

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.13.005

前置 O_3/H_2O_2 -BACFB工艺中试及在大型水厂的应用

李振邦¹, 彭锦玉¹, 江玉强¹, 谢海涛¹, 于建伟², 王全勇¹

(1. 山东华城工程技术有限公司, 山东 济南 250101; 2. 中国科学院 生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 为解决浙江J水厂现有工艺对2-甲基异莰醇(2-MIB)、土臭素(GSM)等嗅味物质去除效率偏低及季节性锰超标风险的问题,开展了前置臭氧/双氧水-生物活性炭流化床(O_3/H_2O_2 -BACFB)深度处理工艺的中试验证与工程应用研究。中试结果表明,该工艺可将原水中浓度高达160 ng/L的2-MIB与50 ng/L的GSM稳定降至检出限以下,同时滤后水锰离子浓度低于0.02 mg/L,与“预氧化+常规处理工艺”和“ O_3/H_2O_2 +常规处理工艺”相比,显著提高了高锰酸盐指数(COD_{Mn})去除效率,进一步降低了消毒副产物三卤甲烷浓度。基于中试成果,对水厂实施了深度处理工艺升级改造,实际运行效果良好,出厂水2-MIB和GSM浓度均稳定在检出限以下,锰离子稳定在0.005 mg/L以下,浊度和 COD_{Mn} 去除率也大幅提升,且对原水水质适应性增强,运行效果稳定。这为同类水厂应对高标准水质要求及工艺升级提供了工程借鉴与支撑。

关键词: 前置臭氧/双氧水; 生物活性炭流化床; 2-甲基异莰醇; 土臭素; 锰离子

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)13-0035-07

Pilot Study and Engineering Application of Pre- O_3/H_2O_2 -BACFB Process in a Large-scale Waterworks

Li Zhenbang¹, Peng Jinyu¹, Jiang Yuqiang¹, Xie Haitao¹, Yu Jianwei²,
Wang Quanyong¹

(1. Shandong Huacheng Engineering Technology Co. Ltd., Jinan 250101, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: To address the low removal efficiency of odor compounds such as 2-methylisoborneol (2-MIB) and geosmin (GSM), as well as the seasonal risk of manganese exceedance in the existing treatment process at Zhejiang J waterworks, a pilot-scale study and engineering application of the pre-ozonation/hydrogen peroxide-biological activated carbon fluidized bed (O_3/H_2O_2 -BACFB) advanced treatment process were carried out. The pilot results demonstrated that this process could consistently reduce 2-MIB and GSM from high influent concentrations of 160 ng/L and 50 ng/L to below the detection limit. Compared with the “pre-oxidation+conventional treatment process” and the “ O_3/H_2O_2 +conventional treatment process”, this process significantly improved the removal efficiency of permanganate index (COD_{Mn}) and further reduced the concentration of the disinfection by-product trihalomethane. Based on the pilot results, an advanced treatment process upgrade and transformation was implemented in the waterworks, and the actual operating effect was good. The concentrations of 2-MIB and GSM in the

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC2119); “海右计划”产业领军人才创新团队项目(1362022088)

通信作者: 王全勇 E-mail: wangquanyong177@163.com

finished water were stable below the detection limit, and the manganese ion was stable below 0.005 mg/L. The removal rates of turbidity and COD_{Mn} were also significantly improved, the adaptability to raw water quality was enhanced, and the operational performance was stable. This study provides engineering reference and support for similar plants facing stringent water quality requirements and process upgrades.

Keywords: pre-ozonation/hydrogen peroxide; biological activated carbon fluidized bed (BACFB); 2-MIB; GSM; manganese ion

J水厂是浙东地区一座采用“预氧化+常规处理工艺”的典型自来水厂,设计规模为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。面对原水季节性嗅味及锰污染问题,水厂通常采用投加次氯酸钠(NaClO)、高锰酸钾(KMnO_4)与粉末活性炭的应急处理方式。 NaClO 和 KMnO_4 凭借其氧化能力,可部分氧化嗅味物质并将溶解态锰转化为二氧化锰沉淀^[2];粉末活性炭则通过吸附作用去除部分嗅味成分^[3]。然而,该应急手段在实际运行中存在明显局限:药剂投加成本较高,去除效率受水质波动影响大,高负荷条件下主体工艺的稳定运行易受影响。

