

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.04.013

高排放标准下分段进水多级AO+MBR工艺的设计

李一龙¹, 包宇², 邸文正¹, 陈筱松³

(1. 北控水务<中国>投资有限公司, 北京 100102; 2. 中煤科工集团北京华宇工程有限公司, 北京 100120; 3. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘要: 北京某再生水厂原设计规模 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 需迁址新建, 并扩容至一期设计规模 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 总规模 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。出水标准由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准, 提高至北京地标《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)中的A标准(准Ⅲ类标准)。通过污染物指标分析和工艺方案比选, 确定采用预处理+分段进水多级AO+MBR+臭氧催化氧化工艺, 实际试运行出水水质稳定达标。采用分段进水多级AO方式, 灵活分配进水碳源, 强化内源反硝化加强TN去除效果, 实际运行在进水超标的工况下通过投加外部碳源使出水TN保持在 10 mg/L 以下。另外, 生物池和膜池膜组件采用精确曝气和脉冲曝气系统, 试运行期间有效节约能耗约10%。

关键词: 分段进水多级AO; MBR; 再生水厂; 高排放标准; 臭氧催化氧化

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)04-0076-06

Design of Step-feed Multi-stage AO+MBR Process under High Discharge Standard

LI Yi-long¹, BAO Yu², DI Wen-zheng¹, CHEN Xiao-song³

(1. Beijing Enterprises Water <China> Investment Co. Ltd., Beijing 100102, China; 2. CCTEG Beijing Huayu Engineering Co. Ltd., Beijing 100120, China; 3. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: The original design scale of a reclaimed water plant in Beijing is $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. The plant was newly built in other place and expanded to the design scale of $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ in the phase I project (the total scale is $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), and the discharge standard was upgraded from the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002) to level A criteria (quasi-class Ⅲ standard) specified in a local standard of Beijing *Discharge Standard of Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plants* (DB 11/890—2012). Through analysis of the pollutant indicators and comparison of the process scheme, the process of pretreatment, step-feed multi-stage AO process, MBR and ozone catalytic oxidation was selected. The trial operation indicated that the effluent quality stably met the discharge standard. The step-feed multi-stage AO process flexibly allocated the carbon sources in the influent and improved the endogenous denitrification to enhance TN removal performance. When the influent quality exceeded the standard in actual operation, TN in the effluent still remained below 10 mg/L by adding external carbon source. In addition, precise aeration and pulse aeration systems were applied to the biological tank and membrane tank, which effectively saved energy consumption by approximately 10% during trial operation.

Key words: step-feed multi-stage AO; MBR; reclaimed water plant; high discharge standard; ozone catalytic oxidation

1 工程概况

北京某再生水厂原设计规模 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用活性污泥法+MBR膜工艺, 设计出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准及再生水回用标准。随着城区扩大, 纳污量增加, 原厂址位于城区中心, 存在用地面积不足、地理位置无法收集下游污水、臭气影响城区环境等问题, 拟将其改为污水泵站, 污水统一汇集至下游另建的新厂处理。新建再生水厂一期设计规模 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 总规模 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 设计出水水质达到北京地标《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)中的A标准(准Ⅲ类标准)。

2 设计思路

原厂为北京市第一批大规模应用MBR工艺的再生水厂, 其运行数据有一定代表意义。原运行实际进、出水水质和新排放标准水质对比见表1。

表1 再生水厂原进、出水水质与新标准对比

Tab.1 Comparison of original influent and effluent quality and new standard of reclaimed water plant

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	BOD ₅	COD	SS	TN	NH ₃ -N	TP
原厂进水水质	150~299	348~580	97~265	55~80	51.5~77.5	6.5~9.0
原厂出水水质	1.66~10.2	20.7~41.2	3~5	18.9~22	0.59~3.55	0.36~0.43
新厂排放标准	4	20	5	10	1.0(1.5)	0.2

