

魏建刚, 徐建华, 吴志顺, 等. 石灰碱化法除锰在水厂生产废水处理中的应用[J]. 净水技术, 2026, 45(4): 189-195.

Wei J G, Xu J H, Wu Z S, et al. Application of lime alkalization process for manganese removal in WTP wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(4): 189-195.

## 石灰碱化法除锰在水厂生产废水处理中的应用

魏建刚<sup>1,\*</sup>, 徐建华<sup>2</sup>, 吴志顺<sup>1</sup>, 谢叶斌<sup>1</sup>, 陈盼盼<sup>1</sup>

(1. 台州城市水务有限公司, 浙江台州 318050; 2. 台州市水务集团股份有限公司, 浙江台州 318020)

**摘要** 【目的】针对水厂生产废水锰污染现状, 本文旨在解决浓缩池上清液回用导致的配水井原水锰超标问题。【方法】利用石灰碱化排泥水, 本文探究不同石灰投加量、pH 条件下锰离子去除效果以及投加石灰对排泥水沉降性能的影响, 并把所得结论运用于生产实践。【结果】利用石灰碱化排泥水能够有效去除排泥水中的锰离子, 石灰投加量越大, 锰离子去除效果越好, 石灰投加质量浓度为 75 mg/L 时, 排泥水 pH 值由 7.13 升至 9.20, 上清液锰离子质量浓度由 4.30 mg/L 降至 0.25 mg/L, 锰离子去除率高达 94.2% 左右, 可满足生产回用要求; 石灰投加质量浓度大于 125 mg/L 时, 上清液锰离子质量浓度可降至 0.10 mg/L 以下。并且投加石灰可改善排泥水的沉降性能, 使排泥水沉降后的污泥容积减少。生产实践表明, 向浓缩池投加 100 mg/L 的石灰, 回用上清液锰离子质量浓度稳定低于 0.30 mg/L, 不受排泥水中锰离子含量变化影响。同时, 浓缩后的污泥转为偏碱性, 压滤尾水中的锰含量显著降低, 泥饼含水率则降低了 3%~8%。【结论】应用石灰碱化法处理排泥水, 解决了浓缩池上清液回用导致的配水井原水锰超标问题, 减少了锰在生产废水回收、储存过程中的富集, 并间接起到了污泥调质的作用。

**关键词** 生产废水 排泥水 除锰 石灰碱化法 水厂

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)04-0189-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.04.022

## Application of Lime Alkalization Process for Manganese Removal in WTP Wastewater Treatment

Wei Jiangan<sup>1,\*</sup>, Xu Jianhua<sup>2</sup>, Wu Zhishun<sup>1</sup>, Xie Yebin<sup>1</sup>, Chen Panpan<sup>1</sup>

(1. Taizhou City Water Co., Ltd., Taizhou 318050, China;

2. Taizhou Water Group Co., Ltd., Taizhou 318020, China)

**Abstract** [Objective] Based on the status quo of manganese pollution from wastewater production in a water treatment plant (WTP), the objective of this paper is to solve the problem of manganese exceedance in raw water distribution well caused by the recycling of supernatant from sedimentation tank. [Methods] By using lime to alkalize the sludge water, this paper investigated the optimal lime dosing and pH control conditions for effectively removing dissolved manganese from the sludge water, as well as the impact of this treatment on sludge sedimentation. The findings were applied to production practice. [Results] Alkalizing the sludge water with lime was an effective method for manganese removal. An increase in lime dosage led to better manganese removal. Specifically, after adding 75 mg/L of lime, the pH value of the sludge water rose from 7.13 to 9.20, and the manganese mass concentration in the supernatant decreased from 4.30 mg/L to 0.25 mg/L, achieving a manganese removal rate of approximately 94.2%, which met production reuse requirements. When the lime dosage exceeded 125 mg/L, the manganese content in the supernatant could be further reduced to below 0.10 mg/L. Additionally, adding lime enhanced sludge sedimentation performance and reduced the sludge volume after settlement. Practical implementation in WTP demonstrated that by dosing 100 mg/L of lime into the sludge sedimentation tank, the manganese mass concentration in the recycled supernatant consistently remained below 0.30 mg/L, unaffected by fluctuations in the manganese content of the sludge water. Moreover, the concentrated sludge became alkaline, significantly reducing manganese levels in the pressure filtration water, and the mud cake moisture content decreased by 3% to 8%. [Conclusion] The application of lime alkalization to treat sludge water successfully addresses the problem of raw water manganese

[收稿日期] 2024-09-03

[通信作者] 魏建刚(1980—)男, 工程师, 主要从事环境水质监测、水处理技术与应用等工作, E-mail: 44603206@qq.com。

exceedance in distribution well caused by the recycling of supernatant from the sedimentation tank. This approach not only minimizes manganese accumulation during the recycling and storage of production wastewater but also indirectly improves sludge conditioning.

