

设计经验

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.02.007

复合型多级AO+臭氧MBBR用于准Ⅳ类混合污水厂

张鹏翔, 谭建国, 姜斌, 陈旭斌

(物产中大公用环境投资有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 浙江省某污水处理厂一期工程处理规模为 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 进水中市政污水、工业废水各占50%左右, 采用曝气沉砂池+复合型多级AO+高效沉淀池+臭氧接触MBBR+滤布滤池+次氯酸钠消毒工艺, 其中复合型多级AO结合了多级AO和Bardenpho工艺特点。运行结果表明, 当进水平均COD、TN、TP分别为366、34.7、6.25 mg/L时, 处理出水相应指标分别降至19、7.5、0.13 mg/L, 对应去除率分别为95%、78%、98%, 出水水质达到浙江省《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018)表2的准Ⅳ类要求。该工艺抗冲击能力强、出水稳定、处理效率高, 可用于出水标准高尤其是需深度去除COD及TN的混合污水处理厂的设计。

关键词: 多级AO; 地表水准Ⅳ类; 分段进水; 混合污水; 臭氧; 印染废水

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)02-0047-05

Application of Composite Multi-stage AO, Ozonation/MBBR in a Quasi-category IV Mixed Wastewater Treatment Plant

ZHANG Peng-xiang, TAN Jian-guo, JIANG Bin, CHEN Xu-bin

(Wuchan Zhongda Utility & Environment Investment Co. Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: The first phase of a sewage treatment plant in Zhejiang Province has a treatment capacity of $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, municipal sewage and industrial wastewater each account for about 50% of the influent. The main treatment process adopts the “aerated grit chamber + composite multi-stage AO process + efficient sedimentation tank + ozonation/MBBR + cloth-media filtration + sodium hypochlorite disinfection”. The composite multi-stage AO combines the advantages of the multi-stage AO and Bardenpho process. The operating results show that when the average COD, TN and TP of the influent are 366 mg/L, 34.7 mg/L and 6.25 mg/L, the corresponding effluent concentrations are decreased to 19 mg/L, 7.5 mg/L and 0.13 mg/L, with removal rates of 95%, 78% and 98%, respectively. The effluent quality meets the quasi-category IV requirements in table 2 of the *Discharge Standard for Major Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (DB 33/2169—2018) in Zhejiang Province. The process has strong impact resistance, stable effluent, and high treatment efficiency, making it suitable for the design of wastewater treatment plants with high effluent standards, especially those requiring deep removal of COD and TN for mixed sewage treatment.

Key words: multi-stage AO process; quasi-category IV standard of surface water; step-feed; mixed sewage; ozone; dyeing wastewater

基金项目: 浙江省科技厅重点研发计划项目(2018C03007)

1 工程概况

浙江某市工业发达,发展迅速,市域内4座污水厂实际污水处理量已饱和,结合城市节能减排、提高水资源利用率、改善城市环境质量的需要,其《市域总体规划》确立重新选址并整合新建一座混合污水处理厂,停用原有1座城市生活污水厂及1座印染工业污水厂,其他污水厂满负荷运行时超量部分污水一并进入该污水厂。新建污水厂一期设计规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,处理混合污水,其中工业废水与生活污水的比例约为1:1。污水厂出水水质执行浙江省《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018)表2要求和《城镇污水处理厂污染物排放标准(征求意见稿)》(环办函[2015]1782号)“特别排放限值”要求。设计进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NH ₄ ⁺ -N/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	色度/ 倍
进水	350	120	35	45	5	250	300
出水	30	6	1.5(3)	10(12)	0.3	5	15

注: 括号内数值为每年11月1日—次年3月31日执行标准。

2 污水处理重难点分析

① 工业废水占比较高,高峰期水量占比超过50%,主要有印染、制革、机械加工、新能源等行业废水。工业废水进入污水厂前虽已经过企业内预处理,但废水的成分依旧比较复杂。尤其是上游印染工业园区,大部分企业的废水经过生化+反渗透膜系统处理回用,排出部分为反渗透浓水,其水质难生物降解,且含盐量较高。

② 工业废水水量、水质季节性波动大。根据资料,2019年印染工业园区实际产生废水量约为 $1.741 \times 10^4 \text{ m}^3$,日均约 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中10月产生的废水量最大,达到 $236.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,平均 $7.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右。此外,加工型企业受市场影响,其废水水质及特征污染物变化也较大。

