

活性染料浸染工艺参数优化及棉纤维染色牢度提升机制研究

周翔

松滋丽康科技有限公司 湖北 荆州 434200

【摘要】：为破解活性染料浸染棉纤维过程中固色率偏低、染色牢度不稳定以及环保压力突出等行业关键难题，本研究围绕浸染工艺参数耦合效应与染色牢度提升的内在关联展开系统探究。通过多维度工艺优化策略，结合分子作用机制分析，创新构建多路径协同增强染料纤维结合稳定性的技术体系，提出兼具高效性与绿色性的活性染料浸染工艺升级方案，为活性染料在纤维素纤维染色领域的高质量应用提供理论支撑与实践参考。

【关键词】：活性染料；浸染工艺；参数优化；棉纤维；染色牢度；提升机制

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.073

纤维素纤维凭借优良的透气吸湿性与生物相容性，在纺织领域占据核心地位，而活性染料因色谱齐全色泽鲜艳等优势成为其首选染色材料。但传统浸染工艺中，染料与棉纤维间的静电斥力、水解副反应导致固色率处于较低水平，大量未固着染料形成浮色，既降低染色牢度又增加废水处理难度。现有研究多聚焦单一参数优化或单一固色机制，忽略工艺参数的协同效应与多机制耦合作用，且高盐高碱使用带来严重环境负担。棉纤维阳离子改性技术虽能改善染色性能，但存在染色均匀性差成本高等问题，未能实现工业化普及。含硅活性染料的出现为提升固着稳定性提供新思路，其硅醇基自缩合形成的 Si-O-Si 网络可增强染料锚定效果，但该技术与浸染工艺的适配性研究尚不充分。基于此，本研究通过多参数协同优化与创新提升机制构建，实现固色率与染色牢度的同步提升，为解决活性染料浸染的核心技术瓶颈提供新方案^[1]。

1 活性染料浸染工艺参数优化的核心逻辑

活性染料浸染棉纤维的过程涉及吸附、扩散、固着三个关键阶段，各阶段的工艺参数并非独立作用，而是存在显著的耦合效应，直接影响染料与纤维的作用效率和最终染色品质。染料浓度是决定染色深度的基础因素，浓度过低会导致纤维反应位点未被充分占据，浓度过高则易引发染料分子缔合，阻碍其在纤维内部的扩散进程，进而降低固着效率。碱剂作为固色反应的关键助剂，用量不足无法促使纤维素羟基充分电离，难以形成稳定的共价键合；用量过多则会加剧染料水解副反应，生成大量失去染色活性的水解染料，既造成资源浪费又加重环保压力。染色温度与保温时间则通过影响分子热运动速率，调控染料的吸附平衡与扩散速率，温度过低时染料分子动能不足，难以突破纤维表面势垒完成扩散；温度过高则会破坏染料结构稳定性，同时加速水解反应的发生。传统工艺往往采用单因素试错法进行参数调整，难以实现各参数间的精准匹配，而通过响应面法等现代优化手段，能够构建参数与染色性能的关联模型，精准划定染料浓度、碱剂用量、染色温度等关键参数的最佳组合区间，在提升固色率的同时减少染料水解与盐碱消耗^[2]。此外，浴比作为浸染工艺的重要辅助参数，其合理选择能够有

效提升染料利用率，降低废水排放量，与核心工艺参数形成协同优化效果，推动浸染工艺向高效低耗方向发展^[3]。需要注意的是，不同类型活性染料的反应活性存在差异，二氯均三嗪型活性染料反应活性较高，适宜在中低温条件下完成固色，而乙烯砜型活性染料则需要相对较高的温度才能实现高效键合，因此在工艺参数优化过程中，必须结合染料的结构特性进行针对性调整，避免采用统一的参数标准导致染色效果参差不齐。同时，染色溶液的 pH 值动态变化规律也是参数优化的重要考量维度，固色初期需要适宜的碱性环境启动共价键合反应，而反应后期则需适当降低碱度以抑制水解反应，通过分段调控 pH 值的方式，可进一步提升工艺的精准性与可控性，实现固色率与染料利用率的双重提升。实际生产中，可通过在线 pH 监测设备实时追踪染液酸碱度变化，结合碱剂的缓释技术，实现 pH 值的精准动态调控，避免因碱度骤变导致的固色效率波动，尤其在批量染色生产中，该方式能有效提升批次间染色质量的一致性。

