

超声波辅助竹片染色工艺优化的研究

孙德彬, 刘文金, 郝景新, 孙德林

(中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要: 探讨了超声波辅助竹片染色在染液质量分数、pH 值和染色温度一定的情况下, 超声波功率、频率和超声波辅助染色时间等因素对竹片上染率的影响。在单因素实验的基础上, 采用响应面法建立了二次回归模型, 并对染色工艺进行了优化。研究结果表明: 使用超声波辅助竹片染色能够提高上染率, 当超声波功率为 525 W、频率为 30 kHz、染色温度为 70.0 °C、染料质量分数为 1.0%、染色时间为 52 min 时, 竹片的上染率可达到 34.16%, 比在相同工艺条件下未使用超声波辅助的提高了 8.43%。

关键词: 竹片染色; 超声波辅助; 工艺优化

中图分类号: TB484.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)17-0074-05

Optimization of Bamboo Chip Dyeing Process Assisted by Ultrasonic

SUN De-bin, LIU Wen-jin, HAO Jing-xin, SUN De-lin

(Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Bamboo chips were dyed with ultrasonic assisted process. The effects of ultrasonic power, frequency and ultrasonic assisted dyeing time on the dye uptake were discussed under condition of constant mass fraction of dye solution, pH value, and dyeing temperature. A quadratic regression model was established with response surface methodology based on single factor experiment, and the process was optimized. The result showed that the dye uptake increases when using ultrasound; the optimized parameters are ultrasonic power 525 W, ultrasonic frequency 30 kHz, dyeing temperature 70 °C, dye mass fraction of solution 1.0%, and dyeing time 52 min; the dye uptake reaches to 34.17%, which increases 8.43% compared with the process without ultrasonic assistance.

Key words: bamboo chip dye; ultrasonic assisted; process optimization

随着天然珍贵阔叶材的减少, 竹子的综合利用已经成为研究的热点。竹子具有生长速度快、韧性好、强度高、纹理别致、成材周期短等特点, 是一般木材难以相比的。竹子除了用于建筑模板外, 在家具制造、包装、室内装饰等方面也受到消费者的青睐, 具有巨大的市场潜力。

竹子用于家具与室内装饰用品时常常需要染色。目前, 有关木材染色先进技术的报道较多^[1], 在竹子染色方面也开始探索新的方法^[2]。近年来, 超声波染色在纺织品染色方面已有应用^[3-4], 由于超声波产生的机械效应、热效应和空化效应^[5]能有效地将染料分

子分散, 并能增加染料分子的运动速度, 因此能够提高上染率, 但超声波在竹子染色方面的应用报道还并不多见。本研究以竹片为原料, 以上染率为考察指标, 就超声波的功率、频率和辅助染色时间等因素对竹片上染率的影响进行探讨, 并采用响应面法(RSM)建立回归方程, 对染色工艺进行分析与优化。

1 实验

1.1 材料与设备

慈竹, 采自湖南益阳, 3 年生, 除出竹青和竹黄,

收稿日期: 2012-06-12

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201004005)

作者简介: 孙德彬(1969—), 女, 湖南常德人, 硕士, 中南林业科技大学副教授, 主要研究方向为木制品染色与涂饰技术。

通讯作者: 孙德林(1966—), 男, 湖南常德人, 博士, 中南林业科技大学教授, 主要研究木制品设计、加工及木质复合材料。

制成 3 mm 的竹片,干燥至含水率为 9%。染料:酸性橙 II、酸性蓝 59、酸性黑 AT 和渗透剂。用金属盐 $KAl(SO_4)_2$ 作为固色剂。

紫外-可见光谱仪 UV2501-PC (日本, Shimadzu);多频超声波发生器(定制,深圳,功率可调);恒温水浴锅(CS502,上海)。

1.2 染色效果评定

上染率是评判染色性能的重要指标,是上染到竹材的染料量占染色前染液中染料总量的百分比。上染率越大,染料的利用率越高。在本实验中用分光光度法(残液法)测定^[6],并根据式(1)计算上染率。

$$C_t = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \quad (1)$$

式中: A_0 为染色前染液的吸光度值; A_t 为残液的吸光度值; C_t 为上染率。

1.3 探索性实验

为了使实验更加科学,在染液质量分数一定的情况下,采用常规的加热染色方法,以染液 pH 值(A)、染色时间(B)和染色温度(C)为影响因素,设计三因素三水平的正交实验进行探索性实验,见表 1。

