

DOI: 10.19666/j.rlfed.202501002

非电解法制备次氯酸及其应用性能实验

黄琼¹, 刘树昌², 苏艳^{3,4}, 杨阳^{3,4}, 黄倩¹,
王正江^{3,4}, 姜琪^{3,4}, 王璟^{3,4}, 张益峰^{3,4}

(1.西安益通热工技术服务有限责任公司, 陕西 西安 710032;

2.华能甘肃能源开发有限公司, 甘肃 兰州 730070;

3.西安西热水务环保有限公司, 陕西 西安 710054;

4.高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室, 北京 102200)

[摘要] 含氯杀菌剂的杀菌效果不取决于总有效氯质量浓度, 而取决于次氯酸(HClO)分子的质量浓度。为降低火电厂循环水杀菌成本, 采用HClO溶液对循环水进行杀菌。以次氯酸钠(NaClO)溶液、CO₂和纯水为原料, 采用非电解法制备次氯酸溶液, 并对其稳定性和杀菌效果2种应用性能进行实验研究。结果表明: NaClO溶液中的HClO质量浓度非常低, 有效氯质量浓度在100~2 000 mg/L的NaClO溶液中, HClO占有有效氯的质量分数仅为0.690%~0.012%, 通入CO₂后可提高至94.91%, 从而提高杀菌效率; 对于HClO质量浓度为500、1 000、1 500、2 000 mg/L的溶液, 当稳定剂投加量分别为30、60、80、90 mg/L时, HClO质量浓度下降率可满足《消毒技术规范》保质期1年的要求; NaClO和HClO的投加量(以有效氯计)分别为5 mg/L和0.06 mg/L, 作用时间分别为120、15 min时, 杀菌率均可达90%, HClO杀菌更为经济、高效, 作为火电厂循环水杀菌剂, 其成本较传统杀菌剂NaClO降低了55%以上。

[关键词] 循环水; 次氯酸; 次氯酸钠; 稳定性; 杀菌效果

[引用本文格式] 黄琼, 刘树昌, 苏艳, 等. 非电解法制备次氯酸及其应用性能实验[J]. 热力发电, 2025, 54(10): 143-148. HUANG Qiong, LIU Shuchang, SU Yan, et al. Experimental study on preparation of hypochlorous acid by non-electrolytic method and its application performance[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(10): 143-148.

Experimental study on preparation of hypochlorous acid by non-electrolytic method and its application performance

HUANG Qiong¹, LIU Shuchang², SU Yan^{3,4}, YANG Yang^{3,4}, HUANG Qian¹,
WANG Zhengjiang^{3,4}, JIANG Qi^{3,4}, WANG Jing^{3,4}, ZHANG Yifeng^{3,4}

(1. Xi'an Yitong Thermal Technology Service Co., Ltd., Xi'an 710032, China;

2. Huaneng Gansu Energy Development Co., Ltd., Lanzhou 730070, China;

3. Xi'an TPRI Water-Management & Environmental Protection Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

4. State Key Laboratory of High-Efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon Capture Utilization and Storage, Beijing 102200, China)

Abstract: The sterilization effect of chlorine-containing disinfectants does not hinge on the total available chlorine concentration, but rather on the concentration of hypochlorous acid (HClO) molecules. To reduce the cost of circulating water sterilization in thermal power plants, HClO solution was used to sterilize circulating water. The HClO solution was prepared from sodium hypochlorite (NaClO) solution, CO₂ and pure water by non-electrolytic method, and experimental study on application performance (including stability and sterilization effect) of the HClO solution was conducted. The results showed that, the mass concentration of HClO in NaClO solution was extremely low, the mass fraction of HClO to available chlorine was only 0.690%~0.012% in NaClO solution with mass concentration of available chlorine in the range of 100~2 000 mg/L, which could be increased to 94.91% by reacting

收稿日期: 2025-01-03

第一作者简介: 黄琼(1990), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为火电厂水处理技术, hq0616@qq.com。

with CO₂, thereby improving the sterilization efficiency. When 30, 60, 80, and 90 mg/L stabilizer were added, the decomposition rate of HClO solution with mass concentrations of 500, 1 000, 1 500 and 2 000 mg/L could meet the requirements for a shelf life of one year of the *Disinfection Technical Specification*. When the dosage of NaClO and HClO (calculated by available chlorine) was 5 mg/L and 0.06 mg/L, the sterilizing time was 120 min and 15 min, the sterilizing rate could reach 90%, and it can be seen that HClO was more economical and efficient for sterilization. HClO solution can reduce the cost of circulating water bactericides in thermal power plants by more than 55% compared with that of conventional NaClO.

