

牛仔棉纱的靛蓝泡沫染色工艺

王宗伟¹, 仇振华¹, 姜为民¹, 王文聪²

(1. 黑牡丹纺织有限公司, 江苏常州 213017; 2. 江南大学纺织科学与工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要:牛仔靛蓝染色生产流程长、能源消耗高、污水排放量大, 将泡沫染色技术应用于纱线的靛蓝染色工艺中, 可有效推进牛仔行业的绿色转型发展。在浆染联合机上安装自主改良设计的泡沫染色系统, 对棉纱进行染色, 探究适宜的生产加工条件并对靛蓝泡沫染色牛仔织物的力学性能和染色性能进行测试。研究发现, 将未经预处理的干态纱线直接送入氮气保护下的泡沫染色系统, 当施泡口宽度为 15 mm, 轧辊压力为 0.2 MPa, 延迟氧化时间为 90 s 时, 可以生产出染色深度适宜、环染效果较优、匀染性良好的靛蓝牛仔棉纱; 其织物拉伸强力、撕破强力、耐摩擦色牢度均符合服用要求, 经水洗加工后可用于生产风格、色彩迥异的牛仔服装。

关键词: 牛仔织物; 靛蓝染料; 泡沫染色; 染色深度; 匀染性; 色牢度

中图分类号: TS 193.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2025)03-0189-07

Indigo Foam Dyeing Process of Denim Cotton Yarns

WANG Zongwei¹, QIU Zhenhua¹, JIANG Weimin¹, WANG Wencong²

(1. Black Peony Textile Co., Ltd., Changzhou 213017, China; 2. College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The traditional indigo dyeing process for denim production features long procedures, high energy consumption, and heavy wastewater discharge. Applying foam dyeing technology to indigo dyeing process of yarn can effectively promote green transformation in the denim industry. A self-modified foam dyeing system was installed on a sizing and dyeing combined machine for the coloration of cotton yarns. Suitable processing conditions were investigated, and the mechanical properties and dyeing performance of indigo foam dyeing denim fabrics were tested. The study found that using dry yarns without pretreatment in a nitrogen-protected foam dyeing system with a foam application nozzle width of 15 mm, roller pressure of 0.2 MPa, and delayed oxidation time of 90 s could produce indigo-dyed denim cotton yarns with appropriate color depth, superior ring dyeing effect, and excellent levelness. The resulting fabrics exhibit tensile strength, tearing strength, and color fastness to rubbing that meet apparel requirements. After washing treatment, these fabrics can be used to produce denim garments with diverse styles and color variations.

Key words: denim fabric, indigo dye, foam dyeing, dyeing depth, dye uniformity, color fastness

传统牛仔布是一种色经白纬的粗斜纹棉布, 因其独特的风格深受消费者喜爱, 然而传统牛仔布的生产加工工艺却极易造成环境污染。实际生产中, 牛仔布主要在浆染联合机或绳状染色机进行经纱

染色, 一般是将不溶性靛蓝染料还原成可溶性的隐色体钠盐进行上染, 经氧化后再重新转变为不溶性染料固着在纤维上。但由于靛蓝隐色体盐对棉的亲和力低, 因此需要低浓度、常温、多次浸轧、多次

收稿日期: 2024-10-31; 修订日期: 2025-03-13。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51703085); 常州市科技支撑计划(工业)项目(CE20210084)。

作者简介: 王宗伟(1983—), 男, 高级工程师。主要研究方向为牛仔生产工艺及新产品开发等。

Email: wangzongwei@blackpeony.com

暴露在空气中进行氧化,该过程流程长、耗能高、污水排量^[1-3]。在当前提倡绿色环保的趋势下,牛仔行业面临严峻考验,亟需采用新技术、新设备或新助剂以实现绿色转型发展。

