

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 09. 006

次氯酸钠与粉末活性炭联用除锰

胡小芳, 陈妙兰, 黄健章, 李家耀, 戴紫云, 何嘉莉
(东莞市水务环境投资控股集团供水有限公司, 广东 东莞 523116)

摘要: 在常规pH条件下,联投次氯酸钠和粉末活性炭,将地表水中溶解态锰氧化成颗粒态二氧化锰,再协同混凝沉淀和过滤工艺除锰。结果表明,联投次氯酸钠和粉末活性炭除锰效果好,在设计的试验条件下,锰去除率与次氯酸钠投加量和粉末活性炭投加量均呈现明显的正相关关系。在絮凝快结束时联投粉末活性炭和次氯酸钠,与在原水处联投相比,水中的溶解态锰去除率明显更高(99%以上),但沉后水中颗粒态锰浓度也明显更高。沉后水中的颗粒态锰可以通过后续砂滤工艺被有效去除。相同次氯酸钠和粉末活性炭投加量条件下,原水中的氨浓度越高,除锰效果越差,但次氯酸钠投加量足够时,除锰效果依然良好。三种不同的试验原水采用粉末活性炭与次氯酸钠联用除锰,再经后续常规工艺处理,其消毒副产物浓度均远低于国标限值,无超标风险。

关键词: 次氯酸钠; 粉末活性炭; 锰; 氨; 消毒副产物

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)09-0040-07

Manganese Removal by Sodium Hypochlorite Combined with Powdered Activated Carbon

HU Xiaofang, CHEN Miaolan, HUANG Jianzhang, LI Jiayao, DAI Ziyun, HE Jiali
(Dongguan Water Supply Co. Ltd. of Water Environment Investment Holding Group, Dongguan 523116, China)

Abstract: Under normal pH conditions, the combination of sodium hypochlorite and powdered activated carbon was used to oxidize dissolved manganese in surface water into particulate manganese dioxide, followed by coagulation, sedimentation, and filtration processes to remove manganese. The results showed that the combined use of sodium hypochlorite and powdered activated carbon achieved good manganese removal. Under the designed experimental conditions, the removal rate of manganese exhibited a significant positive correlation with the dosages of both sodium hypochlorite and powdered activated carbon. When sodium hypochlorite and powdered activated carbon were added together towards the end of the flocculation stage, the removal rate of dissolved manganese in water was significantly higher (above 99%) compared to their addition together in raw water; however, the concentration of particulate manganese in post-sedimentation water was significantly higher. This particulate manganese in post-sedimentation water could be effectively removed by subsequent sand filtration. Under the same dosages of sodium hypochlorite and powdered activated carbon, higher ammonia concentrations in raw water led to poorer manganese removal, but when the sodium hypochlorite dosage was sufficient, the manganese

基金项目: 东莞市水务环境投资控股集团供水有限公司科研项目(GB-2024-Y07)

通信作者: 胡小芳 E-mail: shuying427@163.com

removal effect remained good. Three different types of raw water were treated with powdered activated carbon combined with sodium hypochlorite for manganese removal, followed by subsequent conventional treatment processes. The concentrations of disinfection by-products in the treated water were far below the national standard limits, with no risk of exceeding the standards.

Keywords: sodium hypochlorite; powdered activated carbon; manganese; ammonia; disinfection by-product

随着工业化发展,水环境保护面临着持续的压力与挑战^[1]。水源水中的锰是供水行业关注的典型污染物之一,对其进行有效控制已得到行业人员的普遍重视^[2]。摄入过量的锰可能会对人体健康造成危害^[3],且锰进入管网还易引发“黄水”问题^[4]。因此,研究和开发有效的除锰技术具有重要意义。

目前,除锰技术主要包括化学氧化法、吸附法、生物法、膜法等,而供水厂常采用高锰酸钾预氧化法除锰^[5]。但高锰酸钾属于管制药品,采购和运输等环节管控严格,且若投加过量,会产生水体异色风险^[6]。次氯酸钠预氧化在常规pH条件下基本无除锰效果,将pH调至碱性,除锰效果有所改善,但又会增加出厂水铝超标的风险^[7]。本文提出了一种新的除锰方法(次氯酸钠与粉末活性炭联用),并对其可行性、影响因素、消毒副产物生成情况等进行了研究,旨在为供水厂除锰提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验设备包括混凝搅拌机和自制滤柱。试验药剂包括锰标准使用液、氯化铝溶液、煤质粉末活性炭悬浊液、次氯酸钠。试验原水分为原水A(江河水)、原水B(水库水)和原水C(江河水)。水处理材料为L水厂(处理原水A)砂滤池在用滤砂。

