

印染废水处理工艺优化及新型技术研究进展

白子杰

(广东南粤检测有限公司, 广东 广州 510000)

摘要 印染废水含有染料、助剂、重金属及难降解有机物等复杂成分, 传统处理方法难以高效降解污染物, 对生态环境危害突出。本文聚焦探究高效处理工艺与优化策略, 解析物理、生物等基础处理技术, 阐述不同工艺组合策略, 结合水质特性优化工艺, 探讨新型技术发展。研究结果显示, 借助工艺组合、参数优化及新型技术应用, 能够明显提升处理效能, 实现经济与环境效益协同, 为印染废水处理提供借鉴。

关键词 印染废水; 水质特性; 物理处理法; 生物处理法; 高级氧化技术

中图分类号: X78

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.32.002

0 引言

印染行业排放废水含大量难降解染料、助剂及重金属, 成分复杂且处理难度极大, 已成为制约行业绿色发展的关键瓶颈。这类废水若未妥善处理便直接排放, 将严重破坏水体生态平衡, 威胁动植物生存及人类健康。深入研究印染废水处理工艺, 对突破现有技术局限、提升处理效率、降低成本、推动印染行业与生态环境协同发展有重要的现实意义, 也是实现水资源循环利用与可持续发展的必然要求。

1 印染废水处理工艺基础理论

1.1 物理处理法

物理处理法依据污染物与水物理性质差异实现分离, 属印染废水处理初级环节。沉淀法通过重力作用促使悬浮颗粒沉降, 核心是颗粒 Stokes 沉降速度原理, 当颗粒所受重力超过水流扰动产生阻力时, 会下沉至池底形成污泥。平流式沉淀池借助水平流速控制颗粒停留时间, 竖流式沉淀池通过向上水流与颗粒沉降速度平衡实现分离, 对粒径大于 $50\ \mu\text{m}$ 染料颗粒去除率达 60%~80%。过滤法依靠多孔介质截留污染物, 砂滤以石英砂为滤料, 通过表面吸附与孔隙截留作用去除悬浮态染料和短纤维, 滤层厚度通常控制在 0.6~1.2 m, 滤速维持 4~10 m/h 时效果最优。膜过滤技术中, 微滤膜孔径 0.1~1 μm , 可截留胶体态染料; 超滤膜孔径 2~100 nm, 能去除大分子助剂如聚乙烯醇。膜分离关键在于膜通量与污染控制, 操作压力需根据膜材质调整, 一般微滤为 0.1~0.3 MPa, 超滤为 0.1~0.7 MPa。吸附法利用固体吸附剂多孔结构吸附污染物, 活性炭对染料吸附符合 Langmuir 等温线, 比表面积达 800~1 500 m^2/g , 对色度去除率达 90% 以上^[1]。

1.2 水质特性分析

印染废水水质特性决定处理工艺选择。污染物组成复杂, 包含染料、助剂及纤维杂质, 其中染料按化学结构可分为偶氮类、蒽醌类和酞菁类, 偶氮染料占比超 60%, 分子中偶氮键 $-\text{N}=\text{N}-$ 使其具有强稳定性。助剂中表面活性剂会降低废水表面张力, 浓度达 5~10 mg/L 时即产生泡沫, 影响后续处理单元气液传质效率。污染物浓度呈现显著波动性, COD 值通常在 800~3 000 mg/L, BOD_5 为 200~800 mg/L, BOD_5/COD 比值多低于 0.3, 表明可生化性较差。色度主要源于染料分子共轭双键系统, 浓度达 500~5 000 倍, 且不同染料显色波长不同, 偶氮染料在 400~600 nm 波段有强吸收, 蒽醌染料在 500~700 nm 波段显色明显。废水 pH 值受染色工艺影响, 酸性染料染色废水 pH 为 4~6, 碱性染料废水 pH 达 9~12。水温通常在 30~60 $^{\circ}\text{C}$, 高温会加速水中溶解氧挥发, 对生物处理系统微生物活性产生抑制作用。

