

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021139

高能微波预处理对杉木和白梧桐锯材干燥速率及质量的影响

周凡¹, 曹惠敏¹, 周永东¹, 李善明¹, 高鑫¹, 付宗营¹, 庞小仁², 孟兴宇³

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 浙江升华云峰新材股份有限公司, 浙江德清 313220;

3. 浙江绍兴富得力木业有限公司, 浙江绍兴 312071)



摘要: 利用不同能量密度的高能微波对50 mm厚杉木和白梧桐锯材进行预处理, 分析其对锯材干燥速率和干燥质量的影响。微波预处理后, 两种锯材的干燥均匀度提高, 厚度上的含水率偏差和残余应力值降低, 但干燥速率基本不变。综合考虑锯材的干燥质量、微波预处理过程功率效率和微波预处理锯材表面缺陷情况, 50 mm厚杉木和白梧桐锯材优选微波能量密度分别为168.5、330.2 MJ/m³。

关键词: 微波预处理; 能量密度; 木材; 干燥质量

中图分类号: S791.27; S781.6; TS65 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2022) 04-0051-06

Effect of High-Energy Microwave Pretreatment on Drying Rate and Quality of Chinese Fir and Obeche Lumber

ZHOU Fan¹, CAO Hui-min¹, ZHOU Yong-dong¹, LI Shan-ming¹,
GAO Xin¹, FU Zong-ying¹, PANG Xiao-ren², MENG Xing-yu³

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Zhejiang Shenghua Yunfeng Greenco Co., Ltd, Deqing 313220, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Shaoxing Fudeli Wood Industry Co., Ltd, Shaoxing 312071, Zhejiang, China)

Abstract: High-energy microwave with different energy density was used to treat Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) and Obeche (*Triplochiton scleroxylon*) lumber with 50 mm-thickness. The effects of these treatments on the wood drying rate and drying quality were analyzed. After microwave pretreatment, the drying evenness of two species were improved; the deviation of moisture content in thickness and the residual drying stress value were decreased; while the drying rate remained basically unchanged. Considering the wood drying quality, power efficiency of microwave pretreatment process, and surface defects of pretreated wood, the optimum energy density value was 168.5 MJ/m³ for Chinese fir and 330.2 MJ/m³ for Obeche wood respectively.

Key words: microwave pretreatment; energy density; wood; drying quality

木材微波预处理是利用木材的介质特性与微

波作用产生木材自身的结构及应力等性质变化, 从而有助于木材后续干燥、防腐、阻燃和其他功能改良等的加工利用过程^[1]。由于微波作用物质特有的电磁能量转换机制, 利用其对木材进行预处理兼具即时性、整体性、选择性和高效性。

我国已有学者将微波预处理技术用于木材干

收稿日期: 2021-09-27; 修改日期: 2021-11-23

基金项目: 林业和草原科技成果国家级推广项目“微波处理木材快速浸渍干燥加工技术”(2020133146)。

作者简介: 周凡 (1990—), 女, 助理研究员。Email: zhoufanzju@163.com

通讯作者: 周永东, 男, 研究员。Email: zhouyd@caf.ac.cn

干燥领域，对不同木材采用不同功率的微波预处理后，木材后续的干燥速度均有所提高^[2-3]。还有研究表明采用功率为 0.8 kW 的微波预处理对木材干燥特性影响不显著，因而不改变木材的干燥基准^[4-5]。上述研究均采用实验型微波设备对小试样木材进行预处理，微波辐照的强度和周期式的处理效率均较低。

采用工业型微波设备进行木材高能微波（功率≥20 kW）预处理^[6]，其强度高、瞬时连续，可望达到工业化生产要求。然而，高能微波预处理木材工艺及干燥作用效能有待研究。本研究对杉木和白梧桐两种足尺规格锯材进行高能微波预处理，分析不同能量密度微波预处理对锯材干燥速率和干燥质量的影响，旨在木材微波预处理技术工业规模化应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

杉木（*Cunninghamia lanceolata*）：采自贵州省三穗县款场乡，树龄 27 a，胸径范围 20~30 cm；由于其径级小，加工的锯材多为心边混合材，个别含有髓心，比较接近企业实际应用的锯材状态。锯材规格为 2 000 mm×120 mm×50 mm，初始含水率约 31.1%±7.9%。

