



高强度液体分散染料免水洗印花色浆复配体系研究

余夏杰¹,黄俊峰²,顾挺业³,郭丽雪³,戚栋明^{1,3},崔志华^{1,3}

(1. 浙江理工大学绿色低碳染整技术浙江省工程研究中心,杭州 310018;2. 浙江博澳新材料股份有限公司,浙江绍兴 312000;3. 浙江省现代纺织技术创新中心,浙江绍兴 312030)

摘要:针对传统分散染料印花工艺中水资源消耗大、色牢度与织物手感难以兼顾的行业难题,构建了一种适用于液体分散染料的免水洗印花色浆复配体系。通过对分散染料红 167 进行高效研磨,制备高强度液体分散染料,系统优化增稠剂与黏合剂的种类及配比,确定印花色浆最佳配方;在此基础上,探究了印花色浆的流变性能、织物手感等印花效果以及染料与助剂的协同作用。结果显示:优化后的最佳配方为质量分数 3% 的高强度液体分散染料红 167、质量分数 4% 的 KG-401TJ 增稠剂及质量分数 1% 的 MCH-206 黏合剂。该体系表现出优异的综合性能,印花色浆黏度回复率达 98.5%,具有良好的触变性;在 190 ℃ 的固色条件下,印花织物的表观色深(K/S 值)达到 20.1,干摩擦色牢度为 5 级,湿摩擦色牢度为 4~5 级,还原清洗后整体色牢度保持稳定;织物手感表现优异且均衡,丰满度在各向方均保持 5 级,粗糙度较低,还原清洗后粗糙度进一步优化至各方向均为 2 级,手感更趋柔和。该研究为分散染料印花提供了一种兼具高色牢度、优良手感与节水减排的绿色高效方案。

关键词:液体分散染料;免水洗印花;极差分析;流变性;染料-助剂协同;手感测试

中图分类号: TS194.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2026) 09-0582-10

引文格式:余夏杰,黄俊峰,顾挺业,等. 高强度液体分散染料免水洗印花色浆复配体系研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2026,55(5):582-591.

Reference Format: YU Xiajie, HUANG Junfeng, GU Tingye, et al. Research on the compounding system of high-intensity liquid disperse dyes wash-free printing color paste[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(5): 582-591.

Research on the compounding system of high-intensity liquid disperse dyes wash-free printing color paste

YU Xiajie¹, HUANG Junfeng², GU Tingye³, GUO Lixue³, QI Dongming^{1,3}, CUI Zhihua^{1,3}

(1. Zhejiang Engineering Research Center for Green and Low-Carbon Dyeing and Finishing Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Boao New Materials Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 3. Zhejiang Provincial Innovation Center of Advanced Textile Technology, Shaoxing 312030, China)

Abstract: To address the industrial challenges associated with conventional disperse dyes printing, particularly excessive water consumption and the difficulty of simultaneously achieving satisfactory color fastness and fabric handle, a washing-free printing paste system suitable for liquid disperse dyes was developed. High-strength liquid disperse dye was first prepared by efficiently grinding Disperse Red 167. The types and proportions of thickeners and binders were then systematically optimized to determine the optimal printing paste formulation. On this basis, the rheological properties of the printing paste, the resulting printing performance in terms of fabric handle, and the synergistic interactions between the dye

收稿日期: 2025-11-18 网络出版日期: 2026-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(21808210);浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2023C01096)

作者简介: 余夏杰(1999—),男,浙江衢州人,硕士研究生,主要从事液体分散染料开发与印花应用方面研究。

通信作者: 崔志华, E-mail: zhhcui@zstu.edu.cn

and auxiliaries were further investigated. The results showed that the optimal formulation consisted of high-strength liquid Disperse Red 167 with a mass fraction of 3%, KG-401TJ thickener with a mass fraction of 4%, and MCH-206 binder with a mass fraction of 1%. This system exhibited excellent overall performance. The viscosity recovery rate of the printing paste reached 98.5%, and the paste showed favorable thixotropic behavior. At a fixation temperature of 190 °C the printed fabric achieved an apparent color depth (K/S value) of 20.1. The dry rubbing fastness reached grade 5, while the wet rubbing fastness reached grade 4-5, and the overall color fastness remained stable after reduction cleaning. The printed fabric also exhibited excellent and well-balanced handle properties. Fullness was maintained at grade 5 in all directions, and the fabric exhibited relatively low roughness. After reduction cleaning, the roughness was further reduced to grade 2 in all directions, resulting in a softer fabric handle. This study provides a green and efficient approach to disperse dye printing that combines high color fastness, desirable fabric handle, and reduced water consumption.

Key words: liquid disperse dyes; washing-free printing; range analysis; rheological properties; dye-auxiliary synergistic effect; fabric handle evaluation

0 引 言

纺织印染行业是工业水资源消耗与污染排放的主要行业之一^[1-2]。传统分散染料印花工艺在完成染色固色后,须经过多道水洗工序去除布面浮色及残留的糊料与助剂,耗水量巨大,且产生大量含有染料、助剂的高浓度有机废水^[3-4]。传统工艺普遍依靠海藻酸钠等天然增稠剂来配制色浆,但海藻酸钠原料通常来源于天然藻类提取,成本较高,且形成的糊料流变性较差。为寻求成本与性能的平衡,合成增稠剂逐渐被用于替代天然增稠剂,但其在应用中普遍存在耐电解质性能较差、手感较硬等缺陷,使得现有增稠剂体系难以在免水洗的同时满足优异印花效果、良好手感、低成本和环保要求^[5-7]。因此,发展无需后期水洗且能兼顾优异色牢度与良好手感的印花技术,已成为推动纺织行业绿色转型与高质量发展的关键课题^[8]。

免水洗印花技术的核心在于源头革新,通过构建一套高效的印花色浆体系,使染料在固色过程中实现近乎完全上染与固着,同时使所有浆料组分在烘干、焙烘后能在纤维上形成稳定的功能性薄膜或直接气化/分解,省去水洗工序^[9-10]。该技术路线高度依赖高性能的染料和助剂的系统化复配与工艺调控两大要素。在染料方面,传统粉状染料含有大量的分散剂、填充剂,不利于染料高固着,而通过先进研磨技术制备的高强度、低分散剂含量、超细粒经液体分散染料,具有更高的着色效率和清洁生产优势^[11-13]。在助剂方面,需通过科学的复配研究,使增稠剂、黏合剂等组分在印花、烘干与焙烘的全过程中产生协同效应,解决浮色残留与手感僵硬的难题^[14]。

