

# 生物质液化技术的研究进展

常 杰

(中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510070)

**摘要:** 生物质液化包括生物化学法生产燃料乙醇和热化学法生产生物油, 热化学法又可分为快速热解液化和加压液化。着重介绍了目前达到工业示范规模的各种快速热解液化工艺, 如旋转锥反应器、携带床反应器、循环流化床反应器、涡旋反应器、真空热解磨反应器等, 以及处于实验室阶段的等离子体液化工艺。指出循环流化床工艺具有很高的加热和传热速率, 且处理量可以达到较高的规模, 是目前利用最多、液体产率最高的工艺。建议加强纤维素生物酶法糖化发酵生产燃料乙醇工艺的开发以及热化学法生物油精制新工艺的开发。

**关键词:** 生物质; 液化; 热解; 燃料

中图分类号: TK6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2003)09-0013-04

## Research progress in liquefaction technologies of biomass

CHANG Jie

(Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** Liquefaction of biomass encompasses biochemical conversion for fuel ethanol and thermochemical conversion for bio-oil, which includes fast pyrolysis and high pressure liquefaction. Various fast pyrolysis processes of biomass for liquid fuel, such as the rotating cone reactor, entrained flow reactor, circulating fluid bed reactor, vortex reactor and vacuum hearth reactor, which are all at the commercial demonstration stage, as well as plasma jet flow reactor which is at the laboratory stage, are emphatically introduced. The features and problems of each process are discussed and compared. Higher velocity of the heating and heat transfer can be obtained in the circulating fluid bed process; also larger amount of treating of feedstock can be easily achieved. The circulating fluid bed process, which can get the highest liquid yield among the above processes, is extensively used in the liquefaction of biomass. Liquefaction of biomass for the liquid fuel is a promising technology in China. It is therefore suggested that the research on and development of such new technology as the simultaneous saccharification and fermentation of cellulose to making ethanol by enzymes as well as the turning of bio-oil into higher quality fuel by thermochemical conversion, should be strengthened.

**Key words:** biomass; liquefaction; pyrolysis; fuel

我国一次能源消费量仅次于美国, 为世界第二大能源消费国, 然而 2000 年进口原油已达 7 000 万 t。液体燃料的不足已严重威胁到我国的能源与经济安全, 为此我国提出了大力开发新能源和可再生能源、优化能源结构的战略发展规划<sup>[1-2]</sup>。生物质是惟一可以转化为液体燃料的可再生能源, 将生物质转化为液体燃料不仅能够弥补化石燃料的不足, 而且有助于保护生态环境。生物质包括各种速生的能源植物、农业废弃物、林业废弃物、水生植物以及各种有机垃圾等。我国生物质资源丰富, 理论年产量为 50 亿 t 左右<sup>[3]</sup>, 发展生物质液化替代化石

燃料有巨大的资源潜力。

生物质能源化技术主要包括气化、直接燃烧发电、固化成型及液化等。目前, 前 3 种技术已经达到比较成熟的商业化阶段, 而生物质的液化还处于研究、开发及示范阶段<sup>[4]</sup>。从产物来分, 生物质液化可分为制取液体燃料(乙醇和生物油等)和制取化学品。由于制取化学品需要较为复杂的产品分离与提纯过程, 技术要求高, 且成本高, 目前国内外还处于实验室研究阶段, 有许多文献对热转化及催化转化精制化学品的反应条件、催化剂、反应机理及精制方法等进行了详细报道<sup>[4-8]</sup>, 笔者将主要介绍生物质

液化制取液体燃料的技术与研究进展。生物质液化工艺又可分为生物化学法和热化学法。生物化学法主要是指采用水解、发酵等手段将生物质转化为燃料乙醇。热化学法主要包括快速热解液化和加压催化液化等。

