

温佳琪, 何志军, 平金同, 等. 燃煤电厂脱硫废水预处理软化工艺的试验与优化[J]. 净水技术, 2023, 42(1):122-127.

WEN J Q, HE Z J, PING J T, et al. Experiment and optimization of softening process for desulfurization wastewater pretreatment in coal-fired power plants[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(1):122-127.

## 燃煤电厂脱硫废水预处理软化工艺的试验与优化

温佳琪<sup>1</sup>, 何志军<sup>2,\*</sup>, 平金同<sup>1</sup>, 何思源<sup>3</sup>

(1. 河北建投工程建设有限公司, 河北石家庄 050051; 2. 河北建投水务投资有限公司, 河北石家庄 050051; 3. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010)

**摘 要** 燃煤电厂脱硫废水零排放工艺前端需设置预处理段去除悬浮物、钙镁硬度等, 以达到后续除盐设备的稳定运行要求。以某电厂生产过程中的脱硫废水作为原水, 通过现场批次试验, 分析了  $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{CO}_3$  两种软化方式在 pH 值为 10.5 时对  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的去除效果。前者出水  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度能控制在 23.20 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  质量浓度控制在 73.65 mg/L; 后者出水  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度能控制在 16.00 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  质量浓度控制在 7.35 mg/L。采用  $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$  组合软化方式形成的污泥约为  $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{CO}_3$  组合加药方式污泥量的 37.95%, 但后者沉降速率较高。对于低镁脱硫废水, 采用  $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$  组合加药方式较为经济。

**关键词** 脱硫废水零排放 预处理 软化工艺 沉降速率 经济成本

中图分类号: TQ09 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)01-0122-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.01.016

## Experiment and Optimization of Softening Process for Desulfurization Wastewater Pretreatment in Coal-Fired Power Plants

WEN Jiaqi<sup>1</sup>, HE Zhijun<sup>2,\*</sup>, PING Jintong<sup>1</sup>, HE Siyuan<sup>3</sup>

(1. Hebei Construction & Investment Group Engineering Construction Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China;

2. Hebei Construction & Investment Group Water Investment Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China;

3. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

**Abstract** The desulfurization wastewater zero discharge process in coal-fired power plants needs to set up a pretreatment section to remove suspended solids, calcium and magnesium hardness, etc., to meet the requirements of stable operation of subsequent desalination equipment. In this paper, the desulfurization wastewater in the production process of a power plant was used as the raw water, and through on-site batched experiments, the  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Ca}^{2+}$  eliminating effect of two softening methods which were called  $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$  and  $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{CO}_3$  were discussed respectively. The effluent  $\text{Ca}^{2+}$  of  $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$  softening method could be controlled at 23.20 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  could be controlled at 73.65 mg/L; the effluent  $\text{Ca}^{2+}$  of  $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{CO}_3$  softening method could be controlled at 16.00 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  could be controlled at 7.35 mg/L. The amount of sludge produced by adding  $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$  was about 37.5% of the sludge volume of the amount of sludge produced by adding  $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{CO}_3$ , but the  $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{CO}_3$  had a higher settling rate. For low-magnesium desulfurization wastewater, it is more economical to use  $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$  combined dosing method.

**Keywords** zero discharge of desulfurization wastewater pretreatment softening process settling rate economic cost

[收稿日期] 2022-05-20

[基金项目] 河北省建设科技指导性计划项目(2021—2034)

[作者简介] 温佳琪(1992—), 女, 硕士, 主要从事电厂水处理业务, E-mail: 277452377@qq.com。

[通信作者] 何志军, 男, 研究方向为水处理技术, E-mail: 1505766053@qq.com。

燃煤电厂是工业生产中的用排水大户, 不同用水单元会产生不同类别的排水, 这些排水的水质和水量往往差别较大, 有的可以直接进入水质需求较低的单元进行梯级利用, 有的则需经过物理、化学、生物等手段处理后再利用或达标排放。近年来, 我

