

# 城市生活垃圾的能源化综合利用及产业化模式展望

何 皓\*, 王旻烜, 张 佳, 雪 晶, 李建忠

(中国石化石油天然气股份有限公司石油化工研究院, 北京 102206)

**摘要:** 阐述了城市生活垃圾进行能源化综合利用的必要性, 重点介绍了垃圾热裂解气化技术和垃圾制合成气产燃料乙醇等生物燃料的研发及应用进展, 提出了城市生活垃圾能源化综合利用关键的环节及产业化模式, 并对产业化前景进行了展望。

**关键词:** 城市生活垃圾; 能源化综合利用; 热裂解气化; 合成气; 生物燃料; 乙醇

中图分类号: X799.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)06-0006-09

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.06.002

## Application progress in comprehensive utilization of municipal solid wastes and prospects on its industrialization pattern

HE Hao\*, WANG Min-xuan, ZHANG Jia, XUE Jing, LI Jian-zhong

(PetroChina Petrochemical Research Institute, Beijing 102206, China)

**Abstract:** This review describes the feasibility and necessity to generate energy by comprehensive utilization of municipal solid wastes (MSW), and introduces mainly the latest progress in the development and application of two process technologies. One is the pyrolysis gasification technology targeting to generate energy from MSW, the other one is that biofuels such as ethanol are produced via syngas that is synthesized from MSW by Fischer Tropsch process and anaerobic fermentations. The industrialization pattern and the critical aspects for energy-oriented utilization from MSW are proposed. Prospects on the industrialization pattern are also described.

**Key words:** municipal solid waste; comprehensive utilization; pyrolysis-gasification; syngas; biofuels; ethanol

随着我国城市化进程的加速, 城市生活垃圾产生量也急剧增加, 已成为污染环境、影响人民健康的突出社会问题。目前我国城市生活垃圾中有机垃圾占 25%~30%<sup>[1]</sup>, 尤其大城市生活垃圾中有机生物物质废物比例较大, 如按照质量算, 生活垃圾中 75% 可以得到分门别类再利用。根据统计<sup>[2]</sup>, 2017 年全国生活垃圾清运量 21 520.9 万 t, 无害化处理量达到 21 034.2 万 t, 其中卫生填埋 12 037.6 万 t, 堆肥 533.2 万 t, 焚烧 8 463.3 万 t, 卫生填埋的比例最大, 达到 56% 左右, 这无疑为生活垃圾的能源化利用提供了丰富稳定的原料供应。本文对城市生活垃圾的能源化利用进展进行综述, 重点介绍垃圾热裂解气化技术和垃圾制合成气产生物燃料的技术及应用进展, 并对产业化模式进行展望。

## 1 城市生活垃圾现有处理模式分析

城市生活垃圾处理方式多种多样, 目前广泛应用的处理方式包括填埋、堆肥和焚烧。

### 1.1 填埋处理

填埋处理是最常用的处理方式, 需选择合适的天然场所或人工改造场所, 将垃圾用土层覆盖起来。该技术最大优点是工艺简单、成本低、能处置多种类型的生活垃圾, 因而被广泛使用。填埋处理也能为垃圾能源化利用创造条件, 一般处理 1 t 垃圾会产生 75 m<sup>3</sup> 的填埋气(甲烷质量分数约 55%, 下同), 折合甲烷含量 97% 的天然气约 42 m<sup>3</sup>, 可用于直接燃烧发电, 也可以压缩制成 LNG 或直接并入管网输送<sup>[3]</sup>。但填埋处理缺点也非常明显, 该方法占据大

收稿日期: 2018-10-04; 修回日期: 2019-04-23

基金项目: 中国石化石油天然气股份有限公司重大科技专项“航空生物燃料生产成套技术研究开发与工业应用”资助(2016A-1302)

作者简介: 何皓(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为生物燃料及生物基化学品生产技术, 通讯联系人, 010-80165449, hehao010@petrochina.com.cn。

量土地,选址和资源回收困难,场地处理和防渗施工难以达到环保要求。目前我国大部分垃圾处理采用简易填埋或受控填埋,虽建立了部分环保措施,但仍然达不到环保标准。卫生填埋严格执行环保标准的填埋场在我国还很少。

### 1.2 堆肥处理

堆肥处理是利用微生物作用,使垃圾中有机质发生生物化学反应,形成一种类似腐殖质土壤的物质,用作种植肥料。该工艺对温度要求较高,一般为40~60℃,分为简易高温堆肥和机械化高温堆肥,前者工程规模小,对环境污染大;后者有较齐全的环保措施,但运行成本较高。另外,堆肥处理还有以下缺陷:城市生活垃圾没有完全分类,存在较多的杂质,无法实现减量化处理,同时造成堆肥质量不高;其次,因为垃圾中所含的重金属未处理,致使肥料中重金属超量<sup>[4]</sup>。

### 1.3 垃圾焚烧

垃圾焚烧是将生活垃圾在专用锅炉中焚烧,产生的热量用于发电或直接利用。焚烧处理垃圾减量效果明显,处理后一般可减容80%~90%,并且占地面积小,选址灵活,可在市区建设,是许多发达国家主要的垃圾处理技术。在欧美、日本等国家和地区,城市垃圾经焚烧处理比例达到50%~70%,部分国家甚至超过90%<sup>[5]</sup>。但该处理法主要问题是会产生毒性极强的致癌物质,如二噁英、氯化氢和氰化氢等,造成环境二次污染。研究发现,每焚烧1 kg生活垃圾将产生二噁英11~255 ngTEQ,其中塑料类垃圾焚烧高达370 ngTEQ,同时产生多环芳烃195.4~465.3 mg,明显高于1 kg煤、1 kg石油燃烧所产生的同类物质(每燃烧1 kg煤产生苯并芘10 mg,每燃烧1 kg石油产生苯并芘40 mg),并且焚烧灰烬中的有毒有害物质更多、更难处理。此外,为防止二次

