

涤纶织物免水洗染色及印花技术研究进展

孙素梅¹, 付政^{2,3}, 何颖婷^{2,3}, 关玉^{2,3}, 付少海^{*2,3,4}

(1. 连云港鹰游新立成纺织科技有限公司, 江苏 连云港 222207; 2. 江南大学 江苏省纺织品数字喷墨印花工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122; 3. 江南大学 生态纺织教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122; 4. 山东中康国创先进印染技术研究院有限公司 国家先进印染技术创新中心, 山东 泰安 271001)

摘要:通过文献调查法,介绍了国内外涤纶织物免水洗染色及印花技术的发展现状,归纳总结液体分散染料染色及印花、改性黏合剂印花、微胶囊染色、原位矿化染色和超临界 CO₂ 流体染色等技术的基本原理、应用效果以及实际染色生产中的优缺点和可行性。研究认为,液体分散染料染色及印花技术较为成熟,且已在工业化生产中使用,是现阶段最有可能实现免水洗染色的技术。通过减少助剂用量、改善黏合剂性能,可以获得浮色少、色牢度高、无需还原清洗的涤纶染色印花织物,实现涤纶的连续式少水及免水洗染色。

关键词:分散染料;涤纶织物;免水洗;染色印花

中图分类号:TS 193.5 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2022)05-0390-09

Research Progress of Washing-Free Dyeing and Printing Technology of Polyester Fabric

SUN Sumei^{1,2}, FU Zheng^{2,3}, HE Yingting^{2,3}, GUAN Yu^{2,3}, FU Shaohai^{*2,3,4}

(1. Lianyungang Yingyou New Licheng Textile Technology Co., Ltd., Lianyungang 222207, China; 2. Jiangsu Engineering Research Center for Digital Textile Inkjet Printing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Key Laboratory of Eco-Textile, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 4. National Innovation Center of Advanced Dyeing and Finishing Technology, Shandong Zhongkang-Guochuang Advanced Technology Research Institute of Dyeing and Finishing Co., Ltd., Tai'an 271001, China)

Abstract: The development status of polyester fabric washing-free dyeing and printing technology at home and abroad were introduced in this paper based on literature survey method. The basic principles and performance of dyeing and printing with liquid disperse dye, printing with modified adhesive, dyeing with microcapsules, in-situ mineralization dyeing and supercritical CO₂ fluid dyeing were summarized. The advantages and disadvantages and feasibility of washing-free dyeing and printing technology in polyester dyeing were also discussed. The dyeing and printing with liquid disperse dye is considered to be more mature and has been used in industrial production, and is the most likely technology to achieve washing-free dyeing at this stage. By reducing the auxiliary dosage and improving the performance of adhesive, it is able to obtain polyester dyed and printed fabrics with less floating color, high color fastness, and no need for reductive cleaning, and then the less water and washing-free dyeing of polyester can be achieved.

Key words: disperse dyes, polyester fabric, washing-free, dyeing and printing

收稿日期:2022-04-05; 修订日期:2022-08-26。

基金项目:国家先进印染技术创新中心科研基金项目(ZJ2021A08)。

作者简介:孙素梅(1979—),女,工程师。

*通信作者:付少海(1972—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为生态染整技术。Email:shaohaifu@hotmail.com

纺织及印染业每年产生约2亿t废水,占世界工业废水总量的17%~20%^[1-2],废水问题已经成为影响纺织行业可持续发展的主要障碍^[3-4]。如今,随着人们环保意识的增强,节能减排和环境保护愈发重要,因此,纺织及印染业开始重视印染加工中的耗水量及废水排放量问题,并逐步将未来印染技术的发展重心转移到织物免水洗染色方面。

涤纶因其抗皱性和保型性能优良,坚实耐用,成为当前使用量最大的纤维品种。由于涤纶不含活性基团,染料与涤纶间仅通过范德华力、氢键等弱作用力结合,导致染料固着率低,未经水洗的染色涤纶色牢度较差^[5-6]。为达到色牢度要求,需要对染色涤纶织物进行皂洗或还原清洗等后水洗步骤,以去除浮色^[7-8]。据统计,平均每吨涤纶的染整加工要消耗60~80t水,且产生的废水中包含大量表面活性剂、碱、染料等化学品,这类废水化学需氧量大,生物降解能力差,对水生类动植物具有明显的毒性,会导致严重的环境问题^[9-10]。目前,行业中一般使用后处理的方式来去除废水中的有害物质,常见方法有物理法、化学氧化法和生物法^[11]。然而,这些后处理方法仍存在各种问题,如能耗大、效率低、稳定性差、产生副产物等^[12]。因此,实现涤纶少水及免水洗染色,对减少前端废水的产生具有重大意义。文中详细介绍5种实现涤纶织物免水洗染色及印花的技术手段,并分析各方法的研究进展,总结仍需解决的问题。

1 液体分散染料

1.1 液体分散染料染色

液体分散染料又称“纳米分散染料”,染料颗粒的粒径为纳米级,远小于常规粉体分散染料的微米级^[13]。纳米尺寸的液体分散染料具有更高的渗透分散性能,可高效率进入涤纶纤维大分子的空隙,减少染料在纤维表面的堆积,提高上染率。同时,液体分散染料中添加的助剂较少,可减少染色织物洗涤过程中助剂的脱落,为涤纶免水洗染色工艺的开发提供了可行性^[14-15]。近年来,随着研磨设备及制备工艺的更新升级,液体分散染料相对于粉状分散染料的优势也日益凸显^[16]。如王召伟等^[17]使用聚羧酸盐分散剂制备出了粒径均匀、分散性能好的液体分散染料,并将其应用于涤纶高温高压染色,染料显示出较好的颜色提升性和匀染性。当染料的质量分数为1%时,染色废水接近无色透明,总有机碳值仅为23.49 mg/L,但染色织物仍需进行还原