国在环保要求方面不断升级,而燃煤电厂的脱硫废水属于末端排水,具有含重金属离子、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、悬浮物、氨氮,以及高盐、高硬等特点,需经过处理才能达标排放或者回用<sup>[1]</sup>。目前,脱硫废水处理趋势是“零排放”,通常为“预处理软化+浓缩减量+蒸发结晶/干燥”3个处理单元组合而成的工艺路线,具体方案可根据不同电厂的水质、水量确定,在水质较好或水量较小的情况可考虑简化或省去预处理单元或浓缩减量单元,通过优化工艺方案以节约投资和运行成本。预处理通常选取化学软化絮凝,浓缩减量可选取的工艺包括热法(蒸汽/烟气余热)浓缩和超滤/纳滤/反渗透/电渗析(UF/NF/RO/ED)膜浓缩,蒸发结晶/干燥段可选择蒸汽机械再压缩(MVR)、多级多效蒸馏(MED)以及旁路烟气蒸发器等<sup>[2-3]</sup>。经过该工艺处理的废水被分为固相和液相,干燥的结晶盐产物可以实现二次利用或封存,产水中盐的浓度大幅降低<sup>[4-5]</sup>,可实现回用,不再需要向厂外排放。但由于其工艺链条较长、占地较大、投资运行成本高等,存在电力行业应用尚少、国内外实际工程案例不足的问题<sup>[6]</sup>。

本项目研究的脱硫废水水质复杂,现有脱硫废

水三联箱处理工艺无法满足环保要求,在实现“脱硫废水零排放”工程化投运前需对预处理工艺进行优化比选,以满足后端浓缩减量工艺段(采用ED膜组件+RO膜)的稳定运行。通过试验选择技术可行、经济合理的预处理工艺,确保其经济、可靠运行。

1 材料与方法

1.1 试验用水

采用的试验水样取自某电厂脱硫废水处理澄清浓缩器出水箱,对其  $\text{pH}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{SiO}_2$  进行了多次分析检测,结果如表 1 所示。

表 1 试验水样水质指标  
Tab. 1 Test Water Quality Indices

序号	水质指标	数值
1	pH 值	6.73
2	$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	916
3	$\text{Mg}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	3 896
4	$\text{SO}_4^{2-}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	7 750
5	$\text{SiO}_2/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	130

1.2 试验装置与方法

试验设备配置情况如表 2 所示。

表 2 预处理工艺筛选试验主要设备配置  
Tab. 2 Main Equipment Configuration of Pretreatment Process Screening Test

序号	装置	规格	单位	数量
(a)	脱硫废水取水增压泵	$1\text{ m}^3/\text{h}$ , 30 m, 0.55 kW, 铸铁潜水泵	台	1
(b)	原水调节箱	$5\text{ m}^3$ , PE 材质	套	1
(c)	原水增压泵	$1\text{ m}^3/\text{h}$ , 30 m, 0.55 kW, 氟塑料	台	1
(d)	石灰处理加药装置	1 箱 1 泵	套	1
	溶药箱	$0.5\text{ m}^3$ , 含搅拌装置	套	1
	自吸泵	$20\text{ L/h}$ , 0.5 MPa	套	1
(e)	氢氧化钠处理加药装置	1 箱 1 泵	套	1
	溶药箱	$1.5\text{ m}^3$ , 含搅拌装置	套	1
	计量泵	$150\text{ L/h}$ , 0.5 MPa	套	1
(f)	碳酸钠处理加药装置	1 箱 1 泵	套	1
	溶药箱	$1.5\text{ m}^3$ , 含搅拌装置	套	1
	计量泵	$150\text{ L/h}$ , 0.5 MPa	套	1
(g)	混合反应沉淀池(第一、第二、第三、第四反应槽)	$0.5\text{ m}^3$ , PE 材质	套	4
(h)	沉淀池	$3\text{ m}^3$ , PE 材质	套	1
(i)	清水箱	$1\text{ m}^3$ , PE 材质	套	1

