

综述评论

doi:10.3969/j.issn.0253-2417.2022.05.016

生物质气化技术的发展现状及展望

李学琴^{1,2}, 刘鹏², 吴幼青¹, 雷廷宙^{2*}, 吴诗勇¹, 黄胜¹

(1.华东理工大学 资源与环境工程学院能源化工系, 上海 200237;

2.常州大学 城乡矿山研究院, 江苏常州 213164)



Li Xueqin

摘要:为促进生物质气化技术的发展及气化产物的利用,重点介绍了国内外生物质气化技术的发展及产业现状、气化炉类型及发展现状,提出了生物质气化技术的优缺点;同时,也发现虽然我国生物质资源丰富且生物质具有可再生性、污染较小、蕴藏量大、分布广泛、零碳排放等优异的特点,但由于其收-储-运体系不完善、资金链短缺及副产物较多等一系列问题导致其国际化困难。展望了我国生物质气化技术不仅要走扎实的基础研究和开发路径,也要考虑生物质气化技术的总体需求以及与其他技术的竞争等方面作为未来发展方向及重要攻关点,期望能为生物质气化技术的进一步发展及气化产物的高值化利用奠定坚实的基础。

关键词: 生物质; 气化技术; 气化炉; 发展现状; 展望

中图分类号: TQ35

文献标志码: A

文章编号: 0253-2417(2022)05-0113-09

引文格式: 李学琴, 刘鹏, 吴幼青, 等. 生物质气化技术的发展现状及展望[J]. 林产化学与工业, 2022, 42(5): 113-121.

Development Status and Prospect of Biomass Gasification Technology

LI Xueqin^{1,2}, LIU Peng², WU Youqing¹, LEI Tingzhou², WU Shiyong¹, HUANG Sheng¹

(1. Department of Chemical Engineering for Energy Resources, School of Resources and Environmental Engineering,

East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Institute of Urban and

Rural Mining, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to promote the development of biomass gasification technology and the utilization of gasification products, the development and industrial status of biomass gasification technology, gasifier type and its development status at home and abroad were mainly introduced, and the advantages and disadvantages of biomass gasification technology were analyzed. At the same time, it is also found that China's biomass resources had great potential and biomass energy had the excellent characteristics of renewability, such as renewable, less pollution, large reserves, wide distribution, zero carbon emissions and so on. However, it was difficult to internationalize because of a series of problems such as imperfect of collection-storage-transportation system, shortage of capital chain and more by-products. It was further prospected that biomass gasification in China should not only take a basic research, but also consider the overall demand of biomass gasification technology and the competition with other technologies as the future development direction and important key point. This paper was expected to lay a solid foundation for the further development of biomass gasification technology and the high-value utilization of gasification products.

Key word: biomass; gasification technology; gasifier; development status; prospect

化石能源的过度使用已引起严重的资源短缺和环境污染等问题,而以可再生能源为代表的非化石能源的发展成为世界能源供应体系的重要组成部分,更是我国深入推进能源生产和消费的重要技术措施^[1]。我国生物质来源非常广泛且每年可产生的农林剩余物量将近13亿吨^[2],通过热化学转化、生物

收稿日期:2021-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51906021,21878096)

作者简介:李学琴(1989—),女,甘肃白银人,博士生,研究方向为生物质热解及副产物处理;E-mail:lxq88889@126.com

*通讯作者:雷廷宙,研究员,博士生导师,研究领域为生物质能源及材料;E-mail:leitingzhou@163.com。

转化及物理转化等方式将其高效转化为液体燃料、成型燃料、生物燃气,以及生物基材料等化学品,这是生物质资源绿色发展和替代化石能源的有效途径。生物质热化学转化包括热解、气化和燃烧技术^[3],而生物质气化技术是以生物质为原料通过热化学的方式将其转化为有价值的气体产物(合成气)和固体产物(焦炭)的过程,也是生产电力和热量、氢气和第二代生物燃料的有效工艺^[4]。因此,为促进生物质气化技术的发展现状及产物的高值化利用,深入了解生物质气化技术的研究方向,本文对国内外生物质气化技术的发展进行了全面概述,分析了国内外生物质气化技术、气化炉的发展现状及存在的问题,展望了未来生物质气化技术的研究方向,期望为生物质气化技术的进一步发展提供新思路。

1 生物质气化技术及研究进展

1.1 生物质气化技术

生物质气化技术是在一定热力学条件下,将生物质固体原料转化为混合气体(合成气、焦炭)的热分解方式^[5],是生物质转化为高质量合成气最有前景的技术之一;其中,气体产物(主要包括 CO、H₂、CH₄ 和 CO₂)主要应用于合成气、氢气、醇醚类等高品位液体燃料。生物质气化过程是吸热反应,反应整个过程起初是通过外部热源将生物质加热到一定温度,部分生物质在外部热源的作用下开始燃烧放热,放出的热量首先用于生物质干燥,然后用于生物质热解。整体可分为4个阶段:1)氧化-放热阶段;2)干燥-吸热阶段;3)气化-吸热阶段;4)热解-吸热阶段(具体见图1)。

