

生物质气化技术及产业发展分析

刘华财^{1,2,3}，吴创之^{1,2,3}，谢建军^{1,2,3}，黄艳琴^{1,2,3}，郎林^{1,2,3}，杨文申^{1,2,3}，阴秀丽^{1,2,3}

(1.中国科学院广州能源研究所，广州510640；2.中国科学院可再生能源重点实验室，广州510640；3.广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室，广州510640)

摘要：生物质气化用途广泛、原料种类和规模适应性强，是实现生物质分布式开发利用和可燃固体废弃物处理的途径，可部分替代化石能源、推进节能减排、助力实现可持续发展，在世界范围内得到了广泛应用。本文综述了生物质气化、燃气净化关键技术和供热、发电、合成液体燃料等产业的发展现状，在此基础上对中国生物质气化产业前景进行了展望。

0前言

生物质气化用途广泛且规模灵活，是能够真正实现生物质“因地制宜”开发利用的有效途径。分布式生物质气化利用技术用户广泛，原料种类和规模适应性强，资金门槛要求较低，不同的规模下都具有一定的经济性，比集中式利用更易于商业化。

从生物质资源利用的角度看，分布式生物质气化产业符合中国生物质资源分散的特点，适合分散利用和工业应用，具有较强的适应能力和生存能力。因此，在中国发展生物质气化技术有较好的应用前景。

包括气化在内的生物质能利用技术的进展已有诸多综述，要全面了解其发展动态、详细阐述相关技术特征并非易事。本文就生物质气化技术及产业现状和趋势进行概括，予读者以借鉴。

1气化关键技术现状和发展趋势

1.1气化炉

常见气化炉的优势与劣势对比见表1。限制生物质气化技术推广的因素包括燃气热值低、焦油处理难、气化效率低、炉内结渣和团聚等问题。

因此对气化的研究主要方向为提高燃气热值或特定可燃气体含量，降低燃气焦油含量，提高气化效率，提升原料适应性等。为提高燃气热值或特定可燃气体含量，可采取水蒸气气化、富氧气化、双流化床气化、化学链气化和外热式气化等技术；为降低燃气焦油含量，可利用新型气化技术如两段式气化、气流床气化和等离子体气化等技术。

但这些技术由于成本高、能耗大或技术瓶颈等问题，短期内难以得到规模化推广。目前最成熟和应用最广泛的依旧是常规固定床和流化床的空气气化。

表 1 不同类型气化炉的优点与缺点^[1-2]

Table 1 Advantages and disadvantages of various gasifiers

气化炉类型	优点	缺点
上吸式	热效率高，燃气带灰少；适应不同形状和尺寸的原料；适应不同原料含水量（15%~45%）；炉排工作条件温和；结构简单；容易放大	燃气焦油含量高；燃气 H ₂ 和 CO 含量较低，CO ₂ 含量高；生产强度小
下吸式	燃气焦油含量低；加料方便；结构简单；较上吸式容易实现连续加料	对原料含水量要求较上吸式高（通常<20%）；燃气带灰较多；炉排材料要求较高；生产强度小；不易放大
鼓泡流化床	生产强度大；容易放大	原料尺寸要求较严，通常需要预处理；飞灰碳损失；负荷调节幅度受气速的限制；温度要控制在燃料软化温度之下以避免团聚；建设和运行成本较高
循环流化床（CFB）	负荷适应能力强，调节范围大；生产强度大；容易放大	原料尺寸要求较严，通常需要预处理；建设和运行成本较高
气流床	碳转化率高；燃气中基本不含焦油；容易放大	排渣温度和燃气出口温度很高，冷气效率低；要求生物质粒度在 100 μm 以下，原料预处理要求高；烧嘴容易烧坏，炉壁衬里易受高温熔渣流动侵蚀损坏，维护比较困难；建设和运行成本高
等离子气化	灰渣无污染，可直接用作建筑材料；燃气基本不含污染组分；反应时间极短；容易放大	不能连续运行；需要辅助燃料以获得炉内均匀温度；熔融物在管道凝固；存在活动部件，维护困难；消耗耐热材料和电极；安全问题；建设和运行成本高

林业生物质灰分较低、热值较高，是目前欧美国家乃至中国气化利用的主要原料。非木质生物质如秸秆、蔗渣、中药渣等种植业和农产品加工业副产品，由于灰分较高、热值较低、密度较小、水分含量高和成分复杂等原因，被视为低品质燃料。高灰分容易导致流化床内颗粒团聚、固定床高温区结渣；密度小的原料，则容易造成架空和搭桥，不能在固定床直接使用。对低品质生物质燃料进行处理利用，一般需要烘干、粉碎、成型或烘焙等预处理手段来提升燃料品质，也需要合理设计气化炉以适应燃料特性；另外，与木质原料或煤共气化也是利用低品质生物质的有效手段。

1.2 燃气净化

由于生物质的不完全转化，气化反应过程不可避免地产生焦油和粉尘等杂质，这些杂质可导致下游燃气输送管路及利用设备发生堵塞、腐蚀、结垢等，从而影响燃气利用过程的效率及长期运行的稳定性^[3]。内燃机、F-T合成、燃料电池等燃气利用设备，对粗燃气的洁净程度要求较为严格^[4]

，必须采取有效措施将上述杂质的含量降低到设备可接受的范围之内。因此，作为生物质气化工艺的配套技术，燃气净化技术的研发具有重要的现实意义。

将粗燃气水洗是最简单且应用最广泛的焦油脱除方法，脱除效率可达30%~70%。水洗通常在喷淋塔、文丘里管等反应器中进行，粗燃气与水以并流或逆流的形式直接接触而被净化，洗涤水通常循环使用并须定期更换或补充。这种方式的缺点是损失了粗燃气的显热，并且焦油组分从气相转移到了液相，污染水体的同时还将蕴含于焦油化合物中的能量不合理地丢弃了。

在900 ℃以上的高温状态下将焦油热裂解可得到常温不可凝气体，能回收部分焦油中的能量，但裂解温度须高于1100 ℃才能显著进行^[5]

。这需要输

入额外的能量以再加热

粗燃气，因此催化剂常被用来降低焦油裂解反

应活化能。常用的催化剂^[6]

有白云石、半焦、Ni基及贵金属催化剂等。由于催化剂的引入，焦油裂解反应温度大幅度降低至250~800 ℃，焦油裂解率的大小与催化剂的种类、反应条件等相关，从50%到高于95%均有报道，并且更多的焦油成分被选择性地裂解为轻质气体，因而可增加粗燃气的热值。但催化剂积碳反应的发生使该技术鲜有连续运行时间超过100h。

中国科学院广州能源研究所（以下简称广州能源研究所）在该领域的研究经历了“水洗”-“催化净化”-“等离

[7]、白云石^[8-9]、Ni基催化剂^[10-12]

除焦油的研究,但实际应用过程中发现催化剂失活很快。2012年前后采用“高温除尘+焦油吸收”工艺用于处理100N m³/h的生物质粗燃气,最高连续运行时间达7d^[13-14]

。但工艺流程较复杂,需要两个串联的反应器分别进行除尘和除焦油,投资成本较大,并需要相应的辅助设备,动力消耗严重。2015年起,广州能源研究所开展了临氧除尘

除焦油^[15]、等离子催化净化提质一体化^[16-18]

等研究,现已搭建流光电晕等离子体反应器和介质阻挡放电反应器各1套,初步研究结果表明该方法可将焦油中的重质组分裂解为轻质焦油组分,但400 °C下将轻质焦油组分继续裂解为C4以下烷烃或烯烃所需能量密度为400~600J/L,经换算相当于生物质气化发电总输出电能的20%^[17]

。在此基础上进一步开展了等离子体耦合催化裂解

焦油的实验研究^[18]

,采用传统Ni基催化剂耦合等离子体放电,可在430 °C条件下,达到100%的苯、甲苯脱除率,能量消耗为16.9g/(kW·h),提高了焦油脱除效率的同时降低

了能耗。在应用研究方面,开发了3000Nm³

/h粗燃气处理量的“旋风除尘-临氧陶瓷过滤-水洗-电捕焦”燃气净化工艺,连续运行时间超过2000h,燃气净化后焦油与粉尘的含量分别为14mg/Nm³与43mg/Nm³^[19],洁净燃气可广泛用于内燃机发电、化工品合成等过程。

