

化学氧化消减装置研发及其应急处理氨氮污染源

朱芳瑶¹, 王 骥², 冯立师², 潘超逸², 常 莎², 魏清伟², 陈思莉²,
刘迎云¹

(1. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 生态环境部 华南环境科学研究所,
广东 广州 510530)

摘 要: 以氨氮为污染物,设计研发了一款便捷可拼装式化学氧化消减装置用于应急处理突发环境事件,探讨了氨氮浓度、氧化剂投量、pH 值、反应时间对氨氮去除效果的影响,并对装置运行参数包括进出水口高度以及搅拌方式、时间和速度进行了优化。结果表明,在常规 pH 值条件下,当水中氨氮浓度超标 5、10、20 倍时分别投加 1.7、1.9、15 mL/L 次氯酸钠,反应 40 min,基本能使水中氨氮浓度降到Ⅲ类地表水限值(1.0 mg/L)以下。化学氧化消减装置最佳运行参数如下:进水口和出水口分别设计在水池有效深度的 9/10 和 1/2 处;搅拌方式选用机械搅拌,搅拌速度不低于 75 r/min,搅拌时间不少于 3 min。

关键词: 饮用水源; 氨氮污染; 化学氧化消减装置; 应急处理; 最佳工艺条件

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)01-0029-07

Development of Chemical Oxidation and Abatement Device and Its Emergency Treatment of Ammonia Nitrogen Polluted Drinking Water Source

ZHU Fang-yao¹, WANG Ji², FENG Li-shi², PAN Chao-yi², CHANG Sha²,
GUO Qing-wei², CHEN Si-li², LIU Ying-yun¹

(1. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510530, China)

Abstract: A flexible modular chemical oxidation and abatement device was developed to deal with environmental emergencies with ammonia nitrogen pollution. The effects of ammonia nitrogen concentration, oxidant dosage, pH value, and reaction time on the removal efficiency of ammonia nitrogen were studied. The operation parameters including water inlet and outlet height, stirring mode, stirring time, and stirring speed were optimized. The optimum sodium hypochlorite dosage for the oxidative removal of ammonia nitrogen in the condition of normal pH were 1.7 mL/L, 1.9 mL/L and 15 mL/L when the concentration of ammonia nitrogen in water was 5 times, 10 times, and 20 times higher than that specified limit in the standard, respectively. In 40 minutes of reaction time, the ammonia

基金项目: 广东省省级科技计划项目(2016B020240007); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx703-201905-143)

通信作者: 陈思莉 E-mail: 59204579@qq.com; 刘迎云 E-mail: 596723835@qq.com

nitrogen concentration in the water was reduced to below class III limit (1.0 mg/L) in the *Environmental Quality Standards for Surface Water*. In addition, the optimum parameters for the operation of the chemical oxidation and abatement device were as follows: the water inlet and outlet height were designed at 9/10 and 1/2 of the effective depth of the water tank; chose mechanical stirring, maintained the stirring speed above 75 r/min and the stirring time no less than 3 minutes.

Key words: drinking water source; ammonia nitrogen pollution; chemical oxidation and abatement device; emergency treatment; optimum process condition

随着我国城市化高速发展和经济快速增长,生产和生活废水排放量日益增多,使我国河流型饮用水源安全隐患突出^[1]。据不完全统计,约有65%的饮用水源不宜饮用,而氨氮($\text{NH}_3 - \text{N}$)就是其中一种主要污染物^[2]。饮用水源突发氨氮污染不仅会引起水体富营养化、发生赤潮等现象,更可能在很短时间内造成水源污染及饮用水供水系统的重大损失,甚至进一步触发严重的社会稳定问题^[3-5]。

