

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.04.020

硫自养反硝化+改良型Fenton+活性焦吸附用于 污水厂提标改造

张增国, 谭心, 梁世华, 洪卫, 王红燕, 吴明强
(山东省资源环境建设集团有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 针对某设计规模为3万m³/d工业园区污水处理厂出水COD、TN及TP无法稳定满足排放标准的问题,采用“硫自养反硝化+改良型Fenton+活性焦吸附”组合工艺进行提标改造。实践表明,该组合工艺在工业园区污水深度处理方面展现出良好的适应性和稳定性,具有处理效率高、运行成本低及抗冲击负荷能力强等优势。连续6个月的水质检测数据表明,在提标改造工程进水COD、TN及TP均值分别为102.0、13.56、0.91 mg/L的条件下,处理出水COD、TN及TP均值分别为25.6、8.15、0.09 mg/L, COD、TP满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准, TN满足《山东省城市排水“两个清零、一个提标”工作方案》要求。提标改造工段直接处理费用为1.8元/m³。

关键词: 硫自养反硝化; 改良型Fenton; 活性焦吸附; 工业园区; 提标改造

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)04-0132-05

Application of Sulfur Autotrophic Denitrification + Modified Fenton + Activated Coke Adsorption in the Upgrading and Renovation Project of Wastewater Treatment Plant

ZHANG Zengguo, TAN Xin, LIANG Shihua, HONG Wei, WANG Hongyan,
WU Mingqiang

(Shandong Resources and Environment Construction Group Co. Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: To resolve the chronic compliance challenges of a 30 000 m³/d industrial park wastewater treatment facility regarding increasingly rigorous discharge limits for COD, TN, and TP, an integrated treatment strategy incorporating “sulfur autotrophic denitrification + modified Fenton + activated coke adsorption” technologies was implemented for process enhancement. Operational evaluations revealed that the multi-stage treatment configuration demonstrated robust operational stability and process adaptability in industrial park wastewater remediation applications, achieving notable performance in treatment efficiency, cost-effectiveness, and system resilience. The six-month continuous water quality monitoring data indicate that, under conditions where the average concentrations of COD, TN, and TP in influent of the upgrading and renovation project were 102.0 mg/L, 13.56 mg/L, and 0.91 mg/L, respectively, the average concentrations of COD, TN, and TP in the effluent were 25.6 mg/L, 8.15 mg/L, and 0.09 mg/L, respectively, meeting the class IV thresholds stipulated in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002) and *Work Plan of “Dual Zero and One Upgrade” for Urban*

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2024TSGC0020)

通信作者: 洪卫 E-mail: honw@163.com

Drainage in Shandong Province regulatory targets. The competitive operational expenditure is 1.8 CNY/m³.

Keywords: sulfur autotrophic denitrification; modified Fenton; activated coke adsorption; industrial park; upgrading and renovation

1 工程概况

近年来,为优化工业资源配置,特色工业园区及技术示范区等各类工业集聚区发展迅速^[1-2]。山东某工业园区以农药、医药、化工新材料、石油副产品等为主导产业,其污水处理厂规模为3万 m³/d。随着园区发展,入园企业数量及规模不断扩大,污水排放量波动加剧,水质成分复杂化,废水处理难度大幅增加。该园区污水处理厂原有处理系统出现生化脱氮效率降低,COD及总氮处理能力无法满足排放标准等问题^[3],因此,亟须对污水处理设施进行提标改造。选择适宜的处理工艺并优化运行参数,可显著提升污水处理效果,助力地区生态文明建设向纵深发展^[4-5]。

2 污水处理厂现状及存在问题

2.1 原设计水质及工艺流程

该园区污水处理厂原设计出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,具体进、出水水质见表1。该厂设计处理规模为3万 m³/d,原处理工艺为臭氧预氧化+A²O生化+混凝沉淀,处理后出水COD为42~53 mg/L、TN为11.5~15.9 mg/L、TP为0.45~0.64 mg/L,基本满足一级A标准。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	COD/ (mg/L)	BOD ₅ / (mg/L)	SS/ (mg/L)	NH ₃ -N/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	pH
进水	≤350	≤200	≤300	≤45	≤60	≤8	6~9
出水	≤50	≤10	≤10	≤5	≤15	≤0.5	6~9

