

农作物秸秆热解多联产技术的应用

刘 标¹, 陈应泉¹, 何 涛², 杨海平^{1*}, 王贤华¹, 陈汉平¹

(1. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 武汉天颖环境工程有限公司, 武汉 430074)

摘 要: 农作物秸秆是重要的可再生能源, 开发先进高效的秸秆利用技术, 有助于缓解能源危机, 增加废弃物资源的二次化利用, 降低环境污染。该文介绍了一种新型的农作物秸秆固定床干馏釜气固液联产技术, 并以湖北省天门市杨林办集中供气示范站为商业化运行典型案例进行了经济效益分析。农作物秸秆固定床干馏釜气固液联产技术可以同时产出中等热值(8~12 MJ/m³)的民用燃气和低位发热量达到 28 MJ/kg 的生物质焦炭, 此外还有一定应用潜力的木焦油和木醋液。现有规模商业化运行, 电价和用工成本的大幅上升降低了集中供气示范站的经济效益。

关键词: 秸秆, 农作物, 热解, 集中供气, 经济效益, 案例分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.16.027

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-16-0213-07

刘 标, 陈应泉, 何 涛, 等. 农作物秸秆热解多联产技术的应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 213-219.
Liu Biao, Chen Yingquan, He Tao, et al. Application of cogeneration technology of gas-liquid-solid products pyrolyzed from crop straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 213-219. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

随着新农村建设的全面展开, 农业现代化和城镇化的快速发展, 农村能源短缺和能源利用方式落后的问题日益突显, 农村地区对高效清洁能源的需求十分迫切^[1-2]。生物质能是一种清洁可再生能源, 具有氮、硫含量少和 CO₂ 近零排放的特点, 且在中国农村地区拥有丰富的生物质资源, 因此, 在新农村建设中最大限度地利用自有生物质资源, 减少化石能源的消耗及其造成的环境污染, 可有效增加农民收入、改善农村生活水平和保护农业生态环境, 是新农村建设实现能源、经济、环境协调发展的重要路径^[3-4]。

湖北省作为一个农业大省, 每年仅农作物秸秆就有 5 000 万 t 左右, 其中大约 60% 可作为能源使用^[5]。近年来, 湖北省在新农村建设中, 对农林废弃物的能源化利用技术给予了高度重视, 2009 年和 2010 年湖北省分别计划建设 7 处与 10 处集中供

气示范工程, 2011 年和 2012 年也有多处纳入湖北省绿色能源县的建设。主要农作物秸秆气固液联产技术, 目前已有多处完成工程建设, 进入商业化运行阶段。

本文将介绍农作物秸秆气固液联产技术的基本情况, 并且以湖北省天门市杨林办集中供气示范站为例, 分析其秸秆热解气固液联产特性及其商业化运行的基本情况。

1 农作物秸秆气固液联产技术

1.1 技术原理

如图 1 所示, 在农作物秸秆气固液联产技术中, 首先应将农作物秸秆进行粉碎、干燥和热挤压成型的预处理, 然后将成型原料装入干馏釜中, 在隔绝空气的还原性气氛中, 成型原料吸收从干馏釜外部传入的热量, 进而实现干馏热解并生成生物质炭。

表 1 给出了气固液联产技术主要秸秆原料的工业分析和元素分析。棉秆和油菜秆都属于高挥发分、低灰分类生物质, 有利于收集更多的气体产物以及高品质的生物质炭。农作物秸秆经过粉碎干燥处理后, 其含水率保持在 8%~12%, 通过进一步的热挤压成型后, 得到的成型棒表观密度大于 1 000 kg/m³, 含水率小于 8%。

热解过程中释放的挥发分经过净化装置的冷却、除尘、脱焦、过滤和除酸后, 产出清洁优质燃气、木焦油和木醋液; 优质燃气进入储气柜,

收稿日期: 2012-11-07 修订日期: 2013-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50930006和51021065), 国家支撑计划课题(2011BAD15B05-03)和华中科技大校基金(2011TS077)。作者简介: 刘 标(1989-), 男, 博士生, 主要从事生物质热化学利用研究。武汉 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 430074。

Email: liubiao@126.com

*通信作者: 杨海平(1977-), 女, 副教授, 博士生导师, 主要从事生物质热化学利用研究。湖北省武汉市珞喻路 1037 号 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 430074。Email: yhp2002@163.com;