臭氧-生物活性炭(O_3/BAC)工艺是目前应用最广泛的饮用水深度处理技术之一,通过臭氧氧化与生物降解的协同作用去除有机物^[4]。然而,常见的后置和中置式 O_3/BAC 工艺在实际运行中存在生物泄漏风险较高、活性炭使用寿命较短、对2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)等嗅味物质的去除能力有限等问题,同时在应对锰污染和进一步降低浊度方面也存在一定短板^[5-6]。相比之下,前置臭氧/双氧水-生物活性炭流化床($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2\text{-BACFB}$)工艺以“优先去除有机物,再强化去除颗粒物”为核心理念,以构建原水 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 高级氧化代替臭氧直接氧化提高氧化效率,以BACFB代替常规活性炭滤池强化生物作用,将两者组合后设置于工艺流程最前端,在高效去除有机物和嗅味物质的同时,兼具强化混凝作用,实现深度降浊。目前我国北方地区多个水厂的的实际应用中,该工艺展现出优异的有机物去除性能和深度降浊能力,且对2-MIB和GSM的去除率均超过99%^[7-9],但其在南方低溶解氧、高嗅和含锰地表水源条件下的适用性仍有待验证。

为此,在浙江J水厂开展全流程中试与工程验证,全面评估了“预氧化+常规处理工艺”($\text{NaClO}/\text{KMnO}_4$ +混凝/沉淀/过滤)、“ $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ +常规处理工艺”与“ $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2\text{-BACFB}$ +常规处理工艺”对嗅味物质及

其他污染物的去除效果,提出了合理、安全的工艺流程组合,以期江浙地区乃至全国同类型水厂的升级改造提供有价值的实践经验与技术参考。

1 材料与方法

1.1 原水水质

在2025年4—6月采用浙江J水厂原水进行中试。试验期间水温为 $18\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$,浊度为 $0.25\sim 2.87\text{ NTU}$,溶解氧(DO)为 $0.38\sim 4.0\text{ mg/L}$,氨氮为 $0.02\sim 0.14\text{ mg/L}$,高锰酸盐指数(COD_{Mn})为 $1.0\sim 1.9\text{ mg/L}$,铁离子和锰离子浓度分别为 $0.020\sim 0.186$ 、 $0.060\sim 0.178\text{ mg/L}$,2-MIB和GSM浓度分别为 $20\sim 160$ 、 $30\sim 50\text{ ng/L}$ 。该原水水质整体优良,基本符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅰ~Ⅱ类标准,但具有典型的低溶解氧、高嗅和含锰问题。

1.2 中试工艺流程

中试工艺流程见图1,共进行了3组不同工艺流程的比选试验,包括“预氧化+常规处理工艺”、“ $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ +常规处理工艺”和“ $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2\text{-BACFB}$ +常规处理工艺”。

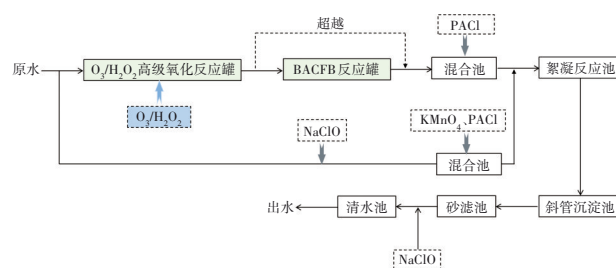


图1 中试工艺流程

Fig.1 Process flow chart of pilot test

1.3 试验装置及运行参数

中试装置如图2所示。其中, $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 反应器包括6套316L材质反应罐,总体尺寸为 $\varnothing 0.15\text{ m} \times 6.0\text{ m}$, O_3 投加量为 $1\sim 2\text{ mg/L}$, O_3 与 H_2O_2 的投加质量比为 $10:1$,氧化反应时间为 15 min 。BACFB反应器包括2套不锈钢材质反应柱,总体尺寸为 $\varnothing 0.3\text{ m} \times 6.0\text{ m}$,