Key words: circulating water; hypochlorous acid; sodium hypochlorite; stability; sterilization effect

火电厂的循环冷却水系统多为敞开式, 循环水中的微生物繁殖会产生生物粘膜、黏泥以及藻类等^[1-3], 是影响提高浓缩倍率的一个重要因素。微生物在滋生和繁殖过程中产生的腐蚀性离子会加速凝汽器腐蚀, 同时会在系统中形成大量的黏泥, 使冷却塔的效率降低^[4]。如果不进行杀菌处理, 微生物的数量会成倍增加, 直接影响火电机组的安全、经济和稳定运行。

为了控制微生物对循环冷却水系统运行的影响, 常采用含氯杀菌剂对微生物进行处理, 通过杀灭或抑制细菌活性来控制微生物的增殖。目前, 国内外最常用的杀菌剂是次氯酸钠, 次氯酸钠碱性强、易挥发、刺激性气味大、性质不稳定, 储存时易衰减^[5], 投加量控制难度大, 运输费用高, 火电厂循环水水量较大, 投加次氯酸钠的成本非常昂贵。也有部分电厂使用电解二氧化氯或氯气杀菌, 该技术设备本体极易腐蚀, 运行维护成本昂贵, 实际使用价值低。

次氯酸 (HClO) 的杀菌效果远高于次氯酸钠、二氧化氯、氯气等杀菌剂, 是一种广谱、高效的新型含氯杀菌剂, 具有腐蚀性小、安全性高、不污染环境等优点^[6-8]。HClO 分子是对多种微生物具有最高杀菌活性的游离氯, 杀菌效果远高于 NaClO, 且 HClO 杀菌反应完全后成为水溶液, 不会产生任何有毒的灭菌副产物和残留杂质, 有利于在消毒灭菌过程中保证循环冷却水系统安全性^[9-10]。次氯酸最显著的化学性质是氧化性和不稳定性, 因为在常温下很容易分解, 需要现制现用^[11-12]。次氯酸的常规制备方法为电解法, 但因制备设备本体易腐蚀而无法长期使用, 且运行维护费用高。非电解技术设备腐蚀性低, 所需原料价格低廉, 运行维护成本低, 因此, 从安全环保属性、杀菌效果及经济考虑, 非电解法制备 HClO 溶液具有重要的现实意义^[13-15]。

基于此, 本文通过非电解法制备 HClO 溶液的实验, 分析不同原料配比对生成 HClO 溶液的 pH 值和浓度的影响, 对 HClO 溶液的稳定性 and 杀菌效

果 2 种应用性能进行实验研究, 分析 HClO 对火电厂循环水杀菌的经济性, 为 HClO 杀菌剂生产和杀菌的推广应用提供基础。

1 实验方案

本研究包括 HClO 的制备实验、稳定性实验和杀菌效果实验 3 部分。HClO 制备方法为非电解法, 原理见反应方程式(1), 制备过程即为次氯酸钠 (NaClO) 溶液酸化过程。采用原料为 10% (有效氯质量浓度为 100 000 mg/L) NaClO 溶液、CO₂ 和纯水, 生成液为 HClO 溶液, 制备装置示意图见图 1。文献^[16]研究显示, HClO 分子的杀菌效果是 ClO⁻ 离子的 80~150 倍。因此, 本实验用纯水将 NaClO 质量分数 10% 的溶液中有有效氯质量浓度稀释至 100~2 000 mg/L, 通过通入不同量的 CO₂ 反应生成不同质量浓度的 HClO 溶液。

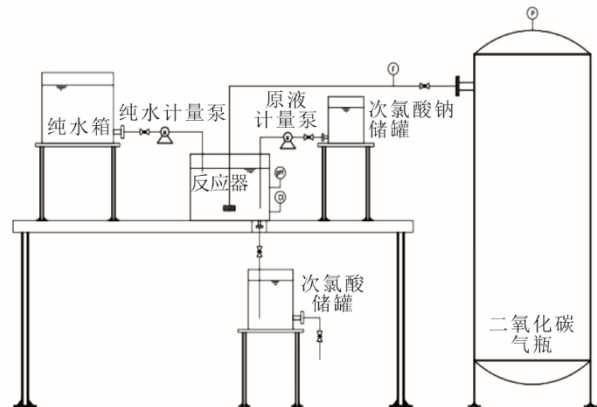


图 1 HClO 制备装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the HClO preparation device