为响应国家亟需应急技术装备产业化的号召,设计研发了一款便捷可拼装式化学氧化消减装置,用于应急处理饮用水源突发污染事件,保障城镇供水安全,同时带动全国环境应急产业升级,具有良好的社会效益和经济效益。由于化学氧化具有反应快速、降解彻底、价格低廉等优点,在突发环境事件的应急处理方面具有巨大潜力,因此本研究基于化学氧化法,选用饮用水源常规污染物氨氮测试该装置性能,在优化装置工艺参数的同时找到去除氨氮的最佳工艺条件。目前国内外去除氨氮的方法主要有吸附法、折点加氯法、吹脱法、生物脱氮法、化学沉淀法、催化湿式氧化法、液膜法以及电渗析法等^[6-7]。从需要满足环境应急中快速、高效、便捷、安全的角度来看,折点加氯法由于简单易行而经常被采用^[8]。次氯酸钠作为一种强氧化剂,已用于多类水处理,与传统氧化剂液氯相比,次氯酸钠安全无外泄,且可进一步减少消毒副产物的产生,因此十分适用于氨氮污染水源的应急处理^[9]。

本研究对化学氧化消减装置的运行参数包括进出水口高度以及搅拌方式、时间和速度等进行了优化,并系统探讨了氨氮浓度、氧化剂投量、pH值、反应时间等对氨氮去除效果的影响,由此找出最佳反应条件以使出水氨氮浓度达到我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中集中式生活饮用水地表水Ⅲ类水标准(1.0 mg/L),为突发氨氮水污染事件的应急处置提供参考。

1 试验装置与方法

1.1 材料与仪器

主要试剂:氯化铵(GR,阿拉丁)、次氯酸钠(漂水,工业级,实测有效氯含量为7.83%)、硫酸溶液(6 mol/L)、氢氧化钠溶液(1 mol/L)、双氧水(工业级,10%)。

主要仪器:岛津UV-1800紫外可见分光光度计,PM2500型电子天平,雷磁PHS-29A pH计,百灵达7500型光度计,BLD立式搅拌机(旋桨式,两片桨叶),不锈钢潜水搅拌机(加安装导杆),LS300-A型便捷式流速测定仪,WQ770型手持式浊度仪,DC-LWS型流量计,40ZX10-40型自吸泵。

1.2 试验装置

中试装置(见图1)主要由自来水池(方形,2.8 m×2.8 m×1.5 m)、原水池(方形,1.7 m×1.7 m×1.5 m)、氧化池(圆形,直径为2 m、高为1.32 m)和溶药池(圆形,直径为2 m、高为1.32 m)4部分组成,辅以搅拌机、潜水泵、流量计、水泵、阀门,通过进、出水管连接(DN40进水管,DN50/80出水管)。水池全部选用夹网PVC复合材料,该材料耐腐蚀性强,且采用聚酯纤维网增加强度,类似钢筋混凝土中的钢筋,满足作为应急处理水池的要求;支撑采用钢管支架,借鉴帐篷的方便、灵活性,满足便携、可拆卸等特点,可实现随用随拼装。

氧化池为该装置的主体部分,设计其有效深度为1 m,处理流量为4 m³/h(流速约为0.8 m/s)。其内固定有旋桨式立式搅拌机(安装在距池底20 cm处)和不锈钢潜水搅拌机,可根据需要自行切换。为测试氧化池的工艺性能,设计了5个不同高度的进水口和3个出水口。5个进水口自下而上依次编号1、2、3、4、5,分别距池底25、45、65、81、95 cm(约为水池有效深度的1/4、1/2、3/4、4/5、9/10),3个出水口自下而上依次编号1、2、3,分别距池底16、57、93 cm(约为水池有效深度的1/5、1/2、9/10),出水

