

# 印染废水的节能型中水回用系统研究

范向东<sup>1,2\*</sup>, 邱地恒<sup>2</sup>, 张玉新<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海瑜科环境工程有限公司, 上海

<sup>2</sup>北纺智造科技有限公司, 广东 韶关

收稿日期: 2024年9月14日; 录用日期: 2024年10月7日; 发布日期: 2024年10月12日

## 摘要

针对双膜法(超滤 + 反渗透)工艺处理印染废水时存在高能耗、高污染、高清洗频率等“三高”问题, 设计一种印染废水节能型中水回用系统, 该系统由深度预处理单元和膜单元组成。深度预处理过程中, 选择PAC为絮凝剂, PAC的投加量为100 mg/L, 最佳絮凝pH值为7.0; 臭氧催化氧化反应时, 臭氧的投加量30 mg/L, 氧化时间为30 min。废水经深度预处理后, 进膜水质达到设计要求, 膜系统污堵减少、清洗频率降低。膜单元采用独特的膜系统工作方式及带有自调型能量回收装置, 使得膜运行过程的能耗大幅下降, 还能减少反渗透浓差极化现象。在工程运行中, 膜单元的吨水电耗总和为1.38~1.40 kw·h。

## 关键词

中水回用, 节能, 预处理, 絮凝, 臭氧氧化

# Research on Energy Saving Reclaimed Water Reuse System of Printing and Dyeing Wastewater

Xiangdong Fan<sup>1,2\*</sup>, Diheng Qiu<sup>2</sup>, Yuxin Zhang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Yuke Environment Engineering Co. Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>Prosperity Textile Co. Ltd., Shaoguan Guangdong

Received: Sep. 14<sup>th</sup>, 2024; accepted: Oct. 7<sup>th</sup>, 2024; published: Oct. 12<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

An energy saving reclaimed water reuse technology of printing and dyeing wastewater was designed

\*第一作者。

文章引用: 范向东, 邱地恒, 张玉新. 印染废水的节能型中水回用系统研究[J]. 水污染及处理, 2024, 12(4): 67-76.

DOI: 10.12677/wpt.2024.124010

to address the “three highs” problems of high energy consumption, high pollution and high cleaning frequency in the treatment of printing and dyeing wastewater using the dual membrane method (ultrafiltration + reverse osmosis). The system consisted of advanced pretreatment unit and membrane unit. During the advanced pretreatment, PAC was selected as flocculant during flocculation and the dosage of PAC was 100 mg/L and the optimal pH value for flocculation was 7.0. During the catalytic oxidation reaction, the dosage of ozone was 30 mg/L and the reaction time was 30 min. The water quality of incoming membrane met the design requirements and the fouling of membrane system and cleaning frequency were reduced after advanced pretreatment. The membrane unit adopted a unique membrane system working mode and was equipped with a self-adjusting energy recovery device, which significantly reduced the energy consumption during membrane operation. It also can reduce the reverse osmosis concentration polarization phenomenon. During the operation of the project, the total electricity consumption per ton of water in the membrane unit was 1.38~1.40 kw·h.

## Keywords

Reclaimed Water Reuse, Energy Saving, Pretreatment, Flocculation, Ozonation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

据不完全统计,我国印染废水年排放量在 23 亿吨左右,占工业废水总量的 35%,其中含有一定的无机盐、有机物、活性染料、匀染剂和渗透剂等多种印染助剂,作为一种水质变化大、污染物组成复杂、COD 高、色度高的难降解废水,经生化、物化等处理之后,印染废水的整体回用率不足 10% [1][2]。国家纺织工业“十二五”科技进步纲要以及工信部和发改委的要求:推广废水深度处理及回用技术,要求水重复利用率要达到 35%以上。目前,我国印染废水普遍采用双膜法(超滤 + 反渗透)工艺实现生产回用 [3][4],然而双膜法工艺处理印染废水时存在高能耗、高污染、高清洗频率等“三高”问题[5]。印染废水的膜法中水回用运行工程中,容易发生膜污堵现象,造成处理水量下降[6]。膜污堵情况下,长时间运行会对膜造成不可逆的损坏缩短其使用寿命,使得运行能耗增加。

