

设计经验

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.22.009

污水厂氧化沟改造为A²O+MBBR+O₃工艺提标设计

乔海兵^{1,2}, 赵志太^{1,2}, 李帅军³, 丁泽宇⁴, 孙 宛⁵, 陈 皓⁴,
尹卫红^{1,2}, 孙成才^{1,2}

(1. 河南省城乡规划设计研究总院股份有限公司, 河南 郑州 450044; 2. 河南省水质保障与水环境修复工程技术研究中心, 河南 郑州 450044; 3. 北控<济源>污水净化有限公司, 河南 济源 454652; 4. 北控<杭州>生态环境投资有限公司, 浙江 杭州 310000; 5. 北控水务<中国>投资有限公司, 北京 100124)

摘 要: 河南黄河流域某污水厂规模为 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,采用组合式氧化沟工艺,提标工程要求出水主要污染物指标达到地表水Ⅳ类标准和《河南省黄河流域水污染物排放标准》(DB 41/2087—2021)一级标准。针对进水以工业废水为主,水质波动大、浓度高的特点,综合考虑用地条件、停水周期、水力高程、消防要求、施工影响、节能降耗等因素,提标改造工程新建了厌氧池并改造氧化沟为A²O+MBBR池,且增加了臭氧(O₃)氧化深度处理工艺,改造后各项出水水质均满足标准要求。设计中生物池加固采用池壁凿孔结构设计,悬浮风机房进风考虑有效过滤,并对高效沉淀池沉淀区进行了配水均匀性改造。

关键词: 黄河流域; 组合式氧化沟; 提标改造; MBBR; 臭氧

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)22-0060-06

Design of Oxidation Ditch Upgraded to A²O, MBBR and O₃ Process in a Wastewater Treatment Plant

QIAO Hai-bing^{1,2}, ZHAO Zhi-tai^{1,2}, LI Shuai-jun³, DING Ze-yu⁴, SUN Wan⁵,
CHEN Hao⁴, YIN Wei-hong^{1,2}, SUN Cheng-cai^{1,2}

(1. Henan Urban Planning Institute & Corporation, Zhengzhou 450044, China; 2. Henan Water Quality Guarantee and Water Environment Restoration Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450044, China; 3. Beijing Enterprises <Jiyuan> Sewage Purification Co. Ltd., Jiyuan 454652, China; 4. Beijing Enterprises <Hangzhou> Ecological Environment Investment Co. Ltd., Hangzhou 310000, China; 5. Beijing Enterprises Water <China> Investment Co. Ltd., Beijing 100124, China)

Abstract: The process of a wastewater treatment plant with scale of $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ in the Yellow River basin of Henan Province was combined oxidation ditch. The main pollutant indexes in the effluent of the upgrading project are required to meet the class IV limit specified in the surface water standard and the first level limit specified in *Discharge Standard of Water Pollutants in Henan Province Located in the Yellow River Basin* (DB 41/2087-2021). The influent is mainly industrial wastewater, and the water quality is characterized by large fluctuation and high concentration. The upgrading project built a new anaerobic tank, transformed the oxidation ditch into A²O and MBBR tank, and added an ozone oxidation

advanced treatment process based on comprehensive consideration of the factors such as land conditions, water cut-off period, hydraulic elevation, fire requirements, construction impact and energy saving and consumption reduction, and the effluent quality met the requirements specified in the discharge standard after the transformation. The design reinforced the biological tank with a perforated structure on the wall, considered the effective filtration of the air from the suspension fan room, and improved the uniformity of water distribution in the sedimentation area of the high efficiency sedimentation tank.

