

横推流式连续干法厌氧发酵设备设计与试验

冯 晶¹ 胡 鑫^{1,2} 赵立欣¹ 郭占斌² 姚宗路¹ 罗 娟¹

(1. 农业部规划设计研究院农业部农业废弃物能源化利用重点实验室, 北京 100125;
2. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

摘要: 我国干法厌氧发酵技术仍然处于试验示范阶段, 尤其是连续式干法厌氧发酵技术仍停留在实验室小试阶段。针对上述问题, 基于螺旋输送和真空负压出料原理, 研究了横推流式连续厌氧干法发酵装置设计方法, 并试制 1 套有效容积 180 L 的中试设备。该平台主要由螺旋进料、干法厌氧发酵、负压出料、气体净化收集、固液分离、在线控制等单元组成。在牛粪与玉米秸秆干物质混合质量比为 3:1、接种量 30%、混合原料总固形物质量分数 20% 的条件下, 分 3 个阶段启动和调试中试平台, 整个调试过程共持续 103 d。第 1 阶段, 反应器在室温下运行 33 d, 平均容积产气率为 0.17 m³/(m³·d); 第 2 阶段, 提升反应器温度至中温 38℃, 反应器平均容积产气率升至 0.25 m³/(m³·d) 左右, 但 pH 值有明显降低, 且沼气中甲烷含量降低; 反应器运行 68 d 后进入第 3 阶段, 通过添加沼液提高接种量, 之后反应器的容积产气率快速升高, 最高可达 0.58 m³/(m³·d), 此阶段中试装置平均容积产气率为 0.48 m³/(m³·d), 甲烷质量分数稳定在 56% 左右, 混合原料的干物质降解率达到 48% 以上。结果表明, 该横推流式连续厌氧干法发酵平台可实现固体物料的连续进出料和稳定连续产气, 达到了设计要求。

关键词: 厌氧干法发酵设备; 横推流式; 混合原料; 中试试验

中图分类号: S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0319-07

Design and Start-up Test of Horizontal Plug-flow Dry Anaerobic Fermentation Equipment

FENG Jing¹ HU Xin^{1,2} ZHAO Lixin¹ GUO Zhanbin² YAO Zonglu¹ LUO Juan¹

(1. Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agriculture Residue, Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Engineering, Beijing 100125, China
2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: At present, the dry anaerobic fermentation technique is still not applied widely among biogas plants in China. Especially, there are few reports on dry fermentation techniques employed in biogas plants. Aimed to this situation, a design method of horizontal plug-flow dry anaerobic fermentation equipment was developed, which employed a screw convey for continuous inlet and a vacuum device for outlet. Based on this method, a pilot scale equipment was developed with an effective volume of 180L. The equipment consisted of screw convey, dry anaerobic fermentation reactor, vacuum pump for discharge, gas purification reactor and solid-liquid separation device. All the above devices were online controlled with a computer. The pilot equipment was started up using mixture of cow dung and corn straw with a mixing ratio of 3:1 (dry matter ratio), the inoculums accounted a proportion of 30% in inlet raw materials and the initial total solid content was 20%. The whole start-up (103 d) could be divided into three stages. During stage I, the reactor was operated at room temperature, the average biogas producing rate for the reactor was 0.17 m³/(m³·d). After 68 d of running, the reactor temperature was raised to 38℃, and then the average biogas producing rate was risen to 0.25 m³/(m³·d), with a decrease of methane content. Meanwhile, the pH value was decreased significantly. After 70 d of running, the inoculation was increased to 50% by adding biogas slurry. After that the biogas production rate of the reactor was increased rapidly and reached the highest point of 0.58 m³/(m³·d). The average biogas

收稿日期: 2018-01-25 修回日期: 2018-03-08

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金项目(CARS-02)

作者简介: 冯晶(1986—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事农业废弃物资源化利用研究, E-mail: fengjing0204@sina.com

通信作者: 赵立欣(1967—), 女, 研究员, 博士, 主要从事农业废弃物资源化利用技术研究, E-mail: zhaolixin5092@163.com

production rate was around $0.48\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, and methane content was stable at about 56%. At the end of the start-up, the dry matter degradation rate of raw materials reached more than 48%. The performance of the reactor during start-up suggested that the equipment could run normally, which meet the design requirement.