2.2 原工艺存在的问题及提标改造思路

为改善区域水环境质量,当地环保主管部门提出了更为严格的区域排放限值标准,具体为:COD、TP执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准,即COD≤30 mg/L、TP≤0.3 mg/L;依据《山东省城市排水“两个清零、一个提标”工作方案》要求,TN控制在10~12 mg/L。因此,原有污水处理系统面临严峻挑战,若沿用旧有工艺,出水水质将无

法满足新限值标准。

同时,随着入园企业数量增加、产能扩大,废水量不断上升,且园区引入的新企业多属于化工、医药行业,排放的废水成分复杂,含难降解有机污染物,而园区污水处理厂原处理工艺对这类污染物的去除效果有限,很难满足排放标准要求,提标改造迫在眉睫。目前该工业园区污水处理厂主要采用“臭氧预氧化+A²O生化+混凝沉淀”传统工艺,在实际运行中逐渐暴露出生化系统脱氮效率明显下降、COD和TN已无法稳定达到出水标准等多个问题,尤其在进水负荷剧烈波动时表现更为突出,可能是C/N比失衡、微生物适应性不足所致。然而,改造过程中仍面临以下重点与难点:①水质复杂且波动大,难降解有机物含量高,对工艺耐受性提出更高要求;②现有构筑物布局紧凑,可用场地有限,需在不停产前提下实现改造;③需选择抗冲击能力强、处理效率高的适用技术;④改造工程需兼顾运行成本与经济可行性,避免过度投资。因此,提标改造需从优化生化系统、引入深度处理单元等多方面系统推进,以实现稳定达标排放。

针对园区污水中污染物组分的特点,提标工程采用“硫自养反硝化+改良型Fenton+活性焦吸附”深度处理组合工艺(见图1),达到深度去除COD、TN、TP的目的。传统反硝化依赖有机碳源的投加以提高总氮去除率,而园区污水经过原有生化工艺处理后,碳氮比大幅降低。提标改造工艺通过设置硫自养反硝化滤池,在无需投加有机碳源的条件下,利用自养菌高效转化硝态氮,降低总氮指标;针对难生物降解有机污染物,采用改良型Fenton技术对反应条件进行精确控制,实现对生化处理后废水中残存有机污染物的“分子羧基化”,羧基化污染物分子再与金属盐离子(Fe³⁺、Al³⁺等)发生络合反应生成大分子羧酸金属盐络合物^[6],从而去除COD、TP等污染物;最后结合活性焦吸附技术,凭借活性焦多孔结构的强吸附性能,深度截留水中残留的微量污染物与色度物质,形成“硫自养反硝化+改良型Fenton+

