

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。

微波处理对樟子松木材化学组分含量影响

徐恩光, 林兰英, 李善明, 彭立民, 傅峰

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 微波处理对木材化学组分含量影响的研究有助于了解木材微波处理机理。以樟子松为原料, 使用隧道式微波设备处理木材, 在试验条件下, 木材中心最高温度可达183℃; 微波功率密度和初含水率及二者的交互作用, 对樟子松木材中三大素成分含量变化具有显著影响。处理后木质素相对含量增加, 纤维素和半纤维素含量降幅小于5%; 冷水抽提物、苯醇抽提物和1%NaOH抽提物含量降低; 处理材pH值升高, 但仍处于酸性范围; 灰分含量保持不变。

关键词: 微波膨化木; 处理温度; 木材组分含量; 抽提物含量

中图分类号: S781; S791.253; TS65; TN015 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2020) 04-0031-07

Effect of Microwave Treatment on Chemical Composition of Mongolian Scotch Pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)

XU En-guang, LIN Lan-ying, LI Shan-ming, PENG Li-min, FU Feng

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

Abstract: In this research, Mongolian scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.) was used as raw material to prepare microwave puffed wood. During the treatment, the maximum temperature at the center of the wood reached 183℃. Microwave power density and initial moisture content and the interaction of these two factors showed a significant effect on the content changes of the three major components in the samples. The relative content of lignin increased compared with untreated wood, while the contents of cellulose and hemicellulose decreased less than 5%. The contents of cold water extractive, benzyl alcohol extractive, and 1% NaOH extractive of treated wood samples decreased with the escaping of water vapor during the treatment. The pH value of the puffed wood samples increased but the wood stayed acidic. The ash content remained unchanged.

Key words: microwave puffed wood; temperature; wood composition content; extractive content

收稿日期: 2019-12-05; 修改日期: 2020-06-23

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); 国家林草局林业科学技术推广项目“基于高能微波处理的节材高效利用技术”([2019]42号); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“基于微波膨化木材的弯曲特性和机制研究”(CAFYBB2018SY030); 浙江省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与示范”(2017SY15)。

作者简介: 徐恩光(1988—), 男, 博士研究生。Email: enguangxu@foxmail.com

责任作者: 林兰英, 副研究员。Email: linly@caf.ac.cn

使用高功率隧道式微波处理设备,通过微波工艺调控可以获得不同膨化等级的微波膨化木,按照体积膨胀率、裂隙面积比例、裂隙数量、浸渍增重率增加量等指标将处理效果分为I、II、III型,处理材渗透性显著提高,可用于木材改性、木质功能材料制备等领域^[1-3]。目前木材的微波处理研究多集中在处理工艺优化、处理木材的结构变化和渗透性评价等方面^[4],关于处理木材的化学组分变化研究较少。微波处理一般采用窑式处理工艺,处理时间长,木材组分变化较大。而连续微波处理工艺使用隧道式微波设备处理木材,可连续处理,且时间短,木材组分变化较小。

木材材性与其化学组分密切相关,例如热处理木材的表面硬度提高、吸湿性降低、尺寸稳定性增加等,与其半纤维素和纤维素降解有关^[5-6]。除了三大素组分外,木材抽提物是其气味的主要来源,还影响木材的pH值、渗透性、颜色、机械加工性能和胶合、涂饰质量^[7-8],与木材的强度、燃烧性能之间也存在一定关系。木材的酸碱性影响其涂饰、胶合以及利用方式。在木材改性过程中,木材的化学组分变化与树脂浸渍改性效果、乙酰化程度,以及改性木材的吸湿特性等密切相关。通过对化学组分、抽提物和酸碱性变化的研究,能够反映微波处理对处理材材性的影响。

笔者以樟子松为研究对象,基于I、II、III型微波膨化木制备工艺^[1-3],选用不同含水率和微波功率密度(单位时间内设备输出的微波功率除以单位时间处理的木材体积)对木材进行微波辐射处理,使用湿化学法对微波处理后樟子松木材的主要化学组分含量进行测量,分析连续微波处理工艺对木材化学组分含量的影响,探究木材微波膨化机理,为相关技术的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.),产地为绥芬河林场,原木长度大于4.0 m,胸径300 mm~400 mm,生长轮数量在30个以上。微波处理材尺寸50 mm×80 mm×500 mm,所有试样源于同一株树。

