

论述与研究

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 15. 001

两种大型饮用水厂次氯酸钠发生器运行评价分析

颌亚玮¹, 樊丞越¹, 张 奔¹, 刘宏远¹, 张 刚², 朱海涛²

(1. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 嘉兴市水务集团有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘 要: 次氯酸钠消毒工艺在饮用水厂已经得到了广泛应用,对某水厂3台有效氯产量为20 kg/h的次氯酸钠发生器在有效氯浓度、氯酸盐浓度、盐耗、电耗等方面进行了对比研究。结果表明,3台发生器(进口F1#和F2#,国产C1#)产出有效氯的平均浓度分别为0.81%、0.79%和0.85%,基本达到0.8%的设计有效氯浓度要求;产液中氯酸盐与有效氯的比值分别为4.8%、4.9%、1.2%,也均低于《人类消耗水处理用化学品——次氯酸钠》(BS EN 901—2013)中5.4%的要求,C1#副产物氯酸盐的含量仅为F1#和F2#的24%左右。C1#发生器在夏季、正常、冬季3种模式下的电耗均低于F1#和F2#,其中,在冬季模式下C1#采用电解槽换热方式代替压缩机加热,进一步降低了发生器的电耗。F1#、F2#、C1#的平均运行成本分别为6.8、6.7、5.6元/kg,C1#由于低电耗的优势,运行成本低于F1#和F2#。同时,相比进口次氯酸钠发生器1年的保修年限,国产发生器的保修年限为5年,具有较强的竞争力。

关键词: 次氯酸钠发生器; 有效氯; 氯酸盐; 盐耗; 电耗; 运行成本

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0001-06

Comparative Analysis of Two Kinds of Sodium Hypochlorite Generators in Large Drinking Water Treatment Plants

XIE Ya-wei¹, FAN Cheng-yue¹, ZHANG Ben¹, LIU Hong-yuan¹, ZHANG Gang²,
ZHU Hai-tao²

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Jiaxing Water Investment Group Co. Ltd., Jiaxing 314000, China)

Abstract: The sodium hypochlorite disinfection process has been extensively applied in drinking water treatment plants. Three large-scale sodium hypochlorite generators with active chlorine production of 20 kg/h were compared in terms of active chlorine concentration, chlorate, salt consumption, and power consumption. The results showed that the average concentrations of active chlorine produced by three generators (F1#, F2# and C1#) were 0.81%, 0.79%, and 0.85%, respectively, which met the design concentration of about 0.8%. The ratios of chlorate to active chlorine in the effluent of the three generators (F1#, F2# and C1#) were 4.8%, 4.9% and 1.2%, respectively, meeting the requirements of less than 5.4% specified in *Chemicals Used for Treatment of Water Intended for Human Consumption—Sodium Hypochlorite* (BS EN 901-2013). The chlorate by-product concentration of C1# was only around 24% of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52070111、52170093); 浙江省自然科学基金资助项目(LY22E080010)

通信作者: 刘宏远 E-mail: lhyzyy@zjut.edu.cn

that of F1[#] and F2[#]. The power consumption of C1[#] generator was lower than that of F1[#] and F2[#] under summer mode, normal mode, and winter mode. Among them, in winter mode, C1[#] adopted electrolytic cell heat transfer instead of compressor heating, further reducing the power consumption of the generator. The average operating cost of three generators (F1[#], F2[#] and C1[#]) were 6.8 yuan/kg, 6.7 yuan/kg and 5.6 yuan/kg, and C1[#] was lower than F1[#] and F2[#] resulted from its lowest power consumption. In addition, compared to the 1-year warranty period of the imported sodium hypochlorite generators, the warranty period provided by the domestic generator was 5 years, which was highly competitive.

