

利用水厂生产废水促进 UASB 工艺 处理低温城市污水启动

周露^{1a,1b}, 李桥², 刘俊³

(1. 重庆大学 a. 建筑城规学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400030;
2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 成都 610072; 3. 重庆市綦南供电局, 重庆 401422)

摘要:为缩短 UASB 工艺处理低温城市污水的启动周期, 开展在原水中添加水厂生产废水强化 UASB 系统污泥颗粒化可行性研究, 并以常规启动方式做为比较, 对启动过程中系统运行特性和形成的颗粒污泥特性进行探讨。试验结果表明, 在水温为 15℃, 初始有机负荷为 0.25 kgCOD/(m³·d) 的条件下, 采用逐步提高负荷的传统启动方式和添加生产废水的强化启动方式都能实现 UASB 工艺的低温启动, 相应的启动周期分别为 120 d 和 95 d 左右。在整个启动过程中, 添加生产废水启动方式对有机负荷提高适应性较强, 达到 4 kgCOD/(m³·d) 时较常规方式缩短 30 d, 而且具有较高的 COD 去除效率和微生物增长速率(分别为 0.029 g VSS/d 和 0.043 g VSS/d)。与常规启动方式相比, 强化启动方式颗粒粒径较大, 在第 95 d 内可形成 2 mm 粒径颗粒污泥。采用添加生产废水的启动方式能够缩短 UASB 工艺的启动周期并强化污泥颗粒化, 提高低温城市污水的处理效率和运行稳定性。

关键词: UASB; 启动; 颗粒污泥; 低温; 生产废水

中图分类号: X703.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2011)06-0135-05

Reuse of Waterworks Wastewater to Enhance the Start-up of UASB Process for Low Temperature Municipal Wastewater Treatment

ZHOU Lu^{1a,1b}, LI Qiao², LIU Jun³

(1a. Faculty of Architecture and Urban Planning; 1b. Upland Urban Construction and New Technology, Key laboratories of the Ministry of Education of China, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Hydro China Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, P. R. China; 3. Power Supply Bureau of Qinan, Chongqing 401422, P. R. China)

Abstract: To shorten the start-up period of UASB process for the low temperature municipal wastewater treatment, two lab-scale UASB reactors were employed to study the feasibility of enhanced start-up with addition of waterworks wastewater to raw water. Also the operation and biomass characteristics were investigated with comparison of conventional start-up mode. The results show that, under the water temperature of 15℃ and the initial organic loading rate (OLR) of 0.25 kgCOD/(m³·d), the UASB system can get stable condition with both the OLR escalating and enhanced mode, and the start-up period is approximate 120 days and 95 days respectively. Throughout the experiment the enhanced start-up processes preferable adaptability, which shorten 30 days to achieve the OLR of 4 kgCOD/(m³·d), and higher COD removal as well as biomass growth rate (0.029 g VSS/d versus 0.043 g VSS/d) correspondingly. Compared to conventional mode, the mean diameter of granular sludge is larger and 2 mm granular sludge can be formed within 95 days by enhanced mode. The experimental results demonstrate that adding waterworks wastewater can shorten the start-up time and enhance granulation, which in turn leads to improvement in organics removal efficiency and stability of the UASB system for low temperature municipal wastewater treatment.

