

两相消化系统产酸相酸化特性模型*

管运涛, 蒋展鹏(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084, E-mail: guanyt@263.net)

摘要: 通过物料衡算建立产酸相的酸化特性分段模型, 并求得本研究两相消化系统处理淀粉配制废水情况下产酸相动力学参数为: 产酸菌产率系数 $Y = 0.28 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$, 产酸菌衰减系数 $k_d = 0.054 \text{ h}^{-1}$, 产酸菌最大比增长率 $\mu_m = 3.1 \text{ h}^{-1}$, 饱和系数 $K_s = 1866 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 讨论了产酸相酸化率对整个系统运行状况的影响, 表明高酸化率有利于提高系统的处理效率和沼气回收.

关键词: 数学模型, 两相消化系统, 产酸相, 酸化率.

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)03-0036-04

Acidification Characteristics of Acidifying Phase in Two-phase Digestion System

Guan Yuntao, Jiang Zhanpeng(Dept. of Environ. Sci. and Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China E-mail: guanyt@263.net)

Abstract: The acidification characteristics of acidifying phase was discussed by piecewise mathematical model. The kinetic parameters of acidification phase are as following: the yield coefficient for acidproducing bacteria(Y) = $0.28 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$, the organism decay constant(k_d) = 0.054 h^{-1} , the maximum specific growth rate(μ_m) = 3.1 h^{-1} , the saturation constant(K_s) = $1866 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The effects of acidification rate to operation of the system were analyzed and the conclusions that higher acidification rate is favorable to organics removal and energy reclaim were found.

Keywords: mathematical model, two-phase digestion system, acidification phase, acidification rate.

80 年代初进行的有关两相厌氧工艺的研究表明^[1-3], 在稳态条件下, 两相厌氧工艺比一相厌氧工艺在处理效率、处理能力及稳定性等运行性能方面要优越, 这一方面是由于相分离为不同的微生物提供了各自适宜的生存条件, 另一方面, 独立控制的产酸相也起到了预处理和缓冲负荷及废水水质波动的作用. 有关两相消化系统产酸相运行特性的研究并不多见. 在 Zoetemeier 等学者的研究中^[4,5]介绍了不同 pH 和不同温度下, 葡萄糖基质酸性发酵产物中挥发酸分布的变化情况, 提出了适宜条件为: pH 为 6.0 左右, 温度 30℃ 上下. 另外, Zoetemeier 等还讨论了产酸阶段产物抑制问题^[6]. Alexiou 等学者^[7]对产酸相的运行控制参数等进行了研究. 在不同的研究中, 产酸相的酸化特性作为衡量产酸相运行状态的参数受到了学者们的重视. 本研究采用酸化率作为表征产酸相酸化特性的参数, 其定义为: 两相消化系统进水有机物在产酸相中被转化为挥发酸(包括

进而转化为气体的部分)的比例. 从定义中可以看出, 酸化率代表了产酸相微生物的酸化能力, 其数值直接影响下一阶段的处理效果. 本文将利用实验的方法测定出产酸相的动力学参数, 对产酸相酸化率进行数学模型模拟及预测, 并对酸化率数值的影响进行初步的讨论.

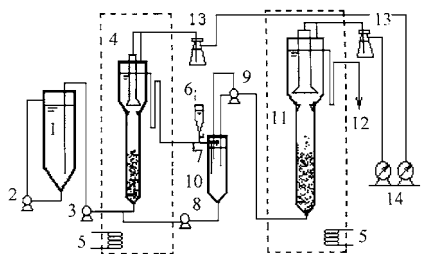
1 试验条件

1.1 工艺与装置

两相消化系统(Two-phase digestion biosystem, BS)试验工艺流程如图 1 所示. 产酸反应器和产甲烷反应器置于 $35 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 的恒温箱内. 产酸反应器为普通厌氧反应器, 体积 3L, 其中反应区 1.65L; 产甲烷反应器为上流式厌氧污泥床反应器, 体积 7L, 其中反应区 3.6L.