Key words: sodium hypochlorite generator; active chlorine; chlorate; salt consumption; power consumption; operation cost

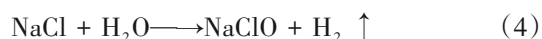
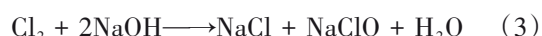
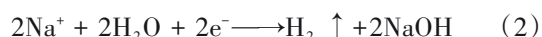
氯消毒经济有效,在饮用水厂已有100多年的应用历史。液氯具有氧化性强、灭菌能力高、持续消毒效果较好等优点,是使用最广泛的消毒方式,但液氯具有强刺激作用,在运输和使用中存在诸多安全隐患,存在安全风险^[1-2]等问题。朱海涛等^[3]对比分析了次氯酸钠和液氯的消毒效果、运行成本及安全性等,结果表明,采用次氯酸钠代替液氯能够满足饮用水厂对消毒的要求。次氯酸钠溶液的获取一般有两种方式:购买商品次氯酸钠和现场制备次氯酸钠^[4]。商品次氯酸钠的浓度一般在10%,储运过程中仍然是危险品,而且容易分解;采用现场制备次氯酸钠既可以保证产品质量,也有利于实时检测有效浓度的变化,是饮用水厂获取消毒剂的一种安全、高效的方式^[5-6]。

次氯酸钠可由次氯酸钠发生器现场制备,浙江省某水厂分两批购买了3台有效氯产量为20 kg/h的次氯酸钠发生器,其中2台为进口设备、1台为国产设备。笔者对该水厂两种不同型号的3台次氯酸钠发生器的有效氯浓度、产量、副产物氯酸盐及运行成本(盐耗和电耗)等进行了评价,期望为其他水厂选购次氯酸钠发生器提供参考。

1 次氯酸钠发生器原理和设备组成

1.1 次氯酸钠发生器工作原理

次氯酸钠发生器是以食盐水作为原材料,通过电解反应产生次氯酸钠溶液,其阳极反应、阴极反应、溶液反应及总反应分别如式(1)~(4)所示^[7]。



此外,次氯酸钠在制备与储存的过程中,还会

发生分解与歧化反应,生成副产物氯酸盐,导致有效氯浓度不断降低,其反应见式(5)。



1.2 次氯酸钠发生器组成

次氯酸钠发生器的工艺流程见图1。依照《次氯酸钠发生器卫生要求》(GB 28233—2020),发生器原水应符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中总硬度<200 mg/L的要求,如不满足则需进行软化处理,使用未加碘盐于溶盐池配制饱和食盐水,通过盐水泵调配软水与饱和食盐水的比例,稀释为3%的盐水溶液作为电解槽的进液,经电解后产出0.8%的次氯酸钠溶液,储存在储液桶中,产生的氢气在排氢风机的作用下稀释至1%以下并及时排出。其中,冷热机组用以调节电解槽的进液温度。

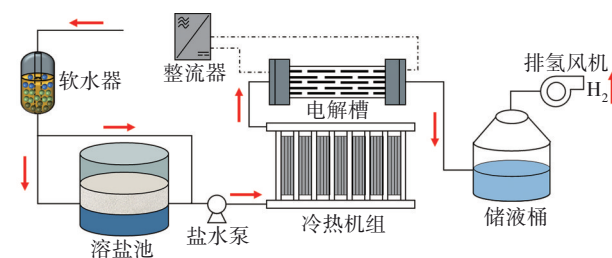


图1 次氯酸钠制备系统流程

Fig.1 Sodium hypochlorite preparation system

目前,国内外生产的次氯酸钠发生器的原理基本相同,但由于工艺设计、极板材料等不同,导致发生器的运行效能存在差异。

2 设备和评价方法

2.1 发生器参数

国外进口的次氯酸钠发生器共2台,型号均为SES-20000,分别记作F1[#]和F2[#];国产发生器1台,型号为WL-20000A,记作C1[#],其相关参数见表1。

表1 次氯酸钠发生器相关参数

Tab.1 Parameters of sodium hypochlorite generator

参 数	SES-20000(F1 [#] 、F2 [#])	WL-20000A(C1 [#])
盐水浓度/%	3.0	3.0
有效氯产量/(kg·h ⁻¹)	20	20
有效氯浓度/%	0.8	0.8
直流电压/V	48~68	65~80
电流/A	600~800	190~220
电极材料	钛/钛涂层	钛/钛涂层
投入生产时间	2016年	2021年
保修年限/年	1	5

3台次氯酸钠发生器均配备冷热机组以保证进液温度在要求范围。随盐水温度的变化,3台设备存在3种不同的运行方式:①当盐水温度>25℃时,启动压缩机制冷保证电解槽进液温度在要求范围内;②当盐水温度在10~25℃时,压缩机不工作;③当盐水温度<10℃时,F1[#]和F2[#]启动压缩机加热保证电解槽进液温度在要求范围内,C1[#]采用电解槽热交换的方式,即通过管路设计使电解槽进液与电解槽进行热交换,提高盐水温度。

