

赵敏燕, 栾燕, 顾军, 等. 蒸汽机械再压缩蒸发联合催化氧化-生化工艺处理染料生产废水工程实例[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 131-137.
ZHAO M Y, LUAN Y, GU J, et al. Engineering case of mechanical vapor recompression evaporation combined with catalytic oxidation biochemical process for dye production wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 131-137.

蒸汽机械再压缩蒸发联合催化氧化-生化工艺处理染料生产废水工程实例

赵敏燕, 栾燕, 顾军, 陶新远*

(南京宇清环境科技有限公司, 江苏南京 210047)

摘要 【目的】 针对江苏某化工某科技有限公司染料生产过程中产生的废水色度高、有机污染组分复杂且浓度高、酸度大、可生化性低等特点, 采用常规生化工艺难以保证废水达标排放的基本问题, 综合现有有机染料废水单一处理方法的主要优缺点及传统组合工艺流程复杂、处理成本高的缺点, 构建形成了针对企业废水特征的有机染料废水组合处理工艺。【方法】 文章以物理法、化学法、生物法为基础, 采用“机械蒸汽再压缩(MVR)蒸发联合催化臭氧氧化及生化处理”的组合工艺对废水进行处理, 该工艺可在降低废水有机物的同时去除废水中的盐分, 解决了传统组合工艺因盐分较高影响生化系统运行的主要问题, 实现了盐分、有机物等污染物质的同步去除。同时, 本文详细介绍了主要组合工艺各处理单元工艺设计参数及投资运行成本。【结果】 工程实施后的连续 30 d 生化进出水水质检测结果表明: 通过 MVR 蒸发处理及臭氧催化氧化的高效预处理, 可在保障生化工艺不受废水盐分及高毒性有机污染物质的干扰的同时有效降低废水色度, 在跟踪检测期内, 生化系统进水 COD 质量浓度为 2 700~3 300 mg/L, 处理后出水 COD 可以下降至 20~120 mg/L, 去除率为 95%~99%; 氨氮进水质量浓度为 300~350 mg/L, 处理后出水氨氮质量浓度可下降至 1~10 mg/L, 去除率为 96%~99%。【结论】 处理后的出水各指标均符合企业废水接管标准, 企业废水可稳定达标排放。该处理工艺的成功运行可为类似染料生产企业的废水处理提供参考。

关键词 工程实例 染料废水 组合工艺 蒸汽机械再压缩(MVR) 催化臭氧氧化

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)12-0131-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.015

Engineering Case of Mechanical Vapor Recompression Evaporation Combined with Catalytic Oxidation Biochemical Process for Dye Production Wastewater Treatment

ZHAO Minyan, LUAN Yan, GU Jun, TAO Xinyuan*

(Nanjing Yuqing Environmental Technology Co., Ltd., Nanjing 210047, China)

Abstract [Objective] In response to the characteristics of high chromaticity, complex organic pollutant components, high concentration, high acidity, and low biodegradability of the wastewater generated during the dye production process of a certain chemical and technology limited company in Jiangsu, the basic problem of using conventional biochemical processes is that it is difficult to ensure the standard discharge of wastewater. Taking into account the main advantages and disadvantages of existing single treatment method for organic dye wastewater and the disadvantages of complex traditional combination processes and high treatment costs, a combination treatment process for organic dye wastewater tailored to the characteristics of enterprise wastewater has been constructed. [Methods] This paper was based on physical, chemical, and biological method, and used a combination process of "mechanical vapor recompression (MVR) evaporation combined with catalytic ozone oxidation and biochemical treatment" to treat wastewater. This process could reduce organic matter in wastewater while removing salt from the wastewater, solving the main problem of high salt content affecting the operation of biochemical systems in traditional combination processes, and achieving synchronous removal of pollutants such as salt and organic matter. At the same time, the process design parameters and investment operating costs of each

