

述评与讨论

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.06.002

某高排放标准污水处理厂运行问题与对策措施研究

杨 敏, 郭兴芳, 孙永利, 郑兴灿, 李 劭, 熊会斌, 申世峰, 吴凡松
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘 要: 以海河流域采用改良 Bardenpho 工艺的某高排放标准污水处理厂提标改造工程为例,结合生产运行实际,对工艺诊断的主要运行问题进行了分析,并对其精细化对策措施进行了研究。结果表明,针对内回流混合液与后缺氧池入流 DO 过高导致外碳源无效损耗及后缺氧池无内源反硝化问题,通过利用池容未利用的好氧段 4 与好氧段 5 设置强化消氧区(设计 HRT 为 3.5 h),外碳源损耗控制量(以 COD 计)可达 15.97 mg/L,后缺氧池内源反硝化强化脱氮量可达 2.8 mg/L(相当于利用污泥内碳源 COD 为 11.2 mg/L),碳源投加量(以 COD 计)可降低 27.17 mg/L,降幅达 54.34%,碳源投加成本可节约 5.2 万元/d;针对部分时段缺氧池碳源过量投加导致部分好氧池池容(约 24%)被占用问题,结合缺氧池设计特征,提出“碳源投加点由缺氧池 1 后移至缺氧池 4 并在缺氧池 3 配置在线硝氮仪”的精细化碳源投加系统及其具体运行控制方法;针对化学协同除磷药剂过量投加导致无生物除磷功能问题,通过采取“化学除磷药剂投加点由二沉池配水井改至磁混凝单元恢复生物除磷功能”的对策措施,生物除磷功能恢复良好,厌氧池磷酸盐由优化前的 0.75 mg/L 增至 7.5 mg/L,好氧池出水磷酸盐低至 0.04 mg/L,缺氧池反硝化除磷作用显著(磷酸盐下降 2.77 mg/L),并且除磷药剂用量降低 70%,投加成本节约 0.7 万元/d。

关键词: 强化消氧区; 强化内源反硝化; 精细化碳源投加系统; 恢复生物除磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)06-0006-05

Study on Countermeasures and Operational Problems of a WWTP with High Discharge Standard

YANG Min, GUO Xing-fang, SUN Yong-li, ZHENG Xing-can, LI Mai, XIONG Hui-bin,
SHEN Shi-feng, WU Fan-song

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: An upgrading and transformation project of WWTP with high discharge standard in Haihe basin, which used Bardenpho process, was taken as an example in this paper. Combining with actual operation, the main operational problems based on process diagnosis were analyzed, and the refinement countermeasures were studied accordingly. Some methods were taken to solve the problems that invalid loss of external carbon source and no endogenous denitrification effect in later anoxic tank caused by high DO of internal recycling mixed liquid and influent of later anoxic tank, which was to set enhanced biological DO removal zone by utilizing the 4th and 5th aerobic phase (HRT of 3.5 h) with

unutilized tank volume. As a result, the quantity of external carbon source loss could be controlled to 15.97 mg/L COD, nitrogen removal ability of later anoxic tank by endogenous denitrification could be enhanced to 2.8 mg/L TN with utilization of 11.2 mg/L COD of internal carbon source in sludge, carbon source dosage could be decreased by 27.17 mg/L COD with decreasing extent of 54.34%, and carbon source adding cost could be saved 52 000 yuan per day. Aiming at the problem that excessive addition of carbon source in anoxic tank in some period causing 24% of aerobic tank volume to be occupied, combined with the design characteristic of anoxic tank, a fine carbon source feeding system with carbon source addition point from 1st anoxic tank to 4th anoxic tank and on-line nitrate meter in the 3rd anoxic tank and its specific operation control method were proposed. In view of the problem that excessive addition of synergistic chemicals for phosphorus removal caused activated sludge losing biological phosphorus removal function, by taking the countermeasure that the addition point of chemicals for phosphorus removal was optimized from distributing well of secondary settling tank to coagulation with magnet unit so as to recover biological phosphorus removal function, biological phosphorus removal function could be recovered well. $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ of anaerobic tank increased from original 0.75 mg/L to 7.5 mg/L, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ of aerobic tank effluent was 0.04 mg/L, denitrifying phosphorus removal effect was significant in anoxic tank with $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ decreasing by 2.77 mg/L, and chemical phosphorus removal medicament dosage decreased by 70% and addition cost of chemical phosphorus removal medicament could be saved by 7 000 yuan per day.

