

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.01.011

催化臭氧氧化联合BAC工艺深度处理石化废水

郑浩¹, 许丹宁¹, 代蓓蓓², 孙井梅¹

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 中石化天津分公司水务部, 天津 300271)

摘要: 针对石化废水难降解的问题,采用活性炭作为臭氧氧化单元的催化剂,并串联生物活性炭(BAC)单元,从水质变化、有机物分子质量分布和有机物结构等角度解析催化臭氧氧化对石化废水中难降解有机物的降解特性,以及对后续BAC单元出水水质的影响机理。结果表明,活性炭催化对臭氧氧化去除COD和UV₂₅₄均有一定的促进作用,且对后续BAC单元去除COD和UV₂₅₄的促进效果更明显,其中,对UV₂₅₄的去除效果影响更大,当臭氧投加量为15和20 mg/L时,催化臭氧氧化对UV₂₅₄的去除率比臭氧氧化分别提升9.4%和11.5%,后续BAC单元对UV₂₅₄的去除率比无催化条件时分别提升17.0%和15.4%;催化条件对进水有机物分子质量分布的改变在O₃投加量为15 mg/L时更明显,相比臭氧氧化,催化臭氧氧化对进水中不可吹扫有机碳(NPOC)的去除率提升5.4%,出水中分子质量<1 ku的NPOC比例增加6%;进水经催化臭氧氧化后,有机物结构显著改变,酚类、链烷烃类及不饱和链酯类等难生物降解有机物的种类明显减少。

关键词: 催化臭氧氧化; 生物活性炭; 石化废水; 难降解有机物; 分子质量分布; 有机物结构

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2023)01-0073-07

Catalytic Ozonation Combined with BAC Process for Advanced Treatment of Petrochemical Wastewater

ZHENG Hao¹, XU Dan-ning¹, DAI Bei-bei², SUN Jing-mei¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Department of Water Affairs, Tianjin Petrochemical Company of Sinopec, Tianjin 300271, China)

Abstract: The ozonation (activated carbon as catalyst) tandem along with biological activated carbon (BAC) was applied to degrade refractory petrochemical wastewater. From the perspectives of water quality change, molecular weight distribution and structure of organic matter, the degradation of refractory organic matter in petrochemical wastewater by catalytic ozonation was investigated and its influence on the effluent quality of subsequent BAC unit was analyzed. The catalytic ozonation had a certain enhancement effect on the removal of COD and UV₂₅₄, and the enhancement effect on the subsequent BAC unit was more obvious, especially for UV₂₅₄. When the ozone dosage was 15 mg/L and 20 mg/L, compared with the ozonation without catalyst, the removal rate of UV₂₅₄ by catalytic ozonation was increased by 9.4% and 11.5%, and the removal rate of UV₂₅₄ by subsequent BAC unit was increased by

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07203-011)

通信作者: 孙井梅 E-mail: jmsun@tju.edu.cn

17.0% and 15.4%, respectively. The change of catalytic condition on molecular weight distribution of organic matter in influent was more obvious when the dosage of ozone was 15 mg/L. Compared with ozonation, the catalytic ozonation increased the removal rate of NPOC by 5.4%, and the proportion of NPOC with molecular weight less than 1 ku increased by 6%. After the influent was catalyzed by ozonation, the structure of organic matters was significantly changed, and the types of refractory organics such as phenolic, alkanes and unsaturated chain esters were significantly reduced.

Key words: catalytic ozonation; biological activated carbon; petrochemical wastewater; refractory organic matter; molecular weight distribution; structure of organic matter

石化产业是中国的支柱产业,这些行业生产过程中必然会产生大量石化废水,石化废水中的污染物组成复杂且部分污染物毒性较大,若直接排放,势必会对受纳水体及水生生物造成潜在危害^[1]。并且其中的杂环物、酚类物、不饱和链酯等物质难以被生物降解,导致其可生化性较差,因此如何深度处理石化废水成为一个重要问题。

