

文康. 某大型曝气生物滤池工艺污水处理厂的提标改造案例分析[J]. 净水技术, 2025, 44(4): 172-181.  
WEN K. Case analysis of upgrading and reconstruction of a large-scale WWTP with biological aerated filter process[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(4): 172-181.

# 某大型曝气生物滤池工艺污水处理厂的提标改造案例分析

文 康\*

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司,上海 200092)

**摘 要** 【目的】 2019 年广东省某污水处理厂的设计规模为 40 万 m<sup>3</sup>/d,要求出水水质由一级 A 标准提升至《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅳ类水标准(总氮、悬浮物质、粪大肠菌群不低于一级 A 标准,化学需氧量、氨氮、五日生化需氧量、总磷质量浓度分别不低于 30.0、1.5、6.0、0.3 mg/L)。【方法】 在分析现有实际运行情况的基础上,指出了配水系统、反冲洗系统、滤池系统的短板,通过调整回流比、减小滤料高度、更新滤头和滤料等方式对现状滤池原位改造,通过新建高效沉淀池和改造预处理系统强化了预处理的处理效率,通过新建反硝化生物滤池和微砂沉淀池保证总氮和悬浮物质的达标。【结果】 改造后工艺可有效地去除水中污染物,出水水质稳定达标。【结论】 提标改造工程在有限用地范围内充分挖掘原有工艺的处理潜能,单位新增用地面积仅为 0.035 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>),具有较好的环境效益和经济效益,为类似污水处理厂提供了曝气生物滤池的系统评估方法、原位挖潜改造途径和极限用地下的脱氮能力提升路线。

**关键词** 污水处理厂(WWTP) 用地紧张 提标改造 曝气生物滤池 预处理 配水系统 反冲洗

中图分类号: TU992 文献标志码: B 文章编号: 1009-0177(2025)04-0172-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.04.021

## Case Analysis of Upgrading and Reconstruction of a Large-Scale WWTP with Biological Aerated Filter Process

WEN Kang\*

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract** [Objective] The design scale of a wastewater treatment plants (WWTP) in Guangdong Province in 2019 is 400 000 m<sup>3</sup>/d, which required the effluent quality to be upgraded from Grade A standard to Class Ⅳ water standard in *Surface Water Environmental Quality Standard* (GB 3838—2002) (total nitrogen, suspended solid and fecal coliform group are not lower than Grade A standard, chemical oxygen demand, ammonia nitrogen, biochemical oxygen demand, and total phosphorus are not lower than 30.0, 1.5, 6.0, and 0.3 mg/L). [Methods] Based on the analysis of the existing actual operation, shortcomings of the water distribution system, backwashing system and filter system are pointed out. The existing filter is reformed in situ by adjusting the reflux ratio, reducing the height of the filter material, updating the filter head and filter material, etc. The treatment efficiency of the pretreatment is strengthened by building a high-efficiency sedimentation tank and reforming the pretreatment system. The standard of total nitrogen and suspended solid is ensured by building a denitrifying biological filter and a micro-sand sedimentation tank. [Results] The modified process can effectively remove the pollutants in the water, and the effluent quality is stable and up to standard. [Conclusion] The upgrading project fully taps the treatment potential of the original process within the limited land area, The new land area per ton of water is 0.035 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>), it has achieved better social and economic benefits. This paper provides a systematic evaluation method of biofilter aerated, a way of in-situ potential excavation and a way of increasing nitrogen removal capacity of underground limit use for similar WWTPs.

**Keywords** wastewater treatment plant(WWTP) land shortage upgrading and reconstruction biological aerated filter(BAF) pretreatment water distribution system backwash

[收稿日期] 2024-01-12

[通信作者] 文康(1993—),男,硕士研究生,注册公用设备工程师(给水排水),主要从事污水处理、水环境治理以及污泥处理方面的研究及设计工作,E-mail:hitwenkang@163.com。

近年来,随着对城市水环境的水质要求更加严格,全国各地的污水处理厂尾水水质要求也不断提高,出水执行类Ⅳ类水标准[即除了总氮(TN)外,其余主要水质指标执行地表Ⅳ类水标准)]也较为普遍。此外,随着各地对城镇污水处理提质增效的重视,由于“清污分流”“挤外水”“污水管网全覆盖、全收集、全处理”等措施的实施,污水处理厂各项污染物浓度逐步提高,现状污水处理设施需结合进水水质波动进一步强化调整。目前,国内约 98% 的污水处理厂以“厌氧/缺氧/好氧(AAO)法”“序批式活性污泥法(SBR)”“氧化沟”为核心处理工艺,通过现状改造为“移动床生物膜反应器(MBBR)<sup>[1]</sup>”“膜生物反应器(MBR)<sup>[2]</sup>”或新增磁混凝高效沉淀池和反硝化深床滤池等深度处理单元实现了出水提标,而根据我国生态环境部公布的《全国投运城镇污水处理设施清单》,国内仍存在约 2% 的污水处理厂以曝气生物滤池工艺(BAF)或其他生物膜工艺为主,提标改造时往往面临滤池构造复杂、系统梳理繁琐、用地拮据<sup>[3]</sup>等不利因素而无从下手,但对大规模 BAF

工艺的提标改造案例分析却鲜有报道。文章以广东省某设计规模为 40 万 m<sup>3</sup>/d 的污水处理厂为例,通过对现状生物滤池系统脱氮能力的评估,提出了氨氮和 TN 提标受限的关键因素,同时全面梳理和解决了滤池系统、配水系统、反冲洗系统等三大系统的现状运行存在问题,调整了回流比、部分滤池滤料高度等工艺参数,并配合改造了预处理设施,新增进一步脱氮和除磷的深度处理单元,实现了在有限用地内充分挖掘原有工艺的处理潜能,为以曝气生物滤池工艺为核心的污水处理厂升级改造提供借鉴和参考。

1 项目概况

1.1 工程背景

广东省某污水处理厂原设计出水水质为《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,要求改造后出水水质除悬浮物质(SS)、TN、粪大肠菌群为一级 A 标准外,其他主要污染指标要求达到地表水Ⅳ标准。

