

生物质气化炉模拟与设计方法研究进展

宋子芸¹, 陶俊宇^{1,*}, 胡永杰², 夏晒歌², 颜蓓蓓², 李健²,

周生权², 程占军², 陈冠益¹

(1. 天津商业大学 环境能源+X 创新实验室/机械工程学院, 天津 300134;

2. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: 生物质作为一种一次能源和可再生能源, 对我国能源领域的低碳、可持续发展具有重要意义。气化是生物质能源化利用的高效、清洁技术, 而气化炉设计是影响生物质气化系统运行效果的关键因素之一。本文系统总结了国内外生物质气化炉的种类、设计参数与研究现状。首先介绍了各种生物质气化炉模拟方法, 包括传统经验模型、人工神经网络等方法, 这些模拟方法对于深入理解气化过程中的关键参数非常重要。其次, 本文讨论了生物质气化炉的设计方法, 包括经验设计法、半经验设计法和反向设计方法等方面的研究, 这些设计方法的发展旨在提高气化炉的效率和增加生产的可持续性。最后, 本文强调了生物质气化炉模拟与设计方法在推动可再生能源领域的重要性, 并对生物质气化炉模拟与设计领域未来的发展方向进行了探讨, 以期为本领域技术革新与应用提供借鉴参考。

关键词: 生物质; 模拟方法; 气化炉; 气化技术

中图分类号: X705

文献标识码: A

Research advances in simulation and design of biomass gasifiers

SONG Ziyun¹, TAO Junyu^{1,*}, HU Yongjie², XIA Shaige², YAN Beibei², LI Jian²,
ZHOU Shengquan², CHENG Zhanjun², CHEN Guanyi¹

(1. *Interdisciplinary Innovation Lab for Environment & Energy, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China*; 2. *School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China*)

Abstract: Biomass plays a crucial role as both a primary and renewable energy source, making significant contributions to China's low-carbon and sustainable development in the energy sector. Gasification, an efficient and clean technology for biomass energy utilization, holds great importance. Gasifier design is a key factor that impacts the operational effectiveness of biomass gasification systems. This paper provides a comprehensive overview of the types, design parameters, and research status of biomass gasifiers, both domestically and internationally. Firstly, various biomass gasifier simulation methods are introduced, including traditional empirical models, artificial neural networks, and other techniques. These methods are crucial for gaining an in-depth understanding of key parameters in the gasification process. Secondly, this paper explores different design methods for biomass gasifiers, such as empirical design methods, semi-empirical design methods, and reverse design methods. These approaches have been developed with the aim of enhancing gasifier efficiency and promoting production sustainability. Lastly, this paper emphasizes the significance of biomass gasifier simulation and design methods in advancing renewable energy. It also discusses the future development direction of biomass gasifier simulation and design, with the goal of providing a valuable reference for technological innovation and practi-

收稿日期: 2023-09-14

DOI: 10.20078/j.eep.20231104

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1601100); 天津市自然科学基金重点项目(22JCZDJC00530)

作者简介: 宋子芸(1997—), 女, 上海人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境能源机械。E-mail: songziyun@stu.tjcu.edu.cn

通讯作者: 陶俊宇(1992—), 男, 山东威海人, 讲师, 主要研究方向为生物质气化热解技术。E-mail: taojunyu@tju.edu.cn

cal application in this field.

Keywords: Biomass; Simulation method; Gasifier; Gasification technology

0 引言

化石能源是人类目前依赖的主要能源,且需求量日益增加。然而化石能源不可再生且储量有限,其使用也带来了严重的环境污染与碳排放问题,因此亟待开展清洁可再生能源替代的研究。生物质能具有与化石燃料接近的燃烧特性,且具有可再生性与零碳排放性,是最有希望在未来替代石油的新型能源之一^[1]。

气化是生物质能源化利用的重要方式,通过干燥、热解、氧化和还原气化四个步骤,将生物质转化为可燃气产物。上述过程均发生在气化炉内,因而气化炉的设计水平会显著影响生产合成气的质量^[2]。生物质气化炉的原理如图1所示。传统的气化炉设计通常是按照工程经验制造具有所需规模的气化炉,然后调整运行参数使其符合原料和设计目标^[3]。这种基于经验的生物质气化炉设计方法存在两方面瓶颈:(1)不同的生物质原料具有不同的化学成分和燃料性能^[4],因此根据某特定的生物质原料设计的气化炉可能对其他原料难以达到高运行效率;(2)生物质气化项目具有不同的设计目标^[5],因此规模相近的生物质气化项目可能具有差异显著的设计需求。上述瓶颈使得传统经验设计所得的生物质气化炉往往难以达到高水平的效果。近年来,为了使气化炉设计满足生物质原料与设计目标的需求,越来越多的研究者采用理论模型或经验模型^[5]对气化炉炉体、供风系统、水蒸汽介质循环反应系统、净化器等结构的参数进行模拟与优化设计^[6]。

模型的建立有助于解析炉内的流动、燃烧、传热和污染物排放等过程,可以预判运行参数对气化炉性能的影响,对系统进行优化,提高燃烧效率并减少污染物的排放,进而减少气化炉运行和投资费用;模型的建立有助于明晰气化炉动态运行及变负荷运行的特性,从而优化对气化炉运行过程的控制;模型的建立有助于气化炉的大型化发展,降低大型气化炉设计的实验成本^[7]。从建模原理的角度,气化模型可以划分成两种类型:一种是理论模型,另一种是经验模型。其中理论模型包括动力学模型、热力学模型、网络模型等,经验模型则以人工神经网络模型为主。此外,也有部

分前沿研究将两类模型结合,构建半理论-半经验模型,以期取得更好的预测精度。

通常来说,建模是气化炉设计的第一步,理论模型也为描述气化炉基本运行机制和性能提供了重要依据。模拟水平高的气化炉模型可以更准确地描述气化过程中的各种物理、化学和热力学现象。精确的模拟结果有助于设计者更全面地了解气化炉的性能特征,提前发现潜在的问题,从而设计出更可靠、稳定的气化炉。而在设计生物质气化炉时,模型的预测结果通常需要与实验数据进行比较验证。实验数据可以用于改进和校准模型,确保模型的准确性和可靠性。通过反复的模型-实验循环,可以逐步优化气化炉的设计和操作参数。总体而言,生物质气化炉的设计与模型之间是相辅相成的关系。模型为设计提供理论指导和优化方向,而设计和实验数据的反馈也为模型提供验证和改进的机会,共同推动气化炉技术的进步与应用。

基于上述背景,本文总结了生物质气化炉的种类及其参数对性能的影响,介绍了国内外关于生物质气化炉的研究概况,概述了生物质气化炉的设计方法以及模拟方法的研究进展,探讨了目前气化炉设计和模拟上存在的瓶颈问题,并提出了可能的解决方法,以期为本领域技术革新与应用提供借鉴。

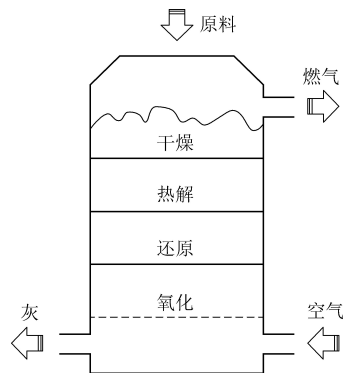


图1 生物质气化炉的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of biomass gasifier

1 生物质气化炉种类与基本设计参数

1.1 生物质气化炉种类

1.1.1 以床型/燃料在炉内的运动状况分类的气化炉炉型

以床型/燃料在炉内的运动状况进行分类,可

将气化炉分为移动床(又叫固定床)、沸腾床(又叫流化床)、气流床等。其中,固定床气化炉是一种传统的气化设备,生物质材料在气化床内固定并进行气化反应,并以炉内气流运动的方向和组合为依据,将其主要分成4种炉型,分别是:下吸式气化炉、上吸式气化炉、横吸式气化炉、开心式气化炉^[8]。固定床气化炉适用于小规模、低产能的生物质气化系统。其优点为气化效率高,产气量大,适用于大规模气化项目,对生物质材料适应性强,产气质量较高。其瓶颈体现在设备复杂,投资成本高,操作和维护相对复杂,对气化剂的需求较大。

