

基于膜生物反应器的印染废水深度处理技术研究

黄涛

深圳市海景环保技术有限公司，广东 深圳 518101

DOI: 10.61369/EAE.2025010008

摘 要： 文章聚焦于印染废水深度处理中的技术问题，构建以膜生物反应器为主体的集成处理体系，系统地设计并结合了印染废水高色度、高有机负荷特性，明确膜组件配置与生化参数匹配机制，并开展了工况参数对出水水质影响的试验研究，分析污泥龄、膜通量和气水比等变量对 COD_{Cr} 与色度去除率的调控效应。结果揭示了跨膜压差增长规律与膜污染控制关键因素，评估处理后出水的达标能力与回用适配性，以此提出工艺优化路径与工程应用建议。

关 键 词： 膜生物反应器；印染废水；深度处理；膜污染控制；出水水质

Research on Advanced Treatment Technology for Printing and Dyeing Wastewater Based on Membrane Bioreactor

Huang Tao

Shenzhen Haijing Environmental Protection Technology Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong 518101

Abstract： This article focuses on the technical issues in the advanced treatment of printing and dyeing wastewater, constructing an integrated treatment system with a membrane bioreactor as the main component. It systematically designs and combines the characteristics of high chromaticity and high organic load of printing and dyeing wastewater, clarifies the matching mechanism between membrane module configuration and biochemical parameters, and conducts experimental research on the influence of operating conditions on effluent water quality. The study analyzes the regulatory effects of variables such as sludge age, membrane flux, and air–water ratio on COD_{Cr} and chromaticity removal rates. The results reveal the growth pattern of transmembrane pressure difference and the key factors for membrane fouling control, evaluate the compliance and reuse adaptability of the treated effluent, and propose process optimization paths and engineering application suggestions based on this.

Keywords： membrane bioreactor; printing and dyeing wastewater; advanced treatment; membrane fouling control; effluent water quality

引言

印染行业在纺织加工过程中产生大量高浓度、高色度、高有机负荷的废水，其成分复杂、水质波动大，常规生化处理难以稳定达到排放或回用标准。膜生物反应器技术结合膜分离与生物降解优势，具备出水水质稳定、占地面积小、抗负荷冲击能力强等特点，已在印染废水深度处理领域展现出良好应用前景^[1]。随着水资源保护与循环利用需求的不断提升，探索适用于印染废水深度净化的高效膜生物反应器已成为工程实践中的关键方向。

一、印染废水水质特征与处理难点分析

印染废水在生产各阶段均产生大量含有助剂、染料、表面活性剂及其他有机化学品的高浓度复合废水，水质变化频繁，具有高色度、高 COD_{Cr}、高盐分、低可生化性等典型特征。废水中常见的活性染料与分散染料结构稳定，分子中含有苯环、偶氮基、硝基等难降解基团，导致生物处理过程中微生物难以有效分解，去除效率受限^[2]。废水 COD_{Cr} 常维持在 800 ~ 2000 mg/L，色

度超过 200 倍，部分还原染料体系 pH 波动剧烈，增加处理过程负荷。高浓度盐分抑制微生物活性，并对膜结构造成物理胀缩与孔隙堵塞风险。废水中含有的胶体颗粒和可溶性有机物易在膜面形成浓差极化层，加剧膜污染速率，降低膜通量，影响出水水质稳定性。印染废水处理还需面对进水水质波动幅度大、峰值冲击频繁等复杂工况，需具备良好的缓冲能力与高容忍度的技术路径^[3]。

作者简介：黄涛（1987.05—），男，汉族，湖北潜江人，研究方向：环境工程。

二、MBR 处理工艺设计与运行参数设定

（一）工艺流程设计

膜生物反应器处理单元设置于预处理段与后续深度净化之间，整体构建以稳定进水、有机负荷削减、产水达标为目标的连续流工艺路径^[4]。预处理区设置格栅和沉淀装置用于初步去除大颗粒悬浮物及部分无机杂质，调节池用于平衡水质与水量，确保进入膜生物反应器段的有机负荷处于稳定区间。生化处理段采用完全混合式曝气池，配合膜组件池构成主体单元，曝气区配置微孔曝气盘与循环搅拌器，形成稳定的溶氧环境与泥水混合态^[5]。膜分离区安装中空纤维膜组件，设置产水抽吸泵维持恒定负压，抽吸侧配置压力监测与反洗控制装置，利用间歇抽吸和周期反洗策略调控膜污染发展速率。