Key words: dry anaerobic fermentation equipment; horizontal plug-flow; mixed raw materials; pilot tests

0 引言

我国主要农作物秸秆理论资源量为 10.4 亿 t, 20% 未有效利用^[1], 畜禽粪污约 38 亿 t, 40% 以上未有效利用^[2], 严重威胁我国农业农村环境。厌氧发酵技术因具有高效、高经济性、广泛性的生化处理方式和可产生沼气这一可再生清洁能源, 沼渣可进行堆肥或者用于生产土壤改良剂等优势, 被用于化工环保领域处理畜禽废水和固体废弃物等^[3-4]。一般而言, 厌氧发酵分为干法厌氧发酵和湿法厌氧发酵。大量实践表明, 湿法发酵产生大量沼液, 施用不当易造成二次污染^[5]。更关键问题是, 我国规模化养殖场越来越多地采用干清粪工艺, 这也导致养殖场所产生的粪便总固形物含量较高, 使用湿法发酵工艺需要消耗大量的水资源用于调节含水率, 使沼气工程运行成本提高。干法厌氧发酵的发酵底物总固形物质量分数(TS)在 20% ~ 40% 之间^[6]。相对于湿法厌氧发酵技术, 干法厌氧发酵技术原料适应性更广, 同时由于其总固形物含量高, 避免了沼液大量产生无法处理的难题, 且其保温能耗较低, 降低了运行成本, 因而可广泛应用于农业废弃物、生活垃圾等有机废弃物处理^[7-11]。

从运行程序来看, 干法厌氧发酵技术主要包括序批式干法厌氧发酵技术和连续式干法厌氧发酵技术两类。车库式干发酵系统是典型的序批式干法厌氧发酵技术^[12], 已经在德国广泛应用, 我国也开发了覆膜槽沼气干发酵技术、一体化车库式干式发酵技术等序批式干法厌氧发酵技术^[13-15]。连续式厌氧干法发酵技术是新近兴起的厌氧发酵技术, 相比于序批式干法厌氧发酵技术, 连续式干法厌氧发酵技术具有产气连续稳定、干物质降解率高等优势。比利时、法国、瑞士等国家已经开发出 Dranco 工艺、Valorga 工艺、Komopogas 工艺^[16-18]等连续式干法厌氧发酵装备。国外开发的连续式厌氧干法发酵技术主要针对城市生活垃圾, 对于秸秆、畜禽粪便等农业废弃物的干法连续式厌氧发酵技术仍有待进一步研究。相比于序批式干法厌氧发酵技术, 连续式干法厌氧发酵技术首先需要解决物料连续密封进出料问题, 但由于总固形物含量高的物料流动性较差, 对进出料设备磨损程度较高, 进出料装备使用寿命短、运

行稳定性差, 连续密封进出料技术有待突破^[19-20]。在连续式厌氧干法发酵机理、装备设计、优化工艺等方面也需要进一步探索。这些都导致连续式干法厌氧发酵技术发展缓慢。

针对上述问题, 本文设计一种横推流式连续厌氧干法发酵装备, 对该装备的设计方法进行研究, 设计试制中试厌氧干法发酵装备, 并利用玉米秸秆和牛粪的混合原料进行发酵试验。

1 工作原理和整机结构

连续厌氧干法发酵工艺流程如图 1 所示。工艺过程包括原料混合、密封进料、厌氧干法发酵、沼气净化收集、沼渣固液分离 5 部分。

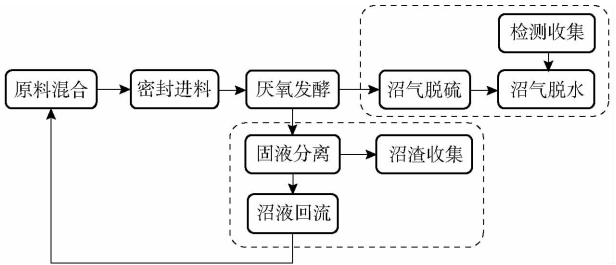


图 1 连续厌氧干法发酵工艺路线图
Fig. 1 Process of horizontal plug-flow dry anaerobic fermentation

横推流式连续厌氧干法发酵设备结构示意图如图 2 所示, 主要由密封进料装置、厌氧干法发酵装置、沼气净化装置、固液分离装置和沼液回流装置组成。设备工作时, 利用储料罐中的搅拌桨先将原料混配均匀, 然后采用螺旋输料器将原料输送至发酵箱。发酵箱侧面安装 4 组单独控速的搅拌桨, 实现物料定向流动和发酵箱内的物料混配。发酵完成后的物料, 在出料口的出料腔内, 利用真空泵形成负压将原料吸出, 并采用固液分离机对物料挤压分离。固液分离产生的沼渣经采样测试后收集备用; 沼液经过测试后, 部分经回流泵回流至储料罐作为接种物与原料混合。沼气依次经脱硫和脱水后在线检测 CH₄ 含量。发酵箱通过电加热炉利用循环热水进行保温增温, 使发酵温度维持在设定的水平上。整套设备安装在线监控系统, 对发酵过程中温度、pH 值、气体流量、CH₄ 含量等参数进行在线监测及数据存储。