## 1 生物化学法生产燃料乙醇

生物质生产燃料乙醇的原料主要有剩余粮食、能源作物和农作物秸秆等。利用粮食等淀粉质原料生产乙醇是工艺很成熟的传统技术。用粮食生产燃料乙醇虽然成本高,价格上对石油燃料没有竞争力,但由于近年来我国粮食增收,已囤积了大量陈化粮,我国政府于 2002 年制定了以陈化粮生产燃料乙醇的政策,将燃料乙醇按一定比例加到汽油中作为汽车燃料,已在河南和吉林两省示范。国内外燃料乙醇的应用证明,它能够使发动机处于良好的技术状态,改善不良的排放,有明显的环境效益。然而我国剩余粮食即使按大丰收时的 3 000 万 t 全部转化为乙醇来算,可生产 1 000 万 t 乙醇,也只有 2000 年原油缺口的 1/10;而且随着中国人口的持续增长,粮食很难出现大量剩余。因此,陈化粮是一种不可靠的能源<sup>[2]</sup>。

美国和巴西分别用本国生产的玉米和甘蔗大量生产乙醇作为车用燃料。从 1975 年以来,巴西为摆脱对石油的依赖,开展了世界最大规模的燃料乙醇开发计划,到 1991 年燃料乙醇产量已达 130 亿 L。美国自 1991 年以来,为维持每年 50 亿 L 的玉米制乙醇产量,政府每年要付出 7 亿美元的巨额补贴<sup>[2-3,8]</sup>。为弥补粮食的不足,许多国家开展了甜高粱及木薯制乙醇工艺的研究与开发,比如我国“十五”国家高技术研究发展计划(“863”计划)中标课题“甜高粱制取乙醇”的实施,将建立工业化中试示范工程,为生物质转化液体燃料提供技术支撑<sup>[9]</sup>。

从原料供给及社会经济环境效益来看,用含纤维素较高的农林废弃物生产乙醇是比较理想的工艺路线。生物质制燃料乙醇即把木质纤维素水解制取葡萄糖,然后将葡萄糖发酵生成燃料乙醇的技术。纤维素水解只有在催化剂存在的条件下才能显著地进行。常用的催化剂是无机酸和纤维素酶,由此分别形成了酸水解工艺和酶水解工艺。我国在这方面开展了许多研究工作,比如华东理工大学开展了以稀盐酸和氯化亚铁为催化剂的水解工艺及水解产物葡萄糖与木糖同时发酵的研究,转化率在 70% 以上<sup>[10]</sup>。中国科学院过程工程研究所在国家攻关项

目的支持下,开展了纤维素生物酶分解固态发酵糖化乙醇的研究,为纤维素乙醇技术的开发奠定了基础<sup>[11-12]</sup>。以美国国家可再生能源实验室(NREL)为代表的研究者,近年来也进行了大量的研究工作,如通过转基因技术得到了能发酵五碳糖的酵母菌种,开发了同时糖化与发酵工艺,并建成了几个具有一定规模的中试工厂,但由于关键技术未有突破,生产成本一直居高不下<sup>[13-15]</sup>。纤维素制乙醇技术如果能够取得技术突破,在未来几十年将有很好的发展前景。

## 2 热化学法生产生物油燃料

生物质热化学法液化技术根据其原理主要可分为快速热解液化和加压液化,2 种技术都已有 20 多年的发展历史。

### 2.1 快速热解液化

生物质快速热解液化是在传统裂解基础上发展起来的一种技术,相对于传统裂解,它采用超高加热速率( $10^2 \sim 10^4$  K/s)、超短产物停留时间(0.2 ~ 3 s)及适中的裂解温度,使生物质中的有机高聚物分子在隔绝空气的条件下迅速断裂为短链分子,使焦炭和产物气降到最低限度,从而最大限度获得液体产品。这种液体产品被称为生物油(bio-oil),为棕黑色黏性液体,热值达 20 ~ 22 MJ/kg,可直接作为燃料使用,也可经精制成为化石燃料的替代物。因此,随着化石燃料资源的逐渐减少,生物质快速热解液化的研究在国际上引起了广泛的兴趣。自 1980 年以来,生物质快速热解技术取得了很大进展,成为最有开发潜力的生物质液化技术之一。国际能源署组织了美国、加拿大、芬兰、意大利、瑞典、英国等国家的 10 多个研究小组进行了 10 余年的研发工作,重点对该过程的发展潜力、技术经济可行性以及参与国之间的技术交流进行了调研,认为生物质快速热解技术比其他技术可获得更多的能源和更大的效益<sup>[16]</sup>。

