

厌氧-好氧颗粒污泥 SBR 处理 城市污水的中试研究

季民¹ 李超¹ 张云霞² 隋鸿志¹ 李欣¹ 郭立¹

(1 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051)

摘要 采用中试规模的厌氧-好氧交替式颗粒污泥 SBR 处理实际城市污水, 研究了厌氧颗粒污泥的培养过程、处理效果及颗粒污泥的特性。以絮状活性污泥为接种污泥, 经过 72 d 的培养后, 反应器内出现小粒径颗粒污泥。在随后的 230 d 运行实验中, 通过调整曝气阶段的溶解氧浓度、排水体积交换率以及周期运行方式, 使得反应器中颗粒污泥粒径和比例逐渐增加。在最佳工况运行条件下, 反应器中污泥浓度为 3 000~4 000 mg/L, SVI 值为 45~55 mL/g。对 COD、氨氮、总氮和总磷的平均去除率分别为 91.63%、74.02%、68.42% 和 96.41%, 达到了同时脱氮除磷的效果。

关键词 SBR 好氧颗粒污泥 中试 城市污水

中图分类号 X703.1 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2010)06-1276-07

Pilot test of domestic wastewater treatment in anaerobic/aerobic granular sludge SBR system

Ji Min¹ Li Chao¹ Zhang Yunxia² Sui Hongzhi¹ Li Xin¹ Guo Li¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract A pilot-scale anaerobic/aerobic granular sludge SBR system inoculated with normal activated sludge was used to treat domestic wastewater. The cultivation process of aerobic granular sludge and the efficiency of the system were investigated, as well as the characteristics of granular sludge. After 72 d's cultivation, small granular sludge appeared in the reactor. Within another 230 d's operation, the diameter and the percentage of aerobic granular sludge increased gradually by changing DO concentration, volume exchange rate and operation programs. Under the optimum working conditions, MLSS reached 3 000~4 000 mg/L and SVI decreased to 45~55 mL/g. The average removal efficiencies of COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP reached 91.63%, 74.02%, 68.42% and 96.41%, respectively. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal ability was achieved in the reactor.

Key words SBR; aerobic granular sludge; pilot test; domestic wastewater

近年来, 好氧颗粒污泥以其沉降性能好、微生物浓度高、能够实现同时除磷脱氮等优点, 逐渐成为污水生物处理领域的研究热点之一^[1~4]。研究者们在好氧颗粒污泥的培养、形成条件、微生物组成、除磷脱氮等方面做了大量的研究工作, 但是这些研究通常采用人工配水, 在实际市政污水研究领域研究较少, 仅有荷兰代尔夫特理工大学取得了显著的研究成果^[5,6], 已获得全球技术专利并应用城市污水进行了中试^[7]。国内对好氧颗粒污泥技术大多停留在实验室阶段, 工程化应用刚刚起步。少数研究者利用实际废水, 如豆制品废水^[8]、酿酒厂废水^[9]、造纸废水^[10]来培养颗粒污泥。迟寒等^[11]对好氧颗粒

污泥处理城市生活污水进行了初步研究, 卢珊等^[12]采用碳、氮含量较高的实际生活污水进行了小试规模的交替式 SBR 中好氧颗粒污泥的形成及其同步脱氮除磷的效果研究。高景峰等^[13]以实际生活污水为研究对象, 以普通絮状污泥为接种污泥, 利用 SBR 和 SBAR 初步考察了沉淀时间对培养短程硝化好氧颗粒污泥的影响。为促使好氧颗粒污泥的工程化应用, 本实验采用实际城市污水, 以絮状活性污泥为接种污泥, 在中试规模的厌氧-好氧交替式 SBR

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07314)

收稿日期: 2009-04-20 修订日期: 2009-06-14

作者简介: 季民 (1957~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为污水生物处理原理及技术。E-mail: jimin@tju.edu.cn

