

“木材微波处理技术”专栏 (7) DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020093

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年开设“木材微波处理技术”专栏系列报道相关研究成果。

微波处理对樟子松木材等温吸湿特性的影响

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: 以樟子松木材为对象, 使用动态水分吸附仪, 借助GAB模型分析微波处理对樟子松试材的等温吸湿特性影响。结果表明, GAB模型能够很好地描述樟子松微波处理材的等温吸湿特性, 微波处理没有改变木材等温吸湿曲线线型; 微波处理后樟子松木材平衡含水率下降, 单层分子饱和吸附量和有效比表面积降低, 表明微波处理可以降低樟子松木材的吸湿性能。在低初含水率或高微波功率密度条件下, 木材平衡含水率变化量较大, 且早材的平衡含水率降幅大于晚材, 说明微波处理对早材细胞壁的影响较大。

关键词: 微波处理; 樟子松木材; 等温吸湿; GAB模型; 比表面积

中图分类号: S781; S791.253; TS62; TN015 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2021) 01-0020-06

Effect of Microwave Treatment on Moisture Sorption Isotherm of Mongolian Scotch Pine

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, the dynamic vapor adsorption system with a GAB model was used to analyze the isothermal hygroscopic characteristics of the microwave treated Mongolian scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.) wood. The results showed that the GAB model described the isotherm moisture absorption process of microwave treated wood well; microwave treatment did not change the isotherm moisture absorption curve line shape. After a microwave treatment, the equilibrium moisture content decreased; the monolayer saturation adsorption and the effective specific surface area decreased. The decreased degree was significant when the initial moisture content was low and/or the microwave power density was high. It was indicated that a microwave treatment reduced the moisture absorption property of Mongolian scotch pine wood effectively. Under the condition of low initial moisture content or high microwave power density, the

收稿日期: 2020-06-24; 修改日期: 2020-12-02

基金项目: 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” (2017SY15); “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” (2019J42号); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“基于微波处理材的弯曲特性和机制研究” (CAFYBB2018SY030)。

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

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

change of equilibrium moisture content was larger, and the decrease of equilibrium moisture content of early wood was greater than that of late wood, which indicated that microwave treatment had more influence on early wood cell wall.

Key words: microwave treated wood; Mongolian scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.); sorption isotherms; GAB model; specific surface area

树脂浸渍、乙酰化处理、热处理等方法可以降低木材的吸湿性能,主要有两方面原因:一是改变了木材的表面特性,减少了与水分的接触;二是减少了木材内部的羟基等吸水性基团数量。微波处理后木材孔隙率增加,渗透性提高^[1],化学组分变化,亲水基团减少^[2-4],理论上也可以降低其吸湿性能,但目前微波处理对木材吸湿性能的影响尚无系统性研究。

木材吸湿特性多使用等温吸湿曲线来行描述,获得木材等温吸湿曲线的方法有:饱和盐溶液法^[5-6]、恒温恒湿箱法^[7]和动态水分吸附仪法(dynamic vapor sorption, DVS)^[8-9]。前两者试验操作简便,但周期长,测试结果通过静态测量法获得,受测量环境的影响很大;近年来多使用动态水分吸附仪来测定木材的吸湿特性,能够实时记录环境湿度和木材含水率的变化。

为了更好地解释木材的吸湿特性,不同学者提出了各种等温吸湿理论模型。最早是Langmuir单分子层吸附模型^[10],随后发展出了基于多层吸附理论和溶液吸附理论的多个吸附模型。BET多分子层模型^[11]是多层吸附理论的代表,使用BET模型分析木材的吸湿特性时,可以推断出木材的比表面积特征,因此得到了广泛使用。但BET模型也有自身缺陷,不适用于环境湿度超过40%条件下的拟合分析^[12]。为了弥补这一缺点,在BET模型基础上又发展出了Guggenheim-Anderson-deBoer模型(GAB模型)^[13-15]可实现10%~90%相对湿度条件下的大范围拟合,且具有良好的拟合度。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)是我国东北地区的人工林优势树种之一^[16],第九次全国森林资源清查结果表明我国樟子松人工林蓄积量为3 102.6万m³,在我国人工乔木林排名12^[17]。前期实验发现,在常见的人工林树种中,樟子松木材微波处理后横截面的裂纹面积比和裂纹数量较多,处理效果明显^[18]。本研究以樟子松为对象,使用动态水分吸附仪,借助GAB模型分析微波处理对樟子松

