

工程实例

二氧化氯除锰技术在某县城地表水厂改造中的应用

吴雪军, 李益飞, 许秋海, 李晓莉, 赵文辉, 吴 晗

(南昌市城市规划设计研究总院, 江西 南昌 330038)

摘 要: 针对某县城水厂原水 Mn^{2+} 季节性超标的问题, 分析 Mn^{2+} 超标的原因, 根据对我国现行除锰工艺的比较, 以及利用水厂现场装置进行的试验成果, 确定采用 ClO_2 氧化、石灰碱液调节原水 pH 值方案作为去除 Mn^{2+} 的最终方案, Mn^{2+} 被氧化生成的 MnO_2 沉淀物, 通过沉淀和过滤得以去除。经除锰改造后, 水厂长期运行稳定。在原水 Mn^{2+} 含量季节性超标的地表水厂中, 二氧化氯除锰方案可以推广应用。

关键词: 地表水; 除锰; 二氧化氯

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)10-0071-06

Application of Manganese Removal in Surface Water by Chlorine Dioxide in the Reform of a County Waterworks

WU Xue-jun, LI Yi-fei, XU Qiu-hai, LI Xiao-li, ZHAO Wen-hui, WU Han
(Nanchang Urban Planning & Design Institute, Nanchang 330038, China)

Abstract: The reasons for seasonal exceeding raw water standard of Mn^{2+} content in a county surface waterworks were analyzed. According to the compared result of current manganese removal processes in China and the field experiment results, a final solution including use of chlorine dioxide as an oxidizing agent and lime alkali solution to regulate the pH value of raw water was determined. The Mn^{2+} was oxidized to MnO_2 deposit, then removed by precipitation and filtration. The long-term operation results showed that the reformed waterworks had an ideal and stable effect. The practice has showed that the technology of removing manganese by chlorine dioxide may be popularized for use in surface waterworks with seasonal exceeding standard of Mn^{2+} content in raw water.

Key words: surface water; manganese removal; chlorine dioxide

1 水厂现状调查

1.1 水厂现状

江西省某县城水厂监测到近几年5月—11月期间一般会出现原水锰含量超标现象, 出厂水锰含量基本在 $0.1 \sim 0.4 \text{ mg/L}$ 之间波动, 不能满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006) 中的出厂水锰含量 $\leq 0.1 \text{ mg/L}$ 要求, 其他出厂水水质指标均能满足标准。

虽然锰在生命体系中很重要, 但含量过高时会

产生毒性和危害。研究表明, 过多的锰会对人和动物的造骨机能造成破坏, 引发锰佝偻病, 还可能导致慢性中毒, 产生神经、免疫、生殖系统等方面的疾病, 如运动性机能障碍、语言障碍、精神失常、肢体乏力、免疫功能下降等^[1]。当锰含量 $> 0.3 \text{ mg/L}$ 时, 水会产生异味。锅炉用水中锰含量超标, 可生成罐泥和水垢; 自来水中含有过量锰时, 洗涤的衣物上会生成锈斑; 若冷却用水中锰超标, 则锰能附着于加热的管壁上, 降低管壁的传热性能^[2]。

该自来水厂设计规模为 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 分成三期建设, 第一期建于 20 世纪 80 年代, 规模为 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 工艺为静态混合器 + 网格絮凝池 + 斜管沉淀池 + 重力无阀滤池; 第二期建于 20 世纪 90 年代, 规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 工艺为静态混合器 + 穿孔旋流絮凝池 + 斜管沉淀池 + 重力无阀滤池。第三期建于 2006 年, 规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 工艺为静态混合器 + 穿孔旋流絮凝池 + 斜管沉淀池 + 重力无阀滤池。

水厂采用二氧化氯消毒。

水源取自该县境内一中型水库, 水源距水厂约 9.8 km。

1.2 检测数据

2013 年 7 月—2014 年 7 月期间, 进、出厂水抽样检测每月锰含量最高的数据见表 1。

表 1 每月最高锰含量

Tab. 1 Maximum manganese content per month

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

检测时间	锰含量	
	原水 (加药点前端)	出厂水 (供水泵房)
2013 年 7 月 29 日	0.265	0.253
2013 年 8 月 14 日	0.282	0.257
2013 年 9 月 2 日	0.316	0.287
2013 年 10 月 16 日	0.210	0.198
2013 年 11 月 3 日	0.121	0.089
2013 年 12 月 2 日	0.097	0.084
2014 年 1 月 16 日	0.077	0.065
2014 年 2 月 21 日	0.084	0.075
2014 年 3 月 13 日	0.065	0.060
2014 年 4 月 16 日	0.086	0.075
2014 年 5 月 16 日	0.173	0.165
2014 年 6 月 16 日	0.224	0.195
2014 年 7 月 16 日	0.257	0.234