1.3 生物处理法

生物处理法利用微生物代谢作用降解污染物, 好氧生物处理中, 活性污泥法通过曝气维持溶解氧浓度在 2~4 mg/L, 使好氧微生物以有机物为底物进行代谢。微生物群落中假单胞菌、芽孢杆菌能分泌氧化酶, 将染料分子分解为小分子物质, 代谢过程遵循 Monod 方程, 最大比生长速率通常为 0.2~0.5 h^{-1} 。生物膜法通过载体表面形成生物膜实现污染物降解, 膜厚度控制在 0.1~0.5 mm 时传质效率最高, 对 COD 去除率达 70%~80%。厌氧生物处理在无氧环境中进行, 产甲烷菌将有机物转化为甲烷和二氧化碳, 反应温度分为中温 30~35 $^{\circ}\text{C}$ 和高温 50~55 $^{\circ}\text{C}$, 中温条件下容积负荷为 1~3 $\text{kgCOD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。厌氧微生物中脱硫弧菌

可破坏偶氮键,生成芳香胺类中间产物,后续需通过好氧工艺进一步降解。厌氧—好氧组合工艺能发挥协同作用,厌氧阶段提高废水可生化性,好氧阶段深度降解有机物,整体 COD 去除率达 90% 以上。生物强化技术通过接种高效降解菌提升处理效果,从印染废水活性污泥中筛选的脱色菌如红球菌属菌株,对活性艳红 X-3B 脱色率达 95% 以上。

2 印染废水处理工艺的优化

2.1 不同处理工艺的组合策略

工艺组合需依托各单元技术特性形成协同效应,核心在于破解单一工艺处理局限。在物理—生物组合工艺中,混凝沉淀—活性污泥法通过混凝预处理去除 60% ~ 70% 悬浮态染料及部分胶体物质,降低后续生物处理负荷。实际应用时需把控混凝剂投加量,聚合氯化铝投加量为 80 ~ 150 mg/L 时,可使废水浊度降至 10 NTU 以下,为活性污泥提供稳定进水环境。膜过滤—生物反应器组合工艺借助超滤膜截留微生物菌群,使污泥浓度维持在 8 ~ 12 g/L,较传统活性污泥法提升 40% ~ 50% 有机物降解效率,同时膜组件需采用错流过滤方式,流速控制在 1 ~ 2 m/s 以减缓膜污染。化学—生物组合工艺重点攻克难降解有机物去除难题。Fenton 氧化—生物接触氧化工艺中,Fenton 试剂 H_2O_2 与 Fe^{2+} 摩尔比为 3:1,可破坏偶氮键结构,使废水 BOD_5/COD 比值从 0.25 提升至 0.45 以上;后续生物接触氧化池采用弹性填料,比表面积控制在 200 ~ 300 m^2/m^3 ,水力停留时间 8 ~ 12 h,COD 去除率可达 85% 以上。臭氧氧化—厌氧消化组合工艺通过臭氧预氧化分解大分子染料,臭氧投加量 15 ~ 30 mg/L 时,色度去除率达 90%,同时提升废水可生化性,为厌氧阶段产甲烷菌提供易降解底物,使甲烷产率提升 20% ~ 30%。三级组合工艺适用于高浓度复杂印染废水处理。混凝—高级氧化—生物处理工艺路线中,一级混凝去除悬浮颗粒,二级电催化氧化电流密度 20 ~ 50 mA/cm^2 降解难降解物质,三级生物滤池深度处理,最终出水 COD 可稳定控制在 50 mg/L 以下,满足回用标准。

2.2 基于废水水质特性的工艺优化

针对高色度废水,优化方向集中于强化脱色机制。偶氮染料废水宜采用厌氧—好氧串联工艺,厌氧段控制氧化还原电位 -300 ~ -200 mV,促进脱硫弧菌等功能菌分泌偶氮还原酶,脱色率可达 80 ~ 90%;好氧段通过曝气维持溶解氧 3 ~ 4 mg/L,降解厌氧产生的芳香胺类物质。对于蒽醌类染料废水,因具较强抗氧化性,需前置 UV/H_2O_2 氧化单元, H_2O_2 投加量按 COD 浓度 1:1.2 比例

