

## 好氧颗粒污泥技术中试研究及应用进展

赵锡锋<sup>1,2</sup>, 李兴强<sup>1,2</sup>, 李 军<sup>1,3</sup>

(1. 浙江省工业污染微生物控制技术重点实验室, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 3. 浙江工业大学 环境学院, 浙江 杭州 310014)

**摘 要:** 好氧颗粒污泥技术因具有沉降性能好、生物量大、抗冲击能力强等特点而备受关注。通过研究和文献分析,梳理了好氧颗粒污泥在中试研究及实际应用中的进展情况。关注了反应器容积、处理工艺、接种污泥、原水水质、污泥浓度、颗粒粒径及 SVI 等技术参数,并详细阐述了中试和应用的经典案例,总结了好氧颗粒污泥中试及应用的问题要点和成功的原因。提出了工程设计和运行建议,以及未来的发展方向。

**关键词:** 污水处理; 好氧颗粒污泥; 中试研究

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)08-0030-08

## A Review on Pilot-scale Study and Application Progress of the Aerobic Granular Sludge Technology

ZHAO Xi-feng<sup>1,2</sup>, LI Xing-qiang<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Microbial Technology for Industrial Pollution Control of Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aerobic granular sludge technology has attracted much attention because of its good sedimentation performance, large biomass and resistance to impact load. Through research and literature analysis, development of the aerobic granular sludge in the pilot-scale and practical application was combed. This paper focused on the reactor volume, treatment process, seed sludge, raw water quality, sludge concentration, particle size, SVI and other technical parameters. The typical cases of pilot-scale test and application were expounded. The key issues and mechanism of these cases with aerobic granular sludge process were summarized. Some suggestions on engineering design and operation were put forward, as well as the development direction in the future.

**Key words:** wastewater treatment; aerobic granular sludge; pilot-scale study

2004年,在德国慕尼黑工业大学召开了好氧颗粒污泥的第一次国际研讨会,对其概念做了初步规定:好氧颗粒污泥是指在一定水力剪切力的作用下,

微生物自身凝结形成的聚集体,是一种无需载体的特殊生物膜,具有良好的沉降性能,泥水分离速度快。之后,好氧颗粒污泥又有了以下特征的认同:

90% 以上颗粒污泥的粒径  $\geq 0.2\text{ mm}$ ; 无明显压缩沉淀, 即污泥指数  $SVI_5/SVI_{30} \geq 0.9^{[1]}$ 。

好氧颗粒污泥的首次研究报道要追溯到 1991 年, 随后发表了大量有关好氧颗粒污泥的实验室培养和综述论文<sup>[2]</sup>。2003 年全世界首例中试规模的好氧颗粒污泥在荷兰 Ede 污水处理厂试验成功<sup>[3]</sup>。此后, 荷兰 DHV 公司开发 Nereda<sup>®</sup> 工艺, 2005 年报道首次成功应用于污水处理厂, 在世界各地先后有 40 个污水处理设施应用了好氧颗粒污泥技术<sup>[4-5]</sup>, 但未公开详细资料。2014 年我国研究人员报道了好氧颗粒污泥技术在污水处理厂的成功应用<sup>[6]</sup>。

好氧颗粒污泥技术具有生物量大、沉降性能好、抗负荷冲击能力强等优点, 但还存在颗粒污泥形成时间长、稳定性差、能耗高和不利于放大等问题。好氧颗粒污泥技术的深入研究和实际应用依然受到广泛的关注。为此, 对国内外中试研究和应用案例进

行整理分析, 有助于借鉴好氧颗粒污泥技术的历史经验和厘清进一步发展的思路。

1 中试研究进展

1.1 中试基本情况

从 2003 年首次报道好氧颗粒污泥中试到 2017 年, 总共查阅了 24 项中试研究报告。而在这些中试好氧颗粒污泥系统中, SBR 占了大多数。反应器的容积最小为 30 L, 最大的有 6 m<sup>3</sup>。接种污泥多取自城市污水厂的活性污泥, 原水包括生活污水、工业废水、农业生产废水。中试原水 COD 最小为 100 mg/L, 最大为 2 000 mg/L, 氨氮为 10 ~ 200 mg/L。培养出的颗粒污泥的粒径最小为 0.2 mm, 最大有 3.5 mm。SVI 值大部分在 50 mL/g 以下。