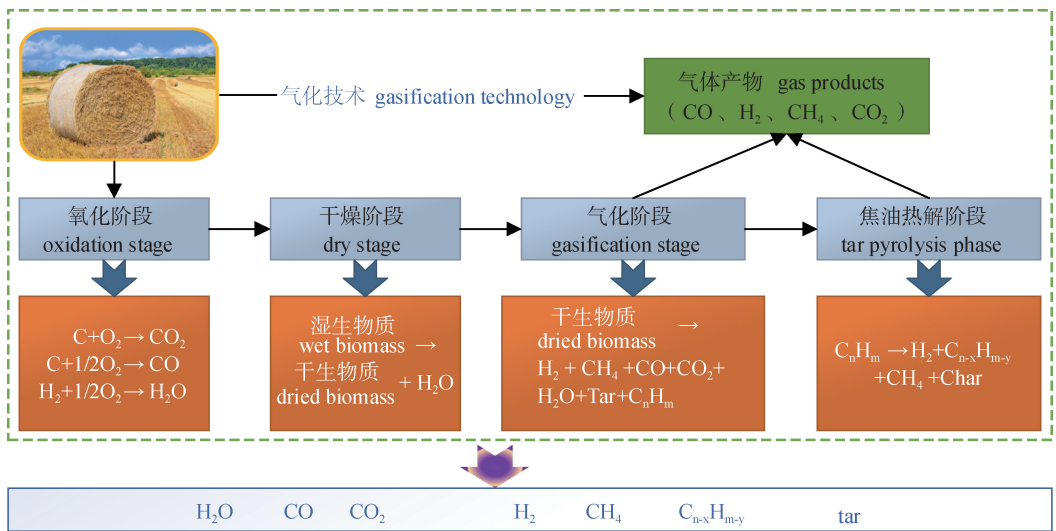


图1 生物质气化过程及主要阶段

Fig.1 Biomass gasification process and its main stage

生物质气化技术类型较多^[6-8],根据燃气生产机理分为热解气化(不使用气化介质)和反应性气化(使用气化介质)。反应性气化包含空气气化、富氧气化、空气-水蒸气气化、氧气-水蒸气气化以及水蒸气气化^[9-11],每种气化剂条件下燃气组分基本相同,但含量差异较大(表1)。

表1 典型的气化剂和燃气组成

Table 1 Typical gasification agents and fuel gas composition

气化剂 gasification agents	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	H ₂ /CO
空气 air	10.0	0.5	41.2	23.0	18.1	5.2	0.4	1.8	0.1	0.44
富氧 oxygen-rich	9.5	0.5	7.3	46.8	23.4	9.7	0.8	2.0	0.4	0.20
空气-水蒸气 air-steam	18.2	0.5	33.7	21.1	19.5	5.3	0.2	2.3	0.4	0.85
氧气-水蒸气 oxygen-steam	32.1	0.3	0.3	28.2	30.4	7.5	0.2	2.1	0.2	1.14
水蒸气 steam	50.8	0.3	0.3	20.3	19.6	7.1	0.3	1.8	0.2	2.50

利用氧气-水蒸气作为气化剂时 H₂ 含量最高,且在该条件下产生的 CO、CO₂ 含量也较高;而空气-水

蒸气气化得到的这3种气体含量总体都偏低。另外,根据气流方向、炉型结构和气化过程分为:固定床气化(上吸式、下吸式、横吸式、开心式)和流化床气化(单流化床、循环流化床、双流化床、携带流化床)。

1.2 国外研究及产业现状

1.2.1 国外研究现状 由于生物质气化反应为吸热过程,需要有可以承受干燥、挥发、还原或气化等多功能的气化剂,以及热和燃料,以促进整个反应才能使生物质资源的作用发挥至最大^[12]。国外在生物质气化技术方面的研究比较多,Sharma等^[13]研究了空气、水蒸气两种气化剂对生物质气化反应的影响,结果表明:生物质燃气组成及占比随时间和温度变化较大。在生物能源政策下^[14],伊朗尝试使用不同的生物质作为原料(如甘蔗渣、麦秆、木材废料等)进行气化技术的研究,但其整体处于市场开发的早期阶段;而目前对支持伊朗开发和实施生物质气化项目的政策相对较少^[15]。英国也迫于温室气体的压力,开始对生物质能的开发利用给予高度重视^[16]。到目前为止,生物质气化工艺已经通过几种传统的技术得到了不断的发展^[17];但是这些气化工艺或者是以空气作为气化介质产生高浓度 N_2 进而降低能量密度,不适合于工业化生产;或是以富含氧气的水蒸气作为气化介质而增加成本;另外,传统气化中产生大量的焦油阻塞下游设备而降低气化效率^[18]。因此,有学者提出了化学环化技术(CLG),即使用金属氧化物的晶格氧作为分子氧的替代品来氧化燃料;与常规气技术化相比,CLG的载体可以提供氧气来源,同时避免增加空分装置的成本消耗;其次,晶格氧有更高的机会氧化燃料进而提高合成气的质量等。该技术为生物质气化提供了更高的效率和更低的生产成本。加拿大学者Aghabaranjad等^[19]利用Aspen Plus对常规纯氧气化装置(CGPO)和CLG进行了模拟,其中CGPO反应器使用砂为床料的鼓泡流化床,由变压吸附装置提供氧气,CLG由一个鼓泡流化床气化炉和一个快速流化床氧化器串联,研究发现:CLG装置的总资本投资高于CGPO装置,但CGPO的年运营成本较低。同时,加拿大学者对7 MW生物质GLG气化装置的技术经济进行分析发现,通过 CO_2 解吸过程实现了吸附剂的完全回收和循环^[20]。美国学者^[21]基于Aspen Plus模型分析了木质生物质原料反应的热力学特性,探讨了生物质转化为合成气的化学循环工艺的基本原理,研究表明:生物质转化为合成气的化学循环工艺明显降低了生物质和水蒸气的消耗,显著提高了生物质转化效率。Cormos^[22]对生物质直接化学循环(BDCL)技术在氢电联产中的应用进行了评价,研究表明:与其他 CO_2 捕集方案相比,BDCL技术提供了高能效(42%的净效率)和几乎全部的碳捕获率(>99%)。煤和生物质的联合气化是一种利用合成气生产热能、电力、液体和气态生物燃料的技术^[23],对提高合成液体燃料所需产物气中 H_2/CO 比具有协同作用;印度学者^[24]在2019年提出煤与生物质共气化技术是未来清洁能源替代的选择之一。