Key words: the Yellow River basin; combined oxidation ditch; upgrading and reconstruction; MBBR; ozone

1 工程概况

河南省黄河流域某城市污水厂设计规模为 4×10^4 m³/d, 2014年建成投运,出水达到一级A标准。2021年启动提标改造工程,按照河南省黄河流域水生态环境保护和受纳水体国控断面考核要求,出水主要污染物指标按地表水Ⅳ类和河南省地方标准《河南省黄河流域水污染物排放标准》(DB 41/2087—2021)一级标准控制,即COD≤30 mg/L、BOD₅≤6 mg/L、SS≤10 mg/L、NH₄⁺-N≤1.5 mg/L、TN≤12 mg/L、TP≤0.3 mg/L。

2 现状及改造条件

2.1 现状分析

该厂围墙内占地面积约 4×10^4 m²,其中可拆除及利用的较大空地约2 000 m²。场地地质第①、②层主要为杂填土及粉质黏土,地下水位为1.91~2.43 m。

该厂主要收集城区及周边建制镇的工业和生活污水,工业废水占比约60%,主要来自食品、制药、化工、电子、机械等行业。设计进水COD≤390 mg/L、BOD₅≤150 mg/L、SS≤200 mg/L、NH₄⁺-N≤42 mg/L、TN≤50 mg/L、TP≤6.5 mg/L,厂区主要建(构)筑物包括粗格栅及进水泵房、细格栅及曝气沉砂池、水解酸化池、组合式改良型氧化沟及沉淀池、高效沉淀池、纤维转盘滤池、接触消毒池、贮泥池、污泥脱水机房、变配电所、综合楼、门卫等。

实际进水量为 $(2.6 \sim 3.2) \times 10^4$ m³/d,生物池污泥浓度为3.5~5.6 g/L,由于工业废水水质波动大,管网流速低、水位高及雨污混接等因素,进水浓度较设计值偏低,2018年—2020年进水水质如表1所示。

在未满负荷且较高污泥浓度运行条件下,出水水质可达到一级A标准,但不能稳定达到新标准要

求,COD、TP和TN达标率较低,分别为50%、52%和32%。

表1 2018年—2020年实际进水水质

Tab.1 Actual influent quality between 2018 and

项 目	2020					
	mg·L ⁻¹					
进水浓度范围	172~	84~	106~	22~	26~	1.8~
	519	167	231	48	56	7.9
95% 概率进水	378	131	162	36	48	4.3

运行中存在以下问题:①水解酸化池采用一管一孔“八爪鱼式”布水分配器,进水受曝气沉砂池跌水复氧影响,布水器堵塞不均匀,池内积泥严重,效果一般^[1]。②组合式改良型氧化沟生化池平均时HRT为16.5 h,厌氧区采用双曲面搅拌器,好氧区采用转碟机组曝气,生物池分区不合理,设备供氧能力不足,积泥多、能耗高,系统脱氮除磷能力欠佳。③高效沉淀池包括混合区、三格絮凝区、沉淀区和排泥及加药设备区,由于絮凝区出水位置在池子边缘,致使稳流区积泥、配水不均匀、出水悬浮物高等。

2.2 改造条件

该厂近期无扩建计划,不能与改扩建项目统筹进行,仅能利用厂内有限空地或部分拆迁用地进行原规模提标改造,应注重节能降耗,尽量避免更换变压器;新增建(构)筑物布置需充分考虑消防要求、水力高程、施工对现有设施及管线的影响,通过避开低温季节、加强运行及临时措施可进行单系列短期停水改造。