清洗。阮仕奔^[18]研究了6种液体分散染料的稳定性,并将它们应用于涤纶染色,减少了染色助剂的使用并提高了织物色牢度。胡会娜等^[19]使用超支链聚合物作为防沉剂制备出高含量液体分散橙288,染色织物在低染料浓度染色后具有高色牢度,在高浓度染色后仅通过热水洗也可达到高牢度,这对实现免水洗染色具有重要意义。

上述研究表明,液体分散染料染色仍存在浮色现象,为解决这一问题,有研究将液体分散染料与其他助剂进行复配以固定浮色。如李禹等^[20]将液体分散红4RL与增稠剂、渗透剂复配后用于厚重涤纶毯布的轧染,得到的涤纶毯布具有高匀染性、高K/S值以及良好的摩擦和水洗牢度,实现了免水洗短流程染色,但存在染色织物颜色较浅的问题。庄广清等^[21]开发了一种高效、便捷、高色牢度的分散染料免水洗涤纶织物染色工艺,优选黏合剂的种类、用量和染色工艺条件,选用质量浓度为6%~8%的TF-320黏合剂与液体分散染料混合后进行轧染,得到的染色涤纶织物干摩擦色牢度达到4~5级。此外,福建溢佳仁科技有限公司研发出一种涤纶经编人造革基布长车免水洗连续染色工艺^[22],此工艺通过筛选和优化液体分散染料的染液组分,免除了涤纶染色中的水洗过程,节水率达到98.4%,每吨涤纶织物生产成本降低500元,降低生产成本的同时,还减少了环境污染。研究表明,液体分散染料染色具有一定的可行性。

1.2 液体分散染料印花

相比传统分散染料,液体分散染料粒径小,在印花过程中分布均匀、固色率高、提升性好,可以提高分散染料的印花效果。卜广玖等^[23-24]对比常规粉状染料和液体分散染料的印花效果,发现液体分散染料具有较高的耐摩擦和耐水洗色牢度。秦经纬等^[25]筛选出12种液体分散染料,与增稠剂、黏合剂复配得到印花色浆,对涤/棉织物进行直接印花,将印花织物的色牢度提升至4级以上。魏奕雯等^[26]将液体分散染料与自制纳米糊料复配并应用于涤纶免蒸洗印花,可获得高得色率和高牢度印花。另外,针对液体分散染料研磨时间长、效率低的问题,ELSHEMY N S等^[27]采用超声粉碎法制备纳米液体分散染料,有效提高了分散染料的超细化加工效率。

采用液体分散染料与染色助剂复配制备的染液具有较好的染色印花效果及色牢度。该方法简单便捷、成本低廉,且现有工艺已能大规模生产液体分散染料,故成为涤纶免水洗染色加工中具有工

业前景的一种方法。常州耀春格瑞纺织品有限公司采用高色牢度液体分散染料对涤纶拉舍尔毛毯进行印花加工^[28]。结果表明,液体分散染料印花毛毯匀染性、色深及印花轮廓清晰度均优于普通粉状分散染料印花毛毯,且还原清洗污水的化学需氧量(COD值)降低,污染物排放减少。这一现象表明,液体分散染料印花技术有望取代粉状分散染料印花,成为涤纶免水洗印花技术的重要部分。

然而,染色印花织物在水洗过程中仍存在少量染料及助剂脱落的现象,无法完全免去水洗步骤,且织物的高色牢度与柔软手感无法兼具。

2 改性黏合剂印花

印花是一种“增材加工”过程,黏合剂在印花中起到极为重要的作用,印花制品的发色性、色牢度、柔软性、耐水洗性等性能主要依赖于黏合剂和增稠剂的结构和用量。如通过改变印花浆成分,可以显著改善织物性能,但一些性能(如耐水洗性、柔软性和色牢度)间往往存在矛盾,很难同时得到解决^[29]。丙烯酸酯共聚物作为应用最广泛的黏合剂,研究如何对其改性并应用于纺织品印花具有重要意义。

陈细江等^[30]以水性聚氨酯-丙烯酸酯复合乳液为着色剂和黏合剂,对超细涤纶织物进行涂料染色,染色织物手感柔软,各项牢度可达到4~5级以上,但存在色深不足的问题。Al L等^[31-32]制备了有机硅改性的丙烯酸酯乳液,与液体分散染料复配后对涤纶织物进行微量印花,印花织物的色牢度达4级以上,水洗废水的染料质量浓度仅为2.62 mg/L。崔松松等^[33]发现在涤纶免水洗印花中,使用有机硅改性聚丙烯酸酯黏合剂替代普通印花黏合剂时,织物可获得更高的得色量和耐摩擦色牢度,且手感柔软光滑。WANG L L等^[34-35]的研究结果证实了有机硅的加入扩大了分散染料和黏合剂薄膜之间溶解度的差异,从而加快染料向涤纶的迁移扩散;同时,有机硅链段在焙烘过程中转移到薄膜表面,实现了分散染料从薄膜到涤纶的定向转移。在此理论上,JIANG J等^[36]将低溶解度参数的氟硅氧烷单体与多乙烯基共聚,设计了新型PA黏合剂,分散染料在PA薄膜中溶解度低,促进了染料向涤纶的迁移。同时,乙烯基间形成的交联结构抑制了聚合物链的迁移,从而允许F/Si链段的锚定,使分散染料的连续迁移成为可能。采用PA黏合剂时,染料利用率及印花织物的得色率和牢度大幅提高,且比传

统印花工艺减少73%的用水量、74%的能耗和100%的废水排放。周庆权等^[37]采用含氟聚硅氧烷改性聚丙烯酸酯乳液,并将其应用于分散染料免水洗印花,显著提高了印花织物的K/S值,织物的耐干湿摩擦色牢度分别达到4~5级和3~4级。

