·农业生物环境与能源工程·

生物质资源能源化与高值利用研究现状及发展前景

王　芳[1]，刘晓风[2]，陈伦刚[3]，雷廷宙[4]，易维明[1※]，李志合[1]

（1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院，淄博 255000；2. 中国科学院成都生物研究所，成都 610041；3. 中国科学院广州能源研究所，广州 510650；4. 河南省科学院，郑州 450002）

摘　要：生物质是唯一能够直接转化为燃料的可再生能源，其开发利用既可以弥补低碳能源的需求，减少环境污染，也是中国实现“碳中和”目标的重要手段。该研究围绕以秸秆为主的生物质资源制备清洁能源和高值利用的总目标，系统分析生物质资源通过生物或热化学等转化途径制备气、液、固三相清洁能源的综合利用技术和模式，重点论述厌氧消化制备生物燃气、水热催化炼制醇烃燃料、裂解液化与生物油提质和生物质制备固体燃料 4 项技术发展现状与研究进展。在 4 项生物质转化技术中，厌氧消化制备生物天然气工业化程度最高，由于其大都基于大型养殖场建立，可有效解决原料收集问题，而且厌氧消化技术与沼气净化技术相对较为成熟，生物天然气可直接作为燃料、电力和热力来源供用户使用；由于生物质制备液体燃料中存在转化过程成本较高、产物分离困难、提质效率低、产品不稳定等问题，很难与当前应用端平稳接轨，因此水热催化炼制醇烃燃料、裂解液化制备生物油技术规模化发展水平较低；对于生物质制备固体燃料，其成型技术较为成熟，配套炉具的研发也有效解决了成型燃料应用端的问题，其规模化应用最大的难点在于原料的收集与存储。文章最后对未来生物天然气、生物质液体燃料与固体成型燃料发展前景进行展望，为实现农村生物质资源高效制备清洁能源及高值利用提供借鉴。

关键词：生物质；天然气；碳减排；液体燃料；固体燃料
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2021.18.026
中图分类号：S216；TK6　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1002-6819(2021)-18-0219-13

王芳，刘晓风，陈伦刚，等. 生物质资源能源化与高值利用研究现状及发展前景[J]. 农业工程学报，2021，37(18)：219-231.　doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2021.18.026　http://www.tcsae.org
Wang Fang, Liu Xiaofeng, Chen Lungang, et al. Research status and development prospect of energy and high value utilization of biomass resources[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(18): 219-231. (in Chinese with English abstract)　doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2021.18.026　http://www.tcsae.org

0　引　言

中国农林生物质废弃物总量为 1.2×10^9 t/a，量大面广。传统的粗放式管控，存在生态环境破坏与安全隐患等问题，严重影响农民生活质量，阻碍“绿色宜居村镇”和“美丽乡村”的建设与发展，同时也造成资源浪费。能源化、材料化、肥料化、饲料化和基料化等“五化”是处理生物质的有效途径，其中能源化是提升生物质增量利用最有效、最现实的手段。生物质是唯一能直接转化为燃料的可再生能源，其开发利用既能弥补能源需要，也是中国实现“碳中和”目标的重要路径[1]。

“碳中和”是指通过平衡或者消除 CO_2 的排放，实现净零 CO_2 的排放，从而阻止其在大气中浓度的增加而导致的全球变暖现象。到 2020 年，全球大气中的 CO_2 平均浓度已达到 746.83 mg/m^3，较 1850 年左右工业化前的 512.88 mg/m^3 水平提升了 45.6%。截至 2021 年 2 月，已有 124 个国家通过立法或承诺到 2050 或 2060 年实现“碳中和”，“碳中和”是人类共同发展的目标，也成为人类发展的新约束[2]。因此，减少化石能源消耗，从源头减少碳排放，用可再生能源替代化石能源是实现碳中和的根本途径之一。生物质不仅是一种重要的可再生能源，也是一种碳中性的载体[3]。生物质蕴含的碳能源是通过空气中 CO_2 和水通过光合作用形成的，直接利用生物质原料通过各种转化技术获得国民经济中所需的能源，可以达到碳平衡，生物质能技术的发展有利于建立良好的可持续性能源利用碳循环圈。开发利用生物质资源，可使其成为继煤、石油、天然气之后人类社会的第四大能源宝库。

因此，无论从能源可持续发展和环境改善方面，还是当前“碳达峰”和“碳中和”国家战略目标的实现方面，生物质能技术的发展和应用将会起到巨大促进作用。本文围绕以秸秆为主的生物质资源制备清洁能源和高值利用的总目标，系统分析秸秆资源通过生物或热化学等转化途径制备气、液、固三相清洁能源的综合利用技术和模式。重点论述厌氧发酵制备生物燃气、水热催化炼制醇烃燃料、裂解液化与生物油提质和生物质制备固体燃料四项技术发展现状与研究进展，并对其发展前景进行展望，为实现农村生物质资源高效制备清洁能源及高值利用提供借鉴。

1　厌氧消化制备生物天然气

生物天然气是以农作物秸秆与畜禽粪污等有机废弃物为原料，经厌氧消化和净化提纯产生的绿色低碳清洁可

收稿日期：2021-08-13　　修订日期：2021-09-13
基金项目：国家重点研发计划资助（2019YFD1100600）
作者简介：王芳，博士，讲师，研究方向为生物质能生物化学与热化学转化技术。Email：wangfang1987711@126.com
※通信作者：易维明，教授，博士生导师，研究方向为生物质能综合利用技术。Email：yiweiming@sdut.edu.cn

再生的天然气，同时厌氧消化过程中产生的沼渣沼液可生产液态和固态有机肥等。生物质厌氧消化制备生物天然气在实现能源综合利用的同时，有效促进养分循环利用、减少化石能源消耗与温室气体排放。沼气工程是以厌氧消化为核心的能源环保工程，以污染治理为主要目的，以有机废物的资源化为效益保障，是废弃物能源化利用为主要途径的系统工程[4]，其技术进程主要包括以下几个方面。

1.1 原料预处理技术

对于以作物秸秆为原料的沼气工程来讲，通过预处理破坏纤维包裹结构，促进原料的降解和转化，提高产气率，可以有效缩短发酵启动时间[5]。秸秆预处理方法主要有物理、化学和生物法。物理法通过机械粉碎、微波、辐射、水热处理等，减小秸秆颗粒尺寸、增大比表面积、降低聚合度[6-8]。化学法通过酸碱、离子液体等化学试剂使秸秆进行水解，去除秸秆中的木质素或半纤维素等[9-10]。生物法是利用微生物或酶提高底物水解效率，使用的降解木质素的微生物种类有细菌、真菌和放线菌，真菌如白腐菌、褐腐菌等是最重要的一类[11-12]。工程常用的酶有纤维素酶和木质素酶，具有专一性、温和性等特点。目前，德国的沼气工程普遍使用玉米青贮原料，其占沼气厂能源作物总质量的 70%左右。中国秸秆沼气工程通常以干秸秆经预处理和黄贮为主要原料，目前还处于工业示范阶段。

对于以畜禽粪便为原料的沼气工程来讲，预处理还包括除砂过程，因为部分畜禽粪便如牛羊和鸡粪在生产或收集过程中不可避免会混入砂石。原料中的砂石会影响后续处理设备的运行，导致设备磨损、管网堵塞，在厌氧罐中沉积，并干扰处理过程等。除砂工艺主要有平流沉砂、旋流沉砂和水解沉砂等。沼气工程中应用较多的是水解沉砂池，为圆形漏斗结构，池中设搅拌器，在北方通常还设有蒸汽喷射加热装置，一方面有利于砂粒和有机物的分离，另一方面起到对料液增温的作用。

1.2 厌氧消化技术

近年来，国内外厌氧消化技术围绕多原料高浓度混合发酵、高负荷失稳预警、生物强化和干发酵等技术开展了大量研究，高浓度混合发酵具有产气率高的优点，在国内外沼气工程中已得到广泛应用，失稳预警、生物强化和干发酵技术为近期研究的热点。

1.2.1 失稳预警技术

厌氧消化系统中，由于产酸发酵型细菌与产甲烷菌的生长周期和反应速率均存在差异，因此高负荷条件下，底物与产物的平衡极易被破坏，导致消化系统的失稳甚至崩溃。失稳预警技术为厌氧消化系统的高效稳定运行提供了重要保证。

在失稳预警指标方面，发展趋势是由单一预警指标转变为综合性指标，由传统化学指标转变为化学/生物复合指标。目前，预警指标按其赋存状态可分为气相预警参数、固相预警参数和液相预警参数，按其特性可分为化学预警参数和生物预警参数。气相参数包括容积产气率、产气量、CH_4/CO_2，液相参数包括 pH 值、氧化还原电位（ORP，Oxidation-reduction Potential）、挥发性脂肪酸（VFAs，Volatile Fatty Acids）、VFAs/碳酸氢盐碱度和碳酸氢盐碱度/总碱度，是现阶段较为常用的预警指标，能够提前 20 d 对系统可能的失稳提前报警[13-15]。

在预警指标检测方面，通过对关键预警参数在线检测的集成，已开发出集数据采集、数据处理和参数控制一体化的厌氧消化过程稳定性检测系统，根据检测结果智能判断系统运行状况，完成远程报警，并实现系统云管理。失稳预警系统已成功应用于国内以鸡粪、餐厨垃圾、酒糟等为原料的厌氧发酵工程，通过失稳预警技术能够将酒糟厌氧消化的容积产气率从 1.3 $m^3/(m^3\cdot d)$提高到 2.7 $m^3/(m^3\cdot d)$，将蔬菜垃圾稳定厌氧消化的有机负荷率从 1.5 $m^3/(m^3\cdot d)$提高到 3.5 $g/(m^3\cdot d)$[16]。