BAC取自山东潍坊某水厂运行2年以上的BACFB反应器,接触时间为3 min,依靠进水上升流速实现BAC膨胀率为40%~45%。



图2 中试装置全景

Fig.2 Panoramic view of pilot plant

混合池采用机械搅拌混合方式,每格混合池水力停留时间为40 s,单格有效容积为46 L,设计超高为20 cm。在“预氧化+常规处理工艺”中, $NaClO$ 与 $KMnO_4$ 均采用计量泵投加,在原水管道投加 $NaClO$,在混合池中投加 $KMnO_4$,投加量分别为0.15~0.30 mg/L和0.3~0.5 mg/L。而在“ O_3/H_2O_2 +常规处理工艺”及“ O_3/H_2O_2 -BACFB+常规处理工艺”中,则不投加上述两种预氧化药剂。此外,三种工艺的混凝剂均采用聚合氯化铝(PACl),投加量为1.4~1.6 mg/L(以 Al_2O_3 有效浓度计),与厂区运行工况保持一致。

絮凝反应池选用3格机械搅拌式反应池,总停留时间为20 min。斜管沉淀池液面负荷为 $5 m^3/(m^2 \cdot h)$,斜管长度为1 m,倾角为 60° 。砂滤柱的滤料为均粒石英砂,粒径为0.9~1.2 mm,滤砂厚度为1.40 m,滤速为7.5 m/h,气冲强度为 $50 \sim 60 m^3/(h \cdot m^2)$,水冲强度为 $17 \sim 22 m^3/(h \cdot m^2)$ 。

消毒剂采用 $NaClO$,投加量为1.5 mg/L,消毒时间为30 min,CT值为 $15 mg \cdot min/L$ 。

1.4 分析指标及检测方法

浊度采用哈希TL2300浊度仪检测; COD_{Mn} 参照《水质 高锰酸盐指数的测定》(GB 11892—89)测定;2-MIB、GSM和三卤甲烷浓度采用固相微萃取-气相色谱质谱联用仪测定;锰离子采用紫外可见分光光度计测定;微生物群落组成基于16S rRNA高通量测序技术进行解析。

2 结果与讨论

2.1 中试效果分析

2.1.1 对嗅味物质的去除

在原水2-MIB浓度为20~160 ng/L、GSM浓度为

30~50 ng/L的条件下,“预氧化+常规处理工艺”对2-MIB和GSM的去除率分别为21.7%~48.8%和29.3%~51.3%,出水2-MIB和GSM浓度分别为12.8~51.5 ng/L和18.0~32.0 ng/L,未能达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中低于10 ng/L的限值要求(见图3)。

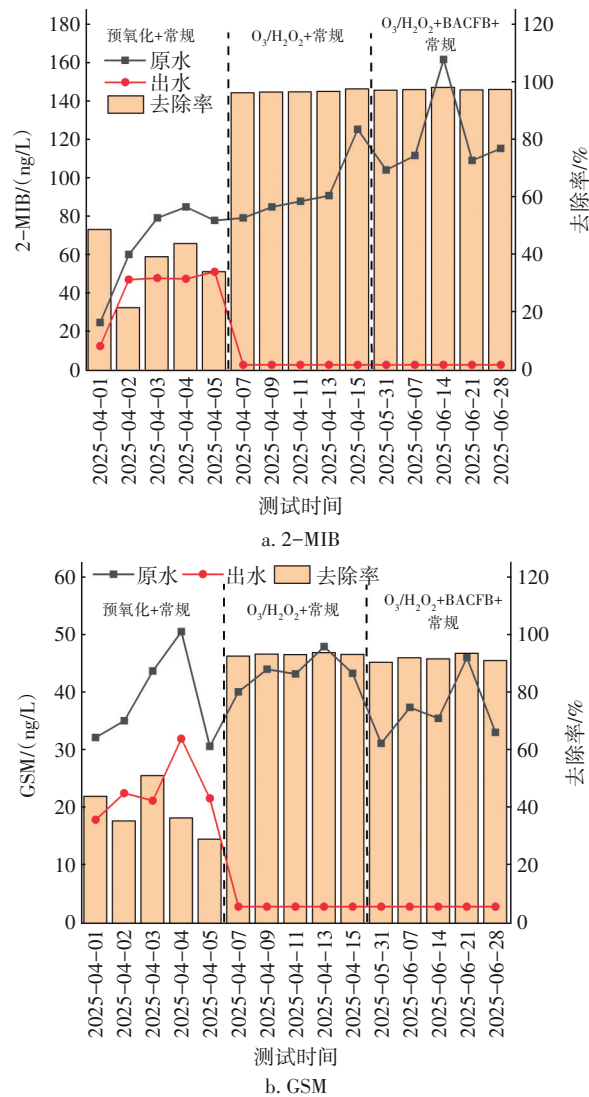


图3 不同工艺对2-MIB和GSM的去除效果

Fig.3 Removal effects of different processes on 2-MIB and GSM

相比之下,“ O_3/H_2O_2 +常规处理工艺”与“ O_3/H_2O_2 -BACFB+常规处理工艺”出水中两种嗅味物质浓度均降至检出限以下($<3.0 ng/L$),对2-MIB和GSM的去除率分别达96%和91%以上。这一差异主要是因为2-MIB和GSM均为天然萜烯醇类化合物,具有稳定的环状结构,导致其在“预氧化+常规处理工艺”中难以被有效去除^[6]。而在 O_3/H_2O_2 体系