横推流式连续厌氧干法发酵设备主要参数为:

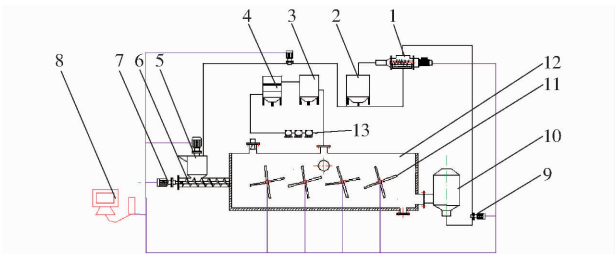


图 2 连续厌氧干法发酵设备结构示意图
Fig. 2 Sketch of horizontal plug-flow dry anaerobic fermentation equipment

1. 固液分离机 2. 沼渣罐 3. 脱水罐 4. 脱硫罐 5. 进料罐
6. 螺旋输料器 7. 减速电动机 8. 控制系统 9. 真空泵 10. 真空罐 11. 搅拌浆 12. 发酵箱 13. 气体流量计

总功率 11 kW, 发酵箱容积 250 L, 进料量 10 ~ 15 kg/d, 发酵温度 25℃/38℃, 停留时间 15 ~ 40 d。

2 关键部件设计

2.1 进料装置设计

由于干法发酵物料比较粘稠, 流动性较差, 设备采用螺旋进料的方式将物料输送入发酵箱中, 结构示意图如图 3 所示, 参照螺旋输送器的设计标准^[21], 水平螺旋输送机计算式为

$$I_m = \frac{1}{4} \pi D^2 v \varphi \rho \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} v = \frac{Sn}{60} \\ S = 0.8D \end{cases} \quad (2)$$

式中 I_m ——处理量, 取 2 ~ 3 kg/min
 D ——螺旋外径, m
 φ ——填充系数, 取 0.33
 ρ ——堆积密度, kg/m³
 S ——螺距, m n ——转速, r/min

通过不同含固率条件下混合原料堆积密度的测试得出, 含固率为 20% 时堆积密度为 994.4 kg/m³, 处理量 I_m 为 3 kg/min, 选择转速为 70 r/min, 根据一般性物料的摩擦性质及其粘附系数, 取填充系数为 0.33, 代入式(2)中可得螺旋输送机外径为 0.1 m, 螺距为 0.08 m。

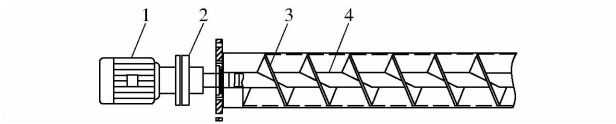


图 3 螺旋输送机示意图

Fig. 3 Sketch of screw conveyor for continuous feeding-in
1. 减速电动机 2. 联轴器 3. 螺旋叶片 4. 螺旋轴

2.2 发酵箱设计

如图 4 所示, 发酵箱作为整个发酵装置的核心部件, 采用卧式推流结构, 主要由发酵箱体、搅拌浆、

物位计、加热装置、取料口和观察孔组成, 箱体夹层中充满循环温水, 保证菌种发酵的温度环境, 搅拌装置定期搅拌使原料层翻滚, 进而保证了原料的均匀混合, 同时也实现推动物料的目的, 物位计和观察孔可用于实时监测原料高度。

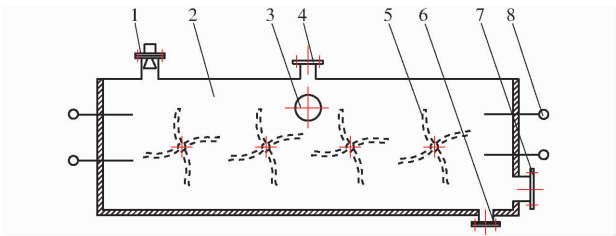


图 4 发酵箱结构图

Fig. 4 Structure of fermentation container

1. 物位计 2. 箱体 3. 观察孔 4. 出气口 5. 搅拌浆 6. 取料口 7. 出料口 8. 温度计

根据工艺要求, 确定发酵箱填料量为 150 kg, 混合物料密度取 994.4 kg/m³, 发酵箱设计为长方形结构, 发酵箱容积计算式为^[22-23]

$$V = \frac{q}{\delta \rho} \quad (3)$$

其中

$$\delta = \frac{\delta'}{\delta_{\max}}$$

式中 V ——发酵箱体积, m³
 q ——填料量, kg δ ——初始充满系数
 δ' ——最大充满系数, 取 0.78
 $\delta_{\max}$ ——体积最大膨胀系数, 取 1.3