1.2 设计进出水水质

该项目的设计进出水水质如表 1 所示。

表 1 进出水水质(单位:mg/L)  
Tab. 1 Influent and Effluent Quality( Unit: mg/L)

| 项目             | 化学需氧量(COD <sub>Cr</sub> ) | 五日生化需氧量(BOD <sub>5</sub> ) | SS  | 氨氮   | TN | 总磷(TP) |
|----------------|---------------------------|----------------------------|-----|------|----|--------|
| 设计进水水质(2008 年) | 135                       | 60                         | 140 | 22.0 | 28 | 3.7    |
| 设计进水水质(2020 年) | 250                       | 130                        | 150 | 30.0 | 40 | 4.5    |
| 现状设计出水标准       | 50                        | 10                         | 10  | 5.0  | 15 | 0.5    |
| 提标改造设计出水标准     | 30                        | 6                          | 10  | 1.5  | 15 | 0.3    |

注:该厂随着厂外污水系统提质增效工程的实施,设计进水水质在 2020 年后相应提高。

2 现状运行情况分析

2.1 现状处理工艺及实际进出水水质

污水处理厂设计规模为 40 万 m<sup>3</sup>/d,用地面积为 0.04 km<sup>2</sup>,现状采用了以生物滤池为核心的处理工艺具体为原水→粗格栅及提升泵房→中格栅→强化预处理池(曝气沉砂池+隔油池斜管沉淀池)→细格栅→配水井→前置反硝化(DN)生物滤池+碳氧化/硝化(C/N)生物滤池→紫外线消毒槽→达标排放。

该项目现状曝气生物滤池水流示意图如图 1 所示,其中现状生物滤池共 4 座,每座包括 12 格 DN 池和 12 格 C/N 池,DN 池、C/N 池滤料面积相同,前后一对一串联运行。原水和生物滤池反冲洗废水经细格栅及预处理池处理后和回流的硝化液进入 2 座配水井中,经配水井分配至 4 座生物滤池。生物滤池为上向流滤池,每座生物滤池设置 2 根进水总管,

其中每根进水总管管径为 DN1200,分配至 6 组 DN 池,配水依靠管道及电动阀门控制,DN 池出水经管道接入后端对应的 C/N 池。

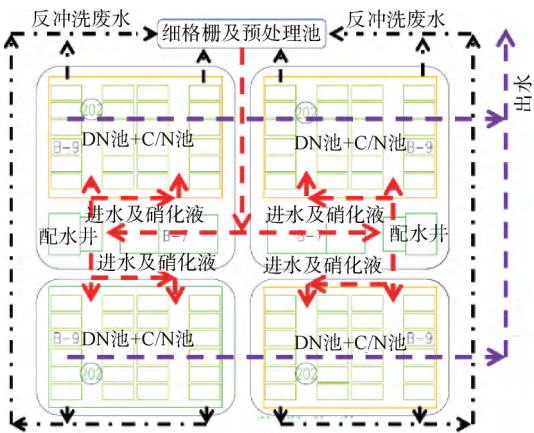


图 1 现状曝气生物滤池水流

Fig. 1 Water Flow of Existing BAF

现状工程运行设计进出水水质及 2016 年—2017 年实际进出水水质分析数据如表 2 所示。

由表 2 可知,现状生物滤池系统进水碳/氮为 1.98 : 1,在目前水质仍偏淡的情况下,出水 BOD<sub>5</sub>、氨氮尚可达到一级 A 标准。随着厂外管网进一步完善,进水污染物浓度逐年增高,进水水质达到本次提标改造设计水质时,进水 TN 和氨氮质量浓度达到 40 mg/L 和 30 mg/L 的设计值时,污水处理厂出水指标特别是 TN 和氨氮达到本次提标水质 15 mg/L 和 1.5 mg/L 的压力将非常大。而现状污水厂用地有限,可用新增用地面积仅为 14 000 m<sup>2</sup>,污水脱氮环

节尽量需在现有构筑物内完成,因此亟须对现状生物滤池进行系统评估,根据复核结果确定提标总体工艺路线。

## 2.2 现状生物滤池系统脱氮能力评估分析

现状生物滤池主要设计参数如表 3 所示。

生物滤池原设计预处理池 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、SS、氨氮、TN、TP 去除率分别为 40%、40%、55%、25%、25%、85%。复核保持预处理池污染物去除率不变,评估改造前实际进出水水质条件下(2016 年—2017 年 90% 保证率对应水质),现状生物滤池系统实际去除效率[硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)的进出水浓度以 TN 近似替代]。

表 2 原工程设计及实际进出水水质汇总(单位:mg/L)

Tab. 2 Summary of Original Engineering Design and Actual Water Quality( Unit: mg/L)

| 项目                           | COD <sub>Cr</sub> | BOD <sub>5</sub> | SS     | TP   | TN    | 氨氮    |
|------------------------------|-------------------|------------------|--------|------|-------|-------|
| 原设计进水水质(2008 年)              | 135               | 60.00            | 140.00 | 3.70 | 28.00 | 22.00 |
| 90% 保证率实测进水水质(2016 年—2017 年) | 192               | 57.53            | 201.85 | 6.23 | 29.10 | 24.04 |
| 本次提标设计进水水质                   | 250               | 130.00           | 150.00 | 4.50 | 40.00 | 30.00 |
| 原设计出水水质                      | 50                | 10               | 10.00  | 0.50 | 15.00 | 5.00  |
| 实测出水水质(2016 年—2017 年)        | 28                | 4.80             | 6.50   | 0.45 | 14.40 | 4.30  |
| 提标设计出水水质                     | 30                | 6.00             | 10.00  | 0.30 | 15.00 | 1.50  |

