

# 改进的二相厌氧消化系统的特性研究\*

郭养浩 孟 春 石贤爱 张景峰 陈惠峰 林敦辉

(福州大学生物工程系, 福州 350002)

**摘要** 研究填充床酸化反应器及其与 UASB 甲烷化反应器组成的二相厌氧消化系统的运行特性. 填充床酸化反应器启动方便, 酸化速率高、抗水力冲击和 pH 波动的能力强、COD 容积负荷达  $200\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ . 采用预调碱工艺, 二相消化系统运行正常, 可高效地处理酿酒废水. 在进料 COD 浓度  $1000\text{--}7000\text{mg/L}$ 、COD 负荷  $40\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  时, 出料 COD 浓度小于  $200\text{mg/L}$ . 对抗生素生产废水也有较好的处理效果.

**关键词** 填充床酸化反应器, 二相厌氧消化, 高浓度酿造废水.

两相厌氧消化系统在微生物群系的生态平衡、处理效率和抗水力冲击能力等方面优于一相厌氧系统<sup>[1,2]</sup>, 在处理高浓度有机废水时优势更加明显. 通常, 二相厌氧处理系统需在酸化反应器和甲烷化反应器中增设中和装置, 用于保证甲烷化反应器进料所需的 pH 值<sup>[1]</sup>. 这种工艺路线增加了投资和运行费用, 使两相系统相对于一相系统的优势受到影响. 在二相厌氧处理工艺中, 酸化反应器一般采用连续全混式反应器 (CSTR)<sup>[3]</sup> 和上流式污泥床反应器 (UASB)<sup>[4]</sup>, 这2种反应器分别存在处理效率低和启动困难的缺点. 因此, 研制新型酸化反应器, 改进工艺路线, 对于进一步完善二相厌氧处理技术, 提高处理效率是有意义的. 本工作对填充床酸化反应器的启动、操作负荷和处理效率进行研究, 采用在集水池调碱、酸化反应器与甲烷化反应器直接串联的工艺考察了对合成废水、啤酒废水和抗生素废水的处理效果.

## 1 材料与方法

(1) 底物 合成废水(以蔗糖和适量无机盐配制而成); 啤酒废水(取自福州啤酒厂洗糟工序); 抗生素废水(取自福州抗生素厂).

(2) 生物反应器 酸化反应器采用全混式 CSTR(高径比  $1.5:1$ ) 或填充床反应器(高径比  $5:1$ ). 填料采用天然农作物制品, 填料系数约  $0.45$ . 甲烷化 UASB 反应器工作容积  $10\text{L}$ (直径

$12\text{cm}$ , 高度  $130\text{cm}$ ), 污泥床为成熟的颗粒污泥, 体积约  $4\text{L}$ . 所有实验在  $28\text{--}30^\circ\text{C}$  条件下操作. 实验中酸化反应器以填充床体积计, 二相系统以 UASB 甲烷化反应器中污泥层体积计.

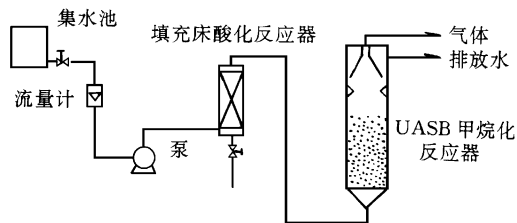


图1 二相厌氧消化工艺流程

(3) 分析方法<sup>[9]</sup> COD 浓度测定: 标准重铬酸钾法, 挥发性脂肪酸的测定: 气相色谱法; 碱度测定: 电位滴定法; pH 值测定: pH S-3 型精密酸度计; 抗生素效价测定: 由福州抗生素厂按常规方法分析,  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度分析: 甲醛滴定法.

