

Bench Scale Study of Methane Production from Food Waste in Combined Two-Stage Process

Xing Wang*, Xiaolan Liu

Beijing Capital Environment Company, Beijing
Email: Wangxing24@126.com

Received: Jul. 26th, 2017; accepted: Aug. 9th, 2017; published: Aug. 17th, 2017

Abstract

To investigate the fermentation features of food waste at different loading rates, a lab scale fermentation process for the anaerobic treatment of food waste was carried out with a two phase bioreactor. The experiment set up four step-wisely increased loading rates, the effects of volatile fatty acid, ammonia nitrogen, retention time and loading rates on fermentation process were studied. At the organic loading rate of 22.65 kg VS/m³·d in hydrolysis reactor and 6.25 kg VS/m³·d in methane reactor, specific methane yield of 0.551 m³/kg VS is achieved. The research shows that the specific methane yields declined when organic loading rates increased from 2.97 to 8.15 kg TS/m³·d, but the volume biogas production rate increased from 1.61 to 3.91 m³/m³·d. With regarding to commercial food waste anaerobic digestion project, higher volume biogas production rate means more biogas production and more economic profits.

Keywords

Food Waste, Two-Stage Anaerobic Digestion, Bench-Scale Experiment

餐厨垃圾两相厌氧消化小试工艺研究

王星*, 刘晓兰

北京首创环境投资有限公司, 北京
Email: Wangxing24@126.com

收稿日期: 2017年7月26日; 录用日期: 2017年8月9日; 发布日期: 2017年8月17日

*通讯作者。

摘要

本文以餐厨垃圾为原料, 利用两相厌氧消化装置开展了厌氧消化工艺的实验研究。实验建立了四个进料浓度梯度, 通过逐步提高进料料浆的浓度, 研究了在不同进料负荷率情况下, 厌氧消化系统的变化趋势, 分析了进料负荷率与挥发性脂肪酸、氨氮浓度的变化关系。实验发现, 当酸化相有机负荷率为 $22.65 \text{ kg VS/m}^3\cdot\text{d}$, 甲烷相有机负荷率为 $6.25 \text{ kg VS/m}^3\cdot\text{d}$ 时, 单位产气率最佳, 可到 $0.551 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ 。实验发现, 当有机负荷率从 2.97 上升至 $8.15 \text{ kg TS/m}^3\cdot\text{d}$ 时, 虽然单位产气率出现下降, 但是厌氧系统的容积产甲烷率从 1.61 上升到 $3.91 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 。这对于商业运行的餐厨垃圾厌氧消化工程而言, 容积产气率的上升, 提高了每日进场餐厨垃圾的总量, 增加了每日的沼气绝对产量, 提升了沼气发电量或者提纯后天然气的总量, 对项目的经济性有明显的改善。

关键词

餐厨垃圾, 两相厌氧消化, 小试研究

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2017年3月30日, 《生活垃圾分类制度实施方案》正式出台。随着该方案的推进和实施, 餐厨垃圾、厨余垃圾等易腐垃圾的厌氧消化处理成为环保行业的热点之一。餐厨垃圾厌氧消化技术利用了厌氧微生物的高有机负荷承受能力, 实现了沼气这种可再生能源的回收利用。目前餐厨垃圾厌氧消化技术主要以两段法厌氧消化工艺与整体一段法为主。两段法把消化过程中的水解酸化阶段和甲烷发酵阶段分离开来, 而一段法则整合了这两个阶段。由于餐厨垃圾极易酸化的特点, 目前国内有不少商业运行的餐厨垃圾厌氧消化项目使用了两相厌氧工艺。

本文利用小试规模的卧式水解酸化罐、立式完全混合式甲烷反应器为实验装置, 开展了餐厨垃圾两相厌氧消化工艺研究。在水解酸化阶段, 利用餐厨垃圾自身富含的大量微生物为菌种, 完成水解酸化阶段。水解酸化液随后进入立式完全混合型反应器进行甲烷化过程。为了充分掌握餐厨垃圾两相厌氧消化的工艺特点, 本文通过建立调整进料负荷、停留时间, 掌握了在小试条件下, 餐厨垃圾水解酸化和甲烷发酵阶段的运行情况, 为餐厨垃圾厌氧消化工程的设计工作提供了依据。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