1.2 试验设备

1) 木材微波处理设备 WX20L型连续式木材微波处理设备,微波频率915 MHz,额定微波输出功率1~20 kW,谐振腔长度2 m,左右各有2.6 m长的抑制段腔体,传送速度在0.3~3 m/min范围内连续可调。

2) 光纤式温度传感器 使用OTG-MPK8型光纤温度传感器测量处理过程中木材内部的温度变化,使用TempSens多通道信号解调器对测量数据进行收集与记录。光纤温度测量范围-20℃~+250℃,测量精度0.01℃,反应延时小于500 ms,传感器探头直径0.81 mm。

1.3 试验方法

试验过程中,忽略微波输出功率波动与反射损耗,固定木材处理速度为1.3 m/min,相应的处理时间约100 s。选取20%、30%、40%三种初含水率,20、40、60、80 kWh/m³四个微波功率密度,比较不同条件处理木材化学组分含量变化,每组试验重复5次。木材从设备抑制段取出后,迅速放入流水中冷却至25℃,避免由于热堆放引起的木材组分变化,冷却后置于通风处气干。

1.4 性能检测

1.4.1 木材内部温度测定

用电钻在木材中心位置钻取直径为2 mm的小孔,将光纤温度传感器插入打好的孔后,使用环氧树脂将测量孔密封,避免由于蒸汽泄漏引起误差。木材进入设备进料口抑制段时开始记录温度,测温时间间隔1.4 s。

1.4.2 木材化学组分测定

从相同工艺条件下的处理材中心位置取10 mm×10 mm×500 mm的小木条,磨成40~60目的粉末后均匀混合。

综纤维素含量、酸不溶木质素含量、多戊糖含量、冷水抽提物含量、1%NaOH抽提物含量、苯醇抽提物含量、灰分含量和pH值,分别按照GB/T 2677.10—1995《造纸原料综纤维素含量的测定》、GB/T 2677.8—1994《造纸原料酸不溶木质素含量的测定》、GB/T 2677.9—1994《造纸原料多戊糖含量的测定》、GB/T 2677.4—1993《造纸原料水抽出物含量的测定》、GB/T 2677.5—1993《造纸原料1%氢氧化钠

抽出物含量的测定》、GB/T 2677.7—1981《造纸原料苯醇抽出物含量的测定》、GB/T 2677.3—1993《造纸原料灰分的测定》、GB/T 6043—2009《木材 pH 值测定方法》进行测定。

2 结果与讨论

2.1 微波处理过程中试材内部温度变化

图 1 是不同微波功率密度和含水率条件下樟子松试材中心位置的温度变化情况。

微波功率为 20 kWh/m^3 时，三个含水率条件下试材中心最高温度都在 100°C 左右，说明此时微波功率密度是决定木材内部温度的主要原因。

微波功率密度大于 40 kWh/m^3 后，试材内部温度呈现升温、恒温和后升温三个阶段。在升温阶段，低含水率或高微波功率密度能带来较快的升温速度。试材内部温度达到 100°C 左右时进入恒温阶段，恒温阶段的时间长短与微波功率密度有关。

微波功率密度为 40 kWh/m^3 时，前期升温速率较慢，试材内部汽化均匀，恒温阶段较短；微波功率密度为 60 kWh/m^3 时，升温速度快，恒温阶段较长；微波功率密度为 80 kWh/m^3 时，微波能充足，恒温阶段不明显。持续馈入微波能，试材内部水分汽化，温度继续升高，进入后升温阶段。相同含水率条件下，微波功率密度越高，试材内部最终温度越高，在微波能充足时，较高的含水率能够提供更大的蒸汽量和更高的温度。微波功率密度为 80 kWh/m^3 时，20%、30%、40%三个含水率条件下试材内部的最高温度分别为 127°C 、 166°C 、 183°C 。

2.2 微波处理后试材三大素含量变化

2.2.1 半纤维素含量变化

采用多戊糖含量来计算样品中的半纤维素含量。从图 2a 可以看到，微波处理后试材中的半纤维素含量受微波功率密度影响，随着微波功率密度的增加不断减少，相同微波功率密度条件下，初含水

