

# 同心圆复合式厌氧水解酸化反应器的 中试应用与特性分析

张 龙<sup>1</sup>, 刘伟京<sup>1</sup>, 吴 伟<sup>1</sup>, 张双圣<sup>2</sup>, 王晓青<sup>2</sup>

(1. 江苏省环境科学研究院, 南京 210036; 2. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:**设计开发了 1 种同心圆式新型水解酸化反应器, 使用搅拌和上清液回流强化泥水混合效果, 有效提高了废水的可生化性。中试研究表明: 针对两类不同水质的难降解废水, 其对 COD 的去除率超过 46% 和 36%, 并通过改变运行方式有针对性地降低运行成本。通过与其他各类水解酸化反应器的对比实验, 新型水解酸化反应器可以提高 6 个百分点左右的 COD 去除效果。

**关键词:**水解酸化反应器; 难降解废水; 可生化性; 同心圆结构

中图分类号: X 505 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)05-0093-04

## Features of Hydrolysis-acidogenesis Reactor in Concentric Structure and Its Pilot-scale Application

ZHANG Long<sup>1</sup>, LIU Wei-jing<sup>1</sup>, WU Wei<sup>1</sup>, ZHANG Shuang-shen<sup>2</sup>, WANG Xiao-qing<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, P. R. China;

2. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116 Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:** A novel hydrolysis-acidification reactor in concentric structure was designed and developed, which could improve the biodegradability of wastewater effectively by the enhancement of the mixture performance due to the stirring and reflux. The pilot-scale study showed that the COD removal rate could reach over 46% and 36% respectively treating the two different kinds of refractory wastewater. Moreover, the reactor could cut down the operational cost through the variation of the operation mode. According to the comparison with other hydrolysis-acidification reactors, the result showed that a 6 percentage point of improvement in COD removal could be reached to the novel hydrolysis-acidification reactor.

**Key words:** hydrolysis-acidogenesis reactor; refractory wastewater; biodegradability; concentric structure

水解酸化工艺通过控制酸化过程, 利用污泥中的厌氧微生物, 可以将废水中非溶态或难降解的大分子有机物转化为溶态易降解的小分子有机物<sup>[1-2]</sup>, 显著提高废水的可生化性, 因此越来越多地应用于各种难降解废水的预处理中, 并且具有剩余污泥产量少、能耗低、操作简单、效果稳定等优点。通过长期的实践研究表明, 影响水解酸化处理效率的主要

因素是: 进水布水的均匀性以及泥水混合的充分性<sup>[3-4]</sup>。广大环保科技工作者基于这 2 点, 优化了水解酸化反应器的工艺结构, 开发出了多种水解酸化反应器, 并取得了较好的实际应用效果。依据水解酸化反应器中水体流动的形态, 各种反应器可以归纳为 3 类: 升流式、折流式和推流式<sup>[5-9]</sup>。其中升流式水解酸化反应器脱胎于 UASB 反应器, 依靠进水

收稿日期: 2010-02-18

基金项目: 国家重大科技专项(2008ZX07313-005, 2008ZX07101-003)

作者简介: 张龙(1983-), 男, 博士生, 主要从事水污染控制技术研究, (E-mail) zhanglong48@sohu.com。

由下而上的升力,达到泥水混合、反应、分离的效果;折流式水解酸化反应器通过反应器内布置的折流板,实现废水在反应器内上行一下行的运行,目前应用较多的是 ABR 反应器;而推流式水解酸化反应器依靠动力,使废水和污泥实现搅拌混合,进行反应。各类反应器各具优点又各有缺点,其中缺点集中在布水不均匀,泥水混合不完全,布水管容易堵塞等问题上。

针对现有厌氧水解反应器的不足,将 3 类反应器优点进行集成,设计开发出一种新型厌氧水解反应器,集成升流式、折流式和推流式反应器的优点。中试实际运行结果表明,该反应器对各类难降解废水具有较好的处理效果,同时,模块化的设计使之针对不同水质的废水,可以调整运行方式,降低运行费用,具有较大的灵活性。

