

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.12.019

# 撬装式Fenton氧化+生物法处理染料渗坑废水

曾胜军

(云南水务投资股份有限公司, 北京 100081)

**摘要:** 针对染料厂渗坑的分散性和废水成分的复杂性,结合水质化验结果和前期预试验,选用Fenton氧化+厌氧+缺氧+好氧+活性炭吸附和絮凝沉淀组合处理工艺,并制造了撬装式处理设备。实际运行结果表明,采用Fenton氧化能够提高染料渗坑废水的可生化性,后续生化工艺可对废水中有机物、氨氮和磷等污染物进行高效处理,最后通过活性炭吸附对色度、COD等进一步处理,絮凝沉淀强化对SS和磷的去除,最终实现渗坑废水处理水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。撬装式设备可以灵活移动,适用于分散性强的渗坑废水处理。

**关键词:** 染料渗坑废水; 撬装式设备; 难降解污染物; Fenton氧化

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)12-0121-04

## Skid-mounted Equipment Based on Fenton Oxidation + Biological Treatment Process for Dyeing Seepage Pit Wastewater Treatment

ZENG Sheng-jun

(Yunnan Water Investment Co. Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:** Addressing the decentralized nature of dyeing factory seepage pits and the complexity of wastewater composition, a combined Fenton oxidation + anaerobic + anoxic + aerobic + activated carbon adsorption with flocculation sedimentation treatment process was selected based on water quality analysis results and preliminary experiments. Skid-mounted treatment equipment was subsequently manufactured. Operational results demonstrate that Fenton oxidation effectively enhances the biodegradability of the dyeing seepage pit wastewater. Subsequent biological processes efficiently remove organic matter, ammonia nitrogen, phosphorus, and other pollutants. Activated carbon adsorption further reduces chromaticity and COD, while flocculation sedimentation enhances the removal of SS and phosphorus. Ultimately, the treated effluent quality meets the first level class A standard specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The skid-mounted equipment offers flexible mobility, making it suitable for treating highly decentralized seepage pit wastewater.

**Key words:** dyeing seepage pit wastewater; skid-mounted equipment; refractory pollutants; Fenton oxidation

### 1 工程概况

沧州市沧县是河北省重要的化工原料生产基地。2017年,河北省生态环境厅公开的第16批中央生态环境保护督察群众信访举报重点关注案件边督

边改情况显示,沧县兴济镇化工厂地块被查出存在不同程度土壤污染和地下水污染问题。根据举报信息,该地块原有4家化工企业,其生产产品与2013年沧县某村“红水事件”中化工厂一致。“红水事件”曝

光后,这4家企业因环保问题陆续停产,但其长期排放的有害废水和就地填埋的化工废料造成某镇4个区域的地下水和土壤严重污染。此外,“原化工厂附近低洼的边沟、铁路地道桥等地方存在着大量外渗红水”,其整个渗坑长400 m,宽8 m,深约1 m。在此背景下,尽快解决渗坑废水处理问题,加快废水处理工程的建设迫在眉睫。

该工程处理水量约3 000 m<sup>3</sup>,设计处理规模为2 m<sup>3</sup>/h,拟采用一体化撬装处理设备。现场取样分析,COD、BOD<sub>5</sub>、SS、氨氮、总氮、磷酸盐、硝基苯、氯苯和对-硝基氯苯均存在超标现象(见表1)。

表1 染料渗坑废水水质

Tab.1 Wastewater quality of the dyeing seepage pit

| 项目                                                   | 实测值     | 设计原水  | 设计出水 |
|------------------------------------------------------|---------|-------|------|
| pH                                                   | 5.3     | 5.5   | 6~9  |
| SS/(mg·L <sup>-1</sup> )                             | 200     | 200   | 10   |
| COD/(mg·L <sup>-1</sup> )                            | 203     | 250   | 50   |
| BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )              | 61.5    | 65    | 10   |
| 氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )                             | 39.9    | 40    | 5(8) |
| 总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )                             | 40.8    | 45    | 15   |
| 色度/倍                                                 | 200     | 200   | 30   |
| 石油类/(mg·L <sup>-1</sup> )                            | 0.19    | 0.25  | 1    |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> ) | 951     | 1 000 |      |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> ) | 4       | 4     | 0.5  |
| 铁/(mg·L <sup>-1</sup> )                              | 2.44    | 2.5   |      |
| 电导率/(μS·cm <sup>-1</sup> )                           | 5 360   | 5 500 |      |
| 溶解性总固体/(mg·L <sup>-1</sup> )                         | 3 680   | 4 000 |      |
| 氰化物/(mg·L <sup>-1</sup> )                            | <0.004  | 0.005 | 0.5  |
| 挥发酚(以苯酚计)/(mg·L <sup>-1</sup> )                      | 0.026 3 | 0.05  | 0.5  |
| 苯胺类/(mg·L <sup>-1</sup> )                            | 0.82    | 1     | 0.5  |
| 硝基苯类/(mg·L <sup>-1</sup> )                           | 9.7     | 10    | 2.0  |
| 氯苯/(mg·L <sup>-1</sup> )                             | 0.8     | 1     | 0.3  |
| 对-硝基氯苯/(mg·L <sup>-1</sup> )                         | 3.33    | 3.5   | 0.5  |
| 2,4-二硝基氯苯/(mg·L <sup>-1</sup> )                      | 0.018 7 | 0.05  | 0.5  |