稳定性实验采用纳米级氮化硼作为稳定剂, 向不同质量浓度的 HClO 溶液加入不同量稳定剂, 在设定条件下检测 HClO 质量浓度的下降率, 并根据《消毒技术规范》^[17]判定有效期。

杀菌效果实验是对 HClO 与 NaClO 的杀菌效果做对比实验, 杀菌对象为火电厂循环冷却排污水。

2 检测方法

本研究采用的检测标准见表 1。《含氯消毒剂卫生要求》^[18] (GB/T 36758—2018) 规定, 溶液 pH 值大于 5 时, HClO 测定方法是通过式(2)计算 HClO 占有有效氯的质量分数, 再结合测定的有效氯质量浓度计算出溶液中 HClO 的质量浓度。可见, 溶液中的 HClO 质量浓度与有效氯质量浓度和 pH 值相关。

$$Y = \frac{1}{1 + k_a \times 10^{pH}} \times 100 \quad (2)$$

式中: Y 为 HClO 占有有效氯的质量分数, %; k_a 为次氯酸的电离平衡常数, 常温下值为 3.8×10^{-8} 。

表 1 检测标准
Tab.1 The testing standards

序号	检测项目	检测依据
1	pH 值	《水质 pH 值的测定 电极法》(HJ 1147—2020)
2	有效氯质量浓度	《含氯消毒剂卫生要求》(GB/T 36758—2018)
3	次氯酸质量浓度	
4	细菌总数	《水质 细菌总数的测定 平皿计数法》(HJ 1000—2018)

3 实验结果

3.1 HClO 制备实验结果

3.1.1 NaClO 溶液的 pH、HClO 含量、有效氯含量

检测有效氯质量浓度为 100~2 000 mg/L 的 NaClO 稀释液 pH 值, 并根据式(2)计算出 HClO 占有有效氯的质量分数, 结果见图 2。实验结果表明, 有效氯质量浓度为 100~2 000 mg/L 的 NaClO 溶液, 其 pH 值在 9.58~11.35, HClO 占有有效氯的质量分数在 0.690%~0.012% 间, HClO 质量浓度均在 1 mg/L 以下。可见, NaClO 溶液中的 HClO 含量非常低。

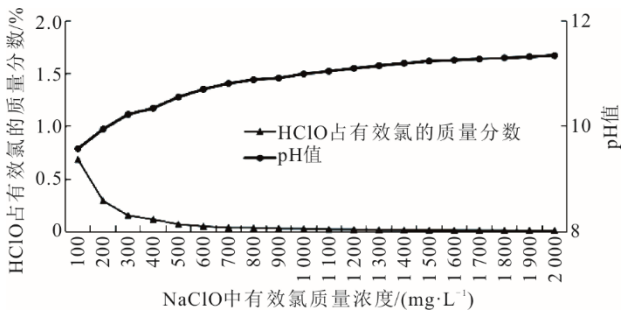


图 2 NaClO 溶液 pH 值和 HClO 占有有效氯的质量分数随有效氯质量浓度的变化

Fig.2 The pH value and mass fraction of HClO to available chlorine in NaClO solution with the mass concentration of available chlorine

3.1.2 CO₂ 投加量对生成液有效氯含量和 pH 值影响

本实验按照不同 CO₂ 与 ClO⁻ 的摩尔比 n , 向上述不同有效氯质量浓度的 NaClO 稀释液中通入 CO₂ 气体, 检测生成液的有效氯质量浓度和 pH 值, 实验结果见图 3 和图 4, 并根据 pH 值计算得到生成液中 HClO 占有有效氯质量分数, 结果见图 5。由图 4 和图 5 可见: 在 n 相同的情况下, 生成液的 pH 值不随 NaClO 溶液中有效氯质量浓度的变化而变化, pH 值随 n 的增大而降低; 且 $n=12:1$ 时, pH 值趋于稳定, 稳定值为 6.15, 此时 NaClO 的酸化过程达到极限, HClO 占有有效氯质量分数为 94.91%, 达到 NaClO 溶液中 HClO 占比的几百甚至几千倍。这是由于 CO₂ 遇水产生的 H₂CO₃ 溶液为弱酸, 与强碱弱酸盐 NaClO 反应仅能到达弱酸阶段, 因此 pH=6.15 时反应达到稳定。由图 3 可见, 生成液与 NaClO 溶液中的有效氯质量浓度相同, 且有效氯质量浓度不随 CO₂ 通入量的变化而变化, 即不随 pH 值的变化而变化。这是由于 NaClO 酸化过程是将原液中的 ClO⁻ 转化成 HClO, ClO⁻ 和 HClO 均为有效氯成分, 因此反应前后溶液中的有效氯质量浓度不变。

