

HYBAS 工艺的脱氮效能及同步硝化反硝化分析

王翥田¹, 车明凤², 韩 萍³

(1. 山东昌乐实康水业有限公司 青岛分公司, 山东 青岛 266109; 2. 青岛瑞源工程集团, 山东 青岛 266555; 3. 青岛市团岛污水处理厂, 山东 青岛 266002)

摘 要: 以团岛污水厂实际进水为处理对象,在改良 A²/O 工艺好氧池投加悬浮填料形成生物膜与活性污泥复合工艺,即 HYBAS 工艺,进行脱氮效能研究。在填料填充率为 40%、好氧池底采用非均匀边缘对称曝气的条件下,当 pH 值为 7~8.7、DO 为 1.2~1.7 mg/L、内回流比为 300%、好氧段 HRT_H 为 7~8 h 时, HYBAS 工艺对 COD、NH₄⁺-N、TN 的去除率分别达到 94%、97%、87% 以上;同时还发现在 HYBAS 池内有同步硝化反硝化(SND)作用发生,使得 TN 在此阶段去除了 9~14 mg/L。

关键词: HYBAS 工艺; 强化脱氮; 同步硝化反硝化

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0059-05

Nitrogen Removal Efficiency and Simultaneous Nitrification and Denitrification of HYBAS Process

WANG Zhu-tian¹, CHE Ming-feng², HAN Ping³

(1. Qingdao Branch, Shandong Changle Salcon Water Co. Ltd., Qingdao 266109, China; 2. Qingdao Ruiyuan Engineering Group, Qingdao 266555, China; 3. Tuandao WWTP, Qingdao 266002, China)

Abstract: Suspended carriers were added into the aerobic tank in a modified A²/O process to form the hybrid biofilm-activated sludge (HYBAS) process, and to research the nitrogen removal efficiency of the process using wastewater from Tuandao WWTP. The filling rate was 40%, and the aeration pipes were laid non-uniformly and symmetrically along the margins of the tank bottom. When using the following settings: pH of 7-8.7, DO of 1.2-1.7 mg/L, internal reflux ratio of 300%, HRT_H of 7-8 h, the removal rate of COD, NH₄⁺-N and TN reached above 94%, 97% and 87%, respectively. Simultaneous nitrification and denitrification (SND) was identified in the HYBAS tank, which removed TN by 9-14 mg/L in the process.

Key words: HYBAS process; enhanced removal of nitrogen; simultaneous nitrification and denitrification

在改良 A²/O 工艺的好氧池中投加悬浮填料形成生物膜与活性污泥复合工艺,即 HYBAS 工艺。HYBAS 工艺既具有传统生物膜法耐冲击负荷、泥龄长、剩余污泥少的特点,又具有活性污泥法的高效性和运转灵活性,大量附着生长在悬浮填料上的生物

膜使生物反应池中的活性生物量大大增加,在悬浮活性污泥与悬浮填料表面生物膜的共同作用下,达到提高污水处理效能和水质的目的。HYBAS 工艺可实现同一反应器不同功能微生物泥龄分离,生物膜泥龄长有利于脱氮,活性污泥采用短泥龄有利于

除磷。由于 HYBAS 可实现在不增容条件下对现有污水厂进行升级改造,因此,其已成为目前城市污水厂升级改造的主要方法之一^[1~4]。

青岛市团岛污水处理厂升级改造过程中存在实际进水水质大大超过设计标准、出水水质标准提高、污水厂内已无发展用地等问题,对污水厂原有改良 A^2/O 工艺进行改造:优先保证反硝化所需的缺氧区池容,硝化不足部分通过投加悬浮生物填料来保证,将好氧段改造为生物膜-活性污泥复合工艺,即 HYBAS 工艺。对 HYBAS 工艺进行深入研究,摸索出更优的运行工况,能更好地指导今后的工程实践,可为低碳氮比污水的脱氮处理提供借鉴及指导。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置