Tel: 027-87542417-211

经燃气输配系统送达用户；木焦油和木醋液则装桶入库待后续的集中销售或深加工。干馏釜内的生物质炭则通过自然冷却后取出，包装后进入销售，可以用作生物炭进行土壤改良和燃料炭进行能源化利用。

集中供气示范站的设计规模为 1 000~1 500 户，农户日均用气为 1.5 m^3 ，因此供气站每日产气量为 $1 500\sim 2 250 \text{ m}^3$ 。

基于农村的需求，气固液联产当前为间断式生产，升温受热时间为 8~10 h，焦炭冷却时间一般为 48 h；因此要保证每日的供气规模，固定床干馏釜一般为可装载 5 t 物料的大钢罐，并且每个气站需配置 3~4 个干馏釜以保证供气连续性。

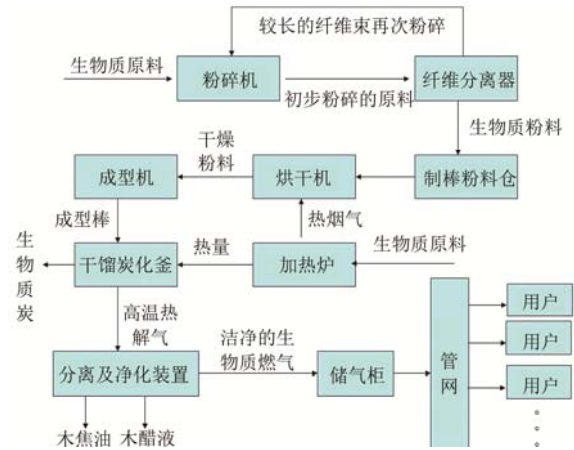


图 1 农作物秸秆气固液联产技术工艺流程图
Fig.1 Process flow of cogeneration technology of gas, liquid and solid product from agricultural straw pyrolysis

表 1 农作物秸秆工业分析和元素分析
Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of crop straws

原料 Feedstock	工业分析 ^{ad} Proximate analysis/%				元素分析 ^{ad} Ultimate analysis/%					低热值 LHV (MJ·kg ⁻¹)
	M	V	A	FC	C	H	N	S	O	
棉秆 Cotton stalk	4.66	74.96	2.59	17.80	45.22	6.34	1.15	0.34	37.70	17.18
油菜秆 Rapeseed stalk	3.87	81.99	4.60	9.53	45.63	5.73	0.45	0.21	39.50	16.31

注：O 由差减计算得到，ad 表示空气干燥基，下同；

Note: The O content was determined by difference, ad means air-dried basis, the same as below.

1.2 热解过程

农作物秸秆经过预处理后，得到较低含水率的成型棒，直径一般为 60~80 mm，长度为 500~800 mm。而后，将成型棒依次堆码在特制铁框中，间开成型棒距离约 5~10 mm，保证挥发分稳定释出，减少系统阻力。用起重装置等相关设备将铁筐放入干馏釜，封装釜盖，保证密封性能。启动点火装置，干馏釜受热升温。前 2~3 h 主要为生物质脱水阶段，温度低于 250℃，大分子连接键开始断裂，部分 CO₂ 和 CO 释出，类似烘焙^[6-7]，此阶段产生的气体不收集，引入加热炉中燃烧，有利于提高燃气及液体产物品质。而后 3~4 h 为主要的产气阶段，温度介于 300~600℃，生物质内部大分子中糖苷键大幅断裂，官能团迅速减少，出现脱羟基、脱羰基、脱羧基、脱甲氧基等，产生 CO₂、CO、CH₄、H₂ 和小分子碳氢化合物气体产物，以及大量的液体产物。最后 2~3 h 为碳化阶段，生物质内部出现脱氢缩聚，生成 3~5 环的芳香化合物，无定形碳逐渐有序化，产生少量燃气及液体油^[8-10]。生物质热解完成后，焦炭在密封干馏釜内冷却至 60~80℃ 后取出。图 2 给出了干馏釜内受热温度的变化曲线，热电偶置于干馏釜中心位置。

