

间歇式次氯酸钠发生器的运行试验研究

李连香¹, 刘文朝¹, 宋实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)

摘要: 结合我国农村小型供水工程对消毒技术的需求, 探讨间歇式次氯酸钠发生器的实际运行效果以及最佳运行工况。试验结果表明, 盐水浓度 3%-4%、盐水体积 45L、电解电流 32A、连续电解 480-500min, 间歇式次氯酸钠发生器的运行成本最低, 为 8.01-8.09 元/kg。按照有效氯投加量 1.0mg/L 计, 吨水处理成本 0.008 元, 可适用于日供水量为 400m³ 的供水工程。本试验结果为间歇式次氯酸钠发生器在农村小型供水工程中的推广应用奠定基础。

关键词¹: 间歇式; 次氯酸钠发生器; 有效氯浓度; 运行成本

中图分类号: TU991.25.

文献标识码: A.

Experimental study on the Intermittent Sodium Hypochlorite Generator

LI Lian-xiang, Liu Wen-chao, Song Shi

(1. China Irrigation and Drainage development Center (Rural drinking water safety Center of Ministry of Water Resources), Beijing 100054, China)

Abstract: According to the needs of disinfection technologies in rural water supply projects, the optimum operation conditions of the intermittent sodium hypochlorite generator were studied in this paper. Results showed that the intermittent sodium hypochlorite generator could reach minimum running cost of 8.01-8.09 RMB per kilogram available chlorine. The optimum operation conditions were with non-iodized salt concentration of 3% or 4%, volume of 45L, electrolytic current of 32A, and electrolytic time of 480-500min. The intermittent sodium hypochlorite generator could supply enough chlorine for daily water supply capacity within 400 m³ with dosage of 1.0mg/L. And the disinfection cost was only 0.008RMB. This experiment results provide guidance for the actual application.

Keywords: intermittent sodium hypochlorite generator; available chlorine concentration; running cost

0 引言

消毒是保证饮用水微生物学安全性的重要技术单元, 生活饮用水必须消毒^[1]。我国农村供水工程数量多、规模小、水质合格率偏低, 为进一步提高水质合格率, 探索适宜农村小型供水工程的消毒模式迫在眉睫。

饮用水消毒技术中氯消毒具有良好的消毒持续性, 在合理采用氯消毒工艺的基础上, 氯消毒是一种安全可靠、可以广泛使用的消毒技术^[2]。氯消毒剂主要有液氯、次氯酸钠、次氯酸钙(漂白粉、漂白精)等^[3], 在应用层面上各有优缺点。其中次氯酸钠发生器是采用电解

¹ 基金项目: 国家十二五科技支撑项目-村镇饮用水安全消毒与水质检测技术研究(2012BAJ25B03).

作者简介: 李连香(1986~), 女, 山东临沂人, 博士, 从事村镇供水水质的研究.

Lianxiang.0810@163.com.

通讯作者: 刘文朝(1964~), 男, 河北平山人, 教高, 从事农村饮水安全相关研究.

liuwenchao2012@126.com.

食盐水制取次氯酸钠溶液，电解过程是一个电化学反应过程，它的唯一原材料就是食盐，通常情况下适宜用于大规模水厂^[4]。为了充分利用次氯酸钠发生器取材简单、管理简便、运行成本低的优点，本文试图采用间歇式次氯酸钠发生器应用于农村小型供水工程，并通过试验研究其运行参数，以适应农村小型供水工程间歇供水或定时供水的现状。

1 材料与方法

1.1 间歇式次氯酸钠发生器

为进一步切合农村小型供水工程的特点，所采用的间歇式次氯酸钠发生器结构简单，主要有整流器、电解槽、电极组成，如图 1 所示。

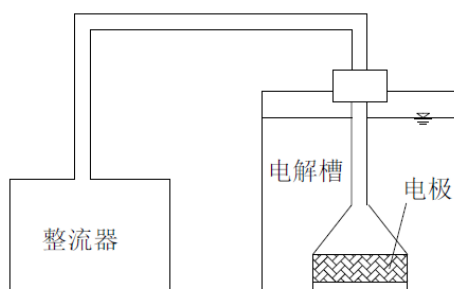


图 1 间歇式次氯酸钠发生器装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the intermittent sodium hypochlorite generator

其中整流器采用无锡安耐斯电子科技有限公司的稳压开关电源，电压为 0-15V，电流为 0-50A，电解槽材质为 PE、直径为 40 cm、容积为 50L，电极采用特殊材料表面涂层的纯钛材料制作而成，电极板间距 5 mm。