反应器中培养好氧颗粒污泥, 并通过调整反应器的最佳运行参数, 逐步提高反应器的处理效果。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验采用的 SBR 如图 1 所示。反应器由有机玻璃圆柱制成, 内层直径为 38 cm, 有效高度为 200 cm, 有效容积 226.8 L。反应器设置有 3 个出水口, 对应体积交换率分别为 50%、60%、70%。反应器进水、出水以及曝气均由电磁阀控制。反应器内设置厌氧搅拌装置, 在反应器处于厌氧阶段时开启。整个反应器由可编程逻辑控制器自动控制进水、厌

氧搅拌、曝气、沉降、出水及闲置等过程, 并可根据实验需要调整各个阶段的运行时间。整套装置前端设置毛发过滤器, 污水经过毛发过滤器后进入低位水箱, 再经过低位水箱内的潜水泵将污水抽至高位水箱中。高位水箱中的污水靠重力作用流入 SBR 反应器中。反应器底部设置有微孔曝气盘 1 个, 供气量由转子流量计控制。实验期间, 实验室内温度变化范围 12~ 25℃。

1.2 原水水质及接种污泥

实验用水取自天津纪庄子污水处理厂曝气沉砂池后出水, 其水质见表 1。

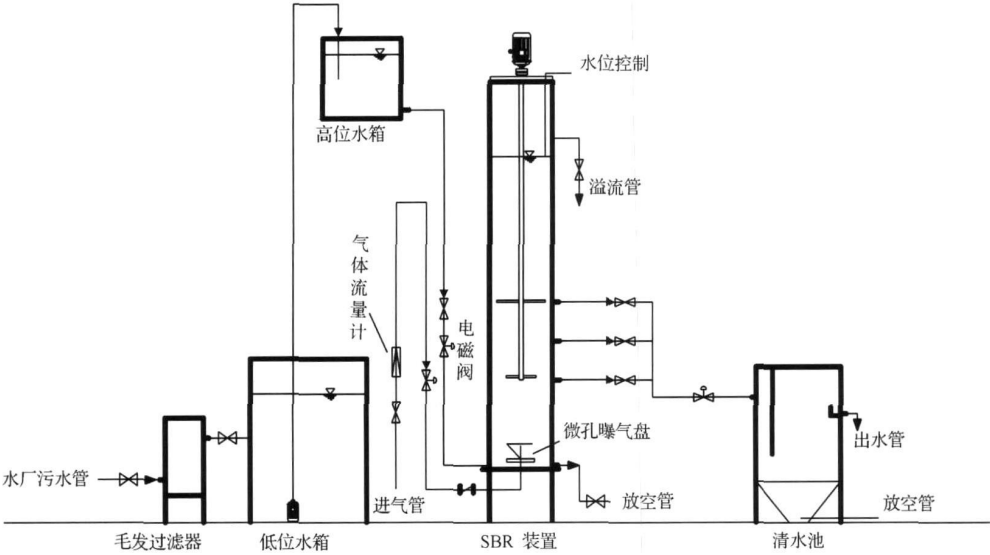


图 1 实验装置示意图
Fig 1 Schematic experimental equipment

表 1 污水水质成分
Table 1 Composition of municipal wastewater (mg/L)

项 目	COD	BOD ₅	氨氮	TN	SS
颗粒培养阶段水质	91.3~157.1	49.4~70.9	39.4~68.2	45.2~71.4	28.2~168.1
运行参数优化阶段水质	346.5~532.6	120.0~241.9	52.4~83.9	52.8~111.0	19.8~137.8

实验接种污泥取自该污水处理厂 A/O 生物池。污泥呈絮状, 结构松散, MLSS 为 2 600 mg/L, MLVSS 为 1 708 mg/L, SVI 120~ 160 mg/L, 没有颗粒, 生物相良好。

1.3 分析项目及方法

氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定; NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 采用 DX600 型离子色谱仪测定; 总氮采用过硫酸钾消解紫外分光光度法; 污泥粒径分布采用激