Key words: UASB, start-up, granulation, low temperature, waterworks wastewater

收稿日期: 2011-04-25

作者简介: 周露(1971-), 女, 博士生, 主要从事山地人居环境与城市建设研究, (E-mail)767314462@qq.com。

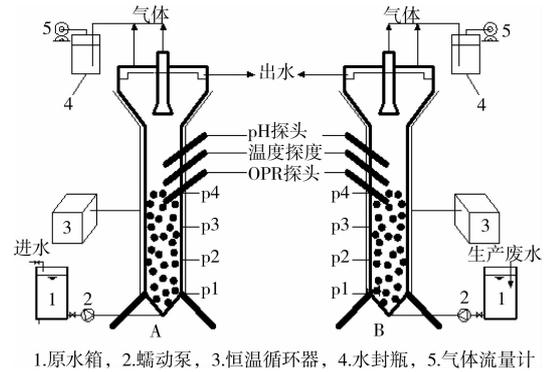
厌氧废水处理是近年来污水处理领域发展较快的技术,也是实现“一控双达标”的重要途径^[1]。在厌氧处理工艺发展过程中,升流式厌氧污泥床(UASB)工艺以其稳定的处理效率、低廉的运行成本以及小限度的剩余污泥产量和能量的可回收利用逐步成为国内外厌氧处理的主流技术^[2-3]。在过去的十几年中,UASB 工艺已经在许多国家成功应用于工业废水和城市污水的处理,特别是在巴西、美国、欧洲以及东南亚等气候炎热的国家地区应用广泛^[4-6]。然而,从污水处理的经济适用性和处理技术的普及推广价值来看,应用 UASB 工艺处理低温城市污水具有更为重要的实际意义与科学价值,有必要对其在寒冷地区城市污水的处理特性进行系统研究。活性高、沉淀性良好和稳定的颗粒污泥的形成,能使系统内的微生物在短时间内适应水质,降低系统的维护与出水后续处理费用,是 UASB 稳定运行的基础。在试验研究中,颗粒污泥培养一般采用直接接种颗粒污泥或逐步提高有机负荷方法,但在实际应用中接种获得大量的颗粒污泥很难实现,而且逐步提高有机负荷的启动周期较长,受水质影响较大^[7-8]。另外,在启动过程中投加大比表面积的颗粒物质也被证实可以缩短启动时间,这些惰性颗粒不仅能够成为微生物附着载体,而且能够弥补反应过程中碱度流失,使 UASB 在室温条件下的启动时间降低^[9-10]。然而,温度的降低会导致微生物代谢能力下降,通过相互布朗运动及胞外聚合物产生能力的抑制延缓颗粒化过程,延长 UASB 在低温状况下的启动时间,甚至导致工艺的启动失败^[7]。

基于上述背景并考虑实际情况下接种污泥的来源问题,以污水厂厌氧消化污泥为接种污泥,研究投加给水厂生产废水促进颗粒化的可行性,并与逐步提高有机负荷启动方式进行对比,对启动过程中系统运行效能和微生物特性进行分析,并对形成的颗粒污泥特性进行初步探讨,为后续研究和实际应用提供一定的基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置与材料

UASB 装置为有机玻璃制成的总有效容积为 6.0 L 的柱状反应器,内径为 10.0 cm,高为 80.0 cm,流程示意图如图 1 所示。反应装置由外圈恒温低温水槽、内圈反应柱、三相分离器、穿孔布水板、取样口(间隔 25 cm)和观察口组成。其中,反应器 A 采用逐步提高有机负荷方式启动,反应器 B 采用投加给



1.原水箱, 2.蠕动泵, 3.恒温循环器, 4.水封瓶, 5.气体流量计

图 1 UASB 试验装置图

水厂生产废水方式启动。

反应器内温度通过恒温循环器(DTY-15B)生产低温自来水泵入设置在系统外部的低温槽循环流动实现,根据当地污水水温 10—3 月份的实测情况将原水温度控制在 15℃。试验进水采用蠕动泵控制,在原水投加给水厂生产污水后直接泵入反应器,投加量为 40 mg/L Al^{3+} 。产生气体通过水封瓶与湿式气体流量计控制,剩余污泥通过反应器底部排泥管排放。反应器接种污泥采用城市污水处理厂消化池污泥,接种量为 25 kg · VSS/m³,活性为 0.28 kg COD_{CH4}/kgVSS · d,污泥容积指数为 42 mL/g · SS。生产废水取自重庆某饮用水处理厂澄清池排泥水,水质特性见表 1。