Key words: enhanced biological DO removal zone; enhanced endogenous denitrification; refinement carbon source adding system; recovery of biological phosphorus removal

1 工程概况

某污水处理厂位于海河流域,设计规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分为 4 个系列,每个系列设计规模为 $3.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进水中工业废水占比约 30%。原设计工艺为改良 A^2/O 工艺 + 深床滤池,其中预缺氧池、厌氧池、缺氧池、好氧池的设计 HRT 分别为 1.4、1.4、7.4 和 15 h,缺氧池由 4 个相同容积的缺氧段构成,好氧池由 5 个相同容积的好氧段构成。原设计出水水质为一级 A 标准,2015 年 10 月天津市地方排放标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/599—2015)颁布实施,该厂于 2018 年完成提标改造工程,设计出水水质为天津市地标 A 标准,设计工艺为改良 Bardenpho 工艺 + 磁混凝沉淀池 + 深床滤池 + 臭氧氧化。提标改造工程生物池平面布置见图 1,其中改良 Bardenpho 工艺的后缺氧池(设计 HRT 为 2 h)与后好氧池(设计 HRT 为 0.5 h)是利用原好氧段 5 通过设置隔墙改造而成,内回流泵设置在现状好氧段 5(设计 HRT 为 0.5 h)末端,碳源投加点分别设置在缺氧池 1 及后缺氧池,化学除磷药剂投加点分别设置在二沉池配水井及磁混凝单元。该厂提标改造工程自运行以来,运行负荷

率约 100%,出水水质稳定达到天津地标 A 标准。

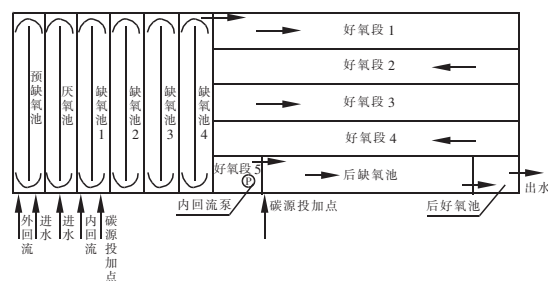


图 1 提标改造工程生物池平面布置

Fig. 1 Layout of biological tank of the upgrading and transformation project

2 运行问题分析

① 内回流 DO 过高导致外碳源损耗严重

该提标改造工程后缺氧池设计 HRT 为 2 h,外碳源投加点设置在推流式后缺氧池前端,综合考虑该厂生物系统污泥活性较高(MLVSS/MLSS 达 70% 以上),并且后缺氧池设计 HRT 较长等因素,实际生产运行中后缺氧池并不投加碳源,以充分利用污泥内碳源反硝化强化脱氮,降低碳源投加量,节约碳源投加成本。但是跟踪研究结果表明,由于后缺氧池入流 DO 浓度即混合液内回流点 DO 浓度过高

(7.26 mg/L),出水混合液 DO 仍达 3.27 mg/L,导致后缺氧池实际并未获得内源反硝化所需的缺氧环境,而是进行了污泥内碳源的生物氧化反应,并无预期的内源反硝化强化脱氮效果。

研究^[1-3]表明,混合液内回流点 DO 会导致缺氧池碳源(进水碳源或外加碳源)无效损耗,影响后缺氧池缺氧环境及其脱氮效果,是高排放标准城镇污水处理厂精细化运行的重要关注点。该厂生物系统主要节点 DO 浓度测试结果见图 2。根据实际运行内回流比(约 220%)及混合液内回流点(即好氧段 5 末端)DO 浓度进行核算,内回流混合液过高 DO 理论上可导致缺氧池碳源(以 COD 计)无效损耗 15.97 mg/L。该污水厂采取缺氧池 1 投加外碳源乙酸钠溶液(有效含量为 25%)的强化脱氮措施,外碳源平均用量约为 50 t/d,乙酸钠 COD 当量按 0.6 gCOD/g 乙酸钠^[4]计,折算外碳源(以 COD 计)平均投加量约 50 mg/L,理论上无效损耗的碳源占外碳源投加量的 31.94%,外碳源无效损耗严重。

