

生物质快速热裂解液化基础研究进展

何文昌，王文亮，冶敏，张瀚文，任学勇，常建民

(北京林业大学材料科学与技术学院，北京100083)

摘要：综述了生物质快速热裂解液化基础研究进展，介绍了生物质热解的基础理论模型，总结了生物质快速热解机理的研究现状，重点从反应条件和物料特性两方面分析了生物质快速热解产物产率的影响因素并对其研究状况进行了总结；较为系统地综述了三种生物质快速热解产物的应用研究进展。最后，从反应器研发、机理研究、影响因素分析及产物利用等四个方面提出了快速热解基础研究的发展方向。

生物质快速热裂解液化是热化学转化技术中工业化应用前景良好、发展潜力很大的高新技术，它是指在无氧、中等反应温度、高升温速率和极短气相停留时间的条件下将生物质经快速加热分解、气固分离、冷凝等工序后生成生物油、炭和清洁燃气的技术。其中，生物油的产率高者可达60%以上，该技术能以连续的工艺和工厂化的生产方式将以木屑等废弃物为主的生物质转化为易储存、易运输、能量密度高的生物油液体燃料。该技术具有对生物质原料要求较低、反应速率快、产物百分之百转化利用等优点，因此自20世纪70年代后期至今，国内外的众多研究机构针对该技术的机理、设备和工艺做了许多研究工作。这些研究是进行进一步工业化应用的基础和关键。

1 生物质快速热解机理研究进展

为了更好地利用这一技术，有必要对其机理进行更加深入的研究。生物质热解过程十分复杂，伴随着一系列的化学和物理变化，包括分子键的断裂、分子异构化和小分子聚合等化学反应，同时还包括热量传递和质量传递等。生物质快速热解机理的研究就是去探索生物质在快速热解过程中的这些物理、化学变化过程的实质。因此，掌握生物质热解反应机理及有关反应动力学参数，将有助于对林木生物质热化学转换技术的理解，并为热解设备的设计、运行提供依据。

1.1 生物质热解基础理论模型

生物质组成成分主要包括纤维素、半纤维素、木质素、抽提物和灰分。其中，除了灰分外，其余四种组成物在加热过程中都可以发生热分解反应。因此，从组成成分的角度，研究者提出了两种生物质热解基础理论模型的构建型式：单组分反应模型和多组分反应模型。单组分反应模型是假设生物质颗粒为单一而均匀的物质，将其视作一个整体考虑，这种模型用单一组分的反应动力学来描述样品整体的热解反应失重过程；多组分反应模型是将生物质各种组分各自的热解动力学进行叠加。

在单组分模型的研究方面，比较典型的是R.S. Miller和J.Bellan的研究^[1-2]

，他们提出了既包含物质成分又涉及升温速率的平行竞争型热解动力学模型——后来发展为Miller模型，对生物质快速热解机理研究做出了较大的贡献。

目前，大部分研究工作都是采用多组分反应模型，即认为生物质中纤维素、半纤维素、木质素、萃取物是独立进行热分解的，而把整个生物质的热解看

成是各独立反应的线性叠加。J.J.M.Orfao等^[3]

对木质纤维素类生物质热解特性进行了热分析，提出了此类物质的三种主要成分（木质素、纤维素、半纤维素）的三个独立反应动力学模型，其中每个独立的反应方程都是一级Arrhenius反应，他们还介绍了模型中各参数的计算方法。这种模型也越来越广泛地被学者们接受。在以上基础理论模型的基础上，研究者又发展了三种模型来研究热解的机理：分别是一步总体模型；一步多反应模型；两步半总体模型^[4]。