泡沫染整技术^[4]利用空气替代了处理液中大部分水,是一种低给液、节能环保的绿色加工技术。在泡沫给液后,织物或纱线带液量大幅度降低,可减少化学品泳移导致的处理不匀问题,大幅节约干燥能耗、减少废水排放并提高生产车速,有效促进印染行业的节能减排与可持续发展。目前,泡沫染整主要用于织物的功能整理^[5-6],以及棉^[7-10]、羊毛^[11-12]等成品织物的活性染料泡沫染色。由于靛蓝染料易与泡沫体系内的氧气发生反应,同时该技术存在染色不匀及表面浮色问题,使其在牛仔布生产中的应用受到限制^[13]。目前,靛蓝泡沫染色已取得一些研究进展^[14-16]。如西班牙牛仔布制造商 Tejidos Royo,与 Gaston Systems 和 Indigo Mill Design 公司展开合作,经过 10 余年联合研发,成功开发出靛蓝泡沫染色技术并制造配套设备,相关牛仔产品已于 2020 年正式推向市场^[17];2021 年,美国 Wrangler 公司与芬兰循环时尚和纺织技术集团 Infinited Fiber Company 携手,推出运用 Indigood™ 泡沫染色工艺的丹宁环保靛蓝系列产品。ZHU D D 等^[18]模拟工厂的靛蓝染色棉纱生产流水线,探讨靛蓝染料的泡沫体系及其发泡工艺的筛选方法,通过正交实验得到靛蓝染料泡沫染色的最佳工艺,相关研究目前主要集中于小型实验室试验阶段,离实际工业化生产应用仍存在较大差距。

文中对浆染联合机进行改装,增配由泡沫发生器、泡沫施加器和延迟氧化区域组成的厌氧泡沫染色系统,探讨靛蓝泡沫染色的重要工艺条件(无氧环境、预处理条件、施泡口宽度、轧辊压力、延迟氧

化时间等)对纱线染色效果的影响,并对较优泡沫染色工艺条件下牛仔织物的染色牢度和力学性能进行评价,为靛蓝泡沫染色技术的大规模工业化应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料 L20 型耐碱起泡剂,常州商贸有限公司生产;FFC 型耐碱渗透剂,常州美胜生物材料有限公司生产;smart indigo 电解靛蓝,邢台里古环保科技有限公司生产,以上均为工业级试剂;棉纱(线密度为 58 tex),常州虹纬纺织有限公司生产;所使用的水为工业用水,未经净化处理。

1.1.2 仪器与设备 ASLGA395 染浆联合机,盐城华威纺机制造有限公司制造;Datacolor 650 测色仪,美国 Datacolor 公司制造;VHX-5000 型超景深三维数字显微镜,日本基恩士公司制造;Y571 型电动摩擦色牢度仪,YGB026ET-250 电子织物强力机,均为温州大荣纺织仪器有限公司制造;泡沫发生器、泡沫施加器,均为自行设计、制造。

1.2 方法

1.2.1 靛蓝泡沫染色工艺路线 牛仔织物靛蓝泡沫染色的生产工艺流程如图 1 所示。棉纱经整经后,在改装后的染浆联合机上进行泡沫染色和上浆,制成浆轴;浆轴经穿经后,在织机上与纬纱相互交织,再经后整理加工得到色经白纬的牛仔织物。与传统牛仔染色工艺中 612 道轧染和氧化工序相比,该靛蓝泡沫染色工艺的泡沫染色、延迟氧化和氧化工序均只有 1 道,染色设备长度从 80 m 缩短为 38 m,穿纱长度从 500 m 降低到 70 m,可缩短生产流程,减少纱线的浪费和设备占地面积,降低成本并提高生产效率。

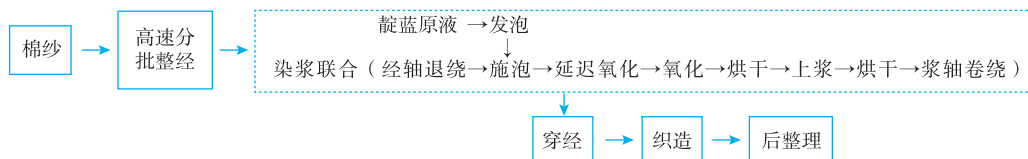


图 1 牛仔织物靛蓝泡沫染色的生产工艺流程

Fig. 1 Indigo foam dyeing production process of denim fabric

1.2.2 靛蓝染液发泡 将质量浓度为 100 g/L 的电解靛蓝染料与质量浓度为 2 g/L 的起泡剂、质量浓度为 5 g/L 的渗透剂均匀混合,制得靛蓝发泡原液,备用。使用泡沫发生器将靛蓝发泡原液与惰性气体混合搅拌,生成指定发泡比的泡沫,染色原液

的发泡原理如图 2 所示。设定气体流量为 2 L/min,液体流量为 1.5 L/min,搅拌速度为 300 r/min,此时泡沫半衰期约为 8 min,发泡比为 1:15。随后,将泡沫发生器产生的泡沫通过管道直接连接到泡沫施加器内。

