

基于 Fluent 流场模拟的半干式连续厌氧发酵反应器的设计及中试试验

李靖, 张重, 赵国明*, 袁存亮, 李爱芹, 丁伟

(吉林省农业机械研究院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为实现干清粪便的无害化处理, 提高干清粪便的厌氧发酵效率, 设计了一款 300 m³ 适合干清粪便的半干式连续厌氧发酵反应器。介绍了半干式连续厌氧反应器的基本构造与工作原理, 通过对发酵罐体的结构参数, 主要装置部件等设计计算, 利用有限元分析进行强度的校核, 并利用 Fluent 流场模拟软件对物料运动状态进行仿真, 确定了厌氧发酵反应器结构参数, 并进行中试试验。试验结果表明: 半干式连续厌氧反应器可在工作过程中维持稳定的工作环境, 并且能够迅速将发酵原料进行厌氧消化反应, 能够维持平均日产气量在 410.6 m³, 容积产气率达 1.37 m³·m⁻³·d⁻¹。针对畜禽干清粪便厌氧发酵来说, 半干式连续厌氧发酵更为适合, 并且能够维持较高的产气效率, 沼气工程整体运行稳定, 工作性能可靠。

关键词: 干清牛粪; 半干式; 连续厌氧反应器; Fluent; 有限元分析

中图分类号: S216.4; X713 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-1166(2023)01-0059-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023010059

Design and Pilot Test of Semi-dry Continuous Anaerobic Fermentation Reactor Based on Fluent Flow Field Simulation / LI Jing, ZHANG Zhong, ZHAO Guoming*, YUAN Cunliang, LI Aiqin, DING Wei / (Jilin Province Agricultural Machinery Research Institute, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to realize the harmless treatment of dry manure and improve the anaerobic fermentation efficiency of dry manure, a 300 m³ semi-dry continuous anaerobic fermentation reactor suitable for dry manure was designed in this paper. This paper introduces the basic structure and working principle of the semi-dry continuous anaerobic reactor. Through the design and calculation of the structural parameters of the fermentation tank and the main device components, the strength was checked by finite element analysis, and the material motion state was simulated by Fluent flow field simulation software. The structural parameters of the anaerobic fermentation reactor were determined and the pilot test was carried out. The test results show that the continuous anaerobic reactor for dry and clean manure can maintain a stable working environment during the working process, and can quickly carry out anaerobic digestion reaction of fermentation raw materials, and can maintain the average daily gas production at 410.6 m³, and the volume gas production rate reaches 1.37 m³·m⁻³·d⁻¹. The overall operation of the biogas project is stable and the working performance is reliable.

Key words: fresh cow dung; semi-dry; continuous anaerobic reactor; Fluent; finite element analysis

随着畜禽养殖业的飞速发展, 畜禽粪便的产生量也十分巨大, 据统计, 我国畜禽粪污每年所产生的 COD 的排放量是我国工业总 COD 排放量的 5 倍以上^[1-2], 如何合理地将畜禽粪便无害化处理已经成为当下一主要研究方向。目前厌氧发酵处理工艺已被广泛应用于畜禽粪便的无害化处理, 并且还可在处理畜禽粪便的同时产生沼气作为清洁能源而被广泛利用。常见的畜禽粪便的厌氧发酵处理工艺

可分为湿式与干式两种^[3], 近几年又将发酵物料 TS 在 15%~25% 的称为半干式厌氧发酵技术。基于环保与节能基础上, 我国畜禽舍现多为干清粪, 其物料 TS 浓度在 10%~25%, 水分含量少^[4], 故而半干式厌氧发酵技术更适合于畜禽干清粪便的处理。

根据文献显示, 厌氧发酵技术虽然存在很多优点, 但是反应器的设计与推广上仍存在许多问题^[5], 对于畜禽干清粪便来说, 一是反应物料浓度

收稿日期: 2022-05-27 修回日期: 2022-06-10

项目来源: 吉林省科技发展计划项目(20200403160SF)