中, O_3 与 H_2O_2 反应可生成氧化能力极强的羟基自由基($\cdot OH$),其氧化电位高达2.80 V,能够高效降解此类结构稳定的嗅味物质^[10]。

2.1.2 对锰离子的去除

当原水锰离子为0.060~0.178 mg/L时,“预氧化+常规处理工艺”出水锰离子浓度为0.04~0.07 mg/L,接近GB 5749—2022限值(0.1 mg/L),存在超标风险(见图4)。而“ O_3/H_2O_2 +常规处理工艺”和“ O_3/H_2O_2 -BACFB+常规处理工艺”可将锰离子浓度分别降至0.02~0.03 mg/L和0.01~0.02 mg/L,去除率和稳定性显著提升。这是因为“预氧化+常规处理工艺”主要依赖NaClO与 $KMnO_4$ 将水中溶解性锰离子氧化为二氧化锰等不溶性锰氧化物,再通过常规处理工艺去除^[2]。“ O_3/H_2O_2 +常规处理工艺”不仅利用臭氧氧化锰离子形成不溶性锰氧化物,同时提高水中溶解氧至10 mg/L左右,有利于强化砂滤的生物除锰作用。“ O_3/H_2O_2 -BACFB+常规处理工艺”在 O_3/H_2O_2 高级氧化基础上引入生物活性炭工艺,在高溶解氧条件下,进一步利用附着在活性炭表面和孔道内的微生物将锰离子氧化为不溶性锰氧化物,强化对锰离子的去除^[8,11]。

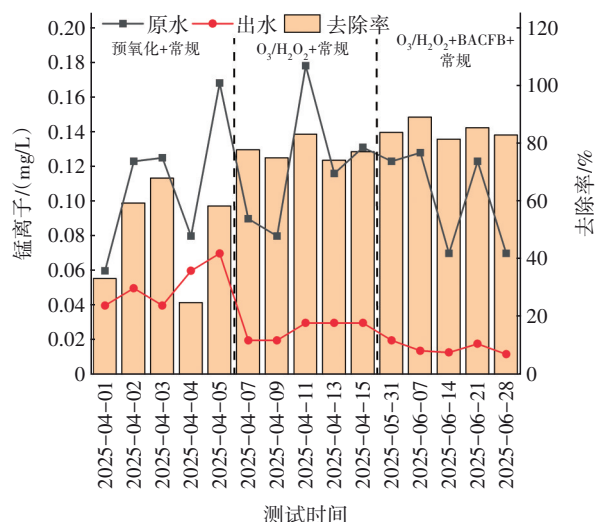


图4 不同工艺对锰离子的去除效果

Fig.4 Removal effects of different processes on manganese ion

2.1.3 对 COD_{Mn} 的去除

各工艺对 COD_{Mn} 的去除效果如图5所示。在原水 COD_{Mn} 处于1.0~1.9 mg/L范围时,“ O_3/H_2O_2 -BACFB+常规处理工艺”的去除率达到60.0%~63.2%,显著优于“预氧化+常规处理工艺”(7.0%~

35.3%)和“ O_3/H_2O_2 +常规处理工艺”(26.0%~45.8%)。这一优势主要是由于该组合工艺的协同作用: O_3/H_2O_2 高级氧化过程将大分子、难降解有机物分解为易于生物利用的小分子中间产物;后续BACFB反应器中的颗粒活性炭在流化状态下通过持续摩擦实现表面更新,维持了良好的吸附性能;同时,活性炭表面和孔道内附着的生物膜可进一步深度降解有机物,从而显著提升了 COD_{Mn} 的整体去除效率^[12]。