表 3 现状生物滤池系统主要设计参数

Tab. 3 Main Design Parameters of Existing BAF

| 设计参数                                        | DN 池    | C/N 池   |
|---------------------------------------------|---------|---------|
| 设计流量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )     | 400 000 | 400 000 |
| 总变化系数                                       | 1.3     | 1.3     |
| 高峰水量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )     | 21 667  | 21 667  |
| 反洗废水回流/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )   | 2 500   | 2 500   |
| 硝化液回流/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )    | 16 667  | 16 667  |
| 总回流比(n)                                     | 100%    | 100%    |
| 实际设计高峰流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 43 058  | 43 058  |
| 滤池格数/个                                      | 48      | 48      |
| 单格面积/m <sup>2</sup>                         | 72      | 72      |
| 实际运行高峰滤速/(m·h <sup>-1</sup> )               | 11.82   | 11.82   |
| 实际高峰时强制滤速/(m·h <sup>-1</sup> )              | 12.33   | 12.33   |
| 滤料层厚度/m                                     | 4.0     | 4.5     |
| 滤料体积/m <sup>3</sup>                         | 13 824  | 15 552  |

表 4 现状生物滤池系统容积负荷复核

Tab. 4 Main Design Parameters of Existing BAF

| 项目                                                    | 进水           | TN      | 氨氮      |
|-------------------------------------------------------|--------------|---------|---------|
| 原水质量浓度/<br>(mg·L <sup>-1</sup> )                      | 设计进水(2020 年) | 40      | 30      |
|                                                       | 实际进水         | 29.10   | 24.04   |
| 预处理设计去除率                                              | —            | 25%     | 25%     |
| 生物滤池进水质量浓<br>度/(mg·L <sup>-1</sup> )                  | 设计(2020 年)   | 30.0    | 22.5    |
|                                                       | 实际           | 21.8    | 18.0    |
| 生物滤池出水质量浓<br>度/(mg·L <sup>-1</sup> )                  | 设计(2020 年)   | 15      | 5       |
|                                                       | 实际           | 14.4    | 4.3     |
| 容积负荷/<br>[kg·(m <sup>3</sup> ·d) <sup>-1</sup> ]      | 设计(2020 年)   | 0.868   | 0.579   |
|                                                       | 实际           | 0.632   | 0.464   |
|                                                       | 排水标准规定值      | 0.8~1.2 | 0.4~0.6 |
| 去除污染物容积负<br>荷/[kg·(m <sup>3</sup> ·d) <sup>-1</sup> ] | 设计(2020 年)   | 0.434   | 0.468   |
|                                                       | 实际           | 0.215   | 0.353   |

该工程原水浓度按照 2020 年设计水质选取,进水氨氮和 TN 的浓度高于现状运行的进水浓度,根据表 4 的复核结果,TN 和氨氮的设计容积负荷分别为 0.868 kg/(m<sup>3</sup>·d) 和 0.579 kg/(m<sup>3</sup>·d),《室外

排水设计标准》(GB 50014—2021)规定的反硝化负荷和硝化负荷分别为 0.8~1.2 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(m<sup>3</sup>·d) 和 0.4~0.6 kg 氨氮/(m<sup>3</sup>·d),原设计容积负荷均接近规范的下限和中间值。另外,实际进水浓度低于设计浓度,实际容积负荷低于或接近规范规定的下限。

除此之外,依据设计和实际运行的去除污染物量评估了生物滤池的去除污染物容积负荷,原设计 TN 和氨氮的去除污染物负荷分别为  $0.434\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  和  $0.468\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ,而实际运行情况下,该负荷仅为  $0.215\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  和  $0.353\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

如果仅根据实际运行的容积负荷判断,尚未达到设计容积负荷,生物滤池的处理能力尚有余量,但根据现场运行反馈,目前生物滤池系统已经满负荷运行,生物滤池系统 C/N 池主要设备曝气风机均按照设计值运行,C/N 池污染物去除潜力基本已经充分挖掘,上述实际运行的计算结论基本反映了 C/N 滤池硝化反应的去除污染物极限,现状生物滤池系统的硝化处理效率低于设计值。下面将从生物滤池水力负荷、微生物挂膜量、曝气等方面进行分析 C/N 池硝化性能差的原因。

现状生物滤池 C/N 池和 DN 池实际运行最大滤速均为  $11.82\text{ m/h}$ ,实际强制最大滤速为  $12.33\text{ m/h}$ (2 格 C/N 池或 2 格 DN 滤池反冲洗时)。根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)和《脱氮生物滤池通用技术规范》(GB/T 37528—2019),DN+ C/N 生物滤池中硝化生物滤池的滤速一般为  $3\sim 8\text{ m/h}$ (含回流),单纯硝化曝气生物滤池滤速一般为  $3\sim 12\text{ m/h}$ (含回流),而前置 DN 生物滤池滤速一般为  $8\sim 12\text{ m/h}$ (含回流)。因此,现状生物滤池的 C/N 池的设计水力负荷明显高于规范值<sup>[4]</sup>,硝化过程的微生物菌群为化能自养型微生物,对水力负荷敏感度较高,过大的水力负荷不利于微生物挂膜,且水力负荷高会导致滤池水头损失过大,滤池冲洗频

率高,不利于硝化菌形成优势菌群,这是本项目氨氮去除效率低的主要原因。而且,现状 C/N 滤池滤料挂膜性能较差,微生物量和微生物活性不足,曝气系统均匀度不高,进一步降低了滤池系统运行效果。DN 滤池相对允许水力负荷较高,处理效率取决于滤池滤料性能、硝化液回流比例、反冲洗效果等,同时受 C/N 池的处理效果的直接影响<sup>[5]</sup>。

2.3 现状生物滤池运行方面问题汇总

根据上述复核结论,滤池系统脱氮能力不足,亟需采取相应工艺方案改造。除工艺改造外,本工程结合运行单位的反馈,总结了现有滤池系统运行方面存在的问题,需一并进行必要的改造,以确保出水稳定达标。相关问题概述如下。

(1) 配水系统

现状生物滤池配水井和 DN 滤池出水之间原设计水头为  $2.75\text{ m}$ ,当按 100% 的硝化液  $n$  运行时, DN 生物滤池实际可用水头仅为  $1.84\text{ m}$ ,现场反馈经常发生堵塞甚至冒溢现象,滤池反冲洗频繁,影响挂膜微生物稳定性,未能发挥实际设计能力;基于高程不足,随着滤池的长期使用,硝化液  $n$  不能按设计上限运行,影响反硝化效果。