口处又设有取样口以便随时取样,通过阀门控制。

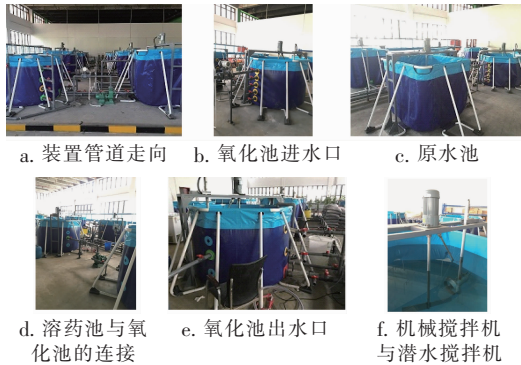


图1 化学氧化消减装置照片

Fig. 1 Photo of chemical oxidation and abatement device

1.3 试验方法

本研究通过中试一方面找到去除氨氮的最佳工艺条件,另一方面借此测试并完善装置的性能参数,其工艺流程如图2所示。

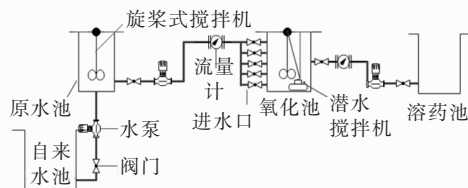


图2 化学氧化消减装置中试流程

Fig. 2 Flow chart of pilot-scale chemical oxidation and abatement device

整个中试在室温(25℃左右)下进行,首先在原水池中加入氯化铵并选择性加入硫酸溶液和氢氧化钠溶液,通入自来水配制成不同pH值和不同氨氮浓度的模拟水,启动原水池中的搅拌机混合均匀。选择性打开氧化池的进水阀门,通过流量计控制并记录进水流量。同时在溶药池内配好次氯酸钠溶液,打开阀门,通过流量计控制并记录药剂投加量,选择性启动氧化池内的搅拌机将药剂与水进行充分搅拌(与上述水样配制过程相同,均可通过手持式浊度仪和流速测定仪判断是否混合均匀)。调节搅拌机的搅拌速度,控制搅拌时间和静置反应时间,取水样过滤后测定出水氨氮浓度,考察氨氮浓度、次氯酸钠投加量、pH值、进出水口高度、搅拌方式、搅拌时间、搅拌速度、反应时间等工艺条件对氨氮去除效果的影响。此外,考虑到实际突发污染水源的氨氮浓度,本研究分别选取超过我国集中式生活饮用水地表水Ⅲ类水氨氮限值(1.0 mg/L)的5、10、20倍(即5.0、10.0、20.0 mg/L)作为初始浓度进行试

验。氨氮浓度采用纳氏试剂分光光度法测定。

2 试验方案与过程

2.1 去除氨氮的最佳工艺条件

2.1.1 工艺原理

试验采用折点加氯法去除氨氮,采用的药剂为次氯酸钠(俗称漂水)。折点加氯法是将氯通入水中把 NH_3-N 氧化成 N_2 的化学脱氮工艺^[10]。当氯通入水中达到某一点时水中游离氯含量最低,氨的浓度降为零,若氯通入量超过该点,水中的游离氯就会增多,因此该点称为折点,该状态下的氯化称为折点氯化。该方法最突出的优点是可通过正确控制加氯量和对流量进行均化,使水中氨氮浓度降为零,同时达到消毒目的^[11-12]。

2.1.2 正交试验

根据反应原理,影响次氯酸钠氧化脱氮的因素主要有氨氮初始浓度(A)、次氯酸钠投加量(B)、反应时间(C)和pH值(D),每个因素选取3个水平,选用 $L_9(4^3)$ 安排正交试验,如表1所示。

表1 正交试验因素和水平

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal experiments

水平	因素			
	A/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	B/ ($\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$)	C/min	D
1	5.0	1	10	4
2	10.0	3	30	8
3	20.0	5	60	12

2.1.3 单因素最优水平试验

参照正交试验结果,在典型浓度下以次氯酸钠投加量、反应时间和pH值为基本条件,确定常量与变量,进一步考察工艺条件对氨氮去除效果的影响。

① 次氯酸钠投加量对氨氮去除效果的影响

本研究分别考虑3个典型浓度下的试验效果,方便实际工程应用进行数据参考。控制反应时间为40 min,不调节pH值,模拟水中氨氮浓度为5.0 mg/L时分别投加1、1.5、1.7、1.8、2、2.3、2.5 mL/L次氯酸钠,模拟水中氨氮浓度为10.0 mg/L时分别投加1.5、1.7、1.8、1.9、2、2.3、2.5 mL/L次氯酸钠,模拟水中氨氮浓度为20.0 mg/L时分别投加10、12、15、16、17、20、25 mL/L次氯酸钠,考察次氯酸钠投加量对氨氮去除效果的影响。

