

好氧颗粒污泥处理实际污(废)水的研究与工程化应用进展

季民¹, 魏燕杰¹, 李超¹, 秦菲菲², 王芬¹

(1 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072 2 天津市自来水集团 津南水务有限公司, 天津 300350)

摘要: 好氧颗粒污泥以反应器中污泥浓度高、沉降速度快、耐冲击负荷能力强、能够同时实现脱氮除磷等特点成为目前污(废)水处理领域的研究热点之一。介绍了好氧颗粒污泥在实际城市生活污水、工业废水处理中的研究现状,以及基于好氧颗粒污泥的技术开发与工程化应用的最新研究进展,指出其在污水处理设施升级改造或新工艺设计中具有良好的应用前景。

关键词: 好氧颗粒污泥; 城市生活污水; 工业废水

中图分类号: X703 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2010)04-0010-05

Research on Treatment of Real Wastewater with Aerobic Granular Sludge and Its Engineering Application Progress

JIMin¹, WEIYan-jie¹, LIChao¹, QNFei-fei², WANGFen¹

(1 School of Environmental Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China
2 Jinnan Water Co. Ltd., Tianjin Waterworks Group Co. Ltd., Tianjin 300350, China)

Abstract With advantages of high concentration, rapid settling velocity, strong ability to withstand shock loading and capacity of simultaneous nitrogen and phosphorus removal, aerobic granular sludge has become one of the hot research issues in the field of wastewater treatment. The recent research progress in treatment of real municipal wastewater and industrial wastewater by aerobic granular sludge as well as in development and engineering application of aerobic granular sludge technology are introduced. The treatment technology based on aerobic granular sludge has good application prospect in upgrading and reconstruction of wastewater treatment facilities and in design of new processes.

Key words aerobic granular sludge; municipal wastewater; industrial wastewater

好氧颗粒污泥以反应器中污泥浓度高、沉降速度快、耐冲击负荷能力强、能够同时实现脱氮除磷等特点,成为目前污(废)水处理领域的研究热点之一。在大量好氧颗粒污泥理论研究的基础上,研究者们进行了好氧颗粒污泥处理实际污(废)水的小试和中试,并取得了较好的处理效果。

1 好氧颗粒污泥的工程应用研究

1.1 在城市生活污水处理中的应用

目前,在好氧颗粒污泥的形成条件和机理、微生物组成和种群的演变以及对氮、磷、难降解有机物、重金属的去除等方面已有大量的理论研究,近年来

对好氧颗粒污泥的研究开始转移到处理实际生活污水等方面。

deKreuk等^[1]采用 SBAR (sequencing batch airlift reactor) 反应器,以絮状污泥为接种污泥,考察了颗粒污泥对城市生活污水的除污效果。试验中,预沉后反应器进水 COD、氨氮分别为(170~330)、(51~57) mg/L。结果表明,在最初的低有机负荷[1.0 kg/(m³·d)]下反应器中无颗粒污泥形成;当缩短运行周期提高有机负荷至 1.5 kg/(m³·d)后,第 20 天反应器中形成了平均粒径为 1.1 mm 的颗粒污泥。与人工配水下形成的表面光滑的颗粒污泥不

