

微波辅助软化尿素浸泡梓木弯曲工艺探讨

姚文亮, 孙德林, 刘文金

(中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要: **目的** 研究微波辅助加热处理条件下梓木的弯曲工艺。 **方法** 当微波处理频率一定时, 分析比较梓木浸水材与尿素浸泡材的软化弯曲性能差异, 探讨微波处理时间、木材初含水率以及微波处理功率等工艺因素对梓木软化效果的影响。在单因素实验基础上, 采用响应面法建立二次回归模型, 并对微波辅助软化弯曲工艺进行优化。 **结果** 梓木经尿素浸泡处理后弯曲性能得到明显提高, 且微波处理时间、木材初含水率以及微波处理功率等工艺因素对梓木软化弯曲性能影响显著。 **结论** 当微波处理时间为 2 min、初含水率为 40%、微波处理功率为 500 W 时, 梓木的最小弯曲半径比 h/r 能达到 1/5。

关键词: 微波辅助加热; 尿素软化; 梓木弯曲; 工艺优化

中图分类号: TB484.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)09-0066-05

Bending Process of Microwave-assisted Softening Urea Soaking Ovata Catalpa Wood

YAO Wen-liang, SUN De-lin, LIU Wen-jin

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

ABSTRACT: **Objective** To study the bending process of ovata catalpa during microwave-assisted heating. **Methods** The difference of bending performance between urea and water soaking ovata catalpa wood was explored under constant microwave frequency. The influences of microwave processing time, wood moisture content and microwave power on the softening effect of ovate catalpa were discussed. A quadratic regression model was established with response surface methodology based on single factor experiments, and the process was optimized. **Results** The results showed that urea soaking could obviously improve the wood bending performance, and the process factors of microwave processing time, wood moisture content and microwave power had significant effects on wood bending performance. **Conclusion** The compression strain could reach 16.3% and the value of h/r could reach 1/5 when the microwave processing time was 2 min, the wood moisture content was 40% and the microwave power was 500 W.

KEY WORDS: microwave-assisted heating; urea softening; bending of ovata catalpa wood; process optimization

木材作为一种生态材料, 具有纹理优美、加工便利、可塑性较强等优点。木材经弯曲加工后可制成样式典雅别致、线条生动流畅的曲木家具、木质包装及木装饰工艺品等^[1-3]。目前, 很多包装设计都采用曲线或曲面以增加造型的生动性, 材料多为纸和纤维板。若使用弯曲的木材制作富有个性的包装, 将木材自然

的纹理与优美的曲线结合, 不仅可提高被包装产品的附加值, 而且还能将外包装变成可以收藏的艺术品。

目前, 弯曲木制品多采用榆木、水曲柳、山毛榉、胡桃楸等高档阔叶木材制造。梓木是我国历代用材最广的木材品种之一, 素有“江南名木”之美誉, 具有分布广、产量大、材质佳、纹理通直、尺寸稳定性好以

收稿日期: 2013-10-27

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201204712)

作者简介: 姚文亮(1987—), 男, 湖南常德人, 中南林业科技大学硕士生, 主攻木制品的设计与制造。

通讯作者: 孙德林(1966—), 男, 博士, 中南林业科技大学教授, 主要研究方向为木制品设计、制造及木质复合材料。

及加工性能强等特点。同时,由于其纹理既有“鸡翅木”的花纹,也有类似榆木纹理的特征,因此也被称为浙江榆木或者南榆木。

木材软化是实木弯曲工艺中极其重要的工序^[4]。在前期研究中发现,梓木可以满足一般弯曲工艺的要求。目前,木材软化多采用蒸煮软化,其最大的不足在于效率低^[5-7]。微波加热具有加热均匀、迅速,不容易引起含水率梯度的优势,能够有效降低含水率梯度引起的应力变化,降低弯曲木的废品率,提高产品质量^[8-11]。文中通过探究微波处理时间、微波功率及木材初含水率与木材软化效果之间的关系,并运用响应面法(RSM)对微波辅助软化工艺进行优化,以期为木材微波辅助软化弯曲技术的研究提供参考。

