

编者按: 依托“十二五”国家科技支撑计划、林业科学技术推广等项目, 中国林业科学研究院木材工业研究所进行了木材大功率微波处理技术的研究与系列产品开发, 经产学研联合攻关, 突破了木材微波处理效果调控的技术瓶颈, 取得了“微波膨化木材制备技术”成果, 开发了“微波膨化木”“微波膨化木装饰表板实木复合地板”等新产品。本刊于2020年系列报道相关研究的成果。

高场强微波处理对樟子松木材宏观裂纹的影响

熊令明, 邢雪峰, 林兰英, 周永东, 傅峰

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 探究高场强微波处理过程中, 樟子松试材含水率、微波功率、处理时间对试材吸收微波能量和宏观裂纹的影响。结果表明, 试材处理前的含水率、微波功率对试材吸收的微波能量有显著影响; 当含水率为40%~60%、微波功率为140 kW、处理时间为120 s时, 樟子松试材横截面的裂纹面积比和裂纹数量最大。建议根据功能化材料的应用领域, 选择不同的微波处理工艺。

关键词: 樟子松; 微波处理; 高场强; 吸收微波能量; 宏观裂纹

中图分类号: S781; S791.253; TS65; TN015 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2020) 06-0001-04

Effects of High-Field-Intensity Microwave Treatment on Macroscopic Cracks in Mongolian Scotch Pine

XIONG Ling-ming, XING Xue-feng, LIN Lan-ying, ZHOU Yong-dong, FU Feng

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Microwave treatment can cause macroscopic cracks in wood. The effects of moisture content, microwave powers, and treatment times on macroscopic cracks in the cross section of Mongolian scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.) after microwave treatment were investigated. Results showed that the moisture content and microwave powers had a significant influence on the microwave energy absorption by the Mongolian scotch pine samples. The number of cracks in the cross section of Mongolian scotch pine samples and crack area ratio reached the largest at 40%~60% of the moisture content, 140 kW of the microwave power and 120 seconds of the treatment time. It was suggested that different microwave treatment processes should be chosen accordingly based on the application of materials.

Key words: Mongolian scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.); microwave treatment; high field intensity; microwave energy absorption; macroscopic cracks

收稿日期: 2020-04-01; 修改日期: 2020-10-17

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划“木质隔声和发热新材料制造关键技术与示范”(2015BAD14B04); 国家林业和草原局林业科技成果推广计划项目“基于高能微波处理的节材高效利用技术”([2019]42号); 浙江省与中国林业科学研究院省院合作林业科技项目“大功率微波膨化重组装饰材料制备技术研究及示范”(2017SY15)。

作者简介: 熊令明(1988—), 男, 博士研究生。Email: xiongliming219@163.com

通讯作者: 林兰英, 女, 副研究员。Email: linly@caf.ac.cn

樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.) 是我国东北地区主要速生用材树种,也是主要进口材树种之一,其木材结构均匀、纹理直^[1],不仅广泛应用于建筑、家具等领域,而且是户外防腐材的主要树种。浸渍处理作为木材改性处理的常用方法,亦是樟子松木材防霉抗菌、阻燃、增强和功能性处理的主要途径^[2-6]。然而,由于樟子松木材树脂丰富^[7],液体渗透性差,严重影响处理剂在浸渍改性过程中的扩散效果。

将一定含水率的木材置于高场强微波场中,木材中的水分迅速汽化,内部压力迅速提高,在高压作用下,木材纹孔、射线细胞等受到破坏^[8-9],内含物溢出,其内部可出现沿径向扩展的宏观裂纹,形成新的流体通道,从而提高木材的渗透性能^[10-11]。微波处理效果取决于微波工艺参数,通过调控微波处理工艺,可获得 I、II、III 型不同性能等级的微波膨化木,适用于不同木材功能化应用场景^[12]。

笔者在前期试验中发现,利用高场强微波处理樟子松试材时,试材无法完全吸收所有的微波能量,测试结果显示 13.09%~19.02% 的微波功率在处理过程中形成反射损失。试材对微波能量的实际吸收情况,直接影响处理效果。而在实际操作过程中,往往忽略微波反射能量的损失,导致不能准确地确定木材实际吸收微波能量值。

鉴于此,笔者利用高场强微波处理设备,研究樟子松木材在不同微波工艺条件下对微波能量的实际吸收情况;建立微波处理工艺与处理材横切面宏观裂纹之间的关系,旨在为后续微波处理材的研究提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

