

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.08.015

天津某高盐高排放标准污水厂提标改造工程设计

孙庆花¹, 张晓霞², 赵益华³, 陶 君³, 周家中¹, 门艳辉¹, 吴 迪¹

(1. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 3. 天津生态城水务投资建设有限公司, 天津 300457)

摘 要: 天津某沿海污水处理厂规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 进水含盐量较高, 2017 年进行提标改造, 要求出水水质稳定达到天津市地方标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/599—2015) A 标准。污水厂面临进水全盐量高抑制生物系统、生化池反硝化脱氮能力不足及占地受限、进水水温较低抑制硝化、难降解有机物含量较高使 COD 达标困难等问题。选择改良 Bardenpho-MBBR 工艺对生化池进行原位升级改造, 以强化系统脱氮效果, 同时提高生化段对高盐废水的抗冲击能力; 选择新建臭氧催化氧化系统, 以提高对难降解有机物的去除能力。改造后污水厂出水水质稳定达标, 系统脱氮能力大幅提升, 出水 TN 和氨氮分别低于 8.0 mg/L 和 1.5 mg/L , COD 稳定低于 30 mg/L , 应用效果良好。

关键词: 高盐污水; 高排放标准; 提标改造; 移动床生物膜反应器; Bardenpho; 高级氧化

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)08-0083-06

Design of a Wastewater Treatment Plant Upgrading Project with High Salinity Influent and High Discharge Standard in Tianjin

SUN Qing-hua¹, ZHANG Xiao-xia², ZHAO Yi-hua³, TAO Jun³, ZHOU Jia-zhong¹,
MEN Yan-hui¹, WU Di¹

(1. Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 3. Tianjin Eco-City Water Investment and Construction Co. Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: The treatment capacity of a coastal wastewater treatment plant (WWTP) in Tianjin is $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, and the influent contains high salinity. In 2017, upgrading and reconstruction of the WWTP was carried out, and the effluent water quality was required to meet level A limitations of Tianjin local *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (DB 12/599-2015). The WWTP faced with problems as follows: high influent total salinity inhibiting biological system, poor denitrification capacity of biochemical tanks with limited footprint, low influent water temperature inhibiting nitrification, high content of refractory organic matter and difficulty in meeting COD discharge limitation. The modified Bardenpho-MBBR process was selected to upgrade the biochemical tank in situ to strengthen the denitrification performance of the system and improve the impact resistance of the

biochemical section to high salinity wastewater. A new ozone catalytic oxidation system was selected to improve the removal ability of refractory organic matter. After the reconstruction, all the control indexes reached the discharge limitations stably, and the denitrification capacity of the system was greatly improved. TN and ammonia nitrogen in the effluent were less than 8.0 mg/L and 1.5 mg/L, respectively, and COD was always less than 30 mg/L, indicating that good removal performance was obtained.

Key words: high salinity wastewater; high discharge standard; upgrading and reconstruction; MBBR; Bardenpho; advanced oxidation

2015年,天津市发布新地方标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/599—2015),提出当污水厂设计处理规模 $>1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,需执行A标准。2017年,天津某沿海污水处理厂进行提标改造,但面临进水中全盐量高、难生物降解有机物含量大,且无新增用地等问题。提高污水处理系统的抗高盐冲击能力和难生物降解有机物处理能力,充分挖掘生物池原池处理能力成为本次提标改造的关键。

针对该污水厂的提标改造,进行了改造工艺的选择、改造技术路线的确定,并跟踪了改造后运行效果,以期同类型污水厂提标改造提供借鉴和参考。

1 项目概况

1.1 项目背景

天津某沿海污水处理厂设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进水由市政污水和化工废水组成,原核心工艺采用氧化沟式 A^2O +气浮滤池,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准。本次提标改造工程规模仍维持现有规模 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,变化系数为1.3,设计出水水质提升至天津市地方标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/599—2015)A标准。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

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

项目	COD	BOD ₅	SS	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
设计进水	200	60	220	37	41	4.5
设计出水	30	6	5	1.5(3)	10	0.3

