

郁振标, 侯晓帮, 吕淼, 等. 除硬度为目标的工业水厂工艺流程及药剂投加[J]. 净水技术, 2023, 42(10):124-130.

YU Z B, HOU X B, LÜ M, et al. Process flow and chemical dosing under the target of hardness removal in industrial water treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10):124-130.

## 除硬度为目标的工业水厂工艺流程及药剂投加

郁振标<sup>1</sup>, 侯晓帮<sup>2,3,\*</sup>, 吕淼<sup>2,3</sup>, 邬亦俊<sup>2,3</sup>, 陆旭<sup>2,3</sup>, 任军<sup>1,4</sup>, 丁炜<sup>1</sup>, 杨燕霞<sup>1,4</sup>

(1. 南通水务集团有限公司, 江苏南通 226007; 2. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 3. 上海水业设计工程有限公司, 上海 200092; 4. 南通市江海水务有限公司, 江苏南通 226007)

**摘要** 江苏省南通市某纺织工业园区距离南通市区较远, 园区用水由南通市长江水源水厂转供, 输水距离长、费用高, 需园区就地自建工业水厂。就地原水硬度高达 340 mg/L, 工业用水硬度要求控制到 150 mg/L 以下。该工程工业水厂采用机械混合折板絮凝平流沉淀池+V 型滤池的常规处理工艺, 同时投加石灰、碳酸钠、二氧化碳等药剂去除硬度; 在原水条件下, 通过小试试验及生产调试, 当石灰投加量在 180 mg/L、碳酸钠投加量在 80 mg/L、聚合氯化铝投加量在 40 mg/L、二氧化碳投加量在 28~51 mg/L 时, 出水硬度可控制在 120 mg/L 左右。该工程的实施不仅大大节省优质长江水源资源, 用水成本也从 4.27 元/m<sup>3</sup> 降低到 2.23 元/m<sup>3</sup>, 经济社会效益明显。

**关键词** 工业水厂 除硬度 常规处理 石灰 碳酸钠 二氧化碳

中图分类号: TQ09 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)10-0124-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.10.016

## Process Flow and Chemical Dosing under the Target of Hardness Removal in Industrial Water Treatment Plant

YU Zhenbiao<sup>1</sup>, HOU Xiaobang<sup>2,3,\*</sup>, LÜ Miao<sup>2,3</sup>, WU Yijun<sup>2,3</sup>, LU Xu<sup>2,3</sup>, REN Jun<sup>1,4</sup>, DING Wei<sup>1</sup>, YANG Yanxia<sup>1,4</sup>

(1. Nantong Water Group Co., Ltd., Nantong 226007, China;

2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

3. Shanghai Water Design & Engineering Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

4. Nantong Jianghai Water Service Co., Ltd., Nantong 226007, China)

**Abstract** A textile industrial park in Nantong, Jiangsu Province is far from the city area. Water usage in the park is transferred from the Yangze River source water plant in Nantong, which is a long distance and has a high cost. Therefore, the park needs to build its own industrial water plant on-site. The original of the water on-site is as high as 340 mg/L, but the industrial water hardness needs to be controlled below 150 mg/L. The conventional treatment process of the industrial water treatment plant included mechanical mixing, plate and tube coagulation, and flow sedimentation tank + V filter. In addition, lime, sodium carbonate, and carbon dioxide were added to remove hardness. Under the original water conditions, through small-scale trials and production debugging, when the lime dosage was 180 mg/L, the sodium carbonate dosage was 80 mg/L, the polyaluminum chloride (PAC) dosage was 40 mg/L, and the carbon dioxide dosage was 28~51 mg/L, the water hardness could be controlled at around 120 mg/L. The implementation of this project not only greatly saved high-quality Yangtze River water resources, but also reduced the water cost from 4.27 yuan/m<sup>3</sup> to 2.23 yuan/m<sup>3</sup>, which has significant economic and social benefits.

