

工程实例

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 20. 015

# 曝气生物滤池多模式运行用于城镇污水厂深度处理

齐亚玲, 狄剑英, 林 甲, 连宝良, 李其宸, 苗雪娜  
(北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044)

**摘 要:** 南方某城镇污水处理厂出水水质从《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准提高至地表水Ⅳ类标准(总氮 $\leq 15$  mg/L),需新建深度处理单元(曝气生物滤池和磁混凝沉淀池),其中曝气生物滤池要求具有同时去除COD、BOD<sub>5</sub>、TN、氨氮的功能。滤池进水可能存在仅氨氮超标、仅总氮超标、氨氮和总氮同时超标等情况,曝气生物滤池单体设计时考虑以上3种工况,每个工况都有相应的进、出水水质要求和工艺设计参数。在传统曝气生物滤池的基础上,对进水分配方式、碳源投加方式、出水回流方式、曝气系统等方面进行了优化改进。在现有二级生物处理单元出水水质不超过滤池设计进水边界条件的情况下,通过运营调整,可实现硝化、反硝化或同步硝化反硝化的多种模式灵活运行,降低了运营风险。

**关键词:** 深度处理; 曝气生物滤池; 多模式运行; 同步硝化反硝化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)20-0085-05

## Application of Biological Aerated Filter with Multi-mode Operation in Advanced Treatment of WWTP

QI Ya-ling, DI Jian-ying, LIN Jia, LIAN Bao-liang, LI Qi-chen, MIAO Xue-na  
(Beijing Capital Eco-pro Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

**Abstract:** The effluent discharge standard of a wastewater treatment plant (WWTP) in southern China had been raised from the first level A criteria in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002) to level IV criteria in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002) (except TN $\leq 15$  mg/L), thus the biological aerated filter (BAF) for removing COD, BOD<sub>5</sub>, TN and ammonia nitrogen, and magnetic coagulation sedimentation tank were built as the new advanced processing units. The three possible influent conditions including only ammonia nitrogen exceeded, only total nitrogen exceeded, both ammonia nitrogen and total nitrogen exceeded are considered in the design of BAF and each design condition has the corresponding influent and effluent quality and process design parameters. Based on the traditional BAF, the influent distribution mode, the carbon source dosage mode, effluent reflux mode and aeration system have been optimized and improved. Through flexible operation, the BAF can realize nitrification only, denitrification only, or simultaneous nitrification and denitrification, under the condition that the effluent quality indexes of the existing secondary biological treatment process do not exceed the design condition of the filter, which reduces the operation risk.

**Key words:** advanced treatment; biological aerated filter; multi-mode operation; simultaneous nitrification and denitrification

曝气生物滤池(BAF)集滤层的截留过滤效能和生物膜的强氧化降解功能于一体,既可以有效去除污水中的悬浮物和有机物,也可以实现硝化、脱氮、除磷以及有害物质的去除<sup>[1]</sup>。BAF可划分为除碳池(C池)、硝化池(N池)、反硝化池(DN池)<sup>[2]</sup>。若要求同时具有除碳、硝化、反硝化功能中的一种或几种,可有针对性地3种池型中选择一种或几种串联组合。在城镇污水处理厂深度处理工段仅建设BAF,通过调整运营模式,可同时实现仅硝化、仅反硝化、同步硝化反硝化等不同功能需求。现以南方某城镇污水厂提标项目为例,介绍多模式BAF的设计及应用情况。

## 1 工程概况

### 1.1 水质、水量

该城镇污水处理厂提标扩建项目设计规模为 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水量变化系数为1.3,占地 $8.35 \text{ hm}^2$ ,已满负荷运行,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。现要求出水提标至地表水Ⅳ类标准( $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$ ),且提标建设期间不停产、不减量、不降标,所有扩建单体需在厂站现有红线内实施。提标扩建工程设计水质和提标前实际运行水质见表1。

表1 提标扩建工程设计水质和提标前实际运行水质

Tab.1 Design influent and effluent quality and actual performance before upgrading and expansion

