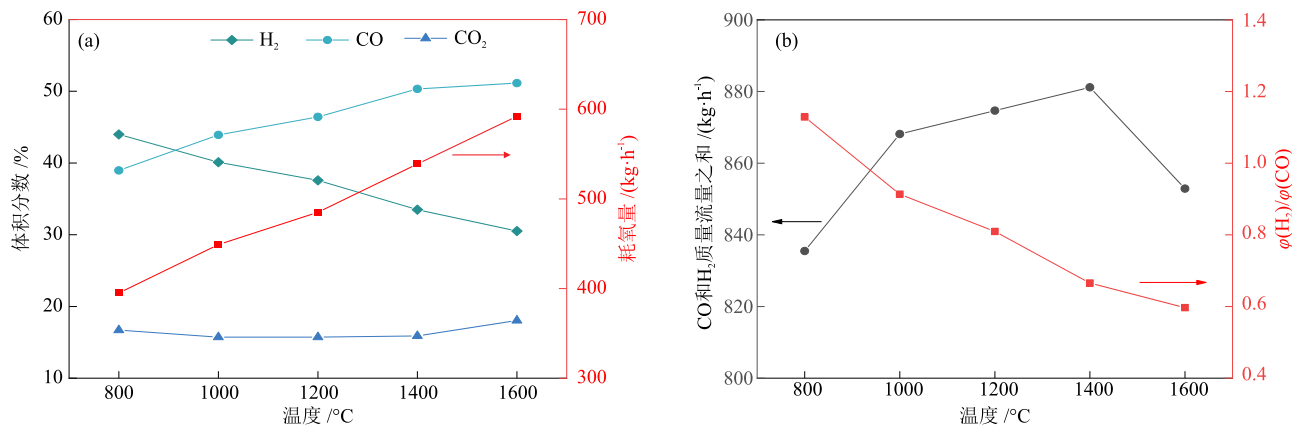


图6 气化温度对沙柳气流床气化结果的影响

Fig. 6 Effect of gasification temperatures on gasification results of *Salix psammophila* in entrained-flow bed

2.3.2 水蒸气与生物质质量比

在气化温度为1400 °C、反应压力0.1 MPa和沙柳进料量为1000 kg/h条件下,考察了 $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 对沙柳气流床气化结果的影响,结果见图7。由图7可知,随水蒸气通入量增大, H_2 和 CO_2 体积分数逐渐增大, CO 则随之减小,当 $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 由0.2增大至1.0时,合成气中 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$ 由0.67增大至1.02,表明通入水蒸气促使了水煤气变换反应发生,因此能够有效调节合成气 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$,

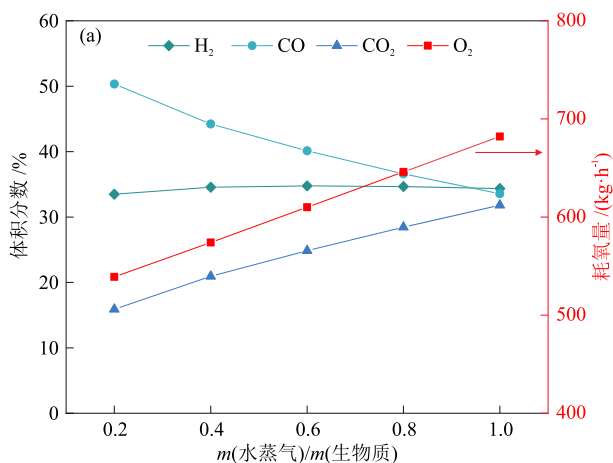


图7 $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 对沙柳气流床气化结果的影响

Fig. 7 Effect of $m(\text{steam})/m(\text{biomass})$ on gasification results of *Salix psammophila* in entrained-flow bed