1.2.2 国外产业现状 近年来,受可再生能源发展政策的激励,国外加大了对气化合成技术产业的发展,美国在这方面尤其突出,如:在生物质整体气化联合循环发电(原料200 kt/d,间接加热气化技术)、生物质气化燃煤耦合发电(木片为原料,15%混燃比例,电站规模50 MW)等。英国在这2个方面也具有较大的规模,其中具有8 MW生物质整体常压气化联合循环发电以及多种原料混燃构成的生物质气化燃煤耦合发电规模1 980 MW。除此以外,瑞典、意大利、巴西、印度等国家在生物质整体气化联合循环规模较大,荷兰、芬兰、比利时等国家在生物质气化燃煤耦合发电方面规模较大^[25]。

1.3 国内研究及产业现状

1.3.1 国内研究现状 我国在生物质气化技术方面的研究主要围绕气化技术、装备及原理这3个方面展开,着重提出了生物质焦油、合成气等产品质量和含量、环境污染及生产成本等方面存在的问题^[26]。诸林等^[27]以松木、玉米秸秆、木屑为气化原料,在固定床反应器上对生物质进行了模拟研究和反应动力学分析;关海滨等^[28]提出如何利用化学法进行焦油的脱除和净化,以及如何开发出复合型的、具有高活性的催化剂来提高生物质气化效率。天津大学陈冠益团队^[29]以中药渣为原料进行水蒸气气化的研究,结果表明:气化温度的升高能够促进气化反应,且中药渣具有良好的水蒸气气化特性。华东理工大学吴幼青团队^[30]在自行设计的反应器中,研究了7种生物质(稻壳、稻草、玉米秸秆、棉花秸秆、木屑、椰子纤维和鸡粪)在高温水蒸气气氛下的气化特性,分析了反应温度和反应时间对稻壳炭孔结构的影响,结果表明:仅需5 min棉花秸秆就能完全气化且产品气中 H_2 、 CO 、 CH_4 和 CO_2 含量分别达到51%、22%、

5.5%和21.4%；而稻草需要40 min才能完全气化且活性最低。同时,该团队在不同气化工艺条件下研究了生物质灰渣中残炭的结构特征及气化活性^[31]。针对生物质气化的特点,生物质整体气化联合循环(BIGCC)是一种将生物质燃料转化为电能的发电技术,也是一种创新的生物质利用技术;南开大学热能转换与控制实验室^[32]开展了BIGCC与CLG耦合发电系统仿真与实验验证,研究表明最佳气化温度为860℃,最适宜的水/生物质(S/B)比值为1.0,该系统表现出更好的电厂性能,其发电效率高于现有的BIGCC示范电厂。此外,利用超临界水气化生物质制氢也得到了很好的发展前景^[33]。但是,目前林业资源气化供热发电产业发展过程中普遍存在原料收储运体系不完善、生产过程自动化和智能化水平不高、标准化生产技术不成熟、高值化和综合利用技术缺乏等问题^[34]。

1.3.2 国内产业现状 我国生物质气化产业自“九五”期间开始,广州能源研究所建成的福建莆田1 MW谷壳气化发电系统、海南三亚1 MW木粉气化发电系统、河北邯郸600 kW秸秆气化发电系统;到“十一五”期间,建成的百吨级生物质气化合成二甲醚的评价系统和中试装置;“十二五”期间,我国又建成了“千吨级生物质气化合成醇醚燃料示范系统”及江苏兴化5 MW气化-蒸汽联合循环电站。近年来,我国更是成功地完成了几十个生物质燃气项目^[25]。同时,我国共建成秸秆气化集中供气站900处,运行数量为600处,供气21万户,每个正在运行的气化站平均供气约350户^[35];国电荆门电厂660 MW机组实现了国内第一个生物质气化耦合燃烧发电,生物质燃气耦合发电部分为10.8 MW,气化炉的处理量为8 t/h^[25]。中国林业科学院林产化学工业研究所建立了5 MW的农林生物质剩余物热解气化实验装置,并进行生物质燃气发电试验和研究示范及系统装置的推广应用,成功推广应用农林生物质气化系统和生产线十二台(套),取得良好的经济和社会效益^[36]。生物质气化多联产技术也为我国的绿色能源发展做出了巨大贡献,如:以橡胶木废弃物为原料的“1 MW生物质气化炭-电-热-肥多联产”项目、“2.5 MW生物质气化发电-炭基肥料联产”项目。