试材的等温吸湿特性影响,为木材微波处理技术的推广应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

樟子松,产地为绥芬河林场,原木长度大于4.0 m,胸径300~400 mm,生长轮数量在30个以上。微波处理材尺寸50 mm×80 mm×500 mm,所有试样源于同一棵树。

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)动态水分吸附测试仪 (SPSx-Highload, ProUmid, Germany) 温度范围15~40℃,温度精度±0.1℃;相对湿度范围在0.5%~98%,相对湿度精度±0.6%;天平量程22 g,天平分辨率1 μg。测量时采用顶风式气体循环系统来调节样品仓温湿度,天平盘托架缓慢旋转以保证每个样品处于完全一致的测量环境中。

1.3 试验方法

1.3.1 木材微波处理

选取生材气干至实验设定含水率后进行微波处理,木材含水率通过质量进行估算。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%三个初含水率,20、40、60、80 kW·h/m³四个微波功率密度进行微波处理。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。

1.3.2 动态水分吸湿性能测量

前期实验发现木材早晚材对微波的响应程度不同,推测微波处理后早晚材的吸湿性能之间存在差异,因此将早晚材分开分析,便于进一步理解微波

对木材的作用机理和作用位置。从未处理材和不同工艺微波处理材的中心位置,选取尺寸为0.1 mm (径向)×5 mm (弦向)×10 mm (轴向)的早材和晚材薄片试件进行动态水分吸湿性能测试,每片质量约50 mg。

将薄片试件放入天平盘后,置于仪器样品仓内,如图1。预设动态吸湿梯度为0.5%~98%,每个相对湿度梯度间隔5%。吸湿过程中,环境相对湿度控制在25℃。当试件含水率在45 min内的标准偏差小于0.1%时,认为试件达到了该相对湿度阶段的平衡,再进行下一相对湿度阶段的吸湿步骤。记录吸附时间、环境相对湿度、试件质量等参数,每组试验重复3次,取平均值进行计算。



图1 动态水分吸附仪

Fig.1 Dynamic vapor adsorption system

1.3.3 GAB吸附模型及数据拟合

利用GAB模型分析木材的吸湿曲线,以及在等温吸湿过程中的平衡含水率、单层分子的饱和吸附量、比表面积。

GAB模型的计算式见式1^[13-15, 19]:

$$V_{\text{ads}} = V_m \frac{K_{\text{GAB}} \cdot C_{\text{GAB}} \cdot \text{RH}/100}{(1 - K_{\text{GAB}} \cdot \text{RH}/100) \cdot (1 - K_{\text{GAB}} \cdot \text{RH}/100 + C_{\text{GAB}} \cdot K_{\text{GAB}} \cdot \text{RH}/100)} \quad (1)$$

式中: V_{ads} —吸附水体积, cm^3/g ; V_m —单层分子饱和吸附量, cm^3/g ; K_{GAB} —多层分子吸附水与纯水自由焓之差相关的常数; C_{GAB} 表示单层分子吸附水与多层分子吸附水之间的自由焓(相较于标准化学势)之差相关的常数; RH表示相对湿度, %。

GAB模型单层分子吸附水所占的面积就是木材细胞壁吸附作用有效比表面积,按式2进行计算^[13-15, 19]:

$$S_{\text{GAB}} = \frac{V_m \cdot \rho \cdot \sigma \cdot N_A}{M} \quad (2)$$

式中: S_{GAB} —有效比表面积, m^2/g ; V_m —单层分子饱

和吸附量, cm^3/g ; ρ —吸附水密度, g/cm^3 , 取 $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ (默认木材细胞壁内吸着水密度与自由水相同); σ —一个水分子所占据面积均值, 取 0.114 nm^2 ; M —水的摩尔质量, 取值 $18 \text{ g}/\text{mol}$; N_A —阿伏伽德罗常数, 取值 6.022×10^{23} 。

2 结果与讨论

2.1 微波处理材等温吸湿GAB模型拟合曲线与平衡含水率变化

本研究使用Origin分析软件,结合公式1,使用最小二乘法对樟子松微波处理材的等温吸湿数据进行GAB模型拟合,获得的拟合参数见表1。结果表明,不同微波工艺处理后樟子松木材的吸湿拟合度(R^2)均大于0.99,且残差平方和(RSS)均小于0.1,说明GAB模型能够很好地描述不同微波工艺处理后的樟子松试材的等温吸湿特性。