现状 DN 池和 C/N 池现状为一对一配水,任意单格水池进行反冲洗时,相应另一格水池必须停运,造成滤池的利用效率低,降低了滤池总体脱氮能力。

(2) 滤池系统

根据表 5 的高程复核结果, DN 池实际可用水头仅为  $2\text{ m}$  左右,滤池堵塞风险高,反冲洗频率高。

表 5 现状生物滤池系统原设计高程复核  
Tab. 5 Review of Original Design Elevation of Existing BAF

| 复核工况[ 高峰<br>系数( $K$ ), $n$ ] | 原水水量/<br>( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 反冲洗废水量/<br>( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 硝化液回流量/<br>( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 原设计配水井到 DN 滤池<br>出水总预留水头/ $\text{m}$ | 复核管路过流所<br>需水头损失/ $\text{m}$ | DN 池实际<br>可用水头/ $\text{m}$ |
|------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| $K=1.3, n=40\%$              | 520 000                                     | 60 000                                        | 160 000                                       | 2.75                                 | 0.58                         | 2.17                       |
| $K=1.3, n=60\%$              | 520 000                                     | 60 000                                        | 240 000                                       | 2.75                                 | 0.67                         | 2.08                       |
| $K=1.3, n=100\%$             | 520 000                                     | 60 000                                        | 400 000                                       | 2.75                                 | 0.91                         | 1.84                       |
| $K=1.15, n=40\%$             | 460 000                                     | 60 000                                        | 160 000                                       | 2.75                                 | 0.52                         | 2.23                       |
| $K=1.15, n=60\%$             | 460 000                                     | 60 000                                        | 240 000                                       | 2.75                                 | 0.59                         | 2.16                       |
| $K=1.15, n=100\%$            | 460 000                                     | 60 000                                        | 400 000                                       | 2.75                                 | 0.76                         | 1.99                       |
| $K=1.0, n=40\%$              | 400 000                                     | 60 000                                        | 160 000                                       | 2.75                                 | 0.46                         | 2.29                       |
| $K=1.0, n=60\%$              | 400 000                                     | 60 000                                        | 240 000                                       | 2.75                                 | 0.48                         | 2.24                       |
| $K=1.0, n=80\%$              | 400 000                                     | 60 000                                        | 320 000                                       | 2.75                                 | 0.64                         | 2.11                       |

### (3) 滤池反冲洗系统

① 预处理沉淀池实际运行负荷高,进水 SS、TP 浓度高,预处理效果不佳,频繁堵塞滤池;

② 为确保 TP 达标, DN 池出水经常需补充聚合氯化铝,进一步堵塞滤池;

③ 反冲洗气、水洗强度不够,加剧滤池堵塞;

④ 滤池反冲洗开始阶段需快速降水,冲洗滤头,现有降水管路复杂,管径偏小,降水速度慢,更加加剧堵塞。

## 3 提标改造分析和对策

### 3.1 总体脱氮能力提升路线分析

根据改造前后的进出水水质计算,该工程设计 TN 去除率需由改造前的 46.43% 提高至改造后的 62.5%,氨氮去除率需由改造前的 77.27% 提高至改造后的 95%,本章结合现状滤池系统评估结论分析总体脱氮能力的提升路线。

#### (1) 关于氨氮去除率提升的分析

根据前文所述,对提标后的进出水氨氮进行核算, C/N 池的设计容积负荷需达到  $0.579 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,尚在规范允许范围内,但按 100% 回流时的水力负荷为  $11.82 \text{ m}/\text{h}$ ,相对偏高,对生物挂膜不利,因此需降低  $n$ ,同时将滤池反冲洗废水不再接入生物滤池配水井,另建设施进行单独处理,从而减小 C/N 池水力负荷。此外,需要通过更新滤池现状滤头、滤板、曝气设施等改善滤池运行状态。

#### (2) 关于 TN 去除率提升的分析

随着 C/N 池  $n$  的降低, DN 池的实际回流的确态氮总量也相应减小。因此考虑将滤层厚度由  $4.0 \text{ m}$  减小至  $3.5 \text{ m}$ ,一方面减小了滤池系统自身水头损失,另一方面适当提高实际运行容积负荷。但由于  $n$  和滤池厚度的减小,回流  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的总量和滤池微生物量也相应减小,现状生物滤池的 TN 去除率受限,因此现状生物滤池仅考虑将 TN 质量浓度降至  $20 \sim 25 \text{ mg}/\text{L}$ ,末端需新增反硝化生物滤池等深度处理单元保障 TN 达标。

### 3.2 现状生物滤池改造分析及对策

统筹考虑前节所述滤池脱氮能力评估结论和运行方面问题及对策分析,经详细分析研究后,提出改造对策如下(图 2)。

#### (1) 关于配水问题

针对现有滤池系统 1 对 1 的形式,对现状 DN

滤池至 C/N 滤池的出水管进行改造,每组生物滤池增加两路 DN800 连通干管,将现状 1 对 1 布水调整为 6 对 6 的布水方式,将滤池充分调用,降低闲置率,提高其抗冲击负荷能力。

#### (2) 滤池反冲洗系统

现状预处理沉淀池采用常规斜管沉淀池,实际运行水力负荷较高。现状实际进水 SS 超出设计浓度 30%~40%,沉淀池固体负荷较大,沉淀效果不理想,出水携带大量絮状 SS。虽然生物滤池总出水 SS 效果尚好,但滤床截污量过大,加剧了滤头和滤料的堵塞板结,日积月累逐渐影响了滤床的过水能力。由于滤池进水携带大量悬浮物性有机物加大了滤池的处理负荷,并且滤床易堵塞需频繁反洗影响了生物膜的正常生长,导致滤池出水水质很难进一步提升。因此考虑单独新建反冲洗水处理单元,不再将反冲洗废水回流到现状预处理单元,从而减轻预处理的压力,保证进入反硝化系统的 SS 趋于正常。

