



中科院创新技术破解餐厨垃圾回收难题*

——我国餐厨垃圾油气肥绿色联产技术实现资源综合利用

■ 袁振宏^{1,2**} 罗文^{1,2} 邢涛^{1,2} 甄峰^{1,2} 吕鹏梅^{1,2}

1. 中国科学院广州能源研究所 广州 510650

2. 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室 广州 510640

摘要:我国餐厨垃圾产生量与日俱增,催生了许多环境和食品安全问题。将餐厨垃圾无害化处理生产成能源,是一条高效的利用途径,既可以获得清洁能源又能减少污染排放,是目前研究的热点。本文结合我国餐厨垃圾的特点,通过对餐厨垃圾除杂分离预处理、生物柴油绿色生产、高效厌氧发酵等关键技术进行攻关,优化集成油气肥多模块,建立了餐厨垃圾联产生物柴油、生物燃气和生物有机肥的综合利用技术体系,有力地促进了餐厨垃圾资源化利用产业化发展。

关键词:餐厨垃圾 生物柴油 生物燃气 生物肥料

DOI:10.11842/chips.2016.03.013

《礼记》曰:“夫礼之初,始诸饮食。”我国自古就是饮食大国,具有历史悠久的饮食文化,并发展至今。随着经济的增长和城镇化的发展,我国新兴城市不断涌现、城市规模迅速扩大,人们的收入水平逐渐提升,消费观念不断更新,在餐饮方面的消费支出也愈来愈大。因此在餐饮业高速增长的同时,餐厨垃圾的产生量也与日俱增。据统计,我国餐厨垃圾占城市生活垃圾比重大致为37%—62%,中国主要城市每年产生餐厨垃圾量不低于6000万吨,大中城市垃圾产生量更多,以北京为例,2014年,北京餐厨垃圾产生量达到每日2600多吨***。

一、餐厨垃圾——可变废为宝的资源

餐厨垃圾,俗称泔脚(泔水、漕水),是生活垃圾中最主要的一种,主要来源于家庭、餐饮服务业、企事业单位食堂等产生的食物加工下脚料和食用残余。餐厨垃圾组成成分复杂,油、水分和有机物诸如淀粉、植物纤维、动物蛋白和脂肪类等含量高,且含有大量的病菌微生物和有害物质,易腐烂、变质,若处理不当,会引发食品安全和环境保护的双重隐患。2010年,国务院办公厅发布《国务院办公厅关于加强地沟油整治和

* 该成果荣获2015年度中国科学院科技促进发展奖科技贡献奖二等奖,获奖成员:袁振宏、王忠铭、罗文、甄峰、李惠文、李连华、吕鹏梅、孙永明、孔晓英、朱建旗。

** 袁振宏,中国科学院广州能源研究所研究员,生物质能研究中心首席科学家,可再生能源学会生物质能专委会主任委员,长期从事生物质能关键技术的研发与推广工作,研究方向包括生物柴油、生物燃气、纤维素乙醇、能源微藻等,开发了生物质能源多联产综合生产系统,进行了广泛的生物质原料梯级清洁高值利用的工程应用推广。

*** 数据来源:中国产业信息网,《2016—2022年中国餐厨垃圾处理行业深度调研及未来前景发展报告》。



餐厨废弃物管理的意见》,针对“地沟油”回流餐桌问题,提出“通过开展试点,探索适宜的餐厨废弃物资源化利用和无害化处理技术工艺路线及管理模式,提高餐厨废弃物资源化利用和无害化处理水平”。餐厨垃圾问题逐渐引起人们的关注。随着食品安全问题的曝光和“地沟油”、“垃圾猪”事件频发,国家及社会对餐厨垃圾问题越来越重视。2011年,国家发改委、环境保护部、财政部、住房城乡建设部等部门联合启动首批餐厨废弃物资源化利用和无害化处理试点,拨付专项资金,支持全国首批33个试点城市(区)收集、运输、利用和处理体系建设以及开展多种形式的资源化利用,截止到2015年年末,已有100个城市成为试点。2013年,国家《餐厨垃圾处理技术规范》颁布实施,餐厨垃圾治理将逐渐规范化。

然而,由于政策引导不到位、处理措施不科学、管理不到位等原因,在已经推出的餐厨垃圾资源化利用和无害化处理试点城市中,90%采用的都是厌氧发酵技术,技术路线比较单一,催生了许多环境和食品安全问题,阻碍了餐厨垃圾资源化处理的产业化进程。《“十二五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》指出,“十二五”期间规划建设餐厨垃圾处理设施242座,总处理能力30,215吨/日,餐厨垃圾专项工程投资109亿元,占生活垃圾处理设施总投资的4.1%。目前,国内餐厨垃圾处理量只占餐厨垃圾产生量20%左右,仍具有8.6万吨/日餐厨垃圾处理缺口。^[1]