污染,常规垃圾电站采用了规模庞大的尾气处理设备,投资和运行费用大幅度增加,一般占总投资费用的一半左右,直接影响了垃圾电站的经济效益和发展<sup>[6]</sup>。

应该看到,随着我国经济社会快速发展,城市生活垃圾中有机垃圾所占比重逐步提高,垃圾组分正在发生较大变化,可燃部分日益增加,垃圾热值不断提高<sup>[5]</sup>,理论上为生活垃圾的能源化利用创造了条件。

## 2 有机生活垃圾能源化利用技术趋势

### 2.1 垃圾热裂解气化技术

垃圾热裂解是指在无氧或缺氧气氛下,利用高温使生活垃圾有机组分发生裂解,脱出挥发性物质并形成固体焦炭的过程,主要产物为热解油和固体炭,气体产率相对较低。而气化是反应物在还原性气氛下与气化剂发生反应,生成可燃气为主的热转化过程,气化剂主要包括空气、富氧气体、水蒸气、二氧化碳等。在实际过程中,热解、气化往往同时存在于反应过程中。

垃圾热裂解气化技术与垃圾焚烧同属于热处置技术,但却是两个完全不同的热化学转化过程,具有各自的特点,如表1所示。但从垃圾无害化、资源化、能源化利用角度两相比较,热裂解气化具有诸多优势。热裂解气化可以将生活垃圾转化为成分较为稳定的气、液、固3种类型产品,或直接利用燃烧产热或产热发电,产品形式灵活丰富,可有效提高装置运行经济性;从污染物排放角度,由于直接焚烧的不充分性所引起的二次污染,特别是二噁英的排放问题,制约着该技术的广泛应用<sup>[7]</sup>,而热裂解气化过程是在贫氧或缺氧气氛下进行,从原理上减少了二噁英的生成,同时大部分重金属在热裂解气化过程中溶入灰渣,减少了排放量<sup>[6]</sup>。

表1 垃圾热裂解气化与垃圾焚烧技术特点比较

对比项	技术名称	
	垃圾焚烧	垃圾热裂解气化
作用机理	利用焚烧物本身热值	利用有机物的热不稳定性,使之裂解
反应过程	足氧条件下固态非均相燃烧,放热过程	绝氧或缺氧燃烧后再进行含氧气化,吸热过程
主要产物	二氧化碳、氮氧化物、水及灰渣	气态低分子化合物:氢气、甲烷、一氧化碳;液态低分子化合物:甲醇、丙酮、醋酸、乙醛及焦油、溶剂油等;固体产物:焦炭或炭黑
产品形式	热、电	可燃性气体、燃料油和炭黑;热、电
适用范围	热值高、水分含量较低的城市生活垃圾	能处理含水量高达60%的固体废弃物,有机垃圾适用性最强
二次污染	二噁英、氯化氢和氰化氢等有毒致癌物质,固体颗粒物、重金属及其化合物成分残留	大部分物质可以回收利用,可降低二噁英的生成量,并减少飞灰排放量

在欧美和日本等一些发达国家,热裂解气化技术的研究已经达到一定高度,尤其自 20 世纪 70 年代以来,西方国家经济生活水平不断提高使得城市生活垃圾中有机物含量越来越多,其中纸张、木质纤维、塑料等可燃成分比例有了较大提高,垃圾热值日益增加,西欧国家垃圾平均热值达  $7\ 500\ \text{kJ/kg}$ <sup>[8]</sup>,已相当于褐煤发热量,为垃圾热裂解气化技术的工业化应用创造了条件<sup>[9-12]</sup>。目前,生活垃圾热裂解气化技术的研发应用目标主要有两类<sup>[8]</sup>:一是以美国为代表,以回收贮存性能源(可燃性气体、燃料油和炭黑)为目标;另一个是以日本、欧洲为代表,以减少焚烧所造成的二次污染和垃圾减量为主要目的,实现垃圾无公害化处理。

以日本为例,其垃圾热裂解气化技术主要是通过热裂解气化熔融炉产生高温蒸汽发电,已建成多座生活垃圾直接气化熔融焚烧炉<sup>[13]</sup>,例如藤泽市城市垃圾发电厂、界市垃圾焚烧发电厂、东京墨田垃圾发电厂,其热裂解气化熔融炉单台处理量分别达到 130、230、600 t/d<sup>[14]</sup>。该技术工艺流程主要分为干燥、裂解、燃烧和熔融几个阶段,生活垃圾在干燥段(约  $300^\circ\text{C}$ )受热蒸发掉水分,随后进入第一燃烧室,即热裂解段( $600\sim 800^\circ\text{C}$ ),在缺氧气氛下使有机物热裂解转化为可燃性气体,然后导入二次燃烧室,即燃烧和熔融段( $1\ 000\sim 1\ 800^\circ\text{C}$ ),供氧充足条件下进一步燃烧,产生高温烟气用于加热蒸汽进行发电。同时,高温焚烧将大部分飞灰和炉渣熔融后,经水骤冷后形成玻璃体,将重金属等有害物质固化,垃圾减量明显,灰渣可以直接填埋处理或作为建材加以利用。目前我国一些地区垃圾热裂解气化技术已经投入使用,取得了不错的垃圾处理效果,并且实现了技术及设备出口<sup>[15]</sup>。

## 2.2 垃圾气化制合成气产生物燃料技术

合成气是以  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$  为主要组分的混合气体,以其为原料生产燃料乙醇等液体生物燃料的技术近年来研究较多,并取得了一些进展。合成气来源非常广泛,包括煤、油页岩、焦油砂、重残渣、钢厂工业废气等<sup>[16]</sup>。另外,来源和数量都很广泛的生物质、有机垃圾是一种低含硫量、比煤更易气化的合成气资源。

城市生活垃圾经有效分类后,其中的有机垃圾可以在高温下转化为合成气,然后经过费托合成(Fischer-Tropsch)或生物化学转化制备乙醇、甲醇及汽油、柴油、航空煤油和 LPG 等液体燃料产品。