图2为使用GAB模型拟合的樟子松微波处理材的等温吸湿曲线。从图中可以看到,不同微波工艺处理后获得的等温吸湿拟合曲线线型未发生明显变化,仍为II类曲线^[20]。20%初含水率的木材,经过不同功率密度微波处理后,吸湿曲线变化明显,随着微波功率密度的增加,平衡含水率不断降低。尤其在 $80 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 微波功率密度条件下,处理后樟子松试材的等温吸湿曲线向直线型转变,环境湿度越大这种转变越明显。处理材相对未处理材平衡含水率的降低,说明微波处理削弱了木材的水分吸附能力,这是由于微波处理后木材的半纤维素和纤维素组分分解,木材内部的羟基等吸湿基团数量减少^[2-4]。当环境湿度较高时,木材内部的毛细管吸附现象增强,但由于微波处理后木材的润胀性能下降^[6],降低了处理材的毛细管吸附作用,进一步促进了处理材平衡含水率的下降,导致吸湿曲线向直线型转变^[21],吸湿性能降低。

30%初含水率条件下,相对湿度在40%以下,微波功率密度小于 $40 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 时,早晚材的等温吸湿曲线均没有明显变化。在高相对湿度环境下,微波功率密度大于 $40 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 时,木材的平衡含水率降低,在 $80 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 时早材的平衡含水率下降了19%,晚材的平衡含水率下降了10%,分析原因是高微波功率密度处理后,木材组分发生了分解^[2-4],吸湿位点减少,木材平衡含水率降低,吸湿性能下降。

表 1 利用 GAB 模型拟合计算的等温吸湿曲线参数

Tab.1 Fitting parameters of the GAB model for the isotherms adsorption

初含水率/ %	微波功率密度/ (kWh·m ⁻³)	早/晚材	$V_m / (\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$		C_{GAB}		K_{GAB}		残差平方和	拟合度
			值	标准差	值	标准差	值	标准差		
20	20	早材	4.406	0.1606	12.969	3.4100	0.862	0.0066	0.2961	0.9945
		晚材	4.966	0.1055	8.404	0.7974	0.806	0.0048	0.0480	0.9988
	40	早材	4.916	0.0533	7.813	0.3260	0.778	0.0027	0.0084	0.9997
		晚材	5.276	0.0579	7.757	0.3328	0.783	0.0027	0.0104	0.9997
	60	早材	4.326	0.0669	7.964	0.4471	0.758	0.0041	0.0110	0.9994
		晚材	4.302	0.0708	8.192	0.5325	0.777	0.0041	0.0155	0.9993
	80	早材	3.537	0.0818	7.920	0.5818	0.720	0.0068	0.0113	0.9989
		晚材	3.711	0.0997	8.430	0.7731	0.731	0.0077	0.0199	0.9983
30	20	早材	4.842	0.1165	10.526	1.4086	0.829	0.0051	0.0918	0.9980
		晚材	4.907	0.1014	8.564	0.8138	0.811	0.0046	0.0476	0.9988
	40	早材	5.261	0.0538	7.711	0.3110	0.786	0.0024	0.0092	0.9998
		晚材	4.866	0.0489	7.760	0.3118	0.789	0.0024	0.0079	0.9998
	60	早材	5.088	0.0532	7.598	0.3153	0.790	0.0024	0.0093	0.9997
		晚材	5.078	0.0489	7.682	0.2795	0.775	0.0024	0.0067	0.9998
	80	早材	4.829	0.0496	8.061	0.3000	0.756	0.0027	0.0060	0.9998
		晚材	5.234	0.0450	7.634	0.2253	0.749	0.0023	0.0043	0.9998
40	20	早材	5.676	0.0477	7.551	0.2512	0.791	0.0020	0.0074	0.9998
		晚材	5.826	0.0501	7.354	0.2348	0.778	0.0021	0.0069	0.9998
	40	早材	5.433	0.0580	8.121	0.3662	0.797	0.0025	0.0127	0.9997
		晚材	5.522	0.0628	7.991	0.3700	0.790	0.0027	0.0135	0.9997
	60	早材	5.512	0.0584	7.508	0.3003	0.779	0.0026	0.0097	0.9997
		晚材	5.603	0.0604	7.842	0.3259	0.778	0.0027	0.0108	0.9997
	80	早材	4.775	0.0596	8.068	0.4041	0.784	0.0030	0.0116	0.9996
		晚材	5.229	0.0574	7.627	0.3225	0.782	0.0027	0.0099	0.9997
对照材		早材	5.226	0.0662	8.210	0.4930	0.825	0.0026	0.0228	0.9996
		晚材	5.625	0.0408	7.329	0.1929	0.771	0.0018	0.0043	0.9999

