



# 自养型反硝化+臭氧催化氧化应用于污水厂 准Ⅳ类出水提标改造

高宗仁, 张开海

(山东省城建设计院, 山东济南 250021)

**[摘要]** 潍坊某污水处理厂规模为  $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 原出水水质执行一级 A 排放标准。通过提标改造将污水厂出水水质提高到准Ⅳ类水质, 针对该厂进水工业废水比例较高、TN 浓度较高和有机污染物难降解等特点, 将现有生化系统卡鲁赛尔氧化沟工艺改造为 Bardenpho 工艺, 同时将表面曝气改造为微孔曝气, 强化脱氮的同时降低电耗; 深度处理系统增加自养型反硝化深床滤池进一步脱氮, 增设臭氧催化氧化池去除难降解有机污染物。提标改造工程中选用的工艺和设备注重节约能耗和药耗, 减少运行成本。项目改造后运行稳定良好, 出水水质完全达到了地方要求的准Ⅳ类水质标准。

**[关键词]** Bardenpho 工艺; 自养型反硝化深床过滤; 臭氧催化氧化; 氧化沟改造; 准Ⅳ类出水标准

**[中图分类号]** X703      **[文献标识码]** B      **[文章编号]** 1005-829X(2022)09-0190-06

## Application of autotrophic denitrification+ozone catalytic oxidation in quasi class IV effluent standard extraction of sewage plant

GAO Zongren, ZHANG Kaihai

(Shandong Urban Construction Design Institute, Ji'nan 250021, China)

**Abstract:** The scale of a sewage treatment plant in Weifang is  $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , and the original effluent quality comply with class I a discharge standard. The effluent quality will be improved to quasi class IV water quality in the upgrading and reconstruction project. According to the plant characteristics of high proportion of influent industrial wastewater, high influent TN concentration and difficult degradation of organic pollutants, the existing biochemical system Carrousel oxidation ditch process was transformed into bardenpho process, and the surface aeration will be transformed into microporous aeration to strengthen nitrogen removal and reduce power consumption. In the advanced treatment system, autotrophic denitrification deep bed filter was added for further nitrogen removal, and ozone catalytic oxidation tank was added to remove refractory organic pollutants. The process and equipment selected in the bid upgrading and reconstruction project paid attention to saving energy and drug consumption and reducing operation cost. After the reconstruction, the project run stably, and the effluent quality fully met the quasi class IV water quality standard required by the local government.

**Key words:** Bardenpho process; autotrophic denitrification deep bed filtration; ozone catalytic oxidation; oxidation ditch reconstruction; quasi class IV effluent standard

山东省潍坊市某污水处理厂原出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。2019 年 6 月 24 日, 潍坊市城市管理委员会办公室印发了《关于做好城市污水处理厂出水水质提升工作的通知》, 该文件明确指出: “污水厂进行提标改造后出水(COD、氨氮、总磷)提升至地表水

Ⅳ类标准, 总氮提升至  $12 \text{ mg/L}$ , 其他指标执行一级 A 标准”。

近年来, 为了应对水环境污染问题, 北京、天津、河南、河北、浙江和山东等地编制了地方水污染物排放标准, 出水的部分指标严于一级 A 标准。污水厂提标改造中应用较多的包括强化二级生物脱氮除

磷、高效沉淀、反硝化深床过滤、Fenton氧化、臭氧氧化和活性炭吸附等工艺。河南省浉池县污水厂(处理规模3万 m<sup>3</sup>/d)针对氨氮和总氮进水指标高、出水指标严格的特点,在提标改造工程中采用了 Bardenpho+高效沉淀池+生物滤池(DN+CN)工艺,总投资约4 000万元,运行成本增加了0.61元/m<sup>3</sup>。山东省昌乐县某污水厂提标改造采用了臭氧催化氧化+活性炭过滤工艺,规模3万 m<sup>3</sup>/d,总投资约4 500万元,运行成本增加了1.2元/m<sup>3</sup>。浙江金华某污水处理厂规模为5万 m<sup>3</sup>/d,提标工程采用了反硝化深床过滤+臭氧催化氧化工艺。根据不同水质特点采用的不同工艺能够保障出水达标排放,但运行中也存在一些问题,包括运行成本较高、管理较为复杂等<sup>[1]</sup>。