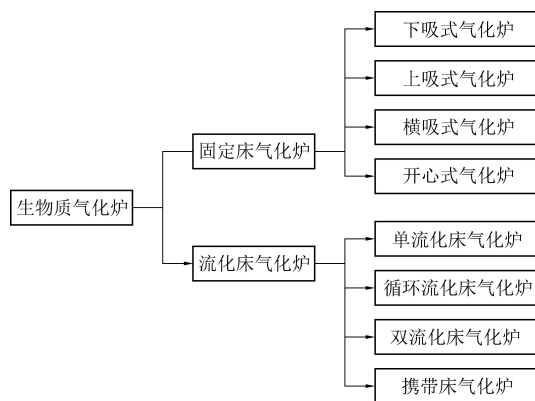


图2 生物质气化炉分类

Fig. 2 Classification of biomass gasifiers

流化床气化炉的名称源于气化过程中的反应介质,气化剂通过固体床层,使床层颗粒呈现流化状态。根据流化床的炉体结构和气化过程中物料的流动状态,将流化床气化炉分为单流化床气化炉、循环流化床气化炉、双流化床气化炉和携带床气化炉。具体分类如图2所示。其优点为气化效率高,产气量大,适用于大规模气化项目,对生物质材料适应性强,产气质量较高。其瓶颈体现在投资成本高,操作和维护相对复杂,对气化剂的需求较大^[9-10]。

气流床气化炉因其气化过程中使用空气作为氧化剂得名。其优点为适应性强,可以处理多种类型的生物质,包括木屑、秸秆、稻壳等;由于使用空气作为氧化剂,气流床气化炉中的碳氢化合物可以在较高温度下完全燃烧,从而有较高的燃烧效率;因气流床气化炉中的固体颗粒呈现流化状态,气化过程中产生的灰渣被有效地带出炉外,使生产气体的灰渣含量较低。其瓶颈主要体现在气化温度难以精确控制;有 NO_x 的生成,需要进一步处理以满足排放标准;能耗较高。

1.1.2 以反应压力分类的气化炉炉型

根据气化反应器的压力分为常压气化(0.11~0.15 MPa)和加压气化(0.15~2.50 MPa)。常压气化时气化反应器的压力为微负压或微正压。加压气化的原理与常压气化相同,但加压气化装置的构造、操作、维护等都比常压气化复杂得多,硬件加工制造的难度也大许多,且加压气化得到的气体组成也并不比常压气化的气体组成有明显优异,但加压气化的优势在于可以使气化炉的设计小型化。

1.2 气化炉设计参数

影响气化炉性能的主要设计参数有:气化炉的几何形状(直径)、进料量、生物质燃料粒径、当

量比、空气表面速度、生物质含水量、生物质类型(摩尔比H/C)等^[11]。

1.2.1 气化炉的几何形状和生物质类型

JUAN F. PeREZ 等的研究表明,生物质气化火焰前沿温度不随反应器直径而显著变化,但受生物质类型而显著变化,H/C较小时,气化火焰的前沿温度显著增加^[12]。通过参数之间的抵消关系可以解释^[12-13]反应器几何形状(直径)和生物质类型对最高工艺温度、生产气体热值和生产气体中的焦油浓度也没有显著影响。

随着反应器直径的增加(绝热反应器越多),火焰前沿速度、生物质消耗率和燃料/空气当量比略有增加,但产物气体的品质也得到改善(热值更高)^[14]。在生物质类型方面,当使用挥发分含量较高的生物质时,火焰前沿速度和发电能力显著提高^[15]。

1.2.2 进料量、生物质燃料含水量、生物质燃料粒径和空气表面速度

传质面积会随着燃烧颗粒直径增加而增加,因此生物质燃料含水量随着燃烧颗粒直径增加而增加^[12]。用具有较高火焰前沿温度的燃料作为生物质气化炉的燃料,则可以有更高的功率。

生物质燃料含水量的增加将导致最高工艺温度和生物质消耗率的降低,影响了反应化学计量和速度,当量燃料/空气比和火焰前沿速度降低^[13]。随着空气表面速度的增加,燃料/空气当量比显著降低。粒径的增加导致生物质消耗率、当量燃料/空气比、最高工艺温度降低,从而降低火焰前沿速度。

1.2.3 当量比和空气流量

燃料/空气当量比增加时,工艺温度降低,热值增加,较高的空气表面速度也导致更高的生物质消耗率,进而导致更高的最高工艺温度,从而产

生更高的火焰前沿速度^[12-13]。

研究表明,通过增加进入实验反应器的空气流量,热化学过程可以从气化转变为燃烧^[12-13]。当火焰前沿达到其最大速度时,气化过程结束。

2 生物质气化炉的国内外研究状况

2.1 国内生物质气化炉发展概况

在 20 世纪 80 年代初期,我国自主开发出了 200 kW 的由固定床气化炉和内燃机组合而成的新型的 200 kW 稻壳发电机组,从此,对生物质汽化炉的研究便得到了迅速的发展。从 80 年代开始,中国林科院林产化学工业研究所研制开发了集中供热、供气的气化炉,并且先后在黑龙江、福建得到工业化应用,气化炉的最大生产能力达 6.3×10^6 kJ/h,建成了用枝桠材削片处理,气化制取民用煤气,供居民使用的气化系统^[16-17]。山东省能源研究所研究开发了下吸式气化炉,主要用于秸秆等农业废弃物的气化,在农村居民集中居住地区得到较好的推广应用,并已形成产业化规模^[18-19]。广州能源所开发的以木屑和木粉为原料,应用外循环流化床气化技术,制取木煤气作为干燥热源和发电,并完成发电能力为 4 000 kW·h 的气化发电系统。20 世纪 90 年代中期,中国科学院广州能源研究所进行了流化床气化器的研制并与内燃机结合组成了流化床气化发电系统,使用木屑的 1 MW 流化床发电系统已经投入商业运行^[18, 20]。中国林科院林产化学工业研究所 2001 年开展国家“十五”攻关课题“160 kW 流

化床生物质气化发电机组技术产业化研究”,并在安徽友勇米业有限公司粮食加工厂建成示范装置,原料可用稻草麦草等软秸秆和稻壳等农业剩余物,燃气热值稳定输出 5.2 MJ/m³ 以上,最高达 5.8 MJ/m³,焦油含量小于 20 mg/m³,已经投入运行,通过经济计算,有明显的直接经济收益,并在安徽望江联河米业建立了一套 400 kW 生物质气化发电机组。近年来,中国林业科学研究院林产化学工业研究所针对农林生物质原料的特点,开发了新型锥形流化床生物质气化炉并设计了配套的自热式固定床焦油裂解炉^[21-22],成功实现了焦油的高温裂解与催化裂解,并将燃气中焦油在内的可凝性液体质量浓度降到了 10 mg/m³ 以下,得到了高品质的生物燃气^[23-24]。

我国部分生物质气化炉情况见表 1。

2.2 国外生物质气化炉发展概况

在上世纪 70 年代的石油危机后,全球各国意识到发展生物质能源的重要性,北美在 30 年间,安装了 1.2 万台平均装机容量为 1 MW 的大型气化炉。经过几十年的发展,欧美等发达国家对生物质气化炉的研究取得了重要的突破,有能力制造气化炉的制造商超过 60 家^[25]。相较于国内的生物质气化炉,国外的气化炉自动化程度较高、规模较大,应用主要以供热、发电和合成液体燃料为主。近年来,受可再生能源发展政策的鼓励,美国天然气技术研究所开发适用于煤炭、煤/生物质联和气化的单级流化床气化炉(U-GAS)^[26]。国外主要生物质气化炉情况见表 2。