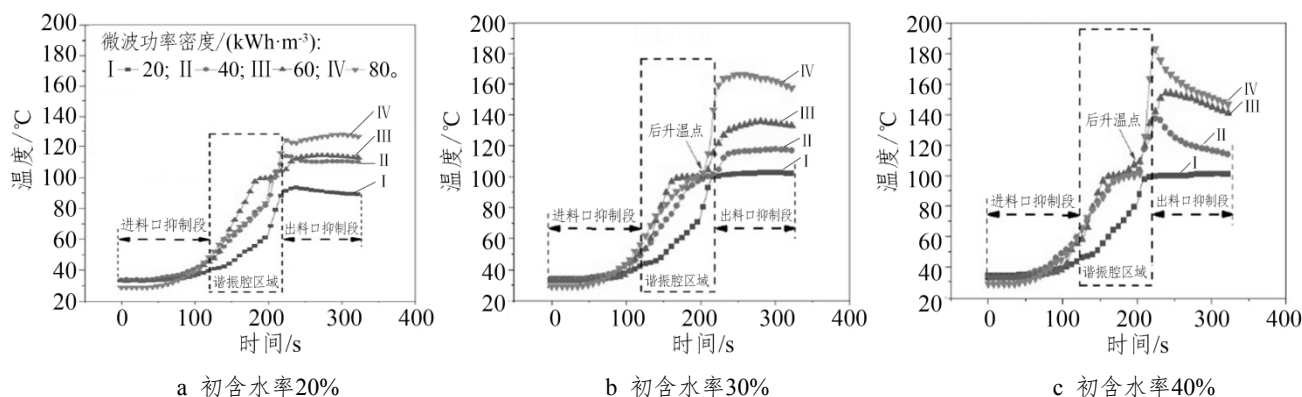


图 1 不同含水率樟子松试材在各微波功率条件下内部温度变化情况

Fig.1 Internal temperature changes of Mongolian scotch pine wood samples with different moisture content under various microwave power densities

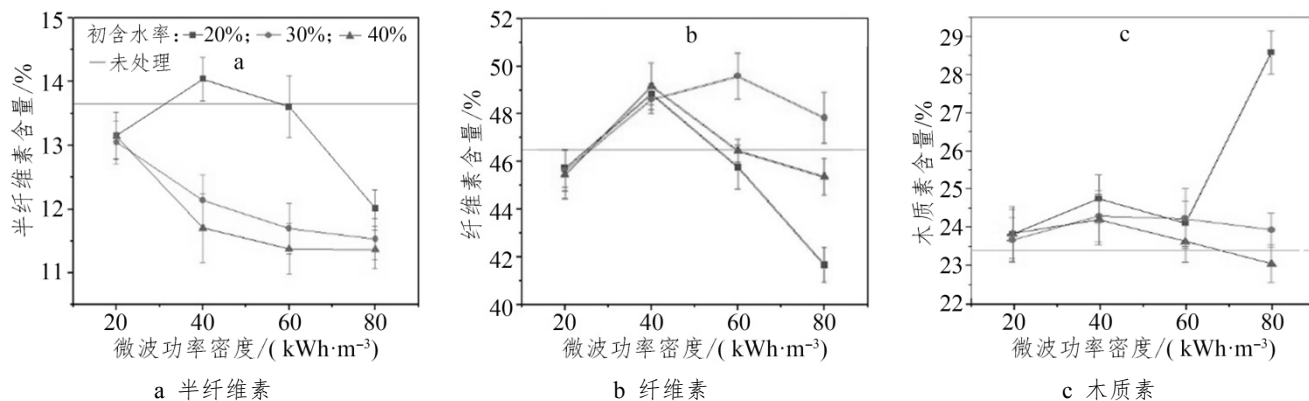


图 2 樟子松微波处理材化学组分含量变化

Fig.2 Chemical composition changes in microwave treated Mongolian scotch pine wood samples

率增加,半纤维素含量降低。在30%和40%含水率条件下,微波功率密度越大,半纤维素减少量越明显,分析原因是在微波能充足的情况下,初含水率越高木材内部温度越高,促进了半纤维素组分的分解。20%初含水率,60 kWh/m³和80 kWh/m³处理材的半纤维素含量,比对照未处理材降低了0.05%和1.63%,说明在低含水率、低温条件下,微波处理同样会使木材中的半纤维素分解。20%含水率、40 kWh/m³时,半纤维素含量升高,分析原因是微波作用下木材热解产生糠醛^[9-10],造成的测量误差。