参考国内多座污水厂的经验,分析潍坊某污水

厂水质特性和现状运行情况,提标改造采用了自氧型反硝化深床过滤+臭氧催化氧化的方案,同时把现有卡鲁赛尔氧化沟改造为 Bardenpho池、设计中对于行业内臭氧氧化、反硝化过滤等存在的问题进行了调整优化。

1 原污水厂处理工艺分析

1.1 原污水厂处理工艺

该污水处理厂于2007年投产运行,规模为6万 m<sup>3</sup>/d,进水工业废水比例达到70%以上,主要以印染、石油工业为主,采用的工艺为“预处理+水解酸化+卡鲁赛尔氧化沟(A<sup>2</sup>O)+二沉池+高效沉淀+纤维转盘过滤+次氯酸钠消毒”工艺,原出水执行一级A标准。改造前一年实际进、出水水质与设计水质分析见表1。

表1 改造前实际进、出水水质与设计水质

| Table 1 Actual inlet and outlet water quality and design water quality before transformation |     |     |      |     |    |                    |      |       |       |      | mg/L |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|-----|----|--------------------|------|-------|-------|------|------|
| 项目                                                                                           | 保证率 | COD |      | SS  |    | NH <sub>3</sub> -N |      | TN    |       | TP   |      |
|                                                                                              |     | 进水  | 出水   | 进水  | 出水 | 进水                 | 出水   | 进水    | 出水    | 进水   | 出水   |
| 改造前实际进、出水水质                                                                                  | 80% | 446 | 44.3 | 140 | 9  | 36.9               | 0.28 | 61.77 | 13.46 | 2.54 | 0.21 |
|                                                                                              | 85% | 483 | 46.8 | 150 | 9  | 38.4               | 0.42 | 65.66 | 14.16 | 2.63 | 0.24 |
|                                                                                              | 90% | 530 | 48.1 | 168 | 9  | 39.5               | 0.56 | 68.09 | 15.56 | 2.74 | 0.26 |
|                                                                                              | 95% | 620 | 49.1 | 210 | 10 | 41.6               | 0.84 | 81.46 | 17.89 | 2.93 | 0.31 |
| 设计水质                                                                                         |     | 450 | 50   | 180 | 10 | 35                 | 5(8) | 45    | 15    | 4    | 0.5  |

污水厂已经满负荷运转,实际进水COD超过设计标准的概率为19.7%,SS超过设计标准的概率为7.7%,实际进水TN超过设计标准的概率为65.3%,实际进水NH<sub>3</sub>-N超过设计标准的概率为30.1%,实际进水TP基本小于进水水质。经过多次改造,除了TN在冬季进水较高时出水超标外,出水其他指标能够达到一级A标准。

1.2 存在问题分析

(1)污水厂受到进水水质冲击负荷较大,给运行管理带来了一定的影响。

(2)由于进水工业废水比例较大,出水中COD大部分为难降解有机物,现有工艺很难将出水COD降低至40 mg/L以下。冬季时由于气温较低,反硝化效果明显降低,为了确保出水TN的达标,碳源投加量大大增加,运行成本增加较多。

(3)原污水厂二级生化池采用了卡鲁赛尔氧化沟池型,设置了8台功率为132 kW的倒伞型表曝机和16台推流器,NH<sub>3</sub>-N的去除效果较好,但脱除TN