白梧桐（*Triplochiton scleroxylon*）锯材：由浙江升华云峰新材股份有限公司提供；加工成弦、径切板，规格为 2 000 mm×120 mm×50 mm，初始含水率约 59.4%±7.4%。

1.2 试验装置

WXD200L 型隧道式微波设备，额定微波功率 200 kW，频率 915±10 MHz，谐振腔尺寸 550 mm×340 mm×280 mm（L×W×H），传送带进给速度 0.6~3 m/min 可调。

HD 74/TA II 型木材干燥试验机，其利用电热锅炉产生 0.6 MPa 的蒸汽，经翅片管式加热器加热、喷蒸管喷蒸加湿，加热、加湿方式与企业生产常用的常规干燥设备一致；采用变频器调节风速，通风方式与企业生产常用顶风机型干燥设备一致。

鼓风干燥箱、电子天平、游标卡尺等。

1.3 试验方法

1) 木材微波预处理：设定传送试材的速度 v ，通过改变设定的微波功率 P_s 来控制微波能量密度（energy density，ED），记录设备实际微波输出功率 P_o 和反射功率 P_r 。微波预处理试验过程参数计算公式如下。

$$ED=3.6\times P_e\times l/v/V$$
 (1)

$$P_e=P_o-P_r$$
 (2)

$$\eta=P_e/P_o\times 100$$
 (3)

其中：ED 为微波能量密度，MJ/m³； P_e 、 P_o 、 P_r 分别为有效微波功率、实际输出功率、反射功率，kW； l 为有效处理区长度，0.5 m； v 为木材传送速度，60 m/h； V 为有效受微波辐照木材体积，0.003 m³； η 为微波功率效率，%。

将杉木和白梧桐试材各随机分为 4 组，每组 14 块，其中 1 组作为对照，分别标记为 S0 和 T0；其余 3 组分别进行不同 ED 下微波预处理。微波预处理 ED 选取以处理过程锯材不产生明显开裂为临界工况进行，具体试验工况见表 1。

表 1 木材微波预处理试验工况
Tab.1 Experiment conditions of the microwave pretreatment process

树种	工况编号	P_s /kW	P_o /kW	P_r /kW	ED/(MJ·m ⁻³)
杉木	S1	20	21.5	4.7	168.5
	S2	30	32.4	8.2	241.3
	S3	40	39.5	9.5	299.3
白梧桐	T1	30	30.9	7.4	235.0
	T2	40	42.2	9.1	330.2
	T3	50	49.9	12.9	370.7

2) 木材干燥：在锯材端部和中间分别截取含水率试片，加工成 900 mm×120 mm×50 mm 的统一规格试件进行干燥试验。将未处理和微波预处理木材码放于干燥机内同时干燥，试验风速平均约 1.8 m/s。干燥装材 48 块，试材端部与干燥机内壁接触，材堆尺寸约 900 mm×800 mm×800 mm（L×W×H），材堆顶部放置不锈钢压重（212.5 kg/m²），材堆外侧边缘与干燥机门框接触。检验板取 16 块，每种工况 4 块，放置于材堆正中心位置。

干燥过程，采用干燥机控制系统，其按设定的干燥基准自动调节干燥过程温湿度参数；当木材含水率达到当前干燥阶段含水率终点时，控制进入下一干燥阶段，直至干燥结束。

杉木的干燥基准参考文献[7-8]制定(表2)。对白梧桐木材首先进行百度试验。由于百度法常用于制定25~30 mm厚锯材干燥基准,而本试验锯材厚50 mm。故参考百度试验结果拟定干燥条件(初期温度60℃,初期温差3~4℃,末期温度85℃)采用更软条件(初期温度55℃,初期温差3℃,末期温度75℃),然后参照LY/T 1068—2012《锯材窑干工艺规程》中阔叶材干燥基准一般编制原则,最终确定白梧桐木材的干燥基准(表2)。