3 改造方案

通过优化运行和工程措施进行水质提标,立足现状设施的潜能挖掘,充分利用现有构筑物、设备及管线等,采用技术成熟、经济合理、占地省、改造

工期短的工艺。

提标后工艺流程见图 1。

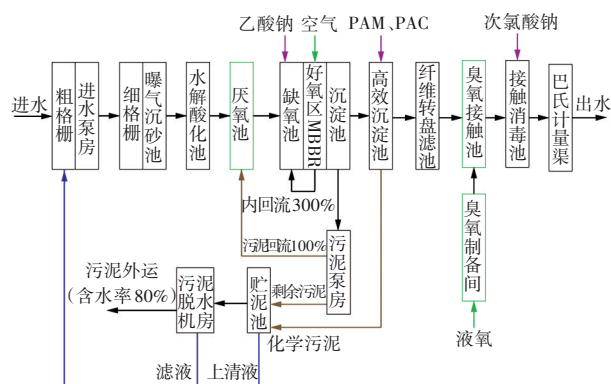


图 1 提标后工艺流程

Fig.1 Process flow chart after upgrading

二级处理段,经核算,现有组合氧化沟池容不足,主要通过增加厌氧池、现状氧化沟分区与曝气改造及投加悬浮填料等方式,将生物池系统改造为泥膜复合缺氧好氧池,即 $A^2O+MBBR$ 工艺,使 NH_4^+-N 和 TN 在该阶段去除,并确保生物除磷功能。

深度处理段,在利用改造现有高效沉淀池和转盘滤池的基础上,增加臭氧氧化去除难降解有机物^[2],确保 COD 和 TP 稳定达标,并进一步脱色。

主要改造内容包括利用厂区西南角空地新建厌氧池,将现状变配电所及仓库改造为鼓风机房,拆除办公楼北侧临时建筑,新建臭氧接触池、液氧汽化站,在高效沉淀池与转盘滤池之间的空地上增建臭氧制备间。对现有的水解酸化池、高效沉淀池、脱水机房等进行改造。此外还包括新老管线系统改建、连通、道路破除及修复等。提标后的厂区平面布置见图 2。

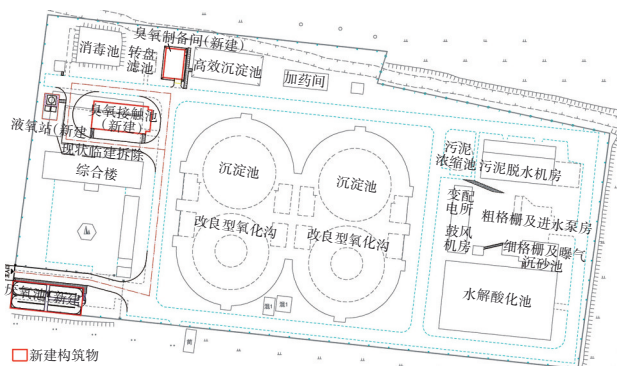


图 2 提标后厂区平面布置

Fig.2 Plant layout after upgrading

4 工程设计

4.1 主要构筑物设计

① 厌氧池。1座2组,平均时HRT为1.5 h,考虑用地限制和流态情况,采用循环型4沟道,单沟宽3 m,水深6 m,配套低速潜水推流器4台,叶片直径2.0 m,单台功率5.7 kW。由于现状可利用水头有限,为减少水损,进水和进泥均采用管道中心分配方式,同时出水管道设流量计以确保2座生物池水量分配。

② 组合式改良型氧化沟生化沉淀池改造。2座,原设计生化池包括厌氧区、好氧区、进水混合区、污泥回流区、硝化液回流区及二沉池(见图3)。其中厌氧区、好氧区有效水深分别为5.9 m和3.9 m。

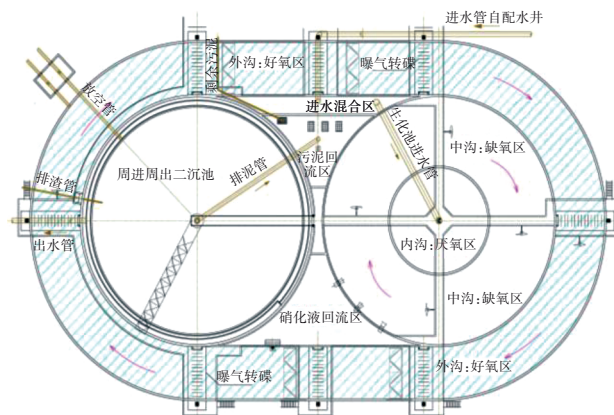


图 3 组合式改良型氧化沟及沉淀池现状

Fig.3 Current situation of combined improved oxidation ditch and sedimentation tank