针对广东某印染企业的生化出水,笔者设计一种印染废水节能型中水回用系统,该系统由深度预处理单元和膜单元组成。膜单元采用“超滤 + 反渗透”为主的膜处理工艺,采用独特的膜系统工作方式及自带自调型能量回收装置,使得膜运行过程的能耗大幅下降。为保证膜系统的稳定运行,减少超滤膜和反渗透膜污堵,提高膜使用寿命,必须对生化出水进行深度预处理,达到进超滤膜的水质要求。项目开展前进行了“絮凝 + 臭氧催化氧化”为主的预处理工艺研究和优化,试验过程中也对印染废水容易造成膜污堵原因进行探讨并提出相应的解决方案,为印染行业完善废水处理与回用工艺提供参考。

## 2. 实验部分

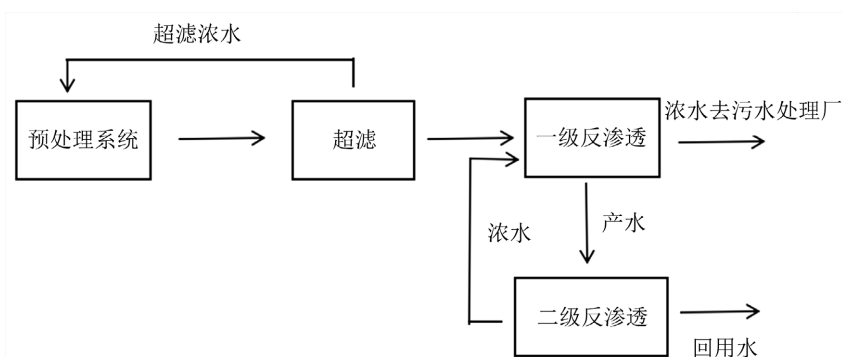
### 2.1. 实验水质

实验进水为该印染企业的生化出水,进水水质见表 1。回用水水质按照企业要求及参照印染行业回用水要求(《纺织染整工业回用水水质》FZ-T01107-2011)来设计,出水水质也见表 1。进超滤膜之前必须进行深度预处理,水质到达进超滤膜的设计要求,进超滤膜的设计水质要求也见表 1。

**Table 1.** Design indicators of influent and effluent quality**表 1.** 进出水水质设计指标

项目	COD (mg·L <sup>-1</sup> )	电导率 (us·cm <sup>-1</sup> )	pH	悬浮物浓度 (mg·L <sup>-1</sup> )	浊度(NTU)	色度(倍)
进水	≤100	≤8000	7.0~8.5	≤50	≤30	≤50
超滤进水	≤50	≤8000	6.5~8.5	≤10	≤5	≤10
回用水	≤10	≤50	6.5~8.5	≤5	≤3	≤10

中水回用系统工艺流程由“预处理系统” + “膜单元”组成，工艺流程见图 1。废水深度预处理流程为“絮凝沉淀 + 高级氧化 + 砂滤 + 保安过滤”的处理工艺，膜单元采用“超滤 + 一级反渗透 + 二级反渗透”的处理工艺。

**Figure 1.** The technological process of reclaimed water reuse system**图 1.** 中水回用系统工艺流程

## 2.2. 试剂和仪器

试剂：聚合硫酸铁(工业级，铁含量 19%)，固体 PAC(聚合氯化铝，工业级，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 28%)，聚丙烯酰胺(PAM，工业级，分子量为 2000 万)，硫酸铝、氢氧化钠、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>，以上试剂均为分析纯，PAM 配置成质量浓度为 1 g/L 的水溶液。

仪器：迈德施 MDS-3SCAD 便携 COD 氨氮总氮快速测定仪，雷磁 DGB-421 型便携式水质色度仪，2100Q 哈希便携式浊度测定仪，PHS-3C 水质 PH 检测仪，龙净新陆 NOL-5 小型臭氧发生器，电子天平，烘箱。

## 2.3. 实验方法

(1) 絮凝沉淀试验。分别取 500 mL 废水于烧杯内，向水样投加不同量的絮凝剂(聚合硫酸铁、PAC 和硫酸铝)，加酸或碱调节 pH 值后，用玻璃棒快速搅拌一分钟后，加入 PAM 助凝剂，快速搅拌 20 秒后再缓慢搅拌 10 秒后静置一段时间后，取上清液测量水样 COD 值和浊度。考察不同絮凝剂的投加量、不同 pH 值对 COD 去除效果的影响，确定最佳试验条件。

