

牛粪厌氧发酵污泥回流试验*

夏吉庆 马添翼 毕经毅 郑国香 李文哲

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

【摘要】 为提高两阶段厌氧发酵系统的效率,对混合使用在线活性污泥与后储罐最佳活性时段污泥的污泥回流工艺进行了研究。综合回流试验以进料质量分数、日进料量和污泥回流比为影响因素,以 COD 去除率、产气量为评价指标,采用二次回归旋转试验设计,研究 COD 去除率和产气量在各参数影响下的变化规律。结果表明:进料质量分数、日进料量和污泥回流比是影响两个评价指标的主要因素,其中混合污泥回流量的影响显著;试验得出该厌氧发酵系统的最优工艺参数为进料质量分数 8.21%、日进料量 7.15 L/d、污泥回流比 30%。

关键词: 牛粪 厌氧发酵 污泥回流

中图分类号: S216.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0105-05

Sludge Recycle Trial of Cattle Manure Anaerobic Fermentation

Xia Jiqing Ma Tianyi Bi Jingyi Zheng Guoxiang Li Wenzhe

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract

In order to improve the efficiency of two-stage anaerobic fermentation system, the circulation process of sludge, composed of the activated sludge online and the activated sludge of the optimal period from storage tanks, was studied. Three factors, including feed concentration, day feeding quantities and sludge recycle ratio, were selected as independent variables, while COD removal rate and biogas production amount were as evaluating indicators. With the quadratic orthogonal rotating combinatorial method, the effects of different parameters on COD removal rate and biogas production amount were analyzed. The results showed that feed concentration, day feeding quantities and sludge recycle ratio were main influencing factors on two evaluating indication, and the mixed sludge recycle ratio had a significant effect. For the anaerobic fermentation system, the optimum parameters of process were feed concentration of 8.21%, day feeding quantities of 7.15 L/d and sludge recycle ratio of 30%, respectively.

Key words Cattle manure, Anaerobic fermentation, Sludge recycle

引言

目前,国家大力提倡发展生物质能利用技术,厌氧发酵是其中之一,但现在许多厌氧发酵装置的效率很低,为了提高厌氧发酵装置的效率,研究了各种各样的方法和措施,污泥回流工艺就是其中之一^[1]。

由于冲击负荷或进料中悬浮固体含量升高,会引起污泥流失,因此厌氧发酵系统排出的沼液中含有部分活性污泥^[2]。为了提高有机物的利用率和厌氧发酵系统的产气率,对这些含有有机物的沼液进行回流是很好的办法,但是回流方法和机理尚需

深入研究。本文针对在线活性污泥与后储罐最佳活性时段污泥混合的污泥回流工艺、结构以及最佳参数进行研究,以提高沼气生产过程中的容积效率。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用鲜牛粪取自哈尔滨市香坊区完达山奶牛场,按所需比例把水和鲜牛粪充分搅匀,放入酸化罐前要用筛网除杂,所用接种物为经过发酵的产甲烷阶段的活性污泥,牛粪和活性污泥经 TS(total solid) 和 VS(volatile solid)测定后备用。

收稿日期: 2010-06-29 修回日期: 2010-07-31

* 黑龙江省自然科学基金资助项目(ZD200817)和东北农业大学博士启动基金资助项目(2009RC49)