干馏釜内部生物质热解释放的挥发分依次进入热交换塔、冷凝塔、洗涤塔、脱酸洗涤塔、气液分离器、过滤塔，实现液体产物与燃气的分离。热

交换塔和洗涤塔是以木醋液为介质的直接混合换热器，冷凝塔是介质为水的间接换热器。经热交换塔和冷凝塔及洗涤塔冷却的液体产物进入油水分离器，根据二者密度差，分离得到焦油和木醋液。脱酸洗涤塔主要喷洒碱性液体，消除气体产物中的 H₂S 等酸性气体。而后，燃气进入气液分离器后，在离心力及惯性力的作用下，进一步脱除燃气中的液体成分。最终气体在过滤塔中进一步去除杂质，经排气输送机送入储气柜。

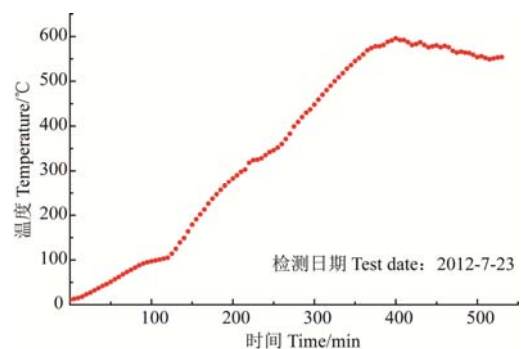


图 2 干馏釜升温曲线
Fig.2 Heating curve of pyrolysis retort

1.3 产物特性

农作物秸秆经过气固液联产技术的转化，1 t 秸秆原料可产 230~310 m³ 燃气，250~300 kg 焦炭，以及 50 kg 左右木焦油和 250 kg 的木醋液。供

气站每一釜原料热解完成后，通过称量焦炭和划取储气柜基线，分别核算气固产物产率；液体产物集中装箱时，计算期间原料耗量和液体产物产量，得到液体产物产率。图 3 给出了不同秸秆原料干馏热解状况下的三态产物产率分布。

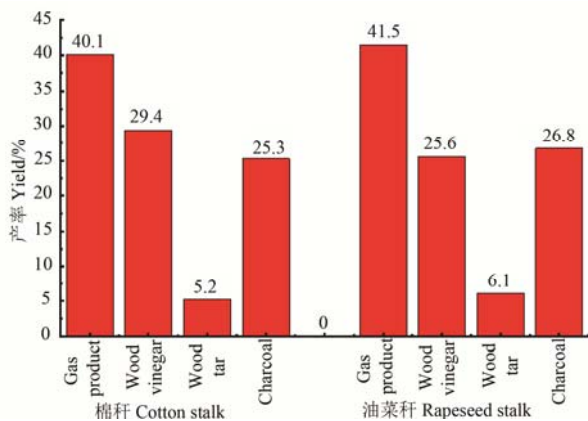


图 3 农作物秸秆热解气固液联产三态产物产率分布
Fig.3 Product yield distribution from different agricultural straws by cogeneration technology

与单一气化技术相比，由于气固液联产技术转化过程中没有空气进入，燃气中氮气含量少^[11]，主要以高热值的氢气、甲烷为主（氢气体积分数可达 25%，甲烷体积分数可达 18%），因此燃气低位热值一般为 8~12 MJ/m³。表 2 给出了天门市杨林办集中供气示范站的燃气检测数据，这些数据表明供气站的燃气基本达到了国家人工煤气的标准^[12]，为优质民用燃气。

表 2 生物质燃气特性
Table 2 Fuel gas properties

项目 Item	国家人工煤 气标准 National standard of manufactured gas	杨林办供气 示范站 Gas supply station in Yanglingban
低热值 LHV/(kJ·m ⁻³)	>4 600	11 706
CO 体积分数 CO volume fraction/%	<20	17.6
O ₂ 体积分数/% O ₂ volume fraction/%	<1	0.8
酸性气体质量体积比 Acid gases content/(mg·m ⁻³)	<20	16
焦油及灰尘质量体积比 Tar and ash content/(mg·m ⁻³)	<50	14.6

生物质炭的产率一般为 25%~30%，热解过程中易于挥发的 H、O 等元素将大部分进入热解气中，而大部分 C 元素则留在生物质炭中。由于物料在高温条件下停留时间比较长，挥发分有充足的时间析出，因此生物质炭的性质接近无烟煤^[13]。表 3 为天门市杨林办集中供气示范站的生物质炭检测数据。