### 2.2.1 垃圾气化制合成气

该过程是利用空气中的氧气或含氧物质等作为气化剂,将生活垃圾中含碳氢化合物转化为小分子可燃气体。在此过程中,还伴随有碳与水蒸气的反应以及碳与氢的反应,得到的气体由  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、甲烷、乙烷以及焦油、焦炭和灰尘等组成。

不同于垃圾热裂解气化技术,以生产合成气为目的的生物质定向气化,与以可燃气体为主产物,用于供热和发电为目的的常规气化有着本质区别,即它不是以热值为追求目标,而是要使有机物尽可能多地转化为富含  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  的混合气体以满足后续转化工艺要求,减少无用气体和碳氢化合物,并降低对转化工艺不利的焦油、焦炭、硫和酸性气体等物质的生成量,减轻转化难度。因而,此技术路线的关键步骤是合成气净化和组分调变过程。

粗合成气经热交换冷却后,过滤袋除灰后在气体的露点温度下进行两级水洗,主要除去  $\text{HCl}$ 、 $\text{NH}_3$ 、汞以及剩余的灰炆,同时水中含有的  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  在酸性环境下变为  $\text{FeS}$  沉淀被除掉。在水洗过程中可以向水中加入  $\text{NaOH}$  调节其 pH。水洗后,进行气体重整,其目的是将气体中碳氢化合物(如烃类气体和焦油等)催化裂解为有用气体,并除去硫化氢等其他有害气体。

经过重整后气体纯度虽然达到了要求,但  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  三者之间的比例一般还不能符合下一步费托(F-T)合成的要求,而且通常是  $\text{H}_2$  不足, $\text{CO}_2$  含量过高。目前主要采用水煤气变换制氢、重整制氢和脱  $\text{CO}_2$  等调变工艺<sup>[17]</sup>,使  $\text{H}_2/(2\text{CO}+3\text{CO}_2)$  约等于 1.05。

### 2.2.2 F-T 合成制生物燃料

F-T 合成反应是  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  在高温、高压条件下,催化反应生成包括从  $\text{C}_1\sim\text{C}_{30}$  的各种烯烃、烷烃以及氧化物的复杂反应过程。F-T 反应机理高度复杂<sup>[18]</sup>,产物烃的生成及其链增长的基本过程为:反应引发;链增长反应与链终止反应(从催化剂表面脱附);二次反应(加氢、加氢分解)。主反应是生成直链烷烃和 1-烯烃,副反应是生成甲醇、乙醇等醇及醛等含氧有机化合物,并伴随有水煤气变换反应,以及可能会发生的析碳反应则会引起催化剂积炭,详见表 2。

由于 F-T 合成反应的产物分布遵循 ASF (Anderson-Schulz-Flory) 分布规律,产物分布宽,种类繁多,难以选择性地合成某一油品,但当控制反应条件,选取合适催化剂和反应器时,可以使链增长率

表2 费托合成中的主要反应<sup>[19]</sup>

反应类型	反应方程式
烷烃的生成	$(2n+1) H_2 + nCO \rightarrow C_n H_{2n+2} + nH_2O$ $(n+1) H_2 + 2nCO \rightarrow C_n H_{2n+2} + nCO_2$
烯烃的生成	$(2n+1) H_2 + nCO \rightarrow C_n H_{2n} + nH_2O$ $nH_2 + 2nCO \rightarrow C_n H_{2n} + nCO_2$
醇类的生成	$2nH_2 + nCO \rightarrow C_n H_{2n+1} OH + nH_2O$ $(n+1) H_2 + (2n-1) CO \rightarrow C_n H_{2n+1} OH + (n-1) CO_2$
醛类的生成	$(n+1) CO + (2n+1) H_2 \rightarrow C_n H_{2n+1} COH + nH_2O$ $(2n+1) CO + (n+1) H_2 \rightarrow C_n H_{2n+1} COH + nH_2O$
水煤气变换反应	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$
积炭反应	$2CO \rightarrow C + CO_2$

$\alpha$  达到 0.9 以上, 选择性合成重质烃组分, 然后再经过加氢精制, 得到汽柴油、航空煤油、石脑油等产品, 这些产物中几乎不含硫化物和氮化物, 是非常洁净的燃料。

与 F-T 合成法制烃类燃料略有不同的是, F-T 法制乙醇需要高选择性地使碳链增长过程停止在  $C_2$  这一步, 而目前从合成气出发, 无论是生成烃类, 还是生成醇类, 高选择性地生成  $C_2$  物种(乙烷或者乙醇) 仍然具有相当难度, 都没有实现工业化过程<sup>[20]</sup>。

国内外对 F-T 法制烃类燃料及乙醇催化剂的选择、制备和应用以及催化剂助剂的选择等方面进行了研究, 主要集中在钴(Co)系催化剂(K-Mo-Co/活性炭催化剂、CuCoMn 催化剂、 $Mo_2-Co_2-K$  硫化钼基催化剂等)、铁(Fe)系催化剂(Cu-Zn-Fe/K 固体催化剂)、铑(Rh)系催化剂和钌(Ru)系催化剂。目前商业化和半商业化的 F-T 合成均使用钴系催化剂, 其催化活性较高, 寿命较长, 但铁系催化剂价格低廉, 成本最低, 操作弹性大, 仍是研发的重点之一, 而最新的研究工作则是针对铑系和钌系催化材料, 但成本十分昂贵, 限制了研发工作的开展, 目前尚不能进行商业应用。

在合成过程与工艺条件优化方面, 研究集中在催化剂用量、合成条件(温度、压力和空速)等上面。以乙醇为例, 目的在于提高乙醇等低碳醇合成过程的单程转化率、合成气的选择性和醇产率<sup>[21]</sup>。目前, 乙醇的选择性可以达到 75% 以上, 乙醇产率可以达到 13%~18% 以上, 可以实现 1 000 h 以上的连续运转<sup>[22]</sup>。