1.2 生物质快速热解机理研究最新进展

对于生物质快速热解机理的研究，国内外的研究者主要从机理研究的反应器和对产物成分的适时准确分析上入手，力求在反应器中达到生物质快速热解的实际反应条件。为此，各研究机构和研究者开发或利用了诸如网屏反应器、层流炉、辐射加热反应器、热丝裂解器、二级管式炉、恒温沉降炉、居里点裂解仪等小型装置来研究生物质快速热解机理。在检测手段上，开始综合利用热分析、气相色谱、质谱、红外光谱等分析手段来研究气体成分分析出规律。通过各种生物质原料的快速热解实验，研究者建立了热解模型和动力学方程并逐渐深入探究了生物质快速热解的反应机理，

提出了以三竞争反应模型和二次反应模型为基础的各种反应模型。比较典型的研究如下：

Stubington.J.F.和Aiman.S. [5]

(1994) 利用网屏反应器对甘蔗渣在高升温速率 (200 ~ 10000 /s) 下的热解动力学进行了研究。实验表明, 网屏反应器作为热解的反应装置具有加热速率可以准确估计、反应生成的挥发成份可以及时移走、有效减少二次反应的发生等优点。

DiBlasi.Colomba和Branca.Carmen等 [6]

(2001) 利用一种辐射加热反应器进行了多种木材 (包括红杉、冷杉等) 在快速辐射加热下的热解实验, 并研究了其反应动力学特性。结果表明, 辐射加热反应器在反应过程中可以实时记录样品质量的变化, 并可以较好地用来研究单个生物质颗粒的热解情况。

王益群、阎立峰、朱清时 [7]

(2008) 将计算流体动力学 (CFD) 数值模拟仿真技术应用到了生物质快速热解制生物质油的研究中, 构建出生物质在流化床中快速热解液化的三维动力学模型, 再现了稻壳热解制生物质油的过程。作者指出, 通过热重分析测量出精确的动力学数据对于模型预测的准确性有决定性的意义。

吴少华、栾积毅等 [8]

(2009) 利用恒温沉降炉对秸秆、稻壳、木屑及一种烟煤粉在900、1000、1100三个温度下进行了快速热解试验, 对4种原料在快速热解过程中气相成分分析出的规律进行了研究。实验发现, 快速热解析出的气相成分产量及组分分布与燃料种类、热解温度、热解停留时间相关。

吴逸民, 赵增立 [9]等

(2010) 利用裂解气质联用仪对生物质进行逐级热解实验, 结果表明, 生物质的化学组成与热解温度区间对热解液体产物都有重要影响。生物质主要化学组分在不同温度区间热解得到不同液体产物, 对其进行选择性热解, 能够有效实现生物质资源的综合利用。

另外, 近年来, 中国林科院的蒋剑春等采用居里点裂解仪研究了纤维素、竹材、杨木屑等的快速热解动力学特性, 提供了一些机理研究的思路。

2 生物质快速热解产物产率影响因素的研究

2.1 反应条件的影响

2.1.1 热解温度的影响

热解温度对热解产物的产率有显著的影响。不同生物质快速热解产油率最高时的温度不同, 一般在500 ~ 600 之间。热解温度影响生物油产率的主要原因是: 热解温度过高时, 快速热解产物中气相的生物油部分在高温下继续裂解成小分子并生成不可冷凝燃气、焦炭, 而使生物油产率降低; 相反, 热解温度太低时, 快速热解过程中气相产物的产量降低, 焦炭产量增加, 也使生物油产率降低。

2.1.2 升温速率的影响

升温速率对热解产物的分布有一定的影响。升温速率低, 生物质颗粒内部温度不能很快达到预定的热解温度, 使其在低温段停留时间长, 使焦炭增多; 提高升温速率使得生物质颗粒内部迅速达到预定的热解温度, 缩短了低温阶段的停留时间, 从而降低了焦炭生成几率, 增加了生物油的产率, 这也是在快速热解制取生物油技术中要快速升温的原因。要使生物油产率高, 升温速率一般为103 ~ 105K/s。但是升温速率不如热解温度对热解产物产率的影响大。任强强、赵长遂^[10] (2008) 利用稻壳等为实验材料, 利用TG-FTIR联用分析, 对升温速率对生物质热解的影响做了探究。结果表明: 生物质热解时, 随着升温速率的提高, 样品热解的TG曲线向低温区偏移, DTG曲线峰值位置也相应地移向低温区。CO₂、CO、H₂O、CH₄及有机物是生物质热解的主要气体产物, 而随着升温速率提高, 这些气体产物析出量增加, 释放的速率加快。