从表 1 可以看出, 原水锰含量超标后, 现状水处理工艺除锰效果甚微, 亟需寻求解决除锰达标技术方案。

1.3 锰超标原因分析

经检测, 水源地水库锰含量随着水深变化呈现出明显的垂直分布规律, 水库锰超标的范围主要集中在水库的下层。2014 年 6 月 15 日水源地取水口附近锰含量检测数据见表 2。检测日水库水面标高为 84.3 m (黄海高程, 以下同), 取水进水口标高为 74.0 m。

表 2 水库分层水深锰含量

Tab. 2 Manganese content under various water depths in reservoir

水深/m	锰含量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
1	0.032
3	0.055
5	0.074
8	0.168
10	0.253
15	0.556

水厂取水口位于水深约 10 m 处, 位于锰含量较高的水库下层, 这是水厂原水锰含量超标的最主要原因。水库锰含量超标主要出现在夏、秋季, 由于气温较高, 水体形成了温跃层, 上下水体缺少对流运动, 导致溶解氧无法穿过温跃层, 温跃层以下的水体随着溶解氧逐渐消耗而呈现还原状态, 这时沉积于底部的高价态锰会被还原为低价态而溶于水中, 造成溶解性锰含量超标^[3]。

2 除锰工艺选择

2.1 除锰工艺比较

饮用水除锰的研究主要集中在地下水除锰 (见表 3), 对于地表水, 因其锰含量不高而未受到特别重视。近年来, 国内外逐步开展了针对地表水的除锰方法的研究。

表 3 常用的地下水除锰方法比较

Tab. 3 Comparison of common manganese removal methods in ground water

方法	优点	缺点
自然氧化法 ^[4]	工艺使用早, 技术成熟	①反应慢, 时间长; ②效果不理想
空气接触氧化法 ^[5,6]	流程简单, 效果优于自然氧化法	①滤料成熟期较长; ②操作不易控制
臭氧氧化法 ^[7-9]	①反应较快、不产生污泥; ②对较低的 pH 值也适用; ③不生成三卤甲烷; ④可降低水的味、臭和色度	①成本高; ②投加量难控制; ③生成致癌物质 (溴酸盐)
高锰酸钾氧化法	反应快、效果明显	①投加量难以控制, 容易造成出厂水色度增加; ②运行费用高
氯接触过滤法	①可利用现场消毒设备, 投加简单; ②改造费用低	①反应慢, 接触时间长; ②一般要把滤砂改为锰砂; ③副产物多, 不利健康

续表3 (Continued)

方法	优点	缺点
生物固锰除锰法 ^[10]	①无需投加化学药剂; ②流程简单	①增设生物除锰滤池; ②滤前需曝气; ③改造费用高; ④工程实际应用较少
二氧化氯除锰法 ^[11]	①反应快、效果优于液氯除锰; ②可利用现场消毒设备,投加简单; ③改造费用低; ④不产生具有致癌作用的三氯甲烷等副产物	①目前自来水中主要用于消毒; ②会产生亚氯酸盐副产物

地表水处理工艺流程中一般包含混凝沉淀或混凝气浮工艺,对于现有水厂改造,本不含除锰工艺,如在现有基础上改造,不适合采用影响沉淀效果的曝气设施,因自然氧化、接触氧化、生物除锰都需要滤前曝气,故不宜作为优先选项。同时为了减少增设中间构筑物对水处理流程的影响,适合选择外加药剂的方法,如臭氧氧化法、高锰酸钾氧化法、氯接触氧化法、二氧化氯氧化法等。如邯郸市铁西水厂成功采用了高锰酸钾氧化法除锰^[12];合肥市供水集团采用了液氯对地表水厂进行应急除锰^[13];福建省三明市富兴堡水厂和泉州市北区水厂均运用了二氧化氯氧化技术实现除锰^[14,15]。