2.1.1. 餐厨垃圾与接种物

实验所用餐厨垃圾由某区环卫局负责收集, 随后进行筛分、粉碎淬浆处理。首先利用振动筛对餐厨垃圾进行筛分, 振动筛上下振幅 $1\sim 2 \text{ cm}$ 、震动频率为 $800\sim 1000$ 次/分钟, 筛孔直径为 $2\sim 3 \text{ cm}$; 对筛分除杂后的餐厨垃圾进行粉碎、淬浆。淬浆后的餐厨垃圾粒径约为 $1\sim 3 \text{ mm}$ 。甲烷发酵接种物取自江苏某酒精厂, 该厂利用木薯为酒精发酵原料, 利用UASB塔厌氧污泥为甲烷发酵罐的接种物。餐厨垃圾和接种物的理化性质见表1。

Table 1. Characteristics of food waste and inoculum**表 1.** 餐厨垃圾和接种污泥理化性质

参数	餐厨垃圾	接种污泥
TS (%)	17.60 ± 0.35	5.78 ± 0.42
VS/TS (%)	85.91 ± 1.27	63.66 ± 1.68
pH	4.68 ± 0.14	7.04 ± 0.27
总氮(%)	2.34 ± 0.08	0.42 ± 0.15
TCOD (g O ₂ /kg)	211.79 ± 11.13	93.114 ± 4.36

2.2. 两相厌氧消化产氢产甲烷系统

小试研究采用两相厌氧消化的模式运行,该系统由卧式水解酸化罐(总容积 0.45 m³、有效容积 0.2 m³)和完全混合立式甲烷反应器(总容积 1.5 m³、有效容积 1 m³)组成。该系统设置了两个缓冲罐用以短时间储存淬浆后的餐厨垃圾及水解酸化罐体的出料。进料时,先将餐厨垃圾投入缓冲罐,随后用蠕动泵将餐厨垃圾泵入水解酸化罐进行氢气发酵,水解酸化罐体的出料经螺杆泥浆泵抽入第二个缓冲罐,随后由泥浆泵泵入甲烷发酵罐进行后续的甲烷发酵。为了保持实验现场的安全工作环境,实验过程产生的氢气、甲烷未经燃烧供给罐体热量。卧式水解酸化罐和立式甲烷反应器的罐体表层设置了 5 cm 厚水浴层用以维持反应器的恒温。水浴层的温度控制在 40°C ± 2°C,采用循环供热。水浴层与水浴锅相连,水浴锅内采用蒸汽加热循环水,利用温控装置控制恒温。水解酸化罐的转动由 Siemens Micromaster Vector 42 变频器控制,转速为 6 rpm,采用间歇方式运行,间歇工作频率运行 3 min,停止 5 min。甲烷罐体的顶端中部设置了电动机,电动机与搅拌叶相连。甲烷反应器的搅拌速度为 120 rpm,采用间歇方式运行。工作频率为运行 3 min,停止 5 min。除上述设备外,系统还配备了沼气气柜、湿式气体流量计、压力表、热电偶。

2.3. 测试方法

消化液中代谢产物分析指标包括:含水率(w, %)、总固体(TS, %)、挥发性固体(VS, %TS)、灰分(%TS)、pH、氨氮(NH₄⁺-N, mg/L)、COD (mg/L)、挥发性脂肪酸(VFA)等[1]。

固形物采用烘干重量法测定。挥发性固体物利用马弗炉测定,将测定固形物后的恒重样品置于马弗炉内,温度 550°C,灼烧 30 min。

pH 值采用 ZDJ-5 型自动电位滴定仪测定;氨氮采用海能 K9860 型全自动凯式定氮仪测试;COD 采用哈希 DRB200 自动消解仪消解,消解液由哈希 DR1010 光度计测定。沼气中甲烷浓度由德国 Sensors 甲烷分析模块(型号 AGM1010)测定。

VFA 由 GC-2000III 气相色谱测定,采用安捷伦 FFAP 毛细管柱(30 m × 0.53 mm × 1.0 μm),其中进样口和检测器(FID)的温度分别为 200°C 和 220°C,氮气作为载气,流速为 2 mL/min,炉温升温程序为:110°C 保持 5 min,然后开始升温,升温速率为 10°C/min,到 220°C 后保持 2 min;需要测定的 VFAs 产物主要包括乙酸、丙酸、异丁酸、丁酸、异戊酸和戊酸(图 1)。