生物质炭孔隙结构发达，比表面积大，拥有超

强的吸附能力，可以制备成高效吸附剂、土壤改良剂，是一种优质的工业原料。一些学者研究了生物质炭对有机污染物的吸附作用及其吸附机理，发现生物质炭的吸附能力与其比表面积大小和有机污染物极性匹配有关^[14-16]。生物质炭加入土壤中，可以增加土壤保湿性，稳定土壤 pH 值，改变土壤微生物群落结构，减少温室气体排放，增加作物产量^[17-19]。

表 3 焦炭基本特性
Table 3 Charcoal properties

项目 Title	符号 Symbol	检测结果 Test results
水分 Moisture/%	M_{ad}	3.00
灰分 Ash/%	A_{ad}	9.16
挥发分 Volatile/%	V_{ad}	11.94
全硫 Sulfur/%	S_{ad}	0.06
氢 Hydrogen/%	H_{ad}	2.894
固定炭 Fixed carbon/%	FC_{ad}	75.9
低热值 LHV/(kJ·kg ⁻¹)	LHV	28227

木焦油为沥青状液体，产率一般为 4.5%~7%，是供气站液态产物中的重质组分，含有大量大分子物质，比如 2 个碳环以上的多环芳烃（如蒽、萘）等，此外还有一些 10 个碳原子的脂肪链烃。目前已有加工厂利用化学方法将木焦油转化为生物柴油，具有较好的应用前景^[20]。同时，木焦油中含有大量酚类物质，可以部分替代苯酚合成酚醛树脂胶黏剂，降低生产成本^[21]。但是目前木焦油的产量还较少，离产业化应用还有较大差距。木醋液为液体产物的轻质组分，含水率超过 85%，有机组分中以乙酸为主，含有少量苯酚。木醋液广泛应用于农林业生产，可以促进植物生长、消菌除臭、堆肥、防止病虫害等^[22-23]。此外，木醋液可与白云石制作低成本环保型融雪剂，有利于解决道路雨雪冰冻问题^[24]。表 4 为气固液联产技术液体产物的 GC/MS 测试结果。测试前，木焦油由丙酮稀释 10 倍，木醋液由乙醚萃取浓缩。测试仪器与方法与陈应泉等对棉秆热解多联产液体油的分析方法一致^[25]。

2 商业化运行案例分析

2.1 示范工程基本情况

湖北省天门市杨林办棉花种植面积 1 700 hm²，水稻面积 2 700 hm²，林地面积 1 500 hm²。年可产棉花秸秆 5 000 t，稻壳 2 000 t，林业废材 1 000 t。实际可利用的原料量达到 8 000 t，而集中示范工程年处理农作物秸秆 2 555 t，原料供应充足。在项目实施区内，方圆 2 km² 内，常住人口 7 千多人，1 500 多户，居住人口集中，能够为输气管网建设和用户燃气供应提供便利条件。

表 4 木醋液和木焦油主要成分 (面积百分比)
Table 4 Composition of wood vinegar and wood tar
determined by GC/MS (Area % of liquid-oil)

类别 Categories	成分 Components	液体产物 Liquid products	
		木焦油 Wood tar	木醋液 Wood Vinegar
酸 Acids	乙酸	1.47	75.58
	4-羟基-3-甲氧基苯甲酸	6.45	
	3,5-二甲氧基-4-羟基苯乙酸	2.65	
酮 Ketone	4-羟基-3,5-二甲氧基苯乙酮	1.08	
醇 Alcohols	4-羟基-3-甲氧基苯乙醇	1	
	3-羟基苯乙醇		2.89
酚 Phenols	苯酚	3.61	10.91
	2-甲基苯酚	2.27	
	4-甲基苯酚	2.73	
	2-甲氧基苯酚	4.93	2.33
	2,4-二甲氧基苯酚	2.19	
	4-乙基苯酚	8.99	
	2,6-二甲氧基苯酚	11.39	5.76
	2-甲氧基-4-甲基苯酚	2.16	
	3-乙基苯酚	2.56	
	2-乙基-6-甲基苯酚	1.44	
	4-乙基-2-甲氧基苯酚	5.1	
	2-甲氧基-4-乙基苯酚	1.6	
	2-甲氧基-4-丙基苯酚	1.37	
	2,6-二甲氧基-4-丙基苯酚	1.25	
2,6-二甲氧基-2-丙基苯酚	5.31		
含氮化 合物 Nitrogen compounds	3,4-二甲苯胺	2.89	
	4-甲氧基苯基-2-羟基亚氨基-乙酰胺	1.26	
	4-丙基联苯	3	