次氯酸钠发生器的工作原理是：氯化钠溶液在一定的槽电压作用下，在电解槽内发生一系列电化学反应，其中 NaClO 的生成过程如式（1）中的化学方程式所示。其中阳极生成 Cl₂，阴极生成 H₂。



1.2 试验材料

试验用材料主要有无碘盐（山东肥城精制盐厂），其中氯化钠含量大于 98.5%。试验用仪器主要有：深圳清时捷科技有限公司 Q-CL501C 便携式有效氯快速测定仪、英国百灵达公司余氯检测仪、中国凯丰集团电子天平、波美比重计、普通室温温度计、HCJYET-HT-866 型红外测温仪、德力西集团仪器仪表有限公司的 DDS607 型单相电子式电能表。

1.3 试验方法

试验研究间歇式次氯酸钠发生器在不同盐水浓度、不同电解电流情况下的运行效果，试验主要在水利部节水灌溉示范基地农村饮水安全实验室开展。

1.3.1 不同盐浓度试验

分别称取 0.90 kg、1.35 kg、1.80 kg 无碘盐放置在电解槽内，添加 45L 纯水，充分搅拌溶解，并采用比重计测试盐水比重，确保盐水浓度为 2%、3%、4%。电解过程中电流设置为 32A，连续电解时间为 660min。不同时间间隔检测电解槽内次氯酸钠溶液的有效氯浓度、温度。

1.3.2 不同电解电流试验

盐水浓度采用 3%-4%（配制方法如同 1.3.1），电解过程中电流设置为 26A 和 32A，电解过程不间断，连续电解时间为 660min。不同时间间隔检测电解槽内次氯酸钠溶液的有效氯浓度、温度。

1.3.3 有效氯衰减试验

将电解后的次氯酸钠溶液放置在储存罐中，在室温条件下，不定期检测次氯酸钠溶液的有效氯浓度，检测时间为 300h，共计 12.5 天。

1.4 测试与计算方法

采用深圳清时捷 Q-CL501C 便携式有效氯快速测定仪和英国 Palintest 余氯检测仪同时测定有效氯浓度并取平均值，采用温度计和红外测温器同时测定温度并取两者平均值。为准确确定电解过程中的用电量，采用电表来计量交流电耗。其中用电量、用盐量和运行成本的计算公式如式（2）-（4）所示。

$$\text{用电量} = (\text{结束电解电表读数} - \text{起始电解电表读数}) / \text{有效氯产量} \quad (2)$$

$$\text{用盐量} = \text{盐量} / \text{有效氯产量} \quad (3)$$

$$\text{运行成本} = (0.55 \times \text{用电量} + 1.1 \times \text{用盐量}) / \text{有效氯产量} \quad (4)$$

其中：有效氯产量为有效氯浓度与体积之积：kg；用电量：kW·h/kg；用盐量：kg/kg；运行成本：元/kg；其中电单价按照 0.55 元/kW·h 计算，盐单价按照 1.1 元/kg 计算^[5]。

2 结果与讨论

2.1 不同盐浓度试验

盐水浓度是影响次氯酸钠发生器产氯量的关键参数，为进一步明确不同盐水浓度情况下间歇式次氯酸钠发生器的运行效果，试验设置盐浓度分别为 2%、3% 和 4%，间歇式次氯酸钠发生器的运行结果如图 2 所示。

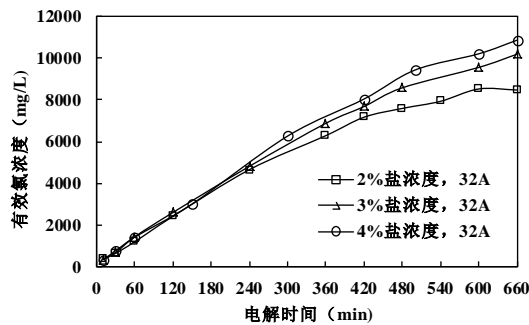


图 2 不同盐水浓度运行结果

Fig.2 Results of different salt concentration

如图 2 所示，在同等试验条件下，当电解时间在 300min 也即 5h 以内时，不同盐浓度情况下次氯酸钠发生器电解产生的有效氯浓度没有差异，但随着电解时间的增长，特别当电解时间超过 400min 后，盐浓度越高，次氯酸钠发生器电解产生的有效氯浓度越高。特别是针对 4% 盐浓度情况下，电解 660min 后，有效氯浓度可高达 11600 mg/L。同时，值得注意的是，3% 盐浓度情况下的有效氯浓度较 2% 盐浓度的有效氯浓度有较大提升，而当盐浓度继续增大至 4% 时，有效氯浓度升高幅度减缓。

