# 生物质能源的利用与研究进展

马君，马兴元，刘琪

(陕西科技大学资源与环境学院，陕西西安710021)

摘要：生物质能源是可再生能源的一个重要组成部分，开发利用生物质能源对世界能源的发展具有重要意义。论述了生物质能源的利用现状和转化利用技术，介绍了国内外生物质能源开发利用的研究进展，并分析了生物质能源技术的发展趋势和面临的问题。

随着社会经济的飞速发展，人类对能源的需求趋势也随之改变。生物质能源因其具有资源丰富、可再生、低污染等优点，使得其在人类生活和社会活动中的价值不断提高。据报道，生物质能已上升为仅次于化石能源煤、石油和天然气之后的第4位能源，占世界一次能源消耗的14%[1]
。与传统的直接燃烧方式相比，现代生物质能源的利用更多的是借助热化学、生物化学等手段，通过一系列先进的转换技术，生产出固、液、气等高品位能源来代替化石燃料，为人类生产、生活提供电力、交通燃料、热能、燃气等终端能源产品[2]
。目前，生物质能作为一种可再生的低碳能源，具有巨大的发展潜力。针对现代生物质能源利用技术的开发和研究，对替代或部分替代化石能源，保护生态环境，实现再生资源的合理利用及人类社会的可持续发展意义重大。

## 1生物质能源利用现状

1.1资源现状
目前，全球每年形成的生物质达1800亿t，相当于$3\times10^{22}$
J的能
量，为全球
实际能源消费的10倍。
在理想状态下，地球上的生物质潜力可达到实
际能源消费的180～200倍[3]
。我国的生物质资源，主要来自农林产业，可分为薪柴、秸秆、粪便、城市生活垃圾、海洋生物及污水和污油等。其中，薪柴秸秆因其热值高、产量大等优点，占
到生物质资源利用的94%[4－5]
，成为主要的可再生能源。在我国，秸秆的年产出量已超过7亿t，但仅有30%左右作为造纸工业、建筑业及手工业的原料使用，其余均被焚烧或废弃处理。剩余秸秆的随意弃置不仅造成环境污染、能源浪费，甚至带来其他社会经济损失[6]。因此，根据我国现存的生物质能源状况及技术水平，生物质资源的开发应主要以利用农林业生产中所产出的有机废弃物为主。此外，世界范围内，美国、巴西等多个国家还开展了有关能源植物的培育种植工作，为生产和开发相应的能源产品进行相关研究。

1.2生物质能源的主要利用途径 在生物质能开发利用过程中，根据不同的生产工艺，可形成不同类型的终端产品(主要是多类型的能源燃料)，用于提供电能、热能和交通能源等能量。目前，技术成熟且综合效益较高的利用方式主要有厌氧发酵产沼气、燃料乙醇、生物质气化发电和秸秆固化成型等。此外，除进行发电、供气及生产能源燃料的生物质资源化利用以外，具有多功能性的生物质原料如秸秆，还可作为饲料、肥料、生物机制和工业原料等进行综合开发利用。

## 2生物质能源的利用技术及研究概况

生物质种类繁多，具有多样性与复杂性，因此，生物质能的利用技术相比于化石燃料等其他能源来说更为复杂多样。随着技术开发和研究领域不断扩展，生物质的利用不再局限于简单的燃烧手段，而是基于现代技术的进一步高效利用。如今，生物质能的系统利用技术较为成熟，转化利用手段主要分为直接燃烧技术、热化学转化和生物化学转化。目前生物质能源的利用技术主要集中在经不同转化途径的生物质固化、生物质气化和液化技术的研究开发上。

2.1固化成型技术 固化成型技术是指以无定形的生物质(如木材屑末下脚料、植物庄稼秸秆、各种糠渣谷壳等)为原料，经过一定的温度和机械压力作用下，利用固化成型设备挤压制成颗粒型、棒型、块型等燃料，便于集中利用，从而改善生物质原有性能，提高热效率。该类技术即可用于城乡居民生活炊事用能，又可用于农业产生燃料，进一步脱烟碳化后可制成清洁炭，达到高效、清洁、$CO_2$

低排放的效果，是一种简单可行的生物质能源生产技术。生物质固化成型技术发展至今，已经开发了许多种成型工艺和成型机械，但作为生产燃料，主要是干燥物料的常温成型与热成型[7]。