1.2 试验方法

总锰和溶解态锰采用电感耦合等离子体质谱法测定;浊度采用浊度仪测定;色度采用铂-钴标准比色法测定;pH采用标准缓冲溶液比色法测定;余氯采用3,3',5,5'-四甲基联苯胺比色法测定;氨采用水杨酸盐分光光度法测定(以N计);三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷采用顶空毛细管柱气相色谱法测定;二氯乙酸和三氯乙酸采用离子色谱法-电导检测法测定。

原水A浊度为5.06~11.20 NTU,pH为7.1~7.2,氨为0.065~0.080 mg/L,高锰酸盐指数为

1.13~2.11 mg/L,试验期间水温为15~18℃;原水B浊度为3.70 NTU,pH为6.8,氨为0.036 mg/L,高锰酸盐指数为1.13 mg/L,试验期间水温为15~18℃;原水C浊度为4.95 NTU,pH为7.9,氨为0.067 mg/L,高锰酸盐指数为2.39 mg/L,试验期间水温为28℃。

常规混凝试验程序如下:混合阶段搅拌速度为500 r/min,运行时间为1 min;絮凝阶段搅拌速度为50 r/min,运行时间为15 min;沉淀阶段静置30 min。

试验预处理方法见表1。

表1 试验预处理方法

Tab.1 Pretreatment methods in the test

试验组别	粉末活性炭投加量/(mg/L)	次氯酸钠投加量/(mg/L,以有效氯计)	投加点及预处理时间
1	10	0.5	原水预处理5 min
2		1.0	
3		1.5	
4		2.0	
5		3.0	
6	20	0.5	
7		1.0	
8		1.5	
9		2.0	
10		0	
11	0	2.0	
12	10	2.0	原水预处理0 min
13			絮凝还剩1 min
14	20	2.0	原水预处理0 min
15			絮凝还剩1 min

2 结果与讨论

2.1 粉末活性炭与次氯酸钠联用除锰的可行性

冬季取原水A和B,夏季取原水C,均将锰加标至0.3 mg/L左右,分别按表1预处理方法进行常规混凝试验。原水A沉后水上清液浊度为0.66~0.92 NTU,pH为7.1~7.2;原水B沉后水上清液浊度为1.06~1.41 NTU,pH为6.8;原水C沉后水上清液浊

