

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.16.020

芬顿精确加药控制系统在污水处理厂的应用

牛汝宝¹, 宋伟², 陈伟², 崔学盼², 赵贵江², 刘扬²
(1. 淄博市市政环卫服务中心, 山东 淄博 255030; 2. 光大水务<淄博>有限公司, 山东 淄博 255086)

摘要: 某工业园区污水处理厂通过试验确定了芬顿处理单元的pH、氧化还原电位(ORP)等关键反应条件,得到双氧水与硫酸亚铁的最佳用量比为1:13,为精确加药控制系统的设计提供了理论基础。采用“前馈+反馈”的闭环控制模式,根据进、出水COD浓度以及ORP等参数实时调整药剂投加量,实现芬顿工艺的精确控制,确保出水水质稳定达标。芬顿精确加药控制系统应用后提升了13%的处理水量,同时节省成本约0.671 3元/m³,具有明显的经济效益。此外,芬顿精确加药控制系统的应用有效推进了污水处理厂药剂投加的精细化管理,增强了出水水质的稳定性。

关键词: 废水处理; 芬顿工艺; 精确控制; 双氧水; 硫酸亚铁

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)16-0127-04

Application of Fenton Precise Dosing Control System in a Wastewater Treatment Plant

NIU Ru-bao¹, SONG Wei², CHEN Wei², CUI Xue-pan², ZHAO Gui-jiang²,
LIU Yang²

(1. Zibo Municipal Administration Sanitation Service Center, Zibo 255030, China; 2. Everbright Water <Zibo> Co. Ltd., Zibo 255086, China)

Abstract: The critical reaction conditions for the Fenton process, such as pH and oxidation-reduction potential(ORP), were determined in an industrial park WWTP through experiments. The optimal flow ratio of hydrogen peroxide to ferrous sulfate was established as 1:13, furnishing a theoretical basis for the design of the precise dosing system. Based on this, a “feedforward + feedback” closed-loop control mode was employed. The dosage of chemicals was adjusted in real time in accordance with parameters like COD concentration and ORP of the influent and effluent, achieving precise control of the Fenton process and guaranteeing the stability and compliance of the effluent quality. The research results suggest that the application of the Fenton precise dosing control system increased the treatment capacity by 13% and reduced the unit cost by approximately 0.671 3 yuan/m³, demonstrating obvious economic benefits. Furthermore, the Fenton precise control system effectively promoted the refined management of chemical dosing in the wastewater treatment plant, enhanced the stability of the effluent.

Key words: wastewater treatment; Fenton process; precise control; hydrogen peroxide; ferrous sulfate

芬顿工艺因具有氧化能力强、反应速度快等优势,成为处理含有高浓度难降解有机物废水的首选工艺^[1]。然而,芬顿工艺对反应条件、药剂配比和投加量有严格的控制要求。目前,芬顿工艺单元相关过程参数仪表无法实现自动调节,需根据水质、水量情况手动调整药剂投加量及配比。当前的芬顿工艺尚无法实现药剂投加量的精准控制,存在药剂欠加或过量投加的情况,导致出水稳定性差,人工操作难度较大^[2-3]。

近年来,随着精确加药技术的推广,对于反应为简单的线性关系、对应关系明确的药剂投加过程,已能通过机器算法实现前馈和反馈控制。例如,可以通过机器算法对化学除磷药剂进行精确投加,碳源精准投加系统利用反硝化菌降解硝态氮,

实现对生物处理过程总氮指标的精准控制^[4-5]。但是,对于芬顿精确加药系统的研究仍然非常有限。为了提高芬顿工艺的运行效率、节约运行成本,以山东省某工业园区污水处理厂芬顿处理单元为研究对象,设计试验确定最佳投药配比,提出一种芬顿工艺精确加药控制系统及其方法,以解决现有技术问题。

1 污水处理厂概况

该工业园区污水处理厂处理能力为 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准。采用两级AO(厌氧-好氧)工艺、芬顿氧化、粉炭吸附、臭氧催化氧化和炭砂滤池处理工艺。