原厂污水经过普通活性污泥法+MBR工艺处理后, 除SS外, 所有污染物指标均不能稳定满足京标A的要求。各污染物指标分析如下:

① COD和BOD₅

进水B/C比为0.4~0.5, 可生化性较好。原厂运行数据显示, MBR工艺的出水COD在20~40 mg/L之间。常规市政污水水质情况下, 采用各类改良A²O工艺配合深度处理, 出水COD能达到30 mg/L左右。为确保最终出水COD及BOD₅达标, 在MBR后设置臭氧催化氧化工艺对溶解性难降解COD进行分解, 同时预留应急投加活性炭设施。

② TN

进水BOD₅/TN比平均为3.5, 碳源基本满足反硝化脱氮的需求。运行数据显示TN去除率在70%左右。董良飞等^[1]研究表明, 应用常规A²O+MBR组合工艺的两座污水厂, TN去除率均值分别为69%和64%; 应用A²O/A+MBR工艺, 后置缺氧强化内源反硝化过程, TN去除率均值为78%。北京某污水处理厂采用分段进水多级AO+超滤工艺处理生活污水, TN去除率约88%^[2]。西安某污水处理厂单独应用多段AO, 在进水TN为50 mg/L的情况下, 投加碳源后出水TN可达10 mg/L以下, 去除率约80%^[3]。经核算, 本项目的TN去除率达到80%以上方可达标。主要从三方面考虑提高TN去除率, 一是采用Bardenpho工艺的原理, 设置多级AO, 强化后置缺氧段的内源反硝化作用; 二是采用分段进水进行碳源的分配和调节, 并补充投加外部碳源; 三是采用较高的回流比提高TN理论去除率, 设置合理的回流方式避免高溶解氧对厌氧环境的破坏。

③ TP

现运行的MBR工艺大多数生物除磷效果不佳, 主要依靠膜的物理截留作用去除难溶磷酸盐和胶体磷。传统A²O及其改良工艺存在脱氮除磷竞争碳源的情况, 其和MBR组合工艺在碳源有限的情况下, 常采用大回流比、长污泥龄、高曝气量优先进行硝化反硝化脱碳除氮, 后端采用化学除磷。工艺上考虑前置缺氧区、控制回流比及补充碳源措施, 加强生物除磷, 同时设化学除磷保证TP达标。

④ NH₃-N和SS

NH₃-N指标在保证曝气和足够的停留时间下较易达标, SS指标原厂MBR工艺已达标。

3 工艺设计

3.1 设计水量、水质

本工程一期设计规模为 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 远期为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。采用频率统计法对进水水质进行统计, 选取95%涵盖率的进水水质作为设计进水水质。出水水质执行《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)中的A标准。设计进、出水水质见表2。

表2 设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality

项 目	BOD ₅	COD	SS	TN	NH ₃ -N	TP
进水/(mg·L ⁻¹)	250	500	350	70	60	8
出水/(mg·L ⁻¹)	4	20	5	10	1.0	0.2
去除率/%	98.4	96	98.6	85.7	98.3	97.5

3.2 工艺型式及流程

一般项目工艺选择的导向因素包括排放标准、占地面积、地区技术推广程度等^[4],原则上应技术经济合理,最大化利用现有设施。本厂为迁址新建,可不考虑利旧改造。厂区总用地面积95 000 m²,本期用地面积72 105 m²,折合吨水面积约1.109 3 m²/m³,用地面积适中。