活性焦吸附”组合工艺体系,确保出水稳定达标排放。

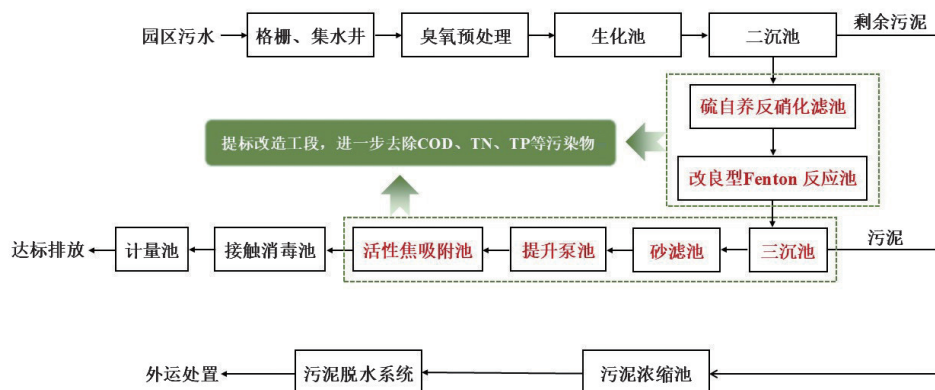


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

3 提标改造主要构筑物及设计参数

3.1 硫自养反硝化滤池

园区污水经原有生化处理系统处理后,由二沉池进入硫自养反硝化滤池。硫自养反硝化滤池中使用的填料为市售复合活性生物载体,由硫、天然矿物(白云石等)、生物促生剂等组分合理配比而成,填料粒径为1~6 mm。利用填料颗粒提供的单质硫作为电子供体,附着在自养滤料表面上的硫自养反硝化细菌将 NO_x^- -N转化成 N_2 ,完成脱氮反应^[6]。新建硫自养反硝化滤池1座,采用地上钢筋混凝土结构,尺寸 $L \times B \times H = 29.7 \text{ m} \times 11.3 \text{ m} \times 9.0 \text{ m}$,分8格,单格过滤面积 30 m^2 ,平均滤速 5.21 m/h ,强制滤速 5.95 m/h ;填料层高度 5.50 m ;采用气水联合反冲洗,反冲洗水经管道返回前端生化系统进行处理。单独气冲洗强度约 $13.0 \text{ L/(s} \cdot \text{m}^2)$,气水联合反冲洗时,气洗强度约 $13.0 \text{ L/(s} \cdot \text{m}^2)$,水洗强度约 $3.0 \text{ L/(s} \cdot \text{m}^2)$,单独水冲洗强度约 $6.0 \text{ L/(s} \cdot \text{m}^2)$ 。硫自养反硝化滤池主要设备:3台干式离心泵($Q=330 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=18 \text{ m}$, $N=22 \text{ kW}$)及配套变频器,2台无油螺杆鼓风机($Q=1\,827 \text{ m}^3/\text{h}$, $P=0.09 \text{ MPa}$, $N=55 \text{ kW}$)。

3.2 改良型Fenton反应池

硫自养反硝化滤池出水自流进入改良型Fenton反应池。新建改良型Fenton反应池,采用半地上钢筋混凝土结构,尺寸 $L \times B \times H = 28.2 \text{ m} \times 9.6 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$,池内设3台双曲面搅拌机($D=2 \text{ m}$, r 为20~36 r/min, $N=3 \text{ kW}$),反应时间为60 min。主要配套设备为催化混合反应器($\varnothing \times H = 3.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$),外置高强钕铁硼永磁体,使反应器内部空间区域形成磁化区,内设低速搅拌器、pH及ORP检测装置,便于运行控

制。磁场可提高Fenton反应中羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的产生速率,并且当反应相处于水溶液中时,磁化作用还可减少分子间因氢键能而导致的分子缔合效应,进而大大提高 $\cdot\text{OH}$ 与有机物碰撞结合的概率^[7-8]。改良型Fenton通过外加磁场催化,混合条件控制及 H_2O_2 的定量分次投加,避免了药剂浓度集中,有效提高了药剂的利用率,同时在有机物氧化过程中促进羧酸类有机物与 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 类金属离子进行络合,并转移至固相沉淀去除^[9-10],在此反应器内进行反应条件精确控制的改良型Fenton反应,提高难生物降解有机物的催化氧化去除效率,保证出水COD有效降低,同时加快反应进程,节省药剂投加量^[11]。催化混合反应器共3套,设备材质为不锈钢316 L。

3.3 三沉池

改良型Fenton反应池出水经三沉池进行泥水分离。新建三沉池1座2组,并联运行,采用半地上钢筋混凝土结构,尺寸 $24.0 \text{ m} \times 26.0 \text{ m} \times 4.9 \text{ m}$;絮凝段停留时间22 min,沉淀段设计表面负荷 $5.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,设计污泥回流量5%~10%。三沉池产生的污泥与原工艺生化段剩余污泥一并处理处置。

3.4 砂滤池

三沉池出水经砂滤池过滤处理,进一步去除污水中的细微悬浮物,以提高后续活性焦吸附工段的处理效率,减少活性焦板结堵塞。新建砂滤池1座6格,采用半地下钢筋混凝土结构,尺寸 $L \times B \times H = 40.3 \text{ m} \times 10.4 \text{ m} \times 4.1 \text{ m}$;平均滤速 7.58 m/h ,强制滤速 9.09 m/h ,采用气水联合反冲洗,单独气反冲洗强度约 $13.0 \text{ L/(s} \cdot \text{m}^2)$,气水联合反冲洗时,气洗强度约 $13.0 \text{ L/(s} \cdot \text{m}^2)$,水洗强度约 $3.0 \text{ L/(s} \cdot \text{m}^2)$,单独水反