作者简介: 李靖(1996-), 女, 硕士, 主要研究方向为新能源开发利用, E-mail:1072439527@qq.com

通信作者: 赵国明, E-mail:1453978737@qq.com

过高,易出现中间产物例如乙酸等物质的积累,从而造成反应物料的酸化,进而阻止厌氧反应的进行;二是反应基质的不均匀性^[6],使得厌氧发酵反应体系不易控制,从而造成连续运行的不稳定性;三是搅拌阻力大,畜禽干清粪便厌氧发酵时的物料浓度高,搅拌阻力大,物料的搅拌混合困难^[7]。

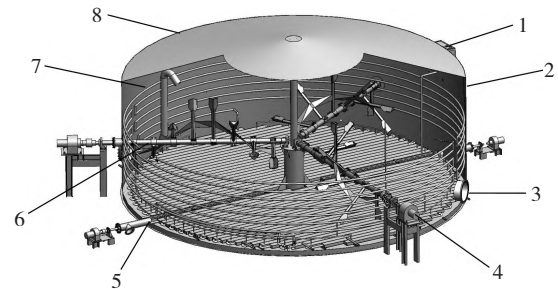
国内外学者近年来针对畜禽粪便厌氧发酵反应器进行了深入研究,赵兰兰^[8]等在传统 CSTR 反应器的基础上对外形进行卵型结构设计,提高厌氧发酵混合效果进而提升厌氧发酵产气效率,但整体物料浓度基本维持在 8% ~ 10%,对于干清粪便物料浓度来说仍需进行稀释,进而增加反应器负荷。杨开宇^[9]等在畜禽粪污厌氧发酵产甲烷反应器选型中也认为在畜禽粪便湿法发酵中,应选择 CSTR 式厌氧反应器进行,但随着技术的不断发展,考虑节能减排的因素,传统的湿法发酵技术在处理干清粪便中已出现很大的局限性,而国外一些研究学者则主要针对干式厌氧反应器进行了大量研究,其中最常见 3 种典型连续式单相干发酵反应器为 Dranco、Kompogas、Valorga。其中比利时的 Dranco^[10]干法反应器多处理经分类后的有机废弃物,其最大特点就是可将发酵剩余物回流至反应器内二次发酵,但由于未设置机械搅拌装置,难以解决干清粪便厌氧发酵时的发料问题。此外,BEKON^[11]工艺与 BIO-Ferm^[12]工艺都是采用高温干式厌氧发酵技术,在发酵过程中并未设置搅拌装置,并且无好氧堆肥阶段,但针对干清粪便的处理来说,高温厌氧发酵会加速干清粪便的水解酸化进程,无搅拌装置,易造成畜禽粪便的酸化及发料,从而抑制厌氧发酵的进行。

尽管国内外许多学者对厌氧发酵反应器都开展了大量的研究,但针对干清粪便处理的半干式厌氧发酵反应器的研究尚存在空白。因此本文设计了 1 种适用于处理干清粪便的 300 m³ 的半干式连续厌氧反应器,并对其进行了结构参数的计算设计及强度分析,模拟仿真物料在罐体内的运动情况,进而为半干式厌氧发酵方式提供高效有利的厌氧发酵反应器。

1 半干式连续厌氧反应器总体设计与工作原理

经过设计的半干式厌氧反应器其结构如图 1 所示,厌氧反应器主要由发酵罐体、增温换热盘管、搅拌装置、进出料口及出料绞龙、搅拌电机、保温层组成。当厌氧反应器正常工作时,畜禽干清粪便由进料口匀速进入厌氧发酵罐体中,当装料浓度达到总

发酵罐体体积的 80% 时停止进料,并且增温换热盘管进行工作,在太阳能辅助增温条件下对盘管内的热水进行循环加热,使其内部物料温度维持在 (35 ± 2) °C 范围内,之后每隔 4 h 搅拌电机开始工作,采用星型卧式布置的搅拌轴在工作时能将物料实现沿搅拌轴周向运动与沿罐体周向的运动,从而使物料与底物充分接触,进而提高厌氧发酵产气效率,当完成厌氧发酵进程后,物料将在底部绞龙与出料口的共同作用下完成出料。