**Keywords** industrial water treatment plant(WTP) hardness removal conventional treatment lime sodium carbonate carbon dioxide

[收稿日期] 2023-04-19

[作者简介] 郁振标(1969—),男,高级工程师,主要从事自来水厂建设与运营管理工作,E-mail:425668736@qq.com。

[通信作者] 侯晓帮(1985—),男,硕士,高级工程师,注册给排水工程师,注册咨询工程师,主要从事给排水工程咨询与设计工作,E-mail:1123524462@qq.com。

江苏省南通市某纺织工业园区距离南通市区较远,园区用水由南通市长江水源水厂经过长距离输送、转供,到户生活用水水价为 3.05 元/m<sup>3</sup>,工业用水为 4.27 元/m<sup>3</sup>,用水成本高。随着工业园的建设发展,企业入驻增加,对生产用水提出了硬度等指标

较生活饮用水更为严格的要求。为降低企业用水费用,节约优质自来水资源,决定在园区分质供水,就近取水自建一套工业水系统,出水水质参考《印染工厂设计规范》(GB 50426—2016)要求,且硬度控制到 150 mg/L(以 CaCO<sub>3</sub> 计,下同)以下<sup>[1]</sup>。由于原水就近取自河网水系的排海段,距离入海控制闸仅 2 km,河道流动性差,又有海水渗透侵入,水质较差,离子含量高且变化幅度大,硬度高达 340 mg/L。原水硬度高且不稳定,而水厂出水硬度需控制在较低水平,处理难度高,可借鉴案例少。工业水厂总规模为 12 万 m<sup>3</sup>/d,一期规模为 3 万 m<sup>3</sup>/d,采用机械混合折板絮凝平流沉淀池+V 型滤池的处理工艺,采用石灰、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 及 CO<sub>2</sub> 等药剂多点位组合投加的方法,使得出水硬度基本控制在 120 mg/L 左右,确保达到小于 150 mg/L 的目标要求。项目单位处理成本为 2.23 元/m<sup>3</sup>,单位处理经营成本为 1.47 元/m<sup>3</sup>;其中硬度去除措施的单位处理经营成本为 0.45 元/m<sup>3</sup>,相比从南通市区转供的长江水源水工业用水单价(4.27 元/m<sup>3</sup>),该项目经济性强、效益明显,获得用水企业认可,后续还将继续扩建。

## 1 工业水厂处理工艺

### 1.1 设计水质

通过调研并结合出水标准,该工程设计进水、出水水质情况如表 1 所示。

表 1 该工程设计进水、出水水质  
Tab. 1 Designed Water Quality of Inflow and Outflow in the Project

水质指标	设计进水水质	设计出水水质
浑浊度/NTU	<50	<3
色度/度	<20	<15
pH 值	6.5~8.5	6.5~8.5
铁/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.16	≤0.1
锰/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.01	≤0.1
悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )	<15	<10
硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	260~340	<150
高锰酸盐指数/(mg·L <sup>-1</sup> )	7.9	/
生化需氧量/(mg·L <sup>-1</sup> )	18.7	/

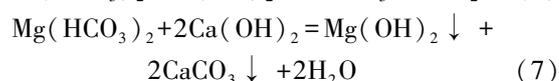
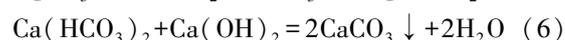
### 1.2 除硬度工艺原理

一般来说,水的硬度是暂时硬度和永久硬度的总和。水的暂时硬度是由含有酸式碳酸盐[如 Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 或 Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]引起的。水的永久硬

度则是由钙和镁的硫酸盐或氯化物引起的。

水中硬度可以通过煮沸法、化学法、离子交换法、膜法等方法<sup>[2-3]</sup>去除。其中,煮沸法仅用于去除水的暂时硬度,难以去除永久硬度。若水的硬度是永久硬度,往往使用其他几种处理方法。然而离子交换法、膜法所需设备复杂,投资及运行成本较高<sup>[4]</sup>,考虑到设备投资及运行成本,在化学法、离子交换法、膜法中,该工程推荐采用化学法<sup>[5]</sup>。

