

Optimization of Co-Separation Technology for High-Salinity and High-COD Wastewater and Its Engineering Application in the Textile Industry

Yungang Luo Jie Liu Hongwei Qiao Shouxiu Sun Yiling Chen

Korla Zhongtai Textile Technology Co., Ltd., Korla, Xinjiang, 841000, China

Abstract

The wastewater discharged from the textile printing and dyeing industry contains a large amount of high salt and high COD. Traditional separation processes have low separation efficiency, low degree of salt resource utilization, and serious membrane pollution, which cannot meet the requirements of industry emission reduction and resource utilization. After optimizing the synergistic effects of pretreatment, membrane concentration, and evaporation crystallization, key unit parameter adjustment and improved drug compatibility were adopted to achieve efficient separation of salt and organic matter, improve salt crystal purity and COD removal efficiency. Combined with the engineering application requirements of the textile industry, the integrated design of the system was completed to solve the efficiency problems of traditional processes in practical operation, providing technical support and engineering reference for the treatment of high salt and high COD wastewater in the textile industry.

Keywords

high salt and high COD wastewater; collaborative separation; membrane concentration; evaporative crystallization; textile printing and dyeing; engineering application

高盐高 COD 废水协同分离技术优化及纺织行业工程应用实践

罗云刚 刘洁 乔宏威 孙守秀 陈依铃

库尔勒中泰纺织科技有限公司, 中国·新疆 库尔勒 841000

摘要

纺织印染行业的排放废水含有大量高盐高COD, 传统的分离工艺分离效率低、盐资源化程度不高、膜污染严重, 不能满足行业减排和资源化利用的要求。经过对预处理、膜浓缩和蒸发结晶三者协同作用进行优化, 采用关键单元参数调节以及药剂配伍改善的方式, 达到盐分和有机物高效分离的目的, 提高盐晶纯度和COD去除效果, 结合纺织行业的工程应用需求完成系统的集成设计, 解决传统工艺在实际运行中出现的效能问题, 给纺织行业的高盐高COD废水处理提供技术支持和工程参考。

关键词

高盐高COD废水; 协同分离; 膜浓缩; 蒸发结晶; 纺织印染; 工程应用

1 引言

纺织印染过程中染料、助剂的大量使用造成废水含有大量的盐分和有机污染物, 呈高盐高 COD 特征, 直接排放会造成水体生态系统的严重破坏, 传统的处理工艺大多采用单一分离的方式, 不能实现盐分和有机物的深度分离, 而且容易造成膜污染、结垢严重、能耗偏高等问题, 使处理后的废水达不到排放标准, 盐资源也无法得到有效地回收。传统工艺设计缺陷的原因是没有考虑到高盐环境对 COD 降解的

抑制作用, 忽略了协同分离过程中热力学和动力学的耦合效应, 造成工艺单元衔接不好, 运行效率无法提高。根据以上对工艺瓶颈的分析, 协同分离技术依靠多单元耦合以及参数调节, 实现盐分回收和 COD 去除的协同前进, 工程应用可以很好地解决纺织行业废水处理难题, 助力行业绿色低碳转型。目前技术优化大多停留在实验室阶段, 与纺织行业实际废水水质、运行工况的契合度欠缺, 亟需通过工程实践加以检验并改进, 构建完善的工艺应用体系。

【作者简介】罗云刚(1988-), 男, 回族, 中国甘肃天水人, 本科, 工程师, 从事人造纤维素纤维研究。

2 高盐高 COD 废水水质特征与协同分离机制分析

2.1 典型纺织印染废水盐分与有机物组成谱图

纺织印染废水中的盐分主要是由染色、固色时加入的盐类助剂引起的，其组成主要是氯化物和硫酸盐，其中还含有少量重金属盐类，盐分的组成受染料种类、生产工艺的影响较大，盐分的存在形式主要是溶解态，不能用常规沉淀的方法进行分离。有机物组分主要是染料、浆料和表面活性剂，染料分子结构复杂、稳定性好，不能生物降解，浆料和表面活性剂会提高废水的黏度，增大分离难度。组成谱图表明，该类废水的有机物和盐分是协同存在的，有机物分子容易吸附在盐分离子表面，形成稳定的胶体体系，使得单一分离工艺很难实现两者的高效分离，同时有机物的存在会干扰盐分的结晶纯度，高盐环境又会抑制有机物的降解转化^[1]。