目前我国污水处理工艺中,A²O及其变型工艺使用范围最广,高出水标准的再生水厂应用占比更多。相比传统的氧化沟、SBR等工艺,A²O工艺通过灵活排列分区、设置多种回流等方式,可取得更好的脱氮除磷效果,出水指标可达到一级A标准。为进一步提高脱氮除磷效率,出现了倒置A²O、UCT、MUCT、Bardenpho、多级AO等多种AAO变型工艺。Bardenpho工艺通过设置二级缺氧强化内源反硝化,提高理论TN去除率,实际应用中根据需要投加外部碳源,进一步提高TN去除率。多段进水多级AO通过分配进水比例,提高总氮去除率,并减少外部碳源的投加量。这两类改良工艺在京津冀地区得到广泛应用并取得了良好的处理效果。北京地区再生水厂的技术路线以预处理+多段AAO+砂滤+臭氧氧化为主,用地受限的厂区常采用MBR+臭氧氧化工艺^[5]。针对更高的京标A排放标准,北京某污水厂采用UCT+MBR+臭氧催化氧化工艺,出水稳定达标^[6];北京另一污水厂采用AAO+MBR+臭氧催化氧化+活性炭吸附工艺,出水亦达标排放^[7]。天津某污水厂采用多级AAO+高效沉淀+反硝化深床滤池+臭氧氧化工艺,实际出水能达到类似的高排放标准^[8]。对市政污水,一般工况下经过生物处理后的出水COD能达到30 mg/L左右,为进一步削减COD至20 mg/L以下,北京地区的案例一般在后续增加臭氧催化氧化工段,同时兼顾脱色,整体应用效果良好。所以工艺选择中主要针对生物处理和深度处理部分做比选。本工程选用分段进水多级AO+MBR和Bardenpho(多级AO)+高效沉淀+反硝化滤池两种组合工艺进行比较分析,见表3。

表3 工艺对比

Tab.3 Process comparison

项 目	分段进水多级AO+MBR	Bardenpho+高效沉淀+反硝化滤池
建(构)筑物占地面积/m ²	26 319	30 919
工程总投资/万元	35 182.16	30 792.27
吨水总投资/(元·m ⁻³)	5 412.64	4 737.27
年运行成本/(万元·a ⁻¹)	6 033.27	5 986.51
吨水经营成本/(元·m ⁻³)	2.54	2.52
吨水处理总成本/(元·m ⁻³)	3.04	2.93
技术评价	出水稳定有保障,流程简捷	投资和运营费用低,流程复杂

经分析,两种工艺方案在投资、运行成本、占地面积等方面各有优劣。MBR工艺在设备投资和运行成本上高于常规工艺,但具有节省占地、出水水质好、稳定性好等优势。在高排放标准要求下,Bardenpho+高效沉淀+反硝化滤池方案占地面积大、工艺流程长、提升次数较多,经济性上并无显著优势。考虑进水包括部分工业废水的特征以及出水高排放标准对工艺稳定性的要求,本工程选择分段进水多级AO+MBR工艺。

工艺流程为预处理+分段进水多级AO+MBR+臭氧催化氧化工艺,见图1。

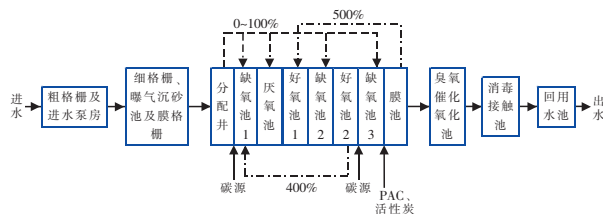


图1 再生水厂工艺流程

Fig.1 Process flow chart of reclaimed water plant

3.3 工艺特点

① 分段进水多级AO

分段进水多级AO工艺设置多级AO,形成连续的缺氧和好氧交替环境,并采用多点进水方式分配原水至各个工艺段,充分利用碳源。作为改良A²O工艺的一种,多级AO的设置有利于强化内源反硝化,串联MBR后,形成三级缺氧、好氧的运行方式,

并在前端增加一段厌氧池增强除磷效果。将缺氧池1置于厌氧池前端,使碳源优先用于脱氮,同时避免前端曝气沉砂池出水溶解氧过高对厌氧除磷造成不利影响。

进水按总量的30%~40%、0~20%、30%~40%、0~20%的比例分别分配至缺氧池1、厌氧池、缺氧池2、缺氧池3,保证后续缺氧、好氧的反硝化、硝化过程有可利用的易降解碳源。