本文基于自制的高强度液体分散染料红 167,

筛选商品增稠剂与黏合剂,并优化染料与助剂间的复配体系,以开发高性能免水洗印花色浆。通过单因素实验确定关键影响因素,结合正交设计并以 K/S 值、印花轮廓清晰度为指标,初步筛选出候选配方;进一步经方差与极差分析验证,确定复配体系最优配方;最后与传统海藻酸钠配方对比,评估其在牢度、手感等方面的优势,为液体分散染料在免水洗印花中的应用提供了理论依据与技术方案。

1 实验部分

1.1 材料与设备

材料:普通涤纶机织物(150 g/m²)、分散剂 MF、分散剂 O-25、工业级分散蓝 79 滤饼、工业级分散红 167 滤饼和工业级分散橙 288 滤饼,均购自浙江博澳新材料股份有限公司;氢氧化钠(分析纯)、保险粉(分析纯)、海藻酸钠(分析纯),均购自阿拉丁生化科技股份有限公司(中国上海);增稠剂 KG-207、KG-401TJ,黏合剂 KG-1018、KG-1053,均购自常熟市辐照技术应用厂;增稠剂 ST312、黏合剂 ST308E,均购自四川益欣科技有限责任公司;增稠剂 RN-F1、RN-F2、RN-F3,均购自浙江睿恩化工有限公司;黏合剂 MCH-201、MCH-206,均购自无锡宜澄化学有限公司。

设备:Gmbh 型旋转流变仪(奥地利安东帕有限公司),FA224 型电子分析天平(上海舜禹恒平科学技术有限公司),CY-1 电动砂磨机(绍兴上虞道墟土工仪器厂),UV-2600 型紫外-可见分光光度计(日本岛津仪器有限公司),ZetasizerLab 纳米粒度电位仪(上海思百吉仪器系统有限公司),TG16-WS 高速离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司),

HG2008A 型高温高压染色机(佛山市华高自动化设备有限公司),B13-3 型磁力搅拌器(上海司乐仪器有限公司),R-3 型热定型机(宁波纺织仪器厂),SF600X 测色配色仪(美国 Datacolor 公司),磁棒式印花小样印花机(佛山市亚诺精密机械制造有限公司),Y571S 摩擦牢度测试仪(南通宏大实验仪器有限公司),NDJ-8S 旋转黏度计(上海平轩科学仪器有限公司),3D 景深显微镜 DMV6(徕卡显微系统上海贸易有限公司),Sigma500 场发射扫描电镜(德国卡尔·蔡司股份公司),CHES-FY 纺织材料手感风格评价仪(南通宏大实验仪器有限公司)。

1.2 高强度液体分散染料的制备工艺

将质量分数为 70% 的分散染料滤饼(染料含水率约 50%)、质量分数为 10% 的分散剂和质量分数为 20% 的去离子水混合后装入砂磨杯,在 1400 r/min 转速下初步研磨 10 min;加入质量分数为 200% 的氧化锆珠,持续球磨至体系扩散性能达 5 级标准,并通过 80 目尼龙筛网过滤研磨产物,获得高强度液体分散染料。

1.3 液体分散染料性能测试

1.3.1 粒径测试

称取 0.5 g 分散染料,用去离子水稀释 2000 倍,使用纳米粒度电位仪对稀释液进行粒径测试,记录平均粒径。

1.3.2 扩散性能

按照《染料 扩散性能的测定》(GB/T 27597—

2011)进行扩散性能的测试、评级。

1.3.3 大颗粒残留

按照《染料 大颗粒的测定 单层滤布过滤法》(GB/T 5542—2016)进行大颗粒残留测试、评级。

1.3.4 染料强度测试

按照《分散染料 色光和强度的测定》(GB/T 2394—2024)进行染料强度测试、评级。

1.4 印花助剂的筛选

以市售几种常规印花增稠剂及传统海藻酸钠为对照,分别在 1%、2%、3%、4% (以下均为质量分数)条件下与自制液体分散染料复配制浆(不外加黏合剂),以 K/S 值与色浆抱水性为评价指标,确定各增稠剂最佳用量;在此基础上对比最优用量下色浆的应用性能,筛选出 3 种效果较优的增稠剂用于后续正交试验。黏合剂以 0.5%、1%、1.5%、2% (以下均为质量分数)梯度筛选,其他同理。

1.5 正交试验设计

为高效系统优化印花色浆性能,选取增稠剂种类(A)、增稠剂用量(B)、黏合剂种类(C)、黏合剂用量(D)4 个关键因素,每个因素设置 3 个水平,具体如下表 1 所示。据此选用 $L_9(3^4)$ 正交表设计实验方案,形成 9 组实验组合,每组组合进行 3 次重复实验并取其平均值。基于测试结果,通过方差分析与极差分析考察各因素对 K/S 值的影响,初步得出较优配方组合,并经实验对比验证后确定最佳色浆配方。

表 1 正交试验因素水平表

水平	因素			
	增稠剂种类(A)	增稠剂用量(B)/%	黏合剂种类(C)	黏合剂用量(D)/%
水平 1	ST312	2.0	MCH-206	0.5
水平 2	RN-F2	3.0	KG-1053	1.0
水平 3	KG-401TJ	4.0	ST308E	1.5

注:正交试验响应指标,水平 1 为抱水性、水平 2 为 K/S 值、水平 3 为印花轮廓清晰度。

1.6 印花色浆调配

采用分段混合工艺调配色浆:将 3% 的液体分散染料与适量去离子水在高速搅拌下混合均匀;加入 4% 的增稠剂,2000 r/min 搅拌 15 min 形成基糊;加入 1% 的黏合剂,继续搅拌 10 min,形成印花色浆。