2.2 二氧化氯除锰方案

二氧化氯不仅具有较强的氧化能力,而且在处理饮用水时,不产生具有致癌作用的三氯甲烷等副产物。据报道^[11],二氧化氯的除锰效能不仅比液氯高,也优于臭氧和高锰酸钾。同时,在较小水处理规模下,二氧化氯的现场制备费用要比液氯经济(见表4)。

表4 理论消耗量和运行成本比较

Tab.4 Comparison of theoretical consumption and operating costs

除锰方法	去除1 mg/L的Mn ²⁺ 理论药剂消耗量/(mg·L ⁻¹)	理论运行成本/(元·m ⁻³)
臭氧氧化法	0.88	0.027~0.045
高锰酸钾法	1.91	0.048
氯接触氧化法	1.3	0.006~0.010
二氧化氯氧化法	0.5	0.004~0.008
注: 实际药剂消耗量一般比理论消耗量高出数倍。		

二氧化氯消毒已经在小规模水厂中得到了广泛的应用。近年来,国内外开展了很多二氧化氯去除地表水铁锰的技术的研究,并有自来水厂成功应用^[14,15]。现有水厂由于采用了二氧化氯消毒工艺,

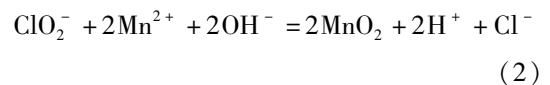
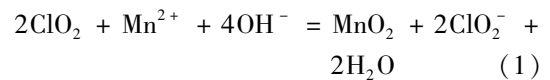
为了降低试验的难度,可以利用现场装置进行短期试验,并严密监测出水水质。如果利用现有装置兼实现二氧化氯除锰试验能够成功,就可以采用这种方案实施改造,更为简单、经济,同时可以尽快实现达标,满足安全饮水需求。

本次采用现场试验、监测的方法,以验证二氧化氯除锰方法在该水厂是否适用。

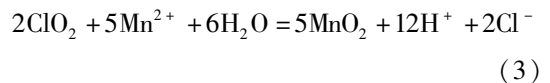
2.3 二氧化氯除锰原理

二氧化氯除锰的原理是利用ClO₂较强的化学氧化性,将二价锰氧化成四价锰,形成不溶性沉淀物,然后通过常规工艺处理(混凝、沉淀、过滤)去除。

水中锰与二氧化氯的反应分两步:



总反应式:



有研究^[16]表明:第一步反应很快,较彻底,第二步反应缓慢。进行两步反应时,根据总反应式,氧化1 mg/L的Mn²⁺所需的ClO₂理论值为0.5 mg/L。为了追求较快的处理效果,工程上一般只考虑第一步反应,按式(1)计算,去除1 mg Mn²⁺需要2.43 mg ClO₂。影响二氧化氯除锰效果的主要因素有二氧化氯投加量、投加点、pH值、原水水质、水温等。

当在水体过滤前端投加ClO₂时,ClO₂会和水中的锰迅速混合并反应,形成的MnO₂^[13](有人认为催化剂不是二氧化锰,而是浅褐色的α型Mn₃O₄)不溶性胶体在水中呈极细微的颗粒状态,然后通过沉淀和过滤得以去除。随着过滤的进行,滤料表面会覆盖上一层锰沉积物(锰质活性滤膜)。研究表明,锰质活性滤膜对水中的二价锰具有一定的催化吸附作用,从而提高水中锰去除效率,同时降低二氧化氯的投加量。由于二氧化氯氧化反应过程会产生H⁺,因此需要保持一定的碱度以满足二氧化氯持续氧化的要求。因二氧化氯的强氧化性,可在pH值较低条件下进行,不需要等到滤料成熟,就能使出水快速达标。

2.4 二氧化氯除锰现场试验

现场试验利用水厂第三期构筑物进行,第三期

处理规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 工艺为静态混合器 + 穿孔旋流絮凝池 + 斜管沉淀池 + 重力无阀滤池 + 二氧化氯消毒。从现有二氧化氯投加管道 De40 接一根相同管径的 UPVC 塑料管至穿孔絮凝池进水口作为二氧化氯投加口, 管道长约 12 m, 管道上设一控制阀门。

分两种工况进行试验:

第一种工况仅投加二氧化氯, 其他按照水厂原有模式运行。试验开始时间为 2014 年 7 月 29 日 16 时 48 分。

第二种工况在进水附近投加石灰乳液, 调节进水 pH 值, 同时投加二氧化氯, 其他按照水厂原有模式运行。试验开始的时间为 2014 年 8 月 3 日 9 时 36 分。

