

内循环式厌氧反应器启动过程中颗粒污泥的特性

丁丽丽,任洪强,华兆哲,陈坚* (无锡轻工大学生物工程学院环境生物技术研究室,无锡 214036, E-mail: jchen@wxuli.edu.cn)

摘要:研究了 IC 反应器的快速启动方法和启动过程中颗粒污泥性质.结果表明,由于反应器成功滞留了大量活性高、沉降性能好的颗粒污泥,反应器初次启动可在 20 d 内完成,二次启动 15 d 内完成,反应器负荷可达 $12 \sim 15 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, COD 去除率 85 % 以上;IC 反应器启动结束后,其颗粒污泥的性质发生显著变化,平均粒径由 0.88 mm 增大到 1.25 mm,平均沉降速度由接种污泥的 $35.4 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到 $105.17 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$,最大比产甲烷活性 $[382.98 \text{ ml} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}]$ 几乎为初期的 4 倍,产甲烷优势菌由 *Methanothrix* 转变为产甲烷球菌和短杆菌.

关键词: IC 反应器;废水厌氧处理;快速启动;颗粒污泥性质

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)03-05-0030

Characteristics of Granular Sludge during Start-up of the Internal Circulation

Ding Lili, Ren Hongqiang, Hua Zhaozhe, Chen Jian (School of Biotechnology, Wuxi University of Light Industry, Wuxi 214036, China E-mail: jchen@wxuli.edu.cn)

Abstract: The quick start-up of the laboratory scale IC reactor and the characteristics of granular sludge during start-up were studied in this paper. The results showed that the first start-up of IC reactor could be finished in 20 days, while secondary start-up only needed 15 days with COD loading rate of $12 \sim 15 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ and COD removal larger than 85 %. During start-up, the characteristics of granular sludge changed greatly: average granular diameter was increased from 0.88 mm to 1.25 mm; average settling velocity was enhanced from $35.4 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ to $105.17 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$; methanogenic activities of the granular increased up to 4 times as large as the seeded sludge; the main methanobacteria was changed from *Methanothrix* to *Methanococcus* and *Methanobacterium*.

Key words: IC reactor; wastewater treatment; quick start-up; characteristics of granular sludge

内循环式厌氧反应器(Internal Circulation, IC)是荷兰 PAQUES 公司 80 年代中期在 UASB 反应器基础上开发成功的第三代超高效厌氧反应器^[1].反应器建成后,如何在短期内快速启动是整个废水处理工程中的关键^[2~4].本试验的主要研究的目的在于探索以 UASB 反应器中颗粒污泥作为接种污泥时 IC 反应器的快速启动方法,同时考察启动过程中颗粒污泥性质的变化情况.

1 材料和方法

1.1 试验设备

试验用 IC 反应器为有机玻璃制成,有效容

积 25 L,反应器总高度 1500 mm,沿柱高设置取样孔.将反应器安装在恒温箱内,用 WMZK-01 温度指示控制仪和热源构成自动温度控制系统,温度控制在 $35 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.试验工艺流程见图 1.

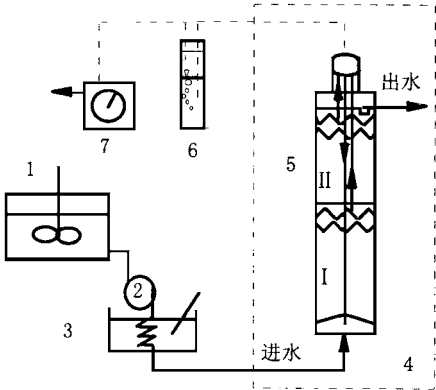
IC 反应器的工作原理为^[5]:废水首先进入 I 室被降解,产生的沼气由 I 室的集气罩收集,大量沼气携带 I 室的泥水混合液沿着提升管上升,至反应器顶部的气液分离器,沼气在此处逸出反应器,而泥水混合液沿下降管返回到 I 室的底部.经 I 室处理后的废水自动进入 II 室继

基金项目:教育部骨干教师科研资助项目

作者简介:丁丽丽(1976~),女,硕士.