代入公式得 $\delta = 0.6$, $V = 0.25$ m³, 为便于搅拌轴的安装, 取发酵箱长为 1.6 m, 宽和高为 0.4 m。

2.3 搅拌桨的设计

目前用于流体搅动常见的搅拌桨主要有锚式、螺带式、涡轮式等结构形式^[24], 其中锚式结构适合于高粘度流体的混合、传热, 但剪切力较低; 螺带式适合总固形物含量高的物料混合、传热反应等操作过程, 但混合程度较差; 涡轮式适合低粘度流体的混合、循环、固体悬浮、溶解等。综合考虑, 为了达到均匀搅拌和有序输送的目的, 设计了一种铲式搅拌叶片, 如图 5 所示。

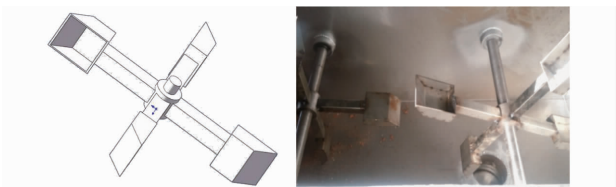


图 5 搅拌桨结构图

Fig. 5 Structure diagram of propeller

目前国内大多的搅拌桨工作间隙为 5 ~ 10 mm, 本设备需要适当接种, 使发酵箱内残留的物料转变为接种物, 因此需要较大间隙, 选取侧边间隙 μ_1 和

底边间隙 μ_2 为 10 mm,根据发酵罐长度及工作间隙,横向设置 4 组搅拌轴,每根轴上安装 4 组搅拌桨,每个搅拌桨由 4 组夹角 90°的搅拌叶片组成。

搅拌桨外径 R 可用发酵箱宽度 b 和搅拌桨底边间隙 μ_2 求出,即

$$R = b - 2\mu_2 \tag{4}$$

为提高搅拌效果并同时降低能耗,搅拌桨工作时,物料所受的离心力应小于自身的重力,即

$$m\omega^2 R < mg \tag{5}$$

其中
$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

式中 m ——叶片质量 ω ——叶片角速度
得出 $R \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 < g$,即 $n < \frac{30\sqrt{g}}{\pi} \frac{1}{\sqrt{R}}$,计算得出搅拌桨转速 n 为 7.93 r/min。

3 样机测试与试验

3.1 样机测试

在试验之前先进行设备的单体运行调试,利用空压机和压力表测试设备耐压可达 0.5 MPa,设备密封性良好;进料螺旋电动机固定转速为 70 r/min,以不同总固形物含量的物料进行测试,进料量为 180 ~ 200 kg/h;选定固液分离机型号为睿特森 GLC-180,经测试,分离效率为 80%;4 个搅拌桨电动机为变频电动机,搅拌速度可在 1 ~ 20 r/min 内调节,搅拌桨明显提高了物料流动性和均匀混合性。

单体部件调试完成后进行发酵试验调试,利用电热炉加热循环水给设备进行保温加热,温度最高可达 40℃,控温误差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$;流量计和 CH₄ 监测仪经校核后示数显示正常,仪表示数误差 $\pm 0.5\%$;运行过程中进料、出料及产气均正常;利用电能质量分析进行了能耗测试,设备整体运行 1 d 的耗电量为 2.6 kW·h,运行成本较低,同时达到了工艺要求。

3.2 试验材料

样机测试完成后,在农业部规划设计研究院重点实验室进行了发酵试验,设备实物图如图 6 所示。

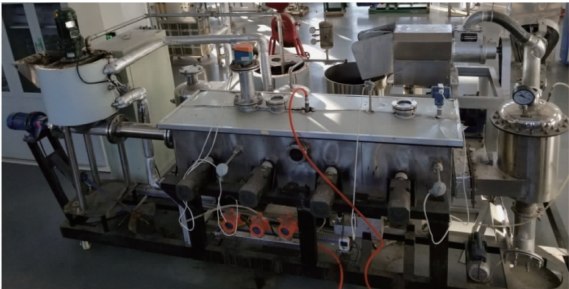


图 6 横推流式厌氧干法发酵设备实物图
Fig.6 Picture of horizontal plug-flow dry anaerobic fermentation equipment