工艺流程见图1。

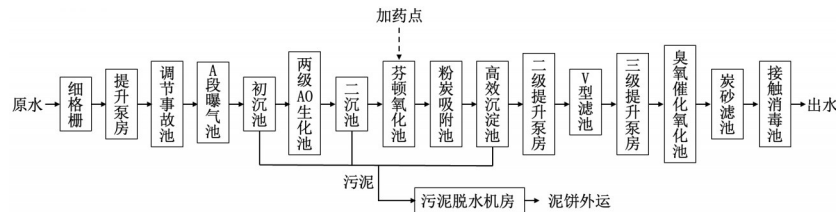


图1 工业园区污水处理厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process of the industrial park WWTP

目前,该污水处理厂的进水流量约 $220 \text{ m}^3/\text{h}$,通过“一企一管”方式接收上游企业的排水,其中化工废水占45%,制药废水占40%,印染废水占10%,农药废水等其他废水占5%。由于受上游企业的生产周期影响,污水处理厂平均水量为 $5\,280 \text{ m}^3/\text{d}$,进、出水水质存在较大波动。

实际进、出水水质具体数据见表1。

表1 实际进、出水水质

Tab.1 Actual influent and effluent quality

| 项目 | $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | | | |
|------|---------------------------------|------------------------|-------|-----------|
| | COD | $\text{NH}_3\text{-N}$ | TN | TP |
| 实际进水 | 54~186 | 1~22 | 10~41 | 0.1~1.5 |
| 实际出水 | 3~24 | 0.01~1.00 | 8~13 | 0.01~0.03 |

2 试验方法

2.1 试验试剂

芬顿法相关化学试剂包括废硫酸、15%(质量分数)硫酸亚铁、27.5%(质量分数)双氧水、32%(质量分数)液碱、0.1%(质量分数)聚丙烯酰胺(PAM)。

试验用水为该污水处理厂二沉池出水,pH为7.8~8.1,COD为120~150 mg/L。

2.2 试验步骤及测定方法

采用HJ-6B型六联磁力搅拌器进行芬顿药剂投加量的试验。取1 L试验水样置于烧杯中,加入废硫酸调节pH。随后加入硫酸亚铁和过氧化氢,反应时间为45 min,记录反应前后的pH和氧化还原电位(ORP)。反应结束后,加入液碱调节pH至中性,加入PAM,快速搅拌1 min,随后慢速搅拌10 min,以促进沉淀。

取静置30 min后的上清液测定COD,方法为《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017)。

3 控制系统建立

3.1 加药参数的确定

基于芬顿小试结果及运行经验,确定了芬顿精确加药控制系统的参数:①调酸区pH控制在5.1~5.4,反应区pH控制在2.8~3.5,调碱区pH控制在8.3~8.8;②双氧水与硫酸亚铁流量比为1:13;③双氧水的投加单耗控制在200~400 mg/L;④反应区控制 $\text{ORP} \geq 440 \text{ mV}$ 。

3.2 加药模型的建立

根据芬顿出水COD浓度及对应的加药系数,计算加药流量:

$$Q_{\text{H}_2\text{O}_2} = \frac{(C_1 - C_{\text{sp}})}{27.5\%} Q \quad (1)$$

$$Q_{\text{FeSO}_4} = Q_{\text{H}_2\text{O}_2} \beta \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{H}_2\text{O}_2}$ 为双氧水加药流量, m^3/h ; C_1 为芬顿池进水COD浓度, mg/L ; C_{sp} 为芬顿池出水目标设定COD浓度, mg/L ; Q 为芬顿池进水量, m^3/h ; Q_{FeSO_4} 为硫酸亚铁加药流量, m^3/h ; β 为硫酸亚铁加药系数,取13。

3.3 控制系统组成

芬顿精确加药控制系统由水量控制和加药控制两个主要模块组成。①水量控制模块:包括进水泵房、调节池及之间相连接的总进水流量计; A段曝气池; 初沉池、生化池以及之间连接的生化池进水量流量计; 二沉池和芬顿反应池以及之间连接的芬顿进水量流量计。②加药控制模块:该模块连接于生化池和芬顿反应池之间,包括酸碱控制模块、双氧水控制模块和硫酸亚铁控制模块。

