

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021179

活性染料染色木质材料的研究进展

杨国超, 周振兴, 张求慧

(北京林业大学; 木质材料科学与应用教育部重点实验室, 北京 100083)



摘要: 染色处理能丰富木质材料的色彩, 提升其装饰效果和商品价值。活性染料通过共价键与木质纤维形成纤维-染料体系, 从而赋予木质材料丰富的色彩, 是一种高效的木材染色剂。本文从活性染料的分类、染色工艺、固色方法等方面对活性染料染色木质材料进行分析, 探讨了活性染料官能团差异性、染料染色影响因素、助剂作用方式等对染色效果的影响, 并从提高活性染料染色活性、提高染色后纤维色牢度、降低染色过程中污染物排放等方面提出了建议。

关键词: 木质材料; 活性染料; 反应活性; 色牢度

中图分类号: S781; TQ615.5

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2022) 04-0013-06

Research Status of Dyeing Wood Materials with Reactive Dyes

YANG Guo-chao, ZHOU Zhen-xing, ZHANG Qiu-hui

(Ministry of Education Key Laboratory of Wood Materials Science and Application; Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Dyeing treatment can enrich the color of wood products, enhance the decorative effect, and add commodity values. Wood dyeing with reactive dyes is an efficient method, which forms a fiber-dye system with wood fibers through covalent bonds and endows wood materials with rich colors. In this paper, the classification, dyeing process, and fixation methods of reactive dyes were analyzed. The effects of functional group differences of reactive dyes, factors affecting dyeing, and the action mode of auxiliaries on the dyeing results were discussed. In addition, the development ideas and suggestions for wood material dyeing were proposed from the aspects of improving the dyeing activity of reactive dyes, enlightening the color fastness of dyed fibers, and reducing the emission of pollution waste in the dyeing process.

Key words: wood materials; reactive dyes; reactive activity; color fastness

能够提供木质部成分或植物纤维以供利用的天然物质统称为木质资源材料(简称为木质材料), 如木材、竹材、藤材、灌木根茎、果实及各种作物秸秆等。木质材料染色技术, 是通过常温、高温、加压蒸煮和浸渍等手段, 将染料或者改性

剂附着或接枝到木质材料纤维表面, 从而改变木质材料的颜色、光泽等^[1-2]。染色后的木材颜色既可以模仿珍贵木材的材色, 也可以满足现代色彩设计需求, 从而提高木质材料的附加值^[3]。木质材料的染色效果主要与染料种类、染色液的浓度与配比、染色温度与时间等因素有关。开发高色牢度、高耐候的产品, 是目前木材染色行业亟需解决的关键技术。

活性染料是一种反应型水溶性的人工合成染

收稿日期: 2021-12-22; 修改日期: 2022-03-22

基金项目: 中国博士后科学基金“ZSM-5分子筛负载双过渡金属对阻燃气体的抑制与转化机制”(2022M710409)。

作者简介: 杨国超(1992—), 男, 讲师。Email: yangguochao@bjfu.edu.cn

通讯作者: 张求慧, 女, 教授。Email: qhzh66@163.com

料,其分子内含有能够与木质材料纤维上的羟基发生反应的活性基团,能与纤维生成共价键。活性染料具有色泽鲜艳、染色均匀性好、色彩体系健全等特点,利用其染色处理木质材料具有成本低、方法简便、色牢度高等特点^[4]。

本文阐述活性染料特性及木质材料染色工艺等对其上染效果、抗变褪色等的影响,总结了目前染色过程中存在的不足,为有效提高木质材料的染色效率并降低染色处理对木质材料性能的影响、提高染色材料的抗变褪色性能提供方法参考。

1 活性染料的化学构成与分类特点

活性染料呈现多种颜色是由发色基团和助色基团引发的。发色基团含不饱和基团,为有机化

合物提供颜色,如乙烯($-C=C-$)、乙炔($-C\equiv C-$)、羰基($-C=O$)、亚硝基($-N=O$)、偶氮($-N=N-$)等;而助色基团为含氨基、羟基或其衍生物的有机化合物,起着加深颜色的作用。由于发色基团选择性地吸收可见光,染料分子表现出不同的颜色。活性染料中活性基团通常与木质纤维活性基团发生交联反应,按活性基团的不同,活性染料主要分为三嗪型、乙烯砒型、其他型。