2.1.3 载气流量的影响

载气流量能在一定程度上影响生物质快速热解产物产率, 因为其对产物的气相滞留时间产生了影响。赵建辉、龙恩

深等人^[11]

(2006) 探究了不同载气流量下生物质热解的产油率, 结果表明: 载气流量越大, 载气流速越高, 颗粒在反应器内滞留时间越短, 相应的生物油产率越高; 在热解温度与滞留时间能够保证完全热解的条件下, 较高的载气流量能缩短颗粒在反应器内的滞留时间, 降低了颗粒发生二次热解的程度, 有利于提高生物油产率。

2.1.4 压力的影响

压力通过气相滞留时间影响生物油的产率。在较高的压力下, 气相滞留时间长, 同时压力的升高降低了气相产物从

2、 CH_4 和 C_2H_2

等) 产量大大增加。而在低压下, 气相产物可以迅速地颗粒表面和内部离开, 从而限制了气相产物分子进一步断裂, 增加了生物油的产率。

2.1.5 气相滞留时间的影响

气相滞留时间是指生物质热解产物中气相产物在热解反应器中的停留时间。在颗粒内部热解成的气相产物从颗粒内部移动到外部会受到颗粒空隙率和气相产物动力黏度的影响。当气相产物离开颗粒后, 其中的生物油和其他不可凝成分还将发生进一步断裂, 所以为了获得最大生物油产率, 在快速热解过程中产生的气相产物应迅速离开反应器以减少生物油分子进一步断裂的时间。气相滞留时间是获得最大生物油产率的一个关键参数。在获得最大生物油产率的热解温度下, 反应装置不同, 生物质种类不同, 最高生物油产率的气相滞留时间也不同, 一般在0.5~2s。

2.1.6 催化剂的影响

催化剂能够降低生物质快速热解温度, 选择合理的催化剂有利于提高生物油的产率。这主要是由于催化剂能够通过与生物质分子络合降低生物质的热解活化能, 从而降低生物质的快速热解温度, 这样就增加了生物质分子快速热解过程中的断裂部位, 减少了焦炭形成的几率, 提高了气相产物的产量, 从而提高了生物油的产率。

催化剂种类繁多, 如碱金属盐、镍基盐、白云石、石灰石等, 目前还开发出不少新型的催化剂, 如HZSM-5分子筛、REY型分子筛、HUSY催化剂等。

2.1.7 冷凝条件的影响

冷凝条件对生物油产率有一定影响。龙恩深、周杰、陈金华^[12]

(2009) 以锯末粉、谷壳等几种生物质为原料, 研究了不同冷凝条件对热解液化率的影响。实验时冷凝器有两种运行条件: 在基准实验中, 充分开启冷却水, 得到热解液化率为46.7%; 在对比实验中完全关闭冷却水阀, 得到热解液化率为38.9%。从对比实验可以看出, 冷凝器的运行状态对生物质的最终热解液化率有较为重要的影响。

2.2 物料特性的影响

2.2.1 物料种类的影响

生物质主要成分有纤维素、半纤维和木质素。生物质种类不同, 这三种成分含量不同, 热解产物的分布也不同。三种主要成分中纤维素含量最高, 所以生物质快速热解产物产量及分布在一定程度上取决于原料中纤维素快速热解的产物产量及分布。半纤维素和纤维素主要产生挥发性物质, 而木质素主要分解为炭, 同时木质素较纤维素和半纤维素更难分解, 因而通常含木质素多者焦炭产量较大。