表 1 国内部分生物质气化炉情况^[27]

Table 1 Status of major biomass gasifiers in China^[27]

气化炉类型	气化效率/%	热值/(MJ·m ⁻³)	规模	应用	研究单位
上吸式 GSQ-1100	75.0	5.0	1 080~2 630 kJ/h	供热	中科院广州能源所
下吸式 ND 系列	65.0~75.0	4.8~6.1	500~650 MJ/h	供热	中国农业机械化研究院
下吸式 HQ/HD-280	70.0	4.5~5.0	8~10 m ³ /h	户用气化	中国农业机械化研究院
下吸式 XFL	72.0~75.0	5.0	100~500 户	集中供气	山东能源研究所
热管式气化炉	/	8.0~10.0	/	热电联产	南京工业大学能源学院
LZ 干馏热解式气化炉	28.8	14.0	1 000 户	集中供气	大连市环科设计研究院
GB-210W-22000 型干馏气 化热解气化炉	100.0	/	40 t/d	城市生活垃圾处理	上海万强科技开发有限公司
锥形流化床气化炉	67.5	4.0~6.0	3 MW	供电、供气、供热	中国林业科学研究院 林产化学工业研究所
下吸式固定床气化炉	75.0	5.5~6.5	0.05 MW	发电	辽宁省能源所
流化床气化炉	78.0	/	4 MW	发电	中科院广州能源所

注: * 缺省数据为未有公开报道

表 2 国外主要生物质气化炉情况^[28]Table 2 Status of major biomass gasifiers abroad^[28]

国家及公司	气化炉类型	原料	效率/%	规模/(t·d ⁻¹)	应用
美国 Taylor	双流化床气化炉	可降解垃圾和废木料	发电效率 35.0~40.0	300~400	热电联产
美国 Silvagas	双流化床气化炉	木材	发电效率 35.0~40.0	540	热电联产和柴油
美国 Range Fuels	气流床气化炉	林业废弃物、木材	热效率 75.0	125	乙醇或混合醇
美国 Pearson	气流床气化炉	废木料、锯末、稻秆等	热效率 70.5	43	乙醇或混合醇
德国 CHOREN	气流床气化炉	能源作物、木材	热效率 90.5	198	合成柴油
丹麦 Carbona	鼓泡流化床	木材	发电效率 28.0	100~150	热电联产
芬兰 VIT	循环流化床	林业废弃物和副产物	/	60	合成柴油
芬兰 Foster	循环流化床	塑料、木材、轮胎、枕轨	/	336	热电联产
瑞典 CHRISGAS	循环流化床	木材、秸秆	/	86	热电联产
德国 Uhde	循环流化床	城市生活垃圾	气化效率 81.0	15	燃料油
加拿大 Plasco	等离子体气化炉	城市生活垃圾、塑料	热效率 75.0	100	发电
美国 InEnTec	等离子体气化炉	轮胎、炉渣、医疗废物	/	218	热电联产氢气、甲醇和乙醇

注：* 缺省数据为未有公开报道

3 生物质气化炉模拟方法

建模研究无需依靠昂贵且耗时的仪器。生物质气化建模的重要任务是开发建模方法,以便对实际操作给出更精确的建议指导。

3.1 生物质气化炉理论模拟方法

3.1.1 热解气化模型

(1) 动力学模型

动力学模型可以精确描述气化炉转化机制的动力学反应和生物质气化全过程的化学反应,这对于气化设备的设计、评估和改进至关重要。动力学模型虽是精确和详细的,但计算量很大。应该注意到,模型的复杂性和尺寸随着模型的期望输出而增加,即系统更详细的分析涉及更详细的反应动力学或反应器流体动力学。然而,通过在不同的化学反应类别内进行简化假设,可以降低模型的复杂性,但必须仔细评估简化程度,使其与模型的最终目标保持一致^[28]。FIASCHI 和 MICHELINI^[29]在其研究中采用了一维双相动力学模型,用于探究生物质气化过程。在这一模型中,质量转移是首先发生的阶段。随着温度稳定,表面反应动力学逐渐变得更为显著。HALAMA 和 SPLIETHOFF^[30]的研究中,建立了一个三维模型,用于模拟夹带床中褐煤气化过程,并重点对炭粒子反应进行全面建模。为了解释孔隙和边界层扩散对反应的影响,他们采用了一种有效因子方法,其中考虑了内在的反应动力学,这个方法使得他们能够更好地理解孔隙结构在高温下的行为,包

括表面积、直径、密度、孔隙率和平均孔径等参数。通过引入颗粒级别的反应机制和炭转化函数,他们为炭粒子的气化过程提供了更详细的描述。ONG 等^[31]在研究固定床污水污泥和生物质共气化过程时,根据已有的气化动力学模型,创造性地提出了一种全新的模型。通过将该模型的建模结果与实验数据进行对比,研究者们发现新模型具备较高的预测精确度。此外,他们还进一步探究了操作参数对气化过程的影响规律。数学模型的验证可以通过与不同实验数据的对比来进行。GILTRAP 等^[32]研究者进行了一项关于动力学模型准确性的研究,以此证实模型的可靠性。他们研究评估了之前开发的生物质气化动力学模型^[33],并发现了该模型中存在的问题,发现该模型在假设方面存在缺陷,未考虑热解和裂解反应,这些缺失导致模型过度高估了 CH₄ 的生成,并且无法准确预测 H₂ 的生成。造成这些差异的原因在于模型的假设过于简化,未考虑 O₂ 不仅与焦炭发生反应,还参与了甲烷的燃烧反应。

与平衡模型相比,动力学模型在相对较低的操作温度下更准确。动力学建模结合了反应动力学和反应器流体动力学,模型可分为移动床或固定床、流化床和气流床。平衡模型、动力学模型或两者的结合各有优缺点。平衡模型在公式上较简单,但对于复杂的反应器设计不能得到令人满意的结果,动力学模型在公式上虽然较复杂,但与用于复杂反应器设计的平衡模型相比,它的预测结果更准确。

(2) 网络模型

网络模型首次在煤的脱挥发分中被提出^[34-35], 挥发通常涉及分子水平的展开聚合和再聚合等反应^[36-37], 其机理的四个阶段就是网络模型的基础。由于网络模型考虑到了热解过程中原料的详细结构变化, 所以又被称之为结构模型。在生物质领域的应用包括 Bio-FG-DVC(生物质-官能团-解聚)模型^[38]、蒸发与交联模型、Bio-FLASHCHAIN 模型和 Bio-CPD(生物质-化学渗透脱挥)模型^[39]等典型模型。其中 FG-DVC 模型由两个子例程组成, 一个子例程是 FG(官能团或物种进化模型), 另一个子例程是 DVC(解聚、挥发和交联或焦油形成模型)^[40-41], 挥发性物种的组成可以使用 FG 模型进行分析, 而 DVC 确定焦油和半焦形成的数量和分子量分布^[42-43]。基于蒙特卡罗或渗透点阵理论的统计技术, 网络模型的结构被定义。SERIO 等^[44]使用蒙特卡罗技术计算蒸发与交联模型对木质素进行热解过程的模拟。SOLOMON 等^[45]描述链结构的四步反应机理及其与闪蒸蒸馏的类比, 因而大大改进了 FG-DVC 模型的准确度。NIKSA^[46-47]提出的 Bio FLASHCHAIN^[48]模型采用了先前研究中的三个概念, 即 DISCHAIN、DISARAY 和 FLASHTWO 理论。Bio-CPD 模型将生物质视为通过化学桥连接的芳香族簇的大分子结构, 当生物质被加热时, 活性桥断裂形成轻气体和焦油, 而其他桥保持完整并形成焦炭, 建立了基于结构性质的焦油、半焦和煤气产率计算模型。FLETCHER 等^[49-52]提出了一种煤热解的化学模型, 该模型使用渗流晶格统计并扩展了对黑液和生物量的研究^[53-54]。SHENG 和 AZEVEDO^[39]提出了生物质主要成分的 CPD 模型。LEWIS 等^[55-56]假设生物质热解的产量是其主要成分(即纤维素、半纤维素和木质素)的加权平均产量之和, 并对所有三种成分分别使用 CPD 模型, 然后计算总产品产量。