2.2 评价时段

根据环境温度的变化,本次评价主要分三个阶段进行:夏季模式阶段,试验时间为2021年8月—10月,期间盐水温度>25℃,对应运行方式①;正常模式阶段,试验时间为2021年10月—12月,期间盐水温度为10~25℃,对应运行方式②;冬季模式阶段,试验时间为2022年1月—2月,期间盐水温度<10℃,对应运行方式③。

2.3 评价方法

次氯酸钠发生器的评价指标包括:有效氯产量、交流电耗、盐耗、运行成本等,其计算参照《次氯酸钠发生器》(GB 12176—90)。其中,有效氯的计算参照《消毒技术规范》(2002年版);氯酸盐的测定采用GB 5750.10—2006中的离子色谱法。

① 有效氯产量

次氯酸钠发生器的产量采用有效氯产量表示,其数值等于设备每小时生产有效氯的质量,按式(6)计算。

$$G = C \times Q \times \rho \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中: G 为有效氯产量,kg/h; C 为有效氯浓度,%; ρ 为有效氯密度,kg/m³; Q 为次氯酸钠流量,L/h。

② 交流电耗

交流电耗为次氯酸钠发生器每生产1 kg有效氯所消耗的电能,按式(7)计算。

$$P_{AC} = U \times I / (G \times \cos\alpha) + P_c \quad (7)$$

式中: P_{AC} 为交流电耗,kW·h/kg; U 为电解电压,V; I 为电解电流,A; G 为有效氯产量,kg/h; $\cos\alpha$ 为整流器功率因数,由厂家提供, $\cos\alpha \geq 0.98$; P_c 为冷干机电耗,kW·h/kg。

③ 盐耗

次氯酸钠发生器每生产1 kg有效氯所消耗的NaCl质量称为盐耗,按式(8)计算。

$$U_s = \omega / C \quad (8)$$

式中: U_s 为盐耗,kg/kg; ω 为盐水浓度,%; C 为有效氯浓度,%。

④ 运行成本

次氯酸钠发生器生产1 kg有效氯所需要的成本,按式(9)计算。

$$\text{运行成本} = U_s \times a \times 10^{-3} + P_{AC} \times b \quad (9)$$

式中: a 为盐的价格,按905元/t计(浙江省某水厂采购价); b 为电价,按0.69元/(kW·h)计。

3 结果与讨论

3.1 有效氯浓度及产量

在不同运行模式下,3台发生器产液的有效氯浓度波动较小,运行稳定(见图2);发生器F1[#]、F2[#]和C1[#]产出液的平均有效氯浓度分别为0.81%、0.79%和0.85%,C1[#]有效氯浓度略高于F1[#]和F2[#],F2[#]产出液有效氯浓度仅低于设备的设计值1.25%,均符合设备的设计值0.8%要求。

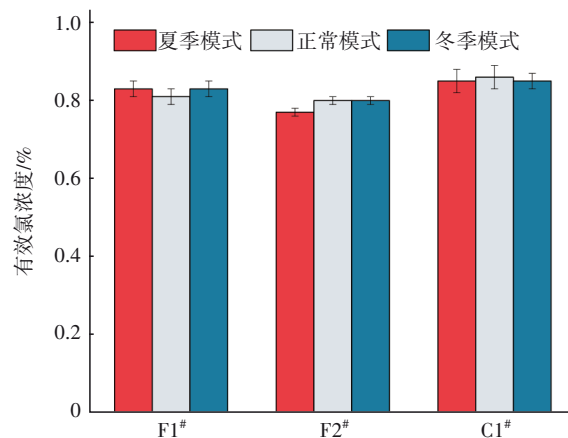


图2 不同运行模式下的有效氯浓度

Fig.2 Effective chlorine concentrations under different operating modes

有效氯产量与次氯酸钠流量和有效氯浓度有关,试验期间,F1[#]、F2[#]和C1[#]次氯酸钠实测平均流量分别为2 500、2 500、2 300 L/h,由式(6)计算得到不同运行模式下3台次氯酸钠发生器的有效氯产量分别为21.89、20.57、20.40 kg/h(见图3),均与设备的设计有效氯产量(20 kg/h左右)相符。其中C1[#]在次氯酸钠流量低于F1[#]和F2[#]的情况下,由于其产出的有效氯浓度较高,使得C1[#]与F1[#]、F2[#]在3种模式下的平均有效氯产量相近。