生物质固化成型需要进行一定的预处理过程，并且在原料的种类、粒度、含水率及成型温度都有一定要求。在固化成型后，为了进一步提高生物质成型燃料的使用价值，可进行碳化，形成木炭。

生物质固化成型的工艺流程为:原料→预处理(粉碎)→干燥→成型→碳化→木炭。

自20世纪90年代以来，欧美、亚洲等一些国家开始将生物质固化成型燃料大量应用在生活领域。瑞典利用林业废弃物如树皮、树枝、木屑以及能源作物等生产固体成型燃料已经发展的相当成熟，形成了从原料种植、收集、到颗粒(或切片)生产再到配套应用和服务体系一个完整的产业链条[8]
。日本对从国外引进的固化成型技术进行了改进，研制出棒状燃料成型机和相关的燃料设备，发展成日本压缩成型燃料工业体系。

近年来，我国围绕生物质固化成型技术的研究和设备的开发不断深入，取得了一定的研究进展。吴云玉等通过建立生物质固化成型的微观接触几何模型推导获取了压辊压力与生物质颗粒表面斜角直接的数学关系，并建立了生物质固化成型的分子电化学微观机理，说明了固化成型
燃料燃烧点低的原因[9]
。陈晓青等通过试验研究了生物质热压成型制品表面裂纹形成的影响因素，结果表明，裂纹的形成与力学、原料的微观组织及环境介质(含水率或温度等)均有关挤压中材料屈服强度后的塑性流动过程产生的剪应力是裂纹形成的根本原因[10]
。侯振东等以玉米秸秆为原料，研究了秸秆固化成型工艺中成型压力、温度及含水率对成型块品质的影响，选取成型压
力为
60～90M
Pa，加热温度为7
5～100°C，物料含水率在8%～12%
的工艺条件，生产出性能优良便于储运的成型块[11]
。生物质固化成型技术应用范围广，但作为能源转化的途径，目前仍有一些关键技术问题难以解决，如物料压缩时螺杆的使用寿命、成型燃料的密度及碳化技术等。

2.2生物化学加工利用技术 随着一次能源的大量消耗及储量的日趋减少，生物化学加工利用技术作为新型的生物质能燃料成为热门的研究领域，受到人们广泛关注。生物质在微生物的发酵作用下，生成的沼气、酒精等能源产品的研究逐步深入。

2.2.1生物质厌氧发酵产沼气。生物质厌氧发酵是生物质在厌氧条件下，以动物粪便、秸秆、有机废水等为原料，通过厌氧细菌的代谢作用产生$CH_4$和$CO_2$
等混合可燃气体(沼气)的过程。目前，生物质厌氧发酵技术已经比较成熟，初步实现了商业化，开始面向规模化应用发展。沼气池技术主要发展于20世纪80年代以前，我国农村地区普遍以秸秆和畜禽粪便进行厌氧发酵，产生沼气用于生活炊事燃料。80年代后大型的沼气工程相继出现，农户型以沼气技术为纽带的畜禽、沼气、果蔬三位一体的生态园模式成为生态农业的发展重点，产业化力度大大加强。

厌氧发酵可分为干式厌氧发酵和湿式厌氧发酵。相比于湿发酵，干发酵技术具有节约发酵用水、节省管理沼气池所需工时、池容产气率较高等优点[12]
，成为秸秆类生物质进行资源化利用的主要途径。目前对厌氧发酵技术的研究主要集中在规模的扩大化及厌氧发酵产气量的提高上。

在对生物质秸秆进行厌氧发酵过程中，由于其中含有木质素与纤维素和半纤维素混杂交联，使纤维素及其他易分解物质难以被微生物分解，降低了产气量，因此，秸秆厌氧发酵的预处理也是研究的一个重要内容。杨玉楠等进行了利用白腐菌对秸秆生物预处理后发酵产甲烷试验[13]
，结果表明，与发酵时间在45～90d，转化率在50%左右的传统秸秆厌氧发酵相比，经过白腐菌室温下20d预处理后的秸秆，发酵15d甲烷产量已相对稳定，转化率达到47.63%，继续发酵至30d后，甲烷转化率达到58.78%，大大缩短了发酵周期，提高了甲烷转化率。孙辰等采用6%的NaOH对稻草秸秆进行化学预处理，研究了其在厌氧发酵过程中厌氧消化效率、产气量及COD的去除情况[14]
。结果表明，与未经NaOH预处理相比，经过NaOH化学预处理后的稻草秸秆在厌氧消化效率和产气量上有了显著提