改造情况见图 4。

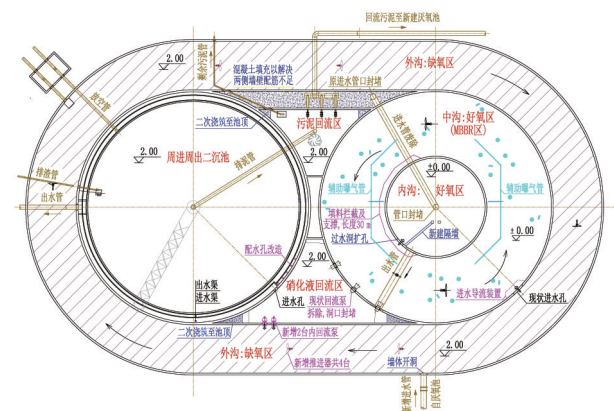


图 4 组合式改良型氧化沟及沉淀池改造

Fig.4 Reconstruction of combined improved oxidation ditch and sedimentation tank

在满足新标准下,设计参数为水温 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$,污泥龄 20 d ,污泥浓度 4 g/L ,内回流比 300% ,污泥回流比 100% ,计算所需单座AO生物池池容为 $15\,875\text{ m}^3$ (缺氧 $6\,705\text{ m}^3$,好氧 $9\,170\text{ m}^3$),现有单座构筑物有效池容为 $13\,880\text{ m}^3$ (外沟 $6\,775\text{ m}^3$ 、中沟 $5\,305\text{ m}^3$ 、内沟及硝化液回流区 $1\,800\text{ m}^3$),池容不足,需采用提高污泥量的方式解决。当碳源不足时需在缺氧区补充乙酸钠。

a. 功能分区改造:根据各区所需池容及池深情况,原外沟为好氧区,但池深较浅,改为缺氧区,原中沟为缺氧区,改为好氧区,原内沟为厌氧区,改为好氧区;二沉池、污泥回流区、硝化液回流区功能分区不变。

根据计算,单组好氧区欠缺容积为 $2\,065\text{ m}^3$,采用在流态较好的中沟投加悬浮填料形成泥膜复合状态的方式提高生物量,弥补池容不足。本工程选用尺寸为 $\varnothing 25\text{ mm}\times 10\text{ cm}$ 、有效比表面积 $620\text{ m}^2/\text{m}^3$ 的高密度聚乙烯悬浮载体填料。根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)及工程实际运行经验,选取悬浮填料的表面硝化负荷为 $0.9\text{ gNH}_3\text{-N}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$),折算为设计水温 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,表面硝化负荷为 $0.486\text{ gNH}_3\text{-N}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。单组好氧区欠缺容积需去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 约 187 kg/d ,因此需投加悬浮填料有效膜面积约 $384\,774\text{ m}^2$,折算为填料体积约 621 m^3 ,中沟好氧区悬浮填料区填充率为 12% 。

b. 构筑物改造:原进水混合区改为污泥泵出水阀门井,由于与相邻池体有液位差,经结构验算,两侧池壁配筋不足,阀门井需回填混凝土 1.8 m ;内沟新建隔墙防止短流,内沟与中沟进水孔扩大至 $1.3\text{ m}\times 1.3\text{ m}$,中沟与硝化液回流区原回流泵拆除、洞口封堵,硝化液回流区至外沟新增洞口并增加硝化液回流泵,上方增加 $2\,500\text{ mm}\times 1\,300\text{ mm}$ 的水泵吊装口和 $5\,325\text{ mm}\times 2\,850\text{ mm}$ 的检修观察口;硝化液回流区、污泥回流区楔角区域采用混凝土填实以防止淤泥沉积。