度为0.35~0.45 NTU, pH为7.9。锰加标原水及沉后水上清液总锰和溶解态锰检测结果见图1。

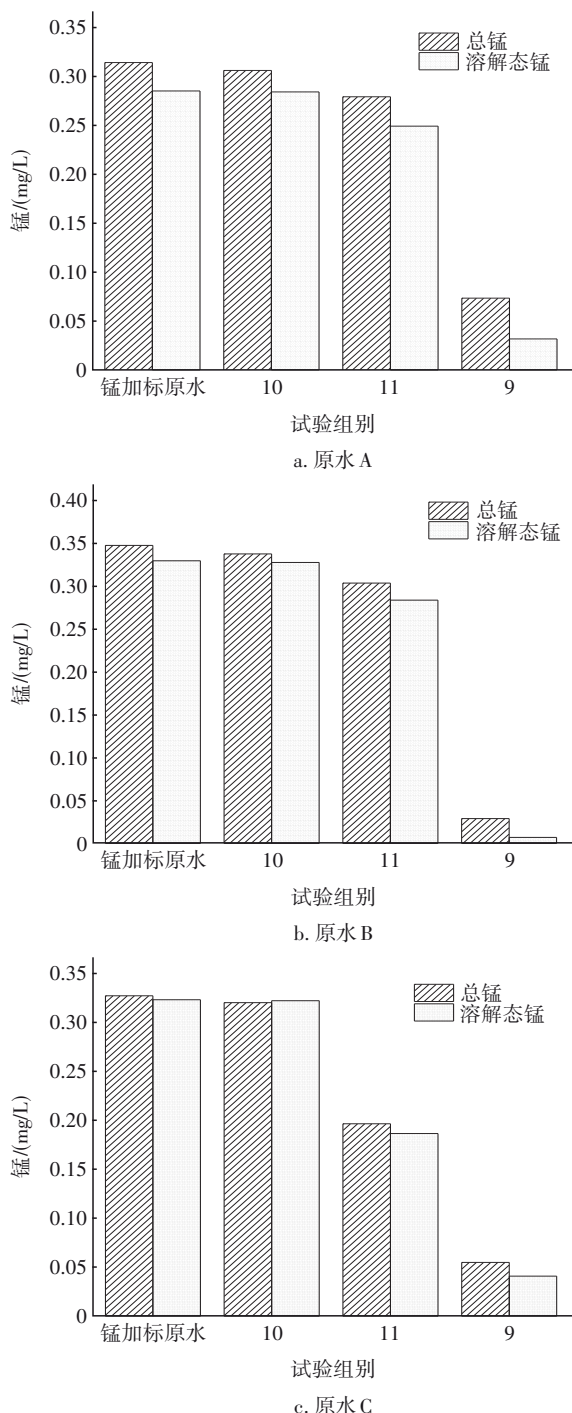


图1 粉末活性炭与次氯酸钠联用除锰效果

Fig.1 Manganese removal efficiency of powdered activated carbon combined with sodium hypochlorite

从图1可知,在常规pH条件下,单独次氯酸钠预氧化、单独粉末活性炭吸附均对原水中的二价锰无明显去除效果。原水C的pH为7.9,单独次氯酸

钠预氧化的锰去除率与原水A、B相比有所上升,但沉后水溶解态锰仍可达到0.187 mg/L,无法满足除锰要求。而粉末活性炭与次氯酸钠联投,对锰的去除率明显提升。粉末活性炭与次氯酸钠联用对地表水除锰有效且可行,这是因为粉末活性炭的电学特性使其能够在氧化还原反应中充当有效的媒介,其表面的羟基、羧基、内酯基和酚羟基等官能团可通过络合机制与液相中的二价锰结合,改变二价锰的原始结构,激活二价锰,通过直接电子传递途径加速二价锰的氧化,粉末活性炭吸附的氯进一步促进了电子从二价锰到氯的转移。在溶液中,低浓度的游离二价锰离子和氯很难相互接触和交换电子。然而,一旦它们被同步吸附在粉末活性炭表面,尽管缺乏直接接触,但具有导电性的粉末活性炭可以将电子供体二价锰释放的电子转移到作为终端电子受体的吸附氯上。粉末活性炭表面新生成的二氧化锰自催化作用也有利于二价锰的连续去除。因此,在粉末活性炭高效催化作用下,次氯酸钠氧化二价锰的速率显著提高,二价锰被氯快速氧化为二氧化锰^[8]。二氧化锰经常规混凝沉淀和过滤后被有效去除。联投粉末活性炭20 mg/L、次氯酸钠2.0 mg/L用于除锰,原水A中溶解态锰去除率达到88.9%,沉后水溶解态锰降至0.032 mg/L;原水B中溶解态锰去除率达到97.9%,沉后水溶解态锰降至0.007 mg/L;原水C中溶解态锰去除率达到87.3%,沉后水溶解态锰降至0.041 mg/L。同等药剂投加量下,三种原水溶解态锰去除率有所不同,这可能是由于不同原水中消耗次氯酸钠及粉末活性炭的竞争物质含量有差异。

2.2 粉末活性炭与次氯酸钠投加量的影响

冬季,对原水A分别进行锰加标(0.1、0.2、0.3 mg/L),再按表1预处理方法进行常规混凝试验。沉后水的上清液浊度为0.66~1.44 NTU,总氯为0.10~0.50 mg/L, pH为7.1~7.3。锰加标原水及沉后水上清液总锰和溶解态锰的检测结果如图2所示。可知,粉末活性炭与次氯酸钠联投除锰时,锰去除率与次氯酸钠投加量和粉末活性炭投加量均呈现明显的正相关关系。这是因为随着粉末活性炭投加量的增大,可吸附二价锰的表面活性位点增加,对次氯酸钠氧化二价锰的催化作用增强,氧化效率提高,故对锰的去除率较高。次氯酸钠与二价锰的反应见式(1)。

