

工程实例

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.06.018

城市污水厂 A^2/O 工艺生物脱氮过程优化控制

冯红利, 赵梦月, 丁舒喆

(北京安国水道自控工程技术有限公司, 北京 100020)

摘要: 针对城市污水厂运行过程中曝气风机能耗高、外加碳源药耗高的问题,将 A^2/O 工艺中好氧池沿程氨氮浓度、进出水总氮浓度、缺氧池末端出水的硝酸盐氮浓度和 COD 浓度作为分析对象,进行 A^2/O 生物脱氮过程的优化控制。首先根据好氧池沿程氨氮浓度调节好氧池的曝气量,从而进行硝化过程的优化控制。然后根据进、出水总氮浓度调节系统的内回流比,根据缺氧池末端出水的硝酸盐氮浓度和 COD 浓度调节缺氧池外部的碳源投加量,从而进行反硝化过程的优化控制。结果表明,采取上述生物脱氮过程的优化控制策略,使得某 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的城市污水处理厂在实际运行中曝气量降低了 50%,碳源投加量降低了 74%,出水水质仍能达到排放标准。

关键词: A^2/O 工艺; 生物脱氮; 曝气量; 内回流比; 碳源; 优化控制

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)06-0102-05

Optimal Control of Biological Nitrogen Removal in A^2/O Process of WWTP

FENG Hong-li, ZHAO Meng-yue, DING Shu-zhe

(Beijing Anguo Waterway Autocontrol Engineering Technology Co. Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: In view of the problems such as high aeration consumption and high consumption of external carbon source in the operation process of a municipal wastewater treatment plant (WWTP), the ammonia nitrogen concentration along the aerobic tank, the influent and effluent total nitrogen concentrations, nitrate nitrogen and COD concentrations at the end of the anoxic tank in the A^2/O process were analyzed as the objects to optimize its biological nitrogen removal process. Firstly, the aeration rate of the aerobic tank was adjusted according to the ammonia nitrogen concentrations along the aerobic tank to optimize the nitrification process. Then the internal reflux ratio was adjusted according to influent and effluent total nitrogen concentrations, and the external carbon source dosage is adjusted according to the nitrate nitrogen and COD concentrations at the end of the anoxic tank. The results indicated that taking the optimal control strategy of biological nitrogen removal process mentioned above, the aeration rate of a $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ municipal WWTP was reduced by 50% during actual operation, and the external carbon source dosage was reduced by 74%, which can still reach the discharge standards.

Key words: A^2/O process; biological nitrogen removal; aeration rate; internal reflux ratio; carbon source; optimal control

污水生物脱氮是国内外污水处理厂常用的方法和手段,因此也成为了国内外学者的研究热点^[1-6]。自 2006 年起我国进入了市政污水处理厂高速建设

期,传统污水处理厂在达标运行中,普遍存在着运行能耗高(风机、回流泵等设备耗电量大)和药耗高(外部碳源、化学除磷药剂过量投加)的问题^[2,4,7]。

因此在确保出水水质稳定达标的基础上,降低污水处理厂运行维护成本,对污水厂提标改造以及稳定运行具有重要的意义。

1 污水处理厂概况

某污水处理厂新建工程设计规模 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。工艺流程如图 1 所示。

表 1 污水处理厂进水水质及出水标准

Tab. 1 Influent quality and effluent requirements of a WWTP

项目	pH 值	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮①/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水水质	6~9	223	119	126	48.4	53.2	7.8
出水要求	6~9	30	6	5	1.5(2.5)	15	0.3

注: ①12 月 1 日—3 月 31 日执行括号内的排放限值。生化池污泥采用老厂(水解池 + SBR 工艺)活性污泥接种驯化。

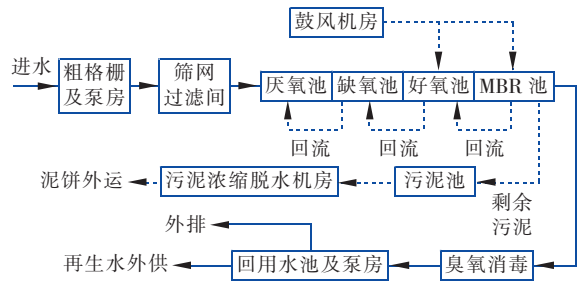


图 1 污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of treatment process of a WWTP