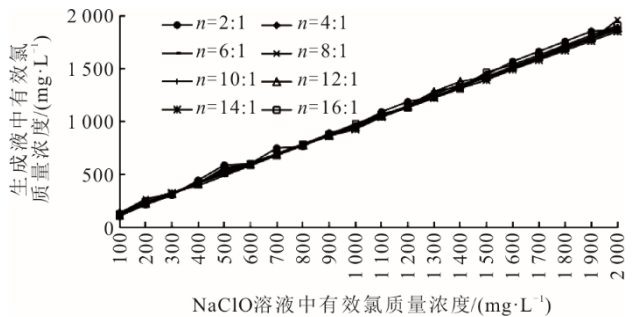


图 3 CO₂ 投加量对生成液有效氯质量浓度的影响
Fig.3 Influence of the dosage of CO₂ on mass concentration of available chlorine in generated solution

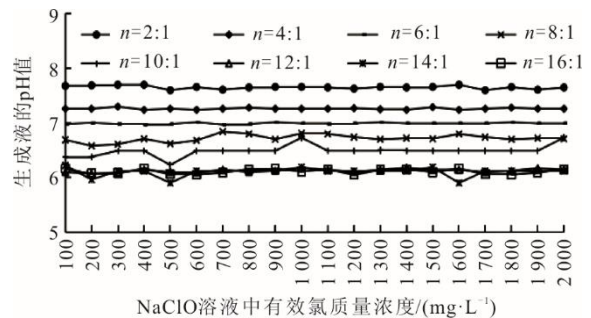


图 4 CO₂ 投加量对生成液 pH 值的影响
Fig.4 Effects of the dosage of CO₂ on the pH value of generated solution

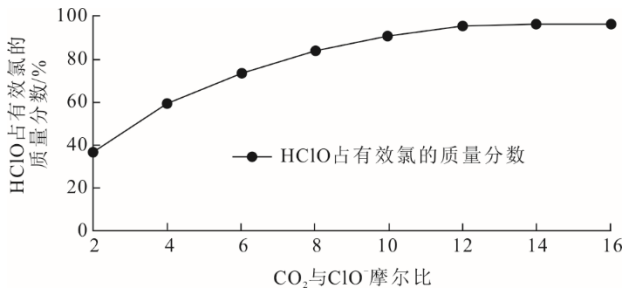


图 5 CO₂ 投加量对生成液中 HClO 占有有效氯质量分数的影响
Fig.5 Influence of the dosage of CO₂ on the mass fraction of HClO to available chlorine in generated solution

3.1.3 生成液中 HClO 质量浓度随 NaClO 溶液有效氯质量浓度的变化

在 NaClO 酸化过程达到极限，即 $n=12:1$ 的情况下，根据 3.1.2 节得出的生成液中有效氯质量浓度和 HClO 占有有效氯质量分数，计算出不同有效氯质量浓度下生成液中 HClO 的质量浓度，实验结果见图 6。结果表明， $n=12:1$ 的情况下，生成液中 HClO 质量分数与 NaClO 溶液有效氯质量浓度成线性关系（式(3)， $R^2=0.9999$ ），相关性好。

$$y = 0.9547x + 2.4703 \quad (3)$$

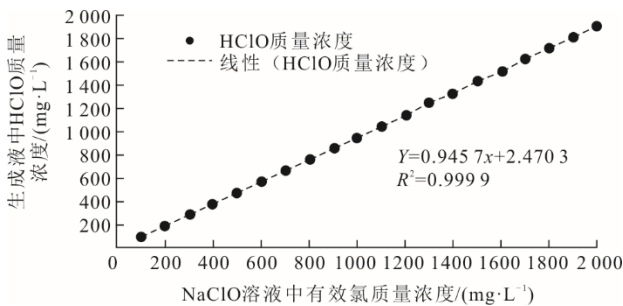


图 6 生成液中 HClO 质量浓度随 NaClO 溶液有效氯质量浓度的变化

Fig.6 Variation of the mass concentration of HClO in generated solution with the mass concentration of available chlorine in NaClO solution