表 1 水厂生产废水水质

指标	固体含量/ %	VSS/ SS	含铝量/ %	pH	Zeta 电位/ mV
含量	500	0.26~0.32	0.4~0.5	6.6~7.0	-17~-35

1.2 试验用水与分析方法

试验原水采用人工合成污水,COD 通过投加啤酒来提供,营养元素通过投加氯化铵和 KH_2PO_4 实现,碱度和 pH 值由 $NaHCO_3$ 和 $NaOH$ 调控,微量元素液的投加量为 1 mL/L(配方见文献[11])。原水主要水质参数见表 2。

表 2 试验人工合成原水水质

水质指标	COD	NH_3-N	SS	BOD_5	碱度
浓度/(mg · L ⁻¹)	500	30	80	254	110

水质指标中 COD,SS 和 MLSS 等的测定均采用国家环保总局颁布的方法进行^[12]。出水中甲烷含量通过亨利定律计算。挥发性脂肪酸和气体组成通过气相色谱测定(AGILENT GC4890),检测器分别为 FID 和 TCD。生物最大比产甲烷活性测定采用董春娟等的方法^[13],其操作条件为 15℃。颗粒污

泥的粒径分布采用筛分法确定:从反应器内取一定量污泥,用水冲洗后使之依次通过孔径为4、2、1、0.5、0.2 mm的分样筛,然后将各个分样筛截留的污泥收集,在105℃下烘干、称重,计算不同粒径范围的污泥所占比例。

2 试验结果与讨论

2.1 启动方式及启动期系统运行状态

高温状态下(35℃以上),UASB的启动方式一般为直接接种颗粒污泥或厌氧污泥,逐步提高有机负荷使反应器达到设计负荷和稳定的运行状态^[7]。本试验参考高温状态的启动方式,在每个有机负荷状况下系统达到稳定状态后通过增加进水流量逐步提高负荷。初期采用有机负荷为0.25 kgCOD/(m³·d)的低负荷状态运行,相应水力停留时间为48 h,而后逐步提升有机负荷至0.50 kg COD/(m³·d),1.0 kg COD/(m³·d),2.0 kg COD/(m³·d),4.0 kg COD/(m³·d),相应水力停留时间分别为24 h、12 h、6 h和3 h。

整个启动期COD去除效率及有机负荷增长情况如图2所示。可以看出,在低负荷期启动初期,由于原水温度较低,接种污泥对水温适应性较差,A反应器对COD的去除能力很低,有20 d的时间里COD去除效率低于20%。与反应器A相比,反应器B的原水经过生产废水中铝盐的絮凝与吸附作用,该作用与接种污泥协同去除约30%的COD。在经历了初期的低温抑制作用后,2个系统内污泥逐渐适应原水温度,随着启动周期的延长和有机负荷的提高,系统内微生物经历快速生长,2种启动方式的COD去除率不断升高,但添加生产废水方式COD去除率增长更快,在有机负荷达到2 kgCOD/(m³·d)后,2种启动方式的COD去除率都达到70%以上。

与COD去除效果和速率增长状况不同,2种启动方式达到稳态的有机负荷时间具有明显差异。在所有的有机负荷条件下,投加生产废水的反应器B都具有较短的适应期,在达到最大有机负荷4.0 kg COD/(m³·d)时,其达到稳定COD去除率时间约为115 d,而反应器A对有机负荷的提高适应周期较长,其达到最高有机负荷的时间约为148 d,强化启动方式较常规启动方式达到最高负荷约缩短30 d。