## 1 材料与方 法

### 1.1 新型水解酸化反应器

新型水解酸化反应器结构示意图如图 1 所示,反应器为同心圆结构,其中穿孔布水管、回流布水管和上清液收集管均为环形穿孔布水管。在实际应用中,进水通过环形布水器进入预反应区,与厌氧污泥进行初步混合反应,然后进行上流式反应,废水上升流速大,并且可以通过上清液回流或搅拌器搅拌强化混合效果。之后废水下行,通过折流板进行 2 次扰动达到泥水混合的目的,反应区体积大,污水上升流速小,并通过填料区水解酸化生物膜的反应,强化处理效果,有效提高废水可生化性。反应区污泥自流回流至预反应区,泥水分离效果较好,出水进入后续反应器进行后续处理。水解酸化反应器的容积为  $1.24 \text{ m}^3$ ,水力停留时间为  $12 \sim 32 \text{ h}$ ,搅拌速度为  $60 \sim 120 \text{ r/m}$ ,上清液回流比为  $50\% \sim 300\%$ ,使用填料为 K3 填料。反应器的主要创新点在于实现无动力的污泥内回流,以及实现上流式、推流式和折流式厌氧水解反应器的有机结合。

### 1.2 实验水样

使用 2 类不同废水对新型水解酸化反应器性能进行实验和评估,①类为某印染厂综合废水,经过格栅和调节池之后出水,水质分析平均值如下:COD 为  $544.0 \text{ mg/L}$ , $\text{NH}_3\text{-N}$  为  $25.5 \text{ mg/L}$ ,TN 为  $32.3 \text{ mg/L}$ ,TP 为  $2.5 \text{ mg/L}$ ,色度 300 倍, $\text{B/C} = 0.19$ 。②类为某化工园区综合废水,为园区污水厂集水井出水,主要含有苯类物质、染料和生活污水,以印染废水为主(占  $86.7\%$ ),水质分析平均值如下:

COD 为  $313.0 \text{ mg/L}$ , $\text{NH}_3\text{-N}$  为  $30.3 \text{ mg/L}$ ,TN 为  $35.9 \text{ mg/L}$ ,TP 为  $4.4 \text{ mg/L}$ ,色度 280 倍, $\text{B/C} = 0.30$ 。

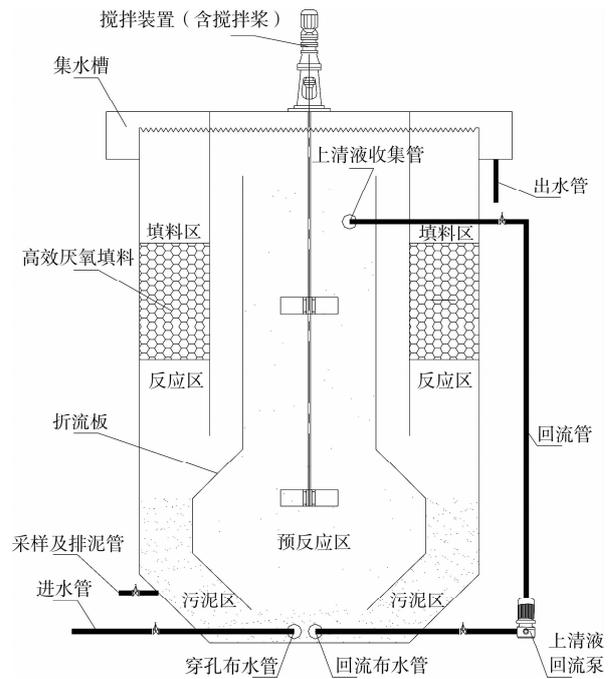


图 1 新型水解酸化反应器结构示意图

### 1.3 分析方法

实验分析指标,包括 MLSS、COD、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 以及色度均按照《水和废水监测分析方法(第 4 版)》相关方法进行测试。生物相观察使用 40 倍生物显微镜 LED XSP-10C(上海光学仪器厂)。挥发性脂肪酸(VFA)含量的测定选用蒸馏滴定法<sup>[10-11]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 水解酸化反应器的启动

水解酸化反应器接种污泥选用周边污水厂水解酸化池含水污泥,MLSS 浓度为  $8 \text{ g/L}$  左右,投加量为  $0.3 \text{ m}^3$ ,接种后进水,开动搅拌器和上清液回流泵,搅拌速度为  $90 \text{ r/m}$ ,上清液回流量为  $100\%$ ,水解酸化反应器水力停留时间为  $24 \text{ h}$ 。污泥接种后,每日投加好氧系统剩余污泥  $10 \text{ L}$ ,连续投加 3 周,反应器底部采样结果如图 2 所示。

图 2 可知,通过 3 周的运行,水解酸化反应器底部污泥的 MLSS 超过  $9 \text{ g/L}$ ,并逐渐稳定。同时,污泥具有较好的流动性,泥水分离界面距水面  $0.3 \text{ m}$ ,表明整个反应器有较好泥水混合和分离效果。运行 6 个月以来,填料挂膜效果理想,且未进行排泥。