作者简介: 夏吉庆,研究员,博士生导师,主要从事生物质能源利用研究,E-mail: xjq12345@sohu.com

1.2 试验装置

试验采用两阶段厌氧发酵工艺,酸化阶段单独配置酸化罐,产气阶段装置由一个降流式厌氧生物滤池(AF)和升流式厌氧污泥床(UASB)反应器以及集气装置组成,如图1所示^[3]。AF中置有微生物载体,附着材料采用110 g规格网格玻璃纤维布(具有耐热性、化学稳定性、耐老化、防腐、防霉、抗紫外线辐射等性能),骨架采用直径75 mm的聚氯乙烯管(具有无毒害、抗腐蚀、抗冲击、水力流动性好等特性^[4])。试验过程是:对鲜牛粪进行初级处理除去较大的杂质,酸化罐中加水配制成需要的进料质量分数后进入酸化阶段,然后每12 h将经酸化好的料液使用蠕动泵从AF上部输送到AF中进入产气阶段,再将经过AF处理后的料液由AF的底部输送到UASB中,使料液得到进一步处理。UASB所排出的沼液由其上部排出进入后储罐。在向AF进料同时,将UASB中部的污泥料液与后储罐最佳活性时段污泥混合回流到AF中(回流方向如图1箭头所示),以增强发酵效果。本装置每个罐的有效容积均为24 L,酸化和产气阶段温度控制在 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$,试验中料液在酸化阶段的停留时间为4~5 d,发酵料液在产气阶段的停留时间为8 d左右。

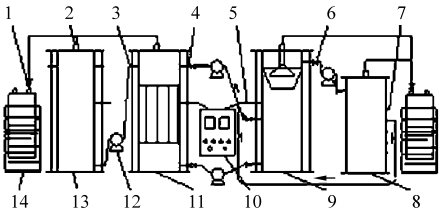


图1 厌氧发酵系统装置

Fig.1 Equipment of anaerobic fermentation system

1. 进气口 2. 出气口 3. 进料口 4. 回流进料口 5. 温度传感器 6. 出料口 7. 取样口 8. 后储罐 9. UASB 反应器 10. 温控箱 11. AF 反应器 12. 蠕动泵 13. 酸化罐 14. 储气罐

1.3 试验方法

1.3.1 厌氧发酵系统的启动

厌氧反应器启动过程:将处理好的牛粪(质量分数为8%)与实验室其他厌氧反应器中已发酵的产甲烷阶段的活性污泥按体积比3:1进行混合,装入反应器中,装填的量为反应器有效容积的80%,反应器温度控制在 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$ 以内,其产气量变化如图2所示,pH值变化如图3所示。

从图2可看出,AF反应器和UASB反应器的日产气量变化趋势基本相同,两反应器平稳日产气量相差5 L左右。反应器日产气量第1天到第7天有小幅上升,主要是因为沼液中各菌种在适应新的反应环境。第7天到第11天日产气量上升幅度比较大,这说明沼液中各菌种已经适应了反应器内的环

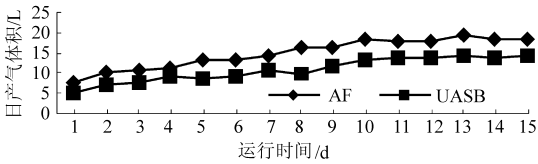


图2 启动阶段产气量变化

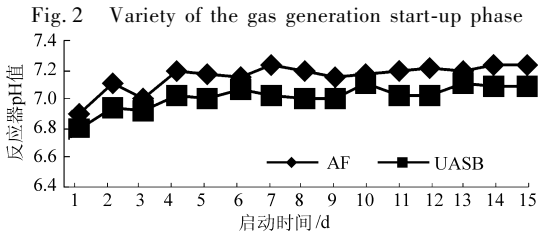


图3 启动阶段 pH 值变化

Fig.3 Variety of pH start-up phase

境,开始发挥作用。第11天到第15天,日产气量基本稳定,AF反应器的日产气量在 (16 ± 0.5) L范围内波动,UASB反应器的日产气量在 (11 ± 0.5) L范围内波动。

从图3可以看出,两反应器pH值变化趋势大体相同。从开始启动的第1天到第6天反应器起伏较大,第7天到第11天pH值波动变小,从第12天起,两反应器的pH值基本趋于稳定,AF反应器的pH值在 7.2 ± 0.1 范围内变化,UASB反应器的pH值在 7.0 ± 0.1 范围内变化,该变化趋势与产甲烷微生物最佳产气的pH值范围^[6-7]相吻合。

1.3.2 后储罐沼液产甲烷活性的测定

产甲烷活性测定装置如图4所示,量取40 mL待测沼液离心分离,弃去上清液再加入以乙酸盐为底物的厌氧培养基50 mL,分别置于6个100 mL的厌氧培养瓶内,然后放入预先设置的35℃恒温水浴槽,再将乳胶管、史氏发酵管如图4所示接好。史氏发酵管内盛有NaOH溶液作水封和CO₂吸收剂,进入管内的CO₂和H₂S可以被完全吸收,因此可按碱液吸收后的气体体积计算CH₄量^[7,12]。