1.7 印花工艺

免水洗印花工艺流程:调节色浆→印花→烘干(110~115 ℃,1 min)→定型(190 ℃,1.5 min)。

参数经过预实验优化确定:磁棒直径 13 mm,印花压力 25 kg,刮刀速度 2 m/s,刮刀角度±15°,

刮印次数 1~2 次。

1.8 印花色浆性能测试

1.8.1 黏度特性

采用旋转黏度计测定色浆黏度,剪切速率梯度为 0.6~60.0 s⁻¹,通过印花黏度指数 PVI 值(Print viscosity index)评价流变性;分别测定糊料在 n 转速下的黏度与 10 n 转速下的黏度,即为该糊料的 PVI 值,印花黏度指数 PVI 值按式(1)计算:

$$I_{PVI} = \frac{\eta_{10n}}{\eta_n}$$

(1)

其中: I_{PVI} 为印花黏度指数; η_{10n} 为印花色浆在剪切

速率 $10n$ 下的表观黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; η_n 为印花色浆在剪切速率 n 下的表观黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

1.8.2 抱水性能测试

将画有刻度标记的定性滤纸(宽度 1 cm)垂直插入待测色浆中,确保色浆液面与滤纸上的基准刻度线平齐;静置 30 min,测量水分沿滤纸上缘上升的高度。

1.8.3 流变性能测试

使用旋转流变仪进行色浆流变特性测试,选取 50 mm 直径平行板测量系统。稳态剪切扫描,在 $0.1\sim1000.0\text{ s}^{-1}$ 剪切速率范围内进行连续扫描,记录表观黏度随剪切速率变化的流变曲线,获取黏度特性数据;动态频率扫描,施加 1% 恒定应变振幅,在 $0.1\sim200.0\text{ rad/s}$ 角频率范围内实施振荡测试,通过测定储能模量(G')、损耗模量(G'')及损耗因子($\tan\delta$)的频率依赖性,表征材料的黏弹响应特性;瞬态剪切实验,采用 3 阶段瞬态剪切实验测定黏度回复率:在 1 s^{-1} 剪切速率下预剪切 2 min(初始阶段),施加 400 s^{-1} 高速剪切 1 min(破坏阶段),恢复至 1 s^{-1} 剪切 2 min(恢复阶段);以恢复阶段与初始阶段的稳态黏度比值(η_3/η_1)作为黏度回复率,用于评价材料的触变恢复性能。

1.9 印花效果测试

1.9.1 印花轮廓清晰度测试

印花轮廓清晰度的测试标准参考文献[15],具体测试过程如下:制备 2 组直线印花试样(细线条为 $10\text{ cm}\times300\text{ }\mu\text{m}$;粗线条为 $10\text{ cm}\times700\text{ }\mu\text{m}$),每组 3 条平行直线;采用 3D 景深显微镜观察烘干后线条,每条线取 3 个典型点(覆盖起、中、终点),共 18 点,测实际宽度;通过式(2)一式(4)计算实际线条宽度平均值、样本标准差、线条不匀度等指标:

$$D_{\text{avg}}=\frac{1}{18}\sum_{i=1}^{18}D_i\times100\tag{2}$$

表 2 自制液体分散染料性能测试结果

染料种类	平均粒径/nm	PDI	D90	扩散性能/级	染料相对强度/%
市售 S-3BG	284.8	0.1867	506.5	4	150
分散蓝 79	205.8	0.2195	306.6	5	150
市售 SE-RH	414.6	0.5526	402.6	4	200
分散橙 288	317.0	0.5139	260.1	5	200
市售 S-5BL	478.7	0.6778	310.6	4	100
分散红 167	281.9	0.4186	288.3	5	100

2.2 印花助剂的筛选

2.2.1 增稠剂对印花色浆性能影响

抱水性高度值越低,表明色浆抱水性能越好,印

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{17}\sum_{i=1}^{18}(D_i-D_{\text{avg}})^2}\tag{3}$$

$$W/\%=\frac{\sigma}{D_{\text{avg}}}\times100\tag{4}$$

其中: D_i 为第 i 个测点的实际线条宽度, μm ; D_{avg} 为线条宽度的算术平均值, μm ; σ 为线条宽度的样本标准差, μm ; W 为线条不匀度, %。

评价印花轮廓清晰度标准:细线条不匀度小于等于 15%,粗线条小于等于 10%,确保线条边缘整齐。

1.9.2 色牢度测试

参照《纺织品 色牢度试验 耐摩擦色牢度》(GB/T 3920—2008)测试耐干/湿摩擦色牢度及耐皂洗色牢度,使用标准灰卡评级。

1.9.3 织物手感测试

将印花后的织物裁剪成长 30 cm、宽 20 cm 的长方形,按照《纺织品 织物触感检测与评价方法 三点梁法》(FZ/T 01171—2023)进行测试、评级。

2 结果与讨论

2.1 高强度液体分散染料的性能

经优化研磨工艺制备的液体分散染料表现优异,具体性能如表 2 所示。从表 2 可以看出:自制染料平均粒径远小于市售,分散红 167 为 281.9 nm,较市售-5BL 的 478.7 nm 降约 41%;分散蓝 79 为 205.8 nm,较市售-3BG 的 284.8 nm 降约 28%,且粒径分布更均匀(PDI 0.22~0.51, D90 均小于或接近市售),大颗粒残留少,可避免印花堵网或染色不均;扩散性能达 5 级,显著优于市售的 4 级,高温下更易渗透纤维内部,提高上染率和色牢度;此外,相对强度均保持与市售一致。将其应用于涤纶染色时,由于粒径小、比表面积大,染料扩散与上染速率显著加快,为后续实现免水洗印花奠定了基础。

花抗渗化能力越强。通过添加不同增稠剂,测试各色浆的 K/S 值和抱水性,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出:对于多数增稠剂, K/S 值随用量增加呈