3.4 控制模型设计

控制策略:根据AO生化池进水提升泵变频控制实现芬顿进水的恒流量控制,在水量稳定的前提下,设定调酸区pH计目标值为5.1~5.4,废硫酸加药流量通过比例-积分-微分(PID)进行调节,避免调酸区pH大幅波动。待满足芬顿调酸区pH要求后,依据芬顿进出水COD变化差值和芬顿反应池ORP仪表,系统综合判断,并自动调节芬顿试剂(双氧水、硫酸亚铁)投加量。控制策略原理如图2所示。

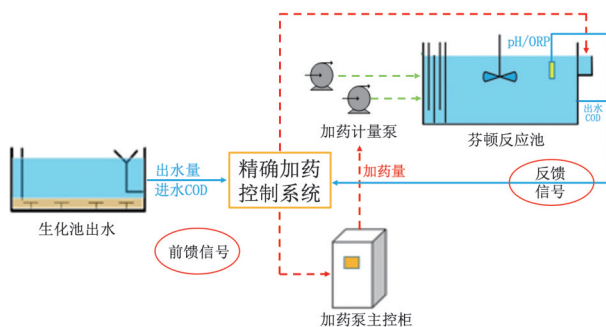


图2 控制策略原理

Fig.2 Schematic diagram of control strategy

水量控制模块通过对AO生化池进水提升泵的变频控制,实现生化池进水恒流量控制,生化池出

水自流至芬顿氧化池,实现芬顿进水量流量计流量恒定。芬顿进水量流量计用于监测芬顿进水量,以计算芬顿药剂投加量。

加药控制模块包括反应前控制阶段和反应后控制阶段,反应前控制阶段包括调酸区和调碱区的pH调控,采用反馈机制调整酸、碱投加量,控制算法为PID控制,即:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

式中: K_p 为比例增益,与比例度成倒数关系,调酸区和调碱区 K_p 分别为0.05、0.06; T_i 为积分时间常数,取60; T_d 为微分时间常数,取10; $u(t)$ 为PID控制器的输出信号; $e(t)$ 为给定值 $r(t)$ 与测量值之差,取5 s。

反应后控制阶段采用前馈和反馈综合控制,根据二沉池不同出水COD,调整双氧水、硫酸亚铁加药量,根据出水COD对加药量进行修正。在芬顿反应区进水处测量COD浓度,记为 C_1 ,设定目标出水COD值,记为 C_{sp} ,两者差值即理论去除COD值,记为 ΔC 。根据现场采集数据,利用加药量计算模型计算双氧水投加量,加药泵接收到加药指令,按设定频率投加药剂进行前馈控制。

系统采集芬顿反应池实际出水COD浓度 C_2 ,与设定目标值 C_{sp} 计算偏差 $\Delta C'$,进行反馈调节控制,修正加药量计算公式如下:

$$Q'_{\text{H}_2\text{O}_2} = \frac{(\Delta C + \Delta C')}{27.5\%} Q \quad (4)$$

$$Q'_{\text{FeSO}_4} = Q'_{\text{H}_2\text{O}_2} \beta \quad (5)$$

式中: $Q'_{\text{H}_2\text{O}_2}$ 为反馈修正后的双氧水投加流量, m^3/h ; $\Delta C'$ 为 $C_2 - C_{\text{sp}}$, mg/L ; Q'_{FeSO_4} 为反馈修正后的硫酸亚铁投加流量, m^3/h 。

在反馈计算中,若 C_2 值高于45 mg/L 或芬顿反应池ORP低于440 mV,则在修正后投加量基础上提高 $k\%$ (k 为经验值,该厂取10),直至 C_2 值低于预警值,加药量恢复正常调节;当 C_2 值高于50 mg/L 时,切换至手动模式,由人工控制加药泵流量,保证出水安全。