### 2.2.3 合成气厌氧发酵制燃料乙醇

微生物厌氧发酵法是利用能代谢合成气的微生物在厌氧条件下发酵生产乙醇的过程。自 20 世纪 80 年代开始, 研究者陆续在动物粪便<sup>[23-24]</sup>、下水道

污泥<sup>[25]</sup>、煤浆<sup>[25]</sup>、农业泻湖<sup>[26]</sup>等物质中发现了一些能够利用合成气生产乙醇的微生物, 如表 3 所示。这些菌种都是中温厌氧菌, 培养温度在 37~40℃, 最适合 pH 在 5.8~7.0 之间, 能够耐受高浓度  $CO_2$ 、 $NO_x$ 、 $SO_x$  等杂质组分, 通过乙酰辅酶(Acetyl-CoA) 代谢途径(也称为 Wood-Ljungdahl 途径, 如图 1 所示) 利用  $CO$ 、 $CO_2$  和  $H_2$  发酵产生有机酸和醇。

表3 部分菌株发酵合成气产乙醇比较<sup>[25, 27-30]</sup>

菌种	最佳培养温度/℃	最佳 pH	终产物	乙醇产量/(g·L <sup>-1</sup> )	培养周期/h
<i>Clostridium autoethanogenum</i>	37	5.8~6.0	乙酸、乙醇	2.07	96
<i>Clostridium ljungdahlii</i>	37	6.0	乙酸、乙醇	48; 11.0~12.0	—; 120
<i>Clostridium carboxidivorans</i> P7	38	6.2	乙酸、乙醇、丁醇、丁酸	2.6; 1.6	100; 240
<i>Clostridium ragsdalei</i> P11	38	5.9	乙酸、乙醇、丁醇、丁酸	24.57; 8.63	1416; 240

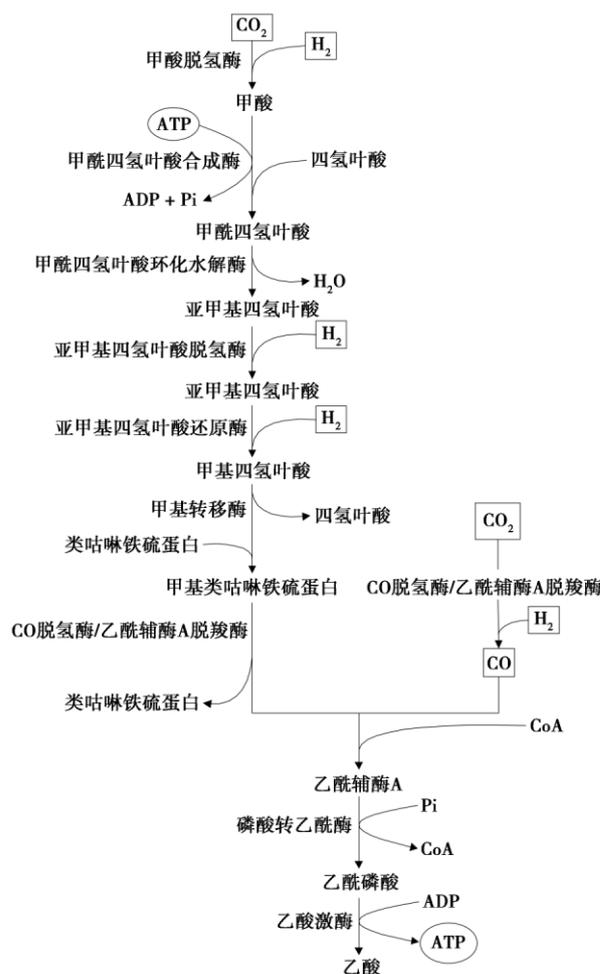


图1 Wood-Ljungdahl 途径<sup>[31]</sup>

目前在此微生物发酵过程中,乙醇产量仍较低,且存在乙酸等副产物,同时发酵周期较长。因此,为了提高乙醇产量,还需要继续从自然界中分离具有较高发酵潜力的微生物菌株,在深入研究其代谢机理的基础上,利用代谢工程和基因工程的手段对它进行改造,获得性状优良、目标产物高积累的菌株。美国能源部联合基因组研究中心(JGI)等单位已经分别完成了对 *Clostridium carboxidivorans* P7、*Clostridium ragsdalei* P11 和 *Clostridium ljungdahlii* 等合成气代谢菌株的全基因组测序,并重构其代谢通路,这些工作为理解合成气代谢机制并进一步提高乙醇产量奠定了基础。

### 2.2.4 应用开发案例

借鉴煤间接液化制备烃类产品、合成氨、含氧化合物等生产技术商业运行的成熟经验,完全可以利用经有效分类的城市生活垃圾经气化制合成气,再经 F-T 合成或生物化学转化制备生物燃料产品。城市生活有机垃圾具有规模化持续供应的优势,作为生物燃料生产原料无疑具有良好的应用前景,国外已经有一些成功的应用实施案例,形成了以城市垃圾、农林废弃物与钢厂废气等有机碳原料生产燃料乙醇的产业化示范<sup>[19]</sup>。

加拿大公司 Enerkem 是一家利用废弃生物质进行回收转化的环保技术公司,其垃圾气化催化转化制生物燃料工艺流程如图 2 所示,它已经在加拿大埃德蒙顿(Edmonton)建成了世界上第一个以垃圾气化制合成气产生生物燃料的商业化工厂,年处理量 10 万 t 干垃圾衍生物,可年产 3 万 t 以上高纯度无水乙醇,作为燃料乙醇销售给包括全球最大的甲醇生产与经销商梅赛尼斯公司(MEOH-Methanex)在内的购买商。2018 年 1 月, Enerkem 与北京北大未