现先上升后平缓或下降的趋势,抱水性则需在达到一定增稠效果后避免过度增加。其中:KG-401TJ 在 4%用量时 K/S 值最高(19.4)且抱水性为 0.2 cm,表现出较优性能;ST312 与 KG-207 在 2%时分别获得较高 K/S 值(18.3 与 18.6),其抱水性分别为 0.15 cm 与 0.4 cm;RN-F1 和 RN-F2 在 3%时 K/S 值达(18.5 与 18.8),抱水性为 0.5 cm 和 0.3

cm,性能均衡;RN-F3 则在 1%时 K/S 值最高(17.3),但抱水性为 1.2 cm;而海藻酸钠在 4%时达到其最高 K/S 值(16.7),对应抱水性为 0.4 cm。综上,初步确定各增稠剂的最佳用量:海藻酸钠为 4%,ST312 为 2%,RN-F1 为 3%,RN-F2 为 3%,RN-F3 为 1%,KG-207 为 2%,KG-401TJ 为 4%。

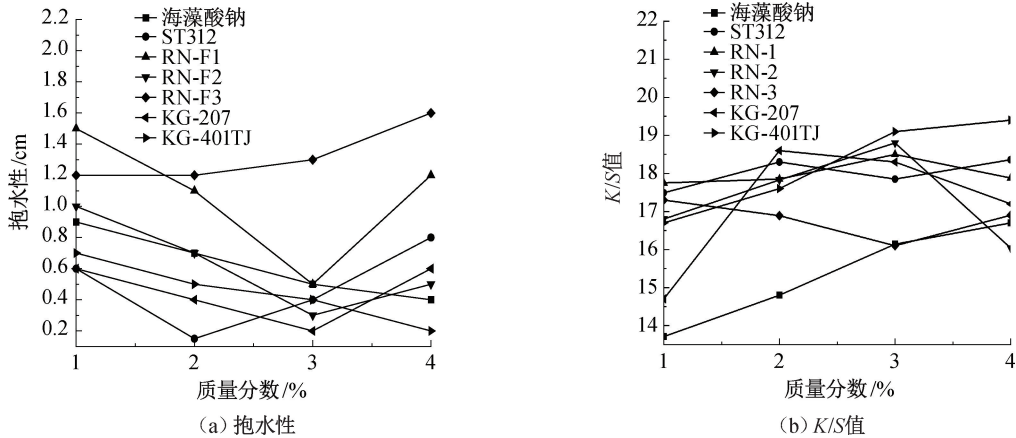


图 1 不同质量分数增稠剂下的抱水性和 K/S 值变化曲线

以此最佳用量复配色浆,并测试印花色浆色牢度性能,结果如表 3 所示。从表 3 可以看出:增稠剂类型对印花色浆的抱水性、得色量及色牢度均有显著影响,KG-401TJ 展现出最优的综合性能,其得色量最高($K/S=19.4$),且耐皂洗与耐摩擦色牢度均达 4 级以上,表明该增稠剂所形成的印花色浆有利于染料的高效转移;ST312 则在抱水性上表现最佳

(0.15 cm,数值越低抗渗化能力越强),有利于保障印花图案的轮廓清晰度;RN-F2 的得色量($K/S=18.8$)明显优于传统海藻酸钠体系($K/S=16.7$),同时保持了相当的色牢度水平。因此,选定 KG-401TJ、ST312 与 RN-F2 这 3 种增稠剂进行后续正交试验,以系统探究其协同作用,进一步优化免水洗印花体系的整体性能。

表 3 不同增稠剂对印花色浆性能测试结果

印花增稠剂	最佳质量 分数/%	耐皂洗色牢度/级			耐摩擦色牢度/级	
		涤沾	棉沾	变色	干摩擦	湿摩擦
海藻酸钠	4.0	4	3~4	3~4	4	3~4
ST312	2.0	4	4	4	4~5	3~4
RN-F1	3.0	3~4	3~4	3~4	4	3
RN-F2	3.0	3~4	3~4	3~4	4	3~4
RN-F3	1.0	3~4	3~4	3~4	4	3~4
KG-207	2.0	3~4	3~4	3~4	4	3~4
KG-401TJ	4.0	4~5	4	4~5	4~5	4

2.2.2 黏合剂对印花色浆性能影响

对添加不同质量分数黏合剂形成的印花色浆进行 K/S 值和抱水性测试,结果见图 2。图 2 结果表明,MCH-206 在 0.5%的低用量下即展现出最优的综合性能,其 K/S 值最高(18.5),且抱水性最低,为 0.3 cm,表明其在获得高得色量的同时具有较好的图案清晰度保持能力;ST308E 和 KG-1053 分别在 1%和 1.5%的用量下达到其最大 K/S 值(分别为 17.8 和 17.2),且对应的抱水性处于良好水平,

实现了性能与成本的较好平衡;而 MCH-201 与 KG-1018 则需提升用量至 2%,方可达到其最高 K/S 值(分别为 16.3 和 15.4)。因此,初步确定各黏合剂的最佳用量:MCH-201 为 2%,MCH-206 为 0.5%,ST308E 为 1%,KG-1053 为 1.5%,KG-1018 为 2%。

对添加最佳质量分数黏合剂所形成的色浆进行性能测试,结果如表 4。根据表 4 数据可知,黏合剂对印花色浆的性能具有显著影响。其中:MCH-206

的综合表现最优,其 K/S 值达到 18.5,且用量较少,耐皂洗与耐摩擦色牢度均优于 4 级;ST308E 次之,2 项色牢度指标均能维持在 4 级水平;而 KG-1018 的各项色牢度虽较为良好,但整体略逊于前两

者。结合黏合剂适宜用量范围为 0.5%~1.5%,本文择优选取黏合剂 MCH-206、ST308E 及 KG-1053,作为后续正交试验的核心变量,以系统探究其对印花品质的协同调控效应。