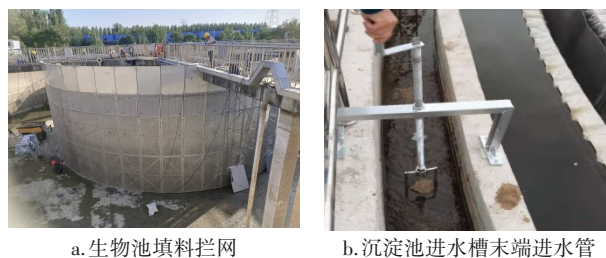
c. 管线改造:将进入原进水混合区的进水管改造为污泥回流管,原进水混合区至内沟的进水管封堵,新增2根厌氧池至外沟的进水管和内沟至硝化液回流区的DN1400出水管。

d. 设备改造:拆除曝气转碟、内沟立式双曲面搅拌器、硝化液回流泵和部分潜水推进器,在中沟、内沟及硝化液回流区增加管式微孔曝气器($\varnothing 65$

$\text{mm}\times 1\,000\text{ mm}$,共1936套),在中沟增加2台低速推进器($\varnothing 2\,000\text{ mm}$, $N=5.5\text{ kW}$)、悬浮载体填料、进水导流及防倒流装置、出水填料拦截不锈钢筛网(单套长度 30 m 、厚度 3 mm 、高度 6.0 m ,背面有加强筋及方管支撑,开孔率 $\leq 40\%$,过孔流速 $\leq 0.01\text{ m/s}$)及辅助流化装置(穿孔管曝气面积 360 m^2)等。硝化液回流新增回流泵($Q=1\,250\text{ m}^3/\text{h}$, $H=8\text{ kPa}$, $P=4.3\text{ kW}$)及拍门等。

e. 沉淀池配水渠改造:周进周出二沉池进水渠末端易积泥、出现浮渣,需频繁清理且影响出水,在末端基础进水口增加高度可调的进水管(不锈钢 $D159\text{ mm}\times 3\text{ mm}$),原槽底孔配水改为管口上部进水,利用管口液位差产生适合的旋涡和吸力将上层浮泥去除。

生物池和沉淀池改造现场照片见图5。



a. 生物池填料拦网

b. 沉淀池进水槽末端进水管

图5 生物池及沉淀池改造现场照片

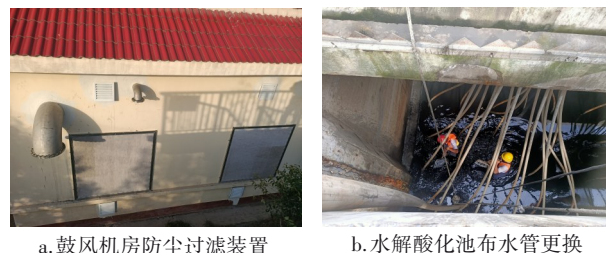
Fig.5 Site photos of reconstruction of biological tank and sedimentation tank

③ 鼓风机房。设置磁悬浮鼓风机2台(1用1备), $Q=166\text{ m}^3/\text{min}$, $H=70\text{ kPa}$, $N=205\text{ kW}$,变频控制。

现状房间内窗户增设防尘过滤装置以实现进风有效过滤,确保鼓风机高效运行,减小维护频率。

④ 水解酸化池改造。1座2组,有效水深 5.5 m ,平均时HRT为 6.0 h ,上升流速为 0.9 m/h ,共42套一管一孔布水器。

鼓风机房和水解酸化池改造现场照片见图6。



a. 鼓风机房防尘过滤装置

b. 水解酸化池布水管更换

图6 鼓风机房和水解酸化池改造现场照片

Fig.6 Site photos of reconstruction of blower room and hydrolysis acidification tank

