

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.04.019

# 某污水处理厂提标扩建工艺设计及运行分析

乔晓娟, 王胤, 傅驿凯, 赵志勇, 杨舒茗, 王汇明  
(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610084)

**摘要:** 四川省某污水处理厂处理规模为 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , 2018年实施了提标扩建工程, 处理规模增至 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , 出水水质由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B标准提高至《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)。该厂提标扩建后工艺流程复杂、自动化控制水平低, 两年后反硝化生物滤池、MBR膜池均出现异常, 2021年初采取一系列措施实现了反硝化生物滤池、MBR膜池的正常运行。对该污水处理厂的改造方案、运行参数及恢复措施进行深度剖析, 认为: CN滤池对污水中碳源利用率低; DN滤池出水与A/A/O出水混合后进入MBR膜池处理的工艺方案经济性差; 完善的自控清洗系统对DN滤池、MBR膜池特别重要。

**关键词:** 污水处理厂; MBR膜池; 运行管理

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)04-0113-06

## Process Design and Operation Analysis of the Upgrading and Renovation of a WWTP

QIAO Xiao-juan, WANG Yin, FU Yi-kai, ZHAO Zhi-yong, YANG Shu-ming,  
WANG Hui-ming

(Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610084, China)

**Abstract:** A wastewater treatment plant (WWTP) in Sichuan Province was upgraded and expanded in 2018 to increase the capacity from  $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$  to  $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ . The effluent quality has been improved from the first level B criteria in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002) to the local *Discharge Standard of Water Pollutants in Minjiang and Tuojiang River Basin* (DB 51/2311-2016). The upgraded and expanded WWTP has complex process and low automatic control level. After two years of operation, the denitrifying biofilter and MBR membrane tank are abnormal. In early 2021, a series of measures were taken to realize the normal operation of the denitrifying biofilter and MBR membrane tank. After in-depth analysis of the renovation scheme, operation parameters and restoration measures of the WWTP, it is concluded that CN filter has low utilization rate of carbon source in sewage; the economic efficiency of mixing DN filter effluent with A/A/O effluent into MBR membrane tank is poor. Perfect automatic cleaning system is of great importance to DN filter and MBR membrane tank.

**Key words:** wastewater treatment plant; MBR membrane tank; operation and management

四川省某污水处理厂一期工程于2007年建成 投运, 处理规模为 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , 出水水质执行《城镇污

基金项目: 成都市“揭榜挂帅”科技项目(2023-JB00-0005-SN)

水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B标准。随着《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)的出台,该污水处理厂于2018年实施了提标扩建工程。同时受不停水施工、用地紧张、资金缺乏等因素的影响,提标扩建后的污水处理厂工艺流程复杂、自动化控制水平低。运行2年后该厂出现反硝化生物滤池(DN滤池)堵塞严重、MBR膜池产水能力锐减等问题,2021年初对这两个构筑物进行多次维护清洗后,整个污水处理厂恢复正常运行。

## 1 原一期工程概况

原一期工程设计规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,出水水质执行一级B标准。至2015年,一期工程已投运8年,实际处理水量达满负荷,实际进水水质呈逐年上升趋势,原设计进水TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN指标偏低,具体见表1。

表1 一期工程设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of WWTP phase I

项目	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	BOD <sub>5</sub> / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	SS/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{NH}_3\text{-N}$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	T/ °C
设计进水	≤300	≤200	≤200	≤40	≤30	≤4	12 ~ 25
设计出水	≤60	≤20	≤20	≤20	≤8(15)	≤1.5	

注: 括号内为温度≤12 °C时的指标。

原一期工程施工流程图见图1。

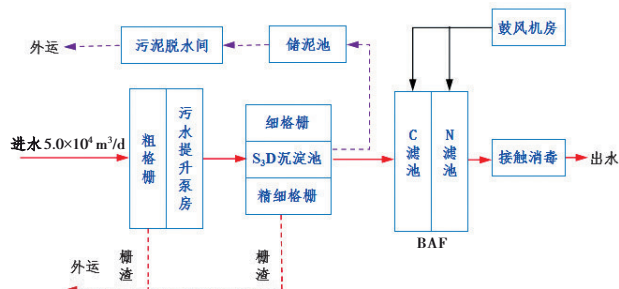


图1 原一期工程施工流程图

Fig.1 Flow chart of the original WWTP phase I process

其中, $\text{S}_3\text{D}$ 沉淀池为曝气沉砂池与斜管沉淀池工艺的组合,但曝气设备已损坏, $\text{S}_3\text{D}$ 沉淀池目前按照普通平流沉砂池与斜管沉淀池组合工艺运行。BAF为CN生物滤池,共设10格,按照 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模配置气、水反冲洗系统。

