

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.09.039

微好氧预升温序批式干发酵装置设计与应用

郭占斌<sup>1</sup> 衣蕊<sup>1,2</sup> 赵立欣<sup>3</sup> 冯晶<sup>2,4</sup> 叶炳南<sup>2,4</sup> 于佳动<sup>2,4</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 农业农村部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100125;  
3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;  
4. 农业农村部规划设计研究院农业农村部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125)

**摘要:**为解决微好氧同步预升温序批式干发酵工艺实际运行过程中现有装备存在曝气不充分、喷淋均匀度低等问题,加快促进纤维物料降解和中间物质转化并提高产气效率,创新设计装备喷淋系统、曝气系统,优化集成了微好氧预升温序批式厌氧干发酵一体化装备,实现微好氧快速预升温、喷淋均匀接种、高效生产沼气。通过喷头特性比选出适合粘稠沼液循环的螺旋式喷嘴,并计算出当喷淋面积为0.6 m×0.6 m时,最佳喷头间距和管道直径分别为0.37 m和0.08 m,喷淋覆盖面积可达到物料表面积的87.33%。为方便物料进出,设计曝气管道对称分布在物料两侧,共设置6支平行曝气管,单侧管道间距和两端管道间距分别为0.5 m和0.7 m。集成装备并耦合微好氧同步预升温序批式干发酵工艺,通过长期试验确定实际运行中的多组反应器序批启动调控策略应为8组反应器,启动间隔为3 d,发酵周期为24 d。基于规模化奶牛养殖场对技术装备应用经济效益进行核算,得出投资回收周期约为4年,与传统湿法厌氧发酵技术相比减少了约1.3年。

**关键词:** 厌氧干发酵; 微好氧预升温; 发酵装备; 喷淋系统; 曝气系统

中图分类号: X705      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2021)09-0346-09      OSID: 

Design and Application of Micro Aerobic Pre-heating Sequencing Batch Dry Fermentation Device

GUO Zhanbin<sup>1</sup> YI Rui<sup>1,2</sup> ZHAO Lixin<sup>3</sup> FENG Jing<sup>2,4</sup> YE Bingnan<sup>2,4</sup> YU Jiadong<sup>2,4</sup>

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China  
2. Institute of Rural Energy and Environmental Protection, Institute of Planning and Design, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China  
3. Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China  
4. Key Laboratory of Energy Utilization of Agricultural Wastes, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Planning and Design, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

**Abstract:** Aiming to solve the problems of insufficient aeration and low spray uniformity in the existing equipment during the actual operation of the microaerobic synchronous preheating sequential batch dry fermentation process, accelerate the degradation of fiber materials and the conversion of intermediate substances and improve the efficiency of gas production, the equipment spray system and aeration system were innovatively designed, micro-aerobic pre-heating sequential batch anaerobic dry fermentation integrated equipment was optimized and integrated, realizing micro-aerobic rapid pre-heating, spray uniform inoculation, and efficient production of biogas. The spiral nozzles suitable for the circulation of viscous biogas slurry were selected through the comparison of nozzle characteristics, and it was calculated that when the spray area was 0.6 m×0.6 m, the best nozzle spacing and pipe diameter were 0.37 m and 0.08 m, respectively, and the spray coverage area can reach 87.33% of the surface area of the material. In order to facilitate the entry and exit of materials, the aeration pipes were designed to be symmetrically distributed on both sides of the materials, and a total of six parallel aeration pipes were set up. The distance between the pipes on one side and the pipes at both ends was 0.5 m and 0.7 m, respectively. The equipment was integrated and coupled with a micro-aerobic synchronous pre-heating sequential batch dry fermentation process. Through long-term experiments, it was determined that the sequential batch

收稿日期: 2021-06-13    修回日期: 2021-07-05  
基金项目: 河北省重点研发计划项目(20323801D)和农业农村部农业废弃物资源化利用重点实验室开放项目(KLERUAR2019-01)  
作者简介: 郭占斌(1966—),男,教授,主要从事废弃物厌氧发酵技术装备研究,E-mail: 329984136@qq.com  
通信作者: 于佳动(1986—),男,高级工程师,主要从事农业废弃物厌氧发酵技术装备研究,E-mail: yujiadong010@163.com

start-up control strategy of multiple reactors in actual operation should be eight reactors, the start interval was 3 d, and the fermentation period was 24 d. Based on the calculation of the economic benefits of technical equipment application in large-scale dairy farms, it was concluded that the investment recovery period was about 4 years, which was about 1.3 years less than the traditional wet anaerobic fermentation technology. This research can provide a theoretical basis for the efficient operation of the sequencing batch anaerobic dry fermentation technology in the actual application process.