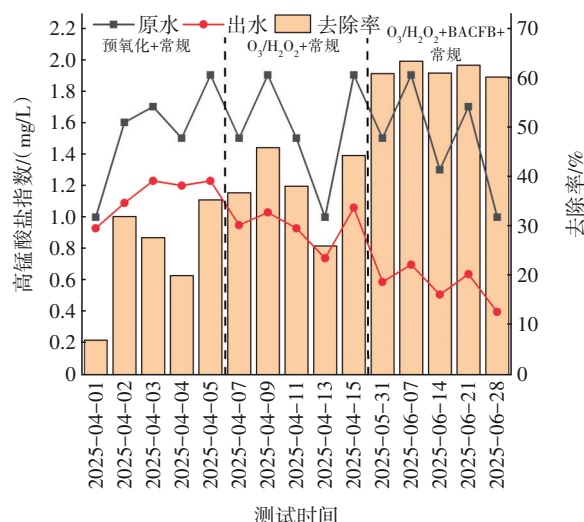


图5 不同工艺对高锰酸盐指数的去除效果

Fig.5 Removal effects of different processes on permanganate index

2.1.4 对浊度的去除效果

“预氧化+常规处理工艺”主要依靠混凝作用实现颗粒物聚集,出水浊度维持在0.089~0.120 NTU;“ O_3/H_2O_2 +常规处理工艺”通过 O_3/H_2O_2 氧化颗粒物表面涂层并改善有机物性质,提升混凝效果,出水浊度降至0.067~0.098 NTU;而“ O_3/H_2O_2 -BACFB+常规处理工艺”则实现了深度降浊,滤池出水浊度稳定在0.020~0.050 NTU的极低水平。这是因为BACFB内的颗粒活性炭在流化状态下通过摩擦再生保持高效表面吸附能力,且其孔道内附着的生物膜可深度降解有机物,同时流失的粉末活性炭与生物膜碎片可作为絮体晶核,胞外分泌物可促进架桥絮凝,二者协同提升混凝效率^[13]。

2.1.5 消毒副产物生成潜能

“预氧化+常规处理工艺”“ O_3/H_2O_2 +常规处理工艺”出水中的三卤甲烷比值(THMR,即三卤甲烷各种化合物的实测浓度与其各自限值的比值之和)

分别为0.28~0.32和0.35~0.38,因为 $NaClO/KMnO_4$ 或 O_3/H_2O_2 氧化将部分有机物转化为更易与氯反应的小分子前体物,导致后续消毒过程中消毒副产物生成潜能较高^[14]。然而,“ O_3/H_2O_2 -BACFB+常规处理工艺”出水的THMR稳定在0.05以内,远低于标准限值(≤ 1)。这一突出优势证明,在 O_3/H_2O_2 单元之后的BACFB中活性炭吸附与生物降解 O_3/H_2O_2 氧化产生的小分子有机物,从源头控制消毒副产物的生成量,显著提升了出水的化学安全性和生物稳定性^[15]。

2.2 工程应用效果

2.2.1 工艺流程选择与设计

中试结果表明,“ O_3/H_2O_2 -BACFB+常规处理工艺”对浊度、 COD_{Mn} 、锰离子和嗅味物质均表现出最佳的去除效果,且可通过BACFB去除消毒副产物前体物,从而降低消毒过程中三卤甲烷等消毒副产物的生成风险。鉴于此,为提升J水厂的出水水质与运行稳定性,决定对其现有常规处理工艺进行升级改造。该水厂原主体工艺为“预处理+机械搅拌混合池+折板絮凝池+平流沉淀池+V型滤池”,并配备了粉末活性炭、 $NaClO$ 、石灰、 $KMnO_4$ 、 $PACl$ 等多种药剂。改造采用以“ O_3/H_2O_2 -BACFB”为核心的前置深度处理工艺,具体工艺流程见图6。