中试装置模拟了团岛污水处理厂改造后生化处理单元运行模式,在改良 A^2/O 工艺的好氧区投加 SPR-1 型生物悬浮填料,填充率为 40%,有效水深为 1.6 m,采用鼓风曝气,池底采用非均匀边缘对称布置小孔径穿孔管曝气,形成 HYBAS 工艺。装置进水为团岛污水处理厂初沉池出水,设计流量 Q 为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$,污泥回流比 R 为 100%,内回流比 r 为 100%~600% (可调)。试验流程见图 1。

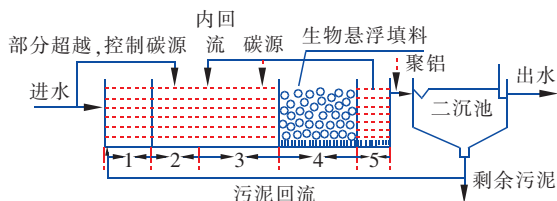


图1 改良 A^2/O + HYBAS 工艺流程

Fig.1 Flow chart of modified A^2/O + HYBAS process

1~5 区段分别为预缺氧区、厌氧区、缺氧区、HYBAS 区、脱气区,各区的 HRT 分别为 1、1.5、9、11.5、0.5 h。

1.2 水质及检测方法

中试模拟团岛污水厂生化处理单元运行方式,试验为期 6 个月。设计进水水质如下:COD 为 $1\,000 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 80 mg/L 、TN 为 100 mg/L 、TP 为 15 mg/L 、pH 值为 6~9;实际进水水质如下:COD 为 $380 \sim 978 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $48 \sim 112 \text{ mg/L}$ 、TN 为 $58 \sim 124 \text{ mg/L}$ 、TP 为 $6 \sim 17 \text{ mg/L}$ 、pH 值为 7~8.7,平均值分别为 548 mg/L 、 82.1 mg/L 、 93.7 mg/L 、 9.5 mg/L 、7.9。

中试采用团岛污水处理厂二沉池回流污泥进行污泥培养接种及填料挂膜,启动运行时水温为 $18 \sim 23 \text{ }^\circ\text{C}$,按设计 HRT 运行,DO 保持在 $2 \sim 3 \text{ mg/L}$,回流污泥量与原水量按 1:1 同步进入中试装置。1~2 d 活性污泥成熟,MLSS 约为 $4\,000 \text{ mg/L}$, SV_{30} 达到 25% 左右,沉降性能良好,此时出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 浓度均达到一级 B 标准;继续稳定运行 40 d,填料表面附着一层微生物薄膜,呈毛绒絮状浅褐色 (见图 2)。生物膜镜检照片见图 3。此时出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 浓度均达到一级 A 标准。

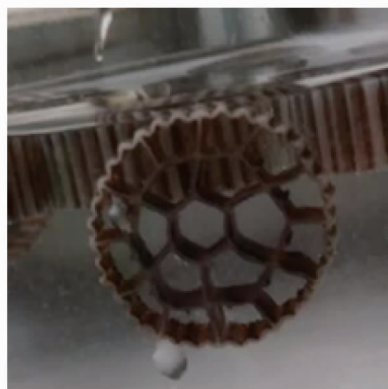


图2 挂膜后的填料外观

Fig.2 Carrier after biofilm formation

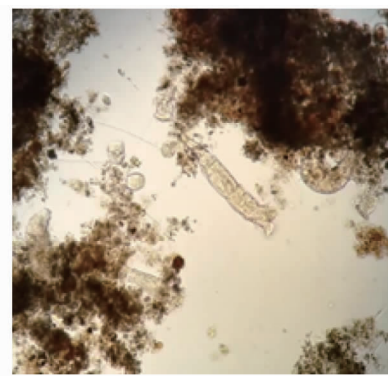


图3 膜面微生物

Fig.3 Microorganism on biofilm surface

系统挂膜成功且稳定运行 1 周后开始改变运行工况,考察 HYBAS 工艺对氮的去除效果,每次改变工况运行 3 d,检测数值均为平均值。

试验期间,每天进行 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 的测定及 pH 值、DO 的在线测定。COD:重铬酸钾法;DO:哈希公司 sension6 便携式溶解氧仪,选择 HYBAS 池中间水面下 30 cm 处进行监测;pH 值:哈希公司 sension1 便携式 pH 测量仪; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$:纳氏试