该厂采取直接投加老厂活性污泥接种的方法,使生化池很快达到设计污泥浓度并开始满负荷进、出水。在调试初期,出水 pH 值为 6~8, COD 为 21.6 mg/L, BOD₅ 为 3.4 mg/L, SS 为 2.3 mg/L, 氨氮为 0.14 mg/L, TN 为 14.02 mg/L, TP 为 0.12 mg/L。

该厂存在的问题主要有:

① 处理效率低

运行初期,污水处理厂运行参数按照设计取值,回流比分别为 500%、200%、100%,碳源投加泵 2 台全开满负荷运行,出水总氮仍有超标的风险。

② 运行成本高

运行初期,碳源(25% 液体乙酸钠)投加量为 700 L/h,折合吨水投加量为 0.336 L/m³,空气悬浮鼓风机风量为 180 m³/min,运行成本较高。

2 生物脱氮过程优化控制

2.1 分析与论证

该污水处理厂运行初期存在的问题,主要是生物脱氮效率低、运行成本高,说明目前生化系统运行参数有待优化。运行初期调控方案:控制好氧池内 DO > 2 mg/L^[5-7],当出水 COD 和氨氮超标或有超

进水水质及出水标准见表 1。该污水厂占地面积 4 hm²。采用预处理 + 改良 A²/O + MBR + 臭氧消毒工艺,其中改良 A²/O 的厌、缺氧池投加生物悬浮填料。

标风险时,加大曝气量。控制出水总氮 < 15 mg/L,总氮超标时,提高碳源投加量。该控制方法较粗糙,对在线 DO 准确性及维护要求较高;依据出水水质控制曝气量和碳源投加量存在滞后性,不能实时反馈。传统生物脱氮过程由硝化、反硝化过程构成,首先由硝化细菌在好氧环境下将氨氮氧化成硝酸盐氮;随后经内循环泵将产生的硝酸盐氮回流到缺氧区,再由反硝化细菌在碳源充足的前提下,将硝酸盐氮还原成氮气并脱离系统从而实现脱氮。硝化过程与反硝化过程相互影响、协同作用。基于此,需要对生物脱氮的硝化、反硝化过程进行优化控制。

2.2 硝化过程优化控制

硝化过程需要控制合理的曝气量。曝气量过低,会使硝化过程不完全,出水氨氮和总氮存在超标的风险;曝气量过高,一方面使得回流液中 DO 过高,消耗缺氧段的碳源,另一方面会使风机能耗增大。依据好氧池内 DO 控制硝化过程,精准性不高,容易造成能源浪费,提高运行成本。硝化过程是将氨氮氧化成硝酸盐氮,在依据理论计算曝气量的前提下,通过好氧池内沿程氨氮浓度调控曝气量,从而优化硝化过程。合理曝气量下对应的好氧池沿程氨氮浓度预期值分别是缺氧池末端 < 15 mg/L,好氧池 1 段末 6 mg/L,好氧池 2 段末 3 mg/L,好氧池 3 段末 < 0.5 mg/L。将好氧池均分为 3 段,在第 3 段末端氨氮浓度降到 0.5 mg/L 以下时,曝气量较合理。

2.3 反硝化过程优化控制

反硝化过程需要控制合理的回流比和碳源投加量。内回流比过小将导致硝酸盐回流量不足,从而影响反硝化效率,进而导致出水总氮超标;而内回流比过大,一是导致过量的 DO 回流到缺氧池,碳源被

DO 消耗^[5-7]而浪费;二是增加回流泵开启台数,从而增大用电负荷。因此反硝化过程的优化控制,首先应根据实际进、出水总氮浓度调整内回流比,计算公式^[1]如下:

$$R = 100\% \times \frac{(A - B)/A}{1 - (A - B)/A} \quad (1)$$

式中: R 为内回流比; A 为进水总氮浓度, mg/L ; B 为出水总氮浓度, mg/L 。

外加碳源主要是在内碳源不足的情况下,补充碳源对总氮进行去除^[3,8]。当外加碳源投加过量时会导致缺氧段出水 COD 偏高,不仅浪费药剂,还会造成好氧段曝气能耗上升;而碳源投加量不足则会导致缺氧段末端出水仍然有较多硝酸盐氮存在,出水总氮可能超标。外加碳源的投药量可以通过缺氧池出水的 COD 以及硝酸盐氮浓度确定,具体调控方案见表 2。所需增加或降低的投药量可根据缺氧段末端的 COD、进水水量以及碳源选型进行计算^[9-11]。