光粒度仪 (Malvern Mastersizer S Long Bed) 测定; 颗粒污泥表面结构扫描电镜观察采用 HITACHI S-4700 电镜; COD、TP、BOD₅、SS、MLSS 和 MLVSS 均采用标准方法测定^[14]。

1.4 反应器运行方式

反应器各个阶段根据实验需要以及处理效果的不同, 采用不同的运行程序, 见表 2。

表 2 SBR 运行方式
Table 2 Operation programs of SBR (min)

运行参数	方式 1	方式 2	方式 3	方式 4	方式 5	方式 6
进水	40	60	60	60	60	120
曝气	90	120	240	480	600	960
厌氧搅拌	—	60	60	60	60	120
曝气	—	120	60	60	60	120
沉淀	10~30	30	30	30	30	30
出水	12	12	12	12	12	12
周期总长	172	402	462	702	822	1362

2 实验结果与讨论

颗粒污泥的培养分为以下 3 个阶段: 颗粒污泥培养阶段、颗粒污泥生长阶段和运行参数优化调整阶段。通过定期测定反应器内混合液的 DO、SV、MLSS、MLVSS、COD、氨氮、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TN、TP、pH 等运行参数, 对监测数据进行分析, 判断反应器的运行状况, 及时做出相应调整。

2.1 不同运行阶段的反应器性能

2.1.1 颗粒污泥培养阶段

接种污泥后, 反应器内初始污泥浓度为 4 500 mg/L。采用选择压法运行反应器, 逐渐减少沉淀时间以提高临界沉降速率, 使细小分散的絮状污泥洗出, 从而促进颗粒污泥的形成和累积。周期程序采用方式 1。沉淀时间由 30 min 逐渐缩减至 10 min。由于进水中 COD 浓度较低, COD 污泥负荷平均为 0.18 kg COD/(kg MLSS·d), 碳源相对不足, 影响颗粒污泥的生长, 同时低负荷容易引起污泥的丝状菌膨胀而使污泥的沉降性能恶化, 加之利用骤降沉降时间法, 污泥的洗出量大于污泥的生长量, 反应器内的 MLSS 呈下降趋势, 最终降低至 1 750 mg/L, 从

而导致反应器运行状况的不稳定。在第 41 d 补泥后 (见图 2), 放弃使用选择压法, 将沉淀时间调整回 30 min 反应器才重新稳定运行。本阶段实验历时 72 d 后, 反应器内肉眼观察到小颗粒。污泥驯化阶段对 COD 和氨氮的去除效果良好, 出水 COD 均值为 47.2 mg/L, 平均去除率达到 64.2%。氨氮的平均去除率达到了 91.3%, 出水氨氮平均 3.9 mg/L。

2.1.2 颗粒污泥生长阶段

经过培养驯化后, 反应器污泥浓度逐渐稳定, 进入颗粒污泥生长阶段。该阶段历时 79 d 控制泥龄为 20 d。调整反应器运行程序, 将曝气时间分为两段, 增加二次厌氧搅拌和二次曝气的时间, 按照运行方式 2 运行。该阶段反应器 MLSS 平均为 2 300 mg/L, SVI 平均为 58.7 mL/g。反应器对 COD 和氨氮平均去除率分别达到了 60.9% 和 83.7%。

2.1.3 运行参数优化调整阶段

该阶段采用方式 3 运行反应器, 泥龄为 20 d 阶段初始时, 污水厂进水 COD 浓度提高至 347~533 mg/L, 经过一段时间后又降回平均 134 mg/L。实验中为维持有利于颗粒污泥的形成条件, 向反应器投加适量葡萄糖, 以提高进水 COD 浓度。该阶段 COD 污泥负荷 0.46 kg COD/(kg MLSS·d)。反应器内污泥 MLSS 呈现增长趋势 (见图 2), 平均为 3 967 mg/L。污泥 SVI (30 min) 呈逐渐下降趋势, 污泥沉降性能逐渐变好, SVI 值平均为 56.8。该阶段反应器 COD 去除率平均为 88.2%。经过一系列的参数调整, 延长曝气时间, 氨氮去除率逐步提高至 80.1%。