2.3.3 气化反应压力

分别在气化温度为800 °C、1400 °C,沙柳进料量为

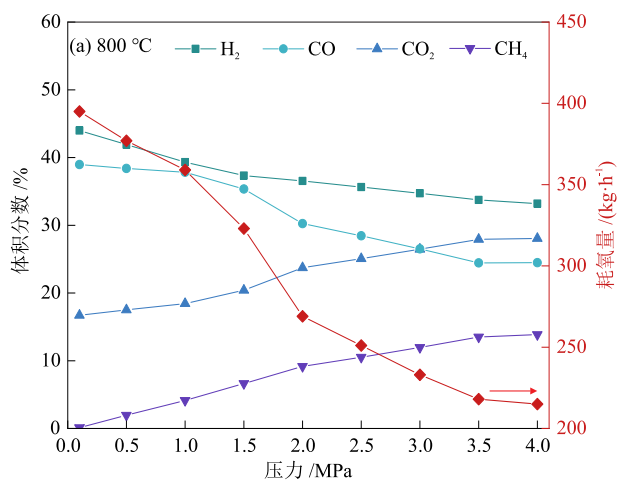
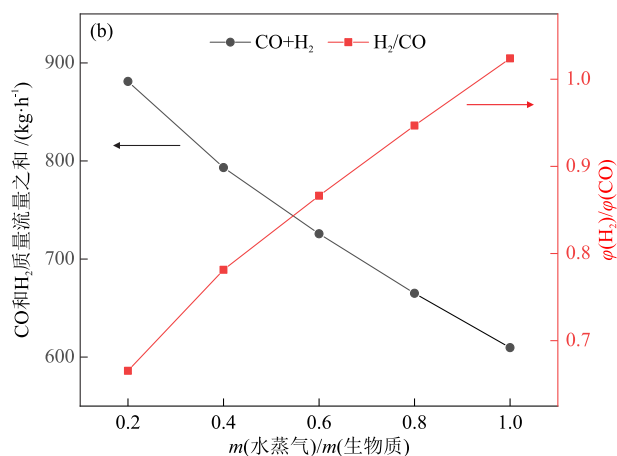


图8 压力对沙柳气流床气化结果的影响

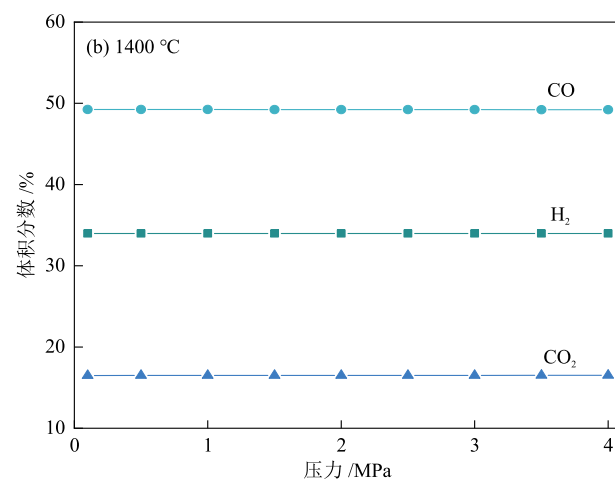
Fig. 8 Effect of pressures on gasification results of *Salix psammophila* in entrained-flow bed

由图8可知,在800 °C时,压力对合成气组分影响显著,随着压力升高, H_2 和 CO 体积分数逐渐减小, CO_2 体积分数增大,且 CH_4 体积分数由常压下趋近于0不断增大至4 MPa时的13.87%,这主要归因于压力升高推动系统平衡向分子量减小的方向进行,抑制

进而减小后续化工合成中绿氢使用量^[27],与黄秀辉等^[12]研究结论一致。值得注意的是,尽管随水蒸气通入量增大,合成气中 H_2 产量增大,维持气化温度所需耗氧量更大,伴随着 CO 体积分数减小和 CO_2 体积分数增大, $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 每增大0.1,合成气平均产量减小33.95 kg/h,因此实际生产中 $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 应综合考虑气化剂和燃料成本以及后续化工合成中的绿氢成本。



1000 kg/h, $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 为0.2条件下,考察了气化反应器内压力对沙柳气流床气化结果的影响,结果见图8。