研究<sup>[6]</sup>表明,石灰软化法用于处理暂时硬度高、永久硬度低、碱度高的水。对硬度高、碱度低,即永久硬度高的水,可采用石灰-纯碱软化法,即加石灰的同时再投加适量的纯碱(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>,又称苏打),会发生如式(1)~式(7)的反应。



从以上化学方程式可看出,水中的硬度可以先随着投加的石灰及 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 转变为难溶于水的 CaCO<sub>3</sub>、MgCO<sub>3</sub>、Mg(OH)<sub>2</sub> 等沉淀物,后经水厂处理工艺中的沉淀池及砂滤池的沉淀、过滤截留可得到有效去除<sup>[7]</sup>。

### 1.3 除硬度工艺及对策

针对硬度、浑浊度、色度等主要处理对象,工业水厂处理工艺及加药情况如图 1 所示。

工艺及药剂投加的基本思路:石灰和 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 投加在沉淀池之前,水中的硬度转变成难溶于水的沉淀物,且大部分在沉淀池中沉淀去除,后经砂滤池把关确保出水达标;之后通过投加 CO<sub>2</sub> 回调 pH。该工艺可保证出水硬度达标,同时将出厂水其他指标控制在标准内。设计中石灰、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 都设置了 2~3 个投加点,以便于多点位投加、不同投加量组合,并通过试验调试确定最佳投药组合。工艺主要特点及参数如下。

(1)工业水厂设置砂滤池的考虑。出水水质中浑浊度仅要求 3 NTU,平流沉淀池完全能够达到该目标,但矾耗较高。考虑到原水主要去除硬度、浑浊

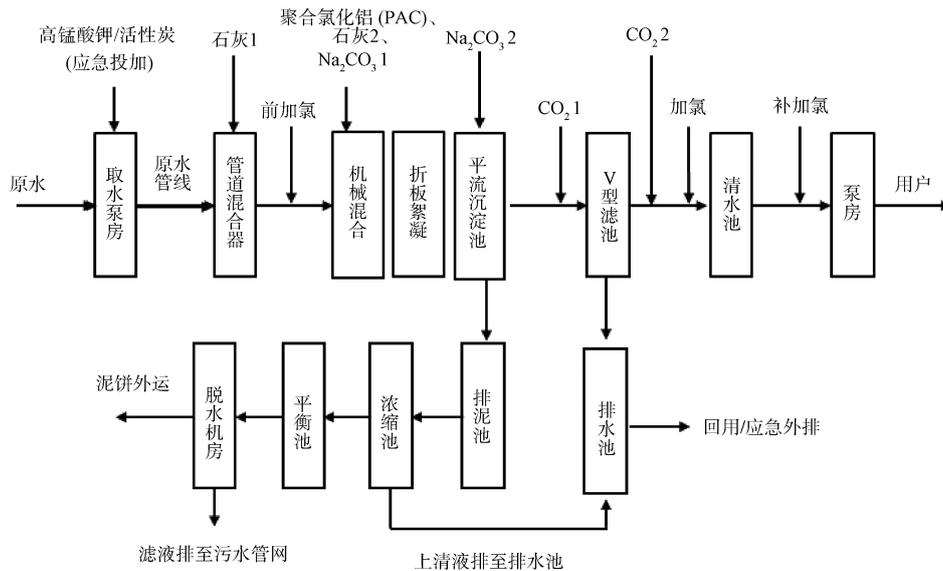


图 1 处理工艺流程

Fig. 1 Flow of Treatment Process

度、色度、铁等指标,有砂滤池把关效果会更好,控制管理难度会降低,投药量也会减少。因此,在沉淀池之后增加了砂滤工艺。由于沉淀过滤共同作用,将沉淀时间减少到 90 min,滤池滤速提高到 9.58 m/h。