网络模型很好地解释了热解机理, 其发展基础是结构变形, 结构变形随原料类型的变化而变化, 可以准确地确定焦炭、焦油和挥发物的产率。

(3) 热力学平衡模型

热力学平衡模型也被称为零维建模^[57], 通常建立在一定假设上。这种模型独立于气化炉的设计, 故在气化过程中不考虑气化炉的结构、反应特征和气体流动状况, 也不需要反应动力学相关参数。基于平衡常数或吉布斯自由能最小化, 可进

一步分为化学计量或非化学计量。一般来说, 平衡模型比较容易实现^[28]。其中, 收敛速度更快, 不存在任何特定化学反应的建模技术称为“吉布斯自由能最小化方法”。依据生物质气化过程中质量和能量平衡, 计算系统在最小吉布斯自由能下的产气组分^[58]。热力学平衡模型通常需要设置一定的限制条件来修正模型, 达到更准确的模拟气化过程的目的。

蒋绍坚等^[61]建立了一种基于物料、能量和化学平衡的热平衡气化模型, 研究了气化剂温度和原料含水率对气化结果的影响。JARUNGTHAM-MACHOTE 等^[62]建立了下吸式气化炉煤气化的热力学平衡模型, 并用系数校正水煤气变换反应和甲烷反应的平衡系数, 以此缩小修正后模型预测结果和实验结果的偏差。李洪涛等^[63]依据所测数据建立一种上吸式固定床生物质气化的综合模型, 并修正了热解阶段水、CO₂ 和焦油的产率。RODRIGUES 等^[64-65]将热力学平衡模型应用于煤炭和生物质的共气化, 获得了具有较高热值的合成气用于能源生产和化学合成。PRINS 等^[66]使用化学平衡模型比较了不同气化系统的热力学效率, 并表明存在动力学受限的气化反应会对气化炉的效率产生负面影响。ZAINAL 等^[67]基于固定床气化炉热力学模型的开发, 在只需输入最终成分的条件下, 合理预测出生产合成气的热值。

热力学平衡计算是独立于气化炉的设计, 可能更适合过程研究最重要的燃料和工艺参数的影响^[68]。

3.1.2 不同热解气化模型比较

三种主要的气化模型中动力学模型的气化过程用了总反应速率来表示, 从而确定了集中总产物的产率, 且该模型不用大量的结构数据。然而在焦油、焦炭的预测, 挥发性气体产量方面的预测方面不足, 需要在各种不同操作条件下的大量实验来计算动力学参数。

网络模型在焦油、焦炭的预测及轻质气体的产率方面使用广泛, 并且可以确定结构的变化, 包括不稳定的桥键断裂及新的桥键的形成, 但在模型输入数据方面有较高的要求, 存在特异性, 且在材料选择方面存在局限性, 仅考虑了纤维素、半纤维素及木质素的影响。

热力学平衡模型是独立于气化炉类型及操作条件范围的模型, 其可预测不同参数条件下的气

化炉性能,具有操作简单、收敛快速的特点。然而这种模型仅能描述固定气化过程,不能提供气化

过程的分析。

三种生物质气化模型的对比分析见表 3。

表 3 不同生物质气化模型的优劣分析

Table 3 Analysis of the advantages and disadvantages of different biomass gasification models

模型种类	优势	不足
动力学模型	拥有准确的流量描述,适合气化炉的设计和改造	过程涉及复杂的操作信息,不能考虑所有的反应过程,模型依赖硬件的设计,不易实现过程的线性控制
网络模型	适用预测反应过程的焦油、气体的产率;可以用来确定反应过程的结构变化	对于不同反应原料需要不同的模型
热力学模型	不依赖硬件设计对模型的影响;可以预测不同参数对硬件设计的影响	只能描述固定的反应过程

3.1.3 生物质气化模拟相关商业软件

模拟软件可分为工艺流程模拟软件和计算流体力学(CFD)模拟软件两类。在建立给定生物质热解气化过程的数学模型(动力学模型、热力学平衡模型等)条件下进行验证之后,工艺流程模拟软件可利用建立的数学模型预测或模拟生物质气化热解系统的性能,优势是当涉及模拟一个完整的热解气化工序流程时,可使用流程模拟器在较短的时间内根据不同的操作条件评估流程性能。数学模型是流程模拟器的组成部分,用户可以在这里开发过程流程图并提供所需的输入数据。工艺流程模拟软件是稳态模拟,忽略过程特性随时间的变化,而计算流体力学模拟软件是通过将累积项加入守恒方程(即质量、能量和动量平衡)来计算过程的时间特性的动态模拟。计算流体力学的优势是描述了过程在实时变化中的特性,而这对于过程控制是必不可少的。可用于模拟生物质热解气化的稳态工艺流程模拟软件包括 Aspen Plus, PETRONASiCON, IPSEpro, HYSYS, SuperProDesigner, Pro/II, ChemCad 等。动态计算流体力学模拟软件有 MATLAB, ANSYSFluent, ANSYS CFX, CFD2000 等。

(1) CFD 软件

在虚拟环境中,CFD 可用于确定生物质反应器中各种操作条件下的物理和化学过程。CFD 模型结合了质量守恒、动量、能量流、流体动力学和气化炉内部不同阶段和过程之间的联系^[69]。如果已知反应堆流体动力学,CFD 模型可以非常准确地预测反应堆周围的温度和气体产量。生物质气化的 CFD 建模涉及稠密颗粒流和非常特殊的化学组合^[70]。

GAO 等^[71]基于 Fluent 软件包开发了旋风气化炉的详细 CFD 模型,在标准模型中加入了木屑热解、挥发物、煤焦燃烧模型,该模型提供了有关气化

炉内气体温度和出口气体成分的信息。JAKOBS 等^[72]开发了高压气流床气化炉的 CFD 模型,使用有限体积求解器求解质量、动量、能量和几种物质的稳态平衡方程,分析了双流体喷嘴的雾化质量与气速和反应器压力的关系。JANA JREH 等^[69]分析了木材的小型鼓风下吸式气化系统的气化炉内部温度场进行实验研究之后,利用 CFD 对拉格朗日粒子耦合演化进行了高保真数值模拟。

(2) Aspen Plus 软件

Aspen Plus 是一个面向问题的输入程序,用于促进物理、化学过程的计算,可用于描述气体、流体和固体的过程。在集成之前可以作为单独的模块进行创建和测试的性质,使 Aspen Plus 更容易进行模型的创建和更新。

MANSARAY 等^[73-75]使用 Aspen Plus 模拟了双分配器式流化床稻壳气化炉。开发了两种热力学模型:单室模型和两室模型。单室模型忽略了流化床气化炉的流体动力学复杂性,使用了整体平衡方法;两室模型考虑了气化室内的复杂流体动力学条件,能够预测各种操作条件下的反应器温度、气体成分、气体高热值和总碳转化率,包括床层高度、流化速度、当量比、流化气体中的氧浓度和稻壳含水量。MATHIEU 和 DUBUISSON^[76]使用 Aspen Plus 在流化床中模拟木材气化并基于吉布斯自由能最小化、热解、燃烧、Boudouard 反应和气化过程不耦合进行了敏感性分析,结果表明,存在着一个临界空气温度,超过该温度时预热不再有效;存在一个最佳氧因子,空气中的富氧在一定值下起有效作用;操作压力对工艺效率只有轻微的正效应。MITTA 等^[77]使用 Aspen Plus 模拟了一个带有空气和蒸汽的流化床轮胎气化装置,并验证了其准确性。