## 2 结果与讨论

### 2.1 酸化反应器的运行特性

将一定形状的填料置于填充床酸化反应器内, 浸泡 COD 浓度  $3000\text{mg/L}$  的合成废水(或啤酒废水), 自然酸化  $2\text{--}3\text{d}$ , 然后连续进料, 物料停留时间约  $0.4\text{h}$ .  $3\text{d}$  后, 填料表面附着大量白色酸化菌, 处理效率趋于稳定, 反应器启动成

\* 福建省自然科学基金项目  
收稿日期: 1996-11-13

功. 整个二相厌氧处理系统连续正常运行.

表1为本实验所采用的填充床酸化反应器与其他文献报道的 CSTR 和 UASB 运行性能的比较. 表1表明, 填充床反应器和 UASB2 具有很高的处理能力, 这与反应器内微生物群系的聚集状态有关, 膜状和颗粒状的微生物聚集体抗水力冲击能力强, 反应器内可形成高浓度的生物催化剂, 因而, 单位容积的反应器具有高的生物降解速率. 在大流量条件下, CSTR 和 UASB1 中的微生物易流失. 酸化菌的最大比生

长速率 $0.18\text{h}^{-1}$ , 若采用 CSTR, 最大实用稀释率  $D=0.7\mu\text{m}$ , 进料废水在 CSTR 中的最小停留时间为 8h. 填充式反应器的酸化速率高于 CSTR 20 倍以上. UASB2 中污泥已颗粒化, 处理效率高, 但其启动期长, 而且启动期间污泥颗粒化过程需采取正确的措施. 表1表明, 填充床酸化反应器具有启动期短, 启动方便, 酸化率高, COD 容积负荷大 [ $200\text{kg}/(\text{d}\cdot\text{m}^3)$ ] 和抗水力冲击能力强(停留时间 0.4h) 的特点, 优于 CSTR 和 UASB 类型的反应器.

表1 不同类型酸化反应器的运行特性

反应器类型	容积负荷/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$	微生物聚集状态	停留时间/h	酸化率 <sup>1)</sup> /%	启动时间/d	废水种类
填充床1	200	生物膜	0.4	51.4	6	合成废水
填充床2	200	生物膜	1.5	60.0	6	啤酒废水
CSTR1 <sup>[3]</sup>	9.6	游离	10	21.4	9	合成废水
CSTR2 <sup>[5]</sup>	9.6	游离	10	41		合成废水
UASB1 <sup>[1]</sup>	39.2	絮状	4	40	7	啤酒废水
UASB2 <sup>[4]</sup>	210	颗粒	3.7		20	合成废水

1) 酸化率= 出料中挥发性脂肪酸总重量浓度/ 进料 COD 浓度

酸化菌代谢的 最佳 pH 值为 6.5—7.0, 但其 pH 适应能力较强, 在 pH5.0—9.0 范围内均具有较高的酸化活性\*. 本实验采用预调碱度、酸化反应器和甲烷化反应器串联的工艺, 考察了不同酸化反应器出料 pH 的波动情况(见图 2). 在一定的进料浓度和进料碱度条件下, 酸化反应器出料的 pH 值反映了已被酸化的物料占总进料的分率. 2.5L 的 CSTR 反应器的 COD 操作负荷为  $32\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  时, 物料的 pH 值从进口的 9.8 仅下降至出口的 8.8, 表明 CSTR 酸化效率低. 采用填充床酸化反应器, COD 操作负荷可提高至  $200\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ . 填充床体积 0.5L, 停留时间 0.4h 条件下, 出料 pH 值波动范围 6.4—7.4, 基本上可满足工艺要求. 改用 2L 填充床反应器, 停留时间 1.5h, 出料的 pH 值稳定在  $6.4\pm 0.1$ . 采用 2L 填充床酸化反应器和 10L UASB 甲烷化反应器组成二相厌氧处理系统, 酸化反应器出料酸化率达 50% 以上, 甲烷化反应器进料 pH 值稳定, 从而保证了二相系统连续稳定高效地运行. 下述实验均采用此套系统. 实验表明, 填充床酸化反应器适用于预调碱工

艺, 系统运行正常, 相对于传统工艺可简化流程, 降低设备投资和运行费用.

