

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.21.012

低浊水预氯胺、预氯化及预臭氧处理效能分析

李宗强¹, 束敏², 董立²

(1. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200063; 2. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200333)

摘要: 为深度分析预氯胺、预氯化和预臭氧对低浊地表水处理效果的影响, 针对江苏X市水源水开展三种预氧化中试, 对比了中试各工艺段出水水质主要指标。结果表明, 三种预氧化在常规处理和深度处理工艺段对浊度的去除效果均比较明显, 其中预氯胺较为突出; 预臭氧投加量对 UV_{254} 去除率影响不大, 而预氯胺和预氯化对 UV_{254} 的去除率均随着投加量的增加而升高, 但经深度处理后三种预氧化总体处理效果相当; 在预氯化 and 预臭氧投量分别为2.0和1.5 mg/L时, 对 COD_{Mn} 的去除率相对较高。因此, 针对低浊水的预氧化工艺选择应根据原水水质、季节变化、水厂处理工艺及运行成本进行综合考虑和动态调整。

关键词: 低浊水; 预氯胺; 预氯化; 预臭氧

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)21-0083-05

Performances of Pre-chloramination, Pre-chlorination, and Pre-ozonation for Treatment of Low-turbidity Water

LI Zong-qiang¹, SHU Min², DONG Li²

(1. Shanghai Water Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200063, China;

2. East China Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200333, China)

Abstract: A pilot-scale study was conducted using the raw water from X city, Jiangsu Province, to comprehensively evaluate the influence of three pre-oxidation methods, namely pre-chloramination, pre-chlorination, and pre-ozonation, on the treatment efficiency of low-turbidity surface water. The effluent quality parameters across each process stage were systematically monitored and comparatively analyzed. The turbidity removal efficiency of the three pre-oxidation methods was relatively evident in both conventional and advanced treatment processes, with pre-chloramination demonstrating particularly notable performance. The dosage variation of pre-ozonation exerted minimal influence on the UV_{254} removal efficiency. In contrast, both pre-chloramination and pre-chlorination exhibited increased UV_{254} removal efficiencies with higher dosages. Nonetheless, following advanced treatment, the overall performance of the three pre-oxidation methods remained comparable. The higher COD_{Mn} removal efficiency was achieved when 2.0 mg/L of pre-chlorination and 1.5 mg/L of pre-ozonation were applied, respectively. Therefore, the selection of pre-oxidation processes for low-turbidity water should be comprehensively evaluated and dynamically adjusted according to raw water quality, seasonal variations, treatment processes, and operational costs.

Key words: low-turbidity water; pre-chloramination; pre-chlorination; pre-ozonation

为了达到更高的供水目标,并进一步降低制水成本,仅靠常规处理工艺已不能满足水质新标准,水厂增设预氧化或深度处理工艺可以提高对水中有机物的去除率,减少消毒副产物(DBPs)前体物含量,进而减少DBPs生成量^[1]。采用预氯胺工艺,不仅可以达到某些预氧化工艺的功效,同时也延长了氯胺消毒的接触时间,提高了饮用水的微生物安全性,这可为解决困扰水处理界多年的微生物风险和化学物风险平衡问题提供新途径;氯可以作为预氧化剂来改善混凝条件、控制臭味、防止藻类繁殖、去除水中硫化氢和色度等;臭氧预氧化对微污染水中的有机物、色度、浊度和藻类都具有良好的去除效果,还能有效控制消毒副产物的产生^[2]。为了进一步对比低浊地表水预氯胺、预氯化 and 预臭氧的处理效能,笔者针对江苏某市水源水开展三种预氧化中试,对各工艺段出水的主要水质指标进行对比分析。

1 材料与方法

1.1 原水水质

试验原水为水源厂出厂水,试验期间原水主要水质指标如下:水温为5~8℃,浊度为10~20 NTU, COD_{Mn} 为2.59~3.98 mg/L, UV_{254} 为0.130~0.173 cm^{-1} ,氨氮平均值为0.06 mg/L。

