

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020105

聚乙二醇交联水性超支化聚丙烯酸酯分散 有机蒙脱土浸渍处理木材的性能

刘如, 徐建峰, 龙玲

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 采用低分子量聚乙二醇200 (PEG-200) 与实验室合成的水性超支化聚丙烯酸酯 (HBPA) 分散有机蒙脱土 (OMMT) 乳液作为木材浸渍处理改性剂, 对青杨 (*Populus cathayana* Rehd.) 边材进行浸渍处理, 并对改性剂及其改性处理材进行化学结构分析以及形貌表征, 分析改性剂对处理材的作用机理以及改性剂在处理材内的形态, 并测试处理材的物理力学性能指标。结果表明: PEG-200 与 HBPA 具有较好的相容性, OMMT 在其中呈部分剥离状态; 经过浸渍处理, 部分 HBPA 和 OMMT 能够进入到木材细胞壁内, PEG 能在 HBPA 和木材之间形成交联作用, 但 OMMT 质量分数在4%时, 部分 OMMT 填充在木材细胞腔内。改性剂处理材的物理力学性能提升, 但 OMMT 质量分数4%相对2%的提升幅度不大。

关键词: 青杨; 有机蒙脱土; 聚乙二醇; 超支化聚丙烯酸酯; 化学改性

中图分类号: S781.7; S792.113; TS62 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2021) 03-0045-07

Properties of Wood Impregnated with Waterborne Hyperbranched Polyacrylate Dispersed Organo-Montmorillonite Crosslinked by Polyethylene Glycol

LIU Ru, XU Jian-feng, LONG Ling

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

Abstract: A laboratory-synthesized waterborne hyperbranched polyacrylate (HBPA) dispersed organo-montmorillonite (OMMT) emulsion with low molecular polyethylene glycol 200 (PEG-200) was used as wood impregnating modifier to treat the sapwood of Cathy poplar (*Populus cathayana* Rehd.). The chemical structure and composition of the compound modifiers and the properties of modified wood were characterized. The water absorption, the volume swelling, the compression strength, and the flexural strength of the modified wood were tested. The results showed that the PEG-200 and HBPA were compatible, and the OMMT was exfoliated in the compound. After the impregnating process, some proportion of HBPA and OMMT entered into the wood cell walls, and the PEG-200 acted as a crosslinking agent among them. However, when the OMMT content was 4%, some OMMT filling was found in the wood cell lumen. Significant improvements on physical and mechanical properties of the modified wood were obtained, while the groups contained OMMT showed further improvements. There was no obvious improvement between the wood modified with a 2% OMMT content and the wood modified with a 4% OMMT content.

收稿日期: 2020-07-20; 修改日期: 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金青年项目“水性超支化聚丙烯酸酯分散蒙脱土在木材中的渗透及改性作用机理”(31800470)。

作者简介: 刘如 (1987—), 男, 助理研究员。Email: liuru@criwi.org.cn

通讯作者: 徐建峰, 男, 副研究员。Email: xujianfeng198216@aliyun.com

Key words: Cathy poplar (*Populus cathayana* Rehd.); organo-montmorillonite; polyethylene glycol; hyperbranched polyacrylate; chemical modification

人工林速生材高值化利用是木材工业高质量发展的重要途径。木材化学改性是将化学物质引入到木材内部, 占据木材细胞壁中的孔隙并与亲水性的羟基反应, 增强木材的物理力学性能, 从而扩大其应用范围, 延长使用寿命^[1-3]。

木材作为一种多孔性材料, 具备宏观、介观和微观多级孔隙结构^[4]。以蒙脱土(montmorillonite, MMT)为代表的纳米黏土可进入到木材纳米孔隙中用于浸渍改性, 较少的添加量(3%~5%)就可以大幅度提高木材的力学、防水和阻燃等性能^[5-7]。通常MMT与木材的复合以水溶性树脂为中间介质, 其中有机蒙脱土(organomontmorillonite, OMMT)对木材的改性效果较好, 但OMMT在水溶性介质中分散性不佳^[8], 且承载OMMT的树脂乳液粒径较大, 黏度较高, 对木材的渗透效果较差, 因而固化后OMMT多填充于木材细胞腔内^[9], 对木材性能的提高作用有限。

