

# 小型规模厌氧消化设施应用进展和挑战

吕凡<sup>1,2,3</sup>, 彭伟<sup>1,2,3</sup>, 章骅<sup>1,2,3</sup>, 何晶晶<sup>1,2,3</sup>

(1. 同济大学固体废物处理与资源化研究所, 上海 200092; 2. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092; 3. 上海多源固废协同处理和资源化工程技术研究中心, 上海 200092)

**摘要:** 传统户用沼气池建造成本低、运行简易, 但产气量较低、产气不稳定、有机物稳定时间长; 而大型工业化规模厌氧消化工程 ( $\geq 50 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 不适合人均或单位面积产量低的易腐废物的就近就地处理。因此, 在全球双碳目标约束的背景下, 处理量  $0.5 \sim 30 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  的小型规模高效厌氧消化设施的应用需求日益增加。处理规模的缩减对厌氧消化主体反应器、易腐废物进料控制、预处理工艺、固液分离等后处理工艺、沼气净化和利用小型设备、沼液沼渣处理和利用方式、臭气等二次污染控制方式、自动化和远程控制等, 从技术、设备、运维、技术模式等多方面都提出了新的挑战, 需要合理控制处理成本, 提高运行的稳定性。针对上述问题, 系统梳理了小型规模厌氧消化设施的类型、技术特征、技术模式和应用案例, 以期指导基于小型规模厌氧消化设施的循环系统的构建, 从而实现易腐废物的负碳就近就地就农资源化。

**关键词:** 易腐废物; 村镇多源有机废物; 厌氧消化; 就近就地处理; 分布式处理设施

**中图分类号:** S216.4; TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2023)03-0003-10

**DOI:** 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023030003

**Applications and Challenges of High-efficient Small-Scale Anaerobic Digesters / LV Fan<sup>1,2,3</sup>, PENG Wei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hua<sup>1,2,3</sup>, HE Pin-jing<sup>1,2,3</sup> / (1. Institute of Waste Treatment and Reclamation, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Multi-source Solid Wastes Co-processing and Energy Utilization, Shanghai 200092, China)**

**Abstract:** Traditional biogas septic tanks have the advantages of low construction cost and easy operation requirements, but their biogas production is of low yield, unstable, and low efficiency. Whereas, large-scale anaerobic digesters ( $\geq 50 \text{ t/d}$ ) are expensive and sophisticated, therefore, not suitable for the decentralized treatment of easily biodegradable biowaste with low generation amount. Therefore, oriented by the global target of emission peak and carbon neutrality, the demand for the small-scale anaerobic digestion ( $0.5 \sim 30 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ , SSAD) is increasing and gradually applied around the world. The reduction of treatment capacity of SSAD results in several challenges, from technology, equipment, operation, and maintenance, to technology modes, for example, including the digester type, mixing, inflow, pretreatment, post-treatment, dewatering, biogas purification and utilization, digestate treatment and utilization, odor control, automation, and remote control, etc., owing to meeting the requirements on both appropriate cost and high efficiency. In response to the above questions, this paper systematically investigated the types, technical characteristics, technical modes, and application cases of SSAD facilities, to guide the construction of an ecologically sustainable system based on SSAD, to realize the carbon sink treatment of easily biodegradable biowaste.

**Key words:** easily biodegradable biowaste; multi-source biowaste in rural areas; anaerobic digestion; in-situ or nearby treatment; decentralized treatment facilities

易腐废物目前主流的资源化处理技术中, 以厌氧消化技术的减碳效益最高<sup>[1-4]</sup>, 其碳排放量约为

$-150 \sim -250 \text{ kgCO}_2\text{eq}^{[3, 5]}$ , 是公认的负碳技术。我国国家标准《大中型沼气工程技术规范》(GBT

收稿日期: 2022-09-25 修回日期: 2022-12-26

项目来源: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100600); 国家自然科学基金资助项目(52000144)。

作者简介: 吕凡(1979-), 女, 福建漳州人, 研究员, 主要从事固体废弃物处理与资源化研究等工作, E-mail: lvfan.rhodes@tongji.edu.cn

通信作者: 何晶晶, E-mail: solidwaste@tongji.edu.cn

51063—2014) 规定,用于民用的沼气工程,沼气产量不宜小于  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,用于发电的沼气工程,沼气产量不宜小于  $1\ 200 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。以沼气单位产量  $70 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$  废物计算,则沼气工程的废物处理量不宜低于  $7 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ,拟发电的沼气工程的废物处理量不宜低于  $20 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。但囿于规模经济效应的约束<sup>[6-8]</sup>,厌氧消化厂的处理规模一般在  $50 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  以上<sup>[9]</sup>。家庭厨余垃圾若按  $0.3 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  分出量估算,则  $50 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  厌氧消化厂服务人口是 16.7 万人,相当于县域左右规模;餐厨垃圾若按  $0.1 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  产生量估算,则服务人口更是高达 50 万人。因此,传统上厌氧消化厂基本只用于城市餐厨垃圾和家庭厨余垃圾等厨余垃圾,以及农业集约化养殖场畜禽粪便的大规模集中处理,很少用于易腐废物的就近就地小规模处理。

但近年来,随着我国双碳目标、绿色发展、农村人居环境提升、乡村振兴等国家重大战略的实施,住房和城乡建设部等 15 部门《关于加强县城绿色低碳建设的意见》(建村(2021)45号,2021年5月25日)、住房和城乡建设部和国家开发银行《关于推进开发性金融支持县域生活垃圾污水处理设施建设的通知》(建村(2022)52号,2022年6月29日)、农业农村部、国家发展改革委《农业农村减排固碳实施方案》(农科教发(2022)2号,2022年5月7日)等重要文件的发布,处理量仅  $0.5 \sim 30 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  的小型规模厌氧消化设施的应用需求日益增加。应用场景包括县城厨余垃圾、村镇多源有机废物(厨余垃圾、尾菜、非集约化生产的畜禽粪污)、集贸市场和超市生鲜垃圾等的就近就地处理与资源化利用。

但是处理规模的缩减对厌氧消化主体反应器、易腐废物进料控制、预处理工艺、固液分离等后处理工艺、沼气净化和利用小型设备、沼液沼渣处理和利用方式、臭气等二次污染控制方式、自动化和远程控制等,从技术、设备、运维、技术模式等多方面都提出了新的挑战,需要合理控制处理成本,提高运行的稳定性。传统户用沼气池,如地下或半地下式的水压式沼气池、浮罩式沼气池等<sup>[10]</sup>,较适合于人畜粪便等含固率较低、性质较单一、杂质较少的物料,其产气率相对较低、物料停留时间长、产气较不稳定,低温时户用燃气利用效果不理想<sup>[11-13]</sup>,易漏气、易板结<sup>[14]</sup>,用能途径单一,往往只作为燃气使用;因此,很多沼气池设施更多只是利用其稳定沼液沼渣的作用。大型厌氧消化厂沼气质量可达垃圾湿重的 8%

