

SBR 工艺运行条件对好氧污泥颗粒化和除磷效果的影响

卢然超¹, 张晓健¹, 张悦¹, 竺建荣² (1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084, E-mail: inchiolou@263.net; 2. 德国慕尼黑工业大学)

摘要: 采用模拟配制生活污水, 研究循环间歇反应器(SBR)工艺在不同运行条件下对好氧污泥颗粒化和生物除磷效果的影响. 试验分别对进水中不同 COD/TN 比(11.79, 18.85, 20.72, 24.66)、COD/TP 比(27.85, 44.53, 48.93, 58.25)、TN/TP 比(4.00, 2.36, 1.54)、温度(22℃, 15℃, 8℃)和污泥龄(16d, 10d, 5d)作比较, 发现进水中较高的 COD/TN 比(24.66)、COD/TP 比(58.25)、温度(22℃)和较低的污泥龄(10d)对生物除磷和颗粒的形成有利; 适当的 TN/TP 比(2.36)、接种污泥的选择是好氧颗粒污泥形成的关键.

关键词: SBR 工艺; 运行条件; 好氧颗粒化污泥; 生物除磷

中图分类号: X703.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)02-04-0087

Aerobic Sludge Granulation and Biological Phosphorus Removal in Different Operating Conditions of SBR

Lou In Chio¹, Zhang Xiaojian¹, Zhang Yue¹, Zhu Jianrong² (1. Dept. of Environmental Sci. & Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China E-mail: inchiolou@263.net; 2. Technical University of Munich, Munich, Germany)

Abstract: This paper investigate the effect of the different operating conditions on the aerobic sludge granulation and biological P removal characteristics in SBR by using synthetic domestic wastewater as feed. Different ratios of COD/TN (11.79, 18.85, 20.72, 24.66), COD/TP (27.85, 44.53, 48.93, 58.25), TN/TP (4.00, 2.36, 1.54), temperature (22℃, 15℃, 8℃) and sludge retention time (16d, 10d, 5d) are tested in this process. It is found that the high ratios of COD/TN (24.66), COD/TP (58.25), temperature (22℃) and low SRT (10d) are beneficial to the phosphorus removal and the cultivation of the aerobic granular sludge. The proper TN/TP rate (2.36), dissolved oxygen and selection of anaerobic seed sludge are basic requirement and most important factors to guarantee such aerobic granules in the process.

Key words: SBR process; operating conditions; aerobic granular sludge; biological P removal

迄今为止, 各国研究学者对 SBR 工艺培养出好氧颗粒化污泥有所报道^[1, 2]. 但是, 这种好氧颗粒污泥在反应器的重现性和稳定性, 以及对生物除磷特性还有待进一步证实. 目前对有关好氧颗粒化污泥的培养和形成条件、污泥的特性以及工艺运行控制参数等方面研究还较少. 反应器中污泥颗粒化和除磷特性一般受到废水水质、运行参数和环境因素等影响. 本试验通过调控改变运行状态, 考察不同运行条件下反应器对好氧污泥颗粒化和除磷特性的影响.

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验所用反应器为聚氯乙烯塑料圆桶, 内径为 22cm, 总体积 8L, 有效容积为 6L. 由 HAL 时间程序控制器及附属电子线路控制进水、厌氧、曝气、沉淀、排水全过程, 可根据需要选定运

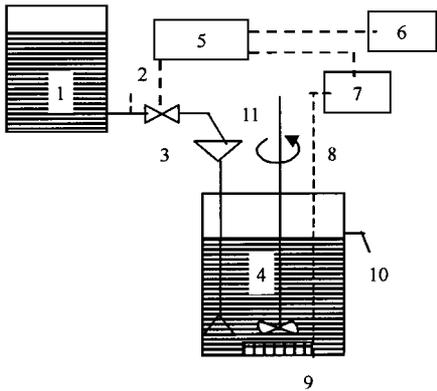
基金项目: 清华大学研究基金资助

作者简介: 卢然超(1973~): 男, 在读硕士研究生.