(3) MATLAB 软件

MATLAB 是由 MathWorks 创建的用于数值计

算和统计分析的可定编程环境^[78],可用于系统的分析和仿真,可通过创建模型来预测不同条件对生物质的热化学转化过程的影响。

GIULIANO 等^[79]使用 MATLAB 创建了一个包含多产品木质纤维生物质炼制的离散优化问题的程序。HOSSEINI 等^[80]开发了空气和蒸汽生物质气化的 MATLAB 模型。LU 等^[81]还开发了流化床中的空气——蒸汽气化模型,该模型同时考虑了流体动力学和化学动力学。DI CARLO 等^[82]结合控制流体动力学方程和动力学反应速率,开发了流化床蒸汽/氧气气化器的一维半经验模型。一维建模方法实现了通过反应器轴的质量和能量平衡的分辨率(考虑横截面中的均匀条件),获得合成气成分的趋势和沿反应器轴的特性。

3.1.4 不同生物质气化模拟软件对比

现对 MATLAB、CFD、Aspen Plus 三种主要的模拟软件进行对比分析。

MATLAB 作为一款相对成熟的商业软件因其入门简单、扩展性强被人所熟知;但缺点也较为明显,就是其程序语言不够简洁,代码的运行速度较低,程序代码的封装性也较低。

CFD 可以按照网格划分的方式对传热传质进行分析,从而可以对其结构进行优化设计,但进行网格划分所需的计算时间长,不便于在短时间内分析时使用。

Aspen Plus 拥有庞大的数据库和相对丰富的模型,使用方法简单,是以工艺设计功能为主的一款软件,其缺点是不能对反应过程和反应器进行精细的模拟计算。

3.2 生物质气化炉经验模拟方法

3.2.1 传统经验模型

传统经验模型是在缺乏详细机理解或实验数据不足的情况下,基于经验和观察得出的模型。这种模型可能建立在已知经验法则、规律和普遍共识的基础上,可以根据特定系统的工作条件和运行参数进行一些粗略估计。

对于生物质气化炉的经验模拟方法,传统经验模型主要依赖于以下方面:

实验测试:通过在实际操作中收集和记录数据,例如气化炉的输入和输出参数、产气组分、温度和压力等。根据这些数据共享的经验来开发经验模型。

类似系统的经验:如果存在与生物质气化炉类似的其他气化系统,可以利用这些系统的经验

数据来建立模型。虽然这种模型不会完全适用于具体的炉内条件,但可以提供一定程度上的参考。

知识共享和专家判断:从领域专家获取有关生物质气化炉工作原理、化学反应和能量传递的知识。这种知识可用于开发推测性的经验模型。

特定因素的解释:经验模型可能基于已知的反应机理和物理原理,考虑生物质气化炉中的特定因素,如反应速率、焦炭生成等。这些因素对于模型预测的准确性至关重要。

3.2.2 人工神经网络模型

人工神经网络(ANN)是基于生物学中神经网络的基本原理,在理解和抽象了人脑结构和外界刺激响应机制后,以网络拓扑知识为理论基础,模拟人脑的神经系统对复杂信息处理机制的一种数学模型。一般而言,ANN 不提供分析过程,只提供结论数值结果^[83-84];但当提供了足够多的实验数据时,ANN 就可以提供不止数据结果的分析性答案。BARUAH 等^[85]建立了一个 ANN 模型用于模拟固定床中的生物质气化过程,使用 18 种不同的文献数据预测合成气成分,并用实验数据训练神经网络。最终气体组分的模拟和实验数据遵循线性回归曲线,它们之间具有高度一致性。PUIG ARNAVAT 等^[86]提出了两种不同的流化床 ANN 模型,分别用于鼓泡床和循环床,两种模型用于预测生物质气化合成气组分。尽管发现不同的变量对不同流化床具有不同的影响,但在两种情况下均获得与实验数据的高度一致性。BROWN 等^[87-88]利用流化床反应中的输出比例,设计出了用于计算生物质气化的反应模型;分析并改进了平衡模型与 ANN 的组合,将温度波动与燃料成分和气化操作参数联系起来。DE SOUZA JR 等^[89]使用 ANN 模拟流化床气化炉中的生物质的气化过程,并将生成的气体的组分与多种环境下的生物质的相应性质联系起来。YAN 等^[5]用试错法确定了 ANN 三种层类中的隐藏层中的神经元数量。ÇEPELIOĞULLAR 等^[90]研究了高度非均质燃料(RDF)在热分析仪中以不同的升温速率从室温热解到 900 °C 时使用 TG-FTIR-MS 监测逸出的气体分析后使用获得的数据开发 ANN 模型,并预测 RDF 在新加热速率下的热行为。选择温度和加热速率作为输入参数,选择温度相关的重量损失作为输出参数。

虽然 ANN 在预测具有相关性的参数方面有

效,但在研究原料的类型和生物质转化的行为或动力学速率表征方面仍有局限性。KARACI 等^[91]使用数据驱动模型来预测废弃物热解产生的氢气产量。SUN 等^[92]构建了一个 ANN 模型用于评估生产中生物质废弃物热解产生的气体产量。PANDEY 等^[93]提出了一种基于 ANN 的建模技术

来估算气化产物的热值。AYDINLI 等^[94]基于 ANN 估算生物质发电的潜力和其热解产物的分布。SUNPHORKA 等^[95]基于 ANN 模型预计出生物质的动力学参数。

传统经验模型与人工神经网络模型的对比见表 4。

表 4 不同生物质气化炉经验模拟方法优劣对比

Table 4 Comparison of advantages and disadvantages of different biomass gasifier empirical simulation methods

模拟方法	优势	不足
传统经验模型	可以根据系统的状态变量之间的联系来定义模型	使用范围广但准确率低
人工神经网络模型	ANN 增强预测结果准确,实验值和模拟值之间差别较小	需要大量数据对模型进行校准

4 生物质气化炉的设计方法

生物质气化炉的设计方法主要包括经验设计法、半经验设计法和反向设计法。

4.1 传统设计方法(经验设计法)

有一定经验的工程师、技术员结合图纸、工艺文件、产品实物及生产及技术条件分析,用直接估算的方法进行生物质气化炉的设计,此方法一般在制定单件小批量的生产或临时生产任务时使用。

4.2 半经验设计法

首先根据设计经验确定一些设计变量,然后根据能量平衡和经验准则,通过半经验公式得到其他设计变量。最终的设计目标值需要通过实验或仿真得到。在特定工况下的生物质气化稳态过程中,采用热力学平衡模型和 ANN 模型进行建模。

4.3 反向设计方法

目前生物质气化工艺设计方法可归纳为“由因及果”的正向设计法,即在设计过程中,根据设计变量值确定相应的设计目标值(半经验法、模拟试错法),在控制过程中,根据过去系统的误差来计算当前的控制变量值(PID 控制、模糊控制)。然而,由于气化反应的复杂性和设计参数的非线性,以及在正向设计过程中缺乏对目标结果的反馈和优化调整,一般难以获得预期结果。为使生物质气化系统达到理想的工艺性能,最优方法是从设计目标出发。因此陈冠益^[8]提出生物质气化工艺反向设计理念,将传统热力学模型和机器学习算法相耦合,建立生物质气化炉设计变量与设计目标间可逆的映射关系,并利用元启发式算法、集成模糊优选与聚类分析法,提升反向设计过程的效率与结果的实用性。反向设计流程如图 3 所示。