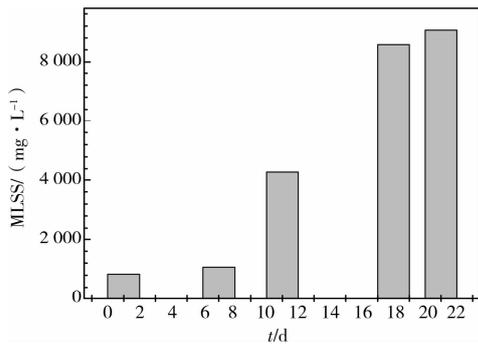


图 2 水解酸化反应器底部污泥 MLSS 变化

### 2.2 水解酸化反应器运行方式的筛选

水解酸化反应器的运行方式有 4 种:搅拌、回流、搅拌+回流以及无动力运行(无搅拌也无回流)。实际运行中,以 2 类废水作为处理对象,搅拌和回流选择以 3 水平因子进行对比,单因子表征的运行时间为 2 周,其主要的运行结果对比如表 1。

表 1 厌氧水解反应器不同运行方式下处理效果对比

	①类废水			②类废水		
	进水	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%
无动力	503	309	38.6	268	202	24.6
50 r/m	555	335	39.6	282	205	27.3
搅拌						
90 r/m	513	300	41.5	288	195	32.2
120 r/m	498	297	40.4	283	189	33.1
50%	522	325	37.7	307	208	32.2
回流						
100%	464	268	42.2	273	181	33.7
200%	491	279	43.2	329	214	35.0
搅拌+回流	532	284	46.6	337	213	36.8

备注:指标为 COD,单位 mg/L,每日采样 1 次,表中数据为 2 周数据平均值,搅拌+回流条件中,搅拌强度为 90 r/m,回流量 100%。

总体比较来说,搅拌+回流的效果最好,无动力运行效果最差。在搅拌和回流运行条件的筛选中,总体而言,随着搅拌强度和回流量的增大,效果要稍好一点,但提升幅度并不明显。尤其是对 COD 浓度较低的②类废水,提高搅拌强度或者回流量效果并不明显。因此,从能耗和运行成本考虑,针对进水污染物浓度较高的废水,推荐使用搅拌加回流运行方式,其中搅拌强度为 90 r/m,回流比为 100%。而针对进水污染物浓度较低的废水,则推荐使用搅拌,而不使用回流,搅拌强度选为 90 r/m。

### 2.3 水解酸化反应器处理效果

新型水解酸化反应器对 2 类废水的实际运行效果如表 2 所示。

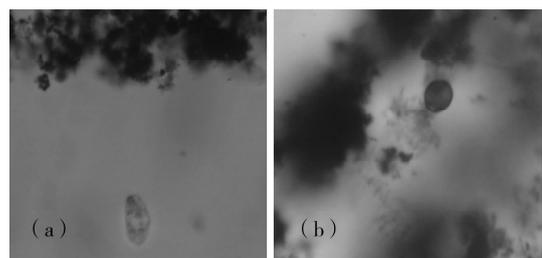
表 2 针对不同废水厌氧水解反应器处理效果对比

	①类废水			②类废水		
	进水	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	544.0	302.8	44.3	313.0	204.6	34.6
B/C/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.19	0.36	—	0.30	0.38	—
NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	23.5	30.7	—	30.3	32.5	—
TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	32.3	38.2	—	35.9	36.6	—
TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	2.5	3.2	—	4.4	4.9	—
色度/倍	300	100	66.7	280	90	67.9
VFA/(mg·L <sup>-1</sup> 乙酸当量)	58.2			55.5		

备注:运行方式为搅拌(90 r/m)+回流(100%),数据运行 30 d 平均值。“—”表示数据为负值。

系统运行中,除表 2 数据以外,二者水力停留时间均为 24 h,但二者系统中的污泥浓度略有不同,①类废水处理系统污泥浓度 MLSS 在 1 800~2 500 mg/L 之间,平均 2 130 mg/L,②类废水处理系统污泥浓度 MLSS 在 2 000~2 800 mg/L 之间,平均 2 520 mg/L。此外,由表 2 可知:水解酸化反应器对 COD、色度的去除效果较为明显,对 B/C 的提升效果也较为明显。此外,经过水解酸化处理后,出水的氨氮、总氮和总磷都有提高,总磷的提高是由于微生物在厌氧环境下的释磷作用,而氨氮和总氮的提高,是由于 2 类废水中都含有大量印染废水,水解酸化作用对印染废水的处理,会导致含氮染料降解为胺类物质,从而导致总氮、氨氮浓度的上升<sup>[12-13]</sup>。