**Key words:** anaerobic dry fermentation; micro aerobic pre-heating; fermentation equipment; spray system; aeration system

0 引言

干法厌氧发酵是一种进料含固率大于或等于 15% 的高含固率厌氧发酵沼气生产技术,是有机固体废弃物高效处理、生产清洁能源、减排固碳的重要方式之一<sup>[1-2]</sup>。该技术在欧盟国家已得到广泛应用<sup>[3-6]</sup>。在我国,沼气工程 90% 以上建设在农村地区,秸秆、畜禽粪便是主要原料来源,传统的沼气工程(CSTR 技术)发酵过程存在物料结壳、分层、搅拌不均匀等问题<sup>[7]</sup>。而序批式厌氧干发酵技术进出料及运行过程操作简单且无需安装物料搅拌装置,在处理农业固体废弃物清洁转化能源方面具备优势并引起了广泛关注<sup>[8]</sup>。然而,对于含纤维原料的序批式厌氧干发酵技术的研究正处于发酵机制探索和工艺优化等基础阶段,缺少一体化技术装备的开发与设计,工艺与装备的匹配及稳定性仍需进一步提升<sup>[9]</sup>。

近年来,围绕提升厌氧干发酵效率的探索取得了明显进展。在工艺调控研究方面,沼渣返混比例、接种方式、物料配比、喷淋频率等因素调控成为研究热点,文献[10]探明了秸秆占比高和牛粪占比高的情况下存在不同的喷淋-接种物复合调控策略,产甲烷速率提升 20.4% ~ 121.3%。文献[11]采用分层接种、沼渣返混等调控方式将干法厌氧发酵容积产气效率提升至 1.6 L/(L·d),并揭示了微生物间的协同作用关系,预测出嗜氢产甲烷代谢有助于提高厌氧干发酵中间产物(有机酸)的转化效率。在装备优化提升研究方面,文献[12]围绕进出料通畅性、装置密封性、侧壁保温性等开展关键部件设计,发酵装置的运行稳定性得到明显改善。然而,在使用纤维类原料发酵过程中原料分解率低、中间产物抑制、发酵过程传质传热不均匀等问题仍未解决,仍需专门对提升纤维类物料序批式厌氧干发酵技术装备适应性进行系统性研究,以确保实际应用中提高整体运行效率。

为此,文献[13]提出了微好氧同步预升温一体化序批式厌氧干发酵技术,发酵初始阶段调节曝气量创造微好氧环境,促进纤维类物料在 48 h 内快速

升温至 42.48℃ 以上,且物料各处温度无显著性差异,利用微生物自产热效应解决了传统侧壁加热不均匀、升温困难等问题,纤维素分解效率也提高了 57.88% ~ 85.53%。同时,厌氧发酵过程中间产物转化效率显著提升,累积沼气产量提高了 56.76%。目前对该技术的研究已进入中试阶段,但在中试运行过程中发现,随着发酵装置的放大,存在曝气不充分、喷淋均匀性不高等问题,并且数据传输不及时也影响了反馈调控效率,仍需对装备的曝气、喷淋系统以及装置整体控制进一步设计优化,并达到连续高效运行的效果。

因此,本文设计微好氧同步预升温曝气和喷淋装置,探明装置最佳组合排布特性;优化集成一体化自动控制厌氧干发酵装备,并通过长期试验探明序批式启动运行高效调控策略,提升装备产气水平。面向实际应用,基于规模化奶牛养殖场粪污处理过程开展经济效益分析,并与传统 CSTR 厌氧发酵技术比较,揭示微好氧预升温厌氧干发酵工艺及装置在处理农业废弃物、转化清洁能源方面的经济优势。

1 关键系统设计

1.1 装备工作流程

将预先混配均匀的原料推送至发酵反应器内部,设备密封圈增压密封。空气压缩机启动运行,进行曝气预升温处理,曝气强度依据主发酵装置监测的溶氧量进行反馈调节,维持微好氧发酵状态并使物料自升温至中温后停止曝气。进入厌氧发酵产甲烷阶段,水浴循环维持中温发酵温度,实时监测渗滤液 pH 值、氧化还原电位(ORP)反馈调节喷淋强度,以变频喷淋的方式促进甲烷生产,工艺流程如图 1 所示。

1.2 曝气系统设计

1.2.1 系统设计与工作原理

曝气系统由曝气管道、空气压缩机、流量计、温度探头、溶氧探头、阀门等主要部件构成。在干法厌氧发酵阶段前通过向物料曝气营造微好氧环境使物料自升温,曝气强度依据主发酵装置监测的溶氧量

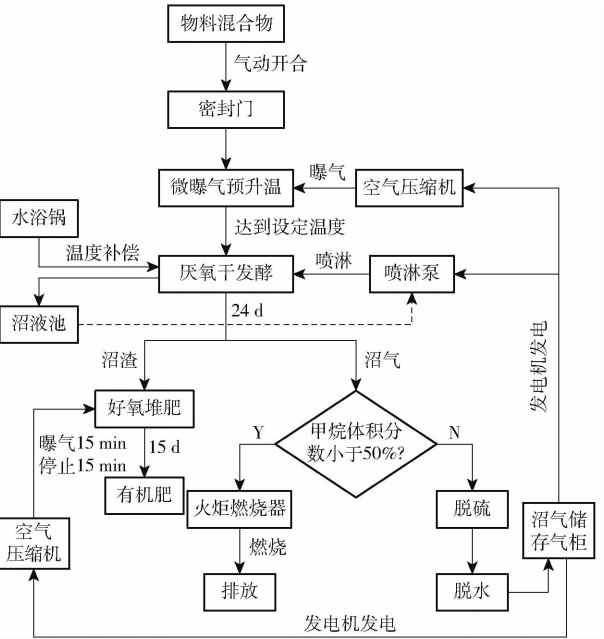


图1 微好氧预升温序批式干发酵装置工艺流程图

Fig.1 Process flow chart of micro aerobic pre-heating sequencing batch dry fermentation device