1 实验

1.1 材料与设备

实验材料:梓木,采自湖南湘西地区,15年生,干燥后含水率为10%左右,并加工成规格为30 mm×20 mm×20 mm的试件。

实验设备:微机控制电子式木材力学试验机(KHQ-002H)、微波炉(Galanz, WP8007L23-K3)、实木家具弯曲机(自制)、游标卡尺和卷尺等。

1.2 实验设计

将加工好的梓木试件分别浸泡在清水和质量分数为30%的尿素溶液中,时间为15 d左右,以达到饱水状态为准。在参照预实验及相关文献的基础上,选定微波处理功率、处理时间及试件初含水率作为该实验影响因素进行单因素实验,考察其对梓木软化弯曲效果的影响,并运用Box-Behnken中心组合实验设计原理^[12-13]设计实验,采用响应面分析方法(RSM),得出优化弯曲工艺参数。

1.3 软化弯曲效果评定

木材的弯曲性能用 h/r (h 为弯曲木厚度, r 为弯曲的曲率半径)来衡量^[14],即同样厚度的木材能弯曲的曲率半径越小(h/r 值越大),则说明弯曲性能越好。实际生产过程中,为使中性层外移,通常会在试件两端加钢带后进行弯曲,此时木材弯曲性能可用式(1)表示^[15]:

$$h/r=2\varepsilon/(1-\varepsilon) \tag{1}$$

式中: ε 为木材顺纹压缩应变,由万能力学试验机,依据GB/T 1935—2009《木材顺纹抗压试验方法》测得。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

在预实验基础上,将微波炉频率固定为2450 MHz,以微波处理时间、初含水率及微波处理功率为实验因素进行单因素实验,对梓木浸水材和尿素浸泡材微波处理后的弯曲性能指标 h/r 值进行考察,并分析其变化趋势。

2.1.1 微波处理时间的影响

当微波处理功率为500 W,梓木浸水材和尿素浸泡材初含水率为40%时,其弯曲性能指标 h/r 值见图1。从图1可知,2种不同浸泡处理木材弯曲性能指标 h/r 值均在1.5 min前迅速增加,在2 min附近趋于平缓,当微波处理时间超过2 min后开始下降。浸水材和尿素浸泡材分别在微波处理时间约为2 min时,弯曲性能指标 h/r 值达到最大值,这说明此条件下梓木达到较好软化效果。此时尿素浸泡材弯曲性能指标 h/r 值高于浸水材,表明在较优微波处理时间下,尿素浸泡材的弯曲性能明显好于浸水材。

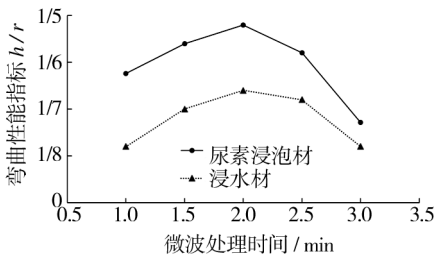


图 1 微波处理时间对弯曲性能指标的影响
Fig. 1 Effects of microwave processing time on the bending performance index

2.1.2 初含水率的影响

当微波处理时间为2 min,微波处理功率为500 W,梓木浸水材和尿素浸泡材的弯曲性能指标 h/r 值见图2。由图2可知,2种不同浸泡处理材料的弯曲性能指标 h/r 值在初含水率为40%之前迅速增加,超过40%后开始下降,50%以后下降趋势明显。浸水材和尿素浸泡材分别在初含水率大约为40%时,弯曲性能指标 h/r 值达到最大,这说明此条件能获得较好的软化效果。此时图2中尿素浸泡材弯曲性能指标

h/r 值高于浸水材,表明在较优初含水率条件下,尿素浸泡材的弯曲性能明显好于浸水材。

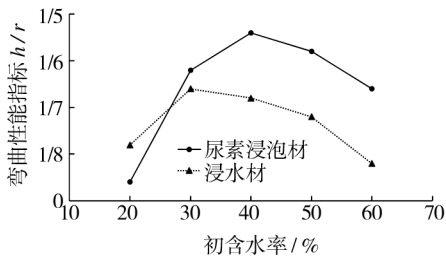


图2 木材含水率对弯曲性能指标的影响
Fig.2 Effects of wood moisture content on the bending performance index

2.1.3 微波处理功率的影响

当微波处理时间为 2 min,梓木浸水材和尿素浸泡材初含水率分别为 40% 时,这 2 种材料的弯曲性能指标 h/r 值见图 3。从图 3 中可知,微波处理功率较小时,2 种不同浸泡处理材料的弯曲性能指标 h/r 值随着微波功率增加而增加,当微波功率超过 500 W 时,下降趋势明显。浸水材和尿素浸泡材分别在功率约为 500 W 时,弯曲性能指标 h/r 值达到最大,这说明此条件能使基材达到较好的软化效果。此时,尿素浸泡材弯曲性能指标 h/r 值高于浸水材,表明在较优微波处理功率条件下,尿素浸泡材的弯曲性能明显好于浸水材。

