

连续运行高浓度猪粪推流式和全混式厌氧 消化反应器性能研究

王雪静^{1,2} 李宏业^{1,2} 乔 玮^{1,2}

(1. 中国农业大学三亚研究院, 三亚 572024; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 高浓度厌氧消化可以减少沼液量,对于缓解工程中沼液出路难的问题有重要的现实意义。但是高浓度物料尤其是猪粪的厌氧分解可能存在搅拌传质差而导致的挥发性脂肪酸积累和产气效率低的问题。为此,本文采用理论上具有更高转化效率的推流式反应器开展122 d的连续运行试验,猪粪的进料总固体质量分数为15.6%,水力停留时间50 d,并在相同条件下与全混式工艺进行对比分析。试验结果表明,推流式反应器的挥发性固体(VS)去除率和甲烷产率分别达到65.1%和294 mL/g(每克VS甲烷产率),显著高于全混式反应器(VS去除率51.2%,甲烷产率233 mL/g(每克VS甲烷产率))。通过计算得出高浓度发酵比湿发酵可减少沼液产量68.7%。推流式和全混式反应器均未出现酸积累现象,体现出反应器长期运行的良好稳定性。本文证实在高含固猪粪厌氧发酵中,推流式反应器比全混式反应器具有更好的发酵性能,为提升高固体猪粪的发酵性能提供了技术参考。

关键词: 高固体含量; 猪粪; 厌氧消化; 推流式反应器; 全混式反应器

中图分类号: X7

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)21-0059-09

OSID:



Comparison of Continuous Anaerobic Digestion of High-solid Pig Manure Between Plug-flow and Stirring Mixing Reactor

Wang Xuejing^{1,2} Li Hongye^{1,2} Qiao Wei^{1,2}

(1. Sanya Institute of China Agricultural University, Sanya 572024, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Anaerobic digestion of high-solid manure can reduce the volume of digestate and benefit the biogas plant operation. However, the anaerobic digestion of high-solid manure, especially pig manure, may have problems such as accumulation of volatile fatty acids and low gas production efficiency caused by suppressed mass transfer and high viscosity. Therefore, a plug-flow reactor with theoretically higher efficiency was used to investigate the continuous anaerobic digestion performance of 122 days. The total solid concentration of the pig manure feed was 15.6% and the hydraulic retention time was 50 days. A stirring mixing reactor under the same conditions was operated for comparison. The results obtained showed that the volatile solids (VS) removal efficiency and methane yield was 65.1% and 294 mL/g in the plug-flow reactor. These results were significantly higher than those obtained in stirring mixing reactor, i. e. 51.2% and 233 mL/g. It was calculated that high-concentration fermentation can reduce biogas slurry production by 68.7% compared with wet fermentation. During the prolonged operation, neither the plug-flow reactor nor the stirring mixed reactor exhibited acid accumulation. This indicated stable microbial communities and balanced metabolic pathways under continuous feeding. Both systems thus demonstrated excellent long-term operational stability and reliable performance. Conclusively, the research results can support the advanced performance in plug flow over stirring mixing reactor. High performance of anaerobic digestion of high-solid pig manure was thus feasible for industrial application.

Key words: high solids content; pig manure; anaerobic digestion; plug flow reactor; stirring mixing reactor

收稿日期: 2026-07-22 修回日期: 2026-07-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3909101)、国家自然科学基金项目(32372015)和海南省国际科技合作研发项目(GHYF2024023)

作者简介: 王雪静(1999—),女,博士生,主要从事厌氧发酵研究,E-mail: wangxuejingcau@163.com

通信作者: 乔玮(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事有机固废和废水厌氧生物处理与资源化研究,E-mail: qiaowei@cau.edu.cn

0 引言

2023 年,全国畜禽粪污总量约 36.4 亿 t,其中生猪粪污 13.4 亿 t,占畜禽粪污总量的 37%^[1],给环境污染治理带来了巨大压力。据农业农村部报道,2024 年全国畜禽养殖规模化率达到 73%。为缓解粪水消纳压力,提高清洁生产水平,农业农村部 2022 年印发的《畜禽养殖场(户)粪污处理设施建设技术指南》中大力推广干清粪工艺,要求养殖场从源头实现粪污减量化。干清粪猪粪的总固体(Total solid,TS)质量分数可达到 15%~25%^[2]。厌氧消化是猪粪处理的重要方式。厌氧消化后沼液中含有多种营养物质^[3],可作为调理剂增强土壤肥力^[4],然而沼液产量过大会难以消纳。高固体厌氧工艺相较于传统的湿法工艺,不但可以提高反应器容积的利用效率,还可以大幅度减少沼液量,极大缓解工程中沼液消纳的难题^[5]。高固体含量物料的流动性差,在厌氧反应器内易出现传质困难,物料分解效率低,挥发性有机酸积累等问题^[6]。推流式反应器(Plug flow reactor,PFR)无需持续搅拌混合全部物料,有一定节能优势。PFR 内物料沿反应器轴向推进,所有底物保持相同的停留时间,从动力学原理上有提高物料分解效率的优势。

目前已有针对 PFR 的研究,高浓度 PFR 适用于

高悬浮固体浓度、高固体发酵原料的“能源生态型”沼气工程^[7]。有少量研究对比了 PFR 与全混式反应器(Continuous stirred-tank reactor,CSTR)在高固体厌氧消化中的性能,但结果不一^[8-10]。对于厌氧工艺的研究,需要长期的工艺运行效果作为基础数据,进一步通过物料平衡进行分析。为此,本文以高固体猪粪为研究对象,对比推流式与全混式厌氧消化反应器的运行性能,旨在为高固体猪粪厌氧处理工艺的优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 猪粪与接种污泥特性

猪粪来自于北京某养猪场干清粪工艺收集到的猪粪,新鲜样品于 4℃ 储存备用。新鲜猪粪 TS 质量分数为(25.1±0.4)%,试验前将新鲜猪粪稀释至目标 TS 质量分数 15.0%,并使用匀浆机均质化处理,用以进料。进料猪粪每 20 d 配制一次,并存储在 4℃ 下保证进料稳定。试验接种污泥取自实验室内长期稳定运行的猪粪中温厌氧反应器。