超支化聚合物是一种具有高度分支结构的树

枝状聚合物。水溶性超支化聚合物因其在水中具有良好的溶解性, 而受到研究人员的关注。将水性超支化聚合物接枝到纳米OMMT上, 可以使OMMT在水溶性介质中稳定分散^[10-12]。笔者团队制备了一种水性超支化聚丙烯酸酯(hyperbranched polyacrylate, HBPA)分散蒙脱土乳液浸渍处理木材。该水性HBPA粒径小, 干燥后易成膜, 可以大幅提升木材的防水和硬度等性能^[13], 相比其他树脂浸渍方法, 对环境污染少且不影响木材表面颜色。但此方法是先将OMMT分散到丙烯酸酯单体中再聚合制备乳液, 制备工艺较复杂且分散进入HBPA乳液中的OMMT含量较少。因此, 本研究改进工艺: 即先合成HBPA乳液, 再将OMMT直接添加到HBPA乳液中, 不仅方便操作, 还可以提高OMMT的含量, 同时尝试在HBPA中加入低分子量聚乙二醇200(PEG-200), 使其与HBPA及木材通过氢键作用形成物理交联的网络结构, 试验设计如图1所示。

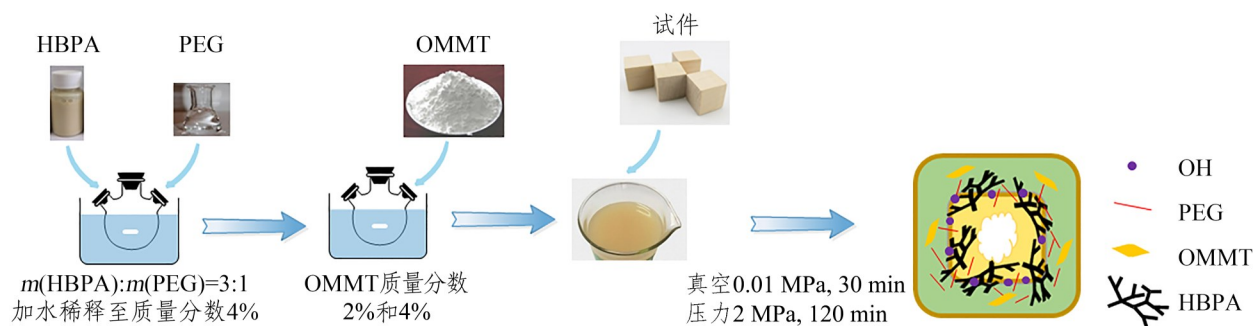


图1 试验设计示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment design

本研究旨在获得一种操作简单、安全环保的木材浸渍改性方法, 以实现人工林速生材的工业化环保高效利用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

青杨(*Populus cathayana* Rehd.)取自河南漯河市, 选择无明显节子、腐朽等自然缺陷的边材作为试材。根据测试标准锯切成规定尺寸。吸水性与湿胀性试件: 20 mm×20 mm×20 mm (L×R×

T); 抗压强度试件: 30 mm×20 mm×20 mm (L×R×T); 抗弯强度试件: 300 mm×20 mm×20 mm (L×R×T)。自然气干至含水率8%~12%, 备用。

有机蒙脱土(OMMT), I.31PS型, 其有机长链为 $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}]_2(\text{CH}_3)_2\text{N}^+$, 过200目筛使其平均粒径为74 μm。外购。

水性超支化聚丙烯酸乳液(HBPA), 参照种子乳液聚合法实验室自制^[13]。平均粒径80 nm, 黏度120 mPa·s (25 °C), 固体含量10%。

聚乙二醇200(PEG-200), 外购。

1.2 主要设备与仪器

X射线衍射仪 (D8 Advance 型)、傅里叶变换红外光谱仪 (IS10 型)、激光粒度仪 (Zetasizer Nano ZS 型)、透射电子显微镜 (TEM 1010 型)。

1.3 试验方法

1.3.1 改性剂的制备

将 PEG-200 加入到 HBPA 溶液中混合均匀, PEG-200 的添加量为 HBPA 固体含量的 1/3, 用去离子水将混合液稀释至质量分数 4%; 加入 OMMT 制备复合乳液, OMMT 的添加量按其在复合乳液中的质量分数计, 设 2% 和 4% 两种水平。在 1 000 r/min 的速度下分散 10 min, 即得到 PEG/HBPA 分散 OMMT 乳液作为改性剂。同时, 制备一组未添加 OMMT 的 PEG/HBPA 乳液作为对照。