目前滤池快速降水系统降水速度慢,为防止滤头堵塞,该工程增加旁路降水管路接至废水池,4 组滤池共设 8 条 DN500 降水管,并对自控系统进行改造,在每次反洗前增加降水水位滤头冲洗工况,定时对滤头进行冲洗,延长布水系统维护周期,可大大改善滤头的冲洗效果,延缓堵塞,使滤池布水系统长期稳定在最佳工况下。

对反冲洗气洗系统进行改造,现有反冲洗罗茨风机风压不足,更换为螺杆风机,新增 2 组反冲洗风机系统,改造后 1 套反冲洗风机系统服务 1 座生物滤池,实现每座滤池独立反冲洗工况,保障反冲洗效果。

#### (3) 滤池系统

##### ① 提高 C/N 滤池硝化能力

4 座生物滤池共计 48 格 C/N 生物滤池,更换高性能滤料(采用球形轻质多孔生物滤料,滤料粒径为  $3 \sim 5 \text{ mm}$ ,比表面积为  $6 \sim 9 \text{ m}^2/\text{g}$ ,滤料高度保持  $4.5 \text{ m}$  不变)、更换滤头(防堵塞长柄滤头,滤杆外径为  $21 \text{ mm}$ ,材质为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)、更换卵石承托层、修复混凝土滤板(厚度为  $100 \text{ mm}$ )、更换曝气设施等。

硝化液  $n$  由原设计 100% 减小至 40%,降低 C/N 滤池的表面负荷。

##### ② DN 滤池配套改造措施

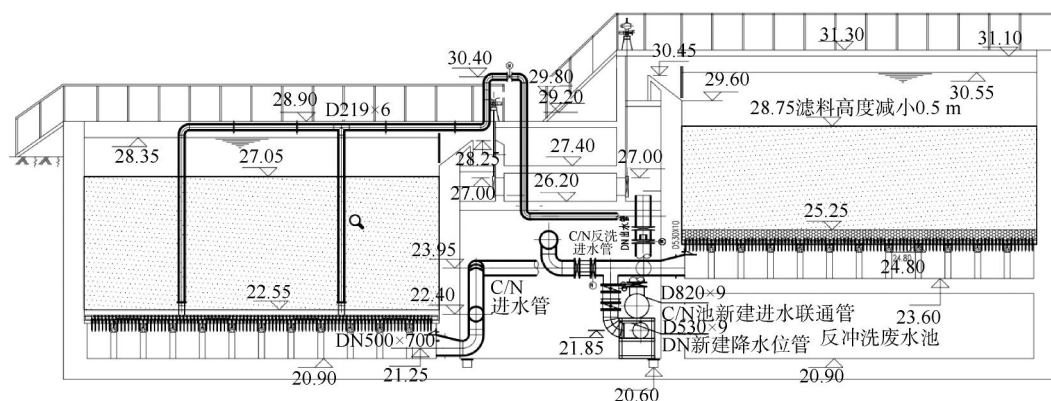
根据对现状水力高程及管路系统的复核计算,

现有生物滤池系统高程不足,该工程建议降低 DN 滤池的滤料高度,由原设计的 4.0 m 降低为 3.5 m,以此来减少滤料层所产生的阻力。由于降低滤床高度会减少现有滤料中的微生物量,因此需采用新型高性能滤料,提高单位体积滤料微生物量,确保脱氮效果。

滤池更换高性能滤料(采用球形多孔生物滤料,滤料粒径为 4~6 mm,比表面积为 6~9 m<sup>2</sup>/g)、更换滤头(防堵塞长柄滤头,滤杆外径为 21 mm,材质为 ABS)、更换卵石承托层、修复混凝土滤板(厚度为 100 mm)。

DN 滤池出水端混凝剂投加点取消,利用后续深度处理去除 SS 和 TP。

经上述改造后,生物滤池中 C/N 滤池的水力负荷均显著降低,相应的去除污染物负荷将大幅提高,硝化液回流比由改造前的 100%降低至 40%,计入反冲洗废水量约为 6 万 m<sup>3</sup>/d,C/N 池和 DN 池的高峰滤速由 11.82 m/h 降低至 8.92 m/h,改造后出水氨氮质量浓度由 4.3 mg/L 降至 1.5 mg/L,相应的由于牺牲了部分反硝化功能,出水 TN 由 14.4 mg/L 升至 20~25 mg/L,后续在深度处理单元需增加反硝化处理单元,确保净化厂出水 TN 达标。



注:图中管径及壁厚单位为 mm,标高单位为 m。

图2 现状滤池改造

Fig. 2 Existing Filter Tank Reconstruction

### 3.3 现状预处理改造分析及对策

该项目现状预处理单元整合了细格栅、曝气沉砂池、隔油池、斜管沉淀池,预处理单元用于去除进水垃圾、砂、浮渣、浮油、SS、TP。

提标对现状预处理池进行复核,现状预处理池斜管沉淀区高峰表面负荷为 9 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),该设计值为排水规范要求的上限值[规范一般要求在 3~9 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)],且后续现状生物滤池的反冲洗废水(6~7 万 m<sup>3</sup>/d)同样需进入预处理池进行处理,则斜管沉淀池实际高峰负荷可达 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)。过高的水力负荷对预处理池的运行非常不利。

此外,该项目进水 TP 和 SS 主要通过预处理斜管沉淀池加药沉淀去除,由于实际进水 SS 和 TP 的浓度逐渐提高并超过设计水质,相应地大幅提高了加药量,增加了斜管沉淀池固体负荷,进一步限制了预处理池的处理效率。为此,提标改造为提高预处理效率,拟采用如下措施对预处理池进行改造。

(1)新建磁混凝高效沉淀池以单独处理滤池反冲洗废水和一部分现状预处理池进水,从而降低斜管沉淀池处理水量及固体负荷,其中磁混凝高效沉淀池设计规模为 15 万 m<sup>3</sup>/d,包括现状滤池反冲洗废水规模为 6 万~7 万 m<sup>3</sup>/d 和现状预处理池规模为 8 万 m<sup>3</sup>/d,共设 2 组,单组沉淀池直径为 14 m,表面负荷为 17.8 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h);其中混合池 1 格,停留时间为 1.15 min;混凝池 2 格,停留时间为 1.7 min;絮凝池 2 格,停留时间为 2.3 min。