生物质气化技术的发展及前景广阔,气化产品用途广泛,但是还存在很多问题。从国内来看,生物质燃气质量不稳定、热值低、CO含量高;已建成的生物质气化系统存在焦油净化效率低,焦油含量高且缺乏成套气化装置长期运行的实践经验;气化炉(如:集中供气、发电、家用气化炉等)规模和容量较小且没有相关的标准体系做支撑等;这些因素阻碍着我国生物质气化技术的大规模发展。

2 生物质气化装置及发展现状

2.1 生物质气化装置

生物质气化过程中气化装置是非常重要的部分,气化装置主要包括气化炉及一些辅助设备。作为气化反应技术的核心部件,气化炉对于生物质气化技术的发展起着决定性作用,且每种气化炉都有特定的适用范围和适应性。目前,比较成熟且应用较广的气化炉包括固定床、流化床、气流床3种炉型^[25]。其中,固定床气化炉主要包括开心式、上吸式、下吸式^[37]、横吸式;流化床气化炉包括内循环、外循环、双循环、鼓泡流化床气化炉等^[38-40]。

固定床气化炉是指气流在经过气化炉内物料层时,物料相对于气流是静止的,比较典型的固定床气化炉是上吸式气化炉,如图2所示。固定床气化炉结构简单,容易操作,但由于存在燃气中焦油含量较高、热量传递效果差等缺点,不适用于规模化生产,主要用于10 MW以下的电厂。流化床是一种利用气体或液体作为介质,当通过生物质颗粒状固定层时带动固体颗粒使其处于悬浮流动状态,并进行气(液)固相反应过程的反应器,以鼓泡流化床较为典型,如图3所示。流化床气化炉由于较高的传热传质系数、反应速率快、副产物少、较好的温度分布和较优的气固接触条件等适合用于生物质气化^[35]。因此,流化床气化炉更适合中等经济规模化生产,主要用于10 MW以上的电厂^[36,38]。气流床气化炉是现阶段最成功的气化炉,被广泛应用于煤、石油焦、炼油铲渣等的大型气化。该装置对气化原料的适应性较好,但是由于物料在床内停留时间较短,需要将原料处理的非常均匀细小,而这恰恰又是非常困难的过程。同时,由于生物质氧含量较高还导致经济性差。因此,气流床气化炉在生物质气化过程中适应性较弱。

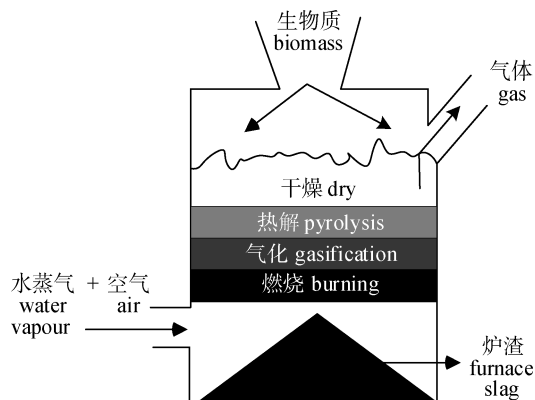


图 2 典型固定床气化炉

Fig. 2 Typical fixed bed gasifier

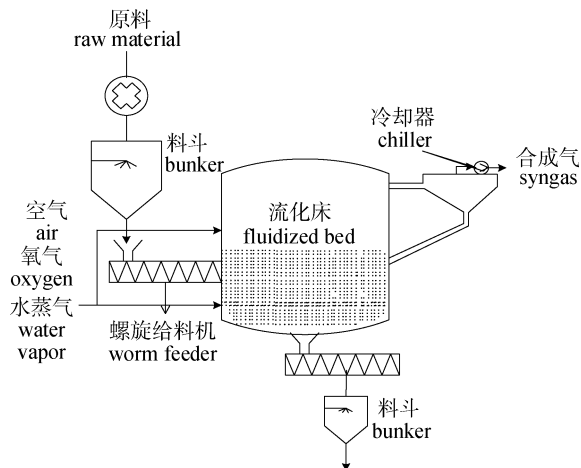


图 3 典型鼓泡流化床气化炉

Fig. 3 Typical bubble fluidized bed gasifier

2.2 国内外发展现状

生物质气化是一个氧气供应受限的热化学转化过程,气化炉是生物质气化技术的核心^[31]。1973 年石油危机期间,北美在短短 30 年内安装了 12 000 多台平均装机容量为 1 MW 的大型气化炉。一些发展中国家正专注于实施基于现有技术的绿色清洁能源生产和利用的气化炉设计。目前,全球有超过 60 家有能力的商业化气化炉制造商^[39],2017 年截止全球商用气化炉情况见表 2。由表 2 可知,不同类型的农作物秸秆所使用的气化炉结构不同,如:农林废弃物使用流化床气化炉、木质类使用上吸式气化炉。