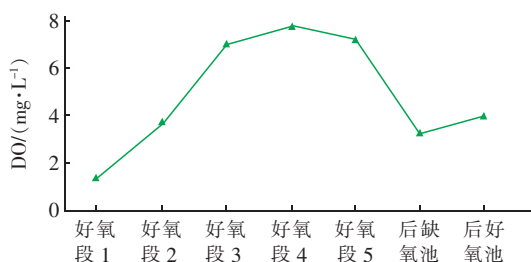


图 2 生物系统主要节点 DO 浓度生产性跟踪测试

Fig. 2 Productive tracking test of DO concentration of main node of biological system

② 碳源过量投加导致好氧池部分池容被占用

对于进水碳源不足的高排放标准城镇污水处理厂,通常正常情况下好氧池主要进行硝化反应,推流式好氧池沿程氨氮浓度呈下降变化,但该提标改造工程长期跟踪研究表明,部分时段存在缺氧池碳源过量投加导致推流式好氧池部分池容被占用问题。根据过量投加碳源与非过量投加碳源下推流式好氧池沿程 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化对比(见图 3),低温季节缺氧池非过量投加碳源下好氧池沿程氨氮浓度明显下降(其中好氧段 1 内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 下降 2.77 mg/L),并且好氧段 3 末端 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 已低至 0.32 mg/L,硝化反应至此已基本完成,但缺氧池过量投加碳源情况下好氧段 1 内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化不大(仅下降 0.13 mg/L),基本未发生硝化反应,好氧段 1(设计

HRT 为 3 h)的池容被完全占用。结合该厂提标改造工程好氧池设计 HRT(12.5 h),核算好氧池池容至少被占用 24%,既造成碳源与曝气浪费,又增加低温季节好氧池出水氨氮超标风险。

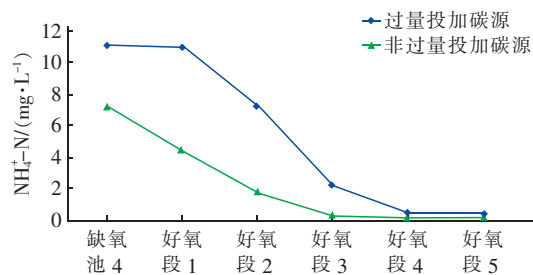


图 3 过量投加碳源与非过量投加碳源下好氧池沿程 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化对比

Fig. 3 Comparison of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration along the aerobic tank between excessive feeding carbon source and non-excessive feeding carbon source

③ 化学除磷剂过量投加导致无生物除磷功能

根据孙永利等^[5]和叶亮等^[6]的研究,化学协同除磷药剂过量投加会抑制高排放标准污水处理厂生物除磷。对于该提标改造工程,除磷工艺设计采用生物除磷与化学辅助除磷相结合方式,在二沉池前配水井及磁混凝单元分别设置除磷药剂投加点,在磁混凝单元正式投运前,除磷药剂 PAC 溶液(有效含量为 10%)投加在二沉池前配水井,用量为 20 t/d,投加量为 133 mg/L。但工程长期跟踪研究表明,由于化学协同除磷药剂过量投加,系统回流污泥中除磷药剂对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除能力达 7.3 mg/L,导致系统污泥实际无生物除磷功能。根据生物系统全流程生产性测试,预缺氧池、厌氧池及缺氧池 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度均在 0.75 mg/L 以下,在乙酸钠过量投加(投加量为 75 mg/L,以 COD 计)情况下,回流污泥厌氧释磷小试过程中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度基本不变。

3 精细化对策措施研究

① 设置消氧区强化后缺氧池内源反硝化

分析发现,该厂鼓风机配置不合理,好氧池曝气量调控范围小,但该厂已完成提标改造,无法重新配置鼓风机,需另想其他办法。长期跟踪研究表明,低温季节氨氮的硝化反应在好氧段 3 即已基本完成(好氧段 3 末端氨氮通常不超过 0.32 mg/L),好氧段 4(设计 HRT 为 3 h)及好氧段 5(设计 HRT 为 0.5 h)的池容并未利用,并且好氧段 3 末端 DO 通常为 2.85 ~ 7.00 mg/L。为此,对低温下好氧段 3