进料猪粪和接种污泥理化性质如表 1 所示。其中进料猪粪每克 TS 含有 1.11 g COD,每克 VS 含有 1.33 g COD,SCOD 占 TCOD 的 12.2%,TS 中 18.0% 为蛋白质,39.2% 为碳水化合物。

表 1 进料猪粪和接种污泥理化性质
Tab.1 Physical and chemical properties of pig manure and inoculated sludge

参数	进料猪粪	接种污泥
TS 质量分数/%	15.6±0.3	5.4±0.2
挥发性固体质量分数(Volatile solid,VS)/%	13.1±0.2	3.4±0.1
总化学需氧量(Total chemical oxygen demand,TCOD)/(g·L ⁻¹)	174.1±4.3	43.5±4.1
溶解性化学需氧量(Soluble chemical oxygen demand,SCOD)/(g·L ⁻¹)	21.3±10.8	8.1±4.9
pH 值	6.39±0.12	7.71±0.08
总氨氮(Total ammonia nitrogen,TAN)质量浓度/(mg·L ⁻¹)	1 380±210	2 810±130
总挥发性有机酸(Total volatile fatty acids,TVFA)质量浓度/(mg·L ⁻¹)	13 137±3 545	1 250±400
总蛋白质质量浓度/(g·L ⁻¹)	28.3±1.6	14.7±2.0
总碳水化合物质量浓度/(g·L ⁻¹)	69.8±9.8	7.4±0.3

注:表中数据表达形式为“平均值±标准差”,下同。

1.2 反应器运行

推流式反应器和全混式反应器总运行时长为 122 d。推流式反应器总容积为 40 L,有效容积为 24 L,长径比 10:1,在整个试验运行期间间歇搅拌,搅拌频次为搅拌 2 min,停止 10 min,搅拌转速为 47 r/min。反应器在 37℃ 下运行,通过水浴加热的方式维持反应器温度。全混式反应器总容积为 6 L,有效容积为 3 L,在整个试验运行期间持续搅拌,搅拌转速为 60 r/min。反应器进料为 TS 质量分数 15.6% 的猪

粪,每日进出料一次,推流式反应器每日进料 480 mL,全混式反应器每次进料 60 mL。出料存储在 4℃ 下,用以测定理化指标。推流式反应器和全混式反应器的水力停留时间(Hydraulic retention time,HRT)均为 50 d,平均有机负荷为 2.62 g/(L·d)。有机物分解效率对比的样品取自稳定运行时段(88~122 d),样品每 7 d 收集一次。

1.3 分析方法

在反应器运行期间,气体产量通过气袋储存后

采用湿式流量计测定 (LML-1 型)。气体组分取当天收集气袋中气体,使用气相色谱仪测定 (GC8A 型,岛津,日本),测定条件为使用 10 m×2 mm 不锈钢色谱柱,氢气分压 0.6 MPa,流速 20 mL/min,进样口温度、柱温和检测器温度分别为 120、50、120℃,进样体积为 0.5 mL。pH 值使用 pH 计 (Orion 5-Star 型,梅特勒,德国)测定。TS 和 VS 含量通过烘干灼烧法测定^[11]。COD 含量使用快速消解分光光度法测定,参照标准 HJ/T 399—2007《水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法》。氨氮含量使用纳氏试剂分光光度法测定,具体方法参照标准 HJ 535—2009《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》。VFA 测定:将样品离心后取上清液过 0.45 μm 滤膜,用甲酸调节 pH 值为 2~3 后过 0.22 μm 滤膜,放入样品瓶中上机测试。使用气相色谱仪测定 (SP-6801A 型,鲁南瑞虹),进样口、色谱柱和检测器温度分别为 220、60、230℃,进样体积为 1 μL。碱度采用盐酸滴定法测定^[12]。甲烷潜能使用批次试验测定^[13]。

1.4 产气模型及产气速率方程

产气潜能采用修正的 Gompertz 模型进行模拟,模型表达式为

$$P = P_0 \exp \left(- \exp \left(\frac{e \mu_{\max}}{P_0} (\lambda - t) + 1 \right) \right) \quad (1)$$

式中 P —— t 时刻的累积产气率 (每克 VS 产气率),mL/g
 $\mu_{\max}$ ——最大产气速率 (每克 VS 产气速率),mL/(g·h)
 P_0 ——产气潜能 (每克 VS 产气潜能),mL/g
 t ——发酵时间,h
 λ ——迟滞期,h

产气速率通过厌氧消化一级动力学模型和产气速率方程计算,一级动力学模型计算式为

$$\ln \left(\frac{P_{s_0}}{P_s} \right) = kt \quad (2)$$

式中 P_{s_0} ——最大产气率 (每克 VS 产气率),mL/g
 P_s ——最大产气率与 t 时刻的累积产气率的差 (每克 VS 产气率),mL/g
 k ——反应速率常数,h⁻¹

产气速率计算式为

$$\mu = k P_s \quad (3)$$

式中 μ ——产气速率 (每克 VS 产气速率),mL/(g·h)

1.5 COD 平衡物料计算

COD 平衡计算的相关公式为

$$w_{\text{PCOD}_{\text{in}}} = \frac{c_{\text{PCOD}_{\text{in}}}}{c_{\text{TCOD}_{\text{in}}}} \times 100\% \quad (4)$$

$$w_{\text{SCOD}_{\text{in}}} = \frac{c_{\text{SCOD}_{\text{in}}}}{c_{\text{TCOD}_{\text{in}}}} \times 100\% \quad (5)$$

$$c_{\text{COD}_{\text{CH}_4}} = \frac{S c_{\text{TCOD}_{\text{in}}}}{f} \quad (6)$$

$$w_{\text{PCOD}_{\text{out}}} = \frac{c_{\text{PCOD}_{\text{out}}}}{c_{\text{TCOD}_{\text{in}}}} \times 100\% \quad (7)$$

$$w_{\text{SCOD}_{\text{out}}} = \frac{c_{\text{SCOD}_{\text{out}}}}{c_{\text{TCOD}_{\text{in}}}} \times 100\% \quad (8)$$

$$w_{\text{COD}_{\text{CH}_4}} = \frac{c_{\text{COD}_{\text{CH}_4}}}{c_{\text{TCOD}_{\text{in}}}} \times 100\% \quad (9)$$