剂法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$:紫外分光光度法;TN:过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;TP:钼锑抗分光光度法;碱度:指示剂滴定法。

2 结果及分析

2.1 DO 对 HYBAS 工艺的影响

好氧段的 HRT_H 为 12 h,保持设计水量运行,内回流比 r 为 600%,污泥回流比 R 为 100%,通过调整不同的曝气量,研究 DO 对 HYBAS 工艺的影响,结果见图 4。

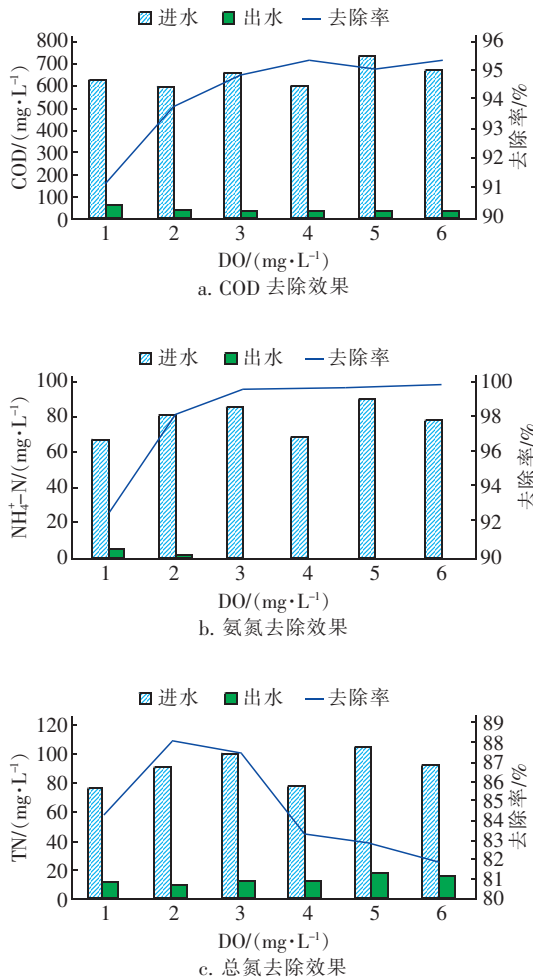


图 4 DO 对 HYBAS 工艺的影响

Fig. 4 Influence of DO on HYBAS process

由图 4(a)可见,当 DO 为 1 mg/L 时,出水 COD 为 55 mg/L;当 $\text{DO} \geq 2$ mg/L 时,出水 COD 浓度均能达到一级 A 标准,去除率达到 94% 以上。

由图 4(b)可见,当 DO 为 1 mg/L 时,出水氨氮为 4.9 mg/L,随着 DO 浓度的增大,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度迅速降低,均达到一级 A 标准,去除率逐渐升高,达到 98% 以上。

由图 4(c)可见,当 DO 为 1 ~ 3 mg/L 时,出水 $\text{TN} < 15$ mg/L,达到一级 A 标准,去除率最高达到 88.2%;但曝气量继续加大,DO 浓度提高到 4 mg/L 以上时,TN 去除率明显降低,当 DO 浓度达到 5 ~ 6 mg/L 时,出水 TN 浓度反而升高到 17 ~ 18 mg/L。

