

生活垃圾与生物质共热解气化过程的模拟及优化

黄秀辉, 杨文凯, 黄玉, 李泽秋

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月23日; 录用日期: 2023年4月29日; 发布日期: 2023年5月6日

摘要

基于Aspen Plus平台, 从热平衡角度出发, 结合Gibbs自由能最小化原理, 模拟了生活垃圾与生物质共热解气化工艺。利用实验数据与模拟结果比较, 证明了该模型可用于共气化特性预测。进一步进行了灵敏度分析, 研究了不同操作条件对共气化特性的影响, 结果表明: 生活垃圾占比减小, 气体热值和干气产率降低, 气化效率提高; 气化温度在750°C以前对模拟结果影响很大; 水蒸气流量在0.1 kg·h⁻¹时气化效率最高; 氧气流量增加对模拟结果产生负面影响。通过总结各指标变化规律, 得到了适宜的操作条件: 原料混合比例取50:50, 气化温度取750°C, 水蒸气流量取0.1 kg·h⁻¹, 氧气流量取0.005 kg·h⁻¹。在该条件下运行模拟, 优化了模拟结果: 合成气中H₂为54.43%, CO为33.23%, CO₂为11.77%, CH₄为0.57%, 低位热值为10.27 MJ·Nm⁻³, 干气产率为1.26 Nm³·kg⁻¹, 气化效率为70.10%。

关键词

Aspen Plus, 模拟, 生活垃圾, 生物质, 气化, 热解

Simulation and Optimization of Co-Pyrolysis Gasification Process of Municipal Solid Waste and Biomass

Xiuhui Huang, Wenkai Yang, Yu Huang, Zeqiu Li

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 23rd, 2023; accepted: Apr. 29th, 2023; published: May 6th, 2023

Abstract

Based on Aspen Plus platform, from the angle of heat balance, combined with the principle of free

energy minimization, the co-pyrolysis gasification process of MSW (municipal solid waste) and biomass was simulated. By comparing the experimental data with the simulation results, it is proved that the model can be used to predict the characteristics of co-gasification. The effects of different operating conditions on gasification characteristics were studied by sensitivity analysis. The results show that the proportion of municipal solid waste has decreased, the calorific value and dry gas yield of gas are reduced, and the gasification efficiency is improved. Gasification temperature has great influence on simulation results below 750°C. The gasification efficiency is the highest when the steam flow rate is 0.1 kg·h⁻¹. The increase of oxygen flow has a negative effect on the simulation results. By summarizing the change rules of each index, the suitable operating conditions are obtained: The mixing ratio of raw material is 50:50, the gasification temperature is 750°C, the steam flow rate is 0.1 kg·h⁻¹, and the oxygen flow rate is 0.005 kg·h⁻¹. Under these conditions, the simulation results are optimized. In syngas, H₂ is 54.43%, CO is 33.23%, CO₂ is 11.77%, CH₄ is 0.57%, low heating value of gas is 10.27 MJ·Nm⁻³, dry gas yield is 1.26 Nm³·kg⁻¹, gasification efficiency is 70.10%.

Keywords

Aspen Plus, Simulation, MSW, Biomass, Gasification, Pyrolysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随城市现代化发展, 固体废弃物产量与日俱增, 据国家统计局公布, 2019 年我国城市生活垃圾年排放总量高达 2.4 亿吨。因此生活垃圾的处理问题迫在眉睫, 而在垃圾处理的各种方法之中, 燃烧法应用最为广泛, 占比约为 60%, 但不论何种处理方法, 垃圾在处理的过程中都会或多或少地造成环境污染, 所以如何将垃圾资源化、无害化处理是世界各国处理垃圾的目标之一。与此同时, 能源危机和环境污染问题受到全球广泛关注。生物质能以其可储运、可再生、对环境友好等优势从中脱颖而出, 成为仅次于三大化石能源的第四大能源[1]。然而生物质能量密度较低, 难以充分发挥潜能, 与生活垃圾联合利用可提高能量转化率, 且其有机成分增加, 可燃性增强。近年来快速发展的热解气化技术可以高效回收利用以上两种资源, 为解决能源环境问题开辟了一条新路径。对不同操作条件进行研究, 可以优化热解气化过程, 考虑到实验研究的难度及成本, 模拟研究成为一个很好的选择。

目前, 已有诸多学者构建了准确可靠的热解气化模型, 研究了不同影响因素对模拟结果引起的变化。Naveed 等[2]开发了混合式生物质气化炉的稳态平衡模型, 模型分为干燥、分解、气化三阶段, 研究表明该模型可作为气化炉性能的优化工具。Begum 等[3]建立了生物质气化的综合固定床气化炉模型, 采用四种不同的原料研究了空燃比和气化炉温对合成气产量的影响。Gagliano 等[4]基于质量和能量平衡模拟了下吸式气化炉中的生物质气化过程, 比较了 16 组实验工况, 证明了该模型能够合理预测合成气组分和热值。对生物质单组份热解气化特性的分析中, 李洪亮等[5]对稻壳进行了热解气化实验, 探究了不同反应温度、蒸气流量和进料速率对产气率和主要组分的影响。同样地, 战庭军[6]建立高温管式炉气化设备, 研究不同生物质原料在不同气化温度下产物、温度、热值的变化规律。类似地, 江龙[7]等利用固定床对谷壳进行热解气化实验, 通过考察温度、水蒸气和催化剂等因素对气化焦油析出的影响。在对于生活垃圾的单组份热解气化特性的研究中, 陈翀[8]模拟了生活垃圾固定床气化炉, 探究进气方式、气化温度和