② 反应时间对氨氮去除效果的影响

配制5.0、10.0、20.0 mg/L典型浓度的氨氮污

染模拟水样,不调节 pH 值,按照试验①确定的最佳量投加次氯酸钠,控制反应时间分别为 10、20、30、40、60、90、120 min,考察反应时间对氨氮去除效果的影响。

③ pH 值对氨氮去除效果的影响

仍选取以上 3 个典型浓度的氨氮污染模拟水样,控制 3 个典型浓度下的最佳次氯酸钠投量和最佳反应时间,调节反应 pH 值分别为 5、6、7、8、9、10、11,考察 pH 值对氨氮去除效果的影响。

2.2 装置性能参数优化

根据 2.1 节确定的最佳工艺条件,选取应急事件中常见氨氮浓度(10.0 mg/L),考察装置进出水口高度、搅拌方式、搅拌时间、搅拌速度对氨氮去除效果的影响,由此优化装置性能。

2.2.1 进出水口高度对氨氮去除效果的影响

配制 10.0 mg/L 典型浓度的氨氮污染模拟水样,不调节 pH 值,投加 1.9 mL/L 次氯酸钠,依次选择 1、2、3、4、5 号进水口(分别距池底 25、45、65、81、95 cm),启动旋桨式机械搅拌机以 60 r/min 搅拌 5 min,然后静置 40 min,从 3 号出水口(距池底 93 cm)取水样,过滤后检测氨氮浓度,考察进水口高度对氨氮去除效果的影响。

同理,从上述最佳进水口通入氨氮污染模拟水样,分别选择 1、2、3 号出水口(分别距池底 16、57、93 cm)取样,过滤后检测氨氮浓度,考察出水口高度对氨氮去除效果的影响。

2.2.2 搅拌方式对氨氮去除效果的影响

配制 10.0 mg/L 典型浓度的氨氮污染模拟水样,不调节 pH 值,投加 1.9 mL/L 次氯酸钠,选择最佳进水口通入模拟水样,分别启动旋桨式机械搅拌机、潜水搅拌机或者不采用搅拌机而利用水力搅拌混合,以 60 r/min 搅拌或不搅拌,5 min 后静置 40 min,选择最佳出水口取水样,过滤后检测氨氮浓度,考察搅拌方式对氨氮去除效果的影响。

2.2.3 搅拌时间与速度对氨氮去除效果的影响

配制 10.0 mg/L 典型浓度的氨氮污染模拟水样,不调节 pH 值,投加 1.9 mL/L 次氯酸钠,选择最佳进水口通入模拟水样,选择最佳搅拌方式机械搅拌,以 60 r/min 的速度分别搅拌 30、60、120、180、300 s,静置 40 min,选择最佳出水口取样,过滤后检测氨氮浓度,考察搅拌时间对氨氮去除效果的影响。

同理,选择上述最佳搅拌时间,分别以 60、75、

90、105、120 r/min 的速度搅拌,经同样处理后检测氨氮浓度,考察搅拌速度对氨氮去除效果的影响。

3 结果与讨论

3.1 氨氮去除工艺

经过正交试验,次氯酸钠氧化脱除氨氮的测定结果如表 2 所示。可知,各因素对氨氮去除效果的影响排序为氨氮初始浓度 > 反应时间 > 次氯酸钠投加量 > pH 值。

表 2 正交试验结果

Tab. 2 Orthogonal test results

试验号	A	B	C	D	氨氮去除率/%
1	1	1	1	1	34.95
2	1	2	2	2	78.50
3	1	3	3	3	58.91
4	2	1	2	3	64.33
5	2	2	3	1	78.20
6	2	3	1	2	44.32
7	3	1	3	2	16.38
8	3	2	1	3	9.73
9	3	3	2	1	18.94
\bar{k}_1	0.574 5	0.385 5	0.296 7	0.440 3	
\bar{k}_2	0.622 8	0.554 8	0.539 2	0.464 0	
\bar{k}_3	0.150 2	0.407 2	0.511 6	0.443 2	
R	0.472 6	0.169 3	0.242 5	0.023 7	