③ 排放标准要求高,COD、总氮深度处理压力较大。污水厂进水中所含难生物降解有机物超出标准限值,采用传统污水处理工艺,COD指标难以满足高标准要求;进水中BOD/TN比仅为2.67,深度

脱氮缺少碳源,要求设计采用高效且能充分利用原水碳源的脱氮工艺。

3 工艺技术路线

3.1 二级生化工艺

传统的A²/O工艺具有同步脱氮除磷功能,适用于脱氮除磷效率要求不高、常规流程即可达标的场合^[1]。地表水准Ⅳ类标准的实施对工艺脱氮除磷提出了更高的要求,为此研究者们开发了众多AO系统衍生工艺,其中多级AO和Bardenpho工艺在实践中取得了较好的效果^[2-5]。为此,生化段采用复合型的多级AO工艺,即在五段Bardenpho工艺基础上于前端增设预缺氧池,消除回流污泥中硝酸盐对厌氧区的不利影响;内回流前增设一级AO并设置多点进水,形成多级AO工艺,以充分利用废水中的碳源,提高脱氮效率、降低回流能耗;末段AO进一步强化脱氮并提高出水水质。该生化工艺结合了多级AO和Bardenpho工艺的优点,具体流程见图1。

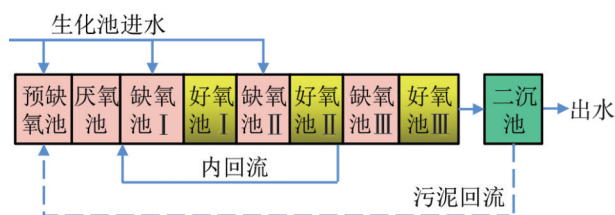


图1 复合型多级AO工艺流程

Fig.1 Flow chart of composite multi-stage AO process

3.2 三级深度处理工艺

复合型多级AO工艺对NH₄⁺-N、TN的去除率较高,因此深度处理的主要目的是去除SS、TP以及COD。根据对原有被整合污水厂的调研,市政污水厂及印染污水厂二级生化出水COD分别为20~30、60~70 mg/L,预测该工程二级生化出水COD约为30~50 mg/L,由于工业废水占比较高,故该部分COD为可溶性难生物降解有机物,采用常规混凝沉淀+过滤的深度处理工艺无法高效将其去除。原有的印染污水厂采用臭氧氧化工艺进行深度处理,COD去除率仅为20%~30%。为此,工艺设计比选了芬顿工艺,但该工艺存在出水电导率升高、产泥量大、有色度等缺陷,有可能对后期中水回用产生影响。综上,三级处理采用高效沉淀池+臭氧氧化MBBR+滤布滤池组合工艺,通过混凝沉淀的方式进一步去除SS、TP、COD,再利用臭氧氧化作用,氧化分解水中的有机物及其他还原性物质,同时臭氧氧化能使部

分难生物降解的有机物断链、开环,改变其生化特性,继而进一步通过生化作用去除该部分有机物质。考虑到臭氧MBBR段处理低量有机物,产生生物量较少,其出水采用滤布滤池直接过滤。

3.3 工艺流程

最终确定的工艺流程如图2所示。

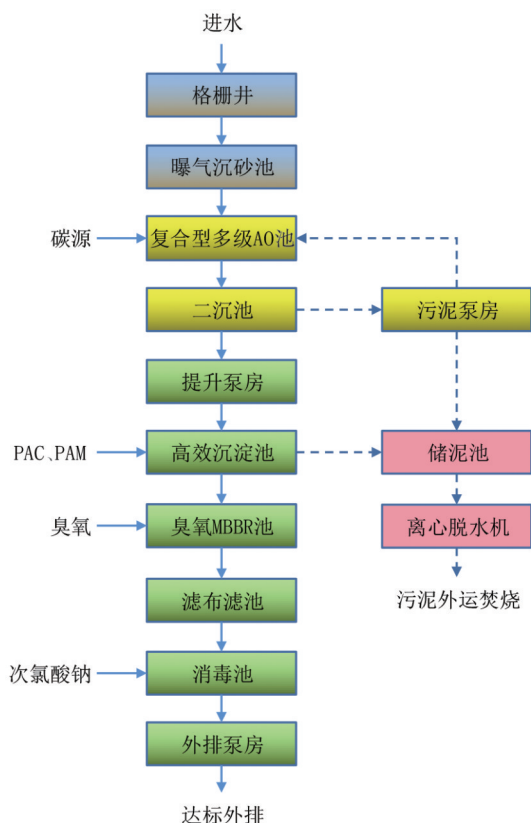


图2 污水处理工艺流程

Fig.2 Flow chart of wastewater treatment process

4 主要处理单元工程设计

4.1 格栅井及曝气沉砂池

格栅井及曝气沉砂池合建,市域内废水通过水量调配,由东、西片泵站提升至稳流格栅井,格栅井数量1座6组,一期工程装备其中4组,设计 Q_{\max} 为 $26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (考虑1.3的系数),每组渠道内分别设置循环耙式粗格栅(b 为10 mm)及阶梯孔板细格栅(b 为3.5 mm),设计过栅流速 v_{\max} 为0.62 m/s。