式中 $w_{\text{PCOD}_{\text{in}}}$ ——进料颗粒态化学需氧量 (Particulate chemical oxygen demand, PCOD) 的质量分数,%

$c_{\text{PCOD}_{\text{in}}}$ ——进料 PCOD 的质量浓度,kg/m³

$c_{\text{TCOD}_{\text{in}}}$ ——进料 TCOD 的质量浓度,kg/m³

$w_{\text{SCOD}_{\text{in}}}$ ——进料 SCOD 的质量分数,%

$c_{\text{SCOD}_{\text{in}}}$ ——进料 SCOD 的质量浓度,kg/m³

$c_{\text{COD}_{\text{CH}_4}}$ ——甲烷转换为 COD 的质量浓度,kg/m³

S ——甲烷产率 (每克 COD 甲烷产率),L/g

f ——COD 转化甲烷系数,标准状况 (0℃,101.325 kPa) 下为 0.35 L/g (每克 COD 可转化甲烷体积)

$w_{\text{PCOD}_{\text{out}}}$ ——出料 PCOD 的质量分数,%

$c_{\text{PCOD}_{\text{out}}}$ ——出料 PCOD 的质量浓度,kg/m³

$w_{\text{SCOD}_{\text{out}}}$ ——出料 SCOD 的质量分数,%

$c_{\text{SCOD}_{\text{out}}}$ ——出料 SCOD 的质量浓度,kg/m³

$w_{\text{COD}_{\text{CH}_4}}$ ——甲烷转换为 COD 的质量分数,%

1.6 高浓度工艺的沼液减排量计算

对于猪场,所产生的猪粪干物质总量是恒定的,用于发酵产生能源的总量也是一定的。含固率高,猪粪 (干物质和水混合物) 的总量越低。为计算推流式高浓度工艺的沼液减排效果,本文以 1 kg 干物质为基础进行计算,以湿法发酵工艺作为比较对象,沼液减排量计算式为

$$R = \frac{M_{\text{wet}} - M_{\text{dry}}}{M_{\text{wet}}} \times 100\% = \frac{\frac{1}{S_{\text{wet}}} - E_{\text{wet}} - \left(\frac{1}{S_{\text{dry}}} - E_{\text{dry}} \right)}{\frac{1}{S_{\text{wet}}} - E_{\text{wet}}} \times 100\% \quad (10)$$

式中 R ——高浓度发酵工艺对比湿发酵工艺的沼液减排量,%

M_{wet} ——湿发酵工艺的沼液质量,kg

M_{dry} ——高浓度发酵工艺的沼液质量,kg

S_{wet} ——湿发酵工艺的 TS 质量分数,取 5.0%

S_{dry} ——高浓度发酵工艺的 TS 质量分数,取 15.0%

E_{wet} ——湿发酵工艺的 TS 去除率,取 50.0%^[14]

E_{dry} ——高浓度发酵工艺的 TS 去除率,取 55.5% (本文推流式工艺数据)

2 结果与讨论

2.1 反应器产甲烷性能对比分析

1~86 d 反应器运行不够稳定,为反应器的启动期,主要是为探索推流式反应器的运行特点。

图 1 展示了反应器在运行 122 d 内的甲烷产率、容积产气率和甲烷体积分数。在启动期,推流式反应器的甲烷产率(每克 VS 甲烷产率)从 145 mL/g 逐渐增长至 305 mL/g,全混式反应器的甲烷产率从 138 mL/g 逐渐增长至 222 mL/g。在稳定期内,推流反应器的甲烷产率为 294 mL/g,显著高于全混式反应器的 233 mL/g ($p < 0.05$) (表 2),提升率为 26.2%。说明推流式反应器在处理 TS 质量分数为 15.6% 猪粪时比全混式反应器更彻底。这与高固体 (TS 质量分数 27%~28%) 餐厨发酵中推流式比全混式产气高 20.3% 的结果相一致^[8]。

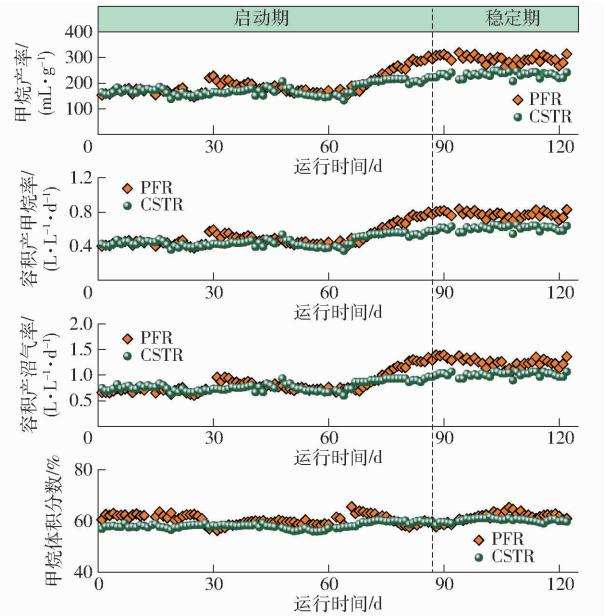


图 1 长期运行条件下 PFR 和 CSTR 产气率

Fig. 1 Gas production rate of PFR and CSTR under long-term operating conditions

表 3 展示了不同反应体系的厌氧消化性能,文献^[16]在进料猪粪 TS 质量分数为 16.5%,HRT 为 30~60 d 时,甲烷产率为 203~219 mL/g。本试验采用的 HRT 为 50 d,这是基于在前期研究中,发现进