收稿日期: 2000-05-26

行周期以及各段的启动、关闭时间。夏季:室温下运行,冬季定为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,由 1 根热交换器保持恒温在 $20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气源采用山本-6500 型曝气机,以粘沙块作为微孔曝气器。试验后期还安装了 JF-3 型精密电动搅拌器。

在沉淀与厌氧状态之间进水。进水方式为:从底部向上进水,同时从反应器上部溢流管排水。进水 20 min ,流量 0.5 L/min ,每次进水控制在 $9\sim 10\text{ L}$ 之间,保证容积为 6 L 的反应器内充分换水。定期测定混合液中的 SV, DO, MLSS, MLVSS, TP, $\text{NH}_3\text{-N}$, pH 等运行参数。对此进行分析,判断反应器运行状况并作相应调整。每昼夜运行 3 个周期,对其中 2 个周期进行实时监控。每个状态运行至少 1 个月左右。试验装置见图 1。



1. 配水槽 2. 进水管 3. 电磁阀 4. 反应器
5. 控制板 6. 时间控制器 7. 曝气机 8. 曝气管
9. 曝气头 10. 出水管 11. 搅拌器

图 1 试验装置示意图

1.2 试验方法

以动态连续实验室小试为主,采用模拟生活自配污水,配水水质见表 1。

1.3 分析项目及方法^[5,6]

P 采用钼酸铵-氯化亚锡法; $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂光度法; $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用 DX-100 型离子色谱仪测定;TN 采用过硫酸钾-紫外分光光度法;COD, SV, SVI, MLSS, MLVSS 等按标准方法测定;污泥的形态、结构采用中国科学院微生物所的电子显微镜观察。

表 1 模拟生活污水组成/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

COD	250 ~ 600	NaHCO_3	94
TN	20 ~ 30	$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	94
NH_4Cl	63	$\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	31
KH_2PO_4	44	$\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.2
蛋白胍	56		

2 试验结果和讨论

试验装置 1998-10-19 启动,采用北京啤酒厂的厌氧颗粒污泥为接种污泥。经过 80d 污泥驯化阶段。驯化过程中,原有的厌氧颗粒污泥外层新长出灰白的疏散组织,厌氧颗粒在水力冲刷和曝气的搅动下解体。驯化结束时,污泥形态基本为絮状,总体颗粒化不好,沉降性能很差。污泥浓度为 $3.2\sim 4\text{ mg/L}$,反应器中 P 的去除率约为 12.9%。

2.1 进水碳源的影响

进水中 TN(理论值 24.3 mg/L) 和 TP(理论值 10.3 mg/L) 保持不变,通过改变 COD 来考察 COD/TN 和 COD/TP 比对污泥颗粒化和除磷效果的影响,试验结果见表 2。

(1) COD 为 $250\text{ mg/L}\sim 350\text{ mg/L}$ 污泥的形态仍然是絮状,反应器中不能转化的颗粒污泥黑点还存在,数量虽有所减少,其存在必然影响污泥的活性。污泥沉降性与传统活性污泥差别不大,但具有传统活性污泥所没有的颗粒核心,SVI 值为 100 左右。

(2) COD 为 $350\text{ mg/L}\sim 500\text{ mg/L}$ 前阶段不能转化的颗粒污泥黑点基本消失,污泥完全变为浅黄色,絮状污泥虽然存在,但逐渐形成了小颗粒。粒径不大,约为 $0.1\sim 0.2\text{ mm}$ 。污泥的沉降性明显变好,出水基本不含 SS。

(3) COD 为 600 mg/L 左右 污泥的形态、结构大多以颗粒污泥存在于反应器中。污泥的沉淀性能非常好。这时污泥的浓度约为 4 mg/L ,SV 保持在 0.2。SVI 值为 50 左右。粒径约为 $0.2\sim 1.0\text{ mm}$ 之间,最大的达到了 2 mm 。出水清澈,污泥象各种形状的小黄米粒。此状态前期的除磷效果不好,后加设搅拌器和缩短泥龄,并进行以下调控:在每个周期厌氧段结束污泥沉

淀后,把反应器的剩余碳源配水全部排走,替换为无碳源配水(不加葡萄糖和蛋白胨,其他配水成分不变),以此来抑制非除磷菌在好氧环境下的生长,为除磷菌提供了适合的生长条件.这个过程大约维持 10d,然后正常配水.除磷率迅速提高,稳定运行时除磷率为 85%左右.