表 1 $L_9(3^4)$ 正交实验设计

Tab.1 $L_9(3^4)$ Orthogonal table head design

水平	染液 pH 值 A	染色时间 B/min	染色温度 C/℃
1	5.5	80	65
2	5.7	90	70
3	5.9	100	75

正交实验的极差分析结果见表 2, B1C2A2 为比

表 2 因素和水平的极差分析结果

Tab.2 Analysis of range between factors and levels

极差分析	A	B	C	空白
K_{1j}	59.9	64.5	57.6	56.7
K_{2j}	62.1	58.7	63.3	69.0
K_{3j}	61.8	60.2	62.9	58.1
$\bar{K}_{1j}$	20.0	21.5	19.2	18.9
$\bar{K}_{2j}$	20.7	19.6	21.1	23.0
$\bar{K}_{3j}$	20.6	20.1	20.8	19.4
$\bar{R}_j$	2.2	5.8	5.7	12.3

较合适的染色条件,即:染色时间为 80 min、染液温度为 70 ℃、染液的 pH 值为 5.7。

1.4 单因素试验

在探索性实验的基础上,将染料、渗透剂等按照

一定的比例配制成质量分数为 0.8%, 1.0%, 1.2% 的染色液,调节 pH 值到 5.7,在染色温度为 70 ℃的条件下进行染色,并按照参考文献[7]中所采用的方法进行固色处理,考察不同的超声波功率、频率和不同辅助染色时间下竹片的上染率。

1.4.1 超声波功率的影响

当染色温度为 70 ℃,染液 pH 值为 5.7,超声波的频率为 30 kHz,超声波辅助染色时间为 50 min,不同超声波功率和染液质量分数对竹片上染率的影响见图 1。随着超声波功率的增加, C_t 值也随之增加,

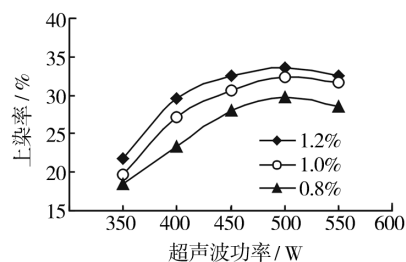


图 1 超声波功率对竹片上染率的影响

Fig.1 Effect of ultrasonic power on bamboo chip dye uptake

在功率为 500 W 附近达到峰值后呈现下降的趋势。

1.4.2 辅助染色时间的影响

当染色温度为 70 ℃,染液 pH 值为 5.7,超声波的频率为 30 kHz,超声波功率为 500 W,不同超声波辅助染色时间和染液质量分数对竹片上染率的影响见图 2。当辅助染色时间在 20~45 min 之间时, C_t

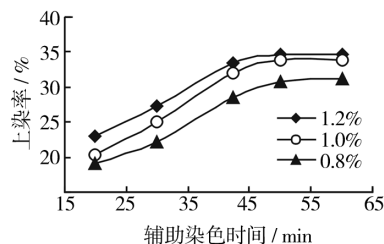


图 2 超声波辅助染色时间对竹片上染率的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic assisted dyeing time on bamboo chip dye uptake

值增加迅速,但随着时间的延长,上染率增幅减缓,甚至有下降的趋势。

1.4.3 超声波频率的影响

当染色温度为 70 ℃,染液 pH 值为 5.7,超声波功率为 500 W,辅助染色时间为 50 min,不同超声波频率和染液质量分数对竹片上染率的影响见图 3。

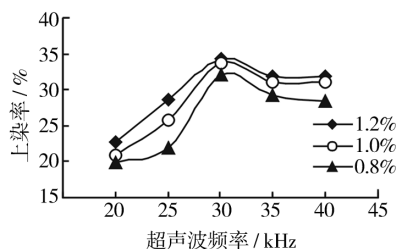


图3 超声波频率对竹片上染率的影响

Fig. 3 Effect of microwave frequency on bamboo chip dye uptake

随着超声波频率的增加,竹片的上染率迅速增加,在 30 kHz 附近到达最大值后开始下降。

1.5 响应面实验设计

由单因素实验可见,在染液质量分数、温度和 pH 一定的前提下,竹片的上染率与超声波的功率、频率和辅助染色时间相关。比较染液质量分数对上染率的影响发现,质量分数为 0.8% 时的上染率比 1.0% 和 1.2% 的低很多,而 1.0% 和 1.2% 的比较接近,考虑到成本问题,取染液质量分数为 1.0% 进行优化实验。