2.2.2 粒径大小的影响

生物质粒径的大小是影响升温速率的决定性因素, 因而也是影响生物质快速热解产物产率的因素之一。研究人员认为, 粒径1mm以下时, 快速热解过程仅受本征动力学速率控制, 而当粒径大于1mm时, 快速热解过程还同时受传热和传质过程控制, 且此时粒径成为热传递的限制因素。另外, 粒径还对热解油的含水率产生一定的影响^[13]。Jun Shen、Manuel

Garcia-Perez等^[14]

(2009)研究了在500 的流化床上,以澳大利亚mallee木质生物质为原料(粒径范围为0.18~5.16mm),生物质粒径对生物油的产率和组成的影响。结果表明,在0.3~1.5mm粒径范围内,生物油的产率随着粒径的增加而减少。但是当粒径大于1.5mm时,生物油的产率没有变化。

2.2.3含水率的影响

含水率作为外部因素,影响热量在材料中的传递。浙江大学能源利用与环境工程教育部重点实验室的研究人员^[15](2005)利用不同含水率的桦木(5%、15%、30%、45%)为原料,对在热解过程中水分对木材的影响过程做了数学模拟实验。结果表明,大约在600K时,木材开始热解,不同含水率对木材热解速率产生不同程度的影响。含水率低的木材表面升温速率基本不变,含水率较高的木材热解速率较低。高含水率的生物质颗粒在流化床流化过程中易出现沟流、节涌现象,导致床层热解不均匀而降低生物油产率。原料的水分含量还影响生物油中的水分含量。

3生物质快速热解产物应用研究进展

生物质快速热解产物包括生物油、炭和清洁燃气(不可冷凝气体)。针对三种产物的不同特性,国内外众多学者进行了大量的研究和探索。

3.1生物油的分析

生物油的组分非常复杂,所含有的有机物有数百种之多,到目前為止并未得到很好的准确鉴定。OasmaaA等人^[16](2010)通过萃取或柱色谱分离等方法将生物油的化学组成进行了分类。他们将生物油的成分分为可溶于水和不可溶于水两类;如果从形态上分,又将其分为上层和下层(上层16wt%,下层84wt%)。上层的密度、酸度较低,粘度较高;下层的灰分、水分含量较高。显微分析显示,生物油是一个多相复合胶体系统。

3.1.1生物油制备液体燃料

精制是生物油制备液体燃料的必备和重要工序。生物油较差的燃料特性主要体现为水分、固体颗粒和氧含量高、热值低、黏度大、安定性差、不能和石油燃料互溶等。因此对生物油的精制是一个重要课题。

早期的研究中,较有代表性的是BridgwaterAV等人^[17]

(1996)采用沸石类催化剂(主要是HZSM-5)对生物油进行催化裂解,即在催化剂的作用下将生物油进一步裂解成较小的分子。生物油经过催化裂解后可以得到烃类产物,降低了氧含量,但同时也存在很多问题。

催化加氢也是一种生物油精制方法,即在高压(7~20MPa)和有氢气或存在供氢溶剂的条件下,对生物油进行加氢处理,其中的氧元素以水的形式脱除。芬兰VTT和BTG合作研究了^[18]

(2010)催化加氢后生物油的性质。他们通过GC/MS,CE,NMR等分析手段,用Ru/C为催化剂,分析了不同加氢处理水平下三种样品的生物油成分,认为催化加氢处理对生物油的改性具有一定的效果。

催化裂解和催化加氢是两种最为重要的生物油精制方法。除以上两种主要方法外,还有高温热解气过滤、添加助剂、催化酯化生物油、生物油与柴油乳化等精制手段。梁伟,王铁军等人^[19]

(2009)使用生物油水相溶液与0#柴油乳化,筛选了四种常用乳化剂和一种助乳化剂进行复配乳化实验,考察了复配乳化剂型号、乳化剂用量、超声作用时间对乳化效果的影响,并探讨了乳化机理。结果表明,超声乳化作用比静置作用具有更大的熵增,乳液更趋于稳定平衡状态。