空气当量比等对气化结果的影响。同样地,张藤原[9]等通过固定床热解气化模型,分析了气化压力、空气当量比等对产气组分的影响,并通过二次回归正交实验法求得最优化工艺参数下的气化效率。此外,袁浩然[10]等在模拟生活垃圾热解气化中,通过改变气化温度、氧气当量比、水蒸气与垃圾质量比在不同气化剂条件下,对气化反应的影响。同样地,在关于双组分共热解气化特性的研究上,Zhao [11]、Hu [12]等分别对煤/低碳燃料、生活垃圾/柳条进行了模拟与分析。

综上所述,前人针对生活垃圾与生物质共热解气化的模拟和研究较少,所进行的模拟研究大多着重于对单一组分进行热解气化,而且在影响合成气气化特性的因素方面,对原料混合比和氧气流量对合成气结果的影响的研究尚少,主要集中在为气化温度、气化介质流量、物料种类对合成气结果的影响。本文研究了生活垃圾和生物质双组分的共热解气化,而且从原料混合比和氧气流量的角度,研究了其对合成气气化特性的影响,为共热解气化技术的工程化应用提供一定的参考依据,因此加强该方面的研究具有重大意义。本文从热平衡角度出发,基于 Gibbs 自由能最小化原理,以生活垃圾与生物质为原料,在 Aspen Plus 平台上建立共热解气化模型,并结合实验数据验证模型的可靠性。再针对通过验证的模型,进一步研究原料混合比、气化温度、气化剂中水蒸气流量和氧气流量对合成气品质及共气化特性的影响,为今后工艺流程的设计及优化提供必要的理论指导。

2. 模型构建与验证

2.1. 模型构建

热解过程是指无氧或少氧条件下将混合物料通入热解炉中,物料中的有机成分会在高温的情况下裂解,反应生成固体焦炭。气化则是将通入气化炉的产物和气化介质,经过氧化和还原阶段,获得 CO、H₂、CH₄、CO₂ 等混合气体的一个过程。根据热解气化原理,生活垃圾与生物质的共热解气化过程一般分为干燥、热解、气化三个阶段,各个阶段并非独立存在,其中的反应往往发生在同一时刻,彼此会产生一定的影响[13]。共气化过程中的主要热化学反应见表 1 [14] [15] [16]。

Table 1. Gasification reaction

表 1. 气化反应

反应	反应式	焓变 $\Delta H/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	编号
氧化反应	$\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$	-394.1	R1
	$2\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$	-220.8	R2
	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$	-567.4	R3
	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	-490.6	R4
析碳反应	$2\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C}$	-173.3	R5
焦炭 - 水蒸气重整反应	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$	+131.7	R6
	$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	+90.2	R7
水煤气转化反应	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-38.4	R8

Continued

高压氢碳气化反应	$C + 2H_2 \rightleftharpoons CH_4$	-84.3	R9
甲烷水蒸气重整反应	$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$	+206.2	R10
	$CH_4 + 2H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 4H_2$	+165.0	R11

以上述原理分析为依据, 在 Aspen Plus 软件中建立生活垃圾与生物质共热解气化模型, 见图 1。该模型包括 7 个单元操作模块, 详见表 2。混料先从物流 FEED 进入 DRY 模块中干燥, 在 SEP1 模块中分离水分, 干料则从物流 DRY-FEED 进入 DECOMP 模块中分解成单质(C、H₂、O₂、N₂、S)、H₂O 及灰分, 再进入 GASIFY 模块中与气化剂共同混合气化, 所得气化产物在 SEP2 中进行气固分离, 固体残渣从物流 SOLID 除去, 气化气则从物流 SYNGAS 进入 COOL 模块中冷却至室温, 再进入 SEP3 模块中进行组分分离, 冷凝水和副产气经物流 BYPROD 排出, 最后获得干燥合成气产品从物流 PRODUCT 输出。反应产生的热量被热流 Q-DRY 和 Q-DEC 在各反应器间传递, 最后经热流 Q-GAS 从系统中散失。

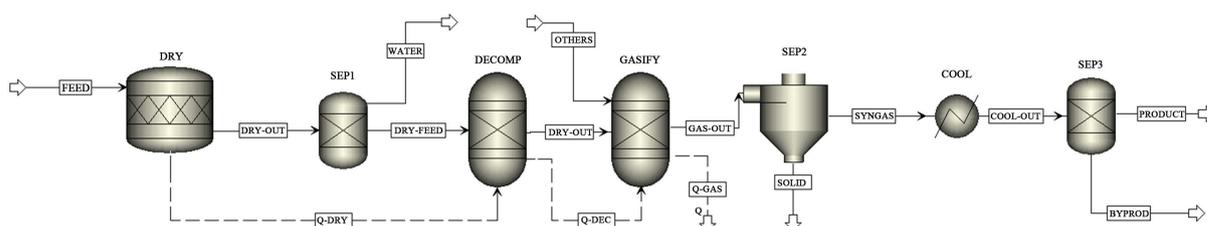


Figure 1. Simulation process of co-gasification of domestic waste and biomass

图 1. 生活垃圾与生物质共气化模拟流程

Table 2. Aspen Plus unit operation module

表 2. Aspen Plus 单元操作模块

模块名称	模块	说明	描述
DRY	RStoic	化学计量反应器	干燥原料
SEP1	Sep	组分分离器	分离干料与水
DECOMP	RYield	收率反应器	将干料分解成小分子物质
GASIFY	RGibbs	吉布斯反应器	基于 Gibbs 自由能最小原理模拟气化
SEP2	SSplit	子流股分流器	分离气化气与固态残渣
COOL	Heater	冷却器	将气化气冷凝
SEP3	Sep	组分分离器	分离合成气产品与其他产物