1.2.2 生物强化技术

沼气工程生物强化技术是指向厌氧消化系统中添加某种或某几种特定的功能微生物，从而使系统的性能得以提升[17-18]。目前对该技术的研究主要聚焦于厌氧消化过程中水解阶段、产氢产酸阶段和产甲烷阶段。生物强化既能增加甲烷产量，也能有助于厌氧系统从中温过渡到高热，利于有机物的同时消化和消毒。生物强化技术按其类型可分为细菌强化、真菌强化、古菌强化、互营菌强化和生物酶强化等；按其功能可归类为强化发酵系统启动、强化失稳系统恢复运行、强化难降解原料转化、强化酸/氨抑制解除等[19-21]。生物强化技术已被应用于强化木质纤维素类原料水解，有研究向麦秸厌氧消化系统中添加纤维素降解菌 *Clostridium cellulolyticum*，使甲烷产量提高了 8%～13%。生物强化可使原料中纤维素去除率和产气量提高，甲烷转化率接近理论产气率的 59%[22]。对于易出现氨类/丙酸类物质抑制的系统，生物强化系统中产甲烷率比受氨氮抑制状态体系提高 40%，产甲烷率恢复至未添加氨抑制时的 97%[23]。此外，一些研究通过向反应器中加入碳布、磁铁矿、生物炭等导电材料，强化产电细菌和产甲烷古菌之间直接电子传递，形成高效的电子传递通道，增强微生物间的协同代谢[24]。

1.2.3 厌氧干发酵技术

干发酵具有用水量少、能耗低、无浮渣、无沉淀、以及沼液少等优势，可广泛用于秸秆、干清粪与厨余垃圾等[25]。近年来，在欧洲新建沼气工程中应用厌氧干发酵技术的比例逐渐增加。干法厌氧发酵反应器根据其进出料方式可分为序批式反应器和连续式反应器。典型的序批式干发酵反应器有 Bekon、Loock 和 Bioferm 等。连续式干发酵中发酵底物固体含量可达到 20%～40%，沼气产量高达 0.3～0.5 m^3/kg，主流发酵设备有比利时的 Dranco、法国的 Valorga、瑞士的 Komogas 和德国的 Linde-KCA 等，该技术已在欧洲多个国家达到商业化生产程度[26]。

国内连续式干法厌氧发酵工艺已从实验室研究及中试研究逐渐发展到工程实际应用，已有推流式、立式、卧式、车库式、覆膜槽式等厌氧干发酵装置。目前，已建成黑龙江林甸以秸秆与牛粪为原料的连续推流式干发酵沼气工程、广东怀集以生活垃圾为原料的续批车库式干发酵沼气工程等。

1.3 沼气脱硫脱碳技术

沼气是一种混合气体，其成分主要包括 CH_4（50%～

75%）、CO_2（25%～45%）、水分（1%～5%）以及少量的 H_2 和 H_2S（小于 1%）。传统脱硫工艺有干法脱硫和湿法脱硫，新型工艺有生物脱硫、微氧脱硫等方法。生物脱硫技术是 20 世纪 80 年代发展起来的替代传统脱硫工艺的新技术。中国科学院成都生物研究所分离到一株高效脱硫鞘氨醇杆菌 *Sphingobacterium sp.* DS-7，硫化物去除率达 95%以上[27]。生物脱硫不需催化剂、无二次污染、效率高、处理成本低、且可回收单质 S^0，有工程表明通过生物脱硫，沼气中的 H_2S 浓度可从 41 720 mg/m^3 降至 140 mg/m^3。

沼气提纯分离的常见方法主要有物理吸收法、化学吸收法、吸附法、深冷分离法、膜分离法[28]。欧洲目前广泛使用加压水洗法，大约占到 40%，其次是变压吸附（PSA，Pressure Swing Adsorption）和化学吸收法。中国目前生物天然气工程使用较多的为变压吸附和膜分离法。对于变压吸附法，具有选择性吸附沼气中二氧化碳功能的吸附剂是影响变压吸附设备性能的关键因素。膜分离提纯技术是利用气体通过膜纤维的渗透率不同实现 CH_4 和 CO_2 分离。加氢甲烷化生物脱碳技术向反应器内通入氢气，经微生物代谢作用将沼气中的 CO_2 转化为 CH_4，从而实现沼气原位提纯和碳减排[29-31]。净化获得的生物天然气可直接作为燃料、电力和热力来源供用户使用，为生物天然气的规模化应用提供了必要条件。

1.4　沼渣及沼液的资源化利用

沼渣、沼液作为优质有机肥提供作物营养，刺激和调节作物生长，增强作物抗病性。施用沼肥，能显著地改良土壤，减少农药、化肥的使用量。对于大型和特大型沼气工程，沼渣沼液的完全消纳是沼气工程稳定运行的关键因素。沼渣经堆肥后作为基肥或追肥并与化肥进行配施可显著提升作物产量和品质，并使土壤品质得以改善。沼渣的水热炭化也是近年来的研究热点，沼渣向碳基材料的转化，产生的生物炭或活性炭可吸附废水中的有害物质[32]。此外，碳基材料还可以对沼液中 N、P、K 等营养物质进行富集，获得富营养生物炭，具有较高的经济价值[33]。

与沼渣类似，沼液中也含有丰富的营养物质和矿质元素，是一种速效水肥。沼液既可作为叶面肥施撒，也可作为有机肥进行灌溉，沼液作为叶面肥尤其适用于果树。灌溉沼液可以为作物提供多种营养与微量元素，促进其生长发育，有利于保持和提高土壤质量[34-36]。利用沼液中的氨氮生产单细胞蛋白是一种新型利用方式[37]。单细胞蛋白的蛋白质含量高，氨基酸种类全，特别是含有较多谷物中较少的赖氨酸，被认为是具有很大应用前景的蛋白质新资源之一。

2　水热催化制备醇烃燃料

在众多生物质转化技术中，生物质液体燃料技术在中国“十三五”期间就已被列入重点发展对象，近年来纤维素乙醇和合成油燃料技术发展较快，主要以生物发酵制乙醇和气化-费托合成油燃料技术为主。然而，针对木质纤维素原料，虽然酶解-发酵法条件温和，但具有转化效率低、生产周期长、反应酶价格昂贵、生产工艺易致毒等问题，而且存在理论收率（67%）和极限浓度（10%～12%）等生产瓶颈，使其技术的经济性面临严峻挑战[38-39]。在合成油技术方面，虽然气化-费托合成转化率较高，但存在反应条件苛刻、目标产物选择性差、油品品质低，后续精制工艺复杂、成本高等问题[40]。由于这些瓶颈问题导致这两类技术在产业化方面进展较慢，所以近年来人们针对木质纤维素生物质的结构组成特点和化学官能团特性，提出了生物质直接或间接（经平台分子）的方法来制备醇、烃燃料，开拓了生物质制备醇烃液体燃料的新途径。

2.1　醇燃料技术

在水热催化制备乙醇技术方面，中国的研究水平走在了国际前列。近年来中国率先报道了纤维素化学催化法制备乙醇的技术路线（图 1），中国科学院广州能源研究所、中国科学院大连化学物理研究所、中国科技大学、厦门大学等单位在这一领域取得了显著进展。2017 年，张涛院士团队首次报道了纤维素催化转化为乙醇的研究成果，包括了两步法以及一步转化法。两步法使用的催化剂为 0.1Pt-Cu/SiO_2 以及 Cu/SiO_2，乙醇产率约为 30%[41]。一步转化法使用 Mo/Pt/WO_x 催化剂，产率为 43.2%[42]。随后，王野教授团队采用 Pt/ZrO_2 和 H_2WO_4 催化剂实现了纤维素直接加氢制备乙醇的过程，产率达到 32%[43]。此外，傅尧教授团队以及马隆龙研究员团队采用 Ru-WOx/HZSM-5 和 Ru/WOx 催化剂实现了纤维素一锅转化为乙醇，产率为 87.5%[44]，此外，还开发了非贵金属 Ni@C 催化剂和磷酸水溶液的催化体系，将纤维素乙醇产率提升到为 69.1%[45]。

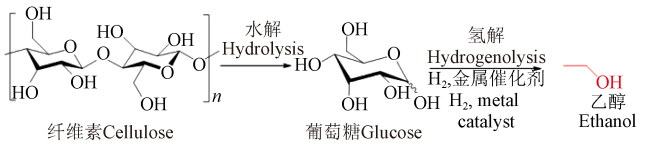

图 1　化学催化法制备纤维素乙醇技术路线

Fig.1　Technical route of cellulosic ethanol by chemical catalysis

对于纤维素原料，生物法在碳利用率方面有 1/3 的碳最终转化为 CO_2（图 2），但是该过程不需要消耗氢气[46]。而化学催化法虽然碳利用率较高，但该过程要消耗大量的氢气，1 mol 的葡萄糖要消耗 6 mol 的氢气。同时，与生物法过程酶催化剂一样，化学催化过程同样面临着金属催化剂的制备成本与寿命问题，这些因素直接关系到转化过程的经济性。虽然在石油化工行业，固体金属催化剂的使用提供了很多成功的经验，但要把这些催化剂从憎水环境应用到亲水环境中也需要进一步研究。此外，纤维素乙醇技术的开发是一个系统工程，从原料收集到预处理，从催化剂的筛选到反应器结构设计，从工艺路线设计到工程化放大，涉及众多的学科和领域，需要系统的技术集成。虽然化学催化法存在以上问题，但相比生物法，化学催化法具有效率高、原料适应性广及与现有化工设备易对接等优势，能克服生物法存在的收率限

制与浓度瓶颈，发展潜力巨大，未来能够成为木质纤维素高效转化制备燃料乙醇的发展新趋势。

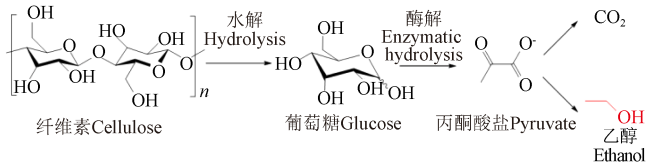

图 2 生物法制备纤维素乙醇技术路线

Fig.2 Technical route of cellulosic ethanol preparation by biological method

2.2 烃燃料技术

前面介绍的醇燃料属于含氧燃料，将其用于内燃机燃料，在使用方面会受到掺混比以及一些副作用的限制。比如乙醇汽油的亲水性强、热值低、蒸发潜热大等缺点，容易导致气阻、存储怕水、保质期短、产生乙酸腐蚀金属等应用问题[47]。因此，近年来由生物质直接或间接通过糖醇等平台分子经水相催化合成脂肪烃和芳烃的研究受到广泛关注。2004 年，美国威斯康辛大学 Dumesic 团队率先提出通过生物质解聚平台分子经过催化转化，制备各类燃料和化学品，被认为是一种绿色高效的合成可再生燃料的新路径，从此拉开了生物质烃类燃料技术的研究序幕[48]。针对葡萄糖到己烷转化过程中原料和中间产物的键能变化计算了整个反应的能量平衡，在完全脱氧的情况下产物能够保留原料中 90%的能量（图 3）[48]。随后，国内外各研究机构相继展开了生物质糖醇水相催化制备 C5/C6 烷烃、C6～C15 长链烷烃和芳烃的研究，包括法国 Cabiac 团队[49]、日本 Tomishige 团队[50]、比利时 Sels 团队[51]、国内的张涛团队[52]和马隆龙团队等[53]。