表 2 缺氧池出水 COD、硝酸盐氮浓度及对应碳源投加调控方案

Tab. 2 Concentration of COD and nitrate nitrogen in the effluent of anoxic tank and the corresponding regulation scheme of carbon source addition $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

缺氧池出水 COD	缺氧池出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$	调控方案
>40	<1.5	降低碳源投加量
<40	>1.5	增加碳源投加量
<40	<1.5	维持现状

3 工程应用

3.1 生物脱氮过程优化控制策略的建立

生物脱氮过程优化控制策略如图 2 所示。

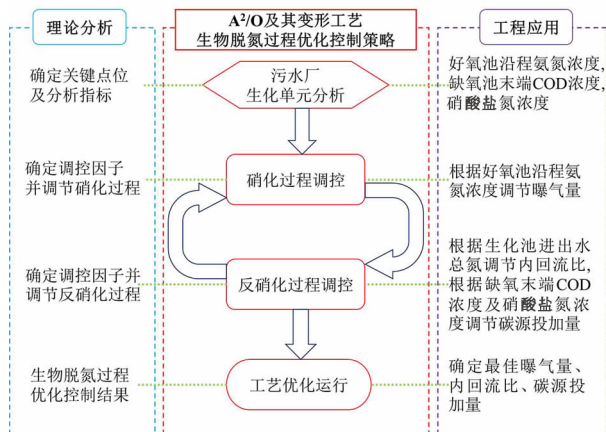


图 2 生物脱氮过程优化控制策略

Fig. 2 Optimal control strategy for biological nitrogen removal

建立生物脱氮过程控制策略,需要对污水厂生化单元关键点位的水质进行分析,确定现有工艺运行问题的症结;针对问题症结,进行硝化反硝化过程的调节控制,从而实现生物脱氮过程的优化控制,使工艺运行最优化。

3.2 工程实践

通过上述控制策略对好氧池沿程氨氮浓度进行测定并调控曝气量,生物脱氮硝化阶段调控过程中氨氮变化如图 3 所示。调控前氨氮在好氧池 1 段就降至 0.5 mg/L 以下,说明此时系统内曝气量过大,需降低曝气量。逐渐调节空气悬浮鼓风机风量 ($180 \text{ m}^3/\text{min} \rightarrow 150 \text{ m}^3/\text{min} \rightarrow 120 \text{ m}^3/\text{min} \rightarrow 90 \text{ m}^3/\text{min}$) 发现,当曝气量为 $90 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,好氧池内氨氮呈现梯度降低,且在好氧池 3 段氨氮降至 0.5 mg/L 以下,说明此时好氧池内硝化过程完成。因此,将空气悬浮鼓风机风量控制在 $90 \text{ m}^3/\text{min}$,能够满足好氧池内硝化过程所需曝气量;同时将好氧池 3 段末端的曝气量调小,降低好氧至缺氧回流液中 DO 对缺氧池反硝化过程的影响^[1,5-6]。

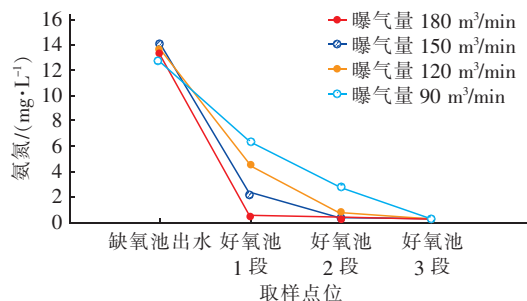


图 3 生物脱氮硝化阶段调控过程中氨氮变化

Fig. 3 Change of ammonia nitrogen in the process of biological denitrification and nitrification