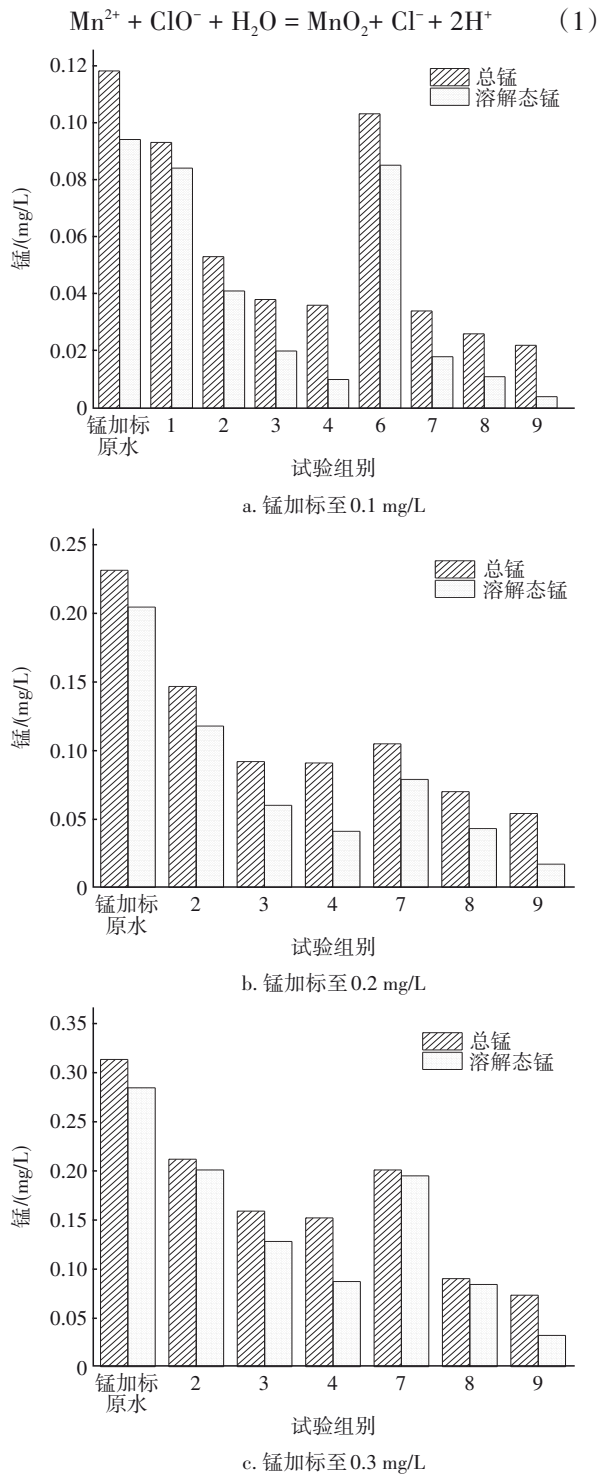


图2 粉末活性炭与次氯酸钠投加量对除锰的影响

Fig.2 Effect of powdered activated carbon and sodium hypochlorite dosages on manganese removal

经计算,次氯酸钠(以有效氯计)与二价锰离子反应的质量比为71:55,约为1.3:1。但原水中溶解态锰浓度为0.285 mg/L时,与粉末活性炭联用,将次氯酸钠投加量提升至1.5 mg/L以上,才能将原水

中的锰浓度控制在国标限值(0.1 mg/L)以下。这表明次氯酸钠作为氧化剂,原水中与二价锰产生竞争氧化、比二价锰的氧化优先级别更高的物质较多,故在该试验条件下,次氯酸钠投加量越大,能与二价锰发生氧化还原反应的有效氯含量越高,二价锰被氧化得越充分,锰的去除率越高。

