

生物质气化发电技术研究进展

常圣强¹, 李望良², 张晓宇¹, 马力强¹, 鲁长波³, 安高军³

(¹中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; ²中国科学院过程工程研究所, 中国科学院绿色过程与工程重点实验室, 北京 100190; ³中国人民解放军总后勤部油料研究所, 北京 102300)

摘要: 化石能源枯竭和环境污染两大难题日渐成为社会发展的枷锁, 人类亟需寻找绿色清洁能源推动社会可持续发展。生物质具有可再生性、原料丰富和清洁低碳的特点, 拥有巨大应用潜力。生物质气化发电技术作为生物能利用的方法之一, 不仅可以替代传统能源, 还能避免能源利用过程中带来的环境污染问题。本文介绍了国内外生物质气化发电技术研究进展, 包括气化设备研究、生命周期评价和发电工艺研究等, 为生物质气化发电技术的研究提供参考和借鉴。

关键词: 生物质; 气化发电; 生命周期评价; 发电工艺; 研究进展

中图分类号: TK 6

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2018) 08—3318—13

Progress in biomass gasification power generation technology

CHANG Shengqiang¹, LI Wangliang², ZHANG Xiaoyu¹, MA Liqiang¹, LU Changbo³, AN Gaojun³

(¹School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

²Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ³Beijing POL Research Institute, Beijing 102300, China)

Abstract: The depletion of fossil energy and environmental pollution gradually become the barriers of social development. To promote the sustainable development of society, it is urgent to seek green and clean energy. Because of its renewability, abundance in raw materials, cleanness and low-carbon characteristics, biomass energy has great potential for industrial application. Biomass gasification-power generation technology, one of the methods of biomass utilization, can replace the traditional fossil energies and avoid environmental pollution. This paper reviews the research progress of biomass gasification-power generation technology, including gasification equipment, life cycle assessment and power generation technology, etc., which can provide the references for the development of biomass gasification-power generation technology.

Key words: biomass; gasification and power generation; life cycle assessment; power generation technology; research progress

引言

化石能源的过度开发和利用, 导致环境污染和全球气候变暖, 可再生能源受到世界各国的广

泛关注^[1]。生物质能具有可再生、环境友好和量大等优点, 越来越引起学者的重视^[2]。生物质作为可再生固体炭资源, 每年产生的生物质达到 2200 亿吨^[3]。截止到 2014 年, 生物质能源作为最大的可

2018-03-06 收到初稿, 2018-04-22 收到修改稿。

联系人: 李望良。第一作者: 常圣强 (1990—), 男, 博士研究生。

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2018M631422)。

Received date: 2018-03-06.

Corresponding author: Prof. LI Wangliang, wlli@ipe.ac.cn

Foundation item: supported by China Postdoctoral Science Foundation (2018M631422).

再生能源, 占全球能源消耗的 14%, 同时其发电总量达 493 TW·h, 占全球可再生能源发电总量的 9.01%^[4]。但是, 生物质的利用也存在自身的问题, 例如受运输距离、季节、能量密度较低等因素影响较大。

生物质能源化利用形式有固体燃料、木炭、合成气、热解油、沼气、生物质发电和生物乙醇等。其中, 气化发电技术是生物质能利用的一种重要形式。它是基于热化学转换原理将固态生物质气化生成合成气, 再通过外燃机或内燃机做功发电, 是一种高效清洁的现代化生物质能利用方式^[5]。生物质气化发电设备紧凑、污染少, 可以解决生物质燃料的能量密度低和资源分散等缺点。生物质气化发电对改善我国以煤炭发电为主的电力生产结构, 特别是对广大农村偏远地区提供清洁电力具有十分重要的意义。

目前, 生物质能源仍处在政策引导扶持期, 国家在“十三五”期间将会继续加大对生物质能发电产业的支持, 依据《生物质能发展“十三五”规划》, 在 2020 年之前全国生物质发电装机容量将达到 1500 万千瓦^[6]。在国家政策鼓励之下, 生物质气化发电技术具有广阔的应用前景。

1 生物质气化

1.1 气化概念和原理

生物质气化是指生物质在高温 (500~1400℃) 作用下, 热解气化生成含有 CO、CH₄ 和 H₂ 等可燃性气体, 也含有一定量的 CO₂、H₂O、N₂ 和其他烃类化合物^[7]。生物质气化发电要经过如下 3 个环节: (1) 生物质气化, 经过加热干燥等其他预处理的生物质在高温环境下热解气化, 产生可燃性气体; (2) 气体净化, 把气体通入净化系统, 除去气体中的灰分、焦炭和焦油等杂质, 以满足发电设备的入料要求; (3) 气体燃烧发电, 净化后的可燃气体通入燃气轮机或者其他内燃机燃烧做功发电, 也可以通入锅炉内燃烧, 利用产生的蒸汽驱动蒸汽机发电。

1.2 气化生物质种类

通常来说, 作为气化发电原料的生物质大致能划分为如下 4 类。

(1) 木材残余物——主要包括: 燃料木材、木炭、废弃木材和森林的残余物

Weerachanchai 等^[8]使用落叶松作为原料, 在流化床反应器中, 气化得到低位热值在 6.49~15.48

MJ/kg 的合成气。Bhoi 等^[9]以阿拉伯胶树为原料在开心式气化炉中气化, 合成气热值达 4.39 MJ/m³。Yin 等^[10]以桃树剪枝为原料通过下吸式固定床中气化, 在不同入料粒度下, 合成气低位热值达到 4.40~4.70 MJ/m³。Ma 等^[11]在固定床气化反应器中使用两级下吸式空气给入, 以木片为原料生产三相产品: 产品气、木炭和提取液。合成气最大低位热值达到 5.28 MJ/m³。气化固体副产物木炭有较高热值, 达到 30.63 kJ/kg, 可用来制作型炭和速燃炭等燃料。木质素气化研究已经成为热点之一, 制浆造纸工业中每年产生约 5000 万吨的木质素副产物, 也可作为生物质气化的原料^[12]。Zhang 等^[13]使用密度泛函理论探究了 β -5 键型木质素高温气化过程, 并提出了四种可能的分解反应过程和四种连续反应过程, 根据结果, 木质素中 C α —C β 键断裂反应是最优的不存在竞争反应的分解反应过程, 其主要反应产物为 5-羟基苯乙醛和十二烷基苯酚, 3-乙酰基苯酚和水的后续反应中, 主要产物为 CO、苯酚和甲醛等。Guo 等^[14]以黑液中碱木质素为气化原料, 探究了酚钠 (—CONa) 和羧酸钠 (—COONa) 对碱木质素热解和气化的影响, 结果表明 NaOH 和 Na₂CO₃ 对碱木质素的热解和气化过程均有催化作用。

(2) 农业废弃物——与种植业和畜牧业有关的废弃物

2015 年, 我国农作物秸秆产生量 10.4 亿吨, 综合利用率 80.2%, 未被利用的秸秆, 随意丢弃或露天焚烧, 既污染了环境, 又浪费了资源^[15]。秸秆中 C 元素及 O 元素含量之和达到 80% 左右, 挥发分含量在 75% 左右^[16]。稻壳主要由纤维素 (34%~42%)、半纤维素 (16%~22%)、木质素 (21%~26%)、二氧化硅 (10%~21%) 和少量粗蛋白、粗脂肪组成^[17], 秸秆和稻壳中可利用物丰富。《能源发展“十二五”规划》^[18]和《农业生物质能产业发展规划(2007~2015)》^[19]推动了秸秆热解气化产业发展, 截止到 2014 年, 秸秆热解集中供气企业达到了 800 多家^[16,20]。通过秸秆气化得到的合成气, 热值一般在 4.20~7.56 MJ/m³ 之间, 属低热值可燃气体, 且合成气中焦油含量高, 容易造成管路堵塞, 设备使用寿命缩短。畜禽粪便气化可得到固体粪便炭、提取液和可燃气体等产品。秦恒飞等^[21]研究发现其合成气热值在 6.60~11.50 MJ/m³。畜禽粪便气化与其他原料相比较, 气化产品多, 且均能作资源化利用, 固体产品畜禽粪便炭具有一定的孔隙结构和比表面积, 可以用于土壤改良剂以及缓释肥, 也可以用于低热值燃