由此可见,通过将两种或多种单体进行共聚,可以制备出不同性能的复合型黏合剂,在保证印花织物高色牢度的同时改善匀染性及手感,从而获得优良的染色效果。然而,印花过程中黏合剂用量极大,虽然引入柔性单体显著改善了织物手感,但织物仍存在透气性差等缺点。

3 微胶囊染色

目前,微胶囊的制备方法包括界面聚合法、原位聚合法、相分离法和分子包埋法^[38]。原位聚合是分散染料微胶囊化的主要方法,其采用高分子壁材将分散染料包裹成微胶囊状。由于微胶囊壁材具有隔离作用,可防止染料大颗粒直接与织物接触,避免沾染形成色斑^[39]。同时,利用壁材对分散染料的缓释,可降低染浴中的染料含量,有效控制染料的上染速率,无需匀染剂也可实现匀染。此外,分散染料本身具有微溶性,高温条件下水进入微胶囊内溶解染料,形成的纤维、染浴和微胶囊中染料的浓度差,使染料在浓度推动力作用下向纤维表面迁移,并在纤维内部扩散,从而避免纤维表面产生高浓度染料吸附层,减少织物表面染料量^[40-41]。微胶囊染色后,废水可通过简单过滤或沉积除去残留微胶囊,并循环使用^[42]。因此,微胶囊技术对于提升织物匀染性、减少染色助剂使用、改善染料增溶现象、减轻水洗负担及降低废水处理难度具有重要意义^[43-44]。

早期分散染料微胶囊的制备多以脲醛树脂为壁材。李立等^[45]就以尿素-甲醛树脂作为壁材制备了分散染料微胶囊,其以阿拉伯胶作为分散剂,并加入NaCl提高囊壁的韧性,加入SiO₂粉末防止微胶囊颗粒发生相互黏结。丁冉等^[46]采用尿素-甲醛预聚体包覆分散染料,以苯乙烯-马来酸酐作为分散剂,研究了马来酸酐对微胶囊粒径、包封率和控释速率的影响。同时,以蜜胺树脂为壁材的微胶囊因强度高、包覆性好、成本低而受到青睐,于是人们转向蜜胺树脂微胶囊的制备与改性研究^[47]。冯继红等^[48-49]选用三羟甲基三聚氰胺和六羟甲基三聚氰胺在分散染料表面进行双层造壁,并使用制备的微胶囊对涤纶织物进行高温高压染色,皂洗后的

染色织物具有较好的色牢度和匀染性,过滤后染色废水的吸光度较传统染色废水下降约98%,验证了分散染料微胶囊对织物染色的可行性。在分散染料释放的过程中,壁材对微胶囊的染色性能起到至关重要的作用,很多学者对此进行了研究。李娴^[50]围绕不同结构的分散染料制备了不同壁材的蜜胺微胶囊,并对微胶囊的染色动力学进行研究,发现不同结构染料呈现出不同吸附类型,通过调控芯壁比和壁材,微胶囊染色织物各项色牢度达4级或以上,实现了免水洗染色。黄利利等^[51]分别使用红黄蓝3色蜜胺树脂类微胶囊对涤纶进行拼染,得到的深色织物经水洗后色牢度达到4~5级及以上。张奔等^[52]对3种配伍性能极不匹配的分散染料进行微胶囊化,通过改变壁材种类和芯壁比,调节了染料的释放速率,增加了染料的提升力,赋予不同配伍性染料较好的相容性,实现非助剂增溶的分散染料微胶囊超细涤纶的非条件配色。纪俊玲^[53]研究了蜜胺微胶囊对锦纶和涤纶的无助剂染色效果,并进行染色废水循环染色研究,实现了零排放染色。王晓文等^[54-55]使用蜜胺微胶囊与活性染料进行涤纶一浴染色,解决了还原清洗破坏活性染料的问题,还原清洗后的织物具有更深的颜色。

然而,蜜胺微胶囊存在染色时间长,上染速率慢的缺点。为解决此问题,钟毅等^[56-57]制备了以聚脲和蜜胺为壁材的分散染料胶囊。研究发现,聚脲类壁材较疏松而聚蜜胺类壁材更紧密,聚脲类微胶囊染料上染速率大于聚蜜胺类微胶囊,两种微胶囊染色后涤纶织物具有较好的牢度,并且可通过“后染色”进一步提高牢度,实现免水洗染色。在此基础上,刘永政等^[58]优化了聚脲微胶囊的制备工艺,采用纤维素纳米晶作为乳液稳定剂,制备分散染料微胶囊,减少表面活性剂的使用,并将其应用于涤纶织物高温高压染色,可有效减少染料浮色,使染色织物的耐干湿摩擦牢度及水洗牢度提高至4~5级及以上,实现涤纶的清洁染色。

虽然早在1974年就有文献提出了分散染料微胶囊染色的概念^[59],但一直没有开发出可进行大批量工业化生产的分散染料微胶囊染色技术。如盛虹集团采用黑色分散染料微胶囊对梭织涤纶进行染色,获得中样试色成功,但因为大批量染色时染料配伍性及萃取器流量问题,织物色光发生改变。实际生产结果表明,大多分散染料微胶囊染色方法仍停留在实验室小样试色和工厂中样试色阶段,在大批量染色时容易出现织物色光改变、颜色浅等现象,故分散染料微胶囊染色技术在工业化方面还需

进一步改进及优化^[60]。连云港鹰游新立成纺织科技有限公司在分散染料微胶囊染色基础上优化了工艺,开发出“闪染”免水洗染色技术,并已在南通艺源、浙江省纺、罗莱家纺等多家公司进行了推广应用。这一技术能耗降低46.41%,耗水量降低91.45%,温室气体排放降低61.77%,具有显著节能减排的效果^[61]。相信随着微胶囊染色技术的优化,有望推动中国传统印染业的技术改造、结构调整和产业升级。