该工程设计出水水质须达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,处理出水排至河道下游。

## 2 染料废水处理工艺的确定

### 2.1 工艺选择的思路

渗坑废水往往具有成分复杂、含盐量高、可生化性差以及生物毒性大等特点<sup>[1]</sup>,按照污染物种类可分为废酸污染、重金属污染、可降解有机污染、难降解有机污染等类型<sup>[2-4]</sup>。

针对渗坑水质超标指标进行分析:①SS大部分

为河道的淤泥和部分大分子染料颗粒,前期试验证明,可以通过常规混凝沉淀工艺去除;②COD、BOD<sub>5</sub>可在生化池活性污泥的作用下部分降解;③通过设置硝化池和反硝化池,采用多级A/O工艺可实现氨氮和总氮的达标排放;④对硝基苯、氯苯、对-硝基氯苯类,目前开展了Fenton氧化、光催化氧化、臭氧氧化等高级化学氧化处理研究<sup>[5]</sup>,相比而言,Fenton氧化工艺最成熟,应用最广泛。因此,该项目考虑采用高级氧化法和生物法联合对渗坑废水进行处理,以达到相应地表水功能区水质要求。

### 2.2 工艺流程

染料渗坑废水处理工艺流程见图1。

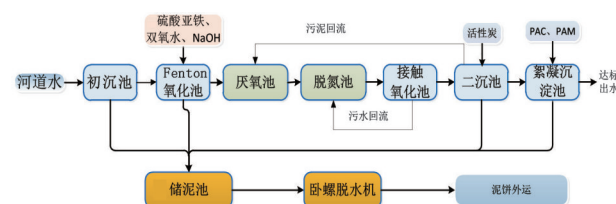


图1 染料渗坑废水处理流程

Fig.1 Flow chart of treatment process for dyeing seepage pit wastewater

渗坑废水通过潜污泵提升至初沉池,投加混凝剂和絮凝剂,将SS降至20 mg/L以下;废水自流进入Fenton氧化池(pH调节、Fe<sup>2+</sup>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>反应沉淀和pH回调)。Fenton属于强氧化剂,可将水中的难降解有机物例如硝基苯类大分子分解成易降解小分子物质<sup>[6]</sup>。经过高级氧化处理后的废水依次通过厌氧池释磷菌的释磷作用和生化池后释磷菌的吸磷作用,最终通过排泥的方式除磷。在厌氧池后设置脱氮池,反硝化菌将后续生化池的硝态氮转化成氮气排出,从而达到去除总氮的目的。接触氧化池是在活性污泥池中添加填料,可以增加系统活性污泥浓度、降低污泥负荷,对该项目难降解废水具有很好的处理效果。接触氧化池出水经过后续沉淀、絮凝沉淀作用,可使COD、SS进一步降低,达到一级A排放标准。

## 3 主体工艺设计

### 3.1 预处理

#### ① 初沉系统

因废水中SS较高,且渗坑已存在近10年,SS大部分为无机物,为避免后续无机污泥增多影响生物池的污泥活性,考虑在前端完成SS去除。

设初沉池 1 座,采用钢制防腐结构,尺寸为 1.2 m×1.2 m×2.5 m,表面负荷为 1.38 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)。

② 高级氧化处理系统

废水经过长时间的净化,易降解污染物已大幅降低,剩余 COD 大部分为难降解物质,因此需采用高级氧化作为预处理<sup>[7]</sup>。目前常用的高级氧化工艺主要为臭氧氧化、Fenton 氧化<sup>[5]</sup>,而臭氧氧化所需设备较多,且水深需达到 5.5~6.0 m 才能获得满意的效果。鉴于该项目水量较小,设备单体水深难以达到 5 m,同时臭氧氧化所需设备较多,运行功率较大,对硝基化合物处理效果不佳,因此,臭氧氧化不适用。相比臭氧氧化,Fenton 氧化仅需增加双氧水、硫酸亚铁、pH 调节加药装置,且该项目水质呈酸性,故考虑采用 Fenton 氧化作为预处理。