2.4. 两相厌氧消化小试实验设计

2.4.1. 反应器的调试和初步工艺研究

两相厌氧消化小试研究设置 4 个有机负荷率,通过逐步提升进料量的方式进行实验,每个有机负荷率约持续运行 30 天。实验开始前首先进行水解酸化罐的启动。首先,将 200 kg 餐厨垃圾投入水解酸化

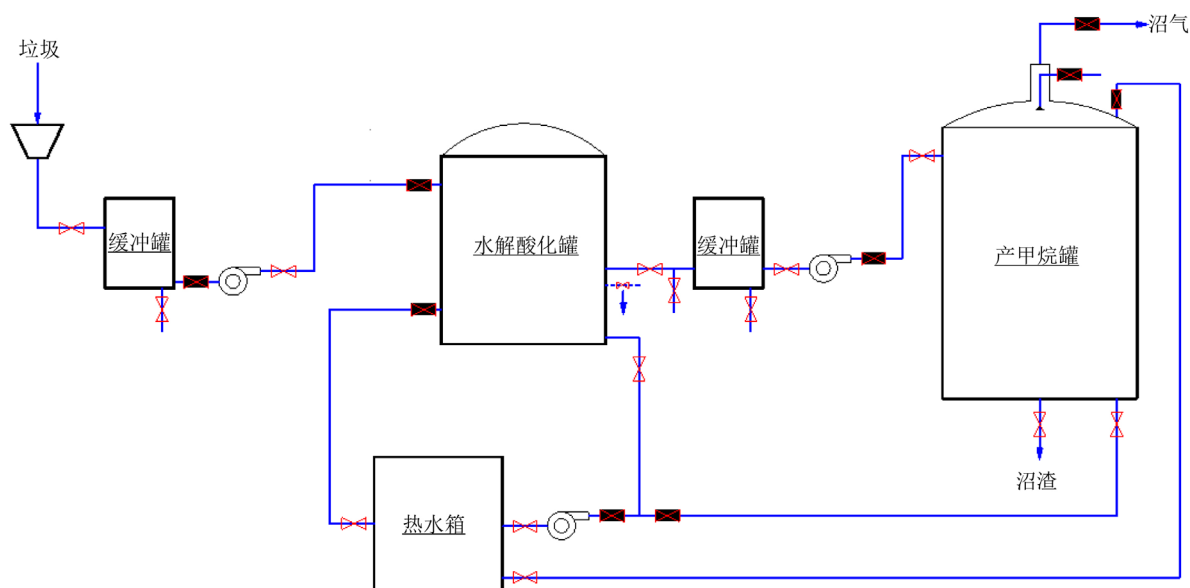


Figure 1. Schematic diagram of integrated two-stage fermentation process

图 1. 两相厌氧消化工艺流程图

罐内, 利用餐厨垃圾自身所富含的微生物为水解酸化菌种, 进行水解酸化反应。实验开始时, 每日向水解酸化罐内投加 20 kg 餐厨垃圾, 次日(24 h 后)将酸化罐内底物排出 20 kg, 投入到已接种的甲烷发酵罐内进行厌氧消化处理。随后逐步将水解酸化罐进料量由 20 kg/d 递增至 50 kg/d, 甲烷发酵罐的给料量也相应从 20 kg/d 增加到 50 kg/d (表 2)。

3. 结果与分析

3.1. 两相厌氧消化工艺的产气情况

餐厨垃圾两相厌氧消化小试运行总计约 150 天, 包括设备调试、设备启动和实验运行。图 2 表示了水解酸化相和甲烷相运行情况。

设备启动后约 34 天, 厌氧消化系统达到了产气稳定阶段。在产气稳定阶段, 水解酸化罐内产生了大量的生物气, 经过计量该生物气产量为 0.167~0.236 m³/kg VS, 其中 CO₂ 46.68%~51.47%、H₂ 28.03%~33.02%。由于水解酸化罐内较低 pH 的抑制(pH 3.0~4.0), 生物气中未检出甲烷存在。

