

温度对网格型次氯酸钠发生器运行效果的影响

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: 结合自组装的网格型电极, 试验研究次氯酸钠发生器在不同盐水温度、不同运行模式、有无冷却措施等情况下的运行效果。试验结果表明: 降低电解过程中电解槽内盐水温度可有效提高次氯酸钠发生器的电解效率。增设循环冷却水或间歇式运行可提高有效氯产量 38%-42%、电流效率 37%-65%, 运行成本降低 5.217-10.185 元/kg。增设循环冷却水情况下有效氯产量最高可达 263g, 相应的理论运行成本为 8.876 元/kg; 电解 270-310min 时, 有效氯产量为 235-250g, 运行成本最低, 为 7.989-8.066 元/kg。在实际应用中, 应根据实际产氯量、运行成本等综合考虑电解时间。

关键词¹: 温度; 次氯酸钠发生器; 网格型电极; 有效氯浓度; 运行成本

中图分类号: TU991.25.

文献标识码: A.

Effect of Temperature on Efficiency of Grid-type 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: A new grid-type electrode was assembled for rural water supply projects. Effects of salt water temperature, running modes, cooling measures on efficiency of sodium hypochlorite generator were investigated in this paper. Results indicated that cooling measures could improve the electrolysis efficiency of sodium hypochlorite generator significantly. Circulating cooling water or intermittent operation could increase the yield of available chlorine from 38% to 42%, heighten current efficiency from 37% to 65% and also reduce operating cost from 5.217 RMB/kg to 10.185 RMB/kg. Sodium hypochlorite generator with circulating cooling water could produce maximum 263g available chlorine and the operating cost was 8.876RMB/kg in theory. The optimum operation condition could reach lowest operating cost of 7.989-8.066RMB/kg with electrolysis time 270-310min. In actual application, electrolysis time should be determined by available chlorine and operating cost.

Keywords: temperature; sodium hypochlorite generator; grid-type electrode; available chlorine concentration; running cost

0 引言

次氯酸钠发生器是采用电解食盐水制取次氯酸钠溶液, 具有取材简单、管理简便的优点^[1]。很多研究者^[2-3]将次氯酸钠发生器进行小型化、微型化, 应用在小型水厂、家庭、宾馆、餐饮、医疗和农业养殖等方面的消毒。然而次氯酸钠发生器小型化、微型化后, 运行效率下降, 相应的运行成本升高。提高小型次氯酸钠发生器运行效率对于次氯酸钠发生器的推广应用至关重要。次氯酸钠发生器在运行过程中受影响因素较多, 其中主要有盐水浓度、盐水温度、电解电流、电流密度、电解电压、电极间距等因素^[4-5]。其中, 很多研究者提出电解过程中温度会较

¹基金项目: 国家十二五科技支撑项目-村镇应急水处理关键技术及设备研发(2012BAJ25B04)。

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.

大程度的影响电解效率^[6-8]，并提出采用加接自来水冷却电极可以降低电解槽内温度（盐水温度和电极温度），提高氯产量^[8]。为进一步明确温度对次氯酸钠发生器电解效率的影响，本文结合组装研制的网格型电极，试验研究次氯酸钠发生器在不同盐水温度、不同运行模式、有无冷却措施等情况下的产氯量以及运行成本，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 材料与方法

1.1 次氯酸钠发生器

本试验采用的次氯酸钠发生器主要是自组装形成，主要有两种，一种是无冷却措施（图 1（1）），主要部件有整流器、电解槽、电极组成；另一种如图 1（2）所示，在图 1（1）的基础上外接循环冷却水用以降低电解槽内温度。试验装置中的整流器为稳流稳压开关电源（无锡安耐斯电子科技有限公司），电压为 0-15V，电流为 0-50A；电解槽材质为 PVC，尺寸主要是 35 cm×30 cm×40 cm，容积为 42L；电极采用网格型电极，采用特殊涂层的纯钛材料制作而成，电极高度 66 mm，电极板间距 5 mm。