1.2 预氧化中试工艺

中试模型的处理规模为2 m³/h,混凝剂为聚合氯化铝(PAC),通过烧杯搅拌试验确定投加量为20 mg/L。氯和氨分别以次氯酸钠和硫酸铵溶液的形式投加,次氯酸钠的有效氯含量约为10.8%,硫酸铵的有效氮约为8%。臭氧由国林CF-G-3-010g臭氧发生器供应。根据试验目的调整中试预氧化的运行条件,按照未预氧化、预氯胺、预氯化、预臭氧四种中试工况进行分析,其中氯投加量以有效氯计,氨投加量以硫酸铵中NH₃含量计。对预氯胺进行两种工况对比,即氯和氨按照4:1和6:1两种比例投加,分别为2.0和0.50 mg/L(中试A)、2.0和0.33 mg/L(中试B);预氯化分两种工况进行对比,分别投加氯1.0 mg/L(中试C)和2.0 mg/L(中试D);对预臭氧进行三种工况对比,分别投加臭氧0.5 mg/L(中试E)、1.0 mg/L(中试F)和1.5 mg/L(中试G)。

中试工艺流程如图1所示。其中,预氧化剂投加点设置在网格反应池前,接触时间约为4 min,网

格反应时间为28.7 min,沉淀时间为2 h,后臭氧接触时间为10 min,砂滤池和炭滤池的滤料厚度分别为1.6和2.0 m。

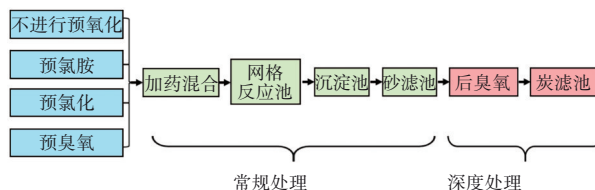


图1 中试工艺流程

Fig.1 Flow chart of pilot process

1.3 采样检测方案

中试历时60 d,每个工况运行15 d。测定浊度、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、氨氮、总氯、加氯消毒副产物可吸附有机卤化物(AOX)和臭氧消毒副产物溴酸盐等一系列水质指标来衡量预处理效果,具体采样检测方案见表1。氨氮、总氯和AOX仅在预氯化、预氯胺时检测,预臭氧时所检测的消毒副产物改为溴酸盐。

表1 采样检测方案

Tab.1 Scheme of sampling and testing

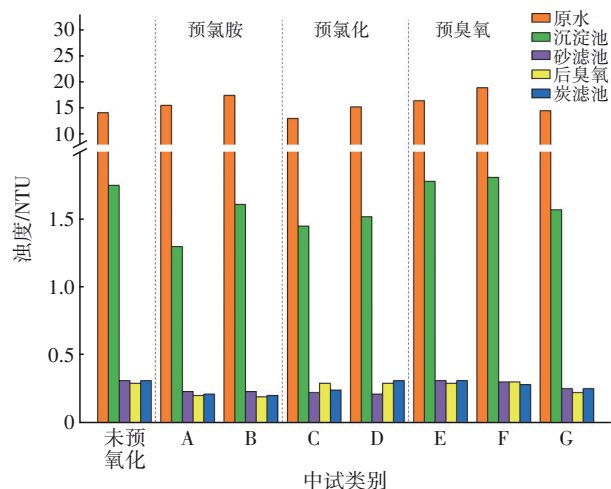
项 目	原水	沉淀池	砂滤池	后臭氧	炭滤池	频次/(次·d ⁻¹)
浊度	√	√	√	√	√	2
COD_{Mn}	√	√	√	√	√	2
UV_{254}	√	√	√	√	√	2
氨氮			√			1
总氯			√		√	1
AOX/溴酸盐			√			1