由于颗粒污泥或者污泥床的形成与悬浮固体直接相关,因此一般将出水中悬浮物的浓度做为判断UASB工艺启动阶段的指标(如图3所示)。由于接

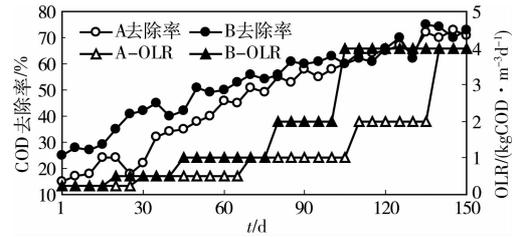


图2 启动期COD去除效率与有机负荷变化

种污泥沉降性较差,有部分微生物随出水洗出系统,造成出水SS浓度偏高,而添加生产废水后,通过铝盐的絮凝提高了污泥沉降性,减低了微生物洗出率,使反应器B的SS处理效率提高。在经历约1周的污泥洗出期后,接种污泥逐步适应低温水质,SS去除率有所提高。随着反应时间的降低,系统有机负荷的增加使底物与微生物接触充分,反应器内微生物经历快速生长期,颗粒污泥的逐步形成,系统对SS的去除逐渐稳定,在启动期结束时,2种启动方式对SS去除率接近80%。

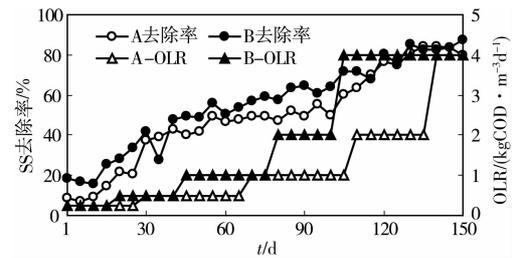


图3 启动期SS去除效率与有机负荷变化

表3为启动期不同阶段微生物浓度随反应器高度变化情况。在2种启动方式下,污泥浓度均随与启动时间和有机负荷呈正相关关系。在系统启动初期,由于接种污泥絮体较松散,系统内污泥随进水流化程度较高,有部分洗出。随着颗粒化的进行,反应器底层积累的颗粒污泥量日益增多,并逐渐在反应区形成密实的污泥床。总污泥量计算结果表明,传统启动方式下污泥增长速率为0.029 g VSS/d,而投加生产废水对生物量的生长促进较为明显,其平均污泥增长速率为0.034 g VSS/d。

表3 启动期微生物浓度随反应器高度变化

取样口	A反应器/d					B反应器/d				
	30	60	90	120	150	30	60	90	120	150
1	18	23	38	48	55	21.3	30.2	45.7	53.9	60.1
2	17.1	20.9	31.2	40.1	49.9	19.2	25.8	39.4	44.8	57.6
3	6.1	7.3	11.1	20.8	26.8	9.2	10.0	15.5	27.2	30.5
4	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	1.1	0.8	0.2	0.2	0.1

2.2 启动期发酵产气与颗粒污泥粒径分析

反应器A和B在启动期产气特性如图4所示。可以看出,2个反应器在启动过程中甲烷产生速率

都与有机负荷和 COD 降解速率呈正相关关系。值得注意的是,由于原水温度较低,颗粒污泥的产甲烷活性受到抑制,尽管系统产气量随着有机负荷的增加逐步升高,但是在提高有机负荷后的稳定运行期,甲烷产率仅与有机物的降解速率有关,表明低温条件下 UASB 系统产甲烷能力与颗粒污泥的形成过程和反应进程没有直接关系。