1.3 污染物排放控制

工业有机固废、垃圾及污泥等广义生物质,其主要元素组成为C、H、O、N、S及少量的Cl、碱金属等,产生于特定的工业生产过程

,富含纤维素、蛋白质、木质素三大

类,代表了一种已经被集中了的生物质资源^[20]

,可以通过热化学途径进行高效清洁转化生产高品质燃料。然而,由于工业生物质废物来源广泛、成分复杂,含有一定量的N、S、Cl等污染成分,其热化学特性和污染排放与普通生物质相比存在较大差异,以单位发热量计算得到的污染物排放浓度值较高,并非是一种传统意义上的清洁燃料,针对其热化学转化过程污染物排放与控制的研究具有重要的应用前景。气化、热解或者共燃等利用生

物质能的方式是减排CO₂、NO_x和SO_x的有效措施^[21]

;烘焙预处理有利于减少气化过程中含N前驱物的生成^[22];生物质解耦气化^[23-24]

则可望实现高效率、低

污染物排放、高产品质量、多联产及广谱燃料

适应性的多目标优化。N₂

是唯一无污染的含N物种,理论上有两种方法可降低热解气化过程氮氧化物的生成量:在热解前和热解过程中控制反应条件或添加催化剂使燃料N最大程度转化为N₂^[21-22,25]

;利用热解产生的HCN、NH₃还原半焦氧化得到的NO_x并生成N₂^[23-24,26]

。S、Cl等污染元素则采用在热解气化过程中添加固硫剂、固氯剂的方式,使之稳定化在以固态形式存在的炉渣或飞灰中。根据各污染元素在热化学转化过程的赋存形态与特性,今后的研究将朝分而治之、多污染物协同控制方向发展。

广州能源研究所对富含N、Cl、S的工业生物质在热解气化阶段污染元素的迁移与转化进行了研究。工业源生物质主要为药渣、污泥、豆秸等。以富N木质纤维素类^[27-29]

及非木质纤维素工业生物质废弃物^[30]、药渣凉茶渣^[31-32]

等为原料,研究了在不同升温速率、热解终温条件下不同含N官能团的N释放规律,结合热重分析和X射线光电子能谱表征,对比研究了热解过程NO_x前驱物的生成特征^[29-30,33]

,并对其中的机理进行了详细分析^[34-35]

。此外,

本研究组还在水热

条件下对市政污泥、脱墨污泥在加压

高温水相环境里N的迁移与转化进行了研究^[36-38]

,为污泥的高值化、能量化、减量化开辟了一条新途径。在Cl、S迁移转化研究方面,利用矿化垃圾制备衍生燃料,采用热重红外质谱联用技术(TG-FTIR-

MS)

和水平管式

热解炉/化学吸收法,

对比研究了矿化垃圾和常规垃圾衍生燃料热

解过程腐蚀性气体 (HCl 和 H_2

S) 的析出特性, 分析了热解温度及热解类型对析出行为的影响, 并对热解固相产物腐蚀性元素的赋存特点进行了考察^[39]。为不同垃圾衍生燃料的热利用提供了一定依据和参考。

1.4灰渣综合利用

生物质气化过程中产生的

灰渣是由生物质本身含有的灰分和气化过程产生的副产物组成^[40]

。近年来, 国内外学者针对生物质气

化灰利用进行了大量研究。EBERHARDT等^[41]

利用生物质灰制备出轻质保温砖; SCHETTINO等^[42]

利用添加一定量甘蔗灰渣的黏土制备出陶瓷材料;

QUARANTA等^[43]

以葵花籽壳灰为主要原料,

附以不同比例的废弃玻璃渣, 成功制备出陶瓷制品; 涂

湘巍等^[44]

研究发现秸秆气化灰渣中含有较多营养元素, 其对改良土壤和农作物增产有一定的促进作用。稻壳灰由于其巨大的产量和独特的物化特性, 成为研究热点。稻壳灰中 SiO_2 含量占87%~97%, 还有少量的 K_2O 、 Na_2O 、 MgO 及 Al_2O_3 等^[45]。根据稻壳灰中硅的物化特性, 可分为非结晶态稻壳灰和结晶态稻壳灰。

非结晶态稻壳灰中硅多以无定型态存在, 具有较强的反应性, 可用于制备碳化硅、水玻璃、白炭黑及气凝胶等多种化工产品^[46-49]

, 但由于稻壳灰中含有多种无机矿物质, 无法满足这些产品对纯度的要求, 一定程度上制约了该方向的产业化进程。

有研究发现无定型

稻壳灰中的硅可与硅酸盐水泥中的化

学物质发生化学反应, 提高了混凝土的强度^[50-51]

, 以非结晶态稻壳灰替代现有水泥原料中的

骨料, 可以有效节约建筑成本^[52]。稻壳灰中的无定形 SiO_2 也可作为危险废物固化中的水泥外加剂^[53]。

结晶态 SiO_2

具有较好的耐高温特性, 可用

于制备隔热材料用于钢铁、绝热材料、耐火砖和陶瓷生产^[54]

, 添加有结晶态稻壳灰的隔热材料已在炼钢生产中商业化应用^[55]。

2004年, CHAREONPANICH等^[56]

通过高温煅烧的方法, 利用稻壳制备出纯度较高的白色 SiO_2

, 并以其为硅源, 在特定的条件下制备出ZSM-5分子筛。而实际工业燃烧或气化工工艺产出的稻壳灰的杂质含量较高, 无法直接用于

制备ZSM-5分子筛。广州能

源研究所通过高温碱液水热处理工艺提纯电厂稻壳灰中

的 SiO_2

, 以制备出的硅溶胶 (RHA硅溶胶) 为硅

源, 成功制备出K-ZSM-5分子筛^[57]

, 并系统研究了模版剂用量、反应时间及未外加铝源等对ZSM-5分子筛制备和合成残液组成的影响, 摸索出最优制备方案^[58]。

2 气化产业发展现状和趋势

2.1 总体状况

在世界范围内, 生物质气化主要用于供热/窑炉、热电联产 (combined heat and power, CHP)、混燃应用和合成燃料 (图1), 目前规模最大的应用是CHP。20世纪80年代起, 生物质气化被美国、瑞典和芬兰等国用于水泥窑和造纸业

的石灰窑,既能保证原料供给又能满足行业需求,具有较强的竞争力,但应用却不多。20世纪90年代,生物质气化开始被应用于热电联产、多用柴油或燃气内燃机,生物质整体气化联合循环(biomass integrated gasification combined cycle, BIGCC)也成为研究热点,在瑞典、美国、巴西等国建成几个示范工程,由于系统运行要求和成本较高,大都已停止运行。1998年,生物质气化混合燃烧技术已被用于煤电厂,将生物质燃气输送至锅炉与煤混燃,目前已商业化运行。

生物质气化最新的发展趋势是合成燃料,利用气化获得一定 H_2

/CO比的合成气及通过合成反应生产液体燃料(如甲醇、乙醇和二甲醚),能部分替代现有的石油和煤炭化工。早在20世纪80年代,气化合成燃料技术在欧美已经有了初步的发展。近年来,受可再生能源发展政策的激励,各国加大了对气化合成技术的关注和投入,美国在气化合成燃料乙醇方面取得了很大的成就,其产能已达600亿L/a^[59]。