同, 该试验培养出的颗粒污泥表面丝状菌丛生, 表面形状各异。Li 等^[2]以乙酸盐配水培养的好氧颗粒污泥为接种污泥, 采用 SBR 反应器处理初沉池后的低浓度城市生活污水(进水 COD、氨氮平均为 200、50 mg/L)。当运行周期为 4 h 时, 有机负荷和氨氮负荷分别为 0.6、0.15 kg/(m³·d); 运行 12 d 后, 运行周期减至 2 h, 有机负荷和氨氮负荷均增加一倍; 当系统运行稳定后, 出水氨氮 < 5 mg/L, 对其去除率高达 90% 以上。迟寒等^[3]采用以乙酸钠和蔗糖为有机碳源的配水, 在 SBAR 中培养出了好氧颗粒污泥, 通过逐步提高进水中城市生活污水(污水厂格栅出水)的比例来驯化培养颗粒污泥的活性及适应能力。当进水全部为城市生活污水时, 反应器运行稳定, 在进水 COD、氨氮分别为(100~150)、(25~30) mg/L 时, 系统对 COD 和 NH₃-N 的平均去除率分别达 70% 和 90%; 颗粒污泥的 MLSS 基本在 2 000~3 500 mg/L, SVI 为 35~50 mL/g。高景峰等^[4,5]以具备良好硝化功能的絮状污泥为种泥, 利用 SBR 和 SBAR 处理某小区的生活污水。在进水 COD、氨氮分别为(200~350)、(50~85) mg/L 并维持表面气速为 15.7 m/h 的条件下, 通过缩短沉淀时间的方式实现了污泥颗粒化。与污泥未形成颗粒化时相比, SBR 和 SBAR 系统中的硝化类型均由全程硝化转变为短程硝化, 出水 NO₂⁻/NO_x⁻ 平均值分别长期维持在 98.7% 和 85.6% 左右, 氨氮降解速率提高了 2~4 倍。张岩等^[6]采用泳动床与好氧颗粒污泥相结合处理低浓度的小区生活污水, 系统运行 16 d 就出现了好氧颗粒污泥。稳定运行期间水力停留时间 HRT 为 3.2 h, COD 负荷与 NH₄⁺-N 负荷分别为 2.03、0.52 kg/(m³·d), 出水 COD、氨氮分别为 20.8、1.2 mg/L, 对其平均去除率分别为 90.9% 和 98.3%; MLVSS/MLSS 平均值高达 0.87, 污泥产率为 0.1755 gMLSS/gCOD_{去除}, 仅为传统好氧工艺的 50% 左右。李军等^[7]对城市污水处理厂曝气池中筛选出的好氧颗粒污泥进行了分析, 发现这些颗粒污泥的直径主要为 0.2~0.8 mm, 占污泥总量的 0.1%~0.5%; 沉淀速率约为 10~42 m/h, 比耗氧速率(SOUR)为 14.2~18.9 mg/(g·h), 挥发性物质占总固体的量与活性污泥基本相似。

1.2 在工业废水处理中的应用

好氧颗粒污泥具有致密的结构、良好的沉降性能, 从而可以在反应器中滞留大量的污泥, 具有处理

高浓度废水的潜力。颗粒污泥致密的结构为多种微生物共存提供了良好的微生态环境, 大量的难降解污染物质可以在紧凑的系统中得到有效处理。同时颗粒污泥的特殊紧凑结构提供的屏蔽作用, 可使颗粒中相当数量的微生物不需要直接接触反应器中的高浓度有毒成分, 使得颗粒污泥系统即使在高毒性的废水处理中也能够表现出较好的除污性能。

Aronj 等^[8]以絮状污泥为接种污泥, 采用 SBR 工艺处理乳品工业废水。该废水 TCOD 为 500~3 000 mg/L, SCOD 为 300~1 500 mg/L, TN 为 50~200 mg/L, 系统启动 60 d 实现了污泥颗粒化。稳定运行期间, 污泥平均粒径为 3.5 mm, SVI 为 60 mL/g, 污泥层区域的沉降速度(ZSV)为 20 m/h。当 COD 负荷与 NH₄⁺-N 负荷分别为 7.0、7 kg/(m³·d) 时, 系统对 COD 和氨氮的去除率分别为 70% 和 80%。Schwarzenbeck 等^[9]同样以絮状污泥为接种污泥, 采用 SBR 工艺处理乳品工业废水。该废水 TCOD 为 2 800 mg/L, SCOD 为 1 500 mg/L, TN 为 140 mg/L, TP 为 30 mg/L。反应器运行第一周即出现颗粒污泥, 第 8 周开始颗粒污泥表面丝状菌滋生。通过采取降低排水体积交换率(由 75% 降至 50%)、缩短沉降时间(由 15 min 降至 5 min)、提高进水 pH 值至 8.5 等措施, 丝状菌逐渐消失。系统稳定运行期间, COD 负荷为 4.5 kgTCOD/(m³·d), 对 TCOD、TN 和 TP 的去除率分别为 90%、80% 和 67%; 污泥平均产率为 0.55 gMLSS/gCOD_{去除}。Su Wang 等分别以絮状污泥为接种污泥, 采用 SBR 工艺处理豆制品和啤酒生产废水, 均取得了良好的除污效果^[10,11]。