硝化过程稳定后,维持曝气量为 $90 \text{ m}^3/\text{min}$,进行反硝化过程的优化。通过上述策略,依据进水总氮和出水总氮浓度(进水总氮为 53.2 mg/L ,为确保出水总氮稳定达标,取出水总氮为 12 mg/L),计算后确定回流比为 350% ,于是将好氧区至缺氧区的回流量由设计回流比(200%)提高到 350% 。稳定 24 h 后测试缺氧池出水末端 COD 与硝酸盐氮浓度,硝酸盐氮浓度在 0.1 mg/L 以下, COD 为 100 mg/L ,说明运行初期外加碳源投加量过高,导致碳源浪费。同时多余的碳源进入好氧区,好氧区曝气优先对过量的 COD 进行氧化,导致曝气量能耗增加,还可能影响硝化过程,因此需降低碳源投加量。缺氧池出

水 COD 和硝酸盐氮浓度对应反硝化过程调控中碳源投加量见表 3,在出水总氮达标的前提下,逐渐降

低碳源投加量,使得反硝化过程充分进行,且无碳源浪费的现象,最终碳源投加量为 180 L/h。

表 3 缺氧池出水 COD 和硝酸盐氮浓度对应反硝化过程调控中碳源投加量

Tab. 3 Concentration of COD and nitrate nitrogen in the effluent of anoxic tank corresponding to the carbon source addition in the process of denitrification

碳源(25% 乙酸钠液体)投加量/(L·h ⁻¹)	630	400	300	180
缺氧池出水 COD/(mg·L ⁻¹)	100	74	52	31
缺氧池出水硝酸盐氮/(mg·L ⁻¹)	0.03	0.14	0.51	0.84
出水 TN/(mg·L ⁻¹)	8.16	8.44	8.53	9.16

生物脱氮过程优化前后运行参数如表 4 所示。经过优化后的参数,与之前相比,曝气量降低了 50%,碳源投加量降低了 74%。在出水水质达标的基础上,大大降低了运行成本。

表 4 生物脱氮过程优化前后运行控制参数

Tab. 4 Controlled operation parameters before and after optimization of biological nitrogen removal process

项 目	优化前	优化后
处理水量/(m ³ ·d ⁻¹)	50 000	50 000
好氧池污泥浓度/(mg·L ⁻¹)	4 000	4 000
膜池污泥浓度/(mg·L ⁻¹)	7 000	7 500
好氧池曝气量/(m ³ ·min ⁻¹)	180	90
膜池-好氧池回流比/%	500	400
好氧池-缺氧池回流比/%	200	350
缺氧池-厌氧池回流比/%	100	100
碳源(25% 乙酸钠液体)投加量/(L·h ⁻¹)	700	180

4 结论与展望

① 依据好氧池沿程氨氮浓度的变化对系统曝气量进行调控,从而优化硝化过程;依据进出水总氮浓度对内回流比进行调控,同时依据缺氧池末端出水硝酸盐氮浓度和 COD 浓度对外加碳源投加量进行调控,从而优化反硝化过程。通过对曝气量、内回流比、碳源投加量的逐级调整,使得生化系统运行成本降低。对于水质水量均较为稳定的城市生活污水,此方法能够精准地调控生物脱氮过程。

② 通过此控制策略,曝气量降低为 90 m³/min,碳源(25% 乙酸钠液体)投加量为 180 L/h,较之前节省了 50% 曝气量、74% 碳源,大大降低了运行成本。

③ 通过运行发现曝气量降低后,好氧区始末出现明显的总氮损失,在节约曝气能耗的基础上发生有利于系统脱氮的同步硝化反硝化现象,如果能够稳定地出现同步硝化反硝化现象,则可进一步降低碳源的消耗量及曝气量。在下一阶段的运行调控

中,将深入分析同步硝化反硝化反应的发生条件及其对总氮去除率的贡献,将其纳入辅助脱氮的优化调控中。

参考文献:

[1] 王慰,王淑莹,张琼,等. 后置缺氧 UCT 分段进水工艺处理低 C/N 城市污水[J]. 中国环境科学,2016, 36(7):1997-2005.
WANG Wei,WANG Shuying,ZHANG Qiong,et al. Post-anoxic UCT step-feed process in treating municipal wastewater with low C/N ratios [J]. China Environmental Science, 2016, 36 (7) : 1997 - 2005 (in Chinese).