4 原位矿化染色

邢建伟^[62-63]科研团队研发了一种应用于间歇式染色加工的新型染色技术,该方法通过在染色残液中加入特种助剂,使废弃染料及残余染色助剂与被染纤维分离,再通过矿化作用将其分解为无色小分子物质及 CO_2 和 H_2O 。由于有机污染物不经排放而在其产生的原位上发生矿化,这一染色加工工艺被称为“原位矿化染色技术”。该技术可产生深度节水、减排、节能的效果,从源头上减轻后续污水处理负担。

赵航^[64]使用矿化染色法,在涤纶织物染色结束后向残液中加入自主研发的特种催化剂XBD以及 H_2O_2 ,使残余染料以及染色助剂发生原位矿化,转化为 CO_2 和水。研究发现,特种催化剂XBD具有一定的疏水性,可以富集吸附在染色残液中以及纤维表面的分散染料,使 H_2O_2 分解,令染料与染色助剂矿化降解,降低染色残液色度88.05%,降低 COD_{Cr} 值51.65%,降低 BOD_5 值27.42%,降低悬浮物含量40.74%,从而还原清洗及水洗环节。丁会会等^[65]采用原位矿化染色技术对涤/氨混纺织物进行染色,当助剂XBD用量为染料用量的0.2倍、XYS用量为染料用量的3.0倍,矿化温度为85℃,矿化时间为35min时,涤/氨混纺织物染色后色牢度和颜色深度可以达到与传统染色工艺相当的水平,可免去染色后还原清洗和多次净洗环节,实现节水减排。周梦宇^[66]对原位矿化的部分机理进行研究,发现原位矿化可以使分散染料的共轭结构和芳香环结构发生断裂,同时将涤纶纤维表面的低聚物进行部分降解,原位矿化染色后织物满足免水洗要求。由于低聚物也是影响染色性能的重要因素,曾笑笑等^[67]研究了原位矿化对于涤纶纤维表面低聚物的影响,结果表明,原位矿化处理使织物表面的低聚物去除率达到20.7%,比传统工艺提高5.3%,同时有效减少了涤纶染色后迁移至纤维表面的低聚物及分散染料,避免了还原清洗步骤。

5 超临界 CO₂ 流体染色

流体染色技术主要利用超临界状态下 CO₂ 具有与液体相似的溶解性和与气体相似的扩散性的特征,将其溶解非极性或低极性染料并对纤维进行染色。染色时超临界流体对合成纤维具有增塑作用,从而降低其玻璃化温度并增强染料的扩散性。染色后经过减压降温,CO₂ 从织物中释放,并将染料留在织物内部^[68]。超临界 CO₂ 可以应用于合成纤维和天然纤维的染色,染色过程无水、价格低廉、可循环使用,零排放无污染,并具有上染速度快、上染率高的优势^[69]。因此,超临界 CO₂ 流体染色技术作为一种清洁化的染色方法已在国内外取得了阶段性研究进展^[70]。

GONG D X 等^[71] 使用超临界 CO₂ 将分散蓝 79 和分散红 167 配色后对涤纶进行染色,染色织物未经水洗就具有良好的水洗色牢度、摩擦色牢度以及耐光色牢度。ABATE M T 等^[72] 和 KABIR S M M 等^[73] 将超临界 CO₂ 用于天然染料姜黄素对涤纶的染色,可解决天然染料上染率低的问题,并减少染色时间,最终获得具有优异耐水洗性和耐摩擦色牢度的染色涤纶。景显东等^[74] 将超临界 CO₂ 用于超细涤纶衬布的染色,结果发现,在染色温度 120 ℃、压力 24 MPa、染色时间 60 min 的条件下,织物染色牢度达到 4~5 级,实现了免清洗、无助剂、无废水的涤纶染色。由此可见,超临界 CO₂ 流体染色是一种可持续、环保、有前途的染色技术,但由于工艺要求,染色需要在高压条件下进行,过程繁琐且危险性较大,因此仍需要进行不断改进,以适应大批量高效生产要求^[75]。

6 结 语

近年来,随着研究人员对涤纶织物免水洗染色及印花技术的深入研究,印染行业染色及印花生产方法不断改进。目前已经有一系列免水洗染色及印花技术的方法,如液体分散染料染色印花、改性黏合剂印花、微胶囊染色、原位矿化染色及超临界 CO₂ 流体染色等。这些方法均具有高染料上染率、高固色率、少浮色、高色牢度、染色后无需还原清洗等优点,为实现涤纶的免水洗、清洁化生产提供了可能。然而,这些技术要实现规模化生产仍存在如下问题:

1) 液体分散染料的染色和印花可应用于涤纶

连续式生产,并已实现规模化生产。但织物在着色过程中需要借助大量黏合剂才能得到高色深和高色牢度,由此导致织物手感不佳。

2) 黏合剂的改性对于兼顾织物的手感和色牢度具有重要意义,但染料在黏合剂膜内的扩散机理还有待研究,黏合剂的使用效果也需进一步改善,如印花织物透气性差的问题仍需要解决。

3) 分散染料微胶囊主要应用于涤纶织物的高温高压染色,无法实现连续化生产,且其缓释作用也会造成染色时间延长等问题。

4) 原位矿化染色仍在研究阶段,存在矿化偶合剂用量大、矿化机理研究不透彻等问题。

5) 超临界 CO₂ 染色对设备要求非常高,限制了其在实际生产中的应用。

综上,未来涤纶织物免水洗染色及印花技术应重点研究黏合剂的开发,从而实现织物染色效果与优良服用性能的统一;同时,应提高对新型染色技术的理论研究与应用,逐步降低其生产使用成本。