3.1.1 次氯酸钠投加量对氨氮去除效果的影响

试验结果表明,在室温、不调节 pH 值、反应 40 min 的条件下,氨氮去除率随次氯酸钠投加量的增加而快速提高。当氨氮初始浓度为 5.0 mg/L、次氯酸钠投加量为 2.5 mL/L 时,次氯酸钠氧化对氨氮的去除率可达到 99% 以上,但投加 1.7 mL/L 次氯酸钠时氨氮浓度已降到 1.0 mg/L 以下,综合考虑去除效果和运行成本确定次氯酸钠最佳投加量为 1.7 mL/L。同样可得,氨氮浓度超标 10 倍时次氯酸钠最佳投加量为 1.9 mL/L。此外,氨氮浓度超标 20 倍时,次氯酸钠投加量越大,氨氮去除率越高,但在最高投药量下反应 40 min 仍不足以使氨氮浓度达标,因此将在后续试验中综合考虑反应时间等因素寻找该浓度下的最佳投药量。

3.1.2 反应时间对氨氮去除效果的影响

在室温,不调节 pH 值,对应 5.0、10.0、20.0 mg/L 初始氨氮浓度的次氯酸钠投加量分别为 1.7、1.9、15 mL/L 的条件下,3 个典型浓度下氨氮去除率均大致随反应时间的增加而上升,120 min 后去除率可达到 90% 左右。40 min 处是一个拐点,10 ~ 40

min 内氨氮去除率快速提高(见图3),考虑到应急工程中要在最短时间内达到出水水质标准,因此确定最佳反应时间为40 min。

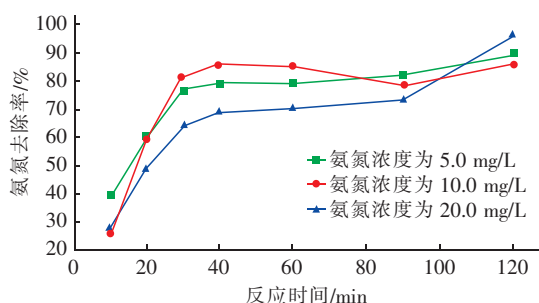


图3 反应时间对氨氮去除率的影响

Fig.3 Effect of reaction time on removal rate of ammonia nitrogen

3.1.3 pH 值对氨氮去除效果的影响

在室温,对应5.0、10.0、20.0 mg/L 初始氨氮浓度的次氯酸钠投加量分别为1.7、1.9、15 mL/L,反应40 min 的条件下,3 个典型浓度下氨氮去除率随pH 值的变化趋势一致,大致表现为从酸性到中性逐渐提高,然后从中性到碱性开始降低。pH 值为7~9 时氨氮去除率最高,该pH 值范围与测得的模拟水样的pH 值一致,因此不调节pH 值有利于氨氮的去除。同时还发现,在3 个典型浓度下,氨氮去除率随pH 值变化波动幅度较小,这说明pH 值对氨氮去除效果的影响较小,实际应用中可不考虑,与上述正交试验结果一致。

3.2 装置性能参数优化

3.2.1 进出水口高度对氨氮去除效果的影响

在氨氮初始浓度为10.0 mg/L 时,依次选择1、2、3、4、5 号进水口(分别距池底25、45、65、81、95 cm)运行工艺(室温、不调节pH 值、次氯酸钠投加量为1.9 mL/L、搅拌速度为60 r/min、反应40 min,下同),反应后从3 号出水口(距池底93 cm)出水,试验结果表明从5 号进水口进水时氨氮去除率最高,可达到92.88%。总体上来看,从5 个进水口进水时氨氮去除率波动范围不大,说明进水口高度对氨氮去除效果的影响相对较小。但为完善工艺性能,建议实际工程中设计进水口高度为水池有效深度的9/10。