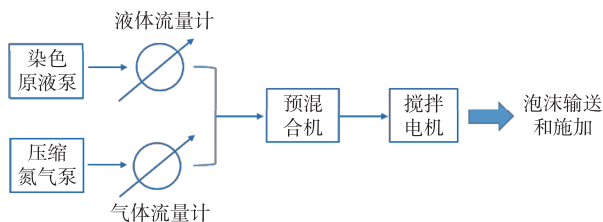
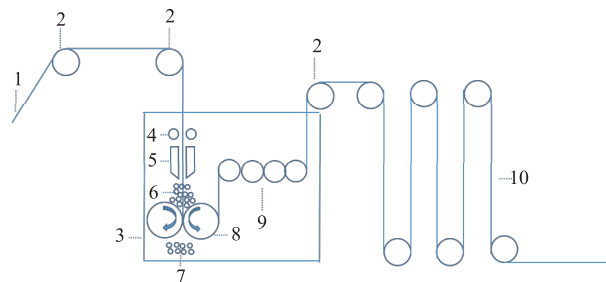


图2 泡沫发生器中染色原液的发泡原理

Fig. 2 Foaming principle of dyeing stock solution in foam generator

1.2.3 靛蓝泡沫染色系统 牛仔棉纱的靛蓝泡沫染色在浆染联合机上进行,纱线从经轴上退绕出来,进入如图3所示的泡沫染色系统。泡沫发生器中产生的靛蓝泡沫经泡沫施加器连续施加到棉纱上,而后泡沫被轧辊压破从而对纱线进行渗透、上染。上染后的牛仔棉纱在惰性气体保护下延迟氧化一定时间,然后进入空气中充分氧化以固色。牛仔棉纱经水洗、烘干后进入浆纱环节。



注:1—纱线;2—引纱导辊;3—厌氧泡沫密封箱(惰性气体条件);4—泡沫输送管;5—泡沫施加器;6—靛蓝泡沫;7—染色废液;8—轧辊;9—延迟氧化区域;10—纱线氧化区域。

图3 泡沫染色系统示意

Fig. 3 Schematic diagram of foam dyeing system

1.2.4 靛蓝泡沫染色工艺条件优化 采用单因素实验研究各生产工艺条件对纱线染色效果的影响。车速设定为 18 m/min,在其他因素不变的情况下,分别调整泡沫染色过程中泡沫染色系统的氧气环境、片纱在进入泡沫染色系统前的预处理方式、施泡口宽度(即泡沫施加器的出泡口宽度)、轧辊压力、延迟氧化时间等因素,测试纱线的表观色深(K/S值),并观察染色后棉纱的横截面,评价纱线的染色效果。

1.2.5 测试与表征 将泡沫直接倒入已知容积的塑料杯中,并用天平称重,计算泡沫染液的质量和同体积泡沫质量的比值(即发泡比);泡沫半衰期用于衡量泡沫的稳定性,为泡沫破裂析出 1/2 液体所需要的时间。

收集靛蓝泡沫染色后的纱线,将其均匀致密地

缠绕到载玻片上,选择 D65 光源和 10° 观察角,使用测色仪测定染色后纱线的 K/S 值。取不同位置重复测试 10 次,取平均值。根据 10 个 K/S 值计算标准偏差 $\Delta K/S$,以评价染色纱线的匀染性。牛仔棉纱的生产注重环染效果,即纱线外部为靛蓝色,芯部保留天然的白色,颜色由深到浅逐渐过渡,洗涤后能够呈现出更加自然的褪色效果,以体现牛仔面料复古、自然、个性化的风格特点。通过超景深显微镜观察染色后棉纱横截面内纱线染色部分和白芯部分,评价纱线染色的环染效果。

将泡沫染色和上浆后的经纱进行织造,生产得到牛仔织物。参照 GB/T 3923.1—2013《纺织品 织物拉伸性能 第1部分:断裂强力和断裂伸长率的测定(条样法)》^[19],将染后的样品置于恒温恒湿实验室内充分平衡,在电子织物强力机上测定试样的断裂强力,测试 3 次后取平均值;参照 GB/T 3917.1—2009《纺织品 织物撕破性能 第1部分:冲击摆锤法撕破强力的测定》^[20] 测试牛仔织物的撕破强力;为模拟日常家庭洗涤条件,参照 GB/T 8629—2017《纺织品 试验用家庭洗涤和干燥程序》^[21] 对织物进行洗涤,洗涤后进行耐摩擦色牢度测试;参照 GB/T 3920—2008《纺织品 色牢度试验 耐摩擦色牢度》^[22] 测定试样的耐摩擦色牢度。