水解酸化反应器中的的生物相主要是兼性酸化菌、产甲烷菌和其他一些菌类,其组成为复杂的菌胶团,一般较难在低倍数的显微镜下观测到生物相。但由表 2 可知,新型水解酸化反应器 VFA 的产量较大,因此判断其所含酸化菌的活性很强。此外,经过长时间连续观察,在水解酸化反应器污泥中也发现了少量原生动物,其生物相如图 3 所示。



(a) 扭头虫, (b) 钟虫

图 3 新型水解酸化反应器生物相

### 2.4 新型水解酸化反应器与其他反应器对比

除了实验的新型水解酸化反应器之外,针对①

类废水的处理,与另外 3 种厌氧水解反应器进行了 结果如表 4 所示:  
 比对,4 类反应器的具体构造对比如表 3 所示,对比

表 3 4 类水解酸化反应器结构和运行参数

序号	名称	尺寸/m	HRT	备注
1	新型水解酸化反应器	$D * H=1.0 \times 1.8$	24 h	
2	上流式水解酸化反应器	$D * H=1.6 \times 3.9$	24 h	
3	折流式水解酸化反应器	$L * B * H=3.6 \times 1.2 \times 2.0$	24 h	5 格 ABR
4	推流搅拌式水解酸化反应器	$L * B * H=3.6 \times 1.2 \times 2.0$	24 h	2 台搅拌机推流

表 4 4 类水解酸化反应器运行效果对比

指标	进水	1		2		3		4	
		出水	去除率/%	出水	去除率/%	出水	去除率/%	出水	去除率/%
COD	544.0	291.8	46.4	324.8	40.3	325.2	40.2	329.8	39.4
B/C	0.19	0.40	—	0.36	—	0.35	—	0.34	—
NH <sub>3</sub> -N	23.5	30.7	—	31.2	—	31.3	—	31.5	—
TN	32.3	38.2	—	39.3	—	39.6	—	39.5	—
TP	2.5	3.2	—	3.3	—	3.2	—	3.3	—
色度	300	100	66.7	120	60.0	120	60.0	125	58.3
VFA	—	56.6		48.2		48.0		46.3	

备注:反应器序号与表 3 对应,单位除 B/C(无量纲)、VFA(mg/L)乙酸当量与色度(倍)外均为 mg/L。数据为运行 30 d 平均值,“—”表示数据为负值。

由表可知:几种反应器对废水的处理效果都较好,其中新型厌氧水解反应器在 COD 的去除上有明显的优势,提升幅度约为 6 个百分点左右,在 B/C 的提高以及对色度的去除上也有一定的优势。

### 3 结论

1)设计开发了一种同心圆新型水解酸化反应器,其集成上流式、折流式和推流式水解酸化反应器的优点,结构简单,可以有效处理不同水质的难降解废水,针对实验中两类不同废水,处理出水中 VFA 超过 50 mg/L 乙酸当量。

2)针对不同的废水,可以启用不同的运行方式,处理高浓度废水时,可以通过搅拌+回流的方式强化泥水混合效果,提高处理效率;在处理低浓度废水时,可以不使用上清液回流设备,在取得较好去除效果的条件下降低运行成本,在实际应用中具有较好的灵活性。

3)和其他各种类型的厌氧反应器相比,新型水解酸化反应器可以提高 6 个百分点左右的 COD 去除效果。

#### 参考文献:

[1] WU H F, WANG S H, KONG H L, et al. Performance of combined process of anoxic baffled reactor-biological contact oxidation treating printing

and dyeing wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(7):1501-1504.

- [2] YALCIN A O, ORHAN I, TOM D, et al. Determination of optimum operating conditions of an acidification reactor treating a chemical synthesis-based pharmaceutical wastewater[J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41(11):2258-2263.
- [3] 韩相奎,桑连海,叶长兵,等. 高效水解酸化废水处理技术初步研究[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(6):721-725.  
 HAN XIANG-KUI, SANG LIAN-HAI, YE CHANG-BING, et al. Wastewater treatment by high efficient hydrolysis-acidogenesis process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6):721-725.
- [4] YOUNG H A, KYUNG S M, RICHARD E S. Preacidification in anaerobic sludge bed process treating brewery wastewater[J]. *Wat. Res.*, 2001, 35(18):4267-4276.
- [5] AZBAR N, URSILLO P, SPEECE E R. Effect of configuration and substrate complexity on the performance of anaerobic processes [J]. *Water Research*, 2001, 35(3):817-829.
- [6] WENTZEL M C, MOOSBRUGGER R E. Tentative guidelines for waste selection, process design, operation and control of upflow anaerobic sludge bed reactors[J]. *Water Sci. Technol.*, 1995, 31(12):31-42.