从5 号进水口通入同样浓度的模拟水样,经装置处理后分别从1、2、3 号出水口取样,测得从3 号出水口出水时氨氮去除率要显著低于1 号和2 号,

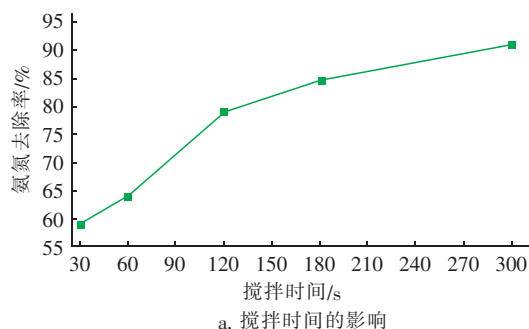
可能是搅拌机的安装高度限制了底部出水口的混合效率。从2 号出水口出水时氨氮去除率最高,达到92.77%,因此建议装置出水口设计高度为水池有效深度的1/2。

3.2.2 搅拌方式对氨氮去除效果的影响

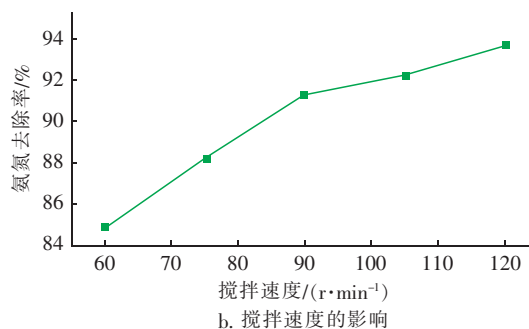
在氨氮初始浓度为10.0 mg/L 时,从5 号进水口进水,改变不同的搅拌方式运行反应后从2 号出水口出水,经旋桨式机械搅拌机搅拌后氨氮去除率最高,可达到90.88%;潜水搅拌机的效果次之,去除率约为82.89%;而单纯依靠进出水的水动力搅拌时氨氮去除率远低于机械搅拌和潜水搅拌,并且在相同条件下达不到出水水质要求。因此,建议装置的搅拌工艺采用机械搅拌桨。

3.2.3 搅拌时间与速度对氨氮去除效果的影响

在上述同等工艺条件下,搅拌时间和速度对氨氮去除效果的影响较大,氨氮去除率均随搅拌时间和速度的增加而提高,见图4。



a. 搅拌时间的影响



b. 搅拌速度的影响

图4 搅拌时间与速度对氨氮去除率的影响

Fig.4 Effect of stirring time and speed on removal rate of ammonia nitrogen

如图4(a)所示,当搅拌时间达到300 s(即5 min)时氨氮去除率最高可达90%以上,但搅拌180 s(即3 min)时已达到出水水质要求,为节约成本,选择装置最佳搅拌时间为3 min。如图4(b)所示,搅拌速度越快则氨氮去除率越高,控制搅拌时间为

3 min, 搅拌速度达到 75 r/min 时出水水质可达标, 超过 100 r/min 时氨氮去除率可达到 90% 以上。因此, 建议装置搅拌速度控制在 75 r/min 以上。

3.3 补充与讨论

3.3.1 关于折点加氯法与余氯处理

折点加氯法虽然便捷、高效, 但也应考虑到出水中残留的氯对河流中鱼类具有较大的致死性, 研究发现当水中游离氯含量超过 0.4 mg/L 时, 对鱼类致死量较高^[13-14]。为验证该结论的可靠性, 本研究在氧化池出水中放养了 10 条罗非鱼, 5 min 内全部死亡。因此, 投加次氯酸钠处理后的出水在排放前一般需要用双氧水进行反氯化, 以去除水中残留的氯, 最大程度降低死鱼现象。后续试验初步研究了在保证投加足量的次氯酸钠时双氧水的投加量与反应时间对水中余氯的影响。

分别选择超标 5、10、20 倍浓度的氨氮模拟水样进行试验, 通入各浓度下最佳量的次氯酸钠, 发现经最佳工艺处理后, 出水余氯浓度大致在 5 mg/L 左右 (实测 5.3 mg/L), 因此本试验考察在该余氯浓度下双氧水的投加情况。在处理出水中分别投加 8、10、15、20、25、30、35 $\mu\text{L/L}$ 双氧水, 反应 15、30、60 min 后快速测定出水中游离氯的浓度, 结果如图 5 所示。

