

技术总结

间歇/串联式次氯酸钠发生器在农村地表水厂的应用

李连香¹, 谢 薇², 王继成³, 刘文朝¹, 王雪莹¹

(1. 中国灌溉排水发展中心<水利部农村饮水安全中心>, 北京 100054; 2. 北京市农村改水领导小组办公室, 北京 100053; 3. 山东恒泰工程集团有限公司, 山东 滨州 256600)

摘 要: 为适应中小型农村供水工程消毒需要,提高次氯酸钠产量和电解效率,间歇/串联式次氯酸钠发生器通过两个电极串联实现同电流、相互独立电解,在实验室研究的基础上进行设备定型,并应用在重庆农村地表水厂。研究表明,该间歇/串联式次氯酸钠发生器在盐水浓度为3%、盐水体积为120 L、电解时间为300 min条件下,有效氯产量为1 038 g,运行成本可低至6.55元/kg。设备定型后在重庆农村地表水厂取得了良好的应用效果,当滤前和滤后消毒剂投加量为1.4 mg/L时,有效保障了出厂水和管网末梢水的微生物安全性,且运行成本仅为0.01元/m³。间歇/串联式次氯酸钠发生器在下一步推广应用过程中需重点提高设备的可靠性、确保适宜的消毒剂投加量,并重视消毒副产物的测试与消毒剂的储存等工作。

关键词: 间歇/串联式次氯酸钠发生器; 地表水厂; 电解; 消毒剂

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0037-05

Application of Intermittent/Series Sodium Hypochlorite Generator in Rural Surface Water Plant

LI Lian-xiang¹, XIE Wei², WANG Ji-cheng³, LIU Wen-chao¹, WANG Xue-ying¹

(1. China Irrigation and Drainage Development Center <Rural Drinking Water Safety Center of Ministry of Water Resources>, Beijing 100054, China; 2. Beijing Rural Water Supply Guidance Center, Beijing 100053, China; 3. Shandong Hengtai Engineering Group Co. Ltd., Binzhou 256600, China)

Abstract: In order to meet the disinfection demand of medium and small rural water supply projects and improve the production and electrolytic efficiency of the sodium hypochlorite, the intermittent/series sodium hypochlorite generator with two tandem electrodes which electrolyzed independently, was set up and applied in Chongqing rural surface water plant based on laboratory experiments. The results showed that the intermittent/series sodium hypochlorite generator could reach the minimum running cost of 6.55 yuan/kg, when the operation conditions were brine concentration of 3%, brine volume of 120 L, electrolysis time of 300 minutes and available chlorine production of 1 038 g. The approved equipment also achieved good applied results in Chongqing rural surface water plant. It could effectively reduce the risk of microbial pollution in tap water and the pipe water when dosing amount of disinfectant was 1.4 mg/L before and after the process of filtration, and the operation cost was 0.01 yuan/m³. In the next ap-

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07402003、2017ZX07501002)

通信作者: 刘文朝 E-mail: 376393172@qq.com

plication process, the reliability of the equipment, the storage and appropriate dosage of the disinfectant, and monitoring of the disinfectant by-products should be paid much more emphasis.

Key words: intermittent/series sodium hypochlorite generator; surface water plant; electrolysis; disinfectant

电解食盐次氯酸钠发生器因使用的原料购置简单逐步成为城市饮用水消毒的重要选择^[1~4],已广泛应用到农村供水工程中^[5,6]。电解食盐次氯酸钠发生器主要包括连续式和间歇式两种。鉴于目前农村供水工程运行管理水平以及大部分为定时供水的现状,适宜采用间歇式次氯酸钠发生器。通常情况下,间歇式次氯酸钠发生器的次氯酸钠产量低、电解时间长,如需提高次氯酸钠产量、减少电解时间,需大幅提高间歇式次氯酸钠发生器的电解电流。这种情况下,电解后期电解槽内液体温度急剧升高,电解效率大幅降低,电耗大大增加。

鉴于目前传统的间歇式电解食盐次氯酸钠发生器产量少、电解时间长、后期电解槽效率下降和电耗高的问题^[7],笔者采用串联式电解电极,通过两个电解箱实现同电流、相互独立电解,旨在增加次氯酸钠产量、减少电解时间、提高电解效率并降低电耗,以适应中小型农村供水工程的消毒需要。该间歇/串联式次氯酸钠发生器经过设备定型后,在重庆农村地表水厂进行了实际应用。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验装置如图1所示,其主要由软水系统、配盐系统、电解系统和储存投加系统组成。配制的食盐水经过软水箱软化后进入溶盐箱,在搅拌器的作用下配制食盐水,食盐水经计量泵输送至电解箱,电解后的次氯酸钠溶液进入储存箱,并经计量泵输送至供水系统中。