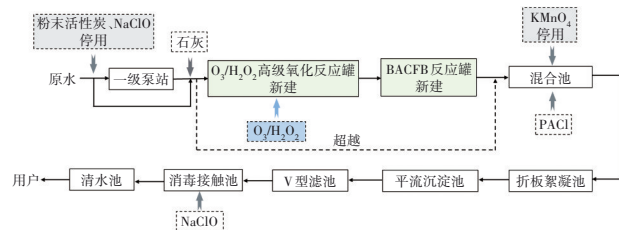


图6 水处理工艺流程

Fig.6 Flow chart of water treatment process

在现有4座平流沉淀池中间的空地上,设置两组并列运行的 O_3/H_2O_2 高级氧化及BACFB反应器,总设计规模为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。每组由三台串联的反应罐组成,其中两台用作 O_3/H_2O_2 高级氧化反应罐,一台作为BACFB反应罐,罐体直径为15.60 m,总高度为8.25 m。系统设计总氧化反应时间为15 min,所选活性炭的碘吸附值不低于800 mg/g,硬度大于95%,粒径范围为1.3~1.5 mm,流化床空床接触时间为4.5 min。此外,通过管道系统设置超越阀门,当原水水质较好、无嗅味和锰污染问题时,只运行常规处理工艺;当原水存在季节性嗅味和锰影响水

质问题时,启用“ O_3/H_2O_2 -BACFB”工艺,从而实现深度处理与常规处理的独立或联合运行,保障供水安全与运行经济性。

2.2.2 工程应用效果分析

该工程于2025年8月上旬开始通水运行并完成调试,运行期间 O_3 投加量为1.0~2.0 mg/L, H_2O_2 投加量为0.1~0.2 mg/L,常规处理工艺运行参数不变。工程运行前取样检测时间为7月20—30日,水温为26.3~26.5℃;运行后取样检测时间为11月1—10日,水温为21.0~22.0℃。“ O_3/H_2O_2 -BACFB”工艺运行前后的出厂水水质对比见表1。

表1 “ O_3/H_2O_2 -BACFB”运行前后水质对比

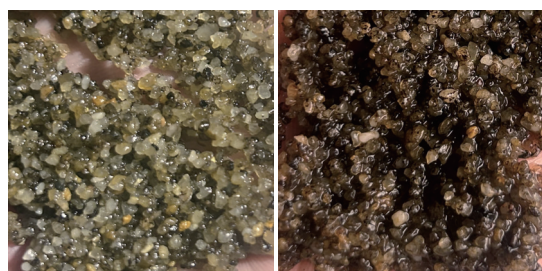
Tab.1 Comparison of water quality before and after operation of O_3/H_2O_2 -BACFB

水质指标	运行前		运行后	
	原水	出厂水	原水	出厂水
2-MIB/(ng/L)	12.0~16.0	8.2~9.6	13.0~19.0	<3.0
GSM/(ng/L)	8.2~11.2	5.3~8.4	8.1~12.3	<3.0
COD_{Mn} /(mg/L)	1.12~1.86	0.56~0.81	1.03~1.88	0.16~0.48
浊度/NTU	1.29~2.46	0.05~0.07	1.65~2.27	0.02~0.04
氨氮/(mg/L)	0~0.17	<0.02	0~0.12	<0.02
锰离子/(mg/L)	0.050~0.150	<0.005	0.020~0.160	<0.005
色度/度	7~8	<5	7~8	<5
THMR	0.02	<0.015	0.02	<0.015

运行后,出厂水中2-MIB与GSM浓度均降至检出限以下,有效解决了原水嗅味问题。同时,沉后水浊度由1.2~1.5 NTU降至0.3~0.5 NTU,甚至达到0.1 NTU,出厂水浊度由0.05~0.07 NTU降至0.02~0.04 NTU,砂滤池过滤周期由24 h延长至30 h。出厂水 COD_{Mn} 由0.56~0.81 mg/L降至0.16~0.48 mg/L,去除率由53.7%提升至78.1%,而常规处理工艺与后置 O_3/BAC 的去除率一般为50%~60%^[16-17],表明该工艺在浊度和有机物的深度去除方面效果显著。此外,出厂水氨氮<0.02 mg/L,锰离子<0.005 mg/L,色度<5度,THMR<0.015,菌落总数、总大肠菌群和大肠埃希氏菌均未检出,说明该工艺对其他指标的控制效果同样优异。值得注意的是,工程运行后混凝剂投加量由1.4~1.6 mg/L降至1.2 mg/L(以 Al_2O_3 有效浓度计),同时停用预氧化剂($NaClO/KMnO_4$)、粉末活性炭等,药耗的降低也进一步证实了工艺运行效率的提升。

