

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.14.012

# 消氧强化反硝化脱氮 AAO 生物池在合肥某污水厂的应用

冯云刚<sup>1</sup>, 张 飞<sup>2</sup>, 冯 凯<sup>1</sup>, 高守有<sup>1</sup>

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 2. 合肥市排水管理办公室, 安徽合肥 230001)

**摘 要:** 合肥某污水处理厂设计规模为  $20.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 出水执行地表水Ⅳ类标准, 其中  $\text{TN} \leq 5 \text{ mg/L}$ 。由于出水总氮要求高, 为降低运营成本, 生物池的设计将脱氮作为重点。在分析污水厂流域范围内近几年进水水质变化趋势的情况下, 结合水温不同对考核指标要求也不同的特点, 对生物池进行重点挖潜, 在五段 Bardenpho 的基础上进行改进, 在厌氧池前设置选择池, 在好氧区后设置消氧区, 同时将第二缺氧区改造为好氧/缺氧变化区, 这样在提高生物池脱氮除磷功能的同时也可更好地应对冬春季和夏秋季运营方式的不同需求。深度处理采用混合絮凝+反硝化深床滤池工艺, 消毒采用次氯酸钠消毒。实际运行数据表明, 工艺流程及设计参数合理可行, 出水水质能够稳定达标。

**关键词:** 消氧区; 变化区; 强化除磷脱氮; 反硝化深床滤池; 准Ⅳ类标准

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)14-0080-05

## Application of AAO Biological Tank for Denitrification Enhanced by Oxygen Elimination in a Wastewater Treatment Plant in Hefei

FENG Yun-gang<sup>1</sup>, ZHANG Fei<sup>2</sup>, FENG Kai<sup>1</sup>, GAO Shou-you<sup>1</sup>

(1. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China; 2. Hefei Drainage Management Office, Hefei 230001, China)

**Abstract:** The designed treatment capacity of a wastewater treatment plant in Hefei is  $20.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , and the effluent quality is required to meet surface water class Ⅳ standard, among which TN in the effluent is no more than 5 mg/L. Due to the high requirement of total nitrogen in the effluent, design of biological tank should focus on nitrogen removal in order to reduce the operational cost. Based on analyzing profile of the influent quality of the wastewater treatment plant in the drainage basin in recent years, combined with the characteristics of different water temperature requirements for assessment indicators, the project focused on modification of the biological tank. Based on improvement of the five stage Bardenpho, a selection tank was added in front of the anaerobic tank, an oxygen elimination zone was set up after the aerobic zone, and the second anoxic zone was transformed into aerobic/anoxic varying zone. In this way, the nitrogen and phosphorus removal performance of the biological tank was improved, and at the same time, it could better meet different operational needs in winter, spring and summer, autumn. The advanced treatment process consisted of mixed flocculation and denitrification deep bed filter, and sodium hypochlorite was employed for disinfection. Actual operational data showed that the process flow and design parameters were reasonable and feasible, and the effluent quality could meet the discharge standard stably.

**Key words:** oxygen elimination zone; varying area; enhanced phosphorus and nitrogen removal; denitrification deep bed filter; quasi IV standard

合肥某污水处理厂设计规模为  $20.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,距离合肥市“母亲河”南淝河较近,对确保南淝河和二十埠河水质持续达标意义重大,是合肥市东南区域污水治理的标志性节点。

1 设计进、出水水质

随着服务范围内城市化进程的逐步推进,该污水厂进水量逐步增大,进水水质也呈现明显的变化趋势。根据近五年每日进水水质数据,进水 TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 均呈上升趋势。结合进水 90% 涵盖率相关数值,确定了设计进水水质(见表 1)。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	TN	NH <sub>3</sub> - N	TP
设计进水水质	350	150	200	50	45	7.5
设计出水水质	30(40) <sup>①</sup>	6	10	5 <sup>②</sup>	1.5	0.3

注: ①进水中溶解性不可降解 COD 值 < 20 mg/L 时出水 COD ≤ 30 mg/L; 不可降解 COD 值 ≥ 20 mg/L 时,出水 COD 值按照 ≤ 40 mg/L 考核。  
②按月平均值考核,当进水水温小于 12 ℃ 时,TN 不参加月平均值计算。

根据设计进水水质: $\text{BOD}_5/\text{TN} = 3$ ,  $\text{BOD}_5/\text{TP} = 20$ ,虽可满足生物脱氮除磷的基本要求,但实际进水水质统计数据表明: $\text{BOD}_5/\text{TN} > 2.86$  占 36.5%,  $\text{BOD}_5/\text{TN} > 4$  仅占 4.1%,  $\text{BOD}_5/\text{TP} > 20$  占 59.5%。总体来说碳源不足,在后续的工艺设计中应注意碳源的高效利用并增加外碳源的投加措施。