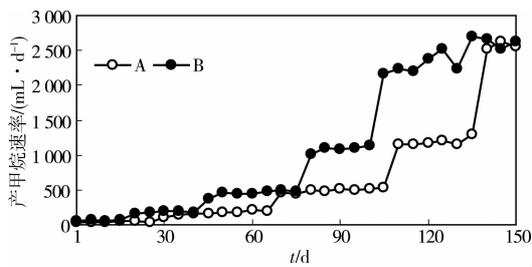


图 4 启动期产气特性

启动期颗粒污泥粒径分布如图 5 所示。

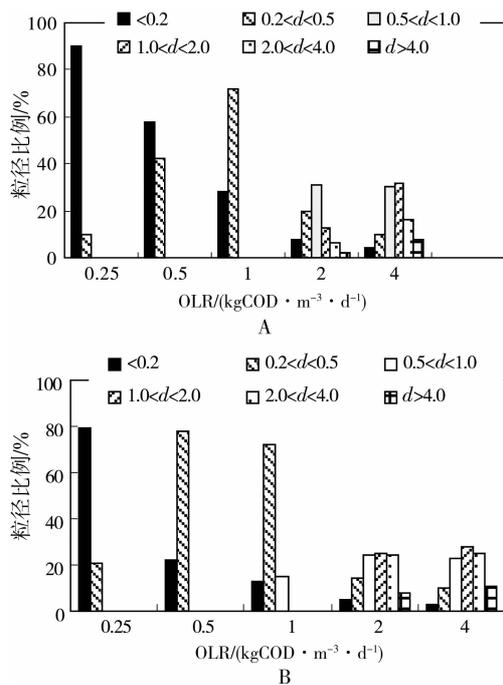


图 5 启动期颗粒污泥粒径分布

2 种启动方式污泥絮体或颗粒粒径均随有机负荷的增加逐渐增大。由于生产废水中铝盐的絮凝作用,反应器 B 在第 60 d 左右(有机负荷为 $1.0 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$)时底部出现直径为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 的细小颗粒污泥。随着有机负荷的增加,污泥成层及产生气体促进了污泥的颗粒化过程,在经过 40 d 的快速成长后,颗粒污泥粒径达到 2.0 mm 。尽管培养中后期,系统的有机负荷有所增加,但颗粒污泥粒径增加缓慢,表明系统内部已经形成了成熟、稳定的颗粒污泥。与反应器 B 相比,反应器 A 中颗粒污泥化过程较慢,由

于水温的降低抑制了生物絮体的颗粒化过程,直到第 95 d 在系统内出现颗粒污泥,其中 50% 以上污泥粒径在 $0.2 \sim 1.0 \text{ mm}$ 之间。当培养结束时,反应器 A 中颗粒粒径在 $1.0 \sim 4.0 \text{ mm}$ 的颗粒污泥比例约为 60%,而只有 8% 的污泥粒径超过 4 mm 。

为进行更为直观的比较,将完成颗粒化时间定义为系统内 10% 污泥粒径超过 2 mm 时所需时间。因此,反应器 A 完成颗粒化时间为 120 d,而反应器 B 为 95 d。与反应器 A 相比,反应器 B 中污泥浓度、污泥粒径及对 COD 的降解能力都较高,表明通过在原水中添加水厂生产废水能够促进污泥颗粒化进程,缩短启动周期。生产废水中的铝盐通过初期的絮凝作用,降低体系的 ξ 电位,并且对细胞表面的负电荷起到架桥作用,促进污泥颗粒化过程。

2.3 启动期最大比产甲烷菌活性分析

表 4 描述了启动期 2 种启动方式颗粒污泥产甲烷活性对比情况。可以看出,反应器 A 的产甲烷活性在启动期随着有机负荷的增加逐渐升高,由接种时的 $0.28 \text{ kg CH}_4\text{-COD}/\text{kgVSS} \cdot \text{d}$ 增加到试验结束期的 $1.30 \text{ kg CH}_4\text{-COD}/\text{kgVSS} \cdot \text{d}$ 。与反应器 A 相比,反应器 B 中污泥活性在培养前 60 d 逐渐增加,60 d 时的污泥活性为 $1.26 \text{ kg CH}_4\text{-COD}/\text{kgVSS} \cdot \text{d}$,随着有机负荷的提高,反应器 B 内污泥活性有所降低,主要是由于在 60 d 的培养过程中,反应器 B 内形成了少量较大粒径的颗粒污泥,相应的污泥量有所提高(表 2)。由于基质扩散阻力随颗粒粒径增加而增大,导致底物向颗粒的内部传质能力降低,降低了微生物活性。另外,由于微生物细胞中铝离子含量很低,投加生产废水促进了铝离子与微生物胞外多糖聚合物的反应,导致污泥表面和颗粒中存在铝盐的聚集,这可能也是导致反应器 B 内产甲烷活性下降的原因。