$\sim 10\%$ <sup>[6]</sup>,但笔者在华北某县的调研数据发现,沼气池处理产生的沼气质量仅为原料湿重的 2.3%。从低碳用能、综合减碳、减少对波动能源市场的依赖等角度,国外近年来已发展了一些相对成熟的小型规模厌氧消化设施应用案例,称为“小型”(Small-scale anaerobic digestion)或“口袋式”(Pocket digestion)厌氧消化或“微型”厌氧消化反应器(Micro digester),其产气效率、产气稳定性和安全性远高于沼气池,多为地上式。因此,沼气可衔接微型热电联产单元,实现区域供能;而且发酵时间缩短,有机处理负荷提高,相应的反应器占地和土建成本降低,适合易腐废物的处理和资源化利用。欧洲各国对于“小型”的规模定义并不一致,例如比利时设定的最大电力是 30 kWe、波兰 40 kWe、荷兰 50 kWe、德国 75 kWe、法国、丹麦和意大利 100 kWe<sup>[15]</sup>,因此这些设施一般是 10 ~ 100 kWe。

本文将就此梳理小型规模厌氧消化设施的类型、技术特征、技术模式、应用案例,指导基于小型规模厌氧消化设施的循环系统构建,从而实现易腐废物的负碳就近就地资源化。

## 1 基于小型规模厌氧消化设施构建的社区改土保肥和低碳用能生态系统

根据国家标准《农村生活垃圾收运和处理技术标准》(GB/T 51435—2021)的规定,垃圾运输距离较长的地区,如超过 30 公里范围以内的山区,乡镇可自行处理生活垃圾。有些村庄地处山区、海岛、偏远地区,垃圾收运效率较低。这些地区若完全采用城乡一体化模式收运生活垃圾,收运成本极其高昂<sup>[16]</sup>。因此,其易腐废物宜就近就地资源化处理。阳光房堆肥或机器成肥的好氧堆肥技术路线是我国易腐废物最常用的就近就地处理技术,易实施、成本相对较低、可产出土壤改良剂<sup>[6,17]</sup>。但好氧堆肥技术是净耗能技术,无法耦合社区分布式用能需求,堆置过程中还有一定的氮损失<sup>[18]</sup>。相比而言,如图 1 所示,厌氧消化技术作为就近就地处理技术,更有利于促进社区低碳用能和改土保肥生态系统的同步构建。以北纬  $50.5^\circ$  国家比利时为例,其小型规模厌氧消化设施自身的能量消耗约为产能的 10% ~ 30%<sup>[19]</sup>;类似规模易腐废物厌氧消化设施的能量平衡分析也得出类似的结论,如在北纬  $23.4^\circ$  云南某地在冬季自用能量为 23%<sup>[20]</sup>,北纬  $41.4^\circ$  希腊克桑西的实践计算出是 12.36%<sup>[21]</sup>。沼气经净化至  $\text{CH}_4$

含量 50% ~ 75%、 $H_2S$  浓度低于 100 ppm 后,可通过微型热电联产 CHP、锅炉、吸收式制冷机等方式用于社区供电、热水和冷水。沼气进一步提纯至  $CH_4$  含量 > 95%、 $H_2S$  浓度低于 16 ppm 后可作为车用燃料, $H_2S$  浓度低于 4 ppm 可达到国家标准《天然气》

GB 17820—2018 要求,可作为商品替代化石燃料。消化残余物经固液分离后的沼液和沼渣氮、磷、钾含量较高<sup>[22-23]</sup>,适合当地就地作为土壤改良剂或有机肥利用。而且沼渣还可以加工成可生物降解的育苗营养钵<sup>[24]</sup>、牛卧床垫料<sup>[25]</sup>。

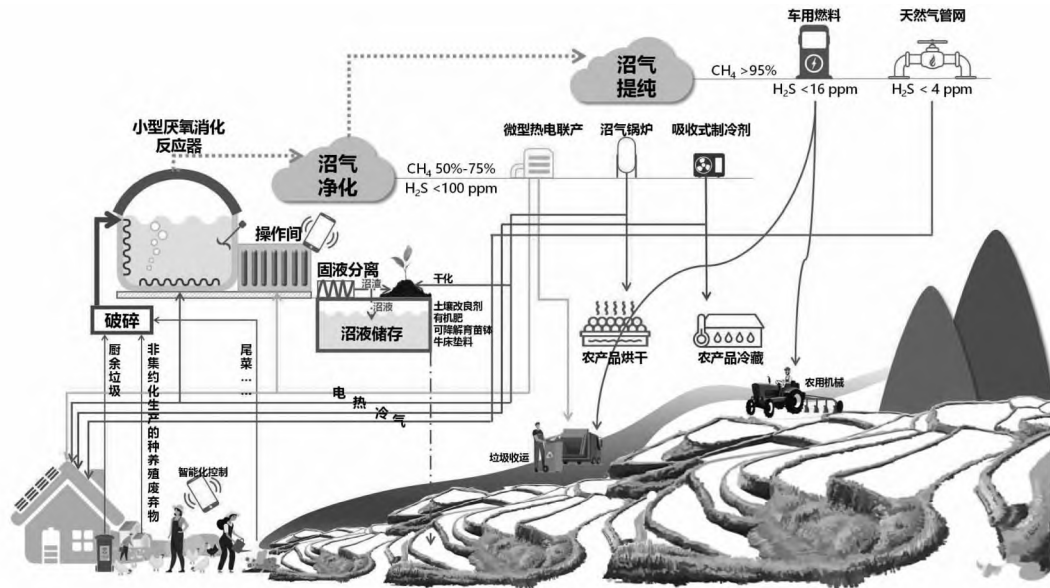


图1 基于小型规模厌氧消化设施构建的社区改土保肥和低碳用能生态系统

## 2 小型规模厌氧消化反应器类型

与大型反应器相比,小型厌氧消化反应器在保证高效率和稳定运行的同时,还要简单、易维护、低成本,因此更注重搅拌、保温、密闭、结构紧凑。反应器类型包括:全混合连续搅拌反应器(Continuously stirred tank reactor, CSTR)、气体引流式生物床反应器(Induced Blanket Digester, IBD)、机械搅拌辅助的柱塞流反应器(Plug-flow reactor, PFR)、车库型批式反应器。