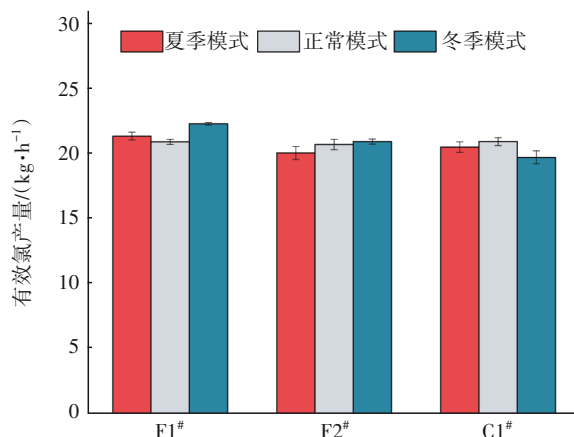


图3 不同运行模式下的有效氯产量

Fig.3 Effective chlorine production under different operation modes

3.2 氯酸盐

运行模式对各发生器所产次氯酸钠的氯酸盐含量影响不大。F1[#]、F2[#]和C1[#]的氯酸盐/有效氯分别为4.8%、4.9%、1.2%,均符合欧盟标准化委员会

《人类消耗水处理用化学品——次氯酸钠》(BS EN 901—2013)中低于5.4%的要求^[8]。此外,F1[#]、F2[#]和C1[#]产液中氯酸盐平均浓度分别为386.5、390.3、94.7 mg/L,即C1[#]的氯酸盐与有效氯含量的比值更低,安全性相对更高。

3.3 运行能耗

3.3.1 运行电耗

表2为3台次氯酸钠发生器在不同工作模式下的电流、电压等数据(进液的盐水浓度均为3%)。F1[#]和F2[#]在夏季、正常、冬季模式下的电耗分别为5.18、4.67、5.16 kW·h/kg和4.84、4.33、5.00 kW·h/kg,C1[#]的为3.66、3.14、3.47 kW·h/kg,即3台发生器在不同运行模式下的电耗均小于6.0 kW·h/kg。次氯酸钠发生器的质量分类标准(GB 12176—90)规定,质量等级A、B、C的交流电耗应分别低于6、7、10 kW·h/kg,盐耗应分别在4.0、4.5、6.5 kg/kg以下,可见3台发生器的质量等级均为A。

对比分析不同运行模式下的电耗发现,3台发生器夏季和冬季模式的电耗较高,正常模式的电耗最低。这是因为在夏季模式和冬季模式下,F1[#]和F2[#]需要启动压缩机调控进液温度,导致这两种模式的电耗要高于正常模式。3台发生器在不同模式下的电耗情况为F1[#]>F2[#]>C1[#],其中,F2[#]电耗为F1[#]的94%,C1[#]电耗为F1[#]的68%,国产发生器C1[#]因发生器系统设计等原因,其电耗要低于进口发生器F1[#]和F2[#],即国产次氯酸钠发生器C1[#]生产1 kg有效氯的电耗更低。

表2 次氯酸钠发生器运行参数

Tab.2 Operating parameters of sodium hypochlorite generator

项 目	夏季模式			正常模式			冬季模式		
	F1 [#]	F2 [#]	C1 [#]	F1 [#]	F2 [#]	C1 [#]	F1 [#]	F2 [#]	C1 [#]
单组电流/A	780.0/780.0	780.0/780.0	210	780.0/780.0	780.1/779.8	210	778.9/780.4	780.3/779.5	210
电压/V	58.1/60.5	51.1/51.2	70.7	61.5/61.1	53.7/53.3	72.7	56.5/59.3	51.8/51.6	75.9
直流功率/kW	92.51	79.79	59.39	95.63	83.45	61.07	90.29	80.64	63.76
交流功率/kW	99.47	85.80	63.86	102.83	89.73	65.67	97.09	86.71	68.56
冷干机功率/kW	11.25	11.25	11.25	0	0	0	18	18	0
总功率/kW	110.72	97.05	75.11	102.83	89.73	65.67	115.09	104.71	68.56