了水煤气反应以及 CO_2 的碳还原反应。值得注意的是,随着压力升高,维持气化温度所需耗氧量不断减小,且在压力为1~2 MPa时减小幅度超20%,说明尽管气流床气化过程中压力增大合成气中有效组分含量减小,但适当加压有助于降低气化反应所需

能量,在实际生产过程中气化条件的设计需综合考虑其带来的燃料成本和合成气收益。此外,1400 °C时压力增大对合成气组分影响不大,表明高温气化时气化系统趋于稳定,压力调控机制对产物分布结果影响有限。

2.4 经济性分析

为了进一步探究沙柳高温气流床气化的可行性,以气化合成气合成绿甲醇($\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$)工艺为例,在气化温度为1400 °C、反应压力为0.1 MPa、生物质进料流量为1000 kg/h和 $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 为0.2条件下,计算了沙柳、玉米秸秆和红麻气化生产绿甲醇成本。成本核算覆盖 H_2 、 O_2 、水蒸气及生物质原料(暂未纳入设备折旧等固定成本)。合成过程中缺少的 H_2 通过电解水制氢获取,且计算仅考虑CO制备甲醇过程,年运行时间4380 h。每吨甲醇的生产成本计算方法见式(1)。

$$C_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{C_{\text{H}_2} + C_{\text{O}_2} + C_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\text{Biomass}}}{P_{\text{CH}_3\text{OH}}} \quad (1)$$

表3 不同生物质气流床气化生产绿甲醇的经济性分析结果

Table 3 Economic analysis results of green methanol production of different biomass feedstocks via entrained-flow gasification

| 生物质 | 每年成本 | | | | | 年产甲醇量/吨 | 生成每吨甲醇原料成本/万元 |
|------|------------------|------------------|----------|--------|---------|---------|---------------|
| | H_2 /万元 | O_2 /万元 | 生物质原料/万元 | 水蒸气/万元 | 总成本/万元 | | |
| 玉米秸秆 | 641.82 | 91.39 | 330.51 | 20.15 | 994.26 | 3173.21 | 0.29 |
| 红麻 | 562.85 | 92.31 | 394.20 | 20.15 | 1069.51 | 3781.41 | 0.34 |
| 沙柳 | 811.34 | 115.56 | 341.64 | 20.15 | 1288.69 | 4631.88 | 0.28 |

3 结论

本文以水蒸气为气化剂,借助 Aspen Plus 构建了基于固定床、流化床和气流床的生物质气化模型,通过对比沙柳、玉米秸秆和红麻在3种气化床中气化的结果和原料特性,优选出与沙柳适配的气化技术,并系统探究沙柳高温气流床气化过程中温度、 $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 和压力等工艺参数对气化效果的影响,最后以气化合成气合成绿甲醇工艺为例,讨论了沙柳高温气化的经济性,得出如下主要结论。

(1)沙柳具有高热值、低灰分的优点,使用气流床进行大规模气化优势显著。在气化温度为1400 °C、 $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 为0.2、压力为0.1 MPa及进料量1000 kg/h条件下,气流床气化中合成气有效组分体积分数为83.82%,碳转化率为97.87%,相同条件下均大于固定床和流化床。

(2)气化温度和 $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 是影响沙

式中, $C_{\text{CH}_3\text{OH}}$ 为生产每吨甲醇所需原料成本,万元/吨; C_{H_2} 为生产过程中所需 H_2 成本,万元/年; C_{O_2} 为生产过程中所需 O_2 成本,万元/年; $C_{\text{H}_2\text{O}}$ 为生产过程中所需水蒸气成本,万元/年; C_{Biomass} 为生产过程中所需生物质原料成本,万元/年; $P_{\text{CH}_3\text{OH}}$ 为甲醇产量,吨/年。计算过程仅考虑绿甲醇生产过程中的主要原料成本,未将设备、人工和能源等成本列入计算,实际生产成本计算还应考虑税收、商业利息等其他潜在成本。