考虑构筑物中有一定的停留时间, 滤后水检测数据为二氧化氯开始投加后 12 h 的检测数据, 检测点为滤池出水口处。工况一和工况二的试验数据分别见表 5、6。

表 5 第一种工况试验数据

Tab. 5 Experimental data under the first operating condition

原水		ClO ₂ 投加量/ (mg · L ⁻¹)	12 h 滤后水		
pH 值	Mn 含量/ (mg · L ⁻¹)		pH 值	Mn 含量/ (mg · L ⁻¹)	余氯/ (mg · L ⁻¹)
6.42	0.261	1.0	6.19	0.15	0.01
6.42	0.263	1.5	6.07	0.09	0.04
6.42	0.262	2.0	5.98	0.04	0.07

表 6 第二种工况试验数据

Tab. 6 Experimental data under the second operating condition

原水(调整 pH 值)		ClO ₂ 投加量/ (mg · L ⁻¹)	12 h 滤后水		
pH 值	Mn 含量/ (mg · L ⁻¹)		pH 值	Mn 含量/ (mg · L ⁻¹)	余氯/ (mg · L ⁻¹)
7.0	0.262	1.5	6.1	0.074	0.03
7.5	0.262	1.5	6.5	0.030	0.02
8.0	0.263	1.5	6.8	0.026	0.01

试验数据表明, 在原水 Mn 含量约 0.262 mg/L, 二氧化氯投加量超过 1.5 mg/L, 即二氧化氯投加量与原水 Mn 含量比值 ≥ 5.73 , pH 值为 7.5 ~ 8.0 时, 出水锰和 pH 值可以达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006) 要求的锰含量 $\leq 0.1 \text{ mg/L}$ 和 pH 值为 6.5 ~ 8.5 的目标。其中二氧化氯投加量超出了理论投加量(约 0.64 mg/L), 主要是因为原水中含有的其他还原性物质(如 Fe^{2+} 等) 参与了反应。另外, 检测工况二的副产物亚氯酸盐的含量, 均小于

0.3 mg/L, 优于标准 ($\leq 0.7 \text{ mg/L}$) 的要求。

2.5 现场除锰方案的选择

为尽早解决该县城水厂锰超标问题, 根据现场试验结果, 本次选择在静态混合器前投加石灰乳液调节 pH 值至 8 左右, 在反应池进口处投加二氧化氯, 控制投加量为原水锰含量的 6 倍左右, 作为除锰达标方案(见图 1)。

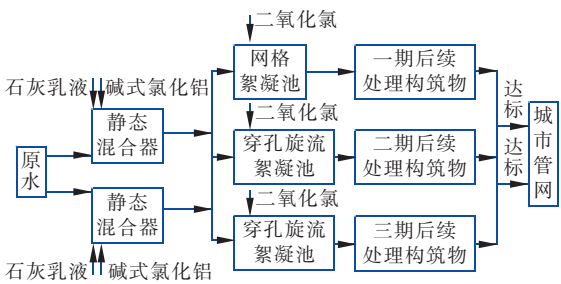


图 1 除锰方案示意

Fig. 1 Schematic diagram of manganese removal scheme

3 除锰设施的设计和运行

3.1 二氧化氯投加设计

为确保安全, 设计原水锰含量最高为 0.5 mg/L, 除锰二氧化氯最大投加量为 3 mg/L。

水厂原加氯加药间内部已经布满, 无法新增加氯设备, 原有二氧化氯发生器最大投加量为 1 kg/h, 需增设两台 5 kg/h 的二氧化氯发生器, 一用一备。原加氯加药间旁边有一块空地, 可以新建加氯加碱间。