的末端活性污泥进行耗氧速率测试。结合实际工艺运行控制参数,核算出低温季节好氧段 4 及好氧段 5 按消氧模式运行下的消氧能力为 5.11 mg/L。为此,提出“设置强化消氧区控制缺氧池外碳源损耗并强化后缺氧池内源反硝化”的精细化运行对策措施(强化消氧区设置示意图 4),即好氧段 4 及好氧段 5 停止曝气,并配置 4 台潜水搅拌器,按强化消氧区(设计 HRT 3.5 h)模式运行,利用较长实际 HRT(0.83 h)条件下,污泥内碳源的生物氧化反应对好氧段 3 末端的 DO 进行强化去除,并同时控制好氧段 3 末端 DO 在 5 mg/L 以下。

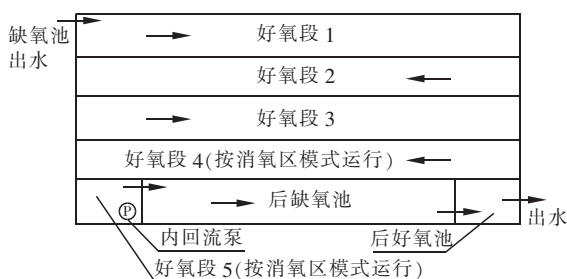


图 4 强化消氧区设置示意

Fig. 4 Schematic diagram of setup of enhanced biological DO removal zone

在 MLSS 为 4.96 g/L、MLVSS 为 3.6 g/L、 T 为 15.5 °C 条件下,对低温下好氧池出水混合液内源反硝化速率进行了小试研究,核算出低温季节后缺氧池的强化内源反硝化脱氮量可达 2.8 mg/L,以去除 1 mg/L 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 需 4 mg/L 的 COD 计,即利用污泥内碳源为 11.2 mg/L,则外碳源投加量(以 COD 计)可降低 11.2 mg/L。

综上所述,通过采取设置强化消氧区的精细化运行对策措施,外碳源投加量(以 COD 计)可降低 27.17 mg/L,降幅为 54.34%,即外碳源乙酸钠溶液用量可降低 27.17 t/d,根据当前碳源乙酸钠溶液市场均价为 1 920 元/t,碳源投加成本可节约 5.2 万元/d,经济效益显著。

② 缺氧池碳源投加点后移,控制过量投加

对于部分时段缺氧池碳源过量投加导致好氧池部分池容被占用的问题,分析其原因为缺氧池碳源投加系统缺乏精细化设计,进水水质波动易造成碳源过量投加。

研究分析发现,缺氧池 4 的设计 HRT 为 1.85 h,若将缺氧池碳源投加点后移至此,不仅能满足强化脱氮对池容的要求,还有利于进水碳源和污泥

内碳源的充分利用,进而降低外碳源投加量。故提出“缺氧池碳源投加点后移并配置在线硝氮仪控制碳源过量投加”的精细化对策措施(缺氧池精细化碳源投加系统见图 5)。即将缺氧池碳源投加点由现状的缺氧池 1 后移至环沟型缺氧池 4,并在环沟型缺氧池 3 出水端配置在线硝氮仪,用于实时指导后续环沟型缺氧池 4 的碳源精确投加,具体运行控制方法为:当缺氧池 3 出水端在线硝氮仪显示的 $\text{NO}_3^- - \text{N} < 0.2 \text{ mg/L}$ 时,可认为反硝化反应至缺氧池 3 即已基本完成,缺氧池 4 无需再投加碳源,应及时关闭碳源投加系统;当 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 不低于 0.2 mg/L 时,应投加碳源强化脱氮,根据工艺运行控制参数(内、外回流比分别为 220% 和 100%),核算缺氧池 4 实际需最大强化脱氮量为 $4.2 C_{\text{NO}_3^- - \text{N}}$,以去除 1 mg/L 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 需 4 mg/L 的 COD 计,则碳源投加量(以 COD 计)为 $16.8 C_{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 。

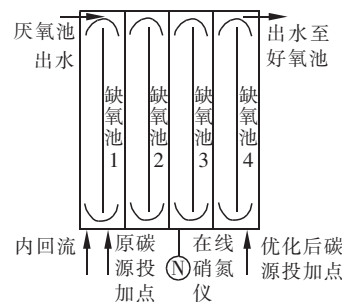


图 5 缺氧池精细化碳源投加系统示意

Fig. 5 Schematic diagram of refinement carbon source adding system of anoxic tank