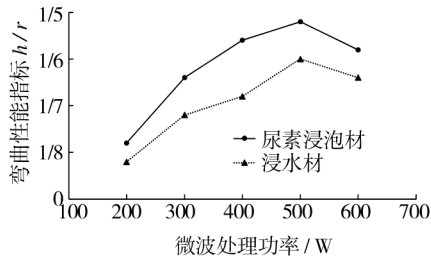


图3 微波处理功率对弯曲性能指标的影响
Fig.3 Effects of microwave power on the bending performance index

通过分析比较图 1—3 中单因素实验数据,可以发现在相同的微波处理条件下,尿素浸泡材的弯曲性能明显好于浸水材,因此,在响应面实验设计中将只对尿素浸泡材进行软化弯曲工艺优化实验与分析。

2.2 响应面分析

2.2.1 响应面优化实验设计

为使微波辅助软化弯曲工艺更加科学与合理,在

单因素实验基础上,根据 Box-Behnken 设计原理,选择尿素浸泡材为实验基材,将微波处理时间、初含水率及微波处理功率作为影响因素,以试件弯曲性能指标 h/r 值为响应值,设计 3 因素 3 水平实验来进行响应面分析,其因素及水平编码见表 1。

表 1 响应面实验设计中的水平和编码
Tab.1 Level and code of variables chosen for RSM design

变量	编 码	水 平		
		-1	0	1
微波处理时间/min	A	1.5	2	2.5
初含水率/%	B	30	40	50
微波处理功率/W	C	400	500	600

2.2.2 多元回归模型分析

根据 Box-Behnken 设计原理进行实验,运用 Design-Expert 8.0.7.1 软件对试验结果进行二次多元回归分析,得到二次多元回归方程:

$$Y = 16.98 + 0.2A - 0.75B + 0.018C - 0.23AC - 1.80BC - 3.17A^2 - 2.75B^2 - 0.87C^2$$
 (2)

同时得到模型与方差分析结果(见表 2),其中模型 P 值为 0.0003,小于 0.05,表现为非常显著;失拟项 P 值为 0.7486,表现为不显著;复相关系数 $R^2 = 96.37\%$,接近 1,这说明模型与实际实验情况基本吻合,没有漏项。 AC 的 P 值为 0.0140,小于 0.05,表现为非常显著,说明微波处理时间与微波处理功率之间存在明显的交互作用。 A^2, B^2, C^2 的 P 值均小于 0.05,

表 2 模型与方差分析

Tab.2 Analysis of variance for regression model					
来源	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
模型	79.33	8.81	44.36	0.0003	**
A(微波时间)	5.94	5.94	29.19	0.0029	**
B(初含水率)	0.80	0.80	4.03	0.1009	*
C(微波功率)	4.46	4.64	22.42	0.0052	**
AB	0.0024	0.0024	0.012	0.9159	
AC	2.72	2.72	13.7	0.0140	*
BC	0.21	0.21	1.06	0.3494	*
A^2	2.66	2.66	16.79	0.0046	**
B^2	2.00	2.00	12.62	0.0093	**
C^2	1.9	1.9	12.00	0.0105	*
残值	0.99	0.20			
失拟项	0.40	0.13	0.44	0.7486	
纯误差	0.6	0.31			
$R^2 = 0.9637$					

注:** 表示非常显著;* 表示显著。

说明微波处理时间、初含水率和微波处理功率对木材软化效果影响显著,影响木材微波软化效果因素的显著顺序为: $A>B>C$,即在本工艺条件下,微波处理时间的影响最大,初含水率次之,微波处理功率影响最小。同时,从二次回归方程中可以发现,其二次项的系数均为负值,表明方程有最优值。

微波处理时间与含水率相互关系的响应面模型曲面见图 4。当微波处理时间和初含水率增加时,试件弯曲性能指标 h/r 值呈先增加后递减的趋势,且当时间为 2 min、含水率为 40% 时达到最大值,随后降低。这是因为木材作为一种粘弹性材料,在微波环境中,内部极性分子(如水)振动摩擦产生热量,木材温度迅速升高,使木材塑性增强,从而达到软化目的。适当延长微波处理时间,木材内部水分子获得能量增加,能产生更多的热量,使木材温度上升更高;但当微波处理时间过长时,木材内部水分会损失更多,水分气化潜热和水蒸气蒸发带走的能量也随之增加。同时,水分的减少会使木素、半纤维素等物的玻璃态转变温度升高。由此,过长的处理时间将导致 h/r 值的降低。