2 结果与讨论

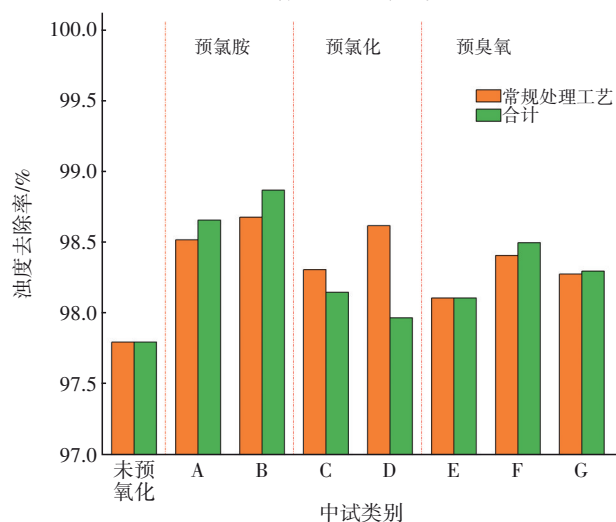
2.1 对浊度的去除效果

浊度是饮用水的重要水质指标之一,低浊水中颗粒物少,有效碰撞效率低,不利于絮体的形成与沉淀。低温下混凝剂水解速率下降,影响混凝沉淀效果,导致混凝沉淀工艺对颗粒物和有机物(包括消毒副产物前体物)的去除效果较差^[3]。针对低浊水加强预氧化,以提升混凝沉淀效果则显得尤为重要,三种预氧化对浊度的去除效果如图2所示。可以看出,预氯胺、预氯化 and 预臭氧组的常规处理工艺出水浊度去除率较不进行预氧化均有明显提升,其中预氯胺表现最为突出,对浊度的去除率均在98.5%以上。沉淀池对浊度的去除率经各预处理后都有不同程度的提高,三种预氧化沉淀池对浊度的去除率排序为:预氯化<预臭氧<预氯胺,以加氯

2.0 mg/L、加氨 0.50 mg/L 时对浊度的去除率最大,达 91.7%。预臭氧时,随着臭氧投加量的增大,网格反应池前浊度明显上升,这可能是由预臭氧将大分子物质分解为小分子物质以及水中含有微小气泡引起的。因此预氯胺在针对低浊水助凝、助滤及出水浊度等方面较另外两种预氧化方式更具有优势。



a. 各工艺段出水浊度



b. 浊度去除率

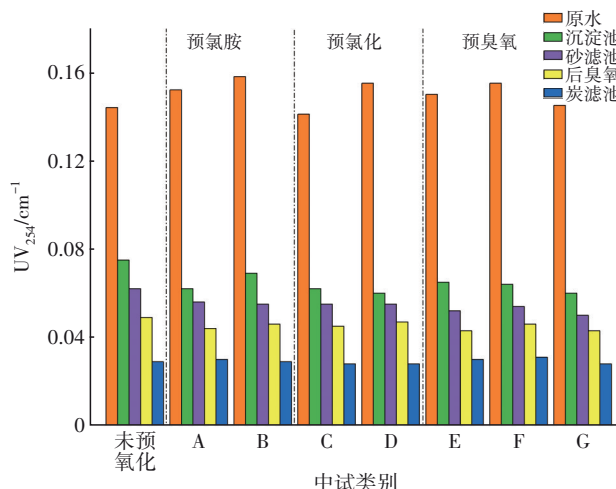
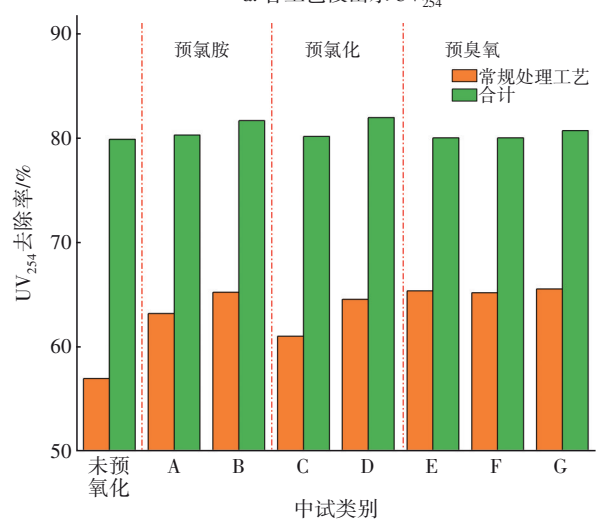
图2 三种预氧化对浊度的去除效果