工程要求出水水质在稳定达到安徽省地方标准《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB 34/2710—2016)的基础上,结合合肥市污水处理设施建设项目实施导则,总磷、总氮、COD 三项主要指标浓度值分别不高于 0.3、5、30 mg/L,最终设计出水水质见表 1。

2 工艺流程

本工程设计进水主要为市政生活污水。结合合肥市主城区其他污水厂运行情况,TN、TP 的稳定达标是本工程关注的重点。经研究比选,设计采用强化除磷脱氮生物池 + 混合絮凝 + 反硝化深床滤池 + 次氯酸钠消毒工艺。污泥采用离心脱水,至含水率 80% 后外运处置。工艺流程见图 1。

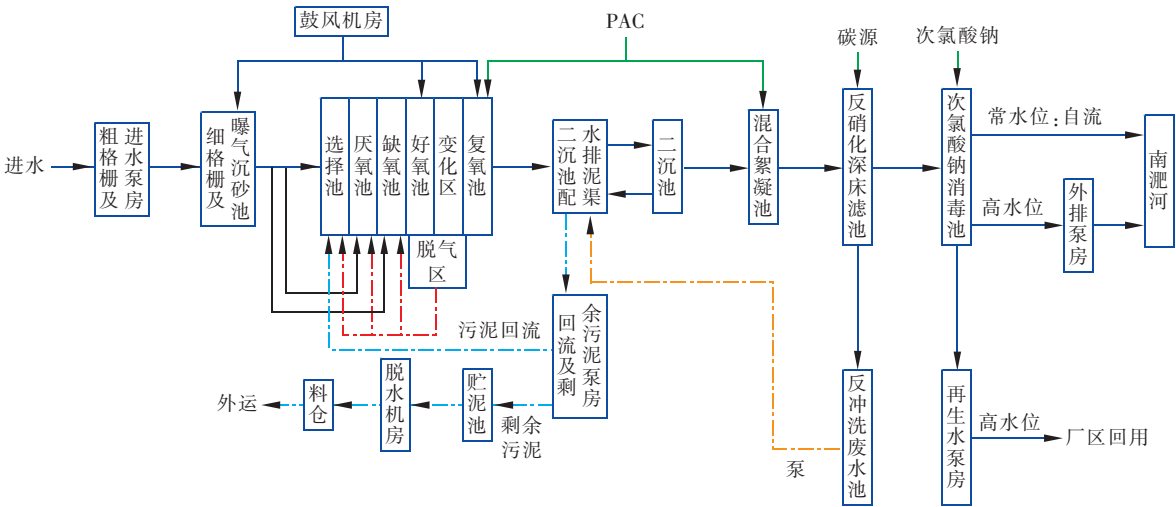


图 1 工艺流程

Fig. 1 Process flow chart

3 主要建(构)筑物设计参数

3.1 生物池

生物池共 4 个系列,每个系列规模  $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,总尺寸为  $141.55 \text{ m} \times 144.60 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$ ,总水力停留时间 16.3 h,其中选择池 0.9 h、厌氧池 1.4

h、缺氧池 4.5 h、好氧区池 6.3 h、好氧/缺氧池 2.7 h、脱气区 0.5 h。有效水深 7.2 m,剩余污泥干质量  $35 \text{ t/d}$ ,污泥回流比  $R = 50\% \sim 100\%$ ,混合液回流比  $r = 100\% \sim 300\%$ 。总污泥负荷  $0.059 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ,好氧段污泥负荷  $0.15 \text{ kgBOD}_5/$

( $\text{kgMLSS} \cdot \text{d}$ ), 系统泥龄 12.77 d, 最大气水比 6:1。

### 3.2 二沉池

二沉池采用矩形周进周出沉淀池, 共 12 座, 单座平面尺寸为  $65.4 \text{ m} \times 12.0 \text{ m}$ 。平均流量时表面负荷为  $0.92 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 最大表面负荷为  $1.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

### 3.3 混合絮凝池

为了确保总磷达标, 考虑化学除磷措施, 在滤池前增加混合絮凝段。设混合絮凝池 2 座, 每座设计规模  $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 设混合池 1 格, 平均流量停留时间 50 s, 设计平面尺寸为  $4.36 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ , 有效水深为 6.5 m; 絮凝池 4 格, 平均流量停留时间 5.2 min, 单格设计平面尺寸为  $4.7 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$ , 有效水深为 6.5 m。

