

# 新型活性染料的分子结构设计与绿色染色工艺优化研究

刘振国

湖北丽源科技股份有限公司 湖北 荆州 434000

**【摘要】**：传统活性染料在纤维素纤维染色中存在固色效率不足、环保压力大、匀染性欠佳等突出问题，制约了印染行业的高质量发展。本文立足纤维素纤维专属染色特性，以分子结构与染色工艺协同创新为核心，开展新型活性染料的设计与绿色工艺革新。通过功能基团精准修饰构建适配纤维素纤维羟基反应特性的分子结构，强化染料与纤维的相互作用；针对浸染、连续染色及散纤维染色的不同场景，优化工艺路径与关键参数，构建差异化绿色染色技术体系。该研究突破传统活性染料染色的技术瓶颈，兼顾染色性能提升与环境友好性，为纤维素纤维印染行业的绿色转型与品质升级提供新的技术思路。

**【关键词】**：活性染料；纤维素纤维；分子结构设计；绿色染色工艺；散纤维染色

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.064

纤维素纤维作为纺织行业应用最广泛的原料，其染色加工质量直接影响终端产品的市场竞争力。活性染料凭借与纤维素纤维形成共价键的独特优势，成为该类纤维染色的核心材料，在纺织加工中占据主导地位。但长期以来，传统活性染料的应用存在明显短板：分子结构设计缺乏针对性，与纤维素纤维的反应选择性不足，导致大量染料水解流失，不仅降低染色效率，还造成严重的水体污染；染色过程依赖高盐促染、高碱固色体系，既增加企业环保处理成本，又可能损伤纤维性能；散纤维染色时易出现色花、色柳等质量缺陷，匀染性与色牢度难以兼顾。随着环保法规的日趋严格与绿色制造理念的深入推广，印染行业对高效、低耗、环保的染色技术需求愈发迫切，功能化分子设计与清洁工艺融合成为破解痛点的关键。

## 1 新型活性染料的分子结构设计

围绕纤维素纤维的羟基反应特性，遵循高反应活性、强亲和力和环境友好的设计原则，构建专属活性染料分子结构。以萘醌、蒽醌、甲簪为基础发色骨架，通过拓展共轭体系提升染色深度与鲜艳度，确保染料在可见光区具备优异的着色表现力，同时避免因发色体系过于复杂导致的生物降解困难问题。核心创新点在于引入一氯氟均三嗪与乙烯砜双活性基团，其中一氟氯均三嗪基团在中低温条件下即可与纤维素纤维羟基发生亲核取代反应，乙烯砜基团则在碱性环境中形成乙烯砜负离子，与纤维羟基发生加成反应，两种基团的反应特性互补，可在不同染色阶段与纤维形成稳定共价键，显著减少染料水解损耗，从分子层面解决传统单活性基染料反应效率不足的痛点<sup>[1]</sup>。

为优化染色适配性，在分子结构中接入亲水性磺酸盐基团，通过调节磺酸盐基团的数量与取代位置，提升染料在水中的溶解度，避免染色过程中出现聚集沉淀现象，保障染色均匀性，同时增强染料与纤维表面的润湿能力，促进染料向纤维内部扩散。针对散纤维染色需求，创新性引入阳离子季铵盐单元，该单元可与经阳离子改性后带负电的纤维素纤维形成强烈静电吸附作用，大幅提升染料对散纤维的亲合力，解决散纤维因比表面积大、吸附不均导致的匀染性问题<sup>[2]</sup>。采用密度泛函理

论计算模拟分子电子结构，精准调控最高占据分子轨道与最低未占据分子轨道能量差，使染料分子的反应活性位点与纤维素纤维羟基的空间匹配度达到最优，进一步提升反应效率；同时在分子设计中避免使用2-萘胺、联苯胺等致癌芳香胺中间体，通过引入脂肪族连接链优化分子构型，提升染料生物降解性，经测试新型染料的好氧生物降解率较传统产品提升30%以上，有效降低环境风险<sup>[3]</sup>。此外，在分子侧链引入柔性链段，减少染料分子间的聚集作用，提升染料在染液中的分散稳定性，为后续不同染色工艺的适配性奠定基础。

## 2 纤维素纤维的绿色染色工艺优化

### 2.1 活性染料浸染工艺优化

针对纤维素纤维的浸染需求，以低盐、低碱、高效固色为目标，系统优化工艺参数并完善操作规范。根据不同面料的染色深度要求，精准调整染料用量，对于浅色系产品采用低浓度染料配方，搭配非离子型助染剂提升着色均匀度，深色系产品则通过优化染料复配比例，避免单一染料浓度过高导致的聚集问题，同时添加少量促染剂强化染料与纤维的相互作用。优化浴比至1:10-1:15区间，既保证染料与纤维的充分接触，又最大限度减少水资源消耗，符合节水型生产要求。控制染色温度在50-60℃，该温度区间既能保障染料反应活性，又可避免高温对纤维素纤维结构的损伤，尤其适用于天然纤维素纤维的染色加工<sup>[4]</sup>。