(2) 臭氧氧化试验。O<sub>3</sub> 反应柱先装臭氧催化剂，再装废水体积 20 L，分别调节 O<sub>3</sub> 投加量和 O<sub>3</sub> 反应时间，反应后取上清液测溶液 COD 值和溶液浊度，上清液静置 8 小时后重新测一次溶液浊度。

## 2.4. 分析方法

(1) COD 检测：化学需氧量的测定，快速消解分光光度法，HJ/T 399-2007。

(2) 废水悬浮物浓度测定：水质悬浮物的测定重量法(GB 11901-89)。

(3) 溶液浊度和色度分别采用便携式浊度仪和色度仪测定。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 不同预处理工艺参数下的废水处理结果

##### 3.1.1. 不同絮凝剂及投加量的絮凝效果比较

几种不同的絮凝剂分别进行絮凝沉淀小试，考察不同絮凝剂及絮凝剂的投加量对废水的 COD 的去除效果。絮凝沉淀后上清液取样测定 COD 值。图 2 可以看出，三种不同的絮凝剂对废水中的 COD 去除趋势基本一致，开始时随着絮凝剂浓度的增加，上清液中 COD 值不断减少；絮凝剂到一定的浓度后，上清液中 COD 值的保持相对稳定。絮凝剂投加浓度超过 200 mg/L 时，絮凝后上清液 COD 反而增加，同时观察到絮凝溶液变浑浊，说明过量的絮凝剂反而降低絮凝效果。针对本项目中的废水，聚合硫酸铁和硫酸铝的较合适的投加浓度在 150 mg/L 左右，PAC 的较合适的投加浓度为 100 mg/L 左右。考虑絮凝效果和药剂使用成本，我们选择 PAC 作为工程中使用的絮凝剂，PAC 投加量为 100 mg/L。

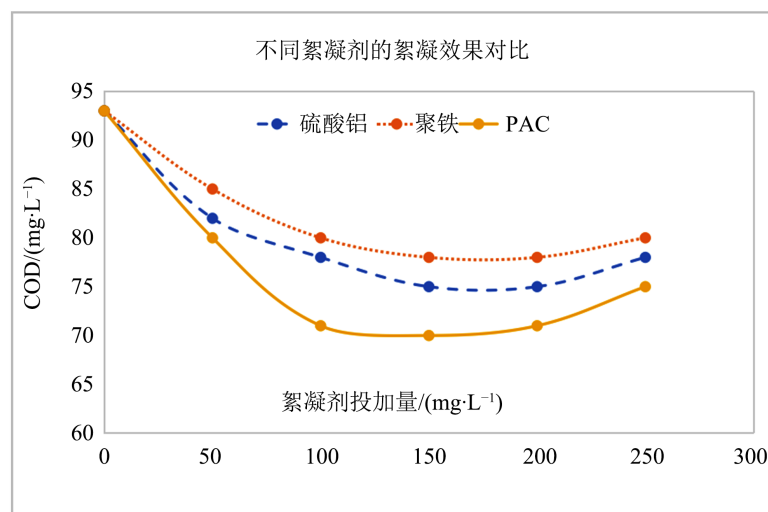


Figure 2. The flocculation efficiency comparison of different flocculants

图 2. 不同絮凝剂的絮凝效果对比

##### 3.1.2. 不同的 pH 值对 PAC 絮凝效果的影响

确定 PAC 作为絮凝剂后，用酸和碱调剂 PAC 絮凝时絮凝溶液至不同的 pH 值，考察絮凝时溶液不同 pH 对废水的 COD 的去除效果。图 3 中可以看出，开始时随着 pH 的升高，上清液中 COD 值不断减少；在 pH 在 6.5~7.5 之间，上清液中 COD 值的保持相对稳定；pH 超过 7.5 后，随着 pH 的上升，絮凝后上清液 COD 不减少反而增加。在 pH 5.5 到 6.5 之间，随着 pH 值升高时，PAC 水解的程度不断增加，絮凝效果也相应增加；在 pH 在 6.5~7.5 之间，PAC 的絮凝效果最佳；pH 超过 7.5 后，随着 pH 的上升，PAC 水解形成的  $\text{Al}(\text{OH})_3$  在碱性条件下部分被溶解成  $\text{AlO}_2^-$  而失去处理废水的絮凝作用。工程中我们选定 PAC 最佳絮凝 pH 值为 7.0 左右。