表 2 COD/TN 和 COD/TP 比值与除磷效果的关系

时段	COD / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	COD / TN	COD / TP	除磷 效率/ %
	286.9	11.79	27.85	15.3
高效除磷 阶段前	458.7	18.85	44.53	31.0
	504	20.72	48.93	43.3
	600	24.66	58.25	52.9
高效除磷阶段	600	24.66	58.25	85.0

表 3 COD/TN 和 TN/TP 比值与除磷效果的关系

TN / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	COD / TN	TN / TP	除磷 效率/ %	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
41.2	14.56	4.00	54.1	12.32
24.3	24.69	2.36	85.0	1.12
15.9	37.74	1.54	35.7	

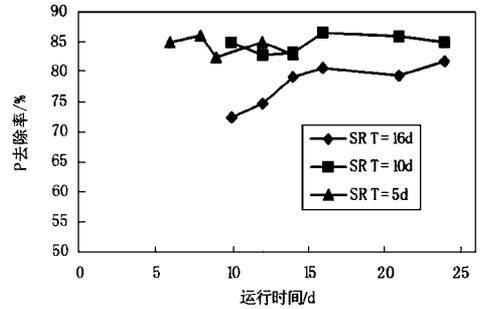


图 2 不同 SRT 与除磷率的关系

2.2 进水氮源的影响

在培养出好氧颗粒化污泥的基础上,试验中其它配水成分(COD = 600 mg/L、TP = 10.3 mg/L)保持不变,分别在反应器 A 和 B 做对比试验,原配水中 TN 含量为 24.3 mg/L.反应器 A 增加配水中氮含量(TN = 41.2 mg/L),反应器 B 减少配水中氮含量(TN = 15.9 mg/L).接种污泥均取自同样的好氧颗粒化污泥,原好氧颗粒污泥具有较好的除磷效果,这样可以保证 2 个反应器的可比性,结果见表 3.试验过程观察到提高或降低进水中的含氮量都会使反应器中的颗粒化程度下降,已有的颗粒污泥逐渐解体,向絮体转化,而且带有丝状絮体,污泥的沉淀性能变差.因此,进水中适合的 TN/TP 比是影响颗粒化污泥的重要因素.

从图 2 可以看出,当 TN/TP 比为 2.36 时,反应器除磷率最高.当 TN/TP 比为 4.0 时,除磷率降到 54.1%,厌氧出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 12.32 mg/L,证明硝酸盐浓度过高,抑制了厌氧放磷过程的顺利进行,导致了反应器磷的去除效果下降;当 TN/TP 比为 1.54 时,除磷率仅为 35.7%,原因可能是废水中的含氮量少,无法为污泥中的除磷微生物提供足够的氮源来进行细胞合成和新陈代谢,抑制了除磷菌的生长.

2.3 污泥泥龄的影响

考察泥龄为 10d 和 5d 对除磷效果的影响,并与泥龄为 16d 的除磷率作对比(图 2).结果表明,SRT 为 10d 和 5d 时,除磷率有所提高,从原(SRT = 16d) 80%左右提高到 86.4%.与污泥龄为 16d 相比,污泥龄为 10d 对好氧颗粒的 SVI 值变化不明显,均为 50 左右,但短泥龄(10d)的颗粒粒径比长泥龄(16d)小,为 0.1 ~ 0.5 mm.这是因为在同样的有机负荷条件下,泥龄短,颗粒没有足够的时间长大.颗粒小,传质条件好,比表面积大,有助于提高反应器的处理能力.当泥龄为 5d 时,尽管保持高效除磷,但污泥的颗粒化逐渐变差,在稳定运行期间,SRT 在 80d ~ 100d 之间,接近普通活性污泥法,而且出水有污泥流失的现象.

2.4 温度的影响

利用加热棒调节反应器温度,结果见图 3 和表 4.可以看出,除磷率随着温度的降低而下降;从 $t = 22^\circ\text{C}$ 的 81.9%,到 $t = 15^\circ\text{C}$ 的 50%左右,最后到 $t = 8^\circ\text{C}$ 的 28%左右.而且随着温度的降低,出水越来越浑浊,含污泥量增加,反应器中污泥减少,颗粒化不好,大多为絮状污泥,污泥颜色变暗,沉淀性能明显下降.笔者认为除磷率下降可能原因有:①低温影响污泥中的微生物生长,污泥浓度降低,活性下降,除磷率不

高. ②低温影响发酵菌的产酸. D. Baetens 等^[2]分别在 20℃, 15℃, 10℃, 5℃做试验, 结果表明在 5℃厌氧区的产酸大大减少, 导致在随后的好氧区乙酸枯竭, 影响放磷效率, 除磷效果下降. ③温度降低使硝化和反硝化作用明显下降, NO₃⁻的存在会抑制产酸菌的厌氧发酵和挥发性脂肪酸的产生. 这一点已在 90 年代的许多研究得到验证.