世界各国通过反应器的设计、制造及工艺条件的控制,开发了各种类型的快速热解工艺。几种有代表性的工艺介绍如下<sup>[16-22]</sup>,各装置的规模、液体产率等参数列于表 1,各工艺的示意图参见文献<sup>[16,18,21]</sup>。

(1)荷兰 Twente 大学开发的旋转锥式反应工艺(Twente rotating cone process),不用载气,不仅大大减少了装置体积,而且减轻了冷凝器负荷,液化效率较高。生物质颗粒与惰性热载体一起加入旋转锥底部,在沿锥壁螺旋上升过程中发生快速热解反应,但

其最大的缺点是生产规模小,能耗较高<sup>[16-17]</sup>。我国的沈阳农业大学1995年从荷兰BTG集团引进了1套规模为10 kg/h的装置,以德国松木粉为原料,在600℃、进料速率34.8 kg/h的条件下,液体产率为58.6%<sup>[18]</sup>。

表1 6种快速热解装置典型试验结果比较

装置	Twente	GIT	Ensyn	GIEC	NREL	Laval
规模/kg·h <sup>-1</sup>	10	50	650	5	20	30
颗粒直径/mm	2	0.5	0.2	0.4	5	10
温度/℃	600	500	550	500	625	400
压力	常压	常压	常压	常压	常压	减压
蒸汽停留时间/s	0.5	1.0	0.4	1.5	1.0	3.0
液体质量产率/%	70	60	65	63	55	65
含水质量分数/%	25	29	16	20	15	18
高位热值/MJ·kg <sup>-1</sup>	17	24	19	22	20	21

(2)美国Georgia工学院(GIT)开发的携带床反应器(entrained flow reactor),以丙烷和空气按照化学计量比引入反应管下部的燃烧区,高温燃烧气将生物质快速加热分解,当进料量为15 kg/h,反应温度745℃时,可得到58%的液体产物,但需要大量高温燃烧气并产生大量低热值的不凝气是该装置的缺点,这一缺点限制了其使用<sup>[19-20]</sup>。

(3)加拿大Ensyn工程师协会开发研制的循环流化床工艺(circulating fluid bed reactor)在意大利的Bastardo建成了650 kg/h规模的示范装置,在反应温度550℃时,以杨木粉作为原料可产生65%的液体产品。该装置的优点是设备小巧,气相停留时间短,防止热解蒸汽的二次裂解,从而获得较高的液体产率。但其主要缺点是需要载气对设备内的热载体及生物质进行流化。Ensyn也在芬兰安装了20 kg/h的小规模装置<sup>[21-22]</sup>。加拿大的Waterloo大学开发了近似的闪速热解工艺(WFPP),装置规模为5~250 kg/h,液体产率可达75%<sup>[16,22]</sup>。我国的中国科学院广州能源研究所(GIEC)也自主研发了生物质循环流化床液化小型装置,以石英砂作为循环介质,木粉进料速率为5 kg/h,反应温度500℃左右,可获得63%的液体产率<sup>[23]</sup>。

(4)美国国家可再生能源实验室(NREL)开发了涡旋反应器(vortex reactor),反应管长0.7 m,管径0.13 m,生物质颗粒由氮气加速到1 200 m/s,由切线进入反应管,在管壁产生一层生物油并被迅速蒸发。目前建成的最大规模的装置为20 kg/h,在管壁温度