**Keywords** production wastewater sludge water manganese removal lime alkalization water treatment plant

沉淀池排泥水回用能促进原水中胶体颗粒脱稳,强化混凝<sup>[1]</sup>,节省投药量<sup>[2]</sup>,是节约水资源、减少水污染的有效措施<sup>[3]</sup>。台州南片地区水资源紧缺,大部分水厂都对沉淀池排泥水进行了回收利用。然而,长期监测发现,水厂排泥水中含有较高浓度的锰离子( $Mn^{2+}$ ),回用后会影响到出水水质,因此有必要进行生产废水除锰技术的研究。

目前国内供水行业关于含锰生产废水处理的研究和工程应用方面鲜有报道,本文将石灰碱化法除锰应用于水厂生产废水处理,开展了石灰碱化法去除排泥水中 $Mn^{2+}$ 的试验研究和工程应用实践,取得了良好的效果,为水厂含锰生产废水的处置提供参考和借鉴。

## 1 水厂概况

台州水厂是目前台州市内最大的水厂,设计供

水规模为 $60\text{万 m}^3/\text{d}$ ;一期规模为 $40\text{万 m}^3/\text{d}$ ,2008年建成通水,二期规模为 $20\text{万 m}^3/\text{d}$ ,2023年建成通水。水厂净水处理工艺为“预处理+混凝+沉淀+过滤+消毒”,其中预处理工艺包括前加氯预氧化工艺、石灰调pH工艺、高锰酸钾除锰工艺、臭氧除臭味工艺等,并根据原水不同水质情况,选择合适的预处理工艺。水厂生产废水包括沉淀池排泥水、滤池反冲洗水和板框压滤水,其中,滤池反冲洗水含固率低,水质较好,经回用水池调节后直接回收至原水配水井。沉淀池排泥水经排泥水池调节后输送至污泥浓缩池,再经重力沉淀,上清液回流至原水配水井。水厂工艺流程如图1所示。