进行反馈调节,当溶氧量大于1.0 mg/L时停止曝气,溶氧量较小时继续根据设定频率曝气,使溶氧量保持在0.2~1.0 mg/L之间,维持微好氧状态实时监测物料温度,当物料自升温至中温温度(40℃)后反馈控制停止曝气。确保物料升温均匀,快速达到预定温度。

反应器主体积为1 m<sup>3</sup>,设计尺寸为0.8 m×0.8 m×1.7 m。反应器正面开口向内推送物料,内部物料反应区域尺寸设计为0.6 m×0.6 m×1.2 m。为确保物料进出不受阻碍,结合物料分布,设计曝气管道对称分布在物料两侧,考虑反应器两侧保温层厚度保留0.1 m,则两端管道间距为0.7 m。为使气体接触物料更加均匀全面,确保空气快速充满反应器,提高供氧的均匀性,共设置6支平行曝气管,单侧管道间距为0.5 m。管道上单侧开口高度8 mm,出气口不直对物料,气流吹向反应器内壁扩散,曝气系统示意图如图2所示。

1.2.2 曝气量计算

通过向物料曝气的方式可显著提升物料温度,初期进行通风主要是为微生物提供生长所需的氧气<sup>[14]</sup>,当曝气量达到好氧堆肥初期的需氧量时,物料升温至厌氧发酵温度即停止曝气。根据公式<sup>[15]</sup>

Q=60μnqV (1)

式中 μ——物料区充满系数,取0.8  
n——反应器数量  
q——单位时间和体积内氧气消耗量经验值,取1.5 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>3</sup>)

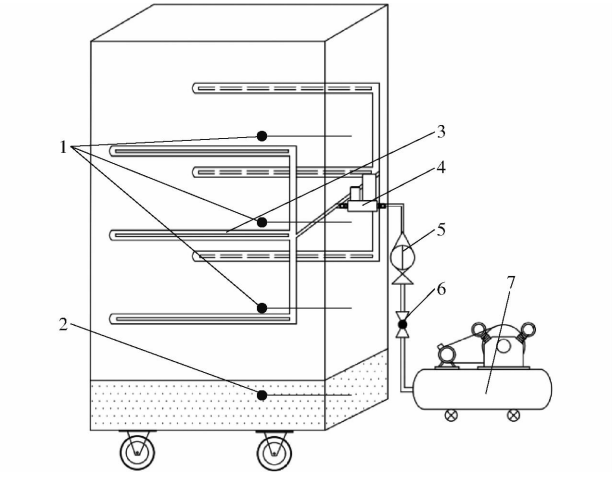


图2 曝气系统示意图

Fig.2 Schematic of aeration system

- 1.温度探头 2.溶氧探头 3.曝气管道 4.转子流量计 5.流量计 6.阀门 7.空气压缩机

V——反应区体积,m<sup>3</sup>

计算求得单个反应器在预升温阶段所需风量Q=31.104 m<sup>3</sup>。其中,单个反应区体积为0.6×0.6×1.2=0.432 m<sup>3</sup>。

1.2.3 风机选型

为使物料达到快速升温效果,在2 d内达到厌氧发酵所需温度,采用间歇式强制通风,风机每间隔1 h运行15 min,则所需通风量为3.24 m<sup>3</sup>/h。风机的风量应大于3.24 m<sup>3</sup>/h。空气压缩机的工作压力较大,对于固体有机废弃物好氧通风供氧具有很好的作用,因此选择ZBW64-40L型空气压缩机,风量95 L/min,功率1 500 W。

1.2.4 曝气管道设计

曝气管道的布置应使物料供气充分均匀且达到最大有效通风量。管道选用耐腐蚀304管道。由公式

d=1 000√(4F/3 600v) (2)

式中 F——通风量,m<sup>3</sup>/h  
v——管道内风速,m/min

计算求得曝气管道直径d=10.70 mm,实际管径取11 mm。

1.3 喷淋系统设计

1.3.1 系统设计与工作过程

喷淋系统主要由沼液收集区域、喷淋泵、沼液回流泵、喷淋管道、喷淋头、pH探头、ORP探头等组成,结构组成如图3所示。在进行厌氧发酵喷淋时,沼液在喷淋泵的作用下通过喷淋管道流至喷嘴,喷淋到物料上方。喷淋频次为4次/d,单次喷淋量与物料干质量比为0.4。沼液向下渗透落至渗滤液收集区。为使物料不浸没在沼液中,渗

