

工程实例

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 06. 016

# “气/液”二氧化碳调pH控铝系统设计与应用

凌卫卫<sup>1</sup>, 马顺君<sup>1,2</sup>, 唐玉霖<sup>2</sup>

(1. 上海南汇自来水有限公司, 上海 201300; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 针对饮用水厂原水藻类繁殖、pH升高的问题,在上海惠南水厂开展了“气/液”二氧化碳调pH控铝系统设计与工程应用,采用原水pH、流量前馈及沉淀进水pH和砂滤池出水铝反馈相结合的控制模式,优化设计在线pH、铝离子检测仪表选型及安装方式,实现了二氧化碳调pH在线精准控制。根据2022年1月—8月的运行结果,与采用聚合氯化铝混凝剂调pH控铝方式相比,二氧化碳预处理调pH控铝可实现精准运行,较2021年同期出厂水铝浓度降低31%,混凝剂用量减少35%,混凝剂与二氧化碳药剂成本减少19%,净水污泥产量减少27%,该成果可为二氧化碳预处理在市政供水行业推广应用提供技术支持。

**关键词:** 饮用水厂; 二氧化碳; 聚合氯化铝

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)06-0091-06

## Design and Application of the pH Adjustment and Aluminum Control System by Gas/Liquid Carbon Dioxide

LING Wei-wei<sup>1</sup>, MA Shun-jun<sup>1,2</sup>, TANG Yu-lin<sup>2</sup>

(1. Shanghai Nanhui Water Supply Co. Ltd., Shanghai 201300, China; 2. College of Environmental Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Aiming at the issue of pH increase in raw water caused by algal proliferation in waterworks, the design and engineering application of gas/liquid carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) injection system was carried out in Huinan waterworks of Shanghai. The control mode combining feedforward control of raw water pH and flow rate with the feedback control of precipitation influent pH and sand filter effluent aluminum concentration is adopted to optimize the selection and installation of online pH and aluminum ion detection instruments, enabling precise online control of pH adjustment by CO<sub>2</sub> injection. Based on the operational results from January to August 2022, the use of CO<sub>2</sub> pre-treatment for pH adjustment and aluminum control achieved precise operation compared to the conventional method of pH adjustment using PAC. The aluminum concentration in the treated water decreased by 31% compared with the same period in 2021, while the dosage of coagulants decreased by 35%. The cost of coagulants and CO<sub>2</sub> agents decreased by 19%, and the production of sludge from the water treatment process decreased by 27%. The results can provide technical support for the widespread application of CO<sub>2</sub> pre-treatment in the municipal water supply industry.

基金项目: 上海市自然科学基金资助面上项目(21ZR1467300)

**Key words:** waterworks; carbon dioxide; poly aluminum chloride

当前国内一些水厂原水藻类暴发、季节性pH升高导致出厂水铝超标,投加二氧化碳控制相比传统的投加聚合氯化铝混凝剂调节pH可提高混凝效果,既节省混凝剂用量,又可减少净水污泥产量,符合未来水厂“绿色、低碳”的发展趋势<sup>[1-5]</sup>。当前国内投加二氧化碳控铝主要分为“气/液”和“液/液”两种投加方式,以上海惠南水厂“气/液”二氧化碳投加系统为例,结合“气/液”二氧化碳投加系统的设计、pH

和铝离子在线仪表优化选型等关键控制点进行论述,确保pH控制精度达到 $\pm 0.1$ ,可为其他类似工程提供参考。

## 1 工程概况

惠南水厂设计制水规模为 $44 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,分为三期建设,一期制水规模为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、二期制水规模为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、三期制水规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该厂水源为青草沙水库水,工艺流程见图1。