## 2 生产废水锰污染现状

每年5月—10月,台州市长潭水库下层取水口汲取的原水中含有较高浓度的 $Mn^{2+}$ (图2),在净水

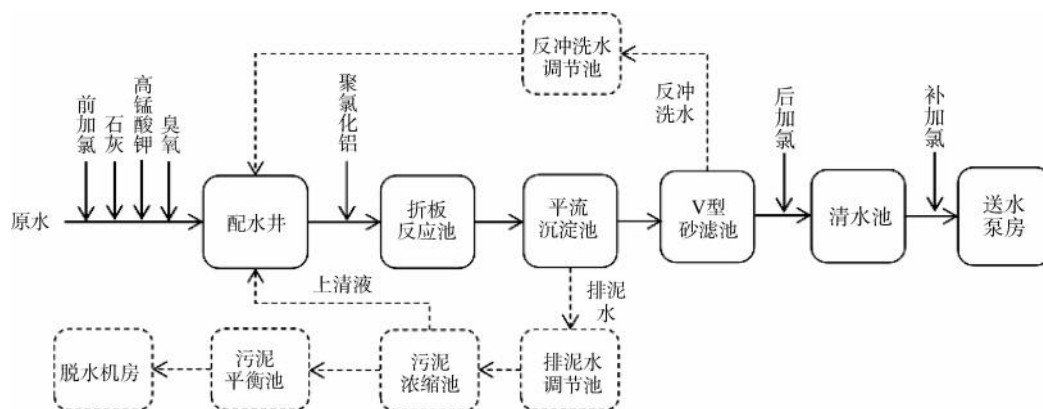


图1 台州水厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Taizhou WTP

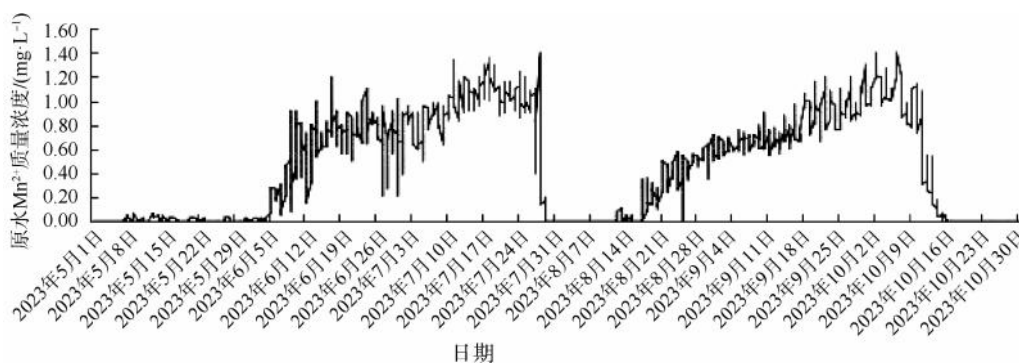


图2 原水 $Mn^{2+}$ 含量的变化(2023年5月—10月)

Fig. 2 Change of Manganese Concentration in Raw Water(May–October 2023)

工艺中被高锰酸钾氧化生成水合二氧化锰<sup>[4]</sup>。这些非溶解态的二氧化锰再经絮凝、沉淀、过滤后,大部分进入沉淀池底泥,小部分进入滤池,在滤砂层中被截留。

水厂沉淀池排泥水一般以天为周期,间歇性排出,排放周期较长。监测结果显示,在排泥水的收集、储存、浓缩处理过程中,沉积于污泥中一部分二氧化锰又被还原成溶解性的  $Mn^{2+}$ 。2018 年—2023 年,水厂排泥水中  $Mn^{2+}$  质量浓度高达 7.6 mg/L,污泥浓缩池回流上清液  $Mn^{2+}$  质量浓度甚至高达 22 mg/L。在水厂工艺中,污泥浓缩池上清液回收至原水配水井,回用废水瞬时流量占原水比例为 2%~6%,导致经高锰酸钾预氧化处理后的原水,再次出现锰含量超标。然而,原水预氧化工艺位于生产废水回收点之前,无法有效应对生产废水回用导致的配水井原水锰超标。

沉淀池排泥水中悬浮物较多、有机物含量高,若使用常规高锰酸钾或氯氧化工艺除锰,不仅药剂消耗量大、成本高,工艺控制也较为困难。石灰碱化法除锰是将石灰投加到含锰水中<sup>[5]</sup>,  $Mn^{2+}$  在碱性条件下生成不稳定的氢氧化锰  $[Mn(OH)_2]$  沉淀,被水中的溶解氧迅速氧化成四氧化三锰 ( $Mn_3O_4$ )、三氧化二锰 ( $Mn_2O_3$ )、二氧化锰 ( $MnO_2$ ) 等锰氧化物<sup>[6]</sup>,经沉淀后去除。程建国等<sup>[7]</sup>对石灰絮凝除锰机理研究表明,锰从废水中沉淀析出适宜的 pH 值应大于 8.5。在冶炼、采矿行业用石灰处理含锰废水技术成熟,工程应用广泛。樊玉川<sup>[8]</sup>利用石灰-碱式氯化铝法处理电解锰废水,原水锰质量浓度由 786 mg/L 降至 0.5 mg/L 以下。朱乐辉等<sup>[9]</sup>采用“石灰石沉淀+过滤+石灰沉淀+混凝沉淀”工艺处理某矿山酸性含锰废水,出水水质达到了国家一级排放标准。

表 2 石灰投加量试验结果

Tab. 2 Experimental Results of Different Lime Dosages

指标	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
石灰投加质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	0	25	50	75	100	125	150	175	200
上清液 $Mn^{2+}$ 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	4.30	1.10	0.59	0.25	0.15	0.08	0.05	<0.03	<0.03
pH 值	7.13	8.17	8.75	9.20	9.46	9.80	10.24	10.88	11.36
$Mn^{2+}$ 的去除率	—	74.4%	86.3%	94.2%	96.5%	98.1%	98.8%	99.7%	99.7%