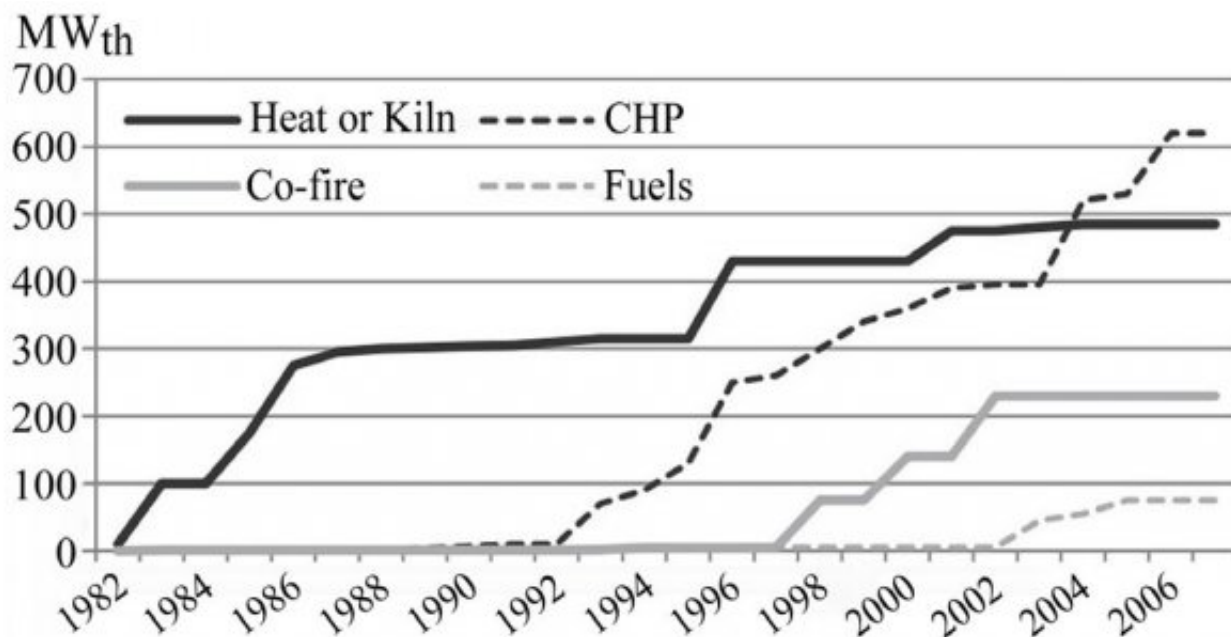


图1 全球生物质气化主要应用状况^[60]

Fig. 1 Application of biomass gasification technology in a global context

中国的生物质气化主要用于发电/CHP、供热/窑炉和集中供气,已建成了从200kWe~20MWe不同规格的气化发电装置,气化发电正向产业规模化方向发展,是国际上中小型生物质气化发电应用最多的国家之一。较具代表性的项目包括广州能源研究所“九五”期间建成的福建莆田1MWe谷壳气化发电系统、海南三亚1MWe木粉气化发电系统、河北邯郸600kWe秸秆气化发电系统,以及“十五”期间建成的江苏兴化5MWe气化-蒸汽联合循环电站。

气化燃气工业锅炉/窑炉应用方面,中国的科研单位和企业也进行了探索。在广州能源研究所技术支持下,广东省已建立生物燃气工业化完整的产业链条基础,近几年来成功地完成了几十个生物质燃气项目,典型项目包括常州运达印染、珠海丽珠合成制药、深圳华美钢铁和广州天天洗衣等项目。目前主要发展途径为以生物质燃气替代石化燃油、燃气作为锅炉/窑炉燃料。

利用生物质气化技术建设集中供气系统以满足农村居民炊事和采暖用气也已得到广泛应用,自1994年在山东省桓台县东潘村建成中国第一个生物质气化集中供气试点以来,山东、河北、辽宁、吉林、黑龙江、北京、天津等省市陆续推广应用生物质气化集中供气技术。据农业部统计,截至2010年底全国共建成秸秆气化集中供气站900处,运行数量为600处,供气20.96万户,每个正在运行的气化站平均供气约350户^[61]。

2.2 生物质气化内燃机发电/CHP

生物质气化发电/CHP可以通过蒸汽轮机、内燃机、燃气轮机和燃料电池等多种方式实现。可根据终端用户的需要

灵活配置、选用合适的发电设备，规模一般在20kWe~10MWe之间，非常适用于分布式发电系统。目前应用最广的是内燃机发电（图2），其负荷可调性高，20%以上负荷就能运行，也可以多台并联运行。

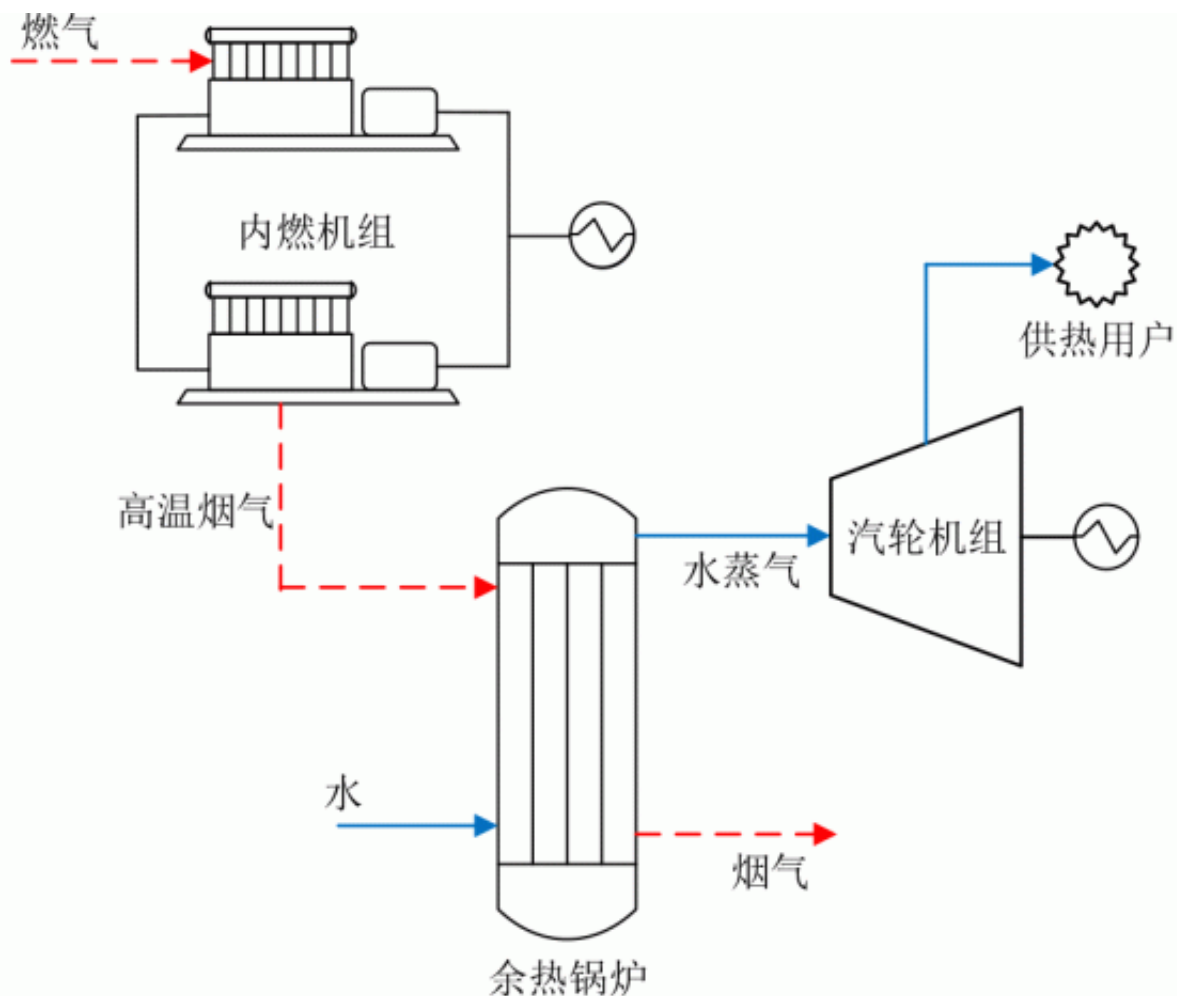


图 2 生物质气化内燃机发电/CHP 示意图

Fig. 2 Schematic of CHP system based on biomass gasification and internal gas engine

生物质气化获得的燃气热值较低，H₂含量较高，容易引起爆燃；生物质燃气中的焦油容易引起点火系统失灵，燃烧产生的积炭会增加机械磨损；燃气中的颗粒物也会增加设备磨损，严重时引起拉缸。所以生物质燃气内燃机的配件损耗和润滑油消耗一般比其他燃气内燃机高。从气化炉出来的燃气需要经过净化处理，内燃机和其他燃气利用设备对燃气的要求见表2。

表 2 燃气利用设备要求^[62]

Table 2 Requirements of various fuel gas device

设备	粉尘 / (mg/Nm ³)	颗粒物 / μm	焦油 / (mg/Nm ³)	碱金属 / (mg/Nm ³)
内燃机	<50	<100	<10	—
气轮机	<30	<5	<5	<0.24
燃料电池	—	<1	<1	—