### 3.4 反硝化深床滤池

为了确保最终出水 SS、TN、TP 稳定达标, 本工程采用反硝化深床滤池。深床滤池共 12 格, 单格滤池平面尺寸为  $30.48 \text{ m} \times 3.56 \text{ m}$ ,  $H=7.3 \text{ m}$ 。深床滤池  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  去除负荷  $0.65 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , 平均流量下设计平均滤速为  $6.4 \text{ m/h}$ , 峰值流量下

设计最大滤速为  $8.3 \text{ m/h}$ , 砂层厚度  $2.44 \text{ m}$ , 反冲洗水强度  $14.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 反冲洗气强度  $109.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 反冲洗频率为 48 h/周期, 滤池水头损失约为 20~25 kPa。

设置气水联合反冲洗, 反冲洗强度: 气洗  $109.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 水洗  $14.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

## 4 各工艺段出水水质目标值

各工艺段出水水质目标值见表 2。

表 2 各工艺段出水水质目标值

Tab.2 Target value of effluent quality of each process

项 目	section					
	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$					
设计进水	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP
设计进水	350	150	200	50	45	7.5
预处理出水	297.5	127.5	200	50	45	7.5
生物池 + 二沉池出水	35	8	25	12	1.5	0.5
混合絮凝 + 深床滤池出水	30	6	10	5	1.5	0.3

## 5 运行出水水质

污水厂自 2020 年初开始试运行, 2020 年部分月份进、出水水质见表 3, 可见, 出水水质稳定达标。

表 3 实际进、出水水质

Tab.3 Actual influent and effluent quality

项 目		进水						出水					
		COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
4 月	最大	213.0	102.0	125.0	21.7	29.8	3.0	17.0	4.2	6.0	0.4	4.8	0.2
	平均值	140.3	66.3	97.0	17.9	24.3	2.2	13.9	3.3	4.8	0.2	4.2	0.1
5 月	最大	322.0	129.0	145.0	28.7	34.4	3.8	17.0	4.0	6.0	0.4	4.2	0.1
	平均值	168.2	79.0	105.7	19.0	25.5	2.4	12.7	3.2	5.1	0.2	3.6	0.1
6 月	最大	189.0	86.9	120.0	21.9	28.0	3.8	13.0	3.6	5.0	0.2	4.2	0.2
	平均值	111.2	54.3	74.3	13.9	20.0	1.7	11.4	2.9	4.5	0.2	3.7	0.1
7 月	最大	158.0	74.1	118.0	21.9	26.6	2.9	12.0	3.0	5.0	0.2	4.3	0.1
	平均值	110.8	52.8	76.5	14.0	21.0	1.4	9.9	2.5	4.7	0.2	3.7	0.1
8 月	最大	241.0	96.3	175.0	22.8	28.4	4.3	16.0	3.5	<4.0	0.3	4.4	0.1
	平均值	143.5	64.5	98.8	15.7	21.1	2.1	11.9	2.9	<4.0	0.2	3.9	0.1
9 月	最大	241.0	108.0	178.0	20.9	29.4	5.3	17.0	4.0	5.0	0.4	4.5	0.2
	平均值	162.2	72.2	116.6	16.9	23.3	2.5	13.6	3.2	4.3	0.2	3.9	0.1
10 月	最大	316.0	126.0	209.0	31.0	33.3	5.1	24.0	5.3	<4.0	0.4	4.9	0.2
	平均值	205.6	88.8	93.2	23.6	28.4	3.1	15.9	3.7	<4.0	0.1	4.1	0.1

从表 3 可见, 污水厂实际进水水质比设计水质低, 经分析原因如下: 4 月—10 月气温较高, 居民用水量, 进水水质较低; 4 月—10 月降雨量较大, 部分雨水进入污水管网; 污水厂设计进水水质是根据该厂一、二期近五年进水 90% 涵盖率相关数值确定的, 意味着全年 90% 的进厂水质数据要低于设计进

水水质。

以上述 4 月—10 月进水水质数据的平均值 (COD 205  $\text{mg/L}$ 、BOD<sub>5</sub> 88  $\text{mg/L}$ 、SS 115  $\text{mg/L}$ 、TN 28  $\text{mg/L}$ 、TP 3.5  $\text{mg/L}$ ) 核算主要设计参数, 进厂流量已达  $(17 \sim 18) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 基本满负荷运行, 剩余污泥干质量为 21.1 t/d, 系统总泥龄为 17.8 d, 总污