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
设计进水	280	150	220	40	45	4.5
一级A标准	50	10	10	5	15	0.5
地表水Ⅳ类标准	30	6	10	1.5	15	0.3
提标前实际进水	159~390	68~121	176~500	27.6~40	35.6~46.3	5.8~11.5
提标前实际出水	19~54	1.4~6.0	2.62~8	0.92~3.2	10.5~18.5	0.4~0.7

### 1.2 提标工程设计思路

由表1可知,本次提标工程重难点指标为TP、COD、氨氮、TN。实际进水TP远高于设计值,运行时已投加大量除磷药剂(聚合硫酸铝铁),但现状污水处理厂未设絮凝沉淀工艺段,沉降效果差,同时化学污泥在系统中不断积累,导致生化池pH偏低,严重影响污泥活性。因此提标工程建议新建磁混沉淀池解决TP超标问题。

现实际出水COD和氨氮有20%时段不能达到提标要求。按实际进水水质95%概率浓度校核现状构筑物处理能力:现状好氧池停留时间为8.6 h,污泥负荷为 $0.2 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ,实测好氧池的污泥浓度为 $7700 \text{ mg/L}$ ,受全厂污泥外运时段限制,最高时可达 $10000 \text{ mg/L}$ ,好氧池已无挖潜空间。同时考虑到该厂污水收集地区正进行雨污分流管网改造,未来进水各项指标浓度均会升高,因此提标工程建议新建BAF进一步去除COD和氨氮。

现实际出水TN指标波动较大,主要原因是现状缺氧池搅拌强度不足,可通过更换搅拌器改善缺氧环境。由于进水中含有工业废水,浓度高且不稳定,实际进水TN指标高于设计值,按实际水质校核,现有缺氧池池容不足,停留时间少0.5 h。因此要求新建的BAF具有脱氮功能,作为TN的应急处理单元。提标后的工艺流程如图1所示。

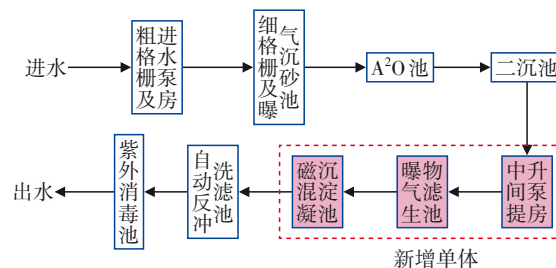


图1 提标扩建工程的污水处理流程

Fig.1 Flow chart of upgrading wastewater treatment process

### 1.3 BAF设计要求

预计在未来运行中,新建的BAF可能面临3种情况:①滤池进水氨氮超过出水标准;②滤池进水TN超过出水标准;③滤池进水氨氮和TN均超过出水标准。设计时按以上3种工况考虑,具体设计边界条件见表2。

表2 3种工况下的BAF设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality of biological aerated filter under three different conditions

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN
工况1:仅硝化	进水	50	10	50	5
	出水	30	6	15	1.5
工况2:仅反硝化	进水	50	10	50	1.5
	出水	30	6	15	1.5
工况3:同步硝化反硝化	进水	50	10	50	3.12
	出水	30	6	15	1.5

2 BAF 设计方案

2.1 基本设计参数

BAF 与中间提升泵房、精细格栅、反冲洗废水池、反洗水池合建。配套建设鼓风机房 1 座,用于放置曝气风机和反洗风机。生物滤池共 12 格,每格滤池尺寸 10 m×8 m×6.8 m,过滤面积 80 m<sup>2</sup>,滤料层厚 3 m,有效水深 6.3 m。采用火山岩生物陶粒滤料,粒径 3~5 mm, $K_{80}=1.1\sim1.6$ 。3 种设计工况下 BAF 的设计参数见表 3。

表 3 3 种设计工况下 BAF 的设计参数

Tab.3 Design parameters of BAF under three design conditions

设计工况	仅硝化	仅反硝化	同步硝化反硝化
运行格数/格	11	6	反硝化 4,硝化 8
回流比/%			30
单格处理水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	11 364	20 833	反硝化:19 792; 硝化:10 417
滤速/(m·h <sup>-1</sup> )	5.92	10.85	反硝化:10.31;硝化:5.43
容积负荷/(kg·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 负荷:0.16	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 负荷:0.32	反硝化 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 负荷:0.59; 硝化 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 负荷:0.11