##### 3.1.3. 印染废水絮凝后溶液浊度二次增加原因分析

PAC 絮凝试验过程中我们发现：沉淀池上清液的浊度变化和絮凝过程投加的 PAC 浓度有关，还发现沉淀池出水溶液长时间放置后(试验中静止 8 小时后测定浊度)溶液浊度增加。从图 4 中可以看出：PAC

投加量的增大,絮凝上清液剩余浊度在随之减少到一定程度之后,不仅不再继续减少,而且随着混凝剂的投加量的增加絮凝沉淀上清液重新变为浑浊而使得溶液浊度增加。絮凝沉淀出水放置 8h 后溶液浊度也会增加,而且在 PAC 投加量超过 100 mg/L 后,投加量越多,静止 8h 后溶液浊度增加的越多。在中性 pH 条件下的 PAC 混凝过程,水( $\eta\text{-H}_2\text{O}$ )和羟基( $\eta\text{-OH}$ )是  $\text{Al}^{3+}$  的活化位点[7],过多絮凝剂容易造成残留在废水中的  $\text{Al}^{3+}$  含量增加,  $\text{Al}^{3+}$  在废水中有机分子产生“后絮凝”,它携带的羟基( $\eta\text{-OH}$ )具有桥链作用,使水解产物之间进行聚合反应,对水中的胶体微粒子起到吸附桥作用形成的胶体物质附着在膜表面或膜流道里。另一方面,为了提高染色效果印染过程中经常会使用到渗透剂或其它离子型表面活性剂等作为印染助剂(本项目中的企业在印染过程会使用脂肪醇聚氧乙烯醚、聚乙烯醇和聚酯类印染助剂)。部分印染助剂属于低聚物,它们可以与  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$  或  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  进行吸附作用及架桥作用,使这些低聚物进行缓慢聚合,增加其聚合分子量,自身或与废水其他有机物缓慢形成胶体束,从而造成溶液浊度缓慢增加,进而造成废水溶液的悬浮物浓度也相应增加,容易造成后续膜污堵。