625℃时,液体产率可达55%<sup>[18,24]</sup>。

(5)与其他几种常压操作的反应器不同,加拿大Laval大学开发的多层真空热解磨反应器(multiple hearth reactor)则是在1 kPa的负压下操作的,反应原料由顶部加入,床顶层温度为200℃,底层温度400℃,由于热解蒸汽停留时间很短,大大减少了二次裂解,当木屑加入量为30 kg/h时,液体产率为65%。其缺点是需要大功率的真空泵,价格高、能耗大,放大困难<sup>[18,20,25]</sup>。

总之,在上述生物质快速裂解技术中,使用循环流化床工艺的最多,而且评价也很高。该工艺具有很高的加热和传热速率,且处理规模较高,目前来看,该工艺获得的液体产率最高。热等离子体快速热解液化是最近出现的生物质液化新方法,它采用热等离子体加热生物质颗粒,使其快速升温,然后迅速分离、冷凝,得到液体产物,我国的山东工程学院开展了这方面的试验研究<sup>[26]</sup>。

虽然欧美等发达国家在生物质快速裂解的工业化方面研究较多,但生物质快速热解液化理论研究始终严重滞后,在很大程度上制约了该技术的提高与发展。在生物质热解机理研究方面,目前国内对其主要组分——纤维素的热解模型已进行了较深入的研究,并取得许多研究成果<sup>[27-30]</sup>。但对其他主要组分——半纤维素和木质素的热解模型的研究还十分欠缺,对其过程机理还缺乏深入的认识,现有的各种简化热解动力学模型还远未能全面描述热解过程中各种产物的生成,离指导工程实际应用还有相当的距离。这是由于生物质本身的组成、结构和性质非常复杂,而生物质的快速热解更是一个异常复杂的反应过程,涉及许多的物理与化学过程及其相互影响。因此,建立一个比较完善和合理的物理、数学模型来定性、定量地描述生物质的快速热解过程,将是未来热解液化机理研究的主要目标。

## 2.2 加压液化

生物质加压液化是在较高压力下的热转化过程,温度一般低于快速热解。该法始于20世纪60年代,当时美国的Appell等人将木片、木屑放入Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液中,用CO加压至28 MPa,使原料在350℃下反应,结果得到40%~50%的液体产物,这就是著名的PERC法<sup>[4]</sup>。近年来,人们不断尝试采用H<sub>2</sub>加压,使用溶剂(如四氢萘、醇、酮等)及催化剂(如Co-Mo、Ni-Mo系加氢催化剂)等手段,使液体产率大幅度提高,甚至可以达到80%以上,液体产物的高位热值可达25~30 MJ/kg,明显高于快速热解

液化(见表 1)。我国的华东理工大学在这方面做了不少研究工作,取得了一定的研究成果<sup>[10,31-32]</sup>。超临界液化是利用超临界流体良好的渗透能力、溶解能力和传递特性而进行的生物质液化,最近欧美等国正积极开展这方面的研究工作<sup>[33]</sup>。与快速热解液化相比,目前加压液化还处于实验室阶段,但其反应条件相对温和,对设备要求不很苛刻,因而在规模化开发上有很大潜力。

### 2.3 生物质液化产物的性质及应用

生物质液化有气、液、固 3 种产物,气体主要由 H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 及 C<sub>2-4</sub> 烃组成,可作为燃料气;固体主要是焦炭,可作为固体燃料使用;作为主要产品的液体产物被称为生物油,有较强的酸性,组成复杂,以碳、氢、氧元素为主,成分多达几百种<sup>[34]</sup>。从组成上看,生物油是水、焦及含氧有机化合物等组成的一种不稳定混合物,包括有机酸、醛、酯、缩醛、半缩醛、醇、烯烃、芳烃、酚类、蛋白质、含硫化合物等,实际上,生物油的构成是裂解原料、裂解技术、除焦系统、冷凝系统和储存条件等因素的复杂函数<sup>[35]</sup>。