电解箱是该试验装置的核心,其采用聚氯乙烯材料制作而成,两个电解箱通过串联电极的35²电源线连接,实现同电流、相互独立电解。每个电解箱底部设有电解电极,上部设有循环冷却管、排气孔和进水孔,总容积为70 L,电解电压为14 V。电解电极通过钛螺纹紧固在电解箱底部两侧,电解电极的阴、阳极以钛材料为基材,表层反复涂覆钌、铱等金属氧化物,电极板间距为5 mm。循环冷却管由直径为8 mm的钛管加工而成,呈螺旋状,位于电解电极上方5 cm处。

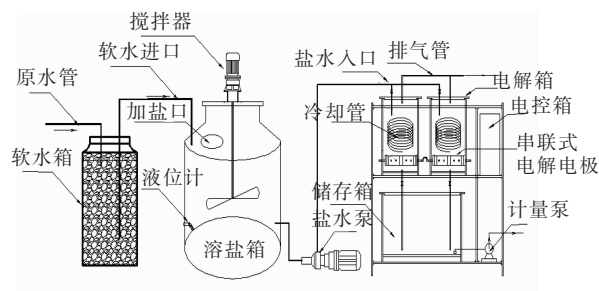


图1 间歇/串联式次氯酸钠发生器装置示意

Fig.1 Schematic diagram of intermittent/series sodium hypochlorite generator

1.2 实验室运行试验

盐水浓度分别为3%和4%,电流密度为380 A/m²,盐水体积为60~120 L,在循环冷却条件下运行,测定不同时间间隔时电解槽内次氯酸钠溶液的有效氯浓度,并计算相应的有效氯产量、交流电耗、直流电耗、盐耗和运行成本,并筛选最佳电解条件。为确保串联式次氯酸钠发生器的电解效果,增加单个电解槽电解试验,电解时盐水浓度分别为3%和4%,电流密度为380 A/m²,盐水体积为60 L。

1.3 现场运行试验

结合原水水质开展烧杯试验确定消毒剂投加量,量取1 L原水,次氯酸钠消毒剂投加量为0.6~2.0 mg/L,接触时间为30 min,检测余氯、微生物相关指标和三氯甲烷浓度。间歇/串联式次氯酸钠发生器现场调试合格后,对其运行效果进行为期1个月的观察,检测出厂水和末梢水余氯、微生物指标以及三氯甲烷浓度。

1.4 分析方法

采用便携式有效氯快速测定仪测定电解产生的次氯酸钠溶液的有效氯浓度,采用余氯检测仪测定出厂水和末梢水的余氯浓度,采用气相色谱仪测定三氯甲烷浓度,微生物指标(菌落总数、总大肠菌群)按照GB 5750.12—2006在实验室测定。

电解过程中有效氯产量($G_{\text{实际}}$)、交流电耗(P_{AC})、直流电耗(P_{DC})、盐耗(U_s)、运行成本(R_c)分别按式(1)~(5)计算。

$$G_{\text{实际}} = C \times V \quad (1)$$

$$P_{\text{AC}} = \frac{R_{\text{PMi}} - R_{\text{PM0}}}{G_{\text{实际}}/1\,000} \quad (2)$$

$$P_{\text{DC}} = \frac{U \times I \times t}{C \times V} \quad (3)$$

$$U_{\text{S}} = S/C \quad (4)$$

$$R_{\text{C}} = 0.55 \times P_{\text{AC}} + 1.0 \times U_{\text{S}} \quad (5)$$

式中, $G_{\text{实际}}$ 为有效氯的实际产量,g; C 为有效氯浓度,g/L; V 为盐水体积,L; P_{AC} 为交流电耗,kW·h/kg; R_{PMi} 、 R_{PM0} 分别为电解*i*时刻和初始时刻

的电表读数,kW·h; P_{DC} 为直流电耗,kW·h/kg; U 为电解电压,V; I 为电解电流,A; t 为电解时间,h; U_{S} 为盐耗,kg/kg; S 为盐水浓度,g/L; R_{C} 为运行成本,元/kg;电价按0.55元/(kW·h)计,盐价按1.0元/kg计。