表2 杉木和白梧桐锯材的干燥基准
Tab.2 Drying schedules for Chinese Fir and Obeche
lumber

树种	含水率阶段/%	干球温度/℃	干湿球温差/℃	备注
杉木	预热处理	60	0.5	升温、保温各6 h
	>30	55	3	
	30~25	60	6	
	中间处理	70	2	处理6 h
	25~20	65	10	
	20~15	70	15	
	<15	75	20	
	平衡处理	80	7	近乎恒重时止
	终了处理	80	4	处理6 h
	降温阶段	50	5	延续5 h
白梧桐	预热处理	60	0.5	升温6 h,保温5 h
	>35	55	3	
	35~30	57	5	
	30~25	60	7	
	25~20	65	10	
	20~15	70	14	
	<15	75	20	
	平衡处理	80	7	近乎恒重时止
	终了处理	80	4	处理5 h
	降温阶段	50	5	延续5 h

干燥木材的含水率确定以用途为主,使用地为辅。由于杉木生产中常用于制造细木工板,依据GB/T 5849—2016《细木工板》中含水率为6%~14%的技术要求,同时参照GB/T 6491—2012《锯材干燥质量》中比使用地(浙江)木材平衡含水率(14.4%~17.0%)低2%~3%的原则,确定两种木材的目标含水率为12%~14%。

1.4 性能评价

1) 微波预处理木材水分含量及表面缺陷变化:测量微波预处理前后锯材质量,计算木材失重,表征木材水分减少量;同时观察木材表面缺陷情况。

2) 干燥过程木材含水率:参照LY/T 1068—2012,测定检验板的初始含水率、初始质量和干燥过程质量,计算干燥过程木材的含水率。

3) 木材干燥质量:依照GB/T 6491—2012,检测全部干燥锯材的可见干燥缺陷;检测检验板的平均最终含水率、干燥均匀度、厚度上的含水率偏差及残余应力值。

2 结果分析

2.1 木材微波预处理

2.1.1 微波功率效率

两种木材微波预处理的功率效率,计算结果见图1。

图1显示,随对应设定微波功率的提高,微波预处理实际输出功率增大,有效功率 P_e 和反射功率 P_r 同时增大,微波功率效率 η 也随之变化。 η 是 P_e 和 P_r 变化的综合反映, P_e 与木材的密度、含水率及纹理方向等介电特性相关因素对微波能实际吸收的影响有关, P_r 由微波腔体额定尺寸与试材规格间存有空隙决定。从微波能量有效利用角度来讲,在相同微波谐振腔、微波泄漏防护条件下,系统总效率主要取决于 η 。本试验条件下,杉木S1组 η 值最高(78.3%),S2组(74.6%)与S3组(75.9%)接近;白梧桐锯材T1、T2组接近,T3组最低。微波功率设定较低时,反射功率的比例较小,可能木材的实际吸收较多,导致效率值较高。

2.1.2 木材水分含量及表面缺陷

1) 木材水分含量

图2显示,微波预处理过程,随着ED升高,两种锯材的水分含量均减小,水分减少量 Δm 均增大,两种锯材单位ED对应的水分减少量 $\Delta m/ED$ 也增加。ED是决定木材内部温度的主要原因,较高ED时木材升温较快^[9]。因此,采用较高ED时木材中更多的水分脱除,但同时微波能除作用于木材的脱水外,还用于木材的整体温升。杉木初始含水率较低,从而使脱除单位水分所需的能量增加, $\Delta m/ED$ 增幅变缓;而白梧桐木材由于初始含水率较高,微波预处理过程中,更多水分吸收微波能而脱除使得其 $\Delta m/ED$ 仍增加。