此外, 众多研究者还将颗粒污泥结合其他技术用于造纸废水、Vc 生产废水及城市垃圾渗滤液的处理, 对 COD、BOD₅ 和 NH₃-N 等污染物的处理效果均较好^[12~14]。

2 基于好氧颗粒污泥的技术开发及应用

2.1 NeredaTM好氧颗粒污泥技术

荷兰 DHV 公司及代尔夫特理工大学、SIW 和 STOWA 于 1999 年合作开始研究 NeredaTM 好氧颗粒污泥技术, 并于 2003 年—2005 年在荷兰 Ede 污水处理厂进行了世界上第一例利用好氧颗粒污泥处理城市生活污水的中试研究。该中试投入运行了 2 座颗粒污泥 SBR 工程化反应器, 基本参数如下: 水量为 5 m³/h, 表面负荷为 3 m/h, 高度和直径分别为 6 m 和 0.6 m, 运行周期为 2.5~3 h, DO 为 1.5~5

mg/L, 水温为 12~20℃; 进水经沉淀、砂滤等预处理后, 可去除 75% 的 SS。稳定运行期间, SBR 中的 MLSS 达 8~12 g/L, 粒径 > 212 μm 的颗粒污泥占 80%~90% (W/W), 且以粒径 > 0.6 mm 的颗粒污泥为主, SV₅ 为 35~65 mL/g。两年的实践运行证明, 基于好氧颗粒污泥的 Nereda™ 工艺占地面积仅为传统工艺的 20%~30%, 虽然初期机电设备的投资较大 (占基建总投资的 40%~45%, 而传统活性污泥工艺中该比例为 25%~30%), 但由于剩余污泥量小, 紧凑的反应器所需供氧量较少, 其能耗比传统工艺降低了 25%~35%, 年均总运行费用 (包括前处理和后续工艺) 比传统活性污泥法低 7%~17% 左右^[15, 16]。

在中试研究的基础上, 荷兰 DHV 公司于 2008 年将 Nereda™ 工艺首次用于南非某污水处理厂的升级改造中。该污水厂存在的主要问题是进水量已严重超过水厂现有设施的处理能力, 致使处理系统的污泥龄低、出水水质差。原改造计划分两步: 第一步, 扩建已有设施使其处理能力达到 2 000 m³/d; 第二步, 新建一座规模为 5 000 m³/d 的采用传统活性污泥工艺的污水厂。基于投资和用地等方面的考虑, Nereda™ 技术最终被用于该污水厂的升级改造。与传统工艺相比, Nereda™ 技术的基建投资低 20% 左右, 电耗节省 35%~45%, 年运行费用降低 50% 左右。目前, 该工程正在试运行^[17, 18]。

2.2 ARGUS 好氧颗粒污泥技术

ARGUS (Aerobic Granules Upgrade System) 是克罗地亚 EcoEngineering 公司开发的技术产品, 可用于污水处理设施的升级改造, 或者用于新建污水处理设施的启动并处理复杂的有毒废水, 也可用于高氨氮废水的处理。该技术首先将实验室培养的好氧颗粒污泥接种于现场的培养罐 (宜为主反应器容积的 2%~3%) 中, 以工厂生产废水为进水, 并投加微生物生长必需的盐类物质, 进行颗粒污泥的富集培养驯化。然后将培养出来的好氧颗粒污泥连续或分阶段地投加到主反应器中, 直至主反应器运行稳定。培养罐中颗粒污泥的富集培养需持续运行, 以便为主反应器发生故障或受到负荷冲击时补加颗粒污泥, 促使主反应器快速恢复稳定运行。目前该技术已成功运用到多家工业废水处理厂, 包括匈牙利的一家制药厂、荷兰的 Nieuwedorp 垃圾渗滤液处理厂、斯洛文尼亚的两家抗生素制药厂及 Lendava

