

# 生物质气化制合成气技术研究进展

解庆龙<sup>1</sup>,孔丝纺<sup>1</sup>,刘阳生<sup>1,2</sup>,曾辉<sup>1,3</sup>

(1. 北京大学深圳研究生院, 深圳市循环经济重点实验室, 广东 深圳 518055;  
2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 3. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

**摘要:**介绍了生物质气化制合成气技术的优势和主要用途,着重论述了国内外生物质气化制合成气技术的研究进展,对存在的主要问题进行了分析和探讨,并对该技术的前景进行了展望,指出新型气化合成技术、高效气化反应器以及高效催化剂是今后研究的重点。

**关键词:**生物质; 气化; 合成气

中图分类号: X382

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2011)07-0016-05

## Recent advances in technologies of biomass gasification to produce syngas

XIE Qing-long<sup>1</sup>, KONG Si-fang<sup>1</sup>, LIU Yang-sheng<sup>1,2</sup>, ZENG Hui<sup>1,3</sup>

(1. Shenzhen Key Laboratory of Recycling Economy, School of Urban Planning and Design, Beijing University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Beijing University, Beijing 100871, China;  
3. College of Urban and Environmental Sciences, Beijing University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The technology of syngas production through biomass gasification is a kind of clean energy transition technology, in which the greenhouse effect caused by fossil fuels combustion can be reduced. In this paper, the advantages and main applications of the technology of biomass gasification to syngas are introduced. The research progress of the technology is emphasized. Moreover, the main problems of the technology of biomass gasification to syngas are analyzed and discussed. The prospect of this technology is also proposed. It is pointed out that the new technology, efficient gasification reactors and excellent catalysts will be focused in the future.

**Key words:** biomass; gasification; syngas

生物质能资源具有硫含量低、资源广泛、可以永久利用且不增加地表 CO<sub>2</sub> 循环总量等特点,日益受到人们的广泛关注和世界各国的高度重视。生物质能量密度低,属于低品位能源,其直接利用具有一定的局限性。生物质气化制备合成气技术是将低品位的固体生物质原料转化为高品位的洁净气体燃料的热处理手段,可以有效地减少温室气体排放问题,是一种可持续的清洁的能源转化技术。生物质制合成气技术作为一种能源开发的新技术,至今已有了较快的发展,尤其是近年来国外很多研究人员在该领域进行了不同技术的研究,并取得了一定的成果。但目前相关研究得到的产气中 H/C 比偏低以及焦油含量较高是生物质气化制合成气技术面临的主要问题。过去几年,我国研究人员在生物质气化领域开展了一系列的研究工作,主要集中于生物质气化制备燃料气、发电等领域,而利用生物质气化途径制备合成气的研究还很少。

本文讨论了生物质气化制合成气技术的优势,重点介绍了国内外生物质气化制合成气技术的研究

进展,分析和探讨了目前该技术存在的主要问题,并对其前景进行了展望。

## 1 比较优势和主要用途

生物质气化技术主要应用于4个方面:供热、供气、发电及合成化学品。各方面应用的主要领域和优缺点比较如表1所示<sup>[1]</sup>。

从表1的比较可以看出,利用生物质气化进行供热和供气的技术比较成熟,是当前国内很多城市供暖、供热的重要途径,但是这2种方式对生物质的利用效率都不高,是限制其进一步发展的主要因素。利用生物质气化进行发电的技术虽然开发潜力很大,但是目前尚处于实验室研究阶段,需要进一步研究,以实现其大规模的工业应用。利用生物质气化制备合成气,进而合成醇、醚和各种烃类燃料,是生物能源利用的新途径,有利于缓解传统化石能源危机,在这几种气化技术中具有更好的应用前景。但是这一技术路线还存在热解焦油含量高,制得的合成气中含有较多 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等杂质及气化效率较低、

收稿日期:2011-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(21077002)

作者简介:解庆龙(1988-),男,硕士生;刘阳生(1968-),男,博士,教授,博士生导师,从事固体废弃物资源化及生物质能利用的研究,通讯联系人,010-62751756, yshliu@pku.edu.cn。