③ 优化化学除磷,恢复生物除磷功能

针对化学协同除磷药剂过量投加导致的无生物除磷功能问题,有两种对策措施:一是优化化学协同除磷药剂投加量,二是采用后置化学除磷方法。为恢复并充分利用生物除磷功能,结合二沉池前配水井与磁混凝单元均设置除磷药剂投加点的的设计特点,以运行控制简单为原则,提出并在生产运行中采取“优化化学除磷药剂投加点恢复生物除磷功能”的精细化运行对策措施,即将除磷药剂实际投加点由二沉池前配水井改至磁混凝单元。生产运行实践表明,采取该措施后系统生物除磷功能得到恢复,厌氧池 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 由优化前的 0.75 mg/L 增加至 7.5 mg/L,好氧池出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 已低至 0.04 mg/L,同时缺氧池反硝化除磷作用显著,缺氧池出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 已低至 0.8 mg/L,核算缺氧池内 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 下降 2.77

mg/L。

优化运行后,系统化学除磷药剂 PAC 溶液用量显著降低,由优化前的 20 t/d 降至优化后的 6 t/d,下降 70%。根据除磷药剂 PAC 溶液当前市场均价 500 元/t,核算除磷药剂投加点优化后除磷药剂投加成本节约 0.7 万元/d,经济效益显著。

4 结论

① 基于碳源无效损耗控制与强化后缺氧池内源反硝化,建议注重 Bardenpho 工艺好氧池 DO 控制,尽量将好氧池末端 DO 控制在 0.5 mg/L 以下,确保缺氧池及后缺氧池良好的缺氧环境。

② 为节约碳源投加成本与确保出水氨氮稳定达标,建议生产运行中应结合缺氧池及好氧池沿程氨氮或硝氮浓度变化,关注高排放标准污水处理厂缺氧池碳源过量投加问题。

③ 为充分利用生物除磷并节约除磷药剂投加成本,建议生产运行中采取优化化学协同除磷药剂投加量或后置化学除磷的技术措施,避免化学协同除磷药剂过量投加而抑制生物除磷。

参考文献:

- [1] 孙永利,李鹏峰,隋克俭,等. 内回流混合液 DO 对缺氧池脱氮的影响及控制方法[J]. 中国给水排水, 2015,31(11):81-84.
SUN Yongli, LI Pengfeng, SUI Kejian, *et al.* Impact of dissolved oxygen in internal reflux mixture on nitrogen removal in anoxic tank and its control measures [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (11): 81 - 84 (in Chinese).
- [2] 杨敏,孙永利,郑兴灿,等. 内回流混合液溶解氧对工艺脱氮影响及其工程控制措施[J]. 给水排水, 2015, 41(9):134-136.
YANG Min, SUN Yongli, ZHENG Xingcan, *et al.* Impact of dissolved oxygen in internal recirculation mixture on denitrification and its engineering control measures [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41 (9): 134 -

136 (in Chinese).

- [3] 李家驹,孙永利,秦松岩,等. 内回流混合液 DO 对缺氧池反硝化影响预测模型研究[J]. 中国给水排水, 2016,32(21):119-121.
LI Jiaju, SUN Yongli, QIN Songyan, *et al.* Forecast model for impact of dissolved oxygen in internal reflux mixture on denitrification in anoxic tank [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (21): 119 - 121 (in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 孙永利,郑兴灿,刘振江,等. 城镇污水厂化学协同除磷对生物除磷的影响[J]. 中国给水排水, 2015, 31(19):68-71.
SUN Yongli, ZHENG Xingcan, LIU Zhenjiang, *et al.* Impact of simultaneous chemical phosphorus removal on biological phosphorus removal in WWTPs [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (19): 68 - 71 (in Chinese).
- [6] 叶亮,杨敏,李鹏峰,等. 芦村污水处理厂精细化管理技术措施研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 115-119.
YE Liang, YANG Min, LI Pengfeng, *et al.* Technical measures of Lucun WWTP based on refined management [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (19): 115 - 119 (in Chinese).

作者简介:杨敏(1981-),男,安徽安庆人,硕士,高级工程师,主要从事污水处理及黑臭水体整治技术研究工作。

E-mail:707180297@qq.com

收稿日期:2019-07-17

修回日期:2019-07-24

(编辑:丁彩娟)