WWTP 的升级改造工程^[19]。

2.3 PERBDF (Periodic Biofilter) 项目

PERBDF 技术是意大利 RSA (Istituto di Ricerca Sulle Acque) 研发的高性能污水处理技术。其主体为 SBBGR (sequencing batch biofilter granular reactor), 内部设生物固定床。该技术通过投加接种污泥, 利用固定床培养出的好氧颗粒污泥处理城市生活污水及工业废水。表 1 比较了该技术与传统活性污泥工艺的一些主要运行参数^[20]。可以看出, PERBDF 技术具有微生物浓度高、污泥产率低、占地面积小等优点。

表 1 PERBDF 技术的 SBBGR 与传统活性污泥工艺的运行参数比较

Tab 1 Comparison of parameters between SBBGR and CAS technology

项目	SBBGR	活性污泥工艺
污泥浓度 / (kgTSS · m ⁻³)	40	4
容积负荷 / (kgCOD · m ⁻³ · d ⁻¹)	6	1
污泥产率 / (kgTSS · kg ⁻¹ COD _{removed})	0.07	0.5
单位占地面积 COD 去除量 / (kgCOD _{removed} · m ⁻²)	30	3
处理难降解工业废水的能力	高	低

在实验室研究的基础上, RSA 于 2005 年 11 月开始启动了 PERBDF 项目, 将 PERBDF 技术应用在一些示范工程并处理实际的城市生活污水或工业废水。中试反应器 (包括容积为 31 m³ 的 SBBGR 及一套臭氧处理装置) 首先在 AMGA 实验室组装完成, 经 3 个星期的预试验后被安装在意大利某城市污水处理厂中。经过 3 个月的运行, 水力停留时间 (HRT) 从最初的 12 h 逐渐减小到 4 h, 反应器中出现了好氧颗粒污泥。稳定运行期间, 当进水 COD 和氨氮平均为 380~32 mg/L 时, 出水分别仅为 50~6 mg/L, 对有机物的去除效果较好。

该中试反应器还被用来处理意大利一家制革厂的生产废水, 在容积负荷为 4 kgCOD/(m³ · d)、进水 COD 平均为 2 900 mg/L 时, 单独采用 SBBGR 处理的出水 COD 仅为 250 mg/L (对其去除率高达 90%), 但是尚不能满足意大利工业废水排放标准。结合后续的臭氧处理装置 (臭氧投加量为 150~300 gO₃/m³), 则联合系统对 COD、DOC、TSS、TKN、表面活性剂及色度的去除率分别为 99.5%、98%、99%、95%、98.7% 和 98%, 出水水质完全满足排放标准。

2.4 国内好氧颗粒污泥中试研究项目

倪丙杰等^[21]在合肥朱砖井污水处理厂进行了应用好氧颗粒污泥处理低浓度城市生活污水的中试研究。已建 SBR 反应器有效容积为 1 m^3 , 高度和内径分别为 6 m 和 0.5 m ; 溶解氧控制在 2 mg/L 左右, HRT 为 $6\sim 8\text{ h}$ 排水体积交换率为 $50\%\sim 70\%$, 有机负荷为 $0.6\sim 1.0\text{ kgCOD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。反应器中接种污泥取自朱砖井污水处理厂的曝气池, SVI 为 75.5 mL/g 初始污泥浓度为 40 g/L 。经过 80 d 的运行, 反应器内出现了粒径为 0.3 mm 左右的颗粒污泥。300 d 后, MLSS 达 $80\sim 100\text{ g/L}$, 85% 为好氧颗粒污泥; 污泥平均粒径 $> 0.4\text{ mm}$, SVI₀ 仅为 35 mL/g 污泥的沉降速率达 $18\sim 40\text{ m/h}$ 。