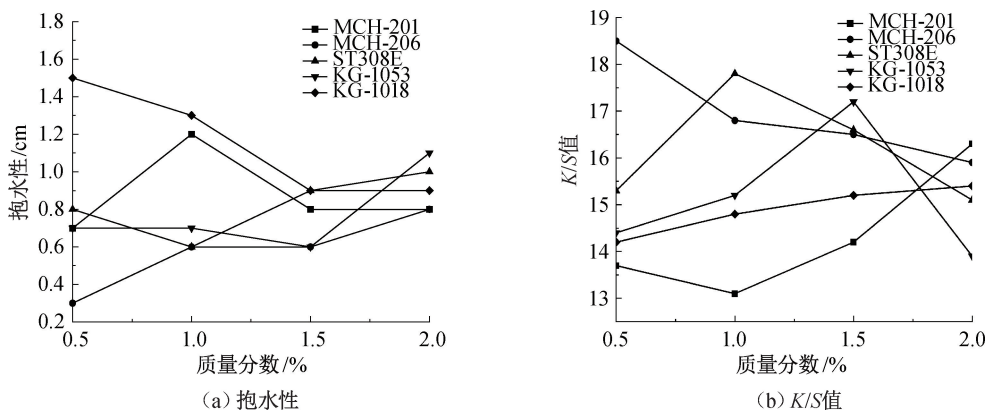


图 2 不同质量分数黏合剂下的抱水性和 K/S 值变化曲线

表 4 黏合剂对印花色浆性能测试

印花黏合剂	最佳质量分数/%	耐皂洗色牢度/级			耐摩擦色牢度/级	
		涤沾	棉沾	变色	干摩擦	湿摩擦
MCH-201	2.0	3~4	3~4	3~4	4	3~4
MCH-206	0.5	4	4	4	4~5	4
ST308E	1.0	4	4	4	4	4
KG-1053	1.5	4	4	4	4	4
KG-1018	2.0	3~4	3~4	3~4	4	3~4

2.3 基于正交试验的复配体系优化

2.3.1 正交试验方差分析

对正交试验中影响 K/S 值的各因素进行方差分析,结果如表 5 所示。表 5 显示:增稠剂种类(A)与黏合剂种类(C)对 K/S 值的影响极显著($P <$

0.01),是调控得色量的核心因素;增稠剂用量(B)的影响显著($P = 0.021 < 0.05$),为次要调整因素;黏合剂用量(D)的影响不显著($P = 0.083 > 0.05$),在优化中可简化处理。因此,后续工艺优化应优先聚焦增稠剂与黏合剂种类的进一步筛选。

表 5 正交试验方差分析结果

因素	方差来源				
	离差平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F 值	P 值
增稠剂种类(A)	22.13	2	11.07	12.30	0.002
增稠剂用量(B)	11.21	2	5.61	6.32	0.021
黏合剂种类(C)	15.32	2	7.66	8.51	0.007
黏合剂用量(D)	6.05	2	3.03	3.37	0.083

2.3.2 正交试验极差分析

正交试验极差分析的结果如表 6 所示,从表中可以看出:各因素对 K/S 值(得色量)的影响主次顺序为:增稠剂种类(A)、增稠剂用量(B)、黏合剂种类(C)和黏合剂用量(D)。增稠剂种类的极差值最大($R = 3.84$),表明其分子结构、分散性及对染料的抱合能力等差异,是影响色浆流变性与染料转移效率的最关键因素;黏合剂种类次之($R = 2.88$),其成膜性与染料相容性显著影响固色效果。根据各因素

水平下 K/S 值的均值比较,最优水平组合为 A3B3C1D2,即增稠剂选用 KG-401TJ (A3)、4% (B3),黏合剂选用 MCH-206(C1)、1%(D2)。

表 6 正交试验极差分析结果

因素	水平			极差 R	最优水平
	水平 1	水平 2	水平 3		
增稠剂种类(A)	23.00	21.72	25.56	3.84	A3
增稠剂用量(B)	22.13	23.29	24.86	2.73	B3
黏合剂种类(C)	23.97	21.09	23.55	2.88	C1
黏合剂用量(D)	23.60	24.32	22.35	1.97	D2

2.3.3 正交试验数据验证

通过方差与极差分析得出的优化复配方案已超出正交试验的预设范围,为验证其有效性,需将其与正交试验中效果最佳的第 8 组配方进行对照评估。设定对照组 1:高强度液体分散染料红 167(3%)+KG-401TJ 增稠剂(3%)+MCH-206 黏合剂(1%);对照组 2:高强度液体分散染料红 167(3%)+KG-401TJ 增稠剂(5%)+MCH-206 黏合剂(1%);标准组:高强度液体分散染料红 167(3%)+KG-401TJ 增稠剂(4%)+MCH-206 黏合剂(1%)。通过对各组配方的抱水性能、K/S 值、印花轮廓清晰度进行平行测试与分析,结果如表 7 所示。从表 7 可以看出:在抱水性方面,标准组(0.1 cm)较对照组 1(0.15 cm)更优,表明其抗渗化能力更强;在表观色深(K/S 值)方面,标准组(20.1)显著高于对照组 1(18.7)与对照组 2(19.5),反映其染料固色更充分;在印花轮廓清晰度方面,标准组细、粗线条不均匀度(7.07%、3.88%)均低于行业清晰度标准(细线 10%、粗线 15%),2 组对照的数值则接近或超出该阈值,表明其印花轮廓更清晰、渗化更轻。因此,正交试验所得最优配方的有效性获得实验证实,该优化配方在浆料稳定性、得色量、图案精度和织物手感上具有综合性能优势。

表 7 复配体系最优配方验证结果

测试组	抱水性/ cm	K/S 值	印花轮廓清晰度	
			细线条 不均匀度/%	粗线条 不均匀度/%
标准组	0.10	20.1	7.07	3.88
对照组 1	0.15	18.7	11.40	14.40
对照组 2	0.10	19.5	27.32	20.61

2.3.4 正交试验结果分析

基于极差与方差分析,增稠剂种类对印花效果的影响最为显著,其次为黏合剂种类。实验选用助剂 KG-401TJ(增稠剂)与 MCH-206(黏合剂)进行

复配,二者均不含甲醛和 APEO(烷基酚聚氧乙烯醚)等受限有害物质,且配伍性良好,能与各类液体分散染料协同作用。实验数据与微观观察结果表明,该复配方案(KG-401TJ 4% + MCH-206 1%)在印花得色量和图案边缘清晰度方面均展现出显著优势。因此,印花色浆的复配体系的方确定为:高强度液体分散染料红 167(3%)+KG-401TJ 增稠剂(4%)+MCH-206 黏合剂(1%)。