运行成本是衡量消毒方法适用性的杠杆。针对次氯酸钠发生器的运行成本核算，不计设备折旧情况下，主要包含运行过程中用电量和用盐量。结合式（2）-式（4）计算不同盐浓度情况下的用盐量、用电量和运行成本，结果如图 3 所示。

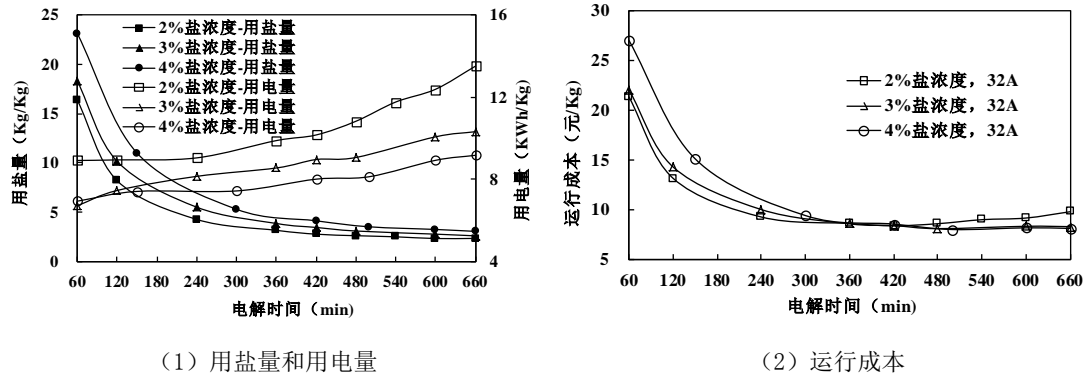


图3 不同盐水浓度的运行成本分析

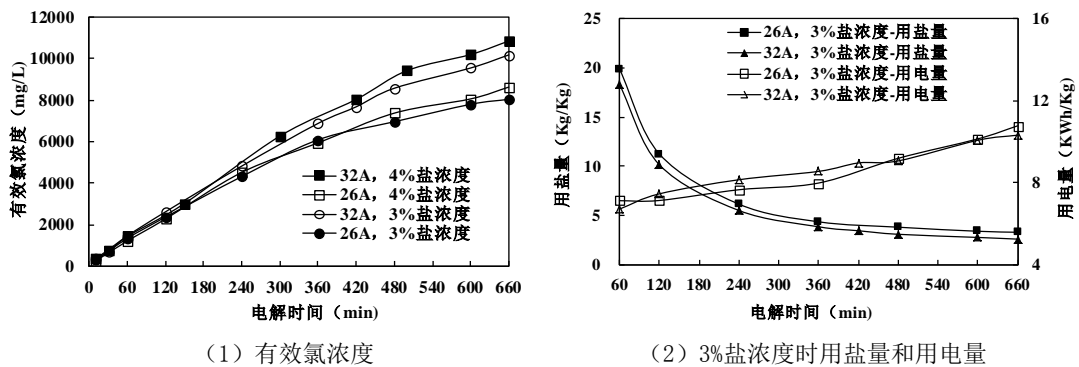
Fig.3 Running cost of different salt concentration

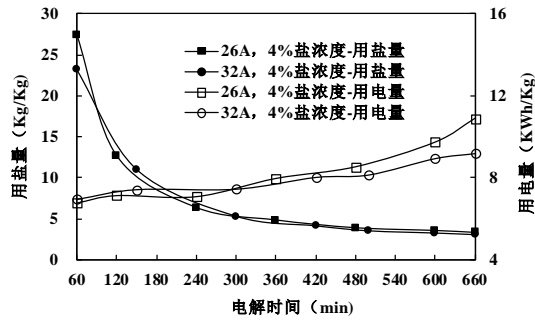
通过图3(1)可见, 盐水浓度低, 相应的用盐量少, 但当电解时间450-500min时, 用盐量没有显著差异; 而用电量正好相反, 随着盐浓度的升高, 用电量逐渐降低。与盐浓度2%相比, 盐浓度为3%和4%时, 用盐量和用电量差异较小。图3(2)的运行成本综合考虑了用盐量和用电量, 当电解时间低于300min时, 盐浓度越高, 运行成本越高, 此时用盐成本占运行成本的50%以上; 当电解时间在300-400min时, 不同盐浓度情况下的运行成本没有差异; 当电解时间超过480min时, 盐浓度为3%的运行成本与盐浓度为4%的运行成本没有差异, 但均显著低于盐浓度为2%的运行成本。当电解时间为480min时, 盐浓度为4%时, 运行成本最低, 其中用电量为8.134KWh/kg, 用盐量为3.534 kg/kg, 运行成本为8.01元/kg, 而此时盐浓度为3%时的运行成本为8.09元/kg。

