

IC 反应器处理猪场废水基质降解的动力学模型

丁一¹, 张杰², 李海华³, 岳建芝¹, 杨世关¹, 张百良^{1*}

(1. 河南农业大学农业部可再生能源重点开放实验室, 郑州 450002; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 3. 华北水利水电学院环境工程系, 郑州 450011)

摘要: 为了研究IC反应器处理猪场废水的运行规律, 依据IC反应器中有机物降解特性, 假设IC反应器精细处理区和污泥床区水力流态分别为推流和全混流、基质降解速率与微生物浓度之间符合一级反应模型, 并在此基础上, 建立了IC反应器处理猪场废水基质降解动力学理论模型, 根据IC反应器处理猪场废水的试验结果, 确定了平均温度为 $(33\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ 条件下的动力学参数; 然后对模型进行了验证, 结果表明, 理论预测值与实测值误差大多 $\leq 10\%$, 二者吻合较好, 证明该动力学模型可为IC反应器处理猪场废水的实际运行和数据预测提供科学依据。

关键词: IC反应器; 基质降解; 动力学模型; 猪场废水

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0236-04

丁一, 张杰, 李海华, 等. IC反应器处理猪场废水基质降解的动力学模型[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 236-239.
Ding Yi, Zhang Jie, Li Haihua, et al. Kinetics model for decomposing substrate in treating piggery wastewater in IC reactor[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 236-239. (in Chinese with English abstract)

0 引言

自报道内循环厌氧反应器 (Internal Circulation Reactor, 简称 IC 反应器) 可以高速高效处理高浓度有机废水以来^[1], 已被扩展到多种有机废水处理的试验研究, 内容涉及 IC 反应器处理工业有机废水可行性^[2-5]、IC 反应器的启动^[6-9]、IC 反应器废水处理的机理^[10,11]、厌氧颗粒污泥的培养以及动力学模型^[12-14]等多个方面, 但在养猪场废水处理理论研究方面却是个空白; 同时, 现有的研究多建立在以人工配水为底物的基础上, 由于营养物质单一, 得出的结论有局限性, 难以指导 IC 反应器处理原废水的生产实践。因此, 本文以猪场废水为基质, 通过 IC 反应器基质降解动力学特性研究, 以期得到 IC 反应器处理猪场废水的动力学方程, 以便为 IC 反应器用于养猪场废水处理工程提供科学依据。

1 试验装置、材料和方法

1.1 试验装置

试验在图1所示的试验装置中进行。该系统由有机玻璃制作的IC反应器、储水箱、加热器、气体流量计等几部分组成, 其中IC反应器污泥床区有效容积为30 L, 精细处理区有效容积为35 L。通过加热系统使反应器进水温度稳定在 $(33\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ 。为了便于内循环流量的测定, IC反应器循环回流管布置在反应器的外部。

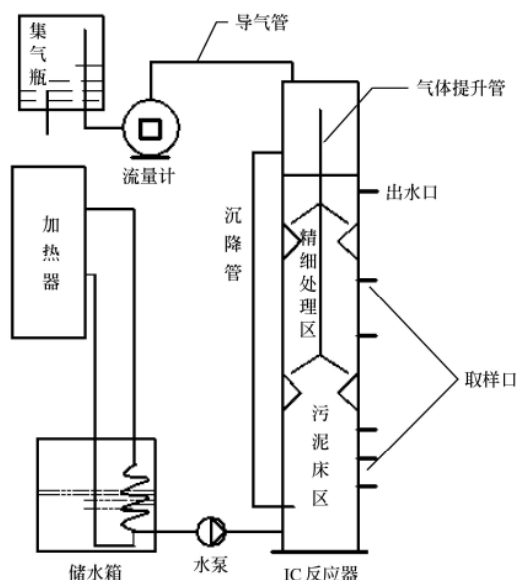


图1 IC反应器试验装置示意图

Fig.1 Diagram of the experimental equipment of Internal Circulation(IC) reactor

1.2 试验用废水

取自郑州种猪场预处理后的废水。郑州种猪场存栏种猪 5000 头, 采用营养配方自行配置饲料, 利用自动化加料, 采取干出粪工艺对粪污进行分离处理, 固体粪便通过简单处理销售, 剩余粪污经离心式固液分离机分离后, 分离的固体残渣与猪粪一同处理, 污水经细格栅进入 UASB 反应器进行处理。本试验用废水取自细格栅后, 其 COD、SS、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 4036.85~14932.6、126.4~483.7、256.7~1068.4 mg/L, pH 值为 6.7~8.3。