曝气沉砂池1座3组,一期工程装备其中2组,最大流量时水力停留时间为11.6 min,水平流速0.055 m/s,采用穿孔管曝气,配套4台罗茨风机, $Q=15 \text{ m}^3/\text{min}$, $H=40 \text{ kPa}$, $N=15 \text{ kW}$,3用1备。

4.2 复合型多级AO

生化池设计为复合型多级AO,由预缺氧池、厌

氧池、缺氧池Ⅰ、好氧池Ⅰ、缺氧池Ⅱ、好氧池Ⅱ、缺氧池Ⅲ、好氧池Ⅲ组成,平面布置如图3所示。设计规模 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设置2座,单座规模 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平面尺寸为 $145.6 \text{ m} \times 91.6 \text{ m}$,有效水深7.0 m,单座生化池设置为2组运行。设计平均污泥浓度3.5 g/L,污泥负荷 $0.038 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,反硝化速率 $0.031 \text{ kgNO}_3^-/\text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。预缺氧区、厌氧池、缺氧池Ⅰ、好氧池Ⅰ、缺氧池Ⅱ、好氧池Ⅱ、缺氧池Ⅲ、好氧池Ⅲ水力停留时间分别为0.6、2.0、2.4、3.6、2.4、3.6、3.4、3.8 h,总HRT为21.8 h。

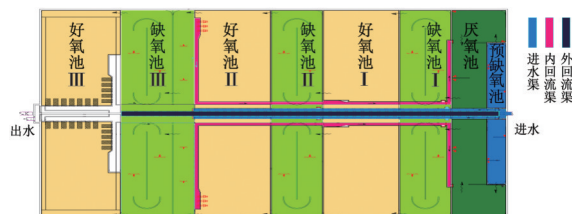


图3 复合型多级AO生化池布置形式

Fig.3 Layout of composite multi-stage AO tank

采用中央管渠设计,分别将进水管、回流管集约化布置,多点进水通过闸门调节。好氧池Ⅱ安装混合液回流泵3台,单台 $Q=1041 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=10 \text{ kPa}$ 、 $N=7.5 \text{ kW}$,变频调速,混合液回流比取50%~150%。

为提高二级生化处理效率,最大程度减轻深度处理负荷及运行成本,好氧池Ⅲ内嵌MBBR工艺,池内投加人造填料,材质为聚乙烯,密度为 $0.97 \text{ g}/\text{cm}^3$,比表面积为 $400 \sim 500 \text{ m}^2/\text{m}^3$,填料投配率为30%。

好氧池Ⅰ、Ⅱ采用盘式微孔膜曝气器,单组池5276个,膜片材质EPDM,托盘材质为PP,单盘曝气量 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。好氧池Ⅰ、Ⅱ由4台单级高速离心鼓风机供气,按两大两小配置,2台大型风机 $Q=400 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=80 \text{ kPa}$ 、 $N=690 \text{ kW}$,2台小型风机 $Q=200 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=80 \text{ kPa}$ 、 $N=350 \text{ kW}$ 。好氧池Ⅲ采用穿孔管曝气及搅拌,3台单级高速离心鼓风机供气,单台 $Q=320 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=78 \text{ kPa}$ 、 $N=540 \text{ kW}$,2用1备。

4.3 二沉池及污泥泵房

设置4座直径为56 m的周进周出辐流式沉淀池,最大流量时表面负荷为 $1.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,平均流量时表面负荷为 $0.85 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,回流污泥泵选用潜水泵,设6台,单泵 $Q=2200 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=100 \text{ kPa}$ 、 $N=110 \text{ kW}$,每3台泵设一根回流污泥管对应一座生化池,污泥回流比为50%~150%。剩余污泥泵采用3台潜水泵,2用1备,单泵 $Q=150 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=150 \text{ kPa}$ 、 $N=$