另一方面,化石能源(煤、石油)消耗导致的环境污染加剧、雾霾天气频发等问题已严重影响了我国社会、经济的可持续发展。餐厨垃圾油脂丰富、有机质含量高,是制备生物柴油和生物燃气的优良原料,每年(以6000万吨计)约可制备生物柴油160万吨、生物燃气50亿立方米,可有效减少对石化能源的依赖、优化能源结构。特别是2015年以来我国经济进入新常态,且我国环境承载力已经达到或接近上限,绿色低碳循环经济新方式势在必行,因此生物质能源化、资源化将是未来的发展主题,也是餐厨垃圾处理的方向。

二、我国科学家对餐厨垃圾资源化利用的探索

针对我国餐厨垃圾的特点及生物能源需求,餐厨

垃圾联产生物柴油、生物燃气和生物有机肥能够更好地实现资源综合利用。但目前该技术主要存在5个问题:第一,杂质分离不彻底;第二,系统能耗高;第三,易造成二次污染;第四,厌氧发酵易酸化;第五,非标设备多,配套性差,难以长期稳定运行。

针对上述问题,中国科学院广州能源研究所依托国家科技计划项目、中科院重点部署项目、广东省科技计划项目等,联合中科元和再生资源技术发展江苏有限公司,以餐厨垃圾油气肥综合利用为指导思路,分别突破预处理、生物柴油、生物燃气与肥料制备等关键技术,优化集成相关设备,建立了以餐厨垃圾为原料的油气肥绿色联产技术体系,提升了我国餐厨垃圾资源化综合利用技术水平及设备生产能力。通过产业化示范和推广应用,有力地促进了餐厨垃圾资源化利用产业化发展。

1. 餐厨垃圾预处理

(1) 发明了餐厨垃圾破碎、分选、分离高效预处理技术与装备

针对我国餐厨垃圾产生源头管理不规范,餐厨垃圾中杂质多,造成预处理难度增加的问题,研发了可富集餐厨垃圾中易腐有机物的高效分选提取技术,通过阶梯式除杂和分步式分选方式,利用水力、机械、风力、磁选等综合方法,提取可发酵有机物,并通过破碎机、精选除杂设备以及固液分离设备的配合,形成餐厨垃圾破碎、分选、固液分离一体化预处理装备。

(2) 研发了厌氧发酵耦合油脂分离工艺

充分利用厌氧发酵过程中微生物和酶对餐厨垃圾固体有机颗粒的连续分解水解作用,促使固相内部油脂释放到水中形成分散油和乳化油;充分利用沼气发酵产生的沼气微气泡,将水中的分散油和乳化油转化为漂浮油;结合厌氧发酵耦合油脂分离一体化反应器,实现沼气发酵与油脂分离的同步进行,依靠集成在厌氧消化反应器内部的除油装置将漂浮油分离,无需增加诸如高温蒸煮罐和微气浮除油罐等独立油脂分离设备,大大简化了工艺和降低设备投资成本,降低系统能耗30%—40%^[2](见图1)。

2. 生物柴油规模化生产技术

创建了以餐饮废油等废弃油脂为原料的生物柴油绿色生产体系,优化集成餐厨垃圾预处理、油脂制备生

物柴油、高浓度厌氧发酵、沼气净化提质、发酵剩余物制肥等先进工艺技术与装备体系，并开发出相应的生物柴油模块化成套设备（见图2），形成国内外第一套全自动控制的餐厨废油—生物柴油模块化生产技术系统，实现了生物柴油制备的绿色、连续、低能耗和模块化。

（1）发明了高性能疏水性催化剂

针对液体酸催化存在的二次污染问题，发明了催化效率高、耐水性强的 Fe/Zn/La 双金属氧化物固体酸催化剂。利用亚铁氰化钾、氯化锌、有机配体叔丁醇、聚乙二醇和氯化镧合成了具有自主知识产权的 Fe/Zn/La 双金属氧化物，形成高性能的 Lewis 酸催化剂^[3]。该催化剂表面具有较好的疏水性，因此催化活性不受副产物水的影响，在水分含量为 10% 时，催化效率仍高达 97%。