在单因素试验的基础上,采用 Box-Behnken 设计方法,进行响应面实验设计,见表 3。

表3 响应面试验设计中的水平和编码

Tab.3 Level and code of variables chosen for RSM design

变量	编码	编码水平		
		-1	0	1
超声波功率/W	A	450	500	550
超声波频率/kHz	B	22	28	34
超声染色时间/min	C	45	50	55

2 结果与讨论

2.1 多元回归分析

根据响应面试验结果,运用 Design-Expert 7.1.6 软件进行二次多元回归分析,得到二次多元回归方程:

$$C_i = 35.24 + 2.72A + 1.86B + 2.11C +$$

$$1.82AB + 2.7AC - 2.96A^2 - 2.02B^2 - 3.27C^2 \quad (2)$$

同时得到模型与方差,见表 4,其中模型的 P 值 < 0.001 ,表现为因变量与所有自变量之间的线性关系非常显著,且 $R^2 = 96.89\%$,接近 1,说明该模型能够很好地描述试验结果。同时,在方程(2)中,二次项的系数均为负值,表明该模型有最大值存在。

超声波频率和功率交互作用对 C_i 值的影响见图 4。

表4 模型与方差

Tab.4 Model and variance

来源	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
模型	275.74	30.64	24.22	0.0002	**
A	59.35	59.35	46.92	0.0002	**
B	27.68	27.68	21.88	0.0023	*
C	35.49	35.49	28.06	0.0011	*
AB	13.21	13.21	10.45	0.0144	*
AC	29.27	29.27	23.14	0.0019	*
BC	0.51	0.51	0.40	0.5452	
A ²	36.98	36.98	29.23	0.0010	**
B ²	17.2	17.20	13.59	0.0078	*
C ²	44.98	44.98	35.56	0.0006	**
残值	8.86	1.27			
失拟项	6.80	2.27	4.42	0.0926	
纯误差	2.05	0.51			

其中: $R^2 = 0.9689$; * 代表显著, ** 代表非常显著

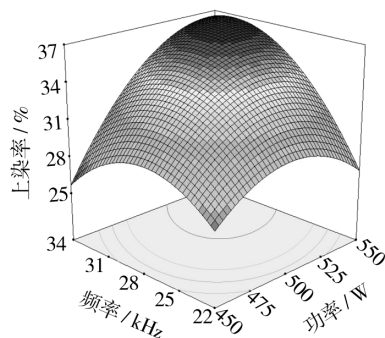


图4 超声波频率和功率对上染率影响的响应面图

Fig. 4 Response surface diagram of ultrasonic power and frequency on the effects of dye uptake

当超声波频率一定时,试样的 C_i 首先随着超声波功率的增加而快速增加,在 525 W 附近达到最大值,随后下降;当超声波功率一定时,超声波频率对 C_i 的影响表现为上染率随着频率的增加而增加,在 30 kHz 附近达到峰值后下降。

这可以解释为:染料分子或离子会形成聚集体存在于染液中,这在一定程度上阻碍了竹纤维对染料的吸附;而超声波能使染液分子产生与其振动频率相同的振动而使聚集体解聚^[7],并增加其分子动能,因此增加了染料向竹片内部的扩散速度。同时,超声波所产生的空化泡在导管和孔隙中崩溃时,对竹材纤维的爆破和机械作用,使纤维产生细微裂纹,形成新的流体通道,并在表面产生大量新的自由基,这些自由基能迅速与染料分子结合^[9]。但当超声波功率和频率更大时,染料分子所获得的动能也更大,这也意味着

吸附在木材纤维表面染料分子的逃逸动能也在增加,因此,较高的功率和频率可能会产生负面影响。

超声波辅助染色作用时间和功率与染色竹片 C_i 值的相互关系见图 5。当辅助染色时间一定时,超声

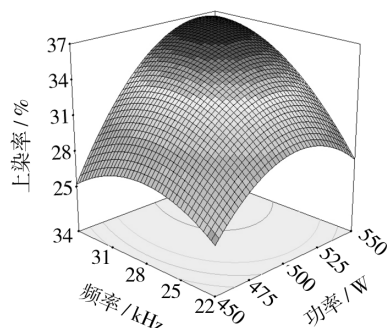


图 5 超声染色时间和功率对上染率影响的响应面图

Fig. 5 Response surface diagram of ultrasonic dyeing time and power on the effects of dye uptake