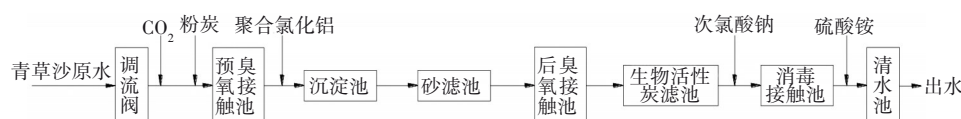


图1 惠南水厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of Huinan waterworks

## 2 “气/液”二氧化碳投加系统设计

惠南水厂“气/液”二氧化碳投加系统(见图2)采用高效喷嘴结合智能化气体调流控制,以精确调节控制沉淀池进水pH,从而优化混凝效果和降低出厂

水铝指标。二氧化碳气体设计投加浓度为 $5 \sim 14 \text{ mg/L}$ ,一期、二期制水单元采用2用1备的流量控制阀组( $75 \text{ kgCO}_2/\text{h}$ ),三期制水单元采用1用1备的流量控制阀组( $120 \text{ kgCO}_2/\text{h}$ )。

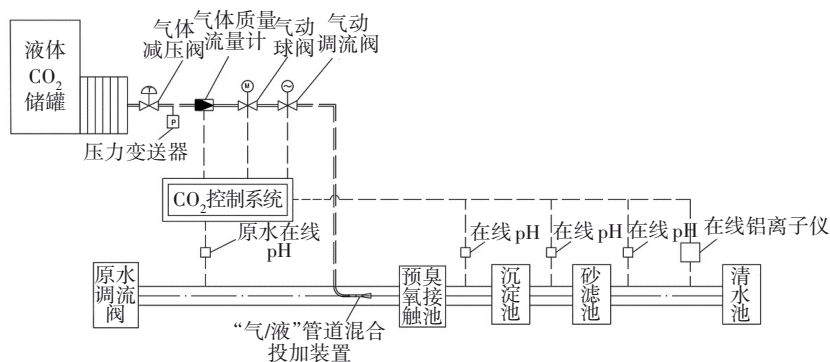


图2 “气/液”二氧化碳投加系统

Fig.2 “Gas/liquid” carbon dioxide dosing system

“气/液”二氧化碳投加系统由“气/液”管道混合投加装置、二氧化碳气体调流装置组成,储气罐和气体蒸发器由工业气体公司提供。相较“液/液”二氧化碳投加装置,“气/液”投加装置采用二氧化碳气体直接喷射进入原水,无需配置增压泵和管道混合器形成碳酸后投加,也无需考虑形成碳酸后对投加管道及混合器的腐蚀,具有简单、可靠、能耗低等优点。

### 2.1 “气/液”管道混合投加装置

“气/液”管道混合投加装置(见图3)可直接插入DN1 200及DN1 600原水管,该装置采用临界流文

丘里喷嘴,气源投加压力为 $0.7 \text{ MPa}$ ,喷嘴喷口能达到亚音速甚至超音速而使二氧化碳气体变成极微小的纳米气泡,提高二氧化碳利用率。

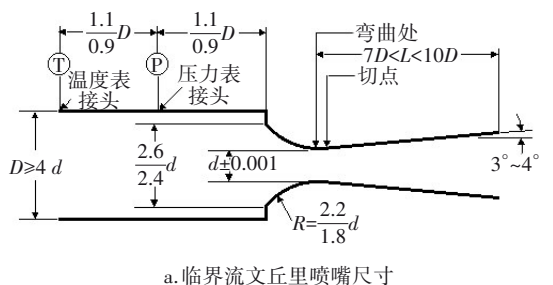


图3 “气/液”管道混合投加装置

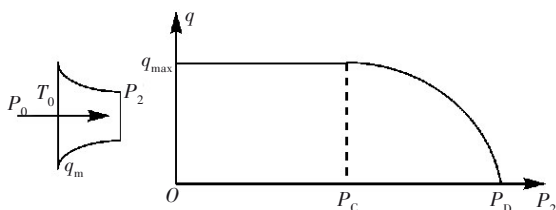
Fig.3 “Gas/liquid” pipeline mixing dosing device