[收稿日期] 2024-10-16

[作者简介] 赵敏燕(1988—), 女, 工程师, 主要从事工业废水和难降解废水治理等工作, E-mail: 961428123@qq.com。

[通信作者] 陶新远(1997—), 男, 工程师, 主要从事工业废水治理和市政污泥处理等工作, E-mail: 1362495158@qq.com。

treatment unit in the main combination processes were introduced in detail. [Results] The continuous 30 days biochemical influent and effluent quality testing result after the implementation of the project showed that through efficient pretreatment with MVR evaporation treatment and ozone catalytic oxidation, the biochemical process could be effectively reduced in color while ensuring that it was not affected by wastewater salinity and highly toxic organic pollutants. During the tracking and testing period, the influent COD mass concentration of the biochemical system was 2 700–3 300 mg/L, and the treated effluent COD could be reduced to 20–120 mg/L, with a removal rate of 95%–99%; The concentration of ammonia nitrogen in the influent was 300–350 mg/L. After treatment, the concentration of ammonia nitrogen in the effluent could be reduced to 1–10 mg/L, with a removal rate of 96%–99%. [Conclusion] All indices of the treated effluent meet the standards for enterprise wastewater management, and the enterprise wastewater can be discharged stably and up to standard. The successful operation of this treatment process can provide reference for wastewater treatment in similar dye production enterprises.

Keywords engineering case dye wastewater combined process mechanical vapor recompression (MVR) catalytic ozonation

在我国传统行业中,染料行业在国民经济中具有举足轻重的地位及作用^[1]。目前,我国染料行业发展迅速,我国染料年产量已占全球总量的70%以上,相关资料统计,2023年我国染料生产总量已达90.4万t,而这些染料生产过程中会产生大量的染料废水。不完全统计,我国每年排放的染料废水量超过18亿t^[2]。染料废水通常具有水质成分复杂、毒性大、生物降解难、盐分高、色度高等特点,且染料废水中污染组分多具有“致癌、致畸、致突变”的三致效应,属于难降解高浓度工业废水,对人类健康及生态环境具有极大的危害^[3-4]。因此,如何有效处理染料废水不仅关乎生态环境的健康,同时关乎染料行业是否能健康可持续发展。随着我国“碳达峰、碳中和”国家战略发展目标的提出,染料废水处理方面也面临着新的机遇和挑战。针对有机染料废水处理的传统方法主要包括物理法、化学法及生物法3种,具体包括吸附法、膜分离法、沉淀法、混凝法、高级氧化法、电化学法、活性污泥法等^[5-8]。染料种类及染料生产工艺的多样性,导致染料废水处理难度进一步增大,使用单一的传统处理方法对染料废水的处理效果有限,如:不能同时降解不同类型的有机污染物、不能同时降解盐分使废水稳定达标排放等。因此,在处理成分复杂的实际染料废水时,需根据废水成分,综合各类方法优势构建针对不同污染物的组合工艺,以提高染料废水的处理效率,保证废水达标排放。相关研究^[9]表明,采用混凝沉淀预处理-生化处理-深度氧化/沉淀处理工艺可以将染料废水处理至达标排放,但工艺存在缺少对盐分及高毒性有机污染物质的高效预处理,容易导致生化工艺处理效率下降甚至崩溃的现象。

江苏某化工科技有限公司一期染料生产规模为37 500 t/a,废水排放量约为1 000 m³/d,其生产废水具有色度高、有机污染组分复杂且浓度高、酸度大、可生化性低的等特点,综合染料废水单一处理及组合处理工艺的优缺点,建设一套针对性废水处理设施,在保证一期废水达到园区污水处理厂接管标准的同时,为二、三期产品废水留有处理余量。本文介绍了该企业染料废水处理工艺流程,并详细介绍了主要工艺设计参数及投资运行成本。

1 工程概况

江苏某化工科技有限公司是一家专业生产高档有机分散染料的化工企业。生产产品包括4-氯-2,5-二甲氧基苯胺、红色基B、2-萘胺-1-磺酸(吐氏酸)、吐氏酸磺化物、2-氨基-5-萘酚-7-磺酸(J酸)、6-硝基-2,1-羟基重氮萘-4-磺酸,色酚AS-IRG、红色基DB-70、红色基KD、靛红、喹哪啶、分散黄3G、N-乙基-N-氰乙基苯胺、分散橙2RL、分散红60及分散蓝60等,产品分三期实施。企业目前一期产品规模包括年产1 200 t 4-氯-2,5-二甲氧基苯胺、6 000 t 红色基B、8 000 t 吐氏酸、5 000 t 吐氏酸磺化物、8 500 t J酸及8 000 t 6-硝基-2,1-羟基重氮萘-4-磺酸。一期产品成产过程中磺化、漂洗、萃取、过滤等工段产生的生产废水,废水污染组分复杂,废水色度深、化学需氧量(COD)及总氮(TN)浓度高,部分废水酸度较大,废水可生化性低,针对废水中不同污染物质需采用针对性工艺进行处理。