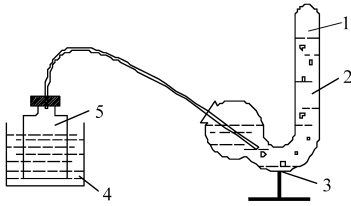


图4 产甲烷活性测定装置

Fig.4 Methanogenic activity measuring device

1. 甲烷气体 2. 碱液 3. 史氏发酵管 4. 恒温水浴 5. 反应罐

试验用沼液是每天由UASB排出置于后储罐中的沼液,后储罐的有效容积为20 L,每12 h进入后储罐的沼液为2 L,则水力停留时间为5 d。分别从1~5号取样口取进入后储罐1、2、3、4、5 d的沼液与直接从UASB排出的沼液作为6种分析样,从而求

出进入后储罐第几天的沼液产甲烷活性最高。

产甲烷速率计算公式^[8-9]为

$$U_{\max \cdot \text{CH}_4} = \frac{24KT_0}{XV_R T_1}$$

式中 K ——累积产 CH_4 量曲线直线段斜率, mL/h
 X ——发酵瓶中平均 VSS 质量浓度, g/L
 V_R ——反应区容积, mL
 T_0 ——标准状况的绝对温度, K
 T_1 ——恒温水浴的绝对温度, K

经过试验分析得到未放置、1 d、2 d、3 d、4 d、5 d 的数据, 进行 3 组重复性试验, 取其 3 组的平均值得到图 5 所示的累计甲烷产量 V_{CH_4} 增长曲线(图中 V_a 为培养瓶的气室容积), 用一元线性回归的方法求出 $V_{\text{CH}_4}-t$ 曲线上直线段的斜率 K , 再测定出培养瓶内的平均 VSS 质量浓度或总 VSS 质量, 便可算出 $U_{\max \cdot \text{CH}_4}$ 。

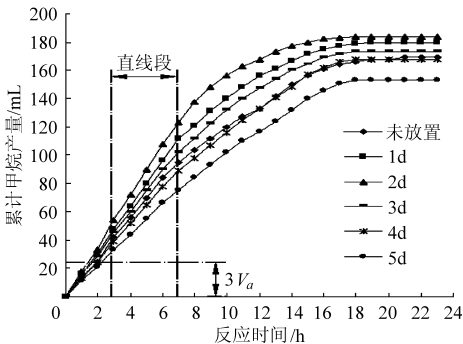


图 5 累计甲烷产量增长曲线

Fig. 5 Production growth curves of cumulative methane

通过试验得出 6 种取样的各参数数据如表 1 所示。

表 1 试验测定数据

Tab. 1 Experimental determination of data						
参数	培养瓶号					
	1	2	3	4	5	6
	(未放置)	(1 d)	(2 d)	(3 d)	(4 d)	(5 d)
$K/\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$	13.6	15.7	17.8	15.1	13.2	10.4
$X/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	28.8	27.9	27.1	26.6	26.4	26.0
V_R/mL	90.2	90.1	90.0	90.1	90.3	90.2
T_0/K	273.0	273.0	273.0	273.0	273.0	273.0
T_1/K	308.0	308.0	308.0	308.0	308.0	308.0
$U_{\max \cdot \text{CH}_4}/\text{mL}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$	111.3	132.8	155.2	134.1	117.8	94.3

由表 1 可以看出第 3 号污泥(即在后储罐第 2 天)的产甲烷活性最高, $U_{\max \cdot \text{CH}_4} = 155.2 \text{ mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 。

通过对后储罐最佳活性时段污泥的研究, 对只将 UASB 中部的污泥按进料量的 25% 回流到 AF 中, 与将 UASB 中部的污泥和进入后储罐第 2 天的

污泥混合(按 1:1、3:2、2:3 的比例), 按进料量的 25% 回流到 AF 反应器中的产气量进行比较试验的数据表明, 按 1:1 比例的回流方式相对于只回流 UASB 中部污泥料液的方式产气率能够提高 5.6%。