15 kW。

4.4 高效澄清池

设置5组高效澄清池,合建,总平面尺寸为90.6 m×27.3 m,池内水深6.6 m。单组池处理规模 4×10^4 m³/d,絮凝区停留时间7.5 min,斜板区表面负荷 $7.50\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,污泥浓缩区固体负荷 $5\sim 24\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,污泥回流比2%~5%。沉淀区下部排泥采用中心传动刮泥机,1台,Ø17.0 m,1.5 kW;采用3台凸轮转子泵进行排泥和污泥回流,单泵 $Q=60\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=200\text{ kPa}$ 、 $N=11\text{ kW}$ 。回流污泥泵连续工作,排泥泵间歇工作,沉淀排泥经污泥泵输送至污泥脱水车间进行脱水。斜管下设反冲气管,曝气量 $5\sim 10\text{ L}/\text{m}^2$ 。

4.5 臭氧MBBR池

臭氧接触池与MBBR池合建,设置1座4组,总平面尺寸91.0 m×67.9 m。臭氧接触池有效水深8 m,臭氧释放区水力停留时间0.5 h,臭氧氧化时间2.5 h。臭氧设计投加量45 mg/L,共配置5台氧气源臭氧发生器(100 kg/h),4用1备,臭氧浓度8%~10%,工作压力0.095 MPa,单台需气量910 m³/h(氧气),冷却水流量160 m³/h,功率800 kW,臭氧发生器外循环冷却水为深度处理后出水。

MBBR池有效水深7.6 m,停留时间2.6 h。池内投加人造填料,材质为聚乙烯,密度为0.97 g/cm³左右,比表面积400~500 m²/m³,填料投配率为30%,气水比为1.2:1,供气量为220 m³/min;供气采用6台空气悬浮离心风机,单台 $Q=55\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=85\text{ kPa}$ 、 $N=110\text{ kW}$,4用2备。

4.6 纤维滤布滤池

纤维滤布滤池1座6组,单组滤池平面尺寸8.8 m×4.0 m,池深4.7 m,水深3.6 m。每组滤池20片滤盘,滤盘直径3 m,过滤面积250 m²。正常滤速5.6 m/h,最大流量时滤速7.2 m/h。设24台反洗抽吸泵为滤盘清洗供水,单泵 $Q=50\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=70\text{ kPa}$ 、 $N=2.2\text{ kW}$ 。

5 运行效果分析

该工程于2021年7月正式投入运行,处理规模达到 $(15\sim 17)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,运行控制污泥回流比为100%,内回流比为150%。根据实际进水中碳、氮、磷比例分配多点进水,预缺氧池、缺氧池Ⅰ、缺氧池Ⅱ进水比例约(4~7):(3~0):3,外加碳源投加位置为缺氧池Ⅲ,运行结果良好,各污染物指标稳定

达标。

5.1 对有机物的去除效果

2023年1月—6月,污水厂进水COD波动范围为136~781 mg/L,平均值为366 mg/L;进水BOD₅波动范围为67~157 mg/L,平均值为96 mg/L,进水中含有较多的工业废水,平均B/C比仅为0.26,污水生化性较差。多级AO系统、混凝高效沉淀池、臭氧MBBR系统出水COD平均值分别为31、26、19 mg/L,对应的去除率分别为91%、16%、27%。上述系统出水COD超过30 mg/L的频率分别为64%、19%、0%,即污水经臭氧MBBR系统处理后有机物浓度可确保稳定在达标线以下。

5.2 对TP的去除效果

进水TP浓度波动较大,进水范围为2.42~13.51 mg/L,均值为6.25 mg/L,经过复合型多级AO的生化除磷作用,二沉池出水TP为0.75~2.03 mg/L,平均为1.38 mg/L,对应平均去除率为78%。高效沉淀池采用聚合氯化铝(PAC)作除磷剂,经滤布滤池过滤后出水总磷范围为0.05~0.22 mg/L,均值为0.13 mg/L,对应平均去除率为98%。

5.3 对TN及NH₄⁺-N的去除效果

污水厂进水TN范围为12.9~65.5 mg/L,均值为34.7 mg/L;进水NH₄⁺-N范围为8.49~38.6 mg/L,均值为25.4 mg/L。经过复合型多级AO工艺处理后,生化出水TN范围为5.2~9.7 mg/L,均值为7.5 mg/L;生化出水NH₄⁺-N范围为0.01~0.45 mg/L,均值为0.2 mg/L,相应的生化系统对TN、NH₄⁺-N的平均去除率分别为78%、99%。