1.3 分析项目及方法^[15]

1) COD: 重铬酸钾法;

2) 溶解性 COD: 对水样进行 4000 r/m 离心后取上

收稿日期: 2007-01-06 修改日期: 2008-07-17

基金项目: 河南教育厅自然科学基金项目 (2006610004)

作者简介: 丁一 (1971-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事农业生物环境与能源工程方面的研究工作。郑州市文化路 95 号 河南农业大学农业部可再生能源重点开放实验室, 450002. Email: dy12@263.net

*通讯作者: 张百良 (1941-), 男, 教授, 博士生导师, 从事农业生物环境与能源工程方面的研究工作。郑州市文化路 95 号 河南农业大学农业部可再生能源重点开放实验室, 450002 Email:

清液, 再进行重铬酸钾法测定;

3) SS: 标准质量法;

4) NH_4^+-N : 纳式试剂光度法。

1.4 IC 反应器基质降解动力学模型的建立

1.4.1 IC 反应器基质降解动力学模型建立的前提条件

IC反应器的实际运行状态是非常复杂的, 为了考察主要因素对基质降解速率的影响, 以便建立基质降解动力学模型, 首先作如下一些假设:

1) 由于IC反应器污泥床区污泥浓度较高, 当基质进入反应器后, 首先在污泥床区被降解并产生大量甲烷气体, 在甲烷气体作用下, 污泥床区产生剧烈的混合状态, 这样就可以近似地认为各物质浓度在污泥床区是均匀分布的; 当废水进入精细处理区时, 基质浓度大大降低, 且精细处理区内污泥浓度很小, 产生气体量也很小, 废水呈稳流状态。因此, 本试验中, 假设进入反应器的基质在反应器的污泥床区按全混合状态处理, 在上部的精细处理区液体按推流状态处理。

2) 假设进水中不含微生物, 这是因为与污泥床区污泥浓度相比, 反应器的进水中微生物浓度很小, 对基质的降解作用与污泥作用相比可以忽略不计。

3) 反应器进水中所有可生物降解的基质均为溶解性的, 进水悬浮物不可生物降解, 且忽略不计, 这是因为IC反应器水力停留时间较短, 进入反应器的猪粪废水中的悬浮物难以降解; 且悬浮物浓度与污泥床区污泥浓度相比小得多, 因此对污泥床区的干扰较小。

4) 在污泥床区及精细处理区基质降解速率与污泥浓度和基质浓度均符合一级反应模型, 即基质降解速率与污泥浓度和基质浓度成正比。

5) 内部循环水中的基质在沉降管内的降解忽略不计: 因为沉降管容积与反应器容积相比小得多, 且基质在其中的停留时间很短, 加之沉降管内污泥浓度又很低, 所以基质在沉降管内的降解可以忽略不计。

6) 反应器内的厌氧污泥浓度保持稳定, 整个处理系统在稳态下运行。

由于猪场废水属于高浓度有机废水, 且可以通过沉淀、固液分离使其中悬浮物浓度大大降低, 符合以上假设条件, 因此本试验适宜IC反应器。

根据假设, 绘制IC反应器的基质变化过程模型, 如图2所示。

1.4.2 污泥床区基质降解模型的推导

根据图2, 得出污泥床区基质平衡方程式:

$$QS_i + RQS_m = (Q + RQ)S_m + K_1 X_m V_s S_m \quad (1)$$

式中 K_1 ——污泥床区基质降解动力学系数, $\text{L}/(\text{mg} \cdot \text{h})$ 。

经整理得:

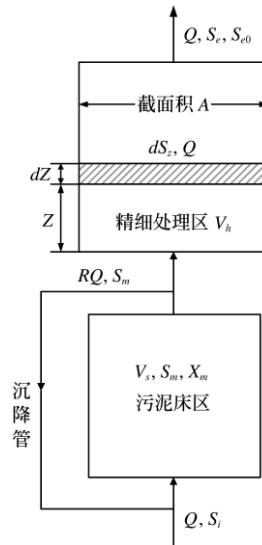
$$S_m = \frac{S_i}{1 + K_1 X_m V_s Q^{-1}} \quad (2)$$