2.2 高盐度对 COD 降解过程的抑制效应及机理

高盐度对于 COD 降解的抑制作用在处理过程中一直存在，主要机理是渗透压失衡以及细胞膜通透性改变。高盐环境里，水体渗透压明显增大，微生物细胞内部溶液浓度比外界低很多，水分就会由细胞内流向细胞外，造成微生物体内水分大量丧失，破坏内部的生物化学反应环境，进而使代谢过程被中断，直到菌体死亡。细胞膜选择透过性的改变受到盐浓度的影响，盐分会影响微生物对营养物质的吸收过程，一些重金属盐类还会进入细胞内，破坏酶的活性，从而抑制有机物的降解。高盐环境还会降低有机物的可生物降解性，使 COD 去除速率大幅度下降，而且还会加重污泥膨胀、泡沫泛出等状况，造成生化处理单元失效，这种抑制效应会随着盐度的起伏而加重，给协同分离工艺的稳定运行造成困难^[2]。

2.3 协同分离过程的热力学与动力学基础

协同分离过程的热力学基础是盐分和有机物在不同的相态中分配的不同，通过调节温度、压力等参数来改变体系的 Gibbs 自由能，使盐分和有机物向不同的相态迁移，达到分离的目的。膜浓缩环节中，膜的选择透过性是根据热力学平衡原理来实现的，即盐离子和水分子先通过膜组件，然后有机物分子被截留，其驱动力是膜两侧的压力差，符合渗透平衡规律。蒸发结晶环节依靠盐分和有机物的沸点差别，借助热量输入让水分蒸发，盐分到达过饱和状态之后就会结晶析出，热力学上体现为体系熵增的自发过程。动力学上协同分离过程速率受传质速率和反应速率共同影响，膜浓缩过程中，错流速度提高可以减小浓差极化，加快盐分传质速率，在蒸发结晶过程中，加入晶种可以降低成核能垒，加快结晶速率，但是有机物的存在会吸附在晶核表面，延缓结晶过程，需要通过药剂调控来减少其干扰。

3 协同分离工艺单元优化与关键参数调控

3.1 预处理—膜浓缩—蒸发结晶的耦合工艺构型

耦合工艺构型是以预处理除杂、膜浓缩富集、蒸发结

晶回收为基本逻辑，打破传统单一工艺的局限性，使各个单元之间相互配合。预处理单元使用混凝和过滤相结合的方法，通过投加混凝剂来破坏废水的胶体体系，去除悬浮杂质和一部分大分子有机物，降低后面膜组件的污染负荷，过滤环节选择精密过滤介质，拦截微小杂质，防止膜孔堵塞。膜浓缩单元为关键的分离环节，采用抗污染膜组件，对盐分和有机物进行初步分离，浓缩后的高盐废水进入蒸发结晶单元，将盐分分离出来并回收利用，膜截留的有机物进入后续降解单元处理。耦合工艺的关键是单元之间的流量匹配和参数协调，预处理后废水水质要符合膜浓缩单元的进水要求，膜浓缩的浓缩比要与蒸发结晶单元的处理能力相适应，防止出现单元之间负荷失衡，造成工艺运行紊乱。^[3]