以反应器容积、处理工艺、接种污泥、原水水质、污泥浓度、颗粒粒径及 SVI 为关注重点, 对国内外好氧颗粒污泥的中试进展情况进行分析(见表 1)。

表 1 好氧颗粒污泥中试研究情况

Tab. 1 Research development of pilot-scale aerobic granular sludge

主要研究者	反应器形式	容积/ m <sup>3</sup>	接种污泥	原水水质	污泥浓度/ (g · L <sup>-1</sup> )	污泥粒 径/mm	SVI/ (mL · g <sup>-1</sup> )
de Kreuk M K <sup>[3]</sup>	SBR	1.5	活性污泥	生活污水	9 ~ 10	> 0.6	60
Liu Y Q <sup>[7]</sup>	SBR	0.03	城市污水厂污泥, MLSS 为 2.74 g/L, SVI 为 180 mL/g	40% 的生活污水, 60% 的工业废水, COD 为 250 ~ 1 800 mg/L, 氨氮为 39 ~ 93 mg/L	20	0.8	30
季民 <sup>[8]</sup>	SBR	0.226	城市污水厂污泥, MLSS 为 2.6 g/L, SVI 为 120 ~ 160 mL/g	城市污水, COD 为 91.3 ~ 157.1 mg/L, 氨氮为 39.4 ~ 68.2 mg/L	4.0	0.245	45 ~ 55
涂响 <sup>[9]</sup>	SBR	6.0	城市污水厂厌氧消化污泥, MLSS 为 3.0 g/L	城市污水, COD 为 200 ~ 350 mg/L, 氨氮为 15 ~ 40 mg/L	8.0	0.33	30
Tu X <sup>[10]</sup>	SBR	6.0	活性污泥	城市污水	7.8	0.275	30
刘绍根 <sup>[11]</sup>	SBR	1.0	城市污水厂污泥, MLSS 为 5.0 ~ 7.0 g/L, SVI 为 75 mL/g	城市污水, COD 为 100 ~ 400 mg/L, 氨氮为 10 ~ 40 mg/L	8.0	0.8	40
Jungles M K <sup>[12]</sup>	SBR	0.1	城市污水厂污泥, MLSS 为 3.7 g/L, SVI 为 190 mL/g	人工配制污水(乙酸)	3.5	3.5	
Liu Y Q <sup>[13]</sup>	SBR	0.032	城市污水厂污泥, MLSS 为 2 g/L, SVI 为 145 mL/g	40% 生活污水和 60% 工业废水, COD 为 360 ~ 1 832 mg/L, 氨氮为 37.5 ~ 108.5 mg/L	7.0 ~ 9.0	1.976	25 ~ 85
Su B S <sup>[14]</sup>	SBR	0.085	城市污水厂厌氧消化污泥, MLSS 为 20.0 g/L	生活污水, COD 为 200 ~ 320 mg/L, TN 为 38 ~ 55 mg/L	5.9	0.75	20 ~ 35
Wei D <sup>[15]</sup>	SBR	1.47	污水厂污泥, MLSS 为 2.8 g/L, SVI 为 105.51 mL/g	大豆蛋白废水厌氧出水, COD 为 700 ~ 2 400 mg/L, 氨氮为 (200 ± 20) mg/L	7.02	1.2 ~ 2.0	42.99
李志华 <sup>[16]</sup>	SBR	5.95	城市污水厂污泥, MLSS 为 2.7 g/L	含工业废水的城市污水, COD 为 271 ~ 1 839 mg/L, 氨氮为 16.98 ~ 214 mg/L	2.236		65.02

续表1 (Continued)

主要研究者	反应器形式	容积/ $\text{m}^3$	接种污泥	原水水质	污泥浓度/ $(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	污泥粒径/mm	SVI/ $(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$
Wei D <sup>[17]</sup>	SBR	1.47	大豆蛋白废水处理厂污泥, SVI 为 125.6 mL/g	大豆蛋白废水厌氧出水, COD 为 800 ~ 1 800 mg/L, 氨氮为 80 ~ 160 mg/L		0.5 ~ 1.0	
Isanta E <sup>[18]</sup>	SBR	0.1		人工配制污水(乙酸钠), COD 为 400 mg/L, 氨氮为 40 mg/L	12 ± 4	2.4	13 ± 6
Morales N <sup>[19]</sup>	SBR	0.1	城市污水厂活性污泥	养猪废水	11 ~ 13	2.0 ~ 2.8	
杨淑芳 <sup>[20]</sup>	SBR	3.5	实际污水处理厂污泥, MLSS 为 4 581 mg/L	城市污水, COD 为 100 ~ 450 mg/L, 氨氮为 20 ~ 30 mg/L	1.2	1.0	
Long B <sup>[21]</sup>	SBR	0.105	实验室培养污泥, MLSS 为 3.0 g/L	人工模拟污水(乙酸钠), COD 为 8 000 mg/L	5.0	1.58	80
Rocktaschel T <sup>[22]</sup>	SBR	4	污水厂强化生物除磷污泥	配有乙酸钠城市污水	12	1.1	
丁立斌 <sup>[23]</sup>	SBR	20	污水处理厂污泥, MLSS 为 3 800 mg/L, SVI 为 78 mL/g	70% 工业和 30% 生活污水, COD 为 500 ~ 1 000 mg/L, 氨氮为 30 ~ 80 mg/L	8.55	0.3	38
Sajjad M <sup>[24]</sup>	MBR	14	城市污水处理厂污泥, SVI 为 210 mL/g	城市污水, COD 为 (300 ± 25) mg/L, 总氮为 (30 ± 5) mg/L	7	0.2	30
Guimaraes L B <sup>[25]</sup>	SBR	0.098	城市污水厂污泥, VSS 为 3.2 g/L, SVI 为 220.2 mL/g	生活污水, COD 为 150 ~ 450 mg/L, 氨氮为 36 ~ 68 mg/L		0.29	67
高永青 <sup>[26]</sup>	SBR	0.16	城市污水处理厂污泥, MLSS 为 6.5 g/L	城市污水, COD 为 300 mg/L, 氨氮为 43 ~ 52 mg/L	12.19	1.269	21.31
Farooqi I H <sup>[27]</sup>	SBR	3.394	工业污水处理厂曝气池好氧污泥, MLSS 为 3.5 g/L	造纸和纸浆工业废水, COD 为 2 000 ~ 3 000 mg/L	7 ~ 8	2 ~ 4	60 ~ 70