Fenton 氧化池:pH 调节池 1 尺寸为 0.6 m×0.6 m×1.2 m,双氧水投加池尺寸为 0.6 m×0.6 m×1.2 m,反应池尺寸为 1.2 m×1.2 m×2.5 m,停留时间为 1.4 h,设玻璃钢防腐碳钢搅拌机 1 台。Fenton 沉淀池尺寸为 1.2 m×1.2 m×2.5 m,pH 调节池 2 尺寸为 0.6 m×0.6 m×1.2 m。 $m(\text{H}_2\text{O}_2):m(\text{COD})=3:1$ , $n(\text{Fe}^{2+}):n(\text{H}_2\text{O}_2)=1:4$ 。

3.2 生化处理

设置厌氧池 1 座,用于生物除磷;设置 2 级缺氧池去除总氮,设置 2 级生化池去除 COD、BOD<sub>5</sub> 和氨氮。

① 厌氧池:尺寸为 1.2 m×1.7 m×2.5 m,停留时间为 2 h。

② 缺氧池:按照最低温度 10℃考虑,最小反硝化速率为 0.023 kgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(kgMLSS·d),一级反硝化池和二级反硝化池尺寸均为 2.0 m×2.0 m×2.5 m,停留时间为 8 h。曝气池 MLSS 为 4 000 mg/L,MLVSS 为 2 800 mg/L。

③ 好氧池:污泥负荷为 0.075 kgBOD<sub>5</sub>/(kgMLSS·d),硝化速率为 0.034 kgNH<sub>3</sub>-N/(kgMLSS·d),一级硝化池尺寸为 2.0 m×2.0 m×2.5 m,二级硝化池尺寸为 2.0 m×2.0 m×2.5 m,停留时间为 8 h。设二级硝化池污水回流泵、沉淀池污泥回流泵各 1 台。

3.3 深度处理

因废水色度较高且难降解物质较多,故考虑采用深度处理保障水质达标。将粉末活性炭投加至生化出水,加强对色度和 COD 的吸附去除。二沉池尺寸为 2.0 m×2.0 m×2.5 m,表面负荷为 0.5 m<sup>3</sup>/

(m<sup>2</sup>·h),活性炭投加量为 30 mg/L。絮凝沉淀池尺寸为 1.6 m×1.6 m×2.5 m,表面负荷为 0.78 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),PAC 投加量为 20 mg/L,PAM 投加量为 2 mg/L。

以上设备采用钢制,其中预处理+厌氧池合建,厌氧、缺氧池合建,部分好氧池合建;另外一部分好氧池和 2 座沉淀池组合,这 4 个组合通过管道连接形成撬装式设备处理渗坑染料废水。

4 运行效果及经济分析

该项目自 2018 年 5 月进入调试运行阶段,进水 COD 为 180 mg/L、BOD<sub>5</sub> 为 60 mg/L;经过 Fenton 氧化作用,COD 为 150 mg/L,BOD<sub>5</sub> 为 100 mg/L,B/C 提升至 0.67;经过生化处理后,出水 COD 为 50 mg/L,二沉池中添加活性炭 10 mg/L,色度达到 15 倍以下,氨氮为 0.5 mg/L,总氮为 11 mg/L,硝基苯、氯苯、对-硝基氯苯未检出,达到一级 A 排放标准。最终出水 SS 在 10 mg/L 以下。4 个月后,该渗坑废水得到全部处理。该项目设计处理规模为 2 m<sup>3</sup>/h,实际日处理量为 48 m<sup>3</sup>/d,占地 270 m<sup>2</sup>,其中集装箱式设备间占地 96 m<sup>2</sup>。总投资为 200 万元,吨水投资为 4 万元/m<sup>3</sup>。运行费用分析见表 2。