脱硫废水预处理试验为批次试验,工艺流程如

图 1 所示。

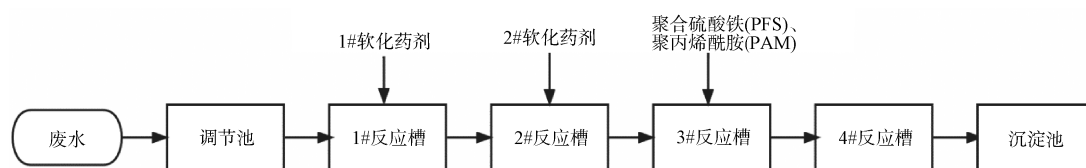


图1 脱硫废水软化流程图

Fig. 1 Flow Chart of Desulfurization Wastewater Softening

### 1.2.1 pH 优化试验

取 1 L 经均质后的脱硫废水以一定转速进行搅拌,通过投入不同量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$  并测定相应的 pH,得到脱硫废水 pH 随  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$  投加剂量的变化曲线。

### 1.2.2 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、NaOH 剂量优化试验

分批次量取 100 L 脱硫废水,加入不同剂量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$  进行搅拌 15 min 后静置沉淀 1 h,用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤上清液后测定滤液中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等物质的含量,对去除镁硬度的  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$  剂量进行优化,获得最佳投加量。

### 1.2.3 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 软化试验

分批次量取 100 L 脱硫废水,加入  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$  最佳投加剂量,搅拌 15 min 后再分别加入不同剂量的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,搅拌 15 min 后静置沉淀,用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤上清液后测定滤液中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等物质的含量。根据测定结果选择投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$  条件下的最佳  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  剂量,通过技术、经济可行性分析选择最佳加药软化方案。

### 1.2.4 污泥量及沉降效果试验

通过对脱硫废水预处理过程中各个反应池悬浮物浓度进行测定,用以估算这两种软化加药组合方式最终所能产生的污泥量。

对脱硫废水不同软化加药组合处理反应后形成的污泥浆液进行沉淀,对比得出两种加药方式各自的沉降沉淀效果,以 1 L 量筒作为沉淀容器。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 脱硫废水批次试验

#### 2.1.1 通过脱硫废水 pH 确定 $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$ 加药量

脱硫废水中投加不同剂量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$ ,测定趋于稳定后的 pH,结果如图 2 所示。

根据  $\text{Mg}^{2+}$  的理论沉淀的 pH 范围可知,投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  时  $\text{Mg}^{2+}$  沉淀的 pH 值为 9.56~10.03,投加

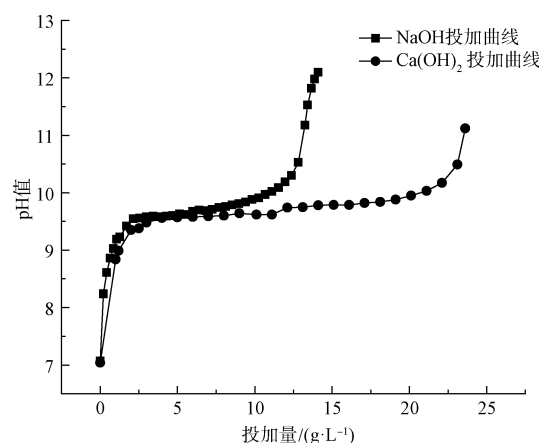


图2 脱硫废水 pH 随  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$  加药量变化趋势

Fig. 2 Variation Trend of pH Value of Desulfurization Wastewater with Dosage of  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$

NaOH 时  $\text{Mg}^{2+}$  沉淀的 pH 值为 9.55~10.00。采用  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和 NaOH 对脱硫废水进行 pH 调节时,达到相同的 pH 趋势相同,说明  $\text{Mg}^{2+}$  沉淀的 pH 区间范围与理论值基本吻合。