3.2 稳定性实验结果

《消毒技术规范》^[17]中规定，消毒剂在 54 °C 恒温箱内放置 14 天，有效成分下降率不大于 10%，可将贮存有效期定为 1 年。本实验向自制的质量浓度为 500、1 000、1 500、2 000 mg/L 的 HClO 溶液中加入不同量的稳定剂，在恒温 54 °C、避光、密闭的恒温箱内放置 14 天，分别测定放置前、后 HClO 质量浓度并计算下降率，结果见图 7。本实验采用的稳定剂为纳米级氮化硼（200 nm）。

实验结果表明：未投加稳定剂的质量浓度为 500、1 000、1 500、2 000 mg/L 的 HClO 溶液，在

恒温 54 °C、避光、密闭的条件下放置 14 天后，有效成分的下率分别为 29.00%、32.70%、36.47%、41.50%，下降率均远超过 10%，且 HClO 溶液质量浓度越高，下降率相对越高；稳定剂投加量分别为 30、60、80、90 mg/L 时，有效成分下降率分别为 9.60%、9.75%、9.67%、9.40%，均低于 10%，有效期可定为 1 年。产生上述现象的原因是 HClO 质量浓度越高，其本身电荷密度越高，越不稳定，越容易分解产生 HCl 和 O₂，而稳定剂中的硼原子具有较强的缺电性，与 HClO 中氧原子可紧密络合，降低 HClO 中氧原子的电荷密度，从而提高 HClO 的稳定性^[19]。

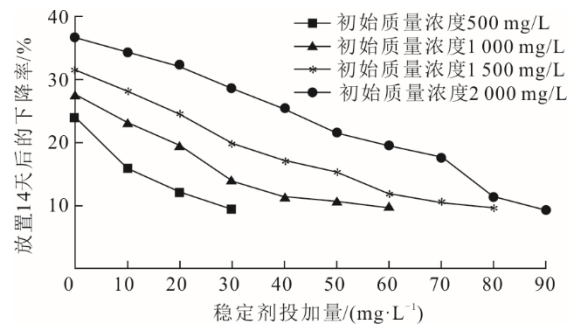


图 7 HClO 稳定性实验结果
Fig.7 Experimental results of the stability of HClO

3.3 杀菌效果实验结果

将自制的质量分数为 0.1% 的 HClO 溶液（HClO 占有有效氯质量分数为 94.91%）与质量分数 10% 的 NaClO 溶液的杀菌效果进行对比，对比指标为杀菌效率和杀菌速率。向杀菌对象中加入不同量（以有效氯质量分数计）的 0.1% HClO 和 10% NaClO，在不同作用时间下检测杀菌对象中的细菌总数，记录杀菌作用时间并计算出杀菌率，杀菌效果实验结果见图 8、图 9。通常认为杀菌率高于 90% 的杀菌剂为合格^[20-24]。实验用杀菌对象为某火电厂浓缩倍率为 5 倍（以氯离子计）的循环冷却排污水，细菌总数为 45 000 个/L。