当原水中溶解态锰浓度约为0.3 mg/L时,联投粉末活性炭20 mg/L和次氯酸钠2.0 mg/L,预处理5 min后,能将沉后水溶解态锰浓度降至0.05 mg/L以下;原水中溶解态锰浓度约为0.2 mg/L时,联投粉末活性炭10 mg/L和次氯酸钠2.0 mg/L,或联投粉末活性炭20 mg/L和次氯酸钠1.5 mg/L,预处理5 min,能将沉后水溶解态锰浓度降至0.05 mg/L以下;原水中溶解态锰浓度约为0.1 mg/L时,联投粉末活性炭10 mg/L和次氯酸钠1.0 mg/L,预处理5 min,能将沉后水溶解态锰浓度降至0.05 mg/L以下。

2.3 不同预处理时间和投加点的影响

冬季,取原水A,锰加标后进行常规混凝试验。沉后水上清液浊度为0.72~2.31 NTU,总氯为0.10~0.20 mg/L。锰加标原水及沉后水上清液总锰和溶解态锰的变化如图3所示。可知,同时投加次氯酸钠和粉末活性炭时,预处理0 min总体上除锰效果不如预处理5 min的,但在药剂投加量充分的条件下仍可获得较好的除锰效果。当粉末活性炭投加量为20 mg/L、次氯酸钠投加量为2.0 mg/L时,沉后水溶解态锰可降至约0.05 mg/L,溶解态锰去除率约为79.5%。

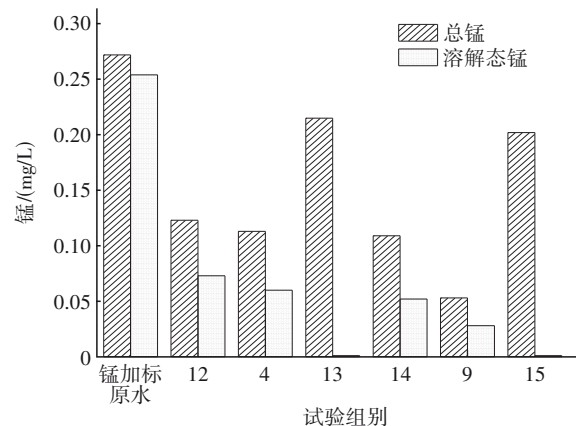


图3 不同预处理时间和投加点对除锰的影响

Fig.3 Effect of different pretreatment times and adding points on manganese removal

在絮凝阶段还剩1 min时同时投加粉末活性炭和次氯酸钠,与同时投加粉末活性炭和次氯酸钠预

处理0.5 min相比,溶解态锰浓度明显更低(降至0.001 mg/L以下,去除率约为99.6%),但水中颗粒态锰浓度明显更高,约为0.2 mg/L。这是因为在絮凝快结束时投加粉末活性炭与次氯酸钠,混凝过程即将结束,水中可与二价锰产生竞争氧化和竞争吸附的物质明显减少,次氯酸钠能更充分地将二价锰氧化为二氧化锰,故水中的溶解态锰浓度明显下降;但由于二价锰在絮凝快结束时才被氧化为二氧化锰,经混凝过程的矾花吸附包裹时间较短,所生成的二氧化锰沉降性能相对较差,沉后水中颗粒态锰浓度相对较高,但经砂滤池过滤后可被有效去除。

在絮凝快结束时联投粉末活性炭10 mg/L与次氯酸钠2.0 mg/L,协同后续砂滤工艺,可将水中锰浓度降至更低(溶解态锰降至0.001 mg/L以下,颗粒态二氧化锰经砂滤池过滤去除),且与在混凝前联投这两种药剂相比,可有效降低药剂投加量,但沉后水浊度有所升高(升至约2.1~2.3 NTU),若原水锰升高持续时间较长,采用该方法可能会加重砂滤池过滤负荷,从而缩短砂滤池过滤周期。

2.4 去除沉后水颗粒态锰的滤柱试验

结合2.3节开展沉后水中颗粒态锰去除的滤柱

试验,原水水质与其相同。使用L水厂砂滤池,再用石英砂滤料填充两个高度约为1.2 m的砂滤柱,滤柱内径约为10 cm。试验原水分别在两个200 L大桶中混凝沉淀,絮凝还剩1 min时分别在两个大桶中联投粉末活性炭10 mg/L与次氯酸钠2.0 mg/L、粉末活性炭20 mg/L与次氯酸钠2.0 mg/L,沉淀30 min后取沉后水分别流经两个砂滤柱进行过滤。两个滤柱进水颗粒态锰浓度分别为0.210、0.198 mg/L。运行1 h后分别取两个滤柱的出水检测颗粒态锰浓度,检测结果分别为0.000 9、0.000 3 mg/L,砂滤柱对进水中颗粒态锰的去除率接近100%。该试验结果证实了沉后水中的颗粒态二氧化锰可通过砂滤工艺被有效去除。