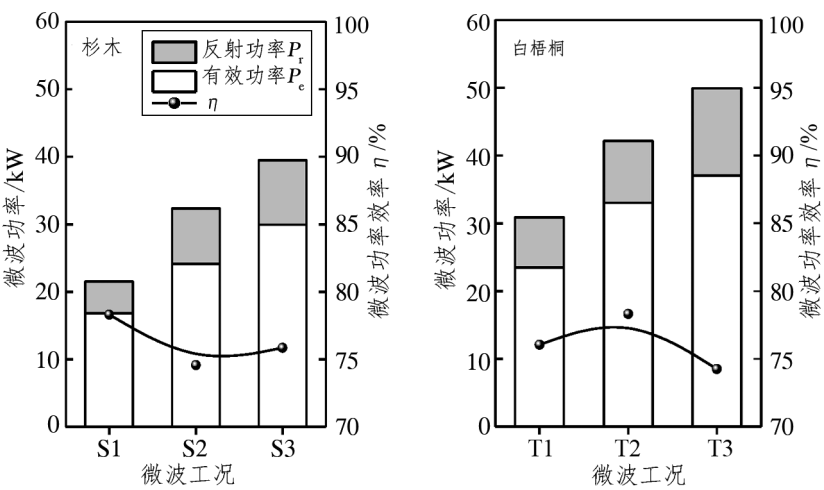


图1 木材微波预处理过程功率效率

Fig.1 Power efficiency of the microwave pretreatment process

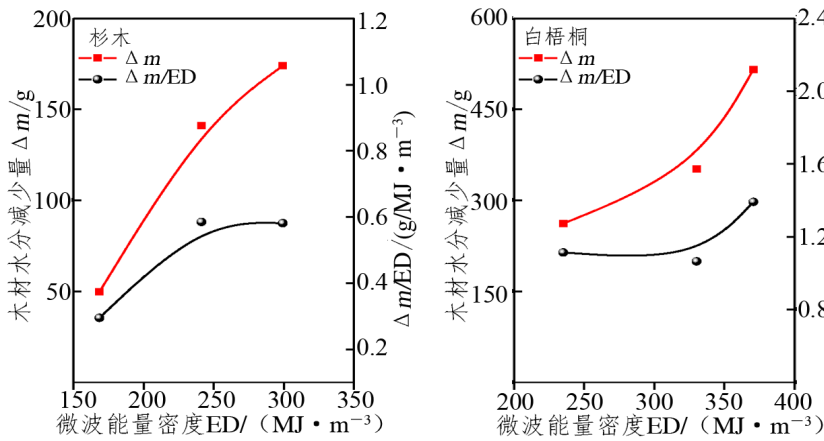


图2 微波预处理木材水分减少量与能量密度关系

Fig.2 Relationship between moisture reduction and energy density during microwave pretreatment process

在ED水平相近时(235.0~299.3 MJ/m³),杉木的 $\Delta m/ED$ 值低于白梧桐木材(图2),如杉木S2(ED=241.3 MJ/m³)和白梧桐T1(ED=235.0 MJ/m³)时的 Δm 分别为141.17 g和261.79 g。微波预处理时,杉木的初始含水率更低以及渗透性更差,导致其单位ED对应的水分脱除质量更少。

2) 木材表面缺陷

微波预处理木材的表面缺陷见表3。

表3 微波预处理杉木和白梧桐锯材的表面缺陷情况

Tab.3 Surface defects of microwave-pretreated Chinese Fir and Obeche lumber

树种	工况	表面缺陷情况	树种	工况	表面缺陷情况
杉木	S1	无	白梧桐	T1	无
	S2	无		T2	极少数细微表裂
	S3	少数细微表裂		T3	少数细微表裂

对于杉木, S1和S2组试材均未发现表裂, S3组约3~4块试材表面有少量细微裂纹。对于白梧桐锯材, T1组试材无表裂现象, T2组约1~2块试材有少量细微表裂, T3组部分试材有少量细微表裂。采用微波预处理, ED越高, 木材表面出现开裂缺陷的风险越大。

2.2 木材干燥

2.2.1 干燥曲线

杉木和白梧桐锯材的干燥过程曲线见图3。

两种木材的初始含水率均是微波预处理组小于对照组, 原因是微波预处理过程中木材中部分水分受微波辐照蒸发散失。干燥过程中, 不同工况下的两种锯材, 在各干燥阶段的含水率曲线随干燥温度的变化趋势均相似, 木材的含水率变化速率接近。对于人工干燥, 干燥介质的温度和相对湿度调节, 对干燥速度具有决定作用^[10]。本试验条件下, 微波预处理前后两种木材的干燥速率差别不大, 干燥过程中木材含水率的变化主要依赖于干燥介质的状态参数调节。

2.2.2 干燥质量

两种锯材的干燥质量见表4。

表4显示, 杉木平均最终含水率指标均低于14%, 满足GB/T 5849—2016中细木工板等产品的一般技术要求, 同时与使用地(浙江)木材平衡含水率的要求也相适应; 微波预处理各组间接近, 但均小于对照组。