天门市杨林办集中供气示范工程面向 1 500 户当地居民提供生活燃气, 所用主要原料为周边农田产出的棉秆、油菜秆以及木材厂的废弃木屑。表 5 列出了示范工程所用设备, 与湖北省同期建设的其他集中供气示范工程相似, 具有典型代表性。

天门市杨林办集中供气示范工程项目总投资 726.88 万元, 其中湖北省以燃气民生工程扶持资金的方式提供了 260 万元的补助, 地方配套 50 万元, 因此企业实际投资为 416.88 万元, 适合中小型业主。

2.2 经济效益分析

表 6 给出了天门市杨林办集中供气站的收入支出具体项目。供气站年销售收入如下: 年生产生物质燃气 54.75 万 m^3 , 燃气销售单价为 1.2 元/ m^3 , 年收入 65.7 万元; 年生产生物质炭 547.5 t, 每吨售价 3 200 元, 年收入 175.2 万元; 年生产木焦油 91.25 t, 每吨售价 2 000 元, 年销售收入 18.25 万元; 全年收入总计 259.15 万元。供气站年运行成本如下: 年需秸秆 2 555 t, 田间收购单价平均为 200 元/t (包括人力和运输费用, 平均运输距离约为 35 km, 平均运输费用为 50 元/t), 年原料费计 51.1 万元; 供

气站工人为 13 名, 每人每年工资福利平均为 2.4 万元, 全年人工成本为 31.2 万元; 供气站全年耗电 52.56 万 kW·h, 作为民生工程原本可享受 0.7 元/(kW·h) 的补贴电价, 但是由于天门市电力供应紧张, 补贴措施难以到位, 一直支付 1.2~1.6 元的浮动商业电价, 全年电费翻倍而达到 73.58 万元; 其他运行成本包括 31.82 万元的折旧费, 4.76 万元的销售费, 7.14 万元的管理费和 1.8 万元的修理费, 其中折旧费按 20 a 使用期折算, 销售费, 管理费和修理费按供气站现有运营情况计算; 因此项目全年运行成本为 201.40 万元。综上所述, 天门市杨林办集中供气示范工程全年净收入为 57.75 万元。

表 5 天门市杨林办示范工程设备清单
Table 5 Equipment list of Yanglinban gas supply system
station in Tianmen

设备名称 Facilities	单位 Units	数量 Amounts
加热炉	台	1
热解干馏釜	台	4
热交换塔	座	1
气源厂仪表	套	1
冷却塔	座	1
脱酸洗涤塔	座	1
耐酸碱塔器洗涤泵	台	2
气液分离塔	座	2
洗涤塔	座	1
潜水排污泵	台	2
吸附塔	座	2
液封桶	台	5
燃气排风机	台	3
热水循环泵	台	1
冷却循环水管道泵	台	3
各种规格阀门、管件	套	1
气源厂配套	套	1
木醋液焦油导流槽	台	1
储焦油桶	个	1
引风机	台	1
脱水塔	座	1
过滤塔	座	1
安全水封塔	座	1
设备、管路连接材料	台	1
10T 吊装设备 (航车)	台	1
干馏釜装卸料、冷却移动车	台	4
净化系统设备工作平台 (架)	架	1
木屑粉碎机	台	1
棉秆粉碎机	台	2
原料烘干设备	套	1
烘干设备联接材料	套	1
制棒机	台	6
制棒自动线	套	1

天门市杨林办集中供气站项目业主总投资为 416.88 万元, 年净收入为 57.75 万元, 根据相关经济学计算方法^[26], 其动态投资回收期为 13.44 a, 项目 20 a 的寿命期内净现金 (基准利率为 10%) 流量