二氧化氯投加点设在各絮凝池进水口处。

3.2 石灰碱液投加设计

原水以 pH = 6.5 计算, 调节后以 pH = 8.0 计算, 考虑石灰最大投加量为 1 mg/L。

加碱间和加氯间合建, 采用自动化石灰一体投加设备(见图 2)。投加量为 1 ~ 5 kg/h, 投加点为现状静态混合器前约 10 m 位置。

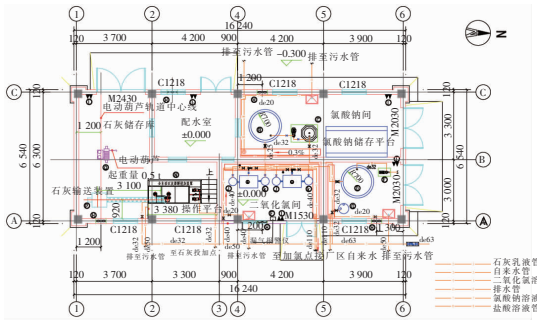


图 2 加碱加氯间平面布置

Fig. 2 Floor plan of chlorination & alkalization room

3.3 运行监测数据

从 2015 年 5 月水厂除锰改造工程竣工开始,在
原水锰含量季节性超标期间,除锰工艺能有效运行,

出水指标均能稳定达到《生活饮用水卫生标准》
(GB 5749—2006)中锰含量 $\leq 0.1\text{ mg/L}$ 的标准要
求。部分锰超标时段运行数据记录见表 7。

表 7 实际运行监测数据

Tab. 7 Operational monitoring data

时间	原水		ClO ₂ 投加量/ (mg · L ⁻¹)	调整原水 pH 值	滤后水		
	pH 值	Mn 含量/ (mg · L ⁻¹)			pH 值	Mn 含量/ (mg · L ⁻¹)	余氯/ (mg · L ⁻¹)
2015 年 6 月 2 日	6.16	0.206	1.0	7.8	7.2	0.03	0.02
2015 年 6 月 23 日	6.18	0.255	1.1	7.6	7.1	0.04	0.04
2015 年 7 月 15 日	6.21	0.262	1.3	7.7	7.2	0.03	0.02
2015 年 8 月 2 日	6.35	0.285	1.5	8.0	7.2	0.04	0.05
2015 年 8 月 25 日	6.45	0.285	1.5	7.9	7.1	0.04	0.04
2015 年 9 月 5 日	6.46	0.288	1.5	8.0	7.1	0.03	0.03
2015 年 9 月 18 日	6.45	0.287	1.5	7.9	7.2	0.03	0.04
2016 年 7 月 8 日	6.31	0.282	1.5	7.8	7.1	0.04	0.04
2016 年 8 月 2 日	6.42	0.295	1.5	7.8	7.0	0.05	0.05
2016 年 9 月 16 日	6.44	0.321	1.7	8.0	6.9	0.05	0.04

3.4 制水增加成本

水厂原水锰含量季节性超标期间,平均增加
ClO₂ 投加量约 1.3 g/m³,投加石灰量约 0.1 g/m³,
按当地药剂市场行情,运行成本仅增加约 0.015 元/
m³。

4 结论和建议

该县城水厂二氧化氯除锰设施已建成运行两
年,在原水锰超标的情况下,完全能保证出厂水锰达
标。

① 工程实践证明,在采用传统工艺的地表水
水厂中,采用二氧化氯除锰的效果较为理想,在
Mn²⁺ 含量季节性超标的地表水厂可以推广应用。

② 理论上去除 1 mg Mn²⁺ 需要投加 0.5 ~
2.43 mg ClO₂,工程应用中由于原水中可能存在部
分其他还原性物质会消耗部分 ClO₂,实际 ClO₂ 投加
量应根据原水试验确定,同时应检测出水副产物亚
氯酸盐的含量,确保满足国家标准。

③ 由于 ClO₂ 除锰反应中需要消耗 OH⁻,为
保证反应的正常进行,投加 ClO₂ 之前需要投加碱
液,建议控制 pH 值为 7.5 ~8.5。

参考文献:

[1] 荆俊杰,谢吉民. 微量元素锰污染对人体的危害[J].
广东微量元素科学,2008,15(2):6-9.
Jing Junjie,Xie Jimin. Hazards of manganese pollution
to health [J]. Guangdong Trace Elements Science,

2008,15(2):6-9(in Chinese).