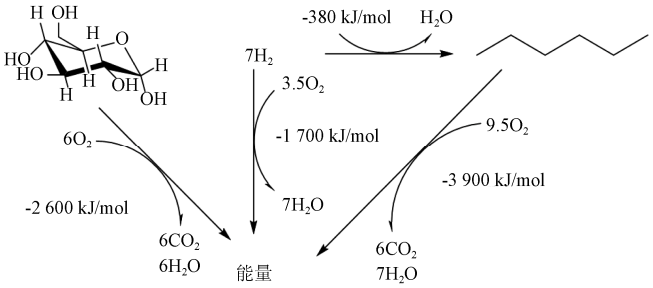

图 3 葡萄糖加氢脱氧制烷烃的能量平衡示意图[48]

Fig.3 Schematic energy balance of glucose hydrodeoxyto to alkane[48]

2010 年，世界上第一套将糖醇转化生物汽油的验证装置在美国威斯康辛州麦迪逊投入运转。该技术整合了水相重整技术与常规的催化加氢技术，主要通过在一系列并联的反应器中使用专有的多相催化剂，以减少生物质原料的氧含量生产生物汽油类产品[54]。该工艺主要的反应温度在 450～573 K 之间，反应压力介于 10～90 bar。在国内，自 2010 起，许多研究机构也陆续展开对生物质水相催化制备烃类燃料的中试试验研究。其中，中国科学院广州能源研究所在辽宁营口研建了以玉米秸秆为原料生产汽油轻烃组分（C5/C6 烷烃）的中试试验系统，该系统的工艺流程图如图 4 所示[55]。

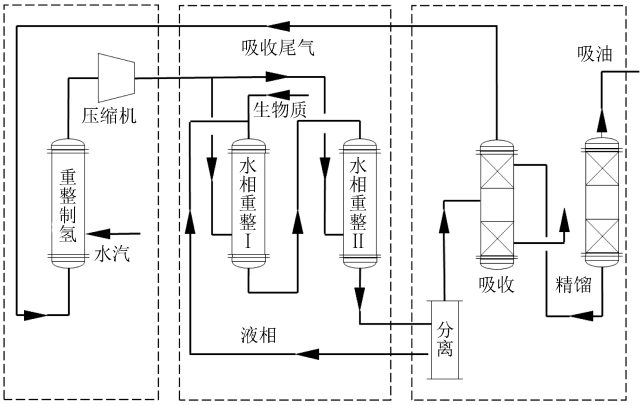

图 4 木质纤维素生物质合成生物汽油的工艺流程[55]

Fig.4 Process flow of synthetic biogasoline from lignocellulosic biomass[55]

由于生物质的结构单元主要是含 5 或 6 个碳，制备的 C5/C6 烷烃在交通燃料方面的使用非常受限。因此，经平台分子催化合成长链烷烃的技术也得到了较快发展[56]：首先通过水热解聚等催化转化工艺，如水解、脱水-水合、汽提或加氢-水解，获得相关的平台分子，主要是五碳糖和六碳糖的脱水产物，如糠醛、5-羟甲基糠醛、乙酰丙酸等。由于这些平台分子只含 5 个或 6 个碳，要合成长碳链的分子必须要进行碳链构建，如：碱催化的羟醛缩合[57]、酸催化的羟烷基化或烷基化以及水相重整/芳构化均可以得到碳链为 C8～C16 的长链含氧化合物[58-59]。最后一步就是脱氧工艺，由于长链含氧化合物含有大量的氧，要通过一系列的脱氧及提质工艺进行油品炼制，脱氧工艺主要包括加氢脱氧、加氢脱羧/脱羰、加氢裂化/异构等[60]。目前发展的有 4 类技术途径：1）羟烷基化/烷基化途径；2）羟醛缩合途径；3）水相重整途径；4）烯烃聚合途径。

表 1 生物质平台分子合成长链烷烃 4 条技术路径的优缺点对比

Table 1 Comparison of the advantages and disadvantages of the four technical paths for the molecular synthesis of long-chain alkane on the biomass platform

序号 No.	技术路径 Technical path	平台分子原料要求 Platform molecular requirements	技术路径优势 Advantages of technical path	技术路径缺点 Disadvantages of technical path
1	羟烷基化途径	纯度、浓度和杂质要求高	碳利用率高、目标烃类产物选择性高、燃料分子结构调控性强	工艺流程长、受限于来源于半纤维素的 2-甲基糠醛、平台分子分离提纯导致能耗高、损耗大
2	羟醛缩合途径	纯度、浓度和杂质要求不高	碳利用率高、目标烃类产物选择性高、燃料分子结构调控性强、纤维素和半纤维素解聚的平台分子可同步利用	工艺流程较长、酸碱消耗大
3	水相重整途径	纯度、浓度和杂质要求不高	工艺流程短、纤维素和半纤维素的平台分子可同步利用	碳利用率低、目标烃类产物选择性低、燃料分子结构调控性差
4	烯烃聚合途径	纯度、浓度和杂质要求高	烯烃聚合后的加氢反应条件温和易实现	工艺流程长、碳利用率较低、目标烃类产物选择性较低、燃料分子结构调控性较差、对烯烃的纯度要求高

中国在生物质水热解聚、平台化合物后续转化、以及航油特性测试等研究领域做了大量研究，中国科学院大连化学物理研究所以糠醛为原料通过 C-C 耦合反应合成了单一族类多环烷烃[61]。中国科学院广州能源研究所成功打通了纤维素类生物质到生物航油（C8～C16 烷烃）的技术路线[62]，于 2015 年率先建立并运行了国际首个秸秆类生物质水相催化制备生物航油的百吨级中试系统，实现了生物航油的连续稳定制取，设计制备的加氢脱氧催化剂寿命已达到 3 500 h，实现 10 t 干基秸秆生物质生产 1 t 生物航油，以东北地区的玉米、高粱秸秆为原料生产出的航油产品质量均达到美国材料与试验协会 ASTM-D7566 标准的全部指标[63]。

目前发展的生物质水热催化制备液体烃类燃料技术，主要是通过来自纤维素的平台化合物（葡萄糖、山梨醇、5-羟甲基糠醛、乙酰丙酸和 γ-戊内酯等），然后针对平台化合物设计化学反应和工艺来制备烃燃料。这种选择性合成方法的目标是降低生物质原料的氧含量以提高能量密度，同时构筑 C-C 键以制备合适碳链长度的生物质基汽油、柴油和航空燃料烃类化合物等。但这种经过平台化合物的选择性转化制备长链烃燃料需要经过多步化学反应，过程比较冗长[64]。因此，简化中间步骤，耦合多步过程缩短工艺流程，将是这种选择性合成方法制备液体燃料所面临的重要挑战。此外，这些技术的实现均涉及到酸水解过程反应设备的腐蚀问题。同时，在加氢脱氧生产烷烃过程需要消耗大量氢气，要获得烃类高品质燃料，必须要投入相当量的氢气才能实现。加氢脱氧这个过程还面临着工程放大的热效应以及催化剂的积碳、水热稳定性等诸多影响金属催化剂寿命的难题，这也是决定工业化是否成功的至关重要因素。

3　裂解液化与生物油提质

快速热解液化是生物质高效制备液体燃料的主要方法之一，通过分散液化-集中提质生产模式，既可实现高品质燃油和高值化学品的制取，又有规模化处理生物质的优势。快速热解液化是指在缺氧气氛下利用热能打断生物质中的部分化学键，使其发生热解构，并在短时间内析出大量有机挥发分，冷凝以得到生物油的过程[65]。生物质热解液化制备生物油技术具有原料适应性强、全组分利用、转化效率高等优点，能够实现分散的低能量密度的农林生物质向高能量密度液体产物的集中转化[66-67]，制得的生物油可经后续酯化改性、加氢脱氧等提质手段转化为液体燃料[68]。

3.1　裂解液化工艺研究

生物质热解液化是一个非常复杂的过程，其热解产物分布及生物油成分受加热温度、升温速率、气相滞留时间、反应压力等因素影响[69]，而不同热解液化工艺对影响因素调控也有很大差别。生物质热解液化工艺的核心是热解反应器，目前常见的热解反应器主要有流化床热解反应器、旋转锥反应器、下降管反应器、烧蚀式反应器、真空反应器与螺旋反应器等[69-70]。

在生物质热裂解制备生物油技术工艺中，流化床以其结构和原理简单，操作方便，在目前的生物质快速热解液化研究中应用最为广泛。流化床反应器属于混合式反应器，主要借助热气流或气固多相流对生物质进行加热，常见的反应器类型有鼓泡流化床反应器、循环流化床反应器、导向管喷动流化床反应器等。加拿大的滑铁卢大学是最早使用流化床进行热裂解液化实验研究的机构，并且一直在该领域保持技术领先；加拿大的 Dynamotive 公司 2007 年在安大略建立了日处理量达到 200 t，生物油产率达 65%～75%的热裂解液化装置；中国科技大学自主研发了自热式流化床热裂解液化装置；随后安徽易能生物能源有限公司采用该技术，建立了 20 kg/h 热裂解液化实验装置，并通过对该技术的不断改进完善研制出产量为 1 000 kg/h 的工业装置[69]。

旋转锥反应器是由荷兰 Twente 大学在 1989—1993 期间研制成功，可极大限度地增加生物油的产量。经过干燥的生物质颗粒与经过预热的载体砂子混合后送入旋转锥底部，在旋转锥的带动下螺旋上升，在上升过程中被迅速加热并裂解。裂解产生的挥发物经过导出管进入旋风分离器分离出炭，然后通过冷凝器凝结成生物油。分离出的炭再次回到预热器燃烧加热原料。在此过程中，传热速率可达 1 000 ℃/s，裂解温度 500 ℃左右，原料颗粒停留时间约 0.5 s，热解气停留时间约 0.3 s，生物油产率为 60%～70%[71]。旋转锥式反应器运行中所需载气量比流化床少得多，这样就可以减少装置的容积，减少冷凝器的负荷从而降低装置的制造成本。