临界流文丘里喷嘴常用于高压大流量气体流

量计量(见图4),当保持喷嘴上游端压力 $P_0$ 和温度 $T_0$ 不变,使其下游压力 $P_2$ 逐渐减小,则通过喷嘴的气体质量流量将逐渐增加。当下游压力 $P_2$ 下降到某一压力 $P_c$ 时,通过喷嘴的质量流量将达到最大值 $q_{\max}$ ,此时喷嘴出口的流速已达到当地音速,如果继续降低下游端压力 $P_2$ ,通过喷嘴的质量流量将不再增加,流速也保持在音速不变。原水管中压力为0.1 MPa,其喷嘴出口压力远小于 $P_c$ ,即使原水管压力有所变动,通过喷嘴的流量也将保持为临界流不变。因此该系统将临界流文丘里喷嘴、气体质量流量计和调流阀相结合,可精确控制投加二氧化碳的气体质量流量,同时在临界流文丘里喷嘴外侧安装文丘里扩散器,可将临界流文丘里喷嘴喷射的二氧化碳气体和原水形成二次卷吸,提高二氧化碳气体在水中的扩散溶解效果。



a. 临界流文丘里喷嘴尺寸



b. 临界流文丘里喷嘴流量特性

图4 临界流文丘里喷嘴示意

Fig.4 Critical flow Venturi nozzle

## 2.2 二氧化碳气体调流装置

该系统采用Samson气体调流阀及艾默生的Micromotion科里奥质量流量计,并采用二氧化碳投加流量PID控制,大幅提高对气体质量流量的控制精度。同时,调流阀及切断阀均采用气动执行机构,阀门气动执行机构利用原液体二氧化碳蒸发后的气体二氧化碳作为压力气源,其压力稳定在0.7 MPa,无需单独配置空压机。气体调流阀运行情况如图5所示。在进气压力为0.7 MPa情况下, Samson气体调流阀配合“气/液”管道混合投加装置,插入到DN1 600原水管中,可实现5%~85%开启度调节,单个调流阀投加二氧化碳气体的质量流量范围为10~

150 kg/h。

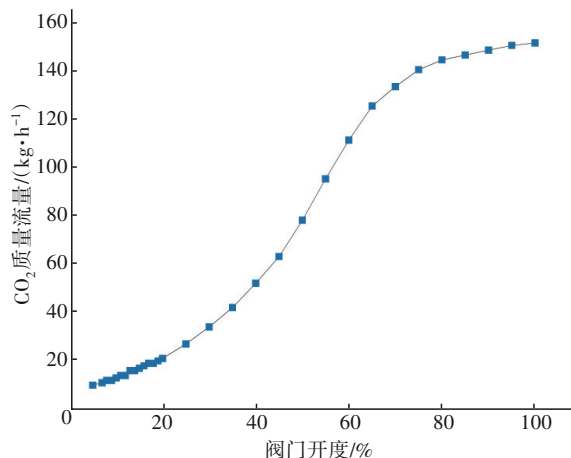


图5 气体调流阀运行情况

Fig.5 Operation of gas regulating valve

## 2.3 在线pH检测仪

该系统采用科隆在线pH检测仪。为避免管道内水体流速过快而对在线pH监测造成不利影响,更好地优化校准在线pH仪表,设计了在线pH仪表平衡箱,通过下进上出稳定水流,将检测探头置于溢水口附近,避免检测死水。同时设置排泥口,定期排除平衡箱中沉积的泥沙。每周完成pH在线检测仪探头清洗和标定工作,确保pH在线仪表实时数据的准确性。

## 2.4 在线铝离子检测仪

在线铝离子分析仪主要采用邻苯二酚紫分光光度法、铬天青S分光光度法。邻苯二酚紫分光光度法:当pH为(5.9±0.1)时,水样中铝与邻苯二酚紫反应生成蓝色配合物,在波长为580 nm处测量其吸光度。铬天青S分光光度法:在pH为6.7~7.0且存在聚乙二醇辛基苯醚(OP)和溴代十六烷基吡啶(CPB)的情况下,铝与铬天青S反应生成蓝绿色的四元胶束,在波长为620 nm处测量其吸光度。在线铝离子、pH分析仪对出厂水铝含量的有效监测至关重要,必须做到高灵敏度、高精度的同时便于操作和运维。邻苯二酚紫分光光度法较铬天青S分光光度法具有检出限低、单次校准及测样时间短等优点(见表1)。