② 精确曝气和脉冲曝气

MBR工艺能耗远高于传统工艺,采用MBR工艺的污水厂吨水电耗一般为 $0.45\sim 0.91\text{ kW}\cdot\text{h}^{[9]}$,工艺中电耗成本约占整体成本的45%。某污水处理厂A²O+MBR中生物池和膜池能耗占比分别为37.3%和43.0%,合计占比大于80%^[10],主要的耗能单元集中在曝气、吹扫、回流环节。生物池采用智能精确曝气系统,同时优化膜擦洗方式为脉冲曝气方式,可降低膜系统的能耗。在生物池各池设置在线溶解氧测定仪,在进入各工艺段的曝气支管设置空气调节阀和气体流量计,精确控制曝气量和溶解氧。好氧池2溶解氧控制在 2 mg/L 以下,好氧池1设置搅拌和曝气双工况,溶解氧控制在 $1\sim 1.5\text{ mg/L}$ 左右,避免膜池回流硝化液的高溶解氧对后续缺氧段的影响。膜擦洗采用脉冲曝气方式,通过气泡的剪切和扰动作用清除污染,低曝气时污泥随膜的抖动而脱离,高强度曝气时膜丝相互碰撞,部分附着的黏性菌胶团得到有效清除。交替循环形成的脉冲气流有助于减少曝气装置堵塞情况的发生。对比一期运行的吨水能耗,试运行期间好氧池精确曝气节约电费6%,膜池脉冲曝气节约电费12%,综合节约能耗约10%,节能效果显著,随着运行稳定,有进一步提升的空间。

③ 除磷方式

分段进水多级AO工艺旨在强化脱氮,除磷效果欠佳。为提高生物除磷功能,本项目在多级AO中设置一段厌氧段,强化厌氧释磷。同时为避免曝气沉砂池及跌水堰过度充氧,将缺氧池1前置,保证厌氧环境。在缺氧池1补充一部分外部碳源,该段进水约30%~40%,后续厌氧池保留有相对充足的碳源来供给聚磷菌进行释磷反应,加强除磷效率。除生物除磷外,还采用化学除磷,投加PAC溶液(10%),加药点为膜池进水管。

4 工程设计

4.1 预处理

预处理按远期规模设计,设粗、细、超细三级格栅,粗格栅采用高链式,格栅间隙 20 mm ,渠宽 1.8 m ,共2台。细格栅、超细膜格栅采用内进流网板式,孔隙分别为 4 mm 。其中细格栅渠宽为 2.0 m ,共3台,膜格栅渠宽为 1.6 m ,共4台。网板式格栅配套中压、高压冲洗泵进行阶段性清污,压力分别为 0.8 MPa 、 10.0 MPa 。粗格栅及进水泵房合建,尺寸为 $20.3\text{ m}\times 13.4\text{ m}\times 6.3\text{ m}$,设4台潜水排污泵(3用1备,2台变频), $Q=1\,300\text{ m}^3/\text{h}$, $H=185\text{ kPa}$, $N=90\text{ kW}$ 。细格栅、曝气沉砂池、超细格栅合建,尺寸为 $39.7\text{ m}\times 16.5\text{ m}\times 6.1\text{ m}$ 。曝气沉砂池设计平均停留时间 8 min ,保证除砂、除油效果,避免无机砂砾和油脂对MBR膜运行造成不良影响。曝气沉砂池配套双桥式吸砂机排砂及罗茨鼓风机曝气。

4.2 MBR生化组合池

MBR生化组合池总尺寸为 $107.5\text{ m}\times 120.0\text{ m}\times 6.0\text{ m}$,其中生物池平面尺寸 $107.5\text{ m}\times 84.6\text{ m}$,膜池及膜设备间平面尺寸 $80.4\text{ m}\times 36.7\text{ m}$ 。