1.1 三嗪型活性染料

三嗪型活性染料是使用最广泛的活性染料之一,其与植物纤维通过亲核取代反应成为植物纤维的侧链^[5],如图1所示。三嗪型活性染料的永久性活性基团来源于染料分子中含氮杂环—均三嗪环,其具有较低电子云密度,反应活性较佳,固色反应所需活化能较低。

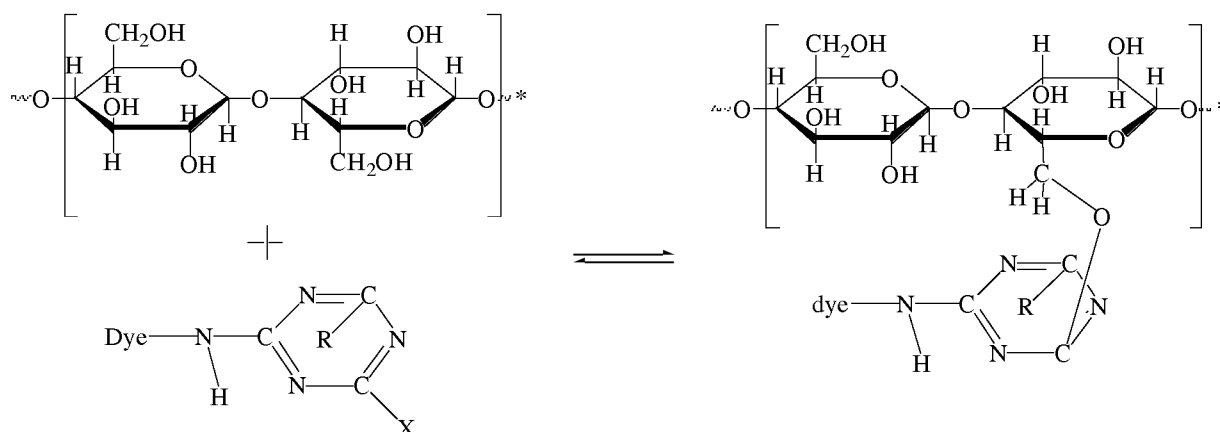


图1 三嗪型活性染料在纤维素纤维上的结合过程

Fig.1 Binding process of triazine reactive dyes on cellulose fibers

三嗪型活性染料多用于渗透性较差的实木板材、薄单板等木质材料的染色,其高反应活性促进了染料在木质纤维表面及浅层的附着,具有染色工艺简单、色泽鲜艳、适应性强的特点。根据活性染料含有卤族元素官能团的差异,三嗪型活性染料又可细分为一氯均三嗪型^[6]、双一氯均三嗪型^[7]、二氯三嗪型^[8]、氟三嗪型活性染料^[9],其中卤系官能团的差异带来活性染料固色率、反应率、竭染率等指标的变化。三嗪型活性染料中氟元素比氯元素具有更高的电负性从而增加染料的活性,而卤族元素数量的增加也会提高染料的活性,在染色过程中,二氯三嗪型、氟三嗪型活性染料、一氯均三嗪型的染料活性呈现出依次下降的趋势。

1.2 乙烯砒型活性染料

乙烯砒型活性染料是一类含有乙烯砒基或 β -羟乙砒基硫酸酯的活性染料,与三嗪型活性染料相比,为中等反应活性,其通过亲核加成反应与木质材料纤维上的羟基形成醚键基团。在染色过程中, β -羟乙砒基硫酸酯基团在碱性条件下形成乙烯砒基,与植物纤维中纤维素形成共价键(图2)。采用乙烯砒型活性染料对木质材料进行染色,通常需要对木质材料进行碱处理、漂白等预处理,去除柳条、荆条等材料表面硅质与杂色以达到更佳染色效果;染色木质材料色泽均匀,具有较高的上染率($>89.0\%$)和固色率($>65.1\%$),但在染色过程中存在工艺复杂、废液难处理等弊端以及