1.3.3 带有混合污泥回流的厌氧发酵回归试验

在沼液产甲烷活性试验研究的基础上, 借鉴相关研究方法, 选择进料质量分数、日进料量和污泥回流比(UASB 中部的污泥料液和进入后储罐第 2 天的污泥料液按 1:1 混合的污泥)为 3 个影响因素进行二次回归旋转试验, 分别用 X_1 、 X_2 和 X_3 表示, 选定 5 个水平, 并以 COD 去除率和产气量为评价指标, 分别用 Y_1 和 Y_2 表示, 寻求本工艺获得较高 COD 去除率和产气量下的厌氧发酵工艺参数。根据二次回归旋转组合试验设计确定的水平编码如表 2 所示。

二次回归旋转试验安排及结果如表 3 所示。

表 2 水平编码
Tab. 2 Level instruction

水平编码	进料质量分数 $X_1/\%$	日进料量 $X_2/\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$	回流比 $X_3/\%$
1.682	9.68	7.68	33.41
1	9	7	30
0	8	6	25
-1	7	5	20
-1.682	6.32	4.32	16.59

表 3 二次回归旋转试验安排及结果表

Tab. 3 Test arrangements and results					
试验号	x_1	x_2	x_3	COD 去除率	总产气量
				$Y_1/\%$	Y_2/L
1	1	1	1	47.65	583.4
2	1	1	-1	40.98	468.9
3	1	-1	1	48.41	513.2
4	1	-1	-1	46.71	437.7
5	-1	1	1	49.81	464.1
6	-1	1	-1	45.42	428.2
7	-1	-1	1	51.98	310.4
8	-1	-1	-1	46.12	289.5
9	1.682	0	0	41.93	459.8
10	-1.682	0	0	46.18	404.5
11	0	1.682	0	44.23	464.7
12	0	-1.682	0	42.93	304.8
13	0	0	1.682	51.41	508.6
14	0	0	-1.682	41.77	450.1
15	0	0	0	46.55	456.1
16	0	0	0	46.36	444.5
17	0	0	0	46.04	449.9
18	0	0	0	44.98	442.1
19	0	0	0	44.77	435.2
20	0	0	0	45.68	452.1
21	0	0	0	45.32	445.8
22	0	0	0	46.43	450.4
23	0	0	0	45.89	441.7

2 结果与分析

2.1 各因素对 COD 去除率的影响

COD(chemistry oxgen demand)去除率是指在一定条件下溶液中有机质与强氧化剂重铬酸钾作用所消耗氧的量,通常厌氧发酵主要是使易被生物降解的有机物得到分解和转化^[5]。畜禽粪便在厌氧发酵过程中,能够转化为沼气的总固体只有 20%~40%,所以在进行厌氧发酵的过程中像牛粪这样总固体含量较多的料液,COD 去除率很难达到 80%以上^[10~11]。试验数据经 Design-Expert 软件分析得到各因素对 COD 去除率影响的曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出进料质量分数越大,厌氧发酵系统的 COD 去除率越低;随着日进料量的增加,COD 去除率先基本不变,当进料量达到一定值时,随着日进料量的增加,COD 去除率逐渐降低;但 COD 去除率在该试验范围内随着污泥回流比的增大而有明显提高。

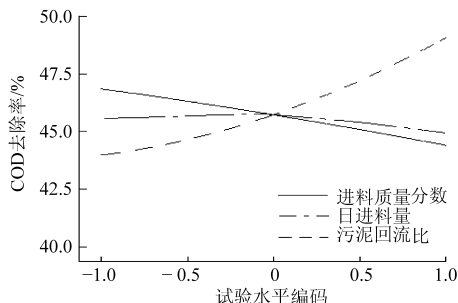


图 6 各因素对 COD 去除率的影响

Fig.6 Influence of all factors on the COD removal rate

随着日进料量的提高,进入反应器中的营养物质增加,适宜的水力停留时间使产酸菌的产酸速率与产甲烷菌利用有机酸的速率达到平衡时,COD 去除率达到最大。当继续增加水力负荷时,使活性污泥的滞留时间小于活性污泥中的产甲烷菌的增代时间,也就是说产甲烷菌还没来得及繁殖一代就被料液带走,致使反应器的 COD 去除率又随之减少。