生物质转化为液体后,能量密度大大提高,可直接作为燃料用于内燃机,热效率是直接燃烧的 4 倍以上。但是,由于生物油含氧量高(质量分数约 35%),因而稳定性比化石燃料差,而且腐蚀性较强,因而限制了其作为燃料使用。虽然通过加氢精制可以除去 O,并调整 C、H 比例,得到汽油及柴油,但此过程将产生大量水,而且因裂解油成分复杂,杂质含量高,容易造成催化剂失活,成本较高,因而降低了生物质裂解油与化石燃料的竞争力。这也是长期以来没有很好解决的技术难题。生物油提取高价化学品的研究虽然也有报道,但也因技术成本较高而缺乏竞争力<sup>[7]</sup>。

### 3 结论与建议

随着化石燃料资源的逐渐减少,生物质液化的研究在国际上引起了广泛的兴趣。经过近 30 年的研究与开发,车用燃料乙醇的生产已实现产业化,快速热解液化已达到工业示范阶段,加压液化还处于实验室研究阶段。我国生物质资源丰富,每年可利用的资源量达 50 亿 t,仅农作物秸秆就有 7 亿 t,但目前大部分作为废弃物没有合理利用,造成资源浪费和环境污染。如果将其中的 50% 采用生物质液化技术转化为燃料乙醇和生物油,可以得到相当于 5 亿~10 亿 t 油的液体燃料,能够基本满足我国的

能源需求。因此,发展生物质液化技术在我国有着广阔的前景。

对采用纤维素生物酶法的同时糖化与发酵工艺的关键问题进行攻关,是今后用生物质生产燃料乙醇的发展方向,一旦取得技术经济突破,将会带来生物质燃料乙醇的大发展。

我国在生物质快速热解液化及加压液化方面的研究工作还很少,与国际先进水平有较大差距,需要加强此项研究,特别是反应机理及其数学模型的研究。开发生物油精制与品位提升新工艺以及降低生产成本,是生物质热化学法液化进一步发展及提高与化石燃料竞争力的关键。

### 参考文献

- [1] 阎长乐. 中国能源发展报告 2001[M]. 北京:中国计量出版社, 2001. 15-35.
- [2] 倪维斗, 靳晖, 李政. [J]. 科技导报, 2001, (12): 9-12.
- [3] 袁振宏, 李学风, 蔺国芬. 我国生物质能技术产业化基础的研究 [A]. 吴剑之, 袁振宏. 2002 中国生物质能技术研讨会论文集 [C]. 南京: 太阳能学会生物质能专业委员会, 2002. 1-18.
- [4] 何方, 王华, 金会心. [J]. 能源工程, 1999, (5): 14-17.
- [5] 李文. [J]. 新能源, 1997, 19(10): 22-28.
- [6] Kloprise B, Hodek W, Bandermann F. [J]. Fuel, 1990, 69(4): 448-455.
- [7] Amen-Chen C, Parkdel H, Roy C. [J]. Bioresource Technology, 2001, 79(3): 277-299.
- [8] Chornet E, Overend R P. Biomass liquefaction: an overview [A]. In: Overend R P. Fundamentals of thermochemical biomass conversion [M]. Essex: Elsevier, 1985. 967-1002.
- [9] 王孟杰. 绿色油田——生物能燃料乙醇商业化前景 [A]. 吴剑之, 袁振宏. 2002 中国生物质能技术研讨会论文集 [C]. 南京: 太阳能学会生物质能专业委员会, 2002. 24-29.
- [10] 颜涌捷. [J]. 太阳能学报, 1999, 20(1): 55-58.
- [11] 陈洪章, 李佐虎. [J]. 大自然探讨, 1999, 18(4): 51-55.
- [12] 陈洪章, 李佐虎. [J]. 无锡轻工业大学学报, 1999, 18(5): 78-81.
- [13] Cook J, Beyea J. [J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 18(6): 441-455.
- [14] McKendry P. [J]. Bioresource Technology, 2002, 83(1): 47-54.
- [15] Mielenz J R. [J]. Renewable Energy, 1997, 10(2-3): 279-284.
- [16] 郭艳, 王焱, 魏飞, 等. [J]. 化工进展, 2001, 20(8): 13-17.
- [17] 吴剑之, 阴秀丽. [J]. 新能源, 1999, 21(3): 30-35.
- [18] 徐保江, 李美玲, 曾忠. [J]. 环境过程工程, 1999, 17(5): 71-74.
- [19] 何芳, 易维明, 柏雪源. [J]. 山东工程学院学报, 1999, 13(3): 61-64.
- [20] Hayes R D. Biomass pyrolysis technology and products: A Canadian viewpoint [A]. In: Soltes E J, Milne T A. ACS symposium series 376 (Pyrolysis oils from biomass: producing, analyzing and upgrading) [M]. Washington D C: American Chemical Society, 1988. 8-15.