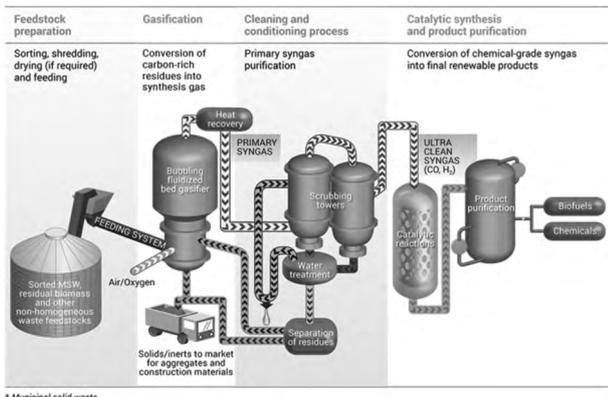


图 2 Enerkem 垃圾气化催化转化制生物燃料工艺

名生物工程集团有限公司达成价值 1.25 亿加元的投资与合作协议,计划在 2035 年之前在中国建设 100 座使用该技术的垃圾能源化利用工厂。

美国生物工程资源公司(BRI)采用生物质合成气发酵生产乙醇,工艺路线先将废旧轮胎、城市生活垃圾及农林废弃物等原料在温度 1 300℃ 分两步汽化为 CO、H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 合成气,冷却至 37.7℃ 后,经活性炭过滤后进入到加有培养基的生物反应器中,通过 *Clostridium ljungdahlii* O-52 菌株的发酵作用生成乙醇,而后通过膜分离系统将菌株和乙醇分离,菌株可继续使用,含乙醇的液相经传统精馏过程和分子筛等工艺精制成无水乙醇。在该过程中,冷却热气体产生的蒸气用来发电。其工艺流程如图 3 所示。

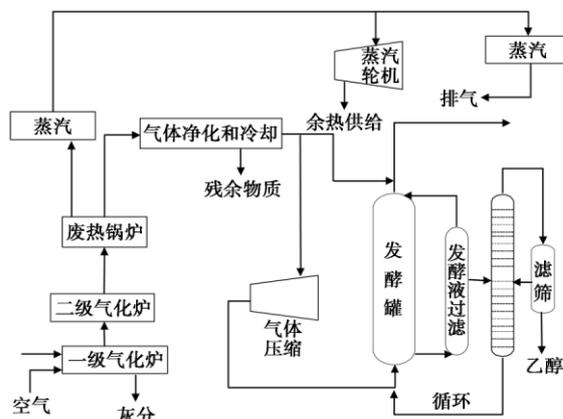


图 3 BRI 工艺流程

被美国能源部选为 6 家纤维素乙醇生产商之一的美国 Alico 公司采用了 BRI 公司阿肯色州 Fayetteville 试验厂的气化和发酵技术,在佛罗里达州 Hendry 县建立 1 家燃料乙醇厂,将含碳原料转化为乙醇和电能,计划通过此技术将燃料乙醇年产量由 770 万加仑(约 2.3 万 t)增加到 5 000 万加仑(约 15 万 t),同时产生的电能除自用外还有 1.26 万 kW 外售。

## 3 城市生活垃圾能源化利用模式探讨

### 3.1 我国城市生活垃圾处理方式总体原则

分析全球发达国家城市生活垃圾处理技术现状,可以发现各国根据其城市生活垃圾的性质和特点,采取了与其国情相适应的生活垃圾处理方式,基本可以归为如下三类<sup>[32]</sup>:一是以机械-生物处理为特色,焚烧发电与生物处理相结合,剩余惰性残渣填埋的方式,可以称为德国模式;二是焚烧发电加炉渣

填埋的方式,可以称为日本模式;三是填埋为主、焚烧为辅的方式,可以称为美国模式。总体来看,焚烧法比例已接近或超过填埋法。但无论哪种模式,都是建立在较好的分类收集基础上,并且制定了符合本国国情的相关法规,从法律和经济政策上对废弃物的资源化利用给予支持<sup>[8]</sup>。

中国地域广泛,各地生活习惯差异显著,垃圾组分差异较大<sup>[33]</sup>,因此我国垃圾产生及组成特点与西方发达国家存在很多不同。整体来说,我国城市生活垃圾大部分混合收集,厨余垃圾量较多(60%),含水率(55%~65%)和灰分含量高,燃烧热值低(4 000~6 000 kJ/kg)<sup>[32]</sup>。鉴于我国垃圾产生现状及其独特属性,加之各区域社会经济不平衡性,很难统一使用一种处理技术,中国应当集各国模式之所长,因地制宜,遵循分级分类综合利用的原则。在土地紧张、环境敏感、经济发达的一线城市和地区,如北京、上海、深圳、广州、江苏、浙江等,可推行垃圾热裂解气化、垃圾气化制合成气产生物燃料等为主的能源化综合利用模式;在土地供应相对宽裕、经济稍欠发达的地区,可推行填埋为主、焚烧为辅的利用模式。

### 3.2 能源化综合利用关键环节

#### 3.2.1 垃圾原料供应环节

城市生活垃圾作为原料资源进行能源化利用,其最大优势在于持续集中供应、原料成分相对稳定、收运成本较低。与秸秆和林业废弃物收集不同,我国垃圾清运系统已经非常成熟,垃圾清运由市政环卫部门完成,每年市政向环卫部门拨付专款用于垃圾清运和处理,因此能源化利用的原料成本、运输成本基本可忽略,同时获得垃圾处理补贴,装置经济性得到保障。

通过垃圾有效分类,选择其中可燃烧部分是垃圾能源化利用的前提。目前垃圾分类主要有3种途径:一是在源头由居民自行分类;二是各城市废品回收公司进行分类,主要回收废纸、金属、玻璃、饮料包装塑料等垃圾;三是在垃圾转运站由环卫工人进行分拣。由于我国生活垃圾分类制度贯彻不够,特别是居民进行的垃圾分类状况不理想,导致后续处理成本显著增加。

针对这一现状,首先,应制定并贯彻落实严格的垃圾分类政策,通过立法监督或行政监管来推动城市垃圾分类,为垃圾分类资源化处理提供前提。其

次,考虑合理征收垃圾处理费补贴垃圾能源化处理企业。目前,我国绝大部分城市垃圾处理费用主要由政府承担,由于处理费用高昂,一般只能采取简单方式进行垃圾处理。实施全成本收费一方面可以为垃圾处理处置提供资金,另一方面将这部分资金用于补贴垃圾能源化处理企业运转补贴,使之可以向社会提供低成本的热、电和车用燃料,让城市居民成为最终受益者,同时可以增加就业。