收稿日期:2000-08-30

* 联系人



1. 进水箱 2. 泵 3. 预热器 4. 恒温箱
5. IC 反应器 6. 水封 7. 湿式流量计
图 1 IC 反应器系统

Fig.1 Sketch of the IC reactor system

续处理,随后经过 II 室中的三相分离器分离

表 1 人工合成葡萄糖废水的组成

Table 1 Components of the composed wastewater with glucose

营 养 元 素 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$				微 量 元 素 / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$			
葡萄糖	2000	CaCl_2	4	$\text{FeCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	80	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	80
$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	40	MgSO_4	8	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	20	ZnCl_2	2
KH_2PO_4	40	NaHCO_3	660	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.2
NH_4Cl	40	酵母膏	80	EDTA	40	H_3BO_3	2
				$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	3.6	36 %HCl	$0.04/\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$

2 试验结果和分析

2.1 IC 反应器的启动

IC 反应器先后共进行了 2 次启动:初次启动和二次启动.初次启动是指从反应器的接种污泥开始,采取适宜的操作方法,至反应器能达到所需要的有机负荷[$8 \sim 12 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$]并具有运行稳定性为结束.二次启动是指反应器经过一定时间的停止运行后的再次启动.初次启动自 1999-06-15 开始,1999-06-29 结束;二次启动 2000-03-02 开始至 2000-03-20 结束.

2.1.1 初次启动

反应器中加入接种颗粒污泥后,开始启动运行.初次启动的进水 COD 浓度为 $1800 \sim 2500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,初始负荷定为接种颗粒污泥活性[$0.157\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$]的 70 %左右,控制进水量和

后,废水排出反应器外.

1.2 试验用废水

采用人工合成废水,废水的组成见表 1.

1.3 接种污泥

接种污泥采用无锡太湖水集团大型 UASB 反应器中的颗粒污泥,污泥的 TSS 为 $72.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,VSS 为 $56.6\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.接种前先将污泥颗粒进行筛洗处理,再用 COD 为 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的人工配水持续 8h ~ 10 h 进行漂洗和活化.

1.4 分析项目

COD:重铬酸钾滴定法^[6];pH:玻璃电极法^[6];SS 和 VSS:重量法^[7];比产甲烷活性:标准法^[7];颗粒污泥粒径分布:湿式筛法^[8,9];沉降速度:采用内径 1.2cm 的玻璃管计时测定(1.6m 水柱法)^[8,9];胞外多聚糖:硫酸-苯酚法^[10];化学元素分析:原子吸收法^[6].

有机负荷,当系统出水稳定在 COD 去除率大于 80 %,pH 在 6.8 ~ 7.2 时可提高进水负荷.

启动过程见图 2.在最初 3d ~ 4 d 内,当启动的 COD 容积负荷由 $2\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 逐渐增加到 $4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,初次启动 COD 去除率能达到 80 %左右,出水 COD 浓度也较稳定.随着容积负荷的进一步增加,第 6 d,COD 去除率下降到 68.5 %,出水 pH 下降,说明不能连续提高反应器的进水负荷.因此降低容积负荷,并将反应器的进水 pH 调到 7.0 ~ 7.5,2 d 后反应器运行正常.反应器酸化后,运行稳定性较差,负荷的提高幅度只能 20 %左右.第 9 d,负荷从 $4.15\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 升高到 $5.27 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 后,出水 COD 浓度即随之升高.第 19 d,将反应器负荷突然由 $8.32 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 提高到 $11.75 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,结果发现出水 COD 仍然很稳定,

COD去除率达到 85.12 % ,反应器开始出现液体内循环 .这说明 IC 反应器具有很强的抗冲击负荷能力 ,此时可认为反应器启动结束 ,进入负荷提高阶段 .