术研究取得了长足进展<sup>[2-4]</sup>。

太阳能制氢是一条理想制氢途径。太阳每年辐射的能量可达  $5.7 \times 10^{24}$  J, 相当于人类每年消耗总能量的 1 万多倍, 是一种丰富的可再生能源, 但太阳能到达地表的能量密度低, 仅有  $1 \text{ kW/m}^2$ , 且存在间歇性, 因而低密度太阳能的收集便成为限制太阳能利用的第一瓶颈。而光合生物却能克服这一障碍, 因为它们对光能的累积是伴随其生长而自发进行。与光伏电池等太阳能收集器相比, 设备简单, 成本低, 技术简单易行。绿藻和蓝细菌可光裂解水产氢, 但光产氢过程伴随有  $\text{O}_2$  的释放, 所以工艺中必须解决产物  $\text{H}_2$  和  $\text{O}_2$  的分离以及氢酶对  $\text{O}_2$  的敏感性问题。光合细菌只含有光合色素系统 I, 电子供体或氢供体是有机物或还原态硫化物, 因此光合作用不产生  $\text{O}_2$ , 故工艺简单。最引人注目之处是它可利用太阳能, 降解转化有机物或有机污染物生产氢能, 且副产物可进一步开发为诸如生物可降解塑料等高值化产品<sup>[5]</sup>, 不会造成二次污染, 被认为是 21 世纪最具潜在竞争力的氢能生产技术之一。

## 1 光合放氢和黑暗产氢机制

1949 年 Gest 在“Science”上首次报道光合细菌在光照厌氧条件下可产生分子氢<sup>[6]</sup>之后, 大量的生理生化研究揭示出: 分子氢是光裂解有机酸所致, 是与光合磷酸化偶联的固氮酶的放氢作用。固氮放氢必须提供三磷酸腺苷(ATP)和细胞还原力(cell reducing equivalents)。因 ATP 来自光合磷酸化, 故固氮放氢所需要的能量来源不受限制, 这也是光合细

菌比厌氧细菌产氢效率高的主要原因。产氢所需要的还原力来自有机物的氧化代谢, 最终由细胞内还原性铁氧还蛋白(reduced ferredoxin, Fdred)水平所决定, 所以光合放氢活性的高低与 Fdred 水平有直接关系<sup>[7-9]</sup>。产氢过程看似简单, 但它涉及光合、固氮和有机物碳代谢等过程。目前我们只知道其功能上的大体衔接, 而对其每一反应步骤和结构与功能的关系还知之甚少。

1988 年, 德国 J. Deisenhofer、H. Michel 和 R. Huber 用 X 射线晶体衍射法测定了光合细菌 *Rhodospseudomonas viridis* 光反应中心组成。近年来超快速时间分辨光谱技术的渗入, 使光合细菌原初反应的微观动力学研究取得了很大进展<sup>[10]</sup>。这里以球形红杆菌(*Rhodobacter sphaeroides*)为模型, 着重介绍近年来光合细菌原初反应新研究成果以及与之有关的光合固氮产氢过程。