对燃气进行深度净化的成本很高，为了应对燃气中的焦油问题，通常有两种方法：一是对内燃机进行定期清洁和维护以保证正常运行；二是将入口燃气保持在燃气残存焦油冷凝温度（约75℃）之上，适用于稀混合气、高转速、涡轮增压的内燃机组，发电效率可高达40%^[63]

。国外的生物质燃气内燃机多为低热值燃气与柴油共烧的双燃料机组，大型的MW级机组和单燃料机组则主要由天然气机组改造而成。中国用于生物质燃气的内燃机主要由柴油发电机改造而成，采用低压缩比、低转速、燃气和空气进入气缸前充分预混等措施，比较成熟的机组单机功率达到500kW_e。

广州能源研究所在生物质气化—内燃机发电/CHP方面处于国内领先水平，已推广生物质气化发电/CHP系统近30套。2005—2006年，在国家863计划支持下，建成国内首个生物质气化内燃机—蒸汽轮机联合循环发电示范工程（图3a），系统装机规模为4.5MW_e（内燃机组）+1.5MW_e（汽轮机组），发电效率超过26%；2012—2014年，在国家科技支撑计划的支持下，建成“2MW_e生物质气化发电及热气联供系统（图3b）”，研制出了发电效率为34.5%的8300D/M-2非增压型500kW_e低热值生物质燃气内燃机，示范系统发电效率为25.5%，CHP综合热效率为52.3%；目前，在国家重点研发计划项目支持下，计划建设2MW_e生物质气化发电和热气联供示范系统，将机组发电效率提高到35%以上，系统发电效率≥27%，热电联供总热效率≥50%，目前已完成选址和设计，进入装置研发和加工阶段。



(a) 6 MW_e 内燃机-蒸汽轮机联合循环发电系统



(b) 2 MW 内燃机发电及热气联供系统

图3 生物质气化发电/CHP 示范工程

Fig. 3 Power plants based on biomass gasification

2.3 生物质整体气化联合循环

IGCC将布雷顿循环和朗肯循环联合（图4），具有较高的发电效率。BIGCC是20世纪90年代的研究热点，最初目的是为了更高效地利用甘蔗渣，目前仍处于发展完善阶段，中国在这方面的研究几乎空白。BIGCC可通过内燃和外燃两种方式实现，内燃方式是燃气和空气在燃烧器混合燃烧生成高温高压烟气，进入到透平中膨胀做功；外燃是燃气与空气混合燃烧后，通过换热器将热量供给压缩空气，吸热后的高温高压空气进入到透平中膨胀做功。外燃方式对燃气质量要求不高，也不需要高压燃烧，燃气净化成本和压缩能耗较低，但投资成本较高，高温换热器等技术难题未攻克。内燃方式对燃气（表2）的焦油、颗粒物和碱金属含量要求非常高，以避免气轮机叶片出现磨损、腐蚀和沉积；燃气需要增压后（一般0.7MPa以上）进入燃烧器燃烧，而生物质燃气热值低、体积流量大，增加了压缩能耗和成本，加压机化可以避免该问题，但增加了气化炉进料和燃气净化的难度。

瑞典Varnamo电厂是世界上首座BIGCC电厂，发电净效率为32%。电厂采用FosterWheeler公司的加压循环流化床气化技术，以空气为气化剂，燃气经冷却器冷却至350~400℃后，由高温管式过滤器净化。电厂1995年开始正式运行，系统整体运行时间超过3600h，其中加压机化炉运行时间超过8500h，验证了生物质加压机化和燃气高温净化系统的可行性，获得了宝贵的运行经验。由于运行成本过高，该项目于2000年停止运行。其他BIGCC示范项目见表3，有四个项目采用了瑞典TPS的常压CFB气化技术，这些示范工程目前都已停止运行。

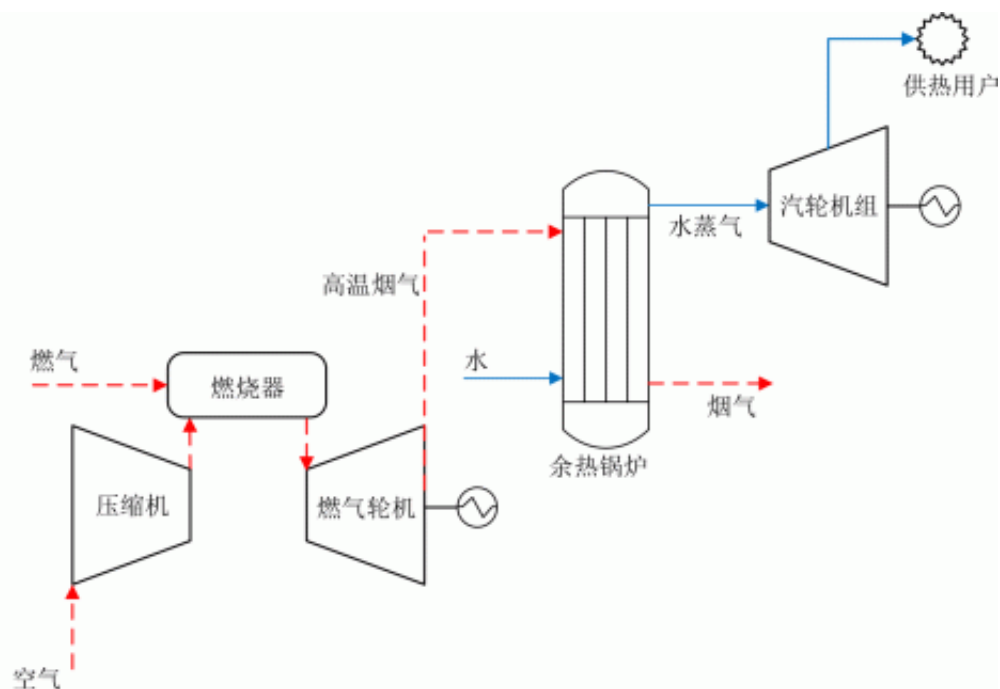


图 4 生物质整体气化联合循环发电示意图

Fig. 4 Schematic of biomass integrated gasification combined cycle

表 3 BIGCC 示范项目^[64-65]

Table 3 Demonstration projects of BIGCC

位置	规模	技术特征
Varnamo (瑞典)	6 MW _e + 9 MW _{th}	Ahlstrom (现为 Foster Wheeler) 加压 CFB, 高温净化
Selby, North Yorkshire (英国)	8 MW _e	TPS 常压 CFB, 催化裂解
Chianti (意大利)	7.7 MW _e + 18 MW _{th}	TPS 常压 CFB, RDF 原料
EF, Bioelettrica (意大利)	32 MW _e	Lurgi 常压气化, 后更换为 Carbona 加压气化
Burlington, Vermont (美国)	200 kt 原料/d	Battelle Columbus 实验室间接加热气化技术
Southern Bahia (巴西)	32 MW _e	TPS 常压 CFB
Piracicaba, São Paulo (巴西)	2 MW _{th}	TPS 常压 CFB
Andhra Pradesh (印度)	12.5 MW _e	Carbona 加压气化