Fig.2 Removal of turbidity in three pre-oxidation processes

2.2 对 UV_{254} 的去除效果

三种预氧化对 UV_{254} 的去除效果如图 3 所示。可以看出,进行三种预氧化处理后,沉淀池对 UV_{254} 的去除率均有所提高,其中预氯胺和预氯化对 UV_{254} 的去除率均随药剂投加量的增加而升高,经加氯 2.0 mg/L 预氯化后深度处理的去除率较 1.0 mg/L 预

氧化有所降低。预臭氧投加量的变化对 UV_{254} 去除率的影响较小。从总体工艺段看,不管是否进行预氧化处理,最终炭滤池出水的 UV_{254} 都较为接近,说明在 UV_{254} 去除方面,预氧化对常规处理工艺段的贡献较大,而经过深度处理的后臭氧氧化时,预氧化优势明显削弱,总体处理效果与不进行预氧化相近。

a. 各工艺段出水 UV_{254} b. UV_{254} 去除率图3 三种预氧化对 UV_{254} 的去除效果Fig.3 Removal of UV_{254} in three pre-oxidation processes

2.3 对 COD_{Mn} 的去除效果

中试发现,与原水相比,预氯化和预氯胺的网格反应池出水 COD_{Mn} 基本没有变化,说明这两种预氧化方式在短时间内不能彻底分解有机物。而预臭氧后的网格反应池出水 COD_{Mn} 略微升高,这可能是由于臭氧将大分子有机物分解为小分子有机物,进行 COD_{Mn} 检测时促进了高锰酸钾的消耗,从而表

现为网格反应池出水 COD_{Mn} 升高。三种预氧化对 COD_{Mn} 的去除效果如图4所示。可以看出,经三种预氧化处理后,沉淀池对 COD_{Mn} 的去除均得到了提高,且加氯 2.0 mg/L 的去除率最高。这与对 UV_{254} 的去除效果相似。综上所述,从 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除效果可以看出,预氧化在常规工艺段对有机物的去除效果较为突出,可减轻深度处理工艺段对有机物去除的负荷,进一步提升供水安全。