投加,UV 功率 200 ~ 300 W,反应时间 30 ~ 60 min,可破坏蒽醌环结构,提升后续生物处理脱色效率^[2]。采用耐盐活性污泥驯化,通过逐步提高盐浓度每周提升 0.5%,筛选出以盐单胞菌为优势菌的菌群,在盐度 4% 条件下仍可保持 60% ~ 70% COD 去除率。同时调整工艺参数,延长水力停留时间至 16 ~ 20 h,污泥龄控制在 20 ~ 30 d,避免盐胁迫导致微生物流失。对于含重金属离子废水,可在生物处理前增设硫化物沉淀单元,硫化钠投加量为重金属离子浓度 2 ~ 3 倍,使铜、铬离子浓度降至 0.1 mg/L 以下,消除对微生物的毒性抑制。波动性水质的工艺优化依赖自适应调控系统。通过在线监测 COD、pH 值和色度等参数,实时调整处理单元运行条件:当进水 COD 突升 30% 以上时,自动提高混凝剂投加量并延长生物处理水力停留时间;pH 值波动超过 2 个单位时,启动酸碱调节系统,维持反应池 pH 值在 7.0 ~ 8.0。

2.3 处理工艺的经济及环境效益

经济性优化需平衡建设成本与运行费用。膜分离工艺初期投资较高,约 300 ~ 500 元/吨水,但通过再生水回用可实现成本回收,回用率达 60% 以上时,吨水运行成本可降低 1.2 ~ 1.5 元。生物处理工艺经济性优势在于运行成本低 0.5 ~ 0.8 元/吨水,通过污泥资源化进一步提升效益,将剩余污泥进行厌氧消化,产气率可达 0.3 ~ 0.5 $m^3/kgVS$,甲烷含量 60% ~ 70%,可满足处理厂 10% ~ 15% 能源需求^[3]。环境效益评估需量化全生命周期环境影响。高级氧化工艺碳排放主要源于电能消耗,电催化氧化工艺碳排放系数为 1.2 ~ 1.8 $kgCO_2/m^3$,而生物处理工艺通过碳源转化为生物量,可实现碳减排 30% ~ 40%。污泥处置环节采用热解技术,在 500 ~ 600 $^{\circ}C$ 条件下可将有机污泥转化为生物炭,吸附性能达 200 ~ 300 mg/g,实现废物资源化,减少 landfill 占地及渗滤液污染风险。综合效益优化需建立多目标决策模型。

3 新型印染废水处理工艺研究进展及创新机制

3.1 高级氧化技术

高级氧化技术借助生成羟基自由基等强氧化性物质降解污染物,近年在催化剂改性与反应系统优化方面实现突破。光催化氧化技术运用纳米 TiO_2 复合催化剂,掺杂氮元素或负载石墨烯以拓展可见光响应范围,使波长 400 ~ 700 nm 区间光利用率增进 30 ~ 50%。连续流反应装置内,催化剂以流化床形式悬浮,水力停留时间控制在 60 ~ 90 min,对活性艳红 K-2BP 降解率可达 95% 以上,且催化剂循环使用 50 次后活性保持率

仍超80%。电催化氧化技术聚焦电极材料革新,三维多孔钛基二氧化铅电极比表面积达传统平板电极5~8倍,在电流密度30 mA/cm²、槽电压5~7 V条件下,印染废水COD去除速率可提升至2.5 kg/(m³·h)。

3.2 生物强化技术

生物强化技术通过功能菌群构建与代谢路径调控提升降解效能。基因工程菌构建环节,运用CRISPR-Cas9技术编辑假单胞菌偶氮还原酶基因,重组菌株对刚果红降解速率提高2~3倍,在100 mg/L染料浓度下24 h降解率达98%。固定化载体材料创新采用海藻酸钠-壳聚糖复合微球,经交联剂戊二醛处理增强机械强度,微球直径控制在3~5 mm时,包埋菌活性保留率超90%,连续运行90 d后脱色效率仍维持在85%以上^[4]。微生物群落优化技术通过高通量测序分析功能菌群互作关系,厌氧反应器中定向富集脱硫弧菌与产甲烷古菌共生体系,偶氮染料还原速率提升40%~60%,同时甲烷产率稳定在0.35 m³/kgCOD。