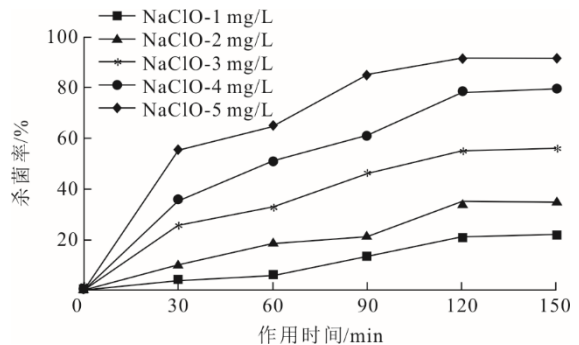


图 8 NaClO 杀菌效果实验结果
Fig.8 Experimental results of sterilization effect of NaClO

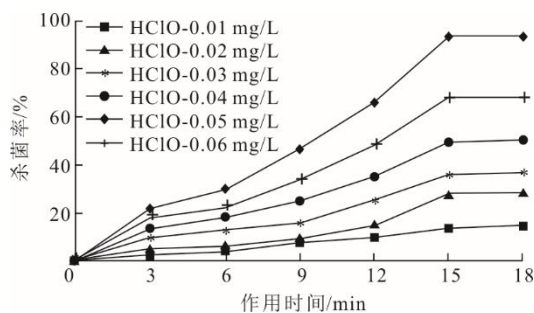


图 9 HClO 杀菌效果实验结果

Fig.9 Experimental results of sterilization effect of HClO

实验结果表明,当 NaClO 的投加量和作用时间为 5 mg/L (以有效氯计)、120 min, HClO 的投加量和作用时间为 0.06 mg/L (以有效氯计)、15 min 时,杀菌率均可达 90%,可见 HClO 的杀菌效率和杀菌速率均远高于 NaClO。产生此现象的原因是: HClO 的主要成分为 HClO 分子,而含氯杀菌剂起主要杀菌作用的是 HClO 分子,由于 HClO 分子不带电荷,可以穿透细胞膜与 DNA 和线粒体发生氧化反应,从而破坏细胞膜或细胞壁直接产生杀菌作用,利用较低浓度的 HClO 溶液作用较短的时间,即可达到很好的杀菌效果^[22-25]; NaClO 的主要成分为 ClO⁻, ClO⁻带负电荷,与细胞膜表面的负电荷排斥,不易浸入细胞壁,导致杀菌效率远低于 HClO,并且 ClO⁻是通过水解作用形成 HClO 间接产生杀菌作用。

4 经济性分析

以循环冷却塔塔池保有水量 $V=20\,000\text{ m}^3$ 为例,对质量分数为 0.1% HClO 和 10% NaClO 2 种杀菌剂进行经济性分析。

1) 杀菌剂成本

制备 1 m³ 质量分数 0.1% 的 HClO 需要质量分数 10% 的 NaClO 14 L, 水 986 L, 液体 CO₂ 11.25 L。其中, 10% 的 NaClO 来源有直接采购和电解法制备 2 种方式, 采购单价按 1.4 元/L 计, 电解法制备的运行成本(包含材料、电耗及设备维护折旧费)按 0.98 元/L 计, 水单价按 0.001 元/L 计, 液态 CO₂ 单价按 24 元/L 计。则 2 种来源原料杀菌剂制备成本比较见表 2。

表 2 2 种来源原料制备杀菌剂成本比较 单位: 元/m³
Tab.2 Cost comparison of fungicides prepared from two kinds of raw materials

10% NaClO 来源	材料成本	电耗及设备维护折旧费	合计
采购	291	~77	368
电解法制备	285	~77	362

可见 2 种来源原料杀菌剂制备成本基本相同, 且“电解法制备”还需考虑人工成本, 因此下列经济分析以“采购 10% NaClO”作为原料制备 HClO 为基础。

2) 经济性分析

根据 3.3 小节杀菌实验结果, HClO 投加质量浓度按 0.06 mg/L (以有效氯计) 计, NaClO 投加质量浓度按 5 mg/L (以有效氯计) 计。杀菌持久性按 1 天考虑, 保有水量 20 000 m³ 的水池 0.1% HClO 的投加量为 1.2 m³/天, 成本价为 442 元/天; 10% NaClO 投加量为 1 m³/天, 若直接采购, 成本价为 1 400 元/天, 若采用电解法制备, 成本价为 980 元/天。综上所述, 采用非电解法制备 HClO 作为循环水杀菌较采购 NaClO 和电解法制备 NaClO 成本可分别降低 68% 和 55%。

5 结 论

1) NaClO 溶液中的 HClO 含量非常低。有效氯质量浓度在 100~2 000 mg/L NaClO 溶液中, HClO 占有有效氯的质量分数仅为 0.690%~0.012%, 通入 CO₂ 后可提高至 94.91%, 从而提高杀菌效率。

2) 质量浓度为 500、1 000、1 500、2 000 mg/L 的 HClO 溶液, 稳定剂投加量分别为 30、60、80、90 mg/L 时, HClO 含量的下降率可满足《消毒技术规范》保质期 1 年的要求。

3) HClO 溶液的杀菌效率和杀菌速率均远高于 NaClO 溶液。当杀菌率同时达到 90% 时, NaClO 和 HClO 的投加量分别为 5、0.06 mg/L (以有效氯计), 作用时间分别为 120、15 min。可见, HClO 作为杀菌剂更经济、高效, 用于火电厂循环水杀菌较传统 NaClO 材料费成本可降低 55% 以上。

[参 考 文 献]