染色木质材料耐日晒牢度差等问题。

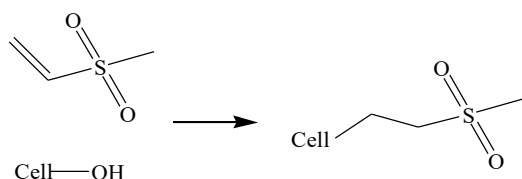


图2 乙烯砜型活性染料与植物纤维反应示意图

Fig.2 Reaction diagram of vinyl sulfone reactive dye and plant fiber

Kan等^[10]利用乙烯砜型活性染料对棉纤维进行染色处理,结果显示其耐洗色牢度,干、湿耐蚀性好,样品评级为5级色牢度。乙烯砜型活性染料与木质纤维之间形成的醚键基团,其相对于酯基基团具有更好的耐酸洗性能。乙烯砜型活性染料对颗粒小、表面积大的木纤维、棉纤维等材料具有更好的染色效果,如耐水解、耐酸性等。

1.3 其他类型活性染料

应用较多的还有磷酸基型、嘧啶型等活性染料^[11]。磷酸基型活性染料在氰胺或碳二亚胺存在的条件下,磷酸基团与纤维素表面羟基发生磷酸酯化反应,形成具有耐洗色牢度高的磷酸纤维酯^[12-13]。磷酸基型活性染料具有丰富的中、深色系,耐刷洗效果良好,但此类染料存在酸性高、后期脱浮色久的弊端,适用于纤维强度高的木质材料染色,避免了磷酸基型活性染料染色处理对材性的负面影响。

嘧啶型活性染料含有嘧啶活性基团,与三嗪官能团相比其活性中等,其具有更好的水解稳定性与湿处理效果^[14]。嘧啶型活性染料耐碱性较差,在进行染色处理前后需要对木质材料进行水洗。

2 活性染料染色木质材料技术

浸渍处理是活性染料染色木质材料经常采用的方法,可分为活性染料受控染色技术、活性染料催化染色技术、活性染料中性或低碱性染色技术、活性染料低盐或无盐染色技术、活性染料小浴比染色技术等^[15-16]。通过染色工艺方法的设计与改善,可有效提高木质材料染色效率与质量,减少污水的产生与排放,同时减少能源消耗,节约成本。

2.1 活性染料受控染色技术

活性染料受控染色技术是一种对活性染料染

色过程中各个变量进行严格控制的自动化、智能化的精确染色工艺,具有高效、准确、经济、环保等特点,是染料、染色技术与管理控制的有机结合^[17]。活性染料受控染色技术主要对染色工艺参数,如温度、染料pH值和浓度、中性电解质浓度等变量进行精确控制^[18]。整个染色工艺包含:①活性染料的选择与搭配^[19];②电解质的添加(确定量与添加方式)^[19];③染液pH值的调控与碱剂选择^[20];④染料添加;⑤染后水洗温度、水流、表面活性剂的控制等步骤与环节^[19]。活性染料受控染色技术适用于反应活性较低、易水解的活性染料和上色难度高的木质材料以及上色一致性要求高的产品。

2.2 活性染料催化染色技术

在活性染料的杂环上引入不饱和基团可以大幅提高染料反应活性。利用叔胺阳离子类强亲核物质(如三乙烯二胺、吡啶、醋酸等)作为染色过程中的催化剂,可有效提高活性染料的染色效率^[21]。染色反应过程中,叔胺阳离子类物质先与染料形成季铵化合物,促进染料与木质纤维素阴离子发生反应,生成染料-纤维染色结构后释放出叔胺阳离子类化合物。随着催化剂浓度的提高,活性染料的固色率与水解染料浓度均提高,未反应活性染料浓度降低,催化剂可以加速固色反应,但也会加速活性染料的水解反应。因此,在进行催化染色时,需控制催化剂的添加量,避免染料水解。活性染料催化染色技术可有效解决活性染料染深色时存在染料用量多、固色率低、不易染深、表面浮色及水洗色牢度差等问题。