由表 2 可知,随着石灰投加量的增加,试验水样 pH 逐渐升高,上清液  $Mn^{2+}$  含量快速降低。当石

### 3 试验部分

#### 3.1 试验水样及检测要求

试验水样 2023 年 7 月 30 日取自水厂排泥水调节池,为混合后的沉淀池排泥水。首先,测定泥水初始 pH 及含固率,再用量筒量取 1 000 mL 水样,静置 30 min。抽取上清液液面下 2 cm 处的水样,一部分水样用于测定总锰,另一部分水样用 0.45 μm 滤膜过滤,然后每升水加 1.5 mL 浓硝酸酸化使 pH 值小于 2,测定  $Mn^{2+}$  含量。pH 采用 pH 计直接测定,锰采用过硫酸铵分光光度法测定,污泥含固率、沉降比(SV)依据《城镇污泥标准检验方法》(CJ/T 221—2023)进行测定。试验期间沉淀池排泥水水质如表 1 所示。

表 1 排泥水水质

Tab. 1 Quality of Sludge Water

水质指标	检测结果
pH 值	7.13
含固率	0.27%
总锰/(mg·L <sup>-1</sup> )	9.1
$Mn^{2+}$ /(mg·L <sup>-1</sup> )	4.3

#### 3.2 试验内容及结果

测定不同石灰投加量下排泥水中  $Mn^{2+}$  去除率,并研究投加石灰对排泥水沉降性能的影响,以验证排泥水投加石灰除锰的可行性。

##### 3.2.1 石灰投加量试验

取 9 只 1 000 mL 烧杯,各加入 1 000 mL 混合均匀的试验水样,再依次加入 0、0.50、1.00、1.50、2.00、2.50、3.00、3.50、4.00 mL 质量浓度为 50 g/L 的熟石灰乳液,以 60 r/min 搅拌 2 min 后,静置 30 min,测定各烧杯上清液面下 2 cm 处  $Mn^{2+}$  含量,并计算不同石灰投加量下  $Mn^{2+}$  的去除率。试验结果如表 2 所示。

灰投加质量浓度为 50 mg/L 时,试验水样 pH 值升至 8.5 以上,  $Mn^{2+}$  去除率大于 85%。当石灰投加

质量浓度增加至 125 mg/L,上清液  $Mn^{2+}$  质量浓度小于 0.1 mg/L,符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的要求。当石灰投加质量浓度继续增加至 175 mg/L 时,试验水样 pH 值升至 10.88,  $Mn^{2+}$  去除率大于 99%,上清液  $Mn^{2+}$  含量降至检出限以下。

### 3.2.2 排泥水静态沉降试验

量取 4 份 1 000 mL 混合均匀的试验水样,向其

中 3 份水样中分别加入 1.0、2.0、3.0 mL 质量浓度为 50 g/L 的熟石灰乳液,以 60 r/min 搅拌 2 min 后,将水样转入 1 000 mL 量筒中,静置。分别在第 5、10、15、20、25、30 min 时,记录量筒泥水分界面刻度值  $V$ ,并计算静置 30 min 后的 SV。同一样品平行测量 3 次,取平均值作为观测结果。不同石灰投加量下的排泥水静态沉降曲线如图 3 所示,SV 测定结果如表 3 所示。