2.5 消毒副产物生成情况

取原水A(江河水)、原水B(水库水)、原水C(江河水)各1个水样进行常规混凝试验,并作为对照组,将另外各1个水样锰加标至0.3 mg/L,按表1预处理方法9进行常规混凝试验。取这6个沉后水上清液,并用0.45 μm滤膜抽滤,抽滤后的水分别投加2.5 mg/L次氯酸钠消毒2 h(模拟主加氯)后,取样检测消毒副产物相关指标,结果见表2。

表2 消毒副产物生成情况

Tab.2 Formation of disinfection by-products

μg/L

项目	三氯甲烷	二氯一溴甲烷	一氯二溴甲烷	三溴甲烷	二氯乙酸	三氯乙酸
国标限值	60	60	100	100	50	100
原水A	5.206	3.827	2.064	<0.000 041	4.2	<0.004 4
原水B	4.015	2.340	1.020	<0.000 041	4.1	5.3
原水C	6.727	4.254	2.324	0.250	6.8	<0.004 4
加标A	3.275	2.503	1.160	<0.000 041	6.4	<0.004 4
加标B	3.169	1.576	0.631	<0.000 041	13.6	13.7
加标C	4.667	4.124	2.482	0.209	6.3	<0.004 4

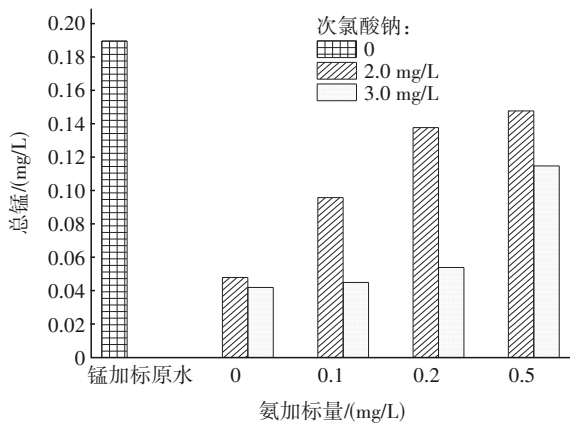
由表2可知,粉末活性炭与次氯酸钠联用除锰后,主加氯模拟试验中三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷浓度与对照试验相比,均无明显提升,且整体稍有下降,同时均远低于国标限值。这可能是因为粉末活性炭可以吸附部分腐殖酸、类腐殖酸和类富里酸类物质。粉末活性炭与次氯酸钠联用除锰后,主加氯模拟试验中二氯乙酸、三氯乙酸浓度与对照试验相比稍有升高,但是仍远低于国标限值。在本试验条件下,三种不同的原水采用粉末活性炭与次氯酸钠联用除锰,再经后续常规工艺处理,其消毒副产物均远低于国标限值,无

超标风险。

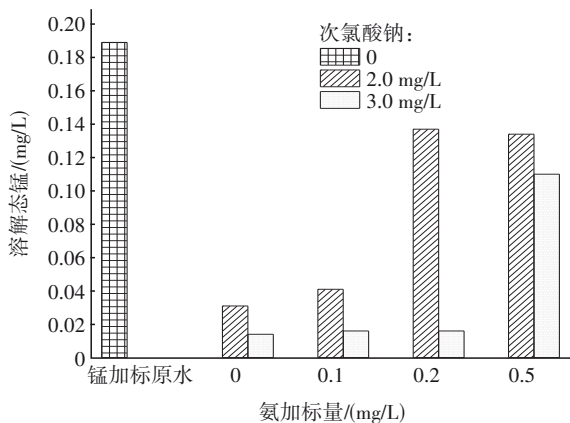
2.6 氨的影响

夏季,取原水C,氨为0.067 mg/L,锰加标至0.2 mg/L,将氨分别加标至0、0.1、0.2、0.5 mg/L,按表1预处理方法4和5进行常规混凝试验。沉后水上清液浊度为0.45~0.61 NTU, pH为7.9~8.0。锰加标原水及沉后水上清液总锰和溶解态锰的变化如图4所示。可知,随着氨浓度的增加,沉后水总锰和溶解态锰也随之升高。水中氨浓度越高,同等次氯酸钠和粉末活性炭投加量下的除锰效果越差。随着次氯酸钠投加量的增加,含氨原水的除锰效果显著