对上述两种在线铝离子分析仪进行质控比对(见表2),邻苯二酚紫分光光度法较铬天青S分光光度法检测准确性高、偏差小,因此采用邻苯二酚紫分光光度法在线铝离子仪能进一步提高二氧化碳

调pH降铝指标投加系统的控制精度。

表1 在线铝离子检测仪参数

Tab.1 Parameters of online aluminum ion detector

项目	邻苯二酚紫分光光度法	铬天青S分光光度法
量程/(mg·L <sup>-1</sup> )	0~0.3	0~0.3
检出限/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.003	0.015
环境温度/℃	5~40	5~40
环境湿度/%	≤90,无凝结	≤90,无凝结
校准方式	两点校准	两点校准
校准值/(mg·L <sup>-1</sup> )	0,0.20	0.03,0.15
校准时长/s	1 110	10 200
单次测样时长/s	580	1 500

表2 在线铝离子数据比对情况

Tab.2 Comparison of online aluminum ion data

检测方法	样品浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	检测次数/次	平均值/(mg·L <sup>-1</sup> )	相对误差δ/%	标准偏差SD/(mg·L <sup>-1</sup> )	相对标准偏差RSD/%
邻苯二酚紫分光光度法	0.4	6	0.042	5	0.001 0	2.38
铬天青S分光光度法	0.4	6	0.046	15	0.001 3	2.83

## 2.5 二氧化碳气体投加控制方式

根据在线测定原水pH、原水 $Q_{\text{流量}}$ 、沉淀池进水pH控制设定目标、设定 $C_{\text{CO}_2}$ 浓度进行前馈控制,如下式所示:

$$M_{\text{CO}_2} = Q_{\text{原水}} \times (\text{pH}_{\text{原}} - \text{pH}_{\text{CO}_2}) \times C_{\text{CO}_2} \div 1000 \quad (1)$$

式中: $M_{\text{CO}_2}$ 为 $\text{CO}_2$ 投加量,kg/h; $Q_{\text{原水}}$ 为进水量, $\text{m}^3/\text{h}$ ; $\text{pH}_{\text{原}}$ 为原水pH; $\text{pH}_{\text{CO}_2}$ 为原水投加 $\text{CO}_2$ 后的pH目标控制值; $C_{\text{CO}_2}$ 为二氧化碳气体投加浓度,mg/L。

通过调节调流阀开度实时控制投加二氧化碳气体质量流量 $M_{\text{CO}_2}$ ;同时通过比较投加二氧化碳后沉淀池实时进水pH和沉淀池进水控制目标 $\text{pH}_{\text{CO}_2}$ 值,满足pH纠偏范围为 $\pm 0.1$ ,及时分时段(10 min)调整二氧化碳气体投加浓度 $C_{\text{CO}_2}$ ,调节幅度为0.1~0.2 mg/L,修正二氧化碳气体投加浓度,对调流阀开度进行PID控制,避免由于投加二氧化碳后在线pH后馈时间较长对投加控制系统的影响。根据砂滤池后的在线余铝仪监测数据优化调整沉淀池进水pH控制设定目标,确保出厂水余铝浓度稳定小于0.08 mg/L。

## 3 “气/液”二氧化碳投加系统运行效果

### 3.1 pH调节控制情况

惠南水厂二氧化碳系统实际运行情况如图6所示。

2022年8月12日—17日A系统原水水温为30~31℃、流量为2 280~4 121  $\text{m}^3/\text{h}$ 、原水pH为7.68~8.53,“气/液”投加二氧化碳后的pH目标控制值为7.2,沉淀池进水pH稳定控制在7.1~7.3、二氧化碳气体控制流量为24~66 kg/h、二氧化碳气体投加浓度为8~16 mg/L。