注: C1[#]的电压取4组的平均值。

3.3.2 盐耗

在进液盐水浓度相同的条件下,3台次氯酸钠发生器在不同工作模式下的盐耗情况见图4。3台发生器在不同运行模式下的盐耗基本一致,符合次

氯酸钠发生器标准(GB 12176—90)中A级的要求(盐耗<4.0 kg/kg)。3台发生器的盐耗排序为F2[#]>F1[#]>C1[#],由于盐耗为盐水浓度与有效氯浓度的比值,3台发生器的盐水浓度相同,而产出的有效氯浓

度存在差异($F2^{\#}<F1^{\#}<C1^{\#}$),导致 $F2^{\#}$ 盐耗稍高于其他2台发生器,比 $F1^{\#}$ 平均高约3.84%,比 $C1^{\#}$ 平均高约7.51%。从夏季、正常和冬季模式下的运行情况来看,国产次氯酸钠发生器的盐耗低于进口次氯酸钠发生器。

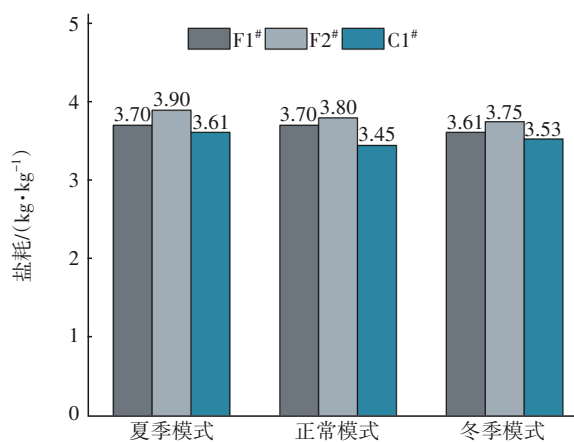


图4 次氯酸钠发生器盐耗

Fig.4 Salt consumption of sodium hypochlorite generator

3.3.3 运行成本分析

发生器的运行成本主要包括盐耗成本和电耗成本。经统计, $F1^{\#}$ 在夏季、正常和冬季3种模式下的运行成本分别为6.93、6.57、6.83元/kg, $F2^{\#}$ 的为6.87、6.43、6.84元/kg, $C1^{\#}$ 的为6.05、5.47、5.59元/kg(见图5)。可见, $C1^{\#}$ 在3种模式下的运行成本均小于 $F1^{\#}$ 和 $F2^{\#}$ 。对比单一发生器在不同运行模式下的运行成本,正常模式的耗电量低于夏季和冬季模式,因夏季和冬季模式需要启动压缩机对进液温度进行调控,导致电耗成本有一定的增加。

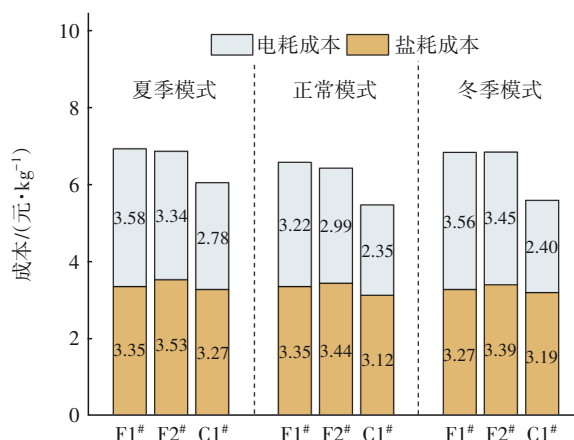


图5 次氯酸钠发生器运行成本占比情况

Fig.5 Proportion of sodium hypochlorite generator operating costs

从图5还可知道3台发生器运行成本中盐耗成本与电耗成本的占比情况。3台发生器的盐耗成本基本一致,而 $C1^{\#}$ 的电耗成本低于 $F1^{\#}$ 和 $F2^{\#}$,表明 $C1^{\#}$ 的低运行成本主要缘于电耗成本的降低。在正常运行模式下,3台发生器的压缩机均不工作, $C1^{\#}$ 的盐耗成本和电耗成本均小于 $F1^{\#}$ 和 $F2^{\#}$,说明 $C1^{\#}$ 电解系统在节能上有优势;在冬季模式下, $C1^{\#}$ 因采用电解槽余热利用的方式提高进液的温度代替压缩机加热,电耗成本相对更低。