高，最大日产气量、总产气量及COD去除率分别提高了61.34%、55.23%、48.72%。目前基于厌氧发酵产沼气的机理研究，工艺优化及反应器制备的研究已相当广泛，但我国现有厌氧发酵技术水平与国外相比有较大差距，推行大规模实际应用的条件还尚未成熟，主要存在包括系统运行和自动化水平低，厌氧发酵相配套的技术和设备不健全等问题。

2.2.2乙醇发酵。乙醇发酵是以糖类(甘蔗、甜菜等)、淀粉(玉米、谷类等)、木质纤维(秸秆、蔗渣等)等生物质为原料，利用微生物发酵制成生物燃料乙醇。燃料乙醇可根据乙醇添加比例的高低分为替代燃料和燃料添加剂两种类型。其中燃料酒精作添加剂可起到增氧
和抗爆的作用，以替代有致癌作用的甲基叔丁醚[15]
。目前利用糖类和淀粉为原料制备燃料乙醇的成熟技术工艺在一些国家已经得到广泛应用，自20世纪70年代中期的石油危机以来，以美国和巴西为主的一些国家开始积极推行生物乙醇发展计划，尤其是21世纪以来，全球生物乙醇产量迅速扩张[16]
。全球可再生燃料联盟和F.O.Licht在2月14日联合发布的全球年度乙醇产量预测报告中指出，2011年全球乙醇产量预计会达到887亿L，在全球范围内每天满足更多的替代原油的需求。根据预测显示，2011年全球乙醇产量增幅超过3%，高于2010年858亿升的产量数据。当前全球乙醇产量已超过5.5亿桶/年。美国作为世界上最大的生物燃料乙醇生产国和使用国，其燃料乙醇生产量占世界乙醇燃料总量的一半以上。

加拿大用木质原
料生产的乙醇产量为17万t。比利时每
年用甘蔗为原料，制取乙醇量达3.2万t以上[17]
。但受到生产乙醇所需的玉米、小麦等经济作物价格的影响，各国乙醇燃料产量增长较为缓慢。由于生产玉米乙醇是以粮食作物为原料，须占用大量耕地，这与国家的粮食安全存在矛盾，不可能进行大规模生产，且从燃料生产成本的角度出发，并不具有经济意义。近年来，由粮食作物向非粮作物的生物质原料转向开始兴起，美国及欧洲等国家进行大量投入开展以纤维素和木质素等为原料的生产技术路线和工业实践。因此，开发利用秸秆等农林废弃植物纤维作为原料，并以工业微生物取代酵母的现代生物燃料乙醇生产将成为今后产业发展的必然之路。

根据当前国情要求，我国的燃料乙醇生产逐步走向“非粮化”的发展道路，燃料乙醇产量呈几何级数增长。目前，国内最大的燃料乙醇生产商中粮集团启动建设的年产500t的纤维素乙醇试验装置，纤维素转化率超过了90%、半纤维素转化率超过95%、糖转化率超过85%等，其多项关键技术指标在行业内均处于领先地位，已接近国际先进水平。国内研究者主要是开展针对木质纤维素乙醇发酵的试验研究。路鹏等提出了减少预处理发酵抑制物和综合利用混合糖类进行发酵的两大关键点，并采用改变预处理方法，提高发酵菌种对混合糖底物的利用能力和产乙酸能力，来提高乙酸的转化率[18]
。丁文武等采用硅橡胶膜渗透汽化分离与酵母细胞固定床耦合构成的连续发酵系统，实现酵母细菌固定化与产物乙醇的原位连续分离，提高了乙醇发酵密度，减少了产物的抑制作用[19]。

2.3热化学转化技术 热化学转化是生物质转化技术中的一类重要的能源利用手段。通常采用高温分解、碳化、气化等热加工工艺，主要以木质素(木材、稻壳)和纤维素(农作物秸秆)为原料，获得焦油、木炭、低热值可燃气等高品位能源产品。