表 2 稳定期 PFR 和 CSTR 产气率

Tab. 2 Gas production rates of PFR and CSTR during stable period

参数	PFR	CSTR
TS 产沼气率	400 ± 26	323 ± 14
VS 产沼气率	479 ± 32	387 ± 16
COD 产沼气率	360 ± 24	292 ± 12
TS 产甲烷率	246 ± 12	195 ± 8
VS 产甲烷率	294 ± 14	233 ± 10
COD 产甲烷率	222 ± 10	176 ± 8

料 15.0%,HRT 为 90 d 时可以实现较高的甲烷产率^[17],因此缩短 HRT 以提高发酵效率。在发酵过程中,甲烷产率反映了物料的转化效率,而容积产气率更能体现反应器的容积利用率。在稳定期,推流式的容积产甲烷率和容积产沼气率分别为 0.77 L/(L·d) 和 1.26 L/(L·d),全混式的容积产甲烷率和容积产沼气率分别为 0.61 L/(L·d) 和 1.02 L/(L·d)。在相同有机负荷下,推流式的容积产气率高于全混式,且推流反应器的搅拌频率更低,说明推流式反应器在此搅拌状态下足以实现较高的传质和混合效果。全混式反应器的运行效果,在充分搅拌混合的条件下,受反应器体积的影响不大^[22]。因此,虽然本文的两个反应器体积有较大差异,所获得的厌氧处理性能是有代表性的,可用于工艺效果的比较。

在稳定期,推流反应器的甲烷体积分数为 (61.7 ± 1.7)%,高于全混式反应器的 (60.4 ± 0.7)% ($p < 0.05$)。全混式反应器在启动期的甲烷体积分数为 58.0%,在稳定期提升至 60.4%。

对于常规湿式发酵,本文取进料 TS 质量分数为 5.0%。对于高浓度的推流式发酵,如本试验方法所述,取进料 TS 质量分数为 15.0%。根据公式 (10) 的计算,高浓度推流式发酵比常规全混湿式发酵,可减少沼液产量约 68.7%。在实际应用中,沼液减排量是非常重要的工艺指标,沼液减排量越大,越有助于提高工程运行的可持续性。

通过推流式和全混式反应器的动力学方程可计算出反应器的可降解物料去除率^[23],方程表达式为

$$r_{\text{PFR}} = \left(1 - \frac{1}{e^{kt_{\text{HRT}}}} \right) \times 100\%$$

(11)

$$r_{\text{CSTR}} = \frac{kt_{\text{HRT}}}{1 + kt_{\text{HRT}}} \times 100\%$$

(12)

式中 r_{PFR} ——推流式反应器可降解物料去除率,%
 r_{CSTR} ——全混式反应器可降解物料去除率,%

t_{HRT} ——水力停留时间,d

由于水力停留时间 t_{HRT} 和反应速率常数 k 必为正值,因此,推流反应器的可降解物料去除率始终大

表 3 猪粪连续厌氧消化性能对比

Tab.3 Continuous anaerobic digestion performance of pig manure

进料 TS 质量 分数/%	进料浓度 类型	反应器型式	运行时长/ d	温度/ ℃	HRT/ d	反应器甲烷产率/ (mL·g ⁻¹)	数据来源
20.0	高浓度	推流	150	37	90	134	本实验室 ^[12]
20.0		全混	195	37	90	230	本实验室 ^[15]
16.5		全混	69	35	60	203	文献[16]
16.5		全混	79	35	40	213	文献[16]
16.5		全混	69	35	30	219	文献[16]
15.6		全混	122	37	50	233	本试验
15.6		推流	122	37	50	294	本试验
15.0		全混	131	37	90	310	本实验室 ^[17]
14.0		全混	30	35	20	235	文献[18]
10.0		全混	40	35	25	283 ^a	文献[18]
10.0	低浓度	全混	600	37	30	245	本实验室 ^[19]
7.2		全混	60	37	30	366 ^b	文献[20]
4.0		全混	69	35	15	308 ^b	文献[21]

注:a 反应器在进料 TS 质量分数 10% ,HRT 为 25 d 的情况下仅运行到第 40 天,其中 1 ~ 10 d 为启动期;b 反应器进料 TS 质量分数阶梯式提升。

于全混反应器的可降解物料去除率。

基于猪粪的元素组成,可以推导出猪粪的经验化学式,该化学式的相对分子质量在数值上等同于每摩尔猪粪的 VS 质量,借助化学计量关系式,可建立猪粪厌氧消化产甲烷的理论反应方程式,进而推算出完全转化条件下的甲烷理论产率和甲烷浓度,化学计量关系式^[24]为

$$\begin{aligned} &C_nH_aO_bN_c + (n - 0.25a - 0.5b + 1.75c)H_2O \rightarrow \\ &(0.5n + 0.125a - 0.25b - 0.375c)CH_4 + (0.5n - \\ &0.125a + 0.25b - 0.625c)CO_2 + cNH_4HCO_3 \end{aligned}$$

(13)

根据经验猪粪元素组成,猪粪元素组成可表示为 C_{18.1} H_{31.9} O_{11.6} N^[25],由此得到的甲烷产率为 486 mL/g,甲烷体积分数为 57.0%。由于实际厌氧发酵过程中物料不可能完全降解,因此实际的甲烷产率通常低于理论值。其次,实际测得的甲烷体积分数 58.0% ~ 61.7%,比理论值高,可能是因为 CO₂ 在水中的溶解度高于 CH₄,因此从液相中溢出的沼气中 CO₂ 的比例会低于理论值,因此 CH₄ 体积分数比理论值偏高。

2.2 有机物分解效率对比

取反应器稳定运行时段的样品进行有机物去除率对比。从图 2 中可以看出,推流式反应器的 TS 去除率(55.5% ± 1.9%)显著高于全混反应器的 TS 去除率(42.9% ± 3.5%)(*p* < 0.05),提高了 29.4%。在启动期,反应器出料的 TS 质量分数呈增加趋势,推流反应器从 4.4% 逐渐增加到 7.6% 最后稳定在 7.6% ± 0.3%,全混式反应器从 8.7% 逐渐增加到 9.8%,最后稳定在 9.8% ± 0.6%。两反应