（2）研发了以固体催化剂与活塞流反应器为主体的餐厨废油脂制备生物柴油工艺与装置

针对以往釜式反应器间歇反应时间长、生产不连续的缺陷，发明了固体酸催化酯化耦合静态混合活塞流反应器连续制取生物柴油工艺与装置。通过分析反应过程中床层温度、酸值变化规律、物料特性等因素，确定了活塞流反应器结构和设计参数等关键因素，设计了大型的活塞流反应器。通过固体酸催化及活塞流反应器酯交换反应的耦合优化，可以在 20min 快速进行连续转酯化，生物柴油转化率高达 96%—99%，反应时间缩短至常规工艺的 1/4。

（3）实现了低能耗甲醇 / 水实时分离



图1 厌氧发酵装置

针对传统甲醇分离工艺能耗较高的问题，研发了渗透气化膜连续提纯回收甲醇技术^[4]。利用两个薄膜蒸发器分别将酯化过程和酯交换过程分离出的过量甲醇连续蒸发汽化，再利用自主研发的渗透气化膜对气化后的甲醇进行提纯回收，实现低能耗甲醇 / 水实时分离。甲醇回收利用率超过 99%，回收浓度达到 98% 以上。

（4）实现了生物柴油和甘油的连续分离

利用甘油与生物柴油的密度差，发明了由外圆柱和内圆柱、液体分布管及溢流面等主要部件组成的低动力生物柴油 / 甘油分离装置。通过优化内圆柱的内径、高度尺寸、停留时间等重要设计参数，既实现了生物柴油和甘油的连续分离，又保证较短的分离时间，分离效率高达 99% 以上。

（5）提高了生物柴油质量

针对粗生物柴油易裂解氧化、色泽深等问题，开发了生物柴油连续精馏装置。利用闪蒸原理将粗生物柴油中的杂质予以脱除，并将不同含碳量脂肪酸甲酯连续分离，提高了生物柴油质量。

3. 厌氧发酵制备燃气与肥料关键技术

针对餐厨垃圾厌氧发酵营养不均衡、易酸化的问题，研究组通过厌氧消化关键参数的高位运行、失稳预



图2 年产10吨生物柴油小试生产线



警参数的在线实时监测和反馈调控,实现餐厨垃圾始终在较高的有机负荷条件下运行,但又保障厌氧消化不会出现酸化抑制,使反应器的性能发挥到最大。高有机负荷厌氧消化能够将有机负荷提高到 $7\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,实现池容产气率高达 $4.5\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,是常规厌氧消化工艺的3倍。开发了“固体渗滤床+过滤填料床和纤维填料床”的两相三段厌氧反应器,能够显著提高易腐性有机垃圾厌氧消化的处理浓度,最高能从4%提高到40%,池容产沼气率最高能从 $0.8\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 提高到 $2.5\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,而且能够有效避免有机酸对系统的抑制。

4. 开发了高效生物脱硫工艺

研究组筛选得到 *Bacillus marisflavi* 无色硫细菌,经培养驯化后用于生物脱硫系统;对进气流量、吸收液循环量、吸收液溶解氧、温度及 pH 等工艺条件进行考察,最终确定较佳的工艺参数。当进气量为 $0.6\text{m}^3/\text{h}$ 、进气 H_2S 浓度为2340ppm、采用多面空心球为填料、吸收液温度为 26°C 、吸收液溶解氧为 $2.00\text{mg}/\text{L}$ 、吸收液循环量为 $2.0\text{m}^3/\text{h}$ 、进气压力不变的情况下,生物脱硫装置运行10天后,出口 H_2S 的浓度降低到44ppm,相应 H_2S 的去除率为98.1%。工程应用中,脱硫成本降低70%。

研究组还进行了发酵残余物生态处理技术研究。对餐厨垃圾厌氧沼渣的营养成分、重金属成分等进行了检测分析,其总养分和有机质含量均高于有机肥料标准中的相关指标,重金属的含量达到标准中的指标要求。

三、餐厨垃圾油气肥联产技术产业化的效益可观

餐厨垃圾油气肥联产技术可使粗油脂含水率降至0.5%以下;生物柴油转化率达到96%—99%,甲醇回收利用超过99%,生物柴油产品达到国家BD100标准;生物燃气制备实现工程发酵浓度大于12%,中温容积产气率大于 $1.9\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,原料总有机物能源转化率达理论值95%以上,综合技术指标达到了国际领先水平,克服了餐厨垃圾处理成本高、资源化利用率和产品品质低、二次污染不易控制等问题,实现了餐厨垃圾资源化综合利用。尤其在解决食品安全,保护生态环境,调整能源结构及缓解就业压力等方面具有重要作用。