40% 初含水率的木材经 20~80 kW·h/m³ 功率密度的微波处理后，其平衡含水率没有发生明显改变，尤其是晚材。早材在微波功率密度小于 60 kW·h/m³ 时，平衡含水率变化程度小于 4%，只有在 80 kW·h/m³ 的条件下才观察到处理材平衡含水率的降低。

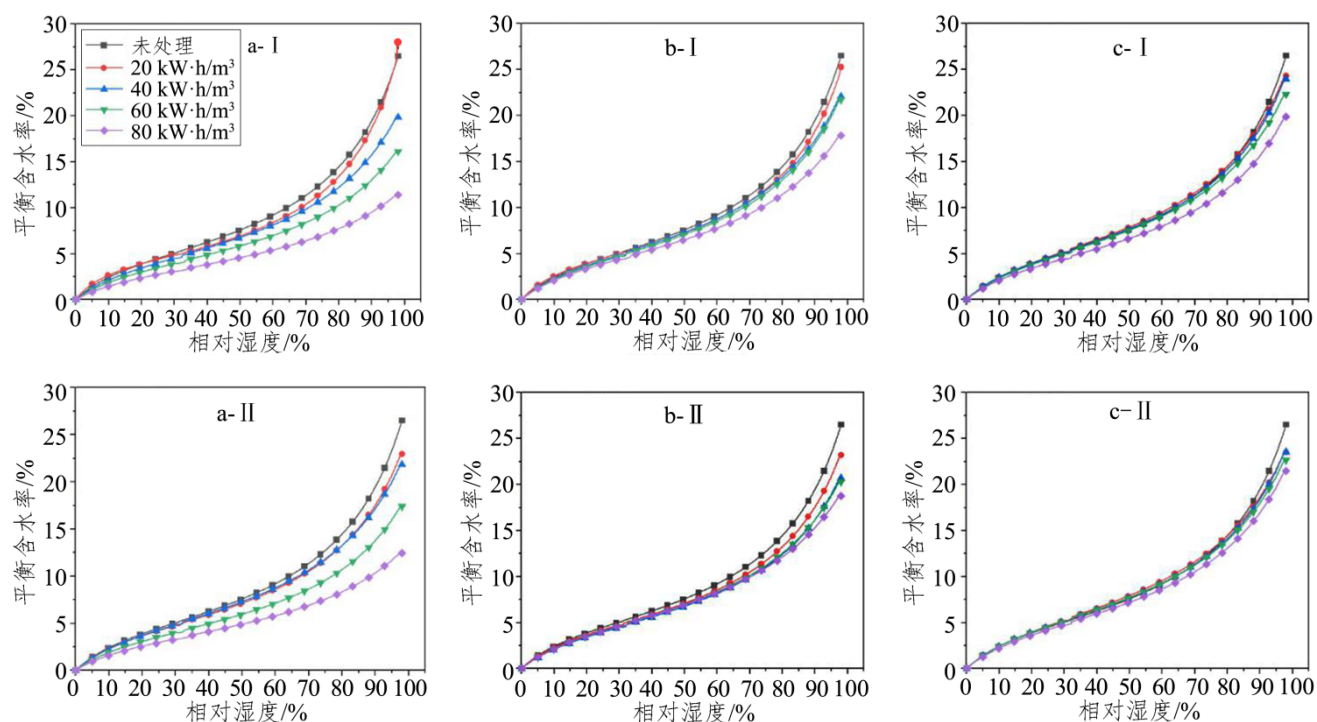
不同微波工艺处理后，在高含水率或低微波功率密度条件下，樟子松木材的平衡含水率变化量较小，早晚材的变化规律基本一致；在低含水率或高微波功率密度条件下，平衡含水率变化量较大，早晚材差异明显，且早材的降低量大于晚材，说明早晚材对微波的响应程度不同。从解剖形态上来说早材细胞腔大壁薄，晚材细胞腔小壁厚，早材细胞壁的密度低于晚材细胞壁，同时早材的孔隙率、干燥速度和水分扩散阻力大于晚材^[22-24]，早晚材的介电特性也存在明显差异^[25]，导致微波处理时樟子松早材区域具有更高的温度和蒸汽压力，更容易引起组分