提高。这是因为水中氨会优先与次氯酸钠反应生成氯胺,氯胺无法氧化二价锰。当联投粉末活性炭10 mg/L和次氯酸钠2.0 mg/L、原水氨浓度约为0.2 mg/L时,沉后水上清液的溶解态锰浓度为0.137 mg/L,已超国标限值,即此药剂投加量不能满足除锰要求;当联投粉末活性炭10 mg/L和次氯酸钠3.0 mg/L、原水中氨浓度约为0.2 mg/L时,沉后水上清液溶解态锰为0.016 mg/L,远低于国标限值;而当原水中氨浓度约为0.5 mg/L时,由于生成了更多无法氧化二价锰的氯胺,沉后水溶解态锰依然高于国标限值。因此,当水中氨浓度较高时,采用次氯酸钠和粉末活性炭联用除锰,宜适当增加次氯酸钠投加量以提升除锰效果,但可能会导致消毒副产物浓度升高。



a. 对总锰去除效果的影响



b. 对溶解态锰去除效果的影响

图4 氨对除锰的影响

Fig.4 Effect of ammonia on manganese removal

2.7 不同除锰方法成本分析

按最近两年10%次氯酸钠商品价格为653.1元/t、粉末活性炭商品价格为5618元/t、高锰酸钾商品价格为16800元/t计,高锰酸钾预氧化和次氯酸

钠联投粉末活性炭预处理除锰两种方法的药剂成本见表3。

表3 不同除锰方法的药剂成本

Tab.3 Reagent costs of different manganese removal methods

原水溶解态锰浓度/(mg/L)	高锰酸钾预氧化除锰		次氯酸钠联投粉末活性炭预处理除锰		
	高锰酸钾投加量/(mg/L)	成本/(元/m ³)	次氯酸钠投加量/(mg/L,以有效氯计)	粉末活性炭投加量/(mg/L)	成本/(元/m ³)
0.1	0.2	0.003	1.0	10	0.063
0.2	0.4	0.007	2.0	10	0.069
0.3	0.6	0.010	2.0	20	0.125

次氯酸钠联投粉末活性炭预处理和高锰酸钾预氧化均能有效除锰,但两种除锰方法各有优缺点。高锰酸钾预氧化除锰运行成本较低,效果快速良好,但高锰酸钾属于管制药品,采购和运输等环节管控严格,采购流程复杂,且原水锰浓度波动时易引起投加过量和水体异色风险。次氯酸钠联投粉末活性炭预处理除锰水体无异色风险,无需额外增加高锰酸钾投加设备,不涉及管制药品,采购方便,但运行成本相对较高,当原水氨浓度相对较高时,所需次氯酸钠投加量也较大,可能导致消毒副产物浓度升高。

由于次氯酸钠联投粉末活性炭预处理除锰的运行成本明显高于高锰酸钾预氧化除锰,对于存在原水常年或者长期锰超标问题的供水厂,推荐采用高锰酸钾预氧化除锰;但是对于原水锰浓度波动较大、投加高锰酸钾容易出现水体异色的供水厂,推荐采用次氯酸钠联投粉末活性炭预处理除锰。对于原水锰浓度只在少数情况下超标的供水厂,次氯酸钠联投粉末活性炭预处理除锰所增加的水厂年运行成本较低,可以根据水厂和水源水实际情况选择高锰酸钾预氧化或次氯酸钠联投粉末活性炭预处理除锰。

3 结论

① 常规水质条件下,单独次氯酸钠预氧化、单独粉末活性炭吸附均对原水中的锰无明显去除效果,但粉末活性炭与次氯酸钠联投,并协同后续常规工艺则具有良好的除锰效果,且其消毒副产物浓度远低于国标限值,无超标风险。相同次氯酸钠和粉末活性炭投加量条件下,原水中的氨浓度越