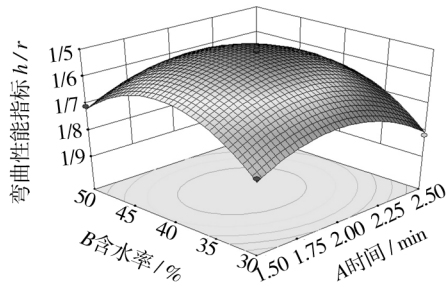


图 4 $Y=f(A,B)$ 的响应面

Fig. 4 Response surface diagram of $Y=f(A,B)$

微波处理功率与初含水率的响应面模型曲面见图 5,当微波处理功率和初含水率增加时,试件弯曲性能指标 h/r 值呈先增加后递减的趋势,且当功率为 500 W、含水率为 40% 时达到最大值。水作为增塑剂能够增加木材内部分子链之间的距离,为分子热运动提供足够空间,且木素、半纤维素等无定形物在湿润状态下玻璃化转变温度会大幅下降。初含水率较低时,木材内部分子链得不到充分润胀,同时微波加热过程水分会有部分损失,造成纤维相对滑移时阻力较大。随着含水率增加,木材逐渐得到充分润胀, h/r 值增幅较小。当初含水率过高时,木材内的自由水在压缩实验中产生的静压力会造成木材纤维破裂,因此

h/r 值下降。

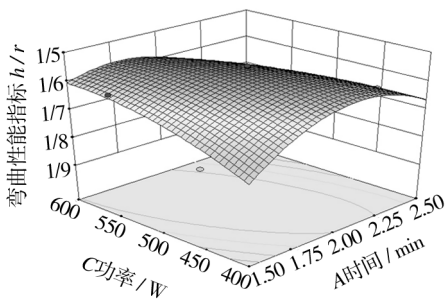


图 5 $Y=f(B,C)$ 的响应面

Fig. 5 Response surface diagram of $Y=f(B,C)$

微波处理功率与处理时间的响应面模型曲面见图 6。当微波处理功率和微波处理时间增加时,试件弯曲性能指标 h/r 值呈现先增加后递减的趋势,且当功率为 500 W、时间为 2 min 时达到最大值。这是因为木材表面水蒸汽蒸发和水分气化潜热需要吸收微波能量,当微波功率较低时,提供的能量有限,木材升温速度较慢。微波功率增加,能提供足够的能量使木材迅速升温。当微波功率过高时,木材内部水分迅速气化,细胞腔内压力急剧上升,高温高压蒸汽的冲击造成木材组织破坏,从而导致 h/r 值下降。

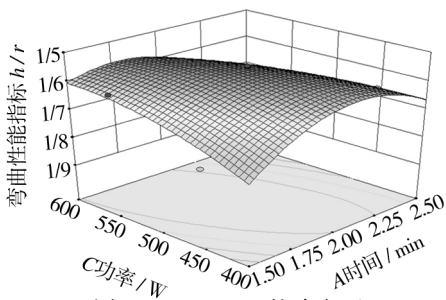


图 6 $Y=f(A,C)$ 的响应面

Fig. 6 Response surface diagram of $Y=f(A,C)$

2.2.3 工艺优化与验证

通过软件对模型进行分析和优化,优化结果为:当微波处理时间为 1.9 min,试件含水率为 43.6%,微波处理功率为 519.37 W 时,可获得最佳软化处理效果,弯曲性能指标 h/r 值为 1/4.5。

考虑到实际操作情况,实验选择波处理时间为 2 min,试件含水率为 40% 左右,微波处理功率为 500 W 为参数进行 3 次验证性实验,弯曲性能指标 h/r 平均值为 1/4.8,与理想值 1/4.5 比较接近,这表明回归模型具有较高的真实性和可信度。

同时,利用实木家具弯曲机(自制),采用优化后的工艺对试件进行微波辅助软化弯曲试验,弯曲试验

得到结果为:在木材两端未加钢带条件下,试件最小弯曲半径比 h/r 为 $1/7$,成品率约为 70%;在试件两端加钢带的情况下,试件最小弯曲半径比 h/r 为 $1/5$,成品率接近 90%。由此可见,在梓木微波辅助软化弯曲工艺中,在试件两端加钢带不仅能提高成品率,更能将试件弯曲成半径更小的构件。