### 2.1 全混合连续搅拌反应器及主要组合形式

如图2所示,CSTR应用最普遍,适用于多种类型的易腐废物进料。反应器内物料含固率 3% ~ 10%。

其中,混合是该类型反应器的关键,以改善底物和微生物的接触,减少死区,以及防止短路、分层、浮渣、积砂。混合也是厌氧消化厂运行过程中能耗最高的环节<sup>[26]</sup>,可占到全厂能耗的 54%<sup>[27]</sup>。反应器内物料的含固率对混合的均质效果和能耗影响极大;以蛋形反应器为例,当含固率增至 5.4% ~ 7.5% 时,流动模式开始发生变化,含固率为 2.5% 时导流管内机械叶轮的转速仅 600 rpm,但含固率若

增至 12%,则叶轮转速需达到 1000 rpm 才能混匀反应器<sup>[28]</sup>。

为了提高其混合效果,可采用的混合形式包括:气体混合,使用带叶轮混合器或泵的水力混合,或机械混合。无限制气体混合有底部扩散器(易堵塞、低效、较过时)和气体喷枪(顺序喷射高压气体;可用于破碎浮渣,但沼气池底部的混合效果较差);限制气体混合有气体提升系统的气体喷射管(由一个位于中央的落地式喷射管和单独的气体喷枪组成)和气泡枪(也称为气体活塞式系统,或“Cannon”混合器,多个喷射管从反应器底部侧壁进入“气泡室”,气泡从顶部喷出时,会“爆发”打破表面浮渣;由于底部进料,气体压缩机必须具有更高的压力和更高的马力)。对 12 m 直径 × 6.7 m 高反应器(物料含固率 TS 为 5.4%、混合能量水平为  $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ )的计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)模拟结果表明,限制混合在流场的均匀性方面比无限制混合表现更好,尤其是双气泡枪<sup>[29]</sup>。水力混合时液态物料的驱动可以通过带机械叶轮的导流管,或者泵实现。导流管可装在反应器内或反应器外;早期带机械叶轮的导流管系统存在结垢或纤维物积聚的问题,现在发展为具有反向旋转电机的

“无积自清洁”(ragless, self-cleaning)三叶片或双叶片叶轮,可实现动态平衡,避免杂物在叶轮上积聚。外部泵系统可以采用轴流泵、螺杆离心泵或者切割泵(斩波泵),后者适合运送含长纤维的物料切碎泵专门设计用于泵送含有长纤维组分的物料。常见的机械混合系统的叶轮直径相对较大,旋转速度相对较慢;搅拌器通过空心轴减速器驱动,轴由支撑止推轴承的安全底座支撑,主轴采用迷宫式水封密封;应可自动定期反转轴旋转,以防止杂物积聚在叶轮上;轴和叶轮需采用不锈钢复合材料,以确保强度和防腐;机械混合功耗低、不容易气泡、混合完全、维护需求较低。而且潜水搅拌机(潜水推进器)通过叶轮定点布设,无需导流管也可形成水力混合,电机或液压直接驱动形状和螺距优化设计的叶轮,通过动态混合控制器(一种智能变频器)进行温度、功耗、速度和扭矩的实时监控,相应调整转速和在反应器内的高度和角度,从而可有效降低混合能耗;与齿轮箱驱动叶轮相比,可减少维护需求;适合搅拌的物料的含固率可高达15%<sup>[26]</sup>;池容1400 m<sup>3</sup>,物料密度1090 kg·m<sup>-3</sup>的反应器通过设置双潜水推进器可以实现85%空间得到均质,功耗约30 kW<sup>[30]</sup>,最高流速可达0.28 m·s<sup>-1</sup><sup>[31]</sup>。

但是,混合并不是越充分越好。多位研究人员均发现间歇搅拌的厌氧产气效率反而高于连续搅拌<sup>[32-33]</sup>、低速连续搅拌优于高速连续搅拌<sup>[34]</sup>。通过间歇性搅拌,能耗降低29%条件下厌氧产气效率未见下降<sup>[27]</sup>。而且,随着流体粘度和剪切稀化敏感性的提高,节能潜力也增加,混合时间可减少10倍<sup>[34]</sup>。大螺旋桨直径的慢速倾斜搅拌器能获得与螺旋桨直径较小的快速旋转潜水搅拌机相当的混合

效果,且节能潜力可提高70%<sup>[35]</sup>。过高混合强度可能是因为破坏了微生物絮体间的有效联系<sup>[33, 36]</sup>(如种间电子传递)、不利于产甲烷菌空间区域的发展<sup>[37]</sup>、促进了水解酸化液化<sup>[33]</sup>,从而加剧了有机酸的积累,而且更容易出现起泡问题。传统上认为反应器内物料的剪切速率阈值为50~80 s<sup>-1</sup>,但较新的研究表明,该阈值仅为6~8 s<sup>-1</sup>,低于该值时混合强度的增加有利于产气,超过该值后越提高混合强度越不利<sup>[38]</sup>。

单段式CSTR反应器较为常见,可降低建造成本和运行要求(见图2a)。但也有不少应用是采用了两段式CSTR(见图2b),以期实现水解酸化和甲烷化两阶段微生物的有效分离,工艺参数的分别优化;而且,水解酸化罐可以起到缓冲作用,减缓进料种类和进料量不稳定等的冲击影响,因此更适用于农村多源有机废物的场景。还可以采用图2c固液两相分离的结构形式,水解酸化罐采用CSTR以适应较高含固率的物料,经水解酸化后悬浮物有所液化,物料含固率降低;其液相出水则采用高效甲烷反应器,如上流式厌氧污泥床反应器(Up-flow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)、固定膜生物反应器、复合式厌氧流化床(Up-flow Blanket Filter, UBF)等较适合低含固率废水(含固率<3%)的形式。

而且水解酸化罐和甲烷化罐可以同心圆设置(见图2d);外圈水解酸化生物反应对于外界温度变化较不敏感,可以不进行加热;水解酸化罐相当于内圈甲烷化罐的保温层;从而可以降低物料和反应器加热保温的能耗。水解酸化罐也可以改为后发酵池或储存池(见图2e),甚至是图2f的三环结构,结构紧凑、减小占地。