波功率对 C_i 值的影响显示出与图 4 相似的特征;而当超声波功率一定时, C_i 值随着超声染色时间的增加而增加,但达到峰值后有下降的趋势。这是因一方面,随着染色时间的增加,竹片对染料的吸附趋于饱和,因此延长染色时间, C_i 值增幅不大;另一方面,可能是染料分子长时间在超声波的作用下高速运动而增加了与空气中氧的接触,同时,染料粒子在超声波的作用下会产生较高的热效应,这些均会使染料的氧化速度加快而导致 C_i 值增幅减缓。

超声波辅助染色时间与超声波频率对 C_i 值影响的交互关系见图 6。超声染色时间的影响与图 5 类

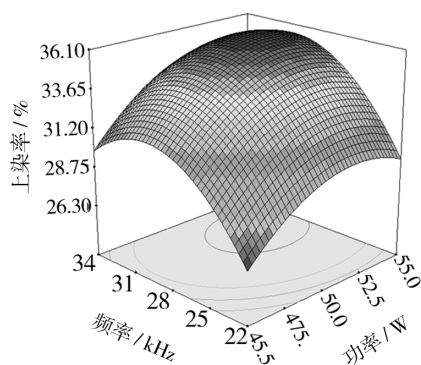


图 6 超声染色时间和频率对上染率影响的响应面图

Fig. 6 Response surface diagram of ultrasonic dyeing time and frequency on the effects of dye uptake

似;但当染色时间一定时,竹片的上染率随着频率的增加而迅速增加后下降。这是因为染液分子产生了与超声波振动频率相同的振动,当超声波强度一定且

频率较低时,所产生的振动和微射流等作用相对较小,染料分子的动能相对也小,加之染料的聚集体在竹材中流动性差,难以向细胞壁扩散;随着频率的增高,振动速度也随之增大^[10],超声波所具有的空化、机械振动、微射流及微声流等多级物理效应给染料分子提供了更多的动能,增加了染料的渗透率;但当频率进一步增加时,声波膨胀相时间相对短,空化核来不及增长至可以产生空化效应的空化泡^[11],这就导致了空化效应变弱、能量传递效率降低,因此上染率随之下降。

2.2 工艺优化与验证

对模型进行优化分析,得到超声波辅助染色时较优化的工艺条件:超声波功率 526.41 W,频率 30.35 kHz,超声染色时间为 52.31 min,竹片的上染率为 37.67%。以超声波功率 525 W、频率 30 kHz,辅助染色时间为 52 min 进行验证性实验,3 次实验结果的平均值为 34.16%。在相同工艺条件下无超声波辅助染色的上染率却只有 25.73%,显然较低。

3 结论

采用超声波辅助染色可以提高竹片的上染率。在温度和染液质量分数一定的情况下,竹片的上染率与超声波的功率、频率以及辅助染色时间等工艺因素有关。当染液质量分数为 1.0%、pH 值为 5.7、染色温度为 70℃,较为优化的染色工艺为:超声波功率为 525 W、频率为 30 kHz,染色时间 52 min,竹片的上染率可达 34.16%,比无超声辅助波染色有较大的提高。

参考文献:

- [1] 郭明辉,管雪梅. 桦木单板仿珍贵材三刺激值配色技术[J]. 林业科学,2010,46(9):130-135.
GUO Ming-hui, GUAN Xue-mei. Computer Color Matching of Birch Veneer for Artificial Dyeing[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(9): 130-135.
- [2] 孙德林,刘文金,姚文亮. 竹篾染色工艺的优化研究[J]. 包装工程,2012,33(5):9-12.
SUN De-lin, LIU Wen-jing, YAO Wen-liang. Optimization of Bamboo Split Dyeing Technology[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 9-12.
- [3] PARVINZADEH M, MEMARI N. Influence of Ultrasonic Waves on the Processing of Cotton with Cationic Softener[J]. Journal of Surfactants and Detergents,

2010,13(2):135-141.