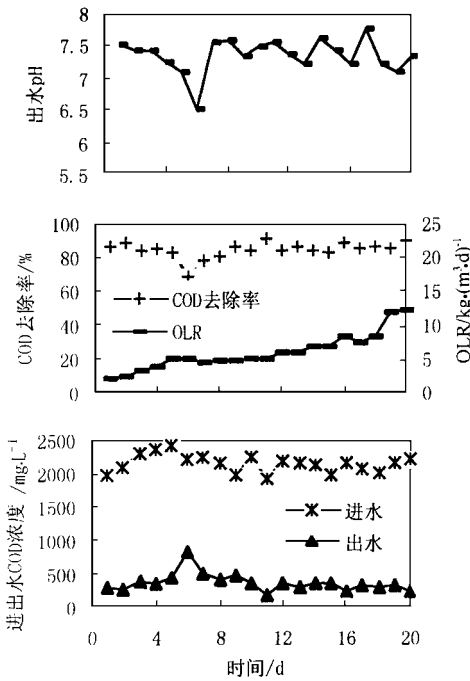


图 2 初次启动运行结果

Fig.2 The IC reactor operation during fist start-up

2.1.2 二次启动

二次启动是反应器停止运行 1 个月后进行 .进水 COD 浓度 ($1800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\sim 2500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 温度、pH、废水组成等与初次启动相同 .二次启动初始进水负荷为反应器中颗粒污泥活性($0.25\text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$)的 70 % .当进水负荷每天以 20 % ~ 30 % 的幅度增加时 ,出水 COD 一直比较稳定 .第 11 d ,有机负荷达到 $9.1\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,COD 去除率可达 83 % .第 12 d ,当反应器有机负荷增加到 $11.1\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 时 ,反应器内部产生的沼气开始推动液体形成内循环 ,反应器内液体搅动激烈 ,液体与颗粒污泥充分接触 .第 14 d ,将有机负荷突然由 $12.5\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 升高到 $15\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,COD 去除率仍高达 87 % ;第 15 d ,反应器在相同的负荷下仍能达到很好的处理效果 ,说明反应器二次启动结

束(图 3) .

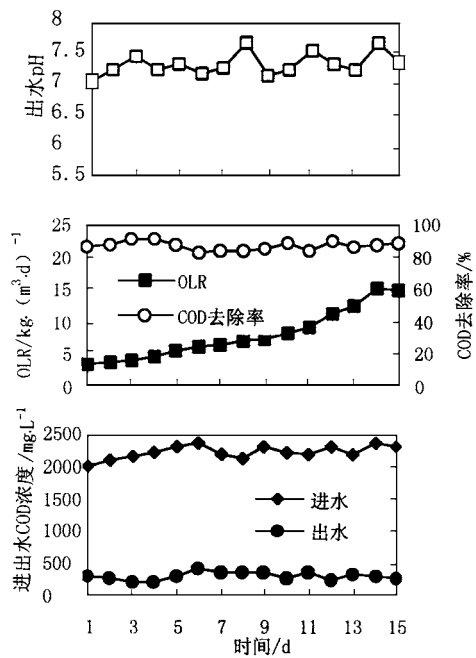


图 3 二次启动运行结果

Fig.3 The IC reactor operation during second start-up

2.2 启动过程中颗粒污泥的性质

2.2.1 物理性质

接种颗粒污泥为黑色球体 ,直径 $0.35\text{ mm}\sim 2.5\text{ mm}$,比重 $1.045\text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$.反应器启动第 15 d ,颗粒污泥青灰色增多 .20 d 后颗粒污泥基本为灰色 ,比重增加到 $1.065\text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$.至启动结束 ,反应器中颗粒污泥粒径分布与接种污泥相比发生明显变化(图4,5) .2 mm 以上的颗粒污泥含量由 0.81 % 增加到 11.6 % ,1.2 mm ~ 1.6 mm 的

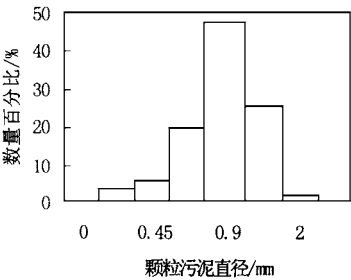


图 4 接种污泥粒径分布

Fig.4 Floc size distribution of the inocular sludge

颗粒污泥比例由 24.7 % 增为 29.4 % , 而 0.9 mm ~ 1.2 mm 所占比例由 47 % 降低到 17.2 % . 平均粒径由 0.88 mm 增为 1.25 mm , 最大粒径达到 3 mm .