高,除锰效果越差,但次氯酸钠投加量足够时,除锰效果依然良好。

② 试验条件下,粉末活性炭与次氯酸钠联投,对锰的去除率与次氯酸钠投加量和粉末活性炭投加量均呈现明显的正相关关系。在絮凝快结束时联投粉末活性炭和次氯酸钠,与在原水处联投相比,水中溶解态锰去除率明显更高(去除率在99%以上),但沉后水中颗粒态锰浓度明显更高。沉后水中颗粒态锰可以通过后续砂滤工艺被有效去除。同一投加点和同等药剂投加量下,除锰效果随预处理时间的增加而整体提高,但在药剂投加量充分的条件下,在原水处联投粉末活性炭与次氯酸钠,预处理0 min,仍可获得较好的除锰效果。

③ 对于存在原水常年或长期锰超标问题的供水厂,推荐采用高锰酸钾预氧化除锰;对于原水锰浓度波动较大、投加高锰酸钾易出现水体异色的供水厂,推荐采用次氯酸钠联投粉末活性炭预处理除锰;对于原水锰只在少数情况下超标的供水厂,可根据水厂和水源水实际情况选择高锰酸钾预氧化或次氯酸钠联投粉末活性炭预处理除锰。

参考文献:

- [1] 陈长太,董亚萍,李学峰.上海大都市圈水源地共同保护策略研究[J].中国给水排水,2023,39(18):32-35.
CHEN C T, DONG Y P, LI X F. Study on cooperative protection strategy of water sources in Shanghai metropolitan area [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 32-35(in Chinese).
- [2] 程永康,王锡良,张含斌,等.水库水锰超标去除方法及高锰酸钾除锰[J].净水技术,2021,40(增刊2):76-79,83.
CHENG Y K, WANG X L, ZHANG H B, et al. Removal methods of excess manganese in reservoir water and removal of manganese by potassium permanganate [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(S2): 76-79,83(in Chinese).
- [3] 马雪雨,伍昌年,薛莉娉,等.饮用水除铁除锰原理与技术进展[J].西安文理学院学报(自然科学版),2023,26(3):81-87.

MA X Y, WU C N, XUE L P, et al. Principle and technological progress of iron and manganese removal from drinking water [J]. Journal of Xi'an University (Natural Science Edition), 2023, 26(3): 81-87(in Chinese).

- [4] 陈祺,鲁智礼,李贵伟,等.南方某市锰致规模性“黄水”发生规律及应对[J].中国给水排水,2023,39(9):39-44.
CHEN Q, LU Z L, LI G W, et al. Occurrence of and response to large-scale manganese-caused “yellow water” events in a southern city [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(9): 39-44(in Chinese).
- [5] 张少博,王三反,邢越.水中除锰技术综述[J].应用化工,2020,49(3):687-691,695.
ZHANG S B, WANG S F, XING Y. Summary of manganese removal technology in water [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(3): 687-691, 695(in Chinese).
- [6] 雷晓玲,秦颖,文永林,等.预氧化强化混凝工艺处理含锰水实验研究[J].应用化工,2022,51(1):110-113.
LEI X L, QIN Y, WEN Y L, et al. Study on the influencing factors of the removal of manganese-containing water by the pre-oxidation and enhanced coagulation process [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(1): 110-113(in Chinese).
- [7] 凌卫卫,马顺君,唐玉霖.“气/液”二氧化碳调pH控铝系统设计及应用[J].中国给水排水,2024,40(6):91-96.
LING W W, MA S J, TANG Y L. Design and application of the pH adjustment and aluminum control system by gas/liquid carbon dioxide [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(6): 91-96(in Chinese).
- [8] LI G W, LI H T, ZHUANG Y, et al. Powdered activated carbon enhanced manganese (II) removal by chlorine oxidation [J]. Water Research, 2019, 156: 287-296.

作者简介:胡小芳(1983—),女,湖北荆州人,硕士,高级工程师,主要研究方向为给水处理技术。

E-mail:shuying427@163.com

收稿日期:2025-06-03

修回日期:2025-08-20

(编辑:任莹莹)