表1 生物质气化技术应用比较

	供热	供气	发电	合成化学品
应用领域	区域供热、农副产品的烘干等	居民炊事用气	居民和企业用电	合成甲醇、乙醇、二甲醚等化学品
主要设备	气化炉、燃烧器	气化炉、气体净化系统、输气管网	气化炉、气体净化设备、燃气发电系统	气化炉、转换器、合成器
优势	系统简单,热利用率高、燃料适应性较广	技术较成熟,应用广泛,规模越大经济性越好	应用广泛,开发潜力大,应用前景广阔,受重视程度高	用途广泛,工艺流程简单
不足	生物质利用效率较低,用途单一	系统复杂,运行维护费用较高	技术不成熟,规模小,发电效率低	技术不成熟,规模小

合成气比例不适中、进行液体燃料合成前需要进行重整等问题,有待进一步深入研究,以逐步解决相应的关键技术问题。

通过生物质气化得到的合成气主要是利用费-托合成的方法合成甲醇、乙醇、二甲醚、液化石油气(LPG)等化工制品和液体燃料。由此得到的燃料是理想的碳中性绿色燃料,可以代替传统的煤、石油等用作城市交通和民用燃料。

## 2 研究进展

近年来,生物质气化制合成气技术已成为了各国研究的热点,日本及欧美等发达国家和地区在该领域取得了较多研究成果,尤其是气化装置和催化剂的研究处于世界领先水平。过去几年,我国在生物质气化技术方面也取得了一定的进步,而利用生物质气化途径制备合成气的研究还比较少,主要集中在中科院广州能源所、华中科技大学、中国科技大学生物质洁净能源实验室等少数科研院所,并且大多数仍停留在实验室阶段。

### 2.1 国外研究进展

日本、美国及欧洲一些国家在生物质气化制合成气技术领域经过了长期、系统的研究,一些工艺技术目前已进入成熟的商业化运营阶段。这些研究工作主要集中在气化反应装置、生物质原料类型、气化和催化剂研究等方面。

生物质气化的反应装置主要包括固定床气化器和流化床气化器两大类。Karmakar 等人<sup>[2]</sup>利用流化床反应器进行了富氢合成气的研究,得到的产气中氢气体积分数最高可达 53.08%,碳转化率为 90.11%,合成气的低位热值(LHV)在 12 MJ/m<sup>3</sup> 左右。瑞典的 Göransson 等人<sup>[3]</sup>对双流化床气化技术进行了探讨,得到了氢气体积分数为 40% 的合成

气, H<sub>2</sub>/CO 可达 1.6 左右,合成气的平均低位热值为 14 MJ/m<sup>3</sup>,焦油裂解率为 90% ~ 95%。日本的 Xiao 等人<sup>[4]</sup>以流化床热解加固定床重整的两阶段气化装置进行了生物质的低温气化的研究,在 600℃ 的条件下,可以得到产率为 2.0 m<sup>3</sup>/kg,氢气体积分数高达 60%,LHV 为 14 MJ/m<sup>3</sup> 的富氢合成气。日本名古屋大学的 Ueki 等人<sup>[5]</sup>对比了上吸式和下吸式固定床的生物质气化效果,其中上吸式固定床得到的合成气低位热值较高(4.8 MJ/m<sup>3</sup>),而下吸式固定床则具有较高的碳转化率(82%)。然而,无论采用何种气化反应装置,在制备合成气的过程中仍普遍存在焦油裂解率和碳转化率偏低的现象,得到的合成气 H<sub>2</sub>/CO 也往往不能满足液体燃料的合成要求。因此,研制新型高效的生物质气化反应设备是将来的研究热点之一。