1.3.2 浸渍处理

先将青杨试件在 103 °C 下干燥至恒重。采用满细胞法, 将试件置于浸渍罐中用处理液进行真空-加压浸渍处理。真空度为 0.01 MPa, 时间 30 min; 加压压力为 2 MPa, 加压时间 120 min。

浸渍完成后, 将试件从浸渍罐中取出, 擦去表面多余水分, 先在 40 °C 恒温干燥箱中干燥 24 h, 随后在 103 °C 下干燥至恒重, 并计算试件增重率。每组同一个试验的重复试件数 10。

1.4 性能表征与测试

1.4.1 改性剂的化学结构与形态表征

1) 将 0.1 μL 浸渍乳液均匀涂抹于溴化钾压片上, 干燥后进行傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 测试;

2) 将浸渍乳液用去离子水稀释 100 倍后, 置于激光粒度仪中进行粒径分布测试;

3) 将浸渍乳液稀释 50 倍后直接滴在铜网上, 风干后用透射电子显微镜 (TEM) 观测。

1.4.2 改性处理材的结构表征与性能测试

1) 将处理材粉碎, 筛取 100 目木粉, 按木粉与溴化钾绝干质量 1:100 的比例均匀混合压片, 进行 FTIR 测试;

2) 用环氧树脂包埋、超薄切片刀切片后置于铜网上, 进行 TEM 观测;

3) 取处理材粉碎后 100 目木粉, 采用 Cu-K α 进行 X 射线衍射 (XRD) 测试, 扫描范围 1.5~40°;

4) 吸水性、体积湿胀率、顺纹抗压强度和抗弯强度, 参照 GB/T 1934.1—2009 《木材吸水性测定方法》、GB/T 1934.2—2009 《木材湿胀性测定方法》、GB/T 1935—2009 《木材顺纹抗压强度试验方法》和 GB/T 1936.1—2009 《木材抗弯强度试验方法》测试。

2 结果与分析

2.1 改性剂的化学结构与形态

为探索 PEG-200 与 HBPA 的相互作用, 测试了三种乳液 HBPA、PEG/HBPA 和 OMMT/PEG/HBPA 的 FTIR 谱图, 如图 2 所示。

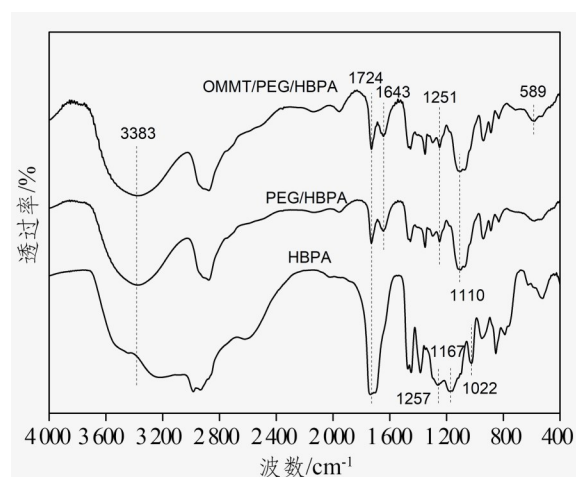


图2 三种乳液的 FTIR 光谱

Fig.2 FTIR spectrum of three types of emulsions

三组样品在 1 724 cm^{-1} 附近均有峰出现, 此处为 C=O 吸收峰, 是聚丙烯酸酯的特征峰^[14]。与 HBPA 相比, 加入 PEG-200 后, 在 3 383 cm^{-1} 处的羟基峰发生了偏移与增强, 这是由于低分子量 PEG 中含有较多的羟基与 HBPA 中的羟基发生了叠加。此外, 在 1 643 cm^{-1} 附近吸收峰明显增强, 为 PEG-200 中的结合水吸收峰^[15]。1 257 cm^{-1} 处为 HBPA 中 O-C=O 的伸缩振动, 在加入 PEG 后, 此峰向 1 251 cm^{-1} 偏移; 此外, 1 167 cm^{-1} 和 1 022 cm^{-1} 为 HBPA 中 C-O-C 的伸缩振动, 在加入 PEG 后此峰消失, 并在 1 110 cm^{-1} 附近出现了新的峰, 说明 PEG-200 中存在的 C-O-C 和 -OH 等可能与 HBPA 形成了氢键作用或与丙烯酸酯中羧基发生了反应^[16]。与 PEG/HBPA 相比, 加入 4% 的 OMMT 后仅在 589 cm^{-1} 附近出现了 Si-O 的吸收峰, 其余基本无差异。