的能力有限,运行中最大的问题是能耗较高。

2 提标改造工艺方案及设计

2.1 提标改造工艺方案选择

提标改造后污水处理厂出水提升至地表水准Ⅳ类标准,改造工程设计出水水质见表2。

表2 提标改造工程设计出水水质

| Table 2 Design effluent quality of upgrading and reconstruction project |                               |                              |                                    |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 水质指标                                                                    | 总进水质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 原有出水标准/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 本次提标设计出水质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> ) |
| COD                                                                     | ≤500                          | ≤50                          | ≤30                                |
| TN                                                                      | ≤70                           | ≤15                          | ≤12                                |
| NH <sub>3</sub> -N                                                      | ≤40                           | ≤5(8)                        | ≤1.5                               |
| TP(以P计)                                                                 | ≤8                            | ≤0.5                         | ≤0.3                               |

由表2可知,NH<sub>3</sub>-N现状可以达标,通过增加絮凝剂也可使出水TP稳定达标,重点是考虑COD和TN的去除。

### 2.1.1 COD 的去除方案

该项目要求出水 COD $\leq 30$  mg/L,但为了运行稳定,实际运行出水 COD 须控制在 25 mg/L。难降解可溶性有机物质通过沉淀过滤是难以去除的,再进行深度生化处理意义不大,较为可行的方案为高级氧化技术,其中,高级氧化技术实际应用较多的包括 Fenton 氧化和臭氧氧化。Fenton 氧化工艺在多种工业废水治理项目中已有成功应用,投资较小。但是 Fenton 试剂对废水的氧化反应,需先将废水调为酸性,氧化反应后再调回中性。投加的药剂品种多,产生的污泥量较大,可能会导致出水全盐量超标。臭氧氧化法的主要优点是反应迅速、流程简单、没有二次污染问题,但是也有投资、运行成本高及对有机物有选择性的缺点。

综合考虑,高级氧化采用臭氧氧化,同时在以下几个方面做了优化:(1)增设高效臭氧溶气系统,利用电磁的作用改变污水分子的微观物质形态,达到提高臭氧气体的溶解效率,并有效减少臭氧投加量。(2)臭氧池进水管设置高效均相催化器,金属离子促进臭氧分解,然后生成 $\cdot\text{OH}$ ,利用高活性的 $\cdot\text{OH}$ 氧化有机物。可根据水质情况对催化装置进行超越。避免了非均相催化系统结构复杂、易堵塞和水头损失大的缺点。(3)臭氧投加采用了射流曝气系统,一方面可使水气混合更为激烈充分,提高传质效率,另一方面可避免附近地区类似工程的曝气盘结垢问题。

### 2.1.2 TN 去除方案

该项目要求出水 TN $\leq 12$  mg/L,但实际运行须控制在 10 mg/L,由于工程进水 TN 浓度较高,提标改造须强化二级处理生化段脱氮功能<sup>[2]</sup>,同时在深度处理段进一步脱除 TN。

(1)原有卡鲁赛尔氧化沟厌氧区停留时间为 2.6 h,缺氧区停留时间为 3.6 h,好氧区停留时间为

20.1 h。本次改造进行优化,将原有表面曝气方式改造为底部微孔曝气,通过曝气管和推流器的设置,将好氧区进行分区,形成 Bardenpho 池,即 A/A/O+A/O 池,调整后各功能区的水力停留时间为:厌氧区 2.6 h、一级缺氧区 7.7 h、一级好氧区 12 h、二级缺氧区 2 h、二级好氧区 2 h。目的是获得同步除磷脱氮功能的效率最大化,强化二级生化池去除 TN 的作用<sup>[3]</sup>。

(2)新建 1 座反硝化深床滤池<sup>[4]</sup>,以确保出水 TN 指标稳定达到标准要求。反硝化深床滤池在行业内已经有较多的应用经验,一般滤料采用 2~3 mm 的石英砂,滤床深度 1.8 m,可去除 5~10 mg/L 的 TN,出水 SS 可控制在 6 mg/L。反硝化深床滤池脱氮必须投加一定量的碳源,当碳源投加量不足的时候,反硝化脱氮效果受到影响,出水 TN 不达标,但碳源的过量投加不仅造成运行成本过高,且有出水 COD、BOD 升高的风险,因此对碳源的精准投加极为关键。反硝化深床滤池对碳源的质量要求较高,如果碳源中杂质含量较高,容易在滤池石英砂面上形成密集的胶状体物质,影响反硝化及过滤效果。