随着污泥混合回流比的增大,使 UASB 中部的污泥和后储罐的高活性污泥不断进入厌氧反应器内,从而使 AF 反应器微生物密度提高,污泥中高密度的微生物可以使进入 AF 反应器中经过酸化的料液很快进入产甲烷阶段,经过一个水力停留时间以后,料液中大部分有机酸得到降解,污泥质量浓度提高,转化率也提高。加之系统回流的污泥在进行回流前,有机质大部分已经降解,COD 的含量较低,所以随着污泥混合回流比的增加 COD 去除率也就会越高,可见污泥混合回流比对 COD 去除率有明显影响。

2.2 各因素对产气量的影响

产气量是监测厌氧发酵系统运行好坏的最简单经济可行及最直接的指标,在发酵系统中了解各因素对产气量的规律,一直是人们所关注的。试验数据经 Design-Expert 软件分析得到各因素对产气量影响的曲线如图 7 所示。

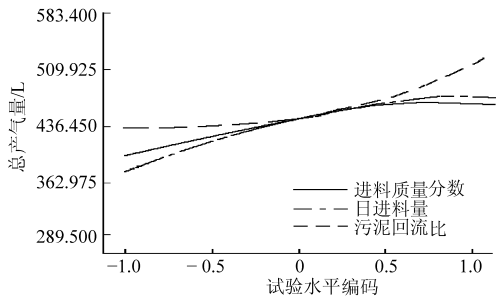


图 7 各因素对产气量的影响

Fig.7 Influence of all factors on the gas generation

从图 7 可以看出,随着料液质量分数的增加,总产气量一开始不断增加,当增加到一定程度时,则不再增加而保持相对稳定,而后随质量分数的增加,总产气量略有下降;日进料量对总产气量的影响是随着日进料量的提高,总产气量先不断增加,到达一个峰值后开始缓慢下降;在试验取值范围内随着污泥回流比的逐渐增加,总产气量是不断增加的。

这是因为当进料质量分数和日进料量较小时,进入反应器中的营养物质较少,使厌氧微生物的正常生长繁殖所需的营养得不到及时供应,使菌种不能最大限度地发挥潜能,致使只有较少的有机质转化为气体,所以产气量很低。随着两者的提高,进入反应器中的营养物质增加,使菌种能很好的发挥其产气的潜力,同时适宜的水力停留时间使产酸菌的产酸速率与产甲烷菌利用有机酸的速率达到平衡时,产气量最大。当继续增加时,使产酸菌的产酸速率超过了产甲烷菌利用有机酸的速率,系统环境中过多的酸化料液,会导致微生物分解有机物的能力低下,使系统的总产气量减少。

通过试验测得,随着污泥混合回流比的增加,AF 反应器产气量在逐渐上升,但 UASB 反应器产气量提高不是很明显,但总体看在同样条件下,改变混合污泥回流比可以达到明显提高产气量的目的。这是因为在向 AF 反应器加入酸化料的同时采取污泥回流,使 UASB 中部的污泥和后储罐的高活性污泥进入 AF 反应器内,从而使 AF 反应器微生物密度提高,使进入 AF 反应器的酸化料迅速进入产甲烷阶段,提高了系统的产气率,使 AF 反应器的产气量得到提高,而进入 UASB 反应器后料液的污泥活性和质量分数与以前相差不多,使 UASB 的产气量只有

较小差异,但是系统总产气量还是得到了显著提高。

2.3 综合评定的最优工艺参数

比较图 6 与图 7 可发现,2 个评价指标达到最优值时各工艺参数并不一致,因此需要设定 2 个评价指标的权重,综合评定得到最佳工艺参数。试验所得综合评定方程为

$$R = 0.437\,3 + 0.004\,6x_1 - 0.026x_2 + 0.032\,8x_3 - 0.051\,6x_1^2 - 0.599\,03x_2^2 - 0.031\,8x_3^2 + 0.421\,8x_1x_2 - 0.007\,1x_1x_3 - 0.025\,6x_2x_3$$