不同生物质气流床气化生产绿甲醇的经济性分析结果见表3。由表3可知,相同进料和气化条件下,沙柳气化制甲醇生产成本低于玉米秸秆,且通过沙柳气化合成的甲醇产量较玉米秸秆高45.97%,表明其具备大规模生产的潜力。此外,由于种植规模限制,现有以沙柳原料的生物质成本较玉米秸秆更高,若推广种植其成本仍有下降空间,考虑到碳减排等碳收益,使用沙柳作为原料高温气化生产合成气具有可观的能源和生态价值。

柳气流床气化结果的主要因素,高温气化过程系统对压力响应不显著。气化温度低于1400 °C时,气化温度升高有助于提升合成气有效组分产量,但对合成气中 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$ 影响更大;当气化温度由800 °C升至1600 °C时,合成气中 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$ 由1.13减小至0.60。水蒸气通入可有效调节合成气中 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$,但合成气有效组分产量减小更显著, $m(\text{水蒸气})/m(\text{生物质})$ 每增大0.1,合成气平均产量减小33.95 kg/h。在实际沙柳气流床气化生产过程中,需综合考虑工艺参数变化对燃料成本和合成气收益的影响,确定最优的工艺参数组合。

(3)在相同的给料和气化条件下,沙柳高温气化合成气生产绿甲醇的成本低于玉米秸秆和红麻,且通过沙柳气化合成的甲醇产量较玉米秸秆高45.97%,若推广沙柳种植其成本仍有下降空间,使用沙柳作为前驱体高温气化生产合成气具有可观的能源和生态价值。