在甲烷发酵罐内, 生物气产量达到 0.760~0.874 m³/kg VS, 甲烷浓度 58.32%~71.48%, 二氧化碳 26.34%~40.73%。氢气是碳水化合物在水解酸化过程中的一种产物[2]。本实验中, 值得注意的是, 甲烷发酵罐产生的氢气浓度始终保持在极低的水平。当甲烷反应器的 OLR 处于最高值 8.15 kg VS/m³·d (RT 16 d)时, 进料量为 50 kg/d, 大量的水解酸化菌随物料进入甲烷发酵罐, 此时沼气中氢气的浓度仍低于 0.2%。这一现象说明, 在实验选取的工艺条件下, 小试设备实现了水解酸化、产甲烷阶段的良好相分离, 水解酸化后的物料在甲烷发酵罐被甲烷菌高效利用, 转化为甲烷。

甲烷反应器采用了水解酸化罐的出料作为厌氧消化的底物。实验发现, 有机负荷率的提升对产甲烷过程造成了一定的影响, 导致单位产气率出现小幅下降。根据表 3 显示的甲烷产量分析, 当甲烷发酵罐处于 2.94、4.61、6.28 kg VS/m³·d 这三个较低的有机负荷率时, 甲烷产量分别达到了 0.546、0.551、0.525 m³/kg VS。统计学分析显示, 这三者之间的差异不显著(ANOVA, $P > 0.05$)。这一结论说明有机负荷率在 2.94~6.28 kg VS/m³·d 时, 甲烷发酵过程未受到显著抑制。然而当有机负荷率从 6.28 增加到 8.15 kg VS/m³·d

Table 2. Organic loading rate
表 2. 进料负荷表

有机负荷率	进料量(kg/d)	酸化相 OLR (kg VS/m ³ ·d)	酸化相 RT (h)	甲烷相 OLR (kg VS/m ³ ·d)	甲烷相 RT (d)
OLR1	20	15.10	240	2.94	40
OLR2	30	22.65	160	4.61	26.67
OLR3	40	30.20	120	6.28	20
OLR4	50	37.75	96	8.15	16

OLR: 有机负荷率; RT: 停留时间。

Table 3. Methane production at different operation parameters
表 3. 不同工艺参数下甲烷产气率的变化

有机负荷率(kg TS/m ³ ·d)	给料负荷(g/d)	单位产气率(m ³ /kg TS)	容积产气率(m ³ /m ³ ·d)
2.97	20	0.546	1.61
4.61	30	0.551	2.54
6.28	40	0.525	3.30
8.15	50	0.480	3.91

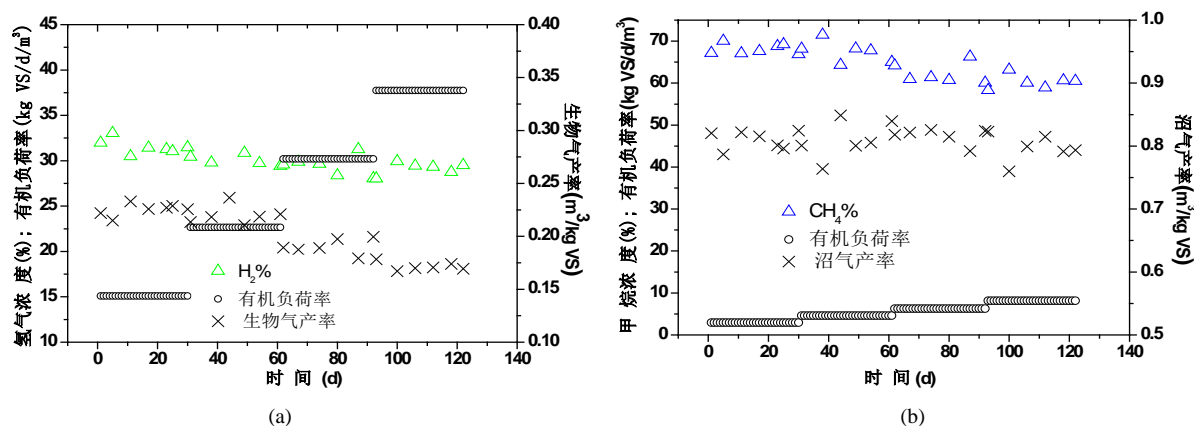


Figure 2. Biogas production in hydrolysis reactor (a) and methane fermentation reactor (b)
图 2. 水解酸化产氢和甲烷化过程的生物气/沼气产量和有机负荷率(OLR)