下降管反应器生物质热裂解液化工艺由山东理工大学自主研制开发。2016 年，山东理工大学建立了处理量为 300 kg/h 的套管式陶瓷球热载体加热生物质热裂解液化工业示范装置。其工艺过程为：利用烟气发生炉产生的 800 ℃左右高温烟气加热热载体换热器中的陶瓷球到设定温度，陶瓷球在反应器内与生物质粉混合，在重力作用下沿反应管向下运动，期间生物质颗粒受热发生热裂解反应；热解气和固体产物（炭粉）进入热载体/炭粉分离装置，其中陶瓷球落在倾斜放置的筛板上并流入热载体循环系统；炭粉落入炭粉收集箱中，热解气被罗茨风机引入旋风除尘器进一步除尘，洁净的热解气在气体冷凝系统中急剧冷却得到液体生物油[72]。

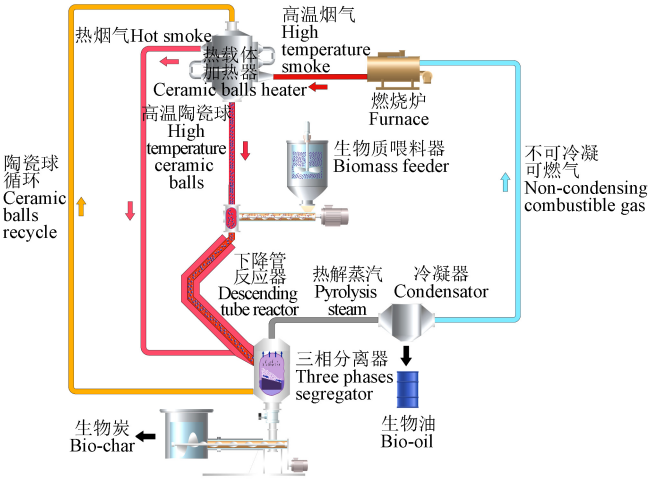

图 5　下降管反应器生物质热裂解液化工艺图

Fig.5　Process diagram of biomass pyrolysis liquefaction of descending tube reactor

3.2 催化热解技术

目前，虽然国内外已建成了多套规模化生物质热解液化装置，但是其商业化路途依然阻碍重重，主要是因为热解生物油品质低，难以直接利用，很难与当前应用平稳接轨。常规热解获得的生物油成分复杂，仅含氧化合物的种类就超过 300 种，包括酸类、醛类、酮类、糖类及酚类低聚物等[73]。生物质催化快速热解技术能够实现生物油组分的在线调控，降低其含氧量。其中，沸石分子筛，尤其是 HZSM-5，凭借其适宜的酸性位强度与分布，具有良好的择形催化效果，在生物质催化热解反应过程中，能够很好地实现部分小分子含氧产物的完全脱氧与芳构化，从而选择性生成以芳香烃为主的烃类产物[74-75]。但是，沸石分子筛等强酸性催化剂在生物质热解过程中存在着催化剂易失活的问题，热解过程中的含氧、氮、磷以及碱/碱土金属等组分容易造成活性位点中毒，不利于脱氧反应的进行[76]；同时，分子筛还存在水热稳定性差等问题，影响催化剂的活性和寿命[77]。在催化脱氧过程中，部分碳元素以 CO_2 和 CO 等气相产物形式流失；同时，脱水反应也显著降低了有机组分中 H/C 比，使得焦炭产率增加，最终，导致液体生物油产率的降低[78]，因此，若将沸石分子筛类强酸型催化剂在快速热解推广应用，还需对其解构和催化热解机理进行进一步研究。

由于强酸性固体催化剂在生物质热解液化过程中的限制，弱酸性或者弱碱性催化剂主导下的催化热解反应体系也成为研究热点。其中，氧化物尤其是金属氧化物，如 Al_2O_3、SiO_2、CaO、MgO、ZnO、ZrO_2、CeO_2 和 TiO_2 等研究较为常见[79-81]，它们在生物质热解过程均呈现出一定的脱氧特性，能够降低生物油中酸类、酮类和醛类等含氧化合物的含量，部分金属氧化物在催化热解过程中具有较高的抗失活特性。此外，金属氧化物催化剂可以同时对生物油品质和产率进行较为平衡的调控[82]。然而，由于金属氧化物种类繁多、具有多种价态属性和酸/碱性，导致对这种相对温和的催化热解的共性认知不足，催化机理尚不明确，而且，由于金属氧化物在催化热解过程中不仅具有催化特性，还有可能作为吸附剂或者反应物等参与到热解过程中，这也使得对其催化机理的研究变得更加复杂，需进一步研究。

近两年，在重点研发计划项目“村镇生物质资源制备清洁能源及高值利用关键技术研究”支持下，山东理工大学与东南大学分别进行了催化型热载体在线催化热解与产物定向调控研究。由于赤泥中含有多种金属氧化物，山东理工大学研究了赤泥催化型陶瓷球热载体的制备工艺，结果表明赤泥中 Al_2O_3 能够促进醇类化合物的生成；Fe_2O_3 能够抑制苯并呋喃类和醛类化合物的生成；CaO 能够促进苯并呋喃类、酮类和酚类化合物的生成，抑制酸类和醛类化合物的生成，通过这些因素的调变，可提高秸秆定向转化效率和产物选择性[83-85]。东南大学开发了廉价的木质素碳基催化剂，木质素炭可促进生物质解聚，酚类化合物的产量明显增加，芳烃收率提升 1 倍，显著提高了生物油品质[86]。在两种催化型热载体研究基础上，山东理工大学开展了基于副产物加热的 6 000 t/a（生物油）下降管式秸秆热解液化集成系统工艺示范工程建设；东南大学与江西金糠新材料科技有限公司合作，开展了 4 000 t/a（生物油）生物质热裂解装置示范工程，实现了固体碳负载催化、热解副产物可燃气燃烧/发电耦联热解自供能技术的热解液化制备高品质液体产品新工艺。

3.3 生物油提质技术

生物质热解液化所得生物油的组成和性质与生物质原料及热裂解工艺条件等密切相关。虽然生物质热解液化工艺与催化快速热解技术等得到广泛研究与发展，但是目前制得的大部分生物油成分仍以含氧化合物为主，含酸量高，存在贮存和热稳定性差、热值低、黏度大等问题。

生物油酯化改性是降低其酸度和腐蚀性，提高稳定性的有效途径。它是指将生物油中的羧酸类化合物通过添加醇类物质转化为高热值的酯类化合物，以此来提升生物油品质。但是单纯添加溶剂不能有效改善生物油含氧量、含水率和热值等燃烧性能，因此有研究通过添加固体酸或固体碱催化剂促进酯化、缩醛等反应进一步提高生物油品质。生物油通常含有 20%～45%的水分，尽管水的存在可以降低生物油的粘度，但对常压下的酯化反应影响较大。在超临界条件下，会减小水对酸酯化的抑制作用，研究表明在超临界条件进行混酸酯化时，比在常压液相中更具有优势，会使得较难酯化的丙烯酸比乙酸易于酯化[69]。

生物油催化加氢是指在高压（10～20 MPa）和存在供氢溶剂的条件下，通过催化剂作用对生物油进行加氢处理，生物油中的氧以 H_2O 或 CO_2 的形式去除，同时可以显著地降低其中的醛、酮、烯等不饱和化合物的含量，抑制缩合、聚合反应的进行，可以显著改善生物油的贮存和热稳定性。目前生物油在催化加氢等改性方面在很多借鉴了石化工艺中的改性技术，然而，由于生物油和石油在理化性质上存在极大差异，粗生物油与石化行业现有的提质工艺匹配性差，其直接改性面临严重困难。对粗生物油直接进行催化加氢，催化剂会发生严重的结焦现象，反应物转化率较低[87]。对生物油族类化合物的气相催化改性研究发现，酮和酸等化合物具有向烃类转化的潜力，而大分子酚类聚合物和糖类则具有明显的向焦炭转化的趋势，并导致催化剂的快速失活[88]。因此，在改性前对生物油中不易转化的组分进行分离和富集，将催化活性较差的大分子酚类聚合物和糖类移除，得到适于后续改性的生物油组分，对于提高改性过程的效率和经济性都是有利的[89]。

水萃取和蒸馏是两种常用的生物油预分离技术。水萃取虽然可以将生物油中的酚类聚合物移除，但仍残余大量的糖类，并且大量水的引入对后续改性过程中催化剂的水热稳定性会造成不利影响[90]。由于生物油具有热敏性，受热非常容易结焦缩合，因此，常规的高温蒸馏也不适于生物油分离。近年来，一些研究将分子蒸馏技术应用于生物油分离。分子蒸馏是一种高效的分离技术，可以在较低温度下将生物油分离为反应活性较高的蒸出馏分和难以转

化的残余馏分[91]。蒸出馏分富集了酮类、酸类和少量单酚类，而裂化活性较差的酚类聚合物和糖类主要保留在残余馏分中[92]。催化活性较高的蒸出馏分可以通过催化裂化或加氢等改性技术制取高品位液体燃料。

4　生物质制备固体燃料

生物质资源虽然具有来源广泛、产量丰富等优点，但是仍受限于产地分散、能量密度低、储运成本高等问题，将村镇生物质废弃物经过压缩制备成型燃料，是推动生物质大规模利用的重要技术之一[93]，固体成型技术解决了生物质原料多样、理化特性差别大、不易大规模利用的缺点。生物质成型燃料经历了技术引进与吸收、设备研发与创新、产业推广与应用，在河南、山东、辽宁、河北、广东、黑龙江等地建成多条生产线，进行了示范推广，已初具规模[94]。但是，由于秸秆难以保证粉碎均匀性，导致流动性差，成型过程电耗高、模具寿命短等问题，目前国内外发展水平均较低。