其中工况 3(同步硝化反硝化):滤池的总进水通过每个滤格对应的分配井的进水堰自由跌落,因为各分配井的堰长相等,可实现总进水均匀分配至所有运行的滤格。总回流液通过反硝化滤格对应的回流井的出水堰自由跌落到配水井,因为回流井的堰长相等,可实现回流液均匀分配至运行的反硝化滤格。反硝化滤格的进水为滤池进水和回流液的混合液,总出水渠为反硝化滤格出水和硝化滤格出水的混合液,混合后污染物浓度均按照加权平均计算,具体设计参数见表 4,校核滤池总出水氨氮为 1.4 mg/L、TN 为 14.62 mg/L。

表 4 滤池同步硝化反硝化设计工况参数

Tab.4 Design parameters of filter with simultaneous nitrification and denitrification

项目	反硝化滤格	硝化滤格
总处理水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	79 167	83 333
单格进水 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	2.35	3.12
单格进水 TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	17.11	19
单格出水 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	2.35	0.5
单格出水 TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	10	19

BAF 需同时考虑 BOD<sub>5</sub> 容积负荷、硝化负荷、反硝化容积负荷和滤速<sup>[2]</sup>,在深度处理过程中进污水

染物浓度很低,按各污染物容积负荷计算得出的过滤面积过小,对滤料冲击大,不宜挂膜。因此滤速成为 BAF 用于深度处理的限制因素。硝化池的滤速建议控制在 6~9 m/h。反硝化滤池内投加碳源后水的黏性增加,建议滤速控制在 10~20 m/h。

2.2 预处理设计

为防止漂浮物、纤维等进入滤池堵塞长柄滤头,进而影响布水、布气的均匀性,要求进入滤池的悬浮物平均粒径<2 mm,因此在滤池前增设栅间隙为 2 mm 的内进流孔板式精细格栅。

2.3 进水池设计

滤池分两排对称布置,单排设计 6 格,两排滤格中间夹着进水池。总进水池分为 2 条,2 条进水池中间夹着每格滤池的分配井和天窗。考虑到下方管廊的采光需求,每 2 个分配井与 1 个天窗井交替布置。第 1~6 格滤格可选择作为前置反硝化滤格,将其对应的分配井分隔出一半空间作为回流井,回流液管道连接在回流井的底部。

具体布置如图 2 所示。

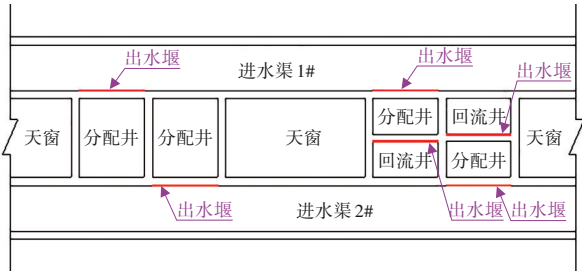


图 2 滤池进水池布置

Fig.2 Layout of intake channel of BAF

2 条进水池的渠道末端均设置闸门。若滤池总进水的 COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、TN 已达到提标要求,则打开闸门,关闭各格滤池的阀门,实现超越滤池。

2.4 曝气系统设计

在深度处理工段,按污染物浓度推算出的所需风量低,但过低的风量会导致滤池气层不稳定,建议按滤池过滤面积考虑曝气量,本项目曝气量按 7 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)设计。

曝气系统有两种设计方案:一种是每格滤池设独立的曝气风机,另一种是中央式集中供气。第一种做法优势是各滤池曝气均匀性容易调整,且可灵活调整曝气量,但是风机台数过多,投资高,占地面积大,能耗为 450~500 W/(m<sup>3</sup>·MPa)。第二种做法的优点是可减少曝气风机台数,投资低,能耗<400