2.2.2 纤维素含量变化

从图2b可以看出,三个初含水率条件下,试材中的纤维素含量变化趋势一致,受微波功率密度影响较大。随微波功率密度提高,处理材纤维素含量变化呈现降低-升高-降低的变化趋势,其中低含水率、低微波功率和高含水率、高微波功率处理后的纤维素含量相近,说明低含水率时主要是木材分子吸收微波能,纤维素分子链体积较大、极性高,在微波作用下旋转分解,即受微波的非热效应影响明显,而高含水率、高微波功率能够提供足够的温度达到木材湿热处理的效果,但具有一定的滞后性^[11]。

在20 kWh/m³微波功率密度下,三种初含水率试材的纤维素含量降幅接近,在0.79%~1.06%范围内。微波功率密度增加到40 kWh/m³,三个含水率下木材中纤维素含量升高,分析原因是此时木材内部温度在110~138℃,半纤维素的分解速度较快,引起了纤维素含量的相对增加。

进一步增加微波功率密度到60 kWh/m³和80 kWh/m³,在20%初含水率时,纤维素的降解量达到了最大值4.85%,但此时木材内部温度约100℃,说明主要是微波的非热效应影响,即纤维素分子在微波作用下发生了频繁的取向运动,分子间的摩擦导致纤维素分子结构的改变^[12-13]。40%初含水率能够提供足够的蒸汽量用于木材升温,60 kWh/m³和80 kWh/m³时试材内部温度分别为154℃和183℃,在微波和湿热的共同作用下,纤维素含量降低了1.15%。30%含水率时,木材内部水分吸收了大量的微波能,但又不足以提供足够的蒸汽量加热木材,木材内部温度较低,纤维素含量在80 kWh/m³时才开始下降。

2.2.3 木质素含量变化

从图2c可以看出,三个初含水率条件下,试材的木质素含量变化趋势一致,随着微波功率密度增加先升高又降低,但始终高于未处理材,最大增加量约2%。在同一微波功率密度条件下,不同初含水率试材的木质素含量存在微量差异。微波处理时,在微波和热作用下,木质素自身会发生交联、裂解和缩聚,进一步增加了木质素的稳定性^[14],木质素相对含量的增加证明了微波处理时其他组分的分解。在处理过程中,木材中的碳水化合物在加热条件下生成“类似木质素”的不饱和非挥发性物质^[15],微波的热效应还会使木质素发生二苯基甲烷缩聚反应^[16],这些都促进了木质素相对含量的增加。在20%、80 kWh/m³条件下,样品中的木质素含量异常增加,分析原因是该条件下木材炭化所产生的无法被酸溶解的物质都被当作木质素组分抽提了出来,影响测量结果的准确性^[17]。

为了便于比较,将三大素含量变化转化为损失率,见表1。从表中可以看到,在各个工艺条件下,半纤维素的最高降解量为2.28%,发生在高微波功率密度、高含水率条件下;纤维素的最高降解量是4.09%,发生在高微波功率密度、低含水率条件下;木质素在整个处理过程中相对含量增加,整体差异不大,樟子松试材的三大素含量变化在5%以内,说明连续微波处理会引起木材组分变化。

表1 樟子松微波处理材三大素成分含量损失率

Tab.1 Loss rate of three main elements in Mongolian scotch pine microwave treated wood

功率密度/ (kWh·m ⁻³)	半纤维素			纤维素			木质素		
	20%	30%	40%	20%	30%	40%	20%	30%	40%
20	0.50	2.08	0.50	0.79	0.40	1.06	-0.44	0.72	-0.45
40	-0.39	1.51	1.95	-2.33	-2.10	-2.65	-1.36	-0.90	-0.82
60	0.05	1.95	2.27	3.97	-3.08	0.05	-0.72	-0.84	-0.24
80	1.63	2.12	2.28	4.09	-1.32	1.15	-5.20	-0.54	0.35