1. 进料口; 2. 发酵罐体; 3. 出料口; 4. 搅拌电机; 5. 出料绞龙; 6. 搅拌装置; 7. 换热盘管; 8. 罐体顶盖

图 1 半干式连续厌氧反应器总体结构示意图

2 半干式厌氧反应器关键部件设计及有限元分析

2.1 发酵罐体结构参数设计及有限元分析

2.1.1 发酵罐体结构参数设计

通过对比国内外畜禽粪便厌氧发酵反应器及物料基本特性,最终确定反应器的发酵罐体设计成圆柱形结构,外形设计为矮胖型,既能节约构造材料,还可以解决垂直方向上传质不均的问题。

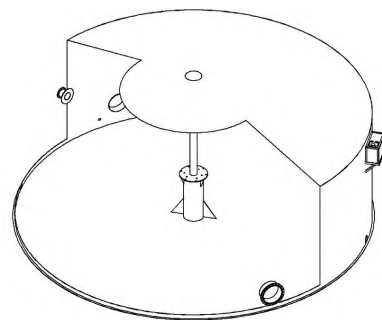


图 2 发酵罐体结构示意图(透视)

本次研究以总体积 300 m³ 为例设计反应器,考虑厌氧发酵罐体顶部需要留有一定的空间用于排气与防止溢流,故而填料量为总体积的 80%,所以罐体有效容积为 240 m³,如图 2 所示。本厌氧发酵罐采用卧式搅拌装置星型结构布置,通过搅拌使罐内料液围绕圆柱罐体的中心轴形成转动,则发酵罐体

内传质相对不充分区域沿垂直方向的投影为图 3 中的阴影部分。

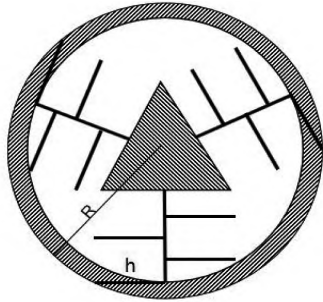


图 3 厌氧发酵罐二维简图

需满足传质相对不充分区域投影面积占总面积比 $\leq 10\%$, 选取占比为 8% , 则最终可确定, 发酵罐体的直径 $D = 11.04 \text{ m}$, 料液高度 $H_{\text{料}} = 2.51 \text{ m}$ 。在保持厌氧发酵罐体直径不变的情况下最终确定厌氧发酵罐高度 $H = 3.13 \text{ m}$, 满足发酵罐体要求。厌氧发酵罐体材料选择 Q235 钢材, 根据圆柱型罐体的相关最小壁厚计算公式同时考虑到钢板的负偏差与腐蚀余量, 最终选择厌氧发酵罐罐体材料最小壁厚为 8 mm 的 Q235 钢板。

2.1.2 发酵罐体的有限元分析

厌氧反应中, 发酵罐体为厌氧发酵设备中的核心功能部件, 利用三维设计软件 SolidWorks 中创建了发酵罐体的三维图, 由于在实际工作过程中罐体内部设置正负压保护器, 因此发酵料液只会对发酵罐体底部与侧壁产生压力, 故而在分析时简化发酵罐体顶盖, 采用无顶盖时三维图进行力学分析, 赋予发酵罐体模型材料参数。根据厌氧发酵罐内在实际工作情况下装料 80% 时, 罐体底部与侧壁焊缝处受到物料产生的重力载荷与压力载荷, 在此种情况下, 罐体底部受到压力为固定约束, 侧壁焊缝处受到压力为均布载荷, 方向垂直于侧壁。

由图 4 和图 5 的应力图与总变形量云图中可以



图 4 厌氧发酵罐体有限元应力云图



图 5 厌氧发酵罐体有限元总变形量云图

看到, 厌氧发酵罐体最大应力在罐体的底部与侧壁的焊接处, 在发酵罐体正常工作下会产生垂直侧壁向外的拉力, 因此受到最大应力为 0.6007 MPa , 最大应力小于材料 Q235 的屈服强度 185 MPa , 符合设计要求。