项目废水主要来源于厂区一期产品吐氏酸、吐氏酸磺化物、红色基B、4-氯-2,5-二甲氧基苯胺生产废水及厂区其他低浓度废水。污水处理系统主要

针对上述废水并预留企业二、三期产品废水处理余量,整体设计处理规模为4 500 m³/d,处理后的出水

满足企业所在园区集中污水处理厂接管标准。设计进出水水质如表1、表2所示。

表 1 设计进水水质及水量
Tab. 1 Designed Influent Quality and Capacity

项目	水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	pH 值	COD/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	溶解性总固体(TDS)/ (mg·L ⁻¹)
吐氏酸生产废水	517	5~6	2 250	13 328	12 003	102 700
红色基 B	脱溶废水	64	7~8	14 639	4 530	—
	水解废水	56	13~14	64 787	1 114	—
	中和废水	56	1~2	220 888	4 299	—
4-氯-2,5-双	水洗分层废水	40	10~11	51 250	752	—
甲氧基苯胺	氯化废水	50	11~12	156	151	—
	中和分层废水	3	4~5	250	157	—
	硝化废水	40	1~2	2 422	2 670	14
结晶过滤废水	28	8~9	12 686	820	220	2 100
生活废水等其他低浓度废水	70	6~9	600	—	40	16 000

表 2 设计出水水质要求
Tab. 2 Requirements for Designed Effluent Quality

项目	数值
pH 值	6~9
COD/(mg·L ⁻¹)	≤500
氨氮/(mg·L ⁻¹)	≤50
悬浮物(SS)/(mg·L ⁻¹)	≤400
TP/(mg·L ⁻¹)	≤2
TDS/(mg·L ⁻¹)	5 000

2 工艺选择及设计

由上述水质分析可知,一期废水生产速度均较高,且吐氏酸生产废水、红色基 B 水解废水、红色基 B 中和废水及 4-氯-2,5-双甲氧基苯胺水洗分层废水盐含量及 COD 浓度均较高,红色基 B 脱溶废水、4-氯-2,5-双甲氧基苯胺硝化废水及 4-氯-2,5-双甲氧基苯胺结晶过滤废水含有较高的 COD 及 TN。如图 1 所示,水质结果表明:一期生产废水含有对二苯甲醚、对氯苯胺、邻甲基苯胺、2-甲氧基苯胺、4-甲氧基苯酚、癸烷基二甲基叔胺、1,4-二甲氧基-2-氯苯、N-(4-甲氧基苯基)-N-甲基乙酰胺、4-氯-2,5-二甲氧基苯胺等物质,污染物组分十分复杂。

上述废水难以采用常规的生化工艺直接进行处理,因此,根据“分类收集、分质处理”的基本原则采用不同预处理工艺处理不同类型的废水。

高含盐废水的蒸汽机械再压缩(MVR)蒸发预

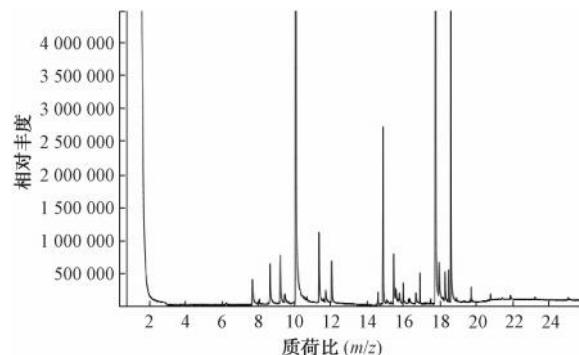


图 1 一期生产废水气质图谱

Fig. 1 GC Spectrum of Production Wastewater in Phase I
处理:吐氏酸生产废水、红色基 B 水解废水、红色基 B 中和废水及 4-氯-2,5-双甲氧基苯胺水洗分层废水采用 MVR 工艺,在去除废水中盐分的同时,能降低废水中高沸点有机物的浓度,从而减少废水 TDS 及 COD 浓度。