近年来,高级氧化工艺在难降解废水深度处理领域的研究不断深入,主要有臭氧氧化法、Fenton法、电化学氧化法和光化学氧化法等^[2-3],其中关于臭氧氧化工艺的研究较为广泛和成熟。臭氧具有强氧化性,可将废水中的芳香族、酚类等大分子难降解物质氧化为小分子物质,也可以直接分解一部分小分子物质,使其可生化降解性能得以有效增强^[4]。然而,由于臭氧在实际应用中存在利用率不高的问题,导致单独臭氧氧化工艺难以完全发挥臭氧的氧化作用,废水中难降解污染物不能被完全氧化分解,因此增强臭氧的利用效率对臭氧氧化工艺的应用具有重要意义。

已有的研究表明,通过对臭氧氧化体系进行催化可使得体系中产生更多的 $\cdot\text{OH}$,从而增强臭氧的利用效率^[5],提高大分子难生物降解物质的降解效能^[6-7]。但目前对催化臭氧氧化工艺的探究大多集中在水质处理方面,对其作用机理的探讨不够深入。近年来的研究发现活性炭可以催化臭氧形成 $\cdot\text{OH}$ ^[8-9],强化体系中难生物降解物质的降解,并进一步削弱有毒有害污染物的毒性^[10];此外,依附聚集在活性炭上的有机物可直接被臭氧降解,活性炭的吸附性能可以实现还原与重生^[11]。笔者以华北某石化企业污水处理厂尾水为处理对象,采用活性炭为催化剂对臭氧氧化单元进行催化,并串联生物活性炭(BAC)单元,分别从水质变化、分子质量

(MW)分布及有机物结构等角度,解析催化臭氧氧化对石化废水难降解有机物的降解特性,以及对后续BAC单元出水的作用机理,旨在为增强石化废水处理效果提供可借鉴的思路。

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行方法

试验装置见图1,包括臭氧氧化单元和BAC单元。臭氧氧化单元主要包括:臭氧发生器,以氧气为气源,进气流量为1 L/min,最大产量为10 g/L;臭氧接触柱及缓冲柱,材质为有机玻璃,内径为0.2 m、高为2.5 m;臭氧破坏装置。BAC柱填充石油化工专用桃壳活性炭(粒径为2~4 mm),内径为0.2 m、高为2.5 m。在臭氧接触单元中添加石油化工专用桃壳活性炭作为催化剂,填充量为10 L。试验前期优化了臭氧单元接触时长和BAC单元空床滞留时长,试验期间控制臭氧单级接触时长为40 min, BAC单元空床滞留时长为1.5 h。

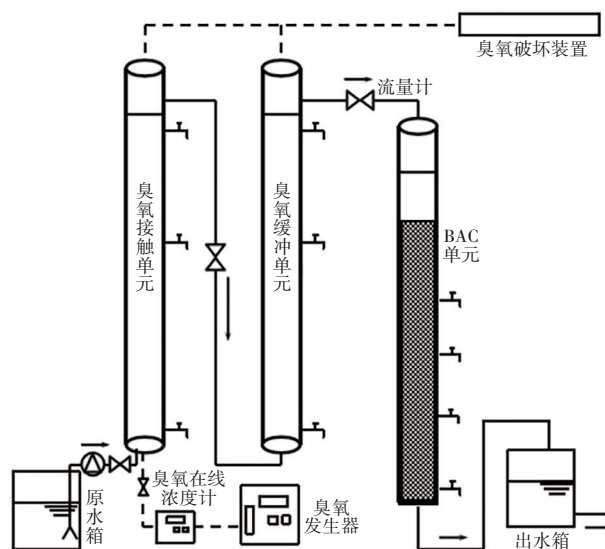


图1 试验装置

Fig.1 Schematics of experimental device

1.2 试验用水

试验用水为华北某石油化工污水处理厂的净化车间处理尾水,该污水厂进水主要为炼油厂减压电脱盐废水。试验用水水质如下:COD为32.6~46.1 mg/L(均值为39.0 mg/L),BOD₅为2.9~4.5 mg/L(均值为3.8 mg/L),TN为19.2~36.4 mg/L(均值为31.2 mg/L),NH₄⁺-N为1.01~4.61 mg/L(均值为2.65 mg/L),pH为6.7~8.7(均值为8.0)。