料, 另外合成气适合在村庄集中供气, 为农户日常生活提供便利。

(3) 能源作物——如木薯、棕榈等

Khan 等^[22]在流化床气化炉中对棕榈果壳进行气化, 其合成气热值达到 14.37 MJ/m^3 。Mohammed 等^[23]研究了棕榈果渣在流化床中的气化过程, 最优条件下, 合成气热值达到 15.26 MJ/m^3 。Moghadam 等^[24]以棕榈壳和废弃聚乙烯为原料在流化床中使用水蒸气催化气化, 最优条件下, 合成气产率达 422.40 g/(kg 原料) , 其中 H_2 产率达到 135.27 g/kg 。木薯加工过程中也会产生大量的固体废渣, 约占原料的 15% 左右, 岳金方^[25]研究了木薯渣在不同氛围下的热解气化过程, 当使用空气-水蒸气作气化剂时, 合成气热值达 6.88 MJ/m^3 。

(4) 城市固体垃圾中的有机物成分

2016 年, 全国城市生活垃圾清运量达 2 亿吨^[26]。与上述原料相比, 城市生活垃圾的热值较低, 组成复杂, 主要包含餐厨、废塑料、废纸、果皮、废弃木料和杂草等。Lopes 等^[27]对巴西的城市垃圾进行气化, 结果显示其合成气低位热值在 $1.88 \sim 10.21 \text{ MJ/kg}$ 之间浮动。Zhang 等^[28]使用城市固体垃圾作为气化原料探究了氧气添加量、蒸汽添加量和镍基催化剂组成对合成气性质的影响, 结果表明氧气和蒸汽量的增加会提高碳转换效率和冷气效率, 同时, 镍基催化剂中 Ce 的添加量也会促进焦油的分解和合成气产量的提高。当在 850°C , 当量比(ER)=0.06, 水碳比为 3.6 时, 经气化重整后合成气中氢气含量达到 36.78% (体积), CO_2 浓度 15.29% (体积), 冷气效率 70.17%, 碳转化率 87.17%, 合成气产率 $0.68 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。目前城市固体垃圾气化面临的困境是, 气化原料的水含量一般要低于 35%, 而餐厨水分含量高, 气化前须干燥预热、降低含水量, 不然多余的水分会带走热量, 造成能量损失^[29]; 废塑料在气化过程中, 不同的组分在高温下互相反应, 生成 HCl、溴化物等有害物^[30]; 城市固体垃圾的 N、S 元素, 经气化转变为 SO_2 和 NO_x 等污染物。

2 气化反应器种类

目前常用的气化反应器可以划分为固定床气化炉、流化床气化炉和气流床气化炉。

2.1 固定床气化炉

在固定床气化炉中, 物料床层相对稳定, 会依次进行干燥、热解、氧化以及还原等反应, 最后转化为合成气。根据气化剂和合成气进出方向的差异,

气化反应器能划分为上吸式气化炉、下吸式气化炉、横吸式气化炉和二级式气化炉。

2.1.1 上吸式气化炉 在重力作用下, 气化原料由顶部给入并向下运动, 而气化剂由底部给入, 和原料逆向运动, 又称逆流式气化炉。生物质原料在下方上升热气流的作用下, 脱除水分, 当温度升高到 250°C 以上, 会发生热解并析出挥发分, 转化生成可燃气和炭, 残留的木炭与气化剂发生氧化还原反应生成合成气。合成气通过和原料热交换来回收气体热量。同时, 物料得到干燥和部分热解, 热效率较高。上吸式固定床气化炉适合处理高灰 ($\leq 15\%$)、水含量较高 ($\leq 50\%$) 的生物质, 对生物质的种类和入料大小适应性较强。但是合成气中含有较高的焦油含量 ($50 \sim 100 \text{ g/m}^3$), 高于内燃机所允许的最大焦油含量 (0.10 g/m^3), 因此上吸式气化炉的合成气不适合内燃机^[31]。Chen 等^[32]在上吸式气化炉中以腺牧豆树和刺柏作为气化原料, 使用空气作气化剂, 研究了当量比(ER)、颗粒大小和含水量对温度曲线、产品气组成 (CO 、 CO_2 、 N_2 、 H_2 、 CH_4 和 C_2H_6) 以及高位热值的影响。结果表明, 随着 ER 从 2.7 增加到 4.2, H_2 和 CO 的摩尔分数减少, 然而 N_2 和 CO_2 的摩尔分数增加。如果 ER 在 2.7 左右, 去除 N_2 之后的合成气高位热值各自可以达到天然气高位热值的 26% 和 27.5%; 另外随着原料含水量的下降, 会导致最高反应温度升高, CO 的摩尔分数增加, H_2 的摩尔分数下降。Ismail 等^[33]探究了气化剂入料温度和 ER 对上吸式气化炉高温气化性能和焦油含量的影响。结果表明, ER 增加, 合成气中 CO 和 H_2 的质量分数会降低, CO_2 的质量分数会增加, 合成气的热值随之减少; 随着气化剂入料温度的增加, CO 和 H_2 的浓度会随之增加。

2.1.2 下吸式气化炉 气化剂由气化炉侧壁给入, 合成气和物料同时向下移动, 也称顺流式气化炉。气化剂首先和物料发生氧化放热反应, 为热解反应以及还原反应提供热量; 热解反应区域位于氧化区上部, 温度为 $300 \sim 700^\circ\text{C}$; 干燥区位于热解区的上部, 物料预热脱水; 还原区位于氧化区的下部, 氧化区产生的 CO_2 、炭和水蒸气在该区域发生还原反应, 同时残留的焦油在此区域发生裂解反应, 最后生成 CO 和 H_2 等合成气, 该区域反应温度为 $700 \sim 900^\circ\text{C}$ ^[34]。

下吸式固定床气化炉分为有喉和无喉两种类型, 有喉气化炉在炉子中上部有收缩区, 当气体通过收缩区时, 有利于生物质与气体混合和焦油裂解。

有喉下吸式固定床气化炉要求物料湿度低于 20%，灰分低于 5%。为顺利通过收缩区，该型气化炉只能处理粒度和形状大致相同的物料，合成气中焦油含量低于 1%，总效率相对较低^[35]。无喉下吸式固定床气化炉由放置在底部的圆柱形炉床构成。开顶式无喉气化炉保证了连续进料和炉内局部温度可控，适合粒度较小以及灰分含量较高的生物质^[35]。Jaojaruek 等^[36]为提高合成气质量和热解区火焰位置稳定性，改装二级空气和预混空气/产品气供应装置，一个进气喷嘴设置在燃烧区，通入空气，另外一个进气喷嘴设置在热解区。和传统二级下吸式固定床气化炉相比，合成气高位热值从 5.40 MJ/m³ 提高到 6.50 MJ/m³，焦油含量低于 0.05 g/m³，气化热效率提高 14%。Guo 等^[37]在传统下吸式固定床的主体结构上进行改造，改变传统单一的进气口，新增三级空气进气口。研究表明，当入料速度为 7.5 kg/h，ER 为 0.25~0.27，合成气低位热值达到 5.40 MJ/m³；当 ER 为 0.32 时，焦油含量最低达到 0.52 g/m³。表 1 展示了上吸式和下吸式固定床气化炉在世界范围内的应用。

2.1.3 横吸式气化炉 在炉内，物料朝下运动，而空气在炉壁一侧引入，反应后，合成气从同一水平

的对面炉壁排出。其优点是能对负载快速反应，启动时间短，设计高度低。与上吸式和下吸式气化炉相比，横吸式气化炉有分开的灰渣收集箱、氧化区和还原区，总效率很低，CO₂ 还原能力差，焦油的裂解能力有较大的局限性，合成气中焦油含量高，导致该气化炉只适合处理含焦油低的原料，且不适合处理细颗粒物料^[38]。Saravanakumar 等^[39]设计出以木材为处理对象的横吸式气化炉，处理量达 50 m³/h，并提出了燃烧热解模型。该型气化炉随着空气给入速率提高到 1.96 m/s 时，合成气产率也随之呈线性增长；当空气给入速率从 2.25 m/s 增长到 2.64 m/s 时，合成气产率会急剧增加；该型气化炉的气化效率达到 79%。