器出料的起始 TS 质量分数存在差异的原因是:第一次出料测定是在反应器运行第 25 天,此时推流反应器的进料还未完全到达反应器后端,即出料口所在位置,因此出料浓度较全混式反应器更低。在对进料为餐厨的推流式反应器进行研究时发现,出料中 TS 质量分数也呈现增加趋势,在第 1 个 HRT 运行后,依然表现出增加趋势^[8],与本试验研究结果一致。推流反应器的 VS 去除率(65.1% ± 2.3%)同样显著高于全混式反应器的 VS 去除率(51.2% ± 4.0%)(*p* < 0.05),提高了 27.1%。猪粪经推流反应器处理后,其 VS/TS 从 83.5% 降低为 65.4%,而全混式反应器出料的 VS/TS 为 71.9%,说明推流比全混产气高是源于 VS 降解更彻底。

TCOD 的去除率反映了底物转化为甲烷的程度,结合 TCOD 平衡分析,可以更清楚地看到有机底物转化为中间产物和甲烷的比例。由图 2 可以看出,采用推流反应器的工艺中 TCOD 去除率为 65.7%,全混反应器的 TCOD 去除率为 50.5%。对反应器进行 COD 平衡分析(图 3),进料猪粪固体中的颗粒态化学需氧量(PCOD)占 TCOD 的 87.8%,SCOD 占 TCOD 的 12.2%,推流和全混工艺出料中 SCOD 仅占 3.1% 和 4.2%。由此可见,进料猪粪中一部分溶解态的有机物被分解产生甲烷,PCOD 被降解后,只有很少一部分作为溶解态存在于发酵液中。

进一步分析 COD 与 VS 的比值,进料中的 COD/VS 为 1.33,推流和全混出料中的 COD/VS 均降低为 1.31,数据比较接近。说明厌氧菌群对猪粪中的有机物进行了无差别分解。理论上,蛋白质、碳

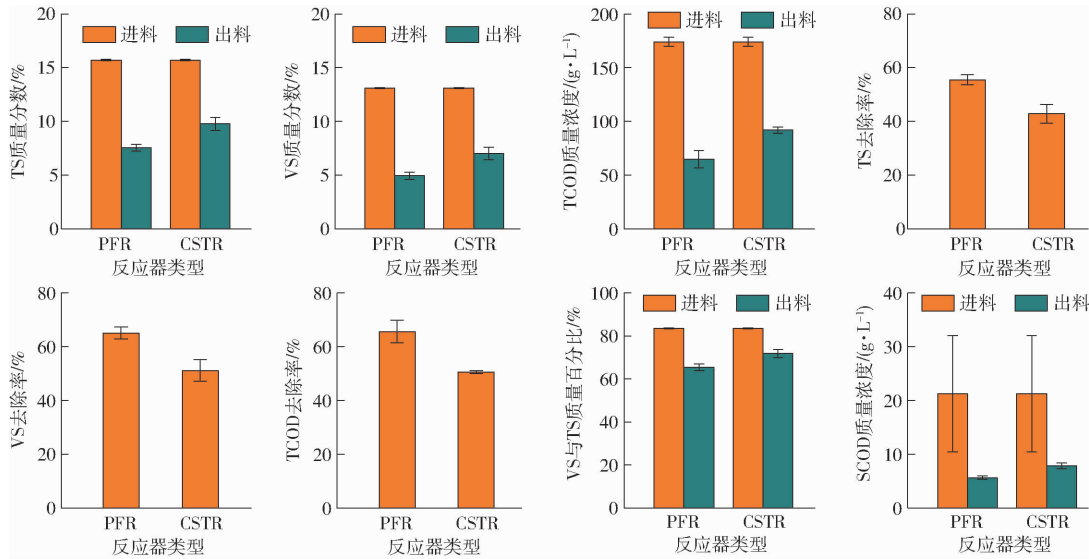


图 2 PFR 和 CSTR 有机物去除率

Fig. 2 Organic matter removal rates in PFR and CSTR

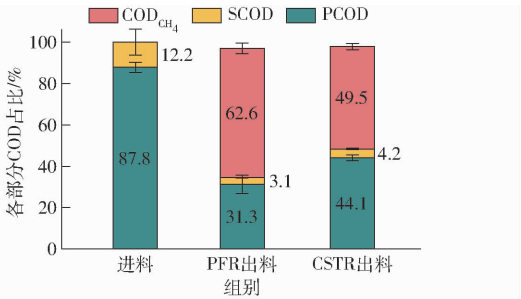


图 3 PFR 和 CSTR 的 COD 平衡分析

Fig. 3 COD material balance analysis of PFR and CSTR

水化合物每单位 VS 的理论 COD 分别为 1.42 和 1.19^[26]。

2.3 反应器运行稳定性对比

图 4 展示了推流和全混反应器长期运行过程中 TVFA 质量浓度变化规律。在反应运行稳定期,推流反应器出料的 TVFA 质量浓度在 100 mg/L 以下,

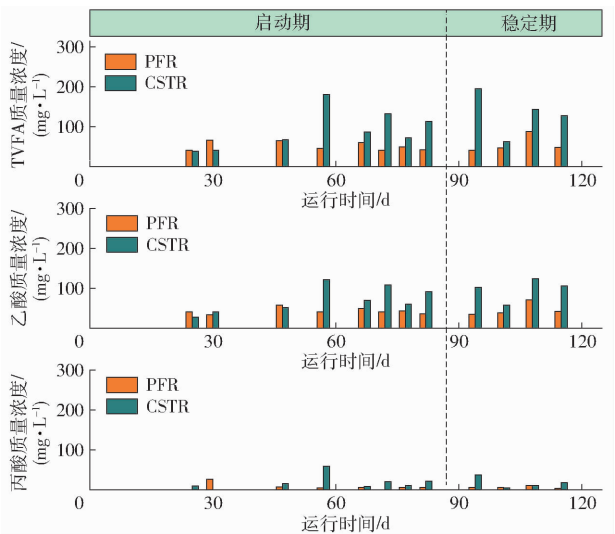


图 4 PFR 和 CSTR 出料酸稳定性

Fig. 4 Acid stability of PFR and CSTR

全混式反应器出料的 TVFA 质量浓度在 200 mg/L 以下,均未出现酸抑制现象。在稳定期,推流反应器出料 TVFA 为 55 mg/L。TVFA 中以乙酸为主,乙酸占比为 84.2%。全混反应器在稳定期出料 TVFA 为 (144 ± 54) mg/L。全混反应器出料的 TVFA 中乙酸占比在稳定期为 88.8%,而丙酸占比在启动期和稳定期分别为 17.3% 和 11.6%。这与其他研究中高浓度猪粪启动期丙酸占比相对较高的趋势一致^[27]。丙酸在转化为甲烷的过程中比乙酸转化为甲烷会释放更多 CO₂^[28],这可能是全混反应器启动期甲烷含量比稳定期甲烷含量低的原因之一。