2.2 搅拌装置的结构参数设计及有限元分析

2.2.1 搅拌装置的结构参数设计

实现物料的搅拌需要输入动力, 即为搅拌功率。由于搅拌功率受叶翅形状, 物料粘度等因素的影响, 故而, 在进行搅拌装置的设计时需计算搅拌功率。根据公式(1)可计算出搅拌功率^[13], 其中, 搅拌功率受功率准数、物料密度、搅拌速度与搅拌直径等因素有关, 故而需计算功率准数。

$$P = N_p \rho N^3 d^5 \quad (1)$$

根据设计要求, 本次设计所选择的叶翅结构形状近似于 MIG 式搅拌叶翅, 在计算功率准数时近似于多层平直桨叶, 利用永田进治的搅拌功率计算式^[14], 得:

$$N_p = \frac{A}{Re} + B \left(\frac{1000 + 1.2 Re^{0.66}}{1000 + 3.2 Re^{0.66}} \right)^p \times \left(\frac{H}{D} \right)^{(0.35 + \frac{b}{D})} (\sin\theta)^{1.2} \quad (2)$$

式中: Re 为雷诺数, $Re = \frac{d^2 N \rho}{\mu}$;

$$A = 14 + \frac{b}{D} \left[670 \left(\frac{d}{D} - 0.6 \right)^2 + 185 \right];$$

$$B = 10 \left[1.3 - 4 \left(\frac{b}{D} - 0.5 \right)^2 - 1.14 \frac{d}{D} \right];$$

$$P = 1.1 + 4 \frac{b}{D} - 2.5 \left(\frac{d}{D} - 0.5 \right)^2 - 7 \left(\frac{b}{D} \right)^4;$$

式中: μ 为物料粘度; b 为桨叶宽度; d 为搅拌直径; D 为搅拌槽内径。

以干清牛粪为例, 利用 NDJ-5S 数显粘度计测得物料粘度为 $19668 \text{ mpa} \cdot \text{s}$, 雷诺数 $Re = 60.86$, 属于较高粘度, 所设计的桨叶类型可近似为 4 层平直桨

叶,其搅拌介质粘度范围通常为 $< 50000 \text{ mPa}\cdot\text{s}^{[15]}$ 。由于本论文所设计反应器搅拌类型为卧式搅拌,故而,搅拌槽内径可近似选用料液高度,即 $D = 2.51 \text{ m}$,根据规定,搅拌直径与搅拌槽内径的比值 d/D 在 $0.5 \sim 0.98$,为增加搅拌解除面积,提高搅拌效率,故而将比值选为 0.98 ,即搅拌直径 $d = 2.4598 \text{ m}$ 。经过公式(2)的计算可得功率准数 $N_p = 5.79^{[15]}$ 。由于,干清粪便的粘度过高,故而设计转速条件时选取 $10 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。经过公式(1)的计算,单个搅拌轴功率为 2.87 kW 。

为实现搅拌轴的受力平衡,本论文在设计时将叶翅以螺旋形式分布,并且设有螺带,可以使物料沿轴向运动。故而,螺带在搅拌时消耗功率需进行计算,可将其近似于螺杆式搅拌器,其中,功率计算公式同(1),但功率准数的计算略有不同,根据前苏联 OB B BacH II C 等人对螺杆式搅拌器的功率准数的研究提出计算式公式为:

$$N_p = 70 \left(\frac{h}{d_j} \right) Re^{-1.0} (Re \leq 100, \text{不带导流筒}) \quad (3)$$

式中: Re 为雷诺数; h 为螺带高度; d_j 为螺带直径。

本次所设计的螺带条数为 $Z = 1$, $d_j = 1.36 \text{ m}$,由于反应器中心需设计一个内中柱作为星型卧式搅拌轴的支撑底座,故而螺带高度 $h = 4.91 \text{ m}$ 。经过计算可得,螺带的功率准数 $N_p = 4.15$,故而单条螺带的搅拌功率 $P = 0.11 \text{ kW}$ 。故而,经过计算单个搅拌设备的总功率 $P = 2.98 \text{ kW}$,取整为 3 kW 。通常电机的传动效率为 0.91 ,则单个搅拌设备的 3.3 kW ,根据常规电机功率规格表,取电机功率为 4 kW 的电机,搅拌轴及搅拌叶翅示意图如图 6 和图 7 所示。