4.1　固体燃料成型机制

松散的生物质原料在高压条件下，依靠机械与生物质之间及其生物质相互之间摩擦产生的热量或外部加热，使木质素软化，生物质颗粒经过重新排列位置关系、颗粒机械变形和塑性流变等阶段，体积大幅减小，密度显著增大。颗粒之间的作用力主要有液桥力、范德华力和机械摩擦力等。固体燃料成型机理较为复杂，其品质主要受生物质理化特征、成型工艺、压缩条件、模具类型与压缩方式等诸多因素影响[95]。目前，生物质固体燃料压缩成型技术主要有常温湿压成型、热压成型、炭化成型和冷压成型[96]。

秸秆类和木制类是制备固体燃料利用最为广泛的生物质原材料，主要含有纤维素、半纤维素、木质素、淀粉与蛋白质等有机物质，这些组分可以成为天然粘结剂[97]。Kaliyan 等[98]研究发现玉米秸秆颗粒之间是通过固体桥形式粘结的，并且成型过程中较高的温度能够充分发挥水分的作用，激活生物质内部木质素、淀粉、蛋白质与脂肪等物质，使之成为天然粘结剂，可以实现无添加剂的热压成型。

4.2　生物质烘焙成型燃料

生物质本身热值低、均匀性差、吸湿性高、易发生腐烂分解等缺点，不利于工业应用及其储存、运输。近年来，为了进一步改善成型燃料品质，提出了将热化学转化与物理法相结合，通过烘焙预处理后进行压缩成型的方法制备烘焙成型燃料。烘焙是指将生物质秸秆在 200～300 ℃惰性气氛下进行的低温热解预处理，与原料直接干燥处理不同，烘焙过程发生了三大素的部分热分解，脱除了轻质挥发分[99]。秸秆烘焙成型燃料的生产工艺流程图如图 6 所示。

由于烘焙处理可以对生物质颗粒储存、运输、处理等方面的具有直接或间接的有益影响，可以降低成型燃料生产成本[100]。Phanphanich 等[101]研究发现 300 ℃烘焙处理后的松木屑和伐木剩余物粉碎能耗仅为原料粉碎能耗的 1/10 和 1/8，分别减少至 23.9 和 37.6 kW·h/t；Peng 等[102]探究了不同条件对软木类生物质烘焙和成型过程及燃料品质的影响，结果表明当成型条件中模具温度为 170～230 ℃，或调节含水率至 10%，模具温度可降低至 110 ℃，烘焙过程使原料质量损失不超过 30%，成型燃料热值可提高 20%，并伴有良好的疏水性。合适的烘焙预处理不仅能够提高生物质的流化特性，而且增加了物料的易磨性[103]，大幅度减少了系统的粉碎能耗，降低了物料热化学反应活化能，使得烘焙生物质能够更容易发生燃烧或热解反应，有利于物料进一步应用。

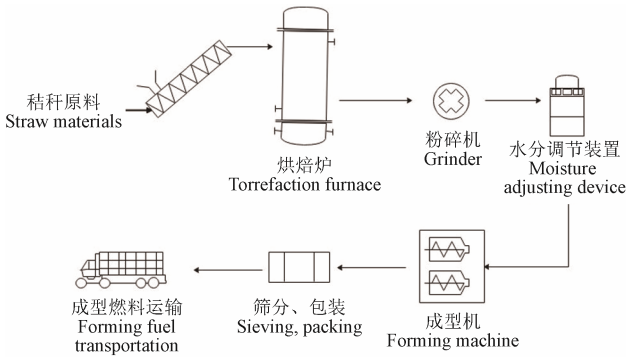

图 6　秸秆烘焙成型燃料生产工艺流程图

Fig.6　Straw torrefied briquette fuel production process flow diagram

生物质经烘焙提质后再制备成型燃料，能够明显改善燃料品质[104-105]，降低了氧碳比和氢碳比，提高了热值和疏水性[106-107]，形成内部疏松多孔的结构，保证了原料的长期储存和含水率调节的要求。同时，烘焙成型燃料的燃烧稳定性也得到了提高。Cao 等[108]研究了烘焙预处理对混合成型对燃料品质的影响，添加蓖麻油饼能够降低烘焙生物质成型能耗，提高颗粒密度；徐嘉昱等[109]对比了烘焙和水热制备棉秆炭的理化特性，分析了两种处理方法制备成型燃料的能耗、松弛密度和燃烧特性等，发现两种方法处理的棉秆炭含量、热值和燃烧热稳定性均有所提高，棉秆烘焙成型燃料的松弛密度减小。

2021 年，河南省科学院在河南省鲁山县，完成了年产 4×10^4 t 以玉米秸秆、花生壳等农业废弃生物质为原料的烘焙成型燃料示范工程建设，其工艺为：原料在 230～250 ℃缺氧条件下烘焙 30 min，降温粉碎后，利用环模颗粒机生产直径 6～8 mm 的烘焙秸秆成型燃料。秸秆烘焙成型燃料具有较高的能量密度和稳定的燃烧特性，可应用于清洁能源集中供热和村镇户用供暖，也可应用于直燃、混燃发电和热电联产。近年来，国家出台一系列政策支持生物质成型燃料供暖、发电等应用，2021 年 1 月国家能源局印发《国家能源局关于因地制宜做好可再生能源供暖工作的通知》，强调因地制宜发展生物质热电联产供暖，合理发展以成型燃料等为燃料的生物质集中供暖[110]。烘焙成型燃料还可以继续进行热解、气化应用，烘焙过程脱除了大部分的氧，减少了焦油含量，使热解生物油成分更均匀[111]，提高了气化过程的能源效率和合成气的质量[112-113]。

基于对以上 4 种生物质资源能源化转化技术分析，其技术成本、技术成熟度、开发难点与应用潜力总结于表 2。

表 2 生物质资源能源化转化技术对比

Table 2 Comparison of the technology of energy conversion of biomass

转化技术 Conversion technology	技术成本 Technical cost	技术成熟度 Technical maturity	开发难点 Development difficulties	应用潜力 Application potential
厌氧消化制备生物天然气 Anaerobic digestion for biogas	成本低	成熟度高	高浓度厌氧发酵稳定控制技术、沼液的处理与资源化利用	潜力大
水热催化制备醇烃燃料 Hydrothermal catalysis for alcohol and hydrocarbon fuel	成本高	成熟度中	平台化合物的分离与提质、高效稳定催化剂的开发	潜力大
裂解液化与生物油提质 Pyrolysis liquefaction and bio-oil upgrading	成本高	成熟度中	生物油品质提升、生物油向烃类燃料、化学品、材料等高效转化	潜力大
生物质制备固体燃料 Biomass for solid fuel production	成本中	成熟度高	原料规模化收储运	潜力大

5 结论与展望

5.1 结 论

生物质资源制备清洁能源是实现能源、环境和经济可持续发展的重要途径，是实现碳中和目标的有效措施之一。生物质资源利用要走综合化、高值化的路径。生物天然气、生物质液体燃料与固体成型燃料作为未来生物质能源化转化发展的主要领域，其规模化应用，至少需要具备以下 3 个基本要素：一是生物质原料在较低成本下的规模化收集与处置；二是高效稳定的转化和提质技术；三是终端燃料产品能够与当前的应用平稳接轨。对于上述生物质规模化应用三要素的第一条，过去的关注度不够，也是目前制约生物质资源规模化利用的前置障碍，任何生物质转化技术如果没有解决原料规模化收集，很难做到规模化发展。第二条高效转化与提质技术是目前研究工作的热点，相继有新的技术方案出现，但无论是传统技术还是新技术都有待应用端的检验。第三条终端产品与当前应用平稳接轨，就是要求生物质清洁能源生产者要提供方便当前用户使用的燃料种类，而不能要求用户做出巨大改变。

1）厌氧消化制备生物天然气技术是目前生物质资源能源化转化技术中应用最为广泛的，其大都是基于大型养殖场建立，可有效解决原料收集问题，而且厌氧消化技术与沼气净化技术相对较为成熟，可直接获得生物天然气，生物天然气通过并入天然气管网或进行发电等，可直接供用户使用，达到了与当前用户平稳接轨的要求。

2）生物质制备液体燃料技术虽然通过分散热解液化-集中提质生产模式可以解决原料收集问题，但仍存在转化过程成本较高、产物分离困难、提质效率低、产品不稳定等问题，很难与当前应用端平稳接轨，因此产业化程度较低。

3）对于生物质制备固体燃料，其成型技术较为成熟，配套炉具的研发也有效解决了成型燃料应用端的问题，目前，其规模化应用最大的难点在于原料的收集与存储。

5.2 展 望

未来生物天然气、生物质液体燃料与固体成型燃料发展的重点方向如下：

1）在生物天然气方面，进行多原料厌氧消化过程生物强化研究，提高厌氧发酵效率，建立高浓度厌氧消化稳定控制系统，提高厌氧发酵稳定性；探究沼气高效脱硫脱碳研究，实现沼气向生物天然气转化过程中 CO_2 原位捕集及再利用；开展沼渣沼液综合利用研究，探究沼液浓缩制备水溶肥等技术，实现沼液养分回收利用，沼渣制备生物有机肥或是炭基肥等，实现保氮固碳。

2）在液体燃料方面，首先考虑原料规模化收集方式和手段，然后探究木质纤维素高效、绿色解聚到呋喃类、糖类等平台化合物，同时实现这些平台化合物的高效分离与提质；在提质过程中，结合多功能催化剂体系，偶合多步反应，缩短工艺流程，进而提高反应效率；同时，在进行液体燃料转化过程中要发展生物质资源高效转化为燃料、化学品、材料等多种产品形式的技术理论体系，以提高产品价值。

3）在固体成型燃料方面，深入研究烘焙秸秆成型过程的传热与粘结机制，实现成型燃料的低能耗和高品质；开发新型高效成型设备与配套炉具，提高成型燃料生产系统的可靠性，推进烘焙、成型与燃烧设备制造标准化、系列化和成套化，降低设备成本；完善生物质原料收储运和成型、燃烧设备标准，形成符合中国国情的从秸秆原料收集、储存、运输成型、配送到高效转化的生物质固体成型燃料产业链。

［参 考 文 献］

[1] 常世彦，康利平. 国际生物质能可持续发展政策及对中国的启示[J]. 农业工程学报，2017，33(11)：1-10.
Chang Shiyan, Kang Liping. Global bioenergy sustainability initiatives and implications for policy making in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(11): 1-10. (in Chinese with English abstract)

[2] Chen J M. Carbon neutrality: Toward a sustainable future[J]. The Innovation, 2021, 2(3): 100127.