1.2 试验水质及接种污泥

* 中法国际合作项目
作者简介: 管运涛(1970~), 男, 博士, 讲师.
收稿日期: 1999-05-28



1. 配水槽 2. 循环泵 3. 蠕动泵 4. 产酸反应器 5. 恒温装置 6. 碳酸钠 7. 水位控制器 8. 回流泵 9. 蠕动泵 10. 中间稳定槽 11. 产甲烷反应器 12. 出水 13. 水封 14. 湿式气体流量计

图1 BS系统试验流程图

试验原水采用工业淀粉及葡萄糖配制, 按比例投加 N、P, 并投加微量元素 Ni、Co、Mo。试验进水水质范围: COD = 1500 ~ 12000 mg · L⁻¹, BOD₅ = 1000 ~ 5000 mg · L⁻¹, pH = 4 ~ 7。

产酸相接种污泥取自污水处理厂二沉池底泥, VSS 接种量 8 g · L⁻¹, VSS/SS 为 55%; 产甲烷相接种污泥取自啤酒厂厌氧反应池污泥, VSS 接种量 13 g · L⁻¹, VSS/SS 为 57%。

1.3 测定项目

试验每日测定 COD、pH、气体产量、挥发性有机酸(VOA)、气体成分。

2 产酸相数学模型的建立

2.1 基本假设

(1) 忽略产酸反应器中的产甲烷反应, 认为产酸反应器中不存在产甲烷菌。

(2) 反应器内完全混合。

(3) 主要考虑稳态情况下的结果, 并且依据物质平衡原理。

2.2 模型推导

根据物质平衡原理, 对不同物质进行物料衡算。

(1) 对产酸菌的物料衡算

$$V_1 \left| \frac{dX}{dt} \right|_g = QX_0 + RQX_R + V_1 \left| \frac{dX}{dt} \right|_d - V_1 \left| \frac{dX}{dt} \right|_d - Q(1 + R)X_1 \quad (2)$$

其中, $V_1 \left| \frac{dX}{dt} \right|_g$ 和 $V_1 \left| \frac{dX}{dt} \right|_d$ 分别为产酸菌的

生长及衰减数量; R 为回流率; X_0 、 X_1 及 X_R 分别为产酸相进、出水及回流液的微生物浓度; V_1 为产酸相有效容积; Q 为进水流量。

稳态条件下, $\frac{dX}{dt} = 0$, 等式两边除以 V_1 , 并以 $\theta_1 = \frac{V_1}{Q}$, $X_0 = 0$, $\left| \frac{dX}{dt} \right|_g = \mu X_1$, $\left| \frac{dX}{dt} \right|_d = k_d X_1$

代入, 整理可得: $\mu = \frac{1 + R}{\theta_1} - \frac{RX_R}{\theta_1 X_1} + k_d$

(2) 溶解性基质的物料衡算

$$V_1 \left| \frac{dS}{dt} \right|_d = QS_0 + RQS_1 + V_1 \left| \frac{dS}{dt} \right|_d - Q(1 + R)S_1 \quad (4)$$

其中, $\left| \frac{dS}{dt} \right|_d$ 为基质反应的速率; S_0 及 S_1 分别为产酸相进水与出水溶解性基质浓度。

稳态条件下, $\frac{dS}{dt} = 0$, 式(4)两边除以 V_1 , 并以 $\theta_1 = \frac{V_1}{Q}$ 代入, 整理可得:

$$\left| \frac{dS}{dt} \right|_d = \frac{S_1 - S_0}{\theta_1} \quad (5)$$

(3) 根据 Monod 关系式有:

$$\mu = \frac{\mu_m S_1}{K_s + S_1} \quad (6)$$

式中, μ_m 为产酸菌最大比增长率, K_s 为其饱和常数。

(4) 产酸菌生长率与基质转化率之间的关系为: $\left| \frac{dX}{dt} \right|_g = -Y \left| \frac{dS}{dt} \right|_d$ (7)

$$\text{由式(7)、(5)可得: } \frac{S_0 - S_1}{\theta_1} = \frac{\mu}{Y} X_1 \quad (8)$$

设回流到产酸相的固体物质总量与流出产酸相的固体物质总量之比(产酸相固体物质回流率)为 r , 则: $r(1 + R)X_1 = RX_R$ (9)

式(8)与式(3)联立, 并以式(9)代入, 可得:

$$X_1 = \frac{Y(S_0 - S_1)}{(1 + R)(1 - r) + k_d \theta_1} \quad (10)$$

式(6)与(3)联立, 可得:

$$S_1 = \frac{((1 + R)(1 - r) + k_d \theta_1) K_s}{\mu_m \theta_1 - ((1 + R)(1 - r) - k_d \theta_1)} \quad (11)$$

设单位有机污泥的 COD 当量为 a , 淀粉的 COD 当量为 b , 则系统酸化率为:

$$R_a = \frac{S_0 - S_1 + bSS_0 - a(1 - r)(1 + R)X_1}{COD_{in}} \times 100\% \tag{12}$$

式中, SS_0 和 COD_{in} 分别为产酸相进水悬浮物(主要成分是未溶解淀粉)浓度和 COD 总浓度. 式(10)与(11)及(12)联立, 可得系统酸化率

2.3 动力学参数确定

生物动力学常数主要和进水性质、生物反应器的温度等有关. 本研究在运行初期在不加入产酸相回流流程(即 $R = 0$)的条件下, 改变 HRT(即 θ_1), 测定一些基本运行的状态参数,

以求得在本研究基质条件下的生物动力学参数. 所得试验结果见表 1.