干燥均匀度、厚度上的含水率偏差、残余应力值指标, 微波预处理组均小于对照组, 且以S1组值整体最小。外观干燥质量指标, 微波组以S1整体最小, 与对照组比, 顺弯度、横弯度、扭曲度更小, 但翘弯度更大。此外, 各组中仅个别试材产生由髓心延伸的开裂。

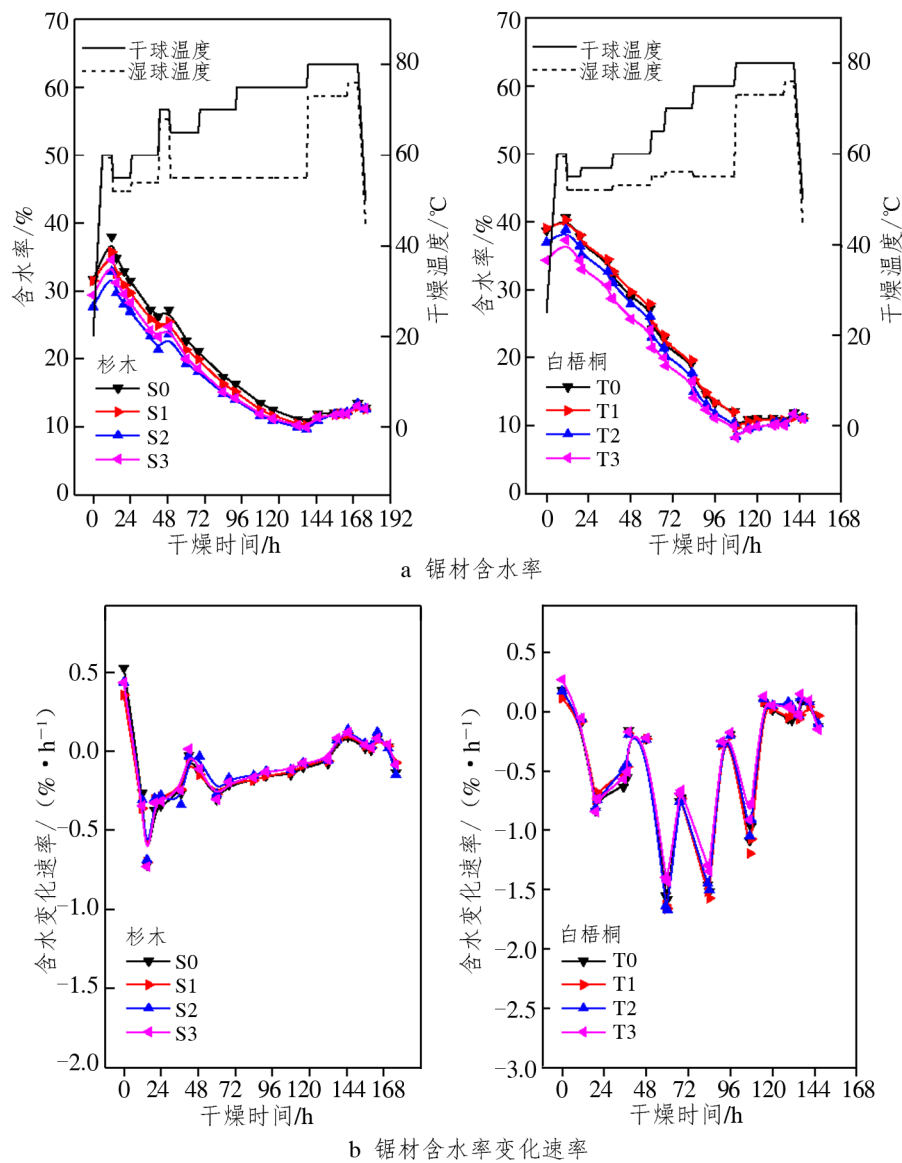


图3 微波预处理杉木和白梧桐木材干燥曲线

Fig.3 Drying curves for microwave-pretreated Chinese Fir and Obeche lumber

白梧桐锯材的平均最终含水率、残余应力值指标，微波预处理组均小于对照组，微波各组间接近。干燥均匀度、厚度上的含水率偏差指标，微波预处理组小于对照组，且ED越高值越低。外观干燥质量指标，微波组以T1最小，与对照组比，顺弯度、扭曲度较小，但横弯度、翘弯度较大。各组试材均未出现干燥开裂。