参考文献:

- [1] HOLKAR C R, JADHAV A J, PINJARI D V, et al. A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016(182): 351-366.
- [2] ÇAY A. Energy consumption and energy saving potential in clothing industry[J]. *Energy*, 2018, 159: 74-85.
- [3] 马永喜,王娟丽,李一. 纺织工业废水处理模式改进研究[J]. *丝绸*, 2017, 54(4): 37-42.
MA Yongxi, WANG Juanli, LI Yi. Study on improvement for wastewater treatment mode in textile industry [J]. *Journal of Silk*, 2017, 54(4): 37-42. (in Chinese)
- [4] YASEEN D A, SCHOLZ M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(2): 1193-1226.
- [5] LUO Y, ZHONG Y, ZHANG B, et al. Effect of microencapsulation on dyeing behaviors of disperse dyes without auxiliary solubilization [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 120(1): 484-491.
- [6] LI M, SONG K L, XIE K L, et al. Dispersion of disperse yellow BROB with polymer surfactants and its dyeing property for polyester fabric [J]. *Fibers and Polymers*, 2015, 16(3): 614-620.
- [7] ALEEM A U, CHRISTIE R M. The clearing of dyed polyester. Part 1. A comparison of traditional reduction clearing with treatments using organic reducing agents

- [J]. *Coloration Technology*, 2016, 132(4): 280-296.
- [8] 郑丽娟. 染色织物低温环保皂洗工艺研究[D]. 上海: 东华大学, 2020: 7-9.
- [9] ZHENG L, WANG X J, WANG X Z. Reuse of reverse osmosis concentrate in textile and dyeing industry by combined process of persulfate oxidation and lime-soda softening[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 108: 525-533.
- [10] TKACZYK A, MITROWSKA K, POSYNIAC A. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137222.
- [11] 章耀鹏, 沈忱思, 徐晨焱, 等. 纺织工业典型污染物治理技术回顾[J]. *纺织学报*, 2021, 42(8): 24-33, 40. ZHANG Yaopeng, SHEN Chensi, XU Chenye, et al. Review on treatment technology for typical pollutants in textile industry[J]. *Journal of Textile Research*, 2021, 42(8): 24-33, 40. (in Chinese)
- [12] 贾艳萍, 姜成, 郭泽辉, 等. 印染废水深度处理及回用研究进展[J]. *纺织学报*, 2017, 38(8): 172-180. JIA Yanping, JIANG Cheng, GUO Zehui, et al. Research progress on deep treatment and recycling of dye wastewater[J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(8): 172-180. (in Chinese)
- [13] 沈卫庆, 项斌, 高建荣, 等. 机械球磨工艺制备超细粒径分散染料的研究[J]. *染料与染色*, 2006, 43(2): 14-17. SHEN Weiqing, XIANG Bin, GAO Jianrong, et al. A study on the preparation of ultra-fine grain size of disperse dyes by mechanical ball milling technology[J]. *Dyestuffs and Coloration*, 2006, 43(2): 14-17. (in Chinese)
- [14] 艾丽, 朱亚伟. 液体分散染料的技术进步及应用[J]. *印染*, 2019, 45(24): 47-52. AI Li, ZHU Yawei. The development of liquid disperse dye and its application[J]. *Dyeing and Finishing*, 2019, 45(24): 47-52. (in Chinese)
- [15] 刘媛媛, 钟毅, 徐红, 等. 液体分散染料的超细化制备工艺[J]. *印染*, 2021, 47(1): 6-10. LIU Yuanyuan, ZHONG Yi, XU Hong, et al. Ultrafine preparation of liquid disperse dyestuff[J]. *China Dyeing and Finishing*, 2021, 47(1): 6-10. (in Chinese)
- [16] 钱春霞, 何权辉, 赵朋, 等. 液体分散染料的制备及分散剂的选择[J]. *染料与染色*, 2021, 58(5): 43-48, 34. QIAN Chunxia, HE Quanhui, ZHAO Peng, et al. Preparation of liquid disperse dyes and the dispersants used [J]. *Dyestuffs and Coloration*, 2021, 58(5): 43-48, 34. (in Chinese)
- [17] 王召伟, 钟毅, 徐红, 等. 液体分散染料的制备及应用[J]. *印染*, 2021, 47(10): 6-10. WANG Zhaowei, ZHONG Yi, XU Hong, et al. Preparation and application of liquid disperse dyes [J]. *China Dyeing and Finishing*, 2021, 47(10): 6-10. (in Chinese)
- [18] 阮仕奔. 涤氨纶混纺织物轧染高牢度低排放染色工艺研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2021: 55-56.
- [19] 胡会娜, 石瑜博, 朱亚伟, 等. 高力份分散橙 288 液体染料制备、稳定性及染色性能[J]. *丝绸*, 2021, 58(1): 8-12. HU Huina, SHI Yubo, ZHU Yawei, et al. Preparation, stability and dyeing performance of high strength disperse orange 288 liquid dye[J]. *Journal of Silk*, 2021, 58(1): 8-12. (in Chinese)
- [20] 李禹, 杨海伟, 林遥瑶, 等. 厚重涤纶毯布的免水洗轧染工艺与颜色指标分析[J]. *武汉纺织大学学报*, 2020, 33(4): 9-14. LI Yu, YANG Haiwei, LIN Yaoyao, et al. Pad dyeing process without washing and color index analysis of heavy polyester blanket [J]. *Journal of Wuhan Textile University*, 2020, 33(4): 9-14. (in Chinese)
- [21] 庄广清, 黄益, 邵建中. 涤纶织物分散染料免水洗染色[J]. *印染*, 2013, 39(19): 9-11, 15. ZHUANG Guangqing, HUANG Yi, SHAO Jianzhong. Clearing-free dyeing of polyester fiber with disperse dyes [J]. *Dyeing and Finishing*, 2013, 39(19): 9-11, 15. (in Chinese)
- [22] 贺江平, 尚玉栋, 康卫刚, 等. 涤纶经编人造革基布长车免水洗连续染色工艺[J]. *针织工业*, 2020, (6): 34-39. HE Jiangping, SHANG Yudong, KANG Weigang, et al. Washing-free continuous dyeing process for polyester warp-knitted artificial leather base fabric [J]. *Knitting Industries*, 2020, (6): 34-39. (in Chinese)
- [23] 卜广玖, 王震, 陆前进, 等. 涤纶家纺面料的液体分散染料免洗印花[J]. *印染*, 2020, 46(6): 45-48. BU Guangjiu, WANG Zhen, LU Qianjin, et al. Washing-free printing of polyester home textiles with new liquid disperse dyes [J]. *China Dyeing and Finishing*, 2020, 46(6): 45-48. (in Chinese)
- [24] 卜广玖, 王震, 陆前进, 等. 涤纶浸染用高固色率液体分散染料[J]. *印染*, 2020, 46(4): 27-30, 34. BU Guangjiu, WANG Zhen, LU Qianjin, et al. Liquid disperse dyes with high fixation yield for exhaust dyeing of polyester [J]. *China Dyeing and Finishing*, 2020, 46