## 2 提标扩建工程

2018年1月—5月该污水处理厂实施提标扩建工程,处理规模增至 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,根据实际情况提高了进水水质浓度,出水执行DB 51/2311—2016标准,具体指标见表2。

表2 提标扩建工程设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality of the upgrading project

项目	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	BOD <sub>5</sub> / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	SS/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{NH}_3\text{-N}$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	T/ °C
设计进水	≤300	≤200	≤200	≤45	≤35	≤5	12 ~ 25
设计出水	≤30	≤6	≤10	≤10	≤1.5 (2.5)	≤0.3	

注: 括号内为温度≤12 °C时的指标。

受资金、用地及不停水施工等因素的影响,提标扩建工程工艺复杂,具体分析如下:

① 一期工程提标改造。将处理规模由 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 降至 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,增设反硝化生物滤池(DN滤池),出水进入扩建工程深度处理段处理后排放。

② 扩建工程(新建污水处理工程)。新建规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的二级处理工程(粗格栅及提升泵房+细格栅及曝气沉砂池+精细格栅+A/A/O生化池)和 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的深度处理工程(MBR膜池+紫外消毒)。

提标扩建后的工艺流程见图2,DN滤池与BAF共用反冲洗水冲及气冲系统。

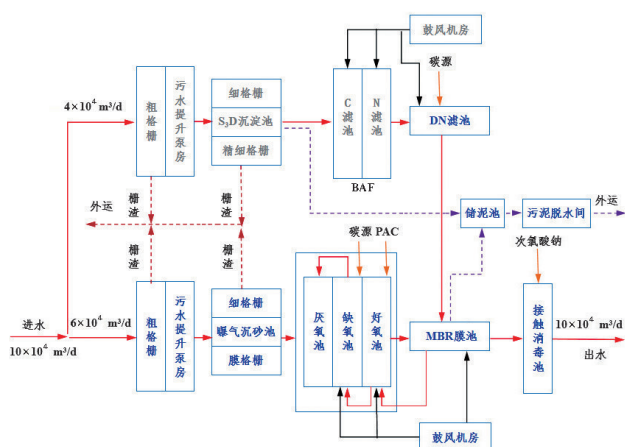


图2 提标扩建后污水处理厂工艺流程

Fig.2 Process flow chart after WWTP upgrading and expansion

3 工艺设计分析

3.1 一期工程改造设计参数复核分析

经复核,预处理各构筑物技术参数完全满足规

范要求,且一期工程BAF前设置的精细格栅与二期膜格栅规格一致,满足膜池运行要求。BAF及DN滤池参数复核见表3。

表3 BAF及DN滤池工艺参数复核

Tab.3 Recheck of process parameters of BAF and DN filter

参数		工程设计取值	旧规范取值范围	是否满足旧规范	新规范取值范围	是否满足新规范
BAF	碳滤池水力负荷/( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	5.94	2~10	是	3~6	否,按新规范计算为6.85
	碳滤池BOD <sub>5</sub> 负荷/( $\text{kgBOD}_5 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ )	2.85	3.0~6.0	是	2.5~6	是,按新规范计算为3.29
	碳滤池需氧量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	3 984	按旧规范计算为3 192	是	按新规范计算为3 683	是
	氮滤池水力负荷/( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	5.94	2~10	是	3~12	是,按新规范计算为6.85
	氮滤池硝化负荷/( $\text{kgNH}_3\text{-N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ )	0.68	0.3~0.8	是	0.6~1.0	是,按新规范计算为0.78
	氮滤池需氧量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	6 744	按旧规范计算为5 010	是	按新规范计算为5 780	是
DN滤池	表面负荷/( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	9.91		是	8~12	是,按新规范计算为11.42
	硝化负荷/( $\text{kgNO}_3\text{-N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ )	1.37	0.8~4	是	1.5~3.0	是,按新规范计算为1.59
	反冲洗系统	与BAF共用	设置	是	设置	是
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N检测仪	未设置		是		是

