

外循环厌氧反应器的快速启动

韩洪军, 王伟, 敖凯, 林杉

(哈尔滨工业大学 城市水资源与环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090, han13946003379@163.com)

摘要: 工程运行试验研究 EC 厌氧反应器处理啤酒废水启动过程中的运行效能、稳定性以及内部的污泥分布情况, 分析颗粒污泥形成的关键因素. 运行第 95 d, 进水有机负荷达到 $8.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, COD 去除率达 80%, 出水 COD 低于 400 mg/L ; 在系统 1.2 m 和 4 m 处污泥中均出现粒径为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 左右的颗粒污泥. 结果表明, EC 厌氧反应器处理低质量浓度、大流量的啤酒废水采用间歇-连续快速启动方式是可行的, 并且上升流速在 $2.5 \sim 5.0 \text{ m/h}$ 有利于颗粒污泥的快速形成. 研究证实 EC 厌氧反应器处理啤酒废水能够实现稳定、高效地启动运行.

关键词: 外循环; 厌氧反应器; 快速启动; 泥水回流; 啤酒废水

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)04-0580-04

Quick start-up of external circulation (EC) anaerobic reactor

HAN Hong-jun, WANG Wei, AO Kai, LIN Shan

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150090, China, han13946003379@163.com)

Abstract: The performance efficiency, stability and inner sludge distribution were investigated in the operation of the full-scale EC reactor for brewing wastewater treatment and the key factor to the formation of anaerobic granular sludge was analyzed, which provides the references for the start-up and operation of EC reactor. After operation for 95 d, the influent organic load and removal efficiency were $8.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ and 80% respectively, and the effluent COD was lower than 400 mg/L . Meantime, the granular sludge with size of $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ was observed from the heights of 1.2 and 4 m in the EC reactor. The results demonstrate that EC anaerobic reactor using the intermittent - continuous start-up mode for treating the low COD concentration and high flow of brewing wastewater is feasible and the upflow velocity in range of $2.5 \sim 5 \text{ m/h}$ is helpful to form granular sludge quickly. The experiment validates that the EC anaerobic reactor can start up stably and efficiently in the brewing wastewater treatment.

Key words: external circulation; anaerobic reactor; quick start-up; sludge-water circulation; brewing wastewater

升流式厌氧污泥床(Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)在工业废水处理领域中已经取得了巨大成功^[1-4]. 但是实践发现, UASB 为避

致颗粒污泥的形成周期长. 文献[5-6]在 UASB 反应器的基础上采用了泥水回流等一系列技术形成了外循环(External Circulation, EC)厌氧反应器. 该反应器通过内部泥水回流获得较高的上升流速, 不仅解决了污泥床的膨胀问题, 而且降低了三相分离器的固液分离要求、防止污泥流失. 目前, EC 厌氧反应器在试验研究和工程应用中均取得了显著的进展^[7-8]. 本文通过对 EC 厌氧反应器的工程调试研究, 探讨了反应器的快速启动方式及其内部特点, 分析颗粒污泥形成的关键因素,

收稿日期: 2008-10-25.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA06A411).

作者简介: 韩洪军(1955—), 男, 教授, 博士生导师.

为 EC 厌氧反应器的快速启动和运行提供了重要的依据。

1 试 验

1.1 EC 厌氧反应器

研究对象为内蒙古自治区某啤酒厂的新建 EC 厌氧塔,该塔直径为 6.8 m,高度为 16 m,回流管线位于 13 m 处,有效体积 500 m³。系统进水和塔内回流的泥水在投配罐内进行混合,并投加蒸汽和碱液控制塔内温度和 pH 分别在 (33 ± 1) °C 和 7.2 ± 0.2。

1.2 接种污泥

EC 厌氧塔接种泥源来自江苏某制药废水处理厂的厌氧消化污泥(含水率为 83%),污泥投加量为 100 t, $m(\text{VSS})/m(\text{SS})=0.46$,最大比产甲烷活性为 0.19 kg/(kg · d),污泥沉降性能良好。

1.3 废水水质、水量

系统进水来自于啤酒生产废水及厂区生活污水,水量约为 2 000 ~ 2 400 m³/d,进水 COD 为 1 500 ~ 2 000 mg/L, BOD₅ 为 800 ~ 1 400 mg/L, TN 为 20 ~ 40 mg/L, TP 为 5 ~ 10 mg/L, SS 为 200 ~ 500 mg/L,温度为 26 ~ 28 °C, pH 为 6.5 ~ 7.0。调试运行期间系统进水的水质和水量较为稳定。

1.4 分析项目及方法

COD、BOD₅、TN、TP、SS 和 VSS 的测定采用标准法^[9],反应器内 pH 值的测定用 PHS-3C 酸度计,污泥产甲烷活性(SMA)的测定用血清瓶实验^[10]。