3.2 抗污染膜组件及操作压力 / 错流速度优化

抗污染膜组件的优化主要集中在膜材质的改性和结构的设计上，选择亲水性膜材料，采用表面改性技术负载纳米颗粒，增加膜表面的亲水基团，减少有机物的吸附，降低膜污染速率。膜组件结构为错流过滤，加大膜表面流体扰动，减小浓差极化，提高分离效率。操作压力的调节要根据废水水质和膜组件性能来定，压力过高会造成膜污染、膜损伤，压力过低会使分离速率降低，用梯度压力试验来确定最佳的操作压力范围，保证分离效率和膜寿命的平衡。错流速度的优化要兼顾传质效率和能耗，速度过低会造成膜表面污染物沉积，速度过高会增大能耗，通过调节错流速度，使膜表面形成稳定的流体边界层，减少污染物吸附，延长膜污染周期。

3.3 蒸发结晶段过饱和度与晶种调控对盐晶纯度影响

蒸发结晶段的过饱和度以及晶种调节直接影响盐晶的纯度，过饱和度过高会造成晶体粒度不均、纯度降低，过饱和度过低会造成结晶周期变长，降低处理效率。过饱和度的调节依靠控制蒸发温度和蒸发速率来实现，防止过饱和度过大或过小造成剧烈波动，保证盐分结晶处于稳定的状态，降低杂质包裹的风险。晶种的选用要和目标盐类相匹配，选用纯度高、粒径均匀的晶种，加入适量的晶种作为结晶的核心，抑制自发成核，防止细小晶体团聚，提高盐晶的纯度。晶种投加量要精确控制，投加过多会造成晶体相互碰撞团聚，投加过少则不能起到晶种的作用，通过动态调节晶种投加量和结晶时间来提高盐晶纯度，保证回收的盐分符合工业复用的标准^[4]。

3.4 高 COD 抑制结垢的药剂配伍及实时控制策略

高 COD 废水中的有机体会吸附在结晶表面，造成结垢现象加重，影响蒸发结晶的效率和盐晶的纯度，需要通过药剂配伍来达到结垢抑制的目的。药剂配伍采用阻垢剂和分散剂复合使用的方式，阻垢剂选择能与盐离子形成稳定络合物的类型，抑制晶体生长和团聚，分散剂能分散结晶表面的有机物吸附层，减少结垢沉积。药剂配伍比例要根据废水 COD 浓度和盐分组成动态调节，防止药剂过多造成二次污染，或者药剂不足达不到阻垢效果。实时控制策略依靠对废

水 COD 浓度、结垢速率等参数的在线监测，建立反馈机制，自动调节药剂投加量和工艺参数，当 COD 浓度上升的时候，适当加大分散剂的投加量，当结垢速率变快的时候，改善阻垢剂的配比，保证结垢抑制效果稳定，维持工艺连续运行。

4 纺织行业工程应用实践与运行效能评价

4.1 典型印染企业废水协同处理系统集成设计

系统集成设计以典型印染企业废水水质特点为基础，按照“适配性、经济性、稳定性”原则将预处理、膜浓缩、蒸发结晶和辅助单元等有机整合在一起，构建起一个完整的协同分离处理系统。预处理单元设混凝反应池、沉淀池、精密过滤器，采用连续式运行方式，保证废水处理量和企业排放量相适应，膜浓缩单元为模块化设计，方便后期扩容和维护，膜组件采用抗污染型，根据废水盐分浓度调节膜组件数量，蒸发结晶单元使用高效蒸发设备，配合余热回收系统，降低能耗，辅助单元包含药剂投加系统、在线监测系统、自控系统，对工艺参数实施实时监测并完成自动调控。根据企业现有的场地情况布置系统，优化管线设计，减少废水输送过程中所消耗的能源和损耗，保证各个单元之间的顺畅衔接，提高整个系统的运行效率。

4.2 连续运行中盐回收率与 COD 去除率的协同响应

连续运行时，盐回收率同 COD 去除率存在着明显的协同响应关系，膜浓缩单元的分离效果好坏直接决定了两者协同性的高低。膜浓缩单元运行稳定时，盐分透过膜组件进入浓缩液，有机物被有效截留，提高后续蒸发结晶的盐回收率，降低蒸发结晶单元的有机物干扰，COD 去除率提高可以减少有机物对膜组件的污染，延长膜运行周期，进一步提高盐回收率。当废水 COD 浓度发生波动时，盐回收率也会随之同步波动。COD 浓度增大会引起膜污染加重，分离效果变差，盐回收率降低。这时需要调整膜清洗次数和药剂投加量，使膜的分离性能得到恢复，从而保持盐回收率和 COD 去除率的共同稳定。