针对反硝化深床滤池存在的上述问题,对滤料的形式进行调整,将石英砂滤料更换为自养型硫自养滤料。利用自养滤料提供的电子供体,附着生长在自养滤料表面上的自养反硝化细菌把  $\text{NO}_x-\text{N}$  转换成  $\text{N}_2$  完成脱氮反应过程,最大的优势是出水水质稳定,无需外加碳源,避免了出水 COD 超标的风险。另外,无碳源加药系统的反洗周期增加至 3~5 d。

通过二级生化系统强化脱氮+自养型反硝化深床滤池进一步脱氮,可保障出水 TN 稳定达标,同时降低运行成本,改造后污水厂的工艺流程见图 1。

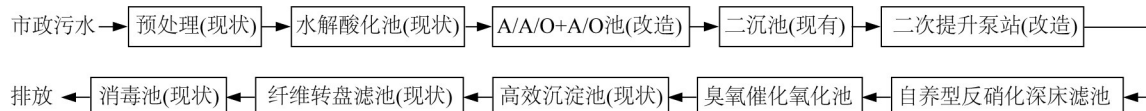


图 1 改造后污水厂工艺流程

Fig. 1 Process flow diagram of sewage treatment plant after transformation

## 2.2 工艺设计

污水厂设计流量 2 500 m<sup>3</sup>/h, 污水总变化系数 ( $K_z$ )=1.36。

(1) Bardenpho 池(2座, 下为单座参数)。

①厌氧池(原池不做变动)。厌氧池主要功能是创造厌氧环境, 充分释放磷, 为下一步除磷创造条件。厌氧池有效容积 3 250 m<sup>3</sup>, 有效水深 4.5 m, 停留时间 2.6 h, 污泥回流比 100%, 池内设置 2 台潜水推流器,  $N=5.5$  kW。

②一级缺氧池。一级缺氧池主要功能是抑制丝状菌生长, 防止污泥膨胀, 完成反硝化脱氮。改造后缺氧池有效容积 9 625 m<sup>3</sup>, 有效水深 4.5 m, 停留时间 7.7 h, 池内设置 4 台推流器,  $N=5.5$  kW。

③一级好氧池。一级好氧池主要功能是在好氧环境下, 利用微生物降解 BOD<sub>5</sub> 及氨氮, 同时生物除磷。好氧池有效容积 15 000 m<sup>3</sup>, 有效水深 4.5 m, 停留时间 12 h, 污泥质量浓度 4 000 mg/L、污泥龄 30 d、污泥内回流比 200%~400%。设内回流泵 1 台 (PP 泵,  $N=15$  kW), 用于将好氧池的污泥回流到一级缺氧池。池内设可提升式曝气管 1 300 根,  $q$  为 6~13 m<sup>3</sup>/(h·根), 池内设置 4 台推流器,  $N=5.5$  kW。

④二级缺氧池。二级缺氧池主要功能是利用外加碳源进行反硝化, 进一步去除总氮。二级缺氧池有效容积 2 500 m<sup>3</sup>, 有效水深 4.5 m, 停留时间 2 h, 池内设置 2 台潜水推流器,  $N=4$  kW。

⑤二级好氧池。二级好氧池主要功能是对二级缺氧池中投加的过量碳源进行去除, 确保出水 COD 的稳定。二级好氧池有效容积 2 500 m<sup>3</sup>, 有效水深 4.5 m, 停留时间 2 h, 设可提升式曝气管 300 根,  $q$  为 6~13 m<sup>3</sup>/(h·根), 池内设置 2 台潜水推流器,  $N=4$  kW。