泥负荷为  $0.035 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ , 最大气水比为  $4.2:1$ 。反硝化深床滤池容积负荷为  $0.5 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

加药量校核:设计碳源采用商品乙酸钠溶液(乙酸钠浓度 30%),主要投加点为反硝化滤池进水端,设计投加量  $210 \text{ mg/L}$ ,进水平均值数据下计算投加量为  $150 \text{ mg/L}$ ,总氮去除量  $7 \text{ mg/L}$ 。除磷采用商品聚合氯化铁溶液(氯化铁浓度 9%) + 商品聚合氯化铝溶液(氯化铝浓度 10%)两种药剂,PAC 投加量  $220 \text{ mg/L}$ 、聚合氯化铁投加量  $770 \text{ mg/L}$ (浓度 9%),进水平均值数据下计算 PAC 投加量  $50 \text{ mg/L}$ (浓度 10%)、聚合氯化铁投加量  $175 \text{ mg/L}$ (浓度 9%)。

## 6 设计特点

### ① 优化生物池设计,强化脱氮除磷

本工程设计出水  $\text{TN} \leq 5 \text{ mg/L}$ ,为减少后续反硝化深床滤池的脱氮量,降低运行费,本工程生物池池型以五段 Bardenpho 为基础,进一步优化挖潜,提高脱氮除磷功能。主要的改进点见图 2。

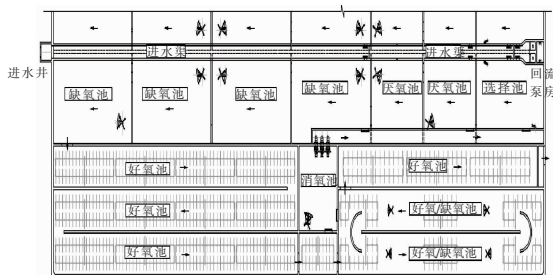


图 2 生物池功能分区

Fig. 2 Functional zoning of biological tank

a. 增加选择池。在工艺前端设置生物选择池,停留时间  $0.9 \text{ h}$ 。全部的污泥回流和 15% (可调) 的进水进入选择池,去除回流污泥中的硝态氮,降低对后续厌氧释磷的影响,提升系统除磷功能。

b. 设置多点进水。在选择池、厌氧区、缺氧区分别设置进水点,设计进水量分别为总水量的 15%、15%、70%,进水量均可调。

c. 设置消氧池。李培、Oh 等<sup>[1-2]</sup>研究认为,好氧区到缺氧区携带的溶解氧是影响 AAO 工艺反硝化脱氮的主要原因,有必要采取措施,降低回流液中溶解氧的含量。本工程在好氧区末端设置消氧区,利用隔墙与好氧区和变化区隔离,使之相对独立,设置搅拌器,停留时间  $0.5 \text{ h}$ 。优化生物池布置,使消

氧池设置 2 个进水闸门,可自好氧区末端和好氧/缺氧变化区进水,根据变化区运行模式的不同选择回流液来源。

d. 第二缺氧区改为好氧/缺氧变化区。根据本工程设计出水水质,当进水水温小于  $12^\circ\text{C}$  时,TN 不参加月平均值计算,按安徽省地标《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB 34/2710—2016) TN 要求  $12 \text{ mg/L}$  计。此时, $\text{NH}_3 - \text{N}$  成为污水厂运行的首要控制指标,应增加好氧区停留时间。当水温高于  $12^\circ\text{C}$  时,出水 TN 要求  $5 \text{ mg/L}$ ,好氧/缺氧变化区按第二缺氧区运行,同时根据需要在该处投加外部碳源,提高反硝化效率。

### ② 采用微絮凝-反硝化深床滤池组合工艺

微絮凝直接过滤技术是省去沉淀过程而将混凝与过滤过程在滤池内同步完成的一种新型接触絮凝过滤工艺。这种直接过滤技术不仅可简化污水处理流程,降低投资费用,减少运行费用,而且还可延长过滤周期,提高产水量及出水水质<sup>[3]</sup>。

利用深床-直接过滤工艺进行同步脱氮除磷的研究是 20 世纪 90 年代以后才开始的,即将混凝除磷与反硝化脱氮集中在同一滤床中同步进行。Jonsson、Boller 等<sup>[4-5]</sup>试验表明,活性砂过滤器是一种高效同步脱氮除磷装置,可将出水中磷和氮分别降到  $0.1 \sim 0.2 \text{ mg/L}$  和  $2 \sim 3 \text{ mg/L}$ 。Hultman 等<sup>[6]</sup>研究认为,下向流式间歇深床过滤工艺比活性砂过滤器能耗更低,结构更简单,更适合污水处理厂的大规模应用。