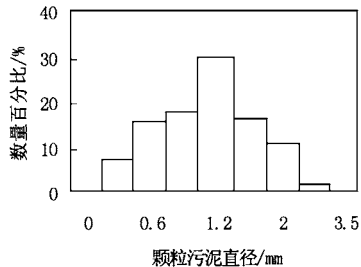


图 5 启动结束颗粒污泥粒径分布

Fig.5 Floc size distribution of granular sludge at the start-up finished

沉降速度与颗粒粒径之间的关系如图 6 、 图 7 . 接种污泥沉降速度 $17.6 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1} \sim 92.05 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, 而启动后颗粒污泥沉降速度增加到 $31.95 \sim 105.17 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. 这可能是由于启动后颗粒污

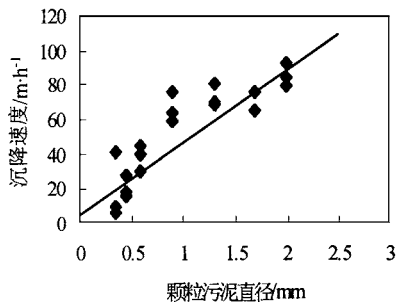


图 6 接种污泥粒径与沉降速度的关系

Fig.6 Relationship between the inoculum sludge floc size and the settling velocity

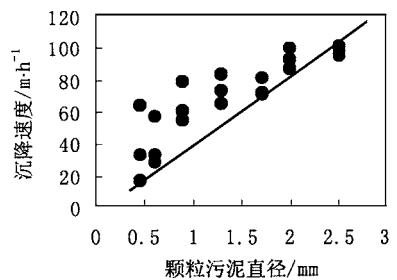


图 7 启动结束颗粒污泥粒径与沉降速度的关系

Fig.7 Relationship between the granular sludge floc size and settling velocity at the start-up finished

泥的粒径和比重增加的原因 .

此外 , 还测定了接种颗粒污泥和启动第 24d 反应器中颗粒污泥的胞外多聚糖含量 . 结果表明 , 后者胞外多聚糖含量 ($58.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 远大于前者 ($30.14 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) . 据此推测 , 启动结束颗粒污泥增大可能是由于胞外多聚糖分泌增加 , 因此菌体间更易吸附 .

2.2.2 产甲烷活性

启动过程中颗粒污泥的活性发生了较大变化 , 结果见图 8 和图 9 . 由图 8 可看出 , 启动过程中污泥产甲烷活性在不断地增加 , 启动结束时污泥产甲烷活性可达到接种污泥的 4 倍 ; 图 9 中表现出了污泥颗粒的 VSS 变化 , VSS/ TSS 由接种颗粒污泥的 66.7 % 增加为 91.8 % , 产生这种变化的原因在于反应器内液体内循环促进了基质和颗粒污泥的接触 , 提高了传质效果 , 促进了产甲烷细菌的繁殖和增长 .

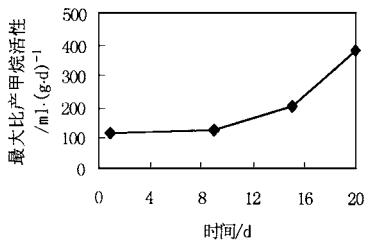


图 8 产甲烷活性的变化

Fig.8 Variation of the methanogenic activities

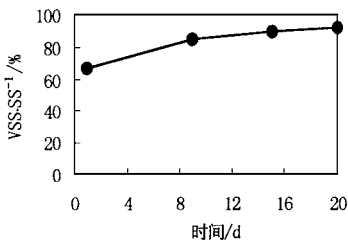


图 9 颗粒污泥 VSS/ TSS 的变化

Fig.9 Variation of rates of VSS and TSS

2.2.3 生物相

通过对颗粒污泥的表面进行扫描电镜镜检发现(图略) , 启动过程中颗粒污泥的生物相发生显著变化 . 接种颗粒污泥表面被 *Methanothrix* 的丝状菌覆盖 , 大量的产甲烷球菌和短杆菌处

于内部孔中;启动结束,颗粒污泥表面 *Methanothrix* 的丝状菌明显减少,产甲烷球菌和八叠球菌占优势,而产甲烷丝状菌仅夹杂于中间,部分表面则以 *Methanobacterium* 为主.此外,还在污泥表面发现大量念珠状球菌.