表 2 全球商用部分固定床和流化床气化炉^[39-42]

Table 2 Global commercial fixed and fluidized bed gasifiers^[39-42]

国家 country	类型 type	原料 raw material	规模 scale
美国 America	下吸式 downdraft	树木 trees	1 MW
		木屑 wood chips, 玉米棒 corn cob	40 kW
丹麦 Denmark	上吸式 upper suction	皮革 leather	2-15 MW
	下吸式 downdraft	稻草 straw, 木屑 wood chips, 树皮 bark	1-15 MW
新西兰 New Zealand	下吸式 downdraft	木屑残渣 wood chips residue	0.5 MW
		木块 wooden block, 木片 piece, 柳条 wicker	30 kW
法国 France	下吸式 downdraft	农业残渣 agricultural residue	100-600 MW
英国 Britain	下吸式 downdraft	榛子壳 haznut shell	30 kW
		农业废物 agricultural wastes	300 kW
印度 India	下吸式 downdraft	稻壳 rice husk	100 kg/h
		丹茶 dan tea, 玉米棒 corn cob, 木材 wood	25-100 kW 128 kW
比利时 Belgium	小型 small scale	木屑 wood chips	160 kW
南非 South Africa	下吸式 downdraft	木块碎片 wood block fragments, 煤 coal	30-500 kW
芬兰 Finland	上吸式 upper suction	木片 wood chips, 稻草 straw, 泥炭 peat	4-5MW
荷兰 Holland	下吸式 downdraft	稻壳 rice husk	150 kW
		木屑 wood chips	200 kW
	下吸式 downdraft	农作物残渣 crop residue	300 kW
		稻壳 rice shell	200 kW
		农林废弃物 all kinds of agricultural and forestry wastes	1 000 kW
中国 China	流化床 fluidized bed	农林废弃物 all kinds of agricultural and forestry	200-1 200 kW
	循环流化床 circulating fluidized bed	秸秆 straw, 木屑 wood chips, 花生壳 peanut shell	5.5 MW

Sarker 等^[42]用固定床下吸式反应器评价了5种木屑的气化潜力,其最优 S/B 值在 0.29 ~ 0.45, 碳转化率在 61% ~ 76%。Bhoi 等^[43]以柳枝花和东部红柏为原料,设计、建造和评价了一套 100 kg/h 的上升式下吸式气化炉系统,结果表明:生物质种类和 S/B 值对合成气组成和热值有显著的影响,在最佳 S/B 值为 0.22 和 0.24 时,柳枝菊和红柏的最大气化效率分别为 64% 和 80%,该气化炉的放大进一步提高了系统的反应性能。美国天然气技术研究所为了处理各种煤并提供中低热值的合成气,研究开发了单级流化床气化炉(即 U-GAS 气化技术),该气化炉适用于煤炭、煤/生物质联合气化(与低于 40% 的生物质混合)的应用^[45]。美国学者研究提出的生物质转化化学循环工艺中所采用的气化系统不需要空气分离(ASU)装置、焦油重整装置、蒸汽重整装置或水煤气变换(WGS)等反应器就可将生物质原料转化生成高纯度的合成气^[21]。Pecate 等^[45]研究了生物质气化的快速内循环床的流体力学性能,考察了床层温度(20 ~ 950 °C)和流化气体(空气或蒸汽)对致密循环流化床的流体力学参数的影响。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剩余物原料的特点,创新开发了新型锥形流化床生物质气化炉并设计了一种自热式固定床焦油裂解炉^[35],该气化炉的运行成功实现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。Jiang 等^[46]提出一种结构简单,气化效率高、碳转化率高且原料适用性广的复合式固定床生物质气化装置,对工业化应用起到了极大的推动作用。另外,对于具有可持续发展路径的生物质气化多联产技术,国内针对不同的生物质原料,在固定床和流化床气化炉的基础上也研究出了多套气化联产系统并应用于工业化,如:农作物秸秆类流化床气化发电多联产系统、木片类(椰子壳片)上吸式固定床气化发电多联产系统、果壳类(稻壳、杏壳、桃壳、棕榈壳等)下吸式固定床气化发电多联产系统等,都实现了生物物质的高效清洁利用,达到了很好的经济、社会效益;但该技术的发展还需要进行大规模的基础研究。

生物质气化装置常用固定床或流化床气化炉,固定床气化炉由于结构简单、原料适应性广、对结渣的敏感度低等特点常用于小规模气化;而流化床具有较大的优势,适用于生物质规模化生产。因此,开发新型的气化系统是促进生物质气化技术发展的途径之一。

3 生物质气化技术存在的问题

由于煤炭资源的大量消耗引起了严重的环境污染,导致能源结构不平衡,同时,“碳达峰、碳中和”目标的提出^[47-50],加速了我国能源低碳化转型。在此背景下,生物质是继煤、石油、天然气之后出现的第四大能源,遍及世界各地,蕴藏量极大^[51]。我国作为农业大国,具有丰富的生物质资源且来源广泛,单以农业大省河南而言,近年来仅秸秆资源的理论可获得量每年达到 4 220 万吨左右(表 3),生物质资源储藏量巨大(每年 24 171.3 ~ 28 606.1 万吨)。这么大容量的生物质资源先不谈总体利用情况,就单从气化技术而论,虽然在国内外都有很好的发展,但仍然没有国际化。