#### 2.1.2 脱硫废水 $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH}$ 优化试验

##### (1) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 优化试验

根据 2.1.1 小节的试验结果,选择  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  投加剂量进行优化试验,降低脱硫废水中的  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量,其结果如图 3 所示。

由图 3 可知,随着  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  投加量的增加,  $\text{Mg}^{2+}$  浓度不断降低,当 pH 值为 10.50 时,  $\text{Mg}^{2+}$  质量浓度降低至 60 mg/L,符合后续工艺流程的技术要求范围,此时  $\text{SiO}_2$  质量浓度为 1.18 mg/L,  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度降低至 4 035 mg/L,而随着  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  投加至 pH 值为 10.50 时,  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度已达 4 780 mg/L。综上,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  最佳投加剂量应为 20.99 g/L,此时 pH 值为 10.50。

##### (2) NaOH 优化试验

与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  优化试验类似,其结果如图 4 所示。

随着 NaOH 投加量的增加, pH 升高、 $\text{Mg}^{2+}$  含量

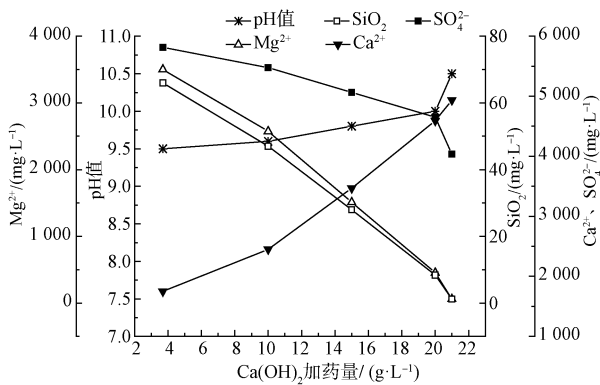


图 3  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  剂量优化试验处理效果

Fig. 3 Treatment Effect of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  Dosage

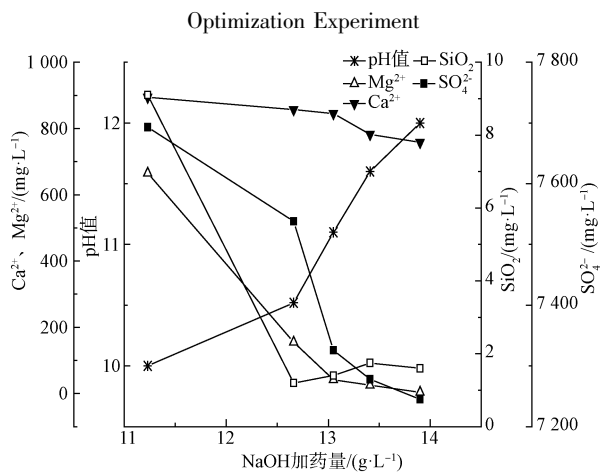


图 4 NaOH 剂量优化试验处理效果

Fig. 4 Treatment Effect of NaOH Dosage

#### Optimization Experiment

降低, pH 值可控制在 10.50 ~ 12.00; pH 值到达 10.50 时,  $\text{SiO}_2$  质量浓度达到 1.25 mg/L, 之后随着投加量的增加,  $\text{SiO}_2$  浓度出现小幅度升高。因此, 最佳 pH 值控制点应为 10.50 附近。综上, NaOH 最佳投加剂量应为 12.54 g/L, 此时 pH 值为 10.50。

若脱硫废水零排放处理工艺中预处理后端所采用的浓缩工艺为 ED, 其浓缩倍率高, 对进水  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等易结垢离子要求尽量控制在较低水平, 防止影响浓缩效率。由图 4 可知, NaOH 的投加对  $\text{Ca}^{2+}$  有一定去除作用, 这是由于随着 NaOH 的投加量增大, 反应形成少量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  沉淀, 且  $\text{CaSO}_4$  溶解度也随着 pH 的升高有所降低, 会有少量析出,  $\text{Ca}^{2+}$  含量逐渐降低。