试验原料新鲜牛粪和黄贮玉米秸秆均来源于北京市某奶牛场,黄贮玉米秸秆先经秸秆揉搓机粉碎(长度 0.5 ~ 1 cm),常温存放于实验室备用。原料的特性如表 1 所示。

表 1 试验原料特性
Tab.1 Properties of raw materials

原料	总固形物 质量分数/%	挥发性固形 物质量分数/%	碳氮比
新鲜牛粪	34.62	85.83	15.24
青贮玉米秸秆	31.19	95.65	24.09

3.3 试验方法及测试指标

牛粪与黄贮秸秆的干物质质量比例为 3:1,初始接种物为取自沼气工程的新鲜沼渣,沼渣干物质质量占物料混合干物质的百分比为 50%,混合原料固形物质量分数为 20%,碳氮比为 20 左右。装置启动时,首先将混合后的原料加入发酵罐内,至发酵罐总容积的 70%。反应器初始停留时间为 20 d,每日进料 1 次,每天进料 9 kg。反应器正常运行后取沼渣与混合原料进行混合后进料。

设备共进行 3 个阶段试验,共运行 103 d。每个阶段试验工艺参数的设定如表 2 所示,每天对容积产气率及 pH 值进行检测,每周对甲烷含量进行抽样检测,在第 3 阶段试验产气稳定后对沼液取样测定化学需氧量和挥发性脂肪酸含量。

表 2 试验方案
Tab.2 Test plan

阶段	发酵温度/ ℃	进料量/ (kg·d ⁻¹)	总固形物质 量分数/%	运行时间/ d
1	25	9	20	33
2	38	6	20	35
3	38	6	15	35

日产沼气量采用 LMP-1 型湿式防腐气体流量计(长春阿尔法仪器公司)测定;沼液中甲烷含量采用 BM12492 型便携式沼气成分测定仪(英国 Geotech 公司)测定;原料中有机碳、总氮含量采用 EA2400 型元素分析仪(美国 PerkinElmer 公司)测定;沼液 pH 值采用 PHS-3C 型酸度计(上海雷磁公司)测定;测定沼液化学需氧量时,先将沼液经过 20 000 r/min 的离心机离心分离 15 min 后再过滤,过滤后的液体采用 5B-2C 型 COD 快速测定仪(美国哈希公司)测定^[25]。

3.4 结果分析

设备运行过程中反应器的容积产气率、甲烷质量分数和 pH 值分别如图 7 ~ 9 所示。试验启动第 1 阶段,反应器初始容积产气率较低,随后呈明显上升趋势,并在反应器运行 20 d 左右达到产气高峰,反