滤液在回流泵的作用下回流至沼液池中。通过序批式厌氧干发酵装置上耦合在线监测技术,实时监测 ORP、pH 值,当 pH 值小于 6.8 时喷淋频次上升为 6 次/d,大于 7.2 时,喷淋频次下调至 2 次/d,使渗滤液 pH 值控制在 6.8 ~ 7.2 之间。并且当 ORP 大于 -180 mV 时停止喷淋,小于 -180 mV 时按上述喷淋频次继续喷淋,根据指标控制实现对喷淋系统进行自动调节。

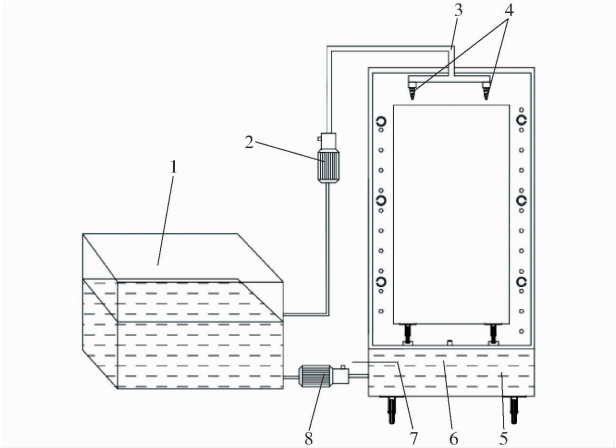


图 3 喷淋系统示意图  
Fig.3 Schematic of spray system

1. 沼液池 2. 喷淋泵 3. 喷淋管道 4. 喷淋头 5. ORP 探头  
6. 渗滤液收集区 7. pH 值探头 8. 沼液回流泵

喷淋是序批式厌氧发酵增加传质的主要方式<sup>[16]</sup>,为使厌氧发酵达到良好的发酵效果,在喷淋系统的设计上着重考虑喷淋管道的排布与喷头的排列,达到喷淋均匀的目的。

1.3.2 喷嘴选型

喷淋的沼液粘度大且含有一定杂质。螺旋喷嘴与其他类型喷嘴相比(表 1),自由畅通直径与喷淋角度较大,可喷洒含颗粒杂质较多的液体,有效防止堵塞并且喷雾均匀全面。喷嘴结构示意图如图 4 所示。

表 1 各类型喷嘴特性对比

| Tab.1 Characteristic comparison of various types of nozzles |             |               |                      |
|-------------------------------------------------------------|-------------|---------------|----------------------|
| 喷嘴类型                                                        | 喷淋角/<br>(°) | 自由畅通<br>直径/mm | 喷嘴特性                 |
| 扇形喷嘴                                                        | 0 ~ 100     |               | 喷雾均匀适用范围广            |
| 螺旋喷嘴                                                        | 50 ~ 180    | 2.4 ~ 15.9    | 最大畅通通道将堵塞<br>概率减小到最低 |
| 实心锥形喷嘴                                                      | 40 ~ 120    | 0.41 ~ 4.0    | 喷雾区成椭圆形,液滴<br>中等偏大   |
| 涡流喷嘴                                                        | 60 ~ 120    |               | 硬度高,使用寿命长            |

为便于安装与日后维护,同时保证沼液在反应器内的喷淋效果,喷头数量要少。所以选择喷淋角



图 4 螺旋喷嘴结构示意图  
Fig.4 Structure diagram of spiral nozzle

可以达到 120° 的 1/2BSJ-303SS12007 型螺旋喷嘴,喷雾形状实心,自由畅通直径 4.8 mm。当其工作压力为 70 kPa 时,喷淋角达到 120°,喷嘴流量 2.6 L/min。

1.3.3 管径

在设计工作压力 0.7 kPa 的条件下,管道流量为 44 m<sup>3</sup>/h,管道流速取常用值 1.5 ~ 3.0 m/s,根据公式

$$D=1.13\sqrt{\frac{Q_d}{3\,600v}}$$

(3)

式中  $D$ ——喷淋管道管径,mm

$Q_d$ ——管道流量,m<sup>3</sup>/h

计算求得  $D$  为 72 ~ 102 mm,确定使用内径为 80 mm 的铸铁管。

1.3.4 管路与喷头排布

喷头的布置应保证物料上方的每个部位均包络在水雾之中,因此采用面积包络法进行计算<sup>[17]</sup>,计算简图见图 5,计算公式为

$$(R/2)^2=(L/2)^2+(H/2)^2$$

(4)

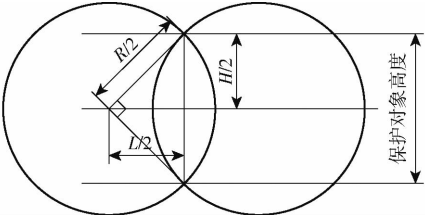


图 5 喷头间距计算示意图

Fig.5 Schematic of nozzle spacing calculation

将喷淋装置设计在反应器上部,则需要的喷淋面积为 0.6 m × 0.6 m。喷头底部到物料顶部距离设计为 0.15 m,则喷淋的理论覆盖直径  $R$  为 0.52 m。为使覆盖面积更均匀,保护对象高度取两圆相交两点到圆心的半径呈直角时相交点的距离,则  $H$  取 0.37 m,求得  $L$  为 0.37 m。则喷头间距应为 0.37 m。在设计工作压力 70 kPa 的条件下,螺旋喷嘴的雾化效果均匀。根据计算排布喷头喷洒效果如图 6 所示。