2 结果与讨论

2.1 染色工艺优化

2.1.1 无氧环境对棉纱染色效果的影响 靛蓝隐色体极易被氧化,转变为不溶且对棉纤维亲和力小的靛蓝染料,难以进一步渗透进纱线内部,不能保证上染率和染色牢度。因此,靛蓝泡沫染色一般在无氧环境下进行,发泡时需要将靛蓝发泡原液与惰性气体(如氮气)进行机械搅拌,泡沫染色过程也需要在惰性气体条件下进行。当施泡口宽度为 15 mm,轧辊压力为 0.2 MPa,延迟氧化时间为 90 s 时,泡沫染色系统在有氧和无氧环境下的染色效果如图 4 所示。

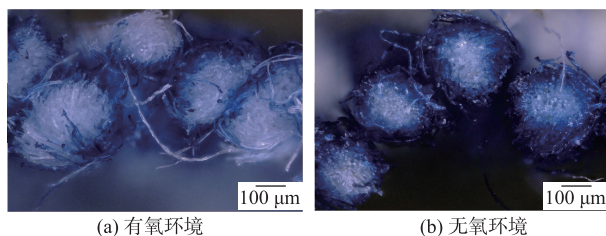


图4 牛仔棉纱的靛蓝泡沫染色效果

Fig. 4 Indigo foam dyeing effects of denim cotton yarns

在有氧环境下,染色后 K/S 值仅为 9.71,白芯部分比例大,说明充足的氧气易造成靛蓝隐色体过早氧化,使其以不溶性靛蓝的状态附着在纱线表面,难以渗透进纱线内部;而在无氧环境下 K/S 值上升至 27.65,纱线表面颜色深,内部白芯比例适宜,说明在惰性气体保护下,靛蓝隐色体对纱线的渗透性较强,上染率提高。

2.1.2 预处理对棉纱染色效果的影响 在靛蓝泡沫染色系统前设置预处理水槽,研究未经预处理、水预处理(80 °C)和渗透液预处理(使用质量浓度为 5 g/L 的耐碱渗透剂,80 °C)对纱线上染效果的影响。设置泡沫染色系统为无氧环境,施泡口宽度为 15 mm,轧辊压力为 0.2 MPa,延迟氧化时间为 90 s。图 5 为不同预处理方式下靛蓝泡沫染色棉纱的横截面,表 1 为预处理方式对牛仔棉纱靛蓝泡沫染色效果的影响。

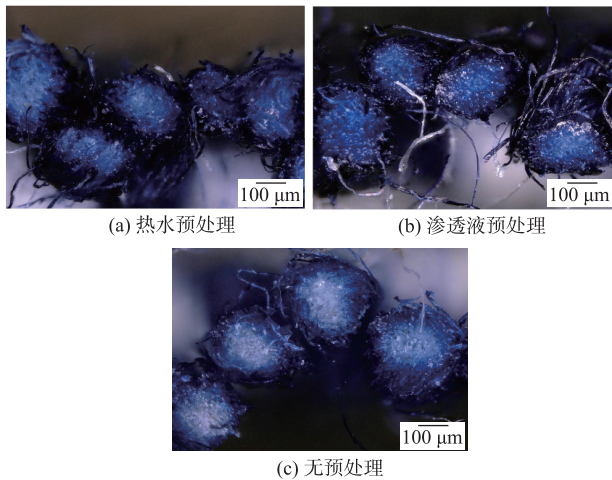


图 5 不同预处理方式下靛蓝泡沫染色棉纱的横截面

Fig. 5 Cross-sectional views of indigo foam dyed cotton yarns under different pretreatment conditions

表 1 预处理方式对牛仔棉纱靛蓝泡沫染色效果的影响

Tab. 1 Effect of pretreatment method on indigo foam dyeing of denim cotton yarns

预处理方式	K/S	$\Delta K/S$
热水	24.43	0.18
渗透液	25.30	0.18
无	27.65	0.15

由图 5 可见,经过热水或者渗透液预处理后,染料对棉纱的渗透性大幅度增加。这是因为预处理工序可以有效去除棉纤维表面的果胶、棉蜡等疏水物质,提高棉纱的润湿性,有助于靛蓝隐色体与棉纤维的有效结合。然而,经过预处理后,靛蓝染料