图 5 显示了推流和全混厌氧消化沼液的碱度及

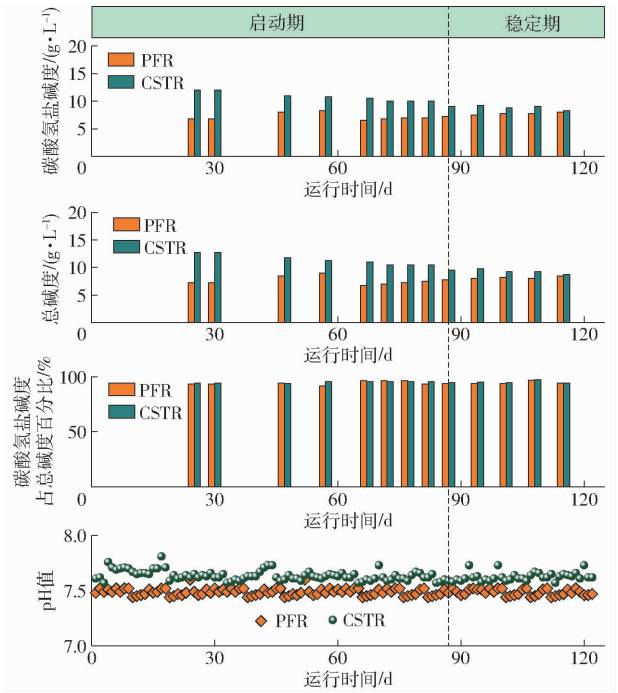


图 5 PFR 和 CSTR 出料碱稳定性

Fig. 5 Alkali stability of PFR and CSTR

pH 值。反应器运行期间,推流式反应器的 pH 值维持在 7.5 ± 0.1 ,全混式反应器维持在 7.6 ± 0.1 。推流式反应器出料的碳酸氢盐碱度始终在 $6\,500\text{ mg/L}$ 以上,碳酸氢盐碱度约占总碱度的 94.0% ,全混式反应器出料的总碱度和碳酸氢盐碱度始终在 $8\,000\text{ mg/L}$ 以上,约占总碱度的 95.0% 。说明两个系统的碳酸氢盐碱度较为充足^[29-30],系统稳定性强。

2.4 反应器产气动力学特征

在反应器运行稳定期,分析了一个进料周期(24 h)的产气动力学特征。如图 6 所示,推流和全混式反应器最终累积产沼气率(每克 VS 产沼气率)为 488 mL/g 和 412 mL/g ,累积产甲烷率分别为 291 mL/g 和 241 mL/g 。产气曲线符合 Gompertz 模型($R^2 > 0.99$)。取进料猪粪进行产气潜能试验,得到进料猪粪的产甲烷潜能为 326 mL/g ,推流和全混式反应器的产甲烷率分别占产甲烷潜能的 89.3%

和 73.9% 。说明在进料猪粪 TS 质量分数 15.6% 条件下,推流反应器的产气性能更好。研究表明,当进料 TS 质量分数越来越高时,甲烷产率占原料产甲烷潜能的比例越来越低^[18]。猪粪进料 TS 质量分数为 1.5% 时,全混式反应器的产甲烷率可达到进料产甲烷潜能的 90.8% ^[31],当猪粪进料 TS 质量分数达到 10.0% 和 14.0% 时,全混式反应器的产甲烷率可达到进料产甲烷潜能的 84.8% 和 74.6% ^[18]。说明本试验中全混式反应器的产甲烷率在正常水平,推流反应器和全混式反应器的比较有意义。基于一级动力学模型计算得到的产气速率常数见表 4,取反应速率常数(k)为 0.090 h^{-1} ,HRT 为 50 d 的情况下,通过公式(11)、(12)可以计算得出,推流式反应器的可降解物料去除率比全混式高 17.1 个百分点,而实际测定结果表明推流式反应器的 VS 去除率 65.1% 比全混式反应器的 VS 去除率 51.2% 高了 13.9 个百分点,与理论计算结果相近。