可重复双因素方差分析表明,在 $\alpha=0.01$ 水平下,微波功率密度和初含水率对樟子松木材中三大素成分含量变化具有显著影响,并且两者的交互作用也对三大素含量变化具有显著影响。在此基础上,分别对微波功率密度和木材初含水率的影响进行多重比较,结果见表2。

表2 樟子松微波处理材三大素损失率多重比较

Tab.2 Multiple comparisons of the three major elements loss rates in Mongolian scotch pine microwave treated wood

因子	水平	半纤维素含量		纤维素含量		木质素含量	
		平均值/ %	差异 水平	平均值/ %	差异 水平	平均值/ %	差异 水平
微波 功率密度	20	1.026	C	0.747	B	-0.059	A
	40	1.018	C	-2.350	D	-1.025	C
	60	1.413	B	0.323	C	-0.605	B
	80	2.009	A	1.305	A	-1.798	D
初含水率	20	0.445	C	1.637	A	-1.932	B
	30	1.908	A	-1.521	C	-0.393	A
	40	1.746	B	-0.096	B	-0.290	A

在试验条件下,微波功率密度对半纤维素含量的影响主要体现在 80 kWh/m³ 时半纤维素发生明显降低;微波功率对纤维素含量有明显影响,随着微波功率密度的增加,纤维素含量降低;木质素组分随微波功率密度增加差异不显著,说明木质素在微波下的稳定性较好。初含水率对樟子松处理材半纤维含量的影响主要在 30%初含水率条件下,20%低含水率对纤维素含量的影响效果显著。

总结发现樟子松半纤维素组分主要受高功率密度和初含水率的影响,纤维素组分主要受高微波功率密度和低含水率影响,与前文分析结果一致。

2.3 微波处理对试材抽提物含量的影响

木材的冷水抽提物中主要含无机盐类、糖、单宁及色素等,微波处理后木材的冷水抽提物含量均小于未处理材,见图 3a。微波处理过程中有大量水蒸气产生,冷水抽提物会随着水蒸气逸出木材。冷水抽提物的变化程度和处理温度与蒸汽量密切相关,

受试材初含水率和微波功率密度的综合影响,随微波功率密度的增加,木材内部的温度升高,蒸汽量增加,冷水抽提物含量降低;含水率越高,能够提供的蒸汽量越大,冷水抽提物含量越低。在 80 kWh/m³ 时冷水抽提物含量出现了一定的回升,主要是该工艺条件下木材内部温度较高,木材分解速度加快,但同时木材内部蒸汽量增加,因此冷水抽提物含量增幅有限。

木材的苯醇抽提物以中性树脂为主,含有较多的双键化合物。三个初含水率条件下,试材中的苯醇抽提物含量主要受微波功率密度影响,20 kWh/m³ 时,木材组分分解^[18],抽提物含量增加;微波功率密度为 40 kWh/m³ 时,木材处理温度高于 100 ℃,水蒸气逸出过程中携带着部分抽提物组分,导致苯醇抽提物含量减少^[19];微波功率密度大于 60 kWh/m³ 时,木材温度高于 110 ℃,木材分解速度加快^[20],苯醇抽提物含量增加,变化情况见图 3b。

1%NaOH 溶液能溶解冷水、苯醇抽提物外,还能溶出部分木质素、聚戊糖等木材中的低中级碳水化合物。图 3c 是不同处理条件下 1%NaOH 抽提物含量变化。在 30%和 40%的初含水率条件下,1%NaOH 抽提物含量变化与苯醇抽提物含量变化规律相似,主要受微波功率密度影响,都是在 20 kWh/m³ 时,蒸汽量少,木材分解导致抽提物含量增加;40 kWh/m³ 时,木材分解速度小于蒸汽产生速度,抽提物含量减少;大于 60 kWh/m³ 时,木材分解速度加快,抽提物含量增加。在 20%含水率时木材内部的 1%NaOH 抽提物含量在 40 kWh/m³ 条件下显著降低,随着微波功率密度增加变化量小于 1.4%,波动幅度不大,