难降解废水的催化臭氧氧化预处理:含有较高 COD 及 TN 的红色基 B 脱溶废水、4-氯-2,5-双甲氧基苯胺硝化废水及 4-氯-2,5-双甲氧基苯胺结晶过滤废水与经过 MVR 蒸发预处理的含盐废水中均含有难降解有机污染物质,且废水色度深,采用对有机污染物质及色度降解具有较强针对性的催化臭氧氧化工艺进行预处理,可以有效处理难降解废水。

综合废水的生化处理:经过 MVR 蒸发及催化臭氧氧化处理后的工艺废水仍残留着一定的有机污染物质,若直接排放,无法满足企业废水排放标准要

求。因此, 可与可生化性较好的4-氯-2,5-双甲氧基苯胺中和分层废水、硝化废水及生活污水等低浓度废水一起进行水解酸化+两级缺氧-好氧(AO)生

化工艺进行处理, 该工艺可同时满足降解COD及脱氮的要求。经生化处理后, 废水可达标接管至园区污水处理厂。工艺流程如图2所示。

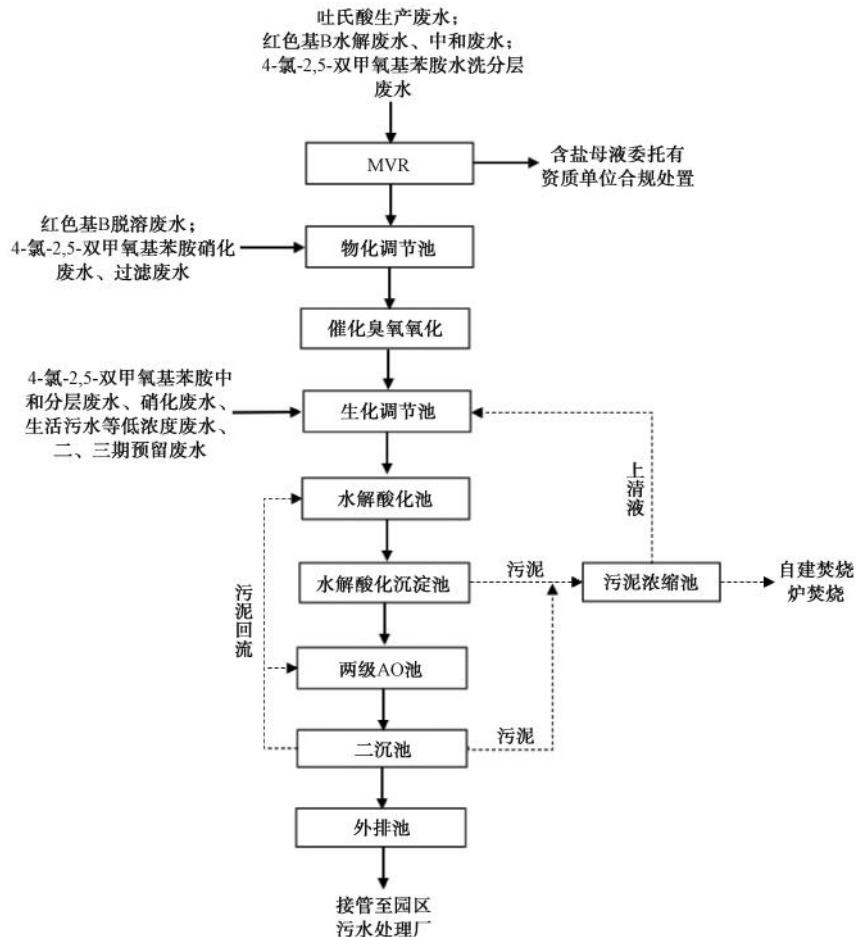


图2 污水处理工艺流程

Fig. 2 Process Flow of Wastewater Treatment

3 主要设计参数

主要构(建)筑物设计参数

(1) MVR反应装置2套, 单套设计处理规模为15 t/h; 降膜蒸发器2台, 物料接触材质管为TA2钛合金、壳为316 L, 换热面积为1 300 m²; 降膜分离器2台, 材质为TA2, 外形尺寸为φ2 800 mm×5 800 mm; 降膜循环泵, 3台, 材质为TA2, 流量为30~50 m³/h, 扬程为20 m。

(2) 物化调节池1座, 钢-混凝土组合结构, 防腐, 有效池容为600 m³, 尺寸为19.3 m×5.3 m×6.5 m; 配套提升泵2台, 流量为50 m³/h, 扬程为15 m; 水下推流器1套, 超声波液位仪1套。