表 3 河南省秸秆资源的理论可获得量

Table 3 Theoretical access of straw resources in Henan province

10 000 t

年份 year	水稻 rice	小麦 wheat	玉米 corn	豆类 beans	薯类 potatoes	花生 peanuts	油菜 rape	棉花 cotton	麻类 hemp	糖料 sugar	烟叶 tobacco leaves
2010	157.7	1323.5	1396.7	64.0	51.8	264.7	93.1	64.8	1.6	1.7	0.8
2011	158.8	1341.0	1449.4	65.3	52.8	266.0	81.0	55.4	1.8	1.7	0.8
2012	158.2	1384.0	1718.4	54.2	37.3	280.8	60.6	24.6	1.6	1.4	0.8
2013	155.0	1402.6	1808.2	59.3	34.5	290.4	58.0	16.9	1.6	1.4	0.9
2014	167.5	1453.6	1784.6	35.3	34.1	288.5	52.0	12.2	1.2	1.3	0.8
2015	167.3	1514.5	1955.1	33.5	34.0	295.3	48.4	9.8	1.2	1.1	0.8
2016	170.1	1553.8	1893.5	33.6	33.6	305.9	42.8	7.1	1.2	1.1	0.7
2017	162.4	1591.0	1854.0	36.6	33.4	327.9	44.1	6.4	1.0	1.0	0.7
2018	167.8	1547.1	2008.9	69.8	24.2	354.3	40.8	5.5	0.9	1.0	0.7

我国生物质气化技术没有实现国际化主要由于以下原因:1) 尽管生物质资源量丰富,但其收-储-

运体系还不是很完善,加之生物质资源密度较低,而生物质气化技术的发展首先取决于原料的可获得性;2) 生物质资源的利用主要是废弃资源的二次利用,过程中的资金运转还需依靠政府的支持以及市场的收益;3) 生物质气化技术中,气化炉的设计、焦油含量高、燃气净化、焦油去除等一系列问题待进一步解决;4) 在生物质气化技术中,缺乏可操作的指标体系,我国的生物质气化标准仅4件且为行业标准(表4)。所以,我国的生物质气化技术要在解决以上问题的同时不仅要走扎实的基础研究和开发路径,同时也要考虑该技术的总体需求以及与其他技术的竞争。

表4 国内生物质行业标准化数量

Table 4 Standardization quantity of the domestic biomass industry

标准类型 standard type	固体生物质 solid biomass	生物天然气 biogas	燃料乙醇/生物柴油 fuel ethanol/biodiesel	农林生物质综合利用 comprehensive utilization of agricultural and forestry biomass	生物质供热发电 biomass heating and power generation	生物质气化 biomass gasification
国内 domestic	30	18	8	14	0	0
行业 industry	86	76	20	7	15	4

4 结语与展望

通过大量文献及最新生物质领域快讯对生物质气化技术及气化炉的研究现状进行了分析,明确了生物质气化技术存在的问题,总结了生物质气化技术的发展方向和面临的挑战,为下一步研究生物质燃气利用及焦油催化热解制富氢燃气提供了理论依据,也为生物质气化技术的进一步发展奠定了基础。

根据“十四五”能源发展规划、生态文明建设和绿色发展的要求,我国在生物质能领域的发展中,应紧跟国际步伐,加大力度探索“生物质气化发电、热电联产及多联产技术”的新发展思路,努力研发集生物质气化-燃气净化-合成气应用于一体的气化工艺及系统,进一步推进生物质与焦油耦合或协同气化。如何开发低成本和产生高热值燃气路径、制定相关标准,实现现有生物质气化技术的大规模化利用;如何开发高活性、高稳定性的催化剂,以及去除生物质焦油新工艺等成为生物质气化技术面临的重要挑战和急需解决的难题。

参考文献:

- [1] 国家可再生能源中心,国家发展和改革委员会能源研究所可再生能源发展中心. 中国可再生能源产业发展报告 2018[M]. 北京:中国经济出版社,2018.
National Development and Reform Commission, Center for Renewable Energy Development of Energy Research Institute, National Development and Reform Commission. China Renewable Energy Industry Development Report[M]. Beijing: Economic Press China, 2018.
- [2] 张蓓蓓. 我国生物质原料资源及能源潜力评估[D]. 北京:中国农业大学,2018.
ZHANG B B. Assesment of raw maerial supply capablity and energy potential of biomsss resources in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [3] 卓叶欣,朱玲君,王树荣. 生物质气化制取合成气及选择性费托合成烃类燃料的研究现状[J]. 可再生能源,2020,38(12):1569-1576.
ZHUO Y X, ZHU L J, WANG S R. Research status on conversion of syngas derived from biomass to hydrocarbon fuels via selective Fischer-Tropsch synthesis[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(12): 1569-1576.
- [4] 仇松柏. 利用生物质基合成气制备清洁生物燃料的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
QIU S B. Study on production of clean biofuel using bio-syngas[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.
- [5] 吴创之,刘华财,阴秀丽. 生物质气化技术发展分析[J]. 燃料化学学报,2013,41(7):798-804.
WU C Z, LIU H C, YIN X L. Status and prospects for biomass gasification[J]. Journal of Fuel Chemistry Technology, 2013, 41(7): 798-804.
- [6] SAFARIAN S, UNNTHORSSON R, RICHTER C. Performance investigation of biomass gasification for syngas and hydrogen production using Aspen Plus[J]. Open Journal of Modelling and Simulation, 2022, 10(2): 71-87.
- [7] MORETTI L, ARPINO F, CORTELLESSA G, et al. Analytical and numerical modelling of biomass gasification in downdraft gasifiers[J/OL]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2177(1): 012028[2021-04-10]. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2177/1/012028>.
- [8] DUTTA A, BAIN R L, BIDDY M J. Techno-economics of the production of mixed alcohols from lignocellulosic biomass via high-temperature