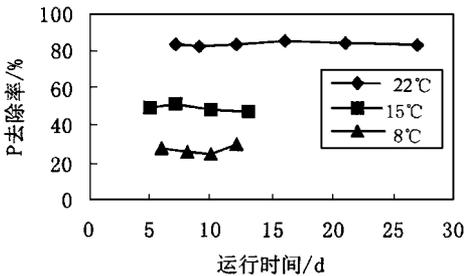


图 3 不同温度与 P 去除率的关系

表 4 曝气结束后 NO₃⁻-N 浓度与温度的关系

温度/℃	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹
8	15.28
15	7.92
22	1.12

2.5 接种污泥

试验曾经采用其它反应器中的污泥为接种污泥, 在反应器 A 作并行比较, 运行条件与反应器 B(好氧颗粒污泥)相同. 经过一个多月的驯化和调整后, 污泥不仅不能形成颗粒, 而且出现一定程度的污泥膨胀, 污泥性能差出水浑浊, 在光学显微镜下观察到反应器中大部分为丝状菌. 经测定, 反应器 A 的除磷能力很低, 一般只能到 20% 左右. 原因可能是, 好氧颗粒的形成开始必须先有微生物附着的基质, 而厌氧颗粒污泥提供了好氧污泥的形成核心, 厌氧颗粒内的微生物逐步培养和转化, 新生的微生物在核心周围互相交错缠绕, 而聚合成颗粒污泥. 不过, 还需要对颗粒从小到大的形成过程各个阶

段进行理化和微生物学的测定来证明.

3 总结

(1) 污水中较高的 C/N 比或 COD/TN 比和较低的污泥龄对生物除磷有利. 要使除磷率超过 80%, COD/TN 在 24 左右.

(2) 进水中适当的氮含量或 TN/TP 比是影响除磷效果和污泥颗粒化的主要因素. 当 TN/TP = 2.36 时, 除磷率和污泥颗粒化最好, 除磷率可达到 85%, SVI 为 50 左右. 高于或低于此比值, 反应器除磷效果和颗粒化变差.

(3) 较短的污泥龄对除磷作用有利, 污泥龄为 10d 或 5d 的除磷率比 16d 的稍有提高. 但污泥龄为 5d 时好氧颗粒形成不好, 太短污泥龄难以进行硝化和反硝化作用, 进行有效地脱氮.

(4) 温度降低, 除磷效率也有所下降. 当 $t = 8^\circ\text{C}$ 时, 除磷率只有 25%, 这是因为温度降低, 影响发酵菌的产酸和反硝化作用, 反应器中硝酸盐的浓度很高, 这是影响反应器除磷能力的主要原因.

(5) 其它运行参数对好氧颗粒化的形成, 例如溶解氧、pH 值、厌好氧交替时间等, 还有待进一步的研究.

参考文献:

- Morgenroth E, Sherden T et al. Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor. *Wat. Res.*, 1997, **31**(12): 3191 ~ 3194.
- Peng Dangcong, Nicolas Bernet Jean-Phillippe Delgenes et al. Aerobic granular sludge—a case report. *Wat. Res.*, 1999, **33**(3): 890 ~ 893.
- 竺建荣, 刘纯新. 好氧颗粒污泥的培养及理化特性的研究. *环境科学*, 1999, **20**(2): 38 ~ 41.
- 美国公共卫生协会 APHA, 自来水厂协会 AWWA, 水污染控制联合会 WPCF 合编, 宋仁元等译. 水和废水标准检验法, 第 15 版. 北京: 中国建设工业出版社, 1982.
- 国家环保局. 水和废水监测分析方法, 第三版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 252 ~ 286.
- Baetens D et al. Temperature effects on bio-P removal. *Wat. Sci. Tech.*, 1998, **39**(1): 215 ~ 225.