和结构变化，微波处理后早材细胞壁首先发生破坏，完整性变差^[26]，所以早材的吸湿性能变化比晚材明显，在热处理木材上也能观察到类似的结果^[27]。

综上所述，20% 初含水率时木材内部没有足够的水分吸收微波，大量的微波能被木材吸收，木材组分降解，吸湿平衡含水率降低，吸湿性能下降；随着初含水率提高，木材内部水分吸收了大量的微波能，且微波处理时间较短，木材组分没有发生明显降解，平衡含水率变化不大。在低初含水率或高微波功率密度条件下，木材平衡含水率变化量较大，早晚材差异明显，早材的平衡含水率降低量大于晚材，说明微波处理对樟子松早材细胞壁的影响较大。

2.2 微波处理材单层分子饱和和吸附量与有效比表面积变化

通过 GAB 模型拟合获得了不同微波工艺处理后樟子松试材等温吸湿过程中的单层分子饱和吸附量



注:a、b、c—初含水率分别为20%、30%、40%;I—早材、II—晚材。

图2 樟子松微波处理材等温吸湿平衡含水率变化曲线

Fig.2 Sorption isotherms of the microwave treated wood

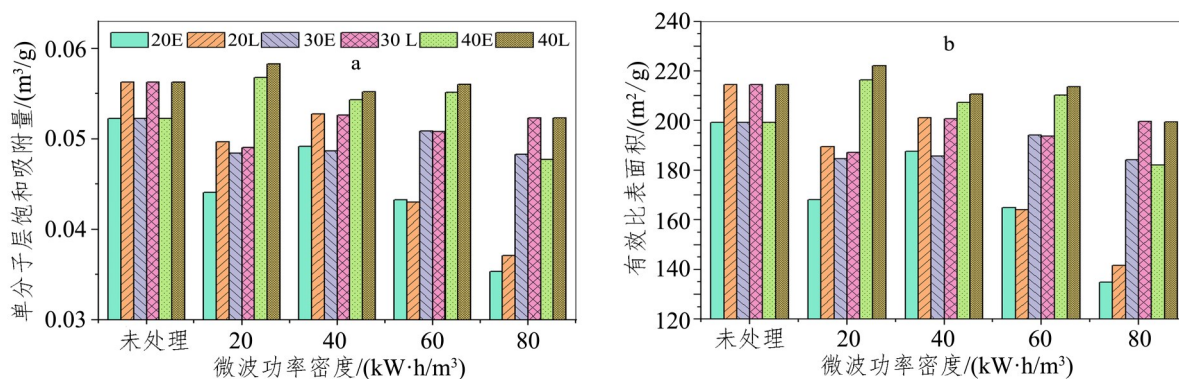


图3 樟子松微波处理材单层分子饱和吸附量与有效比表面积变化

Fig.3 Changes of saturated adsorption capacity of single molecular layer and effective surface area of the microwave treated wood

变化情况,见图3a。可以看到,不同工艺条件下晚材的单层分子饱和吸附量均大于早材,这是因为晚材细胞壁较厚,具有更大的吸附面积。

三个初含水率条件下,樟子松木材的单层分子饱和吸附量都随着微波功率密度的增加逐渐降低。其中20%初含水率的早晚材在60、80 kW·h/m³功率密度下发生了明显的降低,且早晚材的单层分子饱和吸附量差异缩小。一般而言,木材中的单层分子饱和吸附量是由木材中的吸湿位点数量决定的,如

果单层分子饱和吸附量降低,那么意味着木材中的水分吸附位点数量减少,即吸湿基团数量减少^[21]。主要原因是微波处理后半纤维素水解产生乙酸,纤维素脱水产生醚键,木质素发生酯化反应^[24],引起了木材内部的羟基数量下降,单层分子饱和吸附量降低,吸湿性能下降。

本研究拟合计算得到的未处理樟子松早晚材的有效比表面积分别为199.32和214.53 m²/g,经微波处理后,有效比表面积在134.90~222.19 m²/g范围

内。从图3b可以看到,有效比表面积与单层分子饱和吸附量的变化趋势保持一致,因为GAB模型获得的有效比表面积是根据单层分子饱和吸附量计算得到的,比表面积实际上也取决于吸湿位点数量。各个初含水率条件下处理材的有效比表面积都随着微波功率密度的增加而逐渐减小;且初含水率越低,微波处理材的有效比表面积越小,吸湿性能越差。