[2] 叔贵新,王海臣. 地下水中的铁锰对供水管井及输供
水管网的危害[J]. 西南给排水,2000,(4):23-26.
Shu Guixin,Wang Haichen. The damage of iron and
manganese in underground water to water supply pipe
well and network[J]. Southwest Water & Wastewater,
2000,(4):23-26(in Chinese).
[3] 徐毓荣,徐钟际,向申,等. 季节性缺氧水库铁、锰垂
直分布规律及优化分层取水研究[J]. 环境科学学
报,1999,19(2):147-152.
Xu Yurong,Xu Zhongji,Xiang Shen,*et al.* Vertical dis-
tribution of Fe and Mn and optimal pumping depth in a
seasonal oxygen shortage reservoir[J]. Journal of Envi-
ronmental Sciences, 1999, 19 (2) : 147 - 152 (in Chi-
nese).
[4] 范懋功. 地下水接触氧化除锰中催化剂的形态[J].
中国给水排水,1985,1(3):56-57.
Fan Maogong. The form of catalyst in manganese remov-
al of groundwater by catalytic oxidation[J]. China Wa-
ter & Wastewater,1985,1(3):56-57(in Chinese).
[5] 李圭白,刘超. 地下水除铁锰[M]. 北京:中国建筑
工业出版社,1989.
Li Guibai,Liu Chao. Removal of Iron and Manganese
from Groundwater[M]. Beijing: China Architecture &
Building Press,1989(in Chinese).
[6] 李圭白. 地下水除铁除锰技术的若干新发展[J]. 给
水排水,1983,9(3):1-4.
Li Guibai. Several new developments in removal technol-

- ogy of iron and manganese from groundwater[J]. Water & Wastewater Engineering, 1983, 9(3): 1-4 (in Chinese).
- [7] 张济新. 分析化学实验[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 1997.
- Zhang Jixin. Analytical Chemistry Experiment [M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 1997 (in Chinese).
- [8] 武汉大学. 分析化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984.
- Wuhan University. Analytical Chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 1984.
- [9] 吴清平, 孟凡亚, 张菊梅, 等. 臭氧消毒中溴酸盐的形成、检测与控制[J]. 中国给水排水, 2006, 22(16): 12-15.
- Wu Qingping, Meng Fanya, Zhang Jumei, *et al.* Formation, detection and control of bromate in the ozone disinfection of drinking water [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(16): 12-15 (in Chinese).
- [10] 余健. 生物过滤去除饮用水中有机物、铁和锰的特性与机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
- Yu Jian. The Research on Removal Characteristic and Mechanism of Organic Matter, Iron and Manganese in the Drinking Water by Biofiltration [D]. Changsha: Hunan University, 2004 (in Chinese).
- [11] 张金松. 饮用水二氧化氯净化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- Zhang Jinsong. Chlorine Dioxide Treatment Technology for Drinking Water [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002 (in Chinese).
- [12] 时真男, 蔡振宇, 李思敏, 等. 高锰酸钾在邯郸市地表水厂中除锰的生产性应用[J]. 河北建筑科技学院学报, 2004, 21(2): 9-11.
- Shi Zhennan, Cai Zhenyu, Li Simin, *et al.* Productive usage of permanganate removing manganese in surface water plant in Handan [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2004, 21(2): 9-11 (in Chinese).
- [13] 孙玉华, 强昌林. 液氯应用于地表水厂应急除锰研究[J]. 供水技术, 2011, 5(2): 29-31.
- Sun Yuhua, Qiang Changlin. Emergency removal of manganese with liquid chlorine in waterworks [J]. Water Technology, 2011, 5(2): 29-31 (in Chinese).
- [14] 郭星庚, 余伟鸣. 二氧化氯(电解法)除锰工艺在富兴堡水厂的运用[J]. 城镇供水, 2001, (4): 12-13.
- Guo Xinggeng, Yu Weiming. Application of manganese removal with chlorine dioxide (electrolysis method) at Fuxingbao water plant [J]. City and Town Water Supply, 2001, (4): 12-13 (in Chinese).
- [15] 李常英. 泉州市北区水厂应用二氧化氯除锰的研究[J]. 科学论坛, 2012, (14): 294-294.
- Li Changying. Research on removal of manganese by chlorine dioxide in Beiqu Waterworks of Quanzhou City [J]. China Science and Technology Review, 2012, (14): 294-294 (in Chinese).
- [16] 许友芹, 李金成, 王娟, 等. 二氧化氯预氧化处理含锰地下水的试验研究[J]. 西南给排水, 2006, 28(6): 24-27.
- Xu Youqin, Li Jincheng, Wang Juan, *et al.* The study on the removal of manganese in groundwater by chlorine dioxide pre-oxidation [J]. Southwest Water & Wastewater, 2006, 28(6): 24-27 (in Chinese).



作者简介: 吴雪军(1978-), 男, 江西高安人, 硕士, 高级工程师, 国家注册公用设备工程师, 注册环保工程师, 注册咨询工程师, 主要从事市政给排水工程咨询、规划、设计及研究工作。

E-mail: 21124493@qq.com

收稿日期: 2018-01-29