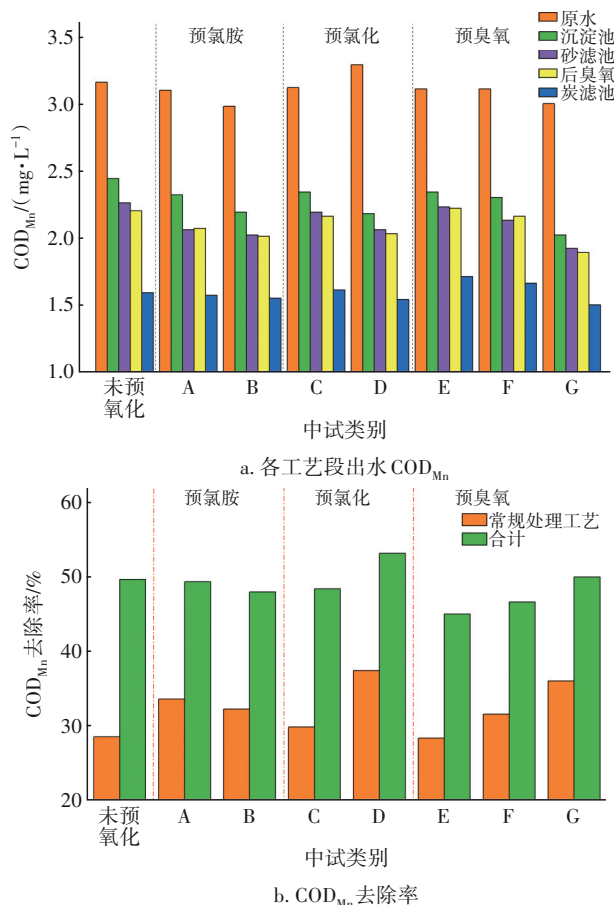


图4 三种预氧化对 COD_{Mn} 的去除效果

Fig.4 Removal of COD_{Mn} in three pre-oxidation processes

2.4 总氯和氨氮分析

预氯化 and 预氯胺过程中,总氯和氨氮情况见表2。可知,同样加入 2.0 mg/L 的氯,加氨后网格反应池出水的总氯提高 0.2 mg/L 左右,且加氨 0.50 mg/L 后砂滤池出水的总氯含量比加氨 0.33 mg/L 时高 0.2 mg/L。可见,加入氨预氧化后水中总氯的减少量相对较慢,有利于氯长时间发挥作用。很多大型管网为了减缓消毒剂衰减,采用氯胺消毒来代替自由氯消毒^[4]。因此,预氯胺对沉淀池、砂滤池降藻及微生物控制有一定的作用。

表2 主要工艺段总氯和氨氮情况

Tab.2 Total chlorine and ammonia nitrogen

concentration in main process section $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目		预氯化		预氯胺	
		氯 1.0	氯 2.0	氯 2.0+氨 0.50	氯 2.0+氨 0.33
总氯	网格反应池出水	0.29	0.61	0.80	0.84
	砂滤池出水	0.10	0.13	0.63	0.43
	炭滤池出水	0.03	0.05	0.03	0.04
氨氮	网格反应池出水	0.06		0.28	0.21
	砂滤池出水	<0.02		0.21	0.16

未进行预处理时,原水中氨氮平均值为 0.06 mg/L,经预氯胺预处理后明显升高,砂滤池后浓度仍然较高,但尚未超过 0.5 mg/L 的限值。

2.5 AOX 和溴酸盐生成分析

AOX 可以从总体上反映氯消毒副产物的情况, AOX 是指按规定方法测定与有机化合物结合的卤素总量,其值以氯计。微库仑法测定的 AOX 包括有机氯化物、有机溴化物,不包括无机卤化物,也不包括有机氟化物和碘化物^[5]。德国饮用水标准要求 $\text{AOX} < 50 \mu\text{g/L}$ ^[6]。经预氯化 and 预氯胺处理后,砂滤池出水 AOX 检测结果表明,在预氯化条件下,当加氯量为 1.0、2.0 mg/L 时, AOX 浓度分别为 8.3、19.3 $\mu\text{g/L}$;在预氯胺条件下,当加氯 2.0 mg/L 和加氨 0.50 mg/L 时, AOX 浓度为 11.4 $\mu\text{g/L}$;当加氯 2.0 mg/L 和加氨 0.33 mg/L 时, AOX 浓度为 18.6 $\mu\text{g/L}$ 。可见,经加氯预处理后,砂滤池出水的 AOX 虽然有所提高,但尚未超出限值。对比加氯 2.0 mg/L 的检测数据,预氯胺的 AOX 生成量略低于预氯化,说明加氨有利于减少消毒副产物的生成。经检测,预臭氧后砂滤池出水溴酸盐检测结果均小于 2.0 $\mu\text{g/L}$,可见适量的预臭氧不会大幅增加消毒副产物的生成量。

2.6 成本分析

结合预氯胺、预氯化 and 预臭氧三种预氧化工艺的中试效果,对三种预氧化工艺进行成本分析。成本主要包含药剂费和电费,其中药剂费按照次氯酸钠溶液、硫酸铵溶液和液氧的价格计算,根据投加量进行成本分析,预氯胺约为 0.017 0~0.018 5 元/ m^3 ,预氯化约为 0.008 8~0.016 8 元/ m^3 ,预臭氧约为 0.017 9~0.035 8 元/ m^3 。为进一步控制制水成本,