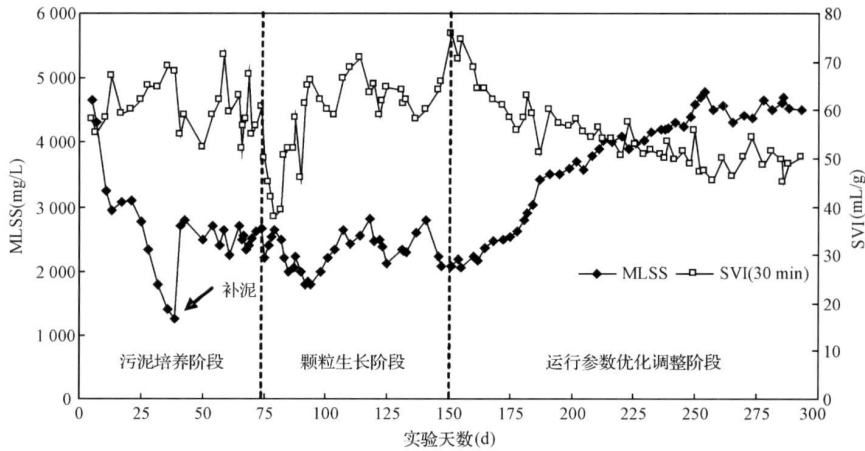


图 2 实验过程中 MLSS 和 SVI 变化

Fig 2 Changes of MLSS and SVI during experiments

2 2 运行参数优化调整阶段的处理效果

进入运行参数优化调整阶段后, 为提高反应器脱氮除磷效果, 调整反应器的运行参数, 以寻求反应器的最佳运行工况。根据好氧颗粒污泥颗粒化的影响因素以及反应器自身设计的特点, 分别改变反应

器曝气阶段溶解氧、反应器体积交换率以及反应器运行方式, 考察反应器在不同条件下对有机物的去除以及脱氮除磷的效果。

运行参数优化调整阶段试验过程以及各项目平均去除处理效果整理为表 3。

表 3 反应器参数优化调整阶段实验过程以及处理效果
Table 3 Experimental process and efficiency in reactor parameters optimization period

实验天数 (d)	DO (mg / L)	体积交换率 (%)	运行时序	COD 去除率 (%)	氨氮去除率 (%)	TN 去除率 (%)	TP 去除率 (%)
172~ 178	2~ 3	50	方式 3	91. 2	40. 7	39. 1	95. 3
179~ 185	3~ 4	50	方式 3	88. 7	39. 3	38. 0	93. 6
186~ 192	4~ 6	50	方式 3	89. 0	41. 3	38. 3	94. 0
193~ 199	2~ 3	60	方式 3	91. 0	45. 4	44. 7	97. 9
200~ 206	2~ 3	70	方式 3	86. 9	51. 4	46. 2	98. 0
231~ 250	2~ 3	70	方式 4	89. 6	67. 2	59. 9	98. 0
251~ 270	2~ 3	70	方式 5	92. 7	69. 2	61. 1	93. 4
271~ 290	2~ 3	70	方式 6	92. 6	85. 7	84. 3	97. 8

在实验第 172~ 192 d 进行改变反应器内 DO 浓度变化的批次实验。将溶解氧分别控制在 2~ 3 mg/L, 3~ 4 mg/L 和 4~ 6 mg/L 下。DO 控制在 2~ 3 mg/L 时, 反应器去除效果与 DO 在 3~ 4 mg/L 以及 4~ 6 mg/L 的条件下的去除效果基本持平。溶解氧过大会穿透小颗粒, 使颗粒污泥的缺氧层和厌氧层变薄, 甚至消失, 使脱氮的效果降低。该阶段实验表明, 好氧颗粒污泥工艺, DO 控制在 2~ 3 mg/L 下即可满足微生物需氧要求, 又可维持颗粒内部的缺氧层。