注: 旧规范指《室外排水设计规范》(GB 50014—2006);新规范指《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),下同。

由表3可知,除碳滤池水力负荷外,其他参数均满足新、旧规范要求。因新、旧规范在碳滤池的水力负荷上有较大的变动,该污水处理厂碳滤池水力负荷不满足新规范要求。DN滤池的设计不合理之处主要有:①未配套设置相关精确加药及自控系统,尤其是未设置NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N检测仪表及流量计,无法实现碳源的精确投加;②DN滤池与一期BAF共用反冲洗水泵、风机,无法实现自动冲洗功能。

DN滤池出水SS、TP达不到DB 51/2311—2016标准,仍需进行深度处理。TP的去除常常通过投加化学除磷剂得以实现<sup>[1]</sup>,因此深度处理的重心在于去除SS。该污水处理厂提标扩建工程将DN滤池出水引入新建污水工程MBR膜池进行处理。

3.2 扩建工程设计参数复核分析

新建预处理构筑物技术参数完全满足规范要求,A/A/O生化池及MBR膜池参数复核见表4。

表4 A/A/O生化池及MBR膜池工艺参数复核

Tab.4 Recheck of process parameters of A/A/O biochemical tank and MBR membrane tank

参数		工程设计值	旧规范取值范围	是否满足旧规范	新规范取值范围	是否满足新规范
A/A/O池	厌氧区HRT/h	1.8	1~2	是	1~2	是,按新规范算得1.56
	缺氧区至厌氧区回流比	1.5	1~2	是	1~2	是
	缺氧区HRT/h	3.73	0.5~3	是	0.5~3	是
	好氧区至缺氧区回流比	3.5	3~5	是	3~5	是
	好氧区HRT/h	7.42		是		是,按新规范计算为6.43
	膜池至好氧区回流比	4:1	(4~6):1	是	(4~6):1	是
MBR膜池	膜通量/( $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	峰值:28;平均:21.53	16~50	是	15~25	否(但满足设备取值范围)
	富余膜组器空位	0	未要求	否	10%~20%	否
	在线化学清洗	未设置	应设置	否	应设置	否
	离线化学清洗	设置,但运行不方便	应设置	否	应设置	否

由表4可知,A/A/O生化池各项参数均满足规范要求,但MBR膜池的部分设计参数不满足规范要求,分析如下:

① 峰值膜通量取值偏大[28 L/( $\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )],但满足《膜生物法污水处理工程技术规范》(HJ 2010—2011)要求,即16~50 L/( $\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ),符合MBR设备厂家

的规定,即 $5\sim 35\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。二期工程在设计、建设时,MBR膜应用于污水处理厂尚属初期阶段,经验不足,但从现阶段的规范[宜为 $15\sim 25\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ]及相关资料来看,峰值膜通量取值偏高。尽管如此,该污水处理厂97.8%的时间段内平均运行规模为 $7.53\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,MBR膜池的实际运行峰值膜通量较低。

② 二期工程MBR膜池未预留空位,但项目设计阶段参考的《膜生物法污水处理工程技术规范》(HJ 2010—2011)未作强制要求。

③ 根据规范,应配置膜在线和离线化学清洗系统,二期MBR膜池未配置在线膜清洗系统,另外虽配置离线化学清洗,但其运行管理不方便。其中未配置在线化学清洗的原因:一是进口MBR膜设备对此没有要求,二是《膜生物法污水处理工程技术规范》(HJ 2010—2011)未作相关强制要求。

#### 4 运行现状及分析

2018年11月该污水处理厂提标扩建工程建设完成,正式进水调试,并于2019年5月调试成功移交运营单位。运行中反硝化滤池(DN滤池)和MBR膜池均出现过异常情况。

##### 4.1 运行异常情况说明

① 一期BAF运行规模无法达到设计值。运行单位反馈实际运行规模为 $(1.5\sim 3.0)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,未达到设计规模。

② DN滤池堵塞严重。DN滤池运行效果较差,底部常被螺类物质堵塞。滤池堵塞后清洗时间长、费用高,常常仅作为过水通道。如2019年6月,DN滤池堵塞严重,直到10月才得到清洗;2020年4月DN滤池再次严重堵塞,2021年1月才得以恢复正常;2021年,DN滤池也常处于堵塞且未发挥反硝化功能的状态。此外,DN滤池正常运行时,相比于新建工程A/A/O生化池碳源投加量偏大。