2.4 生物质气化燃煤耦合发电

生物质气化燃煤耦合发电是将生物质在气化炉中转化为燃气，燃气再送入燃煤锅炉与煤混合燃烧发电，如图5。

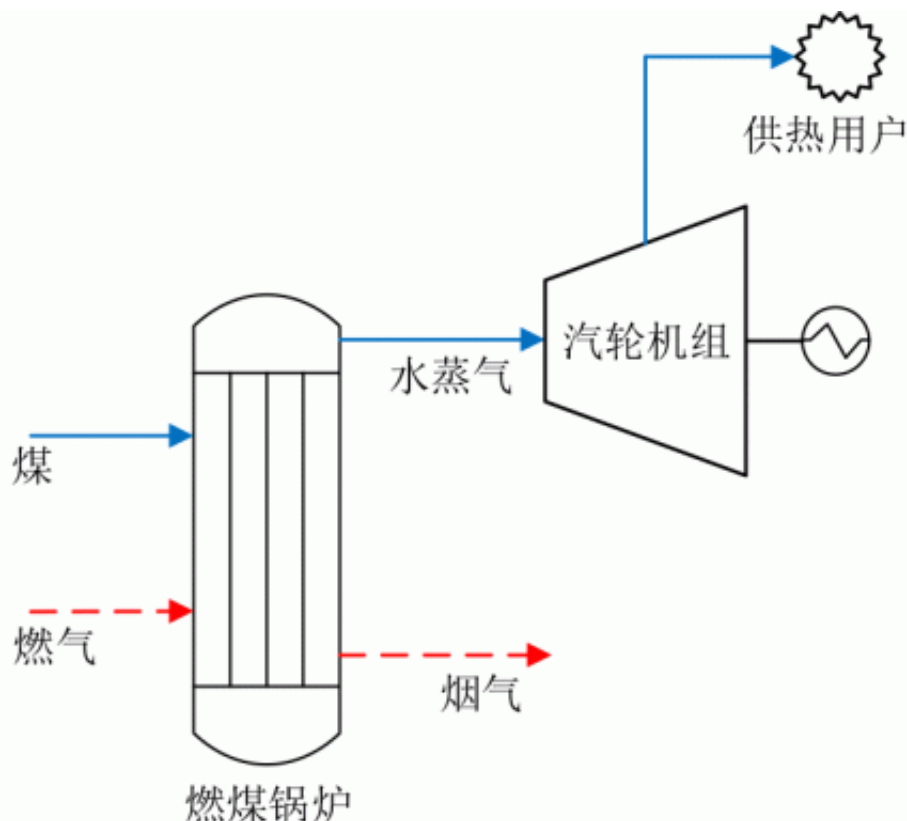


图 5 生物质气化混燃发电示意图

Fig. 5 Schematic of gasification based biomass co-firing in a coal boiler

该技术也称间接混燃，也适用于以油、天然气为燃料的火电厂。需要在燃煤锅炉设备基础上增加独立的生物质气化系统，并根据生物质燃气在锅炉内的燃烧段位置增加燃气燃烧器或局部改造原有的煤粉燃烧器。从气化炉出来的高温燃气直接进入锅炉燃烧，燃气显热和焦油的能量得到充分利用。该技术可以利用现役大容量、高效率燃煤机组，发电效率可达40%~46%，依托燃煤热电联产机组发电并供热，综合能源利用效率可达到70%以上。生物质气化燃煤耦合发电技术可以充分发挥大型燃煤发电机组的优势，而且初投资成本较低、建设周期短、生物质利用规模灵活、可针对煤和生物质价格波动进行自身调节，对生物质价格控制力强，是生物质最高效、经济的利用方式之一。与生物质/煤直接混燃技术相比，其优势在于燃煤锅炉腐蚀和沉积的风险较小、对尾气处理系统无影响、生物质灰和煤灰可分别处理，能够利用的原料范围更广。

表 4 生物质气化燃煤耦合发电项目

Table 4 Projects of gasification based biomass co-firing in coal boiler

项目	生物质原料	规模
Amargas (荷兰)	木质废弃物, 5%混燃比例	83 MW _{th} 的 CFB
Kymijärvi (芬兰)	树皮、木质废弃物, 15%混燃比例	45 ~ 70 MW _{th} 的 CFB
Vaskiluodon (芬兰)	林业废弃物	140 MW _{th} 的 CFB
Electrabel Ruien (比利时)	树皮、木质废弃物	40 ~ 80 MW _{th} 的 CFB
West Burton (英国)	多种原料, 5%混燃比例	电厂规模 1 980 MW _e
Cottam (英国)	多种原料, 5%混燃比例	电厂规模 2 000 MW _e
McNeil (美国)	木片, 15%混燃比例	电站规模 50 MW _e

目前生物质气化燃煤耦合发电项目并不多，如表4。国内第一个气化耦合项目是国电荆门电厂660MWe机组生物质

气化耦合燃烧发电项目，气化炉处理量为8t/h，生物质燃气耦合发电部分为10.8MWe。该项目于2013年10月正式投运，截至2015年11月，累计实现上网电量15157万kW·h，综合利用秸秆104685t。该项目获得了与生物质直燃电厂同等的生物质发电上网电价。为鼓励生物质燃煤耦合技术发展，2018年6月21日，国家能源局、生态环境部联合下发了《关于燃煤耦合生物质发电技改试点项目建设的通知》，明确了84个试点项目，其中生物质气化燃煤耦合发电项目54个，占比64.3%，涵盖全国18个省和直辖市，反映出市场对发展生物质气化燃煤耦合发电的广泛认可。但与此同时，《关于公布可再生能源电价附加资金补助目录（第七批）的通知》将燃煤耦合生物质发电排除在补贴范围外。

2.5 生物质气化 - 燃料电池发电

固体氧化物燃料电池（solid Oxide fuel cell, SOFC）技术突破和规模化发展为生物质高效分布式发电提供了一条可行途径。SOFC在高温下直接将燃料的化学能转化为电能，发电效率可高达60%；对燃料适应性比较强，气化燃气中可燃组分（ H_2 、CO和 CH_4

）均可作为燃料，且发电效率不受规模影响，适合分布式发电应用。生物质气化SOFC发电流程见图6。

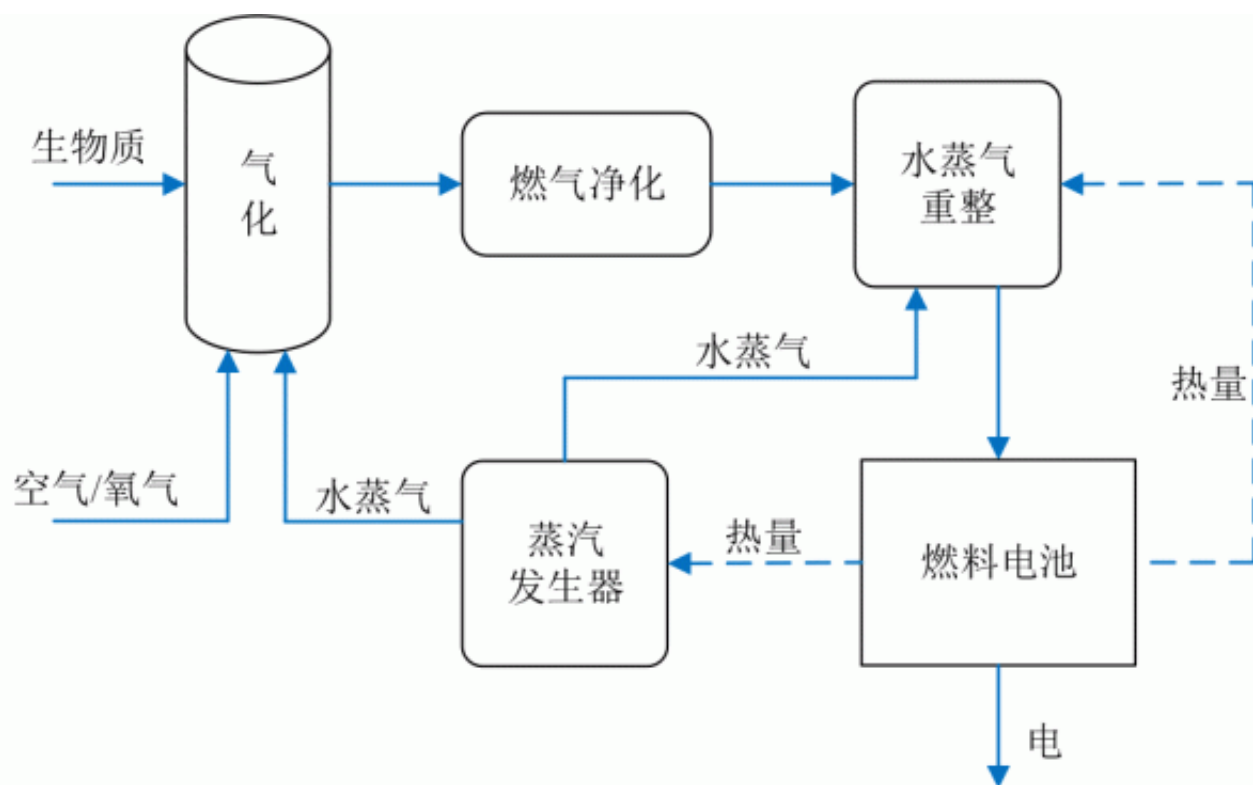


图 6 生物质气化-SOFC 一体化发电系统

Fig. 6 Schematic of biomass-integrated gasification fuel cell system

生物质气化SOFC发电最早在20世纪80年代被提出。近几年，随着气化技术和燃料电池技术的发展，二者耦合发电

[66-68]