渗透到纱线内部,纱线芯部留白比例降低,这与牛仔布所追求的环染效果(即纱线外部为靛蓝色、芯部保留白色)相悖,无法赋予牛仔棉纱更加丰富的色彩层次和变化。此外,由表 1 可见,预处理后 K/S 值和纱线表面匀染性有所下降。这可能是因为预处理后纱线处于湿态,泡沫破裂后染液受到稀释,浓度发生变化。因此,在后续生产中取消了预处理,直接将干态纱线送入靛蓝泡沫染色系统进行上染。

2.1.3 施泡口宽度对棉纱染色效果的影响 施泡口宽度直接影响施泡口处泡沫的出泡量和靛蓝泡沫在片纱分布的均匀性。文中实验所使用的泡沫施加器为自主设计^[23],可有效提高片纱染色的均匀性,以适应快速灵活的生产要求。

表 2 为施泡口宽度对牛仔棉纱靛蓝泡沫染色效果的影响。此时纱线未经预处理,泡沫染色系统为无氧环境,轧辊压力为 0.2 MPa,延迟氧化时间为 90 s。在发泡比一定的情况下,施泡口缝隙过小时,泡沫输出量少,牛仔棉纱与泡沫的接触量和接触时间都过短,纱线得色率低;随着施泡口宽度的增大,泡沫输出量逐渐增加,泡沫在片纱上分布的均匀性有所改善,染色均匀性逐渐提升;但当施泡口缝隙过大时,输出的泡沫量过大,易造成染色均匀性下降。在文中实验所设置的工艺条件下,当施泡口宽度为 15 mm 时,染色效果最佳。

表 2 施泡口宽度对牛仔棉纱靛蓝泡沫染色效果的影响

Tab. 2 Effect of foam applicator width on indigo foam dyeing of denim cotton yarns

施泡口宽度/mm	K/S	$\Delta K/S$
5	23.97	1.10
10	25.43	0.66
15	27.65	0.15
25	26.19	0.29
30	25.07	0.39

2.1.4 轧辊压力对棉纱染色效果的影响 表 3 为轧辊压力对牛仔棉纱靛蓝泡沫染色效果的影响,图 6 为不同轧辊压力下靛蓝泡沫染色棉纱的横截面。此时棉纱未经预处理,泡沫染色系统为无氧环境,施泡口宽度设定为 15 mm,延迟氧化时间为 90 s。由表 3、图 6 可见,随着轧辊压力逐渐增加,牛仔棉纱的 K/S 值不断提高,染色愈加均匀。这是因为轧辊的挤压作用可以使靛蓝泡沫破裂,有助于染料扩散进入纤维内部,进而在纤维内部固着,提高固色率和匀染性。但当轧辊压力过高时,染液易从纱线孔隙中挤出,而非在纱线毛细管内运动,导致带液

率降低,反而影响了染色效果。在后续生产中,轧辊压力控制在0.2 MPa可以保证相对较优的染色效果。

表3 轧辊压力对牛仔棉纱靛蓝泡沫染色效果的影响

Tab.3 Effect of roller pressure on indigo foam dyeing of denim cotton yarns

轧辊压力/MPa	K/S	$\Delta K/S$
0	23.97	1.23
0.1	25.37	0.66
0.2	27.65	0.15
0.3	24.86	0.48

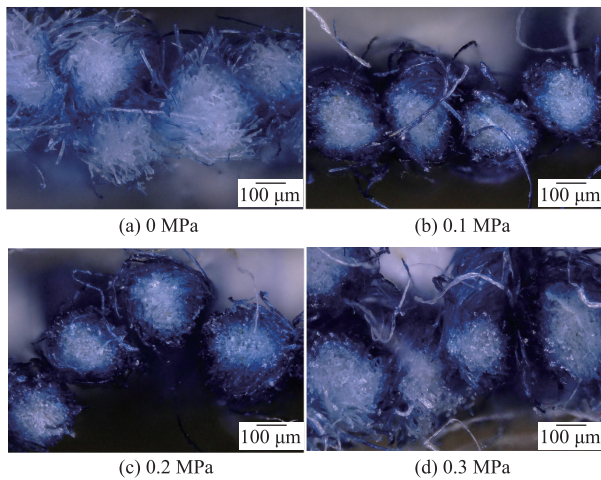


图6 不同轧辊压力下靛蓝泡沫染色棉纱的横截面

Fig.6 Cross-section views of indigo foam dyed cotton yarn under different roller pressures

