

# 棉散纤维阳离子改性工艺对活性染料上染率及染色性能的影响

罗显松

荆州丝路轩行科技有限公司 湖北 荆州 434299

**【摘要】**：为破解活性染料染色过程中污水色度高、COD值高、盐含量高，处理难度大，对环境污染高的行业难题，本文聚焦阳离子改性工艺对棉散纤维染色性能的作用机制，系统分析改性剂类型、工艺参数对活性染料上染率、染色深度及色牢度的影响规律。研究表明，阳离子改性剂通过在棉纤维表面接枝阳离子基团，将纤维与阴离子活性染料的静电排斥转化为静电吸引，辅以共价键结合的双重作用模式，可显著提升染料吸附效率与结合稳定性；优化改性工艺可实现棉散纤维无盐染色，大幅度降低染色能源及污水量，同时改善染色色牢度。该研究为棉散纤维高效环保染色技术的产业化应用提供理论支撑与实践方向。

**【关键词】**：棉散纤维；阳离子改性；活性染料；上染率；染色性能

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.052

纤维素纤维是纺织工业用量最大的纤维原料，棉散纤维作为其重要加工形态，在纱线、面料生产中占据关键地位。活性染料因色泽鲜艳、色谱齐全、应用便捷等优势，成为棉纤维染色的主流染料，但棉散纤维表面羟基电离形成的负电荷，与活性染料分子中的磺酸基产生静电排斥，导致传统染色工艺中染料上染率仅为60%至70%，大量染料水解既增加生产成本，又引发严重的废水污染问题。阳离子改性技术通过在纤维表面引入阳离子基团，从根本上改变纤维表面电荷性质，为解决上述痛点提供有效途径。在此背景下，本文结合棉散纤维的加工特性，阐述阳离子改性的作用原理，分析工艺参数对染色效果的影响规律，总结改性技术的应用优势与发展趋势，为棉散纤维染色技术的升级提供理论参考。

## 1 棉散纤维阳离子改性的作用原理

棉散纤维的主要化学成分为纤维素，其分子链上大量羟基是与染料发生作用的核心位点。阳离子改性的本质是通过化学反应，将阳离子基团接枝到纤维素分子链的羟基上，改变纤维表面的电荷属性。常用的阳离子改性剂主要包括季铵盐类、环氧类、自由基聚合类等，其中季铵盐类改性剂因反应条件温和、接枝效率高、与纤维结合稳定的特点，在棉纤维改性中应用最为广泛<sup>[1]</sup>。季铵盐改性剂分子中的环氧基团或活性基团，在碱催化条件下与纤维素羟基发生醚化反应，将带有正电荷的季铵盐基团固定在纤维表面，使原本带负电的棉纤维转变为带正电的纤维。活性染料分子中的磺酸基在水溶液中电离后呈负电性，改性后的棉散纤维与活性染料之间的作用力，从原来的静电排斥转变为静电吸引，这种吸引力能够加速染料分子向纤维表面的吸附与扩散，大幅提升染料的上染速率与上染率，同时减少染料在染液中的水解概率。同时，活性染料分子中的活性基团仍可与纤维素羟基发生亲核取代/加成反应，形成稳定的共价键结合，静电吸引与共价键结合的双重作用模式，不仅提高染料的固着率，还能增强染料与纤维的结合牢度，避免染色后染料在水洗、摩擦过程中脱落，为改善染色性能奠定坚实基础<sup>[2]</sup>。相较于其他类型改性剂，季铵盐类改性剂还具备良好的生

物降解性，在后续废水处理环节更易被分解，进一步契合绿色印染的技术要求<sup>[3]</sup>。此外，阳离子改性过程中，改性剂分子的接枝不会破坏纤维素分子的结晶区结构，能够最大程度保留棉散纤维原有的吸湿透气、柔软舒适等天然特性，这也是该技术在纺织领域备受青睐的重要原因。值得注意的是，阳离子基团的接枝密度会直接影响改性效果，接枝密度过低则静电吸引力不足，无法显著提升上染率，接枝密度过高则可能导致纤维表面电荷过于密集，引发染料分子的聚集，反而降低匀染性，因此精准控制接枝密度是改性工艺的核心要点之一。