4 运行分析

芬顿精确加药控制系统稳定运行后,水质稳定达标,处理水量明显提高,加药量得到精确控制,药剂使用量明显降低,节省了运行成本。

2023年—2024年芬顿单元COD去除量由70.20 mg/L提升至79.55 mg/L,同比升高13%;去除单位COD药剂投加量与2021年—2022年相比,除石灰外,均有所降低,其中:硫酸亚铁降低0.17 mg/L,双氧水降低0.40 mg/L,液碱降低11.36 mg/L,石灰单耗量升高3.27 mg/L。具体运行数据见表2。以2024年采购单价计算,药剂单耗的降低使得单位运行成本下降约0.668 9元/t。以2023年1月—2024年9月水量核算,运行成本节省约154万元,折合产生经济效益88万元/a。

表2 芬顿单元运行数据

Tab.2 Operation data of Fenton process

| 项目 | 2021年—2022年 | 2023年1月—2024年9月 | 比较结果 |
|---|-------------|-----------------|--------|
| 处理水量/ 10^4 m^3 | 371.514 | 230.224 | — |
| 芬顿单元COD去除量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 70.20 | 79.55 | 9.35 |
| 硫酸亚铁投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 6.38 | 6.21 | -0.17 |
| 双氧水投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 4.20 | 3.80 | -0.40 |
| 液碱投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 14.25 | 2.89 | -11.36 |
| 石灰投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 7.69 | 10.96 | 3.27 |
| 注: 2023年1月—2024年9月节省硫酸亚铁、双氧水、液碱的投加量分别为31.5、74.4、2 080.6 t,石灰投加量增加599.1 t。 | | | |

5 结论

① 通过试验确定芬顿单元的pH、ORP等最佳反应条件参数,得到双氧水与硫酸亚铁的最佳流量比为1:13,为精确加药控制系统设计提供理论数据支撑。

② 采用“前馈+反馈”的闭环控制模式,根据芬顿工艺进、出水COD浓度实时调整药剂投加量,确保出水水质稳定达标,同时实现精确加药控制。

③ 芬顿精确加药控制系统应用后处理水量提升13%,单位成本节省约0.671 3元/ m^3 ,具有潜在的推广价值。

④ 通过芬顿精确加药系统控制药剂投加量,有效推进了污水处理厂药剂投加的精细化管理,增强了出水的稳定性,减少了药剂使用量,减轻了运

营人员的工作负担。

参考文献:

- [1] 许传波,苗红,周凯,等. Fenton氧化工艺及对COD去除率的影响[J]. 天津造纸,2019,41(2):31-36.
XU Chuanbo, MIAO Hong, ZHOU Kai, *et al.* Fenton oxidation process and its effect on COD removal rate [J]. Tianjin Paper Making, 2019, 41(2): 31-36 (in Chinese).
- [2] XU M, WU C Y, ZHOU Y X. Advancements in the Fenton process for wastewater treatment [J]. Advanced Oxidation Processes—Applications, Trends, and Prospects, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.90256.
- [3] SHOKRI A, NASERNEJAD B, FARD M S. Challenges and future roadmaps in heterogeneous electro-Fenton process for wastewater treatment [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2023,234(3):153.
- [4] 董威,胡田力,梁毅,等. 一种基于数理模型和预测控制的智能加药系统及方法:CN202111517003.9[P]. 2024-11-28.
DONG Wei, HU Tianli, LIANG Yi, *et al.* An Intelligent Dosing System and Method Based on Mathematical Model and Predictive Control: CN202111517003.9[P]. 2024-11-28(in Chinese).
- [5] 尚庆波. 城市污水处理厂化学除磷智能加药控制技术现状、发展趋势和挑战[J]. 环境保护前沿,2024,14(3):414-417.
SHANG Qingbo. Current situation, development trend and challenges of intelligent dosing control technology for chemical phosphorus removal in urban sewage treatment plants [J]. Advances in Environmental Protection, 2024,14(3):414-417(in Chinese).

作者简介:牛汝宝(1972—),男,山东淄博人,公共管理硕士(MPA),主要从事环境卫生管理、市政设施管理、城镇生活污水处理运行监管以及垃圾分类、固废处理等工作。

E-mail:nrb999@163.com

收稿日期:2025-01-20

修回日期:2025-04-09

(编辑:衣春敏)