2.1.4 二级式气化炉 相对于热解和气化在一个反应室的气化炉，二级式气化炉把热解和气化分为两个部分。该型气化炉有两个方向上的进气口，主进气口在气化炉顶部，第二进气口在气化炉中间。由于空气补充，在第二段的高温减少了焦油含量，极大提升了控制反应过程温度的能力和系统总效率，合成气中的焦油含量约为 0.05 g/m³，是一段式气化炉气化气中焦油含量的 1/40 左右^[40]。当在内燃机中使用，为了避免焦油凝结，合成气中焦油含量应

表 1 世界范围内固定床的应用^[38]
Table 1 Worldwide commercially available fixed bed gasifiers^[38]

国家	气化器类型	入料类型	处理量	组织/项目
美国	下吸式固定床	碎木头、树桩	1 MW	CLEW
	下吸式固定床	木屑、玉米芯	40 kW	Stwalley Engg.
丹麦	上吸式固定床	有害垃圾，废皮革	2~15 MW	DTI
	上吸式固定床	秸秆，木屑，树皮	1~15 MW	VOLUND R & D Center
	下吸式固定床	木废料	0.5 MW	Hollesen Engg.
新西兰	下吸式固定床	木块，小木片，矮灌木林和柳树木片	30 kW	Fluidyne
法国	下吸式固定床	木材和农业废弃物	100~600 MW	Martezo
英国	下吸式固定床	木屑、榛子壳，城市固体废弃物	30 kW	Newcastle University of Technology
	下吸式固定床	工农废物	300 kW	Shawton Engineering
瑞士	下吸式固定床	木材和农业废弃物	50~2500 kW	DASAG
	下吸式固定床	废木料	0.25~4 MW	HTV Energy
印度	下吸式固定床	木屑，稻壳	100 kg/h	Associated Engg. Works
	下吸式固定床	稻壳	25~100 kW	Husk Power Biomass Gasifier Plant
	下吸式固定床	玉米芯，木材和植物	128 kW	Saran Biomass Gasifier Power Plant
	下吸式固定床	番薯，玉米渣皮	20~120 kW	Baharbari Village Power Plant, North Bihar
	下吸式固定床	松针	9 kW	AVANI Biomass Gasifier Power Plant
比利时	固定床	木屑	160 kW	SRC Gazel
南非	下吸式固定床	木块	30~500 kW	SystBM Johansson Gas Producers
芬兰	上吸式固定床	稻壳	150 kW	KARA Energy Systems
中国	下吸式固定床	锯屑	200 kW	Huairou Wood Equipment
	下吸式固定床	秸秆	300 kW	Huantai Integrate Gas Supply System
	下吸式固定床	各种农林废弃物	200 kW	Tianyan Ltd.

低至 $0.03 \sim 0.05 \text{ g/m}^3$ ^[35]。Wang 等^[41]设计的二级有喉下吸式固定床气化炉, 利用双层管作为热解器, 燃烧器的废气通过双层管中间的环隙, 给热解提供热量, 在气化炉外壁上均匀布置多个进气口, 以保证气化剂可以在炉内均匀分布, 气化剂通过加压输送。 O_2 含量对于合成气组分有显著影响, 当气化剂中 O_2 的体积分数从 21% 增长到 99.5% 时, H_2 和 CO 的含量从 30% 增长到 70%。Efika 等^[42]设计新型二级螺旋炉反应器, 第一段用于生物质热解, 第二段用于热解产物的蒸汽催化重整。第一段热解器温度固定在 500°C , 生物质停留时间 40 s, 第二段催化蒸汽重整的反应温度固定在 760°C 。当使用 NiO/SiO_2 作催化剂时, 合成气产率最高达 54% (质量)。当使用 $\text{NiO/Al}_2\text{O}_3$ 作催化剂时, H_2 产量最高达 44.4% (体积)。

2.2 流化床气化炉

与固定床气化炉相比, 流化床气化炉由燃烧室和布风板等组成, 没有炉栅部件。气化剂由布风板给入流化床气化炉中, 按气固流动特性不同, 可以分为鼓泡流化床气化炉和循环流化床气化炉。前者气流速率相对较低, 适合颗粒较大的原料, 一般需增加热载体。后者气化炉中气流速率相对较高, 从流化床中携带出的大量固体颗粒, 通过旋风分离器收集后重新送入炉内进行气化反应。Calvo 等^[43]使用稻秆在锅炉-流化床气化炉耦合系统中气化时, 研究了物质的量平衡, 能量平衡, 焦油浓度, 产品气组分, 气相氨、氯化物和钾浓度, 床料烧结情况以及气化效率的变化。当在最优操作条件下, 合成气热值达到 5.14 MJ/m^3 , 焦油含量 0.47 g/m^3 , 气化效率 61%, 冷气效率 52%。Song 等^[44]利用松木在互通式流化床气化炉中进行气化产氢实验, 分别考察氢气产量、生物质炭气化、生物质炭燃烧和生物质炭利用情况。随着气化炉反应温度的升高, H_2 产率下降, CO 产率上升, 但蒸汽/生物质的比值对合成气组分影响甚微。当 820°C , 蒸汽/生物质比值为 1.4 时, H_2 产率和碳气化率达到最大, 分别为 $0.55 \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 50.02%。Gómez-Barea 等^[45]设计三级流化床气化炉, 第一级是一个流化床气化炉, 炉内温度保持低于 800°C ; 合成气从第一级出来之后进入第二级, 并在高温环境下蒸汽重整, 该反应区最高温度约 1200°C , 焦油转换效率较高; 第三级中, 生物质气化后残余的焦炭会形成一个结构紧密且向下的床体。该床体在减少焦油和气体急冷过程中起催化过滤的作用。焦炭作为床体, 增大了和焦油的接触时

间, 促进了焦油的减少。三级流化床气化炉气化效率 81%, 焦炭转换率 98%, 产品气中焦油含量 0.01 g/m^3 , 而单级流化床气化炉气化效率 67%, 焦炭转换率 59%, 产品气中焦油含量 31 g/m^3 。

2.3 气流床气化炉

气流床又称携带床, 是气化剂 (如氧气和水蒸气) 夹带燃料颗粒, 通过喷嘴喷入炉膛。细颗粒燃料分散悬浮于高速气流中, 并被气流夹带出去, 形成气流床。高温下细颗粒燃料与氧气瞬间着火、迅速燃烧, 产生大量热量。同时, 固体颗粒瞬间热解、气化转化生成合成气及熔渣。其反应条件通常是 1400°C 左右、 $2 \sim 7 \text{ MPa}$ ^[46]。气流床分级气化过程中, 裂解产物首先分离出合成气, 再把焦炭气化, 最后把裂解的合成气通入反应室进行第二次气化反应。陈超等^[47]发现与传统气化相比, 气流床分级气化显著提高了 H_2 的体积分数, 达到 42.4%, H_2 和 CO 体积比最大达 1.22, 提高了 41.9%, 焦油含量从 5.46 g/m^3 降低到 0.05 g/m^3 。Göktepe 等^[48]通过在气流床入料管线中添加合成射流, 探究了主动流动控制对入料分散程度和烟灰形成的影响。结果表明当添加合成射流时, 烟灰产量明显地从 1.52% (质量) 减小到 0.30% (质量)。Troiano 等^[49]通过构建生物质颗粒在气流床气化炉中的冲击-沉积-回弹动力学模型, 考察了物料颗粒与炉壁的相互作用。玉米秸秆灰分在炉壁表面沉积熔融形成熔渣层, 焦炭颗粒也会沉积在熔融层表面上, 而木屑灰不易于形成熔渣层。Dhanavath 等^[50]使用气流床气化炉对烘干的卡兰贾籽饼进行气化实验, 探究了温度、当量比 ER 、水蒸气/生物质比和粒径对合成气组分、低位热值、冷气效率和碳转换率的影响。结果表明, 该型气流床气化炉的最优参数是当温度为 1100°C , 当量比为 0.3, 水蒸气/生物质比为 0.4, 粒径为 0.5 mm 时, 其最大低位热值在 12 MJ/m^3 左右, 冷气效率在 90% 左右, 碳转换率达到 98%。其他新型生物质气流床分级气化系统应用如德国 CHOREN 公司研发的 Carbo-V 系统^[51]和德国 KIT 机构开发出的 BIOLIQ 工艺^[52]。