## 1.2 中试典型案例

荷兰代尔夫特理工大学与荷兰 DHV 公司于 2003 年在荷兰 Ede 污水处理厂建造了一套好氧颗粒污泥 SBR 中试系统(见图 1)<sup>[3]</sup>。

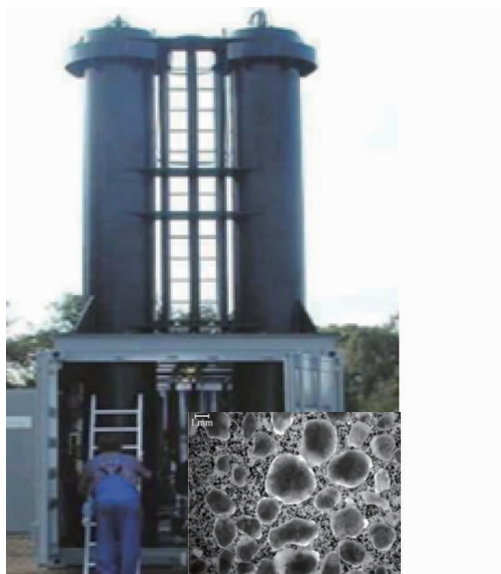


图1 Ede 污水厂的中试系统和颗粒污泥

Fig. 1 Photos of Ede WWTP pilot system and granular sludge

反应器直径为 0.6 m, 高为 6 m, 工作容积为 1.5  $\text{m}^3$ , 原水为经过预沉与砂滤后的生活污水。运行方式: 同时进出水 60 ~ 70 min, 排水 5 min, 曝气 100 ~ 165 min, 反硝化 0 ~ 10 min, 沉淀 10 ~ 25 min。经过 10 个月, 颗粒化程度达到 80%, 污泥浓度为 9 ~ 10 g/L, SVI 为 60 mL/g, 污泥粒径 > 0.6 mm。该系统较大的高径比 ( $H/D = 10$ )、高 COD 负荷, 以及较短的沉淀时间是污泥颗粒化的主要原因。系统对氨氮有较好的处理效果, 但出水 SS 无法达到当地的排放标准。

2009 年 Ni 等<sup>[28]</sup>报道了在污水厂 SBR 中培养出好氧颗粒污泥(见图 2), 反应器容积为 1  $\text{m}^3$ , 原水为城市污水, 接种城镇污水厂活性污泥, 经 80 d 培养出现 0.3 mm 颗粒污泥; 培养 300 d 后, 污泥浓度为 9.5 g/L, SVI 为 35 mL/g, 粒径为 0.2 ~ 0.8 mm, 污泥沉速为 18 ~ 40 m/h。该系统对 COD 的去除率在 85% ~ 95%, 对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率稳定在 90% ~ 99%。结果认为 SBR 的充水比和沉淀时间是污泥在低浓度城市污水中颗粒化的两个关键因素。中试 SBR 运行符合修改的 IWA 活性污泥 3 号模型。