冲洗强度约6.0 L/(s·m²)。

3.5 提升泵池

新建提升泵池1座,采用半地下钢筋混凝土结构,尺寸L×B×H=6.0 m×5.0 m×5.8 m;潜水泵3台,Q=700 m³/h,H=16 m,N=45 kW。

3.6 活性焦吸附池及附属设施

污水经提升泵提升进入活性焦吸附池,由于污水经改良型Fenton处理后,仍有部分难降解有机物及细微悬浮物,为避免水质超标,需经活性焦吸附进一步去除COD、SS、色度。活性焦吸附池设置两级,共20格,每级吸附池各10格,每格均可单独运行。活性焦吸附池采用半地上钢筋混凝土结构,尺寸L×B×H=30.0 m×30.0 m×11.0 m;流速5.6 m/h,空池停留时间第一级1.50 h、第二级1.25 h,第一级活性焦吸附池有效填充高度8.0 m,第二级活性焦吸附池有效填充高度6.5 m。主要设备:80套玻璃钢材质布水器,筛分清洗洗焦设备,洗焦排污设备,排焦气提系统,冲洗水泵(Q=30 m³/h,H=26.5 m,N=4 kW,2台)等。所用活性焦颗粒粒径2~8 mm,碘值650~750 mg/g,中孔(2~50 nm)率>40%,强度>90%,堆积密度0.43~0.47 kg/cm³,共1400 t。此外,还设置加焦泵3台(Q=40 m³/h,H=25 m,N=11 kW);框式搅拌机2台,匹配焦池尺寸1500 mm×1500 mm×2000 mm,N=3 kW;脱水筛4套,脱水能力6 m³/h,N=4.2 kW;湿料仓兼清洗脱盐罐2套,有效容积80 m³;清洗水泵2台,Q=42 m³/h,H=16 m,N=4 kW;空压机2台,Q=5.2 m³/min,H=0.8 MPa,N=30 kW;冷干机2台,Q=1.8 m³/min,N=0.62 kW;干料仓2套,含干料罐60 m³。为提高活性焦重复利用效率,吸附池设1台再生炉成套设备,装机功率650 kW,再生量20 t/d;活性焦再生产生的烟气经配套烟气处理系统处理,烟气量6000 m³/h。

4 实际运行效果

该项目建成后,调试启动时间为20 d。硫自养反硝化滤池调试,首先进行硫自养微生物菌种接种及碳酸钠补充,进水负荷20%,5 d后TN由14.60 mg/L降至4.32 mg/L,出水TN降低后,逐步提高进水负荷,直至满负荷运行,并随时监测,确保TN稳定低于10 mg/L。改良型Fenton工段在启动阶段对加药量及反应条件进行了调试探索,调试5 d即可稳定运行。活性焦吸附池洗焦后,即满负荷进水,

出水稳定达标。

污水处理厂稳定运行期间连续6个月(2024年3月—8月)的水质监测数据见表2,平均处理水量为2.64万m³/d。可见,提标改造各工段运行稳定,在进水水质较为复杂的情况下,其最终出水水质(COD为21~28 mg/L,TN为6.35~9.79 mg/L,TP为0.03~0.19 mg/L)稳定达标,且关键污染物指标优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准及《山东省城市排水“两个清零、一个提标”工作方案》要求,验证了该提标改造组合工艺在工业园区复杂进水条件下的高效去除污染物能力和运行稳定性。该项目自建成投运以来,始终保持稳定高效的运行状态,各项出水指标符合国家及地方排放标准,表现出对复杂水质波动的适应性,不仅为园区内工业企业、配套设施的正常生产经营提供了坚实的环保支撑,有效规避了污水处理问题导致的生产中断风险,更通过持续改善区域水环境质量,显著提升了园区的环境承载能力,为整个园区的正常生产提供了切实保障。

表2 提标改造各工艺段主要污染物去除效果
Tab.2 Removal effect of main pollutants in each section of the upgrading and renovation project

项目		mg/L		
		COD	TN	TP
二沉池出水(提标改造工段进水)	波动范围	88~115	11.50~15.90	0.64~1.31
	均值	102	13.56	0.91
硫自养反硝化滤池出水	波动范围	84~103	5.58~9.95	0.63~1.29
	均值	98	8.44	0.92
改良型Fenton反应池+三沉池+砂滤池出水	波动范围	28~33	6.44~9.76	0.05~0.28
	均值	29	8.95	0.14
活性焦吸附池出水	波动范围	21~28	6.35~9.79	0.03~0.19
	均值	26	8.15	0.09

根据该污水处理厂月度成本表统计结果,提标改造工段直接处理费用为1.8元/m³,其中电费为0.6元/m³,药剂费(含硫酸亚铁、双氧水、石灰、PAM等)为1.2元/m³。