1.3 分析项目与方法

臭氧的产气及尾气采用气相臭氧检测仪测定(测量范围为0.001~800 mg/L,精度为0.001 mg/L);臭氧柱出水中的臭氧采用液相臭氧检测仪测定(测量范围为0.5~20 mg/L,精度为0.01 mg/L)。

有机物的分子质量分布采用容积为50 mL、过滤面积为1.77×10⁻³ m²的Models 8050超滤杯确定。将水样pH调整到7.0左右,过0.45 μm滤膜,随后滤液以并联方式依次流经截留分子质量分别为100、30、10、5和1 ku的Millipore新型再生纤维素膜,按照各分组不可吹扫有机碳(NPOC)在未超滤分组NPOC中所占比例计算各分组的质量分数^[12]。

有机物种类采用GC-MS方法检测^[13]。

COD采用重铬酸钾法测定;UV₂₅₄采用分光光度法测定;NPOC采用TOC-L分析仪测定。

2 结果与讨论

2.1 COD的去除效果

试验设置了两种O₃投加量:15、20 mg/L,探究催化臭氧氧化对进水COD和UV₂₅₄的降解特性及对后续BAC单元出水水质的影响(分别稳定运行3 d)。图2为对COD的去除情况。

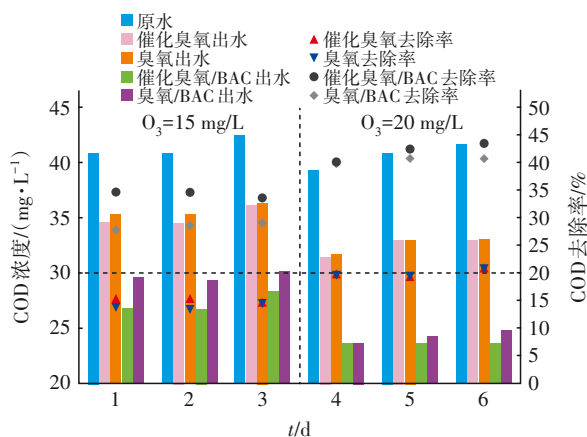


图2 COD的去除效果

Fig.2 Removal effect of COD

由图2可知,当O₃投加量为15 mg/L时,在无催化条件下,进水经臭氧段处理后COD平均减少5.7 mg/L、平均去除率为14.3%,经臭氧/BAC工艺处理后COD平均减少11.7 mg/L、平均去除率为29.3%;而在催化条件下,催化臭氧段对COD的平均去除率比臭氧段提高1.3%,催化臭氧/BAC工艺对COD的平均去除率比臭氧/BAC工艺提高5.8%。当O₃投加量为20 mg/L时,在无催化条件下,进水经臭氧段处理后COD平均减少7.9 mg/L、平均去除率为19.8%,经臭氧/BAC组合工艺处理后COD平均减少16.4 mg/L、平均去除率为41.0%;而在催化条件下,催化臭氧段对COD的平均去除率比臭氧段提高0.3%,催化臭氧/BAC工艺对COD的平均去除率比臭氧/BAC工艺提高1.6%。可见,催化条件对臭氧氧化去除COD具有一定的促进效果,在O₃投加量为15和20 mg/L两种条件下,装置出水COD均可稳定在30 mg/L以下,满足天津市《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/599—2015)。

此外,催化条件对后续BAC单元去除COD的促进作用更明显,这是因为臭氧氧化单元的目的是把进水中的大分子难生物降解物质降解为小分子物质,提高进水的可生化降解性能,从而有助于后续BAC单元中微生物对水中有机物的利用。活性炭可催化吸附在其表面的O₃快速分解,引发一系列自由基反应^[14],生成的·OH等可提高大分子有机物的分解效率,因此在催化条件下,臭氧氧化单元中产生了更多的易生物降解小分子物质,进一步增强了进水的可生化降解性能,有助于后续BAC单元充分发挥生物降解作用,进而促进了COD的去除。另外,催化条件对进水中COD去除的促进作用在O₃投加量为15 mg/L时更明显,原因可能是此浓度的O₃不足以较完全地降解进水中的污染物,而在催化条件下O₃的利用效率得以增强,从而导致更多的COD被去除。