考虑到生活垃圾和生物质的组成成分多变, 两者在气化炉内的反应过程极其复杂, 为简化模拟研究, 作出以下合理假设[2] [17]: ① 系统等温, 处于稳态; ② 热化学反应在气化器中以平衡状态发生, 没有压力损失; ③ 原料中 H、O、N、S 最后都转化为气态产物, 而 C 发生不完全转化, 灰分作为惰性物质不参与任何反应; ④ 合成气产品中仅包含 H₂、CO、CO₂、CH₄、C₂H₂、C₂H₄ 和 C₂H₆, 所有气体都是理想气体。⑤ 不考虑化学动力学因素。

2.2. 模型验证

利用文献[18]中稳定工况下的一组实验数据对模型进行验证。由于模拟得到的产气组分中 C₂ 烃类含量极小, 对判定模型的准确性几乎无影响, 因而作对比时将其忽略不计。此前, 其他学者[16] [17] [19] 进行热解气化模拟研究时发现 CH₄ 含量的模拟值远小于实验值, 经分析认为实验中会产生 CH₄, 但模拟中该反应受时间限制未转化完全而达到理想的平衡状态。因此, 验证该模型时可通过限制吉布斯反应器化学平衡使 CH₄ 含量向实际情况靠近[18] [20], 将模拟条件与实验工况调至相同状态后开始运行, 所得模拟结果与实验结果见表 3。根据表中数据对比分析可知, 模拟结果与实验结果之间具有良好的一致性, 证明了本文所建模型的可行性。

Table 3. Simulation results and experimental results

表 3. 模拟结果与实验结果

产气组分	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄
实验值	47%~49%	24%~26%	20%~22%	5%~7%
模拟值	50.20%	23.00%	21.13%	5.67%

针对验证通过的模型, 采用灵敏度分析进一步研究。原料选自文献[21]中生活垃圾与松木锯屑, 经基准换算和高低热值转换处理后的原料特性分析数据见表 4。混料总质量流量为 0.72 kg·h⁻¹, 气化剂选用水蒸气-氧气, 初步设置的操作参数见表 5。

Table 4. Characteristic analysis data of domestic waste and pine sawdust

表 4. 生活垃圾与松木锯屑的特性分析数据

原料	工业分析/%				元素分析/%					低位热值/MJ·kg ⁻¹
	M	FC	V	A	C	H	O	N	S	
生活垃圾	7.55	26.86	55.47	17.67	65.08	6.06	9.20	1.63	0.35	25.10
生物质	11.70	14.50	85.05	0.45	57.42	4.53	36.01	1.13	0.45	18.46

Table 5. Initial conditions of process simulation

表 5. 过程模拟的初始工况

操作变量	原料混合比(MSW:BIOMASS)	气化温度/°C	水蒸气流量/kg·h ⁻¹	氧气流量/kg·h ⁻¹
参数值	60:40	700	0.12	0.03

3. 模拟结果与讨论

3.1. 原料混合比对模拟结果的影响

在保持其他运行条件不变的情况下, 改变原料混合比对共气化结果的影响见图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)。随着混合原料中生活垃圾的占比越来越小, H₂ 体积分数以缓慢的速度不断增加, CO 体积分数一直减小, 但两者变化幅度均不大, 其他合成气组分的体积分数无明显变化。对比生活垃圾和生物质的物料性质可以发现, 前者固定碳及 C 元素含量相比后者较高, 因此当生活垃圾占比减小时, 混合原料中的固定碳及 C 元素含量随之减少, 此时碳和水蒸气的含量之比减小, 不利于 R6 正向进行, 却可以促进 R8 生成 H₂, 因此合成气组分中 H₂ 体积分数增加, CO 体积分数减小。总体来看, 原料混合比对共气化产物分布产生