③ 膜池处理量锐减。2018年11月膜池正式进水调试,2019年5月调试成功并稳定运行。2020年7月,运行单位发现MBR膜系统产水量下降,遂对膜组件进行清洗维护,至9月底(持续约90 d)维护完毕,膜通量恢复正常,但后续运行过程中发现膜通量下降迅速,MBR处理量锐降至 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

2020年10月—2021年1月,运行单位对MBR膜组件进行了2次恢复性清洗,MBR膜池恢复正常。

考虑到膜通量的衰减,该污水处理厂于2021年4月增设规模为 $3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ (采用国产膜并配置完善清洗系统)应急工程。

##### 4.2 运行效果

2021年一期BAF实际运行规模为 $(1.5\sim 3.0)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,90%的时段DN滤池由于堵塞按过水通道运行。2021年4月以后,增设的应急MBR膜池处理量维持在 $(1\sim 2)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

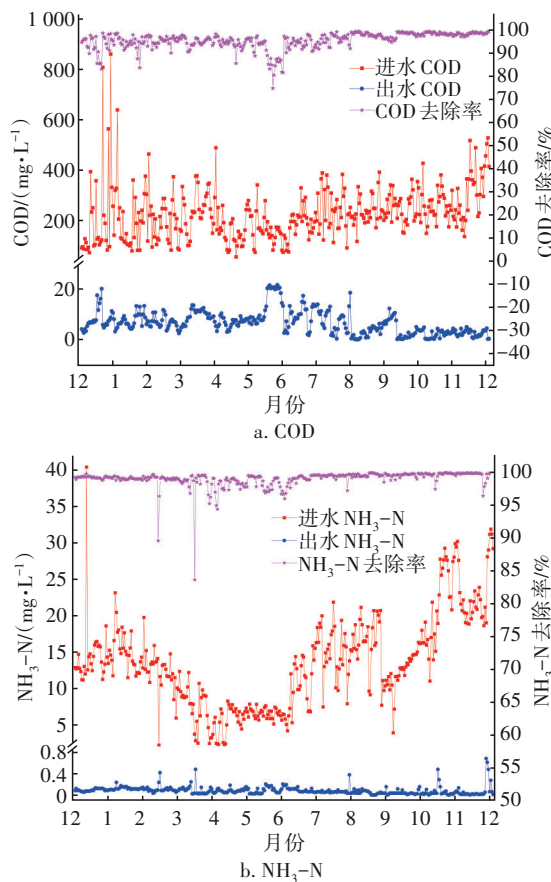
##### 4.2.1 实际制水量

由该污水处理厂2021年1月—12月实测制水量数据可知,制水量最小为 $1.09\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,平均为 $7.53\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,最高为 $10.75\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,97.8%的时段水量 $<10.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

##### 4.2.2 实际进、出水水质

2021年该污水处理厂进、出水水质变化如图3所示。

由图3可知,该污水处理厂全年出水指标满足DB 51/2311—2016标准,出水COD及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标满足地表水Ⅱ类标准的时段分别占96.9%、99.5%,运行效果较好。





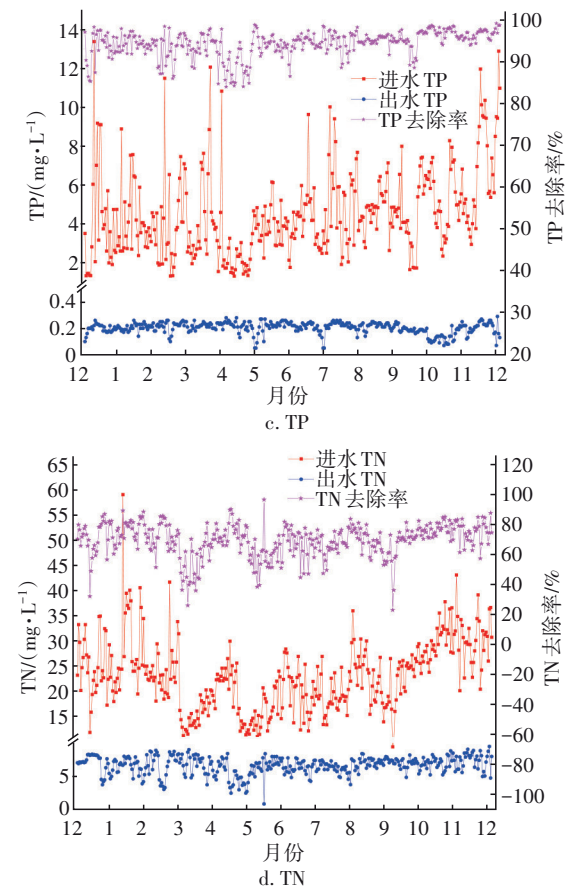


图3 2021年污水处理厂进、出水水质变化  
Fig.3 Change of influent and effluent quality of the WWTP in 2021