2.2 UV₂₅₄的去除效果

图3为UV₂₅₄的去除效果。当O₃投加量为20 mg/L时,进水UV₂₅₄平均为0.311 cm⁻¹,在无催化条件下,臭氧段对UV₂₅₄的平均去除率为16.1%,臭氧/BAC工艺对UV₂₅₄的平均去除率为47.8%;而在催化条件下,催化臭氧段对UV₂₅₄的去除率比臭氧段提高9.4%,催化臭氧/BAC工艺对UV₂₅₄的去除率比臭氧/BAC工艺提高17.0%。当O₃投加量为15 mg/L时,

进水 UV_{254} 平均为 0.319 cm^{-1} , 在无催化条件下, 臭氧段对 UV_{254} 的平均去除率为 30.9%, 臭氧/BAC 工艺对 UV_{254} 的平均去除率为 55.7%; 而在催化条件下, 催化臭氧段对 UV_{254} 的去除率比臭氧段提高 11.5%, 催化臭氧/BAC 工艺对 UV_{254} 的去除率比臭氧/BAC 工艺提高 15.4%。可见催化条件可有效促进臭氧氧化对 UV_{254} 的去除作用。

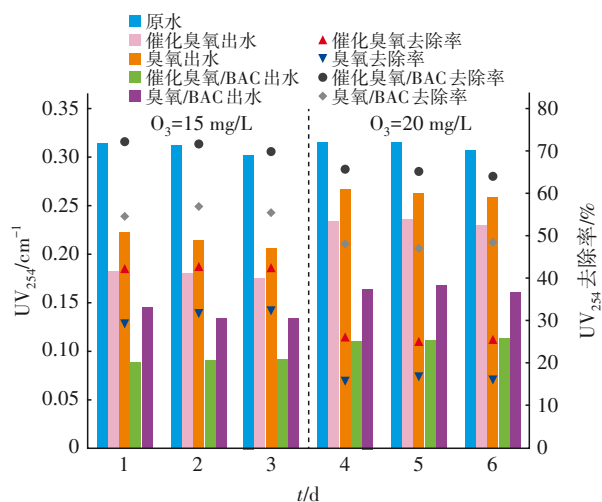


图3 UV_{254} 的去除效果

Fig.3 Removal effect of UV_{254}

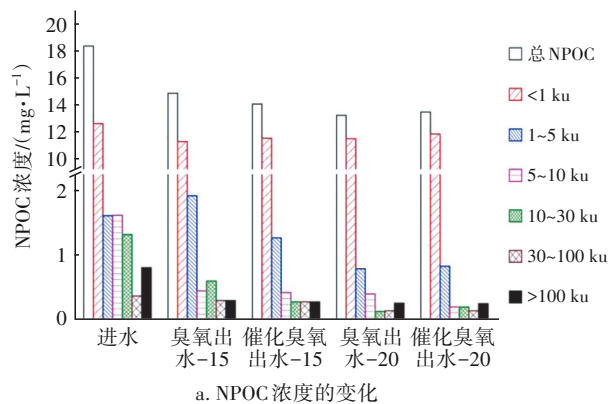
相比 COD, 催化条件对臭氧氧化去除 UV_{254} 的促进作用更大, 对后续 BAC 单元去除 UV_{254} 的促进作用也更明显。有文献表明, 亲核加成、亲电加成及 1,3-偶极环加成是臭氧的主要作用机制^[15], 反应体系中的臭氧会首先作用于有机污染物的不饱和键, 如 $C=C$ 、 $C=O$ 键, 从而促使其结构的转变, 而 UV_{254} 用来表征体系中的不饱和键, 因此在臭氧的作用下, 体系中的 UV_{254} 会得到明显的降低^[16]。在催化剂的作用下, 体系中臭氧的利用效率得到进一步提高, 含有不饱和键的难降解有机物得到进一步氧化分解, 因此催化条件会明显促进 UV_{254} 的去除, 并且进水经催化臭氧氧化后可生化性得到增强, 有助于后续 BAC 工艺对 UV_{254} 的进一步去除。