2.3 活性染料中性或低碱性染色技术

在碱性条件下,活性染料在木质材料中固着的同时,也可大幅降低活性染料的水解。但大量碱剂应用会导致废液浓度提升,污水量增加^[22],同时使染色后的材料变色;另外,高碱性溶液环境也会降低材料的理化强度。为避免上述问题,可选用具有季胺活性基团的高反应活性染料、低碱性或中性活性染色剂进行染色。吕晓慧^[23]的研究发现,胺溶铜季铵盐添加量为0.5%时对染料的促进作用最明显;季铵盐含有的阳离子,改善了染料的润湿及溶解性,提高了染料与木材表面羟基的

反应。活性染料中性或低碱性染色技术的应用,可以有效地拓宽具有酸性的磷酸基型活性染料和耐碱性差的嘧啶型活性染料的应用范围。

2.4 活性染料低盐或无盐染色技术

在活性染料染液中加入有机或无机盐作为中性电解质可提升染料上染率,尤其是大浴比(被染物和染液质量比 $\geq 1:20$)染色的情况下。但加入中性电解质会导致淡水盐化,排出后破坏生态环境。通过开发选用直接上染型染料可有效降低活性染料对电解质的依赖,达到低盐或无盐上染^[24]。以活性红染料SNE作为低盐染料,通过常压加热浸渍的方法对渗透性较差的蒙古栎(*Quercus mongolica*)进行染色处理,结果显示低盐活性染料在 Na_2CO_3 添加量为20 g/L、元明粉添加量为12 g/L的条件下具有更好的上染效果,可以节约70.0%的电解质,同时提高了16.04%的上染率,为后期建立木材低盐活性染料染色工艺奠定了基础^[25]。对于需要进行二次加工的木质材料,活性染料低盐或无盐染色技术可以减少有机或无机盐对木质材料强度的负面影响、降低废弃染液盐浓度,具有降低成本、节约能耗的优势。

2.5 活性染料小浴比染色

浴比是重要的染色工艺参数,关系到染料、中性电解质、碱剂等多种试剂的浓度与用量,同时也与用水量、耗能、排污量等密切相关^[26]。在活性染料小浴比($\leq 1:10$)的染色工艺中,需选用溶解度高的活性染料(溶解度低,会造成染料沉淀,同时低溶解度染料也会造成上染效果差),调整适应低溶液含量的染色设备,选用高效代用盐和代用碱等方式方法(降低废液中溶质的浓度与种类);上述工艺可以降低染色过程中的能源、水和染料(包括盐和碱剂)的消耗,同时提高染色后材料的色彩重现性。于娟^[27]用活性艳红X-3B对桦木(*Betula* spp.)单板进行染色,以色差及上染率为指标,通过单因素与正交试验确定了较佳的上染温度、染料浓度、浴比和染色时间分别为75℃、1%、1:10、60 min。上述结果显示小浴比条件下所需的中性电解质、碱剂(如纯碱、NaCl)、渗透剂等,低于常规染色工艺所用试剂量,同时减少了染料的水解。活性染料小浴比染

色对易水解型活性染料的高效利用具有显著优势,同时也可以减少木质材料染后干燥及废液处理能耗与成本。

3 活性染料染色木质纤维抗变褪色改性研究

活性染料通过与木质纤维官能团发生亲核加成-消除取代反应、亲核加成反应、亲核取代反应,形成丰富色彩。但在潮湿、氧化、辐射等环境下,木纤维与染料间形成的共价键及染料内部的发色基团易被破坏,从而导致变褪色^[28]。因此对染色材料的色牢度,包括氧化色牢度、耐水解色牢度、耐摩擦色牢度与皂洗色牢度等有更高的要求。为提高活性染料处理木质材料的色牢度,可采用木质纤维化学改性处理、改性活性染料染色性能、助剂开发、染色后固化处理等处理方法。