- (4);27-30,34. (in Chinese)
- [25] 秦经纬, 曹红梅, 朱亚伟. 液体分散染料在涤/锦织物上的印花性能[J]. 印染, 2017, 43(11): 12-15, 24.
QIN Jingwei, CAO Hongmei, ZHU Yawei. Printing performance of liquid disperse dyes on polyester/polyamide mixture[J]. Dyeing and Finishing, 2017, 43(11): 12-15, 24. (in Chinese)
- [26] 魏奕雯. 涤纶织物分散染料免蒸洗印花工艺[J]. 印染, 2019, 45(9): 24-27.
WEI Yiwen. Steaming-and washing-free printing of polyester fabric with disperse dyes [J]. Dyeing and Finishing, 2019, 45(9): 24-27. (in Chinese)
- [27] ELSHEMY N S, EL-SAYAD H S, ABD EL-RAHMAN A A, et al. Optimization and characterization of prepared nano-disperse dyes via a sonication process and their application in textile dyeing and printing[J]. Fibers and Polymers, 2019, 20(12): 2540-2549.
- [28] 徐成耀, 张弘. CC-HD 高色牢度液体分散染料涤纶毛毯印花工艺[J]. 染整技术, 2020, 42(1): 27-29, 33.
XU Chengyao, ZHANG Hong. Printing technology of polyester blanket with CC-HD high fastness liquid disperse dye[J]. Textile Dyeing and Finishing Journal, 2020, 42(1): 27-29, 33. (in Chinese)
- [29] JIANG X, HU H L, BAI Y C, et al. Synthesis and properties of the vinyl silicone oil modified polyacrylate core-shell latex as a binder for pigment printing [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013, 27(2): 154-164.
- [30] 陈细江, 丁雷, 刘素素, 等. 水性聚氨酯-丙烯酸酯乳液在超细涤纶涂料染色中的应用[J]. 印染, 2018, 44(3): 36-39.
CHEN Xijiang, DING Lei, LIU Susu, et al. The application of waterborne polyurethane-acrylate composite emulsion to pigment dyeing of superfine polyester fabric[J]. Dyeing and Finishing, 2018, 44(3): 36-39. (in Chinese)
- [31] AI L, CAO H, ZHU Y. Ultralow emission micro-printing process for PET fibers using liquid disperse dye [J]. Textile Research Journal, 2022, 92(5): 788-800.
- [32] AI L, CAO H M, ZHU Y W. Preparation of silicone-modified acrylate latex and its application for low-emission printing of PET fibre[J]. Autex Research Journal, 2019, 19(3): 293-300.
- [33] 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.
CUI Songsong, WANG Lili, WU Minghua. Novel silicone modified adhesive and its application in disperse dye washing-free printing [J]. Textile Auxiliaries, 2018, 35(10): 47-51. (in Chinese)
- [34] WANG L L, CUI S S, NI H G, et al. Preparation and application of polyacrylate binder for washing-free printing on polyester with disperse dyes [J]. Textile Research Journal, 2019, 89(13): 2721-2728.
- [35] WANG L L, CUI S S, NI H G, et al. New washing-free printing binder based on organosilicon-modified polyacrylate for polyester fabric printing of disperse dyes [J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 123: 75-81.
- [36] JIANG J T, SHEN Y F, YU D Y, et al. Sustainable washing-free printing of disperse dyes on polyester fabrics enabled by crosslinked fluorosilicone modified polyacrylate binders[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2021, 32(2): 641-650.
- [37] 周庆权, 王云云, 张奇鹏, 等. 改性聚丙烯酸酯乳液在分散染料免水洗印花中的应用[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 572-578.
ZHOU Qingquan, WANG Yunyun, ZHANG Qipeng, et al. Application of modified polyacrylate emulsion in disperse dye washing-free printing [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2019, 41(5): 572-578. (in Chinese)
- [38] 朱建康, 姬巧玲, 陈焱涛. 微胶囊技术及其在纺织领域中的应用进展 [J]. 天津工业大学学报, 2012, 31(4): 44-49.
ZHU Jiankang, JI Qiaoling, CHEN Yitao. Microcapsule technology and its application process in textile [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2012, 31(4): 44-49. (in Chinese)
- [39] CHANG C P, YAMAMOTO T, KIMURA M, et al. Release characteristics of an azo dye from poly(urethane) microcapsules[J]. Journal of Controlled Release, 2003, 86(2): 207-211.
- [40] 洪桂香. 解读微胶囊技术在染整加工中的应用[J]. 染整技术, 2016, 38(6): 10-14.
HONG Guixiang. Review of the microcapsule technology in the application of dyeing and finishing processes [J]. Textile Dyeing and Finishing Journal, 2016, 38(6): 10-14. (in Chinese)
- [41] 孟春丽, 曹毅, 吕英智, 等. 分散染料微胶囊染色 [J]. 印染, 2009, 35(20): 5-8.
MENG Chunli, CAO Yi, LYU Yingzhi, et al. Polyester dyeing using microencapsulated disperse dyes [J]. Dyeing and Finishing, 2009, 35(20): 5-8. (in Chinese)
- [42] 纪俊玲, 汪信. 微胶囊化分散染料及其在纺织上的应