(2) 鼓风机房。房间平面尺寸为 20 m×10 m, 高度 6 m。主要设备为磁悬浮鼓风机 6 台, 4 用 2 备, 单台参数:  $Q=85$  m<sup>3</sup>/min,  $\Delta P=53.9$  kPa,  $N=105$  kW。

(3) 自养型反硝化深床滤池。主要功能是一方面上部滤层进行反硝化将硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝态氮 (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N) 转化为氮气, 从而确保出水总氮达标, 另一方面底部滤层起到过滤作用, 降低出水 SS, 减少后续臭氧投加量。

①滤池。1 座 6 格, 尺寸 23.5 m×23.6 m×6.8 m, 过滤面积 502 m<sup>2</sup>, 滤料层厚度 2.4 m, 滤料体积 1 200 m<sup>3</sup>, 滤料为 3~5 mm 硫自养脱氮滤料, 水力负荷为 4.98 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h), 硝态氮去除负荷为 0.25~0.5 kg/(m<sup>3</sup>·d)。主要设备为配水配气滤砖 6 套, 单套过滤面积为 83.66 m<sup>2</sup>; 进水不锈钢 304 堰板 6 套, 单套尺寸 23.5 m×0.24 m×0.03 m。

②反冲洗设备间。滤池反洗采用气、水联合反冲洗方式, 水冲洗强度为 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h), 气冲洗强度为 45 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h), 反洗顺序为气洗 (3~5 min)—气水联合 (3~5 min)—水洗 (3 min)。

主要设备: 反冲洗水泵 3 台, 2 用 1 备, 单台参数为  $Q=900$  m<sup>3</sup>/h,  $H=12$  m,  $N=45$  kW; 反冲洗风机 3 台, 2 用 1 备, 单台参数  $Q=31.4$  m<sup>3</sup>/min,  $\Delta P=68.8$  kPa,  $N=55$  kW。

(4) 臭氧催化氧化池。主要功能是去除污水中难生物降解有机物<sup>[5]</sup>。臭氧接触池的尺寸 29.4 m×20.6 m×7.2 m, 有效水深 6.8 m, 停留时间为 1.5 h。进水管道上设置均相催化反应器 2 套。臭氧投加方式采用了射流曝气, 配置射流泵 4 台, 单台参数  $Q=340$  m<sup>3</sup>/h,  $H=15$  m,  $N=22$  kW; 射流器 8 套; 高效混合设备 48 套。尾气破坏器 2 台,  $N=11.5$  kW。

(5) 臭氧设备间。房间平面尺寸 16.9 m×12 m, 高度 6 m。主要设备为氧气源臭氧发生器 3 台, 2 用 1 备, 单台参数 40 kg/h,  $N=280$  kW; 循环量 200 m<sup>3</sup>/h 的冷却塔 1 套; 储存容量 80 m<sup>3</sup> 的液氧储罐及附属系统 1 套。

## 3 运行情况及效果分析

### 3.1 实际运行出水水质

2021 年 3 月—2021 年 10 月的运行数据见图 2。

由图 2 可知, 污水厂出水 COD 为 19.1~28.4 mg/L, NH<sub>3</sub>-N 为 0.08~0.85 mg/L, TP 为 0.08~0.18 mg/L, TN 为 5.2~10.3 mg/L。出水指标 COD、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 达到了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准, TN 达到了地方要求的 12 mg/L 以下。实践证明“Bardenpho+自养型反硝化深床滤池+臭氧催化氧化”方案用于污水厂提标改造中是稳定有效的。