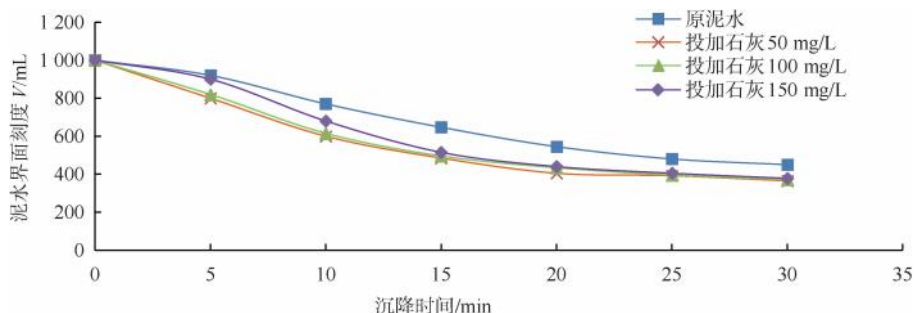


图 3 不同石灰投加量下的排泥水静态沉降曲线

Fig. 3 Static Settlement Curve of Sludge Water under Different Lime Dosages

表 3 不同石灰投加量下的 SV

Tab. 3 SV under Different Lime Dosages

石灰投加质量浓度/(mg · L <sup>-1</sup> )	SV
0	45.0%
50	36.5%
100	37.2%
150	37.8%

排泥水倒入 1 000 mL 量筒后,静置不超过 5 min,所有量筒内均可观察到清晰的沉降界面。由图 2 可知,石灰投加质量浓度分别为 0、50、100、150 mg/L 排泥水在静态沉降过程中,泥水界面随时间增加逐渐下降,表明重力条件下具有良好的沉降性能,但不同石灰投加量下排泥水沉降特性不同。未投加石灰时,污泥沉降速度较慢,投加石灰后,污泥沉降速度明显加快。随着石灰投加量增加,沉降速度先减慢后加快,0~5 min,石灰投加量越大,污泥沉降速度越慢;5~15 min,石灰投加量越大,污泥沉降速度越快;15 min 之后,3 种投加量下的污泥界面高度接近。由表 3 可知,投加石灰后,排泥水 SV 值变小,污泥容积减少,表明排泥水的沉降性能得到改善。当石灰投加质量浓度为 50 mg/L 时,污泥沉降效果最好,SV 值由 45.0% 降至 36.5%,之后随着石灰投加量的增加,SV 又缓慢增大。上述试验结果

表明,通过投加石灰碱化水样,能够有效去除排泥水中的  $Mn^{2+}$ ,改善排泥水的沉降性能,并减少污泥容积,因此在水厂生产上应用具有可行性。

## 4 水厂工艺改造及应用效果

### 4.1 水厂工艺改造

根据小试确定的石灰投加量,2023 年 8 月水厂进行了生产废水投加石灰除锰的工艺改造。为减轻石灰乳液对排泥水输送管道的堵塞,石灰投加点设置在排泥水输送管道末端,距浓缩池进泥口约 10 m,并安装管道混合器使排泥水与石灰乳液充分混合。石灰投加系统包括石灰料仓、给料系统、不锈钢溶解罐、离心泵等,石灰按 10 kg/m<sup>3</sup> 的投加质量浓度在不锈钢溶解罐中进行搅拌溶解,然后通过离心泵将石灰乳液从溶解罐打入排泥水输送管道。污泥浓缩池设置在线 pH 计,对回流上清液 pH 进行监测,及时反馈控制石灰投加情况。改造后的生产废水处理工艺如图 4 所示。投加石灰碱化后的排泥水从浓缩池中心进泥管连续进入,泥水中的  $Mn^{2+}$  在碱性条件下,转化成难溶的锰氧化物随污泥沉降于浓缩池底部污泥区,上清液回流原水配水井。

2023 年 9 月 5 日—23 日开展了浓缩池投加石灰运行调试,选取污泥浓缩池进泥管、污泥浓缩池上清液和原水配水井作为水质采样点,分别监测投加

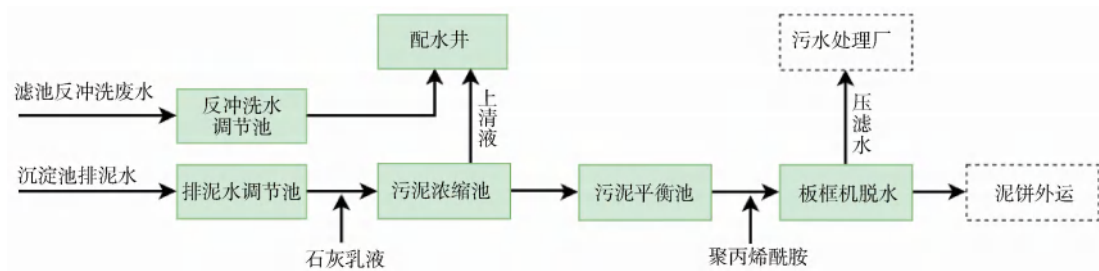


图4 生产废水处理工艺流程

Fig. 4 Process Flow of Production Wastewater Treatment

石灰前、投加石灰后和生产废水回收点水质情况,监测项目为 pH 和  $Mn^{2+}$  含量。污泥浓缩池运行方式为中控手动方式,控制进水流量在  $300 \sim 500 \text{ m}^3/\text{h}$ ,石灰初始投加质量浓度为  $75 \text{ mg/L}$ ,工艺运行稳定后

逐渐增加石灰投加量,直至污泥浓缩池上清液  $Mn^{2+}$  质量浓度小于  $0.03 \text{ mg/L}$ 。调试运行期间,回流上清液占原水比例在  $1\% \sim 3\%$ ,污泥浓缩池上清液水质清澈,出水浑浊度小于  $10 \text{ NTU}$ ,结果如表 4 所示。