值得一提的是,在“ O_3/H_2O_2 -BACFB”系统投入运行20 d后,观察到砂滤池中石英砂由初始的淡黄

色逐步转变为黑褐色(见图7),高通量测序发现滤料含有典型的锰氧化菌 *Hyphomicrobium* (生丝微菌属),占比为7.95%,该现象表明滤料表面已成功负载生物源锰氧化物,形成锰砂滤池^[18-19],为出厂水锰浓度的稳定达标提供了保障。上述结果证实,在常规处理工艺前增设“ O_3/H_2O_2 -BACFB”可促进锰砂滤池形成,有助于强化对锰的持续去除。



a. 运行前

b. 运行后

图7 “ O_3/H_2O_2 -BACFB”运行前后石英砂滤料颜色变化

Fig.7 Change in color of quartz sand filter media before and after operation of O_3/H_2O_2 -BACFB

运行过程中观察到,受水库水体温度分层、取水位置及长距离输水工况影响,进厂水溶解氧浓度偏低,长期在0.3~4.0 mg/L,导致滤池进水溶解氧浓度仅维持在5.0 mg/L左右,低氧环境对氨氮、锰离子的去除带来一定影响,新工艺投运前砂滤池一直没有形成锰砂,无除锰能力。而 O_3/H_2O_2 -BACFB工艺运行后,滤池进水溶解氧浓度提升至8.0 mg/L以上,高溶解氧条件对发挥常规处理工段尤其是砂滤的生物降解作用具有积极影响,也为锰砂形成提供了有力支撑。然而,该工艺促进锰砂生成的具体机制,以及锰去除以化学氧化还是生物氧化为主导,仍有待进一步深入研究予以明确。

3 结论

① 在中试过程中,“ O_3/H_2O_2 -BACFB+常规处理工艺”可将2-MIB和GSM降至检出限以下,滤池出水浊度为0.02~0.05 NTU,对锰离子和高锰酸盐指数的去除率分别为80.0%~89.0%和60.0%~63.2%,且可将THMR控制在0.05以内,表现出较高的净水效率。

② 工程实际运行表明,前置 O_3/H_2O_2 -BACFB工艺有效解决了原水臭味问题,显著降低了沉后水和出厂水浊度,对高锰酸盐指数的去除率达到78.1%,有效提升了供水水质,且无需投加预氧化剂与粉末活性炭。

③ 前置 O_3/H_2O_2 -BACFB工艺可以促进砂滤池中功能性锰砂的快速形成,从而实现化学氧化与生物除锰的协同,对控制供水管网的锰致“黄水”问题具有重要意义。

④ 前置 O_3/H_2O_2 -BACFB工艺可有效解决低溶解氧、高嗅和含锰地表水源对净水工艺及供水水质的影响,并且具备显著的技术和经济优势,为国内同类型水厂水质提升提供了具备可行性与推广价值的系统性解决方案。

参考文献:

- [1] 陈建锋,张孝忠,刘志刚,等. 水厂锰时空分布及控制策略[J]. 广州化工, 2018, 46(13): 107-109.
Chen Jianfeng, Zhang Xiaozhong, Liu Zhigang, et al. Temporal and spatial distribution of manganese in water plants and control strategies [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46 (13): 107-109 (in Chinese).
- [2] 陈妙兰,胡小芳,李家耀. 供水厂预氧化应急除锰技术研究[J]. 供水技术, 2025, 19(1): 23-30.
Chen Miaolan, Hu Xiaofang, Li Jiayao. Study on preoxidation emergency manganese removal technology in water supply plant [J]. Water Technology, 2025, 19 (1): 23-30 (in Chinese).
- [3] Wang J X, Zhou L, Gao J S, et al. Process optimization and mechanism revealing of $KMnO_4$ pre-oxidation coupled powdered activated carbon adsorption for 2-MIB removal [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 53: 103705.
- [4] 许子荣,肖帆,陈铁成,等. 采用臭氧-活性炭深度处理的水厂应对2-MIB的工艺组合优化[J]. 中国给水排水, 2025, 41(6): 69-76.
Xu Zirong, Xiao Fan, Chen Tiecheng, et al. Optimization of ozone-activated carbon filtration process combination for 2-MIB removal in advanced treatment waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41 (6) : 69-76 (in Chinese).
- [5] 范志强,窦茵,陈洪斌. 生物活性炭砂垫层对饮用水生物安全性控制的研究与应用[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 16-23.
Fan Zhiqiang, Dou Yin, Chen Hongbin. Research and application of biological activated carbon-sand bed in biosafety control for drinking water [J]. Water Purification Technology, 2022, 41 (2) : 16-23 (in Chinese).
- [6] 张晓娜,何嘉莉,刘清华,等. 前置臭氧/活性炭与常规