用于气化反应制取合成气的生物质原料有很多种。Asadullah 等人<sup>[6]</sup>利用双流化床反应装置对比了雪松、黄麻、稻草和甘蔗渣 4 种生物质的催化气化反应效果,其中雪松气化得到的合成气中 H<sub>2</sub> 体积分数(35.4%)和 H<sub>2</sub>/CO(1.20)都最高,而黄麻气化的碳转化率(84.0%)最高。加拿大的 Ahmad 等人<sup>[7]</sup>在固定床微型反应器上进行了小麦和玉米的气化反应对比实验,结果表明玉米气化得到的合成气在 H<sub>2</sub> 和 CO 体积分数(11.0% 和 56.5%)、产率(0.42 m<sup>3</sup>/kg)、低位热值(10.65 MJ/m<sup>3</sup>)以及碳转化率(44.2%)等方面都优于小麦。波兰的 Plis 等人<sup>[8]</sup>利用固定床反应器对比了木头和麦壳的气化效果,结果表明用木头得到的产气中 CO 体积分数(15.0% ~ 28.0%)明显高于麦壳(11.0% ~ 16.0%),而 H<sub>2</sub> 体积分数也要比麦壳高出 2% ~ 3%。希腊的 Skoulou 等人<sup>[9]</sup>则在下吸式固定床上进行了橄榄树锯屑和果仁的气化实验,发现在

950℃的条件下,锯屑得到的合成气低位热值(9.41 MJ/m<sup>3</sup>)高于果仁(8.60 MJ/m<sup>3</sup>),而 H<sub>2</sub>/CO(1.52)则低于果仁(1.68)。

国外研究者一直在努力通过改进气化技术提高气化效果及合成气质量。Kantarelis 等人<sup>[10]</sup>将快速热解和固定床气化进行了对比,发现快速热解得到的合成气的 LHV 最高可达 14.80 MJ/m<sup>3</sup>,H<sub>2</sub>/CO 为 0.86;固定床气化合成气的 LHV 只有 11.62 MJ/m<sup>3</sup>,但 H<sub>2</sub>/CO 稍高(0.93)。日本的 Kazuhiro 等人<sup>[11]</sup>研究了木质生物质与煤的共气化,最终得到的合成气中 H<sub>2</sub> 体积分数(41.6%~43.3%)和 H<sub>2</sub>/CO(1.67~2.12)都较高,碳转化率也可达到 98.0%。美国佛罗里达大学的 Mahishi 等人<sup>[12]</sup>在松树皮的气化反应中加入了氧化钙作为 CO<sub>2</sub> 吸附剂,结果表明气化效果得到了很大改善,在 600℃的条件下,与不加氧化钙的相比,合成气产率、氢气产率及碳转化率分别提高了 62%(874.8~1418.1 mL/g)、48.6%(573.0~852.3 mL/g)和 83.5%(30.3%~56.0%)。

在生物质气化制合成气的过程中,会产生焦油等难以直接利用的物质,不仅造成能量的浪费,还会影响系统的正常运行。因此,研究开发能够降低焦油产生量的催化剂,是生物质气化制合成气技术的关键问题之一,也是各国研究的热点。生物质气化除焦油最常用且效果相对较好的催化剂是 Ni 基催化剂。美国国家可再生能源实验室的 Kimberly 等人<sup>[13]</sup>以 90%的  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为载体,负载质量分数分别为 5.0%的 MgO、8.0%的 NiO 和 3.5%的 K<sub>2</sub>O 得到的催化剂具有较好的焦油裂解效果,在 800℃下焦油裂解率可达 90%以上。其中载体  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的粒径在 100~400  $\mu$ m,其抗磨损的能力强,经过 48 h 的连续实验,粒径分布没有明显变化。日本名古屋大学的 Li 等人<sup>[14]</sup>以七铝酸十二钙为载体,通过浸渍法负载六水合硝酸镍制成的 Ni 基催化剂也可用于生物质气化制备富氢合成气。在温度为 650℃,气固比 S/C 为 2.1,时空速率  $w_{\text{cat}}/F_{\text{toluene}}$  为 8.9 kg·h/m<sup>3</sup>的条件下进行焦油裂解,焦油转化率可达 99%以上,H<sub>2</sub> 产率可达 80%,CO 选择性可达 63%。另外,在 400~500℃时使用浸渍法得到的纳米级镍基催化剂,对于提高 H<sub>2</sub> 产率和焦油转化率的效果非常明显<sup>[15]</sup>。Ni 基催化剂的主要问题是失活现象比较严重,其中由于 H<sub>2</sub>S 中毒而使 Ni 的活性位点减少是导致催化剂失活的最主要原因。另外,由于烧结导致 Ni 晶体变大以及炭化现象也可能造成催化