2 结果与讨论

2.1 启动方式

整个启动阶段分为间歇运行期(1~9 d)和连续运行期(10~95 d)。间歇运行期由每 4 h 进水 1 h 提高至每 2 h 进水 1 h,进水流量由 20 m³/h 提高至 40 m³/h;进水时关闭回流系统,停止进水时开启回流系统。连续运行期是由间歇进水转变为连续进水,进水水量由 20 m³/h 逐步提高,此阶段不开启回流系统。待达到满负荷流量 90 ~ 100 m³/h 后,开启回流系统逐步提高塔内上升流速,利用水力筛选作用促进污泥颗粒化进程。

2.2 启动期 EC 厌氧反应器的运行效能

厌氧反应器的运行效能主要体现在该系统在单位体积和单位时间内对目标污染物的去除效果。EC 厌氧反应器作为高效厌氧反应器,在运行效能上要优于第二代厌氧反应器。图 1、2 分别为

启动时期 EC 厌氧反应器的 COD 去除情况和进水有机负荷及 COD 去除率的变化。

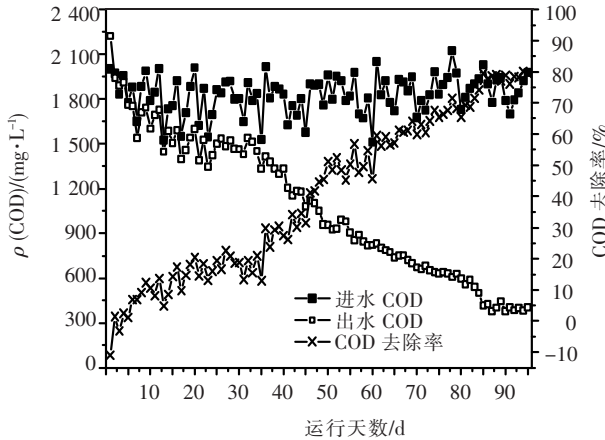


图1 EC 厌氧反应器的 COD 去除情况

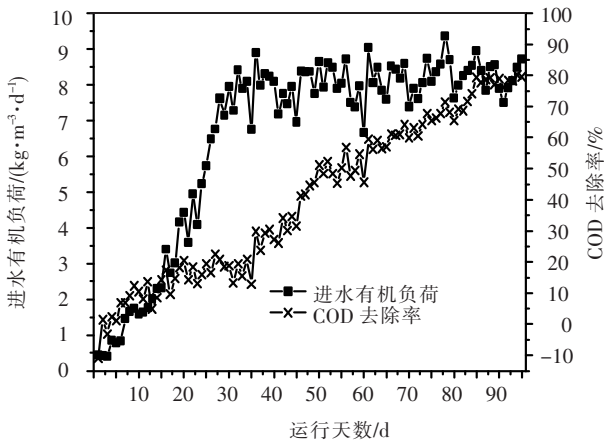


图2 EC 厌氧反应器的进水有机负荷及 COD 去除率变化

启动初期,接种污泥后由于需要一定的适应时间以及出水带泥,系统去除率偏低甚至出现负去除率的现象。运行第 1 ~ 15 天,系统的 COD 去除率均不超过 15%,而这一阶段的进水有机负荷由 0.44 kg/(m³ · d) 上升至 2.32 kg/(m³ · d)。系统进入连续运行后,进水有机负荷迅速提高至负荷 8.0 ~ 8.5 kg/(m³ · d),但是 COD 去除率却维持在 20% 左右,明显滞后于有机负荷的增长;其主要原因是负荷的提高使系统内挥发酸积累,产甲烷细菌的活性受到抑制。第 30 天后系统实现满负荷运行,回流流量逐步提高,反应器内的上升流速超过 2.5 m/h。此后,系统的碱液投加量开始大幅度下降,COD 去除率有了较大的提升。Speece R E 也指出厌氧系统随着回流比的增大,系统耗碱量会大幅度地减少^[11]。整个系统调试运行持续了 95 d,进水负荷达到 8.5 kg/(m³ · d),上升流速为 5 m/h, COD 去除率可达 80%,出水 COD 低于 400 mg/L。研究结果表明,EC 厌氧反应器的泥水外循环可以大幅度地降低耗碱量,并能够在较短时间内取得较高的、稳定的 COD 去除效果,为后

续运行减轻负担、降低运行成本。

2.3 启动期 EC 厌氧反应器的稳定性

考察启动期厌氧系统稳定性的主要指标有：系统内污泥流失量、系统自身的缓冲能力、系统内污泥的沉降性能及其活性^[12]。而在实际工程调试中最直接的因素就是系统随负荷提高过程中污泥流失的情况,这往往关系到系统启动的成败.本文着重考察了 EC 厌氧塔在各阶段的污泥流失情况,并对相应时期内污泥活性进行了测定.启动期 EC 厌氧反应器内的上升流速和出水 SS 变化以及污泥产甲烷活性变化如图 3,4 所示。