表 4 启动期产甲烷活性比较 ($\text{kg CH}_4\text{-COD}/\text{kgVSS} \cdot \text{d}$)

反应器编号	培养时间/d					
	0	30	60	90	120	150
A	0.28	0.83	1.12	1.20	1.29	1.38
B	0.28	0.98	1.26	1.23	1.17	1.10

3 结论与建议

1) 在原水中添加水厂生产废水能够强化 UASB 工艺处理低温城市污水的启动,在相同的运行条件和接种条件下,投加生产废水较常规启动方式提前 25 d 完成污泥颗粒化。

2) 添加生产废水强化启动较常规启动方式对有机负荷提高适应性较强,而且具有较高的COD去除效率和微生物增长速率。

3) 建议在后续研究工作中进行生产废水投加量、投加方式、投加生产废水对系统内微生物群落结构的影响研究。

参考文献:

- [1] 王凯军, 左剑恶, 甘海南, 等. UASB工艺的理论及工程实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [2] ALVAREZ J A, ARMSTRONG E, GOMEZ M. Anaerobic treatment of low-strength municipal wastewater by a two-stage pilot plant under psychrophilic conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(15): 7051-7062.
- [3] NACHEVA P M, CHAVEZ G M, CHACON J M. Treatment of cane sugar mill wastewater in an upflow anaerobic sludge bed reactor [J]. *Water Sci Technol*, 2009, 60(5): 1347-1352.
- [4] CAO Y S, ANG C M. Coupled UASB-activated sludge process for COD and nitrogen removals in municipal sewage treatment in warm climate [J]. *Water Sci Technol*, 2009, 60(11): 2829-2839.
- [5] DIAMANTIS V I, VERSTRAETE W, AIVASIDIS A. Upflow anaerobic clarification tank (UACT) to upgrade existing anaerobic effluents [J]. *Water Sci Technol*, 2009, 59(12): 2411-2419.
- [6] WEILI ZHOU, TSUYOSHI IMAI, MASAO UKITA, et al. Effect of loading rate on the granulation process and granular activity in a bench scale UASB reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(7): 1386-1392.
- [7] GHANGREKAR M M, ASOLEKAR S R, JOSHI S G. Characteristics of sludge developed under different loading conditions during UASB reactor start-up and granulation [J]. *Water Res*, 2005, 39(6): 1123-1133.
- [8] WEN NI, HONGWEI DUAN, XIAOLING AI, et al. Promoting sludge granulation by putting xonotlite into the UASB reactors during starting-up stage [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2003, 10(4): 7-13.
- [9] 王磊, 余宗莲, 郭晶, 等. 常温下向 ABR 反应器中加入惰性载体促进颗粒污泥形成 [J]. *环境工程学报*, 2008, 2(7): 955-958.
- WANG LEI, YU ZONG-LIAN, GUO JING, et al. Granulation in anaerobic baffled reactor with inert carrier at room temperatures [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(7): 955-958.
- [10] SAITO T, BRDJANOVIC D, VAN LOOSDRECHT M C M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms [J]. *Water Research*, 2004, 38: 3760-3768.
- [11] 国家环保局. 水和水质监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 董春娟, 吕炳南. EGSB 反应器内颗粒污泥的快速培养及特性研究 [J]. *中国给水排水*, 2006, 22(15): 62-70.
- DONG CHUN-JUAN, LV BING-NAN. Rapid culture and properties research of granular sludge in EGSB Reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(15): 62-70.

(编辑 胡玲)