生物池总停留时间 17.4 h ,其中缺氧池1、厌氧池、好氧池1、缺氧池2、好氧池2、缺氧池3水力停留时间分别为 2.6 h 、 2.3 h 、 3.7 h 、 2.1 h 、 3.8 h 、 2.9 h ,总计生物池水力停留时间厌氧 2.3 h 、缺氧 7.6 h 、好氧 7.5 h 。污泥浓度 $5\,000\sim 8\,000\text{ mg/L}$,污泥负荷 $0.05\text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$,气水比 $8:1$ 。膜池停留时间 2.2 h ,平均膜通量 $15\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,污泥浓度 $8\,000\sim 12\,000\text{ mg/L}$,运行方式为过滤 11 min ,擦洗 1 min 。采用脉冲曝气,高曝气强度单位膜面积擦洗气量 $0.25\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,低曝气强度 $0.12\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,将好氧和膜池的曝气连通,利用好氧池曝气鼓风机较高的风压,将部分富余的风量送至膜池。设置气体控制阀形成各个膜池的轮流高低气量脉冲曝气,减少气体短流情况的发生。膜池至好氧池1回流比 500% ,好氧池2至厌氧池前端回流比 400% ,回流由穿墙泵控制,可调整比例。

进水设置电动调节堰门控制各段进水比例,缺氧池1、厌氧池、缺氧池2、缺氧池3、好氧池1各设置4台潜水推流器,直径 $2\,500\text{ mm}$,功率 7.5 kW ;好氧池设置管式曝气器,每个 $Q=7.8\text{ m}^3/\text{h}$, $\varnothing 90\text{ mm}$, $L=1\,000\text{ mm}$,共 $3\,000$ 套;膜池设置中空纤维膜组器 84

套,膜池分12组,每池设7套。回流泵采用穿墙泵,膜池至好氧池采用7台(6用1备,2台变频), $Q=2\,300\text{ m}^3/\text{h}$, $H=10\text{ kPa}$, $N=10\text{ kW}$;好氧池2至缺氧池1采用6台,其中2台变频, $Q=2\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $H=10\text{ kPa}$, $N=10\text{ kW}$ 。

膜设备间设置产水抽吸泵共12台, $Q=362\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $N=15\text{ kW}$,次氯酸钠、柠檬酸、PAC的储罐和加药计量泵各1套,另配套真空泵、空压机等。

4.3 臭氧催化氧化

臭氧接触池和臭氧设备间合建,总尺寸 $58.0\text{ m}\times 28.0\text{ m}$ 。臭氧设计投加量 20 mg/L ,COD设计去除量 10 mg/L 。接触池采用滤池型式,总水力停留时间 60 min ,分8格,单池面积 64 m^2 。设计滤速 $5.13\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。臭氧催化氧化采用特殊催化剂填料,堆积密度约 $0.56\sim 0.65\text{ t/m}^3$,并配备钛板曝气盘、滤板、滤柄、滤头等。设计采用气水反冲洗,气洗周期 $15\sim 20\text{ 次/d}$,气冲洗强度 $13.9\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,设置反洗鼓风机2台(1用1备), $Q=60\text{ m}^3/\text{min}$, $H=90\text{ kPa}$, $N=160\text{ kW}$ 。反洗水冲洗强度 $12\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,在回用水泵房设置反洗水泵,接触池配套排空泵、尾气破坏器等。另设臭氧制备间,尺寸 $43.8\text{ m}\times 10.8\text{ m}$ 。设置臭氧发生器1台,采用氧气源制备臭氧,产量 30 kg/h ,配套氧气储罐 50 m^3 。臭氧制备系统设冷却水循环泵3台(2用1备), $Q=60\text{ m}^3/\text{min}$, $H=200\text{ kPa}$, $N=7\text{ kW}$,配套过滤器、板式换热器、膨胀罐等。