的影响不大, 原因可能是生活垃圾与生物质的 C 含量相差不大。

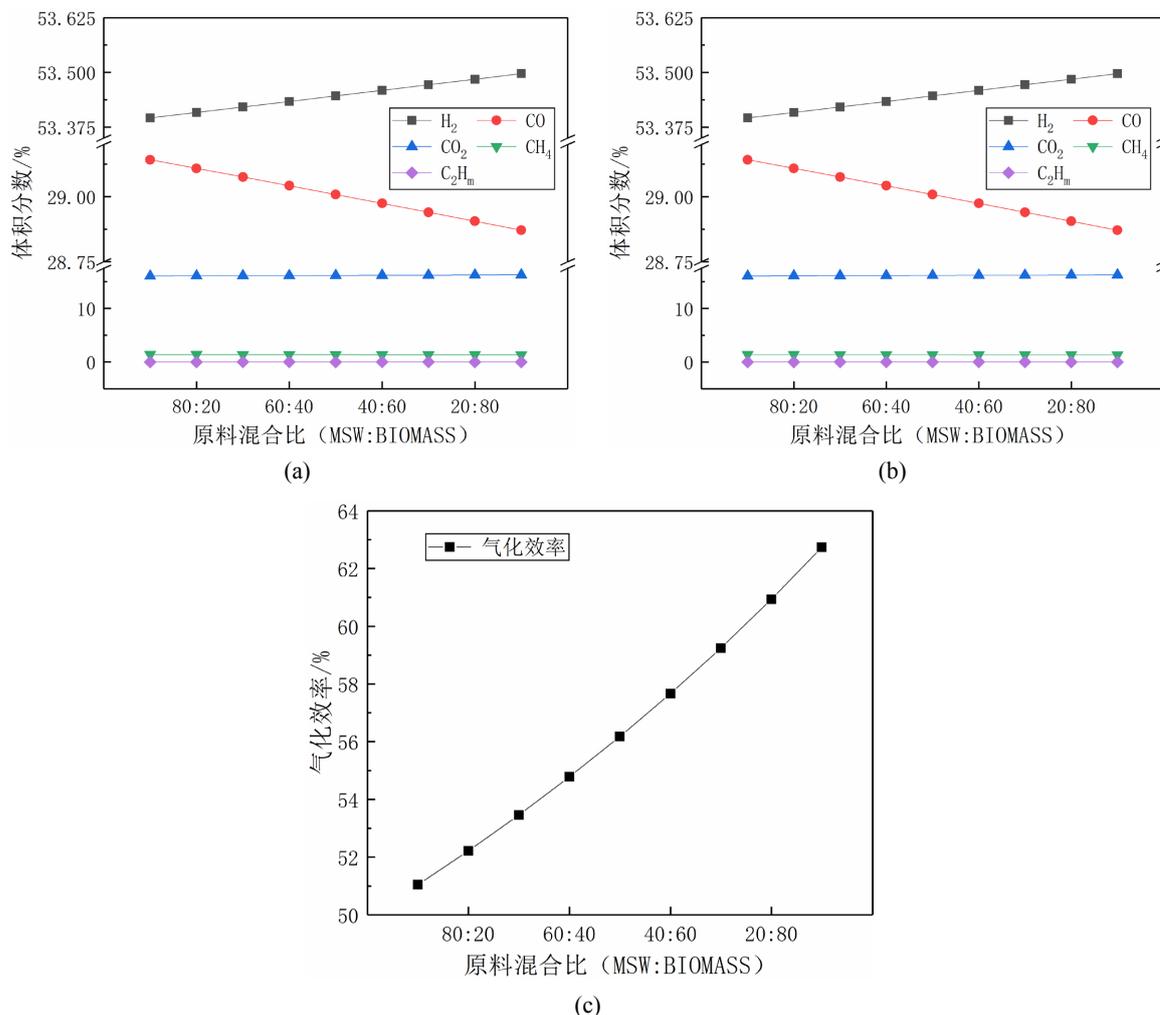


Figure 2. Effect of raw material mixing ratio on simulation results
图 2. 原料混合比对模拟结果的影响

气体低位热值随之从 $9.94 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ 降至 $9.89 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$, 干气产率从 $1.26 \text{ Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $1.21 \text{ Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 。气体低位热值与产气分布状况之间具有十分密切的联系, 由于合成气组分中 H_2 体积分数增加, 而 H_2 热值偏小, 并且在可燃气体中热值较大的 CO 所占比例越来越小, 就导致了气体低位热值的下降。造成干气产率变化趋势的原因则可能是混合原料性质的变化使得气体产物中的副产气含量增多, 而合成气产量减少, 同低位热值一样, 干气产率降低的幅度也不太明显。气化效率有明显的上升趋势, 从 51.04% 提高到了 62.74% , 由此可见, 即使气体低位热值和干气产率均减小, 但原料混合比变化引起的进料热值降低对气化效率的影响更为突出, 这主要源于生物质的低位热值要明显低于生活垃圾。若要保证生活垃圾与生物质共热解气化系统的各指标均衡, 可以选取适中的原料混合比, 如 $50:50$ 及其接近的比例等。

3.2. 气化温度对模拟结果的影响

气化温度是影响气化特性关键参数之一, 对合成气组分分布、气化效率等有很大影响, 反应器温度在 700°C 以后, 气化效率、合成气中的可燃组分浓度、合成气气体热值均与反应器温度呈正相关。其对