2.1.5 延迟氧化时间对棉纱染色效果的影响 经泡沫染色的纱线在惰性气体密封箱中穿过一定数量的导辊,可以控制纱线的延迟氧化时间。将棉纱分别穿过06组导辊(0组代表染色后棉纱直接引出到空气中氧化),对应的延迟氧化时间分别为0,30,50,70,90,110,130 s。表4为延迟氧化时间对牛仔棉纱靛蓝泡沫染色效果的影响,图7为不同延迟氧化时间下靛蓝泡沫染色棉纱的横截面。此时纱线未经预处理,施泡口宽度设定为15 mm,轧辊压力控制为0.2 MPa。由表4、图7可见,若延迟氧化时间过短,进入到棉纱内部的靛蓝隐色体未与纤维上的羟基结合形成氢键就被氧化为靛蓝,会造成表面浮色,不利于染色牢度的提升。当延迟氧化时间达到90 s时,靛蓝隐色体中的羰基与纤维素中的羟基有充足的结合时间,因此棉纱的染色深度及均匀性较好。进一步增加延迟氧化时间,发现穿纱路线增长会增加密封箱占地面积,且对染色效果的影响不显

著,因此,较优的延迟氧化时间为90 s。

表4 延迟氧化时间对牛仔棉纱靛蓝泡沫染色效果的影响

Tab.4 Effect of oxidation delay time on indigo foam dyeing of denim cotton yarns

延迟氧化时间/s	穿纱导辊组数	K/S	$\Delta K/S$
0	0	16.82	1.11
30	1	19.15	1.07
50	2	21.42	0.84
70	3	24.71	0.49
90	4	27.65	0.15
110	5	27.88	0.15
130	6	27.83	0.14

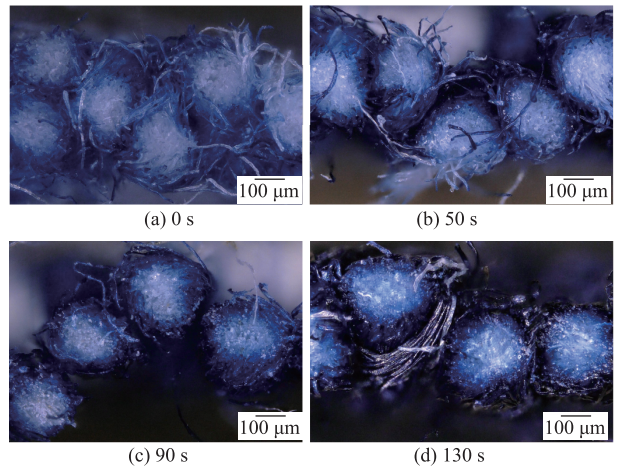


图7 不同延迟氧化时间下靛蓝泡沫染色棉纱的横截面

Fig.7 Cross-section views of indigo foam dyed cotton yarn under different oxidation delay time

2.2 靛蓝泡沫染色牛仔织物及其产品

2.2.1 靛蓝泡沫染色牛仔织物的性能 采用靛蓝泡沫染色技术进行牛仔棉纱染色不仅缩短了生产流程,而且大幅降低干燥能耗,减少废水排放和化学品使用量,安全环保,具有广阔的市场前景。将不同方式染色得到的经纱进行上机织造,生产斜纹牛仔织物,其测试指标见表5,织物表面结构如图8所示。由表5、图8可见,靛蓝泡沫染色达到了传统染色方式的品质,力学性能与常规靛蓝染色接近。靛蓝泡沫染色牛仔织物的耐干/湿摩擦色牢度略低于常规靛蓝染色,这可能是由于靛蓝泡沫染色仅经过了施泡—延迟氧化—氧化的染色工序(常规靛蓝染色会多次反复轧染、氧化),工艺流程大幅缩短,一定程度上影响了染料的固色效果,但整体仍符合牛仔织物的服用要求。后续将继续优化靛蓝泡沫染色配方及工艺,提升牛仔织物的染色牢度和服用性能。

表 5 不同靛蓝染色方式下牛仔织物的性能

Tab.5 Properties of denim fabrics under different indigo dyeing methods

染色方式	经密/ (根/dm)	纬密/ (根/dm)	面密度/ (g/m ²)	拉伸强力/N		撕破强力/N		耐干摩擦色牢度/级		耐湿摩擦色牢度/级	
				经向	纬向	经向	纬向	未洗涤	洗涤 5 次	未洗涤	洗涤 5 次
靛蓝泡沫染色	272	181	354.4	1 177	618	64.5	35.1	34	3	12	1
常规靛蓝染色	271	182	353.7	1 184	601	68.4	36.7	4	34	2	12