时, 甲烷产量从 0.525 显著降低至 0.480 m³/kg VS (ANOVA, $P < 0.05$), 降幅达到 8.57%。

表 3 显示了有机负荷率对甲烷产率的影响。从容积产气率来看, 提高有机负荷率有助于提高系统的产气率。有机负荷率从 2.97 上升至 8.15 kg TS/m³·d 时, 虽然单位产气率出现下降, 但是厌氧系统的容积产甲烷率从 1.61 上升到 3.91 m³/m³·d。这对于商业运行的餐厨垃圾厌氧消化工程而言, 容积产气率的上升, 提高了每日进场餐厨垃圾的总量, 增加了每日的沼气绝对产量, 提升了沼气发电量或者提纯后天然气的总量, 对项目的经济性有明显的改善(表 4)。

3.2. 厌氧消化过程中代谢产物的组成和含量变化

3.2.1. 有机负荷率对水解酸化过程 VFA 含量变化的影响

厌氧消化过程中代谢的产物的组成是评价消化过程稳定性的重要参数。图 3 显示了水解酸化罐、甲

Table 4. Operation parameters and profiles of metabolites in hydrolysis reactor and methane fermentation reactor
表 4. 工艺参数、产气率和代谢产物组成

水解酸化罐 (kg VS/ m ³ ·d)	给料 负荷 (kg/d)	甲烷产量 (m ³ /kg VS)	水解酸化罐出料代谢产物组成、浓度					
			乙醇(mg/L)	乙酸(mg/L)	丙酸(mg/L)	丁酸(mg/L)	乳酸(mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)
15.10	20	0	2320.55 ± 57.43	4355.41 ± 89.74	1241.13 ± 39.67	2641.08 ± 54.65	2345.62 ± 54.32	258.14 ± 24.62
22.65	30	0	2102.68 ± 64.39	4153.46 ± 93.45	1861.35 ± 47.49	2307.43 ± 74.01	3216.78 ± 34.53	350.87 ± 29.51
30.20	40	0	1748.62 ± 48.27	3623.16 ± 75.29	1743.84 ± 56.34	2411.23 ± 63.22	3645.38 ± 48.17	422.41 ± 31.95
37.75	50	0	1412.80 ± 72.63	3426.17 ± 64.76	1758.65 ± 48.65	2235.54 ± 74.83	4425.56 ± 51.68	427.52 ± 30.25

甲烷发酵 反应器 (kg VS/ m ³ ·d)	给料 负荷 (kg/d)	甲烷产量 (m ³ /kg VS)	甲烷发酵出料代谢产物组成、浓度					
			乙醇(mg/L)	乙酸(mg/L)	丙酸(mg/L)	丁酸(mg/L)	乳酸(mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)
2.94	20	0.546 ± 0.001a	N/A	322.66 ± 38.87	76.73 ± 21.16	45.32 ± 12.63	12.46 ± 2.54	881.65 ± 40.81
4.61	30	0.551 ± 0.014a	N/A	338.28 ± 65.43	87.14 ± 16.76	48.16 ± 16.44	8.24 ± 1.27	1417.82 ± 65.63
6.28	40	0.525 ± 0.003a	N/A	398.41 ± 54.32	105.21 ± 19.32	67.98 ± 15.98	11.38 ± 3.12	2134.68 ± 43.54
8.15	50	0.480 ± 0.021b	N/A	432.09 ± 65.76	112.80 ± 17.71	76.25 ± 17.43	9.78 ± 2.68	2625.45 ± 96.14