- gasification[J]. *Environmental Progress Sustainable Energy*,2010,29(2):163-174.
- [9] NING S, JIA S, YING H, et al. Hydrogen-rich syngas produced by catalytic steam gasification of corncob char[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2018,117:131-136.
- [10] UMEKI K, NAMIOKA T, YOSHIKAWA K. Analysis of an updraft biomass gasifier with high temperature steam using a numerical model[J]. *Applied Energy*,2015,90(1):38-45.
- [11] UMEKI K, YAMAMOTO K, NAMIOKA T, et al. High temperature steam-only gasification of woody biomass[J]. *Applied Energy*,2010,87(3):791-798.
- [12] JEON S J, JEONG S H, KIM B J, et al. Gasification technologies for lignocellulosic biomass[M]//HONC. *Emerging Areas in Bioengineering*. Weinheim:Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,2018:215-254.
- [13] SHARMA S, SHETH P N. Air-steam biomass gasification:Experiments, modeling and simulation[J]. *Energy Conversion Management*,2016,110(15):307-318.
- [14] AHMADI K, GHOLIZADEH H, EBADZADEH H R, et al. *Agricultural Statistics Volume I; Crop Products*[M]//Iran A M O. *Agricultural Minist*,2018:125.
- [15] SAMADI S H, GHOBADIAN B, NOSRATI M. Prediction and estimation of biomass energy from agricultural residues using air gasification technology in Iran[J]. *Renewable Energy*,2020,149:1077-1091.
- [16] MOHAMED U, ZHAO Y, HUANG Y, et al. Sustainability evaluation of biomass direct gasification using chemical looping technology for power generation with and W/O CO₂ capture[J/OL]. *Energy*, 2020, 205: 117904 [2021-04-10]. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117904>.
- [17] 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.
- [18] CHAN F L, TANKSALE A. Review of recent developments in Ni-based catalysts for biomass gasification[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2014,38(10):428-438.
- [19] AGHABARARNEJAD M, PATIENCE G S, CHAOUKI J. Techno-economic comparison of a 7-MWth biomass chemical looping gasification unit with conventional systems[J]. *Chemical Engineering & Technology*,2015,38(5):867-878.
- [20] GOPAUL S G, DUTTA A, CLEMMER R. Chemical looping gasification for hydrogen production: A comparison of two unique processes simulated using ASPEN plus[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*,2014,39(11):5804-5817.
- [21] XU D, ZHANG Y, HSIEH T L, et al. A novel chemical looping partial oxidation process for thermochemical conversion of biomass to syngas[J]. *Applied Energy*,2018,222(15):119-131.
- [22] CORMOS C C. Biomass direct chemical looping for hydrogen and power co-production:Process configuration, simulation, thermal integration and techno-economic assessment[J]. *Fuel Processing Technology*,2015,137(1):16-23.
- [23] MANZANARES-PAPAYANOPOULOS E, HERRERA-VELARDE J R, ARRIOLA-MEDELÍN A, et al. The co-gasification of coal-biomass mixtures for power generation: A comparative study for solid fuels available in Mexico[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*,2013,36(1):104-111.
- [24] KAMBLE A D, SAXENA V K, CHAVAN P D, et al. Co-gasification of coal and biomass an emerging clean energy technology: Status and prospects of development in Indian context[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*,2019,29(2):171-186.
- [25] 刘华财, 吴创之, 谢建军, 等. 生物质气化技术及产业发展分析[J]. *新能源进展*,2019,7(1):1-12.
LIU H C, WU C Z, XIE J J, et al. Status and development of technology and applications of biomass gasification[J]. *Advances in New and Renewable Energy*,2019,7(1):1-12.
- [26] 王建楠, 胡志超, 彭宝良, 等. 我国生物质气化技术概况与发展[J]. *农机化研究*,2010,32(1):198-201,205.
WANG J N, HU Z C, PENG B L, et al. General situation of biomass gasification technology in China[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*,2010,32(1):198-201,205.
- [27] 诸林, 蒋鹏, 范峻铭, 等. 串行流化床生物质气化动力学模拟[J]. *天然气工业*,2015,35(2):114-118.
ZHU L, JIANG P, FAN J M, et al. Kinetic modeling of biomass gasification in interconnected fluidized beds[J]. *Natural Gas Industry*,2015,35(2):114-118.
- [28] 关海滨, 张卫杰, 范晓旭, 等. 生物质气化技术研究进展[J]. *山东科学*,2017,30(4):58-66.
GUAN H B, ZHANG W J, FAN X X, et al. Research progress of biomass gasification technology[J]. *Shandong Science*,2017,30(4):58-66.
- [29] 陈冠益, 郭倩倩, 颜蓓蓓, 等. 中药渣水蒸气气化制备合成气研究[J]. *可再生能源*,2017,35(3):345-353.
CHEN G Y, GUO Q Q, YAN B B, et al. Syngas production from Chinese herb residue steam gasification[J]. *Renewable Energy Resources*, 2017,35(3):345-353.
- [30] LI W, WU S, WU Y, et al. Gasification characteristics of biomass at a high-temperature steam atmosphere [J/OL]. *Fuel Processing Technology*,2019,194:106090[2021-04-10]. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.013>.