（二）反应器与膜组件参数配置

反应器主体为矩形钢结构池体，内部衬以环氧树脂防腐涂层，反应有效容积为3.5 m³，设置溢流调节口与观察窗，便于日常维护与运行监控^[6]。反应区采用一体化设计，将曝气区与膜池区隔离布置，曝气区容积占比65%，配比合理以利于有机物降解与泥龄维持。膜组件选用中空纤维型PVDF材质，膜孔径为0.1 μm，单组膜面积20 m²，总装膜面积80 m²，安装方式为立式悬挂，膜束分布均匀、流体扰动良好。产水方向自内向外，抽吸负压维持在-15 kPa以内，设置气水联合清洗管路与反洗接口，采用鼓风辅助气体冲刷模式增强膜面扰动效果。膜组件框架采用不锈钢材质，具备可拆卸结构，便于更换与清洗操作^[7]。

（三）试验运行参数与控制条件设置

水力停留时间设定为6 h，反应器污泥浓度维持在MLSS 8000 ~ 10000 mg/L区间，以维持高效生物降解能力。污泥龄控制在25 d，采用间歇排泥策略，基于每日SV30观测数据动态调整排泥频率与时长。曝气量控制在每小时3.2 m³，配置变频风机联动溶解氧探头实时调节供气强度，溶解氧浓度稳定维持在2.0 ~ 3.5 mg/L之间^[8]。膜抽吸采用周期运行模式，抽吸持续8分钟，停止2分钟，周期性反洗每2小时进行1次，反洗时间设置为30秒，反洗流速为产水流速的1.5倍^[9]。膜通量计算采用以下公式：

$$J = \frac{Q}{A}$$

其中，J为膜通量（L/m²·h），Q为单位时间产水量（L/h），A为有效膜面积（m²）。跨膜压差监测频率为每15分钟一次，预警值设定为25 kPa，超过后执行强力气水反洗流程。系统自动记录出水流量、膜压、曝气频率等核心运行参数，并通过上位机软件形成数据曲线，支持过程追溯与运行优化分析^[10]。水温控制范围维持在18 ~ 28℃，环境条件记录并计入数据分析变量。

三、运行效果分析与技术评价

（一）CODcr与色度去除效果分析

在连续运行30天的稳定负荷阶段内，监测进出水的CODcr与色度变化情况，形成典型处理周期内的波动曲线。图1显示原水

CODcr波动范围在950 ~ 1450 mg/L之间，平均为1190 mg/L。图2可见色度集中在220 ~ 310倍，平均色度为265倍。MBR出水的CODcr稳定控制在40 ~ 85 mg/L之间，平均值为62 mg/L，整体去除率维持在92.3%以上；色度出水范围为5 ~ 18倍，平均为11倍，对应平均去除率达95.8%。结果表明，在曝气强度、污泥浓度和膜抽吸控制参数维持恒定的条件下，有机污染物与染料结构在复合生化-膜分离耦合机制下可实现高效协同去除，且未观察到负荷积压或性能劣化现象。