4.3 运行实测数据分析

2021年5月,一期BAF实际运行规模为 $(1.5\sim 3.0)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,DN滤池由于堵塞无反硝化作用。

4.3.1 一期工程

一期工程各处理单元的实测水质数据见表5。

表5 一期工程各处理单元实测水质数据  
Tab.5 Water quality measured data of each treatment unit in WWTP phase I

项目	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	TP	TN	SS
外网进水	153.5	29.03		2.94	30.46	152
预处理出水	73.74	22.84	1.76	1.05	24.89	23
BAF	一级出水	22.57	12.37	0.65	18.01	17
	二级出水	13.54	0.46	15.31	0.85	15.17
DN滤池出水	14.17	0.94	13.87	0.95	16.25	12

由表5可知,预处理运行良好,对COD、SS的去除率分别达到85%、52%;BAF对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果明显,此两项出水指标可达到DB 51/2311—2016标准(分别为30、1.5 mg/L);DN滤池进水TN为

15.17 mg/L,出水TN为16.25 mg/L,考虑误差及其他影响,认为DN滤池无去除TN功能,与实际相符。

4.3.2 新建污水工程

新建污水工程各处理单元的实测水质数据见表6。由表6可知,预处理运行良好,对COD、SS的去除率分别达到86%、48%;A/A/O生化池运行良好,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN达到DB 51/2311—2016标准;MBR膜池对SS的去除效果优势明显,出水SS仅为0.45 mg/L。

表6 新建污水工程各处理单元实测水质数据  
Tab.6 Water quality measured data of each treatment unit in new sewage treatment project

项目	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	TP	TN	SS
外网进水	153.5	29.03		2.94	30.46	152
膜格栅进水	79.86	15.08	2.88	2.31	20.26	20
A/A/O进水	79.00	12.81	2.05	2.13	17.82	
A/A/O厌氧区出水	30.29	3.56	3.96	1.77	11.25	
A/A/O缺氧区出水	37.86	3.42	3.97	1.72	9.88	
A/A/O好氧区出水	32.36	0.72	6.45	1.28	9.90	
MBR膜池出水	20.05	0.64	6.40	0.24	9.85	0.45

4.4 讨论与分析

① DN滤池多次堵塞,反洗设计不合理

DN滤池堵塞严重,几乎无脱氮效果。原因在于其反冲洗水泵、风机均采用一期工程BAF的反冲洗水泵、风机,未单独设置,且其反冲洗程序未编入一期PLC控制系统,使得DN滤池的反冲洗频率得不到有效保证。建议污水处理厂改造设计时充分考虑运维管理的方便性及可操作性。

比较表5和表6可知,DN滤池进水、A/A/O生化池缺氧区的COD分别为13.54、37.86 mg/L,其中A/A/O生化池缺氧区包含3.5倍的内回流,在此情况下进一步说明A/A/O缺氧区可利用碳源较多。此外,DN滤池未设置精确加药系统(流量计、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 仪),因此DN滤池正常运行时,相比于A/A/O生化池其碳源投加量偏大,与实际相符。

② 一期DN滤池出水与A/A/O生化池出水混合后进入MBR膜池处理的工艺方案经济性差

一期DN滤池出水SS仅为10~20 mg/L,出水进入新建MBR膜池(MLSS为6 000~8 000 mg/L)后,不仅导致一期工程去除SS的难度大幅增加,而且造成MBR膜池内污泥浓度下降。MBR膜工艺投资高、运维要求高、电耗及运行成本较高<sup>[2]</sup>,因此一期改造

