

茶多酚浸渍马尾松的改性研究

张 涛<sup>1</sup>,于建芳<sup>1\*</sup>,王 哲<sup>1</sup>,米海娜<sup>1</sup>,郭继然<sup>1</sup>,王喜明<sup>2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 材料科学与艺术设计学院,内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古农业大学 研究生院,内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘 要:**将植物提取物茶多酚与人工林木材相结合,利用真空浸渍法对人工林马尾松木材实施改性,探究其在增重率、尺寸稳定性、密度、色差、茶多酚溶出释放性能等方面的改性效果,并利用 SEM、FT-IR 手段表征木材改性前后的微观结构变化。研究发现,4 种不同工艺预处理中,微波预处理下的马尾松浸渍增重率最高,达到 14.45%,且微波预处理后的改性材尺寸稳定性最好。微波预处理后不同浸渍浓度下的改性材中,密度提高最大,颜色改变最明显的浸渍浓度为 80 g/L,且 80 g/L 浸渍浓度下的改性材药剂释放更持久。改性剂可与分布于木材结构组织内的某些基团发生交联反应,进而更好地发挥其抗氧化作用,并且与木材中的某些糖可能产生络合反应。

**关键词:**人工林;马尾松;茶多酚;木材改性

**中图分类号:**S791.24      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2020)04-0191-06

Modification of *Pinus massoniana* Timber Infused with Tea Polyphenols

ZHANG Tao<sup>1</sup>, YU Jian-fang<sup>1\*</sup>, WANG Zhe<sup>1</sup>, MI Hai-na<sup>1</sup>, GUO Ji-ran<sup>1</sup>, WANG Xi-ming<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Art Design, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;

2. Graduate School, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Tea polyphenol (TPP) was used to modify the timber of *Pinus massoniana* by vacuum infusion method. Timbers to be modified were pretreated by four different methods. The results of the modification were examined by measuring the relative parameters, such as weight gain rate, dimensional stability, density, color difference and release rate of TPP. The changes of the microstructure of the timber before and after the modification were characterized by SEM and FT-IR. The results showed that microwave pretreatment was the best one among the four methods, manifested by the highest weight gain rate (14.45%) and dimensional stability. Among different infusion concentrations of TPP, 80 g/L was the preferable one, by which the density increase, color change, and persistence of TPP release of the modified timber that was pretreated by microwave were most significant. Some crosslink reactions occurred between the groups of TPP and wood structure, resulted in better antioxidant ability of the timber, complex reaction might also occur between TPP and wood saccharides.

**Key words:**plantation; *Pinus massoniana*; tea polyphenol; wood modification

近年来,为了有效保护天然林木资源,人工速生林在我国广泛种植。第八次全国森林资源清查结果显示,我国人工林面积仍居世界首位<sup>[1]</sup>。人工速生林出材时间短产量高,但具有密度低、木质松软、物

理力学强度差和易产生干缩变形等缺陷,从而限制了速生林木品种的使用范围,在高附加值加工领域的应用较少<sup>[2]</sup>。茶多酚是指茶叶中一大类组成复杂、分子量及其结构差异很大的多酚类及其衍生物

收稿日期:2019-10-19 修回日期:2019-11-11  
基金项目:国家自然科学基金(31760186)。  
作者简介:张 涛。研究方向:木材干燥与保护。E-mail:1034299825@qq.com  
\* 通信作者:于建芳,副教授。研究方向:木材干燥。E-mail:yjf\_112@163.com

混合物,主要由儿茶素、黄酮类、黄酮醇类、花色苷类等组成的有机化合物,儿茶素约占 60%~80%<sup>[3-5]</sup>。茶多酚具有抗氧化、抑菌、抗肿瘤、延缓衰老、调节免疫功能和防治心脑血管疾病的作用,在日用化工、食品保健和医药领域应用广阔<sup>[6-7]</sup>,茶多酚的抗氧化特性有利于阻止特定固相或液相材料的低温氧化、自加热和自燃现象<sup>[8]</sup>。如能将茶多酚与人工林木材料应用相结合,可扩大人工林木材料应用范围并提高其产品附加值。

通过物理和化学等改性方法,可以提高木材的力学性能、尺寸稳定性、耐久性等,在保留木材本身优点的基础上进一步提高了木材产品附加值<sup>[9-11]</sup>。有机单体改性是将低分子量单体浸渍到木材孔隙结构中,填充木材孔隙以阻碍水分和微生物对木材的接触,从而提高木材的力学性能<sup>[12-13]</sup>。本研究采用植物提取物茶多酚的水溶液,在真空条件下浸渍木材,以此来实现人工林马尾松改性的目的,开展增重率、尺寸稳定性、密度、色差、茶多酚溶出释放速率、SEM 分析、红外光谱分析,为更好地利用植物提取物药剂及提高人工林马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)产品附加值提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