笔者所在课题组近年来在厌氧—好氧循环机制下培养颗粒污泥, 在污泥胞内储存机理、颗粒污泥稳定性、颗粒污泥 SBR 同步去除有机物及硝化反硝化除磷、好氧颗粒污泥 SBR 处理小区生活污水及垃圾渗滤液等方面进行了大量研究^[22], 并在此基础上进行了中试规模的厌氧—好氧交替式颗粒污泥 SBR 反应器处理实际城市生活污水的研究。以絮状活性污泥为接种污泥, 经过 72 d 的培养反应器内出现了小粒径颗粒污泥。在随后 230 d 的运行试验中, 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。特别是在负荷提高阶段, 粒径为 $103.6\sim 647.4\text{ }\mu\text{m}$ 的污泥占反应器内全部污泥的 70% , 基本实现颗粒化。在最佳工况运行条件下, 反应器中污泥浓度为 $3000\sim 4000\text{ mg/L}$, SVI 为 $45\sim 55\text{ mL/g}$ 对 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 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^[23]。

3 结语

尽管好氧颗粒污泥与传统活性污泥、厌氧活性污泥、生物膜等相比有着诸多优势, 但由于异养微生物生长速度快, 当运行条件(如容积负荷、曝气量等)控制不当时, 易造成颗粒污泥解体, 沉降性能下降, 出水水质恶化。因此颗粒污泥的稳定性成为其工业化推广的瓶颈, 这将是今后的研究重点。

将现有絮状污泥 SBR 改造成颗粒污泥 SBR, 只是运行方式的改变, 并不需要土建和设备的过多改动, 就可提高系统对有机物、氮、磷的去除能力。此外, 好氧颗粒污泥具有活性污泥所不具备的一些独

特优点, 如具有很强的抗冲击负荷能力、污泥沉淀效果好、泥水分离简单、缩短污泥沉降时间、减小占地面积、降低工程造价、剩余污泥量少等。因此可以预测基于好氧颗粒污泥的处理技术在污水处理设施升级改造或新工艺设计中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] de Kreuk M K, van Loosdrecht M C M. Formation of aerobic granules with domestic sewage[J]. J Environ Eng, 2006, 132(6): 694–697.
- [2] Liu Y Q, Moy B Y P, Tay J H. COD removal and nitrification of low-strength domestic wastewater in aerobic granular sludge sequencing batch reactors[J]. Enzyme Microb Technol, 2007, 42(1): 23–28.
- [3] 迟寒, 刘毅慧, 杨凤林, 等. 好氧颗粒污泥处理城市生活污水[J]. 水处理技术, 2006, 32(8): 73–77.
- [4] 高景峰. 沉淀时间及生物膜对实际生活污水形成好氧硝化颗粒污泥的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1245–1251.
- [5] 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[J]. 环境科学学报, 2007, 27(10): 1604–1611.
- [6] 张岩, 王永胜, 白玉华, 等. 泳动床好氧颗粒污泥新技术处理生活污水的特性研究[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2249–2254.
- [7] 李军, 周延年, 何梅, 等. 城市污水处理厂好氧颗粒污泥的特性[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(5): 640–643.
- [8] Arrojo B, Mosquera-Corral A, Garrilo JM, et al. Aerobic granulation with industrial wastewater in sequencing batch reactors[J]. Water Res, 2004, 38(14–15): 3389–3399.
- [9] Schwarzenbeck N, Borges JM, Wilherer P A. Treatment of dairy effluents in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2005, 66(6): 711–718.
- [10] Su K Z, Yu H Q. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater[J]. Environ Sci Technol, 2005, 39(8): 2818–2828.
- [11] Wang S G, Liu X W, Gong W X, et al. Aerobic granulation with brewery wastewater in a sequencing batch reactor[J]. Bioresour Technol, 2007, 98(11): 2142–2147.
- [12] Wang H L, Yu G L, Liu G S, et al. A new way to cultivate aerobic granules in the process of papermaking