3.1 木质纤维化学改性处理

通过物理、化学或两者结合的方式对木质纤维进行改性处理,以改变染料与纤维之间的接触界面,从微观结构溶胀到晶体结构转换以及官能团的变化,来改善木质材料纤维与活性染料之间的接触形式,从而达到固色的目的。利用强碱或表面活性剂对木质材料(如玉米秸秆和小麦秸秆)进行预处理脱除木质材料表面的硅质,使木质纤维与活性染料接触更加充分,从而提升上染率和色牢度^[29]。利用液氮^[30]、甘油^[31]以及磷酸^[32]对木质材料进行预处理,也可使木质纤维的微观结构发生变化,改变纤维晶型,进而暴露出更多可以参与化学反应的化学基团。利用纤维素表面的大量羟基,通过接枝反应,以氨烷基化合物和亚胺化合物作为改性剂对其进行胺化或季铵化,也可以提高结合染料的能力。利用乙酰化、壳聚糖等对木材进行改性预处理有助于降低染色色差,同时提高染色木材的耐光性能。

3.2 改进活性染料染色性能的助剂

利用 $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{CO}_3$ 作为碱剂调控染液pH值,通过添加 $\text{NaCl}/\text{Na}_2\text{SO}_4$ 等作为中性电解质,尿素作为助溶剂,均能提高活性染料的上染速率与上染率^[33]。中性电解质可以减弱纤维表面与溶液中阴离子间的排斥力,添加 Na^+ 离子还会提高活性染料的反应活性。但随着染液pH值升高,上述助剂的添

加会造成活性染料快速水解, 尤其是当pH值>11后, 水解速率明显加快, 添加过量的电解质会造成染液内水溶性盐的排出与释放, 造成水体污染^[34]。在染料染液中添加尿素时, 随着上染温度的升高, 尿素发生分解形成氨气; 另外, 在反应过程中, 尿素与乙烯砷基染料及染料中碳酸氢钠发生反应生成氨解产物、氰酸及异氰酸盐, 对人员及设备均会造成危害。以 n -乙烯基吡咯烷酮(NVP)和对苯乙烯磺酸钠(SSS)为原料合成了一系列低分子量的水溶性共聚物(NS), 可以有效替代尿素对木质材料进行染色, 此类助剂可降低废液中的含氮量, 进一步降低污染物的释放。

3.3 染色固色处理

由于染色后木质纤维表面附着大量未固着的染料或水解染料, 在水洗过程中易脱落流失, 此外在水洗过程中固着在纤维表面的染料也会发生水解^[35], 上述现象显示活性染料的水解以及共价键的断裂造成了褪色现象。在染色过程中, 通过添加固色剂对染色后木质材料进行处理, 可以提高活性染料的湿处理色牢度, 同时改善木质材料的耐晒、耐氯、耐过氧化物的性能。固色剂按作用方式主要分为中和反应型、交联聚合型和成膜覆盖型。

利用阳离子固色剂^[36], 如胺类聚合物、季铵盐聚合物等与水解染料发生静电吸引, 使纤维的范德华力增加, 减少纤维与活性染料间共价键的断裂。利用含有丙烯酰基的交联固色剂与染料中胺基、磺酰胺基和羟基等发生反应, 形成染料与纤维的交联。利用聚乙烯^[37]、聚氨酯^[38]、聚丙烯酸酯等材料的衍生物作为成膜型固色剂, 在染色后进行后处理, 其在木质材料表面形成一层保护层, 提高材料的湿磨擦色牢度与抗水洗性能。

4 建议

通过对活性染料种类的差异比较和不同染色技术及固色方法的总结, 以及目前利用的不同染色技术的发展与活性染料的变褪色原因的梳理, 对目前活性染料利用中存在的问题提出以下几点建议。

1) 针对目前活性染料存在的上染率低、助剂

添加量多、反应温度高的现象, 通过开发双活性官能团或多活性官能团的染料增加活性染料的反应活性, 如含有一氯均三嗪/硫酸酯乙基砷双反应基团活性染料。

2) 通过开发高活性的“代盐”“代碱”, 如甜菜碱、磷酸三钾等, 来减少多种中性电解质和强碱性物质在染液中的添加。

3) 通过结合助染催化剂、小浴比、高效中性电解质等技术, 从多角度促进活性染料的上染率与色牢度。

4) 在染色前进行除硅与漂白、染色过程中进行工艺精准受控、染色后施加高效固色剂等多个环节进行固色处理, 达到预期固色、染色效果。

参考文献:

- [1] Benkhaya S, M'rabet S, El Harfi A. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes[J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2020, 115: 107891.
- [2] Tang A Y L, Kan C W. Non-aqueous dyeing of cotton fibre with reactive dyes: a review[J]. *Coloration Technology*, 2020, 136(3): 214-223.
- [3] LIU Y S, YU Z M, ZHANG Y, et al. Microbial dyeing for inoculation and pigment used in wood processing: opportunities and challenges[J]. *Dyes and Pigments*, 2021, 186: 109021.
- [4] FAN Z L, CAI X B, LI Q. A research on electrochemical salt-free dyeing with KN reactive dyes: process optimization studies[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2017, 108(4): 562-568.
- [5] Roy Choudhury A K. Coloration of cationized cellulosic fibers—A review[J]. *AATCC Journal of Research*, 2014, 1(3): 11-19.
- [6] Mikhailovskaya A P, Serova N E, Kalugina M S, et al. Evaluation of the intensifying effect of quaternary ammonium salts in the course of dyeing of cellulose materials with active dyes[J]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, 87(1): 108-113.
- [7] MU T, PAN N Y, WANG Y F, et al. Antibacterial coating of cellulose by *Iso*-bifunctional reactive N-halamine with the dyeing process of reactive dye[J]. *Fibers and Polymers*, 2018, 19(11): 2284-2289.
- [8] JIANG Z M, PENG W J, LI R, et al. Synthesis and application to cellulose of reactive dye precursor of anti-bacterial N-halamine[J]. *Coloration Technology*, 2017, 133(5): 376-381.
- [9] Zaghoul D N, Elmaaty T A, Nakamura K, et al. Influence of additive organic base on dyeing of cotton fabric under supercritical carbon dioxide using fluorotriazine reactive disperse dye and investigation of optimal dyeing conditions[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2021, 174: 105243.
- [10] Kan C W, Fong K W F. A study of reusing vinyl sulfone based reactive dye for dyeing cotton fiber[J]. *Fibers and Polymers*, 2017, 18(11): 2176-2186.
- [11] Larik S A, Khatri A, Ali S, et al. Batchwise dyeing of bamboo cellulose fabric with reactive dye using ultrasonic energy[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 24: 178-183.
- [12] Meade S J, Caldwell J P, Hancock A J, et al. Covalent modification of the wool fiber surface: the attachment and durability of model surface treatments[J]. *Textile Research Journal*, 2008, 78(12): 1087-1097.