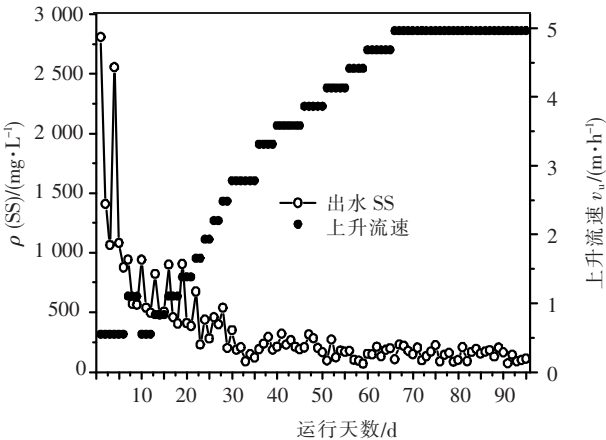


图 3 EC 厌氧反应器内的上升流速和出水 SS 变化

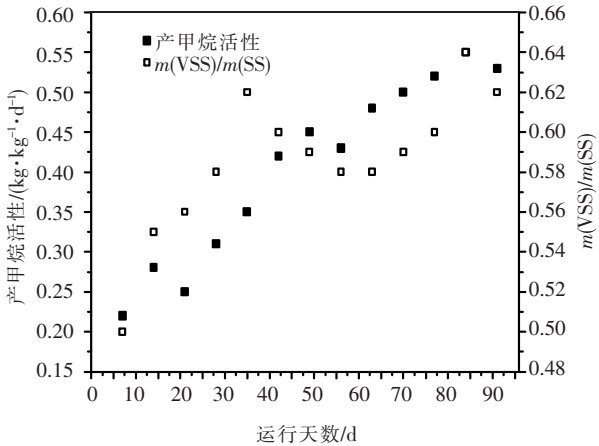


图 4 EC 厌氧反应器内的 $m(VSS)/m(SS)$ 和
污泥产甲烷活性变化

接种污泥初期,水质波动和污泥适应新的环境会造成污泥随系统出水流失.运行第 1~5 天,污泥流失量最高可以达到 2 800 mg/L.从图 3 中不难发现,在每次提高进水负荷和上升流速的阶段,系统的污泥流失量都会有所上升,随后稳定运行 1 d 后,污泥流失量会急剧下降.这一过程重复出现在间歇运行期和连续运行的初期,污泥流失量的高峰值约为 900 mg/L 左右,低峰值约为 500 mg/L.第 31 天,系统内的上升流速已经达到 2.5 m/h,出水 SS 趋于平缓,基本控制在 300 mg/L 以

下.随着进水流量的稳定和回流量的逐步提升,污泥流失量已无明显增加.与 UASB 厌氧反应器相比,在满负荷运行条件下,增大回流比和上升流速不会造成污泥的大量流失,可以加速反应器内污泥的颗粒化.另外,图 4 表明反应器运行第 35 天,污泥的产甲烷活性和 $m(VSS)/m(SS)$ 值分别达到 0.35 kg/(kg·d) 和 0.62.当罐内上升流速达到 2.5 m/h 后,污泥中有效生物量已经趋于稳定 ($m(VSS)/m(SS)=0.58\sim0.64$),但产甲烷活性随着上升流速增大而进一步得到提升,并在第 84 天得到污泥的最大产甲烷活性值 0.55 kg/(kg·d),要高于已报道 UASB 反应器的实际运行值^[13].

研究表明,厌氧反应器内提高液体上升流速有助于提高细菌的产气能力,而且污泥床内高的液-气上升流速会增强传质能力和减少短流^[14],最大限度地提高反应器的处理能力.因此,EC 反应器内的上升流速对污泥活性的作用不可忽视.当上升流速超过 2.5 m/h,污泥流失量已无明显增加,系统具有良好的抗冲击负荷作用.泥水回流可以加速罐内污泥冲刷和传质作用,提高污泥的产甲烷活性和有效生物量,减少投碱量和促进强缓冲液体体系的形成,使 EC 厌氧反应器具有独特的系统稳定性。

2.4 EC 厌氧反应器内污泥情况

不同厌氧反应器内污泥分布情况有着显著的差异.现场分析了 EC 反应器运行第 94 天的 4 个不同高度(1.2, 4, 7, 12 m)的污泥情况,如表 1 所示. EC 厌氧反应器的外循环泥水回流不仅能使系统获得高的污泥膨胀率,而且塔内也具有了独特的污泥质量浓度分布特点。