(2)多药多点灵活应对的考虑。采用的除硬度药剂主要有石灰、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{CO}_2$ ,工程采用多药剂、多投加点设置。石灰投加预留了管道混合器和混合池两个投加地点; $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加预留了混合池和沉淀池末端两个投加地点; $\text{CO}_2$  投加预留了滤池前和滤池后两个投加地点。可灵活应对各种情况,保证硬度达标。

(3)自动加药,确保效果。除硬度加药量和加药点是关键,为保证精确计量精确投加,采用自动加药模式。设计石灰最大投加能力为 250 mg/L,投加质量分数为 7.0%;设计  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  最大投加量为 250 mg/L,投加质量分数为 15%。投加的石灰和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  均为碱性,出厂水 pH 偏高,投加  $\text{CO}_2$  进行

pH 调节,控制出厂水 pH。设计  $\text{CO}_2$  最大投加量为 80 mg/L。

#### 1.4 小试数据

本工程使用的药剂有石灰、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{CO}_2$ 、PAC(混凝剂)及次氯酸钠(消毒剂)。为达到最好的处理及投加效果,通过小试确定最佳药剂投加方案。

小试的检测指标采用《生活饮用水标准检验方法》系列推荐方法,其中硬度采用乙二胺四乙酸二钠滴定法,pH 采用玻璃电极法,浑浊度采用散射法。

每种工况进行 4 组试验,最终出水硬度取 3 组结果平均值,取其标准差并绘制结果曲线。

##### 1.4.1 最佳石灰投加量试验

在固定  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、PAC 投加量的情况下,研究不同石灰加药量下,水质数据变化情况,得出最佳石灰加药量,详细情况如表 2 及图 2 所示。

表 2 石灰投加量对出水硬度的影响

Tab. 2 Effect of Lime Dosage on Hardness Removal of Outflow

序号	原水硬度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	原水 pH 值	原水浑 浊度/NTU	PAC 投加量/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	石灰投加量/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 投加 量/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	出水平均硬 度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	出水 pH 值	出水浑 浊度/NTU
1	188	8.06	15.8	40	120	160	88.4	10.00	2.91
2					140		72.5	10.19	3.37
3					160		60.3	10.36	3.49
4					180		54.7	10.38	2.45
5					200		46.5	10.53	2.95
6					220		41.4	10.76	2.1

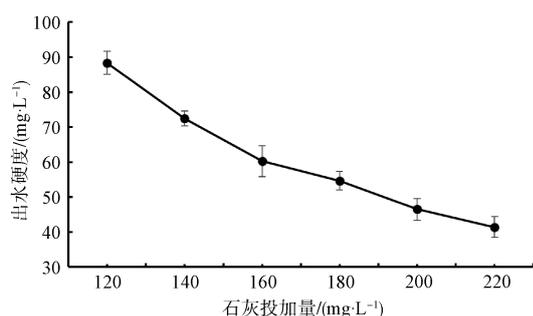


图2 石灰投加量对出水硬度的影响

Fig. 2 Effect of Lime Dosage on Hardness Removal of Outflow

从试验结果可见:石灰投加直接影响出水硬度,随着石灰投加量的增加,出水硬度不断降低。但出

水 pH 会随着石灰投加量增多而上升,导致后续为回调 pH 时 CO<sub>2</sub> 使用量变大,引起成本上升。因此,石灰投加量在出水硬度可控的情况下,不宜太高。石灰投加量超过 200 mg/L 后,增加石灰投加量对降低出水硬度的效果降低。建议根据进水硬度情况,结合出水硬度要求,控制石灰投加量在不大于 200 mg/L 的较小范围。考虑到去除曲线的斜率变化情况,建议后续试验中石灰投加量控制在 180 mg/L。