樟子松,购于浙江绍兴木材市场,规格 2 000 mm×220 mm×120 mm;调整试材含水率分别为 20%~30%、30%~40%、40%~60% 三种。每种含水率试材各 8 根。

1.2 设备仪器

WX200L 高场强微波木材膨化装备,配备双向耦合器测定入射与反射微波情况。鼓风干燥箱、带式砂光机、惠普平板式扫描仪(型号 G3110)。

1.3 试验方法

以试材含水率、处理时间、微波输入功率作为变量因子,考察不同工艺调控樟子松试材的处理效果。试验因素和水平设置见表 1。

表 1 试验因素水平
Tab.1 Experiment factors and levels

因素	水平		
	1	2	3
含水率/%	20~30	30~40	40~60
处理时间/s	80	120	
微波功率/kW	100	140	

1.4 性能测试

1) 木材实际吸收微波能量:即微波设置功率与反射功率的差值,利用笔者课题组开发的装备直接测定^[13]。

2) 木材宏观裂纹:以微波处理材的体积膨胀率、裂纹面积比例、裂纹数量等参数来表征。

在长度方向上等间距取 3 块横截面试样,厚度均为 1 cm,为保证取样的一致性,使试件边棱平直,棱边垂直。然后填充有色物质增加裂隙的对比度,并用 180 目砂纸打磨横截面,直到端面裂隙明显可见。按照 Q/FDL 001—2017《膨化基材》进行测试,并对测试数据进行统计分析。

① 对樟子松横截面图片进行增强、分割及形态学处理等,获得试材的裂纹数量、裂纹面积比例性能指标。

② 统计分析处理试材裂纹数量和裂纹面积比例,制定樟子松膨化基材的宏观裂纹标准。

2 结果与分析

2.1 工艺参数对试材吸收微波能量的影响

试验三因素对试材吸收微波能量的影响结果,如图 1 所示;对吸收微波能量的方差分析及显著性检验结果,见表 2;试验因素与试材吸收微波能量的回归方程,见公式 1。

吸收微波能量 (Y) 与处理时间 (X_1)、微波处理功率 (X_2) 和试材含水率 (X_3) 之间的回归方程:

$$Y=0.763+0.017X_1+0.839X_2+\begin{cases} -4.274X_3 & X_3 \in (20\% \sim 30\%) \\ 0.635X_3 & X_3 \in (30\% \sim 40\%) \\ 0 & X_3 \in (40\% \sim 60\%) \end{cases} \quad (1)$$

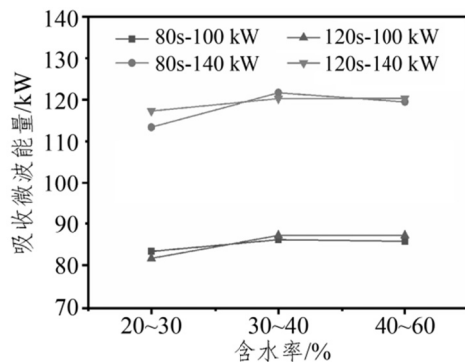


图1 不同处理条件下试材吸收的微波能量

Fig.1 Microwave energy absorbed by the sample under different treatment conditions

表2 吸收微波能量方差分析及显著性检验

Tab.2 Variance analysis and significance test of absorbed microwave energy

来源	III型平方和	自由度	均方值	显著性
处理时间	2.741	1	2.741	0.243
微波功率	6 760.662	1	6 760.662	0.000
含水率	114.037	2	57.019	0.000

1) 试材含水率的影响

由图1和表2可知,试材含水率对其吸收微波能量的影响显著。当木材含水率小于20%时,液态自由水缺失,木材细胞腔中充满空气,因空气和木材对微波的吸收能力均低于水,导致此时试材对微波功率的吸收能力较弱。

随着含水率升高,试材对微波功率的吸收能力有一定提高。一方面,含水率升高带给木材细胞壁中的极性基团及纤维素更大的自由旋转空间^[14],提高了樟子松木材的介电常数;另一方面,木材单位体积内自由水含量增加,自由水的介电常数远大于木材,并且在一定程度下可认为自由水在电场作用下独立于木材极化^[15]。含水率30%~40%试材的吸收微波能力最佳。当含水率进一步升高到40%~60%后,木材中过多的水分含量对微波的屏蔽影响^[16],略微降低了试材对微波功率的吸收能力。

