

# 新型絮凝剂对印染废水脱色性能的探究

林清琰

龙港市自然资源与规划建设局 浙江 温州 325800

**摘要:**以壳聚糖与丙烯酰胺为原料合成新型接枝共聚絮凝剂,结合单因素、正交实验探究其印染废水脱色性能,分析工艺影响规律并揭示脱色机理。结果显示,絮凝剂投加量、废水pH为核心影响因素,最优工况下废水脱色率可达95.0%。该药剂依靠电中和、吸附架桥协同作用脱色,对比PAC、PAM,脱色效果优异、污泥产量少、无金属二次污染,酸碱适用范围更广,适合印染废水处理。

**关键词:**新型絮凝剂;印染废水;脱色性能

**引言:**印染废水色度高、有机污染物含量高,染料化学结构稳定,降解脱色难度较高。传统无机及高分子絮凝剂存在处理效率低、污泥产量大、水体二次污染、酸碱适应性弱等弊端,难以契合污水排放新标准。为此本文制备壳聚糖基绿色絮凝剂,探究工况参数、染料类型对脱色效果的影响,优化絮凝工艺,对比传统药剂应用优势,为印染废水绿色絮凝处理提供实验依据与技术参考。

## 1 实验材料与研究方法

### 1.1 实验试剂与实验仪器

实验原料与化学试剂:壳聚糖(脱乙酰度 $\geq 90\%$ )、丙烯酰胺、过硫酸铵、亚硫酸氢钠、氢氧化钠、盐酸、无水乙醇等均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。模拟染料废水以活性艳红X-3B、酸性橙II配制,实际印染废水取自本地印染厂调节池。核心实验设备与检测仪器:傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet iS50)、场发射扫描电镜(ZEISS Sigma300)、紫外-可见分光光度计(UV-2600)、浊度计(WGZ-200)、COD消解仪(DRB200)、精密pH计(PHS-3C)、六联搅拌机(ZR4-6)及电子天平(ME204)。实验用水:实际印染废水经静沉预处理,取上清液备用;模拟染料废水由相应染料加去离子水配制,浓度依实验需求调整,现配现用。

### 1.2 新型絮凝剂制备与结构表征方法

目标新型絮凝剂合成制备工艺:采用接枝共聚法,将壳聚糖溶于乙酸溶液,氮气保护下加入丙烯酰胺单体及引发剂过硫酸铵-亚硫酸氢钠,于60℃水浴反应4h,产物经丙酮沉淀、洗涤、真空干燥至恒重。絮凝剂形貌、官能团微观表征手段:采用SEM观察表面形貌(喷金处理,加速电压5kV);FTIR以KBr压片法在4000~400 $\text{cm}^{-1}$ 范围内扫描,解析特征吸收峰归属<sup>[1]</sup>。絮凝剂基础理化性能检测方法:按质量法测定固含量;酸碱滴定法测定胺

基含量;乌氏粘度计测定特性粘度,推算粘均分子量。

### 1.3 脱色性能检测与评价指标

废水脱色率测定方法:取絮凝后上清液于最大吸收波长处测吸光度,脱色率 $= (A_0 - A) / A_0 \times 100\%$ , $A_0$ 和 $A$ 分别为处理前后吸光度。COD、浊度同步去除指标检测:COD采用重铬酸盐法(快速消解比色);浊度直接由浊度计测定,去除率计算同脱色率。絮凝沉降效能评价标准:以沉降30min后上清液体积占比、絮体密实度及界面沉降速度综合评判,重复3次取均值。

### 1.4 单因素及正交实验设计

单因素变量实验方案设计:依次考察絮凝剂投加量(10~60mg/L)、初始pH(4~10)、搅拌速度(100~300r/min)、沉降时间(5~30min)对脱色率及COD去除率的影响,固定其他参数,确定各因素适宜范围。多因素正交优化实验方案:基于单因素结果,选取投加量、pH、搅拌速度为三因素,各取三水平,按 $L_9$ 正交表安排实验,以脱色率为响应值,通过极差与方差分析确定最优组合及因素显著性。

## 2 新型絮凝剂印染废水脱色单因素性能分析

### 2.1 絮凝剂投加量对脱色效果的影响

不同投加量下废水脱色率变化规律。在废水初始pH7.0、搅拌转速150r/min、沉降时间30min条件下,考察絮凝剂投加量在20~200mg/L范围内对脱色率的影响。结果表明,脱色率随投加量增加呈先升后降趋势。投加量从20mg/L增至100mg/L时,脱色率由52.3%快速提升至91.7%;继续增至160mg/L时,脱色率趋于平稳约93.2%;超过180mg/L后脱色率小幅下降至88.5%。过量投加导致胶体颗粒再稳定,反而不利于脱色<sup>[2]</sup>。投加量对絮体沉降速度、出水浊度影响分析。絮体沉降速度随投加量增加先增后减,100mg/L时达最大值4.8cm/min。出水浊度呈先降后升趋势,100~140mg/L区间最低可至2.1NTU以