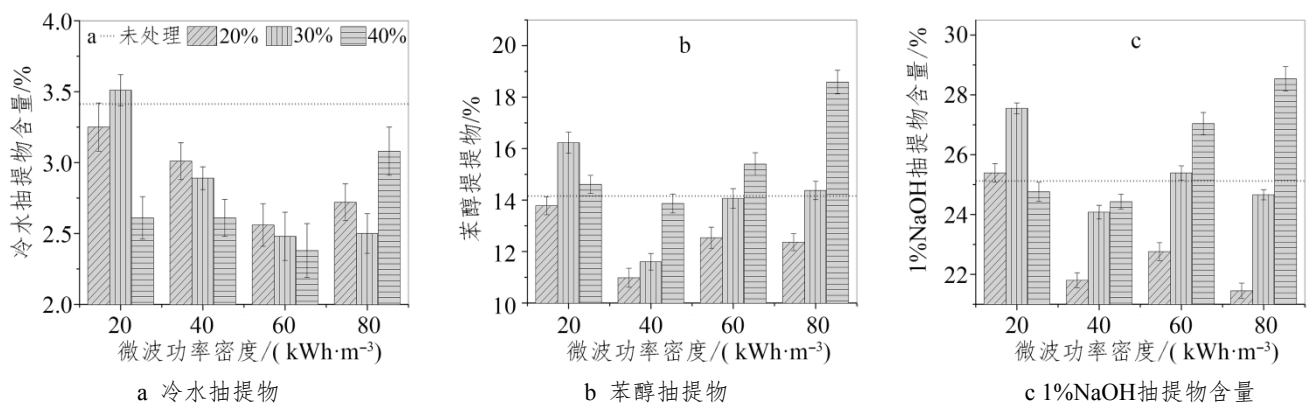


图3 樟子松微波处理材抽提物含量变化

Fig.3 Changes in wood extractive content in microwave treated Mongolian scotch pine wood samples

分析原因是虽然提高了微波功率密度,但20%的含水率不足以提供足够的蒸汽量用以木材升温,木材在低含水率、高微波功率密度下发生了炭化。

2.4 微波处理工艺对木材灰分和酸碱性影响

不同微波功率密度条件下处理樟子松试材的灰分和酸碱性测试结果,如图4所示。

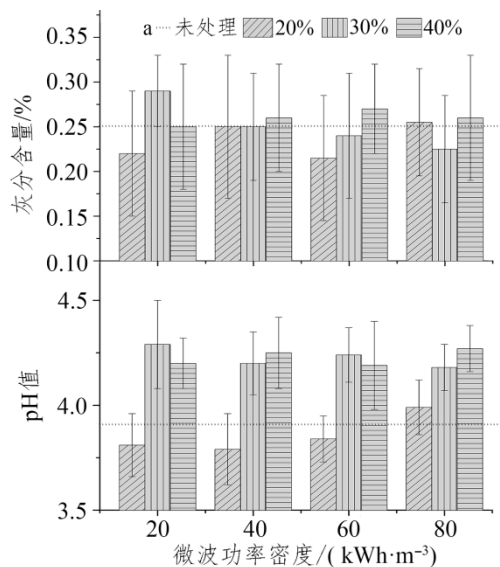


图4 樟子松微波处理材灰分和pH值变化

Fig.4 Changes of ash content and pH value of Mongolian scotch pine wood after microwave treatment

木材中的灰分要由钙、钾、镁的碳酸盐、磷酸盐、硅酸盐等组成,占绝干木材质量的0.03%~0.44%,微波处理后木材内部灰分含量变化在-0.03%~0.01%之间(图4a),说明在高能瞬时微波处理并不会影响木材内部的灰分含量,在后续研究中可忽略。

图4b是微波处理后木材的pH值变化情况。同一含水率下,木材的pH值受微波功率密度影响不大。30%和40%初含水率条件下,微波处理后木材的pH值都增加了0.3~0.4;初含水率20%时,20、40、60 kWh/m³时木材的pH值比对照未处理材低0.1,在80 kWh/m³时略高于未处理材。木材的酸性主要来自于木材抽提物中的树脂酸、脂肪酸等有机酸,半纤维素的糖醛酸和乙酰基,纤维素的羟基和木质素的弱酸性基团^[21],微波处理后樟子松试材的抽提物含量减少,半纤维素和纤维素组分分解,这些酸性组分的减少,导致其pH值升高,但各个工艺微波处理后试材pH值仍处于酸性范围,对后续胶合和涂饰等工艺的影响不大。