2.3.1热解气化。生物质的热解气化技术主要利用秸秆、锯沫等农林废弃物，在气化反应器中高温缺氧条件下，发生热解气化反应，生成含一氧化碳、氢气和低分子烃类的可燃气体。生物质热解气化技术一般以空气、氧气、水蒸汽等作为气化介质。气化炉为生物质热解气化的主要工作设备。

目前国内应用的生物质气化炉主要有流化床和下吸式固化床两种类型。可根据气化方式、气化介质和条件的不同，获得不同热值的生物质燃气，从而调整燃气中CO、$CO_2$、$H_2$
的比例，应用于供热、供气、发电、合成液体燃料及制氢等不同场合。我国的生物质气化技术主要是应用于集中供气以及中小型气化发电领域，还有部分用于工业锅炉供热。

国内外针对生物质气化热解机理开展的研究中发现，由于生物质主要是由纤维素、半纤维素和木质素组成，它们在生物质中紧密结合成一个有机整体，因此，其热解行为被认为是这三种主要组分热解的综合作用。Raveendran利用热重分析仪和填充床热解反应器对14种生物质原料及几种主要成分的热解特征进行了研究，研究表明，生物质的热解在不同温度区间下的主要分解物质不同[20]
。一般来说，在温度较低时(＜300℃)，生物质中易分解的结构单元开始热解，一些较为复杂的化合物(长链脂肪烃或带侧链的芳烃)发生裂解反应，生产较简单的化合物(甲
醛和苯)[21]
，大部分的无机气体及烃类气体由含氧官能

团及侧链上的脂肪烃分解而成[22]
，此阶段半纤维素的分解占主导地位。当温度达到300～500°C时，生物质中的较大结构单元发生热解，生物质焦油产生，纤维素成为主要的热解对象。

此时纤维素聚合度快速降低，并与低温炭化反应形成竞争过程。当纤维素聚合度降到200时，致使纤维素内部结构发生破裂，解聚反应同时存在，伴随生成一些气态小分子产物。而CO则通过半纤维素产生的挥发组分中的不稳定的羰基断裂生成，在很大程度上，CO的生成是源于挥发组分的二次裂解。这段时间里木质素的热解速度很快，失重达50%以上，主要生成片状焦炭。当温度继续升高到500～700°C时，木质素热解固体产物的产率下降，液体产物随温度升高产率提高，甲醇、乙醛和低分子碳氢化合物等可挥发组分大量析出。很多研究者认为，生物质热解行为可以看作纤维素、半纤维素和木质素独立热解的线性叠加[23]。

自20世纪70年代以来，国外尤其是发达国家的科研人员在相关领域做了大量研究工作。Gahly等首次提出了将气化技术应用于能量密度较低的生物质燃料
上，生物质气化研究开始逐步活跃起来[24]
。Alexis等设计了利用木材气化生产合成天然气的工艺流程，研究表明，该工艺可以通过甲烷化反应将木材转化为热效率达57.9%低热值基础上的管道质量甲烷[25]
。此外，美国、瑞典、德国、意大利等国家在生物质气化技术领域已具有备了领先水平。发达国家在生物质发电、生物质气化联合循环发电技
术方面，达到了4～63MW规模水平，发电效率达到
35%～40%以上[26]
。美国现有生物质发电站350多座，主要采用木材废弃物、城市固体废弃物和其他废弃物作为生物质发电所用原料。生物质发电的总装机容量超过1000万kW。目前，生物质动力工业已成为美国仅次于水电的第二大可再生能源。

近年来，该领域的研究方向正逐步拓宽，其中生物质燃气焦油裂解、生物制氢、生物质合成气制备等技术成为研究重点之一，我国的研究者也开展了大量试验研究。孙云娟等以木屑为原料，研究了不同产地白云石催化作用下的焦油裂解过程，分析了裂解
温度、催化类型和反应停留时间等对焦油转化
效果和热解可燃气的影响[27]
。结果表明，裂解温度越高，停留时间越长时焦油的裂解效果越好，且不同催化剂的裂解效果有明显差异，白云石煅烧处理后的比表面积是决定裂解效果优劣的最重要因素。王铁军等就采用空气－水蒸汽气化生物质制备富氢燃气，结合沼气重整富氢燃气的工艺过程，调整合成气化学当量比，并以制备的生物气合成气一步合成二甲醚，且二甲醚的最大产量为0.244kg/kg(DME/生物质)[28]。