表 2 染料渗坑废水处理工程经济分析

Tab.2 Economic analysis of dyeing seepage pit wastewater treatment project

| 项目        | 处理成本/(元·m <sup>-3</sup> ) | 备注                                                    |
|-----------|---------------------------|-------------------------------------------------------|
| 电         | 3.853                     | 电耗为 5.75 kW·h/m <sup>3</sup> ,价格按 0.67 元/(kW·h)计      |
| 工业葡萄糖     | 0.380                     | 投加量为 100 mg/L,价格按 3 800 元/t 计                         |
| 固体 PAC    | 0.036                     | 投加量为 20 mg/L,价格按 1 800 元/t 计                          |
| 阴离子 PAM   | 0.029                     | 投加量为 2 mg/L,价格按 14 500 元/t 计                          |
| 活性炭       | 0.240                     | 投加量为 30 mg/L,价格按 8 000 元/t 计                          |
| 硫酸亚铁      | 0.168                     | 投加量为 335 mg/L,价格按 500 元/t 计                           |
| 双氧水       | 4.200                     | 投加量为 1 200 mg/L,价格按 3 500 元/t 计(浓度为 27.5%)            |
| 硫酸/氢氧化钠   | 0.390                     | pH 由 5.5 调至 4,由 4 调至 7                                |
| 自来水(药剂配制) | 0.021                     | 自来水量为 0.35 m <sup>3</sup> /d,水价按 3 元/m <sup>3</sup> 计 |
| 人工        | 6.667                     | 工资为 5 000 元/(人·月),定员 2 人                              |
| 直接运行成本    | 15.982                    |                                                       |

## 5 结论

① 染料渗坑废水具有多点性、水量固定等特点,采用撬装式设备可灵活移动,相比于固定处理设备造价低,还可根据水质对工艺流程进行调整。

② 相比于其他氧化工艺,Fenton氧化更能有效地氧化硝基苯类化合物,且在废水处理规模较小、处理场地小等情况下更具优势。

③ 采用Fenton氧化+厌氧+缺氧+好氧+活性炭吸附+絮凝沉淀组合工艺处理染料渗坑废水可实现稳定达标排放。

## 参考文献:

- [1] 段云霞,石岩,曾猛,等. 高含盐难降解染料废水渗坑治理工艺设计及运行[J]. 水处理技术,2017,43(6): 48-52.  
DUAN Yunxia, SHI Yan, ZENG Meng, *et al.* Process design and operation of high salt containing and refractory dye wastewater treatment in soakaway [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(6): 48-52 (in Chinese).
- [2] 段云霞,张涛,石岩,等. 难降解制药废水渗坑治理的工艺设计及运行效果[J]. 中国给水排水,2018,34(10):96-100.  
DUAN Yunxia, ZHANG Tao, SHI Yan, *et al.* Process design and operation effect for treatment of a pharmaceutical wastewater seepage pit [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(10): 96-100 (in Chinese).
- [3] 杨舒珺. 重金属工业废水渗坑的风险评价及渗坑废水处理研究[D]. 天津:天津大学,2018.  
YANG Shujun. Study on Risk Assessment of Seepage Pit of Heavy Metal Industrial Wastewater and Seepage Pit Wastewater Treatment [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018 (in Chinese).
- [4] 刘琳. 气相色谱-质谱技术在渗坑水质有机污染筛查中的应用[D]. 北京:中国地质科学院,2020.  
LIU Lin. Application of Gas Chromatography-Mass Spectrometry in Organic Contamination Screening of Seepage Pit Water [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2020 (in Chinese).
- [5] 吴晴,刘金泉,王凯,等. 高级氧化技术在难降解工业废水中的研究进展[J]. 水处理技术,2015,41(11): 25-29.  
WU Qing, LIU Jinquan, WANG Kai, *et al.* Research progress of advanced oxidation processes in the treatment of refractory industrial wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(11): 25-29 (in Chinese).
- [6] 安立超,余宗学,严学亿,等. 利用芬顿试剂处理硝基苯类生产废水的研究[J]. 环境科学与技术,2001(S2):3-4,17.  
AN Lichao, YU Zongxue, YAN Xueyi, *et al.* Application of Fenton's reagent for treatment of nitrobenzene manufacturing process wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2001 (S2): 3-4, 17 (in Chinese).
- [7] 曹美玲. 铁碳微电解、芬顿氧化及其组合工艺提高难降解有机废水可生化性的对比研究[D]. 南昌:江西理工大学,2020.  
CAO Meiling. Comparative Study on Improving Biodegradability of Refractory Organic Wastewater by Iron-carbon Micro-electrolysis, Fenton Oxidation and Their Combination Process [D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology, 2020 (in Chinese).

作者简介:曾胜军(1984—),男,湖北咸宁人,学士,工程师,主要研究方向为工业废水处理技术及工程应用。

E-mail: zengsj1984@163.com

收稿日期:2022-04-24

修回日期:2022-09-14

(编辑:衣春敏)