(2)优化运行更换部分老化斜管,斜管长 = 1.5 m,间距 = 80 mm,厚度 ≥ 1.5 mm,角度 = 60°增设斜管冲洗风机,2 用 1 备,单台风机规模为:流量(Q) = 290 m<sup>3</sup>/h,扬程(H) = 5 m,功率(P) = 7.5 kW。

(3)更换运行效果差的 3 台阶梯格栅为网板格栅,更换曝气沉砂池老化曝气管路。

(4)现有初沉污泥泵为干式安装离心泵,现状 H 为 5 m 且易堵塞,全部更换为防堵效果好的泥泵,水泵 H 提高至 10 m,同时改造部分污泥输送管道。

(5)增设聚丙烯酰胺投加系统,确保 TP 达标。

### 3.4 新建深度处理单元

提标改造工程在深度处理单元除确保 TN 达标外,需考虑处理设施以去除 SS 和 TP,从而取消现状滤池的铁盐投加点,避免滤头堵塞及滤料板结。新建深度处理单元包括新建中间提升泵房及反硝化生物滤池、新建微砂沉淀池、新建深度处理高效沉淀池及新建紫外消毒渠等。

#### 3.4.1 新建中间提升泵房

新建中间提升泵房规模为 40 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,该工程受用地制约,限制 20 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的污水进入滤池处理,剩余 20 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的污水超越后共同进入微砂沉淀池。部分污水进入反硝化系统的设计,不仅有利于提高反硝化效率,还可根据硝酸盐去除量来调节需提升的水量,有利于降低提升能耗。

泵房内设潜水轴流泵共 7 台。

(1)提升至反硝化生物滤池共 4 台,包含大泵和小泵各 2 台。其中大泵单泵规模: $Q=1\,650\text{ L/s}$ , $H=9.7\text{ m}$ ,常规工况为 1 用 1 备,高峰时两用。小泵单泵规模: $Q=825\text{ L/s}$ , $H=9.7\text{ m}$ ,2 用。

(2)超越泵 3 台: $Q=1\,650\text{ L/s}$ , $H=6.6\text{ m}$ ,常规工况为 2 用 1 备,可实现部分超越,全厂超越工况时 3 台全开。

#### 3.4.2 新建反硝化生物滤池

新建上向流反硝化生物滤池规模为 20 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,高峰  $Q$  为 26 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,进水 TN 质量浓度为 20~25  $\text{mg/L}$ ,处理至 5~10  $\text{mg/L}$  左右再与旁通的 20 万  $\text{m}^3/\text{d}$  混合,保证出水 TN 为 15  $\text{mg/L}$ 。滤池总计 10 格,单格尺寸为 13.81  $\text{m}\times 6.1\text{ m}$ ,滤料高度为 4  $\text{m}$ ,平均滤速为 9.89  $\text{m/h}$ ,容积负荷为 0.59~1.18  $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

#### 3.4.3 新建微砂沉淀池

新建微砂沉淀池可实现混凝、絮凝和沉淀处理<sup>[6]</sup>,进水接自反硝化生物滤池和现状曝气生物滤池的,进一步去除  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、SS、TP 等污染物,微砂沉淀池规模为 40 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,高峰  $Q$  为 52 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,进水 TP 为 2.0  $\text{mg/L}$ ,出水 TP 为 0.3  $\text{mg/L}$ ,沉淀池共 4 格,单格尺寸为 13.5  $\text{m}\times 13.5\text{ m}$ ,上升流速为 41.8  $\text{m/h}$ ,混凝池共 4 格,停留时间为 1.5  $\text{min}$ ,絮凝池 4 格,停留时间为 4  $\text{min}$ ,污泥排放量为 19 200  $\text{m}^3/\text{d}$ ,污泥排至深度处理浓缩池进行处理。

#### 3.4.4 新建深度处理浓缩池

新建的反硝化生物滤池的反冲洗废水(6 615  $\text{m}^3/\text{d}$ )和微砂沉淀池的排放污泥(19 200  $\text{m}^3/\text{d}$ )混合后进入新建的深度处理浓缩池,日处理水量为 2.58 万  $\text{m}^3$ 。

混凝池:2 格,停留时间为 2.12  $\text{min}$ ,单格池容为 19  $\text{m}^3$ ;

絮凝池:2 格,停留时间为 14.28  $\text{min}$ ,单格池容为 128  $\text{m}^3$ ;

沉淀池:2 格,直径为 9  $\text{m}$ ,有效沉淀面积为 33.1  $\text{m}^2$ ,上升流速为 16.2  $\text{m/h}$ ;

### 3.5 改造后总体工艺流程

该工程经过上述改造后整体工艺流程如图 3 所示。

## 4 运行效果

该工程 2019 年 12 月正式通水,2020 年试运行并通过环保验收,以下为 2023 年的运行水质数据情况,在进水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、氨氮、TN、TP、SS、 $\text{BOD}_5$  平均质量浓度分别为 153.58、20.56、25.76、3.51、170.09、70.62  $\text{mg/L}$  的情况下,出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、氨氮、TN、TP、SS、 $\text{BOD}_5$  平均质量浓度分别为 15.79、0.51、11.94、0.19、1.86、4.14  $\text{mg/L}$ 。由图 4 可知,实际进水 TN 和氨氮已接近设计进水水质,而  $\text{BOD}_5$  随着管网提质增效的实施逐步增高,但依然低于 100  $\text{mg/L}$ 。此外本工程经提标改造后各项水质均实现了稳定达标。其中对现状滤池改造前后的水质进行检测,C/N 生物滤池出水氨氮质量浓度平均由 4.0  $\text{mg/L}$  降低至 0.56  $\text{mg/L}$ ,DN 生物滤池由于牺牲了部分反硝化功能,出水 TN 由 14.4  $\text{mg/L}$  升至约 20  $\text{mg/L}$ 。