(3) 催化臭氧氧化装置2套, 钢衬塑, 配套气液分离装置、循环水冷却装置、凝液收集装置, 单套处理量为18 m³/h, 配套循环泵2套, 流量为20 m³/h, 扬程为15 m。

(4) 生化调节池1座, 钢-混凝土组合结构, 防腐, 有效池容为2 600 m³, 尺寸为19.3 m×22.7 m×6.5 m; 配套提升泵2台, 流量为94 m³/h, 扬程为15 m; 水下推流器2套, 超声波液位仪1套, pH值在线仪1套, 电导率在线仪1套。

(5) 水解酸化池1座, 钢-混凝土组合结构, 防腐, 有效池容为20 800 m³, 尺寸为69.2 m×52.6 m×6.5 m, 水力停留时间为4.6 d, COD容积负荷为0.598 kg COD/(m³·d)。配套水下推流器12套, 电

磁流量计 2 套, pH 值在线仪 6 套, 氧化还原电位 (ORP) 在线分析仪 6 套。

(6) 水解酸化沉淀池 2 座, 钢-混凝土组合结构, 单组有效池容为 $1\ 100\ m^3$, 单组尺寸为 $\varphi 19.0\ m \times 5.5\ m$, 表面负荷为 $0.33\ m^3/(m^2 \cdot h)$, 污泥回流比为 100%; 配套污泥回流泵 6 套, 流量为 $71\ m^3/h$, 扬程为 15 m; 排渣泵 4 套, 流量为 $15\ m^3/h$, 扬程为 8 m; 潜污泵 1 套, 流量为 $5\ m^3/h$, 扬程为 8 m; 周边传动刮泥机 2 套, 电磁流量计 2 套。

(7) 两级 AO 池 1 座, 钢-混凝土组合结构, 有效池容为 $25\ 000\ m^3$, 尺寸为 $55.2\ m \times 97.1\ m \times 5.5\ m$, 水力停留时间为 5.6 d, COD 容积负荷为 $0.265\ kg\ COD/(m^3 \cdot d)$, 缺氧段脱氮负荷为 $0.112\ kg\ TN/(m^3 \cdot d)$, 硝化负荷为 $0.056\ kg\ 氨氮/(m^3 \cdot d)$ 。配套混合液回流泵 12 套, 流量为 $94\ m^3/h$, 扬程为 10 m; 水下推流器 12 套, 电磁流量计 2 套, pH 值在线仪 8 套, ORP 在线仪 6 套, 溶解氧浓度 (DO) 在线仪 12 套。

(8) 二沉池 2 座, 钢-混凝土组合结构, 单组有效池容为 $1\ 100\ m^3$, 单组尺寸为 $\varphi 19.0\ m \times 5.5\ m$, 表面负荷为 $0.33\ m^3/(m^2 \cdot h)$, 污泥回流比为 100%; 配套污泥回流泵 6 套, 流量为 $71\ m^3/h$, 扬程为 15 m; 排渣泵 4 套, 流量为 $15\ m^3/h$, 扬程为 8 m; 潜污泵 1 套, 流量为 $5\ m^3/h$, 扬程为 8 m; 周边传动刮泥机 2 套, 电磁流量计 2 套。

(9) 污泥浓缩池 1 座, 钢-混凝土组合结构, 防腐, 有效池容为 $350\ m^3$, 尺寸为 $\varphi 8.0\ m \times 7.0\ m$; 配套螺杆泵 2 台, 流量为 $12\ m^3/h$, 扬程为 30 m; 污泥浓缩机 1 套, 电磁流量计 1 套。

(10) 外排池 1 座, 钢-混凝土组合结构, 有效池容为 $2\ 500\ m^3$, 尺寸为 $39.9\ m \times 14.6\ m \times 4.8\ m$; 配套排水泵 3 台, 流量为 $94\ m^3/h$, 扬程为 50 m; 超声波液位仪 1 套, 电磁流量计 1 套。

(11) 污泥脱水车间 1 座, 配套污泥脱水机 2 套; 阳离子聚丙烯酰胺 (PAM) 投加装置 1 套; 潜污泵 1 台, 流量为 $30\ m^3/h$, 扬程为 15 m。