，实验研究尤其是以真实生物质气化燃气作为SOFC燃料的研究很少，仅有的实验研究多集中在欧洲。奥地利Güssing示范工程^[69]

将快速内循环流化床水蒸气气化燃气与SOFC联合运行26h，结果显示SOFC输出电压一直保持稳定；荷兰能源研究中心^[70]

将两段式气化燃气与小型SOFC电池堆（5~30组电池，350W，SulzerHEXIS）联合起来运行48~250h，得到系统发电效率为36%~41%；雅典国家技术大学的HOFMANN等^[71]

考察了平板型SOFC耦合生物质气化燃气时的运行性能，其中气化工艺采用丹麦理工大学开发的两段式气化炉连续运

行了150h后电池无压降,验证了生物质气化燃气耦合SOFC运行的可行性。

总的来说,现阶段生物质气化SOFC发电在世界范围内研究差别不大,中国可以利用研究积累和核心技术,开展生物质气化耦合SOFC发电的研究,为生物质高效分布式发电应用提供技术储备。该技术研究将不仅有利于岛屿、边远山区和农村地区的经济发展,同时还可带来可观的环境效益,在中国具有良好的发展前景。

2.6 生物质气化合成

近年来,欧美等发达国家的众多跨国公司和科研单位相继开展了生物质气化合成液体燃料的研究工作,建立了多套示范装置^[1,72]

: 德国科林

公司(Choren)和林德

集团(Linde)合作,在芬兰Kemi建设了一座年

消耗林业废弃物 1.2×10^6 t、年产 1.3×10^5

t生物质合成柴油/石脑油的工厂;德国卡尔斯鲁厄理工学院和鲁奇公司(Lurgi)建立了BTL合成汽油中试厂,以林木剩余物、秸秆和油棕树叶为原料,日产生物合成汽油2t;瑞典Chemrec公司在瑞典北部Pitea建立了年产1800t甲醇和二甲醚的造纸黑液气化合成车用燃料示范系统。此外,还有美国的Hynol Process示范工程、美国可再生能源实验室的生物质制甲醇项目和日

本三菱重工的MHI生物质气化合成甲醇系

统等^[73]。最近,DIMITRIOU等^[74]

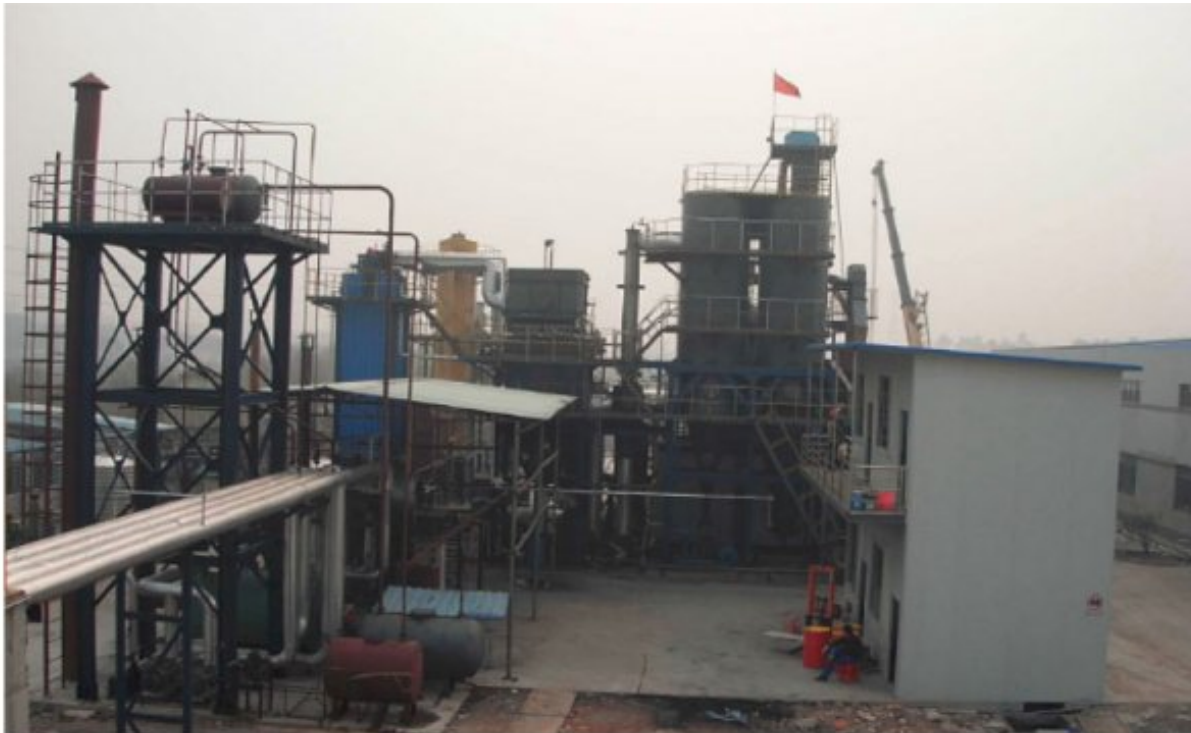
计算分析了6种不同BTL气化合成系统的能效(37.9%~47.6%)和液体燃料生产成本(17.88~25.41 €/GJ),其中费托合成工艺最接近传统石油化工生产成本,且考虑到传统生产中逐渐增加的环保成本,生物燃料在未来将更具备竞争优势。

近几年,中国虽然在生物质气化技术上有较大发展,催化合成工业也逐渐成熟,但有关生物质气化合成液体燃料技术的研究尚处于起步阶段,仅有河南农业大学、浙江大学、中国科技大学、中国科学院青岛生物能源与过程研究所、中国科学院广州能源研究所等为不多科研机构的研究报道,产品主要为汽柴油、二甲醚和低碳混合醇等。广州能源研究所在国家“十五”⁸

63计划支持下,较早开展了生物质气化合成含氧

液体燃料的实验研究^[75]

;“十一五”期间在国家863计划、国际合作及中国科学院知识创新项目的支持下,建立了百吨级生物质气化合成二甲醚的评价系统和试装置;“十二五”期间在国家科技计划项目的支持下,建成了千吨级生物质气化合成醇醚燃料示范系统(图7),并开发出具有自主知识产权的万吨级工艺包。



(a) 气化系统



(b) 合成系统

图 7 千吨级生物气化合成醇醚燃料中试示范系统

Fig. 7 Demonstration project of 1 000 t/a liquid fuel synthesis based on biomass gasification

3中国生物质气化产业发展定位

中国生物质能利用技术多种多样，目前产业仍不成熟，但坚持分布式发展是今后的方向。需要根据技术特点、市场需求，明确其发展定位。结合前述分析，中国生物质气化产业的基本定位如下。

（1）部分替代燃煤、燃气，建设分散工业供热、供气系统，满足分散、小规模燃煤燃气用户需求，推进国家节能减排计划。

生物质能源产业具有良好的经济效益、生态效益和社会效益。中国CO₂

减排压力巨大，分散燃煤造成的雾霾等环境问题日益严重，降低化石能源比例、减少燃煤污染是中国能源发展中相当长时期内的核心任务。生物质气化利用技术可实现在终端用户部分替代燃煤和天然气，例如利用生物质为企业分散供热、将生物质气化燃烧系统应用于工业窑炉等，将生物质能利用与节能减排工作有机结合，为可燃固体废弃物处理和高耗能行业节能减排开辟了新的方法和途径。

（2）建设村镇规模的分布式生物质气化多联供系统，为国家新型城镇化战略提供支撑。

生物质能是分散的地域性能源，主要分布在农村地区。中国农村经济发展极不平衡。一方面，经济发达地区的农民使用洁净的电能、液化气等商品能源，将富余的秸秆在田间焚烧，造成极大的环境污染；另一方面，仍有边远地区没有电力供应，生活用能没有保障。根据当地需求，发展生物质能分布式气化多联供产业，提供热、电、燃气、活性炭、土壤改良剂等产品，可以有效替代高污染、高排放的化石燃料及其产品，资源化利用有机固体废弃物，有利于建立资源节约型和环境友好型社会，促进人与自然的和谐发展及经济社会的可持续发展。