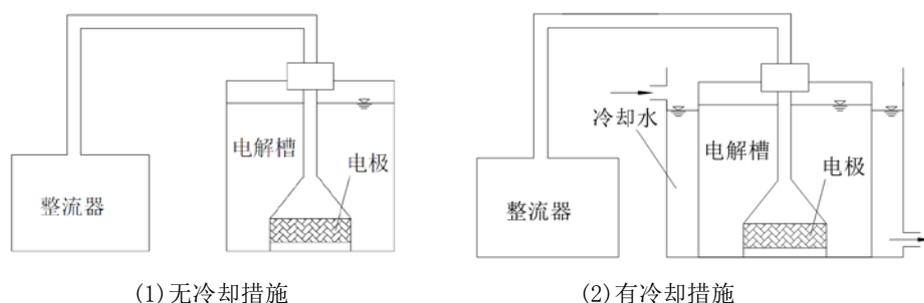


图 1 次氯酸钠发生器装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of sodium hypochlorite generator

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：Q-CL501C 便携式有效氯快速测定仪（深圳清时捷科技有限公司）、余氯检测仪（英国百灵达公司）、电子天平（中国凯丰集团）、波美比重计、普通室温温度计、HT-866 型红外测温仪（HCJYET）、DDS607 型单相电子式电能表（德力西集团仪器仪表有限公司）。

1.3 试验方法

1.3.1 不同盐水温度试验

试验装置采用图 1（1）。称取 0.30 kg 无碘盐放置在电解槽内，添加 10L 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 3%。通过水浴加热调整盐水温度为 20℃±1℃、25℃±1℃、30℃±2℃、35℃±2℃、40℃±2℃。电解过程中电流设置为 35A，电解时间为 60min，电解结束后检测电解槽内次氯酸钠溶液的有效氯浓度、温度。

1.3.2 不同运行模式试验

连续运行模式，无冷却措施：称取 0.90 kg 无碘盐放置在电解槽内，添加 30L 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 3%。电解过程中电流设置为 35A，电解时间 300min，电解过程中不同时间间隔检测电解槽内次氯酸钠溶液的有效氯浓度和溶液温度，并记录电压、电表读数。

间歇运行模式，无冷却措施：盐水浓度为 3%（配制方法同上）。电解过程中电流设置为 35A，电解过程中不同时间间隔检测电解槽内次氯酸钠溶液的温度，当电解槽内温度达到 25℃ 后停止电解，当电解槽内温度低于 18℃ 时，重新开始电解，间歇运行的时间分别是：电解 90min—停机 240min—电解 60min—停机 240min—电解 30min—停机 240min—电解 30min—停机

480min—电解 90min—结束，累计电解时间 300min，检测各个时段电解槽内次氯酸钠溶液的有效氯浓度和溶液温度，记录电压、电表读数。

连续运行模式，外加冷却措施：试验装置采用图 1 (2)。盐水浓度采用 3%，电解过程中电流设置为 35A，电解时间 300min，电解槽外部添加循环冷却水，电解过程连续无间断，不同时间间隔检测电解槽内次氯酸钠溶液的有效氯浓度和溶液温度，并记录电压、电表读数。

1.4 测试与计算方法

采用便携式有效氯快速测定仪（溶液稀释 20 倍测定）和余氯检测仪（溶液稀释 1000-2000 倍测定）同时测定有效氯浓度，如两者数据相差 10% 以上，进行重复测定，数据处理时取两者平均值；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。

电解过程中所使用的法拉第（Faraday）电解定律公式、用电量（交流电耗）（PAC）、直流电耗（PDC）、用盐量（Us）、运行成本（Rc）、电流效率（ η ）的计算公式如式（1）-（6）所示^[7,9-10]。

$$G=K \times I \times t \quad (1)$$

$$PAC = (RPM_i - RPM_0) / (G/1000) \quad (2)$$

$$PDC = U \times I / G \quad (3)$$

$$Us = S / (G/1000) \quad (4)$$

$$Rc = (0.55 \times PAC + 1.1 \times Us) / (G/1000) \quad (5)$$

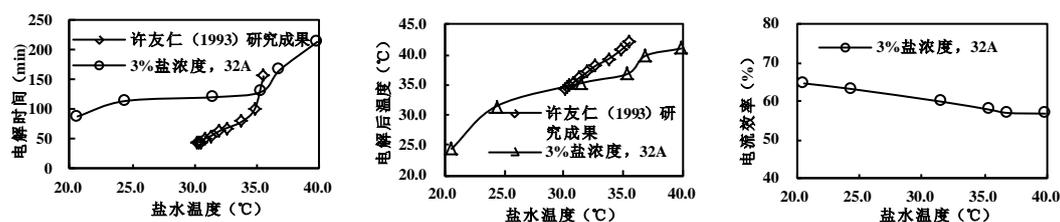
$$\eta = U / (K \times PDC) \times 100 \quad (6)$$