为 74.74 万元; 虽然本项目运行期间可以保持不亏损, 但是盈利额度相对较少, 对进一步吸引投资业主会有不利影响。

表 6 天门市杨林办示范工程年收入支出表
Table 6 Annual income and expense of Yanglinban gas supply system station

	项目 Title	产量/耗量 Yield/Consumption	单价 Price	总额 Total/ 万元
年收入 Annual income	燃气 Fuel gas	54.7 万 m ³	1.2 元/m ³	65.7
	焦炭 Charcoal	547.5 t	3200 元/t	175.2
	木焦油 Wood tar	91.25 t	2000 元/t	18.25
	总收入 Total revenue			259.15
	原料 Feedstock	2555 t	200 元/t	51.1
年支出 Annual expense	人工 Labour	13 人	2.4 万元/ 人	31.2
	电 Electricity	52.56 万 kW-h	1.4 元 (/kW-h)	73.58
	其他 Other expenses			45.52
	总支出 Total expense			201.4

本项目在进行可行性论证时, 工人福利按照 16 500 元/(人·年)进行计算, 电价则为 0.7 元/kW·h, 因此全年运行成本只有 154.86 万元; 供气站在木焦油和木醋液不能顺利售出时全年净收入也可达到 86.04 万元。然而目前即使木焦油能够顺利售出时, 全年收入也只有 57.75 万元, 可见在现有规模和原料收集范围不变情况下, 人工成本和用电成本的大幅上升是利润降低的主因。

因此耗电过高是固定床干馏釜气固液联产技术的主要缺陷之一, 其中 70% 的耗电量用在固体成型棒的制备过程, 有效降低成型棒的制备耗电量, 是进一步提升气固液联产技术经济效益的主要途径之一。另外, 在耗电量难以迅速降低的现实技术条件下, 0.7 元/度电的政策性补贴电价实施到位, 即国家电网让出一部分利润是快速提升供气站经济效益的有效途径, 这对保护业主的投资积极性非常有必要。

3 结论与展望

农作物秸秆气炭联产技术可以同时产出中等热值(8~12 MJ/m³)的民用燃气和低位发热量达到 25 MJ/kg 的生物质焦炭, 此外还有一定应用潜力的木焦油和木醋液。

本文以天门市杨林办集中供气示范站为案例, 分析了该示范工程的经济效益, 该示范工程在现有规模和生物质运输距离条件下, 有微度利润,

供气站年收入 259.15 万元, 支出 201.4 万元, 全年净收入约为 57.75 万元。但是由于人工成本和用电成本的大幅上升, 使项目运行成本升高, 致使年净收入下降, 项目投资回收期大幅延长, 利润较低。提升气固液联产技术的经济效益, 短期手段是进保证民生补贴电价政策的到位, 另还需加快优化成型技术, 降低成型过程中能耗, 同时研究发展先进高效的生物质热解气、液、固联产技术, 也是提高系统经济性和适用性的必要选择。

[参 考 文 献]

- [1] 陈百明, 张正峰, 陈安宁. 农作物秸秆气化利用技术与商业化经营案例分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 124—128.
Chen Baiming, Zhang Zhengfeng, Chen Anning. Case analysis of crop straw gasification technology commercialization operation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(10): 124—128. (in Chinese with English abstract)
- [2] 胡艳霞, 周连第, 李红, 等. 北京郊区生物质两种气站净产能评估与分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 200—203.
Hu Yanxia, Zhou Liandi, Li Hong, et al. Evaluation and analysis of net energy yield of two bio-energy stations in Beijing suburb[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(8): 200—203. (in Chinese with English abstract)
- [3] 杜谋涛, 袁晓东, 郭和军. 我国生物质秸秆资源利用现状及展望[J]. 能源与环境, 2008(2): 76—77, 79.
- [4] 徒向东. 陕西省生物质能开发利用的前景和对策分析[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2008, 36(S1): 126—127.
Tu Xiangdong. Shanxi Province prospects for the development and utilization of biomass energy and countermeasures[J]. Journal of Shanxi Normal University, 2008, 36(S1): 126—127. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈应泉, 汪翔, 陈汉平, 等. 武汉城市圈农村生物质资源特点及综合利用建议[J]. 可再生能源, 2009, 27(2): 106—109.
Chen Yingquan, Wang Xiang, Chen Hanping, et al. The characteristics and the comprehensive utilization proposal of the rural biomass in Wuhan city circle[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(2): 106—109(in Chinese with English abstract)
- [6] Park S W, Jang C H, Baek K R, et al. Torrefaction and low-temperature carbonization of woody biomass:

- Evaluation of fuel characteristics of the products[J]. *Energy*, 2012, 45(1): 676—685.
- [7] van der Stelt M J C, Gerhauser H, Kiel J H A, et al. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(9): 3748.
- [8] Paradelo F, Pinto F, Ramos A M, et al. Study of the slow batch pyrolysis of mixtures of plastics, tyres and forestry biomass wastes[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, 85(1/2): 392—398.
- [9] Yan R, Yang H, Chin T, et al. Influence of temperature on the distribution of gaseous products from pyrolyzing palm oil wastes[J]. *Combustion and Flame*, 2005, 142(1/2): 24—32.
- [10] Fu P, Yi W, Bai X, et al. Effect of temperature on gas composition and char structural features of pyrolyzed agricultural residues[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(17): 8211—8219.
- [11] 赵洪叶, 魏晓明, 徐冬利. 生物质热解干馏集中供气技术的应用[J]. *农业工程技术: 新能源产业*, 2009(2): 28—31.
- [12] GB/T 13612—2006, 人工煤气国家标准[S].
- [13] 杨金和, 陈祚生, 陶玉灵, 等. 中国煤分类的研究[J]. *煤炭科学技术*, 1980(8): 15—22, 8, 64.
- [14] 张继义, 李金涛, 鲁华涛, 等. 小麦秸秆生物碳质吸附剂从水中吸附硝基苯的机理[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(3): 333—339.
- Zhang Jiayi, Li Jintao, Lu Huatao, et al. Adsorption mechanism of nitrobenzene by biological carbon sorbent prepared from wheat straw in water[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(3): 333—339. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈再明, 陈宝梁, 周丹丹. 水稻秸秆生物碳的结构特征及其对有机污染物的吸附性能[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(1): 9—19.
- Chen Zaiming, Chen Baoliang, Zhou Dandan. Composition and sorption properties of rice-straw derived biochars[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1): 9—19. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈宝梁, 周丹丹, 朱利中, 等. 生物碳质吸附剂对水中有机污染物的吸附作用及机理[J]. *中国科学(B辑:化学)*, 2008, 38(6): 530—537.
- [17] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota - A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812—1836.
- [18] Mašek O, Brownsort P, Cross A, et al. Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar[J]. *Fuel*, 2013, 103(1): 151—155.
- [19] 王娟, 姚槐应. 生物焦对土壤生态系统的影响效应[J]. *生物技术进展*, 2011, 1(4): 266—275.
- Wang Juan, Yao Huaiying. Biochar Effects on Soil Ecosystem: A Review[J]. *Current Biotechnology*, 2011, 1(4): 266—275. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙晋勇, 华光. 木焦油提炼生物质柴油试验获成功[N]. *中国煤炭报*, 2010-01-15, 002.
- [21] 李林. 木焦油部分替代苯酚合成酚醛树脂胶粘剂的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- Li Lin. Preparation of Phenol from Aldehyde Resin Adhesive with a Partial Replacement of Phenol with Wood Tar[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [22] 全顺子, 李宗铁, 俞德天, 等. 应用木醋液防治病害研究[J]. *延边农学院学报*, 1994, 16(2): 113—116, 125.
- Quan Shunzi, Li Zongtie, Yu Detian, et al. Study of the control of plant diseases using the solution of wood vinegar[J]. *Journal of Yanbian Agricultural College*, 1994, 16(2): 113—116, 125. (in Chinese with English abstract)
- [23] 周岭, 蒋恩臣, 张强, 等. 木醋液的精制方法及其在农林生产上的应用[J]. *可再生能源*, 2007, 25(4): 56—60.
- Zhou Ling, Jang Encheng, Zhang Qiang, et al. The wood vinegar refining methods and their application in agricultural and forestry production[J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(4): 56—60. (in Chinese with English abstract)
- [24] 许英梅, 张秋民, 姜慧明, 等. 由木醋液制醋酸钙镁盐类环保型融雪剂研究[J]. *大连理工大学学报*, 2007, 47(4): 494—496.
- Xu Yingmei, Zhang Qiumin, Jiang Huiming, et al. Preparation of environment friendly calcium-magnesium acetate deicers from pyrolytic liquid[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2007, 47(4): 494—496. (in Chinese with English abstract)
- [25] Chen Yingquan, Yang Haiping, Wang Xianhua, et al. Biomass-based pyrolytic polygeneration system on cotton stalk pyrolysis: influence of temperature[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 107(3): 411—418.
- [26] 李定凯, 孙立, 崔远勃. 秸秆气化集中供气系统技术评价[J]. *农业工程学报*, 1999, 1(1): 170—174.
- Li Dingkai, Sun Li, Cui Yuanbo. Technical assessment on rural cooking gas supply system straw gasification technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 1999, 1(1): 170—174. (in Chinese with English abstract)