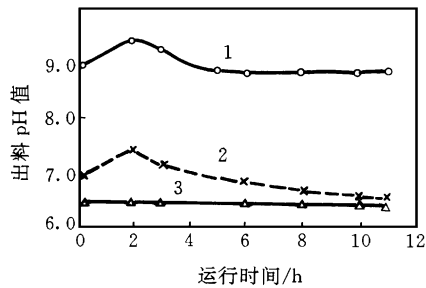


图2 不同酸化反应器出料 pH 值随时间变化曲线

- 1. CSTR, 2.5L, COD 负荷 $32\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ , 进料 pH9.8
- 2. 填充床, 2.0L, COD 负荷 $200\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ , 进料 pH10.5
- 3. 填充床, 0.5L, COD 负荷 $200\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ , 进料 pH10.5

2.2 改进的两相厌氧消化系统对不同来源废水的处置

2.2.1 合成废水和啤酒废水

采用合成废水和啤酒废水, 在进料流量不变的条件下, 提高进料中 COD 浓度, 考察不同进料负荷对 COD 去除速率的影响(图3). 进料浓度的变化与进料负荷的变化成正比. 随着进

\* 孟春, 福州大学生物工程硕士论文, 1996

料负荷的增加, COD 实际去除速率相应增加。当进料负荷增至  $50 \text{ kg}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$  时, COD 去除率趋于极限值。采用填充床酸化反应器和 UASB 甲烷化反应器组成的二相系统处理高浓度酿酒类易降解的废水, 具有很高的处理能力。在本实验条件下, 单位容积反应器的最大处理能力约  $45 \text{ kg}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$  (以 UASB 中污泥层体积计)。在实际运行时, 控制合适的进料负荷, 使其略低于最大处理能力, 在确保反应系统高处理效率的同时可保证一定的出水水质。

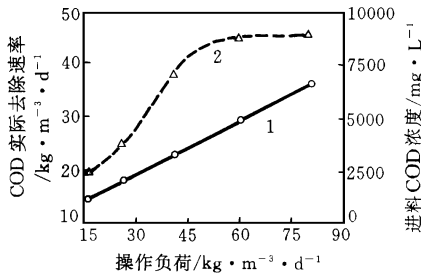


图3 操作负荷对二相系统实际 COD 去除速率的影响

1 进料 COD 浓度 2 COD 实际去除速率

图4为啤酒废水的降解过程。在进料负荷  $40 \text{ kg}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ , 进料 COD 浓度  $1000\text{—}7000 \text{ mg}/\text{L}$  范围内, 均可获得理想的去除率。低进料浓度 ( $< 1500 \text{ mg}/\text{L}$ ) 时, COD 去除率  $85\%\text{—}90\%$ , 出水 COD 浓度约  $100\text{—}150 \text{ mg}/\text{L}$ 。在高进料浓度 ( $5000\text{—}7000 \text{ mg}/\text{L}$ ) 时, COD 去除率达  $95\%\text{—}98\%$ 。出口 COD 浓度约  $180\text{—}200 \text{ mg}/\text{L}$ 。尽管二相厌氧消化系统对酿酒废水的处理效率很高, 由于动力学的原因, 排放水仍难以达到地面水排放标准 ( $\text{COD} < 100 \text{ mg}/\text{L}$ )。然而, 根据我国国情, 从控制排放总量的要求考虑, 改进的二相厌氧消化反应仍不失为酿酒废水(特别是高浓度废水)处理的高效、节能的首选处理技术。