#### 1.4.2 最佳 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 投加量试验

在固定石灰、PAC 投加量的情况下,研究不同 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 加药量下,水质数据变化情况,得出最佳 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 加药量,详细情况如表 3 及图 3 所示。

表 3 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 投加量对出水硬度的影响

Tab. 3 Effect of Sodium Carbonate Dosage on Hardness Removal of Outflow

序号	原水硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	原水 pH 值	原水浑浊度/NTU	PAC 投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	石灰投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水平均硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水 pH 值	出水浑浊度/NTU
1	188	8.06	15.8	40	180	80	44.5	10.53	1.69
2						100	56.4	10.23	3.26
3						120	60.1	10.18	3.28
4						140	51.7	10.19	3.72
5						160	46.8	10.29	3.40
6						180	37.6	10.54	3.02

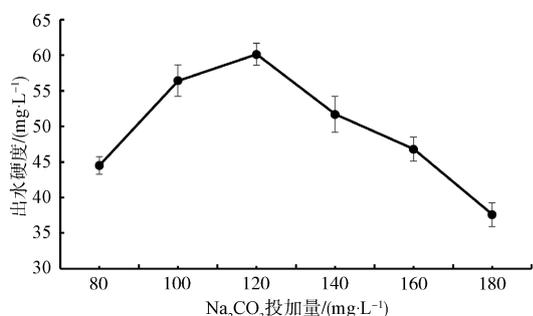


图3 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 投加量对出水硬度的影响

Fig. 3 Effect of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Dosage on Hardness Removal of Outflow

从试验结果可见:随着 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 投加量的增加,出水硬度呈现先升高后降低的趋势;Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 投加量大于 120 mg/L 后,出水硬度开始下降,后期出水硬度低于拐点前出水硬度。但随着 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 投加量增加,会引起出水 pH 增加,CO<sub>2</sub> 使用量变大。建议 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 投加量为(80±20)mg/L。

#### 1.4.3 最佳 PAC 投加量试验

在固定石灰、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 投加量的情况下,研究不同 PAC 加药量下,水质数据变化情况,得出最佳 PAC 加药量,详细情况如表 4 及图 4 所示。

表 4 PAC 投加量对出水硬度的影响

Tab. 4 Effect of PAC Dosage on Hardness Removal of Outflow

序号	原水硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	原水 pH 值	原水浑浊度/NTU	PAC 投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	石灰投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水平均硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水 pH 值	出水浑浊度/NTU
1	188	8.06	15.8	10	180	80	81.4	10.65	10.10
2				20			60.4	10.70	3.87
3				30			58.8	10.57	3.28
4				40			50.2	10.51	4.54
5				50			55.1	10.35	2.44
6				60			57.6	10.28	6.87

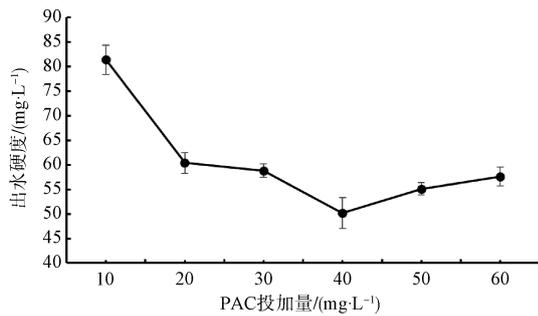


图4 PAC投加量对出水硬度的影响

Fig. 4 Effect of PAC Dosage on Hardness Removal of Outflow

表5 不同药剂组合对出水硬度的影响

Tab. 5 Effect of Different Drug Combinations on Hardness Removal of Outflow

投加方案	原水硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	原水pH值	原水浑浊度/NTU	PAC投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	石灰投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水pH值	出水浑浊度/NTU
(1)	188	8.06	15.8	40	0	0	187	7.74	1.04
(2)				0	180	0	126	10.90	181.00
(3)				0	0	80	143	9.70	38.70
(4)				40	180	0	90	10.47	2.48
(5)				40	0	80	141	9.50	11.20
(6)				0	180	80	86	10.94	3.20
(7)				40	180	80	47	10.92	3.40