2.4 不同气化炉的优缺点

表 2 和表 3 列举了不同类型气化炉的参数和优缺点。对于上吸式固定床气化炉, 合成气从下向上排出, 经过热解区和干燥区, 焦油冷凝在相对低温的原料上或与合成气一起从反应器中离开, 使得合成气中依旧含有高达 10%~20% (质量) 的焦油。由于热解区和干燥区的过滤作用, 同时因为气体流

表 2 各类气化器各项参数对比^[53-54]

Table 2 Comparison of various parameters of various gasifiers^[53-54]

参数	上吸式固定床	下吸式固定床	鼓泡床	循环床	气流床
反应温度/℃	1300（浆式进料） 1500~1800（干法进料）	800~900	800~1000	900~1200	700~1500
入料粒度/mm	2~50	10~300	<5	<10	<0.1
首选入料类型	能胜任对高水分生物质的处理	低水分生物质	任何生物质	任何生物质	任何生物质
停留时间/s	900~1800	900~1800	10~100	10~50	1~5
最大燃料水分/%	60	20	<55	<55	<15
需氧量/(m ³ /kg)	0.64	0.64	0.37	0.37	0.37
产品气 LHV/(MJ/m ³)	5~6	4~5	3~8	2~10	4~10
焦油/(g/m ³)	50~200	0.02~0.30	3~40	4~20	<0.10
能量输出/MW	<20	<10	10~100	10~100	>100
碳转化率/%	≈100	93~96	70~100	80~90	90~100

表 3 不同气化器的优缺点^[38, 53-54]

Table 3 Advantages and disadvantages of different gasifiers^[38, 53-54]

特性	上吸式固定床	下吸式固定床	鼓泡床	循环床	气流床
优点	加热系统	通过氧化固体炭放出的热 — 可以高效利用。气体离 开反应器时可以加热 入料	反应器内温度分布很平 均 在惰性材料、燃料和气体 之间提供很高的换热 效率	因为床料的热容量高，导 致换热效率高 对于快速反应很适合	—
原料	广泛（包含高水分和无机 物的城市固体垃圾）	广泛	广泛，入料粒径没有很大 的限制	—	广泛
合成气特性	更高的焦油含量增加了气 体热值	气化后的物质以积炭或 灰的形式存在，产品气 中的焦油和固体颗粒 含量低，减少了旋风分 离器的使用	合成气成分均匀，含有少 量焦油和未转换的炭	含有少量焦油和未转换的 炭	合成气里不含焦油和 酚类化合物
操作条件	更高的温度可以破坏一些 有毒物质和金属熔渣	形成的焦油有 99.9%被消 耗，对于发动机很适用	高转换率	高转换率	较高的产量和较好品 质 原位硫脱除
商业价值	技术成熟，工艺简单、成 本低	技术成熟，工艺简单、成 本低	技术成熟，成本适中	技术成熟，成本适中	—
缺点	加热系统	蒸汽需要量较高	加热效率低导致了内热交 换不充足，也导致合成 气热值很低	固体流动方向上会出现温 度梯度 相对于鼓泡流化床，热传 递效率低	因为燃料的高效利用 以及高温操作，能量 需要回收
原料	入料粒径有限制	①需要入料水分低于 20% — ②未经预处理的物料不能 气化 ③入料粒径有限制	—	入料粒度范围很窄	对于木质气化工艺，需 要原料预处理
合成气特性	①合成气里含有较高的焦 油和酚类物质 ②气体热值低	相对于上吸式，合成气含 有更高的灰分（熔渣） 气体热值低	—	—	—
操作条件	入料中的细粒物料损耗较 大	合成气离开气化炉时温度 较高，使用之前需冷却	大气泡尺寸会导致气体 绕过反应床	因为物料颗粒高流速，导 致反应器出现磨损	—
商业价值	规模限制	规模限制	—	—	需要使用昂贵的设备 材料，以及高温热交 换器来冷却合成气

动速率较低，所以合成气含有较低的灰分含量。另外气化炉出口温度较低，为 80~300℃。下吸式固定床气化炉的显著优点是构造简单、可操作性好、加料方便。当气化剂和物料通过高温喉管区时，物

料发生热解、气化反应，与此同时，在高温作用下，焦油裂解为可燃性气体。其缺点是气化炉格栅易堵塞，对入料含水量要求高，且气化炉出口温度较高，合成气需要冷却。流化床气化炉优点是气化反应速

度快, 炉内气固接触均匀, 反应温度恒定, 合成气中焦油产量均值在 10 g/m^3 左右, 介于上吸式气化炉 (约 50 g/m^3) 和下吸式气化炉 (约 1 g/m^3) 之间。流化床气化炉的缺点是设备结构复杂, 投资较大, 合成气中灰分含量较高。气流床气化炉的优点突出, 如碳的转化率接近 100%, 合成气中焦油含量少等。其缺点是, 对物料预处理要求较高, 必须粉碎成细小颗粒, 以保证物料可以在短暂的停留时间内反应完全^[55]。

3 生命周期评价

随着化石能源储藏量下降以及使用过程中带来的温室效应、水污染和 S 排放等环境污染问题, 生物能源因具有可循环、碳零排放等特征逐渐得到各国政府的重视。为了在一定程度上量化生物能源利用过程中对环境造成的影响, 研究人员把生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 引入生物质气化发电中。生命周期评价贯穿整个生物能源利用过程, 考察原料收集、运输和预处理、厂房的建设和设备生产、产品生产和使用以及污染物排放等因素对环境的潜在影响。

LCA 得到了世界广大组织和机构的认可, 并在各行各业中得到广泛应用, 其主要包含四个部分: 目的和边界条件, 清单分析, 影响评价和结果解释^[56-57]。国内外学者关于生物质气化发电的生命周期评价进行了很多研究, 并取得了丰硕成果, 主要结论表现在以下几个方面: (1) 生物质气化发电系统的全球性环境影响最小, 而且区域性环境影响远小于局部性环境, 说明该系统对环境友好; (2) 生物质气化发电较火力发电有效减少了不可再生资源消耗和大气酸化; (3) 气化原料的收集半径对生物质气化发电系统的全生命周期影响较小, 不是决定全系统环境性的重要因素; (4) 焦油和固体废弃物的收集与处理对生物质气化发电系统的生命周期评价结果有较大的影响, 必须把污染物的回收利用作为以后研究的重点; (5) 能源作物在种植过程中吸收的 CO_2 远远大于其种植、运输和贮存中释放的 CO_2 ; (6) 应在原料收集处对气化对象进行压块处理, 以进一步减少运输过程中化石能源消耗对环境的影响。具体如表 4 所示。

4 生物质气化发电

生物质气化发电技术与其他生物质能利用方式相比特点显著: (1) 气化发电技术成熟而灵活,

气化可以采用固定床气化炉和流化床气化炉等, 发电可以采用内燃机、外燃机以及燃料电池等, 根据工艺要求和合成气品质要求可以自由选择;

(2) 对环境友好, 整个流程中保持碳平衡, 能够大幅减少 CO_2 和 SO_2 等污染物排放; (3) 经济效益好, 发电规模较小时经济性较好, 成本低, 易回收。可以看出, 生物质气化发电技术相比其他生物质能利用具有更好的应用前景, 非常适合农村偏远分散地区, 对于补充我国能源供应具有重要意义。