剂的失活<sup>[16]</sup>。Rh 基催化剂也是一种有效的焦油裂解催化剂,Colby 等人<sup>[17]</sup>在气化炉温度为 850℃,压力为 0.1 MPa 的条件下,以  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为载体负载 Rh 可使焦油转化率达到 50%。日本的 Keiichi 等人<sup>[18]</sup>以 SiO<sub>2</sub> 为载体,负载上 Rh 和 CeO<sub>2</sub>(其中 CeO<sub>2</sub> 的质量分数占 35%)用以催化焦油裂解和生物质气化。在温度为 650℃,压力 0.1 MPa,生物质进料量 85 mg/min,空气流量 50 m<sup>3</sup>/min 的条件下,碳转化率 99%以上,可得到 CO 产量为 2 254  $\mu$ mol/min,H<sub>2</sub> 产量为 2 016  $\mu$ mol/min 的合成气。Rh 基催化剂在使用中的最大问题是催化剂的磨损和失活。除了 Ni 基和 Rh 基催化剂外,在生物质气化制合成气中,Ru、Zr、Pt 等重金属对焦油的去除也有一定效果<sup>[19]</sup>,但目前研究较少。不管采用哪种催化剂,在合成气制备过程中普遍存在焦油转化率较低的问题,某些催化剂虽然具有比较理想的焦油转化率,但成本很高,因此研究开发催化效率高且价格低廉的新型焦油裂解催化剂是生物质气化制合成气技术发展过程中一个亟待解决的关键问题。

## 2.2 国内研究进展

我国生物质气化研究起步较晚,目前仍停留在气体生产阶段,生物质燃气主要用于炊事、锅炉供热及发电<sup>[20]</sup>,在生物质气化制合成气进而生产化学品方面的研究和实践很少。

生物质气化制合成气实践方面,中科院广州能源所研制出了规模为 100 t/a 的玉米气化制合成气进而生产二甲醚的生产系统,当玉米进料量为 45~50 kg/h,得到的合成气产率可达 40~45 m<sup>3</sup>/h,产气中 H<sub>2</sub> 体积分数为 32.5%,H<sub>2</sub>/CO 在 1 左右<sup>[21-22]</sup>。中国科技大学生物质洁净能源实验室研制出一套流化床式生物质定向气化装置,最多可处理 50 kg/h 生物质,气化压力最高可达 3 MPa<sup>[23]</sup>。

国内在生物质气化制合成气方面的研究目前多数仍停留在实验室阶段。华中科技大学的李建芬等<sup>[24]</sup>以树叶为原料,利用热裂解装置进行了生物质制合成气的研究。实验得到的合成气的主要成分是 CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 及 CO<sub>2</sub>,其中 CO 和 H<sub>2</sub> 的总体积分数占 56%,合成气的低位热值为 15~20 MJ/m<sup>3</sup>,属于中热值可燃气体,可以直接做民用燃气。

武汉工业学院的杜丽娟等人<sup>[25]</sup>以松木锯屑为原料,使用自制的 Ni 基催化剂,在固定床装置上进行了催化裂解制合成气的实验。结果表明温度的升高和催化剂的加入都有利于焦油的裂解和产气量的升高。在 900℃时气化效果最好,得到的合成气中