方案选择上应权衡预氧化效果与成本,同时兼顾消毒副产物生成量。

3 结论

① 预氯胺、预氯化及预臭氧三种预氧化方式能提高常规工艺处理阶段对 UV_{254} 和 COD_{Mn} 等有机物的去除效果,随着药剂投加量的增加去除率同步提高;但经深度处理后,除加 2.0 mg/L 氯的预氧化对 COD_{Mn} 的去除效果略有提高外,其余的有机物去除效果均与不进行预氧化的相近。

② 针对低浊水三种预氧化均有一定的助凝及降低出水浊度的作用,预氯胺在这方面较另两种预处理方式更具优势。

③ 预氯胺可使总氯减少速度变缓,有利于氯长时间发挥作用,适当提高氨的比例,更有利于长时间发挥氯的作用,且可减少消毒副产物的生成。建议在高温高藻季节,为了控制水厂沉淀池、砂滤池藻类生长和微生物的安全性,在适当时间段将预臭氧改为预氯胺,但需关注三卤甲烷的生成量。

④ 结合三种预氧化效能和成本分析,建议预氧化工艺的选择应根据原水水质、季节变化、水厂处理工艺及运行成本进行综合考虑和动态调整。

参考文献:

- [1] 项硕,胡溪超,黄奕鸣,等. 两种预氧化对氯消毒糖精DBPs转化的影响[J]. 中国给水排水,2022,38(3):50-56.
XIANG Shuo, HU Xichao, HUANG Yiming, *et al.* Effect of ozone and UV/H_2O_2 preoxidation on DBPs formation derived from saccharin during chlorine disinfection [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(3):50-56 (in Chinese).
- [2] 许子丽,陈卫,陶辉,等. O_3 /BAC工艺中臭氧作用条件优化研究[J]. 中国给水排水,2020,36(11):33-38.
XU Zili, CHEN Wei, TAO Hui, *et al.* Optimization of

ozone action conditions in O_3 /BAC process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(11):33-38 (in Chinese).

- [3] 苑蕊,韩梅,刘永泽,等. 炭-砂与砂-炭滤池对低温低浊水净化效能的比较[J]. 中国给水排水,2024,40(5):57-62.
YUAN Rui, HAN Mei, LIU Yongze, *et al.* Performances of carbon-sand filter and sand-carbon filter for purification of low temperature and turbidity water [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(5):57-62 (in Chinese).
- [4] 马凯,贾霞珍,赵林,等. 氯胺消毒饮用水中消毒剂分解途径与预测模型构建[J]. 中国给水排水,2023,39(21):34-39.
MA Kai, JIA Xiazhen, ZHAO Lin, *et al.* Decomposition pathway and prediction model construction of disinfectant in chloramine disinfection of drinking water [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(21):34-39 (in Chinese).
- [5] 李为兵,陈雪芳,袁哲,等. 饮用水氯胺辅助消毒的效果及有机卤化物含量变化[J]. 中国给水排水,2011,27(13):5-7,11.
LI Weibing, CHEN Xuefang, YUAN Zhe, *et al.* Effect of chloramine auxiliary disinfection and organic halide content change in drinking water [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(13):5-7, 11 (in Chinese).
- [6] KARANFIL T, KRASNER S W, WESTERHOFF P, *et al.* Disinfection By-products in Drinking Water [M]. Washington DC, United States: American Chemical Society, 2008.

作者简介:李宗强(1978-),男,江苏徐州人,硕士,高级工程师,主要研究方向为市政给排水工程的设计、建设和运维。

E-mail:734699576@qq.com

收稿日期:2025-04-07

修回日期:2025-04-27

(编辑:任莹莹)