模拟结果的影响见图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)。

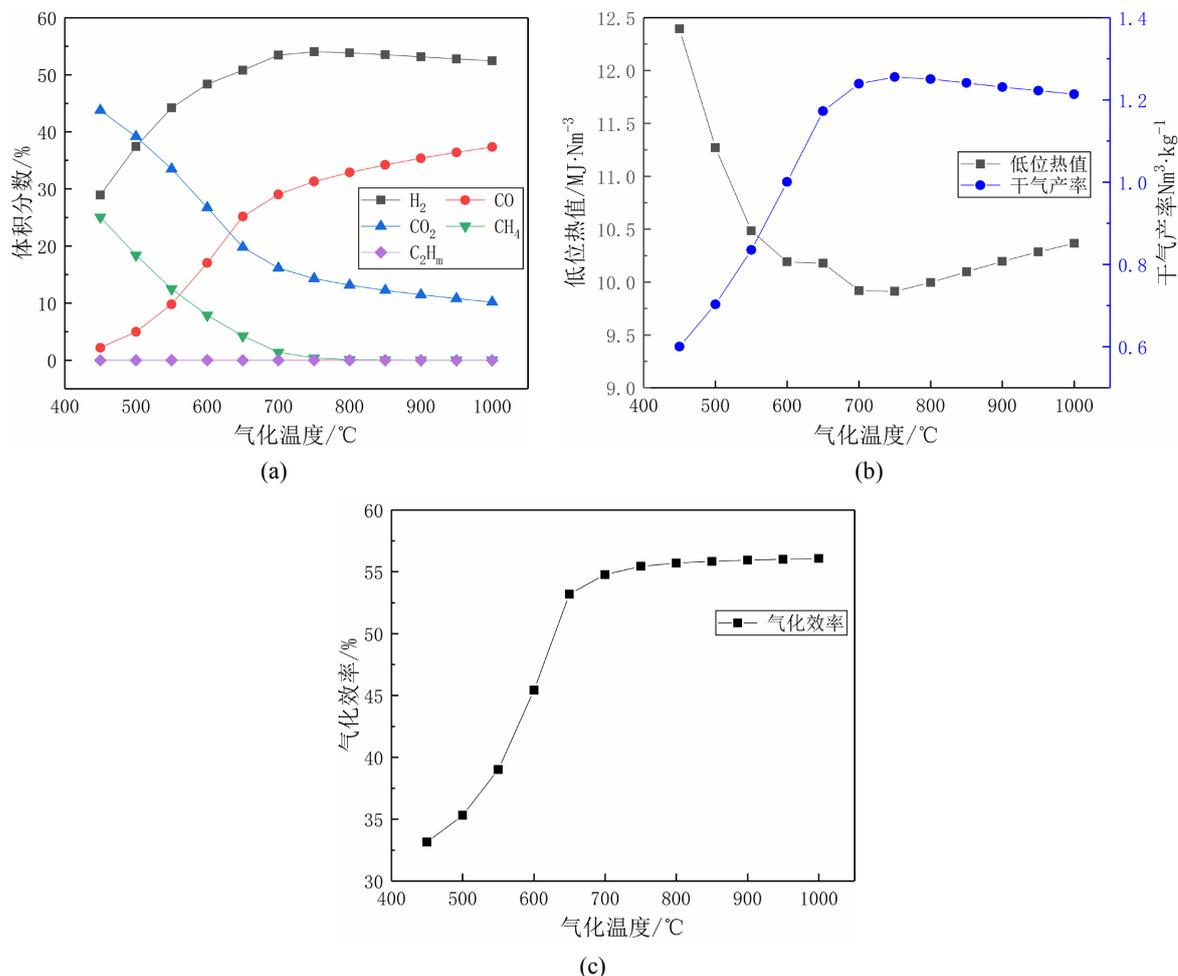


Figure 3. Effect of gasification temperature on simulation results
图 3. 气化温度对模拟结果的影响

在 450°C~750°C 期间, 气化温度的提升大大增加了可燃气组分的体积分数, 尤其是 CO 从最初 28.95% 不断增加至 54.03%, H₂ 体积分数同样从 28.95% 迅速提升到 54.03%, 相反, CO₂ 体积分数则在此期间快速降低, CH₄ 体积分数变化规律与 CO₂ 一致。在气化温度达到 750°C 以后, 所有产物的变化趋势逐渐平稳。提高气化温度, 可以增强焦炭与气化介质间的扩散作用而促进物料转化, 还会促进可逆反应朝着吸热方向发生, 因此 R6、R7 会朝着正反应方向移动, 由于以上两个反应的平衡常数差异较大, 反应温度的提高更利于 CO 含量的增加, 同时 H₂ 含量也会增加。不仅如此, CO₂ 和 C 会发生 R5 逆反应生成 CO, 如此会消耗 CO₂ 而生成大量 CO。CH₄ 体积分数严重下降的原因在于 R10、R11 正反应吸热, 反应速率加快, 将 CH₄ 大量消耗, 也增加了 CO 和 H₂ 产量。然而气化温度升至 750°C 时, CH₄ 含量几乎为 0, 这主要是因为水煤气转换反应(R8)受到一定抑制, 甲烷在合成气中的含量会随温度升高而下降, 此时 CO₂ 含量继续减少, CO 含量保持增长, 而 H₂ 含量稍减。

气体的低位热值随着温度的升高而降, 这是因为温度的升高, 甲烷的蒸气重整反应剧烈, 消耗大量甲烷从而使得合成气中甲烷的含量降低, 而甲烷的热值较大, 其体积分数减小, 使得热值相应减小, 先从 450°C 时的 12.40 MJ·Nm⁻³ 降至 750°C 时的 9.91 MJ·Nm⁻³, 750°C 以后 CH₄ 含量几乎为 0, 此时气体热值则因高热

值气体 CO 含量增加而略增至 $10.37 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ，所以高温对制备高热值燃气使不利的。干气产率的变化趋势则完全相反，从 $0.60 \text{ Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至 $1.26 \text{ Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ ，而后降至 $1.21 \text{ Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ ，主导其变化规律的因素为产氢情况。温升有利于气化效率的显著提升，从 33.15% 开始增加，最后可以达到 56.08%。与合成气组分、低位热值及干气产率一样，气化效率的变化趋势在 750°C 时就达到了一个相对稳定的状态。 750°C 前气化温度对生活垃圾与生物质共热解气化系统的各指标影响很大，促进了两者的共气化， 750°C 后各指标基本稳定。此外，气化温度过高对设备要求也相应增高，不利于设备的经济性选择。在实验室研究中气化温度常常是通过电加热程序来控制，但是在实际生产的应用中，外热式加热由于其价格昂贵所以不会大规模应用，所以对热源的要求相对实验室而言更为严格。所以结合设备要求及成本考虑，最佳气化温度应为 750°C 。