3 结论

1) GAB模型可以有效地拟合不同微波工艺处理樟子松试材的等温吸湿特性,拟合度大于0.99,微波处理未明显改变樟子松木材的等温吸湿曲线线型。

2) 微波处理后樟子松试材的平衡含水率、单层分子饱和吸附量和有效比表面积降低,说明微波处理可以降低樟子松木材的等温吸湿性能,且初含水率越低,微波功率密度越高,降低程度越明显。在低初含水率或高微波功率密度条件下,木材平衡含水率变化量较大,且早晚材差异明显,早材的平衡含水率降低量大于晚材,说明微波处理对樟子松早材细胞壁的影响较大。

3) 后续研究可以尝试采用微波处理来获得类似炭化或热处理的效果,用于改善木材的尺寸稳定性。

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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 陈海鸥. 高温热处理对木材水蒸气吸附动态的影响机制研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- [6] 高鑫, 周凡, 付宗营, 等. 高温热处理对欧洲云杉和花旗松吸湿特性的影响[J]. 林业工程学报, 2018, 3(4): 25-29.
- [7] 周海珍, 杨甜甜, 马尔妮. 脱除部分化学组分杨木的动态水分吸着行为[J]. 林业科学, 2017, 53(8): 94-100.
- [8] Popescu C M, Hill C A S, Curling S, et al. The water vapour sorption behaviour of acetylated birch wood: how acetylation affects the sorption isotherm and accessible hydroxyl content[J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(5): 2362-2371.
- [9] Hill C A S, Norton A J, Newman G. The water vapour sorption properties of Sitka spruce determined using a dynamic vapour sorption apparatus[J]. Wood Science & Technology, 2010, 44(3): 497-514.
- [10] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum[J]. Journal of the American Chemical Society, 1918, 40(9): 1361-1403.
- [11] Brunauer S, Emmett P H, Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers[J]. Journal of the American Chemical Society, 1938, 60(2): 309-319.
- [12] Stamm A. Wood and cellulose science[M]. Ronald Press Co, 1900.
- [13] Mazo, Robert M. Applications of statistical mechanics (Guggenheim, E. A.) [J]. Journal of Chemical Education, 1967, 44(3): A262.
- [14] Anderson R B. Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller equation[J]. Journal of the American Chemical Society, 1946, 68(4): 1727.
- [15] Deboer H J. The Dynamical Character of Adsorption[J]. Soil Science, 1953, 76(2): 166.
- [16] 宁波. 樟子松人工林结构动态及生物量的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
- [17] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014-2018)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [18] 熊令明, 邢雪峰, 林兰英, 等. 高场强微波处理对樟子松木材宏观裂纹的影响[J]. 木材工业, 2020, 34(6): 1-4.
- [19] XIONG L M, XING X F, LIN L Y, et al. Effects of high-field-intensity microwave treatment on macroscopic cracks in Mongolian scotch pine [J]. China Wood Industry, 2020, 34(6): 1-4.
- [20] Timmermann Ernesto O. Multilayer sorption parameters: BET or GAB values? [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2003, 220(1): 235-260.
- [21] Donohue M D, Aranovich G L. Classification of Gibbs adsorption isotherms[J]. Advances in Colloid & Interface Science, 1998, 76: 137-152.
- [22] 姚晴. 樟子松热处理材表面性能和吸湿性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- [23] Neimsuwan, T, Wang, S, Taylor, A.M. et al. Statics and kinetics of water vapor sorption of small loblolly pine samples[J]. Wood Science & Technology, 2008, 42(4): 493-506.
- [24] Ken, Watanabe, Yukie, et al. Non-destructive measurement of moisture distribution in wood during drying using digital X-ray microscopy[J]. Drying Technology, 2008, 26(5): 590-595.
- [25] Wardrop A B, Davies G W. Morphological factors relating to the penetration of liquids into wood[J]. Holzforschung, 1961, 15(5): 129-141.
- [26] Norimoto, Misato. Dielectric properties of wood[J]. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute Kyoto University, 1976, 59: 106-152.
- [27] 徐恩光. 樟子松微波膨化木性能及其树脂强化处理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- [28] GUO Juan, SONG Kunlin, Salmén Lennart, YIN Yafang. Changes of wood cell walls in response to hygro-mechanical steam treatment[J]. Carbohydrate polymers, 2015, 115: 207-14.

(本文编校 向 琴)