- 用[J]. 化工进展, 2006, 25(7):775-779.
- JI Junling, WANG Xin. Microencapsulated disperse dye and its application to textiles[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2006, 25(7): 775-779. (in Chinese)
- [43] 汪媛, 彭勇刚, 纪俊玲. 微胶囊化分散染料在涤纶上染色扩散系数研究[J]. 针织工业, 2021, (2): 52-55.
- WANG Yuan, PENG Yonggang, JI Junling. Study on the dyeing diffusion coefficient of microencapsulated disperse dyes on polyester[J]. Knitting Industries, 2021, (2): 52-55. (in Chinese)
- [44] 罗维新, 王绪山, 刘宝图, 等. 涤棉织物微胶囊分散染料/活性染料一浴染色[J]. 染整技术, 2012, 34(3): 33-35.
- LUO Weixin, WANG Xushan, LIU Baotu, et al. One-bath dyeing of T/C fabric with microencapsulated disperse dyes/reactive dyes [J]. Textile Dyeing and Finishing Journal, 2012, 34(3): 33-35. (in Chinese)
- [45] 李立, 薛敏钊, 王伟, 等. 原位聚合法制备分散染料微胶囊[J]. 精细化工, 2004, 21(1): 76-80.
- LI Li, XUE Minzhao, WANG Wei, et al. Preparation of disperse dye microcapsules by in situ polymerization[J]. Fine Chemicals, 2004, 21(1): 76-80. (in Chinese)
- [46] 丁冉, 姜时锋, 田振, 等. 分散染料微胶囊的制备及性能[J]. 塑料工业, 2020, 48(4): 28-32, 102.
- DING Ran, JIANG Shifeng, TIAN Zhen, et al. Preparation and properties of disperse dye microcapsules [J]. China Plastics Industry, 2020, 48(4): 28-32, 102. (in Chinese)
- [47] 杜晓文, 姜丽萍, 李学敏, 等. 三聚氰胺-甲醛微胶囊改性与应用进展[J]. 染料与染色, 2019, 56(6): 39-45, 60.
- DU Xiaowen, JIANG Liping, LI Xuemin, et al. Progress in the modification and application of melamine-formaldehyde microcapsules[J]. Dyestuffs and Coloration, 2019, 56(6): 39-45, 60. (in Chinese)
- [48] 冯继红, 钟毅, 罗艳, 等. 分散染料微胶囊高温高压无助剂染色[J]. 印染, 2004, 30(21): 9-11.
- FENG Jihong, ZHONG Yi, LUO Yan, et al. High temperature pressure dyeing process using microencapsulated disperse dyes without auxiliaries [J]. Dyeing and Finishing, 2004, 30(21): 9-11. (in Chinese)
- [49] 冯继红, 钟毅, 罗艳, 等. 不同分散染料微胶囊的制备及应用[J]. 染料与染色, 2004, 41(5): 264-266.
- FENG Jihong, ZHONG Yi, LUO Yan, et al. Preparation and application of different microencapsulated disperse dyes [J]. Dyestuffs and Coloration, 2004, 41(5): 264-266. (in Chinese)
- [50] 李娟. 不同结构分散染料微胶囊染色性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2008: 62-63.
- [51] 黄利利, 徐小茗, 钟毅, 等. 微胶囊化分散染料的拼染[J]. 纺织学报, 2008, 29(1): 73-77.
- HUANG Lili, XU Xiaoming, ZHONG Yi, et al. Microencapsulated disperse dyes for combination dyeing [J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(1): 73-77. (in Chinese)
- [52] 张奔, 白聪丽, 戚益, 等. 基于非助剂增溶的分散染料微胶囊非条件配色[J]. 纺织学报, 2010, 31(7): 55-59.
- ZHANG Ben, BAI Congli, QI Yi, et al. Unconditioned color combination with microencapsulated disperse dyes based on auxiliary-free solubilization [J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(7): 55-59. (in Chinese)
- [53] 纪俊玲. 分散染料微胶囊制备及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 104-107.
- [54] 王晓文, 郑昊, 罗艳, 等. 分散染料微胶囊/活性染料涤棉一浴法染色工艺初探[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2007, 33(4): 468-471.
- WANG Xiaowen, ZHENG Hao, LUO Yan, et al. Improving the dyeing process of polyester/cotton blends by disperse dyes microcapsules/reactive dyes in one bath [J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2007, 33(4): 468-471. (in Chinese)
- [55] 王晓文, 罗艳, 杜鹃, 等. 涤棉分散染料微胶囊/活性染料一浴法染色[J]. 印染, 2006, 32(18): 17-19.
- WANG Xiaowen, LUO Yan, DU Juan, et al. One bath dyeing of polyester-cotton blends with reactive and microencapsulated disperse dyes [J]. Dyeing and Finishing, 2006, 32(18): 17-19. (in Chinese)
- [56] ZHONG Y, FENG J H, CHEN S L. Dyeing of polyester using micro-encapsulated disperse dyes in the absence of auxiliaries[J]. Coloration Technology, 2005, 121(2): 76-80.
- [57] 钟毅, 王晓文, 罗艳, 等. 分散染料微胶囊的无助剂清洁染色技术[J]. 纺织导报, 2007(1): 87-89.
- ZHONG Yi, WANG Xiaowen, LUO Yan, et al. Clean dyeing using microencapsulated disperse dyes in the absence of auxiliaries [J]. China Textile Leader, 2007(1): 87-89. (in Chinese)
- [58] 刘永政, 隋晓峰, 毛志平, 等. 纤维素纳米晶稳定的Pickering乳液制备分散染料微胶囊[J]. 印染, 2017, 43(3): 1-5.
- LIU Yongzheng, SUI Xiaofeng, MAO Zhiping, et al.