- [1] 杨宝红, 王璟, 许臻, 等. 火电厂深度节水及废水零排放[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 111-124.
YANG Baohong, WANG Jing, XU Zhen, et al. Deep water saving and wastewater zero discharge technology for thermal power plants[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 111-124.
- [2] 徐钟宇. 火电厂闭式循环水系统优化运行实验研究[J]. 上海节能, 2023(10): 1546-1551.
XU Zhongyu. Experimental study on optimal operation of Closed circulating water system in thermal power plant[J]. Shanghai Energy Saving, 2023(10): 1546-1551.
- [3] 金铁群, 李晓东, 刘川, 等. 燃气电厂高浓缩倍率循环水动态模拟实验研究[J]. 中国资源综合利用, 2023(2): 5-9.
JIN Yiqun, LI Xiaodong, LIU Chuan, et al. Dynamic simulation test research on circulating water with high concentration ratio in gas power plant[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023(2): 5-9.
- [4] 陈康, 李祖强, 韩文荃, 等. 工业循环水除菌技术综述[J]. 当代化工研究, 2022(24): 40-42.
CHEN Kang, LI Zuqiang, HAN Wenquan, et al. A review of industrial circulating cooling water de-bacterization technology[J]. Modern Chemical Research, 2022(24): 40-42.
- [5] 李昆江. 高浓度次氯酸钠溶液生产中的影响因素[J]. 氯碱工业, 2023, 59(8): 22-24.