注: 每年11月1日—次年3月31日执行括号内的排放限值。

1.2 改造难点与工艺选择

① 污水全盐量高,生物处理系统易遭受抑制

该污水厂位于海边,土地属于盐碱地,同区域的污水处理厂进水普遍存在全盐量高的特点,如天津的港东污水处理厂、唐山海港污水处理厂等,进水全盐量均在10 000 mg/L左右。该污水处理厂也具有相似的进水水质情况,进水全盐量为3 090~13 061 mg/L。研究表明^[1-2],高盐会导致细胞外渗透压高于细胞内部,造成细胞的质壁分离,降低细胞内酶活性,进而降低微生物的代谢活性;会引起细胞内氧化反应激增,对微生物细胞产生毒性作用等,进而对污水处理系统造成负面影响。而且每天的进水中全盐量是波动变化的,每一次剧烈的升高或降低都可能对生化系统造成冲击,影响生化系统运行的稳定性,造成出水氨氮难以稳定达标。普通的活性污泥在盐度高于5%时易发生污泥膨胀,处理效果不佳;而盐度低于5%时,进水盐度和负荷的波动也会使系统受到冲击。

国内外对高盐污水处理研究中,关于生物膜法探索较多^[3-5]。杨磊等^[6]采用移动床生物膜反应器(Moving bed biofilm reactor, MBBR)中试装置处理高含盐废水,对氨氮的去除率能高达90%。赵佳伟等^[7]的研究表明,当盐度 $\leq 20 \text{ g/L}$ 时,硝化生物膜反应器可直接启动;盐度 $> 20 \text{ g/L}$ 时,采用梯度盐度驯化法启动反应器,可在一个月左右获得成熟的硝化生物膜并使其获得较高的耐高盐冲击能力。工程应用表明^[8],氯离子冲击对于活性污泥的硝化性能影响明显,而对悬浮载体的硝化性能无明显影响。对该污水处理厂进行的中试结果表明,采用MBBR工艺,在氯离子含量达到12 g/L时,出水COD、氨氮和TN均值分别低于30、1.0和10 mg/L^[9]。由此可知,生物膜对高盐废水具有良好的抗冲击能力。因此本次提标改造工程,考虑利用生物膜应对高盐对生化处理系统的冲击。

② 生化池反硝化脱氮能力不足及占地受限

该污水厂占地受限,生化段只能原位提标改造,通过工艺措施强化脱氮。该污水厂进水 TN 浓度较高,且要求出水 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$, TN 去除率 $> 76\%$,已达到传统 A^2O 工艺脱氮的临界值,受工艺回流限制,难以稳定确保 TN 处理效果;且该污水厂进水 C/N 值较低,需外加碳源,若采用前缺氧回流脱氮方式,较高的内回流量既增加了运行电耗,还会导致大量的溶解氧进入缺氧段影响碳源利用率,增大碳源消耗。

Bardenpho 工艺应对 TN 去除率较高的情形具有较大优势。Bardenpho 在已有 A^2O 基础上,增加后置缺氧区和后置好氧区;前置缺氧区根据原水碳源情况设定内回流比,后置缺氧区根据出水标准定量投加碳源,降低了系统无意义的内回流,提高了外加碳源利用效率。结合该污水厂的特点,不能进行扩建,故考虑在已有生化系统内进行五段功能的分隔,以保障生化段出水氮稳定达标。

③ 进水水温较低抑制硝化

该污水处理厂冬季水温在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,低温条件下,细胞的流动性和酶活性减弱,使得微生物的代谢活性降低,影响生化系统的处理效率^[10]。有研究显示^[11],低温条件下污水厂出水氨氮不达标的主要原因为活性污泥泥龄过短,通过采用 MBBR 工艺延长污泥龄可显著提高低温条件下的硝化效果。国内外许多工程案例均表明 MBBR 工艺可有效应对冬季低温问题。位于挪威利勒哈默尔市的 Lillehammer 污水处理厂,冬季最低水温达到 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用 MBBR 工艺改造后,出水 $\text{TN} < 3 \text{ mg/L}$,已稳定运行 26 年^[12];位于挪威奥斯陆机场的 Gardermoen 污水处理厂,在冬季水温为 $6\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的不利条件下,出水氨氮为 0.26 mg/L , TN 均值为 2.16 mg/L ,已稳定运行 22 年^[12];天津某污水处理厂采用 MBBR 工艺进行提标改造后,在冬季 $9\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温条件下,污水处理厂出水能够稳定达到天津市地方标准的 A 标准^[13]。