其中：G 为电极上生成物质的量，也即有效氯浓度与体积之积(g)；K 为电化当量(g/A·h)，其中 $K_{\text{氯}} = 1.323\text{g/A} \cdot \text{h}$ ；I 为电流(A)；t 为电解时间(h)；PAC 为交流电耗(kW·h/kg)； RPM_i 、 RPM_0 分别为电解时间为 i 时刻和初始时刻的电表读数；PDC 为直流电耗(KW·h/kg)；U 为电解电压(V)；Us 为用盐量(kg/kg)；S 为盐重量(kg)；Rc 为运行成本(元/kg)，电单价按照 0.55 元/kW·h 计，盐单价按照 1.1 元/kg 计^[4]； η 为电流效率(%)。

2 结果与讨论

2.1 不同盐水温度试验

不同盐水温度情况下次氯酸钠发生器的运行效果如图 2 所示。



(1) 电解时间

(2) 电解后溶液温度

(3) 电流效率

图 2 不同盐水温度运行结果

Fig.2 Results of different salt temperature

图 2 (1) 假设电解速率均衡不变的情况下，产氯量为 100g 情况下所需电解时间。试验结果表明相同盐水浓度和电解电流情况下，随着盐水温度的升高，特别是盐水温度在 35°C 以上时，如要达到相同的有效氯产量，则需增长电解时间，与许友仁^[8]的研究结果一致。此外，根据法拉第电解定律（式（1）），在电解过程中有效氯产量与电解电流和电解时间成正比，当电解电流一定时，有效氯产量随着电解时间的增长而增大^[7]。因此，试验结果也与法拉第电解定律相符。由图 2 (2) 可知，电解后电解槽内溶液的温度均有不同程度的上升，氯气溶解度随