4.4 鼓风机房

鼓风机房和总变配电室合建,尺寸为 $62.2\text{ m}\times 9.5\text{ m}\times 10.0\text{ m}$,安装离心鼓风机8台,其中4台供气至膜池(3用1备), $Q=149\text{ m}^3/\text{min}$, $P=45\text{ kPa}$, $N=160\text{ kW}$;另外4台供气至好氧池(3用1备), $Q=130\text{ m}^3/\text{min}$,

$P=65\text{ kPa}$, $N=220\text{ kW}$ 。设置自动卷绕式空气过滤器4台, $Q=12\,555\text{ m}^3/\text{h}$, $N=0.55\text{ kW}$;屋顶风机两台, $Q=30\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $N=1.5\text{ kW}$ 。

4.5 污泥脱水机房

污泥脱水机房尺寸为 $28.6\text{ m}\times 15.0\text{ m}\times 7.5\text{ m}$,安装离心式浓缩脱水一体机3台, $Q=60\text{ m}^3/\text{h}$, $N=77\text{ kW}$,污泥含水率由99%降低至80%,脱水后的污泥由出泥螺杆泵送至厂区西南侧相邻的污泥处置厂进行处置,出泥泵 $Q=9\text{ m}^3/\text{h}$, $H=1.6\text{ MPa}$, $N=18.5\text{ kW}$ 。

4.6 回用水泵房

回水池、回用水泵房及1#变配电室合建,尺寸为 $74.4\text{ m}\times 41.2\text{ m}\times 5.5\text{ m}$ 。泵房设置臭氧催化氧化池反洗水泵3台(2用1备), $Q=1\,400\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$, $N=90\text{ kW}$ 。设置回用水泵4台(3用1备), $Q=1\,080\text{ m}^3/\text{h}$, $H=400\text{ kPa}$, $N=190\text{ kW}$,变频控制。再生水供给新区用于道路浇洒、绿化灌溉、景观用水、建筑杂用水及河道补水。

5 运行效果

再生水厂于2019年底建设完成,2020年初进行调试,同年7月进行试运行。试运行期间实际水量负荷约为设计水量的60%,MBR生化组合池运行其中一个系列,实际进、出水水质见表4。可见,在进水水质短期超过设计限值的情况下,出水仍能稳定达标,通过投加外部碳源,出水TN保持在 10 mg/L 以下。实际经营成本 $2.26\text{ 元}/\text{m}^3$,其中包括电费 $0.73\text{ 元}/\text{m}^3$,其他药剂费、污泥处置费、设备维修费等 $1.53\text{ 元}/\text{m}^3$ 。试运行期间外部碳源采用10%乙酸钠溶液,投加量 20 mg/L ,臭氧投加量 5 mg/L ,主要用于脱色。

表4 实际进、出水水质

Tab.4 Actual influent and effluent quality

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	BOD ₅	COD	SS	TN	NH ₃ -N	TP
进水水质	78.4~285.6(141.2)	106.1~762.8(321.3)	69.7~691.8(350.6)	35.6~76.8(62.8)	24.2~62.3(48.9)	3.6~15.4(7.4)
出水水质	0.44~2.82(1.96)	8.2~17.4(15.9)	1.6~4.5(3.6)	1.67~9.11(7.62)	0.12~0.94(0.54)	0.11~0.16(0.13)

注: 括号内为平均值。

6 结语与讨论

北京某再生水厂采用分段进水多级AO+MBR+臭氧催化氧化工艺,实际运行出水水质稳定达到北京市地标A标准(准Ⅲ类标准)。预处理采用网板式细格栅、超细格栅,可有效去除纤维物质,设计中将

曝气沉砂池停留时间延长至 8 min ,在去除油脂和无机砂砾方面有较好效果。另外实际运行中,通过配水渠和可调堰门调整各段进水比例的方式难以精确控制,将来可考虑应用阀门自动控制调节进水量。分段进水多级AO和MBR的联合应用工艺适用