- 工艺处理微污染水的对比[J]. 中国给水排水, 2018, 34(3): 48-51.
- Zhang Xiaona, He Jiali, Liu Qinghua, et al. Comparative analysis on treatment of micro-polluted source water by pre-ozonation/BAC process and conventional process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(3): 48-51 (in Chinese).
- [7] 姚恒军, 彭锦玉, 李振邦, 等. 前置 O_3/H_2O_2 -生物炭流化床在水厂提标工程中的设计应用[J]. 净水技术, 2024, 43(12): 195-204.
- Yao Hengjun, Peng Jinyu, Li Zhenbang, et al. Design and application of pre- O_3/H_2O_2 -biochar fluidized bed processes in WTP upgrading [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 195-204 (in Chinese).
- [8] 彭锦玉, 李振邦, 张坤乾, 等. 前置臭氧-生物流化床工艺用于水厂提质改造[J]. 中国给水排水, 2024, 40(12): 94-100.
- Peng Jinyu, Li Zhenbang, Zhang Kunqian, et al. Application of pre-ozone and biological fluidized bed in updating and transformation of waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(12): 94-100 (in Chinese).
- [9] Peng J, Wang Y, Li Z, et al. Development of a novel advanced treatment process for high-algae-laden reservoir water: performance and mechanism [J]. Journal of Environmental Sciences, 2025, 158: 281-295.
- [10] Peng J, Wang Q, Li Z, et al. Pilot testing and engineering application of O_3/H_2O_2 process for 2-methylisoborneol and geosmin removal in drinking water treatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 63: 105381.
- [11] 王世龙. 臭氧氧化-铝盐混凝联用体系除锰效能与机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
- Wang Shilong. Efficiency and Mechanism of Manganese Elimination Using an Integrated Ozone Oxidation and Aluminum Coagulation Process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2025 (in Chinese).
- [12] Shan Y, Zhou B, Liu Z, et al. In situ ultrasonic-backwash regeneration of upflow activated carbon filters for improved removal of organics from drinking water [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 198: 107188.
- [13] Xu L, Canales M, Zhou Q, et al. Antibiotic resistance genes and the association with bacterial community in biofilms occurring during the drinking water granular activated carbon (GAC) sandwich biofiltration [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 460: 132511.
- [14] 张笑笑. 水源水中天然有机物氯化生成三氯乙醛的机理及控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- Zhang Xiaoxiao. Mechanism and Control of Chlorination of Natural Organic Compounds in Water Source to Trichloroacetaldehyde [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021 (in Chinese).
- [15] Wang Q Y, Li Y Y, Li Z B, et al. Xenobiotic metabolism and C-N-S cycling during biofilm formation in a full-scale drinking water biological activated carbon fluidized bed [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 524: 168765.
- [16] 武珉辉, 钱庆玲, 刘爽, 等. 后置臭氧-下向流活性炭工艺中臭氧投加量的中试优化[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 49-55.
- Wu Minhui, Qian Qingling, Liu Shuang, et al. Pilot-scale optimization of ozone dosage in rear ozone downflow activated carbon process [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 49-55 (in Chinese).
- [17] 宋佳临, 顾松, 王明远, 等. 饮用水常规处理工艺的强化与提升: 地表水预处理与深度处理案例[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 50-56.
- Song Jialin, Gu Song, Wang Mingyuan, et al. Enhancement and upgrading of conventional drinking water treatment process: case of pretreatment and advanced treatment for surface water [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 50-56 (in Chinese).
- [18] 陈东东, 葛国侃, 翁红英. 水厂除锰工艺试验[J]. 城镇供水, 2023(1): 15-19.
- Chen Dongdong, Ge Guokan, Weng Hongying. Experimental study on manganese removal process in water plants [J]. Urban Water Supply, 2023(1): 15-19 (in Chinese).
- [19] Cheng Q F, Liu Z Y, Huang Y, et al. Influence of temperature on COD_{Mn} and Mn^{2+} removal and microbial community structure in pilot-scale biofilter [J]. Bioresource Technology, 2020, 316: 123968.

作者简介: 李振邦(1990—), 男, 山东嘉祥人, 硕士, 高级工程师, 主要从事给水排水工程研究。

E-mail: lizb1218@163.com

收稿日期: 2025-12-25

修回日期: 2026-02-05

(编辑: 李德强)