4.3 膜污染周期与化学清洗方案的工程优化

膜污染周期的改善依靠调节工艺参数并加强预处理效果。预处理单元的高效除杂能减少膜表面污染物沉积，从而延长膜污染周期。错流速度和操作压力的优化能减少浓差极化和膜损伤，进而推迟膜污染。膜污染后，化学清洗方案要针对性设计。根据膜污染类型选择合适的清洗剂，有机污染用碱性清洗剂，无机污染用酸性清洗剂，防止清洗剂对膜材质造成损害。清洗周期和清洗时间要根据运行数据进行动态调节，防止过度清洗造成膜寿命变短，或者清洗不彻底引发膜污染加重。清洗时保持清洗剂浓度和清洗温度的稳定，保

证清洗效果的同时控制清洗剂用量，减少二次污染风险。

4.4 工程经济性分析：吨水能耗、盐资源化收益及减排效益

工程经济性分析主要从吨水能耗、盐资源化收益、减排效益三个方面进行综合评价，吨水能耗包括膜浓缩单元动力消耗和蒸发结晶单元热量消耗，利用余热回收系统和参数优化可以大大降低吨水能耗，提高工程经济效益。盐资源化收益来自回收盐分的工业复用，回收的盐分可以再利用到纺织印染生产过程中染色、固色环节，减少新鲜盐类的采购成本，降低废水中盐分排放造成的环保压力。减排效益主要是 COD 去除带来的水体污染减排，处理后的废水达标排放，减少污染物排放总量，降低企业环保处罚风险，减少水资源消耗，实现水资源循环利用，推动纺织企业绿色低碳生产，提高企业核心竞争力。

5 结语

高盐高 COD 废水协同分离技术的优化，关键就是破解各个工艺单元的衔接瓶颈和参数匹配的问题，采用预处理、膜浓缩、蒸发结晶的耦合构型，结合抗污染膜组件优化、参数调控、药剂配伍来实现盐分和有机物的高效分离，提高处理效能和资源化水平。纺织行业工程应用实践证明，经过优化的协同分离系统运行稳定，可以很好地适应纺织印染废水的水质特点，解决传统工艺膜污染严重、盐回收率低、能耗偏高的问题，达到盐资源化回收和 COD 减排的目的。协同分离技术工程应用仍有进一步改善的空间，以后要依靠更多的纺织企业实际工况来改进工艺参数和系统设计，提高技术的适应性和经济性，促进该技术在纺织行业的规模化应用，给行业废水处理和绿色转型提供更好的技术支撑。

参考文献

- [1] 施国忠,张雅琴,张林.聚硅酸复合絮凝剂在典型工业高盐废水深度除氟及协同COD去除中的应用研究[J].水处理技术,2025,51(11):122-128.
- [2] 李福勤,陈宇航,郑斐州,代其彬,田莉,李伟宪.高盐高COD废水电渗析分盐实验及工程应用[J].水处理技术,2026,52(1):108-112.
- [3] 安子韩,高丽丽,单科,张琦,潘春佑,黄鹏飞.面向高盐高COD废水预处理的仿生膜制备及抗污染性能研究[J].盐科学与化工,2026,55(1):42-45+54.
- [4] 刘飞飞,武彦巍,王文涛,唐彤,马海龙.膜技术与蒸发结晶工艺在VB_(12)高盐废水零排放中的应用[J].工业水处理,2025,45(3):219-226.
- [5] 陈腾,赵茹涵.膜分离技术在化工过程中高盐废水处理与资源回收的关键技术研究[J].山西化工,2025,45(10):257-259.