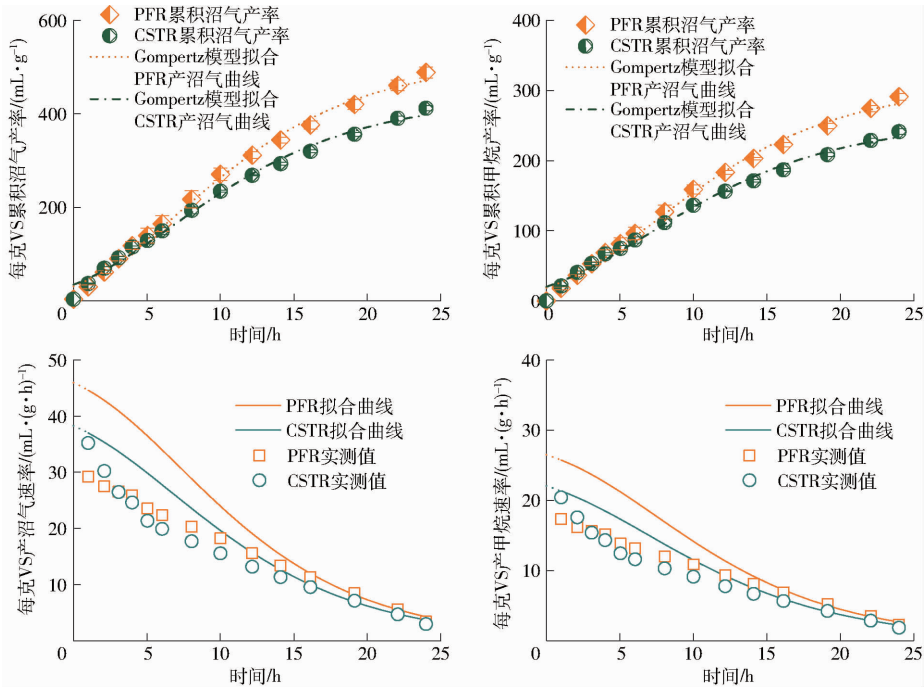


图 6 PFR 和 CSTR 产气动力学特征

Fig. 6 Dynamic characteristics of gas production in PFR and CSTR

在一个进料周期(24 h)内,推流和全混的产气在 20 h 内均达到总产气的 85.0% 以上,在第 22 小时均达到 94.0% 以上。累积产气曲线表明,在 12 h 内,产气曲线接近直线,说明 24 h 的间隔时间里,系统内底物量足够微生物利用^[32]。此外,产气速率结果表明,在前 2 h 内,全混式反应器的产气率高于推流式反应器,而 2 h 后,推流式产气率反超全混式产气率,这与不同反应器中物料降解特征有关。在全混反应器中,通过强力搅拌物料与反应器内各种微生物充分接触,实现产气的快速

启动。而物料进入推流式反应器后,水解酸化过程率先启动,随着物料被推动到后端,水解酸化产物才被甲烷菌大量利用并产气,因此出现产气滞后现象。而用模型拟合速率曲线时并未出现推流产气率先低于全混后反超的现象,这是因为模型拟合速率曲线依赖于速率常数 k ,而猪粪产气常常出现多阶段特性^[33],实际初始 2 h 内的推流和全混的沼气产气速率常数分别为 0.060 h^{-1} 和 0.083 h^{-1} ,低于平均产气速率常数,因此拟合曲线与实测值存在误差。

表 4 推流和全混式反应器产气速率常数
Tab.4 Gas production rate constants of PFR and

反应器型式	CSTR	
	沼气产气速率常数	甲烷产气速率常数
推流式	0.095	0.091
全混式	0.095	0.093

3 结束语

本文对比了高固体猪粪在推流式反应器和全混式反应器中的厌氧发酵性能。结果表明,推流式反应器的甲烷产率和容积产气率均显著优于全

混式反应器,这与推流式在动力学上有更高的物料分解效率是吻合的。推流式反应器对有机物的降解更彻底,挥发性有机物和化学需氧量去除率均高于全混式反应器。两种反应器均能实现稳定运行。由于物料浓度较高,本文的推流式工艺和全混式工艺都选用了较长的停留时间,从工程应用的角度如能进一步缩短水力停留时间可进一步提高经济性。从理论上,推流式反应器仅需要搅动反应器内的部分液体,搅拌能耗更低,优化搅拌策略进一步降低能耗,对于提高工程经济性,仍具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 马晨辉,徐亚,郑景华,等.我国畜禽粪污的时空分布特征及趋势分析[J].环境科学研究,2026,39(2):437-448.
Ma Chenhui, Xu Ya, Zheng Jinghua, et al. Analysis of spatiotemporal distribution and trends of livestock and poultry manure in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2026, 39(2): 437-448. (in Chinese)

[2] 黄峰,史金才,冯文谦,等.猪场清粪工艺模式的综合比较分析[J].农业环境科学学报,2021,40(11):2330-2334.
Huang Feng, Shi Jincui, Feng Wenqian, et al. Comparative analysis of manure cleaning techniques in pig farms[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(11): 2330-2334. (in Chinese)

[3] 郭春春,郭亭,王亮才,等.不同微藻培养处理下餐厨垃圾沼液氨吹脱剩余液净化效果研究[J].农业机械学报,2024,55(增刊2):330-339.
Guo Chunchun, Guo Ting, Wang Liangcai, et al. Purification effects of ammonia stripping residual liquid from anaerobic digestion food effluent by two microalgae cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S2): 330-339. (in Chinese)

[4] 杨爱峥,陈佳旺,王秋菊,等.生物炭与沼液配施对黑土土壤养分和大豆生长的影响[J].农业机械学报,2026,57(12):332-342.
Yang Aizheng, Chen Jiawang, Wang Qiuju, et al. Impact of combined application of biochar and digestate on black soil nutrients and soybean growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(12): 332-342. (in Chinese)

[5] 王悦超.高固体浓度猪粪的厌氧发酵特性研究[D].上海:复旦大学,2012.

[6] Guendouz J, Buffière 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.

[7] 韩芳,林聪.畜禽养殖场沼气工程厌氧消化技术优化分析[J].农业工程学报,2011,27(增刊1):41-47.
Han Fang, Lin Cong. Optimization analysis of anaerobic digestion technologies of biogas engineering in livestock and poultry farms[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(S1): 41-47. (in Chinese)

[8] Perman E, Karlsson A, Westerholm M, et al. High-solid digestion—a comparison of completely stirred and plug-flow reactor systems[J]. Waste Management, 2024, 189: 265-275.