在实验第 193~ 206 d 进行改变反应器体积交换率的批次实验。依次将反应器体积交换率提高至 60% 和 70%。提高了反应器体积交换率相当于增加了进入反应器的碳源, 使厌氧阶段可以在污泥细胞内储存更多的能量, 供反硝化菌和聚磷菌等在好氧阶段使用。

实验第 231~ 290 d 逐渐将周期时间由 462 m in 延长至 1 362 m in。由表 3 可以看出, 随着周期时长的延长, 出水氨氮和总氮的浓度逐渐降低, 处理效果稳步提高。

第 271~ 290 d 平均出水水质见表 4。
由表 4 可见, 随着对运行参数的优化和调整, 反应器各污染物的浓度达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准。

表 4 271~ 290 d 平均出水水质

	COD	氨氮	TN	TP	BOD ₅	SS	pH
	(mg / L)	(mg / L)	(mg / L)	(mg / L)	(mg / L)	(mg / L)	
进 水	412. 8	48. 7	50. 1	4. 8	217. 3	54. 2	7. 3
出 水	22. 9	3. 4	4. 5	< 0. 1	9. 3	8. 2	7. 0

2. 3 典型反应周期中主要指标的变化

图 3 是周期时长分别为 702、822 和 1 362 m in 的典型周期反应器中主要水质指标变化图。图中 I 为进水搅拌阶段, II 是曝气阶段, III 为缺氧搅拌阶段, IV 为二次曝气阶段, V 是沉淀阶段, VI 是出水阶段。

由图 3 可见, 不论周期长短, 大部分 COD 都会在进水厌氧搅拌反应阶段被去除, 根据文献 [15] 介绍, 在厌氧-好氧交替反应过程中厌氧阶段被微生物快速吸收的有机物, 以胞内聚合物 PHB (聚 β 羟基丁酸) 的形式储存于细胞中。在接下来的好氧阶段, 污泥可以利用厌氧阶段储存在胞内的 PHB 作为反硝化的碳源。由于自养硝化与异养反硝化相比是一个较慢的过程, 需要有一个慢速的降解碳源来使得硝化反硝化尽量同步进行。由于 PHB 的降解速率相对较低^[16], 可以使硝化反硝化保持相近的速率, 不会使好氧中后期反硝化碳源匮乏, 从而可以获