CO 和 H<sub>2</sub> 的体积分数达到 85%, 焦油产率仅为 1.8%, 产气量可达 1.56 m<sup>3</sup>/kg。

中科院广州能源所的 Lv 等人<sup>[26]</sup>以松木锯屑为原料进行了生物质气化制合成气的研究。实验装置前端是流化床气化炉,以白云石为催化剂,用于生物质气化;后端是固定床反应器,加入 Ni 基催化剂,用以去除气体中的焦油等杂质。在进料速率为 0.47 kg/h,空气流量 0.65 m<sup>3</sup>/h,水蒸气流量 0.4 kg/h, S/B 为 0.85 的条件下,最终得到的合成气中 H<sub>2</sub> 体积分数最大可达 52.47%, H<sub>2</sub>/CO 的值为 1.87 ~ 4.45。

大连理工大学的 Gao 等人<sup>[27]</sup>利用安装了多孔陶瓷改性装置的连续进料固定床反应器进行了松木锯屑的气化实验。得到的合成气产率为 0.99 ~ 1.69 m<sup>3</sup>/kg,氢气产率为 43.13 ~ 76.37 g/kg,合成气中 H<sub>2</sub>/CO 可达到 1.74 ~ 2.16。与不加多孔陶瓷相比,产气中最大 H<sub>2</sub> 体积分数可提高 45.4%。华中科技大学 Yan 等人<sup>[28]</sup>同样利用多孔陶瓷改性的上吸式固定床反应器进行了富氢合成气的研究,得到的合成气 LHV 为 8.10 ~ 13.40 MJ/m<sup>3</sup>,氢气产率为 45.05 ~ 135.40 g/kg。产气中最大 H<sub>2</sub> 体积分数可达 60.59%,与不用多孔陶瓷改性(43.37%)相比有明显提高。

除了传统的流化床和固定床气化器外,也有研究者利用等离子体反应器<sup>[29]</sup>和高压微反应器<sup>[30]</sup>进行生物质气化制合成气的实验,同样收到了不错的效果。虽然我国在生物质气化制合成气技术方面取得了一定的进展和成果,但尚处于起步阶段,研究工作仍然很少,与国外发达国家相比还存在较大差距。尤其是得到的合成气中 H/C 无法满足合成液体燃料的要求,而且焦油转化率也比较低,很多关键的技术问题还没有解决,因此我国在该领域的研究有待加强。

### 3 存在的问题

国外自 20 世纪 80 年代以来对生物质气化技术进行了大量的实验研究,对不同种类生物质气化的试验设备和工艺流程进行了大量攻关研究,气化工艺和设备已实现商品化,如瑞典的 Bioflow、美国的 BGF、意大利的 EnergyFarm 等都是比较成熟的生物质气化发电工程。但是,生物质气化制合成气的研究大多为实验室研究和小规模中试研究,大型生产工艺和配套设备还有待进一步开发。而且多数的生物质气化制合成气技术与传统技术相比仅有社会、

环境效益,无经济竞争优势,使该技术的工业化生产受到限制。尽管生物质气化制合成气技术研究已经取得了很大进展,但仍有很多问题急需解决,主要体现在以下几个方面:

(1) 生物质气化反应器对各类生物质或混合生物质原料气化试验的通用性不强。

(2) 现有生物质气化技术所得到的产气成分不符合化学品合成技术的要求。产气中 H/C 摩尔比一般较低,达不到甲醇、乙醇等化学品合成的理论比例,而且产气中的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 的含量较高,影响后期的液体燃料的合成,需要进一步开发新的气化技术,以期得到最优的合成气比例,为新型能源的开发提供技术支持。

(3) 生物质气化制合成气过程中会产生大量难以利用的焦油,影响产气的效果及系统的运行,如何尽量减少焦油的产生量,一直是各国研究人员关注的热点问题。虽然开展了不少工作,但效果并不理想,后期研究需要进一步改善气化条件或者开发新型高效的焦油裂解催化剂,最大程度地降低合成气中焦油的含量。

(4) 国内生物质气化及利用研究多限于制备用于供暖锅炉、发电以及居民炊事等的低热值燃气,中热值燃气生产技术仅限于实验室及小规模中试研究,而对于生物质气化制液体燃料合成气技术的研究还很少。