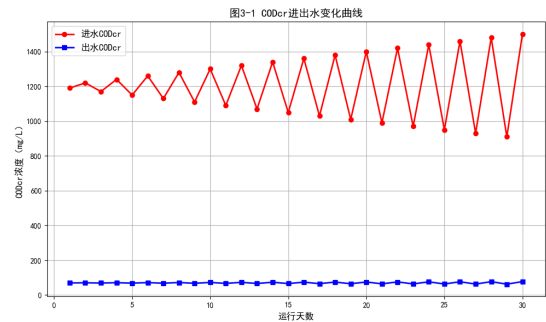


图1 CODcr进出水日变化曲线

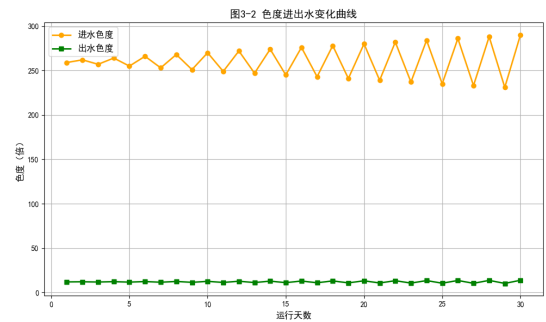


图2 色度进出水日变化曲线

（二）膜污染发展规律与控制策略

跨膜压差（TMP）在稳定运行初期维持在9 ~ 12 kPa区间，反洗周期为每2小时1次，每次持续30秒，配合10分钟/2分钟的抽吸/停止间歇策略维持膜表面负荷平衡。随着运行时间延长至第12天后，TMP呈缓慢上升趋势，至第20天达到17.6 kPa，出现轻微膜面污染积累，出水通量略有下降。调整反洗频率至每小时1次，并在第21天实施气水联合强清洗，TMP降至11.2 kPa并保持稳定，恢复原有抽吸流量。在第30天末端，TMP稳定维持在13.1 kPa，未出现不可逆堵塞风险。膜污染发展表现出周期性积累—恢复规律，与产水间歇结构密切相关，强化在线反洗与气体扰动对控制污染速率效果显著，具体见图3。

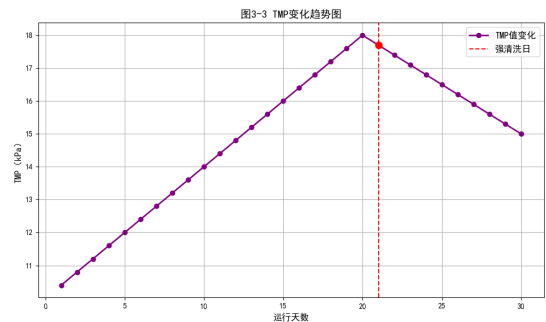


图3 TMP变化趋势及反洗干预节点示意图

（三）出水水质达标情况与对比分析

以《纺织染整工业水污染物排放标准》（GB 4287-2012）为对比依据，对出水主要水质参数进行达标评估，如表1。出水CODcr平均为62 mg/L，远低于一级标准（80 mg/L）；氨氮平均为4.2 mg/L，满足一级标准限值（8 mg/L）；色度控制在11倍内，优于标准上限（40倍）；悬浮物、pH、溶解氧等指标亦处于合格区间。MBR出水可满足印染废水达标排放要求，具备直接回用前置基础，若配合活性炭或纳滤系统，可以具有进一步再利用潜力。

表1 出水水质与排放标准对比表

指标	出水平均值	标准限值（一级）	是否达标
CODcr	62 mg/L	80 mg/L	是
色度	11 倍	40 倍	是
氨氮	4.2 mg/L	8.0 mg/L	是
SS	5 mg/L	20 mg/L	是
pH	7.3	6 ~ 9	是

四、关键影响因素与优化探究

（一）SRT（污泥龄）对处理效果的影响

污泥龄作为调控微生物代谢结构与反应器稳定运行的关键变量，对有机物去除效率及膜组件运行状态具有显著影响。在运行过程中，当SRT控制在25 d左右，MLSS浓度维持在9000 mg/L上下，可形成稳定的菌群结构，保障对难降解染料及中分子有机物的持续降解能力。试验中进一步延长SRT至35 d，观察到出水CODcr及色度无明显改善，反而出现污泥沉降性能下降、SVI升高至190 mL/g的趋势，间接导致膜面负荷加重，通量略有下降，TMP积累速率加快。相反，在缩短SRT至15 d的阶段，污泥活性虽有所提升，但对复杂染料分子的截留降解效果明显减弱，色度去除率降低至85%以下，说明生物群落未能充分适应高负荷条件下的染料降解需求。综合分析表明，维持中长SRT有助于微生物群落结构稳定，有利于持久应对印染废水的成分复杂性和冲击负荷波动。