④ 难降解有机物含量较高

分析现状出水水质, COD 出水平均值为 40.4 mg/L , 最大值 49 mg/L , 可以稳定达到一级 A 标准,但是难以达到 30 mg/L 的处理标准。因为现状出水已经经过了较长时间的二级处理,且采用延时曝气试验处理二级出水, COD 无明显降低,因此剩余 COD 绝大部分为溶解性难生物降解 COD, 导致出水

达标难度大。因此需在深度处理工艺中增设高级氧化工艺,以进一步去除有机污染物,保障出水 COD 达标。

近年来以臭氧和 Fenton 为代表的高级氧化技术应用较多。由于传统 Fenton 氧化法存在后续脱色处理等难题,因此臭氧氧化类技术更适合该污水厂。

Grebel 等^[14]的研究发现,在高盐环境下, $\cdot\text{OH}$ 可能与废水中的氯离子发生一系列反应,生成活性偏弱的氯自由基,从而影响有机污染物的降解。Silva 等^[15]应用臭氧对染料脱色时发现,当染料废水中 NaCl 浓度超过 40 g/L 时臭氧分子的传质速率受到明显的抑制,随着盐浓度的升高,臭氧在水体中的溶解度会下降,从而使染料的降解速率下降。袁瑞霞^[16]的研究发现,酸性条件下, $\text{ClOH}^{\cdot-}$ 易与 H^+ 反应生成 Cl^- 和 H_2O , 并进一步转化为 $\text{Cl}_2^{\cdot-}$, 因此 Cl^- 对羟基自由基的淬灭作用较大,对染料降解表现出更强的抑制作用;而碱性条件下, $\text{ClOH}^{\cdot-}$ 较易分解为 $\cdot\text{OH}$ 和 Cl^- , Cl^- 对有机物降解的抑制作用较小。通常臭氧直接氧化降解 1 mg/L 的 COD 需要 $3\sim 4 \text{ mg/L}$ 的臭氧,而臭氧催化氧化技术仅需要 $0.75\sim 1.50 \text{ mg/L}$ 的臭氧,可以大大节省运行成本。研究表明^[17],催化臭氧分解速率高于单独臭氧分解速率,在相同时间内催化剂能促进臭氧分解产生更多的 $\cdot\text{OH}$, 可有效提高废水的处理效率。已有工程案例表明^[18-22],臭氧催化氧化能有效脱除高含盐废水中的难降解有机物,并且可以大大降低臭氧的投加量。因此,本工程深度处理选择新建臭氧催化氧化系统来确保出水 COD 达标。

综合以上分析,针对脱氮,该污水处理厂拟采用 MBBR 技术对生化段进行原位提标改造,在不扩建池容的情况下,将 A^2O 工艺升级为改良 Bardenpho 工艺,以满足脱氮需求;深度处理在原有气浮滤池工艺之后增加臭氧催化氧化工艺,以满足对 COD 处理的要求。

1.3 改造方案路线确定

该污水厂本次提标改造的工艺方案为:粗格栅及提升泵房+细格栅及旋流沉砂池+改良 Bardenpho-MBBR+二沉池+气浮滤池+臭氧催化氧化+紫外消毒。

原预处理工艺不变,改造生化段,增加高级氧化,改造后工艺流程如图 1 所示。

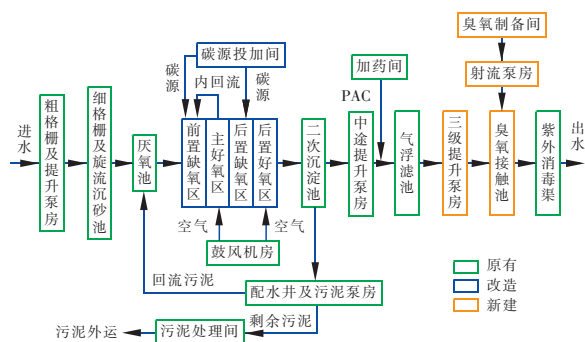


图1 改造后的工艺流程

Fig. 1 Process flow chart after transformation

2 工程设计

2.1 改造生物池

共改造4座氧化沟形式的生物池。生物池有效水深4.5 m,总池容为89 100 m³,池容保持不变,重新划分生物池内部功能区域形成AAOAO工艺,并在前主好氧区内投加SPR_Ⅲ型悬浮载体,设计硝化负荷 $\geq 0.11 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