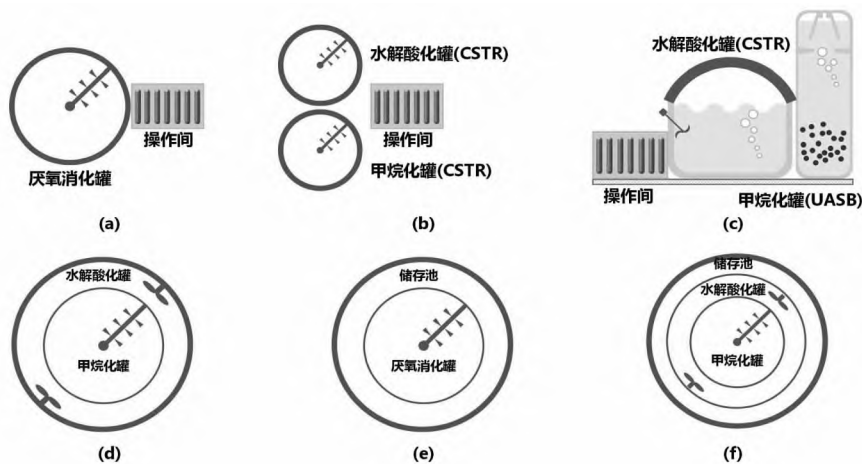


图2 可用于小型规模厌氧消化的全混合连续搅拌反应器及主要组合形式

### 2.2 气体引流式生物床反应器

UASB、固定膜生物反应器等高效厌氧反应器形式停留时间仅需 3~5 天,但只适用于含固率低于 2%~4% 的物料、高浓度废水。而粪便、食品加工废物、餐饮垃圾、家庭厨余垃圾等物料的原状含固率较高,因此传统上多仅能采用 CSTR 形式,停留时间长、反应器体积大、混合能耗较高。若直接采用 UASB 等形式,则前端需进行原料固液分离,仅用于处理液体部分,因此会损失大量的纤维类有机质,并且固体部分需另外堆肥化处理。2002 年犹他州立大学的 Conly Hansen 教授申请了气体引流式生物床反应器( Induced Blanket Digester, IBD) 的专利,该反应器能处理含固率 6%~12% 的物料,停留时间仅 3~5 天,很快在美国和加拿大获得推广应用( 根据笔者了解,本文可能是首次在国内介绍该反应器的报道)。如图 3 所示,该反应器类似于 UASB,但液体上流速度极低,因此生物床层不悬浮,而是下沉至中下部,中上段形成逐渐澄清的液体层。有机物进料从下往上流动时逐渐被降解。反应器内的混合作用可能是源于热流通过反应器引起的热梯度能量输入,以及生物床中沼气泡释放引起的剪切<sup>[39]</sup>。与 CSTR 相比,其运行能耗可显著降低,停留时间短,但运行相对复杂。

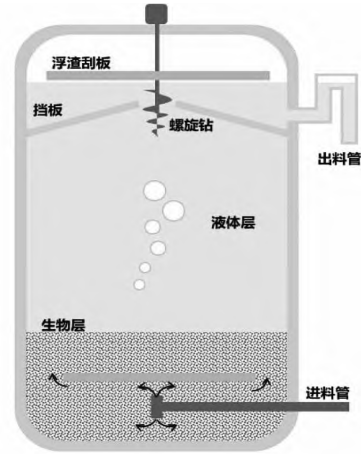


图 3 气体引流式生物床反应器 IBD 示意图

### 2.3 机械搅拌辅助的柱塞流反应器( Plug-flow reactor, PFR)

通过增加缓慢搅拌的长轴搅拌桨,传统只能进行湿式或半干式厌氧消化,处理含固率 11%~14% 物料的卧式柱塞流反应器可实现干式厌氧消化,从而可处理含固率 20%~40% 的废物。无需稀释,沼液产量少,在没有土地利用条件的城市地区有优势。合理布置附属破碎、固液分离、沼气净化和利用等设备的空间位置,可实现全套设备的集装箱化排布,无需土建,有利于快速安装和移动( 见图 4)。

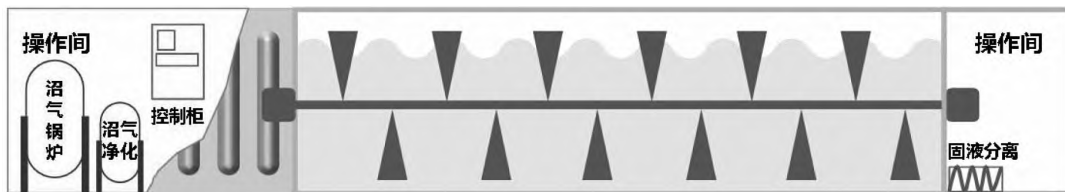


图 4 机械搅拌辅助的柱塞流反应器布置示意图

### 2.4 车库型批式反应器

该类型反应器适合于处理高含固率物料( > 15%) 和杂质含量较高的物料,如生活垃圾。属于批式操作的干式厌氧消化,垃圾无需破碎预处理。通过混合沼渣进料以及水解液和沼液淋滤( 可选)

以快速启动批式厌氧反应和提高产气率。单个反应器 30~400 m<sup>3</sup>,每个批式周期 25~35 天<sup>[40, 41]</sup>。反应器数量可以根据处理垃圾量灵活调整。反应器可以为固定式或车载移动式。在欧洲尤其是德国较多应用( 见图 5)。

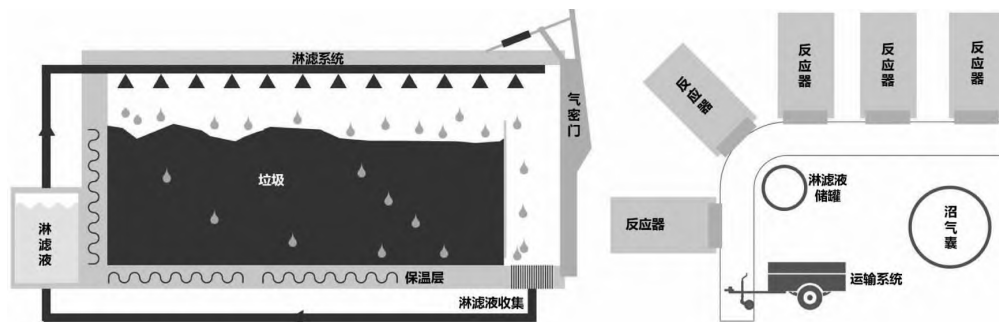


图 5 车库批式反应器以及布置示意图

## 2.5 主要工艺参数

(1) 停留时间: 一般为 15 ~ 30 天。消化残余物或沼液储存池一定程度上可进一步延长停留时间, 有利于有机物稳定。

(2) 温度: 小型规模厌氧消化反应器采用中温范围(30℃ ~ 43℃) 更为常见, 因为为维持高温范围(50℃ ~ 65℃) 的物料升温和反应器保温的能量消耗大幅增加<sup>[42]</sup>, 而高温消化时的产气速率和最大甲烷产率均略低于中温<sup>[42-43]</sup>。但高温消化的优势是可以同步实现消化残余物的有害病菌无害化, 因而减低了沼渣堆肥和沼液进一步稳定的需求。

(3) 油脂: 已有设施的运行均反映原料中的油脂对厌氧运行影响极大, 会显著降低产甲烷菌活力, 导致气泡问题<sup>[44-45]</sup>。因此, 若进料中餐饮垃圾的比重较大, 则建议应滤油处理后再进料。大型厌氧消化厂一般采用加热和三相分离离心机来提高提油率<sup>[6]</sup>, 但对于小型规模设施, 显然应避免此部分的预处理成本。