光合细菌光合机构的核心是色素蛋白复合体, 它包括捕光色素蛋白复合体(LH I 和 LH II)以及反应中心蛋白复合体(RC)。LH I 和 LH II 主要进行光能的吸收和传递, 而 RC 是光能转化的最重要反应场所, 它包括直接参与电荷分离和电子传递的组分, 均位于光合内膜上, 是由固定在 RC 多肽上的 2 个细菌叶绿素 a 双分子( $\text{P}_{870}$ , 原初电子供体)、2 个辅助细菌叶绿素 a 分子(ABchl)、2 个细菌脱镁叶绿素 a 分子(Bphe, 原初电子受体)、初级醌电子受体  $\text{Q}_A$ 、次级醌电子受体  $\text{Q}_B$  和 1 个非血红素铁分子组成, 这些组分左右对称排列成 2 条电子传递链, 具有准  $\text{C}_2$  对称性结构, 但只有一支具有光化学活性。

(上接第 16 页)

- [21] Meier D, Faix O. [J]. *Bioresource Technology*, 1999, 68: 71 - 77.
- [22] Graham R G, Freel B A. Rapid thermal processing (RTP): Biomass fast pyrolysis overview [A]. In: Hogan E, Robert J, Grassi G, et al. *Biomass processing* [M]. Newbury, UK: CPI Press, 1992. 52 - 63.
- [23] 戴先文, 吴创之, 周肇秋, 等. [J]. *太阳能学报*, 2001, 22(2): 124 - 130.
- [24] Diebold J P, Scahill J W. Improvements in the vortex reactor design [A]. In: Bridgwater A V, Boocock D G B. *Developments in thermochemical biomass conversion* [M]. Glasgow: Blackie Academic and Professional (vol. 1/2), 1997. 242 - 252.
- [25] Roy C, Lemieux R, de Caumia B, et al. Processing of wood chips in a semi-continuous multiple hearth vacuum pyrolysis reactor [A]. In: Soltes E J, Milne T A. *ACS symposium series 376 (Pyrolysis oils from biomass: producing, analyzing and upgrading)* [C]. Washington D C: American Chemical Society, 1988. 16 - 30.
- [26] 易维明, 柏雪源, 何方, 等. [J]. *山东工程学院学报*, 2000, 14(1): 9 - 12.
- [27] Demirbas A. [J]. *Energy Conversion & Management*, 2000, 41(6): 633 - 646.
- [28] Orfão J J M, Antunes F J A, Figueiredo J L, et al. [J]. *Fuel*, 1999, 78(3): 349 - 358.
- [29] 刘乃安, 范维澄, 林其钊, 等. [J]. *科学通报*, 2001, 46(10): 876 - 880.
- [30] 孔晓英, 武书彬, 唐爱民, 等. [J]. *造纸科学与技术*, 2001, 20(5): 22 - 26.
- [31] 颜涌捷, 任铮伟, 白鲁刚, 等. [J]. *华北电力大学学报*, 2000, 27(增刊): 51 - 55.
- [32] 颜涌捷, 任铮伟. [J]. *太阳能学报*, 1999, 18(特刊): 177.
- [33] Demirbas A. [J]. *Energy Conversion & Management*, 1998, 39(7): 685 - 690.
- [34] Raveendran K, Ganesh A, Khilar K C. [J]. *Fuel*, 1996, 75(8): 987 - 998.
- [35] Diebold J P. A review of the toxicity of biomass pyrolysis liquids formed at low temperature [A]. In: Bridgwater A V, Czernik S, Diebold J P, et al. *Fast pyrolysis of biomass: a handbook* [M]. Newbury, UK: CPI Press, 1999. 135 - 144. ■