生物质气化发电发展初始, 学者和电厂主要使用气化炉和内燃机或者燃气燃机进行研究及生产。该类型气化发电工艺简单, 处理对象广泛, 缺点是当发电功率低时, 发电效率较低, 随着发电功率的增加, 发电效率也在增加。如郑舜鹏等^[67]使用循环流化床和内燃机对谷壳气化发电, 其中内燃机组功率 1 MW, 发电效率 $\leq 18\%$ 。王贵路^[68]通过模拟计算出对玉米秸秆气化时, 随着发电机组功率的增加, 发电效率也随之增加。为了提高发电效率, 生物质气化发电工艺从过去传统、单一的特点逐渐转向新型、多工艺联合的特点。生物质气化发电在原燃气轮机的基础之上, 利用燃烧烟气余热结合蒸汽轮机发电, 形成生物质联合循环发电 (BIGCC), 系统整体效率能达到 40% 以上。如宋鸿伟^[69]通过设计和建立计算模型研究 GIGCC 系统, 结果显示系统发电效率最高可达 47.56%。伴随着燃料电池研究的深入, 生物质气化有机结合燃料电池发电的联合工艺越来越受到学者的关注。其中固体氧化物燃料电池和熔融碳酸盐燃料电池应用较多。该工艺的一般流程是, 合成气与含过剩氧气的烟气经除尘净化后分别进入燃料电池的两极参与电化学反应; 从燃料电池排出的过剩燃气在驱动燃气透平发电的同时, 进入蒸汽系统加热, 达到蒸汽燃气和燃料电池联合循环发电的目的, 其中系统余热还能用于加热气化介质和预热空气。高杨等^[70]通过计算模拟的方法, 考察生物质气化-MCFC 联合循环发电系统在常压和增压工作条件下的性能参数, 得出常压条件下发电效率为 49.27%, 增压下发电效率为 54.67%, 高于常规气化发电工艺。Ali 等^[71]使用计算模拟的方法计算出当采用碎木屑作气化原料发电时, 系统能量效率最高达 80.13%; 当采用水蒸气作气化剂时, 系统能量效率最高达 87.75%。为了更好提高气化发电过程中的能量利用效率, 热电联供和冷热电联供也是以后发展的趋势之一。表 5 列举了气化发电研究中

表 4 生命周期评价在生物质气化发电中的应用

Table 4 Application of life cycle assessment in biomass gasification power generation

评价对象	气化原料	工艺特点	评价方法	系统功能单元	指标	结论	文献
1 MW 生物质 气化发电站	谷壳	循环流化床气化， 内燃机发电	—	发电 10 ⁴ kW·h	枯竭性资源消耗；全球变暖；可再生资源消耗；酸化；光化学臭氧形成；水体营养；人体毒性；水生生态毒性；固体废弃物；烟尘及灰尘	①焦油处理与否，气化原料对评价结果影响大； ②原料收集半径为 50 km 时，运输排放和消耗对评价结果影响较小； ③气化发电系统的局部环境影响大于区域性环境影响，全球性环境影响最小； ④指出了生物质气化发电在推广应用中的需要注意的问题，如抑制焦油、固体废弃物综合利用和资源收集方式可以降低环境负荷	[58]
25 MW 生物质 直燃发电系 统	玉米秸秆	直燃产生高温高压 蒸汽带动蒸汽轮 机发电	EDIP	发电 10 ⁴ kW·h	全球变暖；酸化；光化学臭氧形成；水体富营养化；人体毒性；水生生态毒性；固体废弃物；烟尘及灰尘	① 环境的污染主要来自电站建设中消耗的混凝土，混凝土生产带来固体废弃物及粉尘排放； ②生物质燃烧发电和气化发电的环境排放都显著优于火电，前者主要发生在建设阶段，后者主要发生在电站运行中的污染物排放	[59]
4 MWe 生物质 气化联合循 环发电系统	稻草	生物质循环流化床 气化-内燃机-汽 轮机联合循环发 电	CML	发电 1 kW·h	不可再生资源消耗；温室效应；人体健康毒害；酸化效应指标；光化学氧化物；臭氧层破坏	①生物质气化发电系统评价指标好于煤气化发电； ②改进燃气内燃机排放性能，可以降低 CO、NO _x 的排放； ③解决生物质生长所需化肥带来的排放问题； ④1~10 MW 气化发电系统能够解决部分地区电力短缺问题	[60]
① 气化-重整 制氢； ② 气化-发电- 电解制氢	—	① 气化-蒸汽重整- 变压吸附制氢； ② 气化-发电-电 解制氢	Ecoindicator 95	产氢 1 MJ	温室气体排放；酸化；富营养化；重金属；致癌作用；冬季尘雾；夏季尘雾	虽然生物质气化-蒸汽重整-变压吸附制氢效率较高，但不如生物质气化-发电-电解制氢环境友好	[61]
木质素废弃物 气化制氢	葡萄藤、杏 仁树枝、 松树和桉 树	固定床气化-蒸汽 重整-水汽转换- 变压吸附	CML2001	产氢 1 m ³	温室气体排放；总能量需要；酸化；富营养化	结果表明桉树表现出了最高的氢气产量，并且在生长过程中没有化肥和杀虫剂的需要，得到了较高的固定碳	[62]
四种生物质处 理系统	稻秆	① 射频等离子体； ② 微波诱导；③ 下吸式气化炉； ④ 等离子体焰 炬	—	—	能源投资回报率；净能比；总热效率	结果表明等离子体焰炬系统处理生物质时，三个能量指标最大，并认为原料的运输阶段和原料的预处理阶段能耗最大，如果现场直接压块运输会减少能耗	[63]
① 分散污泥和 生物质联合 气化系统； ② 污泥焚 烧；③ 木屑 焚烧	污泥和木屑	下吸式气化炉	extension of system boundary	0.2 kg 污泥和 0.8 kg 生物 质的混合物	CO ₂ 年净排放 量回收、运输距离和 排放量	分散污泥和生物质联合气化系统的 CO ₂ 年净排放量减少了 138.9×10 ⁶ ~165.9×10 ⁶ kg，认为产生这种情况的原因来自三个方面：①能源利用效率的提高；②不需要补充燃料来焚烧污泥；③ CO ₂ 封存在气化产生的生物炭中	[64]
下吸式气化炉 和循环流化 床气化炉	木材废料	生物质气化制氢通 入质子交换膜燃 料电池	—	H ₂ 产 量 为 1 MJ/s	化石能源消耗率；CO ₂ 排放量；H ₂ 生产完善 系数	循环流化床相对于下吸式固定床表现出更高的化石能源消耗率，下吸式固定床能量产出是化石能源消耗率的 11.36 倍	[65]
煤-生物质混 合气化联合 循环	柳枝稷 煤	煤和生物质联合气 化发电，灰渣和 硅酸盐混合生产 水泥	CML 2001	生产 1000 kg 混合水泥	酸化；气候变化；富营 养化；土地使用；光 化学氧化；资源消耗	相比传统水泥厂，当使用 20%煤和生物质联合气化发电，气候变化的可能性下降了 20%，又因为灰渣作为水泥添加剂，上涨了 0.97%	[66]

使用到的生物质类型、工艺特点、气化设备和发电设备等。

5 结 语

生物质气化发电技术具有良好的发展前景，经

过几十年的发展，有了很大进步。生物质气化发电技术作为生物质能应用的主流方式之一，有望成为传统化石能源的重要补充。生物质原料的密度低，体积大，运输、存储成本高，不太适合建造大型的生物质发电厂，在偏远但生物质资源丰富的地区建