考虑各干燥质量指标的权重，优先为干燥均匀度、厚度上的含水率偏差和残余应力值，其次为平均最终含水率和外观弯曲度。总体而言，两种木材的微波预处理组的干燥质量整体优于对照组。微波预处理过程中，木材内部产生物理、化学应力松弛，使木材中应力释放、孔隙率提高，从而改善木材干燥质量^[11-12]。结合前面木材干燥曲线可知，在干燥速度接近时，微波预处理可提高两种锯材的干燥质量。

另外，杉木采用较小ED和白梧桐木材采用较大

表4 微波预处理杉木和白梧桐锯材的干燥质量

Tab.4 Drying quality of microwave-pretreated Chinese Fir and Obeche lumber

指标/%	杉木				白梧桐			
	S0	S1	S2	S3	T0	T1	T2	T3
平均最终含水率	13.51	12.57	12.61	12.76	12.21	12.06	12.13	11.90
干燥均匀度	±9.01	±4.60	±4.69	±5.61	±1.69	±1.51	±1.15	±0.89
厚度上的含水率偏差	5.99±4.32	2.58±0.87	3.27±3.41	2.95±1.94	0.61±0.66	0.60±0.23	0.21±0.32	0.11±0.35
残余应力值	0.85±1.06	0.28±0.13	0.52±0.33	0.55±0.26	0.42±0.19	0.25±0.07	0.25±0.24	0.26±0.13
顺弯度	0.11±0.05	0.10±0.04	0.11±0.09	0.11±0.03	0.11±0.11	0.04±0.02	0.09±0.08	0.12±0.10
横弯度	0.15±0.05	0.11±0.05	0.12±0.04	0.10±0.04	0.06±0.02	0.13±0.19	0.23±0.15	0.20±0.07
翘弯度	0.40±0.24	0.42±0.16	0.46±0.22	0.47±0.20	0.01±0.03	0.08±0.05	0.13±0.05	0.08±0.07
扭曲度	0.14±0.10	0.11±0.09	0.16±0.16	0.18±0.11	0.20±0.17	0.15±0.15	0.20±0.13	0.21±0.14

ED时,干燥质量整体更好。两种木材对不同ED作用效能响应不同,推测与其密度、初始含水率和渗透性等自身性质有关。微波预处理对木材的改性机制主要是微波使高含水率木材内部集聚蒸汽压,在蒸汽压的冲击下木材各级组织结构发生改变^[11,13]。杉木由于其含水率更低和渗透性可能较差,ED较小时水分蒸发能量小、逸出木材慢;ED较大时水分逸出较快。白梧桐锯材,其含水率更高和渗透性较好,各ED条件下木材中水分都能较快逸出,且在较高ED时蒸汽总量增多导致积聚充分。

2.3 木材微波预处理能量密度优选

微波处理木材的效果取决于ED^[6]。综合考虑木材干燥质量、微波预处理过程功率效率和微波预处理木材表面缺陷情况,优选木材微波预处理ED,改善木材干燥性能的同时,尽可能减少微波预处理过程能耗及木材表面缺陷风险。ED优选工况如表5所示。总体而言,杉木S1最优(ED=168.5 MJ/m³);白梧桐木材T2最优(ED=330.2 MJ/m³)。

表5 木材微波预处理能量密度优选

Tab.5 Optimization of energy density for microwave pretreatment process

树种	杉木			白梧桐		
	1级	2级	3级	1级	2级	3级
优先级	A	S1	S2/S3	T3/T2	T1	
因子	B	S1	S3/S2	T2/T1	T3	
	C	S1/S2	S3	T1	T2	T3
优选	S1			T2		