[2] 郝晓地,李天宇,吴远远,等. A²/O 工艺用于污水处理厂升级改造的适宜性探讨[J]. 中国给水排水, 2017,33(21):18-24.
HAO Xiaodi, LI Tianyu, WU Yuanyuan, et al. Discussion on suitability of A²/O process for upgrading of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (21) : 18 - 24 (in Chinese).

[3] 马勇,彭永臻,王淑莹. 不同外碳源对污泥反硝化特性的影响[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35 (6) : 820-824.
MA Yong, PENG Yongzhen, WANG Shuying. Sludge denitrification characteristics with different external carbon source [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35 (6) : 820 - 824 (in Chinese).

[4] 陈小燕. MBBR 及 A²/O 五段法用于污水处理厂提标扩建[J]. 中国给水排水, 2017, 33 (12) : 59-62.
CHEN Xiaoyan. Application of MBBR and five-stage A²/O in the upgrading and reconstruction of urban wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (12) : 59 - 62 (in Chinese).

[5] 李培,潘杨. A²/O 工艺内回流中溶解氧对反硝化的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, 35 (1) : 103-106.
LI Pei, PAN Yang. Influence of DO in internal reflux of

- A²/O process on denitrification [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35 (1): 103 - 106 (in Chinese).
- [6] 温沁雪,唐致文,陈志强,等. A²/O 工艺好氧末端溶解氧变化对脱氮除磷影响[J]. 环境工程学报,2011, 5(5):1041 - 1046.
- WEN Qinxue, TANG Zhiwen, CHEN Zhiqiang, *et al.* Effects of dissolved oxygen concentration at the end of aerobic stage in A²/O on nitrogen and phosphorus removal [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(5):1041 - 1046 (in Chinese).
- [7] 张帆,袁晓东. 小红门污水处理厂 A²/O 工艺优化运行研究[J]. 给水排水,2009,35(9):42 - 46.
- ZHANG Fan, YUAN Xiaodong. Study on operation optimization of A²/O process in Xiaohongmen sewage treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(9):42 - 46 (in Chinese).
- [8] 张景炳,范海涛,王洪臣,等. 某污水处理厂 A²/O 工艺冬季生物反硝化过程的影响因素研究[J]. 环境污染与防治,2019,41(6):689 - 693.
- ZHANG Jingbing, FAN Haitao, WANG Hongchen, *et al.* Study on influencing factors of biological denitrification process during winter in a A²/O wastewater treatment plant[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(6):689 - 693 (in Chinese).
- [9] 李桂荣,李雪,许文峰,等. 解决城镇污水处理厂生物脱氮除磷所需碳源不足的方法综述[J]. 广东化工, 2011, 38(4):149 - 150.
- LI Guirong, LI Xue, XU Wenfeng, *et al.* A review on shortage of carbon sources for N and P removal of biological systems in municipal wastewater treatment plant[J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(4): 149 - 150 (in Chinese).
- [10] 吴代顺,王淦,涂桢峰. 碳源投加量对除磷脱氮的影响[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版),2012,24(3):254 - 257.
- WU Daishun, WANG Gan, TU Chengfeng. Influence of carbon source dosing quantity on phosphorus removal denitrification[J]. Journal of Ningde Normal University (Natural Science), 2012, 24(3): 254 - 257 (in Chinese).
- [11] 杨敏,孙永利,郑兴灿,等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. 给水排水,2010,36(11): 125 - 128.
- YANG Min, SUN Yongli, ZHENG Xingcan, *et al.* Denitrification efficiency and techno-economic analysis of different exotic additional carbon source[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(11): 125 - 128 (in Chinese).

作者简介:冯红利(1990 -),男,河北易县人,硕士,工程师,主要从事市政污水厂提标改造项目研发与设计工作。

E-mail:1101869177@qq.com

收稿日期:2020-05-26

修回日期:2020-07-02

(编辑:衣春敏)

强化水资源监管,

落实最严格水资源管理制度