各组改性剂乳液的粒径分布如图3所示。

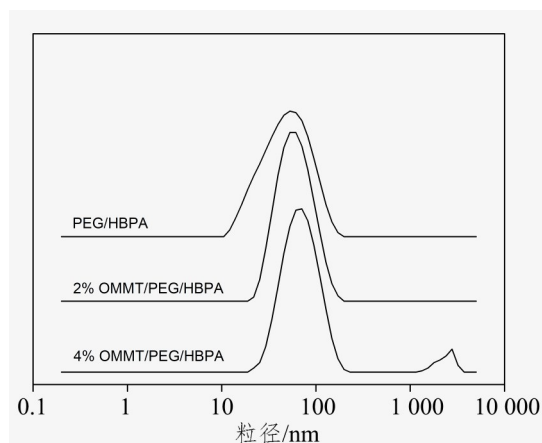


图3 聚乙二醇/超支化聚丙烯酸酯分散蒙脱土乳液的粒径分布

Fig.3 Particle distribution of PEG/HBPA dispersed OMMT emulsions

由图3可以看出, 各组改性剂乳液的粒径分布在10~200 nm, 平均粒径为80~100 nm。OMMT/PEG/HBPA乳液的粒径分布相对较窄, 且加入

OMMT后, 相比未添加组粒径有所增加。4%组在2 000 nm处出现了一个较小的峰, 可能是部分OMMT发生了团聚。

采用TEM可以进一步观测到OMMT在PEG/HBPA中的形态, 结果如图4所示。

图4中可以看出PEG/HBPA颗粒基本呈圆形。而添加了OMMT的乳液形态, 无论添加量是2%还是4%, 均有OMMT片层包裹着HBPA颗粒。其中, 添加量为2%的OMMT基本呈剥离状态, 且出现凝絮状的情况较4%少。相比前期研究^[13], 添加量为4%的OMMT也更多呈现出凝絮状, 这是由于本研究OMMT添加量较大, 因而分散难度较大, 但也有部分呈现出剥离结构。图4所示剥离的OMMT片层厚度和长度, 与理想的单片OMMT尺寸(厚度1 nm、长度100 nm)接近, 说明了HBPA的树枝型结构有利于实现OMMT的剥离。除此以外, TEM图中并未发现独立的PEG-200与HBPA颗粒, 说明了两者在乳液中具有较好的相容性。

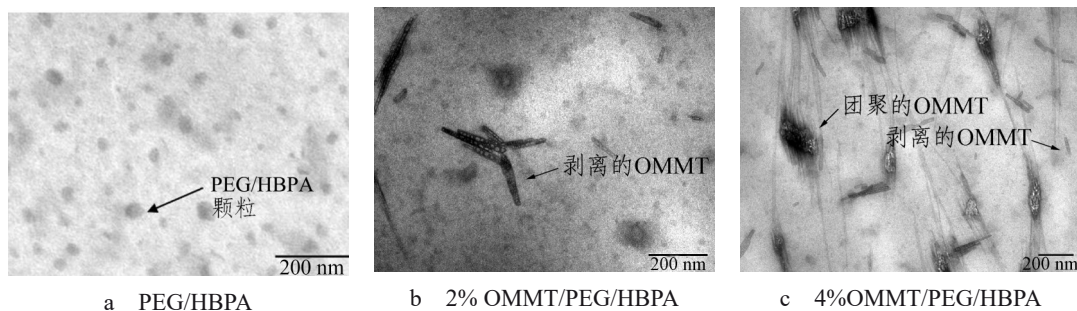


图4 聚乙二醇/超支化聚丙烯酸酯分散蒙脱土的TEM图

Fig.4 TEM images of PEG/HBPA dispersed OMMT

2.2 改性木材的化学结构与形态

图5为不同OMMT添加量的改性剂乳液处理木材的FTIR结果。未处理木材在3 333 cm^{-1} 处的羟基吸收峰, 经PEG/HBPA改性后向高波数区3 378 cm^{-1} 处偏移且峰强度增加, 同时在1 058 cm^{-1} 处出现了新的吸收峰, 此处是PEG/HBPA中C-O-C的伸缩振动, 与图2对比可以发现, 此峰向高波数区偏移; 而在加入了OMMT后, 3 333 cm^{-1} 的羟基吸收峰进一步偏移到3 401 cm^{-1} 。