（3）气化合成液体燃料和化工品，部分替代石油工业产品，服务国家能源发展战略。

从长远看，应重点研发利用农林废弃物等纤维素类生物质气化合成燃料及化工品。化石能源尤其是石油资源严重不足、能源结构失衡，已威胁到中国的能源安全和社会的可持续发展。生物质作为唯一一种能直接转化为液体燃料的可再生能源，可以缓解中国对进口石油的依赖，而且能够大幅度减少温室气体的排放，是生物质利用的跨越式发展，其研究和开发也是世界各国可再生能源发展的热点和焦点。

参考文献:

- [1] 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. DOI: 10.1016/j.jechem.2015.11.005.
- [2] 孙立, 张晓东. 生物质热解气化原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [3] MILNE T A, ABATZAGLOU N, EVANS R J. Biomass gasifier “tars”: their nature, formation, and conversion[R]. NREL/TP-570-25357. Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- [4] LI C S, SUZUKI K. Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification-An overview[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2009, 13(3): 594-604. DOI: 10.1016/j.rser.2008.01.009.
- [5] BRANDT P, HENRIKSEN U B. Decomposition of tar in gas from updraft gasifier by thermal cracking[C]// Proceedings of First World Conference on Biomass for Energy and Industry. Sevilla, Spain: James & James, 2000.
- [6] BALDWIN R M, MAGRINI-BAIRA K A, NIMLOS M R, et al. Current research on thermochemical conversion of biomass at the national renewable energy laboratory[J]. Applied catalysis B: environmental, 2012, 115-116: 320-329. DOI: 10.1016/j.apcatb.2011.10.033.
- [7] 王磊, 吴创之, 陈平, 等. 生物质气化焦油在高温木炭床上的裂解试验研究[J]. 可再生能源, 2005(5): 30-34. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2005.05.009.
- [8] 阴秀丽, 赵增立, 徐冰燕, 等. 白云石和石灰石对废轮胎热解产物的影响[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(3): 283-285. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2409.2001.03.020.
- [9] MIAO Y L, XUE J, XIA F J, et al. Utilization of porous dolomite pellets for the catalytic decomposition of acetic acid[J]. Biomass and bioenergy, 2010, 34(12): 1855-1860. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.07.019.
- [10] 巩伟, 阴秀丽, 谢建军, 等. 多孔白云石颗粒催化裂解生物质焦油的动力学研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 800-805.
- [11] 薛俊, 缪冶炼, 阴秀丽, 等. 多孔镍/白云石颗粒对生物质气化焦油裂解的催化性能[J]. 工业催化, 2009, 17(10): 45-50. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1143.2009.10.010.
- [12] 薛俊, 缪冶炼, 夏发俊, 等. 生物质气化焦油裂解用颗粒催化剂的再生性能[J]. 工业催化, 2009, 17(9): 71-75. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1143.2009.09.015.
- [13] 郎林, 谢建军, 杨文申, 等. 改性陶瓷管高温净化生物质粗燃气的研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(8): 1665-1668.
- [14] 谢建军, 郎林, 杨文申, 等. 高温陶瓷净化生物质气化粗燃气粉尘试验研究[J]. 化工进展, 2017, 36(8): 2903-2909. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2016-2374.
- [15] 林娜, 郎林, 刘华财, 等. 生物质气化燃气中固体颗粒物的恒温临氧热解机理研究[J]. 燃料化学学报, 2018, 46(3): 290-297. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2409.2018.03.005.
- [16] 谢建军, 徐彬, 阴秀丽, 等. 流光电晕放电净化粗燃气焦油及粉尘研究进展[J]. 新能源进展, 2016, 4(3): 232-239. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.03.011.
- [17] 徐彬, 谢建军, 阴秀丽, 等. 流光电晕裂解焦油模型化合物的动力学模拟[J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3178-3184.
- [18] XU B, XIE J J, ZHAN H, et al. Removal of toluene as a biomass tar surrogate in a catalytic nonthermal plasma

- process[J]. *Energy & fuels*, 2018, 32(10): 10709-10719. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02444.
- [19] XIE J, ZHOU Y, ZHOU Z, et al. Demonstration of a combined heat and power plant through biomass gasification[C]//Presented at the The Sixth International Symposium on Gaisification and Its Application. October 25-28, 2018, Chengdu, China, 2018.
- [20] 许光文, 纪文峰, 万印华, 等. 轻工业纤维素生物质过程残渣能源化技术[J]. *化学进展*, 2007, 19(7/8): 1164-1176.
- [21] 廖艳芬, 马晓茜. 生物质能利用技术控制污染物排放的作用[J]. *环境污染与防治*, 2006, 28(5): 369-372, 387. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3865.2006.05.015.
- [22] 冯宜鹏, 王小波, 赵增立, 等. 烘焙预处理对高含氮木质废弃物气流床气化特性与含氮污染物分布的影响研究[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(7): 1908-1916.
- [23] XU G W, MURAKAMI T, SUDA T, et al. Efficient gasification of wet biomass residue to produce middle caloric gas[J]. *Particuology*, 2008, 6(5): 376-382. DOI: 10.1016/j.partic.2008.07.004.
- [24] ZHANG J W, WANG Y, DONG L, et al. Decoupling gasification: approach principle and technology justification[J]. *Energy & fuels*, 2010, 24(12): 6223-6232. DOI: 10.1021/ef101036c.
- [25] 王磊, 沈胜强, 师新广, 等. 生物质气化过程中燃料氮迁移影响因素实验研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(12): 1365-1369. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2007.12.015.
- [26] 许光文, 高士秋, 余剑, 等. 解耦热化学转化基础与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [27] 杨会凯, 常国璋, 张晓鸿, 等. 固定床生物质热解气化过程 N 迁移实验研究[J]. *现代化工*, 2016, 36(11): 116-120.
- [28] 张晓鸿, 詹昊, 阴秀丽, 等. 富氮生物质原料热解过程中 NO_x 前驱物释放特性研究[J]. *燃料化学学报*, 2016, 44(12): 1464-1472. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2409.2016.12.008.
- [29] ZHAN H, YIN X L, HUANG Y Q, et al. NO_x precursors evolving during rapid pyrolysis of lignocellulosic industrial biomass wastes[J]. *Fuel*, 2017, 207:438-448. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.06.046.
- [30] ZHAN H, ZHUANG X Z, SONG Y P, et al. Insights into the evolution of fuel-N to NO_x precursors during pyrolysis of N-rich nonlignocellulosic biomass[J]. *Applied energy*, 2018, 219: 20-33. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.015.
- [31] 詹昊, 阴秀丽, 黄艳琴, 等. 药渣热解过程 NO_x 前驱物生成特征及规律研究[J]. *燃料化学学报*, 2017, 45(3): 279-288. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2409.2017.03.004.
- [32] 詹昊, 张晓鸿, 宋艳培, 等. 富 N 生物质原料气化过程 NO_x 前驱物生成特性及规律[J]. *燃料化学学报*, 2018, 46(1): 34-44. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2409.2018.01.005.
- [33] ZHAN H, ZHUANG X Z, SONG Y P, et al. Evolution of nitrogen functionalities in relation to NO_x precursors during low-temperature pyrolysis of biowastes[J]. *Fuel*, 2018, 218: 325-334. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.01.049.
- [34] ZHAN H, ZHUANG X Z, SONG Y P, et al. Step pyrolysis of N-rich industrial biowastes: Regulatory mechanism of NO_x precursor formation via exploring decisive reaction pathways[J]. *Chemical engineering journal*, 2018, 344: 320-331. DOI: 10.1016/j.cej.2018.03.099.