- [13] Madison S A, Carnali J O. pH optimization of amidation via carbodiimides[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(38): 13547-13555.
- [14] Youssef Y A, Kamel M M, Taher M S, et al. Synthesis and application of disazo reactive dyes derived from sulfatoethylsulfone pyrazolo[1, 5-a]pyrimidine derivatives[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2014, 18(3): 220-226.
- [15] Burkinshaw S M. The role of inorganic electrolyte (salt) in cellulosic fibre dyeing: part 2 theories of how inorganic electrolyte promotes dye uptake[J]. *Coloration Technology*, 2021, 137(6): 547-586.
- [16] Roy Choudhury A K. Coloration of cationized cellulosic fibers—A review[J]. *AATCC Journal of Research*, 2014, 1(3): 11-19.
- [17] 李延卿. 智能化技术在染色生产中的应用[J]. *轻纺工业与技术*, 2021, 50(7): 76-77.
- [18] FU J W, XIN Q Q, WU X C, et al. Selective adsorption and separation of organic dyes from aqueous solution on polydopamine microspheres [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2016, 461: 292-304.
- [19] Chaouch S, Moussa A, Marzoug I B, et al. Study of C. I. Reactive Yellow 145, C. I. Reactive Red 238 and C. I. Reactive Blue 235 dyestuffs in order to use them in color formulation. Part 2: modeling and optimization of dyeing performances[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2020, 111(5): 682-693.
- [20] LI M R, HE Z L, XU J. A comparative study of ozonation on aqueous reactive dyes and reactive-dyed cotton[J]. *Coloration Technology*, 2021, 137(4): 376-388.
- [21] Aldalbahi A, Periyasami G, Alrehaili A. Synthesis of high molar extinction coefficient push - pull tricyanofuran-based disperse dyes: biological activity and dyeing performance[J]. *New Journal of Chemistry*, 2021, 45(4): 2208-2216.
- [22] Khatri A, Peerzada M H, Mohsin M, et al. A review on developments in dyeing cotton fabrics with reactive dyes for reducing effluent pollution[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 50-57.
- [23] 吕晓慧. 速生杨木材色改良及染色机理研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [24] MENG X, WANG X M, WANG P, et al. Enhanced dyeability and wash fastness through a salt-free plasma-induced grafting of cationic monomers on cotton fabrics[J]. *Fibers and Polymers*, 2021, 22(12): 3378-3384.
- [25] 王敬贤, 赫亮, 王建军, 等. 低盐活性红染料染色柞木单板的工艺与性能[J]. *森林工程*, 2020, 36(6): 51-57.
WANG J X, HE L, WANG J J, et al. Processes and performances of Chinese oak veneers modified with low-salt reactive red dyes[J]. *Forest Engineering*, 2020, 36(6): 51-57.
- [26] Islam S, Shaikh I A, Firdous N, et al. A new approach for the removal of unfixed dyes from reactive dyed cotton by Fenton oxidation[J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2019, 9(2): 133-141.
- [27] 于娟. 柞木单板活性染料染色工艺初探[J]. *辽宁林业科技*, 2014(3): 28-31, 56.
- [28] ZHANG J F, ZHANG X Q, FANG K J, et al. Effect of the water content of padded cotton fabrics on reactive dye fixation in the pad-steam process[J]. *Coloration Technology*, 2017, 133(1): 57-64.
- [29] LI Y C, WANG B B, YANG Y N, et al. Preparation and characterization of dyed corn straw by acid red GR and active brilliant X-3B dyes[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2019, 12(21): 3483.
- [30] CAI Y J, LIANG Y H, Navik R, et al. Improved reactive dye fixation on ramie fiber in liquid ammonia and optimization of fixation parameters using the Taguchi approach[J]. *Dyes and Pigments*, 2020, 183: 108734.
- [31] XIAN Y F, WANG H M, WU M H, et al. Urea-free reactive printing of viscose fabric with high color performance for cleaner production [J]. *Cellulose*, 2021, 28(4): 2567-2579.
- [32] Bhate P M, Devi R V, Dugane R, et al. A novel reactive dye system based on diazonium salts[J]. *Dyes and Pigments*, 2017, 145: 208-215.
- [33] Ju S G, Roh J. The dyeing properties of woody fiber regenerated from waste MDF by reactive dyes[J]. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 2019, 47(2): 163-177.
- [34] Dordević D, Cerkovnik J, Gorenšek M. The comparison of the kinetics of hydrolysis of some reactive dyes before and after purification[J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2006, 14(2): 85-88.
- [35] SHI S, FENG X W, GAO L X, et al. Hydrolysis and carbonization of reactive dyes/cotton fiber in hydrothermal environment[J]. *Waste Management*, 2020, 103: 370-377.
- [36] LIU Y J, ZHAO X M. Preparation of a cationic environment-friendly fixing agent[J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2017, 25: 96-102.
- [37] SUN L, LI Z, FU Z, et al. Coloration of calcium alginate fiber with dyes and auxiliary derived from polyvinylamine. part ii. application of pvam in salt-free dyeing with reactive dyes[J]. *Fibers and Polymers*, 2021.
- [38] Shang S, Chiu K, Jiang S. Development of water-based polymeric dye and its application as a colorant for waterborne polyurethane[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, doi.org/10.1002/app.44710.
(本文编校 孟凡丹)