3.3. 水蒸气流量对模拟结果的影响

气化剂中引入适量水蒸气可以提高合成气产品的品质，但水因其比热容较大，通入气化炉中会吸收大量热量造成炉内温度降低，若要维持原有的温度，气化炉的能耗也相应增大，因此如果一味的增加蒸气流量势必加大能耗，不利于设备上的经济性应用。见图 4(a)、图 4(b) 和图 4(c)，即为水蒸气流量对共气化特性的影响。水蒸气流量的逐步增加，会提高 H_2 和 CO_2 体积分数， CO 和 CH_4 体积分数则呈现相反的变化趋势。

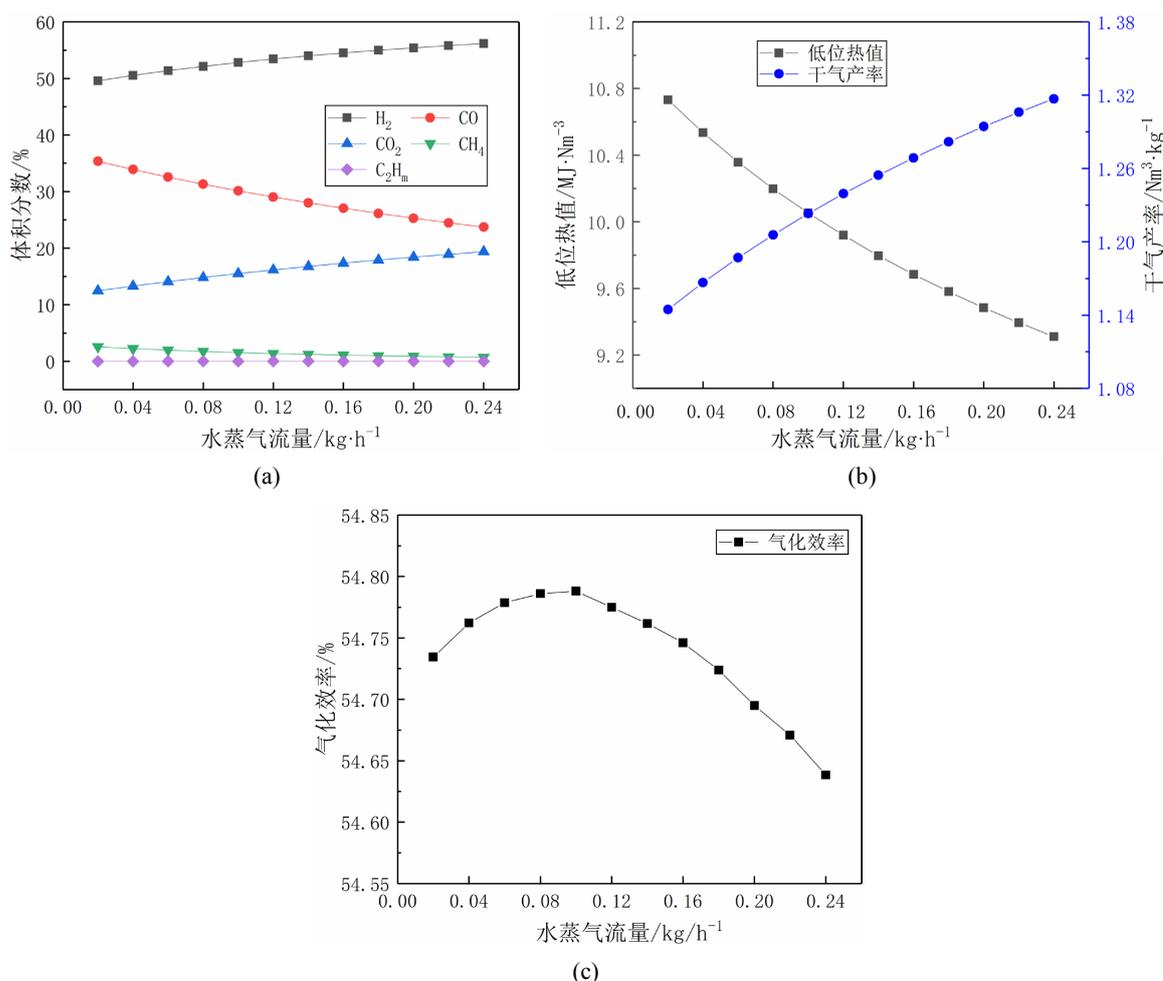


Figure 4. Effect of water vapor flow on simulation results

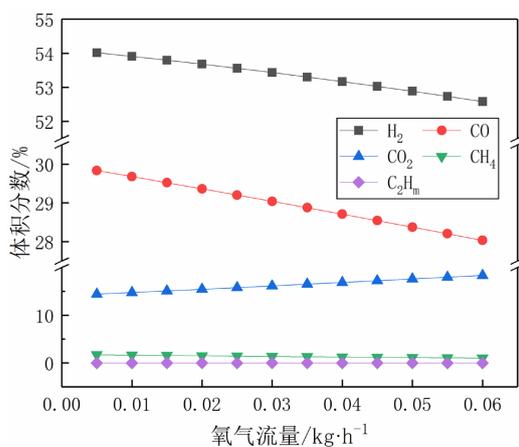
图 4. 水蒸气流量对模拟结果的影响

可从三个角度出发分析水蒸气流量的增加对产气组分分布的影响：1) 水蒸气作为反应物，其浓度增加会导致 R6、R7、R10、R11 快速生成 H_2 ，使 H_2 体积分数增大， CH_4 体积分数减小，同时也会加剧 R8 生成 H_2 和 CO_2 ，进一步增加 H_2 产量， CO_2 含量也增加， CO 含量则随之减少；2) 水蒸气分压会随水蒸气流量的变化而变化，其增加有利于上述反应正向进行的程度加深；3) 过量水蒸气的加入会造成气化炉内温度的降低，从而加大对 R8 向正向移动的影响程度。气体低位热值从 $10.73 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ 逐步降至 $9.31 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ，这主要是因为高热值可燃气体 CO 和 CH_4 含量减少，其对热值的贡献较大，低热值可燃气体 H_2 和不可燃气体 CO_2 两者含量增多，所以热值减小。干气产率从 $1.14 \text{ Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 逐步升至 $1.32 \text{ Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其原因在于水蒸气促进了物料的热裂解和蒸气重整反应。气化效率先增后减，从原来的 54.73% 增至水蒸气流量为 $0.1 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 时对应的 54.79%，这是因为水蒸气流量的增大，使碳氢化合物的水蒸气重整反应占主要地位。然后减至最后的 54.64%，其总体变化趋势较小，其值均保持在 54% 以上。气化剂中水蒸气流量对生活垃圾与生物质共热解气化系统的各指标影响效果不同，从上述的分析可以看出，蒸气的加入量不仅影响气化结果，还影响设备能耗，因此设置合理的蒸气量需要综合考虑以上两个因素，并且增加蒸气量不仅使得可燃气体成分的浓度上述，但也使得合成气成分中二氧化碳的体积分数增大，而二氧化碳的增加不仅对和成气的热值没有作用，还影响了合成气的品质，因此水蒸气流量的设置应同时保证气化效率和合成气成分，基于以上两种目标，水蒸气流量宜设为 $0.1 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