表 5 气化发电工艺进展

Table 5 Progress in gasification power generation process

序号	研究方式	工艺特点	处理原料	气化设备	发电设备	效率	参考文献
1	建模模拟	气化气与含过剩氧气的烟气经除尘净化后分别进入燃料电池的两极参与电化学反应,从燃料电池排出的燃气在驱动燃气透平发电的同时,进入蒸汽系统加热,达到蒸汽燃气和燃料电池联合循环发电的目的,其中系统余热还能用于加热气化介质和预热空气	—	鼓泡流化床,水蒸气作气化剂	熔融碳酸盐燃料电池和蒸汽轮机	发电效率 49.27% (常压) 发电效率 54.67% (增压)	[70]
2	建模模拟	设定燃料电池和燃气轮机混合发电机组功率为 1.7 MW, 分别探究了气化原料、冷气和气化剂三个因素对气化发电能量效率的影响	甘蔗渣、稻秆、木屑、木废料	流化床气化炉	燃料电池 (PSOFC) 和燃气轮机	当采用碎木屑作气化原料, 空气-水蒸气作气化剂时, 全循环能量效率最高达 87.75%。	[71]
3	建模模拟	煤气化后的可燃气, 进入燃气轮机发电, 余热加热的水蒸气进入蒸汽轮机发电	煤	流化床	燃气轮机和蒸汽轮机	当采用高温净化工艺时, 净效率超过 51%; 当采用新型燃气轮机时, 净效率高达 53%。	[72]
4	建模模拟	生物质在气化炉中, 在不同的气化剂条件下生成合成气, 又在是否脱除 CO ₂ 的情况下进入燃料电池发电, 未反应的过剩合成气进入微型燃气轮机发电	含水 10% 木屑	下吸式固定床气化炉, 空气为气化剂	燃料电池 (SOFC) 和微型燃气轮机 (MGT)	电效率最高达 32.81%	[73]
5	建模模拟	烘焙前后的生物质分别与煤以不同的比例联合气化, 生成的可燃气通入燃气轮机发电	木材和煤	—	燃气轮机	系统效率最大 58.94%	[74]
6	建模模拟	烘焙过的生物质与煤以不同的比例联合气化, 生成的可燃气通入燃料电池 (SOFC) 发电	木材和煤	—	燃料电池 (SOFC)	在不考察 CO ₂ 排放量时, 结合余热回收, 系统净能量效率最高可达 45.72%	[75]
7	建模模拟	以热电联供 (CHP) 为背景, 对比介绍了可燃气通入燃气轮机发电和可燃气通入燃料电池 (SOFC) 发电的具体情况	木屑和木块	下吸式固定床气化炉, 空气作气化剂	燃气轮机和燃料电池	电效率 17.3% (燃气轮机), 电效率 25.3% (SOFC)	[76]
8	实验研究	生物质经气化后产生可燃气, 经冷却塔和净化设备, 进入内燃机发电	松树、红橡树、马粪和硬纸板	下吸式固定床气化炉	火花点火内燃机	系统总效率松树 23.0%±3.1%、红橡树 20.6%±3.1%、马粪 21.3%±3.1%、硬纸板 15.8%±3.1%	[77]
9	建模模拟	生物质经气化进入燃气轮机, 在主燃烧室里, 压缩空气和和气化气燃烧。在轮机出口处, 先经过余热回收蒸汽发生器, 把余热转移至朗肯循环中, 产生水蒸气。最后过热的蒸汽进入蒸汽轮机发电提供电力	炼橄榄油残渣和橄榄树废料	快速内循环流化床	燃气轮机和蒸汽轮机	经典再生工艺的系统效率明显都高于附加燃烧器的再生工艺, 最高可达 47.6%	[78]
10	实际运行	生物质在气化炉内进行气化反应, 可燃气体携带灰分进入旋风分离器, 可燃气进入喷淋塔等水洗设备除尘降温, 去除焦油后经过气柜进入内燃机发电	稻壳	锥形流化床, 空气作气化剂	内燃机	发电效率 25%, 系统总效率 15%	[79]
11	建模模拟	气化产生的可燃气, 经过滤、降温与过热蒸汽混合, 经换热后直接通入电池阳极。压缩机鼓入空气, 经换热器通入电池阴极。阳极未反应的气体和阴极剩余氧化剂通入燃烧器燃烧, 提供蒸汽发生器所需的能量	木粉、锯屑、棉花秸秆和城市生活垃圾	—	SOFC 电池组	棉花秸秆发电效率达 28.6%, 锯屑 25.9%, 木粉 23.8%, 生活垃圾 22.4% 棉花秸秆热电联产效率达 92.4%, 生活垃圾 84.4%, 锯屑 76%, 木粉 72%	[80]
12	建模模拟	气化产生的可燃气进入 SOFC 产生电功, 阳极尾气进行燃烧, 燃烧后的高温气体通过换热器对燃气轮机压气机出口空气加热, 利用燃气轮机对系统热进一步利用	木屑	鼓泡床	固体氧化物燃料电池+燃气轮机	电效率最高达 47%	[81]
13	建模模拟	生物质原料进入热载体循环流化床反应器, 生成高质量合成气; 回收气体热量。合成气进入费托合成单元。尾气中含有的可燃性气体作为燃料气进入燃气透平制取电力, HRSG 系统回收的高温水蒸气通入蒸汽透平制取电力	—	循环流化床	尾气进入燃气轮机, 燃气发电机	能量利用效率 72.1%	[82]

Table 5 (continued)

序号	研究方式	工艺特点	处理原料	气化设备	发电设备	效率	参考文献
14	模拟与实验相结合	合成气与饱和蒸汽混合, 经过低温换热器, 进入重整器, 重整后的富氢气体进入 MCFC, 未完全反应的阳极气体与燃气轮机涡轮排气混合进入催化燃烧室燃烧, 为阴极电化学反应提供 CO ₂ 。空气通过压气机压缩后经回热器、高温换热器加热到涡轮入口温度, 高温高压气体进入涡轮膨胀做功	木片	两段式气化炉, 以空气作气 化介质	熔融碳酸盐电 池堆+微型 燃气轮机	燃料电池发电效率 40.24% 微型燃气轮机发电效率 5.16%	[83]

设小型化分布式生物质气化冷热电联供厂, 可以有效解决我国偏远地区能源供应短缺问题。

由于气化发电技术欠成熟, 而且面临原料性质差别大、焦油脱除困难以及传统发电机发电效率低等问题, 导致气化发电成本较高, 在用电市场上没有竞争力。对照国外较成熟的商业运营模式, 以及结合中国国情, 生物质利用的主流方向是热电联供, 实现生物质能源梯级和综合利用。此外, 生物质气化发电中的燃气和经发电机组产生的尾气未回收, 造成整个系统效率降低 (18%左右), 所以将生物质与化石燃料联合气化是新的研究方向。

References

- [1] SHAYAN E, ZARE V, MIRZAEI I. Hydrogen production from biomass gasification: a theoretical comparison of using different gasification agents[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, **159**: 30-41.
- [2] ZHANG X, LI H, LIU L, *et al.* Thermodynamic and economic analysis of biomass partial gasification process[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, **129**: 410-420.
- [3] KUMAR A, KUMAR K, KAUSHIK N, *et al.* Renewable energy in India: current status and future potentials[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2010, **14**(8): 2434-2442.
- [4] ASSOCIATION W B. WBA Global Bioenergy Statistics[EB/OL]. 2017. <http://worldbioenergy.org/global-bioenergy-statistics>.
- [5] KUMAR S, SANI R K. Biorefining of Biomass to Biofuels: Opportunities and Perception[M]. Switzerland: Springer, 2017: 16-25.
- [6] 国家能源局. 生物质能发展“十三五”规划[EB/OL]. 2016. http://www.gov.cn/xinwen/2016-12/06/content_5143612.htm.
National Energy Administration. The 13th Five-Year Plan for Biomass Energy Development[EB/OL]. 2016. http://www.gov.cn/xinwen/2016-12/06/content_5143612.htm.
- [7] AHMAD A A, ZAWAWI N A, KASIM F H, *et al.* Assessing the gasification performance of biomass: a review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **53**: 1333-1347.
- [8] WEERACHANCHAI P, HORIO M, TANGSATHITKULCHAI C. Effects of gasifying conditions and bed materials on fluidized bed steam gasification of wood biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(3): 1419-1427.
- [9] BHOI P R, SINGH R N, SHARMA A M, *et al.* Performance evaluation of open core gasifier on multi-fuels[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2006, **30**(6): 575-579.
- [10] YIN R, LIU R, WU J, *et al.* Influence of particle size on performance of a pilot-scale fixed-bed gasification system[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **119**(3): 15-21.
- [11] MA Z Q, ZHANG Y M, ZHANG Q S, *et al.* Design and experimental investigation of a 190 kWe biomass fixed bed gasification and polygeneration pilot plant using a double air stage downdraft approach[J]. *Energy*, 2012, **46**(1): 140-147.
- [12] VISHTAL A, KRASLAWSKI A. Challenges in industrial applications of technical lignins[J]. *Bioresources*, 2011, **6**(3): 3547-3568.
- [13] ZHANG H, DENG S, CAO X. Density functional theory investigation of gasification mechanism of a lignin dimer with β -5 linkage[J]. *Renewable Energy*, 2018, **115**: 937-945.
- [14] GUO D L, WU S B, LIU B, *et al.* Catalytic effects of NaOH and Na₂CO₃ additives on alkali lignin pyrolysis and gasification[J]. *Applied Energy*, 2012, **95**(2): 22-30.
- [15] 中华人民共和国农业农村部. 重点流域农业面源污染治理示范工程建设规划 (2016—2020 年) [EB/OL]. 2017. http://journal.cnews.net/nybg/2017n/dssq/xygh/62756_20170522042442.html.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Construction Plan for Comprehensive Treatment of Agricultural Non-point Source Pollution in Key River Basins (2016—2020) [EB/OL]. 2017. http://journal.cnews.net/nybg/2017n/dssq/xygh/62756_20170522042442.html.
- [16] 朱颖, 胡启春, 汤晓玉, 等. 我国农作物秸秆资源燃料化利用开发进展[J]. *中国沼气*, 2017, **35**(2): 115-120.
ZHU H, HU Q C, TANG X Y, *et al.* Current development and progress of fuelization of agricultural straw in China[J]. *China Biogas*, 2017, **35**(2): 115-120.
- [17] 董丽辉. 稻壳中生物质及二氧化硅的提取工艺研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
DONG L H. Study on extract processes of the biomass and silica of rice husk[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011.
- [18] 国务院. 能源发展“十二五”规划[EB/OL]. 2013. http://www.gov.cn/zwgk/2013-01/23/content_2318554.htm.
The State Council. The 12th Five-Year Plan for Energy Development[EB/OL]. 2013. http://www.gov.cn/zwgk/2013-01/23/content_2318554.htm.
- [19] 中华人民共和国农业农村部. 农业生物质能产业发展规划(2007—2015)[EB/OL]. 2007. http://www.moa.gov.cn/govpublic/FZJHS/201006/t20100606_1533134.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Development Plan of Agricultural Biomass Energy Industry(2007 — 2015)[EB/OL]. 2007. <http://www.moa.gov.cn/>