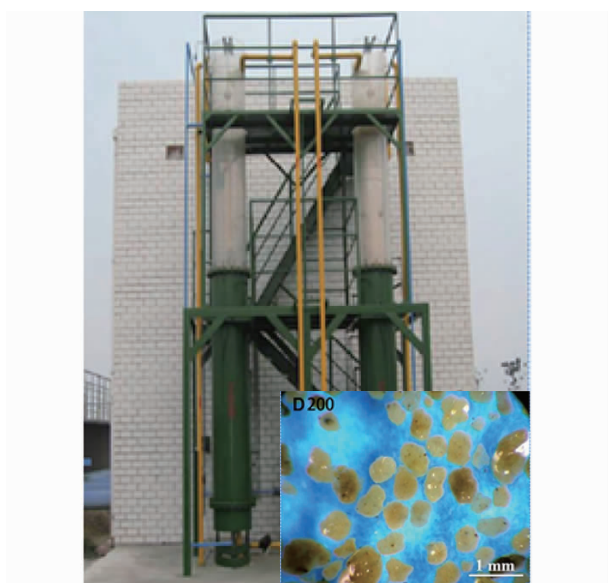


图2 Ni等的中试系统及颗粒污泥

Fig. 2 Pilot SBR and granular sludge from Ni's paper

丁立斌等<sup>[23]</sup>在污水处理厂以SBR形式培养好氧颗粒污泥,反应器工作容积为 $18.84 \text{ m}^3$ ,接种污泥为污水处理厂活性污泥,MLSS为 $3800 \text{ mg/L}$ ,SVI为 $78 \text{ mL/g}$ ,原水为含工业废水的城市污水。反应器启动阶段(前7 d),沉淀时间为60 min;在反应器稳定运行阶段,沉淀时间缩短为20 min。经87 d培养成熟颗粒污泥,污泥浓度为 $8.55 \text{ g/L}$ ,SVI为 $38 \text{ mL/g}$ ,污泥粒径可达 $300 \mu\text{m}$ 。图3为中试SBR和污泥形态的照片。



图3 丁立斌等的中试SBR和颗粒污泥

Fig. 3 Pilot SBR and granular sludge from Ding Linbin's paper

该系统连续运行400余天,对氨氮和 $\text{BOD}_5$ 的去除率可达99%和95%以上。以SBR方式运行,初期采用合适的沉淀时间、较高的有机负荷以及原水富含 $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Na}$ 等离子和微小悬浮固体是形成颗粒污泥的主要原因。

Farooqi等<sup>[27]</sup>开展了一项中试SBR处理造纸和纸浆工业废水的研究(见图4)。进水中可吸附有机卤化物(AOX)的重钙离子浓度为 $15 \sim 20 \text{ mg/L}$ ,COD浓度为 $2000 \sim 3000 \text{ mg/L}$ 。SBR直径为600 mm,有效高度为3000 mm, $H/D$ 为5,水力停留时间(HRT)为6 h,COD负荷为 $4.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。反应器顶部进水,中间出水,成功运行了780 d。该系统培养了成熟的颗粒污泥,污泥浓度为 $7 \sim 8 \text{ g/L}$ ,SVI为 $60 \sim 70 \text{ mL/g}$ ,污泥粒径可达 $2 \sim 4 \text{ mm}$ ,COD去除率为88%,AOX去除率为79%。形成颗粒污泥的主要原因:以SBR方式运行,有较大的高径比,AOX能促进胞外聚合物(EPS)分泌。



图4 Farooqi等的中试SBR和颗粒污泥

Fig. 4 Pilot SBR and granular sludge from Farooqi's paper

## 2 应用研究进展

### 2.1 应用基本情况

2005年在荷兰食品行业,首先建设了Nereda<sup>®</sup>工厂,规模为 $250 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2008年12月Nereda<sup>®</sup>技术运用到南非Gansbaai污水处理厂的升级改造当中,设计成双运行模式,当按照Nereda<sup>®</sup>模式运行时处理能力可达到 $4000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,按照传统SBR方式运行时处理能力为 $2000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,能满足最低处理要求。2012年5月8日,首座采用Nereda<sup>®</sup>技术设计的荷

兰 Epe 污水处理厂正式投入运行,该厂处理能力为  $1\,500\text{ m}^3/\text{h}$ ,其中原水大部分来自屠宰场。促使该污水处理厂采用 Nereda<sup>®</sup>这项新型的污水处理技术来代替原来工艺的主要因素是低成本、低碳以及低能耗。该污水处理厂出水需要满足  $\text{TN} < 5\text{ mg/L}$  和  $\text{TP} < 0.3\text{ mg/L}$  的排放标准<sup>[29]</sup>。