(1) k_d 与 Y

由式(3)与(8), 令 $R = 0$, 变形得:

$$\frac{S_0 - S_1}{X_1} = \frac{k_d}{Y}\theta_1 + \frac{1}{Y} \tag{13}$$

以 θ_1 为横坐标, $\frac{S_0 - S_1}{X_1}$ 为纵坐标, 进行线性拟合(见图 2). 由线性拟合可以得出:

$$Y = 0.28\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}, k_d = 0.054\text{h}^{-1}$$

(2) K_s 与 μ_m

表 1 产酸相生物动力学参数试验结果

θ_1/h	$S_0/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$S_1/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$X_1/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\frac{S_0 - S_1}{X_1}$	$\frac{1}{S_1}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})^{-1}$	$\frac{\theta_1}{1 + k_d\theta_1}/\text{h}$
1	1117.8	762.4	90	3.9489	0.0013	0.9486
2	740.5	415.5	80	4.0625	0.0024	1.8045
4	588.8	162.4	104	4.1000	0.0062	3.2876
6	519.4	189.8	66	4.9939	0.0053	4.5282

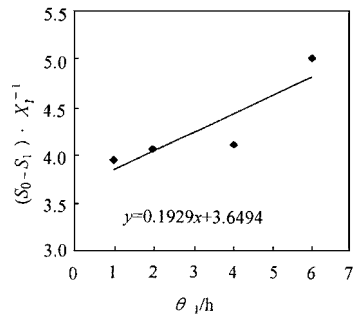


图 2 产酸相 Y 与 k_d 的确定

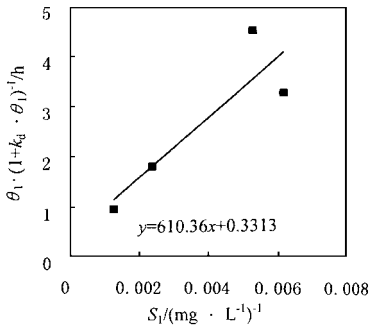


图 3 产酸相 K_s 与 μ_m 确定

由式(3)及(6), 令 $R = 0$, 取倒数得:

$$\frac{\theta_1}{1 + k_d\theta_1} = \frac{K_s}{\mu_m} \cdot \frac{1}{S_1} + \frac{1}{\mu_m} \tag{14}$$

以 $\frac{\theta_1}{1 + k_d\theta_1}$ 为纵坐标, $\frac{1}{S_1}$ 为横坐标, 作图 3, 经线

性拟合可得:

$$\mu_m = 3.1\text{h}^{-1}, K_s = 1866\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

3 模型评价及分析

从生物动力学参数的数值可以看出, 它们与一般厌氧动力学参数相差不大^[5].

由式(10)、(11)代入本试验运行基本数据及动力学参数, 可得:

$$X_1 = \frac{0.28(S_0 - S_1)}{1.716 - 1.5r} \tag{15}$$

$$S_1 = \frac{3202.06 - 2799r}{10.68 + 1.50r} \tag{16}$$

由于 $r \leq 1$, 则由式(16)、(15)及(12)分析可得: $r \uparrow \Rightarrow S_1 \downarrow \Rightarrow X_1 \uparrow \Rightarrow R_a \uparrow$ (17)

本研究取有机污泥 COD 当量 $a = 1.42$, 淀粉的 COD 当量 $b = 1.07$. 计算酸化率并与实测值比较(见图 4). 在 BS 系统中, 一部分流失污泥(含固体有机物)可以回流到产酸相中, 另一部分污泥从产酸相中流失到产甲烷相. 从图 4 中可以看出, 当进水负荷 $< 10\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 取 $r = 0.3$, 利用式(15)、(16)、(12)进行计算, 计算结果与实测值基本相符; 当进水负荷 $> 10\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 取 $r = 0.7$, 模型模拟的酸化率与实测值基本相符. 这是因为在低负荷下,

由于产酸相中流出的 SS 低, 使流失进入产甲烷相的固体物质占有的比例偏高, 故 r 值相应较小; 高负荷下情况相反. 因此, BS 系统酸化率的数学模型为一分段函数.