设污水在污泥床区的停滞时间为 θ , 则

$$\theta = \frac{V_s}{Q + RQ} \quad (3)$$

由式 (1)、(2)、(3) 可得污泥床区基质降解模型:

$$S_m = \frac{S_i}{1 + K_1 X_m \theta (1 + R)} \quad (4)$$



图中: Q ——进水流量, m^3/h ; S_e ——反应器出水COD浓度, mg/L ; S_{e0} ——反应器出水溶解性COD浓度, mg/L ; S_i ——反应器进水COD浓度, mg/L ; S_m ——污泥床区出水COD浓度, mg/L ; V_s ——污泥床区有效容积, m^3 ; V_h ——精细处理区有效容积, m^3 ; R ——内循环比率; A ——精细处理区截面积, m^2 ; X_m ——污泥床区污泥浓度, mg/L ; dZ ——微元体高度, m ; Z ——微元体距离精细处理区进水口高度, m ; dS_z ——微元体内部溶解性基质浓度变化, mg/L

图2 IC反应器基质变化示意图

Fig.2 Diagram of substrate movement in IC reactor

1.4.3 精细处理区基质降解模型的推导

根据图2, 精细处理区内微元体 Adz 内的基质平衡方程:

$$-\frac{QdS_z}{Adz} = K_2 S_z \quad (5)$$

式中 K_2 ——精细处理区基质降解动力学系数, h^{-1} ; S_z ——微元体溶解性基质浓度, mg/L 。

由于 $\frac{Q}{A}$ 为推流的竖直流速 u , 令精细处理区中基质在

Z 高度上的停留时间为 $\frac{Z}{u} = \Theta$, 那么, 式 (5) 可变为微分方程:

$$\frac{ds}{d\Theta} = -K_2 S_z \quad (6)$$

在整个精细处理区高度方向上对式 (6) 积分可得精细处理区基质降解模型:

$$S_e = \varepsilon S_m e^{-K_2 \Theta} \quad (7)$$

式中: $\Theta = \frac{V_h}{Q}$, 为精细处理区中基质停留时间, h ;

$\varepsilon = \frac{S_e}{S_{e0}}$, 为溶解性COD占出水总COD比率的倒数。

1.4.4 IC 反应器基质降解动力学模型的建立

将式 (7) 带入式 (4), 得

$$S_e = \frac{\varepsilon S_i e^{-K_2 \theta}}{1 + K_1 X_m \theta (1 + R)} \quad (8)$$

式中 R ——内循环比率。

式 (8) 即为所求的 IC 反应器基质降解动力学模型。

2 试验结果及动力学系数的确定

2.1 试验结果

反应器启动后, 通过改变进水 COD 浓度和 HRT (水力停留时间) 来调节 IC 反应器的进水有机负荷, 分别在不同 COD 浓度条件下测定了反应器基质降解情况, 结果见表 1。

表1 IC 反应器处理猪场废水部分试验结果

Table 1 Experimental results of piggery wastewater treatment using IC reactor

温度 /℃	S_i /mg·L ⁻¹	S_m /mg·L ⁻¹	S_e /mg·L ⁻¹	S_{e0} /mg·L ⁻¹	ε	X_m /g·L ⁻¹	Q /L·h ⁻¹
33.2	4156.26	1662.50	1080.628	1080.63	1.00	40.19	19.8
33.1	5956.64	2084.82	1355.136	1295.35	1.05	42.09	19.6
32.8	8254.32	2641.38	1769.726	1718.43	1.03	49.85	20.7
32.6	9142.64	2742.79	1837.671	1784.41	1.03	51.19	20.4
33.4	9996.47	2599.08	1780.371	1742.22	1.02	58.66	21.5
33.0	12283.74	2825.26	1864.672	1809.83	1.03	64.35	20.1
32.9	13956.19	3070.36	2026.439	1938.33	1.05	68.84	20.4

2.2 动力学系数 K_1 , K_2 的确定

分别令:

$$\begin{cases} \frac{S_i}{S_m} = y_1 \\ X_m V_s Q^{-1} = x_1 \end{cases}, \quad \begin{cases} -\ln\left(\frac{S_e}{\varepsilon S_m}\right) = y_2 \\ \Theta = \frac{V_H}{Q} = x_2 \end{cases}$$