DN滤池出水进入MBR池去除SS的方案经济性差。

一期工程的深度处理可采用MBR膜池,但应单独设置,不可与A/A/O生化池出水混合。

### ③ MBR膜池清洗系统设计不合理

新建工程MBR膜池采用进口转盘式平板膜,该膜技术手册未要求设置在线清洗设备,设计满足要求。但2020年8月起,膜通量下降较多,经分析认为MBR膜池清洗系统设计不合理是导致膜堵塞严重的最主要原因。本次MBR膜池未设置在线清洗系统,且离线清洗操作复杂繁琐,未设置吊装设备、离线清洗空位膜池,MBR膜的维护清洗无法保证。

由MBR组件表层泥清洗后的情形可以看出,大量絮体缠绕在MBR膜组件上,分析认为是MBR膜维护性清洗不到位所致:一方面MBR膜池清洗系统设计不合理,另一方面前端膜格栅的运维管理不到位。由2020年10月第一次恢复性清洗后的MBR膜情形可以看出,膜表面仍附着一层致密物质。

国内的运维管理水平与国外仍有一定差距,因此未来诸如此类的设计应深入考虑进口设备在国内应用可能面临的问题。

### ④ 一期的实际污水处理量偏低

一期BAF对碳源消耗大,为了降低碳源投加量,运营单位通过降低一期处理规模来节省运行费用。此外,BAF抗冲击能力较小,易堵塞<sup>[3]</sup>。据运行单位介绍,当运行规模超过 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,BAF出水水质变差,无法达到一级B标准,可能是BAF水力负荷偏高及其运维管理不到位所致。

### ⑤ 脱氮工艺的选择

随着多地陆续出台严格的地表水准Ⅳ类排放标准,如何保证出水水质尤其是TN稳定达标是各地污水处理厂面临的首要问题<sup>[4]</sup>。生物脱氮目前应用最广泛,选择工艺时应首先选择对原水碳源利用率高的工艺。“BAF+DN滤池”工艺对碳源利用率较低,对于改造类项目,若资金充足、用地条件合适,建议采用能够深度利用原水碳源的工艺。

## 5 建议

案例污水处理厂一期工程DN滤池出水与新建污水工程A/A/O生化池出水混合后一并进入MBR膜池处理,不仅导致一期工程去除SS的难度大幅增加,而且造成MBR膜池内污泥浓度的稀释,经济性差。建议对MBR膜池进行改造,将DN滤池、A/A/O

生化池出水分开进行处理。该污水处理厂DN滤池及MBR膜池的异常均由未合理设置方便的维护清洗系统所致,因此在此类改造项目中,建议设计时充分考虑运维管理的方便性及可操作性。DN滤池应考虑设置独立的反冲洗系统,并配备完善的精确加药系统。MBR膜池应考虑设置吊装、离线清洗空位膜池、药剂配制相关设备及系统。

## 参考文献:

- [1] 苏武,杨学贵,张亚宁,等. MBR工艺市政污水处理厂硫酸亚铁与聚氯化铝辅助除磷运行实践探讨[J]. 给水排水, 2022, 48(S1): 627-632.  
SU Wu, YANG Xuegui, ZHANG Yaning, et al. Operation practice of ferrous fulfate and polyaluminum chloride phosphorus removal in municipal sewage treatment plant with MBR process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(S1): 627-632 (in Chinese).
- [2] 郝晓地,陈峭,李季,等. MBR工艺全球应用现状及趋势分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 7-12.  
HAO Xiaodi, CHEN Qiao, LI Ji, et al. Status and trend of MBR process application in the world [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 7-12 (in Chinese).
- [3] 游卫强,胡斌,陈浩. 曝气生物滤池在污水处理厂运营中的常见问题分析及改造优化[J]. 给水排水, 2020, 46(S1): 422-425.  
YOU Weiqiang, HU Bin, CHEN Hao. Research on the method of technical transformation of BAF in wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(S1): 422-425 (in Chinese).
- [4] 司文曦,李辰,马庆. 污水处理厂强化生物脱氮措施探析[J]. 中国给水排水, 2015, 31(16): 21-25.  
SI Wenxi, LI Chen, MA Qing. Discussion and analysis of enhanced biological denitrification measures in wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(16): 21-25 (in Chinese).

作者简介:乔晓娟(1988-),女,山西孝义人,硕士,高级工程师,主要研究方向为市政污水污染防治理论与技术及市政给水处理技术。

E-mail:894602416@qq.com

收稿日期:2023-01-17

修回日期:2023-02-21

(编辑:衣春敏)