- LI Kunjiang. Influencing factors in production of high concentration sodium hypochlorite solution[J]. Chlor-Alkali Industry, 2023, 59(8): 22-24.
- [6] 肖琦, 赵霞玲, 钱雯娟, 等. 次氯酸消毒液对猪源病原体的消杀效果[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(21): 170-174. XIAO Qi, ZHAO Xialing, QIAN Wenxian, et al. Disinfection effect of hypochloric acid disinfectant on porcine pathogens[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(21): 170-174.
- [7] 黄育红, 林立旺, 陈路瑶, 等. 弱酸性次氯酸消毒液杀菌性能和腐蚀性的实验研究[J]. 预防医学论坛, 2014, 20(9): 691-692. HUANG Yuhong, LIN Liwang, CHEN Luyao, et al. Experimental study on germicidal properties and metal corrosion of weakly acidic hypochlorite disinfectant[J]. Preventive Medicine Tribune, 2014, 20(9): 691-692.
- [8] 包卫华, 慈颖, 孙颀, 等. 一种次氯酸手消毒剂消毒相关性研究[J]. 中国消毒学杂志, 2022, 39(12): 889-891. BAO Weihua, CI Ying, SUN Yang, et al. Relevant properties of a hypochlorous acid-based hand disinfectant[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2022, 39(12): 889-891.
- [9] 王晨杰. 微酸性次氯酸消毒液灭菌效果与机理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020: 4. WANG Chenjie. Study on the sterilization effect and mechanism of slightly acidic hypochlorous acid disinfectant[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020: 4.
- [10] 谭茗惠, 王汕珊. 手卫生消毒剂的研究现状[J]. 护理研究, 2018, 32(17): 2021-2023. TAN Minghui, WANG Shanshan. Research status quo of hand hygiene disinfectant[J]. Chinese Nursing Research, 2018, 32(17): 2021-2023.
- [11] 杨向东, 李秀燕, 王菊花, 等. 次氯酸的制备和分析[J]. 氯碱工业, 2013, 49(10): 31-32. YANG Xiangdong, LI Xiuyan, WANG Juhua, et al. Preparation and analysis of hypochloric acid[J]. Chlor-Alkali Industry, 2013, 49(10): 31-32.
- [12] 张聪, 刘小琴. 微酸性次氯酸水消毒剂最新制备方法[J]. 当代畜牧, 2022(8): 79-82. ZHANG Cong, LIU Xiaoqin. Latest preparation method of slightly acidic hypochlorite water disinfectant[J]. Contemporary Animal Husbandry, 2022(8): 79-82.
- [13] 鞠剑峰, 王相伟, 于亚楠, 等. 泡沫型次氯酸水杀菌消毒剂的制备及性能[J]. 广东化工, 2020, 47(10): 7-8. JU Jianfeng, WANG Xiangwei, YU Ya'nan, et al. Preparation and property of foam disinfectant about hypochloric acid[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(10): 7-8.
- [14] 程亚光, 辛鹏举, 苏静, 等. 次氯酸对微生物作用的研究现状[J]. 中国消毒学杂志, 2019, 36(6): 470-473. CHENG Yaguang, XIN Pengju, SU Jing, et al. Current research status of the effect of hypochlorous acid on microorganisms[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2019, 36(6): 470-473.
- [15] 吴政文, 王莉. 微酸性次氯酸钠杀菌水在净菜加工生产中的应用研究[J]. 农机化研究, 2011(11): 161-164. WU Zhengwen, WANG Li. Application research of slightly acidic sodium hypochlorite sterilizing water in the processing and production of Clean vegetables[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(11): 161-164.
- [16] 尹义蕾, 王莉, 李邵, 等. 次氯酸杀菌水对温室黄瓜生长特性的影响[J]. 农机化研究, 2013(9): 205-208. YIN Yilei, WANG Li, LI Shao, et al. Effect of hypochlorous acid sterilization water on the growth characteristics of greenhouse cucumber[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(9): 205-208.
- [17] 中华人民共和国卫生部. 卫生部关于印发《消毒技术规范》(2002年版)的通知: 卫法监发(2002)282号[A/OL]. (2006-02-09) [2025-01-03]. <https://www.nhc.gov.cn/zwgk/wtwj/201304/3a0121cba422455b93307f070b099cf2.shtml>. Ministry of Health P.R.China. Notice of the Ministry of Health on printing and distributing *Disinfection Technical Specification* (2002 edition): WFJF (2002) No.282[A/OL]. (2006-02-09) [2025-01-03]. <https://www.nhc.gov.cn/zwgk/wtwj/201304/3a0121cba422455b93307f070b099cf2.shtml>.
- [18] 含氯消毒剂卫生要求: GB/T 36758—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 2. State Administration for Market Regulation. Hygienic requirements for disinfectants with chlorine: GB/T 36758—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018: 2.
- [19] 钱祎. 一种高稳定性次氯酸溶液的制备方法: CN202211261790.X[P]. 2023-01-13[2025-01-03]. QIAN Yi. A preparation method of highly stable hypochlorous acid solution: CN202211261790.X[P]. 2023-01-13[2025-01-03].
- [20] 马运平, 赵晓林. 火电厂循环冷却水杀菌剂杀菌效果研究[J]. 化工管理, 2017(4): 117-118. MA Yunping, ZHAO Xiaolin. Study on the bactericidal effect of circulating cooling water bactericides in thermal power plants[J]. Chemical Enterprise Management, 2017(4): 117-118.
- [21] 王晨杰, 薛源, 张鑫, 等. 稳定性微酸性次氯酸消毒液发生器的消毒效果研究[J]. 应用化工, 2020, 49(12): 2957-2960. WANG Chenjie, XUE Yuan, ZHANG Xin, et al. Study on sterilization effect of stable slightly acidhypochlorous acid disinfectant generator[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(12): 2957-2960.
- [22] ISSA-ZACHARIA A, KAMITANI Y, TIISEKWA A, et al. In vitro inactivation of Escherichia coli, Staphylococcus aureus and Salmonella spp. using slightly acidic electrolyzed water[J]. Journal of Bioscience & Bioengineering, 2010, 110(3): 308-313.
- [23] 杨苗. 次氯酸对磷脂的气-液界面氧化行为及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 1-52. YANG Miao. Research on the oxidation behavior and mechanism of hypochlorous acid on phospholipids at air-liquid interface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 1-52.
- [24] 卫甲鑫, 侯玉琴, 叶月美, 等. 次氯酸钠与次氯酸消毒剂的人体和环境生态毒理学比较分析[J]. 中国消毒学杂志, 2021, 38(4): 296-299. WEI Jiaxin, HOU Yuqin, YE Yuemei, et al. Comparative analysis of human and environmental ecotoxicology of sodium hypochlorite and hypochlorous acid disinfectants[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2021, 38(4): 296-299.
- [25] 丁岚峰, 刁春文, 刘长军, 等. 非电解微酸性次氯酸消毒剂在畜牧养殖业中的应用与展望[J]. 中国兽药杂志, 2020, 54(9): 61-71. DING Lanfeng, DIAO Chunwen, LIU Changjun, et al. Applications and prospects of non-electrolytic micro-acidic hypochlorite water disinfectant in animal husbandry[J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2020, 54(9): 61-71.

(责任编辑 杨嘉蕾)