2) 处理时间和微波功率的影响

图1和表2显示,微波处理功率对试材吸收的微波能量影响显著,而处理时间的影响则不显著。

樟子松试材在高场强微波装备处理过程中,经过谐振腔的时间为试材的处理时间,同一微波功率情况下,微波处理时间增大,试材内部的水分发生

变化,逐渐转化为水蒸气,水蒸气的介电特性相对液态水的介电特性较小,所以试材在吸收微波能力过程中出现最佳点后逐渐减弱。同一处理时间情况下,微波馈入功率增大,试材内部液态水在短时间内吸收微波能量显著,谐振腔中的微波场强密度增高,根据吸收微波公式1得知,试材吸收微波能量成平方倍增大。

软件分析得出回归方程的拟合度 $R^2=0.995$ (R 为样本决定系数),拟合度良好;其中 X_1 参数的系数相对于 X_2 小很多,说明微波处理功率对试材吸收微波能力的影响较大,而处理时间对试材吸收微波能力的影响较小,与方差分析结果一致。

2.2 工艺参数对处理试材横截面裂纹的影响

处理试材横截面的裂纹统计结果,列于表3。在Q/FDL 001—2017的基础上,针对樟子松试材的裂纹情况进一步细化,得出樟子松微波处理材膨化质量要求(表4)以及不同等级处理材的裂纹图(图2),用来评价处理材的等级。

表3 微波处理樟子松试材横截面裂纹的统计结果

Tab.3 Macroscopic cracks in the cross section of microwave treated Mongolian scotch pine samples

试验编号	含水率/%	处理时间/s	吸收微波功率/kW	面积膨胀率/%	裂纹面积比率/%	裂纹数量/(个·m ⁻²)	等级划分
1	20~30	120	81.61	5.20	5.35	2 065	II
2	20~30	120	117.27	8.05	5.11	1 896	II
3	20~30	80	83.28	1.50	2.16	915	I
4	20~30	80	113.37	6.15	4.33	1 597	II
5	30~40	120	87.12	2.65	1.49	1 462	II
6	30~40	120	120.27	4.80	1.79	1 302	II
7	30~40	80	86.09	1.60	0.90	320	I
8	30~40	80	121.69	1.35	1.60	1 191	II
9	40~60	120	87.12	3.95	1.00	917	II
10	40~60	120	120.31	4.00	8.13	3 649	III
11	40~60	80	85.74	2.30	0.72	386	I
12	40~60	80	119.47	1.55	2.42	1 171	II

表4 樟子松膨化基材膨化质量等级要求

Tab.4 Quality standards for different grades of microwave treated Mongolian scotch pine

分级	裂纹面积比例/%	裂纹数量/(个·m ⁻²)	裂纹形状
I	≤2.5	≤1 000	裂纹占面积小
II	2.5~8.0	1 000~3 500	裂纹粗长
III	≥8	≥3 500	裂纹细长且占面积大

由表3可知,含水率40%~60%、处理时间120 s、微波输入功率140 kW时,试材横截面的裂纹面积比最大、数量最多,且裂纹细长占满整个横截面(图2c)。处理时间为80 s、输入功率100 kW时,三种含水率试材的面积膨胀率和裂纹面积比均最小。

同一含水率试材内部,水分以水蒸气和液态自

由水两种形式存在,在一定压力情况下,试材吸收的微波能量越多,其内部的水蒸气压力越大,导致试材的面积膨胀率和裂纹面积越大;反之,试材吸收的微波能量较小时,能量被自由水吸收,水蒸气形成的压力有限,有可能从试材横截面上较大的缝隙中溢出,不利于形成细小裂纹。

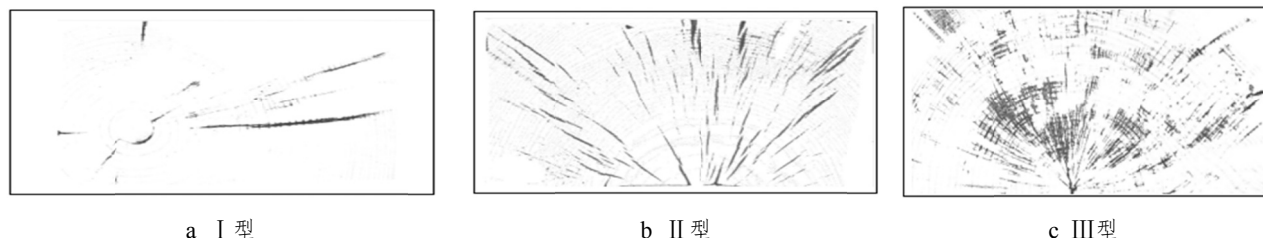


图2 不同等级樟子松处理材的裂纹信息示意图

Fig.2 Cracks in cross section of different grades of microwave treated Mongolian scotch pine samples