同时，国内的一些研究机构和高校等还开展了生物质气化合成液体燃料等技术方面的研究工作，并取得了一定成果。如山东科技大学成功研发了垃圾分级热解气化技术，让城市生活垃圾在还原性气氛下发生反应，避免二噁英的生产，很好地解决了二次污染问题，运行过程中所生成的气体含有大量甲烷、一氧化碳和氢气等可燃气，可用于工业燃气。

2.3.2生物质液化制油。在生物质作为含能物质利用的过程中，由于固体生物质结构松散，能量密度低，直接燃烧的产能方式不易流通和储存利用。而通过热化学转化过程，可将生物质最大限度的转化为能量密度高的液体燃料，使附加值大大提高，便于存储运输。不同的生物质原料制备出的生物质液化产品不同，制备的液体燃料产品主要有生物油、生物柴油、乙醇和二甲醚等，可以替代石油能源产品，成为车用替代燃料。

固体生物质制取生物油的热化学转化方法一般有直接液化和间接液化两种。直接液化包括高压液化和快速热解液化，而间接液化则是先将生物质热解气化，再将生成的气体精制合成燃料油。直接液化产品主要是生物原油，还包含一些气体和固体残留物。由于生物油与石油相比在分子质量和化学组分等理化性质上有很大不同，除含有除碳、氢元素外，还含有35%～48%质量分数的氧元素。在液化过程中由于氧元素性质活泼，生成的生物原油往往含有酸、醛、酚等含氧化合物，这不仅增加了液化研究的难度，而且决定了生物原油热值低、稳定性差及有腐蚀性的特点，因此必须对其进行精制处理，以达到降低含氧量和提高热值等目的[29]
。经过精制后的生物油可作为替代汽油、柴油等燃料用油使用。

生物质高压液化是指在有溶剂存在，反应温度为200～400°C、反应压力为5～25MPa、反应时间为2min至数小时的条件下液化生物质[30]
。生物质高压液化主要是对原料中的纤维素、半纤维素和木质素进行解聚和脱氧的过程。高压条件下可以抑制纤维素和半纤维素解聚，减少气体生成。研究者们发现，采用不同原料作为高压液化对象时，所获得的生物油的组成和产率

不同。一些研究结果表明，原料中木质素的含量对液化产率具有一定影响，但不同的研究者对木质素的作用效果结论不一。Dietrich以云杉木、白桦木、甘蔗渣、麦秆、松树皮、纤维素、木质素为原料进行液化，结果表明，随着原料中木质素含量增加，液收率上升。以木质素为原料进行液化所得液收率可达64%，而以纤维素和松树皮为原料液化所得的收液率只有20%～30%[31]。而Demirbas则认为木质素含量越高，液体产物的产率越低，而焦炭率越高。

这可能与研究者所选用的溶剂和液化条件不同有关。除原料种类外，催化剂与溶剂、反应温度与时间、反应压力和液化气氛等都成为高
压液化过程中主要的影响因素。我国研究
者也在高压液化方面做了一些研究[32]
。吕秀阳等对
纤维素在近临界水中的分解
动力学以及不同温度下停留时间对产物分布的影响进行
了研究[33]
。研究结果表明，在压力25MPa，预热水的流量与浆料的流量比为1：1，浆料槽中的固含量为0.05%(mass)，纤维素初含量为0.25%(mass)的试验条件下，纤维素水解的表观活化能为147kJ/min，说明纤维素在近临界水中可进行选择性分解。白鲁刚等[34]研究了煤与生物质的共液化过程，选用硫铁化物作为催化剂进行煤与生物质加氢共液化[34]。

生物质的快速热解液化是在传统裂解基础上发展起来的一种技术，与传统裂解不同，它采用超高的加热速率在适当温度下，使生物质中的大分子有机聚合物在很短时间内迅速断裂为断链小分子，将生成的可冷凝气体快速冷却液化，从而使焦炭和产气量降到最低，最大限度的获得液体产品。