着溶液温度的上升而降低,从而产生的次氯酸钠量减少,电流效率降低(图2(3))。因此,通过不同盐水温度试验可知,温度对于次氯酸钠发生器的电解效果有较大的影响。

2.2 不同运行模式试验

为进一步明确温度对次氯酸钠发生器电解效果的影响,本文采用连续运行、间歇运行以及外接循环冷却水的方式开展试验,试验结果如图3所示。

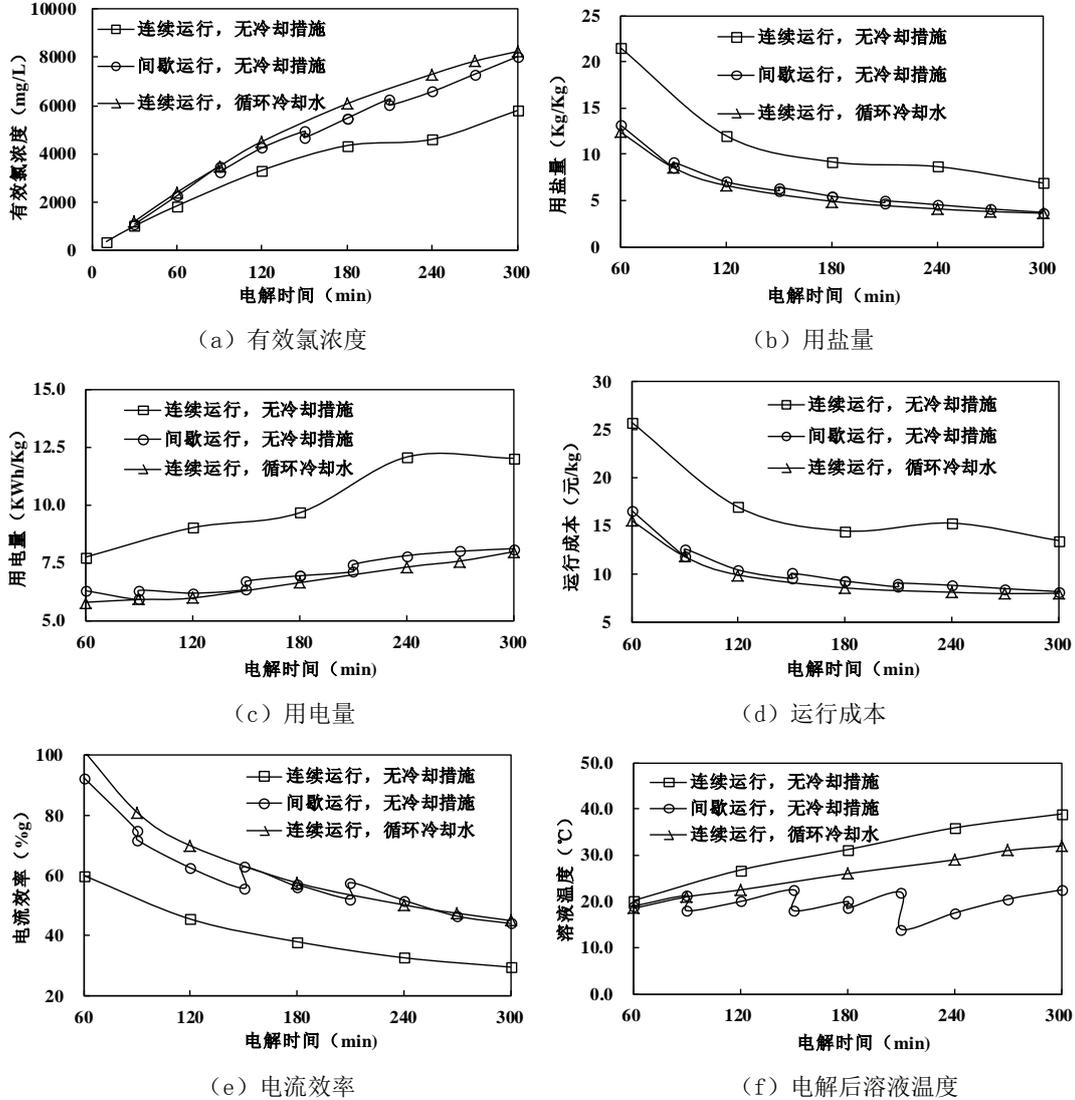


图3 不同运行模式试验结果

Fig.3 Results of different run mode

由图3(a)可知,不同运行模式情况下,次氯酸钠发生器电解后有效氯浓度有较大差异,其中增设循环冷却水情况下,有效氯浓度和氯产量最高,间歇运行(无冷却措施)次之,而没有冷却措施且连续运行情况下最低。以电解时间为300min为例,连续运行(无冷却措施)情况下有效氯浓度为5795 mg/L,间歇运行(无冷却措施)情况下为8020 mg/L,与连续运行(无冷却措施)情况下相较提高38.4%,而连续运行且增设循环冷却水情况下为8240 mg/L,与连续运行(无冷却措施)情况下相较提高42.2%。比较发现连续运行且增设循环冷却水情况下较间歇运行(无冷却措施)情况下的有效氯浓度提高2%-11%。

图3(b)和3(c)描述了不同运行模式情况下的用盐量和用电量。由于连续运行(无冷却措施)情况下产氯量低,从而用盐量和用电量最高。连续运行且增设循环冷却水情况下可以获得最低的用盐量和用电量,与间歇运行(无冷却措施)情况下相比用盐量可节省2%-11%、

用电量节省 2%-8%。当电解时间为 270min 时，连续运行且增设循环冷却水情况下的用盐量为 3.827 kg/kg、用电量为 7.568kW·h/kg，间歇运行（无冷却措施）情况下的用盐量和用电量分别为 4.110 kg/kg、7.991kW·h/kg。图 3（d）综合描述 3 种不同运行模式情况下的运行成本，连续运行且增设循环冷却水情况下运行成本最低（最低为 7.989 元/kg），与间歇运行（无冷却措施）情况下（最低为 8.198 元/kg）相比较可节省 2%-8%，均远低于连续运行（无冷却措施）模式。

由于在电解过程中有副反应发生，消耗了电极反应产品，使得有效氯实际产量低于理论产量，通常采用电流效率来反映电解过程中有效氯实际产量与理论产量之间的差异。按照式（6）计算电流效率（图 3（e））。通过图 3（e）可见，随着电解时间的增长，电流效率逐渐下降。增设循环冷却水或间歇运行可以较大程度的提高电流效率，减少电流消耗，同时减缓电流效率下降速率。当电解时间为 300min 时，增设循环冷却水和间歇运行情况下电流效率降至 45%和 44%，而连续运行（无冷却措施）情况下电流效率仅为 29%。此外，在试验过程中观测了溶液的温度（图 3（f）），可以清晰的看出电解过程中随着电解时间的增长，电解槽内溶液温度不断上升，在连续运行（无冷却措施）情况下，电解 300min，溶液温度升高到 40℃，正是由于温度的大幅升高，从而导致电解效果下降。