好氧MBBR区采用循环流动池型,根据氨氮浓度控制DO在2~4 mg/L之间,混合液悬浮固体浓度MLSS为4 500 mg/L。在前置缺氧区和后置缺氧区增加碳源投加点,根据进出水TN含量合理投加碳源。

2.2 新建臭氧高级催化氧化系统

① 臭氧接触池

新建一座臭氧接触池,为钢筋混凝土结构矩形水池,与新建三级提升泵房合建。尺寸为33.3 m × 28.6 m × 11.6 m,设计流量为1.50 m³/s,水力停留时间为1 h,其中臭氧催化氧化反应时间为55 min,脱气时间为5 min。

主要设备有高效臭氧溶气装置16套, $N=0.50 \text{ kW}$,材质为不锈钢904;均相催化反应器4套, $N=12 \text{ kW}$,外壳材质为不锈钢304。

② 射流泵房

新建一座射流泵房,进行臭氧与污水的充分混合,尺寸为28.6 m × 6.8 m × 9.5 m。配套耐氯离子的离心泵9台(8用1备), $Q=560 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=240 \text{ kPa}$, $N_{\text{轴}}=55 \text{ kW}$ 。

③ 臭氧制备间

新建一座臭氧制备间,位于臭氧接触池上方,尺寸为28.6 m × 12 m × 6.0 m。配备臭氧发生器2台, $Q=86.5 \text{ kg/h}$, $N=857 \text{ kW}$ 。配套尾气破坏器、内循环水泵、外循环水泵、臭氧浓度仪、流量计、臭氧泄漏仪等设备。

④ 气源系统

液氧储罐2台, $V=50 \text{ m}^3$,液氧气化器1套。

2.3 新建三级提升泵房

新建一座三级提升泵房。设计流量为1.50 m³/s。配套潜水轴流泵4台(3用1备,其中1台变频), $Q=502 \text{ L/s}$, $H=30 \text{ kPa}$, $N_{\text{轴}}=30 \text{ kW}$ 。根据集水池水位,由PLC自动控制,水泵按顺序轮值运行,同时现场设手动控制。

改造一座尺寸为18 m × 10 m × 6 m的碳源投加间,主要包含搅拌器2台, $N=0.75 \text{ kW}$;耐腐蚀液下泵2台, $Q=35 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=90 \text{ kPa}$, $N=1.50 \text{ kW}$;隔膜计量泵6台(4用2备),全部变频, $Q=0 \sim 3 000 \text{ L/h}$, $H=400 \text{ kPa}$, $N=1.50 \text{ kW}$ 。

3 运行效果

该污水处理厂提标改造工程于2017年顺利完工,实际进、出水水质如表2所示。

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	全盐量
进水	179.42 ± 16.01	71.13 ± 6.74	171.67 ± 7.97	26.39 ± 2.14	37.78 ± 7.05	3.51 ± 0.44	6 573 ± 1 078
生化段出水	45.44 ± 3.62	3.87 ± 0.46	14.55 ± 2.76	1.05 ± 0.06	6.35 ± 1.21	0.72 ± 0.13	6 548 ± 1 046
总出水	23.21 ± 2.89	3.57 ± 0.54	4.12 ± 0.35	1.04 ± 0.07	6.10 ± 1.06	0.26 ± 0.03	6 538 ± 971

由表2可见,经过改良Bardenpho + MBBR工艺改造生化段和增加臭氧催化氧化深度处理工艺的提标改造后,污水厂各控制指标均稳定达到天津市地方标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/599—2015)中A标准。经过生化段原位MBBR改造,脱氮效果良好,出水氨氮<1.5 mg/L, TN <

8.0 mg/L,生化段TP平均去除率达到79.5%。经过臭氧催化氧化工艺,生化段出水COD进一步降低,稳定低于30 mg/L。可见,针对改造难点,MBBR工艺和臭氧催化氧化工艺都能够发挥实际作用,针对性地解决了污水厂面临的难题,保障了出水水质稳定达标。

本项目吨水电耗为 $0.501 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。投加24%的乙酸钠作为碳源,日均使用量 46.32 t/d ,按 BOD_5 当量为 0.78 计算,折合投加 BOD_5 浓度为 110.78 mg/L 。使用聚合氯化铝(PAC)作为除磷药剂,日均使用量 39.39 t/d ,折算 Al^{3+} 的投加浓度为 0.98 mmol/L 。深度处理臭氧投加量为 8.80 mg/L 。