### 4 结论与展望

随着全球化石燃料的逐渐枯竭和温室气体效应的日益严重,开发一种廉价的清洁能源技术显得尤为重要。生物质气化制合成气,进而合成化工制品和液体燃料是一种效率高、低成本、无污染的新型可再生能源生产技术,已成为世界各国研究的热点,也取得了一定的研究成果,是生物质转化利用技术中极具潜力的发展方向,具有十分广阔的应用前景。

但是目前生物质气化制合成气技术在理论和实践上仍存在问题,尤其是国内在这方面的研究工作还很少。因此,尽快开展生物质气化制合成气技术的研究十分必要。若能通过开发一套新的气化技术路线和高效气化反应设备,并且研制出实用高效的催化剂,从而解决上述难题,使该技术最终走向工业化,必将带来巨大的环境和经济效益。

### 参考文献

[1] 马隆龙,吴剑之,孙立. 生物质气化技术及其应用[M]. 北京:化

- 学工业出版社,2003:153-198.
- [2] Karmakar M K, Datta A B. Generation of hydrogen rich gas through fluidized bed gasification of biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2):1907-1913.
- [3] Göransson Kristina, Söderlind Ulf, He Jie, *et al.* Review of syngas production via biomass DFBGs[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1):482-492.
- [4] Xiao Xianbin, Meng Xianliang, Le Duc Dung, *et al.* Two-stage steam gasification of waste biomass in fluidized bed at low temperature: Parametric investigations and performance optimization[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2):1975-1981.
- [5] Ueki Yasuaki, Torigoe Takashi, Ono Hirofumi, *et al.* Gasification characteristics of woody biomass in the packed bed reactor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2):1795-1800.
- [6] Asadullah Mohammad, Miyazawa Tomohisa, Ito Shin-ichi, *et al.* Gasification of different biomasses in a dual-bed gasifier system combined with novel catalysts with high energy efficiency[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2004, 267(1/2):95-102.
- [7] Ahmad Tavasoli, Masoumeh G. Ahangari, Chirayu Soni, *et al.* Production of hydrogen and syngas via gasification of the corn and wheat dry distiller grains (DDGS) in a fixed-bed micro reactor[J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90(4):472-482.
- [8] Plis P, Wilk R K. Theoretical and experimental investigation of biomass gasification process in a fixed bed gasifier[J/OL]. *Energy*, [2011-02-26]. [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V2S-513F00B-5&\\_user=6492722&\\_coverDate=09%2F25%2F2010&\\_alid=1671188731&\\_rdoc=1&\\_fmt=high&\\_orig=search&\\_origin=search&\\_zone=rslt\\_list\\_item&\\_cdi=5710&\\_st=13&\\_docanchor=&view=c&\\_ct=270&\\_acct=C000066187&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=6492722&md5=181b28a2a5dcb552604369dc3176e885&searchtype=a](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V2S-513F00B-5&_user=6492722&_coverDate=09%2F25%2F2010&_alid=1671188731&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_cdi=5710&_st=13&_docanchor=&view=c&_ct=270&_acct=C000066187&_version=1&_urlVersion=0&_userid=6492722&md5=181b28a2a5dcb552604369dc3176e885&searchtype=a).
- [9] Skoulou V, Zabanitou A, Stavropoulos G, *et al.* Syngas production from olive tree cuttings and olive kernels in a downdraft fixed-bed gasifier[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(4):1185-1194.
- [10] Kantarelis E, Zabanitou A. Valorization of cotton stalks by fast pyrolysis and fixed bed air gasification for syngas production as precursor of second generation biofuels and sustainable agriculture[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(2):942-947.
- [11] Kazuhiro Kumabe, Toshiaki Hanaoka, Shinji Fujimoto. Co-gasification of woody biomass and coal with air and steam[J]. *Fuel*, 2007, 86(5/6):684-689.