*表中甲烷产量数值后的不同字母表示在 0.05 置信水平下经 DUNCAN 多重比较分析差异达显著水平。

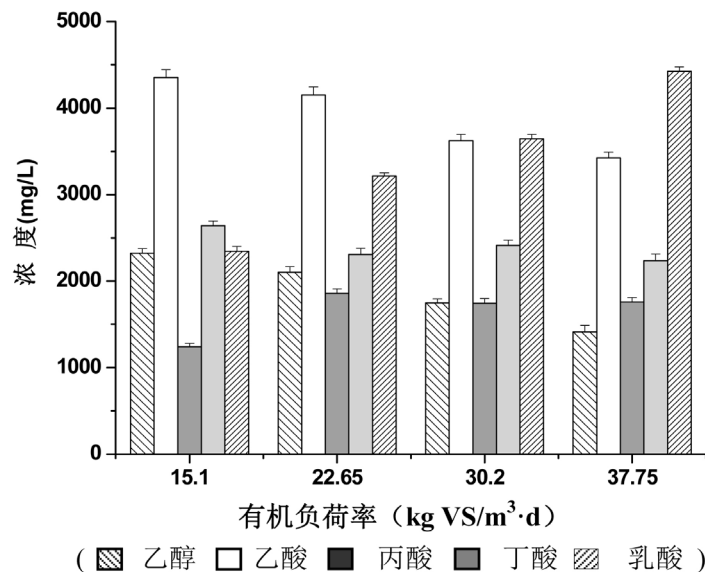
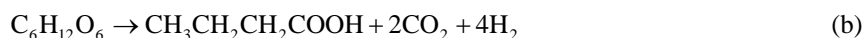
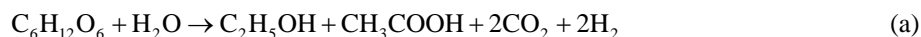


Figure 3. Metabolites in the effluent of hydrolysis reactor
图 3. 水解酸化产氢过程代谢产物组成特性

烷发酵罐内 VFA 的组成和浓度情况。在水解酸化罐内, 当有机负荷率为 15.10 kg VS/m³·d 时, 主要的代谢产物是乙醇、乙酸以及丁酸。三者的浓度之和(9317.04 mg/L)占 VFA (12,903.79 mg/L)的 72.20%, 表明在水解酸化产氢过程中产乙酸、产乙醇、产丁酸细菌成为此阶段厌氧消化过程中的优势微生物, 同时也说明在不接种外源微生物的情况下, 餐厨垃圾中的部分土著微生物可在厌氧消化系统中自行繁殖, 逐步成为优势菌群。根据水解酸化过程的代谢物组成情况分析, 厌氧反应体系内存在乙醇乙酸和丁酸这两种代谢途径((a)、(b)所示), 而在这两种代谢途径中, 出现了氢气这一副产物[3]。



当有机负荷率增加到 $37.75 \text{ kg VS/m}^3\cdot\text{d}$ 时, 乙醇、乙酸、丁酸的浓度总和降低至 7074.51 mg/L , 此时三者之和占 VFA 总和($13,258.72 \text{ mg/L}$)的 53.36% 。实验过程中发现, 当乙酸、乙醇、丁酸浓度下降时, 丙酸和乳酸的浓度出现明显上升的现象。据此可推断在水解酸化体系中发生了丙酸、乳酸发酵这两个分支反应(branch reaction)。

根据上述现象可知, 有机负荷率的增加可以改变水解酸化体系内微生物生理代谢途径, 从而造成反应体系内乳酸、丙酸、丁酸浓度的变化, 并伴随氢气浓度的变化。由于水解酸化过程伴随着氢气的产生, 因此如果在一段法中观察到较高浓度的氢气存在, 则说明水解酸化过程进行的速率超过了甲烷化的速率, 有可能随之产生 VFA 浓度上升、pH 下降的现象, 此时如果不控制有机负荷率, 则极有可能出现整个罐体酸化的现象。

3.2.2. 有机负荷率对甲烷发酵反应器内 VFA、VS 去除率的影响

随着有机负荷率的不断提高, 甲烷发酵过程中的 VFA 浓度也随之出现一定的变化, 其中乙酸的浓度变化最为显著。如图 4 所示当有机负荷率为 $2.94 \text{ kg VS/m}^3\cdot\text{d}$ 时, 乙酸浓度为 800 mg/L 左右, 随着有机负荷率的上升, 其浓度逐渐上升到 1200 mg/L , 表明高有机负荷率会对甲烷发酵造成一定的酸累积现象。然而, 此时的 VFA 总浓度低于 2000 mg/L , 产气过程未出现明显的影响。