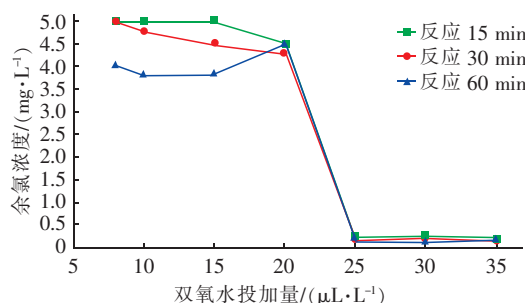


图 5 双氧水对余氯的去除效果

Fig. 5 Removal of residual chlorine by hydrogen peroxide

由图 5 可知, 余氯浓度随双氧水投加量和反应时间的增加而减少。25 $\mu\text{L/L}$ 是双氧水投加量的拐点, 投加 8~20 $\mu\text{L/L}$ 双氧水, 余氯浓度开始逐渐降低, 当投加 25 $\mu\text{L/L}$ 时余氯浓度急剧下降, 反应 30 min 后降到 0.2 mg/L 以下, 超过 25 $\mu\text{L/L}$ 时余氯浓度虽有所降低但进展缓慢。去除余氯后再次在氧化池中放养 10 条罗非鱼, 24 h 内仅有 1 条死亡。因此, 建议双氧水最佳投量为 25 $\mu\text{L/L}$ 。

3.3.2 关于装置的完善升级

处理流量 (4 m^3/h)、搅拌桨安装高度 (距池底

20 cm)、桨叶形式 (旋桨式两叶桨) 等参数, 也有很大可能影响装置的运行效果, 因此后续研究可改变这些参数, 对装置性能进一步完善升级。

4 结论

① 次氯酸钠氧化脱除氨氮的影响因素排序为: 氨氮初始浓度 > 反应时间 > 次氯酸钠投加量 > pH 值。由于反应 pH 值对氨氮去除率的影响较低, 实际工程中可不作考虑。典型浓度下应急处理氨氮污染饮用水源的最佳工艺条件如下: 在常规 pH 值条件下, 水中氨氮浓度超标 5、10、20 倍时分别投加次氯酸钠 1.7、1.9、15 mL/L, 反应 40 min, 基本能使水中氨氮浓度降到地表水Ⅲ类标准限值 1.0 mg/L 以下。

② 化学氧化装置主体材料强度高、耐腐蚀性强, 钢管支架支撑性好, 搭建灵活、方便, 装置整体上便捷、可拆卸, 满足应急处理设备的要求。建议设置装置的有效处理水深为水池高度的 4/5; 进水口设在水池有效深度的 9/10 处, 出水口设在水池有效深度的 1/2 处; 装置内选用机械搅拌桨, 搅拌速度不低于 75 r/min, 搅拌时间不少于 3 min。

③ 双氧水能有效降低水中余氯浓度, 当出水中余氯浓度约为 5 mg/L 时, 投加 25 $\mu\text{L/L}$ 双氧水、反应 30 min 后余氯浓度能降到 0.2 mg/L 以下, 减轻对水生生物的危害。

参考文献:

- [1] 张芳, 王伟亮, 成杰民. 流域突发性水污染事故应急体系构思[J]. 环境科技, 2010, 23(1): 57-60.
Zhang Fang, Wang Weiliang, Cheng Jiemin. Conception on emergency system of water pollution accident in lake basin [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 23(1): 57-60 (in Chinese).
- [2] 李秋霞, 孙洪伟, 赖能城, 等. 预氯化去除饮用水水源中高浓度氨氮等污染因子的应急处理研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(3): 99-103.
Li Qiuxia, Sun Hongwei, Lai Nengcheng, et al. Counter-emergency removing pollutants at high concentration of water source of drinking water by pre-chlorination technology [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(3): 99-103 (in Chinese).
- [3] 陈星宇, 马鑫铭, 史明, 等. 折点氯化法除钨冶炼厂氨氮废水研究[J]. 中国钨业, 2019, 34(1): 45-49.
Chen Xingyu, Ma Xinming, Shi Ming, et al. Treatment of