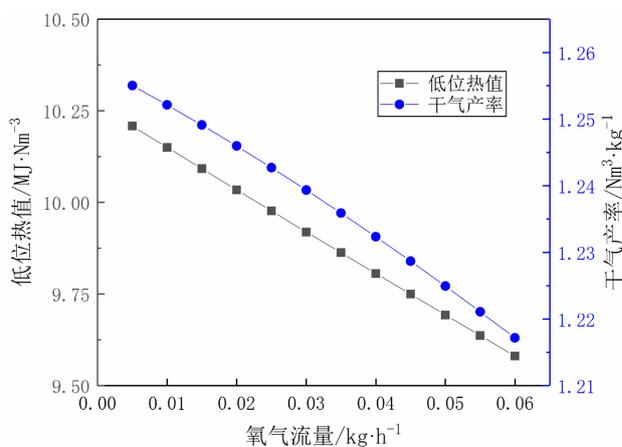
3.4. 氧气流量对模拟结果的影响

保持其他操作条件不变，气化剂中氧气的引入同样对共气化反应特性具有重要影响，其作用效果见图 5(a)、图 5(b) 和图 5(c)。增加氧气流量， H_2 、 CO 、 CH_4 体积分数均减小，仅有 CO_2 体积分数增大。为了保证高品质的合成气及高效的气化率，所研究的氧气流量变化范围较小，因而合成气各组分的体积分数整体而言变化不大。氧气流量的增加可加剧氧化反应，使可燃气体 H_2 、 CO 、 CH_4 进行完全燃烧，这些气体因此消耗，产生了大量的 CO_2 。虽然氧化反应放热可提升气化炉温度，为其余反应供给热量，有利于共气化过程的充分进行，但是这种影响受低氧浓度的限制而不占据优势。

气体低位热值从 $10.21 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ 降低至 $9.58 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ，干气产率也从 $1.26 \text{ Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $1.22 \text{ Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 。气体低位热值的降低与可燃气体 H_2 、 CO 、 CH_4 含量的减少以及非可燃气体 CO_2 含量的增加有关，干气产率的降低则可能是 H_2 、 CH_4 等物质燃烧生成水蒸气后从合成气中分离而造成的结果。气化效率的下降趋势显而易见，该指标从 57.08% 降到了 51.96%。气化剂中氧气流量的提高对生活垃圾与生物质共热解气化系统的各指标均产生负面影响，因此在气化剂中添加的氧气量宜少。



(a)



(b)

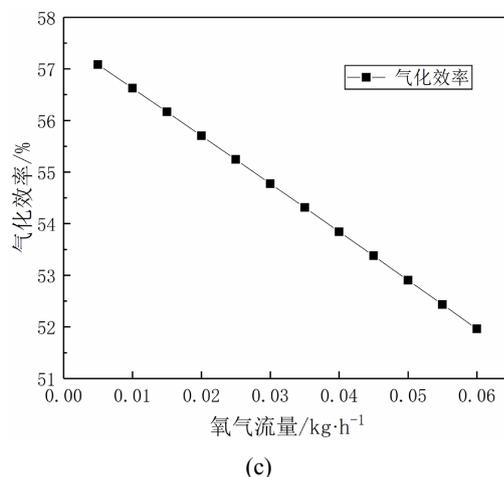


Figure 5. Effect of oxygen flow on simulation results
图 5. 氧气流量对模拟结果的影响

3.5. 共热解气化模拟结果的优化

总结以上分析, 综合考虑生活垃圾与生物质共热解气化特性, 可以得出以下结果: 生活垃圾与生物质的含碳量差异较小, 所以原料混合比对气化产物分布产生的影响不大, 若在保证各指标均衡, 原料混合比的选取可为 50:50 及与之相接近的比例; 通过各指标的变化趋势可以得出, 750℃ 以前气化反应温度对共气化特性的影响相当大, 但在气化温度达到 750℃ 以后, 所有指标都趋于稳定, 若结合设备运行及维护成本的考虑, 最佳气化温度应为 750℃; 水蒸气流量对各指标影响效果不同, 若在保证气化效率最高, 水蒸气流量需设为 0.1 kg·h⁻¹; 氧气流量的提高对各指标均产生负面影响, 因此在气化剂中添加的氧气量宜取最小值 0.005 kg·h⁻¹。