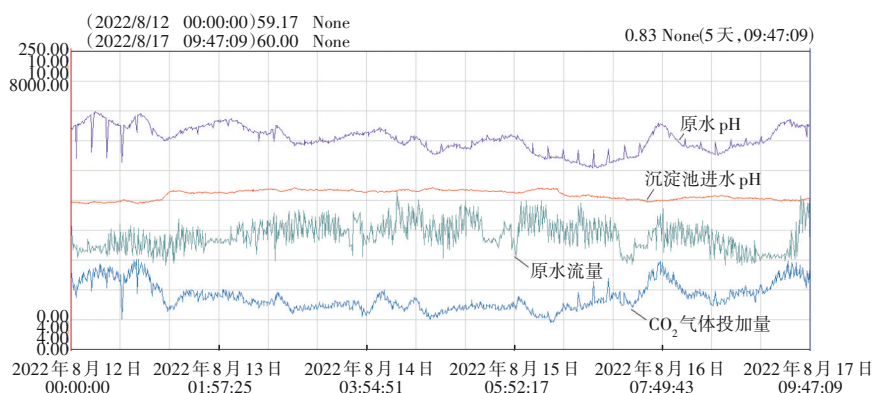


图6 惠南水厂二氧化碳系统运行情况(实时数据)

Fig.6 Operation of  $\text{CO}_2$  system of the Huinan waterworks(real-time monitoring)

### 3.2 在线仪表运行情况

2022年7月1日—4日、7月19日—26日、8月3日—13日,使用邻苯二酚紫分光光度法在线铝离子分析仪对深度处理出厂水进行实时监测,结果见图

7。实验室每天采样1次,采用ICP-MS进行总铝检测后比对,发现两组数据的拟合度较高,因此可根据在线铝数值对沉淀池进水pH控制值进行调整,确保出厂水铝浓度稳定达标。



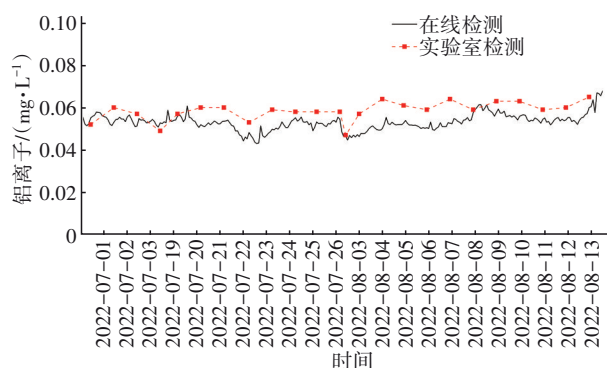


图7 在线铝离子仪表监测与实验室检测的对比

Fig.7 Comparison between on-line aluminum ion meter monitoring and lab monitoring