Application of cogeneration technology of gas-liquid-solid products pyrolyzed from crop straw

Liu Biao¹, Chen Yingquan¹, He Tao², Yang Haiping^{1*}, Wang Xianhua¹, Chen Hanping¹

(1. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Tianying Environmental Engineering Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: To improve the standard of living in rural areas, many distributed gas stations were constructed in Hubei province, and these stations were based on the biomass-polygeneration technology which could produce charcoal, fuel gas and bio-oil simultaneously. This paper presented a theoperational process and the character of products of a typical station. The gas station consisted of a biomass pretreatment system, retort equipment, condensation and purification system, gas storage tank, and pipeline. At first, agricultural straws were dried until their moisture content was below 12%. Subsequently, the dried straws were briquetted, and these briquettes were placed in an orderly manner in the retort equipment. The fuel gas or straws were combusted to supply heat for the pyrolysis process of the briquettes. A complete pyrolysis process would take above 8 hours. At the beginning of 2-3 hours, a large amount of water was formed from external water and bound water when the temperature was controlled below 250°C. At this stage, the gas product consisted of CO₂, CO, and water vapor, and the heat value was rather lower, therefore, these gases would combust. After the gas product was heated about 5~6 hours, the temperature of the retort was up to 600°C, then, the straw briquettes degraded rapidly, and a large amount of volatiles generated which would be removed from the retort equipment to a condensation and purification system. Simultaneously, charcoal was formed and the residue volume was only 30% to 40% of the original briquette because of the released volatiles. At the last 2-3 hours, the retort was retained at 600°C, then the charcoal would be further upgraded and a small amount of liquid product and gaseous products would be generated. The temperature of fresh volatiles out of the retort was up to 450°C, and then these fresh volatiles would cool down to room temperature by condensation and purification. The bio-oil and fuel gas were separated from the volatiles, and the bio-oil was further separated into wood tar and wood vinegar that was stored in the liquid tanks. The fuel gas was stored in a gas storage tank and transferred to users by pipeline. Charcoal was naturally cooled to 60-80°C in a retort and then collected to package and place in storage.

For biomass-polygeneration technology, 1 ton agricultural straws can produce 230-310 m³ of fuel gas, 250-300kg of charcoal, 50 kg of wood tar, and 250 kg of wood vinegar. The main components of fuel gas are CO, CO₂, H₂, CH₄, and other incondensable light hydrocarbons, such as C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, and so on, and its heat value (LHV) reaches to 12 MJ/m³ due to the volume fraction of hydrogen and methane being up to 25% and 18%, respectively. The characteristics of charcoal are similar to anthracite, which has a small volatile content and high fixed carbon, and the heat value (LHV) is around 28 MJ/kg. The porosity of charcoal is well developed, and can be used as an industrial adsorbent and soil conditioner. The yield of wood tar is generally from 4.5% to 7%, and wood tar is composed of a large amount of macromolecules, such as anthracene, naphthalene, and some 10 carbon aliphatic chain hydrocarbon. Wood vinegar has high water content, more than 85%, and the organic component is composed of acetic acid and a small amount of phenol. Meanwhile, this paper analyzed the economic benefits of the typical gas station. It found that the sharp rise of electricity and labor costs reduces the economic benefits of the station.

Key words: straw, crop, pyrolysis, central gas supply system, economic benefits, case analysis

(责任编辑: 刘丽英)