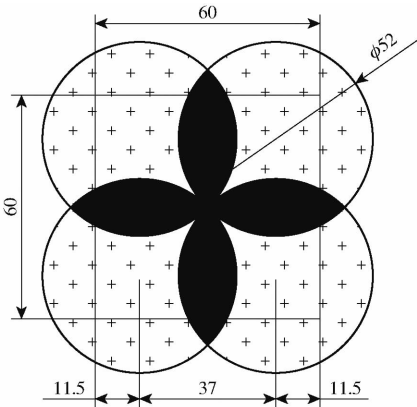


图 6 第 1 次喷淋覆盖面积  
Fig.6 First spray coverage

由图 6 可知,为了保证包络保护对象,相邻的两喷头喷出的水雾有部分重叠,重叠水雾雾滴的碰撞使这部分水雾失去动能而下落,不能有效喷射到保护对象上。因此,有 4 处  $0.22\text{ m} \times 0.22\text{ m}$  的面积(图中未涂黑处)未得到与重叠面积一致的喷淋。所以需要在喷淋进行一定时间后改变喷淋流量使喷淋角改变为  $85^\circ$ ,覆盖直径改为  $0.275\text{ m}$ ,只再次喷淋未重叠面积,再次喷淋后获得同样喷淋强度的面积如图 7 所示,在单位时间内,得到同样喷淋效果的覆盖面积占比  $87.33\%$ ,使喷淋达到均匀。

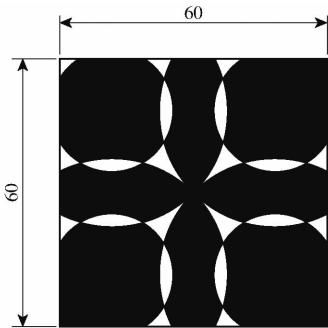


图 7 再次喷淋后同样喷淋强度覆盖面积  
Fig.7 Cover area of the same spraying intensity after spraying again

根据求得喷头间距为  $0.37\text{ m}$ ,排布管道位置,入水口设置在上方,管道直径为  $0.08\text{ m}$  则相互并列的管道间距为  $0.29\text{ m}$ 。管道排布方式如图 8 所示。

**1.4 微好氧预升温序批式干发酵一体化装置结构**  
微好氧预升温序批式厌氧干发酵一体化装置主要由水浴系统、喷淋系统、发酵反应器、曝气系统、电控系统、密封系统等组成,装置示意图如图 9 所示,其采用 PLC 控制系统,主要参数见表 2。将喷淋系统与曝气系统集成在反应器中,使其完成微曝气预升温、喷淋接种物、自动调控等工艺流程。

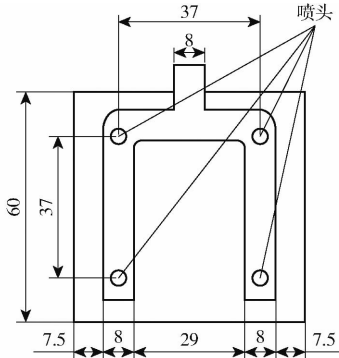


图 8 管道排布图  
Fig.8 Pipeline layout

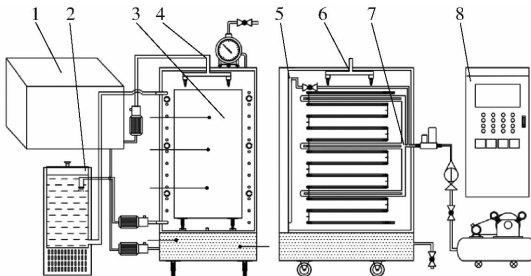


图 9 微好氧预升温序批式干发酵一体化装置示意图  
Fig.9 Schematic of micro aerobic pre-heating sequencing batch dry fermentation device

1. 沼液池 2. 水浴系统 3. 发酵反应箱体 4、6. 喷淋系统 5. 密封系统 7. 曝气系统 8. 电控系统

表 2 微好氧预升温序批式干发酵一体化装置  
主要设计参数

Tab.2 Main design parameters of micro aerobic pre-heating sequencing batch dry fermentation device

| 参数                      | 数值          |
|-------------------------|-------------|
| 外形尺寸(长×宽×高)/<br>(m×m×m) | 0.8×0.8×1.7 |
| 反应器体积/ $\text{m}^3$     | 1           |
| 运行温度/ $^\circ\text{C}$  | 35~42       |
| 发酵周期/d                  | 24~32       |