3 结语

尿素浸泡处理能有效提高梓木的弯曲性能。在微波频率一定的情况下,木材的弯曲性能与微波处理时间、木材初含水率以及微波处理功率等工艺因素有关。当微波炉频率固定为 2450 MHz,较为优化的软化弯曲工艺为:微波处理时间为 2 min,初含水率为 40%,微波处理功率为 500 W,在两端加钢带的情况下最小弯曲半径比 h/r 能达到 $1/5$,成品率接近 90%,与无钢带条件小弯曲相比较有较大提高。经处理后的梓木完全可以满足一般弯曲工艺要求,能应用于曲木家具、木质包装及木装饰工艺品等弯曲木制品的制造。

参考文献:

- [1] 张欣. 软木家具设计研究[J]. 包装工程, 2013, 34(6): 29—32.
ZHANG Xin. Study on the Design of Cork Furniture[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(6): 29—32.
- [2] 李岭. 论中国传统包装材料的生态价值[J]. 包装工程, 2011, 32(14): 98—101.
LI Ling. Ecological Values of Traditional Chinese Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(14): 98—101.
- [3] 付桂涛, 马掌法, 陈思宇. 竹木材料汽车内饰设计趋势及概念[J]. 包装工程, 2011, 32(4): 51—53.
FU Gui-tao, MA Zhang-fa, CHEN Si-yu. Analysis of Trend and New Concepts about Automobile Interior Decoration Design by Bamboo-wood[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(4): 51—53.
- [4] HILLIS W E, ROZSO A N. The Softening Temperatures of Wood[J]. Holzforschung, 1978, 32(2): 68—73.
- [5] 申利明. 枫杨和拓树应用于弯曲木的工艺研究[J]. 南京林业大学学报, 1991, 15(2): 72—75.
SHEN Li-ming. The Research of Stenopera and Tricuspidata on Wood Bending Technology[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 1991, 15(2): 72—75.
- [6] HWANG K, JUNG I, LEE W. Bending Quality of Main Korean Wood Species[J]. Wood Research, 2002, 89: 6—10.
- [7] RÉMOND R, PASSARD J, PERRÉ P. The Effect of Temperature and Moisture Content on the Mechanical Behaviour of Wood: A Comprehensive Model Applied to Drying and Bending[J]. European Journal of Mechanics, 2007, 26(3): 558—572.
- [8] 李军. 微波加热软化处理木材的弯曲工艺研究[J]. 林产工业, 1998, 25(6): 4—6.
LI Jun. Study on Technology of Bending Wood with Microwave Heating[J]. China Forest Products Industry, 1998, 25(6): 4—6.
- [9] NORIMOTO M. Wood Bending by Microwaves[J]. Wood Research, 1979(14): 13—25.
- [10] 宋魁彦, 李坚. 水热-微波软化处理对榆木软化和顺纹压缩及弯曲的影响[J]. 林业科学, 2009, 45(10): 120—125.
SONG Kui-yan, LI Jian. Effect of Hydrothermal-microwave Treatment on Softening and Longitudinal Compressing and Bending Elm Wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(10): 120—125.
- [11] 佟达, 宋魁彦, 李坚. 水热-微波软化处理对水曲柳弯曲的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 129—132.
TONG Da, SONG Kui-yan, LI Jian. Effect of Hydrothermal-microwave Softened Treatment on Bending Ash Wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 129—132.
- [12] 张泽志, 韩春亮, 李成未. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 河南教育学院学(自然科学版), 2011, 2(4): 34—37.
ZHANG Ze-zhi, HAN Chun-liang, LI Cheng-wei. Application of Response Surface Method in Experimental Design and Optimization[J]. Journal of Henan Institute of Education(Natural Science Edition), 2011, 2(4): 34—37.
- [13] GEORGE E P. Statistics for Experiments: An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building[M]. New York: Wiley, 1990.
- [14] 陈太安, 李大钢, 王江. 几种木材微波加热弯曲性能的比较研究[J]. 建筑人造板, 2000(3): 24—26.
CHEN Tai-an, LI Da-gang, WANG Jiang. Contrast Research on Bending Performance for Microwave Heating of Several Kinds of Wood[J]. Building Artificial Boards, 2000(3): 24—26.
- [15] 吴智慧. 木制家具制造工艺学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
WU Zhi-hui. Wooden Furniture Manufacturing Technology[M]. Beijing: China Forestry Press, 2004.