通过最终计算,可以求得抗扭截面系数 $9.285 \times 105 \text{ mm}^3$,对于空心轴内外径之比通常取 $0.5 \sim 0.7$,

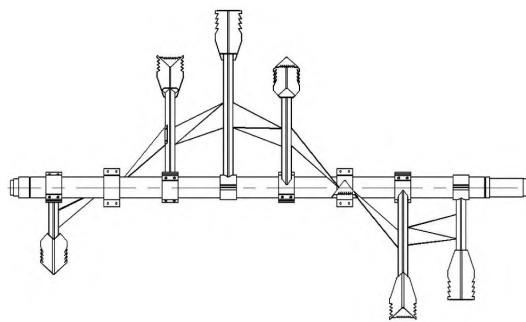


图 6 搅拌轴结构示意图

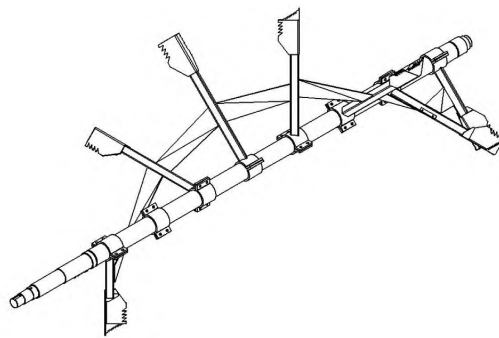


图 7 搅拌叶翅结构示意图

可求得最小外径 $D = 116.98 \text{ mm}$,对最小外径进行取整得 $D = 184 \text{ mm}$,则内径 $d = 128 \text{ mm}$ 。

2.2.2 搅拌轴与搅拌叶翅的有限元分析

利用 SolidWorks 软件,创建搅拌轴及搅拌叶翅的三维模型,如图 8 所示。

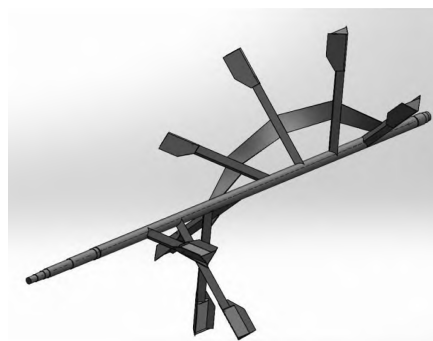


图 8 搅拌装置三维模型

将图 8 所示的搅拌装置的三维模型导入 SolidWorks Simulation 模块内,赋予搅拌轴与搅拌叶翅的材料参数。约束和压力添加完毕后,利用 SolidWorks Simulation 的 Direct Sparse 求解器进行求解。由图 9 和图 10 可以看出,搅拌轴与搅拌叶翅的最大应力集中在搅拌轴与电机连接端,最大应力为 34.76 MPa ,小于 Q235 钢材的屈服强度 185 MPa ,符合设计要求。

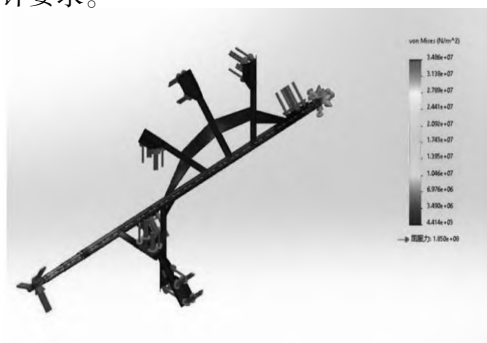


图 9 搅拌装置有限元应力云图



图 10 搅拌装置有限元总变形量云图

3 半干式厌氧反应器流场数值模拟

3.1 workbench 中模型的建立与网格划分

模型形状与实际形状基本相同,计算域选取搅拌区域与反应器其他区域,网格划分如图 11 和图 12 所示,546216 个网格数,108150 个节点数。

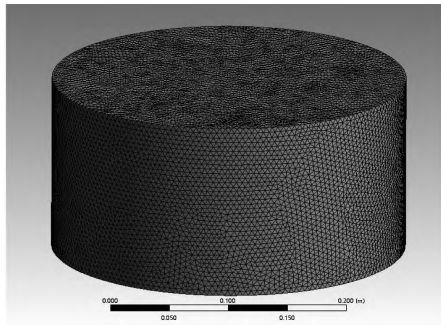


图 11 整体网格划分图

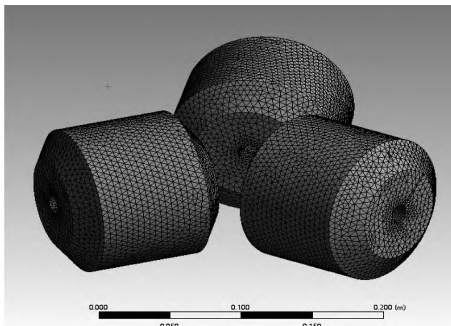


图 12 搅拌装置区域网格划分图

3.2 边界条件的设置及初始参数确定

本次选取求解器湍流模型,将流体的计算区域与边界进行初始化,初始速度为 0,残差的收敛曲线设置为 0.001,进行迭代计算,直至结果收敛。对搅拌装置的转速、物料的粘度等进行设置,不考虑反应的进行,只考虑混合流动情况。设置转速为 10