(下转第 134 页)

- [8] 周正茂, 龚振球, 王素娟. 倒退分析法确定拉索中钢绞线的张拉力[J]. 公路交通科技, 2009, 26(4):73-77.  
ZHOU ZHENG-MAO, GONG ZHEN-QIU, WANG SU-JUAN. Tension control for strands in cables based on reverse analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(4):73-77.
- [9] 张育智, 李乔, 唐亮. 宜宾中坝金沙江大桥索力控制研究[J]. 铁道标准设计, 2005(8):27-30.  
ZHANG YU-ZHI, LI QIAO, TANG LIANG. Research of tension control in yi bin zhong ba jin sha jiang bridge[J]. Railway Standard Design, 2005(8):27-30.
- [10] 陈常松, 颜东煌, 程海浅, 等. 大跨度 PC 斜拉桥施工控制中的温度效应分析[J]. 公路交通科技, 2002, 19(6):84-87.  
CHEN CHANG-SONG, YAN DONG-HUANG, CHEN HAI-QIAN, et al. Analysis of temperature influence on long-span prestressed concrete cable-stayed bridge construction control[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(6):84-87.
- [11] ELBADRY M M, GHALI A. Temperature variations in concrete bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(10):2355-2374.
- [12] 李盼到, 朱巍志, 郭慧乾. 大跨度混凝土斜拉桥温度效应的研究与分析[J]. 特种结构, 2007, 24(1):76-80.  
LI PAN-DAO, ZHU WEI-ZHI, GUO HUI-QIAN. Study and analysis of temperature effects on long-span concrete cable-stayed bridge[J]. Special Structures, 2007, 24(1):76-80.
- [13] ZHAO-DONG XU, ZHI-SHENG WU. Simulation of the effect temperature variation on damage detection in a long-span cable-stayed bridge[J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6(3):177-189.
- [14] BARR P J, STANTON J F, EBERHARD M O. Effects of temperature variations on precast, prestressed concrete bridge girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(2):186-194.
- [15] 周天宇, 陈双庆. 矮塔斜拉桥环氧钢绞线拉索张拉施工技术[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2009, (2):127-130.  
ZHOU TIAN-YU, CHEN SHUANG-QING. Tensile construction technique of Epoxy-coated Strand Stayed-Cable in Extradosed Cable-stayed bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology Edition, 2009, (2):127-130.

(编辑 胡 玲)

(上接第 96 页)

- [7] 韩相奎, 叶长兵, 林年丰, 等. 异波折板高效水解酸化废水的处理技术[J]. 中国环境科学, 2004, 24(3):360-363.  
HAN XIANG-KUI, YE CHANG-BING, LIN NIAN-FENG, et al. The treatment technology of wastewater treatment by high efficient hydrolysis-acidogenesis of anaerobic baffled reaction (ABR) [J]. China Environmental Science, 2004, 24(3):360-363.
- [8] KRISHNA G G, KUMAR P, KUMAR P. Treatment of low strength complex wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(17):8193-8200.
- [9] 郭永福, 郭维华. 内循环式水解酸化反应器的动态实验研究[J]. 苏州科技学院学报:工程技术版, 2003, 16(4):11-15.  
GUO YONG-FU, GUO WEI-HUA. A dynamic experiment on the internal-circulation hydrolytic-acidification reactor[J]. J. of University of Science and Technology of Suzhou: Engineering and Technology, 2003, 16(4):11-15.
- [10] AHAV O, LOEWENTHAL R E. Measurement of VFA in anaerobic digestion; the five-point titration method revisited[J]. Water S. A., 2000, 26(3):389-392.
- [11] 许传珍, 孙村宝, 郝二成, 等. 5 点 pH 值滴定法测定 VFA 方法的研究[J]. 市政技术, 2007, 25(1):54-56.  
XU CHUAN-ZHEN, SUN CHUN-BAO, HAO ER-CHENG, et al. Research of measuring VFA by titration of pH value in 5 points [J]. Municipal Engineering Technology, 2007, 25(1):54-56.
- [12] WANG X Y, ZENG G M, ZHU J L. Treatment of jean-wash wastewater by combined coagulation, hydrolysis/acidification and Fenton oxidation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153(1/2):810-816.
- [13] 喻学敏, 白永刚, 刘伟京, 等. ABR 反应器预处理综合印染废水的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(6):981-984.  
YU XUE-MIN, BAI YONG-GANG, LIU WEI-JING, et al. Study on pretreatment of printing and dyeing wastewater by ABR [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(6):981-984.

(编辑 胡 玲)