2 棉纤维活性染料染色牢度提升的多机制协同路径

2.1 共价键合与硅醇基交联的双重固着机制

活性染料与棉纤维的传统结合方式以单一共价键合为主，这种结合模式在外界摩擦、洗涤等刺激下易发生断裂，导致染色牢度下降。含硅活性染料的引入为提升结合稳定性提供了新的技术路径，其分子结构中同时含有活性染料发色团与硅氧烷基团，在染色过程中，一方面通过活性基团与纤维素羟基发生亲核取代反应，形成稳定的共价键；另一方面，硅氧烷基团水解生成硅醇基，硅醇基之间发生自缩合反应，构建三维网状的 Si-O-Si 交联结构，将染料分子牢固锚定在纤维内部的无定形区域，形成共价键合与化学交联的双重固着体系。这种双重作用模式不仅增强了染料与纤维的结合强度，还能填充纤维内部的空隙，减少染料分子脱落的通道，显著提升织物的摩擦牢度与皂洗牢度^[4]。分子动力学模拟结果表明，交联网络的形成能够降低染料纤维结合体系的自由能，提升体系的热力学稳定性，使染料分子在受到外界作用力时更难脱离纤维基体^[5]。同时，Si-O-Si 交联网络具有良好的耐化学性与耐机械性，在酸碱洗

涤、反复摩擦等恶劣条件下仍能保持结构稳定，相较于传统的单一共价键合，其对染色牢度的提升效果更为持久。此外，含硅活性染料的分子设计可通过调控硅氧烷基团的含量，实现交联网络密度的精准控制，当硅氧烷基团含量适中时，交联网络既能发挥锚定染料的作用，又不会导致纤维手感变硬，兼顾染色牢度与织物服用性能的平衡。

2.2 浮色靶向清除与界面作用调控机制

织物表面的浮色是影响染色牢度的重要因素，传统净洗工艺多采用阴离子表面活性剂，通过乳化、分散作用去除浮色，但未反应及水解染料易反沾纤维，特深色染色时该现象更为明显，影响染色牢度，尤其是湿摩牢度。壳聚糖季铵盐等阳离子型净洗剂的应用，实现了浮色的靶向清除，其分子结构中的阳离子基团能够与未固着染料分子的阴离子基团发生静电吸附，同时分子中的羟基、氨基等基团与染料分子形成氢键作用，双重作用下可高效捕获织物表面的浮色分子，避免浮色在洗涤过程中重新附着于纤维表面。此外，壳聚糖季铵盐还能在纤维表面形成一层薄而均匀的吸附膜，调控纤维与外界环境的界面作用，减少外界因素对染料结合位点的破坏，进一步巩固染色效果^[6]。研究表明，经过阳离子净洗剂处理的棉织物，其表面浮色残留量显著降低，皂洗牢度可提升0.5至1级^[7]。相较于传统净洗剂，壳聚糖季铵盐具有生物可降解性，不会对环境造成二次污染，符合绿色印染的发展要求。同时，该净洗剂的作用具有选择性，仅针对未固着的浮色分子发挥作用，不会影响已与纤维共价结合的染料，避免了传统净洗工艺可能导致的色泽变浅问题。在实际应用中，可通过调整壳聚糖季铵盐的分子量与取代度，优化其与浮色分子的结合能力，进一步提升净洗效果，为染色牢度的提升提供更有力的保障。净洗工艺的温度与时间同样需要精准把控，温度过高会破坏壳聚糖季铵盐的分子结构，时间过长则可能导致纤维表面吸附膜过厚影响手感，通过正交实验确定净洗工艺的最佳参数，能与靶向清除机制形成协同作用，最大化提升净洗效能。

2.3 工艺参数与分子结构的适配优化机制

染色工艺参数的优化不仅影响染料的吸附与固着效率，还能调控染料分子在纤维内部的分布状态与构象，进而影响染色牢度。适宜的温度与碱度条件，能够促使染料分子呈现更有利于与纤维结合的构象，增加染料分子中芳香环、羟基等基团与纤维素分子链的接触位点，增强分子间的范德华力与氢键作用，辅助提升染料与纤维的结合稳定性。同时，优化的工艺参数可促进染料分子向纤维内部的深层扩散，减少染料在纤维表面的聚集，避免因表面染料过多导致的摩擦牢度下降。这种工艺参数与分子结构的适配优化，实现了宏观工艺调控与微观分子作用的有机结合，为染色牢度的提升提供了双重保障^[8]。从分子层面分析，纤维素纤维的无定形区是染料分子的主要作用区域，优化的染色温度能够提高染料分子的扩散速率，使其更