（二）膜污染控制优化策略研究

在运行周期内的TMP监测结果表明，污染积累呈现出典型的“缓升—跃增—恢复”三阶段特征，污染的核心驱动机制来自

于高浓度有机胶体物质和高盐背景下的膜孔堵塞与膜面附着层厚化。在连续运行初期，采取固定反洗频率和标准气水比清洗方式对污染具有抑制作用，但当运行周期接近20 d时，TMP升高速率加剧，标准反洗频率无法有效控制膜阻增长，需调整为高频反洗（1 h/次）并引入错流扰动策略。采用间歇式强曝气扰动并结合反向抽吸，在21天后有效降低TMP至初始阶段水平，通量恢复率达92%以上。此类控制模式对高色度废水中的微絮体、微生物代谢产物（SMP）及可溶性微污染物（DOM）聚集影响的响应效果优于常规反洗策略。此外，在膜组件布局优化过程中，将膜片间距调整至4 mm，并采用底部均布鼓风气孔板，使局部死角流减少40%以上，进一步延缓了表面膜层形成周期。

（三）深度处理与回用适配性探讨

在原始处理单元出水基础上，出水CODcr已优于《纺织染整工业水污染物排放标准》（GB4287）一级排放限值，色度控制在20倍以下，氨氮、SS等指标亦处于优良状态，具备作为回用水源的基础条件。进一步检测中发现，残余微量染料、溶解有机碳（DOC）及部分表面活性剂在出水中仍有检测，需配合后续精密处理单元进行截留与去除。在实际工程可行性上，采用超滤—活性炭吸附组合段可使色度降至5倍以下，CODcr进一步降至30 mg/L左右；若采用纳滤或反渗透作为末端强化，可实现印染废水在漂洗、定型或冷却等环节的回用。运行经济性评估表明，以膜生物反应器为核心段构建的处理路径相较常规“好氧+A/O”工艺，在占地缩减35%、自动化水平提升的前提下，单位水量处理成本提升控制在12%以内，具备高标准排放或企业内部中水回用的技术潜力。建议后续工程中针对目标用途设计分级深度净化路径，实现技术适配性与经济合理性的双向兼顾。

五、结论

膜生物反应器在应对印染废水高色度、高有机负荷特性条件下表现出稳定的处理性能，其关键运行参数如污泥龄、膜通量控制与反洗频率对出水质量和膜运行状态具有显著影响，动态反洗与气水扰动结合可有效抑制污染积累趋势。污泥负荷管理与膜组件结构优化协同调节能够提升运行连续性与出水一致性，在处理目标明确的场景中结合深度处理单元可满足不同回用需求，具有良好的技术可控性与资源化拓展潜力。

参考文献

[1] 张璐, 刘惠, 严明. 膜生物反应技术在环境工程污水处理中的应用研究 [J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(12): 129-131.

[2] 戴雅, 谢新敏. 膜生物工艺优化及其在煤矿废水零排放中的应用 [J]. 能源与节能, 2024, (10): 135-137.

[3] 张亚兵. 膜生物反应器在医疗废水处理中的应用 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(09): 258-260.

[4] 顾军, 赵敏燕, 栾燕, 等. 膜生物反应器及其在工业废水处理中的应用 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(08): 134-136.

[5] 潘卿. 膜生物反应技术在环境工程污水处理中的应用探讨 [J]. 清洗世界, 2024, 40(07): 76-78.

[6] 刘垚. 膜生物反应技术在环境工程污水处理中的应用 [J]. 石材, 2024, (07): 87-89.

[7] 张波, 王高骏, 付鹏, 等. 高浓度氨氮对厌氧膜生物反应器处理养猪废水的抑制影响及生物炭缓解效能 [J]. 环境工程学报, 2024, 18(05): 1283-1291.

[8] 张昱, 王辰, 韩子铭, 等. 厌氧膜生物反应器处理抗生素废水研究进展与展望 [J]. 环境工程学报, 2024, 18(03): 623-633.

[9] 李灿, 黄斌, 古航坤, 等. 厌氧膜生物反应器—纳滤/反渗透处理印染废水 [J]. 水处理技术, 2021, 47(06): 98-103.

[10] 刘鲁建, 董俊, 张岚欣, 等. 粉末活性炭膜生物反应器深度处理印染废水的中试 [J]. 化学与生物工程, 2021, 38(01): 43-46.