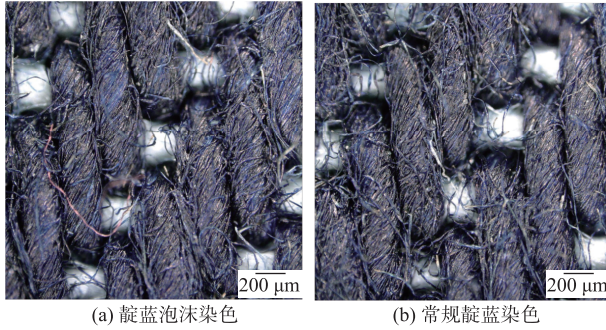
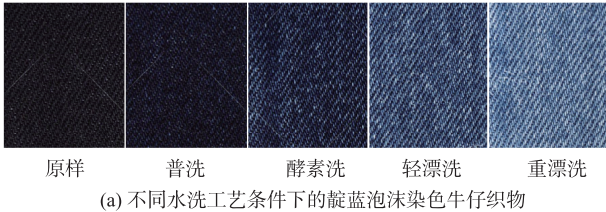


图 8 不同靛蓝染色方式下牛仔织物的表面结构

Fig.8 Surface structures of denim fabrics under different indigo dyeing methods

2.2.2 靛蓝泡沫染色牛仔产品应用效果 图 9 为靛蓝泡沫染色后经纱织造所得的牛仔织物及服装。由图 9 可见,经过不同的水洗工艺,所得牛仔织物的风格、色彩迥异,因此靛蓝泡沫染色工艺适合生产外套、马甲、裤装等不同的牛仔产品。



(a) 不同水洗工艺条件下的靛蓝泡沫染色牛仔织物



(b) 靛蓝泡沫染色牛仔服装

图 9 靛蓝泡沫染色牛仔织物及产品

Fig.9 Indigo foam dyed denim fabrics and products

3 结 语

1)在浆染联合机上安装自主改良设计的泡沫染色系统对牛仔棉纱进行靛蓝泡沫染色。较优的生产工艺为:干态纱线进入氮气保护下的泡沫染色

系统,施泡口宽度为 15 mm,轧辊压力为 0.2 MPa,延迟氧化时间为 90 s。

2)生产出的靛蓝牛仔织物染色深度适宜、均匀性好,其织物拉伸强力、撕破强力、耐摩擦色牢度均符合服用要求。

3)靛蓝泡沫染色技术能大幅降低烘干能耗、减少废水排放并提高生产车速,从而有效推进印染行业的可持续发展,具有广阔的市场前景。

参考文献:

[1] 李竹君,刘森.牛仔布生产技术[M].2版.上海:东华大学出版社,2016.

[2] 宋慧君,梅洪稳,李新阳,等.植物靛蓝对牛仔纱线的染色工艺研究[J].河南工程学院学报(自然科学版),2019,31(1):13-16.
SONG Huijun, MEI Hongwen, LI Xinyang, et al. Research on the process of plant indigo dyeing denim yarn [J]. Journal of Henan University of Engineering (Natural Science Edition), 2019, 31 (1): 13-16. (in Chinese)

[3] 欧阳顺怡.纺织印染企业碳排放核算及降碳措施[J].节能与环保,2023(9):43-46.
OUYANG Shunyi. Carbon emission accounting and carbon reduction measures for textile printing and dyeing enterprises [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2023(9): 43-46. (in Chinese)

[4] 费良,殷允杰,王潮霞.新型泡沫染色技术[J].印染助剂,2020,37(11):1-4.
FEI Liang, YIN Yunjie, WANG Chaoxia. Novel foam dyeing technology [J]. Textile Auxiliaries, 2020, 37 (11): 1-4. (in Chinese)

[5] 袁洁,贺江平.泡沫整理技术在单面防水单面亲水针织面料的应用研究[J].纺织科学与工程学报,2019(3):70-73,65.
YUAN Jie, HE Jiangping. Application research on foam finishing technology in single side waterproof and single side hydrophilic knitted fabric [J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2019(3): 70-73, 65. (in Chinese)

[6] 李永贺,瞿凌曦,徐壁,等.生物基聚对苯二甲酸丙二醇酯织物的阻燃与三防一步法泡沫整理[J].纺织学报,2021,42(4):8-15.
LI Yonghe, QU Lingxi, XU Bi, et al. One-step foam finishing of flame retardancy and three-proof finishing for bio-based polytrimethylene terephthalate fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(4): 8-15. (in Chinese)