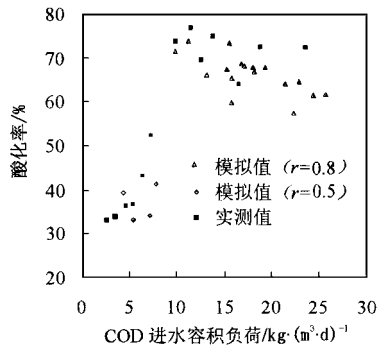


图 4 BS 系统产酸相酸化率实测值与模拟值比较

从上述讨论和方程中可以看出, R 值也可以影响系统的酸化率. 固定 r 值, 而使 R 值变化, 则从式(10)、(11)、(12)分析得出: 当 R 升高, S_1 升高, X_1 则降低, 而酸化率 R_a 却没有明显的规律. 取 $r=0.99$, 将 R 从 0 以 0.2 的步长升高到 3, 代入上述公式并代入任意试验初始值(S_0 、 SS_0 、 COD_{in}), 计算表明, 酸化率的变化均在 2% 以内. 可见, 产酸相回流率 R 对系统酸化率的影响不大, 可以忽略.

综上所述, 该分段模型可以用于对两相消化系统产酸相酸化特性(酸化率)的模拟和预测, 从而考察产酸相的运行状态及分析可能对产甲烷相产生的影响.

关于 BS 系统酸化率对整个消化工艺效率的影响, 现存在一些不同观点. 如 Alexiou 等学者认为^[7], 在两相消化系统中, 废水完全酸化是应该避免的, 它将对产甲烷相的运行产生不良影响, 而 40%~50% 的酸化物质进入产甲烷相是适宜的. 而本研究则没有得到相同的结论. 在低负荷情况下($<10\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$), 由于产酸相污泥流失进入产甲烷相的比例相对较大, 故酸化率只有 40%~50%, 而当负荷较大时($>10\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$), 酸化率较高, 而这时系统的去除率仍然保持在 80% 以上. 只有当系统 COD 容积负荷进一步增大到 $20\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 以上时, 系统去除率才下降到 80% 以下.

本研究后期将系统产酸相出水经膜过滤后再进入产甲烷相, 经过一段时期的驯化, 产甲烷相进水的酸化程度几乎达到了 100%, 而即使是系统 COD 容积负荷上升达到 $20\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 以上, 系统的去除率仍然保持在 90% 以上. 由此可见, 高的酸化率(接近完全酸化)是可取的, 关键是以酸化程度较高的废水驯化出具有高厌氧活性的产甲烷菌. 本研究的实验数据表明, 在系统酸化率高的情况下, 产甲烷相中污泥的产甲烷活性有较大的提高, 因此保证了高酸化程度进水较完全的处理及更高的沼气产量^[8].

4 结论

(1) 通过物料衡算建立产酸相的酸化特性模型为分段模型. 产酸相固体物质回流率 r 对系统酸化率影响较大.

(2) 根据分段模型计算, 产酸相回流率 R 对系统酸化特性(酸化率)影响很小.

(3) 系统产甲烷相进水较高的酸化程度是可以接受的, 且有利于提高系统产甲烷相污泥活性进而提高系统处理效率和沼气回收.

参考文献

- 1 Cohen A, Breure A M , van Andel J G et al. Influence of phase separation on the anaerobic digestion of glucose-II . stability, and kinetic responses to shock loadings. Wat. Res. , 1982, 16: 449~ 455.
- 2 Cohen A et al. Influence of Phase Separation on the Anaerobic Digestion of Glucose-I , Maximum COD-Turnover during Continuous Operation. Wat. Res. , 1980, 14: 1439~ 1448.
- 3 Cohen A et al. Anaerobic Digestion of Glucose with Separated Acid Production and Methane Formation. Wat. Res. , 1979, 13: 571~ 580.
- 4 Zoetemeyer R J, J C van den Heuvel and A Cohen. pH influence on acidogenic dissimilation of glucose in an anaerobic digester. Wat. Res. , 1982, 16(3): 303~ 310.
- 5 Zoetemeyer R J et al. Influence of Temperature on the Anaerobic Acidification of Glucose in Amixed Culture Forming Part of A Two-stage Digestion Process. Wat. Res. , 1982, 16: 313~ 321.
- 6 Zoetemeyer R J et al. Product Inhibition in the Acid Forming Stage of the Anaerobic Digestion Process. Wat. Res. , 1982, 16: 633~ 639.
- 7 Alexiou I E, Anderson G K and Evison L M . Design of pre-acidification reactors for the anaerobic treatment of industrial wastewaters. Wat. Sci. Tech. , 1994, 29(9): 199~ 204.
- 8 管运涛, 蒋展鹏, 祝万鹏等. 两相厌氧膜生物系统处理有机废水的研究. 环境科学, 1998, 19(6): 56~ 59.