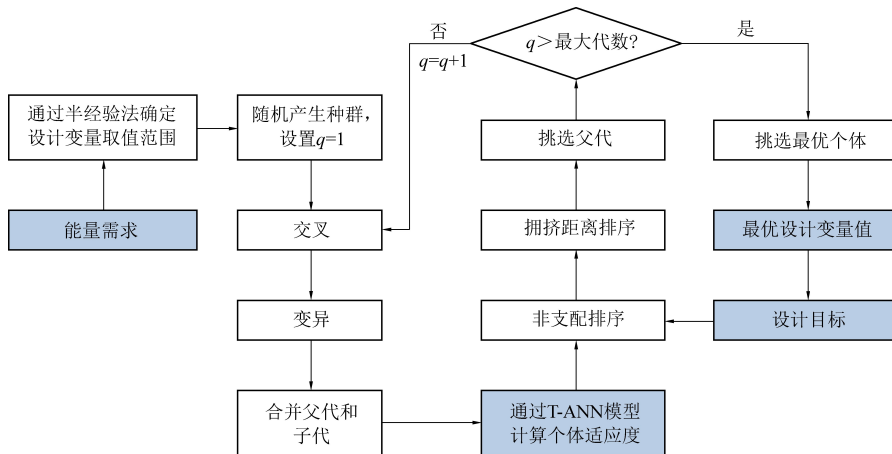


图 3 反向设计流程图

Fig. 3 Reverse design flowchart

在 YAN^[5]的研究中,反向设计方法耦合 T-ANN 生物质气化炉设计的模型和 NSGA-II 算法和评估。结果显示,相比传统的 TE 和 ANN 模型, T-ANN 模型的预测精度更高,鲁棒性更好,在

95% 置信度下,准确度在 $(8.81 \pm 1.21)\%$ 以内。在只关注与设计目标相对应的气化性能指标,不考虑其他气化性能指标的情况下,反向设计的设计结果均优于半经验设计。

5 结论与展望

生物质来源多种多样,其成分和性质也各有不同,因此对生物质的预处理方式及气化参数应有所区别,相应的气化炉设计也应因地制宜地做出调整优化。利用模拟方法对气化炉的流动与反应特性进行预测已成为气化炉设计研究的重要手段。本文对气化炉的类型、设计参数、国内外发展状况、模拟方法以及模拟软件进行了综述,结果表明:

(1)生物质气化炉理论模拟方面,动力学模型对流程的描述更加准确,适合生物质气化炉的设计和改进,但没有考虑所有的可能的过程反应,模型的反应系数和动力学常数也不固定,难以实现在线的过程控制。热力学模型独立于气化炉类型和设计或特定操作条件范围,可用于不同操作参数下的气化炉性能的预测,有收敛快速的特点,但仅能描述固定的气化过程,不能提供有关气化过程的见解。热力学模型虽然不能在所有情况下给出准确的结果,但是在燃料和工艺参数影响的工艺研究方面有独立于气化炉硬件设计的优点;而动力学的模型在计算上更繁杂,但结果准确、详细。

(2)生物质气化炉经验模拟方面,在多种模拟方法中,半经验法相较其他方法的优势在于可以根据设计变量值来确定相应的设计目标值,但由于正向设计过程中缺乏对目标结果的反馈,所以和预期结果有一定的差距。在只考虑设计目标,不考虑其他气化性能指标的情况下,反向设计的设计结果都优于半经验设计。对于不同生物质种类的设计结果,反向设计和半经验设计的设计结果的相对差异是相似的。因此以结果为导向的反向设计法有望在未来得到越来越多的应用。

参考文献 (References):

[1] 邓先伦,高一苇,许玉,等.生物质气化与设备的研究进展[J].生物质化学工程,2007,41(6):37-41.
DENG Xianlun, GAO Yiwei, XU Yu, et al. Progress in biomass gasification and its equipments[J]. Biomass Chemical Engineering, 2007, 41(6):37-41.

[2] SIKARWAR V S, ZHAO M, FENNELL P S, et al. Progress in biofuel production from gasification[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2017, 61: 189-248.

[3] MIKULANDRIĆ R, LONČAR D, BÖHNING D, et al. Process performance improvement in a co-current, fixed bed biomass gasification facility by control system modifications[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 104: 135-146.

[4] VASSILEV S V, BAXTER D, ANDERSEN L K, et al. An overview of the chemical composition of biomass[J]. Fuel, 2010,

89(5): 913-933.

[5] YAN B, ZHAO S, LI J, et al. A conceptual framework for biomass gasifier design using a semi-empirical model and heuristic algorithm[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 427: 130881.

[6] MA Z, ZHANG Q, ZHOU J, et al. Research progress of downdraft biomass fixed-bed gasifier[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2013, 56(05): 139.

[7] 徐志. 超临界循环流化床锅炉数学模拟与设计优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 85-124.
XU Zhi. Research on the modelling and the design optimization of supercritical circulating fluidized bed boiler[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 85-124.

[8] 陈冠益,高文学,颜蓓蓓,等.生物质气化技术研究现状与发展[J].煤气与热力,2006,26(7):20-26.
CHEN Guanyi, GAO Wenxue, YAN Beibei, et al. Present research status and development of biomass gasification technologies[J]. Gas & Heat, 2006, 26(7): 20-26.

[9] MIN F, ZHANG M, ZHANG Y, et al. An experimental investigation into the gasification reactivity and structure of agricultural waste chars[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011, 92(1): 250-257.

[10] 刘焕志. 双循环流化床颗粒循环流率实验及其模型研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 43-44.
LIU Huanzhi. Experimental research and model study on solids circulation rate in a double fluidized bed[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011: 43-44.

[11] KUSHWAH A, REINA T, SHORT M. Modelling approaches for biomass gasifiers: A comprehensive overview[J]. Science of the Total Environment, 2022, 834: 155243.

[12] PÉREZ J F, MELGAR A, BENJUMEA P N. Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study[J]. Fuel, 2012, 96: 487-496.

[13] MELGAR A, PÉREZ J F, LAGET H, et al. Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(1): 59-67.

[14] PORTEIRO J, PATINÓ D, COLLAZO J, et al. Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor[J]. Fuel, 2010, 89(1): 26-35.

[15] ZHAO W, LI Z, WANG D, et al. Combustion characteristics of different parts of corn straw and NO formation in a fixed bed[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(8): 2956-2963.

[16] 蒋剑春,应浩,戴伟娣,等.锥形流化床生物质气化技术和工程[J].农业工程学报,2006,22(S1):211-216.
JIANG Jianchun, YING Hao, DAI Weidi, et al. Technology and engineering of biomass gasification with conical fluidized-bed[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(S1): 211-216.

[17] 常圣强,李望良,张晓宇,等.生物质气化发电技术研究进展[J].化工学报,2018,69(8):3318-3330.
CHANG Shengqiang, LI Wangliang, ZHANG Xiaoyu, et al. Progress in biomass gasification power generation technology