易进入无定形区的深层，与更多的纤维素羟基发生反应；而适宜的碱度则能调控纤维素分子链的舒展程度，增加无定形区的空隙率，为染料分子的扩散与键合提供更多空间。此外，保温时间的精准控制也至关重要，过短的保温时间会导致染料固着反应不充分，过长则可能引发染料的过度水解，只有通过工艺参数的协同优化，才能实现染料分子构象、纤维结构状态与反应进程的精准匹配，最大化提升染色牢度。

3 活性染料浸染工艺的绿色化升级方向

活性染料浸染工艺的绿色化升级是纺织印染行业可持续发展的必然要求，其核心在于减少盐、碱等助剂的使用，降低废水排放量与处理难度。阳离子改性棉纤维技术与优化浸染工艺的结合，为无盐低盐染色提供了可行路径，通过对棉纤维进行阳离子化处理，改变纤维表面的电荷性质，消除染料与纤维间的静电斥力，在大幅减少促染盐用量的同时，提升染料的上染率与固着率^[9]。阳离子改性剂的选择直接影响改性效果与染色性能，季铵盐类改性剂具有反应活性高、改性效果稳定等优势，在实际生产中应用广泛，而天然多糖类改性剂则兼具环保性与生物相容性，符合绿色制造的发展趋势。此外，低温活性染料的研究与应用，能够降低染色过程的能耗，减少高温条件下的染料水解反应，进一步提升工艺的绿色性。将工艺参数优化、新型染料应用与绿色净洗技术相结合，构建一体化的绿色染色体系，可实现活性染料浸染工艺的高效化、低碳化升级，推动纺织印染行业向绿色制造方向转型。需要强调的是，绿色化升级并非单一技术的应用，而是多个技术环节的协同整合，从染料的分子设计、纤维的改性处理，到工艺参数的优化调控与废水的循环利用，每个环节都需兼顾环保性与实用性。例如，采用膜分离技术对染色废水进行处理，可实现染料与助剂的回收再利用，既降低生产成本，又减少污染物排放，与绿色染色工艺形成良性循环。同时，数字化技术在工艺优化中的应用也为绿色化升级提供了新的途径，通过建立染色过程的数字化模型，可实现工艺参数的精准调控与实时优化，进一步提升工艺的高效性与环保性。另外，生物酶制剂在染色工艺中的应用也成为绿色升级的重要方向，纤维素酶可适度刻蚀纤维表面，增加染料吸附位点，而漆酶等氧化酶能有效降解废水中的染料污染物，将生物酶技术融入浸染工艺全流程，可进一步推动工艺的绿色化与高效化发展。

4 结论

本研究通过对活性染料浸染工艺参数耦合效应的系统分析，明确了染料浓度、碱剂用量、染色温度等关键参数的优化逻辑，突破了传统单因素优化的局限性。创新提出共价键合硅醇基交联浮色靶向清除三重协同机制，从微观分子作用与宏观工艺调控两个层面，解决了活性染料浸染棉纤维固色率低、染色牢度不稳定的核心问题。含硅活性染料与阳离子净洗剂的联合应用，以及绿色化工艺路径的探索，为活性染料浸染工艺的

高质量发展提供了新的技术方向。后续研究可进一步聚焦新型染料染色技术在更广泛的纺织领域实现应用突破。功能染料的研究与多形态纤维素材料的染色适配性，推动活性

参考文献:

- [1] 孙丽静,张莹莹,钟毅.含硅活性染料的高固着棉织物染色技术及其多重键合机制研究[J].印染,2025,51(21):1-7.
- [2] 李娟,王强,陈芳.壳聚糖衍生物:活性染料染色棉织物净洗的绿色革新与效能探究[J].纺织学报,2025,46(9):89-96.
- [3] 张敏,刘伟,赵静.改性棉纤维活性染料无盐染色机制研究[J].棉纺织技术,2023,51(4):32-37.
- [4] 王艳,李涛,张丽.杂功能偶氮活性染料的棉织物染色工艺优化[J].印染助剂,2022,39(11):38-43.
- [5] 陈浩,吴敏,郑伟.分子动力学模拟量化活性染料-纤维素亲和性研究[J].高分子材料科学与工程,2025,41(8):67-73.
- [6] 刘芳,黄伟,周明.纤维素酶协同处理提升棉织物活性染料固色率研究[J].纺织高校基础科学学报,2024,37(3):28-34.
- [7] 高欣,马建中,吕斌.活性染料交联固色体系的构建及牢度提升机理[J].精细化工,2023,40(7):1421-1428.
- [8] 崔淑玲,李瑞洲,王潮霞.棉织物活性染料染色清洁生产进展[J].印染,2024,50(15):52-58.
- [9] 朱平,张建波,王雪燕.阳离子改性棉纤维活性染料染色工艺与性能研究[J].纺织学报,2023,44(12):105-112.