表 4 石灰碱化法除  $Mn^{2+}$  调试运行结果

Tab. 4 Commissioning Results of  $Mn^{2+}$  Removal by Lime Alkalinization

取样日期	石灰投加质量浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	浓缩池进水		浓缩池上清液		配水井原水	
		pH 值	$Mn^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH 值	$Mn^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH 值	$Mn^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
9月5日	0	7.02	3.2	6.95	4.00	7.39	0.07
9月6日	75	6.99	3.0	8.44	0.55	7.38	<0.03
9月7日	75	7.01	3.5	8.38	0.70	7.40	0.03
9月9日	100	7.03	2.8	8.80	0.23	7.43	<0.03
9月11日	100	7.06	2.2	8.76	0.20	7.40	<0.03
9月13日	125	7.06	2.1	9.03	0.13	7.42	<0.03
9月15日	125	7.08	1.8	9.07	0.12	7.38	<0.03
9月17日	150	7.03	2.6	9.32	0.08	7.41	<0.03
9月19日	150	7.06	2.3	9.35	0.05	7.40	<0.03
9月21日	175	7.07	1.7	9.60	<0.03	7.43	<0.03
9月23日	175	7.05	2.0	9.66	<0.03	7.45	<0.03

由表 4 可知,在污泥浓缩池前端投加石灰,随着石灰投加量的增加,污泥浓缩池上清液 pH 逐渐升高, $Mn^{2+}$  含量迅速降低,回流上清液对配水井原水 pH 影响较小。石灰初始投加质量浓度为  $75 \text{ mg/L}$ ,排泥水  $Mn^{2+}$  离子去除率约为  $80\%$ ,回流上清液与原水掺混后  $Mn^{2+}$  含量接近内控限值(配水井原水  $Mn^{2+}$  质量浓度限值为  $0.03 \text{ mg/L}$ )。当石灰投加质量浓度达到  $100 \text{ mg/L}$  时,上清液 pH 值大于  $8.7$ ,排泥水  $Mn^{2+}$  离子去除率提升至  $90\%$  以上,回流上清液  $Mn^{2+}$  质量浓度降至  $0.25 \text{ mg/L}$  以下,与原水掺混后  $Mn^{2+}$  含量符合内控要求。当石灰投加质量浓度达到  $150 \text{ mg/L}$  时,回流上清液  $Mn^{2+}$  质量浓度降至  $0.10 \text{ mg/L}$  以下,回用水  $Mn^{2+}$  含量达到《地表水环

境质量标准》(GB 3838—2002)的要求。与小试试验相比,生产上若要达到同等除锰效果,石灰投加量增加了约  $25\%$ 。从调试运行结果来看,石灰投加量越大, $Mn^{2+}$  去除效果越好,但是考虑到经济成本和石灰堵塞管道的风险,实际应用中投加质量浓度为  $100 \text{ mg/L}$  的石灰是较为适宜的。

#### 4.2 运行效果

2023 年 10 月污泥浓缩池投加石灰除锰工艺开始连续运行,排泥水流量约为  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ ,石灰按固定质量浓度  $100 \text{ mg/L}$  投加,排泥水和浓缩池上清液  $Mn^{2+}$  含量监测结果如图 5 所示。

由图 5 可知,排泥水中  $Mn^{2+}$  质量浓度为  $1 \sim 5 \text{ mg/L}$ ,浓缩池上清液  $Mn^{2+}$  质量浓度稳定低于

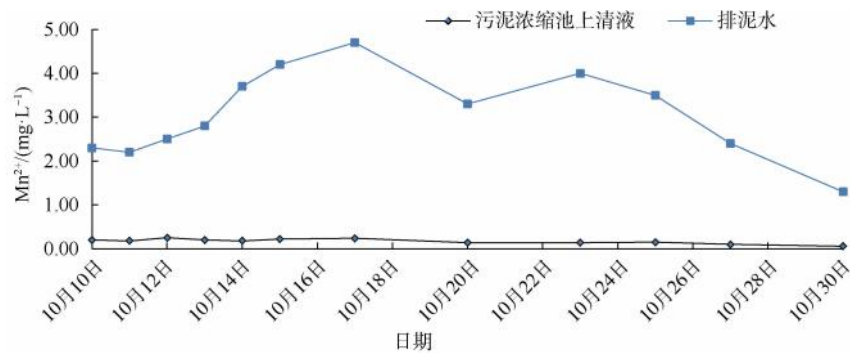


图5 排泥水及污泥浓缩池上清液 Mn<sup>2+</sup> 含量监测结果 (2023 年 10 月)