$r \cdot \min^{-1}$,转动方向沿搅拌轴顺时针,设置负方向重力加速度 $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,物料粘度设定为 $19.668 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,密度 $1187 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3.3 结果及分析

当转速为 $10 \text{ r} \cdot \min^{-1}$ 时、粘度为 $19.668 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,反应器内物料的速度矢量图及运动轨迹图如图 13 和图 14 所示。沿搅拌轴轴向方向可以看出,搅拌轴附近的物料速度基本一致,可稳定在 $0.0104 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而在搅拌叶片外径处速度达到最大,可达 $0.0174 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于物料混合的多样性与不同物料具有的复杂流变特性,在进行搅拌时,由于物料的粘度较高,在粘滞力的影响下会出现部分的层流状态。此外,从图中可以看出,物料以角速度旋转方向做沿搅拌轴的周向运动,并且速度大小会沿着搅拌直径方向呈线性增大,而在模拟过程中考虑重力场的影响,故而在底部出现转速大的现象;此外在搅拌轴作用之外的其他区域,由于物料存在的粘滞力,可使物料随着惯性出现沿罐体的周向运动,经过模拟后的流场速度分布基本与设计目标相符合,能够实现物料的全混合无死角搅拌。

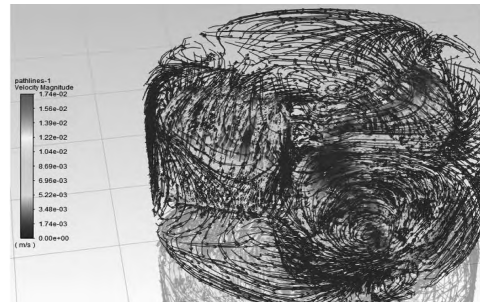


图 13 反应器物料运动速度矢量图

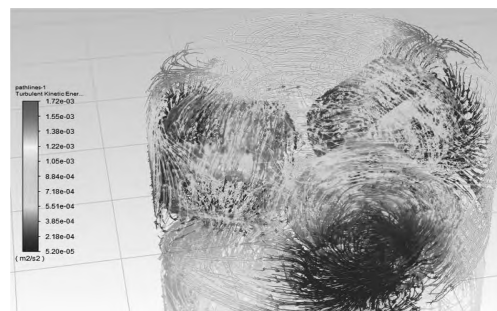


图 14 反应器物料运动轨迹图

4 中试试验验证

4.1 工程概述

为验证该反应器针对畜禽粪便连续运行实际情

图 15 300 m³ 沼气示范工程

况,吉林省农业机械研究院于乾安县牧羊厂建立 300 m³ 沼气示范工程,该工程依托于吉林省科技发展计划项目“畜禽粪便高浓度沼气发酵及沼渣基质化利用技术装备研究”,总工程占地 1300 m²。工程运行处理畜禽干清粪便产生天然气可供示范园区生产生活,沼渣渣液可固态、液态有机肥还田使用。实际工程如图 15 所示。

4.2 实际工程运行情况

本次工程运行原料以干清牛粪作为主要发酵原料,物料浓度可达 16.4%,按接种比例 30% 进行投料,装料容积为总体积的 80%,装料完毕后,开启循环换热系统与搅拌装置,进行 10 min 低转速搅拌使发酵罐体内部物料均匀匀质,之后循环换热系统开启,当物料温度高于或低于(35 ± 2) °C 时,自动开启或停止循环换热以维持厌氧发酵罐体温度;保持每 4 h 1 次,转速为 10 r·min⁻¹,时长为 2 min 的间隙搅拌强度,当厌氧发酵反应进入产气高峰期,开始连续进出料,并每天记录产气情况与设备的运行检查。