2.3 有机物分子质量分布的变化

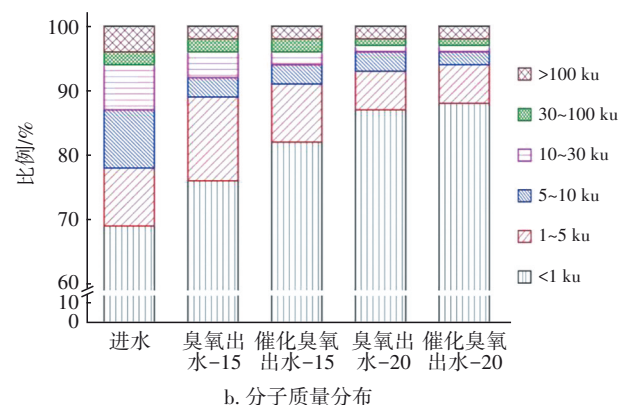
为进一步验证催化条件对石化废水中大分子有机物降解能力的促进作用, 测定催化臭氧氧化前后有机物分子质量分布的变化情况, 结果见图 4。

当 O_3 投加量为 15 mg/L 时, 由图 4(a) 可知, 在无催化条件下, 进水经臭氧段处理后 NPOC 平均减少 3.40 mg/L 、平均去除率为 18.5%; 而在催化条件下, 催化臭氧段对 NPOC 的平均去除率比臭氧段提高

5.4%, 可见活性炭催化可有效促进臭氧氧化去除 NPOC。此外, 催化臭氧氧化后与臭氧氧化后 $MW < 1 \text{ ku}$ 的 NPOC 浓度相当, 说明催化对臭氧氧化去除 $MW < 1 \text{ ku}$ 的 NPOC 无促进作用; 经催化臭氧氧化后, MW 为 $1 \sim 5 \text{ ku}$ 和 $10 \sim 30 \text{ ku}$ 的 NPOC 比臭氧氧化后分别降低 0.65 、 0.32 mg/L , 占比分别下降 4% 和 2%。体系中的臭氧会倾向作用于含有不饱和键的有机物, 与分子质量大小并无直接关系^[17], 臭氧在将大分子有机物降解为小分子有机物的同时, 也在降解一些小分子有机物, 因此催化作用对 $MW < 1 \text{ ku}$ 的 NPOC 浓度变化无明显影响。由图 4(b) 可知, 经催化臭氧氧化后 $MW < 1 \text{ ku}$ 的 NPOC 比例比臭氧氧化后提高了 6%, 表明催化条件可促进臭氧氧化单元中出现更多的小分子有机物。



a. NPOC 浓度的变化



b. 分子质量分布

图4 催化臭氧氧化单元进水与出水中有机物分子质量分布的变化

Fig.4 Change of molecular weight distribution of organic matter in effluent and influent of catalytic ozonation unit

当 O_3 投加量为 20 mg/L 时, 由图 4(a) 可知, 在无催化条件下, 进水经臭氧段处理后 NPOC 平均减少 5.39 mg/L 、平均去除率为 29.3%; 而在催化条件下, 催化臭氧段对 NPOC 的平均去除率相比臭氧段并无

明显提升,仅对5~10 ku的NPOC有一定的降解效果。由图4(b)可知,进水经催化臭氧氧化后MW<1 ku的有机物比例相比臭氧氧化亦无明显提升。这可能是因为20 mg/L的O₃浓度可较完全地氧化进水中的有机物,此时催化发挥的作用有限。

综上可知,催化条件对进水中有机物分子质量分布的改变在低O₃投加量下更明显。当O₃投加量为15 mg/L时,在催化作用下臭氧对水中NPOC的去除率得到一定的提高,并且出水中易降解小分子有机物的比例增大,有助于后续BAC单元充分发挥生物降解作用,同时通过催化作用可以降低O₃投加量,具有较好的经济效益。