### 3.2 投资及运行成本

该工程总投资 6 800 万元, 运行费用比原来增加

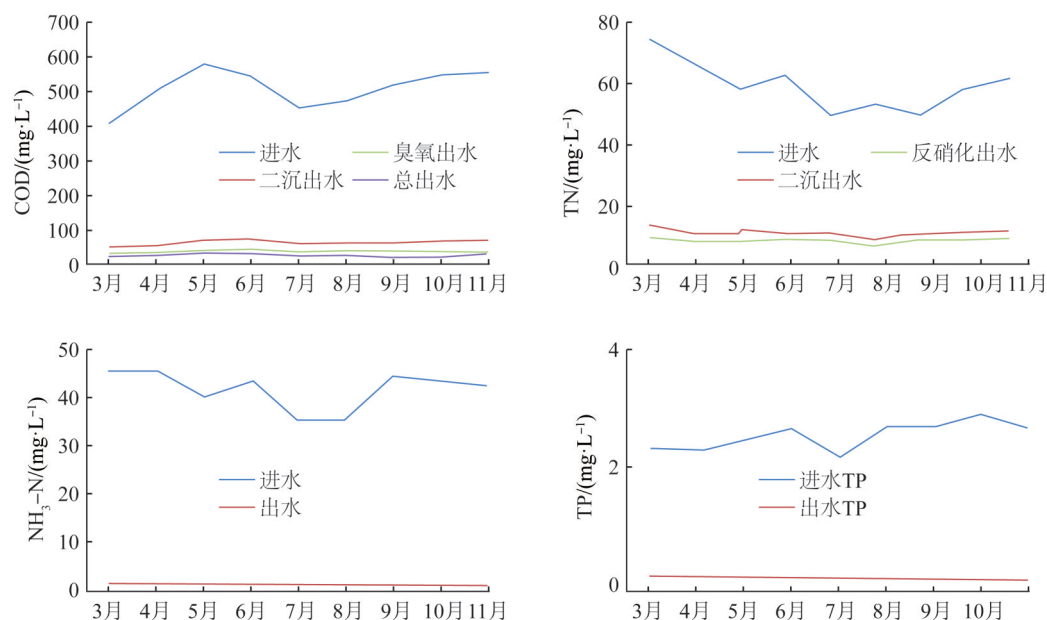


图2 改造后污水厂实际运行数据

Fig. 2 Actual operation data of sewage plant after reconstruction

0.652元/m<sup>3</sup>,主要包括动力费、人工费和药剂费。

(1)动力费:工程新增年用电量1 031万kW·h,电价按0.80元/(kW·h)计,则动力费用10 310 000×0.80÷365÷60 000=0.376元/m<sup>3</sup>。

(2)人工费:定员5人,工资按40 000元/a计,则人工费用5×60 000÷365÷60 000=0.014元/m<sup>3</sup>。

(3)药剂费:药剂主要为液氧、硫自养滤料和新增PAC和PAM,主要用于反硝化深床滤池、臭氧催化氧化池和高效沉淀池,药剂费约为0.262元/m<sup>3</sup>。

#### 4 工艺运行特点

提标改造工程在确保达标的前提下,选择先进、可靠的工艺和设备,注重节省投资和降低运行成本。

(1)将卡鲁赛尔氧化沟改造为Bardenpho工艺,两级脱氮提高了TN去除率,生化池出水TN能够稳定达到15 mg/L以下。调整了生化池功能分区容积,能够充分利用进水碳源,乙酸钠消耗量比改造前降低了20%。

(2)由表面曝气调整为底部曝气方式,运行功率由原来的528 kW降低至现在的300 kW,大大降低了电耗。

(3)臭氧投加采用了射流曝气方式,比曝气盘方式增加了4台22 kW水泵,但由于射流曝气提高了

气水传质效果,提高了催化氧化反应速率,使臭氧投加量与COD降解量之比仅为1.4:1,减少了臭氧发生器功率消耗120 kW,总体来说更为节能。

(4)自养型反硝化深床滤池为山东地区的首次大规模应用。去除单位TN所消耗的滤料质量比为1:4。按去除5 mg/L NO<sub>x</sub>-N计算,滤料消耗量为20 mg/L,则每天消耗滤料约为1 200 kg;自养脱氮滤料价格按照4 000元/t计算,折合吨水药剂费为0.08元。而常规反硝化深床滤池需投加乙酸钠碳源,按去除5 mg/L NO<sub>x</sub>-N计算,乙酸钠消耗量为30 mg/L,则每天消耗乙酸钠约为7.2 t(25%溶液),按照1 500元/t计算,折合吨水药剂费为0.18元。可见自养型反硝化滤池脱氮比常规反硝化深床滤池处理成本更低,更重要的是自养型反硝化深床滤池对TN去除效果更稳定性更好,运行管理更为方便。