## 2 阳离子改性工艺参数对染色效果的影响

### 2.1 改性剂用量的影响

改性剂用量是影响棉散纤维阳离子改性效果的核心参数。随着改性剂用量的增加，棉纤维表面接枝的阳离子基团数量逐渐增多，与活性染料的静电吸引力不断增强，染料上染率随之稳步提升。当改性剂用量达到一定阈值时，纤维表面的阳离子位点趋于饱和，过量的改性剂会在溶液中发生分子聚集，不仅降低有效接枝效率，还会增加生产成本，甚至可能因分子聚集导致纤维表面电荷分布不均，影响染色匀染性，造成局部色深或色浅的问题。不同类型的阳离子改性剂因分子结构、反应活性的差异，其最佳用量范围存在明显区别，季铵盐类改性剂的最佳用量有明确的适宜区间，此范围内既能保证足够的阳离子接枝量，又能避免改性剂的浪费与负面影响<sup>[4]</sup>。需要注意的是，改性剂用量还需与棉散纤维的比表面积相匹配，对于纤度更细、长度更长的棉散纤维，其比表面积更大，所需改性剂用量可适当上调，但不宜超过合理上限，否则会导致纤维之间粘连，影响后续的纺纱加工。在实际生产中，可通过预试验确定不同规格棉散纤维对应的改性剂用量，确保改性效果与生产效率的平衡。同时，改性剂的纯度也会对改性效果产生影响，工业级改性剂中含有的杂质可能会与碱剂发生副反应，消耗部分活性基团，因此在条件允许的情况下，选用高纯度改性剂能有效提升接枝效率。

## 2.2 碱剂浓度与反应温度的影响

碱剂是阳离子改性反应的关键催化剂,常用碱剂为 NaOH,其浓度直接影响改性剂活性基团的开环与反应速率。适量的碱剂可促进改性剂分子中的环氧基团开环,加速与纤维素羟基的醚化反应,提高阳离子基团的接枝效率;当碱剂浓度过高时,会导致纤维素纤维过度溶胀,破坏纤维的结构完整性,使纤维强力下降,同时引发改性剂的水解反应,降低有效阳离子基团的含量,进而影响染料上染率<sup>[5]</sup>。反应温度对改性效果的影响同样显著,温度升高可加快分子运动速率,促进改性剂与纤维素羟基的接触与反应,提升接枝效率;但温度过高会导致改性剂分解失效,还可能造成棉纤维的热损伤,影响纤维的强力与手感,导致后续纺织加工中出现断头、起毛等问题。综合来看,阳离子改性有对应的最佳碱剂浓度与反应温度区间,可在保证改性效果的前提下,最大限度保护纤维性能。在实际生产中,还可通过分段升温的方式优化改性过程,即先在较低温度条件下让改性剂充分渗透到纤维内部,再升温至适宜温度促进反应进行,这种方式能进一步提升阳离子基团接枝的均匀性<sup>[6]</sup>。同时,碱剂的添加方式也会影响改性效果,采用分批加入的方式可避免局部碱浓度过高,减少纤维损伤,提升改性的均匀性。此外,浴比也是不可忽视的工艺参数,合适的浴比能保证纤维与改性液充分接触,浴比过小会导致纤维堆积,改性不均,浴比过大则会增加改性剂与碱剂的用量,提高生产成本。

## 2.3 反应时间的影响

反应时间决定阳离子改性反应的进行程度,在一定范围内,随着反应时间的延长,改性剂与纤维素羟基的反应更加充分,阳离子基团接枝量逐渐增加,染料上染率随之提升。当反应时间达到一定时长时,接枝反应基本达到平衡状态,继续延长反应时间,接枝量无明显增长,反而会增加能源消耗,甚至因长时间处理导致纤维损伤,使纤维手感变得粗糙。因此,结合生产效率与改性效果,棉散纤维阳离子改性需控制合理的反应时间范围。对于批量生产而言,反应时间还需结合设备类型调整,如采用气流式改性设备时,纤维与改性液的接触更充分,反应时间可适当缩短,而采用传统浸染式设备时,则需维持足够的反应时间,以确保改性效果的稳定性<sup>[7]</sup>。此外,反应过程中的搅拌速率也会影响改性效果,适宜的搅拌速率能够保证纤维与改性液充分接触,避免局部纤维改性不充分,进一步提升阳离子基团接枝的均匀性。搅拌速率过低则纤维易沉降,与改性液接触不充分,搅拌速率过高则会造成纤维的机械损伤,破坏纤维的长度与强度,因此需根据纤维的特性调整搅拌速率,实现改性效果与纤维损伤的平衡。

# 3 阳离子改性对棉散纤维染色性能的提升作用

## 3.1 提高上染率与染色深度

阳离子改性最显著的效果是提升活性染料对棉散纤维的

上染率,改性后的棉散纤维在无盐或低盐条件下可实现高效上染,大幅减少染料的水解流失,降低染料使用成本。上染率的提升直接带动染色深度的增加,表现为染色纤维的 K/S 值显著提高,这是因为阳离子改性增加了纤维对染料的吸附位点,使更多染料分子通过静电吸引与共价键结合的方式固着在纤维上,从而增强染色织物的色泽鲜艳度与饱满度。同时,改性后的纤维对不同类型活性染料均有良好的适应性,无论是单偶氮型、蒽醌型还是酞菁型活性染料,都能实现较高的上染率,拓宽了棉散纤维的染色色谱选择范围,满足多样化的市场需求。此外,改性后的棉散纤维在染色过程中,染料分子的扩散路径更短,能够更快地达到染色平衡,缩短染色时间,提升生产效率,这对于大规模工业化生产具有重要的现实意义。