综上所述，降低电解过程中电解槽内温度是提高次氯酸钠发生器电解效率的重要措施。

此外，值得注意的是，在电解过程中电解时间的确定尤为重要。通过上述分析可知，随着电解时间的增长，有效氯浓度（有效氯产量）、用盐量、电流效率逐渐降低，但同时用电量、电解槽内温度逐渐升高。针对外接循环冷却水情况下，采用多项式对有效氯浓度与电解时间的关系曲线、运行成本与电解时间的关系曲线进行拟合（式（7）和式（8）），模拟计算次氯酸钠发生器有效氯产量为 50g、100g、150g、200g、250g、263g 情况下的电解时间、运行成本（表 1）。

$$y_1 = -0.055x^2 + 43.946x - 21.117 \quad (R^2 = 0.9998) \quad (7)$$

$$y_2 = 0.00000001x^4 - 0.000008x^3 + 0.0028x^2 - 0.4139x + 32.083 \quad (x < 150\text{min}, R^2 = 0.9999) \quad (8)$$

其中： y_1 为有效氯浓度（mg/L）， y_2 为运行成本（元/kg）， x 为电解时间（min）；

表 1 外接循环冷却水情况下次氯酸钠发生器的模拟计算结果

Fig.2 Simulation calculation results of sodium hypochlorite generator with cooling water

电解时间（min）	有效氯产量（g）	运行成本 ^① （元/kg）	电流效率 ^② （%）
40	50	19.521	90-95
85	100	12.741	81-85
140	150	10.907	60-65
210	200	8.583	50-55
270	235	7.989	45-50
310	250	8.066	40-45
400	263	8.876	35-40

注①：当电解时间超过 150min 后，按照相近电解时刻的电流效率计算用电量以及运行成本；②根据相近电解时刻的电流效率给出电流效率的范围值。

通过表 1 可知，理论情况下自组装电极在电解 400min 时，有效氯浓度达到最高，为 8757 mg/L，相应的有效氯产量为 263g，按照电解 300min 时的电流效率计算，运行成本为 8.876 元/kg。自组装电极在电解 270-310min 时，有效氯产量为 235-250g，运行成本最低，为 7.989-8.066 元/kg。在实际应用中，应根据实际产氯量、运行成本等综合考虑电解时间。

3 结语

结合组装研制的网格型电极开展试验, 试验结果表明盐水温度对电解效果有较大的影响, 当盐水温度在 35℃以上时, 需延长电解时间才能达到相同的有效氯产量。增设循环冷却水或者间歇式运行可提高有效氯产量 38%-42%、电流效率 37%-65%, 运行成本降低 5.217-10.185 元/kg。自组装电极连续运行且增设循环冷却水情况下电解 270-310min 时, 有效氯产量为 235-250g, 运行成本最低, 为 7.989-8.066 元/kg。有效氯产量最高可达 263g, 相应的理论运行成本为 8.876 元/kg。在实际应用中, 应根据实际产氯量、运行成本等综合考虑电解时间。

此外, 由于本次试验过程是在室温为 10℃-16℃情况下进行的, 试验结果有一定的局限性, 在实际应用前还需进一步开展现场试验, 综合考虑运行温度、冷却效果、设备自动化程度、运行维护等多方面的因素。

感谢: 感谢杨彭卫在试验过程中的帮助。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘珊, 王亚娥. 微、小型次氯酸钠发生器性能及设计参数研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(2): 113-115.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 刘珂. 次氯酸钠发生器的研究与应用[D]. 上海: 同济大学硕士学位论文, 2007 年 3 月, p12.
- [6] 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.
- [7] 何荣. 提高次氯酸钠生产率的探讨[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 1984, 2: 43-45.
- [8] 许友仁. 次氯酸钠电解发生器的电极降温问题[J]. 中国消毒学杂志, 1995, 12(2): 88.
- [9] 王新伟, 何瑛, 韩国臣, 等. 次氯酸钠消毒与 TCL-500 型次氯酸钠发生器的改进[J]. 热电技术, 2013 (2): 42-45.
- [10] GB12176-90《次氯酸钠发生器》. 中华人民共和国国家标准化管理委员会[S].