- ammonia nitrogen wastewater from tungsten smelter by breakpoint chlorination [J]. China Tungsten Industry, 2019, 34(1): 45–49 (in Chinese).
- [4] 单明丹,周吉娜,唐世刚. 去除城市污水中氨氮的方法研究[J]. 环境与发展, 2017, 29(9): 66–67.
Shan Mingdan, Zhou Jina, Tang Shigang. Study on the method of removing ammonia nitrogen from urban sewage [J]. Environment and Development, 2017, 29(9): 66–67 (in Chinese).
- [5] 孙文彦. 饮用水常见污染防治及污染事件应急处理[J]. 建筑工程技术与设计, 2014(33): 1025.
Sun Wenyan. Prevention and treatment of common pollution in drinking water and emergency treatment of pollution events [J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2014(33): 1025 (in Chinese).
- [6] Shang C, Blatchley E R. Chlorination of pure bacterial cultures in aqueous solution [J]. Water Res, 2001, 35(1): 244–254.
- [7] 宁平,曾凡勇,胡学伟. 中高浓度氨氮废水综合处理[J]. 有色金属, 2003, 55(z1): 130–132.
Ning Ping, Zeng Fanyong, Hu Xuewei. Comprehensive treatment of middle/high NH_3 -N content wastewater [J]. Nonferrous Metals, 2003, 55(z1): 130–132 (in Chinese).
- [8] 顾庆龙. 次氯酸钠氧化法脱除二级生化出水中氨氮的中试研究[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(12): 97–99, 147.
Gu Qinglong. The pilot trim of ammonia nitrogen removal from secondary treatment effluent by sodium hypochlorite oxidation [J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(12): 97–99, 147 (in Chinese).
- [9] 张胜利,刘丹,曹臣. 次氯酸钠氧化脱除废水中氨氮的研究[J]. 工业用水与废水, 2009, 40(3): 23–26.
Zhang Shengli, Liu Dan, Cao Chen. Removal of ammonia-nitrogen from wastewater by sodium hypochlorite oxidization [J]. Industrial Water & Wastewater, 2009, 40(3): 23–26 (in Chinese).
- [10] 陆少鸣,陶光华,王健. 饮用水原水突发性铬污染的应急处理研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(11): 136–138.
Lu Shaoming, Tao Guanghua, Wang Jian. Emergency treatment of accidental chromium pollution in raw drinking water [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(11): 136–138 (in Chinese).
- [11] 黄堃. UASB + A/O + 折点氯化法处理高氨氮高有机物废水的工艺研究[D]. 南昌:南昌大学, 2012.
Huang Kun. UASB + A/O + Breakpoint Chlorination Process Treat the High Organic Wastewater with High Ammonia Nitrogen [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012 (in Chinese).
- [12] Bouropoulos N C, Koutsoukos P G. Spontaneous precipitation of struvite from aqueous solutions [J]. Journal of Crystal Growth, 2000, 213(3/4): 381–388.
- [13] 曾江宁,陈全震,郑平,等. 余氯对水生生物的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2717–2724.
Zeng Jiangning, Chen Quanzhen, Zheng Ping, et al. Advanced in effect of residual chlorine on hydrobios [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2717–2724 (in Chinese).
- [14] 王荣生,黄翔峰,谢浩,等. 城市污水厂尾水氯消毒及其余氯控制技术进展[J]. 贵州环保科技, 2003, 9(4): 16–20.
Wang Rongsheng, Huang Xiangfeng, Xie Hao, et al. Chlorine disinfection and other chlorine control techniques in the tail water of municipal wastewater treatment plant [J]. Guizhou Environmental Protection Science and Technology, 2003, 9(4): 16–20 (in Chinese).



作者简介:朱芳瑶(1993–),女,湖北宜昌人,硕士研究生,研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: zhufy02@vanke.com

收稿日期:2019–07–12