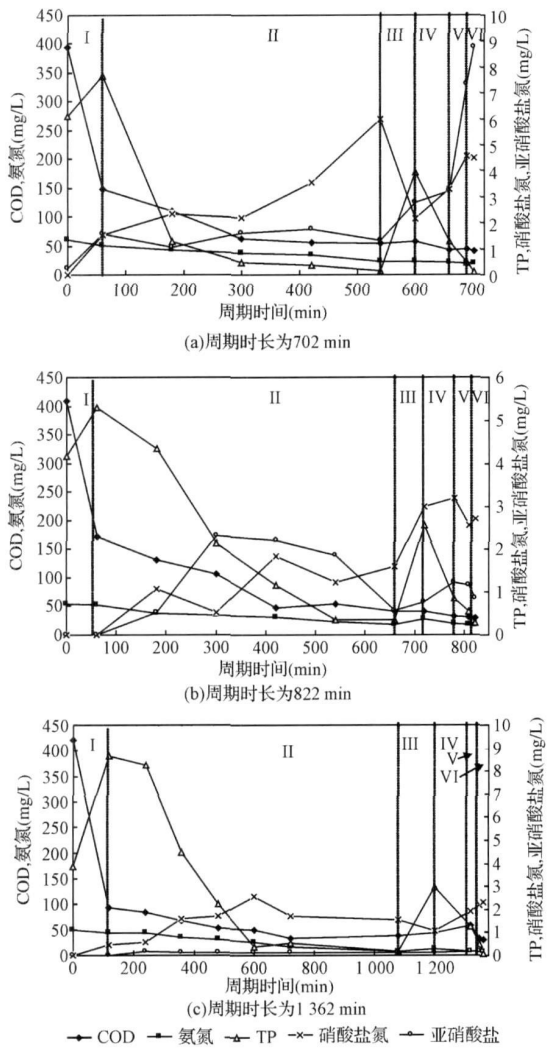


图 3 典型周期反应器中主要水质指标变化
Fig. 3 Changes of main water quality index in typical cycles reactor

得良好的脱氮效果。

由图 3(a)可见,在较短反应时间时,第一次好氧硝化反应的主要产物是硝酸盐,而第二次好氧硝化的主要产物为亚硝酸盐,反应器内呈现短程硝化反硝化的现象。当反应时间较长时,如图 3(b)、图 3(c)所示,第一次和第二次好氧硝化反应的产物主要为硝酸盐。

另外,通过图 3 可明显地观察到缺氧阶段磷的释放以及好氧阶段磷的吸收现象。

2.4 颗粒污泥的特性分析

图 4是将第 141 d的颗粒污泥样品置于培养皿内拍下的照片。其中图 4(a)为肉眼观察系统中颗粒污泥外观,图 4(b)为光学显微镜下颗粒污泥

外观。

肉眼观察颗粒污泥轮廓分明,颗粒之间区分明显。颗粒成球状或椭球状,外形比较光滑,一般呈棕色或棕黄色,颗粒边缘颜色较浅,有一层微绒毛。光学显微镜下观察,颗粒污泥生物相丰富,有活跃的钟虫、轮虫等原生和后生动物。

颗粒污泥的电镜分析照片如图 4(c)、图 4(d)所示。颗粒污泥生物相以球菌、杆菌为主。颗粒污泥的表面呈现各种沟迥和皱褶,这增大了污泥表面同废水的接触面积,能够更有效吸收和分解废水中的养分。颗粒污泥上存在许多空隙,可以为外部基质传输以及内部微生物生长代谢产物逸出提供通道。

接种污泥的 MLVSS/MLSS 为 65.72%,经过驯化培养后,反应器中 MLVSS/MLSS 逐渐升高,在负荷提高阶段达到 78.91%。

耗氧速率 (OUR) 也是评价污泥微生物代谢活性的一个重要指标。在提高负荷阶段对颗粒污泥进行多次 OUR 的测定,以对其微生物代谢活性进行比较。测得的好氧颗粒污泥的 OUR 平均 $1.26\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{min})$,高于普通活性污泥 (OUR 为 $0.8\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 左右),显示了好氧颗粒污泥良好的生物活性。

在实验运行的第 35、82 和 167 d 从反应器中取出适量颗粒污泥,用激光粒度仪测定其粒径分布,结果见图 5。

测试结果显示,随着运行时间延长,颗粒污泥平均粒径有逐渐增加趋势,颗粒培养阶段、颗粒生长阶段和负荷提高阶段颗粒平均粒径分别为 $95.79\text{ }\mu\text{m}$ 、 $147.6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $245.4\text{ }\mu\text{m}$,其中负荷提高阶段,粒径在 $103.6\sim 647.4\text{ }\mu\text{m}$ 范围内污泥占反应器内全部污泥的 70%。但是相比较其他文献中的报道^[3 11],该试验所培养的颗粒粒径偏小,颗粒所占的比例偏低。这可能是进水中有机物浓度偏低的原因。