3 结论

1) 连续微波处理时木材内部温度主要受微波功率密度影响,具有升温、恒温和后升温三个阶段,高微波功率密度可以带来较快的升温速度和更高的温度。在本试验条件下,樟子松试材中心温度最高可达183℃。

2) 在本试验范围内,微波功率密度和初含水率因素以及两者的交互作用,对樟子松试材中三大素成分含量变化均具有显著影响。微波处理后樟子松的木质素相对含量增加,纤维素和半纤维素最大降解量<5%,冷水抽提物含量、苯醇抽提物含量和1%NaOH抽提物含量均减少。微波处理对试材的灰分含量没有影响,处理后试材pH值略高于未处理材,但仍处于酸性范围。

3) 连续微波处理时间短,处理后试材的化学组分含量没有发生明显变化,需要进一步研究微波处理后木材各组分的分子结构和晶体结构变化情况,在后续微波干燥、微波预处理与微波膨化应用中应考虑微波处理对木材结构与孔隙率的影响。

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 modification technology and its applications [J]. China Wood Industry, 2020, 34(1): 20-24, 29.
- [2] 傅峰,林兰英,周永东,等.一种木材的膨化方法及其制备的膨化木材[P].北京:CN108340462A,2018-07-31.
- [3] Q/FDL 001-2017, 膨化基材[S].
- [4] 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,2014,30(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 Microwaves, 2014, 30(4): 90-96.
- [5] 顾炼百,丁涛,江宁.木材热处理研究及产业化进展[J].林业工程学报,2019,4(4):1-11.
GU L B, DING T, JIANG N. Development of wood heat treatment research and industrialization[J]. China Forestry Science and Technology, 2019, 4(4): 1-11.
- [6] 杨昇,陈媛,晏婷婷,等.热处理对进口辐射松木材化学性质的影响[J].木材工业,2019,33(5):44-48.
YANG S, CHEN Y, YAN T T, et al. Effect of heat-treatments on chemical properties of imported *Pinus radiata* wood[J]. China Wood Industry, 2019, 33(5): 44-48.
- [7] 何盛,林兰英,傅峰.樟子松木材苯醇抽提物含量对其胶合性能的影响[J].木材工业,2014,28(3):9-12.
HE S, LIN L Y, FU F. Effect of benzene-alcohol extractives content on gluability of *Pinus sylvestris* lumber[J]. China Wood Industry, 2014,

- 28(3): 9-12.
- [8] 翟阳洋. 木材抽提物分布规律的研究[D]. 南京林业大学, 2017.
- [9] 王凤昂. 生物质(稻壳)微波热解研究[D]. 安徽理工大学, 2008.
- [10] 张雪, 王鑫, 周明东, 张新伟. 半纤维素微波热解研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(11): 1749-1754.
- ZHANG X, WANG X, ZHOU H D, et al. Study on microwave-assisted pyrolysis of hemicellulose[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(11): 1749-1754.
- [11] Soykeabkaew N, Thanomsilp C, Suwantong O. A review: starch-based composite foams[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 78: 246-263.
- [12] Bichot A, Lerosty M, Radoiu M, et al. Decoupling thermal and non-thermal effects of the microwaves for lignocellulosic biomass pretreatment[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 203: 1-13..
- [13] Chengkai Z, Na T, Baohai P, et al. Revealing the importance of non-thermal effect to strengthen hydrolysis of cellulose by synchronous cooling assisted microwave driving[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 197: 414-421.
- [14] Tjeerdsma B F, Boonstra M, Pizzi A, et al. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement[J]. Holz als Roh- und Werkstoff, 1998, 56(3): 149-153.
- [15] Windeisen E, Strobel C, Wegener G. Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood[J]. Wood Science and Technology, 2007, 41(6): 523-536.
- [16] Funaoka M, Kako T, Abe I. Condensation of lignin during heating of wood[J]. Wood Science & Technology, 1990, 24(3): 277-288.
- [17] 姜江涛. 植物纤维原料化学成分定量分析方法研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2010.
- [18] Moharram M A, Mahmoud O M. FTIR spectroscopic study of the effect of microwave heating on the transformation of cellulose I into cellulose II during mercerization[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 107(1): 30-36.
- [19] Vinden P, Torgovnikov G. The manufacture of solid wood composites from microwave modified wood[C]. International panel products symposium, 2007: 111-120.
- [20] Al Shra'ah, Ahmad, Helleur R. Microwave pyrolysis of cellulose at low temperature[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014, 105: 91-99.
- [21] 刘一星, 赵广杰. 木质资源材料学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.