虽有报道称在全球运用好氧颗粒污泥技术的设施有 40 处,但截至目前,好氧颗粒污泥实际应用案例有详细研究报道的仅有两例。

## 2.2 实际应用经典案例

### ① Garmerwolde 污水厂提标改造案例

荷兰 Garmerwolde 污水处理厂于 2013 年启动提标改造项目<sup>[5,30]</sup>,采用 Nereda<sup>®</sup>技术,与原有的 AB 法并行运行。Nereda 技术工艺段处理 41% ( $28\,600\text{ m}^3/\text{d}$ ) 的总进水,最高处理能力可达  $4\,200\text{ m}^3/\text{h}$ 。污水处理厂进水水质如下:COD 为  $146\sim715\text{ mg/L}$ ,  $\text{BOD}_5$  为  $60\sim420\text{ mg/L}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为  $13.4\sim56.5\text{ mg/L}$ ,  $\text{TN}$  为  $14\sim81\text{ mg/L}$ ,  $\text{TP}$  为  $1.9\sim9.7\text{ mg/L}$ ,  $\text{SS}$  为  $101\sim465\text{ mg/L}$ ,  $\text{TN}$  为  $14\sim81\text{ mg/L}$ 。污水经 6 mm 筛分、除砂和缓冲池 ( $4\,000\text{ m}^3$ ) 后,输送到两个 SBR 池。每个 SBR 池的容积为  $9\,600\text{ m}^3$ ,直径为 41 m,高度为 7.5 m。处理后出水 COD 可达  $64\text{ mg/L}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为  $1.1\text{ mg/L}$ ,  $\text{TN}$  为  $6.9\text{ mg/L}$ ,  $\text{TP}$  为  $0.9\text{ mg/L}$ 。污泥浓度达  $8.5\text{ g/L}$ ,  $\text{SVI}$  为  $35\text{ mL/g}$ ,60% 的颗粒污泥直径为  $1.0\text{ mm}$ 。现场和颗粒污泥如图 5 所示。

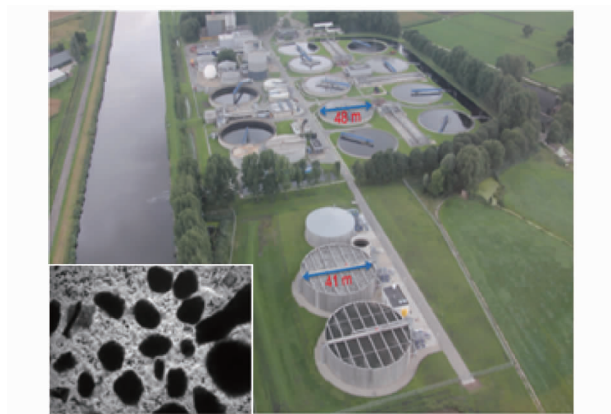


图5 Garmerwolde 污水处理厂好氧颗粒污泥

Fig.5 AGS in Garmerwolde sewage treatment plant

Nereda<sup>®</sup>工艺采用 SBR 法,其单个周期运行方式为:第一步,同时进出水(底部进水,上部排水);第二步,曝气;第三步,沉淀。该工艺有利于好氧颗

粒污泥形成的主要原因是:通过控制进水时间、进水流速和沉淀时间等,形成适当选择压,洗出轻污泥;底部进水,形成厌氧和基质丰富机制,增强聚磷菌的生长。

### ② 浙江盐仓污水处理厂扩建工程

浙江盐仓污水处理厂于 2010 年扩建 SBR 工艺,并成功运行好氧颗粒污泥技术<sup>[6]</sup>。污水处理厂进水中工业废水约占 70%,包括印染废水、制革废水、化工废水等;约 30% 为生活污水。进水水质如下:COD 为  $200\sim700\text{ mg/L}$ ,  $\text{BOD}_5$  为  $50\sim150\text{ mg/L}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为  $28\sim40\text{ mg/L}$ ,  $\text{TP}$  为  $2\sim4\text{ mg/L}$ ,水温为  $20\sim35\text{ }^\circ\text{C}$ ,进水 B/C 平均在 0.23 左右。新上 SBR 处理能力为  $50\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ,由 4 座单池组成,每座池长 55 m,宽 38 m,深 6.0 m。池前设有生物选择池,池后设有物化深度处理单元。SBR 单个周期运行方式为:40 min 进水,240 min 曝气,40~60 min 沉淀,30 min 出水。出水 COD 为  $90\text{ mg/L}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为  $1.0\text{ mg/L}$ ,  $\text{TN}$  为  $15\text{ mg/L}$ 。培养出的颗粒污泥  $\text{SVI}$  为  $47.1\text{ mL/g}$ ,平均粒径为  $0.5\text{ mm}$ ,平均沉速为  $42\text{ m/h}$ 。现场和颗粒污泥见图 6。



图6 盐仓污水处理厂好氧颗粒污泥

Fig.6 AGS in Yancang sewage treatment plant

经分析,该工艺形成好氧颗粒污泥的主要原因是:原水富含  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  等离子,盐度较高,并含有大量微小悬浮固体,易形成晶核并通过吸附架桥等作用促进生物集聚;以 SBR 方式运行、初期采用较短的沉淀时间、较高的有机负荷,形成适宜的选择压和周期性机制(丰富-匮乏机制),促进颗粒的成长。