3 结 论

(1) 采用中试规模的厌氧-好氧交替式颗粒污泥 SBR 处理实际城市污水,经过 72 d 的培养,反应器内出现小粒径颗粒污泥。在随后的 230 d 运行试验中,通过调整曝气阶段的溶解氧浓度、排水体积交换率以及周期运行方式,使得反应器中颗粒污泥粒径和比例逐渐增加。在颗粒培养阶段、颗粒生长阶段和运行参数优化调整阶段的颗粒污泥平均粒径分别达到 $95.79\text{ }\mu\text{m}$ 、 $147.6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $245.4\text{ }\mu\text{m}$ 。颗粒污泥的

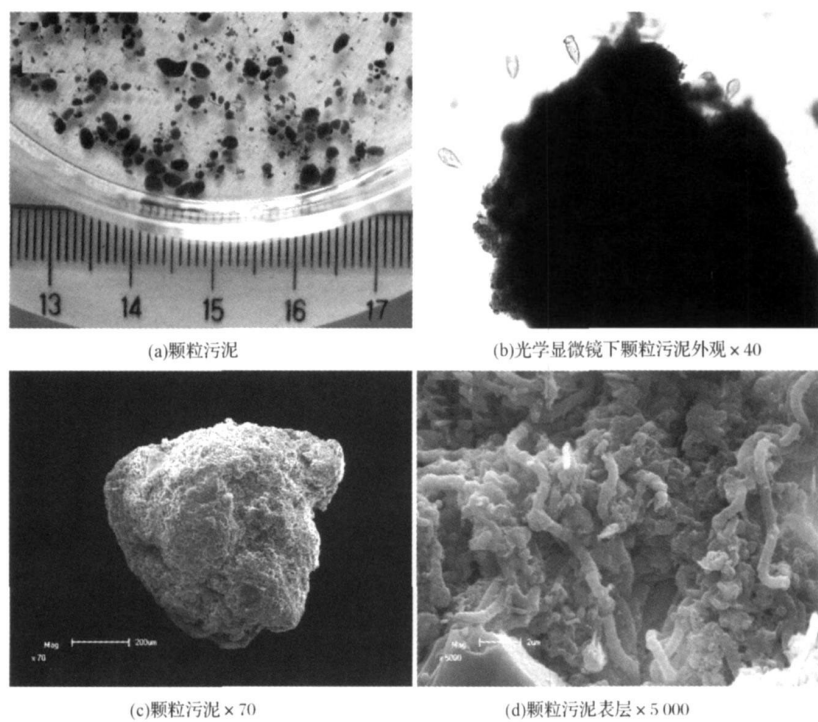


图 4 好氧颗粒污泥的形态以及扫描电镜观察

Fig.4 Morphology and observation by SEM of aerobic granular sludge

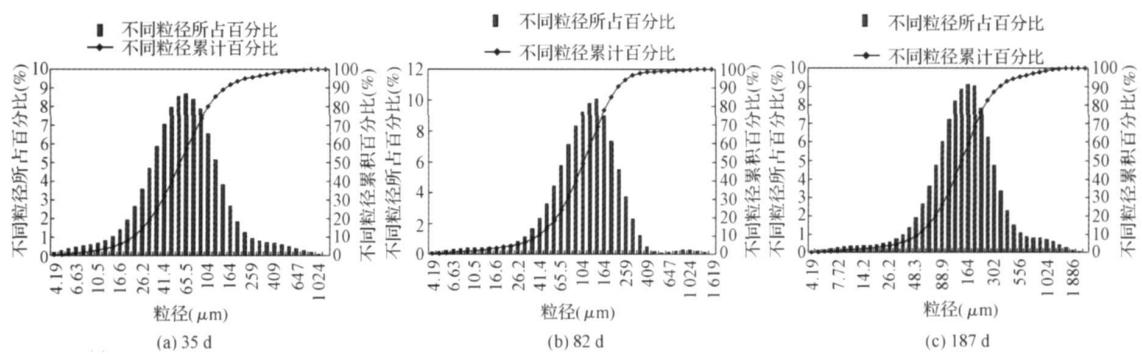


图 5 各阶段粒径分布

Fig.5 Particle size distribution of granule

MLVSS/MLSS为 79%, 颗粒污泥耗氧速率 (OUR) 达到 1.26 mg/(g·min), 颗粒污泥比絮状污泥有更好的生物活性。

(2) 在最佳工况运行条件下, 反应器中污泥浓度为 3 000~4 000 mg/L, SV I 值为 45~55 mL/g 对 COD、氨氮、总氮和总磷的平均去除率分别为: 91.63%、74.02%、68.42% 和 96.41%。