## 5 结论

(1)文章主要基于广东省以曝气生物滤池工艺为核心的某污水处理厂,通过提标改造工程实现了在进水水质浓度不断升高的不利因素下,出水标准从一级 A 提高至准 IV 类。污水厂设计规模为 40 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,改造后的工艺路线为“原水→粗格栅及提升泵房→中格栅→强化预处理池(曝气沉砂池+隔油池斜管沉淀池)→细格栅→配水井→前置反硝化(DN 滤池)+碳氧化/硝化(C/N 滤池)→中间提升泵房及反硝化生物滤池→微砂沉淀池→紫外线消毒槽→达标排放”,根据实际运行数据判断,该工艺是稳定有效的。

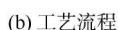


Fig. 3 General Layout and Process Flow after Reconstruction

(3)改造后,吨水工程费用为1 062元,吨水运行成本由0.62元/d增加至0.8元/d,主要增加部分为药剂费用和电费,其中药剂增加主要是进水碳

(4) 现状使用年限较长的生物滤池改造是系统工程,需从配水系统、反冲洗系统、滤池系统多点分析,同步改造,不仅需注重滤料、滤头、滤板及承托层等的“硬件更新”,还需关注水力负荷、预留水头、硝化液回流比等参数配置宜在合理范围内,建议必要时可适当减少滤层高度,既充分发挥滤床的容积负荷余量,又可以避免因水头损失大造成反冲洗频繁等不利情况。

(5) C/N 滤池和 DN 滤池由于生物种类不同,

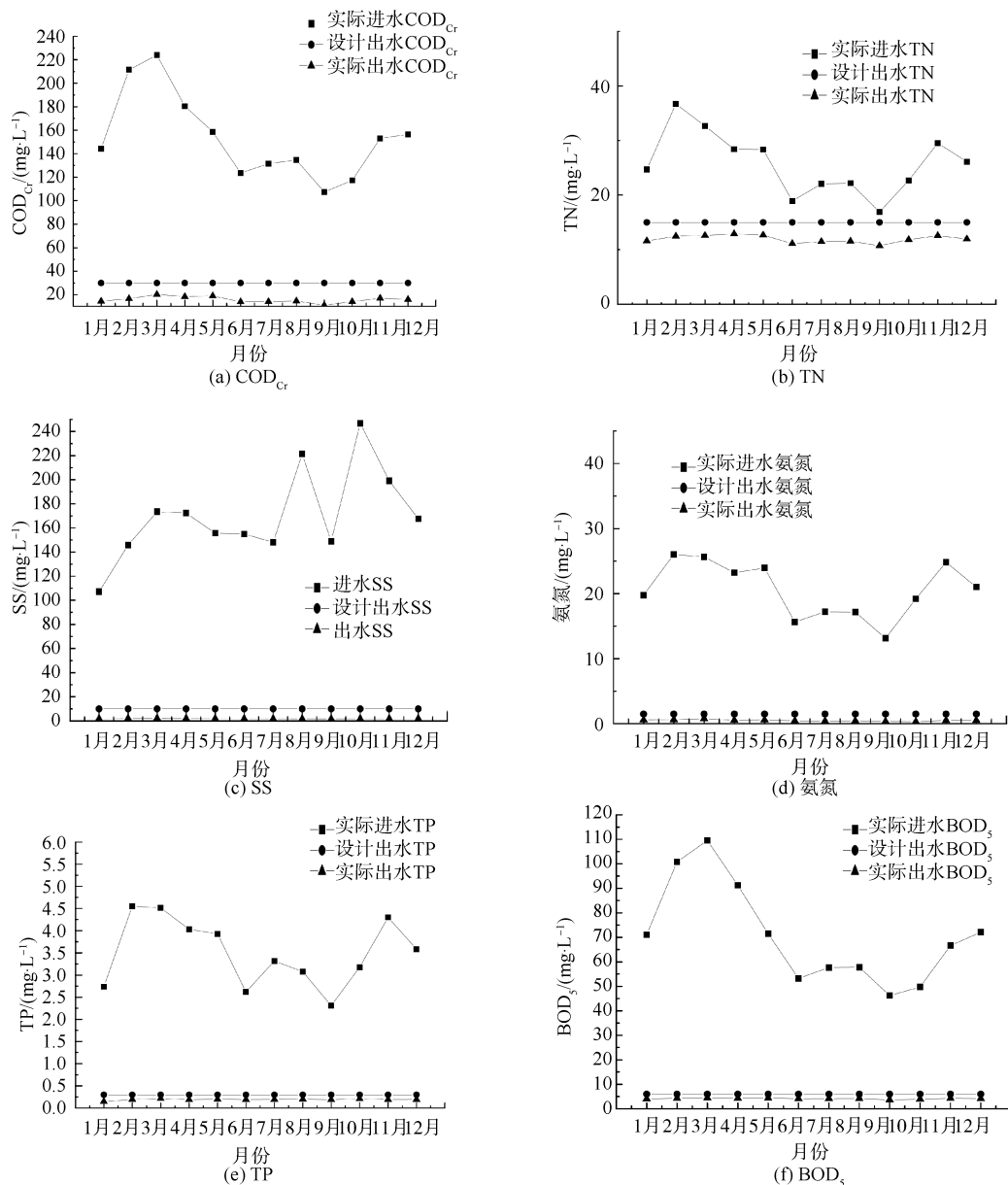


图 4 2023 年进出水水质曲线

Fig. 4 Water Quality Curve for Influent and Effluent in 2023

容积负荷和水力负荷要求也不同,建议类似工程在设计时不必强求前后串联的 DN 池和 C/N 池数量和面积完全一致,而应考虑各自的特点进行参数设计,此外串联系统在设计之初宜采用多对多的方式,避免因反冲洗时个别滤池闲置。

(6)深度处理采用上向流反硝化生物滤池,相比常规下向流的反硝化深床滤池具有更高的水力负荷和容积负荷,结合“部分进水+部分超越混合达标”的思路可减小深度处理滤池总设计规模,在有限的用地内实现 TN 达标。