综合考虑电解产生的有效氯浓度、有效氯产量以及运行成本, 在电解电流为32A的情况下, 盐水浓度适宜选择为3%-4%, 这和孙凝^[6]的研究结果一致。

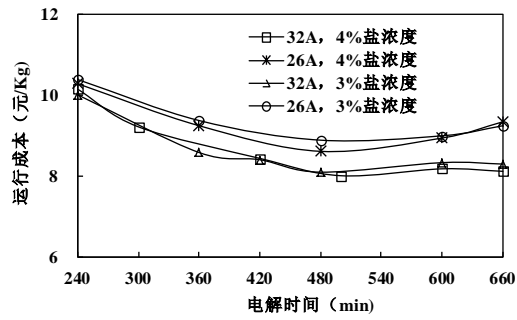
2.2 不同电解电流试验

电解电流是决定次氯酸钠发生器运行效果的重要参数, 一方面决定电解速率, 另一方面决定电解过程中的用电量。为进一步明确不同电流情况下间歇式次氯酸钠发生器的运行效果, 电解电流设置为26A和32A, 盐水浓度为3%和4%, 电解时间为660min, 试验结果如图4所示。





(3) 4%盐浓度时用盐量和用电量



(4) 运行成本

图4 不同电解电流情况下的运行效果

Fig.4 Results of different Electrolytic current

图4描述了电解电流为26A和32A情况下间歇式次氯酸钠发生器的运行结果。如图4(1)可见,相同试验条件下,当电解时间在240min以内时,不同电解电流情况下的有效氯浓度无显著差异;而当电解时间超过240min后,电解电流越高,电解后产生的有效氯浓度越高。以电解时间为660min为例,盐浓度为3%(4%)时,电解电流26A情况下的有效氯浓度为8040 mg/L(8630 mg/L),而电解电流为32A时的有效氯浓度为10180 mg/L(10850 mg/L),较电解电流为26A情况下有效氯浓度提高26.6%(25.7%)。同时,无论是电解电流为26A还是32A,4%盐浓度与3%盐浓度情况下的有效氯浓度差异较小,有效氯浓度仅提高2%-7%,试验结果与2.1的试验结果一致。

图4(2)描述了盐浓度为3%时不同电解电流情况下间歇式次氯酸钠发生器的用盐量和用电量。当电解电流高时,有效氯浓度高也即有效氯产量高,从而使得用盐量低。针对用电量而言,与电解时间密切相关,随着电解时间的增长,有效氯产量增高,电解电流32A时的用电量反而低于电解电流为26A时的用电量。图4(3)描述了盐浓度为4%时不同电解电流情况下间歇式次氯酸钠发生器的用盐量和用电量,无论是电解电流为26A还是32A,盐浓度为4%时的用盐量无显著差异,而用电量有显著差异,随着电解时间的增长,电解电流越高,相反用电量会越低。

图4(4)综合考虑用盐量和用电量,描述了不同电解电流情况下的运行成本。可以清晰的看出,电解电流为32A时的运行成本低于26A时的运行成本,电解时间越长越显著。此外,分析发现不同盐水浓度、不同电解电流情况下,间歇式次氯酸钠发生器的运行成本存在最低点,也即当电解时间为480min左右时,运行成本最低。

结合不同盐水浓度、电解电流情况下的试验结果,综合考虑电解产生的有效氯浓度、有效氯产量以及运行成本,间歇式次氯酸钠发生器的运行参数可设置为:电解电流32A,盐水浓度3%-4%,电解时间480-500min,此时电解1kg有效氯的运行成本为8.01-8.09元。

2.3 次氯酸钠衰减试验

由于我国农村小型供水工程大多数采用间歇供水或定时供水方式,为适应目前供水现状,间歇式次氯酸钠发生器采取夜间电解、白天使用的模式运行。这种情况下,电解产生的次氯酸钠溶液需要储存后使用,因此需测试和明确次氯酸钠溶液的衰减情况和使用期限。

将电解后的次氯酸钠溶液(有效氯浓度分别为8450 mg/L、10000 mg/L和11600 mg/L)放置在储存罐中,在室温条件下,不定期检测次氯酸钠溶液的有效氯浓度,检测时间为300h,共计12.5天,检测结果如图5所示。