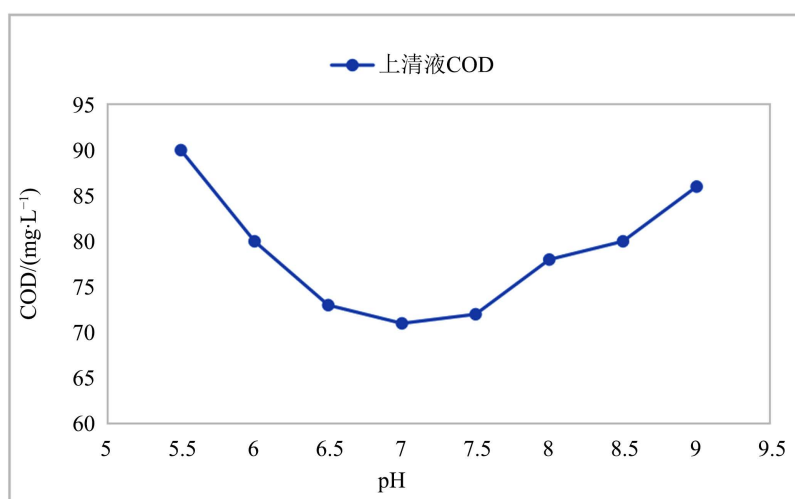


Figure 3. The flocculation efficiency comparison of PAC with different pH

图 3. 不同 pH 对 PAC 的絮凝效果对比

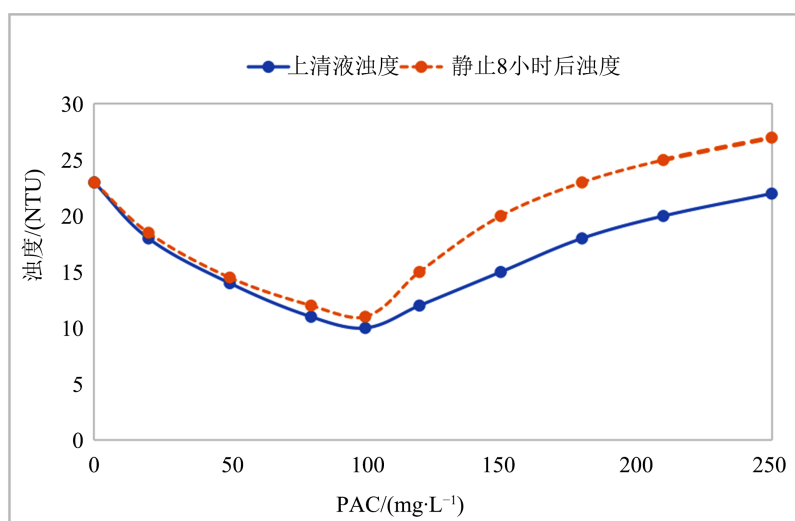


Figure 4. The comparison of turbidity of the solution

图 4. 溶液浊度对比

印染废水絮凝后溶液浊度二次增加造成废水中悬浮物浓度增加，这也许是印染废水中水回用过程中容易造成膜污堵的原因之一。文献报道：废水中残留的铝离子与天然有机物的络合物能加剧纳滤膜污染[8]，铝盐污染对反渗透系统的污堵影响非常严重[9]。

为了减少废水絮凝后溶液浊度二次增加现象，要准确控制或减少 PAC 的投加量，尽量减少  $Al^{3+}$  在溶液中残留含量，PAC 处于在最佳的絮凝条件下废水里残留的  $Al^{3+}$  浓度最小[10]。

减少废水絮凝后溶液浊度二次增加现象，还可以通过减少废水中能发生聚合反应的有机物含量，从源头上来解决问题。针对印染废水，可以通过高级氧化的方法将残留在废水的难降解的低聚物氧化成小分子或者直接氧化成  $CO_2$  和  $H_2O$ ，失去聚合效应。

### 3.1.4. 臭氧投加量及臭氧反应时间对废水氧化效果的影响

为了进一步去除废水中的 COD 和溶液浊度，将絮凝沉淀出水进行臭氧催化氧化。改变不同的臭氧投加量和臭氧反应时间，确定最佳的臭氧反应条件。臭氧氧化后测定上清液 COD 值和浊度；该溶液静止 8 小时后再测定上清液浊度。图 5 可以看出，在投加的臭氧浓度在 30  $mg/L$  前，随着臭氧投加浓度的增加，溶液中 COD 值不断减少。但是臭氧浓度超过 30  $mg/L$  后，随着臭氧的投加浓度的增加，溶液中的 COD 值基本趋于稳定，不再大幅下降。图 6 可以看出，在臭氧氧化 30 min 前，随着氧化时间的增加，溶液中 COD 值和浊度不断减少。但是臭氧浓度超过 30 min，再增加臭氧氧化时间，溶液中的 COD 和浊度值，不再大幅下降，基本趋于稳定。从图 7 中可以看出臭氧投加浓度低于 30  $mg/L$ ，上清液静止 8 小时后，溶液浊度还会增加。在臭氧投加浓度超过 30  $mg/L$  后，上清液静止 8 小时后，重新测定溶液浊度，浊度值基本不变，说明此时臭氧氧化后的废水溶液性质稳定，里面的低聚有机物绝大部分被氧化成小分子，聚合反应基本消失。文献报道：臭氧氧化处理后印染废水中相对分子质量较大的物质被降解为相对分子质量较小的物质[11] [12]。

从上述实验中我们确定：臭氧催化氧化过程中，臭氧的投加浓度为 30  $mg/L$ ，臭氧氧化时间为 30 min。

### 3.1.5. 深度预处理各单元的水质处理结果

中试过程中废水深度预处理各个单元运行一个月的水质参数月平均值见表 2。从表 2 看出，接入本项目的印染废水经过深度预处理环节，废水的各项参数指标达到最初的设计目标(见表 1)，该水质条件满足进入后续超滤系统。