1. 缓解食品安全和环境污染问题

利用餐厨垃圾中废弃油脂转化为生物柴油,可有效杜绝地沟油回流餐桌。该技术每年可减少约60万吨地沟油回流餐桌,有效缓解餐厨垃圾食品安全及环境污染问题。

生物柴油和生物燃气都属于清洁燃料,用于替代石化能源可有效减排二氧化碳、硫化物和氮氧化物等。该技术已在近40座餐厨垃圾油气肥联产、废弃油脂制备生物柴油、有机废弃物制备生物燃气工程中得到推广应用,3年累计减排 CO_2 约320万吨、二氧化硫2000吨、氮氧化物2000吨,有助于减少大气污染,保护生态环境。且沼肥的使用可使每公顷的土地减少600kg碳铵的使用。

2. 缓解就业压力

餐厨垃圾产生量大面广,资源利用市场前景广阔,餐厨垃圾资源化产业涉及收集运输、环保设备与工程、能源及肥料供给与销售等多个行业领域、可提供大量就业岗位与机会,对缓解就业压力具有积极作用。

3. 经济效益显著

餐厨垃圾油气肥联产整体技术应用于长兴县金耀废弃油脂处理有限公司,并建立了餐厨垃圾油气肥绿色联产示范工程,该工程自建成以来共处理餐厨垃圾3.8万吨,共制备生物燃气215.6万立方米,生物柴油1万吨,制备生物质能约1.4万吨标准煤,生物肥料3600吨,2013—2014年新增产值5452万元,新增利税955万元。同时,还应用于与杭州能源环境工程有限公司及其总包建设的多座生物燃气工程,3年新增产值总计约1.92亿元,新增利润约6417万元,纳税846万元。

生物柴油关键技术已在11家企业得到应用,3年累计生物柴油产量44.6万吨,约占全国总产量的25%。2012—2014年3年累计新增产值24.87亿元,新增利税6.29亿元。此外,生物燃气关键技术已在20多座生物燃气工程和多家生物燃气工程建设企业中得到应用(见图3),近3年累计产气1.28亿立方米,带动产值约2.23亿元。

四、思考与建议

虽然近年中国餐厨垃圾油气肥生产技术发展快速,前沿研究和工程技术整体达到国际并行水平,但在生

物柴油固体碱催化工艺、生物柴油产品与副产物甘油的高值化利用, 新型厌氧干发酵、发酵系统余热利用、生物燃气纯化等方面与国外还存在一定的差距。未来还需要重点在原料拓展、新型工艺与核心关键技术、产品高值化利用方面进行技术攻关, 实现上游原料保障, 中游高效制油、气、肥以及下游高值化产品出售的有机贯通, 提升油气肥产业的技术水平与竞争力。



图3 山东民和牧业3 MW 热电联产生物燃气工程

参考文献:

- [1] 斯兰, 薛秀泓. 餐厨垃圾变废为“宝”有赖顶层设计 [N]. 中国改革报, 2014-10-21.
- [2] LI Dong, SUN Yongming, GUO Yanfong, et al. Continuous anaerobic digestion of food waste and design of digester with lipid removal[J]. Environmental Technology, 2013, 34 (13-16):2135-2143.
- [3] YANG Lingmei, LV Pengmei, YUAN Zhenhong, et al. Promoting effect of metal promoters on Fe(II)-Zn-based double metal cyanide complex catalysts for biodiesel synthesis[J]. Advanced Materials Research, 2011 Vols. 236-238 ;3041-3045.
- [4] 祝春芳, 王忠铭, 袁振宏等. 精馏法与渗透汽化膜分离法在甲醇脱水提纯过程中的能耗比较 [J], 可再生能源, 2011, 29(6): 68-71.

CAS Innovative Technology to Break Food Waste Recycling Problem

—Oil Fat Food Waste Green Generation Technology has Comprehensive Utilization of Resources in China

YUAN Zhenhong^{1,2}, LUO Wen^{1,2}, XING Tao^{1,2}, ZHEN Feng^{1,2}, LVPengmei^{1,2}

1.Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650

2.Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640

Abstract: The increasing amount of food waste is accompanied by an increased concern about environmental and food safety. It is a high efficient utilization way that food waste is harmlessly treated to produce clean energy and reduce pollution emissions. It currently becomes a hot research. Based on the characteristics of food waste, pretreatment technologies to separate impurity from food waste, biodiesel production technologies, efficient anaerobic fermentation and other key technology were researched. It established a green technology system of joint production of biodiesel, biogas and bioorganic fertilizer with food waste as raw material. It effectively promotes the industrial development of food waste utilization.

Keywords: food waste; biodiesel; biogas; biofertilizer

(责任编辑:唐佩佩 何岸波;责任译审:龚宇)