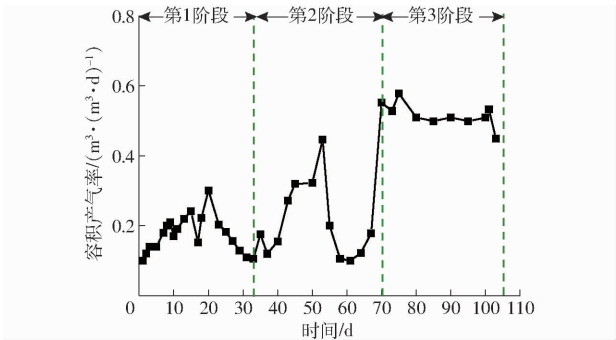


图 7 容积产气率变化曲线

Fig. 7 Changes of gas production rate

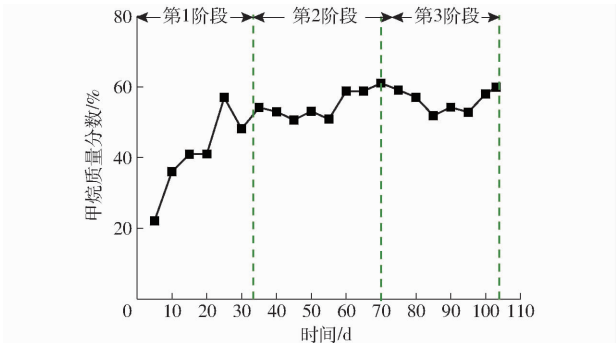


图 8 沼气甲烷质量分数变化曲线

Fig. 8 Changes of methane content in biogas

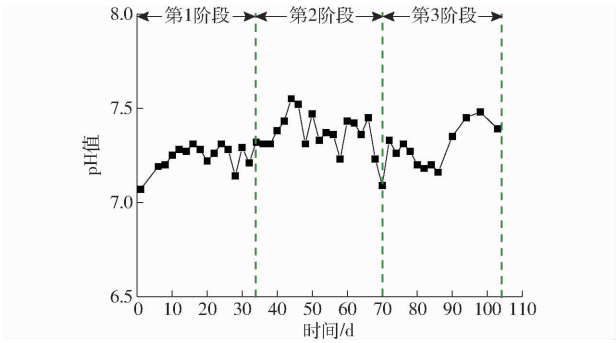


图 9 沼液 pH 值变化曲线

Fig. 9 Changes of biogas slurry pH value

应器的日容积产气量达到 60 L 左右,容积产气率达到 $0.30\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,之后反应器的容积产气率逐渐降低。在此过程中,反应器的平均容积产气率为 $0.17\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,沼气中甲烷质量分数逐渐升高,并最终质量分数达到 61.05% 左右。同时,沼液初始 pH 值为 7.07,第 1 阶段运行过程中,沼液 pH 值稳定在 7.0 ~ 7.5 范围内。一般而言,产甲烷菌对 pH 值变化更敏感,适宜的生长 pH 值为 6.5 ~ 7.8^[26],比较适合厌氧微生物的生长。同时温度对厌氧微生物生长以及反应过程动力学和稳定性、沼气的产量等都有显著的影响^[27]。有研究表明发酵温度过高或过低均会影响厌氧菌的活性,从而影响厌氧菌分解物料的能力,造成产气量小、原料降解率低^[28-30]。第 1 阶段反应器的容积产气率较低,这主要是由于反应器运行保持在室温 (25℃) 左右运行,

温度较低导致产气量不高。

第 2 阶段,反应器的运行温度提高至中温 38℃,同时为避免反应器发生酸化,将进料量降低至 6 kg/d,反应器水力停留时间提高至 35 d。改变运行条件后,反应器容积产气率明显上升,并在反应器运行 50 d 后达到 $0.45\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,但之后逐渐下降。在此过程中,反应器的平均容积产气率为 $0.25\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 左右,较常温阶段产气量有明显升高。第 2 阶段运行过程中,沼气的甲烷质量分数持续保持在 60% 左右,而在反应器运行至 55 d 左右时,沼气中甲烷质量分数迅速降低至 40% ~ 50%。同时,第 2 阶段沼液 pH 值呈下降趋势。这可能是由于随着温度的提升,反应器内有机物降解速率加快,由于接种量为 30% 左右,可能由接种量不够或局部酸化导致^[31]。

反应器运行 68 d 后,第 3 阶段用沼液调整混合原料总固形物质量分数为 15%,以增加接种量,同时调整反应器进料总固形物质量分数至 15%。之后,反应器容积产气率迅速升高,在运行第 75 天时设备的容积产气率可达 $0.58\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,设备平均容积产气率可达 $0.48\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,产气量较第 2 阶段明显升高。在此过程中,沼气中甲烷平均质量分数在 56.7% 左右,沼液 pH 值降低但随后稳定保持在 7.0 ~ 7.5 的范围内,设备保持稳定运行。之后对沼液内化学需氧量和挥发性脂肪酸进行测试,沼液内溶解性化学需氧量平均可达 43 669 mg/L,挥发性脂肪酸质量浓度平均可达 9 976 mg/L,与其他研究相差不大^[32]。通过试验数据分析,混合原料在 38℃ 条件下降解率可达 48% 以上。众多研究表明^[33],在中温条件下,牛粪与秸秆混合原料降解率为 40% 左右。对比分析得出,在该运行条件下,原料降解率已达到较高水平,工艺运行条件较优。但与国外相关报道相比^[34],本研究中设备的容积产气率不高,这主要是由于本研究采用牛粪和秸秆原料,并且牛粪所占比例较高,这也是装备容积产气率不高的主要原因。

4 结论

(1) 结合螺旋进料装置、气体净化的收集装置、搅拌装置和固液分离等装置,设计了横推流式连续干法厌氧发酵设备,建立了横推流式连续干法厌氧发酵设备的设计方法,并且试验过程中设备运行良好。