- [12] Mahishi Madhukar R, Goswami D Y. An experimental study of hydrogen production by gasification of biomass in the presence of a CO<sub>2</sub> sorbent[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(4):2803-2808.
- [13] Kimberly A. Magrini-Bair, Stefan Czernik, Richard French, *et al.* Fluidizable reforming catalyst development for conditioning biomass-derived syngas[J]. *Applied Catalysis*, 2007, 318:199-206.
- [14] Li Chunshan, Hirabayashi Daisuke, Suzuki Kenzi. Development of new nickel based catalyst for biomass tar steam reforming producing H<sub>2</sub>-rich syngas[J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90(6):790-796.
- [15] Johan Richardson, Joël Blin, Ghislaine Volle, *et al.* In situ generation of Ni metal nanoparticles as catalyst for H<sub>2</sub>-rich syngas production from biomass gasification[J]. *Applied Catalysis*, 2010, 382(2):220-230.
- [16] Yung Matthew M, Magrini-Bair Kimberly A, Parent Yves O, *et al.* Demonstration and characterization of Ni/Mg/K/AD90 used for pilot-scale conditioning of biomass-derived syngas[J]. *Springer Science*, 2010, 134:242-249.
- [17] Colby Joshua L, Wang Tao, Schmidt Lanny D. Steam reforming of benzene as a model for biomass-derived syngas tars over Rh-based catalysts[J]. *Energy Fuels*, 2010, 24:1341-1346.
- [18] Keiichi Tomishige, Mohammad Asadullah, Kimio Kunimori. Syngas production by biomass gasification using Rh/CeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> catalysts and fluidized bed reactor[J]. *Catalysis Today*, 2004, 89(4):389-403.
- [19] Polina Yaseneva, Svetlana Pavlova, Vladislav Sadykov, *et al.* Combinatorial approach to the preparation and characterization of catalysts[J]. *Catalysis Today*, 2008, 137(1):23-28.
- [20] 王翠艳,白轩,王永威. 流化床生物质气化试验研究[J]. *农村能源*, 2007, (2):24-26.
- [21] Li Yuping, Wang Tiejun, Yin Xiuli, *et al.* 100 t/a-Scale demonstration of direct dimethyl ether synthesis from corn-cob-derived syngas[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(3):583-587.
- [22] Li Yuping, Wang Tiejun, Yin Xiuli, *et al.* Design and operation of integrated pilot-scale dimethyl ether synthesis system via pyrolysis/gasification of corn-cob[J]. *Fuel*, 2009, 88(11):2181-2187.
- [23] 朱锡锋. 生物质气化制备合成气的研究[J]. *可再生能源*, 2002(6):7-10.
- [24] 李建芬,肖波,江建方,等. 农林生物质热裂解制取合成气的研究[J]. *新能源及工艺*, 2006, (1):19-21.
- [25] 杜丽娟,李建芬,肖波,等. 生物质催化裂解制合成气的研究[J]. *化学工程师*, 2008, 153(6):3-5.
- [26] Lv Pengmei, Yuan Zhenhong, Wu Chuangzhi, *et al.* Bio-syngas production from biomass catalytic gasification[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(4):1132-1139.
- [27] Gao Ningbo, Li Aimin, Quan Cui. A novel reforming method for hydrogen production from biomass steam gasification[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(18):4271-4277.
- [28] Yan Feng, Luo Siyi, Hu Zhiquan, *et al.* Hydrogen-rich gas production by steam gasification of char from biomass fast pyrolysis in a fixed-bed reactor; Influence of temperature and steam on hydrogen yield and syngas composition[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14):5633-5637.
- [29] Tang L, Huang H. Plasma pyrolysis of biomass for production of syngas and carbon adsorbent[J]. *Energy and Fuels*, 2005, 19:1174-1178.
- [30] Yin Xiuli, Leung Dennis Y C, Chang Jie, *et al.* Characteristics of the synthesis of methanol using biomass-derived syngas[J]. *Energy and Fuels*, 2005, 19:305-310. ■