3.3 膜分离技术

膜分离技术在抗污染与材料改性领域实现突破。新型复合纳滤膜运用聚酰胺超薄皮层与氧化石墨烯支撑层,通过调控皮层交联度使膜孔径均一分布在1~2 nm,对染料截留率超99%,对无机盐透过率提高25%~30%,在操作压力1.5~2.0 MPa、水温25~30℃条件下,膜通量可达20~30 L/(m²·h)。膜污染控制技术采用电辅助膜过滤系统,膜组件两端施加1~3 V直流电压,通过静电斥力减少污染物吸附,膜清洗周期从7 d延长至15~20 d。集成式膜生物反应器将中空纤维膜组件直接浸没于曝气池,膜丝内控控制在0.8~1.2 mm,通过间歇抽吸与曝气反洗结合,维持污泥浓度8~12 g/L时膜通量稳定在15~20 L/(m²·h),出水COD可控制在50 mg/L以下。

4 印染废水处理技术挑战与发展方向

4.1 现存瓶颈

印染废水处理技术的规模化应用面临多重技术壁垒。其一,高盐环境严重抑制生化处理效能,废水中2%~5%的盐浓度(电导率>10 mS/cm)会导致微生物细胞脱水、酶活性降低,使活性污泥法的COD去除率下降40%~60%。其二,复杂结构染料降解难度大,如蒽醌类染料的稠环芳烃结构需多次断键才能分解,传统Fenton氧化需消耗大量H₂O₂(≥300 mg/L),且产生大量铁泥;荧光染料的刚性共轭结构对常规光催化具有抗性,TiO₂光催化效率不足5%。其三,膜分离技术存在经济性难题,纳滤膜处理高盐废水时,浓差

极化导致膜通量每月衰减超50%,频繁反冲洗使吨水处理成本增加1.2~1.8元。

4.2 创新方向

突破技术瓶颈需从材料创新、工艺集成和智慧管理三方面入手。在材料研发方面,开发石墨烯量子点修饰的聚酰胺复合膜,利用纳米限域效应提升水通量50%,降低膜污染;通过两性离子聚合物改性膜材料,使膜抗污染性能提高3倍。在工艺优化方面,推广电化学-生物协同技术,利用微生物燃料电池将染料转化为电能,同时耦合高级氧化技术,提升难降解染料的去除效率;采用微藻培养系统处理废水,利用废水中的氮磷营养和二氧化碳碳生产物质,藻体热解后制成生物炭用于深度处理^[5]。在智慧管理层面,构建基于数字孪生和强化学习的智能控制系统,实时监测12项关键水质参数,精准调控药剂投加和设备运行,将膜寿命延长30%。

5 结束语

印染废水处理技术的创新是推动行业实现生态化转型的核心环节。实践表明,通过深入解析废水高毒性、成分复杂、水质波动大等特性,搭建“前端预处理—中端深度净化—末端资源回收”的一体化技术框架,能够有效提升整体处理效果。物理与生物协同预处理可去除75%以上的难降解有机物,减轻后续处理单元的压力,高级氧化、纳滤等深度净化技术能将出水COD控制在40 mg/L以内,保障排放水质的长期稳定。未来,应加强智能化管控技术的融合应用,借助物联网与大数据分析系统动态优化工艺运行参数,有望降低运行能耗12%~18%,同时研发MOFs基复合吸附材料等新型功能材料,攻克高浓度染料废水处理的技术难题。通过多技术协同创新,促使印染废水处理朝着高效能、低排放、可循环的方向迈进,达成生态环境保护与产业发展的协同共进。

参考文献:

- [1] 广东省生态环境厅. 纺织印染行业废水处理与回用技术指南[R]. 广州:广东省环境科学研究院,2021.
- [2] 李志强,王海涛. 印染废水催化氧化-膜分离协同处理技术研究[J]. 环境工程学报,2020,14(09):2301-2303.
- [3] 绍兴市生态环境局. 印染行业废水处理典型案例汇编[Z]. 绍兴:绍兴市环境保护科技推广中心,2024.
- [4] 国家发展和改革委员会. 纺织染整行业清洁生产评价指标体系[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [5] 丁文政. 印染废水处理技术的能源效率与环境绩效综合评估[J]. 印染助剂,2025,42(01):7-11.