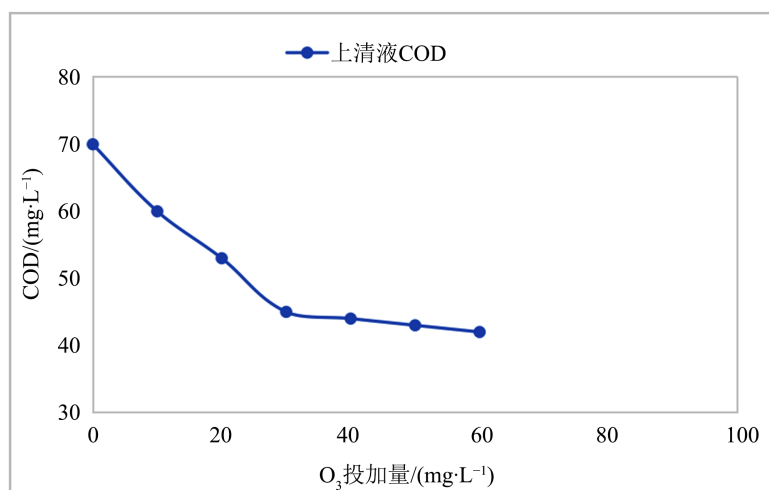
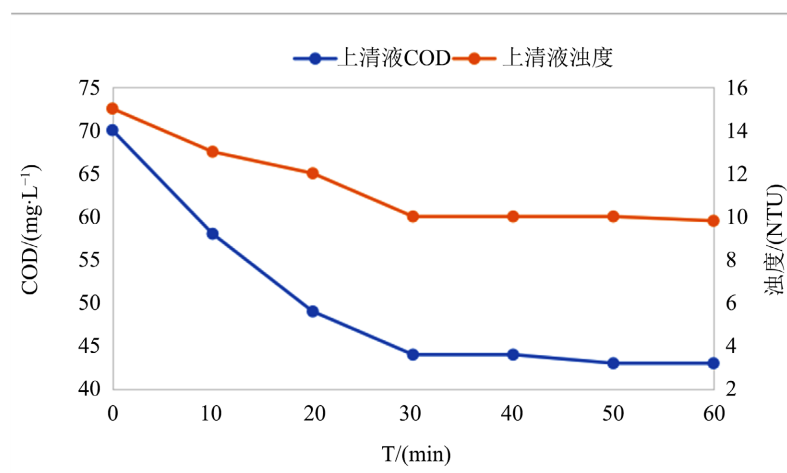
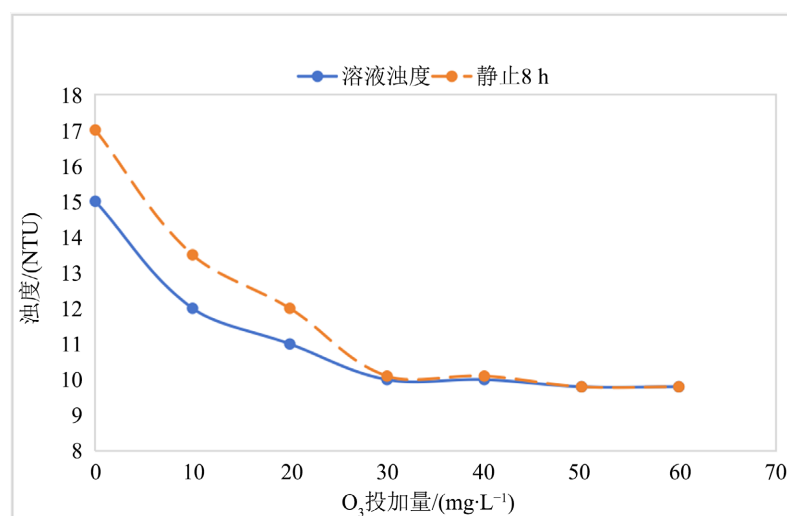


Figure 5. The comparison of COD removal effects with different ozone dosages  
图 5. 不同的臭氧投加量的 COD 去除效果对比



**Figure 6.** The comparison of COD and turbidity removal effects with different ozone oxidation times

**图 6.** 不同的臭氧氧化时间对溶液 COD 和浊度去除效果对比



**Figure 7.** Changes in solution turbidity after treatment with different ozone dosages

**图 7.** 不同臭氧投加量处理后溶液浊度变化

**Table 2.** Water quality parameters at each stage of pretreatment

**表 2.** 预处理每个阶段水质参数

项目	预处理工艺运行参数	COD (mg·L <sup>-1</sup> )	pH	悬浮物浓度 (mg·L <sup>-1</sup> )	浊度(NTU)	色度(倍)
生化池出水		≤100	6.5~8.5	≤50	≤30	≤50
絮凝沉淀出水	絮凝剂选定为 PAC, 投加量为 100 mg·L <sup>-1</sup> , 絮凝 pH 为 7.0 左右	65~75	6.5~7.5	≤30	≤20	≤20
O <sub>3</sub> 氧化后出水	O <sub>3</sub> 投加浓度为 30 mg·L <sup>-1</sup> , 氧化时间为 30 min	40~50	6.5~7.5	≤15	≤10	≤12
砂滤出水	介质为 0.5~2.0 mm 石英砂	35~45	6.5~7.5	≤10	≤5	≤10
超滤进水	超滤膜选用截留分子量为 3 万道尔顿的卷式膜	35~45	6.5~7.5	≤10	≤5	≤10