[9] 董经玲.三种生物反应器系统中餐厨垃圾厌氧消化性能及微生物群落的比较研究[D].重庆:重庆大学,2021.
Dong Jingling. A comparative study of three bioreactor systems for food waste on anaerobic digestion performance and microbial community[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)

[10] 李荣平,李秀金,Chen S.用于牛粪液厌氧消化的推流式和完全混合式反应器性能研究[J].农业工程学报,2007,23(9):186-190.
Li Rongping, Li Xuejin, Chen S. Performance evaluation of anaerobic digestion of dairy manure in plug flow reactor and continuous stirred tank reactor[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 186-190. (in Chinese)

[11] 熊林鹏.鸡粪长期高温甲烷发酵稳定性的研究[D].北京:中国农业大学,2019.
Xiong Linpeng. The impact of long-term operation on thermophilic methane fermentation stability of chicken manure[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[12] 李宏业.高浓度猪粪推流厌氧分解与菌群结构特征[D].北京:中国农业大学,2026.
Li Hongye. Characterization of high-solids pig manure anaerobic digestion in a plug-flow reactor[D]. Beijing: China Agricultural University, 2026. (in Chinese)

[13] 宋亚朋.沼液氨吹脱下鸡粪高浓度厌氧消化物料分解转化机制解析[D].北京:中国农业大学,2024.
Song Yapeng. Analysis of material decomposition and transformation mechanisms in high-concentration anaerobic digestion of chicken manure via biogas ammonia stripping[D]. Beijing: China Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[14] 代曦.不同负荷提升方式诱导超负荷对猪粪厌氧消化稳定性及其微生物群落结构影响研究[D].南充:西华师范大学,2023.
Dai Xi. Effects of overload induced by different load lifting methods on the stability of anaerobic digestion of pig manure and its

- microbial community structure[D]. Nanchong: China West Normal University, 2023. (in Chinese)
- [15] 李洋. 高浓度猪粪厌氧消化物料分解特性与搅拌能耗分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2025.
Li Yang. Characterization of the decomposition of high solid pig manure and mixing energy consumption in anaerobic digestion [D]. Beijing: China Agricultural University, 2025. (in Chinese)
- [16] Song X, Zhang K, Han B, et al. Anaerobic co-digestion of pig manure with dried maize straw[J]. *BioResources*, 2016, 11(4): 8914–8928.
- [17] 李洋, 张卓毅, 乔玮. 高浓度猪粪全混式连续厌氧发酵有机物分解特性[J]. *新能源进展*, 2025, 13(5): 527–534.
Li Yang, Zhang Zhuoyi, Qiao Wei. Characterization of organic matter decomposition in continuous anaerobic digestion of high-solid pig manure[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2025, 13(5): 527–534. (in Chinese)
- [18] 王明, 赵胜雪, 李旭荣, 等. 猪粪中温半干法连续厌氧发酵产气性能[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 204–209.
Wang Ming, Zhao Shengxue, Li Xurong, et al. Biogas production performance of swine manure by mesophilic semi-dry continuous anaerobic digestion[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(1): 204–209. (in Chinese)
- [19] 林敏, 乔玮, 张家豪, 等. 猪粪中温单级与高温-中温两级厌氧消化效率比较分析[J]. *新能源进展*, 2023, 11(3): 239–246.
Lin Min, Qiao Wei, Zhang Jiahao, et al. Comparison of anaerobic digestion efficiency between mesophilic single-stage and thermophilic–mesophilic two-stage anaerobic digestion of pig manure[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2023, 11(3): 239–246. (in Chinese)
- [20] 勒系意, 黄运红, 任雨涵, 等. 梯度有机负荷下农业废弃物厌氧发酵特性及微生物群落[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 239–247.
Le Xiyi, Huang Yunhong, Ren Yuhan, et al. Anaerobic digestion characteristics and microbial structure of agricultural wastes under gradient organic loadings[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(17): 239–247. (in Chinese)
- [21] 田世杰, 刘文昊, 郭建斌, 等. 猪场干清粪两相厌氧消化工艺研究[C]//2011 国际沼气技术与环境工程学术研讨会暨产业化论坛会议论文集, 2011: 91–97.
- [22] Sadeghi M H, Naderi A, Hashemi-Owlya A, et al. Kinetic similarity as a scaling strategy for batch adsorption reactors to ensure efficient decolorization of sugar syrup on a larger scale[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 38350.
- [23] 郑平, 冯孝善. 废物生物处理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [24] 林敏. 两级厌氧消化处理高固体猪粪的分解效率与能量回收解析[D]. 北京: 中国农业大学, 2024.
Lin Min. Illustrating the decomposition efficiency and energy recovery of high-solid pig manure treated by two-stage anaerobic digestion[D]. Beijing: China Agricultural University, 2024. (in Chinese)
- [25] 刘文其. 猪粪产甲烷性能影响机制及评估模型研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
Liu Wenqi. Study on the influence mechanism and evaluation model of methane production performance of pig manure[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023. (in Chinese)
- [26] Klimiuk E, Gusiati Z M, Bułkowska K, et al. ADM1-based modeling of anaerobic codigestion of maize silage and cattle manure—a feedstock characterisation for model implementation (part I) [J]. *Archives of Environmental Protection*, 2015, 41(3): 11–19.
- [27] Sun H, Ni P, Angelidaki I, et al. Exploring stability indicators for efficient monitoring of anaerobic digestion of pig manure under perturbations[J]. *Waste Management*, 2019, 91: 139–146.
- [28] Puengrang P, Suraraksa B, Prommeenat P, et al. Diverse microbial community profiles of propionate-degrading cultures derived from different sludge sources of anaerobic wastewater treatment plants[J]. *Microorganisms*, 2020, 8(2): 277.
- [29] Martín-González L, Font X, Vicent T. Alkalinity ratios to identify process imbalances in anaerobic digesters treating source-sorted organic fraction of municipal wastes[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2013, 76: 1–5.
- [30] Yin Fubin, Li Zifu, Ma Huanhuan, et al. Experimental study on rheological characteristics of high solid content sludge and its mesophilic anaerobic digestion[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, 5(4): 043117.
- [31] Da Silva J F F, Túpparo D C, Steinmetz R L R, et al. Anaerobic co-digestion of swine manure and enzymatically hydrolyzed carcasses at two different biodigesters[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2025, 15(11): 16573–16589.
- [32] Humphrey I, Adedokun M, Mordi O. Comparative evaluation of biogas production from yeast-treated agro-wastes using linear regression and non-linear (Gompertz) models[J]. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 2026, 12(4): 134–148.
- [33] 乔玮, 姜萌萌, 赵婧, 等. 中温和高温环境下乙酸和丙酸厌氧发酵产甲烷动力学特征[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 234–238.
Qiao Wei, Jiang Mengmeng, Zhao Jing, et al. Methanogenesis kinetics of anaerobic digestion of acetate and propionate at mesophilic and thermophilic conditions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(21): 234–238. (in Chinese)