表 1 第 94 天的 EC 厌氧反应器内污泥特点

取样 高度 m	污泥产 甲烷活性 kg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹	COD 去除率 %	污泥质量 浓度 g·L ⁻¹	$\frac{m(VSS)}{m(SS)}$
1.2	0.45	20	23.5	0.62
4	0.63	61	19.4	0.69
7	0.62	70	12.9	0.63
12	0.43	78	15.1	0.48

由表 1 可知,在 1.2 和 7 m 处的污泥质量浓度要比 4 m 处高出约 10 g/L,但是 4 m 处污泥的产甲烷活性 (0.63 kg/(kg·d)) 和 $m(VSS)/m(SS)$ (0.69) 均高于其他高度的污泥.在 1.2 m 处污泥质量浓度和 $m(VSS)/m(SS)$ 值虽然也较高,但该段主要是废水中有机物与污泥实现充分混合,污泥中水解酸化细菌发挥着重要作用,所

以,污泥产甲烷活性和 COD 去除率分别只有 0.45 kg/(kg · d) 和 20%。在 0 ~ 7 m 段系统的 COD 去除率已经高达 70%,而 7 ~ 12 m 段污泥中有效生物量、污泥质量浓度和产甲烷活性均有所下降。L. A. Núñez and B. Martínez 也指出产甲烷菌的活性会沿着反应器的高度发生变化,反应器上部污泥的产甲烷活性要高于下部污泥^[15]。

EC 厌氧反应器内独特的泥水回流使其具有了自身的污泥分布特征,这也是保证反应器快速启动和颗粒化的重要保证。运行 58 d,在系统 1.2 m 处污泥水洗观察,污泥中已有少量粒径 0.5 mm 左右的颗粒污泥出现。运行 95 d,在系统 1.2 m 处污泥中粒径为 0.5 ~ 1.0 mm 左右的颗粒污泥明显增多,在 4 m 处污泥中已有少量粒径 0.5 mm 左右的颗粒污泥出现。

3 结 论

1) 工程研究结果表明采用间歇 - 连续的启动方式可以实现 EC 厌氧反应器处理低质量浓度、大流量啤酒废水的快速启动,能够在运行 60 ~ 90 d 形成颗粒污泥。

2) EC 厌氧反应器的泥水回流可以加速污泥冲刷和增强传质作用,提高污泥的产甲烷活性和有效生物量,减少投碱量和促进缓冲液体系形成,使反应器自身拥有独特的稳定性,可以保证系统的稳定、高效运行。

参考文献:

[1] DONG F, ZHAO Q B, ZHAO J B, *et al.* Monitoring the restart - up of an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor for the treatment of a soybean processing wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101 (6): 1722 - 1726.

[2] CHOWDHURY P, VIRARAGHAVAN T, SRINIVASAN A. Biological treatment processes for fish processing wastewater—A review [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(2): 439 - 449.

[3] SINGH K P, BASANT N, MALIK A, *et al.* Modeling the performance of “up - flow anaerobic sludge blanket” reactor based wastewater treatment plant using linear and nonlinear approaches—A case study [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 658(1): 1 - 11.

[4] WIJETUNGA S, LI Xiufen, CHEN Jian. Effect of organic load on decolourization of textile wastewater containing acid dyes in upflow anaerobic sludge blanket reactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177 (1/3): 792 - 798.

[5] 韩洪军, 马文成. 外循环厌氧反应器处理啤酒废水的启动研究[J]. *中国给水排水*, 2008, 24 (13): 28 - 34.

[6] 赵金, 韩洪军, 王伟, 等. 外循环厌氧法处理啤酒废水的研究[J]. *中国给水排水*, 2008, 24 (9): 52 - 55.

[7] 韩洪军, 贾银川, 马文成, 等. 外循环厌氧 - 好氧工艺处理啤酒废水工程设计 [J]. *中国给水排水*, 2008, 24(12): 34 - 39.

[8] 韩洪军, 敖凯, 王伟, 等. 外循环厌氧反应器接种好氧污泥的启动研究[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31 (12): 53 - 57.

[9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[10] SØRENSEN A H, AHRING B K. Measurements of the specific methanogenic activity of anaerobic digester biomass [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1993, 40(2/3): 427 - 431.

[11] SPEECE R E. *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater* [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.

[12] LEITÃO R C. Robustness of UASB Reactors Treating Sewage under Tropical Conditions [D]. Wageningen: Wageningen University, 2004.

[13] PARAWIRA W, KUDITA I, NYANDOROH M G, *et al.* A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full - scale UASB reactor seeded with activated sludge [J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40: 593 - 599.

[14] LIER van J B, ZEE van der F P, TAN N C G, *et al.* Advances in high - rate anaerobic treatment: Staging of reactor systems [J]. *Wat Sci Tech*, 2001, 44 (8): 15 - 25.

[15] NÚÑEZ L A, MARTÍNEZ B. Anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater in an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor [J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 40(8): 99 - 106.

(编辑 刘 彤)