2.4 印花色浆性能研究

2.4.1 黏度特性

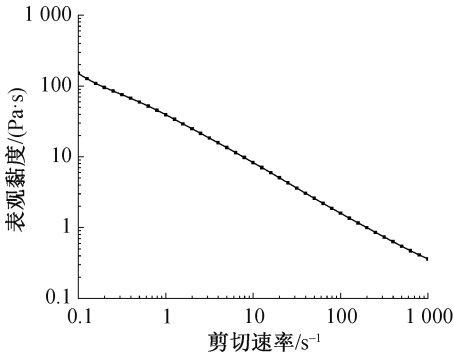
对海藻酸钠体系与复配体系的黏度特性进行测试,结果如表 8 所示。表 8 显示:复配体系的 PVI 值较传统海藻酸钠体系显著降低,降幅达 25%~40%,复配体系的 PVI 值小于 0.3,表明其属于典型的假塑性流体(即剪切稀化流体):在高剪切速率下(如刮印时),其表观黏度急剧下降,流动性增强,有助于色浆顺利透网;当剪切作用停止或减弱时,其黏度迅速恢复,从而维持色浆稳定性并确保其在织物表面均匀铺展。这种优异的流变特性是复配体系获得更佳印制效果的重要原因。

表 8 海藻酸钠体系与复配体系的黏度特性对比

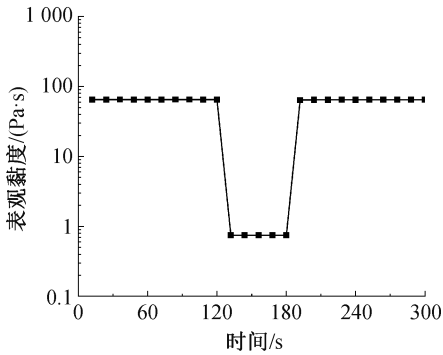
液体分散 染料种类	印花色浆	黏度/(Pa·s)		PVI 值
		6 r/min	60 r/min	
分散红	海藻酸钠体系	16.61	5.45	0.33
167	复配体系	22.71	5.31	0.23

2.4.2 流变性能

印花色浆复配体系的流变特性结果如图 3 和表 9 所示。从图 3(a)可以看出,复配体系的黏度随着剪切速率增大而下降,表明复配体系兼具显著的假塑性(剪切稀化)特征;由图 3(b)和表 9 可知,当受到高剪切作用(100 s⁻¹)时,复配体系黏度呈现数量级降低,剪切撤除后体系黏度在 30 s 内快速恢复至 44.12 Pa·s,黏度回复率高达 98.5%,展现出优异的结构恢复能力(高触变性)。这种快速触变恢复



(a) 表观黏度-剪切速率曲线



(b) 表观黏度回复曲线

图 3 表观黏度-剪切速率曲线及黏度回复曲线

特性使得色浆在剪切力撤除后迅速恢复高黏度,减少染料扩散,实现高得色量同时也保证了印花图案的轮廓清晰度。

表 9 复配体系的黏度和黏度回复率				
测试种类	黏度/(Pa·s)			黏度回复率/%
	第一阶段	第二阶段	第三阶段	
印花色浆	44.77	0.58	44.12	98.5

复配体系黏弹性结果如图 4 所示,从图中可以看出:储能模量(G')与损耗模量(G'')在角频率 183 rad/s(对应剪切速率 0.00785 s^{-1})处相交,此时损

耗因子 $\tan \delta=1$,为体系的黏弹性转折点;在高于此点的频率区, $\tan \delta>1$,体系以黏性行为为主,色浆表现出良好的流动与形变能力,利于刮印操作;在低于此点的频率区, $\tan \delta<1$,弹性行为占据主导, G' 值(约 374 Pa)显著且稳定高于 G'' ,表明分子间摩擦阻尼较小,能够提供良好的静态抗沉降能力,提升色浆的储存稳定性。因此,复配体系低剪切储存稳定、高剪切成网迅速,在保障印花轮廓清晰度与色泽的同时,充分展现了高强度液体分散染料在免水洗印花中的优势。

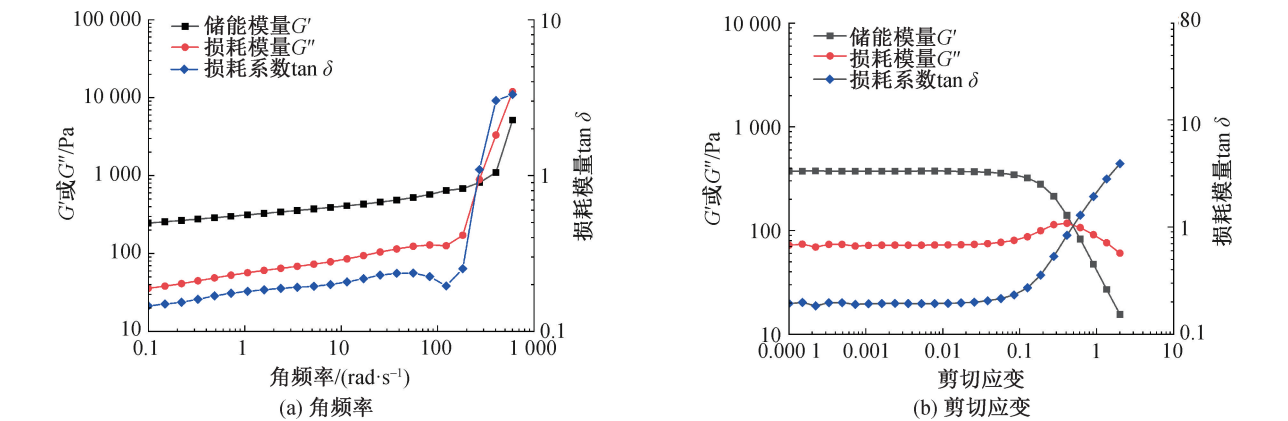
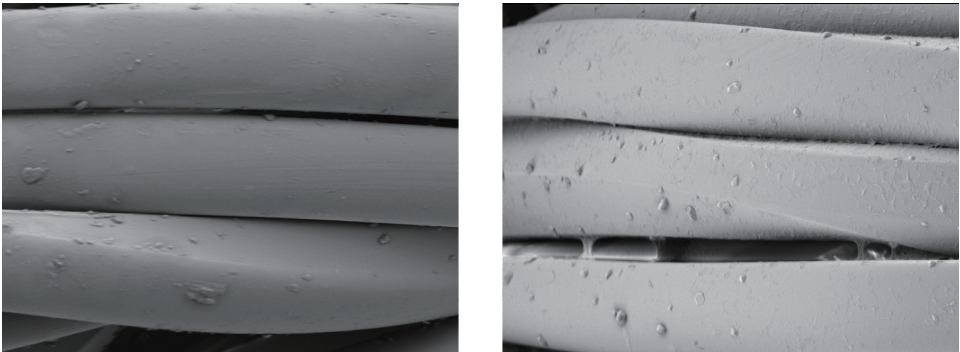