3.1.2 生物油的化工利用——生物油胶黏剂

富含木素和单宁的植物原料快速热解得到的生物油，其主要成分是酚类物质。快速热解生物油胶黏剂是以生物油和苯酚为原料，用于PF树脂胶的合成。

国外在20世纪80年代末期就开展了相关的研究工作。美国可再生能源实验室用锯末、树皮和其他生物质材料研制出“类苯酚”油状物，从中提取的酚类物质可代替大约50%的苯酚用于PF树脂胶的制备。

SukhbaatarB等人 [20]

(2009) 仅用水和甲醇从快速热解生物油中提取出热解木素成分，并以30%，40%，50%的替代比例分别替代苯酚制备PF树脂，将其用于OSB的胶合。实验表明，仅用水和甲醇提取与目前的方法相比成本较低；热解木素替代率为40%时，得到的木材PF胶黏剂性能最好。

国内，北京林业大学常建民等人 [21]

(2009) 开展了落叶松树皮生物油改性酚醛树脂胶粘剂的研究。对生物油改性PF在固化反应过程中的热行为的研究表明，生物油改性PF和普通PF的固化反应模式基本相同；与普通PF相比，生物油改性PF具有相对较低的平均活化能（即固化能耗相对较低）。

3.1.3 其它生物油改性方法

徐俊明、蒋剑春等人 [22]

(2009) 以生物油和乙醇为原料，在固体酸催化作用下，首次采用氧化预处理和反应精馏的方法对生物质油进行了催化改性。研究表明，改性油与原料油相比各方面性能都有较大的提升，经GC和FTIR分析，改性油中的轻油和重油成分都具有较高的储存稳定性。

杨续来、Charles、朱锡锋 [23]

(2010) 选取

生物油中含量较高的愈创木

酚、儿茶酚和苯酚为酚类模型化合物，以蒙脱土K-10负

载的 $C_{32.5}H_{10.5}PW_{12}O_{40}$

为固体超强酸催化剂，苯酚/1-辛烯烷基化反应为探针，考察了催化剂负载量、反应温度及物料摩尔比等因素对酚类烷基化反应的影响。结果表明，升高温度有利于烷基化改性反应的进行，但产物中氧烷基化产物的选择性随着温度升高而降低。

3.2 热解炭的应用研究

生物质快速热解炭用于制备活性炭是目前的一个重要的应用方向。由于活性炭的比表面积大且化学性质稳定，活性炭在环境保护、食

品、医药、化工等领域中的应用越来越广，需求量日益增加。孙锐，栾积毅等人 [24]

(2009) 利用一维恒温沉降炉，对在快速热解条件下获得不同物料和不同热解温度下的热解炭试样进行了比表面积和孔隙结构的研究，得到了热解炭的一些基本表面特征。

对热解炭进行活化的方

法主要有物理活化法、化学活化法和复合活化法等

。Shadkani等人 [25]

(2010) 对热化学转化制得的炭进行活化，结果表明，热解所得炭的形态结构与天然炭相似，所得到的活性炭对溶液中的有机物具有较好的吸附能力，可应用于污水处理等领域。

4 不可冷凝气体的应用研究

生物质快速热解得到的不可冷凝气体，主要包括一氧化碳、甲烷、氢气、二氧化碳、水蒸气等，具有一定的热值，不含硫等有害气体，为清洁燃气。陈冠益等人 [26]

2008) 对二级固定床反应器(第一级是热解反应器，第二级是催化反应器)，以制取富氢燃气为目标，分别采用稻壳、秸秆、锯末为原料，重点考察了固定床催化反应器在不同反应条件下对产气量、产氢率和焦油含量的影响，发现催化