- [35] ZHAN H, YIN X L, HUANG Y Q, et al. Comparisons of Formation Characteristics of NO_x Precursors during Pyrolysis of Lignocellulosic Industrial Biomass Wastes[J]. *Energy & fuels*, 2017, 31(9): 9557-9567. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b01559.
- [36] 庄修政, 詹昊, 黄艳琴, 等. 两类药渣的水热提质效果及其燃烧特性研究[J]. *燃料化学学报*, 2018, 46(8): 940-949.
- [37] ZHUANG X Z, HUANG Y Q, SONG Y P, et al. The transformation pathways of nitrogen in sewage sludge during hydrothermal treatment[J]. *Bioresource technology*, 2017, 245: 463-470. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.08.195.
- [38] ZHUANG X Z, HUANG Y Q, LIU H C, et al. Relationship between physicochemical properties and dewaterability of hydrothermal sludge derived from different source[J]. *Journal of environmental sciences*, 2018, 69: 261-270. DOI: 10.1016/j.jes.2017.10.021.
- [39] 林均衡, 杨文申, 阴秀丽, 等. 矿化垃圾衍生燃料热解过程 HCl 与 H₂S 析出规律[J]. *燃料化学学报*, 2018, 46(2): 152-160.
- [40] 李学琴, 时君友, 雷廷宙, 等. 生物质秸秆气化灰渣基多元元素农作物复合肥的研制[J]. *吉林农业大学学报*, 2016, 38(5): 605-612. DOI: 10.13327/j.jjlau.2016.3354.
- [41] EBERHARDT T L, PAN H. Analysis of the fly ash from the processing of wood chips in a pilot-scale downdraft gasifier: Comparison of inorganic constituents determined by PIXE and ICP-AES[J]. *Biomass and bioenergy*, 2013, 51: 163-168. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.01.020.
- [42] SCHETTINO M A S, HOLANDA, J N F. Characterization of sugarcane bagasse ash waste for its use in ceramic floor tile[J]. *Procedia Materials Science*, 2015, 8: 190-196. DOI: 10.1016/j.mspro.2015.04.063.
- [43] QUARANTA N, UNSEN M, LÓPEZ H, et al. Ash from sunflower husk as raw material for ceramic products[J]. *Ceramics international*, 2011, 37(1): 377-385. DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.09.015.
- [44] 涂湘巍. 稻秸秆气化灰渣的理化性质及煤焦孔结构表征方法的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
- [45] 朱永义. 稻谷加工与综合利用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999.
- [46] VENEZIA A M, LA PAROLA V, LONGO A, et al. Effect of alkali ions on the amorphous to crystalline phase transition of silica[J]. *Journal of solid state chemistry*, 2001, 161(2): 373-378. DOI: 10.1006/jssc.2001.9345.
- [47] ÖHMAN M, NORDIN A, SKRIFVAR B J, et al. Bed agglomeration characteristics during fluidized bed combustion of biomass fuels[J]. *Energy & fuels*, 2000, 14(1): 169-178. DOI: 10.1021/ef990107b.
- [48] SUN L Y, GONG K C. Silicon-based materials from rice husks and their applications[J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2001, 40(25): 5861-5877. DOI: 10.1021/ic010284b.
- [49] CHANDRASEKHAR S, SATYANARAYANA K G, PRAMADA P N, et al. Review Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk—an overview[J]. *Journal of materials science*, 2003, 38(15): 3159-3168. DOI: 10.1023/A:1025157114800.
- [50] KIZHAKKUMODOM V H, RANGARAJU P R. Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete[J]. *Cement and concrete composites*, 2015, 55: 348-363. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.09.021.
- [51] SALAZAR-CARREÑO D, GARCÍA-CÁCERES R G, ORTIZ-RODRÍGUEZ O. Laboratory processing of Colombian rice husk for obtaining amorphous silica as concrete supplementary cementing material[J]. *Construction and building materials*, 2015, 96: 65-75. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.178.
- [52] NAIR D G, JAGADISH K S, FRAAIJ A. Reactive pozzolanas from rice husk ash: An alternative to cement for rural housing[J]. *Cement and concrete research*, 2006, 36(6): 1062-1071. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.03.012.
- [53] EL-DAKROURY A, GASSER M S. Rice husk ash (RHA) as cement admixture for immobilization of liquid radioactive waste at different temperatures[J]. *Journal of nuclear materials*, 2008, 381(3): 271-277. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.08.026.
- [54] PRASARA-A J, GRANT T. Comparative life cycle assessment of uses of rice husk for energy purposes[J]. *The international journal of life cycle assessment*, 2011, 16(6): 493-502. DOI: 10.1007/s11367-011-0293-7.
- [55] Bronzeoak Ltd. Rice husk ash market study[Z]. UK Department of Trade and Industry, 2003.
- [56] CHARBONPANICH M, NAMTO T, KONGKACHUICHAY P, et al. Synthesis of ZSM-5 zeolite from lignite fly ash and rice husk ash[J]. *Fuel processing technology*, 2004, 85(15): 1623-1634. DOI: 10.1016/j.fuproc.2003.10.026.
- [57] 郎林, 王凤岳, 张超, 等. 利用稻壳气化残渣制备 K-ZSM-5 分子筛的研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 107-113. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.020.
- [58] 杨文申, 郎林, 阴秀丽, 等. 稻壳灰高值利用制备 ZSM-5 分子筛[J]. *新能源进展*, 2018, 6(1): 8-13. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2018.01.002.
- [59] DWIVEDI P, ALAVALAPATI J R R, LAL P. Cellulosic ethanol production in the United States: Conversion technologies, current production status, economics, and emerging developments[J]. *Energy for sustainable development*, 2009, 13(3): 174-182. DOI: 10.1016/j.esd.2009.06.003.
- [60] KIRKELS A F, VERBONG G P J. Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2011, 15(1): 471-481. DOI: 10.1016/j.rser.2010.09.046.
- [61] 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.
- [62] 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. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.038.
- [63] TSIKAKIS S, MERTZIS D, DIMARATOS A, et al. Experimental study of combustion in a spark ignition engine operating with producer gas from various biomass feedstocks[J]. *Fuel*, 2014, 122: 126-139. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.01.013.
- [64] LARSON E D, WILLIAMS R H, LEAL M R L V. A review of biomass integrated-gasifier/gas turbine combined cycle technology and its application in sugarcane industries, with an analysis for Cuba[J]. *Energy for sustainable development*, 2001, 5(1): 54-76. DOI: 10.1016/S0973-0826(09)60021-1.
- [65] PANG S S, LI J. BIGCC system for New Zealand: an

- overview and perspective[J]. New Zealand journal of forestry, 2006, 51(2): 7-12.
- [66] MINUTILLO M, PERNA A, JANNELLI E, et al. Jannelli, et al. Coupling of biomass gasification and SOFC-gas turbine hybrid system for small scale cogeneration applications[J]. Energy procedia, 2017, 105: 730-737. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.383.
- [67] DEY T, SINGDEO D, POPHALE A, et al. SOFC power generation system by bio-gasification[J]. Energy procedia, 2014, 54: 748-755. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.316.
- [68] OZCAN H, DINCER I. Performance evaluation of an SOFC based trigeneration system using various gaseous fuels from biomass gasification[J]. International journal of hydrogen energy, 2015, 40(24): 7798-7807. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.11.109.
- [69] AHRENFELDT J, THOMSEN T P, HENRIKSEN U, et al. Biomass gasification cogeneration-A review of state of the art technology and near future perspectives[J]. Applied thermal engineering, 2013, 50(2): 1407-1417. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.12.040.
- [70] OUDHUIS A B A, OUWELTJES J P, RIETVELD G, et al. High efficiency electricity and products from biomass and waste; experimental results and proof of principle of staged gasification and fuel cells[C]// Proceedings of the 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. May 10-14, 2004, Rome, Italy, 2004.
- [71] HOFMANN P, SCHWEIGER A, FRYDA L, et al. High temperature electrolyte supported Ni-GDC/YSZ/LSM SOFC operation on two-stage Viking gasifier product gas[J]. Journal of power sources, 2007, 173(1): 357-366. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.04.073.
- [72] 程序, 石元春. 木质原料制取先进生物燃料正处在大规模产业化的前夜——迎接生物能源第二波浪潮[J]. 中国工程科学, 2015, 17(1): 11-18. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2015.01.002.
- [73] 王忠华. 生物质气化技术应用现状及发展前景[J]. 乙醛醋酸化工, 2016, 18(12): 14-18. DOI: 10.1016/j.rser.2018.02.023.
- [74] DIMITRIOU I, GOLDINGAY H, BRIDGWATER A V. Techno-economic and uncertainty analysis of Biomass to Liquid (BTL) systems for transport fuel production[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2018, 88:160-175.
- [75] 应浩, 蒋剑春. 生物质能源转化技术与应用(IV)——生物质热解气化技术研究和应用[J]. 生物质化学工程, 2007, 41(6): 47-55. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5854.2007.06.012.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/153597.html>