## 3 典型案例

### 3.1 应用全混合连续搅拌反应器的案例

案例 1<sup>[19]</sup>: 某北欧农场, 养殖 70 头奶牛、50 头小母牛和 100 只母鸡。处理量为 4 ~ 5 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> 的厌氧反应器 125 m<sup>3</sup>, 高 2.5 m, 直径 8 m, 停留时间 18 ~ 25 d。沼气发电机 9.7 kWe, 设施自用 0.85 kWe。建设和安装周期 3 周, 启动周期 2 周。年均发电量 64000 kWh, 余热热水储存 500 L·d<sup>-1</sup>。每日检查运行维护 20 min, 每 400 小时更换发电机的油和过滤器。产气运行情况和泵等机械故障均可手机监控。消化残余物储存, 施用前无需再处理。成本: 工程直接投资, 95000 欧(含 CHP, 交钥匙工程); 其它费用, 5000 ~ 10000 欧(资格证等)。运行费用: 每年 3500 欧。收入: 电力替代, 每年 7500 ~ 11000 欧; 替代热, 未统计; 绿色电力证书, 每年约 67 个绿色证书指标 × 93 欧 = 6231 欧; 热证书, 每年约 160 个指标 × 31 欧 = 5000 欧。

案例 2<sup>[19, 46]</sup>: 处理 120 公顷的菊苣种植废物(11 t·d<sup>-1</sup>, 含固率 15%) 以及青贮玉米(约菊苣根的 10%)。反应器设置 3 段: CSTR 水解酸化罐(400 m<sup>3</sup>, 停留时间 10 天; pH ~ 6; 最高进料量 30 t·d<sup>-1</sup>)、蜂窝填料床甲烷化罐(2 × 25 m<sup>3</sup>, 停留时间 18 小时; pH ~ 7; 温度 38℃; 最高有机负荷 35 kg COD m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>; 75% 的产气源于此反应器)、后消化罐(400 m<sup>3</sup>, 停

留时间 20 天)。甲烷产量: 38 m<sup>3</sup>·t<sup>-1</sup> 废物(相当于沼气产量: 70.4 m<sup>3</sup>·t<sup>-1</sup> 废物, 甲烷含量 54%)。CHP 配置: 100 kWe, 150 kWth。每年产电量 500 MWhel, 其中 145 MWhel(29%) 用于消化设施自用, 355 MWhel(71%) 主要用于菊苣种植生产过程(每公顷耗电 10 000 kWhel), 剩余电量并入电网。每年产热量 760 MWth, 其中 205 MWth(27%) 用于维持消化罐温度, 281 MWth(37%) 用于菊苣种植生产, 82 MWth(24%) 售卖给临近的印刷厂(1 km 距离), 还剩余 84 MWth(11%)。物料进罐前先清洗(去除石块)和破碎(XRipper 研磨泵)。消化残余物固液分离后, 沼渣用于农场的土壤改良, 沼液经澄清后排入市政管网<sup>[46]</sup>, 也可直接施用于农场作为肥料。人工: < 1 h·d<sup>-1</sup>(进料)。成本: 工程投资, 90 万欧(含 CHP, 交钥匙工程, 含 1 km 热水管线运至印刷厂); 运行费用: 每年 30000 欧(由运营公司专门负责维护)。收入: 电力替代, 每年 45500 欧; 替代热, 每年 20000 欧; 绿能证书(含电和热), 每年 64000 欧; 卖给印刷厂热, 每年 5200 欧。

### 3.2 应用机械搅拌辅助的柱塞流反应器的案例

案例 3: 处理某中国大型超市的过期食品等有机垃圾, 处理量 1.5 t·d<sup>-1</sup>。反应器和其它附属设备(破碎、分选、固液分离、沼气净化、锅炉或微型 CHP) 一体化设置在 13.7 m × 2.5 m × 2.5 m 的空间。反应器温度 36℃ ~ 38℃。进料垃圾含固率 28%, 出料消化残余物含固率降至 4%, 经固液分离后, 沼渣含固率约 14%, 沼液悬浮物 20000 ~ 40000 mg·L<sup>-1</sup>。甲烷产量 120 m<sup>3</sup>·t<sup>-1</sup> 废物。产生的能量热损失 19% ~ 23%, 用于反应器加热约 10%, 其它能源用于产 60℃ 热水或 CHP 发电, 直接用于该超市日常用能。设备的运行均通过物联网可直接手机监控。形成 0.5 ~ 30 t·d<sup>-1</sup> 的系列化设备。(信息由上海某新能源科技有限公司提供)。

案例 4: 处理江苏省某县垃圾分类后的村镇有机垃圾, 处理量 1 t·d<sup>-1</sup>, 反应器体积 20 m<sup>3</sup>, 反应温度 37℃。进料垃圾含固率 12% ~ 21%。沼气产量: 60 ~ 80 m<sup>3</sup>·t<sup>-1</sup> 废物。采用沼气锅炉获得热水用于反应器保温。固液分离后, 沼液沼渣用于周边蔬菜种植。设备的运行也是通过物联网直接手机监控。

### 3.3 应用车库型批式反应器的案例

案例 5<sup>[19]</sup>: 法国某带乡间别墅旅馆的马场, 约 150 匹成年马、50 匹马驹和 80 个旅馆床位。平均处理量 4.1 t·d<sup>-1</sup>(包括 1.78 t·d<sup>-1</sup> 垃圾、2.33 t·d<sup>-1</sup> 农

牧有机废物),但这些废物产生季节性波动量很大。反应器为中温干式批式厌氧消化,共6个,每个反应器容积 $30\text{ m}^3$ ,气密、带排气孔、热交换、淋滤液回流( $250\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ ),每批停留 $25\sim 30\text{ d}$ 。CHP配置:50 kWe。年均净发电量 $253\ 000\text{ kWe}$ ,产热 $425000\text{ kWh}$ (47%用于别墅建筑采暖,15%用于带马棚的住房建筑采暖,38%用于农业用干燥(装机功率9 kW,用于干草、小麦和其它农产品干燥))。消化产物直接用在边上的草场和农田。工程投资:反应器系统,38.3万欧(10个反应器);CHP( $2\times 25\text{ kW}$ )和沼气储存,12.3万欧;热水管网铺设,11万欧;其它费用(混凝土地面、仪器仪表、技术支持),6.8万欧。运行费用:未知。收入:绿点替代和相关补贴,每年4.55万欧;替代热,每年约1.9万欧;燃料油,每年约3万欧。