该处理设施在 2015 年进行了提标改造,将原 SBR 工艺改造为连续流  $\text{A}^2\text{O}$  工艺,并增强预处理和



深度处理,出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,但改造后的工艺未形成好氧污泥颗粒化。

### 3 中试及应用总结

#### ① 反应器形式

通过对好氧颗粒污泥中试研究和实际应用的分析,可以看出颗粒污泥的形式基本都是出现在SBR处理工艺中。SBR能通过沉淀时间来控制选择压,能有效生成基质丰富-匮乏机制,能产生较好的水力及气流条件,能避免污泥回流对颗粒产生破碎作用。相比连续流,SBR的这些特性更有利于好氧颗粒污泥的形成。同时也发现,SBR的高径比( $H/D$ )并不是污泥颗粒化的必要条件,在 $H/D=1\sim 12$ 的情况下均实现了污泥的颗粒化。

#### ② 接种污泥

无论是曝气池普通活性污泥,还是厌氧消化污泥、回流污泥都可成功实现污泥颗粒化。直接用颗粒污泥与絮体污泥混合接种,将更容易得到以好氧颗粒污泥为主导的中试系统。接种污泥的浓度范围在 $1\sim 20\text{ g/L}$ 和SVI在 $70\sim 220\text{ mL/g}$ 的情况下都能实现好氧颗粒污泥的形成。

#### ③ 进水水质

就进水水质而言,人工配制污水(基质以乙酸钠为主)、生活污水、高低浓度城市污水、特殊的工农业生产废水都可以形成好氧颗粒污泥。进水水质仅对颗粒污泥的微生物群落及微观结构产生影响。而进水的有机负荷率将会影响颗粒化的大小及增长快慢。污水的C/N大多集中在 $4\sim 15$ ,该范围内的污水都可实现污泥颗粒化。但是,进水的氨氮冲击负荷容易造成颗粒污泥的解体。原水富含金属离子和微小悬浮固体有利于颗粒形成。

#### ④ 运行策略

在SBR工艺下,无论有无缺氧或厌氧段,好氧颗粒污泥都可以成功培养并实现同步脱氮除磷。沉淀时间会对颗粒化进程产生主要影响,沉淀时间较长会造成大量絮体存留于系统中,而过短则造成新生颗粒的流失。

#### ⑤ 颗粒化时间

颗粒化最快的时间为5 d,最长达400 d。SBR系统可长时间稳定运行好氧颗粒污泥,并取得较为稳定的出水效果。

#### ⑥ 污泥性状

培养得到的颗粒污泥粒径均在 $200\text{ }\mu\text{m}$ 以上,最大可达 $3.5\text{ mm}$ ,且因污泥颗粒化,生物量较大,污泥浓度总体都在 $7\text{ g/L}$ 以上,最大可达 $16\text{ g/L}$ 。其次,污泥的沉降性能较好,SVI值都在 $50\text{ mL/g}$ 以下,最佳可达 $20\text{ mL/g}$ 。

#### ⑦ 颗粒形成的主要原因

目前对于好氧颗粒污泥形成的机理仍然不是完全清楚。一般认为颗粒污泥形成的主要影响因素有:沉淀时间、进水负荷、水力剪切力、反应器构型、水力停留时间、进水方式、曝气强度等。颗粒形成的机理主要有晶核理论假说、金属阳离子假说、自凝聚假说、胞外聚合物假说和丝状菌假说。从中试研究和实际应用案例来看,共同点在于使用合适的停留时间以提供选择压、合适的有机负荷率和较好的水力及气流条件。

### 4 工程设计和运行建议

#### ① 分析原水水质

并不是所有的污水都适合采用好氧颗粒污泥法,通过水质分析可判断实现好氧活性污泥颗粒化技术应用的可行性。一般来说,原水 $\text{COD}>300\text{ mg/L}$ ,且富含金属阳离子、一定盐度和微小固体悬浮物,并有氮磷的去除要求时,宜采用好氧颗粒污泥技术。

#### ② 优先选择SBR工艺

SBR采用底部进水方式;运用具有脱氮除磷的厌氧-缺氧-好氧模式;通过设计调整,控制反应和沉淀时间,形成一定选择压和基质丰富-匮乏机制。

#### ③ 设计负荷

启动阶段,可以采用与活性污泥法相近的污泥负荷或容积负荷设计。颗粒污泥形成且浓度增长至 $6\text{ g/L}$ 以上后,宜采用更低的污泥负荷和更高的容积负荷。

#### ④ 脱氮除磷的不同

设计时需要考虑颗粒污泥和絮体污泥脱氮除磷的机制有所不同。颗粒污泥有利于世代长的细菌生长(如硝化菌),并有利于同步硝化反硝化,进而有利于脱氮。实际污泥停留时间长,却不利于除磷。颗粒污泥的除磷包括生物除磷,以及颗粒吸附、沉积除磷。