- [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(8): 3318-3330.
- [18] 吴正舜, 吴创之, 郑舜鹏, 等. MW 级谷壳气化发电的操作特性研究[J]. *电站系统工程*, 2004, 20(1): 13-15.
WU Zhengshun, WU Chuangzhi, ZHENG Shunpeng, et al. Operational performance study of MW-Grade power generating system from rice husk gasification[J]. *Power System Engineering*, 2004, 20(1): 13-15.
- [19] 吴正舜, 吴创之, 郑舜鹏, 等. 4MW 级生物质气化发电示范工程的设计研究[J]. *能源工程*, 2003(3): 14-17.
WU Zhengshun, WU Chuangzhi, ZHENG Shunpeng, et al. A design study of demonstration project of 4MW power generation system by biomass integrated gasification combined cycle[J]. *Energy Engineering*, 2003(3): 14-17.
- [20] 张祎旋, 傅童成, 周方圆, 等. 中国废弃生物质能源化利用经济效益评价[J]. *电力与能源进展*, 2020, 8: 38-47.
ZHANG Yixuan, FU Tongcheng, ZHOU Fangyuan, et al. Evaluation on economic benefits of biowaste conversion pathways to energy in China[J]. *Advances in Energy and Power Engineering*, 2020, 8: 38-47.
- [21] 肖陆飞, 哈云, 孟飞, 等. 生物质气化技术研究与应用进展[J]. *现代化工*, 2020, 40(12): 68-72+76.
XIAO Lufei, HA Yun, MENG Fei, et al. Research and application progress on biomass gasification technologies [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(12): 68-72+76.
- [22] BHOI P R, HUHNEKE R L, KUMAR A, et al. Scale-up of a downdraft gasifier system for commercial scale mobile power generation[J]. *Renewable Energy*, 2018, 118: 25-33.
- [23] RATHORE A S, SINGH A. Biomass to fuels and chemicals: A review of enabling processes and technologies [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2022, 97(3): 597-607.
- [24] 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.
- [25] SARKER S, NIELSEN H K. Assessing the gasification potential of five woodchips species by employing a lab-scale fixed-bed downdraft reactor [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 103: 801-813.
- [26] 胡小金, 杨涛, 刘三举, 等. 循环流化床气化温度对稻壳气化固相产物特性的影响[J]. *生物质化学工程*, 2021, 55(3): 23-28.
HU Xiaojin, YANG Tao, LIU Sanju, et al. Effect of gasification temperature of circulating fluidized bed on solid product feature of rice husk gasification [J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2021, 55(3): 23-28.
- [27] SANSANIWAL S, PAL K, ROSEN M, et al. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72: 363-384.
- [28] RANZI E, DENTE M, GOLDANIGA A, et al. Lumping procedures in detailed kinetic modeling of gasification, pyrolysis, partial oxidation and combustion of hydrocarbon mixtures [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, 27(1): 99-139.
- [29] FIASCHI D, MICHELINI M. A two-phase one-dimensional biomass gasification kinetics model [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2001, 21(2): 121-132.
- [30] HALAMA S, SPLIETHOFF H. Numerical simulation of entrained flow gasification: Reaction kinetics and char structure evolution[J]. *Fuel Processing Technology*, 2015, 138: 314-324.
- [31] ONG Z, CHENG Y, MANEERUNG T, et al. Co-gasification of woody biomass and sewage sludge in a fixed-bed downdraft gasifier[J]. *AIChE Journal*, 2015, 61(8): 2508-2521.
- [32] GILTRAP D, MCKIBBIN R, BARNES G. A steady state model of gas-char reactions in a downdraft biomass gasifier [J]. *Solar Energy*, 2003, 74(1): 85-91.
- [33] HEIDENREICH S, FOSCOLO P U. New concepts in biomass gasification[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 46: 72-95.
- [34] BORAH R C, GHOSH P, RAO P G. A review on devolatilization of coal in fluidized bed [J]. *International Journal of Energy Research*, 2011, 35(11): 929-963.
- [35] SOLOMON P R, HAMBLEN D G, YU Z Z, et al. Network models of coal thermal decomposition [J]. *Fuel*, 1990, 69(6): 754-763.
- [36] ZHANG L, XU C C, CHAMPAGNE P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(5): 969-982.
- [37] WAN K, WANG Z, HE Y, et al. Experimental and modeling study of pyrolysis of coal, biomass and blended coal-biomass particles [J]. *Fuel*, 2015, 139: 356-364.
- [38] NIKSA S. Predicting detailed products of secondary pyrolysis of diverse forms of biomass [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28: 2727-2733.
- [39] SHENG C, AZEVEDO J. Modeling biomass devolatilization using the chemical percolation devolatilization model for the main components [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(1): 407-414.
- [40] ABDELOUAHED L, AUTHIER O, MAUVIEL G, et al. Detailed modeling of biomass gasification in dual fluidized bed reactors under Aspen Plus [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(6): 3840-3855.
- [41] SOLOMON P R, HAMBLEN D G, SERIO M A, et al. A characterization method and model for predicting coal conversion behaviour [J]. *Fuel*, 1993, 72(4): 469-488.
- [42] SOLOMON P R, KING H H. Tar evolution from coal and model polymers: Theory and experiments [J]. *Fuel*, 1984, 63(9): 1302-1311.
- [43] SERIO M A, HAMBLEN D G, MARKHAM J R, et al. Kinetics of volatile product evolution in coal pyrolysis: Experiment and theory [J]. *Energy & Fuels*, 1987, 1(2): 138-152.
- [44] SERIO M A, CHARPENAY S, BASSILAKIS R, et al. Measurement and modeling of lignin pyrolysis [J]. *Biomass and Bioenergy*, 1994, 7(1-6): 107-124.
- [45] SOLOMON P R, HAMBLEN D G, CARANGELO R, et al.

- General model of coal devolatilization [J]. *Energy & Fuels*, 1988, 2(4): 405-422.
- [46] NIKSA S, KERSTEIN A R. FLASHCHAIN theory for rapid coal devolatilization kinetics. 1. Formulation [J]. *Energy & Fuels*, 1991, 5(5): 647-665.
- [47] NIKSA S. FLASHCHAIN theory for rapid coal devolatilization kinetics. 4. Predicting ultimate yields from ultimate analyses alone [J]. *Energy & Fuels*, 1994, 8(3): 659-670.
- [48] NIKSA S. Predicting the rapid devolatilization of diverse forms of biomass with bio-flashchain [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(2): 2727-2733.
- [49] FLETCHER T H, KERSTEIN A R, PUGMIRE R J, et al. Chemical percolation model for devolatilization. 3. Direct use of carbon-13 NMR data to predict effects of coal type [J]. *Energy & Fuels*, 1992, 6(4): 414-431.
- [50] JUPUDI R S, ZAMANSKY V, FLETCHER T H. Prediction of light gas composition in coal devolatilization [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(6): 3063-3067.
- [51] GRANT D M, PUGMIRE R J, FLETCHER T H, et al. Chemical model of coal devolatilization using percolation lattice statistics [J]. *Energy & Fuels*, 1989, 3(2): 175-186.
- [52] FLETCHER T H, KERSTEIN A R, PUGMIRE R J, et al. Chemical percolation model for devolatilization. 2. Temperature and heating rate effects on product yields [J]. *Energy & Fuels*, 1990, 4(1): 54-60.
- [53] FLETCHER T H, POND H R, WEBSTER J, et al. Prediction of tar and light gas during pyrolysis of black liquor and biomass [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(6): 3381-3387.
- [54] WOOTERS T J, BAXTER L L, FLETCHER T H. CPD model calculations of black liquor and biomass pyrolysis [J]. *American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, Preprints*, 2005, 50(1): 108.
- [55] LEWIS A D, FLETCHER T H. Prediction of sawdust pyrolysis yields from a flat-flame burner using the CPD model [J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(2): 942-953.
- [56] LEWIS A D, FLETCHER E G, FLETCHER T H. Pyrolysis and CO₂ gasification rates of biomass at high heating rate conditions [C]. *Utah: Proceedings of the 8th US National Combustion Meeting F*, 2013.
- [57] COSTA M, ROCCO V, CAPUTO C, et al. Model based optimization of the control strategy of a gasifier coupled with a spark Ignition engine in a biomass powered cogeneration system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 160: 114083.
- [58] 张伟, 吴永明. 基于 Aspen Plus 的固定床生物质气化过程的建模、仿真及工艺优化 [J]. *林产化学与工业*, 2018, 38(3): 75-82.
ZHANG Wei, WU Yongming. Simulation and optimization of fixed bed biomass gasification processed by aspen plus [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2018, 38(3): 75-82.
- [59] 赵展, 刘晓东, 姜雪, 等. 生物质气化过程热力学模型分析 [J]. *应用科技*, 2011, 38(7): 44-48.
ZHAO Zhan, LIU Xiaodong, JIANG Xue, et al. Thermodynamic model of biomass gasification [J]. *Applied Science and Technology*, 2011, 38(7): 44-48.
- [60] 蒋受宝, 蒋绍坚, 张灿. 生物质气化计算平衡模型 [J]. *中南林学院学报*, 2006, 26(2): 68-71.
JIANG Shoubao, JIANG Shaojian, ZHANG Can. A balance model for analyzing biomass gasification process [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2006, 26(2): 68-71.
- [61] 蒋绍坚, 赵颖, 林竹, 等. 高温空气气化数学模型的建立与分析 [J]. *太阳能学报*, 2006, 27(10): 1058-62.
JIANG Shaojian, ZHAO Ying, LIN Zhu, et al. Establishment and analysis on mathematical model for high temperature air gasification [J]. *ACTA Energetica Solaris Sinica*, 2006, 27(10): 1058-1062.
- [62] JARUNGTAMMACHOTE S, DUTTA A. Equilibrium modeling of gasification; Gibbs free energy minimization approach and its application to spouted bed and spout-fluid bed gasifiers [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(6): 1345-1356.
- [63] 李洪涛, 李炳熙, 徐有宁, 等. 上吸式固定床生物质气化的综合计算法模型 [J]. *太阳能学报*, 2014, 35(11): 2210-2215.
LI Hongtao, LI Bingxi, XU Youning, et al. Comprehensive calculation model for biomass gasification in updraft fixed bed gasifier [J]. *ACTA Energetica Solaris Sinica*, 2014, 35(11): 2210-2215.
- [64] XIANG X, GONG G, SHI Y, et al. Thermodynamic modeling and analysis of a serial composite process for biomass and coal co-gasification [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2768-2778.
- [65] RODRIGUES R, MUNIZ A R, MARCILIO N R. Evaluation of biomass and coal co-gasification of brazilian feedstock using a chemical equilibrium model [J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2016, 33: 401-414.
- [66] PRINS M J, PTASINSKI K J, JANSSEN F J. From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency [J]. *Energy*, 2007, 32(7): 1248-1259.
- [67] ZAINAL Z, ALI R, LEAN C, et al. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials [J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, 42(12): 1499-1515.
- [68] PUIG ARNAVAT M, BRUNO J C, CORONAS A. Review and analysis of biomass gasification models [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 2841-2851.
- [69] JANAJREH I, AL SHRAH M. Numerical and experimental investigation of downdraft gasification of wood chips [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 65: 783-792.
- [70] PEPIOT P, DIBBLE C, FOST T. Computational modeling in lignocellulosic biofuel production [M]. *United States: American Chemical Society*, 2010: 273-298.
- [71] GAO J, KOSHIO S, ISHIKAWA M, et al. Effects of dietary palm oil supplements with oxidized and non-oxidized fish oil on growth performances and fatty acid compositions of juvenile Japanese sea bass, *Lateolabrax japonicus* [J]. *Aquaculture*,