(12) 配电间、加药间等辅助用房 1 座, $1\ 000\ m^2$ 。

(13) 电气、自控系统 1 套, 配套进线开关柜、母联柜、配电柜、电控柜、现场控制柱、可编程逻辑控制器 (PLC) 柜+仪表柜、不间断电源柜、监控软件、控制台等。

4 运行效果

考虑到企业二、三期发展规划, 调试期间仅对一期 MVR 蒸发系统、臭氧氧化系统和生化系统进行污泥培养、驯化等调试。系统正式投入运行后, 根据近一个月的 MVR、臭氧与生化系统进水和排水水质检测结果可知, 经处理后废水色度得到了有效降低, 系统出水水质符合企业所在园区污水处理站接管要求。系统调试运行成功后, 系统运行效果如图 3~图 7 所示。

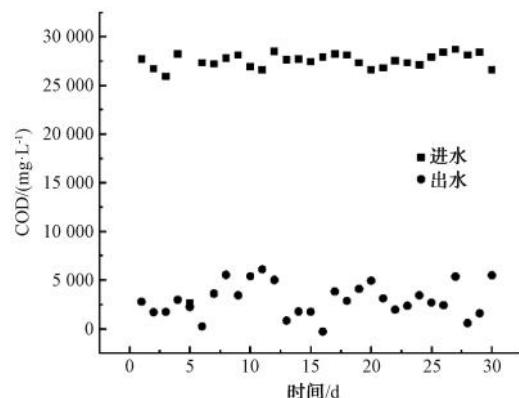


图 3 MVR 蒸发系统 COD 处理效果

Fig. 3 COD Treatment Effect of MVR Evaporation System

图 3 为 MVR 蒸发系统的进出水 COD 变化, 在跟踪检测期间内 MVR 进水 COD 为 $27\ 000\sim28\ 500\ mg/L$, 经过 MVR 蒸发后出水 COD 下降到 $3\ 200\sim5\ 300\ mg/L$, 去除率为 82%~90%。

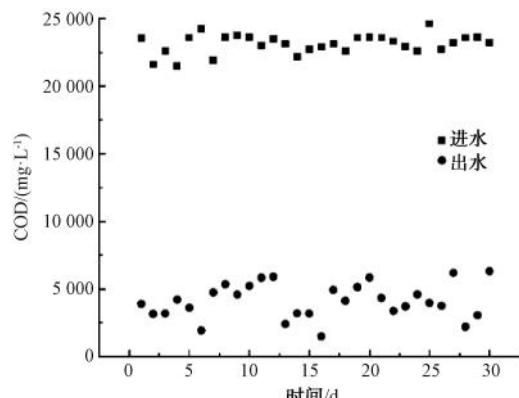


图 4 臭氧氧化系统 COD 处理效果

Fig. 4 COD Treatment Effect of Ozonation System

图 4 为臭氧催化氧化系统的进出水 COD 变化, 在跟踪检测期间内氧化反应池进水 COD 为 $23\ 000\sim24\ 000\ mg/L$, 经过臭氧氧化后出水 COD 下降到 $3\ 000\sim5\ 000\ mg/L$, 去除率为 81%~88%。图 5 为臭氧出水的气质图谱, 检测出水中含有的主要有机污

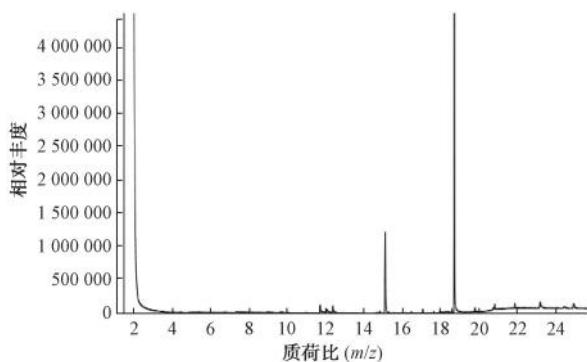


图 5 臭氧化出水气质图谱

Fig. 5 GC Spectrum of Ozonation Effluent

染物为 1,4-二甲氧基-2-氯苯、N-(4-甲氧基苯基)-N-甲基乙酰胺、4-甲氧基-2-硝基乙酰苯胺。相较原水有机污染物, 臭氧后的有机污染物数量有明显减少, 证明废水的可生化性提高, 有利于后续生化系统的处理。