共试验了7种组合方案,结果表明:方案(7)中3种试剂均投加的情况下效果最好,出水硬度最低,达到47 mg/L;方案(1)石灰和Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>均不投加时,出水硬度最高,基本没有去除能力;方案(2)、方案(3)及方案(6)的试验结果显示,混凝剂是否投加及

从试验结果可见:随着混凝剂PAC浓度增加,出水硬度呈现下降趋势,该现象说明混凝沉淀效果影响出水硬度。结合出水浊度及硬度分析,建议PAC投加量为(40±10)mg/L。

#### 1.4.4 最佳投加组合方案试验

在固定石灰、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、PAC这3种研究投加量的情况下,研究不同药剂组合情况下,水质数据变化情况,得出最佳组合投药方案,详细情况如表5所示。

混凝效果优劣对出水硬度影响较大。

#### 1.4.5 最佳投加点位试验

对石灰、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>和CO<sub>2</sub>在不同投加点的效果进行了对比试验(A与B对比,A与C对比,A与D对比),详细情况如表6及图5所示。

表6 不同投加点位对出水硬度的影响

Tab. 6 Effect of Different Injection Points on Hardness Removal of Outflow

投加点位	进水硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	石灰投加管道混合器/(mg·L <sup>-1</sup> )	石灰投加混合池/(mg·L <sup>-1</sup> )	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 投加混合池/(mg·L <sup>-1</sup> )	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 投加沉淀池末端/(mg·L <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 投加滤池进水管/(mg·L <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 投加滤池出水管/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )
A	278	180	/	100	/	40	/	131.25
B	278	/	180	100	/	40	/	137.75
C	278	180	/	/	100	40	/	138.25
D	278	180	/	100	/	/	40	129.25

根据试验结果,从出水硬度的角度得出如下结论。

(1)石灰投加在管道混合器的效果优于投加到混合池效果。主要原因是增加了反应时间,同时石灰和Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>分开投加。

(2)Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>投加在混合池的效果优于投加到沉淀池末端。主要原因是增加了反应时间,同时充分发挥了沉淀池的沉淀分离作用。

(3)CO<sub>2</sub>投加在滤池出水管相比投加到进水管效果有较为明显的提升。主要原因是:前期投加石灰和Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>后,硬度形成的沉淀物随絮凝沉淀在沉淀池大量去除,同时难沉淀部分会在滤池中去除。然而CO<sub>2</sub>投加在滤池前会降低水的pH,将已经产生的CaCO<sub>3</sub>、MgCO<sub>3</sub>等沉淀物再次溶解在水中,降低滤池的除硬度效率,增加出水硬度。主要发生的反应如式(8)~式(9)。

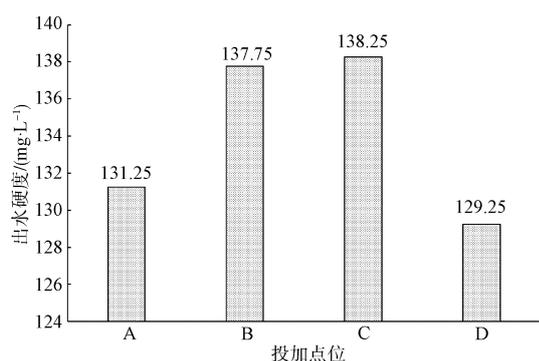
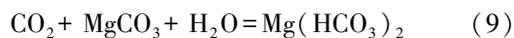
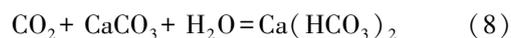