案例6:美国南旧金山市,处理食品垃圾和园林废物, $31\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ,8个反应器,停留时间 $21\text{ d}$ ,反应温

度 $51\text{ }^\circ\text{C}\sim 55\text{ }^\circ\text{C}$ ,沼气产量 $90\text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ 废物,沼气甲烷含量 $58\%\sim 62\%$ 。沼气提纯为压缩天然气,每年120000 DGE(DGE:柴油加仑当量),可每天为 $18\sim 20$ 辆卡车供应燃料。沼渣仓式堆肥。(信息来自于www.zerowasteenergy.com)

案例7<sup>[40]</sup>:黑龙江省某县,两条处理线用于处理混合收集的生活垃圾,垃圾进罐前破袋、筛分、人工分拣预处理。每条处理线处理能力 $50\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ,设置6个 $400\text{ m}^3$ 的车库批式反应器( $24\text{ m}\times 4\text{ m}\times 4.2\text{ m}$ )和1个 $600\text{ m}^3$ 的淋滤液储罐( $24\text{ m}\times 4\text{ m}\times 6.2\text{ m}$ )。反应器温度 $37\text{ }^\circ\text{C}$ ,停留时间 $35\text{ d}$ 。进料垃圾含固率 $36.7\%\sim 48.8\%$ ,挥发性固体(VS) $43.1\%\text{ dw}\sim 60.9\%\text{ dw}$ ,出料垃圾含固率 $48.7\%\sim 56.7\%$ ,VS $29.4\%\text{ dw}\sim 46.2\%\text{ dw}$ ,甲烷产量 $270\text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}\text{ VS}$ ,沼气产量平均每个反应器 $0.72\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}\text{ d}^{-1}$ ,淋滤液储罐产气 $2.22\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}\text{ d}^{-1}$ 。

以上案例的主要运行参数汇总于表1。

表1 3种典型反应器的应用案例汇总表

编号	反应器类型	垃圾类型	处理规模	CHP配置	成本	收入
1	全混合连续搅拌反应器	北欧农场禽畜废物	70头奶牛、50头小母牛和100只母鸡产生的废物	9.7 kWe	直接投资:95000 欧 运行成本:每年3500 欧	电力替代:每年7500~11000 欧 补贴:11231 欧
2		种植废物	$11\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 菊苣种植废物以及青贮玉米(约菊苣根的10%)	100 kWe, 150 kWh	直接投资:90 万欧 运行成本:每年3 万欧	电力替代:每年45500 欧 替代热:20000 欧 补贴:每年64000 欧 其他收入:每年5200 欧
3	机械搅拌辅助的柱塞流反应器	过期食品	$1.5\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$	甲烷产量 $120\text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ 废物	—	—
4		村镇有机垃圾	$1\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$	沼气产量: $60\sim 80\text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$	—	—
5	车库型批式反应器	马场产生的农牧有机废物和旅馆产生的有机废物	$4.1\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$	50 kWe	工程投资: 68.4 万欧	替代热:每年1.9 万欧 燃油替代:每年3 万欧 补贴:每年4.55 万欧
6		食品垃圾和园林废物	$31\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$	沼气产量: $90\text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$	—	沼气提纯为天然气每年12 万 DGE
7		生活垃圾	$50\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$	甲烷产量: $270\text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}\text{ VS}$	—	—

#### 4 实测运行数据

尽管已有相当数量的应用,小型规模厌氧消化设施实际运行对外公开的监测数据、物质流和能量流数据都非常缺乏。以下介绍了3个最新的发表数据案例。

案例8<sup>[47]</sup>:处理对象为西班牙某烹饪职业学校食堂产生的餐饮垃圾。垃圾经手动去除大尺寸杂物后研磨机破碎进入厌氧反应罐,每天进料约33 kg,用50 L 垃圾桶装。微型 CHP 配置:1 kWe、2.8

kWh,总体能量效率85%(电效率22.5%,热效率63.0%)。餐饮垃圾性质:TS 27.5% wt,VS 84% dw,C/N 为18.7,pH 值5.70。消化残余物TS $3.11\pm 0.62\%\text{ wt}$ ,VS 49% dw。有机负荷OLR $1.06\text{ gVS}\cdot\text{L}^{-1}\text{ d}^{-1}$ ,停留时间55.3 d,消化残余物回流约17.8%。甲烷产率: $360\text{ mL CH}_4\cdot\text{g}^{-1}\text{ VS}_{\text{added}}$ ,VS去除率93.1%。系统能量平衡情况为:沼气产能 $12864\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ VS}$ ,外部能量输入 $3061\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ VS}$ ,能量输出包括:反应器热损失 $1131\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ VS}$ ,反应器加热 $3065\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ VS}$ ,CHP热损失 $1866\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ VS}$ ,净产

热 5039  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ , 净产电 2894  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ 。另一实验周期测算的全设施能量需求测算为 9155  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ , 相当于  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$ , 包括: 运行 3283  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ ( 加热器(  $2 \times 1500 \text{ W}$ ) 87.8% + 控制器(  $50 \text{ W}$ ) 12.2%), 加热 5345  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ ( 加热器(  $2 \times 1500 \text{ W}$ ) 57.3% + 主泵(  $800 \text{ W}$ ) 38.2% + 控制器(  $50 \text{ W}$ ) 2.4% + 加热泵(  $45 \text{ W}$ ) 2.1%), 回流 191  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ ( 主泵(  $800 \text{ W}$ ) 66.0% + 加热器(  $2 \times 1500 \text{ W}$ ) 30.0% + 控制器(  $50 \text{ W}$ ) 4.2%)、进料 241  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ ( 加热器(  $2 \times 1500 \text{ W}$ ) 37.3% + 潜水泵(  $400 \text{ W}$ ) 20.7% + 主泵(  $800 \text{ W}$ ) 12.4% + 混合器(  $650 \text{ W}$ ) 11.2% + 控制器(  $50 \text{ W}$ ) 3.3% + 加热泵(  $45 \text{ W}$ ) 0.8%)、破碎 95  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ 。有机负荷 OLR 1.06  $\text{gVS}\cdot\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$  时的电能综合表现系数 COPel( 全厂电能产生与电能消耗之比) 为 0.95、热能综合表现系数 COPth( 全厂热能产生与热能消耗之比) 为 2.64; 上述 CHP 电效率若调整至 25%, 热效率调整至 50%, 则 COPel = 1.05, COPth = 2.09; 若 OLR 增至 2.7  $\text{gVS}\cdot\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ , 则 COPel = 1.68, COPth = 3.37。