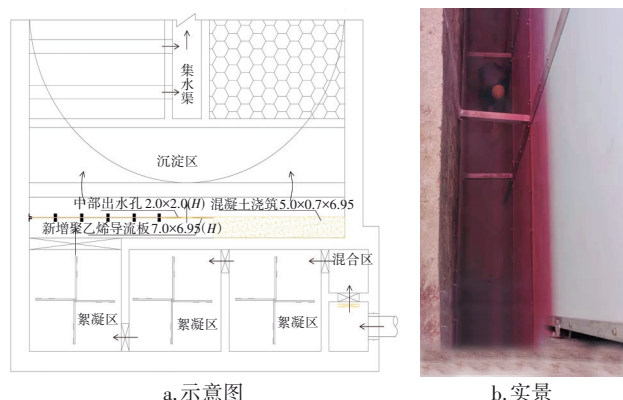
本次改造主要包括清除池内淤泥,并采用吹扫冲洗的方式对布水器连接的 $\varnothing 50\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 聚乙烯布水管进行排查,其中1 315根进行疏通后可继续使用,严重损坏的365根需进行更换。后期运行时应定期对布水管进行疏通维护。

⑤ 液氧汽化站。基础尺寸为 $12.9\text{ m}\times 7.49\text{ m}$,设液氧储罐1套,有效容积 50 m^3 ,工作压力 0.8 MPa ,配套 $1\,500\text{ m}^3/\text{h}$ 蒸发器及双路稳压装置。由于场地受限,为满足与南侧综合办公楼的消防要求,储罐靠北布置。

⑥ 臭氧制备间。建筑尺寸为 $15.0\text{ m}\times 9.6\text{ m}\times 4.8\text{ m}$,包括补氮、臭氧制备及冷却水系统,设计臭氧投加量 30 mg/L (可去除COD约 10 mg/L 以内),配套2台臭氧发生器, $Q=35\text{ kg/h}$ (10%), $N=262.5\text{ kW}$,采用再生水作为外循环冷却水。根据出水COD、色度和进水流量调整投加量。

⑦ 臭氧接触池。外壁尺寸 $29.6\text{ m}\times 13.85\text{ m}\times 8.05\text{ m}$,设计为三段式,高时HRT为 47 min ,采用曝气投加方式,投加比例为 $2:1:1$,配套尾气破坏器(外设岩棉板房屋)、臭氧泄漏报警仪等。池体内壁面(底面、墙、顶板)防水砂浆粉刷整平后,涂专用氟碳涂料一底三面,厚度 $\geq 250\text{ }\mu\text{m}$ 。

⑧ 高效沉淀池改造。1座2组,高时混合区HRT为 30 s ,三格絮凝区HRT为 13 min ,沉淀池上升流速为 10 m/h ,本次改造在絮凝区至沉淀区 1.4 m 宽的配水渠内增加中间开孔的不锈钢骨架聚乙烯导流板(质量较轻,便于施工),将絮凝区侧边出水引至中间出水,并用素混凝土填筑短流区,确保了配水均匀,保证了沉淀区澄清效果。配水渠改造见图7。



a. 示意图

b. 实景

图7 高效沉淀池配水渠改造

Fig.7 Reconstruction of distribution channel of high efficiency sedimentation tank

⑨ 污泥脱水机房改造。处理干污泥量 14.32 t/d ,利用现状1台带式浓缩脱水机,拆掉并新增2套带式浓缩脱水机,带宽 2 m ,处理能力为 $180\sim 360\text{ kg/h}$ (干质量),配套改造相关管路及阀门等。

4.2 池壁凿孔结构设计

现状生物池需重新开进水口和回流泵吊装孔,设计采用植筋对结构进行加固改造,剔掉原混凝土时不得使用大锤夯砸,应用小钻凿剔,施工应严格按照植筋规范进行,为保证新旧混凝土粘接牢固,与新浇混凝土结合处池壁、顶板混凝土应去污凿毛,表面去除浮浆,还应形成凹凸麻面,并将钢筋剔出与新增钢筋焊接牢固。

4.3 基坑支护设计

根据周边建(构)筑物及地下管线情况,确定以下基坑支护方案:

① 厌氧池基坑深 4.6 m ,边坡系数 $1:0.4$,采用土钉墙支护,坡面为 100 mm 厚C20混凝土及 $\varnothing 6@200\times 200$ 钢筋网,间隔 1.5 m 设置 7.5 m 预应力全长粘结锚杆和 6 m 土钉。

② 臭氧接触池基坑深 7.7 m ,下部采用 12 m 拉森IV型钢板桩和间隔 2.8 m 的预应力全长 12 m 粘结锚杆,上部 3 m 范围采用 $1:0.5$ 土钉墙支护。支护安全性经受了2021年“7·20”特大暴雨的考验。

基坑支护现场见图8。



a. 厌氧池基坑支护

b. 臭氧接触池基坑支护

图8 基坑支护现场照片

Fig.8 Site photos of foundation pit support

4.4 变配电系统设计

拆除现状生物池转碟曝气机等用电设备,减少设备功率 516 kW ,新增设备安装容量为 $1\,311.3\text{ kW}$,全厂计算总负荷为 $1\,181.58\text{ kW}$ 。利用现状两台 $1\,000\text{ kVA}$ 变压器,互为备用,变压器负荷率为 59.1% ,新增低压配电柜为新增设备供电。

5 运行效果

改造工程建设费用约 $4\,500$ 万元,考虑新增人员、药耗、电耗等,新增经营成本为 $0.22\text{ 元}/\text{m}^3$,自

2021年11月投产运行以来,平均进水量约 3.4×10^4 m³/d,工艺运行稳定,出水稳定达标。近一年实际进、出水水质见表2。

表2 实际进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
进水	205~ 420	105~ 152	123~ 185	26~ 46	32~ 53	2.5~ 5.6
出水	13~ 24	2.2~ 4.8	6.2~ 9.3	0.3~ 1.2	6.3~ 10.8	0.06~ 0.23

6 结论

本项目结合改造条件,通过生物池原位改造使NH₃-N和TN在二级处理段去除,增加臭氧氧化去除难降解有机物和色度,改造后各项出水水质指标均满足高标准要求,该项目对进水以工业废水为主且用地和时间受限的组合氧化沟工艺污水厂提标改造具有借鉴意义。

在项目设计时,对组合氧化沟的改造应考虑优化分区后的结构验算、填料区的流化状态,悬浮鼓风机房应考虑进风的有效过滤,高效沉淀池沉淀区配水应注意均匀性等问题。

参考文献:

[1] 郭亚琼,李鹏峰,孙永利,等. 某工业园区污水处理厂

工艺诊断和优化运行研究[J]. 中国给水排水,2020,36(2):16-21.

GUO Yaqiong, LI Pengfeng, SUN Yongli, *et al.* Study on the process diagnosis and optimizing operation of a WWTP in industrial park [J]. China Water & Wastewater, 2020,36(2):16-21(in Chinese).

[2] 申世峰,李劭,郭兴芳,等. 工业集聚区集中污水处理厂难降解有机物高标准深度处理研究[J]. 给水排水,2020,46(10):59-64.

SHEN Shifeng, LI Mai, GUO Xingfang, *et al.* Study on high standard advanced treatment of refractory organic matter in centralized wastewater treatment plant of industrial agglomeration area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020,46(10):59-64(in Chinese).

作者简介:乔海兵(1979-),男,河南西峡人,工学硕士,正高级工程师,分院总工,注册公用设备工程师、咨询工程师(投资),主要从事市政给排水和环境工程的咨询、设计及研究等,曾获国家优秀设计三等奖2项、河南省建设事业科学技术进步一等奖1项、河南省优秀设计一等奖11项,获得“河南省勘察设计行业优秀青年勘察设计师”称号。

E-mail:532722520@qq.com

收稿日期:2022-11-17

修回日期:2023-01-03

(编辑:孔红春)

依法划定河湖管理范围

严格水域岸线水生态空间管控