2.4 有机物种类和结构的变化

在O₃投加量分别为15、20 mg/L的条件下,对臭氧氧化和催化臭氧氧化的进出水分别进行GC-MS检测分析,并统计主要有机物种类,GC-MS谱图如图5所示。

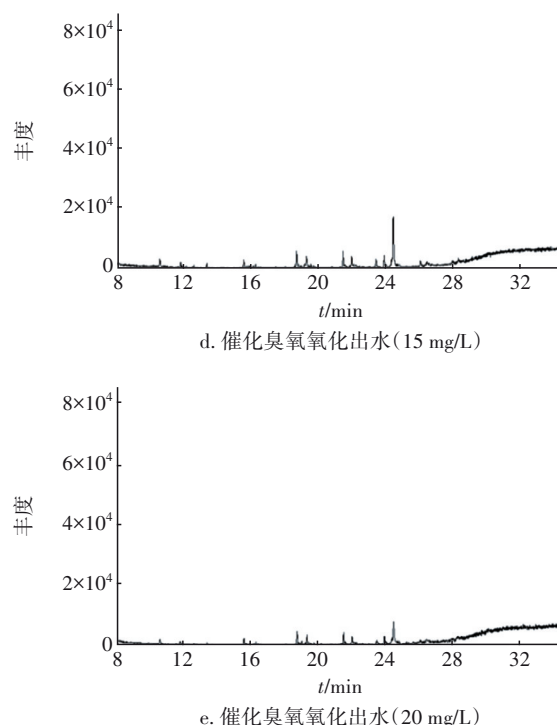
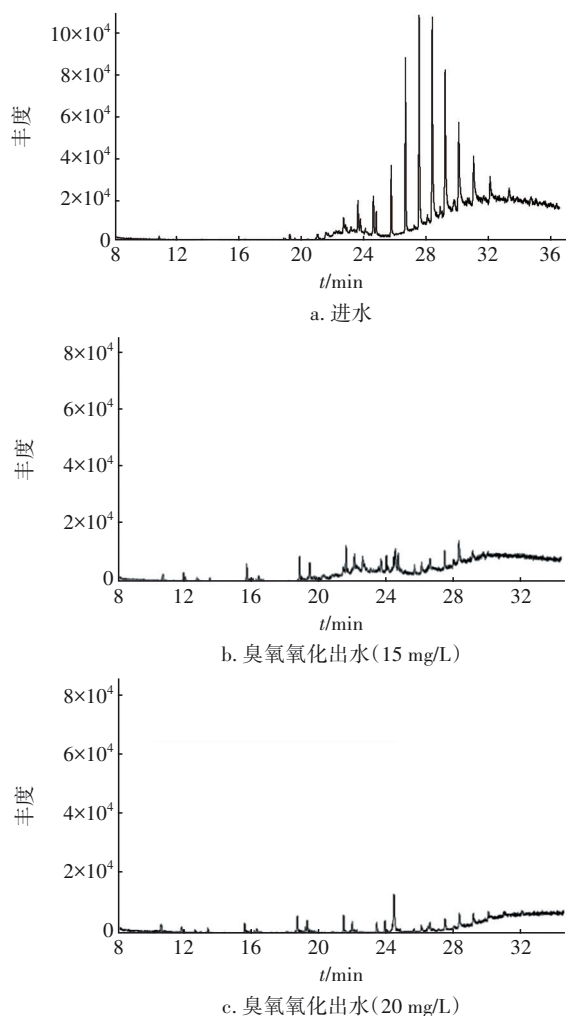


图5 臭氧氧化与催化臭氧氧化进出水的GC-MS谱图

Fig.5 GC-MS spectrogram of effluent and influent of catalytic ozonation process and ozonation process

从图5可以看出,在不同O₃投加量下,臭氧氧化单元出水中峰的数量和丰度均有明显减少,表明臭氧氧化可有效降解水中的有机污染物。对于臭氧氧化出水,O₃投加量为20 mg/L条件下对应的峰数量和丰度相比15 mg/L条件下要小,这可能是因为20 mg/L的O₃可较完全地氧化进水中的有机物;对于催化臭氧氧化出水,两种O₃投加量条件下对应的峰数量均比臭氧氧化出水要少,表明催化条件可进一步促进水中有机物结构的改变,其中在O₃投加量为15 mg/L条件下促进效果更明显,此时催化臭氧氧化出水的峰数量不仅明显少于臭氧氧化出水的,而且可以达到投加量为20 mg/L时臭氧氧化的效果。