#### 5 结论

(1)对于印染、石油化工等工业水比例较大的市政污水厂<sup>[6]</sup>,采用“预处理+水解酸化+Bardenpho+反硝化滤池+臭氧氧化池+高效沉淀池+纤维转盘滤工艺”可使出水达到准Ⅳ类水标准;(2)将卡鲁赛尔氧化沟改造为Bardenpho工艺,能够强化对TN的去除效果。磁悬浮风机+微孔曝气管比倒伞表曝机的节

能效果更加明显,也证明了4.5 m水深的氧化沟采用微孔曝气是可行的;(3)自养型反硝化深床滤池+臭氧催化氧化工艺适用于污水厂的提标改造,能够节约较大的电耗和药耗;(4)对于出水严格的地方排放标准,污水厂设计时须保障达标的稳定性,同时也应考虑运行管理的灵活性和可调性,能够根据水质的变化调整运行方式。该工程案例对类似条件的污水厂设计有一定的借鉴意义。

### 参考文献

- [1] 杨晨宵,盛铭军,黄继会,等. “准Ⅳ类”标准下城镇污水厂提标改造的难点与举措[J]. 工业水处理, 2020, 40(11): 15-21.  
YANG Chenxiao, SHENG Mingjun, HUANG Jihui, et al. Difficulties and measures for upgrading and reconstruction of urban sewage treatment plants under quasi-Ⅳ standard [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(11): 15-21.
- [2] 鲍任兵,高廷杨,宫玲,等. 污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述[J]. 净水技术, 2021, 40(9): 14-20.  
BAO Renbing, GAO Tingyang, GONG Ling, et al. Review of process optimization of biological denitrification and phosphorus removal in wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(9): 14-20.
- [3] 李采芳,杨丹,王志刚. A/O+高效沉淀+深床滤池用于污水厂提标扩建[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 88-92.  
LI Caifang, YANG Dan, WANG Zhigang. Application of A/O, high efficiency sedimentation tank, denitrification deep-bed filter process in upgrading and expansion of WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 88-92.
- [4] 陈莉,雷睿,刘洋,等. 反硝化深床滤池/电磁催化臭氧氧化用于污水厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2016, 32(20): 44-47.  
CHEN Li, LEI Rui, LIU Yang, et al. Application of denitrification deep bed filter and electromagnetic catalytic ozonation to upgrading and reconstruction of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(20): 44-47.
- [5] 李赟泽,马立志,郭超,等. 江苏省某化工园区污水处理厂提标改造工程实例[J]. 工业用水与废水, 2020, 51(6): 69-72.  
LI Yunze, MA Lizhi, GUO Chao, et al. An upgrading and reconstruction project example of a sewage treatment plant of a chemical industrial park in Jiangsu Province [J]. Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(6): 69-72.
- [6] 杨彬,杨文斌,文志潘,等. 催化臭氧氧化印染工业园尾水提标处理研究[J]. 工业水处理, 2020, 40(12): 64-68.  
YANG Bin, YANG Wenbin, WEN Zhipan, et al. Catalytic ozonation tail water treatment of printing and dyeing industrial park to meet the upgrading emission standard [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(12): 64-68.
- [作者简介] 高宗仁(1984—), 本科, 高级工程师, 注册公共设备工程师, 注册环保工程师, 咨询工程师。电话: 18663706226, E-mail: gaozongren@163.com。
- [收稿日期] 2022-07-25(修改稿)