3 结论

1) 在WX200L高场强微波木材膨化装备处理的条件下,微波输入功率对樟子松试材吸收微波能力有显著影响;试材含水率对吸收微波能力影响复杂,含水率为30%~40%的樟子松试材吸收微波的能力最佳;试材处理时间对吸收微波能量的影响较小。

2) 含水率40%~60%、处理时间为120 s、微波输入功率为140 kW时,樟子松横截面的裂纹面积比和裂纹数量最大。后期建议根据功能化材料的应用领域,选择不同的微波处理工艺。

3) 需进一步深入研究高场强微波处理后樟子松材微观构造的破坏情况,如木材纹孔膜、射线细胞管胞及树脂道等,为后期功能化试材受力分析提供依据。

参考文献:

- [1] 成俊卿, 杨家驹, 刘鹏. 中国木材志[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992: 67.
- [2] 林琳, 庞瑶, 刘毅, 等. 超声波辅助纳米Ag/TiO₂浸渍木材的化学改性与微观构造表征[J]. 林业科学, 2017, 53(12): 102-111.
LIN L, PANG Y, LIU Y, et al. Chemical modification and microstructure characterization of nano-Ag/TiO₂ impregnation of wood assisted by ultrasonic[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(12): 102-111.
- [3] 杨小军, 徐汀竹, 张璐, 等. 户外用蜡浸注木工艺及物理力学性能[J]. 森林与环境学报, 2017, 37(4): 496-501.
YANG X J, XU D Z, ZHANG L, et al. Impregnating technology and physical mechanics properties of wax impregnated wood for outdoor use[J]. Journal of Forest and Environment, 2017, 37(4): 496-501.
- [4] 王石进, 郭垂根, 王奉强. 真空加压浸渍法阻燃处理樟子松木材研究[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(9): 1058-1061.

- [5] 何盛, 傅峰, 林兰英, 等. 微波处理技术在木材功能化改性研究中的应用[J]. 世界林业研究, 2014(1): 62-67.
HE S, FU F, LIN L Y, et al. Research progress in functional modification of microwave treated wood[J]. World Forestry Research, 2014(1): 62-67.
- [6] Torgovnikov G, Vinden P. Microwave wood modification technology and its application[J]. Forest Products Journal, 2010, 60(2): 173.
- [7] 平立娟. 樟子松材汽蒸脱脂/高温干燥研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [8] Awoyemi L. Effects of microwave modification on the swelling properties of *Pinus radiata* heartwood[J]. Indian Forester, 2004, 130(3): 267-272.
- [9] 何盛, 林兰英, 傅峰, 等. 六种木材的微波处理实验研究[J]. 微波学报, 2014(4): 90-96.
HE S, LIN L Y, FU F, et al. Experimental study of six species of wood treated by microwave[J]. Journal of Microwave, 2014(4): 90-96.
- [10] 何盛, 于辉, 吴再兴, 等. 微波处理对樟子松木材液体浸注性能影响[J]. 微波学报, 2016(6): 90-96.
- [11] Torgovnikov G, Vinden P. High-intensity microwave wood modification for increasing permeability[J]. Forest Products Journal, 2009, 59(4): 84.
- [12] 徐恩光, 林兰英, 李善明, 等. 木材微波处理技术与应用进展[J]. 木材工业, 2020, 34(1): 20-25.
XU E G, LIN L Y, LI S M, et al. Wood microwave treatment technology and its applications[J]. China Wood Industry, 2020, 34(1): 20-25.
- [13] 熊令明, 徐恩光, 林兰英, 等. 高场强微波处理木材仿真分析与装备三维实体设计[J]. 木材工业, 2020, 34(3): 1-5.
XIONG L M, XU E G, LIN L Y, et al. Simulation and 3D-design of high-intensity microwave equipment for wood pre-treatment [J]. China Wood Industry, 2020, 34(3): 1-5.
- [14] Kol H S. Thermal and dielectric properties of pine wood in the transverse direction[J]. BioResources, 2009, 4(4): 1663-1669.
- [15] 肖辉. 微波处理樟子松木材机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [16] 查安霞, 孙少云, 来侃. 含水率对微波屏蔽效能的影响[J]. 西安工程大学学报, 2008(2): 136-138.

(本文编校 孟凡丹、向 琴)