3.3.4 其他

从设备运行维护方面考虑,进口次氯酸钠发生器 $F1^{\#}$ 和 $F2^{\#}$ 的保修期为1年,国产发生器 $C1^{\#}$ 的质保为5年。次氯酸钠发生器作为饮用水厂高频使用的设备,较长的保修期可极大地降低设备的运行维护成本,国产设备在该方面有较强的竞争优势。除此以外,由于涉及到商务问题以及购买年限的不同,本文没有评价3台反应器的价格以及由于使用年限造成的设备损耗等问题。

4 结论

3台次氯酸钠发生器的有效氯浓度和产量达到了设备的设计规格,副产物氯酸盐的含量满足欧盟标准化委员会《人类消耗水处理用化学品——次氯酸钠》(BS EN 901—2013)要求,运行电耗和盐耗满足国家标准GB 12176—90中次氯酸钠发生器质量等级A的标准。但相比于进口发生器 $F1^{\#}$ 和 $F2^{\#}$,国产次氯酸钠发生器 $C1^{\#}$ 的有效氯浓度更高,在提高有效氯产量和降低盐耗上更占优势。

在安全性和运行成本方面, $C1^{\#}$ 发生器氯酸盐与有效氯的比值、盐耗和电耗成本低于其他2台发生器。进口次氯酸钠发生器由于采购时间比国产设备更早,使用时间更长,可能会影响其性能。结合国产/进口次氯酸钠发生器保修年限的差异,进口发生器保修年限为1年,国产发生器的保修年限为5年,因此国产发生器具有较强的竞争力。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 孙亚全, 宋子明, 司徒菲. 次氯酸钠消毒在自来水厂中的应用[J]. 工业用水与废水, 2019, 50(1): 5-7.
SUN Yaquan, SONG Ziming, SITU Fei. Application of sodium hypochlorite disinfection in waterworks [J]. Industrial Water & Wastewater, 2019, 50(1): 5-7 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 陈宏源, 赵奇特, 张凯风. 次氯酸钠用于饮用水消毒时副产物风险和控制[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 34-40.
CHEN Hongyuan, ZHAO Qite, ZHANG Kaifeng. Risk and control of by-products in drinking water disinfection with sodium hypochlorite [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(20): 34-40(in Chinese).
- [5] 张清泊. 集美水厂次氯酸钠消毒系统改造技术示例[J]. 低碳世界, 2020, 10(5): 10-11.
ZHANG Qingbo. A case of the transformation technology of sodium hypochlorite disinfection system in Jimei Water Plant [J]. Low Carbon World, 2020, 10(5): 10-11(in Chinese).
- [6] 纪海霞, 李利生, 王怡人. 现场制备次氯酸钠在净水厂中的设计应用[J]. 给水排水, 2019, 45(6): 40-43.
JI Haixia, LI Lisheng, WANG Yiren. Design and application of sodium hypochlorite production on site in water treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(6): 40-43(in Chinese).
- [7] 刘丽君, 周娅琳, 阮建明, 等. 次氯酸钠消毒剂的分解特性及氯酸盐副产物形成规律探讨[J]. 给水排水, 2019, 45(6): 54-58.
LIU Lijun, ZHOU Yalin, RUAN Jianming, *et al.* Decomposition characteristics and chlorate formation rules of sodium hypochlorite disinfectant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(6): 54-58 (in Chinese).
- [8] European Committes for Standardization. Chemicals Used for Treatment of Water Intended for Human Consumption-Sodium Hypochlorite: BS EN 901-2013 [S]. Brussels: European Committes for Standardization, 2013.

作者简介: 颜亚玮(1988-), 男, 甘肃天水人, 博士, 副教授, 主要从事水处理技术研究。

E-mail: xyw@zjut.edu.cn

收稿日期: 2022-06-12

修回日期: 2022-06-21

(编辑: 李德强)

大力推进水利薄弱环节建设,
提高防灾减灾能力