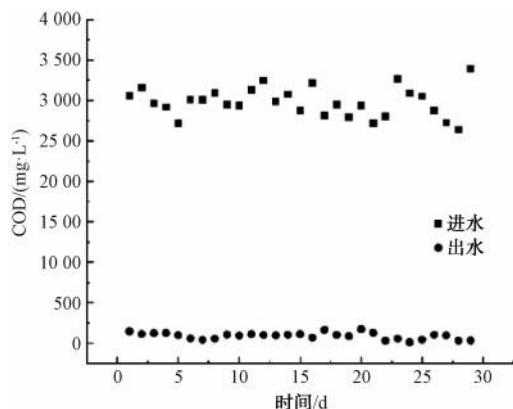


图 6 生化系统 COD 处理效果

Fig. 6 COD Treatment Effect of Biochemical System

由图 6 可知, 在跟踪检测期间内, 生化系统进水 COD 为 2 700~3 300 mg/L, 经处理后的出水 COD 可以下降到 20~120 mg/L, 去除率为 95%~99%。由图 7 可知, 生化系统进水的氨氮质量浓度为 300~350 mg/L, 经处理后的出水氨氮质量浓度下降至 1~10 mg/L, 去除率为 96%~99%, 均符合排放标准。

5 技术经济指标分析

工程投资范围包括 MVR 蒸发除盐系统、催化臭氧氧化预处理系统、生化处理系统、污泥处理系统、加药系统及配套的土建、仪表、管道、阀门、电气自控等费用, 项目总投资约为 7 254 万元。一期系统运行费用包括人工费、电费及药剂费用, 其中药剂主要包括过氧化氢、液氧、液碱、PAM、碳酸钠等, 人

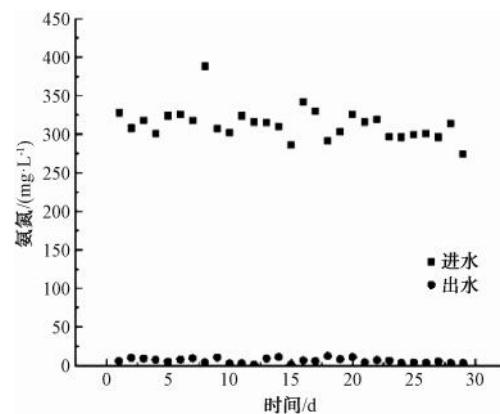


图 7 生化系统氨氮处理效果

Fig. 7 Ammonia Nitrogen Treatment Effect of Biochemical System

工费用为 2.1 元/m³、电费为 37.4 元/m³、药剂费用为 5.1 元/m³, 总运行费用为 44.6 元/m³。

6 结语

(1) 有机染料生产废水水质成分复杂、具有 COD 浓度及 TN 浓度高、含盐量高、色度深等特点, 采用常规生化工艺难以处理该类废水, 需根据“分类收集、分质处理”总体思路制定废水处理工艺。

(2) 工程实践表明: 采用“MVR 蒸发联合催化臭氧氧化+水解酸化-AO”的组合工艺可以有效处理染料生产企业的生产废水, 处理后企业废水能稳定满足相应排放指标的要求。

(3) 因现有生化工艺预留了二、三期废水余量, 建议企业在进行二、三期废水处理时, 充分分析二、三期废水水质特征, 结合现有废水预处理系统, 增设针对性的预处理工艺措施, 保证生化系统的稳定运行及废水达标排放。

参考文献

- [1] 徐涛. 苯胺类染料中间体废水预处理的有关分析 [J]. 化工设计通讯, 2018, 44(6): 237~237.
- [2] XU T. Analysis of pre treatment of wastewater from aniline dye intermediates [J]. Chemical Design Design Communications, 2018, 44(6): 237~237.
- [3] 李益群, 王新疆. 化工企业废水分类收集、清污分流构思 [J]. 绿色科技, 2016, 18(10): 49~51.
- [4] LI Y Q, WANG X J. Chemical enterprise wastewater separating collection, sewage filtration disposal [J]. Journal of Green Science and Technology, 2016, 18(10): 49~51.
- [5] 李荣菊. 某煤化工高盐废水处理工程实例 [J]. 工业用水与废水, 2022, 53(4): 65~68.