本次半干式厌氧发酵反应器连续运行试验产气结果如图 16 所示,本次干清牛粪连续厌氧发酵试验,截取进入连续运行后的 15 天连续日产量,在厌氧发酵反应进入第 7 天开始进行连续进出料,在连

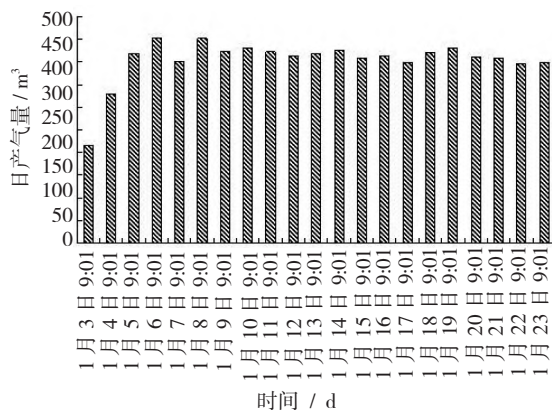


图 16 半干式连续厌氧发酵日产气量变化

续运行期间,平均日产气量可达 410.6 m³,并且平均容积产气率可达 1.37 m³·m⁻³·d⁻¹,整个连续厌氧发酵期内,干清牛粪能够正常高效完整厌氧发酵,并且维持较高的产气能力,可充分证明本次论文所研究的半干式厌氧反应器的工作性能,并值得推广应用。

5 讨论

5.1 对前人研究结果有所突破、创新的阐释

(1) 针对畜禽粪便厌氧发酵,目前我国常见的厌氧反应器为 CSTR 型,本次论文设计的半干式厌氧发酵反应器与 CSTR 型反应器相比结构与外型有很大差异,首先,常规的 CSTR 型厌氧反应器罐体采用细高型立式圆柱结构^[16],而本次论文所设计的半干式厌氧发酵反应器采用矮胖型立式圆柱罐体结构,在合理范围内较小的高径比能减少物料沿垂直方向上的分层,并且在大型沼气工程中还可节省板材厚度,减少开支;其次,常规 CSTR 型反应器的机械搅拌为单一搅拌的小直径搅拌叶翅方式,需利用低浓度物料自身的水力特点在机械搅拌参与时实现物料自下而上的运动^[17],但对于畜禽干清粪便来说属高浓度物料,其粘度过高,CSTR 型反应器的搅拌无法实现预期效果,而本文设计的半干式厌氧发酵反应器采用星型布置的卧式机械搅拌,不受物料粘度影响,能实现均匀传热传质,搅拌效果较佳。因此,本文设计的半干式厌氧反应器可针对干清粪便进行高效处理。

(2) 本文所设计的半干式厌氧发酵反应器在中试试验中运行较为稳定,因半干式厌氧发酵反应器可满足高浓度物料的厌氧发酵,并且厌氧发酵环境适宜,接种物比例合适,因此,反应周期较短,效率较高,较传统的 CSTR 型厌氧发酵反应器的水利滞留期 30 d 相比,半干式厌氧发酵反应器的水利滞留期可缩短至 20 d,并且在连续厌氧发酵过程中,畜禽粪便的降解率可达 56.9%,连续厌氧发酵平均容积产气率也可达 1.37 m³·m⁻³·d⁻¹,较 CSTR 型厌氧发酵反应器的平均容积产气率 0.8 m³·m⁻³·d⁻¹ 有较高的提升^[18]。

5.2 本研究需要说明的问题

本次论文所设计的半干式厌氧发酵反应器能高效处理浓度在 12% ~ 25% 的农业废弃物,不仅仅只适用于干清粪便的厌氧发酵,对于秸秆类原料,合理的搅拌方式可以避免物料的结壳及分层,进而达到

高效运行效果。此外,由于设备可进行半干式厌氧发酵,发酵浓度较高,能避免经过厌氧发酵后产生大量沼液造成沼液难以消纳的问题,因此本设备同时具有很好的推广应用价值。在今后的研究中将会继续加大对反应器运行时间的监测,从而确保反应器的稳定运行,并且还会增加对玉米秸秆连续厌氧发酵的研究,用以验证反应器的处理能力。