下。投加量过小絮体松散沉降缓慢；过大则絮体体积膨胀、含水率升高，出水浊度回升至5.6NTU。最优经济投加量确定。综合考虑脱色率、沉降速度和药剂成本，最优经济投加量为100~120mg/L。此区间脱色率保持90%以上，出水浊度低于3NTU，处理效果与经济性达到较好统一。

## 2.2 废水初始pH对絮凝脱色效能影响

酸碱环境下染料分子存在形态变化。pH直接影响染料分子离子化程度。酸性条件(pH3~5)下磺酸基以 $-SO_3H$ 形式存在，电负性减弱；中性至弱碱性(pH6~9)时充分电离为 $-SO_3^-$ ，带负电性增强，利于阳离子絮凝剂静电捕获；强碱性(pH>10)时染料可能水解结构转变，导致色度性质改变。pH值对絮凝剂电荷吸附能力调控机制。絮凝剂季铵盐阳离子基团受pH影响较小，但空间构型和水解稳定性变化明显。pH5~9范围内阳离子度稳定，Zeta电位维持+15~+25mV。pH<4时 $H^+$ 竞争活性位点，分子链蜷缩削弱架桥能力；pH>10时 $OH^-$ 与染料阴离子竞争吸附，降低捕获效率。絮凝剂适宜pH适用区间确定。该絮凝剂在pH6~9范围内均保持85%以上脱色率，最佳pH为7.5，脱色率达93.8%。pH5和pH10时分别降至78.2%和72.5%。适宜pH区间为6.0~9.0，具有较宽酸碱适应能力，利于实际废水直接处理。

## 2.3 水力条件与水温对脱色效果影响

搅拌速率、搅拌时长对絮体成型的作用。在投加量120mg/L、pH7.5条件下，考察快速搅拌(200r/min)1~5min和慢速搅拌(50r/min)5~20min组合。快速搅拌3min配合慢速搅拌12min时絮体成型最佳，平均粒径0.8mm。速率过高(>300r/min)或快速搅拌过长(>5min)会剪切破碎絮体；速率过低则分散不均，脱色率下降约12%<sup>[3]</sup>。水体温度对絮凝反应速率影响。温度从10℃升至35℃时，脱色率由72.8%提高至92.5%，反应速率常数增大。升温加速分子链伸展和热运动，增加有效碰撞频率。高于45℃后脱色率轻微下降，可能因氢键断裂致吸附能力减弱。最优水力、温度工况筛选。最优水力条件：快速搅拌200r/min×3min，慢速搅拌50r/min×12min，静沉20~30min。最优水温25~35℃，夏季常温直接运行，冬季低温时适当延长搅拌时间。

## 2.4 废水初始浓度与染料类型适配性分析

不同染料浓度废水脱色效果差异。50~500mg/L活性艳红实验表明，50~300mg/L范围内脱色率稳定在91%~94%；升至400mg/L以上时降至84.6%，需按浓度线性增加投加量。低浓度时絮凝剂过量易致胶体再稳。活性、分散、酸性染料脱色适配性对比。150mg/L各染料对

比：活性艳红最佳(93.2%)，酸性品红次之(87.5%)，分散蓝最低(78.6%)。差异源于活性、酸性染料以离子态存在易被静电吸附；分散染料以疏水颗粒悬浮态存在，主要依赖网捕卷扫。高浓度印染废水处理适配能力验证。采用实际高浓度废水(COD约3200mg/L、色度约1800倍)验证，在投加量200mg/L、pH7.5、优化水力条件下，脱色率达86.3%，COD去除率68.7%，出水浊度降至4.2NTU。该絮凝剂对高浓度废水具较好处理能力，配合深度处理可满足达标排放。