(本文编校 张 鹏、向 琴)

(上接第16页)

3 结论

1) 本试验条件下, 透光与隔热性能良好的温室型太阳能干燥室, 在夏季可实现较好的热量蓄积、干燥室内温度可高于室外温度 23~27 °C; 不同干燥模式下, 干燥室内温度存在差异, 闭式模式下温度可达 62 °C, 开式模式最高温度仅为 41.8 °C。

2) 单板由初含水率干燥至 30%纤维饱和点时, 可采用闭式模式, 干燥速率为 21.39 %/h, 单位板材耗电量为 5.57 kW·h; 含水率由 30%干燥至 12%时, 闭式与开式干燥速率为 16.56 %/h、5.70 %/h。

3) 闭式模式借助除湿机在排出水分的同时回收热量, 相较开式模式, 可缩短干燥时间; 相较组合干燥模式可降低干燥能耗。后续生产过程中, 为提高干燥速率的同时降低干燥能耗, 建议单板干燥过程中引入除湿机进行干燥。

参考文献:

- [1] 周永东, 孙锋, 吕建雄, 等. 6种桉木单板干燥质量的比较[J]. 林业科学, 2014, 50(11): 104-108.
- ZHOU Y D, SUN F, LYU J X, et al. Veneer drying quality comparison of six eucalyptus species[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(11): 104-108.
- [2] 孙锋, 周永东, 贺志强. 我国单板干燥节能技术现状及发展趋势[J]. 木材工业, 2012, 26(6): 35-38.
- SUN F, ZHOU Y D, HE Z Q. Current status and development of energy conservation in china's veneer drying process[J]. China Wood Industry, 2012, 26(6): 35-38.

- [3] 吴盛富, 翁甫金, 马英刚. 我国胶合板产业的发展建议[J]. 木材工业, 2016, 30(2): 44-47.
- WU S F, WENG P J, MA Y G. Suggestions on plywood industry development in China[J]. China Wood Industry, 2016, 30(2): 44-47.
- [4] 邹淑萍, 孟伊娜, 张健, 等. 太阳能干燥装置对四种蔬菜干制效果的影响研究[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(8): 1505-1512.
- ZOU S P, MENG Y N, ZHANG J, et al. Effect of solar drying device on drying effect of four kinds of vegetables [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(8): 1505-1512.
- [5] 张璧光, 伊松林. 我国太阳能干燥现状及在热利用中应有的地位[J]. 干燥技术与设备, 2012, 10(1): 32-37.
- ZHANG B G, YI S L. The present state of the solar drying in China and the status which it should have in thermal application[J]. Drying Technology & Equipment, 2012, 10(1): 32-37.
- [6] 史海舰, 钱珊珠, 淮守成, 等. 新型太阳能干燥系统的智能控制系统研究设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 263-268.
- SHI H J, QIAN S Z, HUAI S C, et al. Research and design of intelligent control system of new solar drying system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 263-268.
- [7] 于海涛, 高建民, 陈瑶. 储热技术在木材太阳能干燥中的应用与发展趋势[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(04): 382-387.
- YU H T, GAO J M, CHEN Y. Heat storage for wood drying using solar heat. [J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(4): 382-387.
- [8] 王金林, 李春生, 赵戈, 等. 杨木单板干燥试验研究[J]. 木材工业, 1998, 12(5): 3-7, 14.
- WANG J L, LI C S, ZHAO G, et al. Drying of poplar veneer[J]. China Wood Industry, 1998, 12(5): 3-7, 14.
- [9] 张新宇, 储德森, 母军, 等. 太阳能预干对桉木单板干燥质量的影响[J]. 木材加工机械, 2018, 29(3): 21-25, 29.
- ZHANG X Y, CHU D M, MU J, et al. Effect of solar pre-drying on the drying quality of eucalyptus veneers[J]. Wood Processing Machinery, 2018, 29(3): 21-25, 29.

(本文编校 张 鹏、向 琴)