2 运行工艺设计

2.1 试验材料

本试验以玉米秸秆和牛粪为原料,玉米秸秆取自河北省张家口市崇礼县某农场,粉碎为粒径  $3 \sim 5\text{ cm}$ ,实验室通风处保存,混料前,测定秸秆 TS (Total solids) 质量分数为  $(89.69 \pm 0.43)\%$ 。牛粪取自河北省三河市某使用干清粪收集工艺的规模化奶牛养殖场,牛粪取回放置在常温  $((25 \pm 0.5)^\circ\text{C})$  实验室保存,取用前,测定牛粪 TS 质量分数为  $(24.22 \pm 0.71)\%$ ,挥发性固体(Volatile solids, VS) 质量分数为  $(16.21 \pm 0.28)\%$ 。接种物来自本实验室其他序批式厌氧干发酵装置试验结束产出的沼渣,并进一步厌氧培养至不产气作为本次试验接种

物,测定其 TS 质量分数为  $(18.90 \pm 0.47)\%$ 。沼液取自河北省三河市某沼气工程,未经过滤,测定沼液 TS 质量分数为  $(1.22 \pm 0.04)\%$ 。

2.2 试验设计

为探究多组反应器序批启动对产甲烷效率的影响,耦合微好氧同步预升温序批式干发酵工艺开展不同组数反应器产沼气试验,通过长期试验,探明序批式启动运行高效调控策略。试验以玉米秸秆、牛粪混合为原料(秸秆与牛粪质量比 6:4)。设计 3 组试验,运行周期 24 d,分别以 4、8、12 组反应器为单位,对应启动间隔为 6、3、2 d。进料后密封反应器,均按照本文提出的自动控制频率对物料曝气、喷淋,进行长期厌氧干发酵试验。

2.3 指标测试方法

物料 TS、VS 含量根据美国 APHA 方法测定<sup>[18]</sup>,甲烷含量使用便携式沼气成分分析仪(英国 Geotech 公司)测定,在试验进行过程中,使用 LMP-1 型湿式防腐气体流量计(长春阿尔法仪器公司)每天记录沼气产量(L)。容积产气率根据沼气产量和反应器容积换算,容积产甲烷率根据容积产气率和甲烷体积分数换算,单位为  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^3)$ 。计算方法参考文献[19]。使用 Miersoft Excel 2019 进行基

础数据处理与图形绘制。

2.4 试验结果与分析

通过长期厌氧发酵试验运行得出不同组数的反应器厌氧发酵产气特性如图 10 所示,其中图 10a 为容积产气率的变化,8 组反应器在发酵前 30 d 一直呈上升趋势,后趋于平稳,容积产气率稳定在  $2.5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^3)$  左右。12 组与 8 组反应器趋势相近,而 4 组反应器在发酵第 55 天容积产甲烷率达到顶峰后呈下降趋势。8 组较 4 组和 12 组反应器平均容积产气率分别提高了 46.28% 和 56.13%。甲烷含量如图 10b 所示,12 组反应器厌氧发酵甲烷含量最高,在第 18 天达到峰值后趋于稳定,4 组、8 组反应器与 12 组反应器甲烷含量趋势相近,整体上累计甲烷含量 12 组是 4 组和 8 组反应器的 1.2 倍和 1.1 倍。容积产甲烷率如图 10c 所示,8 组反应器容积产甲烷率明显高于 4 组和 12 组反应器,在发酵 30 d 后趋于稳定,容积产甲烷率稳定在  $1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^3)$  左右,与国内报道的序批式厌氧干发酵平均容积产气率相比增加了约 87.5%。故在微好氧预升温序批式干发酵装置实际应用运行时应以 8 组反应器为单位,反应周期 24 d,启动间隔 3 d。

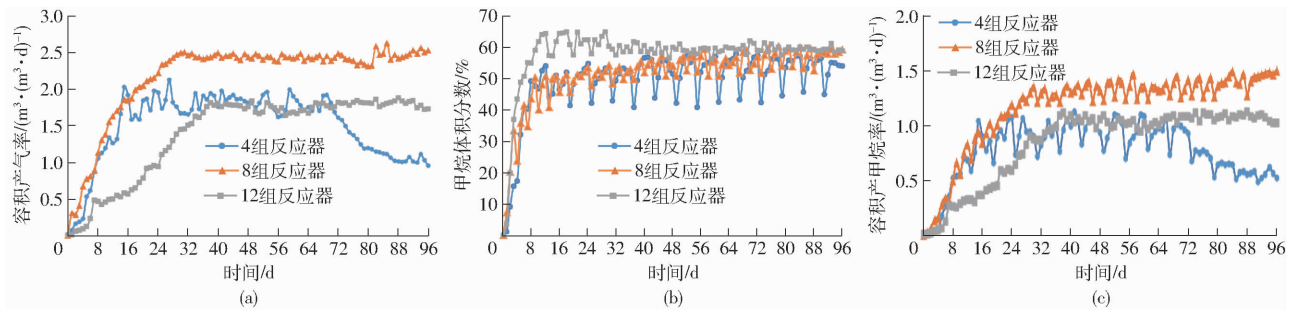


图 10 不同组数反应器厌氧发酵产气特性

Fig. 10 Gas production characteristics of anaerobic fermentation in different reactor groups

3 装置应用及经济效益对比

3.1 规模化奶牛场粪污处理工艺设计

以存栏 500 头规模化奶牛养殖场为例,通过有机废弃物资源化循环利用,建立以沼气工程为纽带,形成肥料、饲料、食品 and 能源的循环模式。工艺流程图如图 11 所示。