### 3.3 出厂水铝含量控制情况

“气/液”二氧化碳投加装置运行情况见图8。

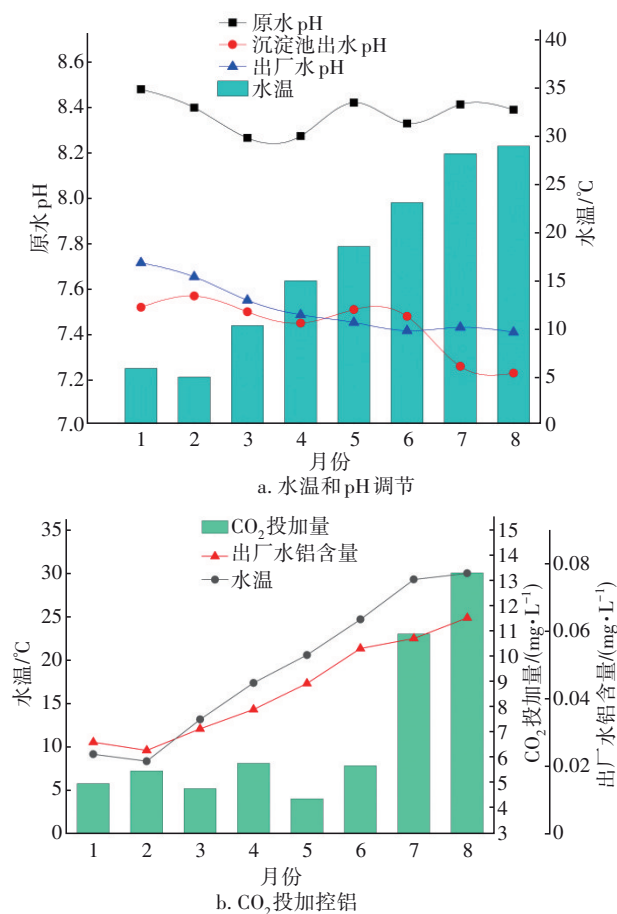


图8 “气/液”二氧化碳投加装置运行情况

Fig.8 Operation of the “gas/liquid” CO<sub>2</sub> dosing device

2022年1月—8月原水pH为8.27~8.48、水温为8.4~30℃,通过投加二氧化碳调节沉淀池进水pH为7.23~7.57、二氧化碳气体投加浓度为4.4~13.3 mg/L;出厂水铝为0.025~0.064 mg/L、出厂水

pH为7.41~7.72,同期8月水温上升至30℃,提高了对Al(OH)<sub>3</sub>的溶解度。通过“气/液”二氧化碳投加系统调pH使出厂水铝稳定小于0.08 mg/L。2022年9月—12月,惠南水厂受咸潮影响,采用就地取水和青草沙原水混合取水方式,原水pH降至7.6~7.8,停用二氧化碳投加系统,故对该时间段数据不进行比较。

药剂使用及净水污泥产量如图9所示。

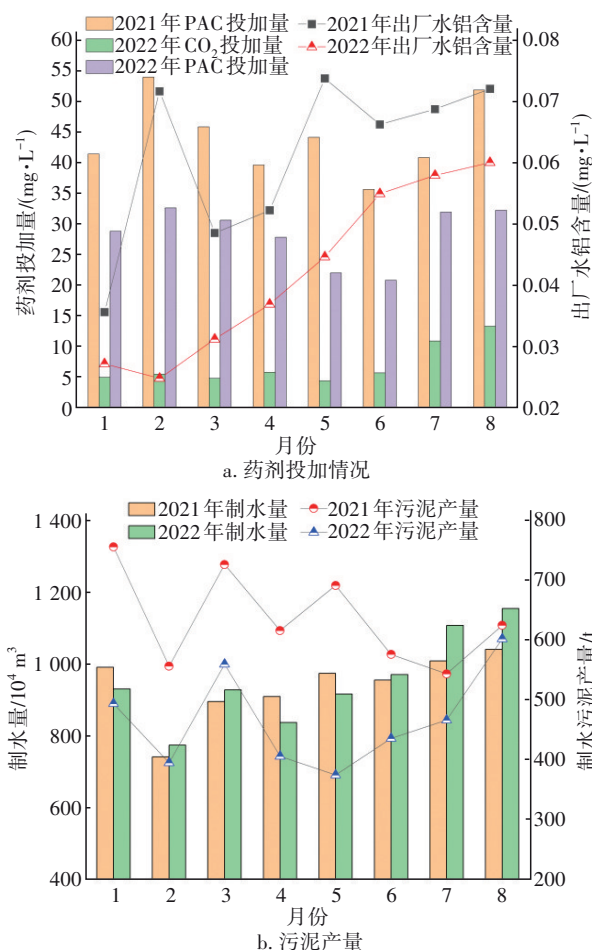


图9 药剂使用及污泥产量

Fig.9 Chemicals addition and sludge production

通过与2021年同期采用聚合氯化铝调pH控铝进行比较,2021年1月—8月累计制水量为7572×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>、进水浊度平均为6.43 NTU、水温平均为18.4℃、出厂水铝平均为0.061 mg/L、混凝剂平均投加量为44 mg/L、净水污泥累计处置量为5090 t;2022年1月—8月累计制水量为7621×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>、进水浊度平均为6.12 NTU、水温平均为19.1℃、出厂水铝平均为0.042 mg/L、混凝剂平均投加量为28.4 mg/L、二氧化碳气体平均投加量为7.3 mg/L、净水污