4 结论

针对高盐胁迫下高排放标准污水厂提标改造,该污水厂采用改良 Bardenpho + MBBR 对现有生物池进行原位改造保障脱氮,并在深度处理段增加臭氧催化氧化工艺保障出水 COD 达标。改造后出水指标稳定达到天津市地方排放标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/599—2015)中 A 标准。改良 Bardenpho + MBBR 工艺的应用提高了生化处理系统的脱氮能力,并显著提升了系统的抗高盐冲击性能,出水氨氮和 TN 分别稳定达到 1.5 mg/L 和 8.0 mg/L 以下。深度处理增加臭氧催化氧化工艺,使污水中难生物降解有机物被充分降解,出水 COD 稳定低于 30 mg/L ,应用效果良好。

参考文献:

- [1] 蔡涛. 好氧颗粒污泥生物脱氮除磷对盐度的响应[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(6): 50–52, 66.
CAI Tao. Response of aerobic granular sludge biological nitrogen and phosphorus removal to salinity [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018, 44(6): 50–52, 66 (in Chinese).
- [2] 李明, 张思, 张建清, 等. 温度、盐度和 pH 对仿刺参体腔细胞活性氧产生的影响[J]. 水产科学, 2016, 35(4): 346–351.
LI Ming, ZHANG Si, ZHANG Jianqing, et al. Effects of water temperature, salinity and pH on production of ROS by coelomocytes of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) [J]. Fisheries Science, 2016, 35(4): 346–351 (in Chinese).
- [3] 吕宝一, 谢冰, 邵春利, 等. 两段 A/O 生物接触氧化法处理高盐有机废水研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(1): 102–104, 108.
LÜ Baoyi, XIE Bing, SHAO Chunli, et al. Treatment of saline organic wastewater by two-stage A/O biological contact oxidation process [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(1): 102–104, 108 (in Chinese).
- [4] 韦朝海, 王文祥, 吴超飞. 射流循环厌氧流化床两相厌氧处理高浓度硫酸盐有机废水[J]. 化工学报, 2007, 58(1): 205–211.
WEI Chaohai, WANG Wenxiang, WU Chaofei. Two-phase anaerobic digestion process for treating high concentration sulfate-organic wastewater with jet-loop anaerobic fluidized bed reactor [J]. CIESC Journal, 2007, 58(1): 205–211 (in Chinese).
- [5] 李坤, 徐军, 云干, 等. 复合耐盐微生物菌剂强化 MBBR 工艺处理高盐废水[J]. 环境工程学报, 2015, 9(6): 2829–2834.
LI Kun, XU Jun, YUN Gan, et al. Treatment of high salt wastewater in MBBR process strengthened by complex salt-tolerant microorganism [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(6): 2829–2834 (in Chinese).
- [6] 杨磊, 徐志远, 强成良. MBBR 工艺对高含盐废水中氨氮的硝化效果研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(13): 88–90.
YANG Lei, XU Zhiyuan, QIANG Chengliang. Nitrification of ammonia nitrogen in high salinity wastewater by MBBR process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(13): 88–90 (in Chinese).
- [7] 赵佳伟, 徐艳梅, 冯丽娟, 等. 盐度胁迫下 MBBR 系统硝化性能及生物膜特性[J]. 中国给水排水, 2015, 31(9): 6–10.
ZHAO Jiawei, XU Yanmei, FENG Lijuan, et al. Nitrification performance and biofilm characteristics under salinity stress in sequencing batch moving bed biofilm reactor [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(9): 6–10 (in Chinese).
- [8] 栾志翔, 李志伟, 王江宽, 等. 北方某污水处理厂抗氯离子冲击效果分析[J]. 给水排水, 2020, 46(1): 32–38.
LUAN Zhixiang, LI Zhiwei, WANG Jiangkuan, et al. Effectiveness analysis of anti-chloride ion shock in a wastewater treatment plant in northern China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(1): 32–38 (in Chinese).
- [9] 吴迪, 刘曙, 肖永辉. MBBR 处理高盐废水中试研究[J]. 给水排水, 2018, 44(8): 74–78.
WU Di, LIU Shu, XIAO Yonghui. Pilot study on high salt wastewater by MBBR [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(8): 74–78 (in Chinese).
- [10] DELATOLLA R, YOUNG B, STINTZI A. Application of the MBBR technology to achieve nitrification below 1°C : biofilm and microbiome analysis [C] // FICWTM. Frontiers International Conference on Wastewater