$W/(m^3 \cdot MPa)$ ,但各滤池容易互相串风,难以控制各格的曝气量和曝气均匀性。

为克服中央风机的缺点,在每格滤池的曝气风管上均设置活塞阀和孔板式流量计,活塞阀的特点:

① 流量与开度基本呈线性比例关系,可实现全线性调节;

② 任意开度位置过流面均为环形,抗气蚀能力强。

推荐采用中央集中供气+单格活塞阀控制的曝气方式。

### 2.5 碳源投加设计

设计2种碳源投加方式,可根据运营工况进行灵活选择。

① 在滤池出水回流总管上设静态管道混合器,将碳源投加至管道混合器内。该方式适用于同步硝化和反硝化运行工况,可供选择的反硝化滤格为1~6格。

② 在BAF总进水管的前端设置2个混合搅拌池作为碳源投加池。该方式适用于仅反硝化运行工况,可供选择的运行滤格为1~12格。

### 2.6 水力高程设计

处理水量通过分配井和每格滤池进水管的蝶阀分配至各滤格内,所有滤格进水采用同一高程,进水管至滤池内水头损失主要源于滤池内长柄滤头和滤料,共计约26 kPa,滤格内的水通过出水堰自由跌落至总出水渠,水头损失约3 kPa,总水头损失为29 kPa。

### 2.7 冲洗方式设计

推荐的冲洗方式:降水位→单独气洗→气水联合洗→单独水洗,循环3~5次,时长共计30~45 min,其中水洗总时长约30 min,气洗约20 min。根据《生物滤池法污水处理工程技术规范》(HJ 2014—2012),气洗强度取 $12 \sim 25 L/(m^2 \cdot s)$ ,但通过长期运营发现,因生物膜黏度大,气洗强度不足,反洗不够彻底,因此推荐气洗强度为 $20 L/(m^2 \cdot s)$ ,水洗强度为 $5 L/(m^2 \cdot s)$ 。

气水联合洗时,反冲洗气量和水量同时进入滤池,压力瞬间变化大,建议反洗风机采用容积式风机(如罗茨风机),不宜选择离心类风机(如空气悬浮风机、离心风机等)。

## 3 运行效果及成本分析

### 3.1 多模式运行工况调整

多模式运行工况如下:

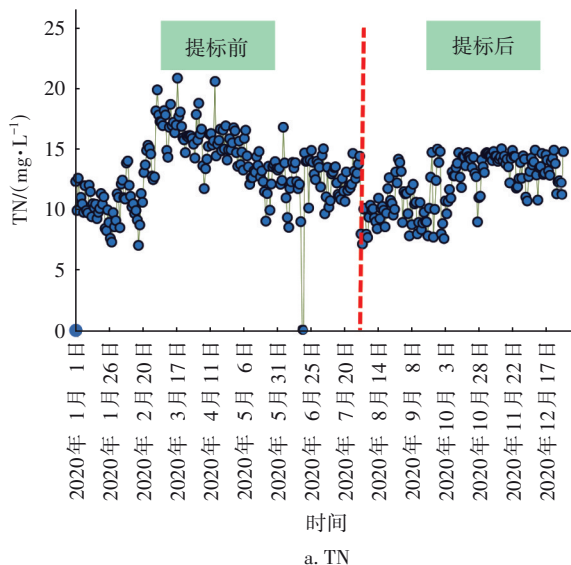
工况1(仅硝化):0~12格可调,打开运行滤格的进水蝶阀和曝气管路。硝化反应需要自养菌,而异养菌繁殖速度较快,在反应过程中会优先利用氧气,抑制自养菌的繁殖。因此有机物降解尽量在二级生物处理段完成,以降低进入滤池的有机物浓度。

工况2(仅反硝化):0~12格可调,关闭所有曝气管路,打开运行滤格的进水蝶阀。碳源投加在滤池进水端。深度处理段碳源不足,需投加碳源促进反硝化菌生长,使其成为优势菌种。通过进、出水DO和COD的变化来判断生物膜的生长状况,若出水DO较进水明显降低,出水COD较进水无明显上升,说明生物膜已有一定作用。