(2) 该设备经过了 3 个阶段,不同温度、不同总固形物含量条件下 103 d 的连续运行,最高容积产气率可达到 $0.58\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,实现了较高的原料降解率,甲烷质量分数可达 56%,实现了较高的产气量,达到了设计要求。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国农业部. 我国主要农作物秸秆综合利用率超过 80% [EB/OL]. [2016-05-26]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwlml/zwdt/201605/t20160526_5151375.htm.
- 2 中华人民共和国农业部. 关于推进农业废弃物资源化利用试点的方案[EB/OL]. [2016-08-11]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwlml/zcfg/nybgz/201609/t20160919_5277846.htm.
- 3 王乐,樊敏,詹翔宇,等. 气体搅拌下厌氧消化反应器 CFD 数值模拟及模型研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):305-312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180239&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.039.
WANG Le,FAN Min,ZHAN Xiangyu,et al. Numerical simulation and models of gas-stirred anaerobic digester by CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(2):305-312. (in Chinese)
- 4 盖希坤,张良俊. 禽畜废水厌氧反应动力学研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):245-251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170132&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.032.
GAI Xikun,ZHANG Liangquan. Kinetic study on anaerobic reaction of livestock wastewater[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(1):245-251. (in Chinese)
- 5 韩捷,向欣,李想. 覆膜槽沼气规模化干法发酵技术与装备研究[J]. 农业工程学报,2008,24(10):100-104.
HAN Jie,XIANG Xin,LI Xiang. Technology and equipment of large scale biogas dry fermentation in membrane covered trough[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(10):100-104. (in Chinese)
- 6 程序,梁近光,郑恒受,等. 中国“产业沼气”的开发及其应用前景[J]. 农业工程学报,2010,26(5):1-6.
CHENG Xu, LIANG Jinguang, ZHENG Hengshou,et al. Tapping of China's biogas industry and its perspective[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(5):1-6. (in Chinese)
- 7 曲静霞,姜洋,何光设,等. 农业废弃物干法厌氧发酵技术的研究[J]. 可再生能源,2004(2):40-41.
QU Jingxia,JIANG Yang,HE Guangshe,et al. Research on dry anaerobic fermentation by agricultural refuse[J]. Renewable Energy Resources,2004(2):40-41. (in Chinese)
- 8 路朝阳,汪宏杰,于景民,等. 农村废弃物厌氧干发酵技术研究进展[J]. 河南化工,2015,32(2):7-11.
LU Chaoyang,WANG Hongjie,YU Jingmin,et al. Research progress of dry-anaerobic fermentation technology for rural waste[J]. Henan Chemical Industry,2015,32(2):7-11. (in Chinese)
- 9 NICHOLS C E. Overview of anaerobic digestion technologies in Europe[J]. BioCycle,2004,45(1):47-53.
- 10 朱圣权,张衍林,张文倩,等. 厌氧干发酵技术研究进展[J]. 可再生能源,2009,27(2):46-51.
ZHU Shengquan,ZHANG Yanlin,ZHANG Wenqian,et al. The progress of dry anaerobic fermentation technology [J]. Renewable Energy Resources,2009,27(2):46-51. (in Chinese)
- 11 朱德文,曹成茂,陈永生,等. 秸秆厌氧干发酵产沼气关键技术及问题探讨[J]. 中国农机化,2011(4):56-59.
ZHU Dewen, CAO Chengmao, CHEN Yongsheng,et al. Key technologies and discussion of the straw dry-anaerobic fermentation [J]. Chinese Agricultural Mechanization,2011(4):56-59. (in Chinese)
- 12 LUTZ P. New BEKON biogas technology for dry fermentation in batch process[R]. Unterföhring:BEKON Energy Technologies GmbH & Co. KG,2010.
- 13 李军,杨洪旭,刘强. 稻秆组合预处理沼气干发酵试验[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2013,29(2):344-348.
LI Jun,YANG Hongxu,LIU Qiang. The study on the combined pretreatment of rice straw for dry fermentation[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University:Natural Science,2013,29(2):344-348. (in Chinese)
- 14 梁越敢,郑正,汪龙眠,等. 干发酵对稻草结构及产沼气的影响[J]. 中国环境科学,2011,31(3):417-422.
LIANG Yuegan,ZHENG Zheng,WANG Longmian,et al. Effect of dry digestion on structure changes and biogas production from rice straw[J]. China Environmental Science,2011,31(3):417-422. (in Chinese)
- 15 BOLZONELLA D,INNOCENTI L,PAVAN P, et al. Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste:focusing on the start-up phase[J]. Bioresource Technology,2003,86(2):123-129.
- 16 DE BAERE L. The dranco technology: a unique digestion technology for solid organic waste[M]. Brussels: Organic Waste Systems Pub.,2010.
- 17 李东,孙永明,张宇,等. 城市生活垃圾厌氧消化处理技术的应用研究进展[J]. 生物质化学工程,2008,42(4):43-50.
LI Dong,SUN Yongming,ZHANG Yu,et al. Application and research advances on anaerobic digestion for municipal solid waste treatment[J]. Biomass Chemical Engineering,2008,42(4):43-50. (in Chinese)
- 18 LI Y,PARK S Y,ZHU J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2011,15(1):821-826.
- 19 于美玲,谷士艳,于洋,等. 立式连续干发酵装置的设计与产气特性[J]. 农业工程学报,2016,32(7):194-197.
YU Meiling,GU Shiyang,YU Yang,et al. Design and biogas production characteristics of vertical continuous dry fermentation equipment[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(7):194-199. (in Chinese)