(3) 以小粒径污泥颗粒为主的厌氧-好氧交替运行的 SBR, 其脱氮除磷反应过程与传统的 A/O 工艺相似。大部分有机物在厌氧阶段去除。厌氧释

磷, 好氧吸磷的现象也非常明显。硝化反应随周期反应时间长短有所不同, 在短周期反应时间条件下, 出现短程硝化反硝化反应现象, 二次好氧出水以亚硝酸盐为主。长周期条件下, 出水以硝酸盐为主。

参考文献

[1] Morgenroth E., Sherden T., Van Loosdrecht M. C. M., et al. Aerobic granulation in a sequencing batch reactor. *Water Research*, **1997**, 31(12): 3191~3194

[2] Tay J. H., Liu Q. S., Liu Y. Microscopic observation of

- aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor. *Journal of Applied Microbiology*, **2001**, 91(1): 168~175
- [3] 卢然超, 张晓健, 张悦, 等. SBR工艺运行条件对好氧污泥颗粒化和除磷效果的影响. *环境科学*, **2001**, 22(2): 87~90
- [4] 王强, 陈坚, 堵国成. 选择压法培育好氧颗粒污泥的试验. *环境科学*, **2003**, 24(4): 99~104
- [5] Beun J. J., Van Loosdrecht M. C. M., Heijnen J. J. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor. *Water Research*, **2002**, 36(3): 702~712
- [6] De Kreuk M. K., De Bruijn L. M. M., Kraan M. W., *et al*. Nutrients removal by aerobic granular sludge: microelectrode measurements and modeling. Thesis of 5th IWA World Water Congress, Beijing, **2006**
- [7] Van Loosdrecht M. C. M., De Kreuk M. K. Method for the treatment of wastewater with sludge granules. Dutch and International Patent NL1021466C, WO2004024638 (A1), **2004**
- [8] Su K. Z., Yu H. Q. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater. *Environmental Science and Technology*, **2005**, 39(8): 2818~2827
- [9] Wang S. G., Liu X. W., Gong W. X., *et al*. Aerobic granulation with brewery wastewater in a sequencing batch reactor. *Bioresource Technology*, **2007**, 98(11): 2142~2147
- [10] 王海磊, 魏丽莉, 李宗义. 好氧颗粒污泥的形成过程、形成机理及相关研究. *环境污染与防治*, **2006**, 27(7): 485~488
- [11] 迟寒, 刘毅慧, 杨凤林, 等. 好氧颗粒污泥处理城市生活污水. *水处理技术*, **2006**, 32(8): 73~77
- [12] 卢珊, 季民, 王景峰, 等. 颗粒污泥 SBR 处理生活污水同步除磷脱氮的研究. *环境科学*, **2007**, 28(8): 1687~1692
- [13] 高景峰, 周建强, 彭永臻. 处理实际生活污水短程硝化好氧颗粒污泥的快速培养. *环境科学学报*, **2007**, 27(10): 1604~1611
- [14] 国家环境保护局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [15] 王景峰, 王暄, 季民, 等. 聚糖菌颗粒污泥基于胞内储存物质的同步硝化反硝化. *环境科学*, **2006**, 27(3): 473~477
- [16] Thirid K. A., Burnett N., Cord-Ruwisch R. Simultaneous nitrification and denitrification using stored substance (H₂B) as the electron donor in an SBR. *Biotechnology and Bioengineering*, **2003**, 83(6): 706~720