- [31] ZHANG W, HUANG S, WU S, et al. Study on the structure characteristics and gasification activity of residual carbon in biomass ashes obtained from different gasification technologies[J/OL]. *Fuel*, 2019, 254: 115699[2021-04-10]. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115699>.
- [32] YIN F, SHAH K, ZHOU C, et al. Novel calcium-looping-based biomass-integrated gasification combined cycle: Thermodynamic modeling and experimental study[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(3): 1730-1740.
- [33] ZHANG H, ZHANG X, DING L, et al. Characteristics of cyanobacterial biomass gasification in sub- and supercritical water[J]. *Energy Fuels*, 2019, 33(4): 3239-3247.
- [34] 孙昊, 孙云娟, 马名哲, 等. 林业资源热解气化供热发电产业发展趋势与战略对策[J]. *生物质化学工程*, 2022, 56(2): 40-48.
SUN H, SUN Y J, MA M Z, et al. Development trend and strategic countermeasures of forestry resources gasification, heat supply and power generation industry[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2022, 56(2): 40-48.
- [35] 王红彦. 秸秆气化集中供气工程技术经济分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
WANG H Y. Technical and economical analysis of straw gasification engineering for central gas supply[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [36] 蒋剑春, 阴秀丽, 孙荣峰, 等. 农林剩余物制备生物燃气关键技术研究[J]. *科技创新导报*, 2018(35): 242-243.
JIANG J C, YIN X L, SUN R F, et al. Research on key technology of agricultural and forestry residues[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2018(35): 242-243.
- [37] 程相文, 刘丽智, 魏荣. 下吸式固定床气化炉的气化过程及气化特性模拟分析[J]. *生物质化学工程*, 2021, 55(2): 9-15.
CHENG X W, LIU L Z, WEI R. Analysis of gasification process and gasification characteristics of downdraft fixed bed gasifier[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2021, 55(2): 9-15.
- [38] BASU P. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*[M]. 2nd ed. [s. l.]: Academic Press, 2013.
- [39] HANAOKA T, MIYAZAWA T, MATSUNAGA K, et al. Development of conversion technology from cellulosic biomass to liquid fuel via syngas by biomass-to-liquid(BTL)[J]. *Journal of the Japan Institute of Energy*, 2011, 90(1): 31-36.
- [40] 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 X J, YANG T, LIU S J, 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.
- [41] ZUOLONG L, PEIQIN S, SHAOHUI S. Present research status and development of biomass gasification technologies and gasifiers[J]. *Hennan Chemical Industry*, 2011, 28(1): 21-25.
- [42] 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.
- [43] SARAVANAKUMAR A, HAGGE M J, HARIDASAN T M, et al. Numerical modelling of a fixed bed updraft long stick wood gasifier[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2011, 35(10): 4248-4260.
- [44] ZHOU Z, YIN X, XU J, et al. The development situation of biomass gasification power generation in China[J]. *Energy Policy*, 2012, 51: 52-57.
- [45] 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.
- [46] BHOI P R, HUHNKE 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.
- [47] PUIG A M, HERNANDEZ J A, BRUNO J C, et al. Artificial neural network models for biomass gasification in fluidized bed gasifiers[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2013, 49(2): 279-289.
- [48] PECATE S B, MORIN M, KESSAS S A, et al. Hydrodynamic study of a circulating fluidized bed at high temperatures: Application to biomass gasification[J]. *KONA Powder Particle Journal*, 2019, 36: 271-293.
- [49] JIANG J G, SUN R F, XU M, et al. Research on the device of compound fixed bed low tar biomass gasification[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2019, 18(3): 214-218.
- [50] 林伯强. 中国能源发展报告 2018[M]. 北京: 北京大学出版社, 2018.
LIN B Q. *China Energy Outlook*[M]. Beijing: Peking University Press, 2018.
- [51] 任菊荣, 苏允泓, 应浩, 等. 生物质气化制富氢合成气的研究进展[J]. *生物质化学工程*, 2022, 56(3): 39-46.
REN J R, SU Y H, YING H, et al. Research progress of biomass gasification for hydrogen-rich syngas[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2022, 56(3): 39-46.