反应器是生物质快速热解液化技术的核心，目前国内外达到工业规范的生物质热解液化反应器主要有流化床、循环流化床、烧蚀、旋转锥、引流床和真空移动床反应器等[35]。美国太阳能研究所(SERI)使用的涡旋反应器(vortex reactor)生物油产率可达55%，加拿大ENSYN的循环流化床反应器(up-flow circulating-fluidized bed reactor)利用砂子作热载体，减小了设备尺寸，缩短了气相停留时间，使得生物油产率提高到65%[36]。

目前，除对利用热化学转化制备生物油的研究外，生物柴油、乙醇等其他油品燃料的制备工艺技术也均较为成熟，并通过调整工艺及制备条件来对转化过程开展进一步的探索研究。

**3发展趋势与面临的问题**

3.1发展趋势 生物质能源的开发和利用已经成为当前解决能源危机问题的一个重要发展方向。从资源利用的角度来看，农林业成为发展生物质能源的基础。能源植物、能源作物的培养及优化成为满足生物质能源规模化发展的保障。如今，生物质能源的开发利用技术日趋多样化，目标在于寻求更多的有效途径来获取清洁能源，实现资源的综合利用。在今后几年，生物质在生物发电、生物燃料和生物产品部门应用领域将大幅增长，预期市场价值会显著提升。

3.2面临的问题 在实际的研究和应用中也面临着来自资源与技术的诸多问题。在我国，发展能源植物的种植和培育还未达到规模化应用的条件，受到用地限制，全面推广生产并不可行。在利用技术手段方面，目前生物质能源的转化利用仍以传统低效的直接燃烧方式为主，且在亚洲、非洲等发展中国家，这种传统的生物质能利用手段还占据了相当高的比例。另外，技术瓶颈成为限制生物质能源发展的主要问题。以粮食作物原料为主的燃料乙醇和生物柴油产业的可持续性存在严重问题。同时，非粮生物质液体燃料产业化进展缓慢，生产核心技术仍未突破，产品质量不稳定，影响产业化发展。生物质发电虽然取得了重要进展，但受到投资过大、运行成本过高的严重制约。近年来，我国主要是针对中小型生物质气化发电技术进行研究，但对如直燃和混烧等其他生物质发电技术研究较少，缺乏实际应用经验，技术种类低，整体研究开发能力较差。因此，与国外的研究进展和成果相比，我国的生物质能技术研究起步较晚，存在关键技术研发周期过长等劣势，必须要加强对外交流合作，借鉴国外的先进技术与工艺，将自主开发与技术引进相结合。

**4结语**

生物质能资源丰富，若能充分利用，不仅能够减少环境污染，而且还是解决未来面临能源危机的必由之路。目前，世界各国越来越重视对生物质能源的研究，积极采取相应的经济支持和政策扶持的办法加大对生物质能转化利用技术的投入。生物质能源产品因其性能优势，使得技术开发有着广阔的应用空间。随着气化、制油、制氢等研究在技术上的不断突破，产出更为清洁价廉的能源，这对于能源的有效利用和可持续发展都具有重要意义。

参考文献

[1]中华人民共和国国家发展计划委员会基础产业发展司.中国新能源与可再生能源1999白皮书[M].北京:中国计划出版社，2000.

[2]吴创之，周肇秋，阴秀丽，等.我国生物质能源发展现状与思考[J].农业机械学报，2009，40(1):91-99.

[3]张无敌，宋洪川，韦小岿，等．21 世纪发展生物质能前景广阔[J].中国能源，2001(5):35-38.

[4]张无敌，宋洪川，李建昌，等.有利于农业持续发展的农村能源——生物质能[J].农业与技术，2001，21(4):8-12.

[5]孙宪文，李丽萍.发展生物质能可获得多方面的效益[J].节能，2003，247(2):45-47.

[6]高自超，周元军.农作物秸秆综合开发利用技术[J].农产品加工，2007(6):39-42.

[7]吉林省农委科教处.秸秆能源利用技术[J].吉林农业，2008(5):8-9.

[8]孟海波，朱明，王正元，等.瑞典、德国、意大利等国生物质能技术利用现状与经验[J].新能源产业，2007(4):53-56.

[9]吴云玉，董玉平，吴云荣.生物质固化成型的微观机理[J].太阳能学报，2011，32(2):268-271.