Fig. 5 Test Results of Mn<sup>2+</sup> in Sludge Water and Supernatant of Sludge Thickening Tank (Oct, 2023)

0.3 mg/L, Mn<sup>2+</sup> 去除效果不受排泥水中 Mn<sup>2+</sup> 含量变化影响,去除率均大于 90%。排泥水中的 Mn<sup>2+</sup> 经石灰碱化法处理后,大部分沉降至浓缩池底泥中,不再进入净水生产环节,减少了锰在生产废水回收、储存过程中的富集。

为避免石灰配制浓度波动对投加量的影响,提高投加精度确保水质达标,石灰投加控制优化为采用排泥水调节池出水流量配比和浓缩池上清液 pH 联合控制的方式,设定石灰投加质量浓度为 100 mg/L,上清液 pH 值控制目标为 8.7,根据上清液 pH 反馈通过比例-积分-微分 (PID) 控制调节石灰投加量。2024 年 5 月—10 月,水厂原水季节性锰超标期间,排泥水中 Mn<sup>2+</sup> 质量浓度为 0.55 ~ 6.30 mg/L,浓缩池投加石灰后上清液 pH 值控制在 8.7±0.3,排泥水 Mn<sup>2+</sup> 去除率为 94.3%~99.4%,平均去除率为 97.1%,石灰乳液(配制质量分数设定值为 1%)投加流量与回用排泥水流量之比在 0.8%~1.3%。

污泥浓缩池投加石灰除锰工艺运行以来,对污泥处理系统的连续跟踪监测发现,浓缩后的污泥 pH 明显升高,平衡池污泥 pH 值由小于 7.0 升至 8.0 以上,污泥从偏酸性转变为偏碱性,经板框压滤机脱水后,压滤尾水中的锰含量显著降低,泥饼含水率则降低了 3%~8%。这一结果表明,向污泥浓缩池投加石灰除锰间接起到了污泥调质的作用<sup>[10]</sup>。

## 5 总结

(1) 针对水厂生产废水回用导致的原水锰超标问题,本文结合排泥水水质特征和水厂实际情况,采用石灰碱化法去除排泥水中的 Mn<sup>2+</sup>,取得了良好的效果。

(2) 在污泥浓缩池进泥口前端 10 m 处投加石灰,提高排泥水的 pH,排泥水中的 Mn<sup>2+</sup> 被快速氧化成难溶的锰氧化物,随污泥沉降于浓缩池底部。回流上清液 Mn<sup>2+</sup> 含量出现了明显下降, Mn<sup>2+</sup> 去除效果随着石灰投加量的增大而提高。

(3) 水厂生产实践表明,当石灰投加质量浓度为 100 mg/L 时,浓缩池上清液 Mn<sup>2+</sup> 残余质量浓度小于 0.3 mg/L, Mn<sup>2+</sup> 去除效果不受排泥水中 Mn<sup>2+</sup> 含量变化影响,去除率均大于 90%。该工艺减少了锰在生产废水回收、储存过程中的富集,并间接起到了污泥调质的作用。

(4) 该工艺药剂成本低、操作简单、锰去除效果好,且不受排泥水中悬浮物和有机物的影响,具有较好的推广价值。

## 参考文献

- [1] 刘国焯,童祯恭,胡锋平. 沉淀池排泥水回流强化混凝工艺参数研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(2): 32-36.  
Liu G Y, Tong Z G, Hu F P. Study on processing parameters of sedimentation tank sludge water reflux coagulation[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(2): 32-36.
- [2] 童祯恭,吴哲帅,钟赐龙. 赣江南昌段净水厂排泥水回用混凝增效实验研究[J]. 应用化工, 2019, 48(10): 2300-2303, 2307.  
Tong Z G, Wu Z S, Zhong C L. Experimental study on coagulation and synergistic effect of sludge water reuse in Nanchang water treatment plant of Ganjiang River[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(10): 2300-2303, 2307.
- [3] 向平,蒋绍阶. 给水厂排泥水处理回用的若干问题[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(4): 70-72.  
Xiang P, Jiang S J. Some issues about the recycling liquid sludge water from water treatment plant[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2004, 26(4): 70-72.