中国科学院的李桂平<sup>[7]</sup>2001 年在北京水源九厂建立了实验室规模的微絮凝深床直接过滤同步脱氮除磷工艺。研究表明,该工艺对二沉池出水中氮和磷的去除率可分别达到 98% 和 90% 以上;脱氮过程和除磷过程没有明显的相互抑制现象。

本工程采用微絮凝-反硝化深床滤池工艺去除二沉池出水中的 SS、TN、TP。混合段设计停留时间  $50 \text{ s}$ ,投加 PAC,投加量  $40 \text{ mg/L}$ (商品溶液,浓度 10%),絮凝时间  $5.2 \text{ min}$ 。实际运行效果显示,在生物池和二沉池运行稳定的情况下,滤池出水 SS、TN、TP 三项指标均能满足要求。

### ③ 对反硝化风机及管路噪声采取降噪措施

滤池反冲洗鼓风机及管路噪声,是污水厂噪声污染的重要来源之一,对滤池运维人员的职业健康造成了一定影响<sup>[8]</sup>。分析原因,主要是风机、风管



流速过大产生的噪声,及管路共振引起的噪声。本工程采取风机增加隔音罩、放大风机主管路管径(反冲洗风机主管径从DN500提高到DN700)、优化管路布置、减小长直管段等措施,取得了较好的效果。

## 7 结语与展望

针对污水厂近年进水水质特点及不同季节重点考核指标有所不同的特点,本工程对生物池进行了挖潜改造,增加选择池、消氧区,设置好氧/缺氧变化段,投产后运行效果较好,具有一定的示范意义。下一步应结合污水厂的实际应用,对消氧段容积的大小与好氧池容积、回流比的关系进行总结,同时对消氧区与第二好氧/缺氧区的组合应用情况、具体的消氧效果结合不同季节的连续应用情况进行进一步分析论证。

针对合肥地区进水水温不低于12℃的市政生活污水,通过强化生物池的脱氮除磷功能及后续反硝化深床滤池的进一步脱氮,出水TN可稳定达到5mg/L。今后类似项目设计时,应逐步弱化深床滤池对SS、TP的去除能力,专注脱氮,同时设置精确加药系统,以降低运营成本。

## 参考文献:

- [1] 李培,潘杨. A<sup>2</sup>/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 A<sup>2</sup>/O process on denitrification [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35 (1): 103 - 106 (in Chinese).
- [2] OH J. Oxygen Effect on Activated Sludge Denitrification in Sequencing Batch Reactors [D]. USA: University of Colorado at Boulder, 1998.
- [3] 赵奎霞,李晓粤,张传义. 微絮凝-直接过滤技术的研究与应用进展[J]. 环境保护科学,2003,29(5):12-14.
- ZHAO Kuixia, LI Xiaoyue, ZHANG Chuanyi. Research and application progress of micro-flocculation-direct filtration technology [J]. Environmental Protection Science, 2003, 29 (5): 12 - 14 (in Chinese).
- [4] JONSSON L. Experiences of nitrogen and phosphorus removal in deep-bed filters at Henriksdal sewage works in Stockholm [J]. Water Science & Technology, 1998, 37 (9): 193 - 200.
- [5] BOLLER M. Full scale experience with tertiary contact filtration [J]. Water Science & Technology, 1984, 16 (10): 225 - 239.
- [6] HULTMAN B, JONSSON K, PLAZA E. Combined nitrogen and phosphorus removal in a full-scale continuous up-flow sand filter [J]. Water Science & Technology, 1994, 29 (10): 127 - 134.
- [7] 李桂平. 微絮凝-深床直接过滤技术在城市给水及废水处理中的应用研究[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心,2002.
- LI Guiping. Application of Micro Flocculation Deep Bed Direct Filtration Technology in Urban Water Supply and Wastewater Treatment [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2002 (in Chinese).
- [8] 朱海明. 石洞口污水处理厂内反硝化深床滤池运行状态下的降噪研究[J]. 工程建设与设计,2019(16):139-140,143.
- ZHU Haiming. Research of the noise reduction of operation deep-bed denitrification filter in Shidongkou wastewater treatment plant [J]. Construction & Design for Project, 2019 (16): 139 - 140, 143 (in Chinese).

作者简介:冯云刚(1982-),男,山东泰安人,硕士,高工,研究方向为市政污水处理。

E-mail:58858173@qq.com

收稿日期:2021-01-03

修回日期:2021-03-08

(编辑:孔红春)