利用 Matlab 软件算得当 R 值最大时对应的最优工艺参数为:进料质量分数 8.21%、日进料量 7.15 L/d、污泥回流比 30%。

3 结论

(1) 试验以牛粪为发酵原料,将污泥(UASB 反应区中部的活性污泥和进入后储罐第 2 天的污泥按

1:1 混合的污泥)回流至 AF 中,设计了一种新型污泥回流工艺。

(2) 通过二次回归旋转组合试验证明了进料质量分数、日进料量和污泥回流比是影响 COD 去除率、总产气量的 3 个主要因素。随着进料质量分数和日进料量的增加,COD 去除率的一般趋势是相对降低,而产气量先升高后降低;而随着混合污泥回流比的增加,COD 去除率和总产气量也增加。3 个主要因素之间具有一定的交互作用,对各指标的影响,混合污泥回流比影响效果明显,说明混合回流一定比例的活性污泥对这个系统的产气量和 COD 去除率的提高具有显著促进作用。

(3) 在兼顾 2 个评价指标基础上,建立了厌氧发酵混合污泥回流综合评定方程,得到了一组综合评定该厌氧发酵系统的最优工艺参数为:进料质量分数 8.21%、日进料量 7.15 L/d、污泥回流比 30%。

参 考 文 献

1 Duangmanee T, Padmasiri S I, Simmons J, et al. Hydrogen production by anaerobic microbial communities exposed to repeated to repeated heat treatments [J]. 2007,79(9):975 ~ 978.

2 周孟津,张榕林. 沼气实用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004:30 ~ 60.

3 东北农业大学. 一种沼气发生装置:中国, 200820089207.0 [P]. 2008 - 12 - 10.

4 李慧强. 基于维纶纤维载体的厌氧发酵参数试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2007.
Li Huiqiang. Study on the anaerobic fermentation parameter experiment based on vinylon-fibre carrier [D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2007. (in Chinese)

5 边炳鑫, 赵由才. 农业固体废弃物的处理与综合利用[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.

6 Adama Traore, Stephane Grieu, Jesus Colprim. Control of sludge height in a secondary settler using fuzzy algorithms[J]. Computers and Chemical Engineering,2006,30(9):1 235 ~ 1 242.

7 林聪,王久臣,周长吉. 沼气技术理论与工程[M]. 北京:化学工业出版社, 2006:1 ~ 27.

8 吴唯民,胡纪华,顾夏声. 厌氧污泥的最大比产甲烷速率的间歇试验测定法[J]. 中国给水排水,1985,4(1):30 ~ 35.
Wu Weimin, Hu Jihua, Gu Xiasheng. Maxmum specific methane production rate of anaerobic sludge and its measurement by batch test [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House,1985,4(1):30 ~ 35. (in Chinese)

9 Min K S, Park K S. Acidogenic fermentation; utilization of wastesludge as a carbon source in the denitrification process [J]. Environmental Technology, 2002,23(3): 293 ~ 302.

10 Huang J S, Tsai C C, Chou H H, et al. Simulation modeling for nitrogen removal and experimental estimation of mass fractions of microbial groups in single-sludge system[J]. Chemosphere,2006,62(1): 61 ~ 70.

11 Zhang Guangming, He Junguo, Zhang Panyue, et al. Ultrasonic reduction of excess sludge from activated sludge system II. urban sewage treatment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009,164(2 ~ 3):1 105 ~ 1 109.

12 毕经毅,夏吉庆,马添翼,等. 厌氧发酵系统中回流沼液的产甲烷活性研究[J]. 环境工程学报,2010,4(11):2 031 ~ 2 034.
Bi Jingyi, Xia Jiqing, Ma Tianyi, at al. Research on specific methanogenic activity of circulate biogas slurry in anaerobic fermentation system[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010,4(11):2 031 ~ 2 034. (in Chinese)