固定床能够有效降低燃气中焦油的含量。催化剂负载量和燃气空速对产气量和氢气浓度都有影响。

5 生物质快速热解基础研究发展方向

5.1 反应器研究方面

目前世界各国对生物质快速热解反应器的研究做了大量的工作，已经开发出了各种类型的反应器。笔者认为，在今后的反应器研究方面，考虑如何降低能耗，如何实现热解气的循环利用，如何将三种产物（生物油、热解气、炭）合理有效地综合利用等将是富有前景的方向。另外，反应器的微型化也是一个值得考虑的方向。

将快速热解微型反应器与各种分析仪器和手段结合，将有助于快速热解机理的研究。在反应器的工业化应用方面，可以考虑不同的加热方式，比如太阳能加热、激波管加热等。

5.2 机理研究方面

国内外学者在对生物质进行机理研究时逐渐从热分析的方式过渡到在接近生物质快速热解实际过程的反应器中进行热解反应并检测各种产物和进行动力学分析与模型的建立。随着各种更加先进的仪器应用到生物质快速热解机理的研究中，以及随着分析手段从离线到在线测试的进步，生物质快速热解机理的研究将更加贴近生物质快速热解反应的实际过程，检测手段将更加多样和精确。将来生物质快速热解机理的研究将向着真正实现快速热解、对产物在线实时检测和气体成分的多级可控冷凝的方向发展。

5.3 热解产物影响因素研究方面

对生物质快速热解产物产率的影响因素的研究是合理有效利用产物的基础和关键。目前国内外学者对于反应温度、升温速率、载气流量、压力、气相滞留时间、催化剂、冷凝条件、物料种类、物料粒径、物料含水率等方面都进行了大量的研究工作，积累了一些实验室数据。笔者认为，今后对快速热解产物产率的影响因素的研究应该与生产实际结合起来，也就是针对中试或者工业化应用的设备，开展相关的影响因素的研究，对各影响因素应该综合起来考虑，针对不同的目标产物要有不同的研究侧重点，以求最大化地优化目标产物产量和质量。同时，应该考虑固、液、气三相产物的综合利用，从影响因素上考虑解决三种产物的出路问题。

5.4 产物利用方面

生物质快速热解产物不仅可以做燃料、能源化利用，而且可以将其开发成化工产品，以获得具有更高附加值的产品。

在生物油的应用上，应该研发更高效和成本更低的精制改性方法。对催化剂的开发是一个重要的研究方向。生物油的化工利用将具有广阔的应用前景，从生物油中提炼各种化工原料可以有效降低对化石燃料的依赖，但由于生物油成分复杂，因此还需要对生物油进行更为系统的开发研究。生物油胶黏剂是一个具有前景的方向，可以有效利用生物油中的酚类物质。

在热解炭的应用上，发展新的活性炭制备方法是一个重要的方面。另外，考虑到生物质的来源广泛，木材、竹材、农作物秸秆及其它农林加工剩余物都有开发成活性炭的潜力。

在不可冷凝气体的应用方面，将生物质快速热解制取富氢气体与热解、气化、发酵等其它技术联合，将是未来工业化的一个重要发展方向。

[参考文献]

[1] Miller, R.S. and J. Bellan. Numerical simulation of vortex pyrolysis reactors for condensable tar production from biomass[J]. Energy and fuel, 1998, 12(1).

[2] Miller, R.S. and J. Bellan. A generalized biomass pyrolysis model based on super imposed cellulose, hemicellulose and lignin kinetics[J]. Combust sci. and tech, 1997, 12(6).

[3] J.J.M. Orfao, F.J.A. Antunes, J.L. Figueiredo. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic material-three dependent reactions

model[J].Fuel, 1999, 78(3).

[4]修双宁, 易维明, 李保明.生物质热裂解动力学的研究进展[J].生物质化学工程, 2007, 41(2).

[5]Stubington.J.F., Aiman.S.Pyrolysis kinetics of bagasse at high heating rates[J].Energy Fuels, 1994, 8(1).

[6]Di Blasi.Colomba, Branca.Carmen, Santoro.Antonio, Perez Bermudez, Raul Alberto.Weight loss dynamics of wood chips under fast radiative heating[J].Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2001, 57(1).