图5 不同投加点位对出水硬度的影响

Fig. 5 Impact of Different Injection Points on Hardness Removal of Outflow



## 2 工程运行效果及成本分析

### 2.1 运行效果

本工程于2022年11月建成通水,经过调试后可稳定运行,出水水质达标,进出水及药剂投加情况具体如表7所示。

自2023年以来,进水硬度为240~300 mg/L,出水硬度维持在100~138 mg/L,出水比较稳定,同时其他指标均能满足《印染工厂设计规范》(GB 50426—2016)要求。

表7 稳定运行期进、出水水质及药剂投加

Tab. 7 Inflow and Outflow Water Quality and Chemical Dosage during Stable Operation

日期	进水硬度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	出水硬度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	管道混合器 石灰投加量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	混合池 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 投加量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	混合池 PAC 投加量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	混合池前部前 加氯投加量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	清水池进水管后 加氯投加量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	滤后出水总管 CO <sub>2</sub> 投加量/ (mg·L <sup>-1</sup> )
2023-01-01	295	124	220	120	40	6	6	28
2023-01-02	290	122	220	120	40	6	6	28
2023-01-03	292	122	220	120	40	6	6	28
2023-01-04	298	124	220	120	40	6	6	28
2023-01-05	295	135	200	100	40	6	6	32
2023-01-06	300	138	200	100	40	6	6	32
2023-02-01	282	137	200	100	40	6	6	32
2023-02-02	284	132	200	100	40	6	6	32
2023-02-03	278	134	200	100	40	6	6	32
2023-02-04	280	130	200	100	40	6	6	32
2023-02-05	276	132	200	100	40	6	6	32
2023-02-06	280	126	180	80	40	6	6	32
2023-02-07	268	126	180	80	40	6	6	32
2023-02-08	272	138	180	80	40	6	6	32
2023-02-09	276	134	180	80	40	6	6	32
2023-02-10	258	130	180	80	40	6	6	32
2023-02-13	256	120	180	80	40	6	6	32
2023-02-14	240	102	180	80	40	4	4	32
2023-02-15	256	100	180	80	40	4	4	32
2023-02-16	260	116	180	80	40	4	4	32
2023-02-17	255	106	180	80	40	4	4	32
2023-02-18	258	104	180	80	40	4	4	32
2023-02-19	254	106	180	80	40	4	4	32
2023-02-20	260	112	180	80	40	4	4	32
2023-02-21	256	116	180	80	40	4	4	32
2023-02-22	254	116	180	80	40	4	4	51
2023-02-23	264	120	180	80	40	4	4	51
2023-02-24	261	117	180	80	40	4	4	51
2023-02-25	257	116	180	80	40	4	4	51
2023-02-26	271	117	180	80	40	4	4	51
2023-02-27	265	121	180	80	40	4	4	51
2023-02-28	260	119	180	80	40	4	4	51

运行前期,石灰及  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  加药量稍有保守,后期随着运行经验的增加,石灰投加量稳定在 180 mg/L,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量稳定在 80 mg/L, PAC 投加量稳定在 40 mg/L, 各种药剂投加量与试验成果基本一致。

$\text{CO}_2$  投加在滤后出水总管,根据原水 pH 情况,投加量在 28~51 mg/L。

## 2.2 成本分析

本工程总规模为 12.0 万  $\text{m}^3/\text{d}$ , 一期建设规模为 3.0 万  $\text{m}^3/\text{d}$ 。一期工程总投资为 17 759.24 万元,其中工程费用为 11 487.14 万元;单位处理成本为 2.23 元/ $\text{m}^3$ ,单位处理经营成本为 1.47 元/ $\text{m}^3$ 。与硬度去除密切相关的药剂中,石灰单价为 990 元/t,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  单价为 2 750 元/t,  $\text{CO}_2$  单价按 845 元/t,  $\text{CO}_2$  储罐租赁费按 6.2 万元/年,药剂投加的单位成本为 0.45 元/ $\text{m}^3$ 。