由此可得优化后的模型操作参数, 详见表 6。然后, 将模型的各个操作参数设置为对应的最优工况点后再运行模拟, 所得结果见表 7。

Table 6. Optimal conditions for process simulation

表 6. 过程模拟的最优工况

操作参数	原料混合比(MSW:BIOMASS)	气化温度/℃	水蒸气流量/kg·h ⁻¹	氧气流量/kg·h ⁻¹
参数值	50:50	750	0.1	0.005

Table 7. Simulation results under optimal conditions

表 7. 最优工况下的模拟结果

气化指标	产气组分/%				低位热值/MJ·Nm ⁻³	干气产率/Nm ³ ·kg ⁻¹	气化效率/%
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄			
模拟结果	54.43	33.23	11.77	0.57	10.27	1.26	70.10

4. 结论

本文基于 Aspen Plus 平台, 运用 Gibbs 自由能最小化原理, 建立了生活垃圾与生物质共热解气化热力学平衡模型, 所得模拟结果与实际情况吻合良好, 验证了所建模型的可靠性, 对其进行研究分析, 结论如下:

1) 结合对生活垃圾占比、气化温度、水蒸气流量、氧气流量等因素,对合成气体积分数、气体低位热值、干气产率、气化效率等影响的考虑,将原料混合比设定为 50:50 左右,气化温度设置在 750℃,水蒸气流量为 0.1 kg·h⁻¹,氧气流量为分析时最小值 0.005 kg·h⁻¹。

2) 将模型调至合适的操作条件后运行,可优化模拟结果,得到的产气组分中 H₂ 占比 54.43%,CO 占比 33.23%,CO₂ 占比 11.77%,CH₄ 占比 0.57%;合成气低位热值为 10.27 MJ·Nm⁻³,干气产率为 1.26 Nm³·kg⁻¹,气化效率为 70.10%。

参考文献

- [1] 奚爽. 固体成型玉米秸秆气化特性研究及气化炉设计[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [2] Ramzan, N., Ashraf, A., Naveed, S., *et al.* (2011) Simulation of Hybrid Biomass Gasification Using Aspen Plus: A Comparative Performance Analysis for Food, Municipal Solid and Poultry Waste. *Biomass and Bioenergy*, **35**, 3962-3969. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.005>
- [3] Begum, S., Rasul, M.G., Akbar, D., *et al.* (2013) Performance Analysis of an Integrated Fixed Bed Gasifier Model for Different Biomass Feedstocks. *Energies*, **6**, 6508-6524. <https://doi.org/10.3390/en6126508>
- [4] Gagliano, A., Nocera, F., Bruno, M., *et al.* (2017) Development of an Equilibrium-Based Model of Gasification of Biomass by Aspen Plus. *Energy Procedia*, **111**, 1010-1019. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.264>
- [5] 李洪亮, 李金鸿, 李彦豪, 等. 稻壳在水蒸气中气化实验研究[J]. 化工进展, 2017, 36(11): 4017-4021.
- [6] 战庭军. 典型生物质热解和气化的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [7] 江龙, 黄丹, 胡松, 等. 谷壳热解/水蒸气气化焦油析出特性研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(12): 2553-2558.
- [8] 陈翀. 生活垃圾固定床热解气化特性的实验研究及其过程模拟[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [9] 张藤元, 冯俊小, 冯龙. 基于 Aspen Plus 的生活垃圾热解气化模拟及正交优化[J]. 环境工程, 2022, 40(2): 113-119.
- [10] 袁浩然, 鲁涛, 熊祖鸿, 等. 城市生活垃圾热解气化技术研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(2): 421-427.
- [11] Zhao, Y., Wen, H. and Xu, Z. (2006) Conceptual Design and Simulation Study of a Co-Gasification Technology. *Energy Conversion and Management*, **47**, 1416-1428. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.08.024>
- [12] Hu, Y., Pang, K., Cai, L., *et al.* (2021) A Multi-Stage Co-Gasification System of Biomass and Municipal Solid Waste (MSW) for High Quality Syngas Production. *Energy*, **221**, Article ID: 119639. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119639>
- [13] 张强. 生活垃圾热解气化处理工艺开发与过程模拟分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [14] 沈元兴. 生物质固体有机废弃物气化技术与建模分析[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2018.
- [15] 靳幻. 生物质与水蒸气高温气化过程模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [16] 刘忠慧. 循环流化床煤气化工艺的模拟与优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2018.
- [17] 曹斌奇, 刘运权, 王夺. 松木屑在氧气-水蒸气-二氧化碳氛围下的气化模拟研究[J]. 生物质化学工程, 2017, 51(3): 14-20.
- [18] 郑丰. 生活垃圾与玉米秸秆共水蒸气气化制备富氢燃气的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [19] 刘作龙. 在不同气化剂条件下生物质气化模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- [20] 邓文义, 于伟超, 苏亚欣, 等. 生物质热解和气化制取富氢气体的研究现状[J]. 化工进展, 2013, 32(7): 1534-1541.
- [21] Cao, Y., Fu, L. and Mofrad, A. (2019) Combined-Gasification of Biomass and Municipal Solid Waste in a Fluidized Bed Gasifier. *Journal of the Energy Institute*, **92**, 1683-1688. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.01.006>