6 结论

本文设计了1种针对畜禽干清粪便连续厌氧发酵的反应器,为畜禽干清粪便的无害化处理与资源化利用提供了1种新的处理设备及厌氧发酵工艺,并基于300 m³沼气工程进行了实际运行试验,最终得到以下结论。

(1)利用三维建模软件 SolidWorks 对半干式厌氧反应器进行总体结构设计,基于发酵物料的理化性质、半干式厌氧发酵工艺及基本工作原理,对总体及关键部件进行设计计算机有限元分析,均符合实际生产需要与设计目标,值得推广应用。

(2)通过流体数值仿真分析对半干式厌氧反应器进行流体力学仿真分析,进而模拟实际运行结果,在转速为10 r·min⁻¹的条件下,物料能够实现在罐体内的全混合式搅拌,使物料沿搅拌轴周向旋转的同时,实现物料沿罐体的周向运动,使得物料与底物的接触更加充分,完全可避免在实际厌氧反应进程中发酵原料发料、结壳、分层等问题。

(3)通过300 m³沼气工程实际运行情况来看,半干式厌氧反应器整机性能良好,能维持稳定的厌氧发酵环境,并且对于干清粪便的处理效果十分显著,在连续运行期间,平均日产气量能稳定在410.6 m³左右,平均容积产气率可达1.37 m³·m⁻³·d⁻¹,工程运行稳定,值得推广应用。

参考文献:

[1] 徐长春. 畜禽粪便的危害及无公害处理的现状[J]. 新农业,2020(13):56.
 [2] 郑苇,刘淑玲,李波,等. 禽畜干清粪工艺产生鲜粪的厌氧消化处理技术探讨[J]. 环境卫生工程,2018,26(01):5-8+12.
 [3] De Baere. Anaerobic digestion of solid waste:state-of-the-

art[J]. water science & technology a journal of the international association on water pollution research, 2000,41(3):283-90.
 [4] 姜时保,彭长城,陈丽,等. 浅析当前猪场粪污综合处理的方法[J]. 中国畜禽种业,2020,16(05):8-10.
 [5] 胡鑫,冯晶,赵立欣,等. 干法厌氧发酵反应器及过程控制技术进展[J]. 中国沼气,2018,36(02):68-75.
 [6] 邱荣娥. 干法厌氧发酵反应器设计与启动实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
 [7] Guendouz J, Buffiere P, Cacho J, et al. Dry anaerobic digestion in batch mode: Design and operation of a laboratory-scale, completely mixed reactor[J]. Waste Management, 2010, 30(10):1768-1771.
 [8] 赵兰兰,郭占斌,王心语,等. 全混式厌氧发酵反应器(CSTR)研究进展[J]. 江苏农业学,2019,47(21):95-99.
 [9] 杨开宇. 畜禽粪污湿式厌氧发酵产甲烷反应器选型[J]. 能源与节能,2021(12):170-172.
 [10] De Baere L. The Dranco Technology: A unique digestion technology for solid organic waste[M]. Belgium: Organic Waste Systems (OWS) Pub. Brussels, 2010.
 [11] Angelidaki I, Ellegaard L, Ahring B K. Applications of the anaerobic digestion process[M]. Biomethanation II. Springer Berlin Heidelberg, 2003:1-33.
 [12] El Mashad H M, Zeeman G, Van Loon W K P, et al. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure[J]. Biore-source technology, 2004,95(2):191-201.
 [13] 郑盼. 猪粪干式厌氧消化实验研究[D]. 昆明:云南师范大学,2019.
 [14] NB/T 47003.1-2009 钢制焊接常压容器[S]. 北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会,2009.
 [15] 唐金松. 机械设计手册[J]. 中国机械工程,2004,015(011):947.
 [16] 赵兰兰,郭占斌,王心语,等. 全混式厌氧发酵反应器(CSTR)研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(21):95-99.
 [17] 沈耀良,李媛,孙立柱. 连续流CSTR反应器中好氧污泥的颗粒化及其特性[J]. 环境工程,2008,26(06):63-66+5.
 [18] 何秋阳,李润东,冯磊, Bernhard Raninger. CSTR反应器鸡粪厌氧消化中试启动研究[J]. 可再生能源,2012,30(04):89-92+96.