### 3.2. 低能耗中水回用膜工艺系统节能原因分析

在本项目中，中水回用膜系统设计采用独特的工作方式及自带自调型能量回收装置。该技术是自主研发的新技术，也是首次应用于印染废水的中水回用过程中。常规的反渗透工作方式见图 8，反渗透单元包括膜组件和高压泵，通过高压力驱动水通过反渗透膜，去除水中的溶解性盐和其他污染物，产水从一侧排出，带压浓水从另一侧排放，这样浓水端压力会全部损耗。而带有自调型能量回收装置的反渗透系统见图 9，产生的浓水基本是无压排放。该系统采用周期性循环工作的模式，可根据需求自行调节实现对产水水质、产水量、系统压力的综合调节，工作中无能量泄漏，浓水端能耗可节省效率能达到 99%。该系统还可以减少反渗透运行过程中的浓差极化现象，减少膜内结垢现场，延缓膜的污堵，增加膜使用寿命。

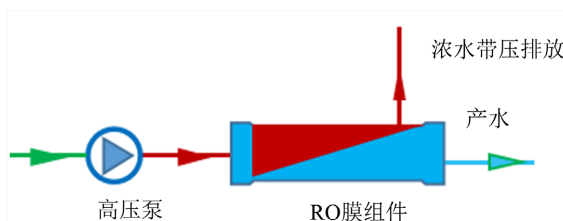


Figure 8. Reverse osmosis system without energy recovery  
图 8. 没有能量回收的反渗透系统

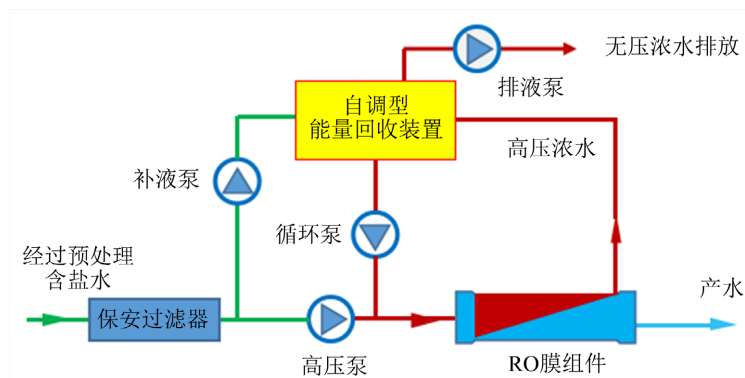


Figure 9. Reverse osmosis system with self-adjusting energy recovery device  
图 9. 有自调型能量回收装置的反渗透系统

从理论上计算两种反渗透系统各自所需能耗。以最常见海水淡化反渗透系统为例：盐水 TDS: 32,000 ppm，产水率：40%，高压泵的要求输出压力：P = 60 kgf/cm<sup>2</sup>，反渗透过程需要的能耗即水功率计算公式如下：

$$N \text{ (水功率)} = Q \text{ (进水流量)} \times \Delta P \text{ (压差)}$$

常规没有能量回收的反渗透系统：

$$N_{\text{水总}} = (\text{产水 } 0.4Q + \text{浓水 } 0.6Q) * \Delta P = 1Q * 60 \text{ kgf/cm}^2 = 60 Q$$

有自调型能量回收装置的反渗透系统：

系统平均输出压差：

$$P = (35 + 55) / 2 = 45 \text{ kgf/cm}^2$$

$$N_{\text{产水}} = 0.4Q * 45 = 18 Q$$



$$N_{\text{浓水}} = 0.6Q \times 3 = 1.8Q$$

$$N_{\text{补水}} = 0.4Q \times 1.5 = 0.6Q$$

$$N_{\text{水总}} = N_{\text{产水}} + N_{\text{浓水}} + N_{\text{补水}} = 20.4Q$$

在海水淡化系统中,有自调型能量回收装置的反渗透系统可节约能耗 $(60-20.4)/60=66\%$ ,在电导率为 $8000\text{ us/cm}$ 常见工业废水中水回用处理过程中,带自调型能量回收节能装置的反渗透系统和常规反渗透系统相比,可节能 $30\% \sim 40\%$ 。本项目半年的现场能耗数据统计:整个中水回用系统膜单元的吨水电耗总和仅为 $1.38 \sim 1.40\text{ kw}\cdot\text{h}$ 。