5.4 总体除污效果

污水厂主要指标整体去除效果见表2。

表2 污水厂除污效果

Tab.2 Pollutant removal effect of the WWTP

污染物指标	COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP
平均进水/(mg·L ⁻¹)	366	34.7	25.4	6.25
平均出水/(mg·L ⁻¹)	19	7.5	0.2	0.13
平均总去除率/%	95	78	99	98

污水厂进水COD、TN、NH₄⁺-N、TP等指标波动均较大,实际出水仍能稳定达标且优于设计出水水质,说明系统具有较强的抗冲击能力及优秀的调控能力。由运营数据可知,进水B/C平均为0.26, BOD/TP平均为15.5, B/N平均为2.8,在此条件下,碳源成为TN、TP去除的主要制约因素,尤其在水质

波动的情况下,碳源存在较大缺口。运行中采用多点进水、缺氧池Ⅲ投加醋酸钠溶液的方式,平均碳源投加量约为25 mgCOD/L,实践证明复合型多级AO能充分利用原水中的碳源,结合后置反硝化的优点,根据总氮出水调节碳源投加量,在保障TN达标的同时节省运行费用。

5.5 存在问题讨论

复合型多级AO采用中央管渠布置进水渠道、内外回流渠道,并用堰门调节流量,在此条件下很难对各池进水(泥水)情况进行精确计量,缺少流量的数字化信息,对运行管理人员在调节分配流量时造成困扰,且不利于“智能污水厂”的建设。

氧气源臭氧发生器产生臭氧浓度约8%~10%,臭氧接触反应后尾气中含有较纯的氧气,直接排放造成浪费,增加运行成本。下一步应积极探寻氧气循环制臭氧措施实现氧气的高效利用。

6 结语

① 工业企业废水在企业内部预处理过程中通过生化反应消耗了绝大部分BOD,致使实际进水B/C比较低(一般小于0.3),采用常规的生化+混凝终沉工艺很难使COD满足地表水准Ⅳ类高标准排放要求。

② 实践表明,采用曝气沉砂+复合型多级AO生化池+二沉池+高效沉淀池+臭氧MBBR系统+滤布滤池+消毒组合工艺处理工业废水占比较高的混合污水,出水满足地表水准Ⅳ类标准,具有出水水质稳定、效率高的特点,起到了示范作用。

③ 采用臭氧MBBR工艺进一步去除难降解COD,可根据负荷及处理目标灵活调整臭氧投加量,COD去除量约为4~15 mg/L,实际生产中臭氧投加比例约为(1~2):1(臭氧量/COD去除量)。

④ 采用复合型多级AO池,兼具多级AO和Bardenpho工艺优点,工艺灵活,对进水水质适应性强,脱氮除磷效率较高,仅通过二级生化处理就能稳定达到TN<10 mg/L的要求,无需建造进一步的深度脱氮单元,节省造价。

参考文献:

[1] 王舜和,邓胜琳,姜宝媛. 多模式A²/O工艺的运行模

式与设计要点[J]. 水处理技术, 2014, 40(8): 107-110.

WANG Shunhe, DENG Shenglin, JIANG Baoyuan. Operation mode and design of multi-mode A²/O process [J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(8): 107-110(in Chinese).

[2] 李一龙,包宇,邸文正,等. 高排放标准下分段进水多级AO+MBR工艺的设计[J]. 中国给水排水, 2022, 38(4): 76-81.

LI Yilong, BAO Yu, DI Wenzheng, et al. Design of step-feed multi-stage AO+MBR process under high discharge standard [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(4): 76-81(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] 林达,赵询霞,覃晖. 改良Bardenpho-臭氧-BAF处理工业园区污水[J]. 中国给水排水, 2022, 38(14): 89-92.

LIN Da, ZHAO Xunxia, QIN Hui. Treatment of industrial park wastewater by modified Bardenpho, ozone oxidation and BAF process [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(14): 89-92(in Chinese).

[5] 虞佳庆,武丹丹,王海峰,等. 杭州城西污水厂提标改造实践与思考[J]. 中国给水排水, 2022, 36(16): 89-95.

YU Jiaqing, WU Dandan, WANG Haifeng, et al. Practice and thinking on upgrading of Hangzhou Chengxi WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2022, 36(16): 89-95(in Chinese).

作者简介:张鹏翔(1982—),男,安徽黄山人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水污染控制技术及项目管理。

E-mail:56274913@qq.com

收稿日期:2023-11-02

修回日期:2024-01-10

(编辑:丁彩娟)