这是由于PEG/HBPA中存在大量羟基, 并与木材中的羟基形成了氢键结合^[17], 在OMMT的作用下, 形成了更多的氢键。另外, 在1 736 cm^{-1} 处

的C=O吸收峰也有所增强, 这是由于木材半纤维素中的C=O与HBPA中的C=O吸收峰信号发生了重叠。添加OMMT后, 处理材在2 918 cm^{-1} 处出现了较尖锐的吸收峰, 此处归属于 $-\text{CH}_3/-\text{CH}_2$ 的伸缩振动, 说明了OMMT中有机长链进入到了木材中。

X射线衍射可以分析OMMT在木材中的形态, 结果如图6所示。OMMT在 $2\theta=7.10^\circ$ 处有一个明显的(001)晶面衍射峰, 根据布拉格公式1, 可以计算得到OMMT的层间距。

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

其中: d —层间距, nm; λ —X射线的波长, 值为0.154 nm; θ —衍射角, $^\circ$ 。

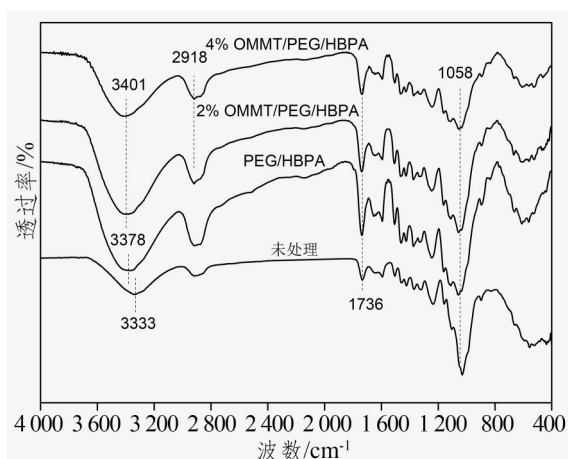


图5 不同OMMT添加量改性剂处理木材的FTIR结果

Fig.5 FTIR of modified wood with different proportions of OMMT

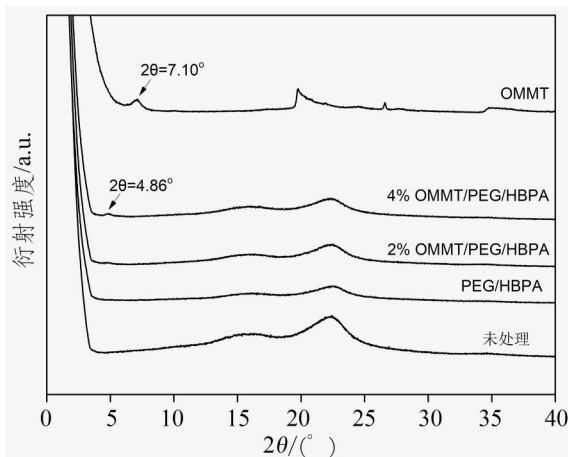


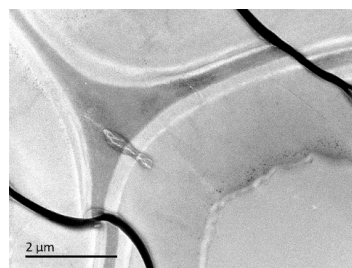
图6 改性木材的XRD结果

Fig.6 XRD results of modified wood samples

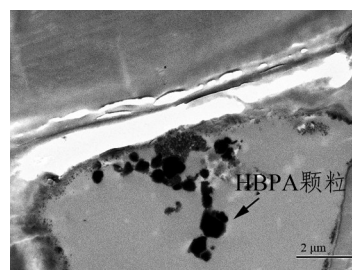
OMMT 的层间距为 1.24 nm, 而 4% OMMT/PEG/HBPA 处理材出现了一个较小的 OMMT 衍射角在 $2\theta=4.86^\circ$ 附近, 对应其层间距为 1.82 nm, 为部分凝絮的 OMMT。而 2% OMMT/PEG/HBPA 处理材中未发现 OMMT 的衍射角, 说明较小 OMMT 添加量的处理材中 OMMT 可能呈剥离状态。从图 6 中也可以发现, 不同处理材在 $2\theta=15^\circ$ 和 $2\theta=22.5^\circ$ 的纤维素衍射峰没有发生明显变化, 说明本研究所采用的改性方法没有破坏纤维素的结晶结构。