## 4. 结论

(1) 节能型中水回用系统由“预处理系统”+“膜单元”组成。预处理系统为“絮凝沉淀+高级氧化+砂滤+保安过滤”的处理工艺,膜单元采用“超滤+一级反渗透+二级反渗透”的处理工艺。

(2) 预处理工艺研究和优化过程中:确定絮凝剂选用PAC,其投加量为 $100\text{ mg/L}$ ,絮凝pH值为7.0左右。絮凝沉淀后采用臭氧催化氧化对废水进一步处理,臭氧的投加量为 $30\text{ mg/L}$ ,反应时间为 $30\text{ min}$ 。臭氧出水再经过砂滤罐和保安过滤后,废水水质达到进膜单元设计要求,能减少膜系统运行期间的污堵现象,降低膜的清洗频率,使膜系统能长期稳定运行,间接降低了膜运行能耗。

(3) 膜单元采用独特的膜系统工作方式及自带自调型能量回收装置,使得膜运行过程的吨水电耗大幅下降,整个中水回用系统膜单元的吨水电耗总和仅为 $1.38 \sim 1.40\text{ kw}\cdot\text{h}$ 。

(4) 印染废水在回用处理过程中易产生二次浑浊造成水中悬浮物浓度增大,这些悬浮物容易形成胶体物质附着在膜表面或膜流道里造成膜污堵,这可能是印染废水容易造成膜污堵的原因之一。这个过程是残留在废水的 $\text{Al}^{3+}$ 与废水中的有机物发生缓慢聚合反应引起废水中的胶体物质含量增加从而造成膜污堵。工程中需控制絮凝剂投加量,减少残留的 $\text{Al}^{3+}$ 含量,还可以采用高级氧化将废水中容易发生聚合反应的聚合物彻底氧化或氧化成小分子来减少膜污堵。

(5) 节能型中水回用系统可应用于其他印染废水或工业废水的回用处理中。

## 基金项目

广东省科技计划项目(科技创新平台类,项目编号:2022B1212030001):省市共建高端牛仔产品低碳智造技术广东省重点实验室。

## 参考文献

- [1] 贾艳萍,姜成,郭泽辉,等. 印染废水深度处理及回用研究进展[J]. 纺织学报, 2017, 38(8): 172-178.
- [2] 李宇庆,马楫,宋小康,等. 印染废水处理与回用技术应用研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(4): 95-97.
- [3] 王学华,刘峰,王浩,等. 低能耗印染废水处理工艺与运行条件[J]. 环境工程学报, 2015, 9(11): 5477-5481.
- [4] 景新军,蔡大牛,李斌,等. 印染废水深度处理技术进展[J]. 水处理技术, 2022, 48(6): 13-19.
- [5] 耿迪,冯秋雨,王康,等. 印染废水深度处理技术研究现状与发展趋势[J]. 现代盐化工, 2018, 45(5): 74-76.
- [6] 朱阿妹. 印染废水中水回用工艺组合选型[J]. 智能城市应用, 2023, 6(2): 105-108.
- [7] Liu, M., Graham, N., Gregory, J., et al. (2024) Towards a Molecular-Scale Theory for the Removal of Natural Organic Matter by Coagulation with Trivalent Metals. *Nature Water*, 137, 285-294. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00212-x>
- [8] 袁梓屹,李芸妃,李天玉,等. 天然水背景下残余铝组分分析及其对纳滤膜污染的贡献[J]. 膜科学与技术, 2021, 6(1): 10-17, 26.
- [9] 杨伟,李文强,薛玉清. 市政供水中残留铝盐对反渗透系统的污染和应对实践[J]. 饮料工业, 2023, 26(3): 43-45.
- [10] 廖伟,秦雄,黄苑强,等. 铬天青S分光光度法测定自来水中铝方法的改进[J]. 供水技术, 2017, 11(6): 51-54.

- [11] 田敏慧, 赵楠楠, 许子聪, 等. 化学氧化法深度处理印染废水生化出水的研究[J]. 工业用水与废水, 2024, 55(3): 25-29.
- [12] 王龙, 邴柳洁, 刘洋, 等. 高级氧化法处理印染废水的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(2): 105-111.