表 5 显示了甲烷反应器内 VS 去除率的变化情况。经过水解酸化后的餐厨垃圾, 其 VS 浓度有了一定的下降。经过甲烷发酵后, 水解酸化后的餐厨垃圾 VS 浓度得到进一步的去除。纵观这四个不同有机负荷率阶段的 VS 去除率, 当有机负荷率上升时, 甲烷反应器表现出的 VS 去除率比较稳定, 基本上维持在 50% 的去除率水平。这也表明, 经过水解酸化后这一阶段, 促进了易生物降解物质的降解速率。

3.2.3. 有机负荷率对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的影响

众所周知, 甲烷发酵过程对环境因素有很严格的要求, 许多工艺参数对产甲烷过程有明显的影响, 如 pH、温度、VFA 浓度、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。VFA 浓度过高将会导致反应器的酸化, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度过高则会

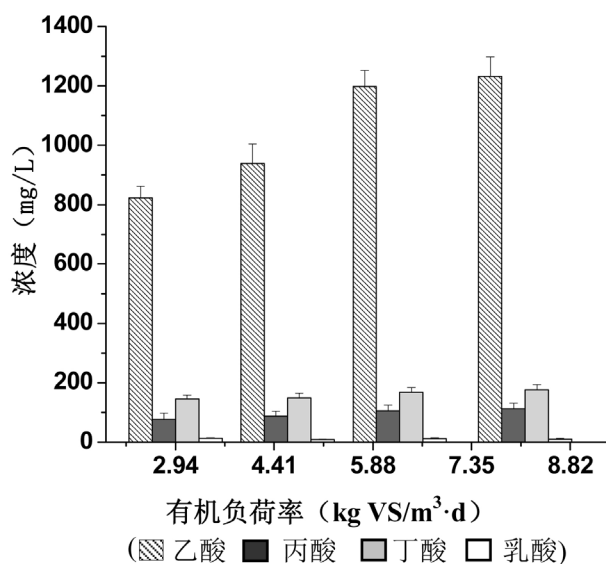


Figure 4. VFA in the effluent of methane fermentation reactor

图 4. 甲烷发酵过程中 VFA 浓度

导致甲烷菌活性的降低。小试实验中甲烷反应器内的 VFA 总浓度为 457.17~630.92 mg/L, pH 位于 6.7~7.3 之间。由于甲烷反应器内 VFA 浓度与 pH 均处理合适范围内, 可排除由这两个因素而造成沼气产量下降的可能性。因此, 由有机负荷率上升而导致沼气产量下降的原因可能 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度上升造成了一定的抑制作用。当有机负荷率从 2.94 kg VS/m³·d 上升至 8.15 kg VS/m³·d, 甲烷反应器内 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度从 0.551 g/L 急剧上升至 2.625 g/L (图 5), 此时产气率从 0.546 m³/kg VS 下降至 0.480 m³/kg VS, 通过统计学分析, 这一下降过程存在显著差异(ANOVA, $P < 0.05$)。高浓度的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 对厌氧微生物有明显的抑制作用, 其中甲烷菌对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的承受能力要明显低于其他微生物。

图 6 为水解酸化罐内 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的浓度变化情况。由于餐厨垃圾中含氮量较高, 因此 OLR 的提高对造成了 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度的上升。当 OLR 从 15.10 增加到 37.75 kgVS/m³·d 时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 从 0.25 g/L 上升到了 0.45 g/L 左右。

4. 结论

1) OLR 在 2.94 kg TS/m³·d、4.61 kg TS/m³·d、6.28 kg TS/m³·d、8.15 kg TS/m³·d 时, 甲烷产率分别 0.546、0.551、0.525 m³/kg TS、0.480 m³/kg TS。

2) 实验发现, 水解酸化过程伴随着氢气的产生。因此如果在一段法中观察到较高浓度的氢气存在,

Table 5. VS removal in methane fermentation reactor

表 5. 甲烷反应器 VS 去除率

给料负荷 (kg/d)	甲烷反有机负荷率应器(kgVS/m ³ ·d)	甲烷反应器进料 VS 浓度(%)	甲烷反应器出料 VS 浓度(%)	甲烷反应器 VS 去除率 (%)
20	2.94	11.77	5.98	50.82
30	4.61	12.29	6.14	49.94
40	6.28	12.56	6.45	51.39
50	8.15	13.03	6.57	50.42