- wastewater treatment[J]. *Biochem Eng J* 2006, 28(1): 99-103.
- [13] 汪善全, 张胜, 李晓娜, 等. 高浓度 Vc 生产废水培养好氧颗粒污泥的试验研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(10): 2243-2248.
- [14] Iaconi C D, Ramadori R, Lopez A. Combined biological and chemical degradation for treating a mature municipal landfill leachate[J]. *Biochem Eng J* 2006 31(2): 118-124.
- [15] van Loosdrecht M C M, de Kreuk M K. Method for the Treatment of Waste Water with Sludge Granules [P]. Dutch and International Patent NL1021466C, WO2004024638(A1), 2004-03-25.
- [16] de Kreuk M K. Aerobic Granular Sludge-scaling-up a New Technology [D]. Netherlands Delft University of Technology, 2006.
- [17] Carls T. Company introduces new sludge treatment technology [EB/OL]. <http://www.engineeringnews.co.za/article/consulting-engineering-company-introduces-new-technology-for-sludge-treatment> 2009-03-27.
- [18] Lindsey B. Water treatment technology showcased in the Western Cape [EB/OL]. <http://www.engineeringnews.co.za/article/new-technology-for-water-treatment-showcased-in-the-western-cape> 2009-07-17.
- [19] Tay JH, Tay S T L, Liu Y, *et al*. Biogranulation technologies for wastewater treatment [M]. Netherlands Elsevier 2006.
- [20] Lopez A. Innovative and integrated technologies for the treatment of industrial wastewater [EB/OL]. http://www.enviotech.at/3668_EN-Images-Files-enviotech-Dokumente-PDFs-Antonio-Lopez.ppt 2008-02-01.
- [21] Ni B J, Xie W M, Liu S G, *et al*. Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater [J]. *Water Res* 2009, 43(3): 751-761.
- [22] 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 [J]. *环境科学*, 2006 37(3): 473-477.
- [23] 张云霞. 颗粒污泥 SBR 中试研究及颗粒污泥特性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.

E-mail: wei_y@yahoo.com

收稿日期: 2009-10-09

(上接第 9 页)

- [21] Rivera-Utrilla J, Sánchez-Pob M. Ozone of naphthalenetrisulphonic acid in the aqueous phase in the presence of basic activated carbons [J]. *Langmuir* 2004 20(19): 9217-9222.
- [22] Faria P C C, Orfao J J M, Pereira M F R. Ozonation of aniline promoted by activated carbon [J]. *Chemosphere* 2007, 67(4): 809-815.
- [23] Beltrán F J, García-Araya J F, Gázquez I I, *et al*. Kinetics of activated carbon promoted ozonation of succinic acid in water [J]. *Ind Eng Chem Res* 2006, 45(9): 3015-3021.
- [24] Pereira M F R, Orfao J J M, Faria P C C. Ozone decomposition in water catalyzed by activated carbon: influence of chemical and textural properties [J]. *Ind Eng Chem Res* 2006, 45(8): 2715-2721.
- [25] Alkarez P M, García-Araya J F, Beltrán F J, *et al*. The influence of various factors on aqueous ozone decomposition by granular activated carbons and the development of a mechanistic approach [J]. *Carbon* 2006, 44(14): 3102-3112.
- [26] Ma J, Sui M H, Zhang T, *et al*. Effect of pH on MnO_x/GAC catalyzed ozonation for degradation of nitrobenzene [J]. *Water Res* 2005, 39(5): 779-786.
- [27] 隋铭皓, 马军, 盛力. MnO_x/GAC 多相催化臭氧氧化降解有机物机理探讨 [J]. *中国给水排水*, 2007 23(7): 106-108.

电话: 13720316025

E-mail: zhqliul226@163.com

责任作者: 章北平

收稿日期: 2009-02-12