[3] 马隆龙. 生物质资源化利用重在“负碳排放”[N]. 中国科学报，[2021-01-06].

[4] 李伟，吴树彪，HamidouBah，等. 沼气工程高效稳定运行技术现状及展望[J]. 农业机械学报，2015，46(7)：187-196.
Li Wei, Wu Shubiao, HamidouBah, et al. Status analysis and development prospect of biogas engineering technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 187-196. (in Chinese with English abstract)

[5] 刘晓风，李东，孙永明. 我国生物燃气高效制备技术进展[J]. 新能源进展，2013，1(1)：38-44.
Liu Xiaofeng, Li Dong, Sun Yongming. The progress of technology on biogas production in China[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2013, 1(1): 38-44. (in Chinese with English abstract)

[6] Li D, Wang Q, Li J, et al. Mesophilic–hydrothermal–thermophilic(M–H–T) digestion of green corn straw[J]. Bioresource Technology, 2016, 202: 25-32.

[7] Li D, Huang X, Wang Q, et al. Kinetics of methane production and hydrolysis in anaerobic digestion of corn stover[J]. Energy, 2016, 102: 1-9.

[8] Theuretzbacher F, Lizasoain J, Lefever C, et al. Steam explosion pretreatment of wheat straw to improve methane yields: Investigation of the degradation kinetics of structural compounds during anaerobic digestion[J]. Bioresource Technology, 2015, 179: 299-305.

[9] Taherdanak M, Zilouei H. Improving biogas production from wheat plant using alkaline pretreatment[J]. Fuel, 2014, 115: 714-719.

[10] Zhu J, Wan C, Li Y. Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(19): 7523-7528.

[11] Wen B, Yuan X, Li Q, et al. Comparison and evaluation of concurrent saccharification and anaerobic digestion of Napier grass after pretreatment by three microbial consortia[J]. Bioresource Technology, 2015, 175: 102-111.

[12] Gao Z, Mori T, Kondo R. The pretreatment of corn stover with Gloeophyllum trabeum KU-41 for enzymatic hydrolysis[J]. Biotechnology for Biofuels, 2012, 5: 28.

[13] Li D, Ran Y, Chen L, et al. Instability diagnosis and syntrophic acetate oxidation during thermophilic digestion of vegetable waste[J]. Water Research, 2018, 139: 263-271.

[14] Li D, Chen L, Liu X, et al. Instability mechanisms and early warning indicators for mesophilic anaerobic digestion of vegetable waste[J]. Bioresource Technology, 2017, 245: 90-97.

[15] Ao T, Chen L, Chen Y, et al. The screening of early warning indicators and microbial community of chicken manure thermophilic digestion at high organic loading rate[J]. Energy, 2021, 224: 120201.

[16] Li D, Sun J, Cao Q, et al. Recovery of unstable digestion of vegetable waste by adding trace elements using the bicarbonate alkalinity to total alkalinity ratio as an early warning indicator[J]. Biodegradation, 2019, 30(1): 87-100.

[17] 吴树彪，李颖，董仁杰，等. 生物强化在厌氧发酵过程中的应用进展[J]. 农业机械学报，2014，45(5)：145-154.
Wu Shubiao, Li Ying, Dong Renjie, et al. Application of bioaugmentation in anerobic desgestion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 145-154. (in Chinese with English abstract)

[18] Kovacs K, Acs N, Kovacs E, et al. Improvement of biogas production by bioaugmentation[J]. Biomed Research International, 2013, 2013: 482653.

[19] Li Y, Yang G, Li L, et al. Bioaugmentation for overloaded anaerobic digestion recovery with acid-tolerant methanogenic enrichment[J]. Waste Management, 2018, 79: 744-751.

[20] Li Y, Li L, Sun Y, et al. Bioaugmentation strategy for enhancing anaerobic digestion of high C/N ratio feedstock with methanogenic enrichment culture[J]. Bioresource Technology, 2018, 261: 188-195.

[21] 王硕. 产氢产乙酸优势菌群构建及其对厌氧消化系统的强化效应[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2009.
Wang Shuo. Construction of Dominant Hydrogen-Producing Acetogens and the Bioaugmentation for Developing the Efficacy of Anaerobic Wastewater Treatment System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)

[22] Peng X, Börner R A, Nges I A, et al. Impact of bioaugmentation on biochemical methane potential for wheat straw with addition of *Clostridium cellulolyticum*[J]. Bioresource Technology, 2014, 152: 567-571.

[23] Li Y, Zhang Y, Sun Y, et al. The performance efficiency of bioaugmentation to prevent anaerobic digestion failure from ammonia and propionate inhibition[J]. Bioresource Technology, 2017, 231: 94-100.

[24] 司哺春，刘凯强，林新宇，等. 直接种间电子传递对缓解厌氧消化抑制效应的研究进展[J]. 农业工程学报，2020，36(24)：227-235.
Si Buchun, Liu Kaiqiang, Lin Xinyu, et al. Research progress of the relief of anaerobic digestion inhibitions based on direct interspecies electron transfer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(24): 227-235. (in Chinese with English abstract)

[25] 蒋滔，韦秀丽，肖璐，等. 玉米秸秆固态和液态厌氧发酵产气性能与微生物种类比较研究[J]. 农业工程学报，2020，36(3)：227-235.
Jiang Tao, Wei Xiuli, Xiao Lu, et al. Comparison of biogas production and microbial species of corn straw in solid-state anaerobic digestion (SS-AD) and liquid anaerobic digestion (L-AD)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(3): 227-235. (in Chinese with English abstract)

[26] 李冰峰，张大雷. 干式厌氧发酵技术现状与国内应用项目简介[J]. 可再生能源，2021，39(3)：294-299.
Li Bingfeng, Zhang Dalei. Research and application progress of dry anaerobic fermentation technology[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(3): 294-299. (in Chinese with English abstract)

[27] 赵鹏，李东，周一民，等. 一株脱硫菌株的分离鉴定及其对硫化物的去除效果验证[J]. 新能源进展，2016，4(6)：425-430.
Zhao Peng, Li Dong, Zhou Yimin, et al. Isolation and identification of a desulfurization strain and its sulfide removal performance[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2016, 4(6): 425-430. (in Chinese with English abstract)

[28] 甄峰，李东，孙永明，等. 沼气高值化利用与净化提纯技术[J]. 环境科学与技术，2012，35(11)：103-108.
Zhen Feng, Li Dong, Sun Yongming, et al. High value application and purification technology of biogas[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(11): 103-108. (in Chinese with English abstract)

[29] Zhu X, Chen L, Chen Y, et al. Effect of H_2 addition on the microbial community structure of a mesophilic anaerobic digestion system[J]. Energy, 2020, 198: 117368.

[30] Zhu X, Chen M, Chen Y, et al. Differences of methanogenesis between mesophilic and thermophilic in situ biogas-upgrading systems by hydrogen addition[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2019, 46(11): 1569-1581.

[31] Zhu X, Cao Q, Chen Y, et al. Effects of mixing and sodium

formate on thermophilic in-situ biogas upgrading by H-2 addition[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 216: 373-381.

[32] Parmar K R, Ross A B. Integration of hydrothermal carbonisation with anaerobic digestion: Opportunities for valorisation of digestate[J]. Energies, 2019, 12(9): 1-17.

[33] Zheng X, Yang Z, Xu X, et al. Characterization and ammonia adsorption of biochar prepared from distillers' grains anaerobic digestion residue with different pyrolysis temperatures[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2018, 93(1): 198-206.

[34] 靳红梅，常志州，叶小梅，等. 江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析[J]. 农业工程学报，2011，27(1)：291-296.
Jin Hongme, Chang Zhizhou, Ye Xiaomei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 291-296. (in Chinese with English abstract)

[35] 隋倩雯，董红敏，朱志平，等. 沼液深度处理技术研究与应用现状[J]. 中国农业科技导报，2011(1)：83-87.
Sui Qianwen, Dong Hongmin, Zhu Zhiping, et al. Present status of biogas effluent treatment technology research and application[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011(1): 83-87. (in Chinese with English abstract)

[36] 杨怀. 养猪场沼液转化液体有机肥及应用研究[D]. 海口：海南大学，2011.
Yang Huai. Study on Turning Biogas Slurry of Pig Farm into the Liquid Organic Fertilizer and Applications[D]. Haikou: Hainan University, 2011. (in Chinese with English abstract)

[37] Dou J, Huang Y, Ren H, et al. Autotrophic, heterotrophic, and mixotrophic nitrogen assimilation for single-cell protein production by two hydrogen-oxidizing bacterial strains[J]. Appl Biochem Biotechnol, 2019, 187(1): 338-351.

[38] 曹莲莹，李凯，李凡，等. 木质纤维素乙醇关键技术研究进展[J]. 生物产业技术，2018，4：25-32.
Cao Lianying, Li Kai, Li Fan, et al. Progress on key technology of lignocellulosic ethanol[J]. Biotechnology & Business, 2018, 4: 25-32. (in Chinese with English abstract)

[39] 陈伦刚，赵聪，张浅，等. 国外生物液体燃料发展和示范工程综述及其启示[J]. 农业工程学报，2017，33(13)：8-15.
Chen Lungang, Zhao Cong, Zhang Qian, et al. Progress of liquid biofuel development and demonstration facilities in foreign countries and its inspiration for China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(13): 8-15. (in Chinese with English abstract)

[40] 陈凯，钱璟，杨智渊，等. 航空生物燃料生产工艺研究进展[J]. 石油化工，2012，41(8)：974-978.
Chen Kai, Qian Jing, Yang Zhiyuan, et al. Advances in aviation biofuel production technology[J]. Petrochemical Technology, 2012, 41(8): 974-978. (in Chinese with English abstract)

[41] Xu G, Wang A, Pang J, et al. Chemocatalytic conversion of cellulosic biomass to methyl glycolate, ethylene glycol, and ethanol[J]. ChemSusChem, 2017, 10(7): 1390-1394.