综合来看,DO 为 2 ~ 3 mg/L 时,出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及 TN 均能稳定达标,同时检测 TP 也有较高的去除率,二沉池出水 $\text{TP} < 1.4$ mg/L;但随着 DO 浓度继续提高,曝气能耗提高,COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率提高并不明显,TN 去除率反而降低,出水水质不能达标,系统除磷效果也降低。这是因为,DO 浓度过高,大量的硝化液携带 DO 回流到系统前段,破坏了缺氧-厌氧环境,不仅影响到反硝化效果,而且反硝化菌利用 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 进行反硝化,消耗易生物降解的有机基质,从而竞争性抑制了聚磷菌的厌氧释磷,导致释磷不彻底,进而影响到好氧段吸磷。

试验同期对进、出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度进行监测,发现在 DO 为 2 mg/L 时,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度最低,此时出水 TN 效果最佳。

2.2 回流比对 HYBAS 工艺的影响

从 2.1 节可知,在好氧段 HRT_H 为 12 h、DO 浓度为 2 ~ 3 mg/L 时,COD 及氨氮、TN 都有最好的去除效果。当好氧段 $\text{HRT}_\text{H} = 12$ h,维持 DO 浓度为 3 mg/L 时供风量不变,调整内回流比 r ,考察内回流比 r 对 TN 去除率的影响,结果见图 5。

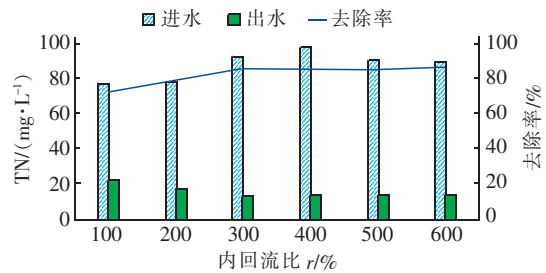


图 5 TN 去除率与内回流比关系

Fig. 5 Relationship between TN removal rate and internal reflux ratio

理论上,TN 去除率 η 与回流比存在如下关系:

$$\eta = [(R + r) / (R + r + 1)] \times 100\% \quad (1)$$

根据式(1)可计算出不同回流比下反应器对总氮的理论去除率。试验发现,当 $r \leq 300\%$ 时,TN 去除率最高达到 85%,均高于其理论去除率;当 $r > 300\%$ 时,TN 实际去除率并没有较大提升。同期检测出水 TP 浓度,发现当 $r > 300\%$ 时,出水 TP 为 1.2

~1.9 mg/L;当 $r \leq 300\%$ 时,出水 TP < 1 mg/L。综合考虑节能和生物除磷效果,选择 r 为300%。

2.3 水力停留时间对HYBAS工艺的影响

保持好氧段 HRT_H 为 12 h、 r 为 300%、DO 为 3 mg/L 时的供风量不变,通过改变水力负荷,考察 HYBAS 工艺在不同 HRT 下的脱氮效果,见图 6。