2 结果与讨论

2.1 间歇/串联式次氯酸钠发生器的性能分析

不同电解条件下,间歇式次氯酸钠发生器的运行结果见表1。

表1 间歇式次氯酸钠发生器试验结果

Tab. 1 Running results of intermittent sodium hypochlorite generator

项 目	盐水浓度/%	盐水体积/L	电解时间/min	有效氯浓度/(g·L ⁻¹)	有效氯产量/g	交流电耗/(kW·h·kg ⁻¹)	直流电耗/(kW·h·kg ⁻¹)	盐耗/(kg·kg ⁻¹)	运行成本/(元·kg ⁻¹)
单体式	3	60	420	7.22	433.2	7.80	6.67	4.16	8.45
	4	60	480	8.62	517.2	8.85	7.08	4.64	9.51
串联式	3	60	120	7.55	453	5.14	4.08	3.97	6.80
	3	120	300	8.65	1 038	5.60	4.38	3.47	6.55
	4	60	180	9.85	591	5.64	4.37	4.06	7.16
	4	120	360	9.30	1 116	5.94	4.68	4.30	7.57

由表1可知,相较于单体式次氯酸钠发生器,间歇/串联式次氯酸钠发生器显著提高了次氯酸钠产量,缩短了电解时间,大幅降低了运行成本。不同试验条件下间歇/串联式次氯酸钠发生器均取得了良好的电解效果,且电解后期电解槽内温度不超过25℃。上述试验条件下,电解时间为120~360 min,次氯酸钠有效氯浓度为7.55~9.85 g/L,有效氯产量为453~1 116 g,交流电耗为5.14~5.94 kW·h/kg,直流电耗为4.08~4.68 kW·h/kg,盐耗为3.47~4.30 kg/kg,运行成本为6.55~7.57元/kg,可满足中小型农村供水工程的消毒需要。其中,当盐水浓度为3%、盐水体积为120 L、电解时间为300 min时,有效氯产量为1 038 g,运行成本最低,为6.55元/kg。

2.2 实际应用分析

2.2.1 应用工程简介

重庆地表水厂设计供水规模为2 000 m³/d,实际供水量为80 m³/h,间歇式供水,供水时间为6:00—12:00和17:00—23:00,清水池容积为500 m³,高位水池容积为200 m³,采取自流供水和水泵直供相结合的供水方式。该水厂采用混凝—沉淀—过滤常规水处理工艺,原水水质:总大肠菌群为50 MPN/100 mL,菌落总数为500 CFU/mL,pH值为7.63,色

度为20度,浊度为180 NTU,COD_{Mn}为3.29 mg/L,溶解氧、硫酸盐、氯化物、氨氮、硝酸盐、总氮分别为7.7、25.5、14.9、0.179、0.694、1.050 mg/L。可见,原水存在大肠杆菌、菌落总数、色度、浊度、COD_{Mn}等指标超标问题。该水厂之前采用复合型二氧化氯消毒,但由于反应釜无加热装置,出现了氯酸盐超标现象,且出厂水和末梢水消毒剂余量不符合《生活饮用水卫生标准》。因此,该水厂使用次氯酸钠替代二氧化氯对饮用水进行消毒。

2.2.2 消毒剂投加量

在现场开展烧杯试验,以确定消毒剂的投加量。结果表明,消毒剂投加量为1.4 mg/L较为适宜,接触30 min后,余氯含量大于0.3 mg/L,消毒副产物三氯甲烷含量低于60 μg/L,相应的微生物指标符合《生活饮用水卫生标准》。

2.2.3 运行效果

消毒剂投加量为1.4 mg/L,投加点设在清水池的管道上。结果表明,消毒副产物三氯甲烷浓度超过标准限值(60 μg/L),这是因为原水中有有机物和藻类较高,混凝—沉淀工艺对有机物和藻类的去除能力有限,投加消毒剂后导致消毒副产物超标。

为进一步增强消毒效果,需采用消毒剂进行氧化,分别于滤前和滤后投加次氯酸钠,投加过程中为

避免消毒副产物超标,滤前投加量为 0.6 mg/L,滤后投加量为 0.8 mg/L,经检测出厂水余氯为 0.35 mg/L、三氯甲烷为 43.60 $\mu\text{g/L}$,末梢水余氯为 0.08 mg/L、三氯甲烷为 34.60 $\mu\text{g/L}$,均符合《生活饮用水卫生标准》。