#### ⑤ 调整选择压

采取动态、合适的选择压,必须将轻的絮体污泥洗出。实际运行过程中,要将大的、质量重的污泥和

小的且轻的污泥分开至关重要,但其实有难度。可以控制适当的污泥浓度和沉淀方式,尽可能在沉淀时不要形成完全的拥挤沉淀。

## 5 结论与展望

① 中试研究及实际应用取得的成功,尤其是不同原水、不同培养方式的研究,证明了好氧颗粒污泥技术用于污水处理是可行的。好氧颗粒污泥具有良好的沉降性、高浓度生物量、适应能力强和处理效果好等特点,有待于进一步积极推广。

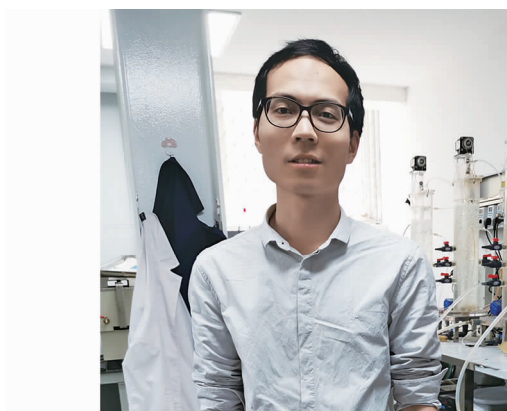
② 污泥颗粒化过程中使用合适的沉淀时间以提供选择压,合适的水质、有机负荷率和好的水力及气流条件等都有利于颗粒污泥的形成。加速污泥颗粒化和长期稳定运行仍需要大量深入的研究,颗粒化的原理也需要进一步探索。

③ 目前报道的中试研究和实际应用案例均为SBR,而实际污水处理厂大部分为连续流工艺。好氧颗粒污泥技术在连续流反应器中的中试和应用将会成为未来研究的热点和难点。

## 参考文献:

- [1] Gao D W, Liu L, Liang H, *et al.* Aerobic granular sludge: Characterization, mechanism of granulation and application to wastewater treatment [J]. *Crit Rev Biotechnol*, 2011, 31(2): 137 – 152.
- [2] Lee D J, Chen Y Y, Show K Y, *et al.* Advances in aerobic granule formation and granule stability in the course of storage and reactor operation [J]. *Biotechnol Adv*, 2010, 28(6): 919 – 934.
- [3] de Kreuk M K. Aerobic Granular Sludge: Scaling up a New Technology [D]. Delft: Delft University of Technology, 2016.
- [4] de Bruin L M M, van der Roest H F, van Loosdrecht M C M. Overview of applied research with Nereda®-technology in the Netherlands [J]. *Proceed Water Environ Feder*, 2010(7): 103 – 113.
- [5] Pronk M, de Kreuk M K, de Bruin B, *et al.* Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment [J]. *Water Res*, 2015, 84: 207 – 217.
- [6] Li J, Ding L B, Cai A, *et al.* Aerobic sludge granulation in a full-scale sequencing batch reactor [J]. *Biomed Res Int*, 2014. DOI:10.1155/2014/268789.
- [7] Liu Y Q, Moy B, Kong Y H, *et al.* Formation, physical characteristics and microbial community structure of aerobic granules in a pilot-scale sequencing batch reactor for real wastewater treatment [J]. *Enzyme Microb Technol*, 2010, 46(6): 520 – 525.
- [8] 季民,李超,张云霞,等. 厌氧-好氧颗粒污泥SBR处理城市污水的中试研究[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(6): 1276 – 1282.
- Ji Min, Li Chao, Zhang Yunxia, *et al.* Pilot test of domestic wastewater treatment in anaerobic/aerobic granular sludge SBR system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(6): 1276 – 1282 (in Chinese).
- [9] 涂响,苏本生,孔云华,等. 城市污水培养好氧颗粒污泥的中试研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(9): 2118 – 2123.
- Tu Xiang, Su Bensheng, Kong Yunhua, *et al.* Cultivation of aerobic granules in a large pilot SBR with domestic sewage [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(9): 2118 – 2123 (in Chinese).
- [10] Tu X, Su B S, Li X N, *et al.* Characteristics of extracellular fluorescent substances of aerobic granular sludge in pilot-scale sequencing batch reactor [J]. *J Cent South Univ Technol*, 2010, 17(3): 522 – 528.
- [11] 刘绍根,梅子鲲,谢文明,等. 处理城市污水的好氧颗粒污泥培养及形成过程[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(7): 918 – 923.
- Liu Shaogen, Mei Zikun, Xie Wenming, *et al.* Cultivation and granulation process of aerobic granular sludge applied to treat municipal wastewater [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(7): 918 – 923 (in Chinese).
- [12] Jungles M K, Figueroa M, Morales N, *et al.* Start up of a pilot scale aerobic granular reactor for organic matter and nitrogen removal [J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 2011, 86(5): 763 – 768.
- [13] Liu Y Q, Kong Y H, Tay J H, *et al.* Enhancement of start-up of pilot-scale granular SBR fed with real wastewater [J]. *Sep Purif Technol*, 2011, 82: 190 – 196.
- [14] Su B S, Cui X J, Zhu J R. Optimal cultivation and characteristics of aerobic granules with typical domestic sewage in an alternating anaerobic/aerobic sequencing batch reactor [J]. *Bioresour Technol*, 2012, 110: 125 – 129.
- [15] Wei D, Qiao Z M, Zhang Y F, *et al.* Effect of COD/N ratio on cultivation of aerobic granular sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2013, 97(4): 1745 – 1753.
- [16] 李志华,付进芳,李胜,等. 好氧颗粒污泥处理综合城市污水的中试研究[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(15): 4 – 8.