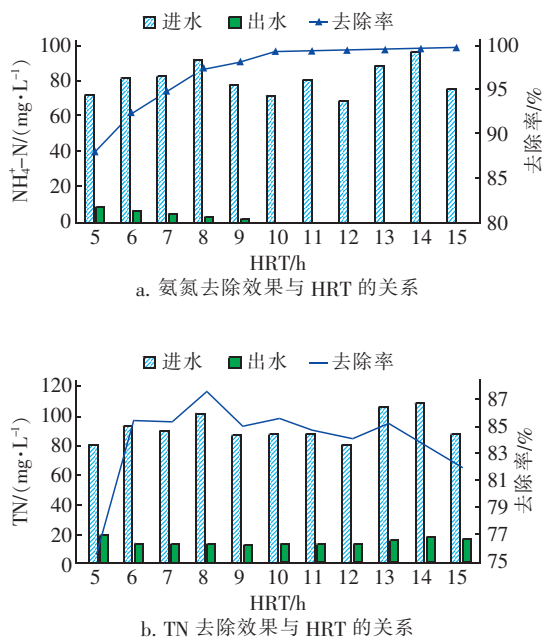


图6 水力停留时间对HYBAS工艺的影响

Fig.6 Influence of HRT on HYBAS process

增加水力负荷发现,当 HRT_H ≤ 6 h 时,DO < 1 mg/L,出水 NH₄⁺-N 超标;减小水力负荷,氨氮的去除效果持续增加,但当 HRT_H ≥ 8 h 时,去除率增加趋势变缓,此时 DO 从 1.7 mg/L 逐渐升高。试验发现,当 HRT_H 为 6 h 时,出水氨氮为 6.2 mg/L,但此时出水 TN 为 13.4 mg/L,去除率为 85.6%,最接近于 HRT_H 为 8 h 时的去除率(87.7%)。当水力负荷降低,HRT_H > 14 h 时,DO > 5 mg/L,出水 TN 升高,超过 16 mg/L;当 HRT_H 为 7~8 h 时,DO 为 1.2~1.7 mg/L,NH₄⁺-N、TN 去除率达到 97.5%、87.7%。通过变化水力负荷进行冲击试验,发现 HYBAS 工艺可耐受较高的水力负荷,脱氮效果稳定。

2.4 同步脱氮

以往的研究发现,污水生化处理中只有当碳氮比 ≥ 7 时才能取得较好的总氮去除率^[5],但试验发现当碳氮比 < 5 时,HYBAS 工艺也有较高的脱氮效率,出水 TN 浓度能够达标。讨论 TN 去除率与回流比关系时发现,试验中 TN 的实际去除率常高于其

理论去除率,通过对 HYBAS 工艺段进、出水 TN 进行检测,发现当 HRT_H 为 7~8 h、DO 为 1.2~1.7 mg/L、进水 TN 为 18~27 mg/L 时,出水 TN 为 9~13 mg/L,去除了 9~14 mg/L,该工艺段发生了同步硝化反硝化(SND)作用,这是因为填料表面生物膜本身具有同步硝化反硝化作用^[6],从氧扩散限制角度来说,在生物膜内部存在 DO 浓度梯度,在生物膜外表面溶解氧浓度高,以好氧硝化菌及氨化菌为主;深入生物膜内部,由于氧传递阻力的存在及氧的消耗,膜内产生缺氧区,为反硝化菌提供了优良的生存环境从而形成有利于实现 SND 的微环境。而吸附和储存在生物膜表面的有机物质,通过浓度梯度扩散进入生物膜内部,许多低分子溶解态有机物被微生物细胞通过主动运输、辅助运输、单纯扩散机制直接吸收;大分子有机物吸附在细胞表面经胞外酶水解作用转化为可传递到胞内的溶解性有机物,这些有机物的存在为反硝化反应提供了能源和碳源,因此附着或储存在载体上的有机碳源和生物膜内层的缺氧层共同作用促使 SND 作用的发生,加之底部非均匀边缘对称的曝气形式,会使 HYBAS 工艺段在空间上形成对称逆循环作用,填料会周期性地经历好氧-微氧-缺氧的微循环,使得硝化及反硝化作用得到增效,增强了脱氮效果。HYBAS 工艺池内发生 SND 作用利于降低能耗及碳源需求量^[6]。

3 结论

① HYBAS 工艺能够耐受较大的水力冲击负荷,脱氮效果稳定。

② 当 pH 值为 7~8.7、DO 为 1.2~1.7 mg/L、内回流比 r 为 300%、好氧段 HRT_H 为 7~8 h 时,改良 A²/O + HYBAS 工艺运行稳定,能耗最低,对 COD、NH₄⁺-N、TN 的去除率分别达到 94%、97%、87% 以上,同时发现在 HYBAS 池内有同步硝化反硝化作用发生,使得 TN 在此阶段去除了 9~14 mg/L,增强了系统的脱氮能力。

参考文献:

- [1] 彭永臻. 对我国污水处理污染物排放标准的思考[J]. 给水排水,2009,35(10):1.
Peng Yongzhen. A consideration about pollutants discharge standard of wastewater treatment in this country [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(10):1 (in Chinese).