此外,进水中共检测出22种有机物,其中包括1种醚醇类、2种杂环类、1种酚类、9种链烷烃类、2种苯基酯、4种不饱和链酯类、2种氮杂萘和吡啶类、1种环烷醇类;经臭氧氧化后,有机物种类明显减少,当O₃投加量分别为15和20 mg/L时,出水中有机物分别减至11种(1种醚醇类、9种链烷烃类、1种苯基酯)和7种(5种链烷烃类、1种苯基酯、1种不饱和链酯类);而经催化臭氧氧化后,两种O₃投加量条件下的出水中均只检测到2种有机物(1种链烷烃类、1

种苯基酯),证明催化条件可明显促进臭氧氧化去除进水中结构复杂的有机污染物,同时说明石化废水水质得到了有效的改善。

3 结论

① 活性炭催化对臭氧氧化深度去除石化废水中的COD和 UV_{254} 具有一定的促进作用,催化条件对后续BAC工艺去除COD和 UV_{254} 的促进作用更明显,在 O_3 投加量为15和20 mg/L两种条件下,催化臭氧氧化/BAC工艺出水水质均可达到天津市地方排放标准。

② 催化臭氧氧化对进水中有机物分子质量分布的改变在低 O_3 投加量条件下更明显。在 O_3 投加量为15 mg/L条件下,相比臭氧氧化,催化臭氧氧化对NPOC的去除率提高5.4%,出水中 $MW < 1$ ku的NPOC比例增大6%,易降解小分子有机物占比增大,有助于后续BAC单元充分发挥生物降解作用。

③ 在 O_3 投加量为15和20 mg/L两种条件下,经催化臭氧氧化后,废水中的有机物结构明显改变,酚类、链烷烃类及不饱和链酯类等难生物降解有机物得到有效去除,水质得到有效改善。

参考文献:

- [1] 丁鹏元,党伟,腾艳,等. 石化废水深度处理技术的研究进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(7): 7-14.
DING Pengyuan, DANG Wei, TENG Yan, *et al.* The advanced treatment technologies for petrochemical wastewater: an overview [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(7): 7-14 (in Chinese).
- [2] 聂冬,金明姬,董巍巍,等. 高级氧化法在水处理领域中的应用研究[J]. 延边大学农学学报, 2014, 36(2): 179-185.
NIE Dong, JIN Mingji, DONG Weiwei, *et al.* Research on advanced oxidation process in the field of water treatment [J]. Journal of Agricultural Science Yanbian University, 2014, 36(2): 179-185 (in Chinese).
- [3] 孙德智. 环境工程中的高级氧化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
SUN Dezhi. Advanced Oxidation Technology in Environmental Engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002 (in Chinese).
- [4] 王慧娟,段新耿. 组合工艺提标改造炼油污水工程实例[J]. 水处理技术, 2019, 45(3): 137-139.
WANG Huijuan, DUAN Xingeng. Engineering project of upgrading and reconstruction of refinery sewage by combined process [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(3): 137-139 (in Chinese).
- [5] LIN S H, LAI C L. Kinetic characteristics of textile wastewater ozonation in fluidized and fixed activated carbon beds [J]. Water Research, 2000, 34 (3): 763-772.
- [6] 李京京,李坤,徐军,等. 臭氧催化氧化-BAF深度处理石化二级出水中试[J]. 工业用水与废水, 2018, 49 (6): 30-34.
LI Jingjing, LI Kun, XU Jun, *et al.* Pilot test on advanced treatment of petrochemical secondary effluent by ozone catalytic ozonation-BAF process [J]. Industrial Water & Wastewater, 2018, 49 (6): 30-34 (in Chinese).
- [7] 孙逊,杨红红. 催化臭氧氧化工艺深度处理市政污水厂生化出水[J]. 中国给水排水, 2018, 34(1): 74-76.
SUN Xun, YANG Honghong. Application of catalytic ozonation in treatment of biochemical effluent of municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(1): 74-76 (in Chinese).
- [8] 蒋广安,赵越,李宝忠,等. 活性炭基催化剂臭氧催化氧化处理酸性大红染料废水[J]. 现代化工, 2018, 38(5): 124-127.
JIANG Guang'an, ZHAO Yue, LI Baozhong, *et al.* Treatment of acid brilliant scarlet dye wastewater by ozone catalytic oxidation over activated carbon-based catalyst [J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(5): 124-127 (in Chinese).
- [9] 汪毅,赵冬霞,封莉,等. 活性炭催化臭氧氧化深度处理工艺对酵母发酵废水中有机物的去除特性分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(11): 5820-5827.
WANG Yi, ZHAO Dongxia, FENG Li, *et al.* Analyses on removal characteristics of organic compounds during activated carbon catalytic ozonation process treating yeast fermentation wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11 (11): 5820-5827 (in Chinese).
- [10] RIVERA-UTRILLA J, SÁNCHEZ-POLO M, MONDACA M A, *et al.* Effect of ozone and ozone/activated carbon treatments on genotoxic activity of naphthalenesulfonic acids [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2002, 77 (8): 883-890.
- [11] 白小霞,杨庆,丁昀,等. 催化臭氧氧化处理难降解