#### 3.2.2 垃圾处理环节

在生活垃圾处理环节中,能源化利用有两条技术路线可供选择,即垃圾热裂解气化和制合成气产生物燃料。对我国来说,热裂解气化处理垃圾成本相对较低,有成型的技术设备和可以借鉴的国内外经验,具有较强的可行性<sup>[15]</sup>。不过鉴于我国城市生活垃圾特性及收运现状,一般情况下采用进口技术和设备的垃圾气化燃烧很难达到热裂解气化熔融所需高温,气化效率受到影响,无法保证可燃气体的质量,从而影响熔融效果<sup>[34]</sup>,实际运行中仍需额外补充其他燃料,增加了生产成本,因此有必要开发适用于我国低热值垃圾的热裂解处理技术。

另外,采用垃圾热裂解气化技术时,目标产品的选择以热、电为更宜。由于生活垃圾的物理及化学成分极其复杂,而且组分随地域、季节、居民生活水平及能源结构的改变而有较大变化,将会导致热裂解工艺处在一个较为复杂的不确定状态中<sup>[8]</sup>,若以回收可燃性气体、燃料油和炭黑为目标,要保持产品质量的稳定性就必须实现工艺的稳定控制,这无疑具有较大困难。此外,还需要充分考虑与该技术配套的生活垃圾破碎、分选等预处理技术所带来高投资和高能耗,以及生活垃圾中低熔点物质给系统操作可能造成的障碍,有害物质的混入等对产品质量及应用方面的影响。因此,目标产品为热、电等能源形式更适合我国国情。

以乙醇、甲醇及汽油、航空煤油等液体燃料为目标产品时,采用生活垃圾气化制合成气技术无疑更为合理,如图4所示。其优势在于:垃圾只用简单分离即可;减少垃圾的体积近90%;低温低压反应节约过程能耗,也可掺混木质纤维素类原料,实现两种原料资源的协同处理;根据市场产品需求可实现工艺灵活切换。需要注意的是,当生活垃圾含水量高、热值低(2 000~3 500 kJ/kg)时,还需要添加部分煤或天然气才能进行气化反应。

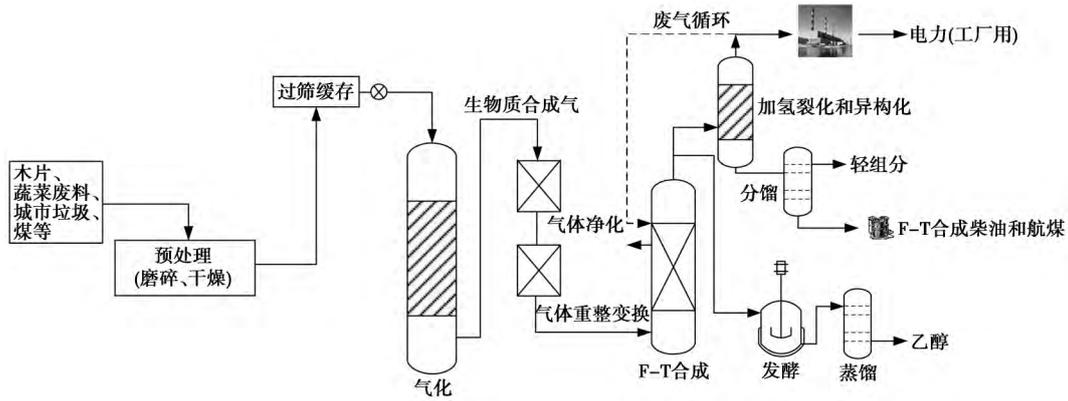


图 4 垃圾气化-燃料热电联产工艺

### 3.3 能源化综合利用模式设想

目前国内城市生活垃圾处理整体仍处于无害化处理初级阶段,以垃圾填埋为主,但填埋总量已经出现下降趋势,垃圾焚烧发电正处于快速发展阶段,焚烧处理量比例达到 36%<sup>[32]</sup>。截至 2016 年底,投入运行的生活垃圾焚烧发电厂有 250 座,总处理能力为 23.8 万 t/d,总装机约为 4 906 MW,其中 2016 年新投入运行生活垃圾焚烧厂 30 余座,总规模约 2.6 万 t/d,比 2015 年有明显增加<sup>[35]</sup>。

但应该看到,国内城市生活垃圾组分具有复杂性、多变性和地域差异性等特点<sup>[32]</sup>,加上生活垃

圾分类制度实施十余年仍然进展缓慢,使得我国垃圾焚烧技术在实际应用中面临比西方国家更为复杂的工程技术问题,二噁英排放难以达到国际排放标准(0.1 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>)等二次污染问题比较突出,以至于许多城市的垃圾焚烧项目受到了社会各方面的抵制,大规模推广应用还存在较多障碍。为了真正实现垃圾的减量化、无害化,尤其是资源化,根据我国城市生活垃圾特性,目前的垃圾收集、分拣和运输过程,结合各种处理方式的技术特点,提出垃圾能源化综合利用模式,如图 5 所示。