图 4 G' 、 G'' 和 $\tan \delta$ 随角频率和剪切应变的变化曲线

2.4.3 增稠剂和黏合剂对免水洗印花的协同作用

在免水洗印花色浆的复配体系中,增稠剂 KG-401TJ 与黏合剂 MCH-206 通过多阶段协同作用,共同主导了染料从印制到固着的全过程,为实现免水洗印花奠定了关键基础。该协同依次体现于 3 个关键阶段:a)印制阶段,增稠剂 KG-401TJ 凭借触变性,使得色浆刮印时变稀过网,印到织物上后,其黏度迅速恢复,如同一张瞬间定型的网,将染料颗粒牢牢锁定在指定位置,有效防止渗化,确保印花轮廓的清晰;b)预烘阶段,黏合剂 MCH-

206 通过初步成膜将已定位的染料当场固定,避免其随水分迁移,保证颜色均匀;c)高温焙烘阶段,KG-401TJ 网络有步骤地分解并释放染料,MCH-206 黏合剂交联形成透明薄膜。未加入黏合剂和加入黏合剂的涤纶纤维表面扫描电镜图片如图 5 所示,从图中可以看出:未添加黏合剂时(图 5(a)),涤纶纤维表面染料颗粒分布较为松散;加入黏合剂后(图 5(b)),纤维表面形成连续的薄膜,通过交联作用增强染料与纤维的结合力,使染料在纤维上稳定固着。



(a) 未加入黏合剂 (b) 加入黏合剂

图 5 未加入黏合剂和加入黏合剂的涤纶纤维表面扫描电镜图

2.5 复配体系印花效果测试

2.5.1 色牢度性能

海藻酸钠体系和复配体系的色牢度性结果如表 10 所示。从表 10 可以看出:在 K/S 值方面,复配体系对分散红 167 的效果显著,其 K/S 值(20.1)高于海藻酸钠体系同款染料(15.1),且经处理后仍能保持较高的 K/S 值,体现了更优的染料固着稳定性;在耐摩擦色牢度上,2 个体系的干摩擦牢度均达

到最高 5 级,复配体系对 C. I. 分散红 167 的湿摩擦牢度在处理后将由 4~5 级提升至 5 级,显示出更好的耐摩擦性能;在耐皂洗色牢度方面,复配体系对 3 种染料的表现整体更均衡,尤其在处理后各项沾色与变色牢度普遍达到 4~5 级。以上结果表明,复配体系通过助剂协同作用,在源头上建立了高而稳定的色牢度基础,无需依赖后道水洗弥补缺陷,从而为免水洗印花工艺的实现提供了关键支撑。

表 10 海藻酸钠体系与复配体系色牢度性能测试

印花色浆	还原清洗	染料种类	K/S 值	耐摩擦色牢度/级		耐皂洗色牢度/级		
				干摩擦	湿摩擦	涤沾	棉沾	变色
海藻酸钠体系	后	分散红 167	15.1	5	5	4~5	5	4~5
		分散蓝 79	17.2	5	5	5	5	4~5
		分散橙 288	18.3	5	5	4	4~5	4
复配体系	前	分散红 167	20.1	5	4~5	4~5	4~5	4~5
		分散蓝 79	18.6	5	5	5	5	4~5
		分散橙 288	19.5	5	5	4~5	4~5	4
	后	分散红 167	20.4	5	5	5	5	5
		分散蓝 79	16.8	5	5	5	5	5
		分散橙 288	19.1	5	5	5	5	5

2.5.2 织物手感测试

通过对海藻酸钠体系与复配体系的织物手感进行对比测试,结果如表 11 所示。结果显示,复配体系在免水洗工艺条件下对 3 种染料均呈现出普遍的手感改善,在 4 项核心指标上整体优于海藻酸钠体系。具体而言,在硬挺度方面,分散红 167 染料的复配体系在免水洗状态下的各向硬挺度均稳定在 4 级,分散蓝 79 复配体系经还原清洗后的各向指标优化至 5 级,有效改善了原布在经、

纬、斜 3 个方向上的性能差异;在表面粗糙度方面,分散红 167 复配体系免水洗处理后,粗糙度从原布的 3~4 级降至 2~3 级,还原清洗后进一步达到 2 级,而海藻酸钠体系处理后粗糙度仍维持在 3 级;在丰满度方面,3 种染料的丰满度均维持在 5 级,而分散橙 288 的海藻酸钠体系丰满度降至 4 级;松紧度指标在所有体系中均稳定保持 5 级最优值,表明各工艺均未对织物基本弹性结构产生不利影响。

表 11 海藻酸钠体系与复配体系手感测试

色浆还原清洗	染料种类	丰满度/级			硬挺度/级			粗糙度/级			松紧度/级		
		经向	纬向	45°斜向	经向	纬向	45°斜向	经向	纬向	45°斜向	经向	纬向	45°斜向
原布		5	5	5	3	5	5	3	4	4	5	5	5
海藻酸钠体系	后	分散红 167	5	5	5	3	3	3	3	3	5	5	5
		分散蓝 79	5	5	5	4	5	5	4	5	5	5	5
		分散橙 288	4	4	5	5	5	4	4	3	5	5	5
复配体系	前	分散红 167	5	5	5	4	4	4	2	3	5	5	5
		分散蓝 79	5	5	5	4	5	4	4	4	5	5	5
		分散橙 288	5	4	5	3	3	3	3	3	5	5	5
	后	分散红 167	5	5	5	4	4	4	2	2	5	5	5
		分散蓝 79	5	5	5	5	5	5	3	3	5	5	5
		分散橙 288	5	4	5	3	3	3	2	3	5	5	5