优先级:指定各级仅代表优选顺序为1级>2级>3级。因子:A-锯材干燥质量,B-微波预处理过程功率效率,C-微波预处理锯材表面缺陷。

3 结论

1) 高能微波预处理对50 mm厚杉木和白梧桐锯材的干燥速率影响不明显,但可提高两种锯材的干燥均匀度,降低厚度上的含水率偏差和残余应力值,提高锯材的干燥质量。

2) 在本试验条件下,综合锯材干燥质量、微波预处理过程功率效率和微波预处理木材表面缺陷情况,50 mm厚杉木、白梧桐宜分别选用168.5、330.2 MJ/m³能量密度微波预处理。

参考文献:

- [1] 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):20-24,29.
- 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): 20-24, 29.
- [2] 张耀丽,苗平,庄寿增,等.微波、冷冻预处理对改善尾巨桉木材干燥性能的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(2):61-64.
- ZHANG Y L, MIAO P, ZHUANG S Z, et al. Improving the dry-ability of *Eucalyptus* by pre-microwave or pre-freezing treatment[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2011, 35(2): 61-64.
- [3] 王喜明,薛振华,石丽慧,等.微波改性木材的初步研究[J].木材工业,2002,16(6):16-19.
- WANG X M, XUE Z H, SHI L H, et al. Preliminary study on microwave modified wood[J]. China Wood Industry, 2002, 16(6):16-19.
- [4] 江泽慧,王喜明.桉树人工林木材干燥与皱缩[M].北京:中国林业出版社,2003:42-50.
- [5] 李贤军,伊松林.微波预处理对三种人工林木材干燥特性的影响[J].林产工业,2008,35(4):32-34.
- LI X J, YI S L. Effects of microwave pretreatment on drying characteristics of three species of plantation wood[J]. China Forest Products Industry, 2008, 35(4):32-34.
- [6] 李善明,邢雪峰,林兰英,等.高能微波预处理辐射松木材的弯曲性能研究[J].木材工业,2020,34(5):1-6.
- LI S M, XING X F, LIN L Y, et al. Effect of high energy density microwave pretreatment on bendability of *Radiata Pine (Pinus radiata)* wood[J]. China Wood Industry, 2020, 34(5):1-6.
- [7] 周永东,李晓玲.人工林杉木高温干燥与常规干燥的比较研究[J].北京林业大学学报,2005,27(S1):18-21.
- ZHOU Y D, LI X L. Comparison of high-temperature drying and conventional drying of Chinese fir lumber[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(S1):18-21.
- [8] 吕建雄,林志远,蒋佳荔,等.不同干燥方法对杉木人工林木材浸注性的影响[J].林业科学,2006,42(10):85-90.
- LYU J X, LIN Z Y, JIANG J L, et al. Effect of different drying methods on the liquid impregnation of Chinese fir plantation wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(10):85-90.
- [9] 徐恩光,林兰英,李善明,等.微波处理对樟子松木材化学组分含量影响[J].木材工业,2020,34(4):31-37.
- XU E G, LIN L Y, LI S M, et al. Effect of microwave treatment on chemical composition of Mongolian scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.) [J]. China Wood Industry, 2020, 34(4):31-37.
- [10] 李梁,张璧光,伊松林.材性法制定木材干燥基准初探[J].木材工业,2006,20(5):42-44.
- LI L, ZHANG B G, YIN S L. Preliminary study on establishing a drying schedule based on wood properties [J]. China Wood Industry, 2006, 20(5):42-44.
- [11] 李贤军,傅峰,周永东,等.木材微波改性技术研究进展[J].材料导报,2007,21(11A):295-297,308.
- LI X J, FU F, ZHOU Y D, et al. Advances in the research of wood microwave modification[J]. Materials Reports, 2007, 21(11A): 295-297, 308.
- [12] 徐恩光,林兰英,李善明,等.微波处理对樟子松木材等温吸湿特性的影响[J].木材科学与技术,2021,35(1):20-25.
- XU E G, LIN L Y, LI S M, et al. Effect of microwave treatment on moisture sorption isotherm of Mongolian Scotch Pine[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(1): 20-25.
- [13] 周永东,Grigory Torgovnikov, Peter Vinden,等.微波预处理加速阔叶树材干燥的技术分析[J].木材工业,2011,25(1):23-25.
- ZHOU Y D, Grigory T, Peter V, et al. Technological analysis of microwave pretreatment for fast drying of hard wood[J]. China Wood Industry, 2011, 25(1):23-25.

(本文编校 孟凡丹)