图 7 为 PEG/HBPA 以及不同浓度 OMMT/PEG/HBPA 改性木材的 TEM 结果。未处理木材细胞壁清晰可见 (图中黑线条状为切片时产生的部分裂隙)。经过 PEG/HBPA 处理后, PEG/HBPA 粘附在细胞壁上, 部分填充在木材的孔隙中。添加 2% 的 OMMT 在细胞腔中未发现大量的 OMMT 片层, 但

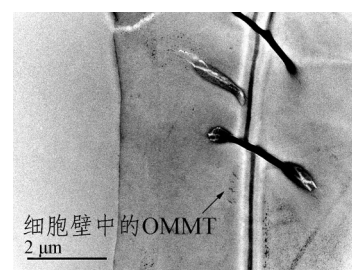
在木材细胞壁内可以发现一些 OMMT, 说明少量的 OMMT 可以进入到细胞壁内。而 OMMT 添加量为 4% 时, OMMT 片层大部分凝絮在木材细胞腔内。说明 OMMT 质量分数增加会阻碍 OMMT 进入到木材细胞壁内, 不利于其有效渗透。



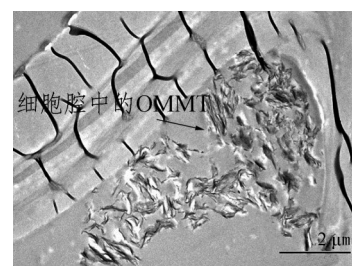
a 未处理



b PEG/HBPA



c 2% OMMT/PEG/HBPA



d 4% OMMT/PEG/HBPA

图7 改性材的TEM图

Fig.7 TEM images of modified wood samples

2.3 改性木材的性能

不同 OMMT 添加量的改性材的性能测试结果列于表 1。

表1 改性木材的增重率、平衡吸水率、体积湿胀率、
抗压强度和抗弯强度

Tab.1 Weight percent gain, equilibrium water absorption,
volume swelling, compression strength, and flexural
strength of PEG/HBPA dispersed OMMT modified wood

改性剂	增重率/ %	平衡吸水 率/%	体积湿胀 率/%	抗压强 度/MPa	抗弯强 度/MPa
无	0 (0.0)	145.2 (0.5)	15.0 (1.8)	45.6 (6.1)	62.3 (8.2)
PEG/HBPA	4.6 (0.1)	125.7 (1.7)	13.3 (0.8)	59.1 (6.3)	77.4 (5.5)
2%OMMT/ PEG/HBPA	4.9 (0.2)	103.0 (2.2)	11.2 (0.4)	70.2 (8.3)	85.6 (6.3)
4% OMMT/ PEG/HBPA	5.11 (0.2)	99.1 (0.7)	10.9 (0.5)	71.2 (6.4)	88.4 (4.4)