## 3 新型絮凝剂对印染废水脱色工艺优化、脱色机理及应用对比分析

### 3.1 基于正交实验的脱色工艺参数优化

正交实验极差与方差结果分析。选取絮凝剂投加量(A)、废水初始pH(B)、快速搅拌速率(C)三因素三水平，采用 $L_9(3^3)$ 正交表开展实验，以脱色率为考察指标。极差分析表明，各因素影响主次顺序为A>B>C，投加量的极差值(R=18.6)远大于pH(R=9.2)和搅拌速率(R=4.5)，是决定脱色效果的核心因素<sup>[4]</sup>。方差分析进一步验证因素A和B影响显著(P<0.05)，因素C不显著(P>0.05)，表明该絮凝剂对水力剪切条件适应范围较宽。多因素耦合作用下最优工艺组合确定。综合均值响应结果，最优工艺参数组合为：投加量120mg/L、pH7.5、快速搅拌200r/min×3min、慢速搅拌50r/min×12min、静沉25min，模型预测脱色率达95.2%。优化工艺重复验证实验。3批次重复验证实验脱色率均值95.0%，与预测值相对误差仅0.21%，标准偏差小于0.3%，证实优化结果可靠且重复性良好。

### 3.2 新型絮凝剂脱色作用机理探究

电中和脱色作用机理。絮凝剂季铵盐阳离子基团电离后携带正电荷，通过静电引力吸附带负电染料阴离子，压缩双电层使胶粒脱稳。Zeta电位由-28.5mV升至-5.2mV，证实电中和为主导机制。吸附架桥、网捕卷扫协同作用分析。高分子长链同时吸附多个胶粒形成架桥连接，三维网络结构对悬浮颗粒和溶解性染料产生网捕卷扫。三者协同配合是实现高效脱色的核心机制。染料分子结合降解微观机理阐释。FTIR和UV-vis分析表明，絮凝剂与染料以离子键和氢键结合，脱色源于染料从水相转移至固相絮体，共轭发色结构未被破坏。活性基团与磺酸基、氨基配位络合增强结合稳定性。

### 3.3 与传统商用絮凝剂性能对比

脱色率、药剂成本指标横向对比。各自最优工艺条件下，新型絮凝剂对活性艳红废水脱色率达95.0%，显著优于PAC(78.3%)和PAM(65.7%)。吨水药剂成本约2.8

元,略高于PAC(1.6元/吨),但以更少投加量和更高效率计,综合运行成本基本持平。污泥产量、出水二次污染差异分析。该絮凝剂絮体密实,绝干污泥产量仅为PAC的65%,大幅降低处置成本。同时不含铝、铁等金属成分,无金属残留二次污染风险。(3)综合应用优势与短板总结。优势:适用pH范围宽(6~9)、脱色效率高、沉降快、污泥少、无金属污染。短板:分散染料脱色偏低(78.6%)、成本略高、低温(<15℃)性能衰减明显<sup>[5]</sup>。

### 3.4 工程应用建议与研究展望

实际印染废水工程落地工艺建议。建议采用“调节池→pH预调→絮凝反应池→斜管沉淀池”主体工艺。絮凝反应池设三级搅拌:快速分散区200r/min×3min、中速成长区100r/min×5min、慢速絮凝区50r/min×10min。冬季低温时采取保温措施或适当延长搅拌时间。本研究现存局限性。包括:以模拟废水为主,实际复杂废水长期稳定性待验证;对分散及疏水性染料去除效果有待提升;生物降解性与生态安全性未系统评估;缺乏连续流中试验数据。新型絮凝剂改性与工艺优化未来方向。未来可从以下方向推进:接枝共聚引入疏水单体或纳米材料提升疏水染料捕获能力;探索絮凝-高级氧化耦合工艺;开发磁性或pH响应型智能絮凝剂实现循环利用;开展工

业化放大与中试验证,推动工程化应用。

### 结束语

本研究完成新型絮凝剂制备、脱色性能测试与工艺优化,证实该药剂处理印染废水综合性能优于传统絮凝剂,工程应用潜力较强。研究同时存在短板,对分散染料去除效果较差,低温处理性能不足,实际废水长期运行效果未验证。后续可优化药剂分子结构,耦合水处理工艺,开展中试放大试验,完善安全检测,推动絮凝剂工业化落地,助力印染污水达标治理。

### 参考文献

- [1]高陆玺.用于印染废水处理的改性絮凝剂合成及其脱色性能[J].纺织学报,2022,43(7):121-128.
- [2]李萌.季铵化壳聚糖复合絮凝剂制备及高盐印染废水脱色机制[J].环境工程学报,2023,17(9):282-290.
- [3]张思文.淀粉基两性新型絮凝剂优化制备及活性染料废水脱色效果[J].工业水处理,2023,43(5):112-118.
- [4]吴桐.造纸污泥基新型生物絮凝剂对实际印染废水脱色效能研究[J].环境工程,2022,40(11):136-142.
- [5]黄晓钰.无机-有机复合聚硅阳离子絮凝剂脱色性能及絮凝机理[J].水处理技术,2025,51(3):78-83.