- [1] LI R J. A project example of coal chemical industry high salinity wastewater treatment [J]. Industrial Water & Wastewater, 2022, 53(4): 65–68.
- [2] 穆文华. 某印染工业园区废水处理工程实例 [J]. 工业用水与废水, 2022, 53(5): 71–74.
- [3] MU W H. An example of wastewater treatment project in a printing and dyeing industrial park [J]. Industrial Water & Wastewater, 2022, 53(5): 71–74.
- [4] 江奇志. 染料废水处理工程设计 [J]. 工业用水与废水, 2019, 50(2): 68–72.
- [5] JIANG Q Z. Project design of dyestuff wastewater treatment [J]. Industrial Water & Wastewater, 2019, 50(2): 68–72.
- [6] 刘源, 张娜, 刘群, 等. 阳离子染料废水处理技术研究进展 [J]. 净水技术, 2023, 42(4): 39–51.
- [7] LIU Y, ZHANG N, LIU Q, et al. Review on treatment technology for cationic dyes wastewater [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4): 39–51.
- [8] 陈建武, 张淑芬, 陈陵霞. A+A²O 工艺改为厌氧+两级 AO 工艺的总结 [J]. 水科学与工程技术, 2021(2): 10–13.
- [9] CHEN J W, ZHANG S F, CHEN L X. Summary of A+A²O process changed to anaerobic+two-stage AO process [J]. Water Science and Engineering Technology, 2021(2): 10–13.
- [10] 向心怡. 非溶解性氧化还原介体催化厌氧生物还原偶氮染料废水处理研究进展 [J]. 净水技术, 2020, 39(5): 100–108.
- [11] XIANG X Y. Research advances of anaerobic bioreduction catalyzed by insoluble redox mediator for azo dyes wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(5): 100–108.
- [12] 陈莲欣, 余帆. 染料废水处理技术研究及应用进展 [J]. 能源与环境, 2024, 35(4): 84–96.
- [13] CHEN L X, YU F. Research and application progress of dye wastewater treatment technology [J]. Energy and Environment, 2024, 35(4): 84–96.

(上接第 8 页)

- [14] BRATSKAYA S, SCHWARZ S, CHERVONETSKY D. Comparative study of humic acids flocculation with chitosan hydrochloride and chitosan glutamate [J]. Water Research, 2004, 38(12): 2955–2961.
- [15] PIAO W, KIM Y J, KIM H, et al. Life cycle assessment and economic efficiency analysis of integrated management of wastewater treatment plants [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113: 325–337. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.11.012.
- [16] STERGIOU Y, ECKERT K, SCHWARZENBERGER K. Entrance effects in a radial Hele-Shaw cell: Numerical and experimental study [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 428: 131146. DOI: 10.1016/j.cej.2021.131146.
- [17] HEYDARI O S, RASTEGARZZADEH S, ZARGAR B. Experimental and modeling analyses of COD removal from industrial wastewater using the TiO₂–chitosan nanocomposites [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 11088. DOI: 10.1038/s41598-022-15387-0.
- [18] 陈璐, 高晶晶, 章萍萍, 等. 污泥厌氧/好氧消化过程对泥中水形态分布及其脱水性能的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2023, 43(5): 281–292.
- [19] CHEN L, GAO J J, ZHANG P P, et al. Influence of anaerobic/aerobic digestion process on moisture distribution and dewatering performance in sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(5): 281–292.
- [20] 戴晓虎. 污泥处理处置与资源化 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [21] DAI X H. Sludge treatment and recycling [M]. Beijing: China Building and Construction Press, 2022.
- [22] 李杰, 戴子俊, 张晴波, 等. 基于絮凝调理技术强化污泥脱水性能的研究进展 [J]. 工业水处理, 2024, 44(5): 52–63.
- [23] LI J, DAI Z J, ZHANG Q B, et al. Research progress on flocculation-based conditioning technology for sludge dewaterability enhancement [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(5): 52–63.
- [24] YU G H, HE P J, SHAO L M, et al. Stratification structure of sludge flocs with implications to dewaterability [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(21): 7944–7949.
- [25] PENG S N, WANG Z Y, YU P F, et al. Aggregation and construction mechanisms of microbial extracellular polymeric substances with the presence of different multivalent cations: Molecular dynamic simulation and experimental verification [J]. Water Research, 2023, 232: 119675. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119675.
- [26] 金儒霖, 王宗平, 任拥政, 等. 污泥处置 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [27] JIN R L, WANG Z P, REN Y Z, et al. Sludge treatment [M]. Beijing: China Building and Construction Press, 2017.