为确保消毒效果和供水水质,对该工程进行 1 个月的连续检测,结果如图 2 所示。可以看出,在保证末梢水余氯均在 0.05 mg/L 以上的基础上,出厂水余氯值大部分时间高于 0.3 mg/L,符合《生活饮用水卫生标准》。同时,抽测了出厂水和末梢水中的三氯甲烷浓度,抽测结果也符合《生活饮用水卫生标准》。

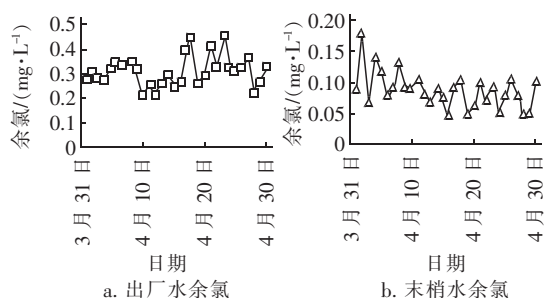


图2 余氯检测结果

Fig. 2 Results of residual chlorine

2.2.4 运行成本

由于示范点所在地区运输费略高,食盐含运输费用的价格为 1 100 元/t,应用地点供水工程用电单价为 0.55 元/(kW·h),现场制备次氯酸钠消毒剂的成本为 6.90 元/kg。滤前和滤后消毒剂投加量共为 1.4 mg/L,消毒运行成本约为 0.01 元/m³。

2.3 讨论

2.3.1 提高次氯酸钠发生器设备的可靠性

提高次氯酸钠发生器设备的可靠性是确保消毒设备发挥作用的关键。间歇/串联式次氯酸钠发生器由软水系统、配盐系统、电解系统、储存投加系统等组成。其中软水系统适宜安装全自动数显电动阀,可以自动进行制水和反冲洗,减少人工操作。配盐系统宜使用桨叶式搅拌机,以提高配盐速度并增加盐水均匀度,同时应适当增大食盐投加口直径,以便于投加原料食盐。针对电解系统应注意:①需保证电解电源干燥,电解电源用于控制电解时间、电解电流和电压,由于南方雨季湿度大,电解电源易受潮而影响正常工作;②电解槽上端宜设置液位计和移液泵联动装置,当电解槽内液位达到高液位时,移液

泵可自动停止移液,降低对电解槽的压力冲击;③宜采用倒极方式运转电解电极,以提高电极利用率,减轻电极结垢。针对储存投加系统需注意:①次氯酸钠储存箱应选用避光材料,且尺寸设计应大于电解槽;②宜安装小流量的可视转子流量计,用以直观反映消毒剂投加量。

2.3.2 确保适宜的次氯酸钠消毒剂投加量

次氯酸钠消毒剂投加量应综合考虑原水水质、管网长度等因素,并参考消毒设备生产厂家给出的消毒剂投加量范围,结合原水水质开展现场试验确定。目前,由于工业技术发展,人工合成有机物种类增加,水源水质状况复杂,大部分农村地表水厂以常规水处理工艺为主,常规水处理工艺以去除浊度为目标,不能有效去除溶解性有机物,该情况下仅依赖后续消毒工艺难以确保出厂水水质稳定达标。消毒工艺与水处理工艺应统筹兼顾,水处理工艺对污染物的去除效果对于确保消毒剂发挥消毒作用十分关键。次氯酸钠消毒适宜用于 COD_{Mn} 浓度低于 3.0 mg/L 的情况,当原水有机物含量较高时,可以采用滤前和滤后分开投加的方式,但需要结合原水开展现场试验。

2.3.3 重视消毒副产物的产生

根据上述案例可知,当原水中有有机物和藻类浓度较高时,投加次氯酸钠后导致三氯甲烷超过标准限值。因此使用次氯酸钠消毒时,尤其是地表水源,应重视消毒副产物的产生,需结合原水水质情况开展现场试验,必要时增设控制及去除消毒副产物的措施。