则式 (2)、(7) 可分别变为:

$$\begin{cases} y_1 = K_1 x_1 + 1 \\ y_2 = K_2 x_2 \end{cases}$$

将表 1 中相关数据代入上式, 分别作出 $y_1 - x_1$ 、 $y_2 - x_2$ 线性回归曲线, 如图 3、图 4。

从图 3、图 4 可以确定出 $(33 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 条件下基质降解的动力学系数 K_1 、 K_2 的值分别为:

$$K_1 \approx 0.0324, R_1 = 0.93 > \rho_{(0.01,5)} = 0.87$$

$$K_2 \approx 0.237, R_2 = 0.92 > \rho_{(0.01,5)} = 0.87$$

且, 由表 1 可以求出 $\bar{\varepsilon} = 1.03$ 。

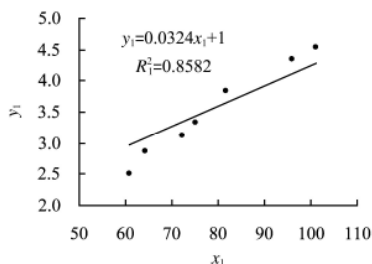


图3 $y_1 - x_1$ 曲线

Fig.3 $y_1 - x_1$ curve

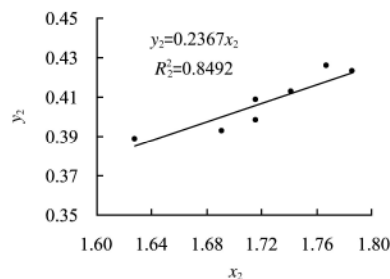


图4 $y_2 - x_2$ 曲线

Fig.4 $y_2 - x_2$ curve

将 K_1 、 K_2 代入式 (8), 并用 $\bar{\varepsilon}$ 表示 ε , 得出 IC 反应器处理猪场废水时基质降解动力学方程:

$$S_e = \frac{1.03 S_i e^{-0.237 \theta}}{1 + 0.0324 X_m \theta (1 + R)} \quad (9)$$

由式 (9) 可得, 影响 IC 反应器处理效率的因素主要有以下几个方面:

1) 内循环比率。根据模型可以看出在进水 COD 浓度和进水流量一定的情况下, 随着内循环比率 R 的增加, 反应器出水 COD 浓度降低, 基质去除效率提高。这更进一步证明了反应液内部循环在提高反应器效率方面的作用。

2) 污泥床区水力滞留期 θ 。模型中出水浓度随 θ 的增加而减小, 因此为使出水 COD 浓度降低, 就要增加 θ , 在进水流量维持不变的情况下, 为获取适宜的 θ , 就需要提高反应器污泥床区的高度, 从这个意义上说, 提高反应器的高度有利用提高基质去除效率。

3) 污泥床区污泥浓度。从模型中可以看出, 增加污泥床区污泥浓度有利于基质去除率的提高, 因此为在高水力负荷下维持 IC 反应器中污泥床区高浓度污泥, 必定要提高污泥的沉淀性能, 因此需要对污泥进行颗粒化培养。

2.3 动力学模型验证

根据式 (9) 对 IC 反应器运行 10 d 的出水 COD 浓度变化进行理论计算, 并和实测值对比, 得表 2。

表2 IC 反应器运行 10 d 的出水 COD 浓度模型计算值和实测值
Table 2 Calculated values and measured values of COD concentration of outflow from IC reactor during the ten days

试验 进程 /d	Q /L·h ⁻¹	S_i /mg·L ⁻¹	X_m /mg·L ⁻¹	R	S_e /mg·L ⁻¹		误差	
					计算值	实测值	绝对 误差 /mg·L ⁻¹	相对 误差 /%
1	20.6	5368.9	67.5	1.4	1529.0	1620.2	-91.27	-5.63
2	20.4	6698.4	63.4	1.3	1880.4	1729.4	151.97	8.73
3	19.8	5897.6	65.4	1.3	1567.4	1624.3	-56.97	-3.51
4	21.4	8523.4	68.2	1.0	2045.8	2165.7	-119.93	-5.54
5	23.7	7596.1	68.4	1.2	2268.9	2105.3	163.59	7.77
6	20.4	5543.8	65.7	1.4	1591.2	1438.5	152.64	10.61
7	20.6	6987.6	66.5	1.0	1631.9	1753.5	-121.55	-6.93
8	20.5	7475.2	64.3	0.9	1670.5	1823.8	-153.27	-8.40
9	21.7	5599.8	65.2	1.2	1571.9	1600.2	-28.34	-1.77
10	20.4	7789.2	65.7	1.4	2235.6	2040.7	194.97	9.55

由表2可知, 根据模型计算出的理论预测值与实测值的误差较小, 大多 $\leq 10\%$, 能较好的吻合试验实测值, 因此该动力学模型对IC反应器的试验运行和数据预测具有一定的指导意义。