- [ 4 ] 杨宏, 朱晓辉, 张杰.  $\text{KMnO}_4$  氧化  $\text{Mn}^{2+}$  产物  $\text{MnO}_2$  的作用机理研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(S1): 295-299.  
Yang H, Zhu X H, Zhang J. Study on mechanism of  $\text{MnO}_2$  produced from  $\text{Mn}^{2+}$  oxidization[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(S1): 295-299.
- [ 5 ] 李继震, 于文举, 王志军, 等. 曝气-石灰碱化法除铁除锰、降低水的硬度和溶解性总固体含量的研究[J]. 给水排水, 2000, 26(4): 12-13.  
Li J Z, Yu W J, Wang Z J, et al. Fe-Mn removal and hardness-TSS reducing in water[J]. Water & Wastewater Engineering, 2000, 26(4): 12-13.
- [ 6 ] 马子川, 谢亚勃.  $\text{Mn}(\text{OH})_2$  空气氧化反应实验与产物表征[J]. 化学研究与应用, 2001, 13(4): 417-418.  
Ma Z C, Xie Y B. Air-oxidation of  $\text{Mn}(\text{OH})_2$  and characterization of the products[J]. Chemical Research and Application, 2001, 13(4): 417-418.
- [ 7 ] 程建国, 林永树, 阳华玲, 等. 石灰絮凝法去除矿坑废水中锰离子的研究[J]. 矿冶工程, 2012, 32(2): 45-48.  
Cheng J G, Lin Y S, Yang H L, et al. Removal of Mn ions from mine wastewater by lime flocculation [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2012, 32(2): 45-48.
- [ 8 ] 樊玉川. 含锰废水处理研究[J]. 湖南有色金属, 1998, 14(3): 36-38.  
Fan Y C. Study on the treatment of wastewater with manganese [J]. Hunan Nonferrous Metals, 1998, 14(3): 36-38.
- [ 9 ] 朱乐辉, 黄建, 孟祥超. 矿山高浓度酸性含锰废水处理的研究与工程实施[J]. 工业水处理, 2013, 33(4): 82-84.  
Zhu L H, Huang J, Meng X C. Experimental research and engineering practice of the treatment of high-concentration acidic mining wastewater containing manganese [J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(4): 82-84.
- [ 10 ] 李一璇. 石灰在深圳梅林水厂污泥调质中的应用[J]. 给水排水, 2010, 46(11): 21-24.  
Li Y X. Application of lime in sludge conditioning of Shenzhen Meilin Waterworks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 46(11): 21-24.

(上接第 188 页)

- [ 8 ] Alsaqqar A S, Khudair B H, Jbbar R K. Rigid trunk sewer deterioration prediction models using multiple discriminant and neural network models in Baghdad City, Iraq[J]. Journal of Engineering, 2023, 23(8): 70-83.
- [ 9 ] 邢雯雯. 基于 GA-BP 神经网络模型的排水管道系统健康状况评估[D]. 西安: 长安大学, 2021.  
Xing W W. Research on the health assessment model of sewer system based on BP neural network [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [ 10 ] 张文俊, 谢震方, 黎雷. 城市污水干管运行风险评估指标体系[J]. 净水技术, 2019, 38(6): 112-117, 121.  
Zhang W J, Xie Z F, Li L. Assessment index system of operational risk for urban sewage mains[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(6): 112-117, 121.
- [ 11 ] 周德敏, 何仁洋, 刘长征, 等. 关于埋地管道检验检测的必要性及建议[J]. 化工设备与管道, 2010, 47(6): 51-54, 63.  
Zhou D M, He R Y, Liu C Z et al. On the necessity and suggestions for inspection and testing of buried pipelines [J]. Chemical Equipment and Piping, 2010, 47(6): 51-54, 63.
- [ 12 ] Chen T, Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system [J]. ACM, 2016. DOI:10.1145/2939672.2939785.
- [ 13 ] 孙丽丽, 方宏彬, 朱星星, 等. 基于网格搜索优化的 XGBoost 模型的股票预测[J]. 阜阳师范大学学报: 自然科学版, 2021, 38(2): 97-101.  
Sun L L, Fang H B, Zhu X X, et al. Stock prediction using XGBoost model based on grid search optimization[J]. Journal of Fuyang Normal University: Natural Science, 2021, 38(2): 97-101.
- [ 14 ] 张美. 基于重采样和集成学习的不平衡数据分类与应用研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2023.  
Zhang M. Research on classification and application of unbalanced data based on resampling and ensemble learning [D]. Kunming: Yunnan University of Finance and Economics, 2023.