## 3 小结

(1)根据试验及实际运行情况,“多点前石灰投加+同步  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加+后  $\text{CO}_2$  投加”工艺对硬度的去除具有显著的效果。为保证出水硬度达标,石灰、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  及 PAC 均需投加。石灰最佳投加点位是管道混合器; $\text{Na}_2\text{CO}_3$  最佳投加点位是混合池; $\text{CO}_2$  最佳投加点位是滤池出水管。

(2)石灰投加直接影响出水硬度,但 pH 会随着石灰投加量增多而上升,导致后续  $\text{CO}_2$  使用量变大,引起成本上升。建议根据进水硬度情况,结合出水硬度要求,控制石灰投加量在不大于 200 mg/L 的较小范围。随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量的增加,出水硬度先是升高; $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量大于 120 mg/L 后,硬度呈现下降趋势,后期出水硬度低于拐点前出水硬度。但随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量增加,会引起出水 pH 增加,  $\text{CO}_2$  使用量变大;建议  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量为  $(80 \pm 20)$  mg/L。随着混凝剂 PAC 投加量增加,出水硬度呈现下降趋势,该现象说明混凝沉淀效果影响出水硬度。结合出水浑浊度及硬度分析,建议 PAC 投加量为  $(40 \pm 10)$  mg/L。

(3)在进水硬度为 240~300 mg/L 时,投加石灰、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和 PAC 的质量浓度分别为 180、80 mg/L 和 40 mg/L,可有效且经济地完成对硬度的去除。 $\text{CO}_2$  的投加量为 51 mg/L,可将出水的 pH 值控制在 7.5~8.5。

(4)本工程一期规模为 3.0 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,项目单位处理成本为 2.23 元/ $\text{m}^3$ ,单位处理经营成本为 1.47 元/ $\text{m}^3$ ,药剂投加的单位成本为 0.45 元/ $\text{m}^3$ ,经济社会效益明显。

(5)建议后续进一步研究上述投药对水厂污泥产量及性质的影响,并深入对比各种除硬度方案的系统成本。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中国纺织工业联合会. 印染工厂设计规范: GB 50426—2016[S]. 北京:中国计划出版社,2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, China National Textile and Apparel Council. Code for design of dyeing and printing plant: GB 50426—2016[S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [2] 陈涛. 用石灰软化-絮凝法处理地下水水源硬度试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.  
CHEN T. Study on treatment of hardness of underground water source using lime softening-flocculation process [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [3] 潘俊杰,李玉仙. 石灰软化-超滤工艺处理高硬度地下水探讨[J]. 给水排水,2021,47(8): 15-18,44.  
PAN J J, LI Y X. Study of lime soften-ultrafiltration process for groundwater hardness treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 15-18, 44.
- [4] 乔沐阳,李星,于海宽,等. 石灰软化/超滤组合工艺处理高硬度纳滤浓水[J]. 中国给水排水,2019,35(19): 33-39.  
QIAO M Y, LI X, YU H K, et al. Treatment of nanofiltration concentrate by combined process of lime softening/ultrafiltration [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(19): 33-39.
- [5] 李婷,王长平,黄婷婷,等.  $\text{CO}_2$ -石灰联用技术在水厂低硬度原水处理中的应用及成效[J]. 净水技术,2021,40(12): 170-176.  
LI T, WANG C P, HUANG T T, et al. Application and performance of combined process of  $\text{CO}_2$ -lime for low-hardness raw water treatment in WTP[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(12): 170-176.
- [6] 曹霞. 去除水中硬度处理方法探讨[J]. 西南给排水,2012,34(5): 37-40.  
CAO X. Exploration of methods for removing hardness in water treatment[J]. Southwest Water & Wastewater, 2012, 34(5): 37-40.
- [7] 肖关忠. 焦化厂废水去除 SS 及硬度的工程应用设计[J]. 净水技术,2017,36(8): 85-89.  
XIAO G Z. Design of engineering application in SS and hardness removal for coking plant wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(8): 85-89.