- [4] AHMED N S E, EL-SHISHTAWY R M. The Use of New Technologies in Coloration of Textile Fibers[J]. Journal of Material Science, 2010, 45(5):1143-1153.
- [5] YUSUF G A, NORTH C A. Sonochemistry: Environmental Science and Engineering Applications[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2001, 40(22):4681-4715.
- [6] 李春生, 王金林, 王志同, 等. 杨木单板染色染料上染率研究[J]. 中国人造板, 2008(11):9-13.
LI Chun-sheng, WANG Jin-lin, WANG Zhi-tong, et al. Research on Dye up Take of Poplar Veneer Dyeing [J]. Chian Wood-Based Panels, 2008(11):9-13.
- [7] 顾继友, 韦双颖, 孟黎鹏, 等. 染色单板表层耐水颜色稳定性的研究[J]. 木材工业, 2007, 21(5):5-7.
GU Ji-you, WEI Shuang-ying, MENG Li-peng, et al. A Study on the Color Fastness of Dyed Veneer to Water [J]. China Wood Industry, 2007, 21(5):5-7.
- [8] TSOCHATZIDIS N A, GUIRAUD P. Determination of Velocity, Size and Concentration of Ultrasonic Cavitation Bubbles by the Phase-Doppler Techniqu[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(5):1831-1840.
- [9] AKALIN M, MERDAN N. Effects of Ultrasonic Energy on the Wash Fastness of Reactive Dyes[J]. Ultrasonics, 2004, 42(1-9):161-164.
- [10] 杨英贤, 陈言芳, 姜宜宽. 不同频率的超声波对织物染色性能的影响[J]. 山东纺织科技, 2005(3):8-9.
YANG Ying-xian, CHEN Yan-fang, JIANNING Yi-kuan. The Effect of Different Frequency Ultrasonic on Fabric's Dyeing Property[J]. Shandong Textile Science & Technology, 2005(3):8-9.
- [11] DIETMAR P. Ultrasound in Materials Chemistry[J]. Journal of Materials Chemistry, 1996, 10(6):1605-1618.

(上接第 69 页)

度从 40%到 60%, 或者从 60%到 80%, 相对湿度增长 20%, 相对湿度平均每上升 10%, 瓦楞纸箱抗压强度降低不超过 10%; 而相对湿度从 80%到 90%, 湿度同样上升了 10%, 而抗压强度的上升值达到 10.4%, 所以, 瓦楞纸箱的湿度越大, 抗压强度的损失也就越大。

在设计前, 需要考虑到瓦楞纸箱的流通环境, 特别是流通环境中的湿度^[7]。尤其是需要从北方运到南方, 或者需要水运的^[8], 要特别考虑到湿度对瓦楞纸箱的抗压强度的影响, 采取适当增强瓦楞纸板的各层原纸的质量来提高瓦楞纸箱的抗压强度, 或者采用涂防水涂层, 防止湿气进入瓦楞纸箱, 使瓦楞纸箱瘫软, 避免因瓦楞纸箱强度随湿度降低后引起的损坏瓦楞内装商品的情况出现。

参考文献:

- [1] 蔡梅琼. 影响瓦楞纸箱质量的因素及解决措施[J]. 广西轻工业, 2011(3):25-27.
CAI Mei-qiong. Factors that Affect the Quality of Paper-Board and Solutions[J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2011(3):25-27.
- [2] 郭彦峰, 付云岗, 许文才, 等. 瓦楞纸板结构在运输包装应用中的研究进展[J]. 包装工程, 2007, 28(8):33-36.
GUO Yan-feng, FU Yun-gang, XU Wen-cai, et al. Advances of the Application Research of Corrugated Paper-board Structures in Transport Packaging[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(8):33-36.
- [3] 刘乘, 刘俊, 张凯凯. 新型包装压力试验机的设计[J]. 包装与食品机械, 2010, 28(1):27-29.
LIU Cheng, LIU Jun, Zhang Kai-kai. Design of a Newly Pressure Tester for Package[J]. Packaging and Food Machinery, 2010, 28(1):27-29.
- [4] 邵孟, 刘乘. 基于 LabVIEW 的压力试验机测试系统的设计[J]. 包装工程, 2008, 29(10):46-50.
SHAO Meng, LIU Cheng. Design of Test System of Compression Testing Machine Based on LabVIEW[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10):46-50.
- [5] 孙聚杰. 瓦楞纸板承载能力疲劳损伤曲线研究[J]. 包装工程, 2008, 29(12):26-29.
SUN Ju-jie. Research on Fatigue Damage Curve of Corrugated Cardboard[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12):26-29.
- [6] 潘幸珍. 复合瓦楞纸板结构性能的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
PAN Xing-zhen. Study on the Structural Properties of Corrugated Cardboard Composites[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007.
- [7] 张琴. 瓦楞纸箱结构尺寸的优化设计[J]. 今日印刷, 2009(12):35-38.
ZHANG Qin. Optimization Design on Paper-board Structure Size[J]. Today Printing, 2009(12):35-38.
- [8] 杨传民, 王心宇. 温湿度及纸箱尺寸对堆码强度影响的实验研究[J]. 包装工程, 2009, 30(8):1-3.
YANG Chuan-min, WANG Xin-yu. Study on temperature, Humidity and Carton Size Effects on Stacking Strength by Experiment [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(8):1-3.