- Treatment and Modelling. Cham: Springer, 2017: 513 – 517.
- [11] 郑志佳, 白华清, 孟涛, 等. 低温下 MBBR 强化硝化原理分析和应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(23): 6 – 11.
- ZHENG Zhijia, BAI Huaqing, MENG Tao, *et al.* Principle analysis and application of MBBR enhanced nitrification at low temperature [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(23): 6 – 11 (in Chinese).
- [12] RUSTEN B, ØDEGAARD H. Design and operation of moving bed biofilm reactor plants for very low effluent nitrogen and phosphorus concentrations [J]. Water Practice, 2012, 1(5): 1 – 13.
- [13] 刘强, 王泰, 沈淳, 等. MBBR 工艺用于污水厂提标改造的低温运行效果[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13): 7 – 13.
- LIU Qiang, WANG Tai, SHEN Bo, *et al.* Operation effect of MBBR applied in upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant in Tianjin at low temperature [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 7 – 13 (in Chinese).
- [14] GREBEL J E, PIGNATELLO J J, MITCH W A. Effect of halide ions and carbonates on organic contaminant degradation by hydroxyl radical-based advanced oxidation processes in saline waters[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(17): 6822 – 6828.
- [15] SILVA A C, PIC J S, JR G L S, *et al.* Ozonation of azo dyes (Orange II and Acid Red 27) in saline media [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 169(1/2/3): 965 – 971.
- [16] 袁瑞霞. 基于自由基反应的高盐染料废水降解动力学及有机卤代物(AOX)生成机制研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- YUAN Ruixia. Free Radicals-based Degradation Kinetics and AOX Formation Mechanisms in the Treatment of High Salinity Dye Wastewater [D]. Shanghai: Donghua University, 2012 (in Chinese).
- [17] 任明, 孙淑英, 金艳, 等. 催化臭氧氧化法处理煤化工高盐废水[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 54 – 59.
- REN Ming, SUN Shuying, JIN Yan, *et al.* Treatment of high-salt wastewater from coal chemical industry by catalytic ozone oxidation [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(8): 54 – 59 (in Chinese).
- [18] 李文国, 战树岩, 刘佩春. 电磁(EM)催化高级氧化用于桥东污水处理厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2014, 30(10): 89 – 91.
- LI Wenguo, ZHAN Shuyan, LIU Peichun. Application of EM advanced catalytic oxidation technology to upgrading and reconstruction of Shijiazhuang Qiaodong WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(10): 89 – 91 (in Chinese).
- [19] 王瑞, 夏文辉, 原建光. MBBR + 臭氧电磁催化氧化用于污水处理厂提标扩建[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 86 – 89.
- WANG Rui, XIA Wenhui, YUAN Jianguang. MBBR + ozonation together with electromagnetic catalytic oxidation for upgrading project of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 86 – 89 (in Chinese).
- [20] 栗文明, 白永刚, 周军, 等. 臭氧催化氧化应用于工业园区污水处理厂深度处理工艺的选择及设计[J]. 给水排水, 2019, 45(5): 90 – 93.
- LI Wenming, BAI Yonggang, ZHOU Jun, *et al.* Selection and design of catalytic ozonation in wastewater advanced treatment of industrial park [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(5): 90 – 93 (in Chinese).
- [21] 何灿, 黄祁, 张力磊, 等. 催化臭氧氧化深度处理高含盐废水的工程应用[J]. 工业水处理, 2019, 39(11): 107 – 109.
- HE Can, HUANG Qi, ZHANG Lilei, *et al.* Application of catalytic ozonation technology in advanced treatment of high-salinity wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(11): 107 – 109 (in Chinese).
- [22] 马栋, 段锋. 煤化工高盐废水臭氧催化氧化脱除 COD [J]. 环境工程学报, 2020, 14(4): 984 – 992.
- MA Dong, DUAN Feng. COD removal from high-salt wastewater in coal chemical industry by ozone catalytic oxidation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(4): 984 – 992 (in Chinese).
-
- 作者简介:** 孙庆花(1989 –), 女, 山东莒县人, 硕士, 工程师, 主要从事污水处理工艺研发与设计工作。
- E – mail:** sunqinghua@qdspr.com
- 收稿日期:** 2020 – 11 – 16
- 修回日期:** 2021 – 01 – 04

(编辑: 孔红春)