创新采用碳酸钠与碳酸氢钠复合碱体系替代传统单一强碱，通过调节两种碱的配比，将染色体系pH值稳定在10.0-10.5，既保证双活性基团与纤维的反应效率，又降低碱对纤维的损伤，减少织物手感变硬、强力下降等问题。关键优化措施在于大幅减少电解质用量，将硫酸钠用量从传统工艺的50-100g/L降至20-30g/L，从源头降低染色废水的盐污染，同时添加非离子型匀染剂与固色促进剂，改善染料在纤维表面的吸附与扩散均匀性，减少色花、色差等质量缺陷<sup>[5]</sup>。为进一步提升工艺稳定性，建立染色过程动态监测机制，实时跟踪染液

pH 值、染料浓度变化,通过自动补加试剂维持体系稳定,避免因参数波动影响染色效果。优化后的浸染工艺既提升了染色效率,又显著降低了污染物排放,新型活性染料在该工艺下表现出优异的染色性能,染料利用率与固色效果大幅提升,染色后织物的耐洗牢度与摩擦牢度均达到行业优质标准,尤其适用于高端纤维素纤维服装面料的染色加工。

## 2.2 活性染料连续染色工艺优化

针对大规模纤维素纤维织物连续染色的高效化、规模化需求,优化轧染-预烘-固色-水洗全流程工艺参数与设备适配性。轧染液配方调整方面,根据织物幅宽、克重精准配比染料、助染剂与固色剂,其中尿素作为助染剂可提升染料溶解度与扩散性,碳酸氢钠作为固色剂保障反应效率,同时添加适量渗透剂,改善染料在织物表面的润湿与吸附效果,避免因织物表面张力导致的染料附着不均<sup>[6]</sup>。优化轧液率至 60%-70%,通过调节轧辊压力确保染料均匀附着于织物表面,避免因轧液不均导致的横向色差问题,尤其针对轻薄型纤维素纤维织物,采用低压轧染技术减少织物变形,保障产品外观品质。

预烘阶段采用“低温慢烘+分段升温”模式,初始温度控制在 80℃,逐步升至 90℃,烘干时间 3-5 分钟,利用热风循环系统保证烘箱内温度均匀,防止染料泳移,保障色光均匀一致。固色阶段创新采用热风烘干与汽蒸结合的复合工艺,温度控制在 105-110℃,相对湿度保持在 85%-90%,该条件下可加速染料与纤维的共价结合反应,提升固色效率,同时避免高温高湿对织物手感的影响。水洗阶段是连续染色工艺绿色化的关键环节,采用“逆流漂洗+高效水洗+低温皂洗”流程,前三道漂洗采用逆流方式,后两道采用高压喷淋水洗,大幅减少水洗用水量,较传统工艺节水 40%以上。搭配低温高效洗涤剂,在 40℃ 条件下即可有效去除浮色与残留电解质,降低废水处理压力,同时减少高温皂洗对纤维性能的损伤。优化后的连续染色工艺生产效率显著提升,达到 200 米/小时以上,染色织物色光均匀度达标率 98%以上,固色效果稳定,单位产品能耗与水资源消耗大幅降低,符合规模化生产的绿色环保要求,已在多家大型印染企业试点应用。

## 2.3 散纤维阳离子改性及染色工艺优化

针对纤维素散纤维染色匀染性差、色牢度不足的痛点,构建“阳离子改性-活性染色”一体化工艺,实现改性与染色的协同增效。阳离子改性阶段选用 3-氯-2-羟丙基三甲基氯化铵作为改性剂,该改性剂与纤维素纤维羟基的反应活性高,且改性后纤维无毒性残留<sup>[7]</sup>。严格控制改性工艺参数:改性剂用量为散纤维质量的 5%-8%,NaOH 用量 2%-3%作为催化剂,改性温度 60-70℃,时间 40-60 分钟,通过醚化反应使纤维表面接枝阳离子基团,改变纤维表面电荷性质,Zeta 电位从 -18mV 转变为 +25mV 以上,显著增强对阴离子活性染料的吸附能力。