#### 2.1.3 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 优化试验

##### (1) $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ 试验结果

根据 NaOH 剂量优化试验结果, 去除  $\text{Ca}^{2+}$  至满

足后续 ED 进水要求的 20 mg/L, 同时参照  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  与  $\text{Ca}^{2+}$  摩尔比为 1:1 所得的理论  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量, 确定试验的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量, 反应 30 min 后测定上清液中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  浓度, 得到表 3 中的数据。

表 3 脱硫废水不同 pH 值条件下上清液  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  浓度  
Tab. 3 Concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in Supernatant under Different pH Values of Desulfurization Wastewater

pH 值	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 加药量/ ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{Ca}^{2+}$ / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{Mg}^{2+}$ / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
10.00	3.151	31.00	402.60
10.50	2.639	24.00	73.90
11.00	2.402	32.00	46.80

分别对上述 3 组加药组合方式的投加药剂成本进行计算, 结果如表 4 所示。

表 4 不同 pH 值及不同出水  $\text{Ca}^{2+}$  要求下药剂投加成本估算  
( $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

Tab. 4 Chemical Dosage Cost Estimation under Different pH Values and Different Requirements of  $\text{Ca}^{2+}$  in Effluent ( $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

pH 值	NaOH 加药成本/(元 $\cdot\text{t}^{-1}$ )	$\text{Ca}^{2+}$ / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 加药成本/(元 $\cdot\text{t}^{-1}$ )	总加药成本/(元 $\cdot\text{t}^{-1}$ )
10.00	40.74	31.00	8.29	49.03
10.50	47.01	24.00	6.94	53.95
11.00	47.82	32.00	6.32	54.14

注: NaOH 价格按 1 100 元/t 液碱 (30% 纯度, 即 NaOH 按照 3 667 元/t) 计,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  按照 2 500 元/t (95% 纯度) 计

#### (2) $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{CO}_3$ 试验结果

根据  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  剂量优化试验结果, 去除  $\text{Ca}^{2+}$  至满足后续 ED 进水要求的 20 mg/L, 同时参照  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  与  $\text{Ca}^{2+}$  摩尔比为 1:1 所得的理论  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量, 确定试验的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量, 反应 30 min 后测定上清液中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  浓度, 得到表 5 的数据。

表 5 脱硫废水不同 pH 值及不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  加药浓度下上清液中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  浓度

Tab. 5 Concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in Supernatant under Different pH Values of Desulfurization Wastewater and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  Dosing Concentration

pH 值	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 加药量/ ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{Ca}^{2+}$ / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{Mg}^{2+}$ / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
9.50	16.532	22.00	1 688.00
10.00	17.152	29.00	364.20
10.50	19.974	17.00	7.56

分别对上述 3 组加药组合方式的投加药剂成本进行计算, 结果如表 6 所示。



表6 不同 pH 值条件及不同出水  $\text{Ca}^{2+}$  要求下药剂投加成本估算  $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3]$

Tab. 6 Cost Estimation of Chemical Dosage under Different pH Value Conditions and Different Effluent  $\text{Ca}^{2+}$  Requirements  $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3]$

pH 值	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 加药成本/(元·t <sup>-1</sup> )	$\text{Ca}^{2+}$ 本/(元·t <sup>-1</sup> )	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 加药成本/(元·t <sup>-1</sup> )	总加药成本/(元·t <sup>-1</sup> )
9.50	2.36	22.00	43.51	45.87
10.00	16.38	29.00	45.14	61.52
10.50	18.03	17.00	52.56	70.59

注: $\text{Ca}(\text{OH})_2$  加药成本通过加药量转换后按照 650 元/t(91%纯度)计, $\text{Na}_2\text{CO}_3$  按照 2 500 元/t(95%纯度)计