参考文献

- [1] BAO Y Z, ZHANG G L. Study of adsorption characteristics of methylene blue onto activated carbon made by *Salix psammophila* [J]. *Energy Procedia*, 2012, 16: 1141-1146.
- [2] LIU W J, LANG Z. The structure and self-regeneration performance of *Salix psammophila*-activated carbon modified by Ag and N co-doped TiO_2 [J]. *RSC Advances*, 2020, 10(7): 3844-3852.
- [3] LI C J, YANG X, ZHANG Z, et al. Hydrothermal liquefaction of desert shrub *Salix psammophila* to high value-added chemicals and hydrochar with recycled processing water [J]. *BioResources*, 2013, 8(2): 2981-2997.
- [4] SANSANIWAL S K, PAL K, ROSEN M A, et al. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72: 363-384.
- [5] SIKARWAR V S, ZHAO M, CLOUGH P, et al. An overview of advances in biomass gasification [J]. *Energy & Environmental Science*, 2016, 9(10): 2939-2977.
- [6] ONG H C, CHEN W-H, FAROOQ A, et al. Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 113: 109266.
- [7] 吴子波, 张敬宇, 吴路平, 等. 不同绿氢耦合生物质气化制绿色甲醇工艺经济性分析[J]. *低碳化学与化工*, 2025, 50(3): 97-105.
- WU Z B, ZHANG J Y, WU L P, et al. Economic analysis of different processes of green hydrogen coupled with biomass gasification for green methanol production [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2025, 50(3): 97-105.
- [8] 贺树民, 彭万旺, 王学云. 不同碳减排下生物质气化制绿色甲醇的经济性分析[J]. *低碳化学与化工*, 2025, 50(6): 89-96.
- HE S M, PENG W W, WANG X Y. Economic analysis of biomass gasification for green methanol production under different carbon emission reduction scenarios [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2025, 50(6): 89-96.
- [9] 尹佳芝, 陶从喜, 王浩, 等. 生物质气化技术研究进展及应用现状[J]. *新世纪水泥导报*, 2024, 30(4): 1-6.
- YIN J Z, TAO C X, WANG H, et al. Research progress and application status of biomass gasification technology [J]. *Cement Guide for New Epoch*, 2024, 30(4): 1-6.
- [10] MOLINO A, CHIANESE S, MUSMARRA D. Biomass gasification technology: The state of the art overview [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2016, 25(1): 10-25.
- [11] ÜNLÜ N, ÖZDOĞAN S. Entrained flow co-gasification of torrefied biomass and coal [J]. *Energy*, 2023, 263: 125864.
- [12] 黄秀辉, 杨文凯, 甘奕, 等. 基于 Aspen Plus 的玉米秸秆与煤共气化模拟优化研究[J]. *建模与仿真*, 2023, 12(6): 5875-86.
- HUANG X H, YANG W K, GAN Y, et al. Simulation and optimization of co-gasification of corn stover and coal using Aspen Plus [J]. *Modeling and Simulation*, 2023, 12(6): 5875-86.
- [13] SEZER S, KARTAL F, ÖZVEREN U. Artificial intelligence approach in gasification integrated solid oxide fuel cell cycle [J]. *Fuel*, 2022, 311: 122591.
- [14] GAO K, CHEN G Y, YAN B B, et al. Modeling of biomass thermal decomposition/gasification in a downdraft gasifier under low pressure by Aspen Plus [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 59: 103229.
- [15] AJORLOO M, GHODRAT M, SCOTT J, et al. Modeling and experimental validation of the co-gasification of plastic and biomass waste to estimate product yields [J]. *Energy*, 2025, 317: 134718.
- [16] TIMILSINA M S, CHAUDHARY Y, SHAH A K, et al. Syngas composition analysis for waste to methanol production: Techno-economic assessment using machine learning and Aspen plus [J]. *Renewable Energy*, 2024, 228: 120574.
- [17] CHEN G B, HSU Y T. ASPEN Plus simulation of palm kernel shells, waste shiitake substrate, and sewage sludge co-gasification [J]. *Energy*, 2025, 329: 120574.
- [18] 杨辉, 孙姣, 陈文义, 等. 下吸式生物质气化炉结构研究进展[J]. *低碳化学与化工*, 2020, 46(1): 120-128.
- YANG H, SUN J, CHEN W Y, et al. Research progress in the structure of downdraft biomass gasifier [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2020, 46(1): 120-128.
- [19] JADOON U K, DÍAZ I, RODRÍGUEZ M. Comparative analysis of aspen plus simulation strategies for woody biomass air gasification processes [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2025, 194: 107626.
- [20] SHI H, HUANG Y Q, QIU Y Z, et al. Modelling of biomass gasification for fluidized bed in Aspen Plus: Using machine learning for fast pyrolysis prediction [J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 332: 119695.
- [21] DE S, YADAV S, SINGH D, et al. Simplified approach of modeling air gasification of biomass in a bubbling fluidized bed gasifier using Aspen Plus as a simulation tool [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(2): 115402.
- [22] LIU L. Model of co-gasification of coal and biomass in jetting fluidized bed by Aspen Plus: Contributive ratio [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 279: 128091.
- [23] LI W Y, WU S Y, WU Y Q, et al. Gasification characteristics of biomass at a high-temperature steam atmosphere [J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 194: 106090.
- [24] LI X T, GRACE J R, LIM C J, et al. Biomass gasification in a circulating fluidized bed [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 26(2): 171-193.
- [25] ZHOU J S, CHEN Q, ZHAO H, et al. Biomass-oxygen gasification in a high-temperature entrained-flow gasifier [J]. *Biotechnology Advances*, 2009, 27(5): 606-611.
- [26] 冯宜鹏, 王小波, 曾碧凡, 等. 松木粉气流床气化特性实验研究[J]. *燃料化学学报*, 2015, 43(5): 589-597.
- FENG Y P, WANG X B, ZENG B F, et al. Experimental investigation of gasification characteristics of pine powder in an entrained flow gasification reactor [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2015, 43(5): 589-597.
- [27] 周君, 张栋顺, 张永平, 等. 生物质气化耦合绿氢制备绿色甲醇技术经济性分析[J]. *低碳化学与化工*, 2025, 50(10): 75-81.
- ZHOU J, ZHANG D S, ZHANG Y P, et al. Techno-economic analysis of green methanol production via biomass gasification coupled with green hydrogen [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2025, 50(10): 75-81.