于厂区占地受限、低碳氮比进水、高排放标准的再生水厂,能优先保证总氮的去除,但生物除磷效果受限,强化生物除磷、开展反硝化除磷研究及侧流磷沉淀的应用可作为未来的工艺改进方向。

参考文献:

- [1] 董良飞,刘珊,周铭威,等. MBR工艺在无锡三座城市污水厂中的应用分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(4):20-23.
DONG Liangfei, LIU Shan, ZHOU Mingwei, *et al.* Application of MBR technology in three WWTPs in Wuxi [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(4):20-23 (in Chinese).
- [2] 李伟,卢东昱,陈永玲,等. 北京市某污水厂基于准地表Ⅲ类水体出水标准的工程实践[J]. 中国给水排水, 2017, 33(2):56-60.
LI Wei, LU Dongyu, CHEN Yongling, *et al.* Engineering practice of a WWTP in Beijing City based on quasi-class Ⅲ criteria of surface water [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(2):56-60(in Chinese).
- [3] 贾建伟,党晓宏,李建洋,等. AMAO(多级AO)工艺在污水厂扩建工程中的应用及运行[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4):63-66.
JIA Jianwei, DANG Xiaohong, LI Jianyang, *et al.* Application and operation of AMAO technology (multi-stage AO) for expansion project of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4):63-66(in Chinese).
- [4] 李一龙. 以流域治理为目标导向的城乡过渡区污水处理厂设计[J]. 净水技术, 2020, 39(12):36-42.
LI Yilong. Design of wastewater treatment plant for watershed management-oriented in urban-rural transition area [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(12):36-42(in Chinese).
- [5] 冯硕,李振川,冯凯. 北京市中心城区再生水厂技术路线总结及探讨[J]. 给水排水, 2020, 46(2):20-24.
FENG Shuo, LI Zhenchuan, FENG Kai. Summarization and discussion of reclaimed water treatment process in Beijing central area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(2):20-24(in Chinese).
- [6] 冯云刚,冯凯,张伟. MBR-O₃工艺用于高排放标准污水处理厂的设计案例[J]. 给水排水, 2020, 46(3):79-81.
FENG Yungang, FENG Kai, ZHANG Wei. MBR-O₃ process for the design of high discharge standards wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(3):79-81(in Chinese).
- [7] 朱强. 膜生物反应器与臭氧活性炭组合工艺在高品质再生水厂的应用[J]. 净水技术, 2020, 39(12):30-35.
ZHU Qiang. Application of combined process of MBR and ozone-BAC in high quality reclaimed water plant [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(12):30-35(in Chinese).
- [8] 张玲玲,尚巍,孙永利,等. 高标准下天津市津沽污水处理厂提标改造效果分析[J]. 给水排水, 2019, 45(10):37-41.
ZHANG Lingling, SHANG Wei, SUN Yongli, *et al.* Analysis of the upgrading effect of Tianjin Jinggu wastewater treatment plant under high discharge standard [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(10):37-41(in Chinese).
- [9] 王琦,樊耀波. 膜生物反应器在污水处理与回用中的能耗分析[J]. 膜科学与技术, 2012, 32(3):95-102.
WANG Qi, FAN Yaobo. Analysis of energy consumption in membrane bioreactors for wastewater treatment and reuse [J]. Membrane Science and Technology, 2012, 32(3):95-102(in Chinese).
- [10] 杨敏,颜秀勤,孙雁,等. A²/O-MBR工艺城镇污水处理厂能耗特征与运行优化[J]. 给水排水, 2016, 42(12):44-47.
YANG Min, YAN Xiuqin, SUN Yan, *et al.* Energy consumption and operation optimization of urban wastewater treatment plant with A²/O-MBR process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(12):44-47 (in Chinese).

作者简介:李一龙(1988—),男,北京人,大学本科,工程师,主要研究方向为水污染防治理论和技术。

E-mail:241746979@qq.com

收稿日期:2021-03-03

修回日期:2021-04-11

(编辑:孔红春)