根据以上所述加药软化批次处理结果,在  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度为 20 mg/L 左右的前提下,综合评估后得出结果:若采用  $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$  加药组合方式控制 pH 值在 10.50 左右,此时加药成本为 53.95 元/t;若采用  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  加药组合方式控制 pH 值在 10.50 左右,此时加药成本为 70.59 元/t。

#### 2.1.4 两种加药方式的去除效果

以上述试验结果为基础,分别分析了采用  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$  联合预处理方式在 pH 值为 10.50 左右条件下对脱硫废水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{SiO}_2$  的去除情况,其对比结果如表 7 所示。

表7 脱硫废水加药软化处理出水水质对比

Tab. 7 Comparison of Effluent Quality of Desulfurization Wastewater Dosing and Softening Treatment

出水水质指标	工艺方案	
	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$
pH 值	10.65	10.68
$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	16.00	23.20
$\text{Mg}^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	7.35	73.65
$\text{SiO}_2/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.08	1.14

在主要污染指标去除水平方面,  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  效果略优于  $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ 。在控制 pH 值保持 10.50 左右的条件下投加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,出水  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度能控制在 20 mg/L 左右,  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  加药组合中  $\text{Mg}^{2+}$  质量浓度能控制在 7.35 mg/L,原因是其沉淀效果更佳,更多细微的  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  被共沉淀。

## 2.2 脱硫废水污泥量及沉降效果试验

### 2.2.1 脱硫废水污泥量测定

通过测定脱硫废水在  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$  软化处理过程中的悬浮物浓度可知,

采用  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  组合进行处理,由于  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应效率低、反应形成部分  $\text{CaSO}_4$  等系列产品,一级反应池形成的悬浮固体质量浓度约为 35 000 mg/L,二级反应池形成的悬浮固体质量浓度约为 13 000 mg/L,混合后污泥质量浓度约为 48 000 mg/L。为了防止一级  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应过程中残留的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  进入二级  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  反应池,两者之间需单独设置沉淀池以保证后端  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  加药量的准确性。

采用  $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$  组合软化过程中,反应所产生的  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  和  $\text{CaCO}_3$  最终均会到达同一沉淀池,经过检测,反应形成的悬浮固体平均质量浓度在 18 000 mg/L 左右。

综上所述,采用  $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$  组合软化方式形成的污泥量约为  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  组合加药方式形成的污泥量的 37.5%。

### 2.2.2 脱硫废水软化沉降对比试验

如图 5 所示,采用  $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$  加药方式形成的污泥经过 16.5 h 之后体积减小了 46%,而采用  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  加药方式形成的污泥经过 2 h 体积减小了 50%,最终经过 7 h 沉淀后污泥体积减小了 63%,说明  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  加药方式在沉淀速率上具有一定优势。

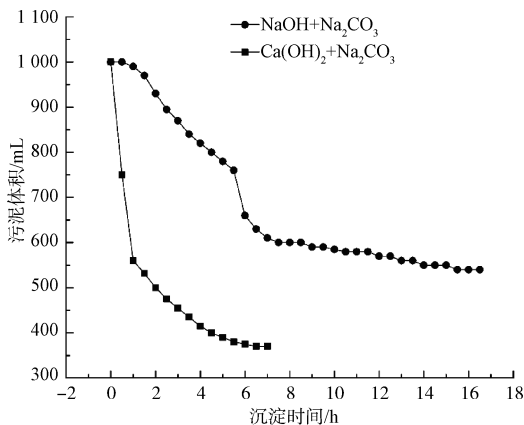


图5 脱硫废水不同加药软化方式下污泥体积随时间变化  
Fig. 5 Sludge Volume Changes with Time under Different Softening Methods of Desulfurization Wastewater

另外,对两种软化方式进行了对比,两者的异同如表 8 所示,  $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$  产生的污泥量约为  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  的 37.95%。