2.3.4 次氯酸钠溶液的储存和放置

次氯酸钠消毒液对温度非常敏感,温度越高,分子运动速度越快,活化能降低,分解速度加快,稳定性较差,因此消毒液应在低温、低湿、避光环境下储存,最好在 10℃ 以下保存,但通常情况下环境温度应低于 25℃,不宜高于 30℃,避免因外界温度过高促进次氯酸钠溶液分解而降低消毒效果。另外,次氯酸钠分解生成的都是气体物质,长时间密闭保存会带来安全隐患。因此贮藏环境要低温、通风、无阳光直照,可选用避光效果好的包装材料如玻璃纤维增强聚酯、硬质聚氯乙烯、聚乙烯、橡胶的钢制容器以及棕色玻璃瓶等。

3 结论

间歇/串联式次氯酸钠发生器通过两个电解箱

实现同电流、相互独立电解,在盐水浓度为3%和4%、电流密度为 380 A/m^2 、盐水体积为 $60\sim 120\text{ L}$ 、电解时间为 $120\sim 360\text{ min}$ 条件下,有效氯产量为 $453\sim 1\,116\text{ g}$,交流电耗为 $5.14\sim 5.94\text{ kW}\cdot\text{h/kg}$,盐耗为 $3.47\sim 4.30\text{ kg/kg}$,运行成本为 $6.55\sim 7.57\text{ 元/kg}$ 。间歇/串联式次氯酸钠发生器在重庆农村地表水厂取得了良好的应用效果,在滤前和滤后分别投加消毒剂,当消毒剂投加量为 1.4 mg/L 时,可有效保障出厂水和管网末梢水的微生物安全性,并且消毒副产物符合《生活饮用水卫生标准》,消毒运行成本约为 0.01 元/m^3 。

参考文献:

- [1] 朱海涛,张富标,徐飏,等. 嘉兴市贯泾港水厂次氯酸钠消毒技术工程应用研究[J]. 中国给水排水,2017,33(6):39-42.
Zhu Haitao, Zhang Fubiao, Xu Biao, *et al.* Engineering application of sodium hypochlorite disinfection technology in Guanjinggang Water Treatment Plant[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(6): 39-42 (in Chinese).
- [2] 崔红军,吴东升,宋思怡,等. 自来水厂采用次氯酸钠替代液氯消毒的可行性研究[J]. 中国给水排水,2016,32(19):58-61.
Cui Hongjun, Wu Dongsheng, Song Siyi, *et al.* Feasibility analysis of sodium hypochlorite instead of liquid chlorine in waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(19): 58-61 (in Chinese).
- [3] 郑建军,沈松土. 岱山小高亭水厂现场制备次氯酸钠消毒系统的实践[J]. 给水排水,2016,42(1):12-16.
Zheng Jianjun, Shen Songtu. Practice of the sodium hypochlorite disinfection system on the site of Xiaogaoting Water Treatment Plant in Daishan[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(1): 12-16 (in Chinese).
- [4] 廖建锋,李有朵,周祥雷. 现场次氯酸钠发生器在水厂供水消毒中的应用[J]. 中国给水排水,2015,31(15):57-59.
Liao Jianfeng, Li Youduo, Zhou Xianglei. Application of on-site sodium hypochlorite generator to disinfection in water treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(15): 57-59 (in Chinese).
- [5] 贾燕南,邬晓梅,李晓琴,等. 次氯酸钠与液氯消毒在农村供水中的应用效果对比研究[J]. 水利水电技术,2017,48(11):194-198,205.
Jia Yannan, Wu Xiaomei, Li Xiaoqin, *et al.* Comparative study on application of sodium hypochlorite and liquid chlorine disinfections to rural water supply[J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2017, 48(11): 194-198, 205 (in Chinese).
- [6] 赵微,李铁男,高雪杉,等. 北方农村小型次氯酸钠消毒水厂运行效果研究[J]. 黑龙江水利,2017,3(9):29-34.
Zhao Wei, Li Tienan, Gao Xueshan, *et al.* Study on the operation effect of small sodium hypochlorite disinfection water works in northern rural areas[J]. Heilongjiang Water Resources, 2017, 3(9): 29-34 (in Chinese).
- [7] 李连香,刘文朝,宋实,等. 间歇式次氯酸钠发生器的运行试验研究[J]. 中国农村水利水电,2015,(12):97-100.
Li Lianxiang, Liu Wenchao, Song Shi, *et al.* Experimental study on the operation of the intermittent sodium hypochlorite generator[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015, (12): 97-100 (in Chinese).



作者简介:李连香(1986-),女,山东临沂人,博士,高工,主要从事保障农村饮水安全相关研究。

E-mail: lianxiang.0810@163.com

收稿日期:2018-07-03