案例 9: 处理对象为新加坡某综合型大学校区食堂的餐饮垃圾, 每天进料 30 kg, 物料破碎至 3 mm 以下。厌氧反应器  $1 \text{ m}^3$ , 反应温度  $35^\circ\text{C}$ , 环境温度  $29^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 。有机负荷 5.4  $\text{gVS}\cdot\text{L}^{-1}$  时甲烷产量  $0.55 \text{ L}^{-1}\text{CH}_4 \cdot \text{g}^{-1}\text{VS}$ 。若处理量模拟放大至  $500 \text{ kg}$  废物 $\cdot\text{d}^{-1}$ , 则净热能和电能输出预测为 175.93 kWh 和 163.90 kWh。

案例 10<sup>[21]</sup>: 希腊北部某农场, 处理对象为 8.23  $\text{tVS}\cdot\text{d}^{-1}$  牛粪(  $129 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ) 和 3.274  $\text{tVS}\cdot\text{d}^{-1}$  鸡粪与青贮饲料(  $10 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ), 混合进  $5400 \text{ m}^3$  CSTR 厌氧反应器( 共组容积  $4200 \text{ m}^3$ ; 上覆双膜沼气膜空间  $650 \text{ m}^3$ ; 反应器内设 4 个潜水推进器; 反应温度  $39^\circ\text{C}$ ; 顶部设 10 cm 填料以支撑硫酸氧化菌生长)。沼产气率  $0.46 \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ , 沼气产量  $5300 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。消化残余物  $4.832 \text{ tVS}\cdot\text{d}^{-1}$ (  $130 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ), 经固液分离后, 形成沼液  $3.194 \text{ tVS}\cdot\text{d}^{-1}$ , 沼渣  $1.638 \text{ tVS}\cdot\text{d}^{-1}$ 。沼渣条垛式堆肥 60 天, 占地  $600 \text{ m}^2$ , 即  $10 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  处理量, 形成  $1.370 \text{ tVS}\cdot\text{d}^{-1}$  堆肥。沼液储存池  $18000 \text{ m}^3$ , 停留时间长达 160 天, 池内稳定后产量为  $3108 \text{ kgVS}\cdot\text{d}^{-1}$ , 典型的稳定沼液性质是 pH 值 7.49、电导率  $21.75 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、TS  $41.7 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、VS  $25.9 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$   $1691 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。沼渣堆肥和稳定沼液均回用至农场(  $4 \text{ km}$  半径)。 $1000 \text{ m}^2$  玉米田在种植期灌溉  $75 \text{ m}^3$  沼液, 玉米产量是  $6500 \text{ kg}$ ; 作

为对比之前采用商业肥料  $70 \text{ kg}\cdot 1000 \text{ m}^{-2}$  的玉米产量仅  $5900 \text{ kg}$ 。CHP 配置:  $550 \text{ kWe}$ , 电能供给公共电网, 热能则用于 CSTR 反应器加热。沼气脱硫罐内和罐外进行: 罐内一是向 CSTR 添加  $32 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}\text{Fe}(\text{OH})_3$  或  $26.5 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}\text{FeCl}_2$ ; 二是低剂量引入空气。罐外则是采用活性炭吸附。

## 5 基于小型厌氧消化设施的其它技术模式

基于小型规模厌氧消化设施构建的社区改土保肥和低碳用能生态系统最理想的情况是沼液和沼渣均能实现土地利用、沼气热电联供。但实际应用时可能受到经济和土地利用时空条件等各方面的限制, 因此, 应因地制宜地对沼气、沼液和沼渣的利用消纳去向做相应调整。例如, 与县域已建焚烧厂协同, 不另设沼气 CHP, 而是将沼气和收集的臭气喷入焚烧炉, 沼液利用已有污水厂处理, 从而节省沼气 CHP 设备成本和二次污染控制成本, 以及人员费用; 但是需注意的是, 沼气 CHP 能量效率远高于垃圾焚烧厂, 后者发电效率仅 22% ~ 25%, 而且相比欧盟焚烧厂的能效水平<sup>[48]</sup>, 我国焚烧厂目前整体能效水平偏低<sup>[49]</sup>, 因此, 此沼气利用方案不利于能源利用, 会相应大幅减低减碳量。至于沼渣, 在城市地区, 多缺少堆肥和贮存空间, 余热利用需求较低, 可考虑用余热进行沼渣干化。

## 参考文献:

- [1] 何晶晶, 吕凡, 邵立明, 等. 中国城市生活垃圾中生物质组分的回收和利用研究 [Z]. 罗斯托克: 德国联邦环境、自然保护、建筑和核安全部, 2017.
- [2] Dehoust G, Schueler D, Vogt R, et al. Climate protection potential in the waste management sector. Examples: municipal waste and waste wood [EB/OL]. [2022-9-19]. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/climate-protection-potential-in-waste-management>.
- [3] Cuhls C, Möhl B, Clemens J. Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen (Determination of the emission situation in the recycling of organic waste) [EB/OL]. [2022-9-19]. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ermittlung-der-emissionssituation-bei-der>.
- [4] Liao N L, Bolyard S C, Lu F, et al. Can waste management system be a Greenhouse Gas sink? Perspective from Shanghai, China [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2022, 180.