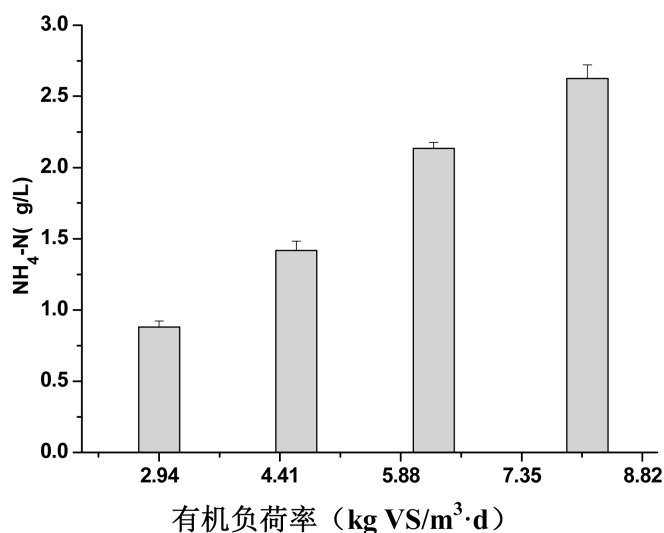


Figure 5. $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentration variation with OLR in the effluent of methane reactor

图 5. 甲烷发酵过程中氨氮浓度与有机负荷率

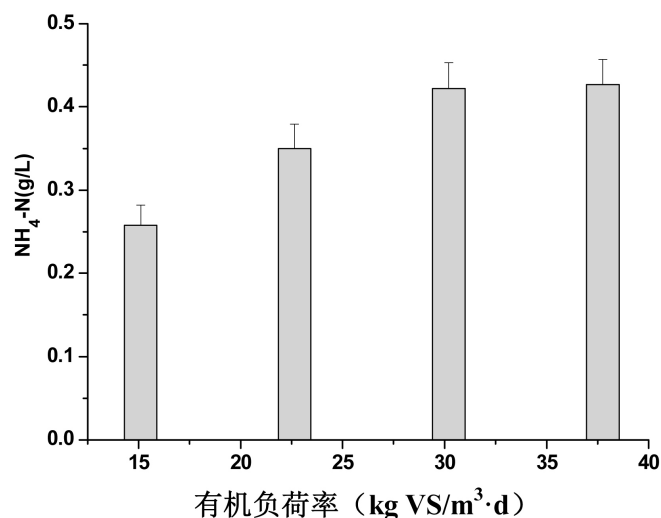


Figure 6. NH₄⁺-N concentration variation with OLR in the effluent of hydrolysis reactor

图 6. 水解酸化产氢过程中氨氮浓度与有机负荷率

则说明水解酸化过程进行的速率超过了甲烷化的速率,有可能随之产生 VFA 浓度上升、pH 下降的现象,此时如果不控制有机负荷率,则极有可能出现整个罐体酸化的现象。

3) 实验发现,当有机负荷率从 2.97 上升至 8.15 kg TS/m³·d 时,虽然单位产气率出现下降,但是厌氧系统的容积产甲烷率从 1.61 上升到 3.91 m³/m³·d。这对于商业运行的餐厨垃圾厌氧消化工程而言,容积产气率的上升,提高了每日进场餐厨垃圾的总量,增加了每日的沼气绝对产量,提升了沼气发电量或者提纯后天然气的总量,对项目的经济性有明显的改善。

参考文献 (References)

- [1] 国家环保局,《水和废水监测分析方法》编委会,编. 水和废水监测分析方法[M]. 第 3 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [2] 刘敏,任南琪,丁杰. 糖蜜、淀粉与乳品废水厌氧发酵法生物制氢[J]. 环境科学, 2004, 25(5): 65-69.
- [3] 曹先艳. 添加剂存在下餐厨垃圾厌氧发酵产氢条件优化研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2008.

Hans 汉斯

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网覆盖推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: se@hanspub.org