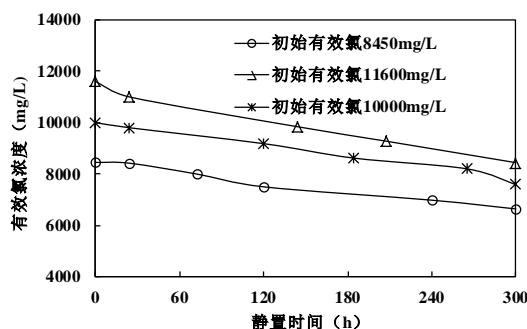


图 5 不同初始有效氯浓度的衰减情况

Fig.5 Attenuation of different initial available chlorine

由图 5 可见, 所储存的次氯酸钠溶液随着静置时间的增长, 有效氯浓度逐步降低, 呈现小幅度的衰减趋势。不同初始有效氯浓度, 衰减程度有差异。初始有效氯浓度为 8450 mg/L、10000 mg/L 和 11600 mg/L 时, 静置 24h (1 天) 后, 有效氯浓度分别为 8420 mg/L、9800 mg/L 和 11000 mg/L, 衰减比例分别为 0.4%、2.0% 和 5.2%; 当静置时间增长至 300h (12.5 天), 有效氯浓度分别为 6640 mg/L、7580 mg/L 和 8440 mg/L, 衰减比例分别为 21.4%、24.2% 和 27.2%。随着静置时间的增长, 初始有效氯浓度越高, 衰减趋势越快。

此外, 程晋南^[7]研究表明温度对次氯酸钠中氯含量的衰减速度有直接影响, 而且证实了次氯酸钠储罐采取有效的降温措施, 可明显减缓次氯酸钠中氯含量的衰减速度。由于本次试验过程是在室温为 13-15℃ 情况下进行的, 试验结果不能代表夏季特别是室温超过 20℃ 的情况。因此, 综合考虑试验时的温度状况以及有效氯的衰减程度, 间歇式次氯酸钠发生器夜间所电解的次氯酸钠溶液, 应尽量当日使用。结合本试验结果, 电解电流为 32A, 盐水浓度为 3% (4%), 盐水体积 45L, 电解时间 480min 情况下, 间歇式次氯酸钠发生器的有效氯产量为 386g (424g)。按照当日使用的原则, 有效氯投加量 1.0mg/L 计, 可满足日供水量为 386m³ (424 m³) 的供水工程使用。

3 结语

为适应目前农村小型供水工程供水现状, 间歇式次氯酸钠发生器采取夜间电解、白天使用的模式运行, 适宜的电解电流为 32A, 盐水浓度为 3%-4% (体积为 45L), 电解时间为 480-500min, 此时电解 1 kg 有效氯的运行成本为 8.01-8.09 元, 可适用于日供水量 400 m³ 的供水工程。间歇式次氯酸钠发生器应用于农村小型供水工程从理论层面是可行的, 但在实际应用前还需进一步开展现场试验, 并综合考虑生产安全、运行维护等多方面因素。

此外, 研究表明温度对于次氯酸钠发生器的电解效率和次氯酸钠溶液的储存均有直接影响。本文试验均是在室温条件下、连续电解、无冷却措施情况下进行。如采取温控措施、间歇电解情况下, 试验结果将更优。

感谢: 感谢杨彭卫在试验过程中的帮助。

参考文献:

- [1] GB5749-2006《生活饮用水卫生标准》. 中华人民共和国卫生部国家标准化委员会[S].
- [2] 张晓健, 黄霞编. 水与废水物化处理的原理与工艺 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011, p208.
- [3] 李连香, 孙瑞刚, 王智勇, 等. 次氯酸钙饼剂在饮用水消毒中应用[J]. 中国农村水利水电, 2012 (11): 125-128.
- [4] 陆宇骏. 次氯酸钠现场生产系统在大中型水厂的应用[J]. 净水技术, 2010, 29(1): 70-73.
- [5] 李晓琴, 贾燕南, 胡孟, 等. 电解参数对不同电极次氯酸钠发生器运行效果影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2014 (2): 39-42.
- [6] 孙凝, 龚德洪. 次氯酸钠发生器在小型水厂的应用与成本研究[J]. 城镇供水, 2014 (1): 77-79.
- [7] 程晋南. 关于液体次氯酸钠储罐降温减缓氯含量衰减速度的研究与实践[J]. 城镇供水, 2012, 2: 27-30.