[7] 牛燕燕,习智华.活性染料对纯棉织物的泡沫染色[J].染整技术,2016,38(3):14-18.
NIU Yanyan, XI Zhihua. Foam dyeing of cotton fabric with reactive

- dyes[J]. *Textile Dyeing and Finishing Journal*, 2016, 38(3): 14-18. (in Chinese)
- [8] 王元丰,余弘,谭思思,等. 棉织物泡沫染色工艺的筛选和优化[J]. *纺织学报*, 2014, 35(3): 68-74.
WANG Yuanfeng, YU Hong, TAN Sisi, et al. Selecting and optimizing of parameters of foam dyeing process of cotton fabrics[J]. *Journal of Textile Research*, 2014, 35(3): 68-74. (in Chinese)
- [9] 赵亚楠,葛甜甜,张妍,等. 基于泡沫整理技术的棉织物三防整理工艺与性能[J]. *现代纺织技术*, 2025, 33(2): 67-74.
ZHAO Yanan, GE Tiantian, ZHANG Yan, et al. Three-proof finishing process and performance of cotton fabrics based on foam finishing technology[J]. *Advanced Textile Technology*, 2025, 33(2): 67-74. (in Chinese)
- [10] YU H, WANG Y F, ZHONG Y, et al. Foam properties and application in dyeing cotton fabrics with reactive dyes[J]. *Coloration Technology*, 2014, 130(4): 266-272.
- [11] 苗爽,崔永珠,何佩峰,等. 羊毛织物姜黄素泡沫染色工艺研究[J]. *毛纺科技*, 2019, 47(10): 51-54.
MIAO Shuang, CUI Yongzhu, HE Peifeng, et al. Technology of natural dyes turmeric foam dyeing wool fabrics[J]. *Wool Textile Journal*, 2019, 47(10): 51-54. (in Chinese)
- [12] 何佩峰,崔永珠,于洪健,等. 羊毛织物的茜草/姜黄复配泡沫染色[J]. *印染*, 2019, 45(4): 10-15.
HE Peifeng, CUI Yongzhu, YU Hongjian, et al. Foam dyeing of wool fabric with madder and turmeric compound[J]. *Dyeing and Finishing*, 2019, 45(4): 10-15. (in Chinese)
- [13] 王建萍,郝赟,朱晶晶,等. 基于靛蓝纱的色织面料设计及水洗性能对比[J]. *服装学报*, 2017, 2(3): 189-194.
WANG Jianping, HAO Yun, ZHU Jingjing, et al. Design of the yarn dyed fabric based on the indigo yarn and performance analysis of its washing properties[J]. *Journal of Clothing Research*, 2017, 2(3): 189-194. (in Chinese)
- [14] JAIN A, KAMAL P. Dyeing of woolen yarns with indigo dyes[J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 671: 9-13.
- [15] PERIYASAMY A P, PERIYASAMI S. Critical review on sustainability in denim: a step toward sustainable production and consumption of denim [J]. *ACS Omega*, 2023, 8(5): 4472-4490.
- [16] UDDIN M G. Indigo ring dyeing of cotton warp yarns for denim fabric[J]. *Chemical and Materials Engineering*, 2014, 2(7): 149-154.
- [17] 中国棉纺织行业协会. 新型环保泡沫染纱技术[J]. *纺织科技进展*, 2019(2): 61.
China Cotton Textile Association. New environment-friendly foam dyeing technology[J]. *Progress in Textile Science and Technology*, 2019(2): 61. (in Chinese)
- [18] ZHU D D, WAN Z, ZHAO X Y, et al. Foaming indigo: an efficient technology for yarn dyeing[J]. *Dyes and Pigments*, 2022, 197: 109862.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纺织品 织物拉伸性能 第1部分: 断裂强力 and 断裂伸长率的测定(条样法): GB/T 3923.1—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纺织品 织物撕破性能 第1部分: 冲击摆锤法撕破强力的测定: GB/T 3917.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纺织品 试验用家庭洗涤和干燥程序: GB/T 8629—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纺织品 色牢度试验 耐摩擦色牢度: GB/T 3920—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [23] 仇振华,王宗伟,睢开毅,等. 牛仔经纱染色方法及其采用的染色装置: 113249891A[P]. 2021-08-13.

(责任编辑:沈天琦)