[42] Yang M, Qi H, Liu F, et al. One-pot production of cellulosic ethanol via tandem catalysis over a multifunctional Mo/Pt/WOx catalyst[J]. Joule, 2019, 3(8): 1937-1948.

[43] Song H, Wang P, Li S, et al. Direct conversion of cellulose into ethanol catalysed by a combination of tungstic acid and zirconia-supported Pt nanoparticles[J]. Chem Commun (Camb), 2019, 55(30): 4303-4306.

[44] Li C, Xu G, Wang C, et al. One-pot chemocatalytic transformation of cellulose to ethanol over Ru-WOx/HZSM-5[J]. Green Chemistry, 2019, 21(9): 2234-2239.

[45] Liu Q, Wang H, Xin H, et al. Selectivecellulose hydrogenolysis to ethanol using Ni@C combined with phosphoric acid catalysts[J]. ChemSusChem, 2019, 12(17): 3977-3987.

[46] 张俊，许超，张宇，等. 纤维素酶降解机理的研究进展[J]. 华南理工大学学报：自然科学版，2019，47(9)：121-130.
Zhang Jun, Xu Chao, Zhang Yu, et al. Research progress on cellulase biodegradation mechanism[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2019, 47(9): 121-130. (in Chinese with English abstract)

[47] 娄志刚. 乙醇汽油及其应用性能研究[D]. 重庆：重庆大学，2008.
Lou Zhigang. Study on Ethanol-Gasoline Blended Fuel and Application Properties[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. (in Chinese with English abstract)

[48] Huber G W, Cortright R D, Dumesic J A. Renewable alkanes by aqueous-phase reforming of biomass-derived oxygenates[J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2004, 43(12): 1549-1551.

[49] Vilcocq L, Koerin R, Cabiac A, et al. New bifunctional catalytic systems for sorbitol transformation into biofuels[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2014, 148/149: 499-508.

[50] Liu S, Tamura M, Nakagawa Y, et al. One-pot conversion of cellulose into n-hexane over the Ir-ReOx/SiO_2 catalyst combined with HZSM-5[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2014, 2(7): 1819-1827.

[51] Beeck B Op de, Dusselier M, Geboers J, et al. Direct catalytic conversion of cellulose to liquid straight-chain alkanes[J]. Energy & Environmental Science, 2015, 8(1): 230-240.

[52] Li G, Li N, Li S, et al. Synthesis of renewable diesel with hydroxyacetone and 2-methyl-furan[J]. Chem Commun (Camb), 2013, 49(51): 5727-5729.

[53] 刘勇. 金属-酸水相催化木质纤维素转化为烃燃料的研究[D]. 广州：中国科学院广州能源研究所，2012.
Liu Yong. Study on Metal-acid Water Phase Catalyzing the Conversion of Lignocellulose into Hydrocarbon fuel[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese with English abstract)

[54] 张利雄，闵恩泽. 从近期美国在生物质炼油化工厂建设的投入思考其在我国的发展[J]. 石油学报（石油加工），2011，27(2)：155-161.
Zhang Lixiong, Min Enze. Some thoughts on development of biorefineries in China through US government’s investment in construction of biorefineries in recent years[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2011, 27(2): 155-161. (in Chinese with English abstract)

[55] 翁育靖. 金属/酸催化剂结构与催化糖醇制生物汽油的性能研究[D]. 广州：中国科学院广州能源研究所，2017.
Weng Yujing. Study on the Structure of Metal/acid Catalyst and Catalytic Glycoalcohol to Biogasoline[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese with English

abstract)

[56] 陈伦刚，张兴华，张琦，等. 木质纤维素解聚平台分子催化合成航油技术的进展[J]. 化工进展，2019，38(3)：1269-1282.
Chen Lungang, Zhang Xinghua, Zhang Qi, et al. Progress in aviation biofuel technology by catalysis synthesis of platform molecules from lignocelluloses depolymerization[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(3): 1269-1282. (in Chinese with English abstract)

[57] Olcay H, Subrahmanyam A V, Xing R, et al. Production of renewable petroleum refinery diesel and jet fuel feedstocks from hemicellulose sugar streams[J]. Energy Environ. Sci., 2013, 6(1): 205-216.

[58] Corma A, Torre O, Renz M. Production of high quality diesel from cellulose and hemicellulose by the sylvan process_ catalysts and process variables[J]. Energy Environ. Sci., 2012, 5(4): 6328-6344.

[59] Corma A, Torre O de la, Renz M, et al. Production of high-quality diesel from biomass waste products[J]. Angew. Chem. Int. Ed., 2011, 50: 2375-2378.

[60] Li G, Li N, Yang J, et al. Synthesis of renewable diesel range alkanes by hydrodeoxygenation of furans over Ni/Hβ under mild conditions[J]. Green Chem., 2014, 16(2): 594-599.

[61] Li G, Li N, Wang Z, et al. Synthesis of high-quality diesel with furfural and 2-methylfuran from hemicellulose[J]. ChemSusChem, 2012, 5(10): 1958-1966.

[62] 张琦，李宇萍，陈伦刚. 百吨/年规模生物质水相合成航油类烃过程的物质与能量转化[J]. 天津大学学报：自然科学与工程技术版，2017，50(1)：13-18.
Zhang Qi, Li Yuping, Chen Lungang, et al. Material and energy conversion of integrated 100, t/a-Scale Bio-Jet fuel-range hydrocarbon production system via aqueous conversion of biomass[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2017, 50(1): 13-18. (in Chinese with English abstract)

[63] 陈伦刚，马隆龙，王铁军，等. 一种秸秆生产交通燃料用油的方法：CN201610304296[P]. 2017-09-29.

[64] 张家仁，邓甜音，刘海超. 油脂和木质纤维素催化转化制备生物液体燃料[J]. 化学进展，2013，25：192-208.
Zhang Jiaren, Deng Tianyin, Liu Haichao. Catalytic production of liquid biofuels from triglyceride feedstocks and lignocellulose[J]. Progress in Chemistry, 2013, 25: 192-208. (in Chinese with English abstract)

[65] Bridgwater A V, Peacocke G V C. Fast pyrolysis processes for biomass[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2000, 4: 1-73.

[66] Kan K, Strezov V, Evans T, et al. Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass: A review of variations in process factors and system structure[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110305.

[67] Sharifzadeh M, Sadeqzadeh M, Guo M, et al. The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 71: 1-80.

[68] Kumar R, Strezov V. Thermochemical production of bio-oil: A review of downstream processing technologies for bio-oil upgrading, production of hydrogen and high value-added products[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110152.

[69] 易维明. 生物质热裂解及合成燃料技术[M]. 北京：化学工业出版社，2020.

[70] 胡二峰，赵立欣，吴娟，等. 生物质热解影响因素及技术研究进展[J]. 农业工程学报，2018，34(14)：212-220.
Hu Erfeng, Zhao Lixin, Wu Juan, et al. Research advance on influence factors and technologies of biomass pyrolysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 212-220. (in Chinese with English abstract)

[71] Janse A M C, Biesheuvel P M, Prins W, et al. A novel interconnected fluidised bed for the combined ash pyrolysis of biomass and combustion of char[J]. Chemical Engineering Journal, 1999, 75: 121-130.

[72] Li Z, Li N, Yi W, et al. Design and operation of a down-tube reactor demonstration plant for biomass fast pyrolysis[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 161: 182-192.

[73] Liu R, Sarker M, Rahman M M, et al. Multi-scale complexities of solid acid catalysts in the catalytic fast pyrolysis of biomass for bio-oil production – A review[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2020, 80: 100852.

[74] Ren X, Cai H, Zhang Q, et al. Evaluation of zeolite catalysts on product distribution during sweet sorghum bagasse catalytic pyrolysis[J]. Energy, 2021, 214: 118799.

[75] Che Q, Yang M, Wang X, et al. Influence of physicochemical properties of metal modified ZSM-5 catalyst on benzene, toluene and xylene production from biomass catalytic pyrolysis[J]. Bioresource Technology, 2019, 278: 248-254.

[76] Mullen C A, Boateng A A. Accumulation of inorganic impurities on HZSM-5 zeolites during catalytic fast pyrolysis of switchgrass[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(48): 17156-17161.

[77] Liu C, Wang H, Karim A M, et al. Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass[J]. Chemical Society Reviews, 2014, 43(22): 7594-7623.

[78] Chen X, Che X, Li S, et al. Recent developments in lignocellulosic biomass catalytic fast pyrolysis: Strategies for the optimization of bio-oil quality and yield[J]. Fuel Processing Technology, 2019, 196: 106180.

[79] Mante O D, Dayton D C, Carpenter J R, et al. Pilot-scale catalytic fast pyrolysis of loblolly pine over γ-Al2O3 catalyst[J]. Fuel, 2018, 214: 569-579.

[80] Mochizuki T, Atong D, Chen S Y, et al. Effect of SiO_2 pore size on catalytic fast pyrolysis of Jatropha residues by using pyrolyzer-GC/MS[J]. Catalysis Communications, 2013, 36: 1-4.

[81] Kaewpengkrow P, Atong D, Sricharoenchaikul V. Catalytic upgrading of pyrolysis vapors from Jatropha wastes using alumina, zirconia and titania based catalysts[J]. Bioresource Technology, 2014, 163: 262-269.

[82] Chen X, Chen Y, Yang H, et al. Catalytic fast pyrolysis of biomass: Selective deoxygenation to balance the quality and yield of bio-oil[J]. Bioresource Technology, 2019, 273: 153-158.

[83] Wang L, Yi W, Zhang A, et al. Catalytic fast pyrolysis of corn stalk for phenols production with solid catalysts[J]. Frontiers in Energy Research, 2019, 7: 1-9.

[84] Wang S, Li Z, Bai X, et al. Catalytic pyrolysis of lignin in a cascade dual-catalyst system of modified red mud and HZSM-5 for aromatic hydrocarbon production[J]. Bioresource Technology, 2019, 278: 66-72.

[85] Wang S, Li Z, Bai X, et al. Catalytic pyrolysis of lignin with red mud derived hierarchical porous catalyst for alkyl-phenols and hydrocarbons production[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 136: 8-17.