泥累计处置量为3 735 t。

2022年1月—8月较2021年同期制水量接近情况下,出厂水铝浓度降低31%,混凝剂用量减少了35%,投加混凝剂和二氧化碳药剂成本减少了19%,净水污泥处置量减少27%。

#### 4 工程效益分析

惠南水厂“气/液”二氧化碳投加系统工程总投资为430万元。由于气体调流阀及截止阀采用二氧化碳气源,不需要增压泵,二氧化碳气体投加采用液体二氧化碳蒸发后形成的压力,因此运行成本只有PLC柜控制电源,运行费用可忽略不计。预估每年药剂费减少110万元(按液体PAC单价为1 100元/t、液体二氧化碳单价为1 100元/t计算),净水污泥处置费减少119万元(按污泥处置费为560元/t计算)。

#### 5 结论

① “气/液”二氧化碳调pH系统通过采用临界流文丘里喷嘴及文丘里扩散喷射结构提高了二氧化碳气体在水中的溶解度,改善了二氧化碳的强化预处理效能。

② “气/液”二氧化碳调pH控制系统与在线pH、铝离子等仪表联合应用实现了二氧化碳调pH的精准控制,提高了控制精度。

③ 2022年1月—8月,惠南水厂通过全制水系统启用二氧化碳调pH控铝,药剂成本减少了19%,净水污泥处置量减少了27%,预估每年药剂及净水污泥处置费减少229万元。

#### 参考文献:

- [1] 陈德放,李梅,张华军,等. 投加二氧化碳控制出厂水铝含量的生产性试验[J]. 中国给水排水, 2021, 37(23): 9-14.
- CHEN Defang, LI Mei, ZHANG Huajun, *et al.* Controlling aluminum content in finished water of

waterworks by dosing carbon dioxide[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(23): 9-14(in Chinese).

- [2] 黄孟斌,吕华,王梅芳,等. CO<sub>2</sub>应用于中小型水厂原水pH值调控生产性试验[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 62-64, 125.
- HUANG Mengbin, LÜ Hua, WANG Meifang, *et al.* Productive experiment on application of CO<sub>2</sub> in pH value regulation for raw water in small and medium-sized WTP[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 62-64, 125(in Chinese).
- [3] 王一桐,刘俊良,张铁坚. 南水北调中线高碱水成因及其应急处置技术研究[J]. 给水排水, 2021, 47(4): 14-20.
- WANG Yitong, LIU Junliang, ZHANG Tiejian. Study on the causes of high alkali water in the middle route of south-to-north water diversion project and its emergency treatment technology [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(4): 14-20(in Chinese).
- [4] 吴雪飞. 二氧化碳投加在水厂处理高pH原水上的应用及效果[J]. 净水技术, 2022, 41(S1): 40-44, 249.
- WU Xuefei. Application and effect of carbon dioxide dosing on high pH value of raw water in WTP[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(S1): 40-44, 249(in Chinese).
- [5] DENNETT K E, DIXON R T. Using carbon dioxide to cope with fluctuations in raw water pH and maintain effective conventional treatment [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology, 2003, 52(5): 369-381.

作者简介:凌卫卫(1969—),男,上海人,大学本科,工程师,主要从事给排水处理工艺研发应用及水务管理工作。

E-mail: david\_msj@163.com

收稿日期: 2023-04-12

修回日期: 2023-06-14

(编辑:衣春敏)