- Preparation of disperse dye microcapsules based on Pickering emulsion stabilized by cellulose nanocrystals [J]. *Dyeing and Finishing*, 2017, 43(3): 1-5. (in Chinese)
- [59] 荆茵苒. 微囊染料及其应用[J]. *染料工业*, 1976(4): 44.
JING Yinran. Microcapsule dyes and applications [J]. *Dyes Industries*, 1976(4): 44. (in Chinese)
- [60] 杜鹃. 分散染料微胶囊清洁染色项目进展[C]//2008 诺维信全国印染行业节能环保年会论文集. 苏州: 中国印染行业协会, 2008: 154-156.
- [61] 郭春花. 鹰游新立成在无水印染上玩出了新花样! [J]. *纺织服装周刊*, 2021(14): 23.
GUO Chunhua. ZGL Xinlicheng has played a new trick in waterless dyeing! [J]. *Textile Apparel Weekly*, 2021(14): 23. (in Chinese)
- [62] 同晓妮, 徐成书, 苏广召, 等. 原位矿化染色技术研究进展[J]. *印染*, 2018, 44(18): 54-57.
TONG Xiaoni, XU Chengshu, SU Guangzhao, et al. Research progress on in-situ mineralization dyeing technology [J]. *Dyeing and Finishing*, 2018, 44(18): 54-57. (in Chinese)
- [63] 邢建伟, 徐成书, 沈兰萍, 等. 涤纶毛条分散染料原位矿化染色新技术[J]. *毛纺科技*, 2016, 44(5): 37-40.
XING Jianwei, XU Chengshu, SHEN Lanping, et al. Dyeing of polyester top in the in situ mineralization processes [J]. *Wool Textile Journal*, 2016, 44(5): 37-40. (in Chinese)
- [64] 赵航. 聚酯纤维深度节水减排染色新技术的研发及应用[D]. 西安: 西安工程大学, 2016: 53.
- [65] 丁会会, 邢建伟, 徐成书, 等. 涤/氨混纺织物的原位矿化染色[J]. *印染*, 2019, 45(3): 24-26, 58.
DING Huihui, XING Jianwei, XU Chengshu, et al. In-situ mineralization dyeing process of polyester/spandex blended fabric [J]. *Dyeing and Finishing*, 2019, 45(3): 24-26, 58. (in Chinese)
- [66] 周梦宇. 涤纶分散染料深度节水减排染色新技术的研发及应用[D]. 西安: 西安工程大学, 2018: 57.
- [67] 曾笑笑, 邢建伟, 徐成书, 等. 原位矿化技术对涤纶染色过程低聚物的影响[J]. *印染*, 2019, 45(4): 32-35.
ZENG Xiaoxiao, XING Jianwei, XU Chengshu, et al. Effect of in situ mineralization technology on oligomers in polyester dyeing process [J]. *Dyeing and Finishing*, 2019, 45(4): 32-35. (in Chinese)
- [68] 郑环达, 胥维昌, 赵强, 等. 涤纶筒纱超临界二氧化碳流体染色工程化装备与工艺[J]. *纺织学报*, 2017, 38(8): 86-90, 101.
ZHENG Huanda, XU Weichang, ZHAO Qiang, et al. Engineering plant and process for dyeing of polyester bobbins in supercritical CO₂ fluid [J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(8): 86-90, 101. (in Chinese)
- [69] BANCHERO M. Recent advances in supercritical fluid dyeing [J]. *Coloration Technology*, 2020, 136(4): 317-335.
- [70] ZHENG H D, XU Y Y, ZHANG J, et al. An ecofriendly dyeing of wool with supercritical carbon dioxide fluid [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 143: 269-277.
- [71] GONG D X, JING X D, ZHAO Y P, et al. One-step supercritical CO₂ color matching of polyester with dye mixtures [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, 44: 101396.
- [72] ABATE M T, FERRI A, GUAN J P, et al. Colouration and bio-activation of polyester fabric with curcumin in supercritical CO₂: part I-investigating colouration properties [J]. *The Journal of Sournal of Supercritical Fluids*, 2019, 152: 104548.
- [73] KABIR S M, HASAN M, UDDIN M. Novel approach to dye polyethylene terephthalate (PET) fabric in supercritical carbon dioxide with natural curcuminoid dyes [J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2019, 27(3): 65-70.
- [74] 景显东, 郑环达, 高世会, 等. 超细涤纶衬布的分散红 54 超临界 CO₂ 流体染色 [J]. *印染*, 2019, 45(19): 48-51.
JING Xiandong, ZHENG Huanda, GAO Shihui, et al. Dyeing of superfine polyester linings with disperse red 54 in supercritical CO₂ fluid [J]. *Dyeing and Finishing*, 2019, 45(19): 48-51. (in Chinese)
- [75] GOÑI M L, GAÑÁN N A, MARTINI R E. Supercritical CO₂-assisted dyeing and functionalization of polymeric materials: a review of recent advances (2015-2020) [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021(54): 101760.

(责任编辑:张雪)