[86] 赵勃，吴凯，仲惟鹏，等. 木质素炭与 ZSM-5 联合催化

热解木质素制备芳烃实验研究[J]. 燃料化学学报，2021，49(3)：303-310.
Zhao Bo, Wu Kai, Zhong Weipeng, et al. Experimental study on catalytic pyrolysis of lignin under char and ZSM-5 for preparation of aromatics[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2021, 49(3): 303-310. (in Chinese with English abstract)

[87] Pinho A d R, Almeida M B B de, Mendes F L, et al. Fast pyrolysis oil from pinewood chips co-processing with vacuum gas oil in an FCC unit for second generation fuel production[J]. Fuel, 2017, 188: 462-473.

[88] Zacher A H, Olarte M V, Santosa D M, et al. A review and perspective of recent bio-oil hydrotreating research[J]. Green Chem., 2014, 16(2): 491-515.

[89] Wang S, Cai Q. Bio-oil graded upgrading and utilization based on separation[J]. Biofuels, 2013, 4: 135-137.

[90] Vispute T P, Zhang H, Sanna A, et al. Renewable chemical commodity feedstocks from integrated catalytic processing of pyrolysis oils[J]. Science Foundation in China, 2010, 330: 1222-1227.

[91] Rong W, Cai Q, Zhang F, et al. A review on the upgradingof bio-oil based on separation[J]. Science Foundation in China, 2017, 25(1): 57-80.

[92] Wang S, Gu Y, Liu Q, et al. Separation of bio-oil by molecular distillation[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(5): 738-745.

[93] 何丙辉，曾成. 中国能源作物产业特征及环境效应[J]. 农业环境科学学报，2020，39(4)：882-890.
He Binghui, Zeng Cheng. Industrial characteristics and environmental effects of energy crops in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 882-890. (in Chinese with English abstract)

[94] 张百良. 生物质成型燃料技术与工程化[M]. 北京：科学出版社，2012.

[95] 袁振宏，吴创之，马隆龙. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京：化学工业出版社，2005.

[96] 胡建军，雷廷宙，沈胜强，等. 秸秆颗粒冷态压缩成型过程的比能耗回归分析[J]. 可再生能源，2010，28(1)：29-35.
Hu Jianjun, Lei Tingzhou, Shen Shengqiang, et al. Regression analysis on specific energy consumption in the pelletizing process of straw[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(1): 29-35. (in Chinese with English abstract)

[97] 刘正光. 谷秆固体燃料物理性能及燃烧特性研究[D]. 太原：山西农业大学，2018.
Liu Zhengguang. Study on Physical Properties and Combustion Characteristics of Straw Stalk Solid Fuel[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)

[98] Kaliyan N, Morey R V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(3): 337-359.

[99] 雷廷宙，辛晓菲，李在峰，等. 烘焙预处理制备生物质清洁成型燃料的研究进展[J]. 林产化学与工业，2021，41(2)：110-118.
Lei Tingzhou, Xin Xiaofei, Li Zaifeng, et al. A Review of torrefaction pretreatment for preparation biomass clean briquette fuels[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2021, 41(2): 110-118. (in Chinese with English abstract)

[100] Chen W H, Peng J, Bi X T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 847-866.

[101] Phanphanich M, Mani S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 1246-1253.

[102] Peng J, Bi X, Sokhansanj S, et al. Torrefaction and densification of different species of softwood residues[J]. Fuel, 2013, 111: 411-421.

[103] 徐贵玲，李梦慧，卢平. 烘焙林业废弃物生物质与煤粉不同配比混合颗粒的流化特性[J]. 农业工程学报，2019，35(3)：218-225.
Xu Guiling, Li Menghui, Lu Ping. Fluidization characteristics of torrefied forest waste biomass and pulverized coal mixture particles with different mixing ratios[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(3): 218-225. (in Chinese with English abstract)

[104] Mamvura T A, Danha G. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production[J]. Heliyon, 2020, 6(3): e03531.

[105] Barskov S, Zappi M, Buchireddy P, et al. Torrefaction of biomass: A review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feedstocks[J]. Renewable Energy, 2019, 142: 624-642.

[106] Singh S, Chakraborty J P, Mondal M K. Torrefaction of woody biomass (*Acacia nilotica*): Investigation of fuel and flow properties to study its suitability as a good quality solid fuel[J]. Renewable Energy, 2020, 153: 711-724.

[107] 郝宏蒙，杨海平，刘汝杰，等. 烘培对典型农业秸秆吸水性能的影响[J]. 中国电机工程学报，2013，33(8)：90-94.
Hao Hongmeng, Yang Haiping, Liu Rujie, et al. Influence of torrefaction on typical agricultural straw hydrophilic property[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(8): 90-94. (in Chinese with English abstract)

[108] Cao L, Yuan X, Li H, et al. Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets[J]. Bioresour Technol, 2015, 185: 254-262.

[109] 徐嘉昱，朱广阔，高英，等. 不同预处理温度对棉秆焦炭理化及成型燃烧特性的影响[J]. 太阳能学报，2021，42(4)：46-52.
Xu Jiayu, Zhu Guangkuo, Gao Ying, et al. Effects of temperature on characteristics and combustion behaviors of biochars produced from the hydrothermal carbonization (htc) and torrefaction of cotton stalk[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(4): 46-52. (in Chinese with English abstract)

[110] 国家能源局. 国家能源局关于因地制宜做好可再生能源供暖工作的通知[Z]. nea.gov.cn/2021-02/08/C_139728134.htm [2021-01-27].

[111] Chen W, Wang C, Kumar G, et al. Effect of torrefaction pretreatment on the pyrolysis of rubber wood sawdust analyzed by Py-GC/MS[J]. Bioresour Technol, 2018, 259: 469-473.

[112] 余维金，应浩，王燕杰. 原料烘焙预处理对生物质气化的影响综述[J]. 生物质化学工程，2013，47(6)：41-45.
Yu Weijin, Ying Hao, Wang Yanjie. Influence of torrefaction pretreatment on biomass gasification[J]. Biomass Chemical Engineering, 2013, 47(6): 41-45. (in Chinese with English abstract)

[113] 谢腾，丛宏斌，赵立欣，等. 烘焙对生物质理化特性影响综述与秸秆烘焙研究前景分析[J]. 应用化工，2020，49(11)：2841-2846.
Xie Teng, Cong Hongbin, Zhao Lixin, et al. A review of the effects of torrefaction on biomass physicochemical properties and analysis of research prospects for straw torrefaction[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(11): 2841-2846. (in Chinese with English abstract)

Research status and development prospect of energy and high value utilization of biomass resources

Wang Fang[1], Liu Xiaofeng[2], Chen Lungang[3], Lei Tingzhou[4], Yi Weiming[1※], Li Zhihe[1]

(1. *School of Agricultural Engineering and Food Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255000, *China*; 2. *Chengdu Institute of Biology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Chengdu* 610041, *China*; 3. *Guangzhou Institute of Energy Conversion*, *Chinese Academy of Sciences*, *Guangzhou* 510650, *China*; 4. *Henan Academy of Sciences*, *Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract: Biomass has been the only renewable energy that can be directly converted into fuel. The full utilization of biomass can effectively alleviate energy needs in an eco-friendly way. It is also an important path for China to achieve the goal of "carbon neutrality". Therefore, this study aims to focus mainly on the general goal of clean energy production and high-value utilization for straw-based biomass resources in recent years. A systematic analysis was made to evaluate the comprehensive utilization technology and mode of producing gas, liquid, and solid clean energy in the biological or thermo-chemical way. The development status and research progress were concentrated upon the anaerobic digestion for biogas, hydrothermal catalysis for alcohol and hydrocarbon fuel, pyrolysis liquefaction and bio-oil upgrading, and solid fuel production. Particularly, an attempt was addressed on the prospect of biogas, liquid fuel, and solid fuel. More importantly, no matter what biomass conversion technology was adopted, biomass resources utilization should be comprehensive and of high value. Correspondingly, the large-scale application required at least three basic elements. The first was the scale collection and disposal of biomass raw materials at a low cost. The second was the efficient and stable transformation, as well as quality improvement technology. The last was that the terminal fuel products needed to connect smoothly with the current application. Among them, anaerobic digestion for biogas presented the highest level of industrialization in recent years, due mainly to effectively solving raw materials collection in large breeding farms. It infers that the anaerobic digestion and biogas purification technology were relatively mature during this time. As such, biogas was directly used as a source of fuel, power, and thermal production. By contrast, hydrothermal catalysis for alcohol and hydrocarbon fuel, together with pyrolysis liquefaction for bio-oil was relatively difficult to connect with the current application, due mainly to the high conversion cost, difficult product separation, low-quality improvement efficiency, and unstable products. Therefore, the large-scale development level of the two technologies was relatively low during this time. Nevertheless, the technology of biomass preparation was relatively mature for solid fuels. The research and development of supporting stoves also effectively implemented the application of molding fuel. But the biggest difficulty in the scale application lay in the collection and storage of raw materials. Finally, the development prospects were proposed for the biomass conversion technologies. In terms of biogas, the anaerobic digestion was enhanced by multi-ingredients and bio-strengthen to improve biogas production efficiency. A precise control system should be established for the high concentration anaerobic digestion for better stability. Particularly, the comprehensive utilization of biogas slurry was carried out to realize the nutrient recycling, and biological organic fertilizer, or carbon-based fertilizer for nitrogen and carbon fixation, with emphasis on the efficiency of desulfurization and decarbonization. In terms of liquid fuel, the unpolluted depolymerization can be explored from lignocellulose to platform compounds, especially how to realize the efficient separation and quality improvement of platform compounds. During the quality upgrading process, the multi-step reaction combined catalyzer can be used to shorten the process and improve the reaction efficiency. In addition, the efficient conversion of biomass resources into fuel, chemicals, and materials should be developed synchronously for higher-value products. In terms of solid fuel, the heat transfer and bonding mechanism of torrefaction straw should be studied during the molding process, further to realize the low energy consumption and high quality. New efficient molding and combustion equipment needed to be improved the reliability of solid fuel production, particularly on the standardization, series, and package of torrefaction, molding, and combustion equipment. Consequently, the standard production of biomass collection, storage, and combustion should be improved to form biomass solid fuel industry chain from collection, storage, transportation, molding, and distribution. This research can provide a strong reference for the efficient preparation of clean energy and high-value utilization in rural biomass.

Keywords: biomass; biogas; carbon abatement; liquid fuel; solid fuel