5 结论

针对山东某工业园区污水处理厂出水水质不满足最新环保要求的问题,采用硫自养反硝化+改良型Fenton+活性焦吸附组合工艺进行提标改造。改造后,在进水COD、TN及TP均值分别为102、13.56、0.91 mg/L的条件下,处理出水COD、TN及

TP均值分别为25.6、8.15、0.09 mg/L, COD、TP指标满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准, TN满足《山东省城市排水“两个清零、一个提标”工作方案》要求, 提标改造工段直接处理费用为1.8元/m³。该组合工艺集处理效率高、运行成本低、抗冲击负荷能力强及运行稳定可靠等优势于一体, 经济与环境效益显著, 可为类似工业园区污水处理厂提标改造提供参考。

参考文献:

- [1] 张鹏辉, 雷海东, 孔海霞. 陕西省某纺织工业园区污水处理厂提标改造工程实例[J]. 中国给水排水, 2025, 41(10): 98-103.
- ZHANG P H, LEI H D, KONG H X. Upgrading case of a textile industrial park WWTP in Shaanxi Province [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(10): 98-103(in Chinese).
- [2] 丁来保, 田庆文, 盘爱享, 等. 生物增效技术在工业园区污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2024, 40(16): 121-125.
- DING L B, TIAN Q W, PAN A X, et al. Application of a bioaugmentation technology in industrial park wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(16): 121-125(in Chinese).
- [3] 姜鸣, 石芳永, 顾雪峰, 等. 工业园区污水厂准Ⅳ类水质提标改造工程设计[J]. 中国给水排水, 2022, 38(2): 59-63.
- JIANG M, SHI F Y, GU X F, et al. Design of a wastewater treatment plant upgrading project in an industry park to meet quasi-Ⅳ surface water standard [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(2): 59-63(in Chinese).
- [4] 张万里, 冯仕训, 程明涛. 太湖流域某工业园区污水厂高排放标准提标改造工程设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 83-87.
- ZHANG W L, FENG S X, CHENG M T. Design of a wastewater treatment plant upgraded to higher discharge standard in an industrial park in Taihu area [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 83-87(in Chinese).
- [5] 刘兴静, 玄鹤林, 杨迪, 等. 天津某工业园区污水厂扩容与提标改造工程实例[J]. 中国给水排水, 2020, 36(2): 103-108.
- LIU X J, XUAN H L, YANG D, et al. Case of expansion and upgrading project of wastewater treatment plant in an industrial park in Tianjin [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(2): 103-108(in Chinese).
- [6] DI CAPUA F, PIROZZI F, LENS P N L, et al. Electron donors for autotrophic denitrification [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 362: 922-937.
- [7] 崔凤国, 杨鹏, 张伟军, 等. 混凝和活性炭吸附深度处理制药废水中有机物去除特征[J]. 环境工程学报, 2015, 9(9): 4359-4364.
- CUI F G, YANG P, ZHANG W J, et al. Removal characteristics of organic contaminants of pharmaceutical wastewater in advanced treatment with coagulation and PAC adsorption [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(9): 4359-4364(in Chinese).
- [8] CHENG Y Q, CHEN Y L, LU J C, et al. Fenton treatment of bio-treated fermentation-based pharmaceutical wastewater: removal and conversion of organic pollutants as well as estimation of operational costs [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 12083-12095.
- [9] 刘勃, 洪卫, 苏颖, 等. 制浆造纸废水复合仿酶深度处理技术反应机理研究[J]. 中国造纸, 2013, 32(3): 1-8.
- LIU B, HONG W, SU Y, et al. Reaction mechanism of advanced treatment of pulp and paper wastewater with composite biomimetic enzyme [J]. China Pulp & Paper, 2013, 32(3): 1-8(in Chinese).
- [10] LIU B, GAO B Y, XU X, et al. The combined use of magnetic field and iron-based complex in advanced treatment of pulp and paper wastewater [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 178: 232-238.
- [11] 洪卫, 张增国, 梁世华, 等. 改良型Fenton工艺深度处理制药园区废水中试研究[J]. 工业水处理, 2023, 43(11): 53-60.
- HONG W, ZHANG Z G, LIANG S H, et al. Pilot study on advanced treatment of pharmaceutical park wastewater by improved Fenton process [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(11): 53-60(in Chinese).

作者简介: 张增国(1987—), 男, 山东济南人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为工业废水绿色低碳深度处理。

E-mail: 18668929965@163.com

收稿日期: 2025-08-13

修回日期: 2025-09-19

(编辑: 衣春敏)