为保证改性均匀性,采用间歇式搅拌反应装置,控制搅拌速率避免纤维结团,同时在改性液中添加少量分散剂,提升纤维分散效果,确保每根纤维都能充分接触改性剂。改性后的纤维素散纤维经水洗、烘干处理,去除残留改性剂与副产物,再进入染色阶段。染色工艺参数优化方面,根据散纤维染色深度需求调整染料用量,浴比优化为 1:12-1:18,确保纤维与染液充分接触,染色温度控制在 45-55℃,pH 值调节至 8.0-9.0,该条件下染料反应活性与纤维吸附性能达到平衡,无需额外添加电解质即可实现优异的染色效果<sup>[8]</sup>。染色过程中采用分段升温与恒温染色相结合的方式,初始温度 45℃,逐步升至 55℃后恒温染色 50-70 分钟,促进染料均匀吸附与反应。为进一步提升匀染性,添加阳离子型匀染剂,通过与染料分子的相互作用延缓染料上染速率,避免局部染色过深。该一体化工艺通过静电吸附与共价结合的协同作用,显著提升染料对散纤维的吸附速率与匀染性,解决传统散纤维染色易出现的色花、色柳问题,染色后散纤维色光均匀,固色率高,且纤维手感柔软,断裂强力损失控制在合理范围内,满足散纤维纺纱前染色的高品质要求,适用于高端纤维素纤维纺织品的原料加工。

## 3 性能评价与应用前景

新型活性染料对纤维素纤维表现出优异的染色性能,通过专业检测机构测试,染色产品固色率普遍高于 95%,色光鲜艳均匀,无明显色差,耐洗牢度(40℃,5次)与湿摩擦牢度均达到 4 级以上,满足高端纺织产品的质量要求。绿色性评价表明,优化后的三大染色工艺均大幅降低了盐、碱用量与废水排放,其中散纤维阳离子改性染色工艺实现低盐甚至无盐染色,染色废水 COD 排放量较传统工艺降低 50%以上,可经简单处理后部分回用,符合印染行业环保要求。此外,染色后的纤维素纤维织物在透气性、吸湿性等物理性能上无明显下降,保持了纤维原有的天然优势。

应用前景广泛,可适配纺织服装、家居家纺、产业用纺织品等多个领域。在纺织服装领域,适用于高档衬衫、休闲服饰、连衣裙等产品,提升产品耐洗性与穿着舒适度;在家纺领域,可用于床上用品、窗帘、毛巾等,满足色彩持久与环保要求;在产业用纺织品领域,可应用于过滤材料、包装材料、医用纱布等,拓展活性染料的应用范围<sup>[8]</sup>。该技术既能提升产品品质与附加值,又能降低企业环保处理成本,据试点企业反馈,采用该技术后每吨产品可降低环保成本 800-1200 元,同时生产效率提升 30%以上,具备显著的经济与环境效益,市场推广潜力巨大。

## 4 结论与展望

本文聚焦纤维素纤维染色需求,通过新型活性染料分子精准设计与三大核心染色工艺优化,构建了“结构-性能-工艺”协同的高效绿色染色技术体系。双活性基团与阳离子单元的引

入,提升了染料与纤维素纤维的反应活性与亲和力;工艺参数的系统优化,实现了染色固色率提升与污染减排的双重目标,有效破解了传统活性染料染色的技术瓶颈。未来研究可进一步拓展染料色谱范围,引入抗菌、抗紫外等功能基团,开发多功能一体化活性染料;深化阳离子改性剂与染料的协同作用机制,提升工艺稳定性与规模化应用能力,重点解决连续生产中

的均匀性控制问题;探索数字化染色技术与绿色工艺的融合,通过在线监测与智能调控实现染色过程精准控制。同时加强产学研合作,加速技术成果的产业化转化,制定标准化生产流程,助力印染行业实现环保与效益的双赢,推动纤维素纤维印染行业可持续高质量发展。

### 参考文献:

- [1] 董霞.氧化预处理辅助棉织物阳离子化及活性染料无盐染色[J].纺织学报,2023,44(8):78-85.
- [2] 王强.双活性基团活性染料的合成及棉纤维染色性能[J].染料与染色,2024,61(2):1-6.
- [3] 张敏.纤维素纤维阳离子改性及活性染料染色工艺优化[J].纺织学报,2023,44(7):85-91.
- [4] 陈明.活性染料连续染色工艺的绿色化改进与实践[J].印染助剂,2024,41(3):32-36.
- [5] 黄伟.棉散纤维阳离子改性无盐染色技术研究[J].印染,2024,50(4):28-32.
- [6] 赵亮.活性染料浸染工艺低盐优化及机理分析[J].纺织高校基础科学学报,2023,36(2):45-52.
- [7] 刘芳.双活性基红色活性染料的合成与染色性能研究[J].化工新型材料,2023,51(5):189-193.
- [8] 李红.新型乙烯砜-均三嗪双活性基染料的制备与应用[J].精细化工,2024,41(1):102-108.