## 3 结论

(1)脱硫废水软化预处理试验需根据 pH 曲线、后续处理单元的进水水质要求及产生的污泥

**表 8 脱硫废水不同加药软化方式对比**  
Tab. 8 Comparison of Different Dosing and Softening Methods for Desulfurization Wastewater

项目	1# NaOH+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2# Ca(OH) <sub>2</sub> +Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	备注
加药成本/(元·t <sup>-1</sup> )	53.95	70.59	—
沉淀情况	16.5 h 污泥液位下降至 54%	2 h 污泥液位下降至 50%	pH 值均为 10.50
污泥总量/(g·L <sup>-1</sup> )	约 18.22	约 48.00	软化完成后测定结果

量等技术指标,分析其经济可行性,从而确定碱性药剂组合的最佳投加量范围。试验结果表明,Ca(OH)<sub>2</sub>+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 组合加药方式在 pH 值为 10.5 左右时,Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>可以被高效去除。

(2)Ca(OH)<sub>2</sub>+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 组合加药方式产生的污泥量比 NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 组合加药方式大 2 倍左右,但前者污泥沉降效率较高。

(3)本项目试验水样属低镁脱硫废水,采用 NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 组合加药方式较为经济。根据现场实际技术及经济需求,结合本项目脱硫废水水质特点,推荐 NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 的组合加药方式。

#### 参考文献

[ 1 ] 马双忱,于伟静,贾绍广,等. 燃煤电厂脱硫废水处理技术研究与应用进展[J]. 化工进展, 2016, 35(1): 255-262.  
MA S C, YU J W, JIA S G, et al. Research and application progresses of flue gas desulfurization (FGD) wastewater treatment technologies in coal-fired plants [ J ]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(1): 255-262.

[ 2 ] 白璐,陈武,王凯亮,等. 燃煤电厂脱硫废水零排放处理技术研究进展[J]. 工业水处理, 2019, 39(4): 16-20.  
BAI L, CHEN W, WANG K L, et al. Research progress in the

zero-discharge treatment technology for desulfurization wastewater from coal-fired power plants [ J ]. Industrial Water Treatment, 2016, 35(1): 255-262.

[ 3 ] 马学虎,郝婷婷,兰忠,等. 浓盐水零排放技术研究进展[J]. 水处理技术, 2015, 41(10): 31-41.  
MA X H, HAO T T, LAN Z, et al. Advances in zero liquid discharge technologies for brines [ J ]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(10): 31-41.

[ 4 ] 李柄缘,刘光全,王莹,等. 高盐废水的形成及其处理技术进展[J]. 化工进展, 2014, 33(2): 493-497, 515.  
LI B Y, LIU G Q, WANG Y, et al. Formation and treatment of high-salt wastewater [ J ]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(2): 493-497, 515.

[ 5 ] 韦飞,刘景龙,王特,等. 燃煤电厂脱硫废水零排放技术探究[J]. 水处理技术, 2017, 43(6): 34-36.  
WEI F, LIU J L, WANG T, et al. Research on zero discharge technique of desulfurization wastewater in coal-fired power plant [ J ]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(6): 34-36.

[ 6 ] 刘亚鹏,王金磊,陈景硕,等. 火电厂脱硫废水预处理工艺优化及管式微滤膜实验研究[J]. 中国电力, 2016, 49(2): 153-158.  
LIU Y P, WANG J L, CHEN J S, et al. Optimization of FGD wastewater pretreatment technique for thermal power plant and test studies on tubular crossflow microfiltration process [ J ]. Electric Power, 2016, 49(2): 153-158.

(上接第 14 页)

[ 34 ] ZHANG X, CHEN C. Emergency drinking water treatment in source water pollution incident—Technology and practice in China [ J ]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2009, 3(3): 364-368. DOI: 10.1007/s11783-009-0027-2.

[ 35 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇供水厂运行、维护及安全技术规程: CJJ 58—2009 [ S ]. 北京: 中国建筑工业出

版社, 2009.  
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for operation, maintenance and safety of city and town waterworks: CJJ 58—2009 [ S ]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.