工艺流程为:牛场固体粪污废弃物采用刮粪板处理,与秸秆等农业废弃物混合,进入微好氧预升温序批式干发酵装备中进行厌氧发酵产沼气;液体废水作为接种物对物料进行喷淋接种。厌氧发酵沼气作为清洁燃料使用,沼气发酵残留物好氧堆肥制成有机肥还田。

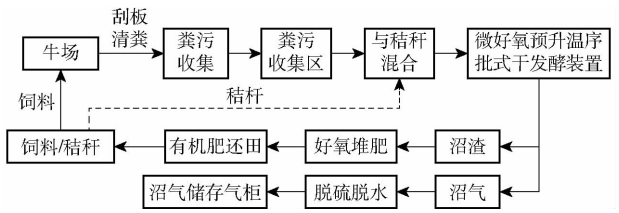


图 11 工艺流程图

Fig. 11 Process flow chart

3.2 规模化奶牛场粪污产生量计算

为更精确地掌握奶牛场各类牛群存栏头数分配情况,经对部分奶牛场走访调研,得出规模化奶牛场产奶牛与育成牛比例约为 12:5。文献[20-21]给出了不同饲养阶段的单日粪便产生量、尿液产生量,如表 3 所示。



表 6 与传统工艺运行成本比较

Tab.6 Comparison of operation cost with traditional process

| 项目    |         | 本工艺干法厌氧发酵               |                         | 传统湿法厌氧发酵                |                         |
|-------|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|       |         | 参数                      | 费用/(元·年 <sup>-1</sup> ) | 参数                      | 费用/(元·年 <sup>-1</sup> ) |
| 动力成本  | 保温      | 8 919.09 kW·h/年         | 5 352.45                | 25 046.61 kW·h/年        | 15 038.00               |
|       | 加热      |                         |                         | 76 524.86 kW·h/年        | 45 914.92               |
|       | 曝气 + 喷淋 | 64 620 kW·h/年           | 38 772                  |                         |                         |
|       | 搅拌装置    |                         |                         | 65 700 kW·h/年           | 39 420                  |
|       | 其他动力    |                         | 50 000                  |                         | 80 000                  |
| 年运行费用 | 人工费用    | 60 000 元/(年·人)          | 1 200 000               | 60 000 元/(年·人)          | 1 200 000               |
|       | 秸秆原料收集  | 1 288.45 t/年            | 257 690                 | 2 489.3 t/年             | 497 860                 |
|       | 维修费     |                         | 13 220                  |                         | 35 448                  |
|       | 运输费     |                         | 219 000                 |                         | 248 838.75              |
|       | 设备折旧费   |                         | 132 198                 |                         | 354 475                 |
|       | 管理及销售费用 |                         | 211 677                 |                         | 325 464                 |
|       | 其他运行费用  |                         | 200 000                 |                         | 400 000                 |
|       |         |                         |                         |                         |                         |
| 年效益   | 沼气发电收益  | 4 120 m <sup>3</sup> /d | 1 691 775               | 6 912 m <sup>3</sup> /d | 2 838 240               |
|       | 沼渣堆肥收益  | 17.38 t/d               | 1 332 177               | 23.63 t/d               | 1 811 239.5             |
| 合计    |         |                         | 696 042.55              |                         | 1 407 020.83            |

4 结论

(1)设计了微好氧同步预升温一体化序批式干发酵装备,包括装备的喷淋系统和曝气系统。通过喷头特性比选出适合粘稠沼液循环的螺旋式喷嘴。计算求得喷头间距和管道直径分别为 0.37 m 和 0.08 m。喷淋覆盖面积可达到物料表面积的 87.33%,使喷淋达到均匀。设计曝气管道对称分布在物料两侧,共设置 6 支平行曝气管,单侧管道间距和两端管道间距分别为 0.5 m 和 0.7 m。气体可快速充满反应器,提高了微好氧预升温启动效率,确保物料升温均匀。对 ORP、pH 值、溶氧量、温度等指标实时在线监测,根据指标范围,实现自动调控曝气

与喷淋频率,提升了装置自动控制效果。

(2)通过长期试验验证,8 组反应器容积产甲烷率明显高于 4 组和 12 组反应器,容积产甲烷率稳定在 1.5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d<sup>3</sup>)左右,确定多组反应器序批启动调控策略应为 8 组反应器,启动间隔为 3 d,发酵周期为 24 d。

(3)设计微好氧预升温一体化序批式干发酵装备应用于 500 头规模化奶牛养殖场工艺方案,并与使用传统湿法厌氧发酵的同规模养殖场进行了效益对比。工程设施与设备投资分别降低了约 70.39% 和 31.65%。年运行成本减少约 91.5 万元。本工艺投资回收周期约为 4 年,与传统湿法厌氧发酵相比减少了约 1.3 年。

参 考 文 献

[1] STEHEL V, MAROUŠKOVÁ A, KOLÁŘ L, et al. Advances in dry fermentation extends biowaste management possibilities[J]. Energy Sources Part A: Recovery Utilization & Environmental Effects, 2020, 42(2): 212–218.