[10]陈晓青，陆萍，董玉平，等.生物质固化成型制品表面裂纹试验研究[J].农机化研究，2010(2):185-190.

[11]侯振东，田潇瑜，徐杨.秸秆固化成型工艺对成型块品质的影响[J]．农业机械学报，2010，41(5):86-89.

[12]齐岳.干发酵——秸秆资源化利用的最佳途径[J].农业工程技术·新能源产业，2010(4):17-19.

[13]杨玉楠，陈亚松，杨敏.利用白腐菌生物预处理强化秸秆发酵产甲烷研究[J].农业环境科学学报，2007，26(5):1968-1972.

[14]孙辰，刘荣厚.稻秸 NaOH 预处理及厌氧发酵产沼气的试验研究[J]．农机化研究，2010(4):127-129.

[15]吴业颖.生物质能研究进展[J].科技资讯，2008(8):8，10.

[16]翁凌云.国外生物乙醇燃料生产现状和发展趋势分析[J].世界农业，2010(5):42-45.

[17]陈启梅，翁一武.生物质能的利用与发展[C]//“2006年全国博士生学术论坛——中国生物多样性分论坛”论文集.成都:[出版者不详]，2006.

[18]路鹏，江滔，李国学.木质纤维素乙醇发酵研究中的关键点及解决方案[J].农业工程学报，2006，22(9):237-240.

[19]丁文武，伍云涛，汤晓玉，等.细胞固定化与硅橡胶膜渗透汽化分离耦合连续发酵制造乙醇[J].酿酒科技，2008(4):17-24.

[20]RAVEENDRAN K，GENESH A，KHILAR K C.Pyrolysis Characteristics of Biomass and Biomass Components[J].Fuel，1996，75(8):987-998.

[21]XU W C，TOMITA A.1987 International Conference on Coal Science[C].Amsterdan:Elsvier Science Publishers B V，1987:629-632.

[22]XU W C，TOMITA A.Effect of Coal Type on the Flash Pyrolysis of Vari-ous Coals[J].Fuel，1989，21(1):25-37.

[23]李雪瑶，应浩.生物质热解气化机理研究进展[J].精细石油化工进展，2009，10(10):45-50.

[24]GAHLY M，PREKORZ J.The hydro gasification of wood[J].Ind Eng Chem Res，1988，27:256-264.

[25]DURET A，FRIEDLI C，MARECHAL F.Process design of Synthetic Natu-ral Gas (SNG) pro-duction using wood gasification[J].Journal of Clean-er Production，2005，15(13):1434-1446.

[26]吴创之，马隆龙，陈勇.生物质气化发电技术发展现状[J].中国科技产业，2006(2):76-79.

[27]孙云娟，蒋剑春.生物质热解气化产物中焦油的催化裂解研究[J].林产化学与工业，2007，27(5):15-20.

[28]王铁军，常杰，吕鹏梅，等.生物质热化学合成二甲醚[J].过程工程学报，2005，5(3):277-280.

[29]王泽，林伟刚，宋文丽，等.生物质热化学转化制备生物燃料及化学品[J].化学进展，2007，19(Z2):1190-1197.

[30]姜洪涛，李会泉，张懿.生物质高压液化制生物原油研究进展[J].化工进展，2006，25(1):8-13.

[31]DIETRICH M，RONALD A，OSKAR F.Catalytic hydropyrolysis of lignin:Influence of reaction conditions on the formation and composition of liquid products[J].Bioresource Technology，1992，40:171-177.

[32]DEMIRBAS A.Effect of Lign in Content on Aqueous Liquefaction Prod-ucts of Biomass[J].Energy Conversion & Management，2000，41:1601-1607.

[33]吕秀阳，迫田章义，铃木基之.纤维素在近临界水中的分解动力学和产物分布[J].化工学报，2001，52(6):556-559.

[34]白鲁刚，颜涌捷，李庭琛，等.煤与生物质共液化的催化反应[J].化工冶金，2000，21(2):198-203.

[35]路冉冉，商辉，李军.生物质热解液化制备生物油技术研究进展[J]．生物质化学工程，2010，44(3):54-59.

[36]王丽红，贾官臣.生物质热解液化产物——生物油的国内外研究进展[J].山东理工大学学报:自然科学版，2008，22(4):92-95.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/113061.html