### 2.2.2 抗生素生产废水

经板框压滤后排放的金霉素生产废水, pH

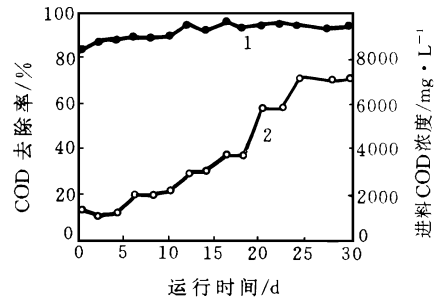


图4 啤酒废水厌氧处理过程

1. COD 去除率 2. 进料 COD 浓度

约  $6.0$ , COD 浓度  $1000\text{—}1200 \text{ mg}/\text{L}$ , 金霉素效价  $70\text{—}100 \text{ u}/\text{ml}$ 。在  $20 \text{ kg}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$  操作负荷下, 二相系统运行正常。出水 COD  $100\text{—}200 \text{ mg}/\text{L}$ , COD 去除率达  $85\%\text{—}90\%$ 。酸化反应器出料的金霉素效价与系统进料相同, 甲烷化反应器出料的效价为  $0$ , 说明金霉素效价的去除发生在甲烷化反应器。

卡那霉素生产废水中含有大量的以豆饼渣和菌体为主的悬浮固体, pH  $3.6$ , 经静置沉降后, 取上清液作为厌氧处理实验的进料, COD 浓度约  $10000\text{—}15000 \text{ mg}/\text{L}$ 。各批实验进料加水配制成所需浓度, pH 调至  $7.0\text{—}7.5$ 。单纯处理卡那霉素废水, 操作负荷小于  $20 \text{ kg}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$  时, COD 去除率  $65\%\text{—}71\%$ ; 提高进料浓度至  $5000 \text{ mg}/\text{L}$  [操作负荷  $30 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ], COD 去除率下降至  $46.6\%$ 。在进料中添加啤酒废水, 在同样操作负荷下, COD 去除率显著增加, 达  $84.3\%$ , COD 实际降解速率从  $9.6 \text{ kg}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$  增加至  $23.4/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$ 。在表2所示的后3批实验进料中, 卡那霉素的效价相同, 均为  $32 \text{ u}/\text{ml}$ , 因而抗生素抑菌作用<sup>[6]</sup>不是本实验中单纯卡那霉素废水 COD 去除率不太高的主要原因。出料分析表明, 系统中存在大量的  $\text{NH}_3\text{-N}$ 。抗生素工业废水中游离  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度一般小于  $200 \text{ mg}/\text{L}$ 。除了微生物的增长需求外, 过量的蛋白质或其他含 N 物质是厌氧消化系统难以处理的<sup>[7]</sup>。添加啤酒废水, 改善了进料的碳氮化, 有助于提高二相厌氧消化系统的处理效率。

(下转第44页)

表5 不同人群主观反应差异对应的声级阈值差

反应类型		男-女	青年-中老年	脑力-体力	健康-非健康
烦恼度/ 昼	阈值差/ dB( A )	0. 3	4. 2	1. 8	4. 6
	高干扰率/ %	0. 9	10. 8	6. 2	6. 5
睡眠干扰/ 夜	阈值差/ dB( A )	0. 7	6. 3	2. 2	6. 5
	高干扰率/ %	0. 5	13. 2	4. 9	12. 1
思考干扰/ 昼	阈值差/ dB( A )	0. 4	1. 2	- 1. 0	1. 5
	高干扰率/ %	0. 2	6. 6	9. 8	7. 9
语言干扰/ 昼	阈值差/ dB( A )	0. 6	2. 1	- 0. 8	3. 5
	高干扰率/ %	1. 2	9. 7	8. 8	15. 8

6 小 结

(1) 现场调查与声级测量的研究表明, 对交通噪声的所有主观反应, 高反应率均随交通噪声的增大而增高, 但由于个体的差异, 少数人的反应不遵循这一规律.