2.2.4 化学性质

为了进一步揭示启动过程中颗粒污泥性质变化的原因,试验中还研究了启动过程中颗粒污泥所含的化学元素的变化,结果见表 2.从表

2 中可看出,构成颗粒污泥灰分的主要元素是 Fe、Ca、K、Na,但启动后颗粒污泥灰分中大部分化学元素含量都发生了变化.启动结束颗粒污泥内 Na 含量升高为原先的 5 倍多,Cu 元素增加了近 3 倍,Ni、Co、K 元素含量为接种污泥的 2 倍.Ca、Fe 元素含量有所降低,颗粒污泥的颜色由黑色变为灰色可能与 Fe 元素含量减少有关.此外,颗粒污泥中元素的分布情况与所处理的水质也密切相关.

表 2 颗粒污泥内化学元素分析/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Analysis of chemical elements in the granular sludge

元素	Ni	Co	K	Fe	Cu	Ca	Mg	Na	Zn
接种污泥	0.066	0.4143	3.0399	31.51	0.3193	12.945	2.448	2.768	2.278
启动后污泥	0.1186	0.8022	7.0144	28.206	1.1855	9.0891	2.9144	14.820	2.9638

3 结论

(1) IC 反应器的启动包括初次启动和二次启动.初次启动 20 d 内完成,二次启动 15 d 完成,启动结束 COD 容积负荷达 $12\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}\sim 15\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,COD 去除率 85 % 以上.

(2) 反应器启动结束后,颗粒污泥性质发生显著变化:颗粒污泥平均直径由 0.88 mm 增加到 1.25 mm;颗粒污泥沉降速度最大达到 $105.17\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$,比产甲烷活性几乎是接种颗粒污泥活性的 4 倍;产甲烷优势菌由 *Methanothrix* 转变为产甲烷球菌和短杆菌.

参考文献:

1 Lettinga G, Field J, van Lier J, Zeeman G, Hulshoff Pol L W. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future. Wat. Sci. Tech., 1997, 35(10): 5~12.
2 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.环境导报,1998,4:22~24.

3 Habets L H A, Engelaar A J H H, Groeneveld N. Anaerobic treatment of inuline effluent in an internal circulation reactor. Wat. Sci. Tech., 1997, 35(10): 189~197.
4 Driessen W, Yspeert P. Anaerobic treatment of low, medium and high strength effluent in the agro-industry. Wat. Sci. Tech., 1999, 40(8): 221~228.
5 胡纪萃. 试论内循环厌氧反应器. 中国沼气,1999,17(2): 3~6.
6 国家环保局等. 水和废水监测分析方法. 第三版. 北京: 中国环境出版社,1989. 103~104,354~356,118~226.
7 贺延龄. 废水的厌氧生物处理. 北京: 中国轻工业出版社, 1998. 536~543.
8 Pereboom J H F, Vereijken TLFM. Methanogenic granule development in full-scale internal circulation reactors. Wat. Sci. Tech., 1994, 30(8): 9~21.
9 Pereboom J H F. Size distribution model for methanogenic granules from full-scale UASB and IC reactors. Wat. Sci. Tech., 1994, 30(12): 211~221.
10 刘志杰,谢华,俞毓馨等. 厌氧污泥胞外多聚物的提取.测定法选择. 环境科学, 1994, 15(4): 23~26.
11 吴允,张勇,刘红阁等. 啤酒生产废水处理新技术——内循环反应器. 环境保护,1997,9:18~19.