3 结 论

1) 在假设IC反应器污泥床区各相为全混合状态、精细处理区液体为推流状态的基础上推导出了IC反应器中基质降解动力学模型, 该模型证明IC反应器处理效率的影响因素主要有内循环比率、污泥床区水力滞留时间和污泥床区污泥浓度;

2) 以猪场废水为基质, 在IC反应器稳定运行的情况下, 应用图解法分别求出了动力学参数 $K_1 \approx 0.2324 \text{ L}/(\text{mg} \cdot \text{h})$, $K_2 \approx 0.237 \text{ 1/h}$, 经验证, 模型理论计算值与试验测定值误差大多 $\leq 8\%$, 能较好的吻合试验实测值, 因此该动力学模型对IC反应器处理猪场废水的试验运行和数据预测具有一定的指导意义。

3) 在动力学模型的求解过程中, 计算数据均为IC反应器稳定运行后同一温度下所得, 因此, 能否用于IC反应器启动过程中基质的降解以及常温下的猪场废水处理还需进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] Hack P J `F M, Vellinga S H J, Habets L H A. Growth of granular sludge in the biopaq IC-reactor[A]. In: Granular anaerobic sludge; microbiology and technology[C]. Lettinga G, Field J, Vanlier J, et al. Proc. workshop Lunteren 1987, PUDDOC Wageningen 1988, 211—215.
- [2] 陈厂元. 附加气循环IC反应器处理低浓度有机废水[J]. 中国沼气, 2002, 20(4): 22—23.
- [3] 管秀琼, 陈中豪. 高效内循环反应器处理脱墨废水运行分析[J]. 纸和造纸, 2002, (2): 49—51.
- [4] Habets L H A, Engelaar A J H, Groeneveld N. Anaerobic treatment of inuline effluent in an internal circulation reactor[J]. Wat Sci Tech, 1997, 35(10): 189—197.
- [5] 张晓彦. IC厌氧工艺处理味淋酒废水的应用[J]. 酿酒科技, 2002, (4): 77—78.
- [6] 王林山, 吴 允, 张 勇, 等. 生产性IC反应器处理啤酒废水启动研究[J]. 环境导报, 1998, (4): 22—24.
- [7] 于 军. 内循环上流式厌氧污泥床启动研究[J]. 环境工程, 2000, 18 (4): 16—18.
- [8] 张 杰, 刘亚纳, 胡张保, 等. IC反应器处理猪粪废水的启动特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 777—781.
- [9] 丁丽丽, 任洪强, 华兆哲, 等. 内循环式厌氧反应器启动过程中颗粒污泥的特性[J]. 环境科学, 2001, 22 (3): 30—34.
- [10] 高剑平. 新型厌氧反应器—IC反应器结构及应用研究[J]. 漳州职业大学学报, 2002, 4(1): 77—78.
- [11] Pereboom J H F, Vereijken T L M F. Methanogenic granule development in full scale internal circulation reactor[J]. Water Science and Technology, 1994, 30(8): 9—21.
- [12] 杨世关, 张百良, 张 杰, 等. IC反应器水力特性实验研究[J]. 可再生能源, 2004, 115(3): 18—21.
- [13] 许英杰, 冯贵颖, 买文宁. 生产性IC反应器厌氧颗粒污泥的生物学特征[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(4): 94—85.
- [14] 高剑平. IC反应器运行特性及基质降解动力学模型研究[J]. 漳州职业大学学报, 2003, 5(2): 116—119.
- [15] 国家环保局. 水和废水监测分析方法 (第4版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.

Kinetics model for decomposing substrate in treating piggery wastewater in IC reactor

Ding Yi¹, Zhang Jie², Li Haihua³, Yue Jianzhi¹, Yang Shiguan¹, Zhang Bailiang^{1*}

(1. Key Laboratory of Renewable Energy Ministry of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Department of Environmental Engineering, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450012, China)

Abstract: In order to work out the laws of piggery wastewater treatment in IC reactor, theoretic kinetics model of substrate decomposing in IC reactor was set up on the basis of analysis for substrate decomposing characteristics in IC reactor, and on the basis of the hypothesis: 1) fluid state in fine treatment section and sludge bed section is flow and plug flow, respectively, 2) the relationship between substrate decomposing and concentration of microbe coincides Class I reaction model. Based on the experimental results, the kinetics parameters of substrate decomposing under the average temperature of $(33 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ were determined. The validation of the kinetic model shows that most of the errors are no more than 8%, which demonstrates that the kinetics model can provide scientific bases for piggery wastewater treatment by using IC reactor.

Key words: IC reactor; substrate decomposing; kinetics model; piggery wastewater