## 3.2 染色均匀性的实际表现与色牢度提升效果

从实际生产与理论逻辑来看,阳离子改性无法改善棉散纤维的染色均匀性,反而会加剧均匀性控制难度:棉散纤维形态松散、长短粗细存在天然差异,且纤维素分子链结晶度与羟基分布不均,导致阳离子改性剂接枝难以绝对均匀,部分区域阳离子位点密集、部分区域稀疏,形成“电荷分布不均”缺陷。这种差异使染料分子选择性聚集,位点密集区吸附快、染料堆积,稀疏区吸附慢、染料不足,且改性后染料吸附速率远快于扩散速率,易造成“表染严重、芯层染色不足”,最终引发色花、色差,染深色时问题更突出。虽染色均匀性未改善,但阳离子改性对色牢度提升显著:纤维与染料通过静电吸引与共价键双重结合,耐摩擦色牢度提升至 3-4 级,耐皂洗色牢度达 4 级以上,满足服用要求。同时,阳离子基团与染料紧密结合,减少光照降解与水洗脱落,耐日晒色牢度小幅提升,多次洗涤后仍能保持较好色泽,延长产品使用寿命。此外,改性未破坏纤维素结构,染色后纤维仍保持天然柔软质感,保障终端产品服用体验。

## 3.3 实现环保无盐染色

传统活性染料染色工艺需添加大量元明粉作为促染剂,高盐废水的排放是印染行业主要的污染源之一,不仅会造成土壤盐碱化,还会增加污水处理的难度与成本。阳离子改性后的棉散纤维,依靠自身带有的正电荷即可实现染料的高效吸附,无需添加元明粉,可直接进行无盐染色,大幅降低染液中的盐含量,减轻废水处理压力。这种无盐染色工艺符合绿色印染的发展趋势,是实现印染行业节能减排的有效途径。此外,无盐染色工艺还能减少设备的腐蚀,延长染色设备的使用寿命,降低企业的设备维护成本,具备显著的经济与环境双重效益。同时,无盐染色工艺还能减少盐类物质对染料活性基团的影响,降低染料水解的概率,进一步提升染料的利用率,为企业节约生产成本。另外,无盐染色后的废水处理工艺更简单,可与现有废水处理系统兼容,无需大规模改造设备,降低了企业的技术改造成本,更易于在行业内推广应用。

## 4 结论

阳离子改性通过在棉散纤维表面接枝阳离子基团,将纤维与活性染料的静电排斥转化为静电吸引,辅以其价键结合的双重作用模式,是提升染料上染率的核心机制,改性剂用量、碱剂浓度、反应温度与时间是影响改性效果的关键工艺参数,季

铵盐类改性剂有对应的优化工艺区间,在此工艺条件下,棉散纤维的活性染料上染率得到显著提升,染色深度与匀染性大幅改善,各类色牢度指标均可满足纺织品应用要求,同时该工艺可实现无盐染色,降低染液污染物含量,减少废水污染,为棉散纤维高效环保染色提供可行的技术方案,也为印染行业的绿色转型与高质量发展提供理论支撑与实践方向。

## 参考文献:

- [1] 商显芹,刘豹林,马海涛.棉散纤维的阳离子改性及其性能[J].印染,2024,49(7):21-24+28.
- [2] 崔金德,李德芹,沈希慧.棉纤维阳离子改性对染色性能的影响[J].染整技术,2021,43(2):35-37.
- [3] 吴文胜,李志伟,黄鸿发,等.阳离子改性棉织物低盐低碱活性染色[J].印染助剂,2022,39(10):43-48.
- [4] 罗蕙敏,杨艳凤,刘雁雁,等.活性染料无盐染色的研究进展[J].染整技术,2021,43(5):1-10.
- [5] 钱威,胡金辉,王照朋,等.活性染料在低含水率固色体系中的构效关系[J].印染,2022,48(3):31-35.
- [6] 邵敏,王丽君,李美琪,等.非水介质-微水体系中活性染料的水解和键合性能[J].纺织学报,2022,43(11):94-103.
- [7] 韩雪,韩冬,于乐,等.漆酶催化没食子酸染色阳离子改性棉织物的性能[J].印染,2024,50(3):20-23.