- 石化废水技术的研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35 (1): 263-268.
- BAI Xiaoxia, YANG Qing, DING Jun, *et al.* Research progress of catalytic ozonation process to treat refractory petrochemical wastewater [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35 (1): 263-268 (in Chinese).
- [12] 王翼, 吴昌永, 周岳溪, 等. Fenton氧化深度处理石化废水厂二级出水研究[J]. 环境科学, 2015, 36 (7): 2597-2603.
- WANG Yi, WU Changyong, ZHOU Yuexi, *et al.* Treatment of petrochemical treatment plant secondary effluent by Fenton oxidation [J]. Environmental Science, 2015, 36(7):2597-2603 (in Chinese).
- [13] 张超, 单明皓, 许丹宁, 等. O₃-BAC深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4628-4635.
- ZHANG Chao, SHAN Minghao, XU Danning, *et al.* Characteristics of treated petrochemical water enhanced removal by O₃-BAC and analysis of consortium structure [J]. Environmental Science, 2018, 39 (10): 4628-4635 (in Chinese).
- [14] 冯玥, 石文静, 谭德俊, 等. 活性炭催化臭氧氧化处理染料废水生化出水研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(10): 2724-2729.
- FENG Yue, SHI Wenjing, TAN Dejun, *et al.* Tertiary purification of biologically treated effluent of dye-making wastewater by activated carbon catalytic ozonation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33 (10): 2724-2729 (in Chinese).
- [15] SONNTAG C V, GUNTEN U V. Chemistry of Ozone in Water and Wastewater Treatment: from Basic Principles to Applications [M]. London: IWA Publishing, 2012: 230-298.
- [16] 陈力行, 史惠祥, 沈涤清, 等. 造纸废水臭氧-曝气生物滤池深度处理技术研究[J]. 水处理技术, 2010, 36 (8): 88-91.
- CHEN Lixing, SHI Huixiang, SHEN Diqing, *et al.* Advanced treatment technologies of paper mill wastewater by ozone-biological aerated filter process [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36 (8): 88-91 (in Chinese).
- [17] WEI C H, ZHANG F Z, HU Y, *et al.* Ozonation in water treatment: the generation, basic properties of ozone and its practical application [J]. Reviews in Chemical Engineering, 2017, 33(1): 49-89.
-
- 作者简介: 郑浩(1995-), 男, 山东乐陵人, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制理论与技术。
- E-mail: 17854234399@163.com
- 收稿日期: 2020-06-17
- 修回日期: 2020-08-06

(编辑: 刘贵春)

加强湖泊管理保护**改善湖泊生态环境****维护湖泊健康生命**