[7]王益群.生物质在流化床中热解过程的动力学数值模拟[D].中国科学技术大学博士学位论文, 2008.

[8]吴少华, 栾积毅, 孙锐, 姚娜.生物质快速热解气相成分分析出规律[J].太阳能学报, 2009, 30(11).

[9]吴逸民, 赵增立, 吴文强, 李海滨.基于裂解气质联用分析的生物质逐级热解研究[J].燃烧化学学报, 2010, 38(2).

[10]任强强, 赵长遂.升温速率对生物质热解的影响[J].燃料化学学报, 2008, 36(2).

[11]赵建辉, 龙恩深.生物质快速热解液化传热模型与试验研究[D].重庆大学硕士论文, 2006.

[12]龙恩深, 周杰, 陈金华.生物质快速热解液化的试验[J].重庆大学学报, 2009, 32(5).

[13]Manuel Garcia-Perez, Xiao Shan Wang, Jun Shen, Martin J.Rhodes, Fujun Tian, Woo-Jin Lee, Hongwei Wu, and Chun-Zhu Li.Fast Pyrolysis of Oil Mallee Woody Biomass:Effect of Temperature on the Yield and Quality of Pyrolysis Products[J].American Chemical Society, 2008, 47(6).

[14]Jun Shena, Xiao-Shan Wang, Manuel Garcia-Pereza, Daniel Mouranta, Martin J Rhodessa and Chun-Zhu Lia.Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass[J].Fuel, 2009, 10(88).

[15]严晓龙, 袁兵, 余春江, 方梦祥.考虑水分影响的木材热解过程数学模拟[J].消防科学与技术, 2005, 24(6).

[16]Oasmaa, Anja; Solantausta, Yrjö; Arpiainen, Vesa; Kuoppala, Eeva; Sipilä, Kai.Fast pyrolysis bio-oils from wood and agricultural residues[J].Energy and Fuels, 2010, 24(2).

[17]Bridgwater AV.Production of high grade fuels and chemicals from catalytic pyrolysis of biomass[J].Catalysis Today, 1996, 29(1-4).

[18]Oasmaa, A.; Kuoppala, E.; Ardiyanti, A.; Venderbosch, R.H.; Heeres, H.J.Characterization of hydrotreated fast pyrolysis liquids[J].Energy and Fuels, 2010, 24(9).

[19]梁伟, 王铁军, 张琦, 汪璐, 徐莹, 吴创之.生物质快速热解油水相溶液超声乳化特性[J].燃料化学学报, 2009, 37(6).

[20]Sukhbaatar, Badamkhand; Steele, Philip H.; Kim, Moon G.Use of lignin separated from bio-oil in oriented strand board binder phenol-formaldehyde resins[J].Bioresources, 2009, 4(2).

[21]常建民, 郑凯, 任学勇, 范东斌.落叶松树皮生物油改性酚醛树脂胶粘剂固化动力学研究[J].中国胶粘剂, 2009, 18(4).

[22]徐俊明, 蒋剑春, 孙云娟, 卢言菊.反应精馏催化改性生物质热解油[J].太阳能学报, 2009, 30(2).

[23]杨续来, Charles U.Pittman Jr., 朱锡锋.固体酸催化烯烃改性生物油酚类化合物研究[J].高等学校化学学报, 2010, (31)7.

[24]孙锐, 姚娜, 栾积毅, 吴少华.生物质快速热解焦炭的比表面积和孔隙结构[C].中国动力工程学会第四届青年学会会议, 2009, 1.

[25]Shadkami , Farzad ; Helleur , Robert.Recent applications in analytical thermochemolysis[J].Journal of Analytical and Applied Pyrolysis , 2010 , 89(1).

[26]陈冠益 , 颜蓓蓓 , 贾佳妮 , 胡艳军.生物质二级固定床催化热解制取富氢燃气[J].太阳能学报 , 2008 , 29(3).

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/87883.html>