3 结 论

本文针对传统分散染料印花工艺中高耗水以及色牢度与织物手感难以协同优化的难题,围绕高强

度液体分散染料免水洗印花色浆复配体系的构建与性能调控,采用单因素实验与正交试验相结合的方法,对增稠剂、黏合剂及其配比进行了系统筛选与优化,通过极差分析和方差分析验证最优配方。主要

结论如下:

a)所构建的免水洗印花色浆复配体系最佳配方:液体分散染料红 167(3%)、KG-401TJ 增稠剂(4%)和 MCH-206 黏合剂(1%)。在该条件下,印花织物 K/S 值达 20.1,较海藻酸钠体系提高 20%,色浆抱水性为 0.1 cm,印花黏度指数为 0.23,摩擦色牢度(干/湿)分别为 5 级/4~5 级,说明该体系在免水洗条件下能够获得较高的表观色深和较稳定的色牢度性能。

b)结合极差和方差分析表明,增稠剂种类对印花效果影响最显著($P=0.002$,极差 $R=3.84$),其次是黏合剂种类,说明增稠剂在印花色浆的流变行为、给色能力和花纹成形中起主导作用,而黏合剂则对色牢度与织物手感的协调优化具有重要影响。该结果为免水洗印花色浆的设计与优化提供了明确方向。

c)该体系呈剪切稀化特性,兼具优良的触变性与黏弹性特征,在免水洗的条件下,实现手感和性能的平衡。在低剪切区由弹性主导(G' 稳定于 374 Pa),在高剪切区则为黏性占据主导(G' 与 G'' 相交于 183 rad/s);相较于传统海藻酸钠体系,该体系下制得的织物在经向、纬向及 45°斜向上的硬挺度分布更均衡,均为 4 级,表面粗糙度降低至 2~3 级,丰满度保持在 5 级,说明该体系在提高印花色浆性能的同时,能够较好地保持织物柔和、丰满的手感特征。

本文构建的高强度液体分散染料免水洗印花色浆复配体系,通过染料与助剂的精准调控,实现了涤纶织物印花的高色牢度与优良手感的统一,为印染行业的清洁生产与节能减排提供了切实可行的绿色技术路径。

团队介绍

崔志华教授团队专注于染(颜)料及印染助剂等精细化学品的分子设计、构效关系研究以及纤维、染料的光稳定化机理研究等绿色染整技术创新,致力于解决染料光稳定性不足、蛋白质纤维反应性染色难、传统印花工艺水资源消耗大等产业关键技术难题。团队在国家自然科学基金、浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划、浙江省重点研发计划及浙江省自然科学基金等项目的资助下,经过多年的科技攻关,系统阐明了基于 Mannich 反应的芳伯胺染料-蛋白质纤维共价键合染色机制,研发了高强度稳储型液体分散染料、可碱清洗分散染料、双母体叠合型紫外线吸收剂、反应性光稳定剂等系列精细化学品,建立了从分子设计、合成制备到工艺应用的全链条技术体系。团队发表 SCI、EI 等学术论文 40 余篇,授权国家发明专利 40 余件,主持及参与浙江省重点研发计划项目 2 项、浙江省自然科学基金 3 项、省科技厅计划项目 2 项,开展校企产学研合作课题 10 余项,研究成果已在浙江龙盛、浙江闰土、传化集团、吉华集团等龙头企业实现产业化应用,取得了显著的经济效益和社会效益。

(责任编辑:张会巍)

参考文献:

[1] 翟世雄, 范追追, 蔡再生. 纺织品生态印花技术现状[J]. 纺织导报, 2020(11): 18-21.

[2] Chen J, Pei L J, Shi W H, et al. Effect of dispersant on disperse dyeing in silicone waterless dyeing system [J]. Polymers, 2023, 15(4): 1046.

[3] 姚文齐, 荆丽丽, 杜金梅, 等. 涤棉织物耐碱分散染料/活性染料同浆印花工艺研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2023, 49(1): 20-25.

[4] 张永波, 郑灵芝, 黄俊, 等. 涤纶磨毛织物的分散免水洗印花工艺[J]. 印染, 2023, 49(4): 48-50.

[5] 许琳, 马琦, 董中华, 等. 聚丙烯酸盐增稠剂及其复合体系应用性能[J]. 印染, 2024, 50(5): 56-60.

[6] 王宣滨, 姜红红, 刘海杰, 等. 活性染料印花糊料研究进展[J]. 染整技术, 2023, 45(10): 13-16.

[7] 刘永强, 宋心远. 海藻酸钠的改性及印花性能探讨[J]. 染整技术, 2000, 22(1): 38-41.

[8] 张超民. 分散染料免蒸洗印花工艺研究[J]. 纺织报告, 2024, 43(7): 14-16.

[9] 冯冰冰, 刘艳春, 周天池, 等. 分散染料免蒸洗印花糊料的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2022, 43(1): 161-166.

[10] 黄燕珠, 张亚坤, 黄丽珍. 分散染料色浆免蒸化水洗印花工艺[J]. 针织工业, 2019(6): 42-45.

[11] 曲日庆. 液体分散染料免水洗印花生产工艺应用[J]. 丝网印刷, 2021(10): 28-32.

[12] 丁志平. 免蒸洗液态分散染料及碳中和印染技术研究进展[J]. 江苏丝绸, 2022, 51(2): 8-12, 48.

[13] 尚祖正, 宋理想, 戚栋明, 等. 稳储型液体分散蓝 79 的制备及其应用性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(4): 457-465.

[14] 崔松松, 王莉莉, 吴明华. 新型有机硅改性黏合剂及其分散染料免水洗印花应用研究[J]. 印染助剂, 2018, 35(10): 47-51.

[15] 苗赛男, 李青, 邢铁玲, 等. 棉织物活性染料干热转移印花清晰度[J]. 印染, 2014, 40(21): 5-8, 14.