- govpublic/FZJHS/201006/t20100606_1533134.htm.
- [20] 中华人民共和国农业农村部. 2014 年全国农村可再生能源统计汇总表[R]. 2014.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Summary of National Renewable Energy Statistics in Rural Areas in 2014[R]. 2014.
- [21] 秦恒飞, 周建斌, 张齐生. 畜禽粪便气化可行性研究[J]. 中国畜牧兽医, 2012, **39**(1): 218-221.
- QIN H F, ZHOU J B, ZHANG Q S. A feasibility study on gasification of livestock manure[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2012, **39**(1): 218-221.
- [22] KHAN Z, YUSUP S, AHMAD M M, *et al.* Integrated catalytic adsorption (ICA) steam gasification system for enhanced hydrogen production using palm kernel shell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, **39**(7): 3286-3293.
- [23] MOHAMMED M A A, SALMIATON A, WAN AZLINA W A K G, *et al.* Air gasification of empty fruit bunch for hydrogen-rich gas production in a fluidized-bed reactor[J]. Energy Conversion and Management, 2011, **52**(2): 1555-1561.
- [24] MOGHADAM R A, YUSUP S, UEMURA Y, *et al.* Syngas production from palm kernel shell and polyethylene waste blend in fluidized bed catalytic steam co-gasification process[J]. Energy, 2014, **75**: 40-44.
- [25] 岳金方. 木薯渣热解气化的研究[D]. 扬州: 中国林业科学研究院, 2007.
- YUE J F. Study on cassava dregs pyrolysis and gasification[D]. Yangzhou: China Academy of Forestry Science, 2007.
- [26] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2017[EB/OL]. 2017. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2017/indexch.htm>.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2017[EB/OL]. 2017. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2017/indexch.htm>.
- [27] LOPES E J, QUEIROZ N, YAMAMOTO C I, *et al.* Evaluating the emissions from the gasification processing of municipal solid waste followed by combustion[J]. Waste Management, 2018, **73**: 504-510.
- [28] ZHANG L, WU W, ZHANG Y, *et al.* Clean synthesis gas production from municipal solid waste via catalytic gasification and reforming technology[J]. Catalysis Today, 2018, DOI: 10.1016/j.cattod.2018.02.050.
- [29] PERES A P G, LUNELLI B H, FILHO R M. Application of biomass to hydrogen and syngas production[J]. Chemical Engineering Transactions, 2013, **32**: 589-594.
- [30] 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.
- YUAN H R, LU T, XIONG Z H, *et al.* Advance in pyrolysis and gasification of municipal solid waste study[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, **31**(2): 421-427.
- [31] SUSASTRIAWAN A A P, SAPTOADI H, PURNOMO. Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, **76**: 989-1003.
- [32] CHEN W, ANNAMALAI K, ANSLEY R J, *et al.* Updraft fixed bed gasification of mesquite and juniper wood samples[J]. Energy, 2012, **41**(1): 454-461.
- [33] ISMAIL T M, EL-SALAM M A. Parametric studies on biomass gasification process on updraft gasifier high temperature air gasification[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, **112**: 1460-1473.
- [34] 刘宝亮, 蒋剑春. 生物质能源转化技术与应用(VI): 生物质发电技术和设备[J]. 生物质化学工程, 2008, **42**(2): 55-60.
- LIU B L, JIANG J C. Conversion technology and utilization of biomass energy(VI): Technology and equipment for biomass power generation[J]. Biomass Chemical Engineering, 2008, **42**(2): 55-60.
- [35] CHOPRA S, JAIN A K. A review of fixed bed gasification systems for biomass[J]. Agricultural Engineering International: The CIGR e-Journal, 2007, **9**(5): 1-23.
- [36] JAOJARUEK K, JARUNGTHAMMACHOTE S, GRATUITO M K, *et al.* Experimental study of wood downdraft gasification for an improved producer gas quality through an innovative two-stage air and premixed air/gas supply approach[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(7): 4834-4840.
- [37] GUO F, DONG Y, DONG L, *et al.* Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: an experimental study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, **39**(11): 5625-5633.
- [38] 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.
- [39] SARAVANAKUMAR A, HARIDASAN T M, REED T B. Flaming pyrolysis model of the fixed bed cross draft long-stick wood gasifier[J]. Fuel Processing Technology, 2010, **91**(6): 669-675.
- [40] BUI T, LOOF R, BHATTACHARYA S C. Multi-stage reactor for thermal gasification of wood[J]. Energy, 1994, **19**(4): 397-404.
- [41] WANG Z, HE T, QIN J, *et al.* Gasification of biomass with oxygen-enriched air in a pilot scale two-stage gasifier[J]. Fuel, 2015, **150**: 386-393.
- [42] EFIKA C E, WU C, WILLIAMS P T. Syngas production from pyrolysis-catalytic steam reforming of waste biomass in a continuous screw kiln reactor[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012, **95**: 87-94.
- [43] CALVO L F, GIL M V, OTERO M, *et al.* Gasification of rice straw in a fluidized-bed gasifier for syngas application in close-coupled boiler-gasifier systems[J]. Bioresource Technology, 2012, **109**: 206-214.
- [44] SONG T, WU J, SHEN L, *et al.* Experimental investigation on hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, **36**: 258-267.
- [45] GÓMEZ-BAREA A, LECKNER B, VILLANUEVA PERALES A, *et al.* Improving the performance of fluidized bed biomass/waste gasifiers for distributed electricity: a new three-stage gasification system[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, **50**(2): 1453-1462.
- [46] BASU P. Chapter 5—Gasification Theory and Modeling of Gasifiers[M]// Biomass Gasification and Pyrolysis. Boston: Academic Press, 2010: 117-165.
- [47] 陈超, 周劲松, 项阳阳, 等. 生物质高温气流床分级气化特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, **49**(4): 626-631.
- CHEN C, ZHOU J S, XIANG Y Y, *et al.* Biomass staged-gasification characteristics in high-temperature entrained-flow bed[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2015, **49**(4): 626-631.
- [48] GÖKTEPE B, UMEKI K, HAZIM A, *et al.* Soot reduction in an entrained flow gasifier of biomass by active dispersion of fuel particles[J]. Fuel, 2017, **201**: 111-117.
- [49] TROIANO M, MONTAGNARO F, SALATINO P, *et al.* Experimental characterization of particle-wall interaction relevant to entrained-flow gasification of biomass[J]. Fuel, 2017, **209**: 674-684.