- 2012, 324; 97–103.
- [72] JAKOBS T, DJORDJEVIC N, FLECK S, et al. Gasification of high viscous slurry R&D on atomization and numerical simulation[J]. *Applied Energy*, 2012, 93: 449–456.
- [73] MANSARAY K, GHALY A, AL TAWHEEL A, et al. Mathematical modeling of a fluidized bed rice husk gasifier: Part III–Model verification [J]. *Energy Sources*, 2000, 22(3): 281–296.
- [74] MANSARAY K, AL TAWHEEL A, GHALY A, et al. Mathematical modeling of a fluidized bed rice husk gasifier: Part I–Model development [J]. *Energy Sources*, 2000, 22(1): 83–98.
- [75] MANSARAY K, GHALY A, AL TAWHEEL A, et al. Mathematical modeling of a fluidized bed Rice Husk gasifier: Part II –Model sensitivity[J]. *Energy Sources*, 2000, 22(2): 167–185.
- [76] MATHIEU P, DUBUISSON R. Performance analysis of a biomass gasifier[J]. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43(9–12): 1291–1299.
- [77] MITTA N R, FERRER NADAL S, LAZOVIC A M, et al. Modelling and simulation of a tyre gasification plant for synthesis gas production [J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2006, 21: 1771–1776.
- [78] MARCANTONIO V, MONFORTI FERRARIO A, DI CARLO A, et al. Biomass steam gasification: A comparison of syngas composition between a 1-d matlab kinetic model and a 0-d aspen plus quasi-equilibrium model[J]. *Computation*, 2020, 8(4): 86.
- [79] GIULIANO A, CERULLI R, POLETTO M, et al. Optimization of a multiproduct lignocellulosic biorefinery using a MILP approximation[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2014, 33: 1423–1428.
- [80] HOSSEINI M, DINCER I, ROSEN M A. Steam and air fed biomass gasification: Comparisons based on energy and exergy [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(21): 16446–16452.
- [81] LÜ P, KONG X, WU C, et al. Modeling and simulation of biomass air–steam gasification in a fluidized bed[J]. *Frontiers of Chemical Engineering in China*, 2008, 2: 209–213.
- [82] DI CARLO A, BORELLO D, BOCCI E. Process simulation of a hybrid SofC/mGT and enriched air/steam fluidized bed gasifier power plant[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(14): 5857–5874.
- [83] 阴秀丽, 徐冰, 吴创之, 等. 生物质循环流化床气化炉的数学模型研究[J]. *太阳能学报*, 1996, 17(1): 1–8.
YIN Xiuli, XU Bingyan, WU Chuangzhi, et al. Mathematic model study on circulating fluidized bed gasifier for biomass [J]. *ACTA Energaiae Solaris Sinica*, 1996, 17(1): 1–8.
- [84] BARUAH D, BARUAH D. Modeling of biomass gasification: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 806–815.
- [85] BARUAH D, BARUAH D, HAZARIKA M. Artificial neural network based modeling of biomass gasification in fixed bed downdraft gasifiers [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2017, 98: 264–271.
- [86] PUIG ARNAVAT M, HERNÁNDEZ J A, BRUNO J C, et al. Artificial neural network models for biomass gasification in fluidized bed gasifiers [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 49: 279–289.
- [87] BROWN D W, FUCHINO T, MARÉCHAL F M. Stoichiometric equilibrium modelling of biomass gasification: Validation of artificial neural network temperature difference parameter regressions [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2007, 40(3): 244–254.
- [88] BROWN D, FUCHINO T, MARÉCHAL F. Solid fuel decomposition modelling for the design of biomass gasification systems [J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2006, 21: 1661–1666.
- [89] DE SOUZA M, COUCEIRO L, BARRETO A, et al. Neural network based modeling and operational optimization of biomass gasification processes [J]. *Gasification for Practical Applications*, 2012, 12: 297–312.
- [90] ÇEPELIOĞULLAR Ö, MUTLUİ, YAMAN S, et al. A study to predict pyrolytic behaviors of refuse-derived fuel (RDF): Artificial neural network application[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016, 122: 84–94.
- [91] KARACI A, CAGLAR A, AYDINLI B, et al. The pyrolysis process verification of hydrogen rich gas (H₂-rG) production by artificial neural network (ANN)[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(8): 4570–4578.
- [92] SUN Y, LIU L, WANG Q, et al. Pyrolysis products from industrial waste biomass based on a neural network model [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016, 120: 94–102.
- [93] PANDEY D S, DAS S, PAN I, et al. Artificial neural network based modelling approach for municipal solid waste gasification in a fluidized bed reactor[J]. *Waste Management*, 2016, 58: 202–213.
- [94] AYDINLI B, CAGLAR A, PEKOL S, et al. The prediction of potential energy and matter production from biomass pyrolysis with artificial neural network [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2017, 35(6): 698–712.
- [95] SUNPHORKA S, CHALERMSINSUWAN B, PIUMSOMBOON P. Artificial neural network model for the prediction of kinetic parameters of biomass pyrolysis from its constituents [J]. *Fuel*, 2017, 193: 142–158.