工况3(同步硝化反硝化):反硝化格数0~6格可调;其余可选择作为硝化滤格,回流比调节范围为0~45%。碳源投加在总回流管的静态混合器内。打开运行滤格的进水蝶阀、反硝化滤池的回流管蝶阀,关闭反硝化滤格的曝气管路,打开硝化滤格的曝气管路。

### 3.2 运行效果

该项目于2020年6月完成环保验收,提标后出水TN和氨氮指标均明显下降,如图3所示。目前以反硝化模式作为日常运行的主要模式,若监控发现出水氨氮升高到 $0.8 mg/L$ 以上,且有上升趋势时,则启动BAF的硝化功能。



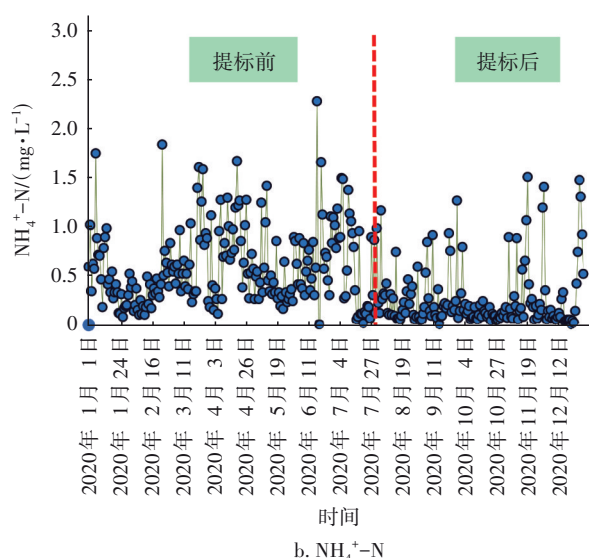


图3 提标前、后出水 $\text{TN}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化

Fig.3 Change of effluent  $\text{TN}$  and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  before and after upgrading

### 3.3 运行成本

该提标工程中的BAF单体投资为5 981万元,折合投资为478元/ $\text{m}^3$ 。单位运行成本中,电耗为0.35  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,电价按0.617元/( $\text{kW}\cdot\text{h}$ )计,电费为0.216元/ $\text{m}^3$ ,碳源费用为0.072元/ $\text{m}^3$ ,总计0.288元/ $\text{m}^3$ 。

### 4 结论

对于城镇污水厂提标扩建工程,应首先分析现状运行情况,优先考虑通过运营优化,深度挖掘现有系统的处理能力。将提标指标进行合理分配,易处理指标放在现有系统,难处理指标由新建深度处理单元解决。同时深度处理单元可作为难控制指

标(如 $\text{TN}$ )的应急处理单元,以降低运行风险。

BAF用于污水处理厂深度处理工段时,对进水分配方式、碳源投加方式、出水回流方式、曝气系统做了调整,使其同时具备去除 $\text{COD}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{TN}$ 、氨氮的功能。根据滤池进水超标污染物指标不同,通过运营模式的切换,可实现仅硝化、仅反硝化、同步硝化和反硝化多模式运行,稳定出水水质,对进水波动冲击适应性更强,有利于降低运营风险。

### 参考文献:

- [1] 张小玲,李强,王靖楠,等. 曝气生物滤池技术研究进展及其工艺改良[J]. 化工进展, 2015, 34(7): 2023-2030.  
ZHANG Xiaoling, LI Qiang, WANG Jingnan, et al. Research progress process improvement of biological aerated filter: a review [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34 (7) : 2023-2030 (in Chinese).
- [2] 王舜和,郭淑琴. 不同功能曝气生物滤池的设计要点[J]. 给水排水, 2008, 34(11): 47-51.  
WANG Shunhe, GUO Shuqin. Design characteristics of biological aerated filters with different functions [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(11): 47-51 (in Chinese).

作者简介:齐亚玲(1982- ),女,重庆人,硕士,高级工程师,主要研究方向为污水处理技术。

E-mail: 156989922@qq.com

收稿日期:2021-02-01

修回日期:2021-02-18

(编辑:衣春敏)

全面推行河长制湖长制,维护河湖健康生命