- [2] Rusten B, Kolkin O, Ødegaard H. Moving bed biofilm reactors and chemical precipitation for high efficiency treatment of wastewater from small communities[J]. Water Sci Technol, 1997, 35(6): 71 – 79.
- [3] 廖足良. 采用 HYBAS™ 工艺升级改造传统活性污泥工艺[J]. 中国给水排水, 2006, 22(12): 21 – 25.
Liao Zuliang. Application of HYBAS™ process to upgraded activated sludge process [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(12): 21 – 25 (in Chinese).
- [4] 毕学军, 高廷耀. 生物脱氮除磷工艺好氧区硝化功能的强化试验[J]. 上海环境科学, 2000, 19(4): 183 – 186.
Bi Xuejun, Gao Tingyao. Intensive test on nitrification of aerobic zone of biological denitrification and phosphorus removal process [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2000, 19(4): 183 – 186 (in Chinese).
- [5] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹. 有机碳源对低碳氮比生活污水好氧脱氮的影响[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(6): 11 – 15.
Gao Jingfeng, Peng Yongzhen, Wang Shuying. Effect of organic carbon on aerobic nitrogen removal in treatment of low COD/TN domestic wastewater [J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(6): 11 – 15 (in Chinese).
- [6] 张朝升, 张可方, 方茜, 等. 序批式生物膜法对城市污

水的脱氮效果[J]. 水处理技术, 2007, 33(2): 54 – 55, 76.

Zhang Chaosheng, Zhang Kefang, Fang Qian, *et al.* Nitrogen removal effect of municipal sewage with low carbon content by sequencing batch biofilm reactor (SBBR) and law of carbon conversion [J]. Technology of Water Treatment, 2007, 33(2): 54 – 55, 76 (in Chinese).



作者简介:王翥田(1982 –), 男, 山东青岛人, 硕士, 工程师, 主要从事水污染治理与控制相关工作。

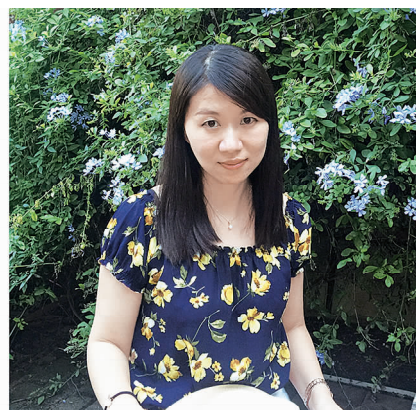
E – mail: wangzhutian@126. com

收稿日期: 2018 – 03 – 12

(上接第 58 页)

- 苯酚[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Gao Huanfang. The Research of Advanced Oxidation Degradation 2,4-Dimethylphenol in Water of Sodium Persulfate [D]. Changchun: Jilin University, 2013 (in Chinese).
- [6] Bennedsen L R, Muff J, Sogaard E G. Influence of chloride and carbonates on the reactivity of activated persulfate [J]. Chemosphere, 2012, 86(11): 1092 – 1097.
- [7] Fang J Y, Shang C. Bromate formation from bromide oxidation by the UV/persulfate process [J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(16): 8976 – 8983.
- [8] 晋艺欣. 单过硫酸盐氧化体系中碘代副产物生成规律的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Jin Yixin. Iodinated Products Formation in Peroxomono-sulfate Oxidation System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [9] 廖云燕, 刘国强, 赵力, 等. 利用热活化过硫酸盐技术去除阿特拉津[J]. 环境科学学报, 2014, 34(4): 931 – 937.
Liao Yunyan, Liu Guoqiang, Zhao Li, *et al.* Removal of

atrazine in heat activated persulfate oxidation process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(4): 931 – 937 (in Chinese).



作者简介:董紫君(1983 –), 女, 江苏南京人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为饮用水深度处理和副产物控制技术。

E – mail: dzj@szpt. edu. cn

收稿日期: 2018 – 03 – 12