- 20 袁存亮, 丁伟, 张重. 新型连续式干法厌氧发酵反应器的设计[J]. 农业与技术, 2015, 35(23): 48 – 50.
- 21 JB/T 7679—2008 螺旋输送机的基本参数与技术要求[S]. 2008.
- 22 胡明成, 龙腾瑞, 李学军. 沼气脱硫技术研究新进展[J]. 中国沼气, 2005, 23(1): 17 – 20.
HU Mingcheng, LONG Tengrui, LI Xuejun. The up to date processes for the hydrogen sulfide removal and sulfur recovery from the biogas[J]. China Biogas, 2005, 23(1): 17 – 20. (in Chinese)
- 23 李金洋, 敖永华, 刘庆玉. 沼气脱硫方法的研究[J]. 农机化研究, 2008, 30(8): 228 – 230.
LI Jinyang, AO Yonghua, LIU Qingyu. The research of biogas desulphurization technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(8): 228 – 230. (in Chinese)
- 24 BOLLON J, LE-HYARIC R, BENBELKACEM H, et al. Development of a kinetic model for anaerobic dry digestion processes: focus on acetate degradation and moisture content[J]. Biochemical Engineering Journal, 2011, 56(3): 212 – 218.
- 25 曹美苑, 任露陆, 赵科明, 等. 进口与国产 COD 消解测定仪测定废水 COD 的比对研究[J]. 中国环境监测, 2015, 31(2): 148 – 152.
CAO Meiyuan, REN Lulu, ZHAO Keming, et al. The comparison research of import and domestic cod digestion apparatus[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(2): 148 – 152. (in Chinese)
- 26 庞然, 庞德茂, 李蓝, 等. 预均化堆放农业有机废弃物的厌氧发酵技术[J]. 农业工程, 2011, 1(2): 36 – 38.
PANG Ran, PANG Demao, LI Lan, et al. Prehomogenization stacked biogas fermentation technology in large junk dry yards of applications[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(2): 36 – 38. (in Chinese)
- 27 CHAVEZ-VAZQUEZ M, BAGLEY D M. Evaluation of the performance of different anaerobic digestion technologies for solid waste treatment[C] // CSCE/EWRI ASCE Environmental Engineering Conference, 2002.
- 28 李东, 叶景清, 甄峰, 等. 稻草与鸡粪配比对混合厌氧消化产气率的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 232 – 238.
LI Dong, YE Jingqing, ZHEN Feng, et al. Effects of anaerobic co-digestion of different proportions between rice straw and chicken manure on biogas yield rate[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 232 – 238. (in Chinese)
- 29 李东, 叶景清, 孙永明, 等. 稻草与牛粪混合连续厌氧消化制备生物燃气研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 101 – 105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130120&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.020.
LI Dong, YE Jingqing, SUN Yongming, et al. Continuous anaerobic co-digestion of rice straw and cow manure for biogas production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 101 – 105. (in Chinese)
- 30 白洁瑞, 李铁冰, 郭欧燕, 等. 不同温度条件粪秆结构配比及尿素, 纤维素酶对沼气产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 188 – 193.
BAI Jierui, LI Yibing, GUO Ouyan, et al. Effects of ratios of manure and straw, urea and cellulose on biogas yields at different temperatures[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 188 – 193. (in Chinese)
- 31 孟津, 榕林, 金印, 等. 沼气实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- 32 张彤, 李伟, 李文静, 等. 粪秆结构配比厌氧发酵中 pH, VFA 与产气效果的关系[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2425 – 2430.
ZHANG Tong, LI Wei, LI Wenjing, et al. The relationship among pH, VFA and biogas production in anaerobic fermentation of mixed manure and straw with different ratios [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(12): 2425 – 2430. (in Chinese)
- 33 翟宁宁. 餐厨垃圾厌氧发酵过程稳定性及高效产气工艺研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
ZHAI Ningning. Recess stability and biogas efficiency improve technology in anaerobic digestion of kitchen waste [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- 34 YAMASHIRO T, LATEEF S A, YING C, et al. Anaerobic co-digestion of dairy cow manure and high concentrated food processing waste[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2013, 15(4): 539 – 547.