(2) 高架桥路建成后, 人群的主观高反应率普遍升高了, 这为城市高架桥路和临街建筑的规划设计提供了依据. 比如, 不在高架桥路附近建高层建筑或高架桥路尽量避开临近高层建筑群. 若不可避免时, 应加大防噪措施.

(3) 不同人群对高架桥路噪声主观反应百

分率的差异大小与其主观反应声级阈值差的大小相一致.

(4) 高架桥路两侧噪声等效声级昼间 60dB( A ) , 夜间 50dB( A ) 时, 不同人群主观高反应率均处于低水平, 这对高架桥路而言是不易达到的环境噪声水平.

参 考 文 献

1 赵仁兴. 噪声与振动控制, 1994. 10( 5) : 20  
2 柳孝图. 噪声与振动控制, 1989. 8( 4) : 22  
3 陈子明等. 环境科学, 1994. 4( 11) : 24  
4 Lambert J et al. . Journal of Sound and Vibration, 1984, 92 ( 2) : 159

( 上接第40页)

表2 卡那霉素废水厌氧处理实验

操作负荷/ kg•d <sup>-1</sup> •m <sup>-3</sup>	10	20	30	30	40
进料 COD 浓度/ mg•L <sup>-1</sup>	1200 <sup>2)</sup>	3200 <sup>2)</sup>	5000 <sup>2)</sup>	5000+ 2000 <sup>1)</sup>	5000+ 2000 <sup>1)</sup>
出料 COD 浓度/ mg•L <sup>-1</sup>	500	1120	2670	1100	2000
COD 去除率/ %	71. 0	65. 3	46. 6	84. 3	71. 0
出料 NH <sub>3</sub> -N/ mg•L <sup>-1</sup>		400	720	401	521
COD 降解速率/ kg•d <sup>-1</sup> •m <sup>-3</sup>	7. 1	9. 8	9. 6	23. 4	34. 0

1) 进料 COD 浓度中5000mg/L 来自卡那霉素废水, 2000mg/L 来自啤酒废水 2) 由卡那霉素废水加水配制而成

3 结 论

(1) 填充床酸化反应器启动方便, 酸化速率高, 容积负荷大, 具有较强的抗水力冲击和抗 pH 波动的能力, 优于 CSTR 和 UASB 酸化反应器.

(2) 以填充床酸化反应器与 UASB 甲烷化反应器组成的二相厌氧消化系统, 采用预调碱工艺, 运行正常.

(3) 经合理设计和控制的二相消化系统可有效地处理啤酒废水和金霉素废水. 在40kg/

(d•m<sup>3</sup>) 负荷条件下处理啤酒废水, 排放水 COD 浓度可控制在200mg/L 以下, 对卡那霉素废水有一定的处理效果.

参 考 文 献

1 严月根. 中国环境科学, 1990, 10( 4) : 304  
2 郭养浩. 微生物学通报, 1995, 22( 5) : 289  
3 Cohen A et al. . Water Research, 1979, 13: 571  
4 杨虹. 上海交通大学学报, 1995, 29( 5) : 165  
5 Zoenemeyer R J et al. . Water Research, 1982, 16: 303  
6 王蕾. 环境科学, 1992, 13( 3) : 51  
7 刘双江. 环境科学, 1991, 12( 3) : 7

leached for ten years are more than 7, except the brown earth which become acid under pH 2 in the fourth year. The total losses of the leached base ions are: After ten years leaching, lime concretion black soil > salt-affected soil > chao soil > brown earth. The sensitivity of base ions to acid rain are:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+, \text{Na}^+$ . The simulated acid rain has activation to the aluminium in the soils. There is no active aluminium in the four types of soils except the brown earth which the active aluminium appears in pH2. It has obvious improvement effect to apply lime to the acid brown earth.

**Key words:** simulated acid rain, simulated earth volume test, physical and chemical properties of soil, active aluminium.