- Li Zhihua, Fu Jinfang, Li Sheng, *et al.* Pilot study on aerobic granular sludge for treating comprehensive municipal wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(15): 4–8 (in Chinese).
- [17] Wei D, Si W, Zhang Y F, *et al.* Aerobic granulation and nitrogen removal with the effluent of internal circulation reactor in start-up of a pilot-scale sequencing batch reactor [J]. *Bioprocess Biosyst Eng*, 2012, 35(9): 1489–1496.
- [18] Isanta E, Suarez-Ojeda M E, del Rio A V, *et al.* Long term operation of a granular sequencing batch reactor at pilot scale treating a low-strength wastewater[J]. *Chem Eng J*, 2012, 198/199: 163–170.
- [19] Morales N, Figueroa M, Fra-Vázquez A, *et al.* Operation of an aerobic granular pilot scale SBR plant to treat swine slurry [J]. *Process Biochem*, 2013, 48(8): 1216–1221.
- [20] 杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 等. 实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(5): 1850–1856.
- Yang Shufang, Zhang Jianjun, Zou Gaolong, *et al.* Formation and characterization of aerobic granules in a pilot-scale reactor for real wastewater treatment [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(5): 1850–1856 (in Chinese).
- [21] Long B, Yang C Z, Pu W H, *et al.* Rapid cultivation of aerobic granular sludge in a pilot scale sequencing batch reactor[J]. *Bioresour Technol*, 2014, 166: 57–63.
- [22] Rocktaschel T, Klarmann C, Ochoa J, *et al.* Influence of the granulation grade on the concentration of suspended solids in the effluent of a pilot scale sequencing batch reactor operated with aerobic granular sludge [J]. *Sep Purif Technol*, 2015, 142: 234–241.
- [23] 丁立斌, 马俊杰, 李军, 等. 好氧颗粒污泥 SBR 中试运行效能评价[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(21): 87–90.
- Ding Libin, Ma Junjie, Li Jun, *et al.* Evaluation of operation efficiency of pilot-scale SBR with aerobic granular sludge[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(21): 87–90 (in Chinese).
- [24] Sajjad M, Kim I S, Kim K S, *et al.* Development of a novel process to mitigate membrane fouling in a continuous sludge system by seeding aerobic granules at pilot plant[J]. *J Membr Sci*, 2016, 497: 90–98.
- [25] Guimaraes L B, Mezzari M P, Daudt G C, *et al.* Microbial pathways of nitrogen removal in aerobic granular sludge treating domestic wastewater [J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 2017, 92(7): 1756–1765.
- [26] 高永青, 张帅, 张树军, 等. 实际城市污水培养好氧颗粒污泥的中试研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(5): 22–25.
- Gao Yongqing, Zhang Shuai, Zhang Shujun, *et al.* Formation of aerobic granular in pilot-scale SBR for real wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(5): 22–25 (in Chinese).
- [27] Farooqi I H, Basheer F. Treatment of absorbable organic halide (AOX) from pulp and paper industry wastewater using aerobic granules in pilot scale SBR [J]. *J Water Process Eng*, 2017, 19: 60–66.
- [28] 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.
- [29] Giesen A, de Brum L M M, Niermans R P, *et al.* Advancements in the application of aerobic granular biomass technology for sustainable treatment of wastewater [J]. *Water Pract Technol*, 2013, 8(1): 47–54.
- [30] 陈涛, Helen X Littleton, 李军, 等. Garmerwolde 污水处理厂提标改造——新增好氧颗粒污泥系统、旁侧流 SHARON [J]. *净水技术*, 2016, 35(5): 11–16.
- Chen Tao, Helen X Littleton, Li Jun, *et al.* Upgrading and reconstruction of Garmerwolde WWTP in application of newly constructed aerobic granular sludge system and enhanced SHARON [J]. *Water Purification Technology*, 2016, 35(5): 11–16 (in Chinese).



作者简介: 赵锡锋(1994–), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生, 研究方向为水污染治理。

E-mail: 1435020129@qq.com

收稿日期: 2019–06–08