[2] ABDELSALAM E M, SAMER M, AMER M A, et al. Biogas production using dry fermentation technology through co-digestion of manure and agricultural wastes[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(6): 8746–8757.

[3] LUTZ P. New BEKON biogas technology for dry fermentation in batch process [J]. BEKON Energy Technologies GmbH & Co KG, 2010(2): 3–6.

[4] GASCH C, HILDEBRANDT I, REBBE F, et al. Enzymatic monitoring and control of a two-phase batch digester leaching system with integrated anaerobic filter[J]. Energy Sustainability & Society, 2013, 3(1): 1–11.

[5] DE BERE L. Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the-art[J]. Water Science & Technology, 2000, 41(3): 283–290.

[6] FRUTEAU D, SERGE D, CLAUDE S J. Anaerobic digestion of municipal solid organic waste: Valorga full-scale plant in Tilburg, the Netherlands[J]. Water Science & Technology, 1997, 36(6–7): 457–462.

[7] 陈润璐,李再兴,冯晶,等.农业废弃物厌氧干发酵技术研究进展[J].河北科技大学学报,2020,41(4):365–373. CHEN Runlu, LI Zaixing, FENG Jing, et al. Research progress in anaerobic dry fermentation of agricultural waste[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2020, 41(4): 365–373. (in Chinese)

[8] 李冰峰,张大雷.干式厌氧发酵技术现状与国内应用项目简介[J].可再生能源,2021,39(3):294–299. LI Bingfeng, ZHANG Dalei. Research and application progress of dry anaerobic fermentation technology [J]. Renewable Energy, 2021, 39(3): 294–299. (in Chinese)

[9] HZA C, PHL B, ZW B, et al. Genomic driven factors enhance biocatalyst-related cellulolysis potential in anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2021,333:125148.

[10] 于佳动, 赵立欣, 冯晶, 等. 喷淋次数和接种量对序批式秸秆牛粪混合干发酵产气性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21):236 – 241.

YU Jiadong, ZHAO Lixin, FENG Jing, et al. Effects of spraying times and inoculation amount on gas production performance of sequencing batch dry fermentation with straw and cow manure [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(21): 236 – 241. (in Chinese)

[11] CHEN Runlu, LI Zaixing, FENG Jing, et al. Effects of digestate recirculation ratios on biogas production and methane yield of continuous dry anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 316 : 123963.

[12] 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. Research progress of anaerobic dry fermentation technology [J]. *Renewable Energy*, 2009, 27(2): 46 – 51. (in Chinese)

[13] 于佳动, 刘新鑫, 赵立欣, 等. 基于微好氧同步预升温的序批式厌氧干发酵特性[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(10):213 – 219.

YU Jiadong, LIU Xinxin, ZHAO Lixin, et al. Characteristics of sequencing batch anaerobic dry fermentation based on micro aerobic simultaneous warming [J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(10): 213 – 219. (in Chinese)

[14] ZHANG M, SHI A, AJMAL M, et al. Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting [J/OL]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021. <http://doi.org/10.1007/s13399-021-01438-5>.

[15] 杨延梅. 有机固体废物好氧堆肥反应器的设计[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2008, 27(6):1155 – 1159.

YANG Yanmei. Design of organic solid waste aerobic composting reactor [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition)*, 2008, 27(6):1155 – 1159. (in Chinese)

[16] ROCAMORA I, WAGLAND S T, VILLA R, et al. Dry anaerobic digestion of organic waste: a review of operational parameters and their impact on process performance[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 299: 122681.

[17] SUN T, HUANG X, CHEN Y, et al. Experimental investigation of water spraying in an indirect evaporative cooler from nozzle type and spray strategy perspectives[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 214:109871.

[18] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. Washington DC: American Public Health Association, 2005.

[19] YU J, ZHAO L, FENG J, et al. Sequencing batch dry anaerobic digestion of mixed feedstock regulating strategies for methane production: multi-factor interactions among biotic and abiotic characteristics [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 284(5): 276 – 285.

[20] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查产排污系数手册[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2011.

[21] 全国畜牧总站, 中国饲料工业协会, 国家畜牧养殖废弃物资源化利用科技创新联盟. 粪便好氧堆肥技术指南[M]. 北京:中国农业出版社, 2017.

[22] ALESSANDRO C, FRANCESCO DA B, SONIA L. Dry anaerobic digestion of cow manure and agricultural products in a full-scale plant: efficiency and comparison with wet fermentation[J]. *Waste Management*, 2018, 71:704 – 710.

[23] 邓良伟. 沼气工程[M]. 北京:科学出版社, 2015.

[24] 李生. 规模化养殖场大中型沼气工程效益分析[D]. 南昌:江西师范大学, 2018.

LI Sheng. Benefit analysis of large and medium-sized biogas projects in large-scale farms [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2018. (in Chinese)

[25] NIU S, DAI R, ZHONG S, et al. Multiple benefit assessment and suitable operation mechanism of medium- and large-scale biogas projects for cooking fuel in rural Gansu, China[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 46(49): 101285.