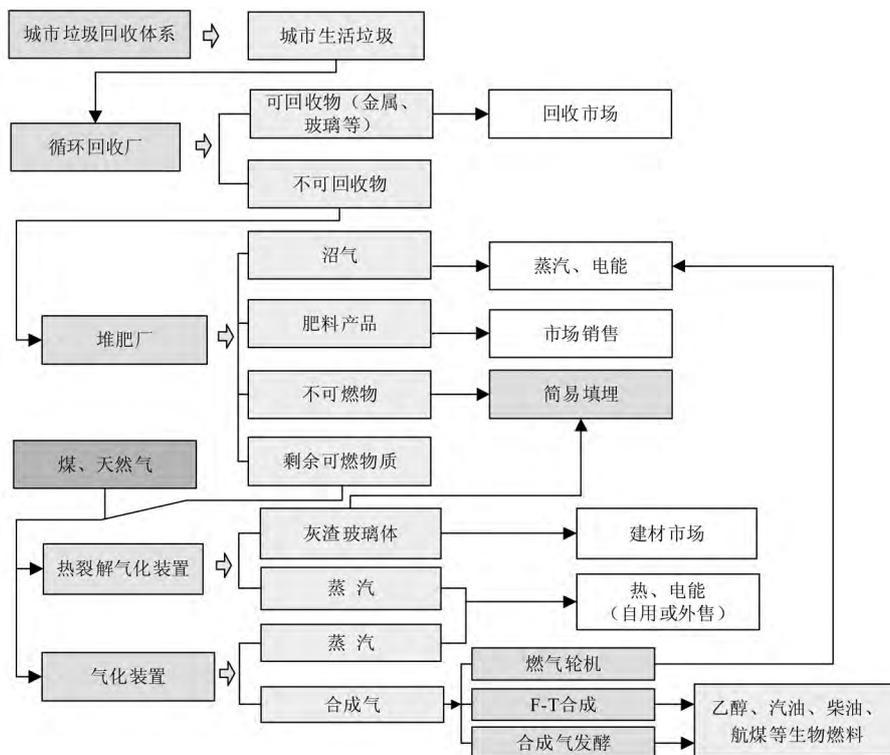


图 5 城市生活垃圾能源化综合利用模式

在能源化综合利用模式中,垃圾回收系统收集来的城市生活垃圾首先在垃圾循环回收厂进行简单初级分离,将其中的可回收部分(如金属、玻璃、部分塑料和橡胶等)回收后出售给相应的再生资源加工企业;剩余的不可回收物中的厨余类有机垃圾进行堆肥处理,可得到沼气、堆肥产品等。其中沼气可用于发电,肥料可直接销售;不可燃部分(如砖块等)普通建筑垃圾进行简易填埋;可燃的部分,包括纸屑、包装袋、草木、皮革制品、布料等有机垃圾则进入能源化利用环节,由能源生产企业利用热裂解气化生产热、电能源产品,副产的气化熔融灰渣直接填埋处理或作为建材销售,也可以利用垃圾气化制合成

气,生产乙醇等液体燃料产品。按照目前城市生活垃圾的构成,以此模式进行处理运行,约有20%垃圾可循环利用,40%垃圾可制成堆肥产品,30%有机垃圾转化为生物燃料或其他能源产品,10%垃圾进行填埋。

综合来看,相比其他垃圾处理技术,城市生活垃圾的能源化综合利用模式可最大程度实现垃圾的减量化、无害化、资源化利用以及温室气体减排,并且具备了一定的经济可行性,详见表4。因此,应该大力发展城市生活垃圾的分级分类能源化综合利用模式,可在一线大城市和经济发达地区率先试点推行。

表4 垃圾气化制合成气、焚烧和填埋法技术对比<sup>[36]</sup>

项目	气化制合成气	焚烧	填埋	堆肥
CO <sub>2</sub> 排放	减少排放 60%~90%	燃烧产生 CO <sub>2</sub> 全部外排	回收甲烷燃烧释放 CO <sub>2</sub>	未知
其他有害气体	二氧化硫排放减少 10%; 氮氧化物减少 80%; PM 排放减少 30%; 无二噁英排放	二氧化硫; 氮氧化物; PM; 二噁英	未知	刺激性气体; 二氧化硫; 氨气; 硫化氢; 氮氧化物
产品	生物燃料; 生物基化学品; 电力	电力	电力; 沼气	有机肥料
产量/产值	100~300 kg 燃料乙醇/t 生活垃圾; 利润 500~2000 元/t 垃圾	250~400 kW·h/t 生活垃圾 [垃圾电价 0.65 元/(kW·h)]; 收益 260 元	未知	800 元/t 有机肥料
投资额	600~1300 元/(t·d)	500~900 元/(t·d)	未知	未知
系统残渣(占原始重量的比重)	10%~15%	20%~25%	未知	30%~36%

#### 4 展望

环境与能源问题是当前人类社会面临的重大挑战。以石油、天然气、煤等化石能源为核心基础的现代能源体系,在为现代工业文明提供有力保障的同时,也造成了温室效应、大气和水体污染等一系列严重的气候和环境问题<sup>[37]</sup>。同时,随着我国城市化的迅猛发展,使得城市生活垃圾量也急剧增加,已成为污染环境、影响人民健康的突出社会问题。此外,2017年我国原油进口量达到4.2亿t<sup>[38]</sup>,对外依存度高达67.4%,已处于国际公认的警戒线位置,能源安全也是处于经济结构转型升级的中国必须要解决的重要现实问题。

对城市生活垃圾进行能源化综合利用,既可以最大程度地实现垃圾减量化、无害化、资源化处理,又可以实现城市能源及交通燃料的绿色减排和多元化可持续供应,从而为环境和能源两个难题的有机协调解决提供了一种有效途径。

2017年9月,国家发改委、国家能源局等十五部门联合印发了《关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案》,明确到2020年全国基本实现车用乙醇汽油的全覆盖推广使用,生物燃料乙醇使用规模达到1100万t左右,这也为城市生活垃圾生产燃料乙醇提供了市场空间。北京2017年生活垃圾年清运量约924.8万t,日焚烧量达到9200t(326.5万t/a)<sup>[2]</sup>,若采用垃圾气化制合成气发酵路线转化为燃料乙醇,以每1t生活垃圾生产0.2t乙醇计算,则每年就可生产约65万t燃料乙醇,而北京当年汽油消费总量489.85万t<sup>[39]</sup>,利用现有的基础设施(垃圾收集、储运和分类预处理),仅垃圾生产的燃料乙醇就可满足汽油消耗量的13%。中国石油等大型能源公司可与城市环卫集团开展合作,发挥各自产业和技术优势,充分利用清洁发展机制(CDM)等碳排交易市场,率先在一线大城市和经济发达地区城市试点推行城市生活垃圾的能源化综合利用,实现良好环境效益、社