注：括号内数值为10个重复试件的标准偏差。

加入OMMT后处理材的质量所有增加，说明了更多OMMT进入到木材内。不同OMMT添加量的改性木材的吸水率结果如图8所示。

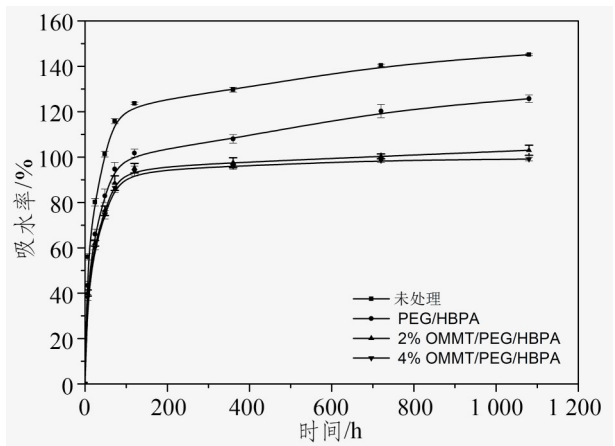


图8 改性木材的吸水率
Fig.8 Water absorption of modified wood samples

结果表明，随着时间的延长，各组试件的吸水率均呈增加趋势，但与未处理木材相比，经PEG/HBPA以及OMMT/PEG/HBPA处理的木材吸水率明显下降，这是由于PEG/HBPA进入到木材中后占据了木材的孔隙，同时干燥后PEG/HBPA可以形成一层疏水的薄膜覆盖在细胞壁上，从而有效阻止了水分进入到木材中。另一方面，木材表面的有效羟基与HBPA反应后，吸水位点减少，因而整体吸水率降低。而添加OMMT的吸水率进一步下降，说明进入到木材细胞壁中的OMMT的片层结构，能够有效阻止水分向木材内扩散^[18]。从

图8中也可以看出，添加OMMT后，处理材的吸水率在192 h之后开始趋于平缓，而未处理组和PEG/HBPA处理组均缓慢增加。表1列出了各组试件在吸水1 080 h后的平衡吸水率，4%MMT/PEG/HBPA处理材的最低，说明改性剂能明显提高木材的防水效果。

PEG/HBPA、2% OMMT/PEG/HBPA和4% OMMT/PEG/HBPA改性试件的体积湿胀率相比未处理组，分别降低了11.3%、25.3%和27.3%，亦表明木材的尺寸稳定性明显提升。由于OMMT与PEG/HBPA占据了木材细胞壁中的孔隙，使进入到细胞中的水分减少，因而尺寸稳定性有所改善。另一方面，PEG/HBPA进入到木材细胞壁形成物理交联，并与木材细胞壁形成氢键结合，有效抑制了木材的吸水变形。而OMMT进入到木材细胞壁中能形成更多的氢键结合，从而使尺寸稳定性进一步提高。

表1还表明，改性后木材的抗压及抗弯强度提高。PEG/HBPA能够提高改性材的力学强度，可能由于PEG-200的物理交联及氢键作用，能够将HBPA和木材紧密连结，使其抵抗外力的能力增加。而OMMT对处理材的力学强度有明显的增强作用，是由于OMMT是一种强度较高的刚性纳米填料，能承载更大的力^[19]。4%OMMT/PEG/HBPA改性材相比2%的抗压强度仅提升1 MPa，抗弯强度改善效果也不明显，这主要是由于OMMT过量则大部分团聚存在于木材细胞腔内，因此作用不明显。

由上述试验结果可以发现，采用质量分数4%的HBPA/PEG与OMMT复合乳液（OMMT质量分数为2%）浸渍处理木材，可以使木材平衡吸水率从145.2%下降至103.0%，体积湿胀率从15.0%降低至11.2%，同时抗弯强度和抗压强度增加约1.5倍，而木材的增重率仅4.89%。相比其他改性处理，如糠醇或酚醛树脂浸渍等（木材增重率需达到15%~50%）^[1]，本试验方法的改性剂用量较少，试验原料来源广泛，成本较低且毒性较小。

但本试验仅对小试件的青杨边材进行了处理，还需进一步研究对大尺寸木材以及不同树种的浸渍处理效果，以期待实现工业化人工速生材的环保改性增值利用。

3 结论

1) PEG和HBPA在乳液中具有良好的相容性,能部分剥离OMMT。PEG能和HBPA以及木材之间形成氢键结合,产生物理交联。添加2%OMMT浸渍处理木材,OMMT可以进入到木材细胞壁中呈剥离状态,而添加4%OMMT则有部分OMMT团聚在细胞腔内。

2) 经过PEG/HBPA改性,处理材的吸水率和体积湿胀率均有所降低,抗压强度和抗弯强度提高。添加OMMT后,处理材物理力学性能进一步提升。但OMMT添加4%的试材组与2%试材组相比,提升幅度不大。

3) 本研究获得了一种操作简单、安全环保、成本低廉的木材浸渍改性方法,但试验仅对小试件的青杨边材进行了处理,还需进一步研究对大尺寸木材以及不同树种的浸渍处理效果,以期待实现工业化人工速生材的环保高效利用。

参考文献:

- [1] 沈晓双, 邹献武, 李改云. 糠醇树脂木材改性技术研究进展[J]. 木材工业, 2017, 31(3): 27-30.
SHEN X S, ZOU X W, LI G Y. Review of wood modification technology with furfuryl alcohol resin[J]. China Wood Industry, 2017, 31(3): 27-30.
- [2] Cabane E, Keplinger T, Merk V, et al. Renewable and functional wood materials by grafting polymerization within cell walls[J]. ChemSusChem, 2014, 7(4): 1020-1025.
- [3] Ermeýdan M A, Cabane E, Hass P, et al. Fully biodegradable modification of wood for improvement of dimensional stability and water absorption properties by poly(ϵ -caprolactone) grafting into the cell walls[J]. Green Chemistry, 2014, 16(6): 3313-3321.
- [4] 赵广杰. 木材中的纳米尺度、纳米木材及木材-无机纳米复合材料[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(Z1): 208-211.
ZHAO G J. Nano-dimensions in wood, nano-wood, wood and inorganic nano-composites[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(Z1): 208-211.
- [5] Wang W, Zhu Y, Cao J Z. Morphological, thermal and dynamic mechanical properties of Cathay poplar/organoclay composites prepared by *in situ* process[J]. Materials & Design, 2014, 59: 233-240.
- [6] LIU R, CHEN Y, CAO J Z. Effects of modifier type on properties of *in situ* organo-montmorillonite modified wood flour/poly(lactic acid) composites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(1): 161-168.
- [7] 陈玉, 曹金珍. 蒙脱土稳定石蜡基Pickering乳液处理材的性能研究[J]. 林业工程学报, 2017, 2(5): 36-40.
CHEN Y, CAO J Z. Effect of dicumyl peroxide(DCP) on properties of paraffin wax based Pickering emulsion stabilized by montmorillonite [J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(5): 36-40.
- [8] Cai X L, Riedl B, Zhang S Y, et al. Formation and properties of nanocomposites made up from solid aspen wood, melamine-urea-formaldehyde, and clay[J]. Holzforschung, 2007, 61(2): 148-154.
- [9] 吕文华. 木材/蒙脱土纳米插层复合材料的制备[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
- [10] Ganjaee Sari M, Ramezanzadeh B, Pakdel A S, et al. A physico-mechanical investigation of a novel hyperbranched polymer-modified clay/epoxy nanocomposite coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2016, 99: 263-273.
- [11] Meyers K P, Decker J J, Olson B G, et al. Probing the confining effect of clay particles on an amorphous intercalated dendritic polyester[J]. Polymer, 2017, 112: 76-86.
- [12] WEI X F, YANG S Y, WANG J C. Hyperbranched polyester-modified montmorillonite: A novel phase change material for energy storage[J]. Polymer International, 2017, 66(9): 1284-1294.
- [13] LI X Y, XU J F, LONG L, et al. Wood composites modified with waterborne hyperbranched polyacrylate dispersed organo-montmorillonite emulsion and the permeability investigations by surface characterizations[J]. Polymer Composites, 2020, 41(9): 3798-3806.
- [14] Kuang X, Kuang R, Zheng X D, et al. Mechanical properties and size stability of wheat straw and recycled LDPE composites coupled by waterborne coupling agents[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 80(3): 927-933.
- [15] LIU R, CHEN Y, CAO J Z. Characterization and properties of organo-montmorillonite modified lignocellulosic fibers and their interaction mechanisms[J]. RSC Advances, 2015, 5(94): 76708-76717.
- [16] 刘平, 黄展淑, 谢志明, 等. 聚丙烯酸与聚乙二醇在浓溶液中的复合作用[J]. 高分子材料科学与工程, 1995, 11(5): 79-82.
LIU P, HUANG Z S, XIE Z M. Complexation of poly(acrylic acid) and polyethylene glycol in concentrated solution[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 1995, 11(5): 79-82.
- [17] Ohkoshi M. FTIR-PAS study of light-induced changes in the surface of acetylated or polyethylene glycol-impregnated wood[J]. Journal of Wood Science, 2002, 48(5): 394-401.
- [18] LIU M, YI Q R, LI J Y, et al. Synergistic effect of montmorillonite/lignin on improvement of water resistance and dimensional stability of *Populus cathayana*[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 141: 111747.
- [19] Utracki L A, Sepehr M, Boccaleri E. Synthetic, layered nanoparticles for polymeric nanocomposites (PNCs) [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2007, 18(1): 1-37.

(本文编校 张鹏、向琴)