- [5] Levis J W, Barlaz M A. What Is the Most Environmental-friendly Beneficial Way to Treat Commercial Food Waste? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(17): 7438–44.
- [6] 吕凡, 章骅, 郝丽萍, 等. 易腐垃圾就近就地处理技术浅析 [J]. *环境卫生工程*, 2020, 28(05): 1–7.
- [7] Crowe M, Nolan K, Collins C, et al. *Biodegradable Municipal Waste Management in Europe* [M]. Office for Official Publications of the European Communities, 2002.
- [8] Tsilemou K, Panagiotakopoulos D. Approximate cost functions for solid waste treatment facilities [J]. *Waste Management Research*, 2006, 24(4): 310–22.
- [9] 吕凡, 章骅, 邵立明, 等. 基于物质流分析餐厨垃圾厌氧消化工艺的问题与对策 [J]. *环境卫生工程*, 2017, 25(01): 1–9.
- [10] Regattieri A, Bortolini M, Ferrari E, et al. Biogas Micro-Production from Human Organic Waste—A Research Proposal [J]. *Sustainability*, 2018, 10(2).
- [11] 赵会林, 鲁新蕊. 北方寒冷地区沼气池的应用与发展研究 [J]. *东北水利水电*, 2019, 37(05): 67–68+70.
- [12] 赵嵩颖, 秦雨晴, 颜萍, 等. 相变蓄热采暖沼气池蓄热结构优化 [J]. *中国科技论文*, 2021, 16(08): 830–835.
- [13] 余师漩. 基于相变储能技术的太阳能恒温沼气池 [J]. *科学技术创新*, 2022(06): 163–167.
- [14] 徐庆贤, 官雪芳, 吴晓梅, 等. 恒压黑膜沼气池设计及运行效果分析 [J]. *可再生能源*, 2022, 40(06): 732–736.
- [15] Mirosz L, Amrozy M, Trzaski A, et al. What policymakers should know about micro-scale digestion [M]. National Energy Conservation Agency (NAPE), 2015.
- [16] 何晶晶. “分类”是农村生活垃圾治理的关键 [N]. *中国建设报*, 2019–05–17(8).
- [17] 邵立明, 崔广宇, 廖南林, 等. 农村多源易腐垃圾机械预处理-强化自然通风阳光房堆肥技术及示范工程 [J]. *环境卫生工程*, 2022, 30(02): 107–109.
- [18] Wong JWC, Wang X, Selvam A. Improving compost quality by controlling nitrogen loss during composting [M]. Elsevier: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 2017: 59–82.
- [19] Dobbelaere A D, Keulenaere B D, Mey J D, et al. Small-scale anaerobic digestion: case studies in Western Europe [M]. 2015.
- [20] Li J, Kong C X, Duan Q W, et al. Mass flow and energy balance plus economic analysis of a full-scale biogas plant in the rice-wine-pig system [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 193: 62–7.
- [21] Spyridonidis A, Vasiliadou I A, Akratos C S, et al. Performance of a Full-Scale Biogas Plant Operation in Greece and Its Impact on the Circular Economy [J]. *Water*, 2020, 12(11).
- [22] 王志杰, 何晶晶, 章骅, 等. 厌氧消化残余物土地利用的中外标准政策浅析 [J]. *环境卫生工程*, 2022, 30(01): 17–27.
- [23] He P J, Huang Y L, Qiu J J, et al. Molecular diversity of liquid digestate from anaerobic digestion plants for biogenic waste [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 347: 126373.
- [24] 边文范, 王艳芹, 李国生, 等. 一种沼渣营养钵及其制备方法和应用 [P]. 山东: CN102440158A, 2012–05–09.
- [25] 屈安安, 郭钰, 段娜, 等. 基于沼渣原料的高温高湿杀菌耦合热风干燥生产牛床垫料工艺参数研究 [J]. *中国沼气*, 2021, 39(06): 62–67.
- [26] Wiedemann L, Conti F, Janus T, et al. Mixing in Biogas Digesters and Development of an Artificial Substrate for Laboratory-Scale Mixing Optimization [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2017, 40(2), 238–247.
- [27] Kowalczyk A, Harnisch E, Schwede S, et al. Different mixing modes for biogas plants using energy crops [J]. *Applied Energy*, 2013, 112, 465–472.
- [28] Meister M, Rezavand M, Ebner C, et al. Mixing non-Newtonian flows in anaerobic digesters by impellers and pumped recirculation [J]. *Advances in Engineering Software*, 2018, 115, 194–203.
- [29] Wu B. CFD simulation of gas mixing in anaerobic digesters [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 109, 278–286.
- [30] Conti F, Saidi A, Goldbrunner M. Numeric Simulation-Based Analysis of the Mixing Process in Anaerobic Digesters of Biogas Plants [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2020, 43(8), 1522–1529.
- [31] Conti F, Saidi A, Goldbrunner M. Evaluation Criteria and Benefit Analysis of Mixing Process in Anaerobic Digesters of Biogas Plants [J]. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, 24(3), 305–317.
- [32] Stroot P G, McMahon K D, Mackie R I, et al. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions—I. Digester performance [J]. *Water Research*, 2001, 35(7), 1804–1816.
- [33] Li L, Wang K, Sun Z, et al. Effect of optimized intermittent mixing during high-solids anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge: Simulation, performance, and mechanisms [J]. *Science of The Total Environment*,

- 2022, 842, 156882.
- [34] Annas S, Elfering M, Jantzen H A, et al. Experimental analysis of mixing-processes in biogas plants [J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 258, 117767.
- [35] Lemmer A, Naegele H-J, Sondermann J. How Efficient are Agitators in Biogas Digesters? Determination of the Efficiency of Submersible Motor Mixers and Incline Agitators by Measuring Nutrient Distribution in Full-Scale Agricultural Biogas Digesters [J]. *Energies*, 2013, 6(12), 6255 – 6273.
- [36] McMahon K D, Stroot P G, Mackie R I, et al. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions-II: Microbial population dynamics [J]. *Water Research*, 2001, 35(7), 1817 – 1827.
- [37] Vavilin V A, Angelidaki I. Anaerobic degradation of solid material: Importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2D distributed model [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, 89(1), 113 – 122.
- [38] Sindall R C. Increasing the efficiency of anaerobic waste digesters by optimising flow patterns to enhance biogas production [D]. Birmingham: University of Birmingham, 2015.
- [39] Dustin J S, Hansen C L. Completely Stirred Tank Reactor Behavior in an Unmixed Anaerobic Digester: The Induced Bed Reactor [J]. *Water Environment Research*, 2012, 84(9), 711 – 718.
- [40] Qian My, Li Rh, Li J, et al. Industrial scale garage-type dry fermentation of municipal solid waste to biogas [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217, 82 – 89.
- [41] O'connor S, Ehimen E, Pillai S C, et al. Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms [J]. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2021, 139: 110580.
- [42] Nie E Q, He P J, Zhang H, et al. How does temperature regulate anaerobic digestion? [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, 150: 111453.
- [43] Nie E Q, He P J, Duan H W, et al. Microbial and Functional Succession during Anaerobic Digestion along a Fine-Scale Temperature Gradient of 26-65 degrees C [J]. *Acs Sustainable Chemistry Engineering*, 2021, 9(47): 15935 – 15945.
- [44] Lu F, Liu Y, Shao L M, et al. Powdered biochar doubled microbial growth in anaerobic digestion of oil [J]. *Applied Energy*, 2019, 247: 605 – 614.
- [45] Liu Y, He P J, Duan H W, et al. Low calcium dosage favors methanation of long-chain fatty acids [J]. *Applied Energy*, 2021, 285, 116421.
- [46] Sherrard A. Novel biogas plant feasts on culinary cultivar [EB/OL]. (2014 – 1 – 31) [2022 – 9 – 19]. <https://bioenergyinternational.com/novel-biogas-plant-feasts-on-culinary-cultivar/>.
- [47] Gonzalez R, Hernandez J E, Gomez X, et al. Performance evaluation of a small-scale digester for achieving decentralised management of waste [J]. *Waste Management*, 2020, 118: 99 – 109.
- [48] 欧远洋, 龙吉生. 提高垃圾焚烧厂发电效率的最新应用技术 [J]. *环境卫生工程*, 2015, 23(01): 65 – 68.
- [49] 吴剑, 蹇瑞欢, 刘涛. 我国生活垃圾焚烧发电厂的能效水平研究 [J]. *环境卫生工程*, 2018, 26(03): 39 – 42.