## 参考文献

- [1] 杨平, 徐康康, 周家中, 等. MBBR+磁混凝用于 A<sup>2</sup>/O 微曝氧化沟污水厂提标扩容[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 67-74.  
YANG P, XU K K, ZHOU J Z, et al. MBBR + magnetic coagulation for upgrading and expanding the capacity of A<sup>2</sup>/O micro aeration oxidation ditch wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 67-74.
- [2] 鲍任兵, 马民, 徐健, 等. AAO 及改良型工艺耦合 MBR 工艺应用研究综述 [J]. 净水技术, 2022, 41(3): 26-31, 62.  
BAO R B, MA M, XU J, et al. Technological research overview

- on AAO and modified process coupled with MBR [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 26-31, 62.
- [ 3 ] 林胜. 曝气生物滤池在高标准污水处理厂提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(7): 153-159.
- LIN S. Application of biological aeration filter in high standard WWTP upgrading and reconstruction [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(7): 153-159.
- [ 4 ] 余琴芳, 余太平, 杜敬, 等. 污水处理反硝化滤池的应用综述[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 35-41, 106.
- YU Q F, YU T P, DU J, et al. Application review on denitrification filter in wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2021, 40(6): 35-41, 106.
- [ 5 ] 齐亚玲, 狄剑英, 林甲, 等. 曝气生物滤池多模式运行用于城镇污水厂深度处理[J]. 中国给水排水, 2022, 38(20): 85-89.
- QI Y L, DI J Y, LIN J, et al. Application of biological aerated filter with multi-mode operation in advanced treatment of WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(20): 85-89.
- [ 6 ] 马超, 杨海燕. 微砂沉淀工艺处理河道直排生活污水的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(7): 121-124.
- MA C, YANG H Y. Application of micro-sand sedimentation technology in treatment of domestic sewage discharged directly into river [J]. China Water & Wastewater, 2019, 38(7): 121-124.
- (上接第 171 页)
- [ 4 ] 柯艳春, 李晓琳, 刘豹, 等. MABR 技术在污水处理中的应用及研究进展[J]. 工业水处理, 2022, 42(11): 18-24.
- KE Y C, LI X L, LIU B, et al. Application and research progress of MABR technology in wastewater treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(11): 18-24.
- [ 5 ] 徐波, 周正兵, 甘雁飞, 等. 不同填料曝气生物滤池处理生活污水效能研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(6): 126-129, 140.
- XU B, ZHOU Z B, GAN Y F, et al. Study on the treatment efficiency of domestic wastewater by biological aerated filter with different fillers [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(6): 126-129, 140.
- [ 6 ] 赵会芳, 何国钢, 钟翔, 等. 农村污水一体化设备工艺研究新进展[J]. 农业与技术, 2022, 42(1): 61-64.
- ZHAO H F, HE G G, ZHONG X, et al. New progress in research on rural sewage integrated equipment technology [J]. Agricultural and Technology, 2022, 42(1): 61-64.
- [ 7 ] SHENG X L, QIU S K, XU F, et al. Management of rural domestic wastewater in a city of Yangtze delta region: Performance and remaining challenges [J]. Bioresource Technology Reports, 2020, 11: 100507. DOI: 10.1016/j.biteb.2020.100507.
- [ 8 ] 李社锋, 张家琛, 冯巍, 等. 膜生物反应器研究新进展与应用[J]. 环境工程, 2024, 42(1): 37-46.
- LI S F, ZHANG J C, FENG W, et al. Overview and research progress of membrane bioreactor process [J]. Environmental Engineering, 2024, 42(1): 37-46.
- [ 9 ] 赖竹林, 周雪飞. 移动床生物膜反应器(MBBR)的研究现状及进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(10): 7-11.
- LAI Z L, ZHOU X F. Research status and progress of moving bed biofilm reactor (MBBR) [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(10): 7-11.
- [ 10 ] 陶光辉, 吴艳华, 叶克, 等. 南方地区 9 座污水厂提标工艺、造价和运营成本后评估[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 196-205.
- TAO G H, WU Y H, YE K, et al. Post evaluation of upgrading process, construction cost and operation cost of 9 WWTPs in southern area [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 196-205.
- [ 11 ] 沈浩, 杨忠启, 汪凡, 等. MBBR+磁混凝沉淀工艺用于用地受限污水厂改造[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8): 112-119.
- SHEN H, YANG Z Q, WANG F, et al. Application of MBBR and magnetic coagulation precipitation process in retrofitting of a WWTP with limited construction land [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 112-119.
- [ 12 ] 刘妍, 滕一杰, 周家中, 等. 纯膜 MBBR 用于南方某大型水质净化厂改造效果分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 1-8.
- LIU Y, TENG Y J, ZHOU J Z, et al. Operation effect of pure MBBR process used in a large-scale water purification plant in south China [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(1): 1-8.
- [ 13 ] 王毅, 井添祺, 周家中, 等. 盐城市某原水预处理厂设计与运行分析[J]. 净水技术, 2020, 39(7): 24-29, 34.
- WANG Y, JING T Q, ZHOU J Z, et al. Analysis of design and operation for a raw water pretreatment plant in Yancheng City [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(7): 24-29, 34.
- [ 14 ] 周家中, 吴迪, 郑临奥. 纯膜 MBBR 工艺在国内外的工程应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 37-47.
- ZHOU J Z, WU D, ZHENG L A. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 37-47.
- [ 15 ] 周家中, 韩文杰, 吴迪, 等. MBBR 工艺应用于市政污水处理的系列解决方案探讨[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12): 1-12.
- ZHOU J Z, HAN W J, WU D, et al. Discussion on series solutions of MBBR Process applied to municipal sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 1-12.
- [ 16 ] 张淳, 徐东耀, 康赛, 等. 磁混凝预处理小城镇混合污水的效能与混凝机制研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(7): 268-278.
- ZHANG C, XU D Y, KANG S, et al. The application and coagulation mechanism of magnetic coagulation in treating mixed sewage from small towns [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(7): 268-278.
- [ 17 ] 祝年俊, 贺阳, 孙政, 等. AAO-MBR 工艺用于村镇污水处理厂提标改造[J]. 水处理技术, 2022, 48(12): 140-144.
- ZHU N J, HE Y, SUN Z, et al. AAO-MBR process for upgrading and reconstruction in series rural wastewater treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(12): 140-144.