**A Study on the Treatment of Black Liquor from Bamboo Pulping Process with Sequencing Batch Reactor Biological Technique.** Yan Shanghua, Chen Min et al. (Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(3), 1997, pp. 30\_33

In this paper, the treatment of bamboo pulping black liquor in which lignin has been separated by acid with sequencing batch reactor (SBR) was investigated. The experimental results showed that BOD<sub>5</sub> and COD in black liquor increased remarkably with the treatment of SBR, BOD<sub>5</sub> removal rate is 70%—83%, COD removal rate is 54.5%—63%, the effluent BOD<sub>5</sub> and COD after the treatment are 76—101 mg/L and 419—500mg/L respectively when influent COD is 1090—1170mg/L. The technology of combining internal decomposition with SBR is more efficient for treatment of black liquor, BOD<sub>5</sub> and COD removal rate are 67%—68% and 71.4%—76.9% respectively, the effluent BOD<sub>5</sub> and COD from this system are 33—48mg/L and 242—315mg/L respectively when influent COD is 1046—1100mg/L. It is in keeping with GB8978-88 effluent standard. The internal decomposition remarkably increase the effectiveness of follow-up SBR treatment. In addition, the kinetics of first order degradation reaction of COD was studied. The kinetic constant and undegradable COD had been calculated. Simulated data tally with experimental data well.

**Key words:** SBR, biological technique, internal decomposition, bamboo pulp, black liquor, biological degradation, sequencing batch reactor.

**Study on the Formula of Expansion Characteristic of Three-phase Biological Fluidized Bed.** Pan Tao, Wu Yangshan, Wang Shaotang

(Beijing Municipal Research Academy of Environmental Protection, Beijing 100037): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(3), 1997, pp. 34\_37

The formula of expansion characteristic in the three-phase biological fluidized bed has been founded in this study. When the empty-bed velocity of liquid and gas as well as the thickness of bio-film are known, the high of bed expansion is determined rather precisely, which provided basis for design. It is unusual that the expand ruler in both the two-phase bed and three-phase fluidized bed are reflected by using one equivalent function; the relationship of the dynamic in biochemical reaction and behavior of hydromechanics has been set up by the thickness of bio-film. The behavior of shrink in bed under the low velocity of gas can be reflected by this formula, and the formula in three-phase bed can be restored to one in two phase bed when the velocity of gas is zero. The tested bed is 1.4m of diameter and 6.5m of high, in which the diameter of media made of quartz sand is 0.3—0.5mm, using air jet for aeration inside the reactor. The test is within the bio-film thickness of 52, 80, 115, 137m, respectively. The BOD<sub>5</sub> concentration in the sewage tested are 47.6—77.2mg/L.

**Key words:** three-phase biological fluidized bed, rate of expansion, formula based on experimental data, equivalent function, thickness of bio-film, method for design, wastewater treatment.

**Study on the Operation Characters of a Modified Two-Phase Anaerobic Digestion System.** Guo Yanghao, Men Chun, Shi Xianai et al. (Dept. of Biotechnology, Fuzhou University, Fuzhou 350002): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(3), 1997, pp. 38\_40

In this work the operation characters of the two-phase anaerobic digestion system incorporated by a packed bed acidification reactor and an UASB methanorization reactor were studied. The packed bed acidification reactor started up easily and possessed of a high acidification rate and a good resistance against hydraulic impulsion and pH fluctuation. The COD volume charge was higher than 200 kg/(m<sup>3</sup>·d). Adopting a preadjusting alkalinity technology, the two-phase system could operate normally and effectively for treating brewing wastewater. Under the conditions of COD concentration 1000—7000 mg/L in the feed and COD charge 40 kg/(m<sup>3</sup>·d), the COD concentration was less than 200 mg/L in the effluent. The system possessed also a rather good capacity for treating antibiotics wastewater.

**Key words:** packed bed acidification reactor, two-phase anaerobic digestion system, brewing wastewater of high concentration.

**An Investigation of the Subjective Response to the Traffic Noise of an Elevated Highway or**