- [50] DHANAVATH K N, SHAH K, ISLAM M S, *et al.* Experimental investigations on entrained flow gasification of Torrefied Karanja Press Seed Cake[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, **6**(1): 1242-1249.
- [51] ZHANG W N. Automotive fuels from biomass via gasification[J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, **91**(8): 866-876.
- [52] KOLB T, JAKOBS T, ZARZALIS N. Syngas from biomass-based slurry entrained flow gasification[C]// 10th Conference on Energy for a Clean Environment. Lisbon, Portugal, 2009.
- [53] BEOHAR H, GUPTA B, SETHI V, *et al.* Parametric study of fixed bed biomass gasifier: a review[J]. *International Journal of Thermal Technologies*, 2012, **2**(1): 134-140.
- [54] SAMIRAN N A, JAAFAR M N M, NG J H, *et al.* Progress in biomass gasification technique—with focus on Malaysian palm biomass for syngas production[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **62**: 1047-1062.
- [55] BASU P. Chapter 6—Design of Biomass Gasifiers[M]// *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Boston: Academic Press, 2010: 167-228.
- [56] ABBAS D, HANDLER R M. Life-cycle assessment of forest harvesting and transportation operations in Tennessee[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **176**: 512-520.
- [57] SHOURKAEI M A, RASHIDI A, KARIMI-SABET J. Life cycle assessment of oxygen-18 production using cryogenic oxygen distillation[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2018, DOI: 10.1016/j.cjche. 2017.12.008.
- [58] 王伟, 赵黛青, 杨浩林, 等. 生物质气化发电系统的生命周期分析和评价方法探讨[J]. *太阳能学报*, 2005, **26**(6): 752-759.
- WANG W, ZHAO D Q, YANG H L, *et al.* Life cycle analysis on biomass gasification & power generation system and inquiry to assessment method[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2005, **26**(6): 752-759.
- [59] 林琳, 赵黛青, 李莉. 基于生命周期评价的生物质发电系统环境影响分析[J]. *太阳能学报*, 2008, **29**(5): 618-623.
- LIN L, ZHAO D Q, LI L. Environmental impact analysis of biomass power generation system based on life cycle assessment[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2008, **29**(5): 618-623.
- [60] 贾友见, 余志, 吴创之. 4 MWe 生物质气化联合循环发电系统的寿命周期评价[J]. *太阳能学报*, 2004, **25**(1): 56-62.
- JIA Y J, YU Z, WU C Z. Life cycle assessment of 4MWe biomass integrated gasification gas engines-steam turbine combined-cycle power plant[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2004, **25**(1): 56-62.
- [61] KORONEOS C, DOMPROS A, ROUMBAS G. Hydrogen production via biomass gasification—a life cycle assessment approach[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2008, **47**(8): 1261-1268.
- [62] MORENO J, DUFOUR J. Life cycle assessment of hydrogen production from biomass gasification. Evaluation of different Spanish feedstocks[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, **38**(18): 7616-7622.
- [63] SHIE J L, CHANG C Y, CHEN C S, *et al.* Energy life cycle assessment of rice straw bio-energy derived from potential gasification technologies[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(12): 6735-6741.
- [64] RAMACHANDRAN S, YAO Z, YOU S, *et al.* Life cycle assessment of a sewage sludge and woody biomass co-gasification system[J]. *Energy*, 2017, **137**: 369-376.
- [65] KALINCI Y, HEPBASLI A, DINCER I. Life cycle assessment of hydrogen production from biomass gasification systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, **37**(19): 14026-14039.
- [66] WANG Y, WINANS K S, SHAO Y, *et al.* Life cycle assessment of biomass integrated gasification combined cycle in cement industry[C]// *The Seventh International Conference on Environmental Science and Technology*. Houston, Texas, USA, 2014.
- [67] 郑舜鹏, 吴创之, 阴秀丽, 等. 1 MW 循环流化床谷壳气化发电装置的运行及经济性分析[J]. *太阳能学报*, 2000, **21**(2): 140-144.
- ZHENG S P, WU C Z, YIN X L, *et al.* Operation and economy analysis of 1 MW circulating fluidized bed for rice husk gasification and power generation sets[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2000, **21**(2): 140-144.
- [68] 王贵路. 50 kW 生物质气化发电机组的研制[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2014.
- WANG G L. Design on a 50kW biomass gasification for power system[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2014.
- [69] 宋鸿伟. 生物质气化技术及BIGCC系统性能的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- SONG H W. Research on biomass gasification technology and performance of BIGCC system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [70] 高杨, 肖军, 沈来宏. 生物质气化-熔融碳酸盐燃料电池联合循环发电系统性能研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, **29**(20): 112-118.
- GAO Y, XIAO J, SHEN L H. Performance investigation of biomass gasification-molten carbonate fuel cell combined cycle power generation system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, **29**(20): 112-118.
- [71] ALI O H, HOSSEIN G, HOOMAN F. Energy efficiency improvement analysis considering environmental aspects in regard to biomass gasification SOFC/GT power generation system[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, **17**: 831-841.
- [72] GIUFFRIDA A, ROMANO M C, LOZZA G. Efficiency enhancement in IGCC power plants with air-blown gasification and hot gas clean-up[J]. *Energy*, 2013, **53**: 221-229.
- [73] PEDRAZZI S, ALLESINA G, TARTARINI P. Effects of upgrading systems on energy conversion efficiency of a gasifier - fuel cell - gas turbine power plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, **126**: 686-696.
- [74] KUO P C, WU W. Design of co-gasification from coal and biomass combined heat and power generation system[J]. *Energy Procedia*, 2015, **75**: 1120-1125.
- [75] KUO P C, WU W. Design and thermodynamic analysis of a hybrid power plant using torrefied biomass and coal blends[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, **111**: 15-26.
- [76] PERNA A, MINUTILLO M, CICCONE S P, *et al.* Conventional and advanced biomass gasification power plants designed for cogeneration purpose[J]. *Energy Procedia*, 2015, **82**: 687-694.
- [77] LEE U, BALU E, CHUNG J N. An experimental evaluation of an integrated biomass gasification and power generation system for distributed power applications[J]. *Applied Energy*, 2013, **101**: 699-708.
- [78] FORTUNATO B, CAMPOREALE S M, TORRESI M. A gas-steam combined cycle powered by syngas derived from biomass[J]. *Procedia Computer Science*, 2013, **19**: 736-745.
- [79] 许玉, 蒋剑春, 应浩, 等. 3000 kW 生物质锥形流化床气化发电系统工程设计及应用[J]. *生物质化学工程*, 2009, **43**(6): 1-6.
- XU Y, JIANG J C, YING H, *et al.* Design and application of 3000kW biomass gasification power system using cone-shaped fluidized bed[J].

- Biomass Chemical Engineering, 2009, **43**(6): 1-6.
- [80] 赵展, 齐秀龙, 刘晓东, 等. 生物质气化-燃料电池发电系统性能分析[J]. 可再生能源, 2011, **29**(6): 115-120.
- ZHAO Z, QI X L, LIU X D, *et al.* Performance analysis of biomass gasification and solid oxide fuel cell system[J]. Renewable Energy Resources, 2011, **29**(6): 115-120.
- [81] 刘爱斌, 王冰, 翁一武, 等. 生物质-燃料电池/燃气轮机发电系统特性研究[J]. 农业机械学报, 2014, **45**(8): 178-183.
- LIU A G, WANG B, WENG Y W, *et al.* Performance of biomass-fuel cell/gas turbine power plant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, **45**(8): 178-183.
- [82] 陈昊. 生物质热载体循环流化床气化系统集成[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- CHEN H. Biomass gasification system integrated with dual fluidized bed reactor technology[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [83] 姚振鹏. 生物质气燃料电池-燃气轮机混合动力系统特性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- YAO Z P. Characteristic analysis of a fuel cell and gas turbine hybrid system utilizing biomass syngas[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.