社会效益和经济效益。

### 参考文献

- [1] 张记市, 张雷, 王华. 城市有机生活垃圾厌氧发酵处理研究[J]. 生态环境, 2005, 14(3): 321-324.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴——2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [3] 马人熊. 垃圾填埋气利用技术简介[J]. 中国城市环境卫生, 2010, 3(3): 20-24.
- [4] 秦成. 我国城市生活垃圾处理现状及清运量预测研究[D]. 天津: 天津财经大学, 2015.
- [5] 解强, 边炳鑫, 赵由才. 城市固体废弃物资源化利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [6] 肖睿, 金保升, 仲兆平, 等. 基于低温气化和高温熔融焚烧方法处理城市生活垃圾[J]. 能源研究与利用, 2001, 3(3): 28-30.
- [7] Maken S, Hyun J, Park J W, et al. Vitrification of MSWI fly ash using Brown's gas and fate of heavy metals[J]. Sci Ind Res, 2005, 64: 198-204.
- [8] 宋立杰, 陈善平, 赵由才. 可持续生活垃圾处理与资源化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [9] 赵由才, 宋玉. 生活垃圾处理与资源化技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [10] 田贵全. 德国固体废物技术方法[J]. 环境科学动态, 2005, 2: 10-11.
- [11] Williams P T, Besler S. Pyrolysis of municipal solid waste[J]. Journal of the Institute of Energy, 1992, 65(1): 192-200.
- [12] Malkow T. Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal[J]. Waste Management, 2004, 24(1): 53-79.
- [13] 胡建杭, 王华. 城市生活垃圾直接气化熔融焚烧技术基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [14] 袁浩然, 鲁涛, 熊祖鸿, 等. 城市生活垃圾热解气化技术研究进展[J]. 化工进展, 2012, 32(2): 421-427.
- [15] 钱睿, 韩健. 北京城市生活垃圾处理转型新思路——垃圾热解气化技术[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 689-692.
- [16] 徐喆, 韩波. 我国炼厂气体的综合利用[J]. 当代化工, 2009, 38(3): 257-261.
- [17] 马龙隆, 王铁军, 吴创之, 等. 木质纤维素化工技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [18] 吉媛媛, 相宏伟. Fischer-Tropsch 合成烃生成机理研究进展[J]. 燃料化学学报, 2002, 30(2): 186-192.
- [19] 胡徐腾, 李振宇, 付兴国, 等. 液体生物燃料: 从化石到生物质[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [20] 宋安东, 冯新军, 谢慧, 等. 合成气制取乙醇 2 种技术比较分析[J]. 生物加工过程, 2012, 10(5): 72-78.
- [21] 士丽敏, 储伟, 刘增超. 合成气制低碳醇用催化剂的研究进展[J]. 化工进展, 2011, 30(1): 162-166.
- [22] 王鹏, 王宪贵, 郭战英, 等. 合成气合成乙醇的研究进展[J]. 净煤技术, 2010, 1(1): 5-62.
- [23] Barik S, Prieto S, Harrison S B, et al. Biological production of alcohols from coal through indirect liquefaction[J]. Appl Biochem Biotechnol, 1988, 18(1): 363-378.
- [24] Abrini J, Naveau H, Nyns E J. *Clostridium autoethanogenum* sp. Nov., an anaerobic bacterium that produces ethanol from carbon monoxide[J]. Arch Microbiol, 1994, 161(4): 345-351.
- [25] Hurst K M, Lewis R S. Carbon monoxide partial pressure effects on the metabolic process of syngas fermentation[J]. Biochem Eng J, 2010, 48(2): 159-165.
- [26] Rajagopalan S, Datar R P, Lewis R S. Formation of ethanol from carbon monoxide via a new microbial catalyst[J]. Biomass Bioenergy, 2002, 23(6): 487-493.
- [27] Cotter J L, Chinn M S, Grunden A M. Ethanol and acetate production by *Clostridium ljungdahlii* and *Clostridium autoethanogenum* using resting cells[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2009, 32(3): 369-380.
- [28] Najafpour G, Younesi H. Ethanol and acetate synthesis from waste gas using batch culture of *Clostridium ljungdahlii*[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, 38(1-2): 223-228.
- [29] Kundiyana D K, Huhnke R L, Wilkins M R. Syngas fermentation in a 100-L pilot scale fermentor: Design and process considerations[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2010, 109(5): 492-498.
- [30] Saxena J, Tanner R S. Effect of trace metals on ethanol production from synthesis gas by the ethanogenic acetogen *Clostridium ragsdalei*[J]. Journal of Industrial Microbiology, 2011, 38(4): 513-521.
- [31] 张兰波, 刘继开, 李东, 等. 合成气乙醇发酵的微生物研究[J]. 可再生能源, 2007, 25(3): 27-30.
- [32] 李延吉. 生活垃圾制备 RDF 及资源化利用研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2017.
- [33] 董越勇, 邹道安, 刘银秀, 等. 我国城市生活垃圾特点及其处理技术浅析——以杭州市为例[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(6): 1055-1060.
- [34] 向达. 城市生活垃圾处理现状及热解制备燃料油技术的分析[J]. 生物质化学工程, 2012, 46(5): 39-44.
- [35] 张晓明, 王颖. 垃圾焚烧技术的发展状况[J]. 建筑与预算, 2017, 4(4): 31-33.
- [36] 韩志明. 北京市生活垃圾焚烧的合理性[R/OL]. 环卫科技网, 2007-09-29. <http://www.cn-hw.net/html/27/200709/4332.html>.
- [37] Myles R Allen, Vicente Ricardo Barros, John Broom, et al. Climate change 2014 synthesis report[R]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014.
- [38] 刘朝全, 姜学峰. 2017 年国内外油气行业发展报告[R]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
- [39] 北京市统计局. 北京统计年鉴——2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. ■