人工林马尾松,试件规格为 210 mm×100 mm×20 mm(长×宽×厚),四面刨光,无节疤;茶多酚(*Tea polyphenol*),西安瑞林生物科技有限公司,纯度 98%;蒸馏水。

DZF-ZASB 型真空干燥箱,北京科伟永兴仪器有限公司;DGH-9245A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海齐欣科学仪器有限公司;MKX-G3 型微波干燥箱,青岛迈克威微波应用技术有限公司;GDJSX-120A 型高低温交变湿热试验箱,上海跃进医疗器械有限公司;DW-60W308 型超低温保存箱,浙江捷盛低温设备有限公司;BPS-100CA 型恒温恒湿箱,上海一恒科学仪器有限公司;SWS-1 型色差仪,上海物光科技开发有限公司;Hitachi-S4800 型扫描电子显微镜,日本日立;Nicolet6700 型傅里叶红外光谱仪,美国 Nicolet 公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 木材改性处理 4 种预处理条件:①冷冻预处理,恒温 -25℃ 条件下冷冻处理 24 h;②水煮预处理,恒定水温 100℃ 条件下水煮处理 4 h;③汽蒸预处理,温度 100℃ 和湿度 100% 条件下汽蒸处理 4 h;④微波预处理,以 1.6 kW 功率条件下微波处理 4 min。

预处理后将板材干燥至绝干,进一步加工成规格为 50 mm×30 mm×20 mm(长×宽×厚)的试样,进行茶多酚溶液浸渍处理。采用 2 种不同浓度的茶多酚水溶液分别为 40 g/L、80 g/L,进行浸渍处理,浸渍前先称重,在相对真空度为 -0.08 MPa 条件下,抽真空浸渍 50 min 后恢复常压继续浸渍,共浸渍 400 min,浸渍完成后干燥到绝干并称重,以未浸渍的素材为对照组。

1.2.2 改性材尺寸稳定性的测试 将改性材与素材加工成尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm 的试样,试样制作精度与检验按 GB/T 1928-2009《木材物理学试验方法总则》规定进行,不同预处理条件下的改性材与素材试样各 10 个。测试方法参照国家标准 GB/T1931-2009《木材含水率测定方法》、LY/T2490-2015《改性木材尺寸稳定性测定方法》进行。

1.2.3 改性材密度的测试 改性材与素材密度的测定参照国家标准 GB/T1933-2009《木材密度测定方法》进行。

1.2.4 改性材色差的测试 利用色差仪在温度为 20℃,相对湿度为 65% 的环境下进行测量。为保证测量结果的准确性,仪器自带程序设定为每个试样取 6 个点测量结果的平均值作为该试样的测量值。

1.2.5 茶多酚溶出释放速率的测试 浸渍完毕且绝干的茶多酚改性材试样,放入 500 mL 蒸馏水中以 65℃ 恒温浸泡,浸泡时间以 10 min 为间隔共测量 9 次,浸泡后进行绝干称重,计算不同浸泡时间下茶多酚的溶出释放速率。

### 1.3 分析与表征

1.3.1 SEM 分析 用 SM2010R 型平推式切片机将木块试样切片,并用双面胶固定在金属载物台上,在样品表面和截面喷镀金膜后利用 Hitachi-S4800 型 SEM 观测其微观形貌。

1.3.2 FT-IR 分析 将试样用打粉机磨成粉末,经 100℃ 干燥后压片,使用 Nicolet6700 型 FT-IR 红外分析仪作检测,分辨率优于 0.4 cm<sup>-1</sup>,扫描范围 500~4 000 cm<sup>-1</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 预处理工艺的影响

2.1.1 增重率 由图 1 可知,不同方法预处理后对马尾松进行真空浸渍茶多酚改性处理,不同预处理方法对浸渍增重率影响不同,增重率微波预处理>汽蒸预处理>冷冻预处理>水煮预处理,且微波预处理和汽蒸预处理下的马尾松浸渍增重率更高,微波预处理下增重率更是达到 14.45%,造成这一现象应该这是由于汽蒸预处理使马尾松管胞壁上的纹孔

膜发生水解、变薄或脱落,增大纹孔膜上微孔口的直径,减少了纹孔对流体的阻碍作用,从而提高了渗透性<sup>[14-15]</sup>,微波预处理使木材内部具有疏导作用的管胞壁上的纹孔的纹孔口附近遭到破坏<sup>[16-17]</sup>,使液体更容易在管胞间流通,提高了马尾松的浸渍性。由图中还可知,浸渍溶液浓度越高则增重率也越大,增重率几乎和浓度大小成正比关系,80 g/L 浓度下的增重率约为 40 g/L 浓度下增重率的 2 倍。由此可得,对马尾松改性材增重率最高的较优预处理方法为微波预处理。

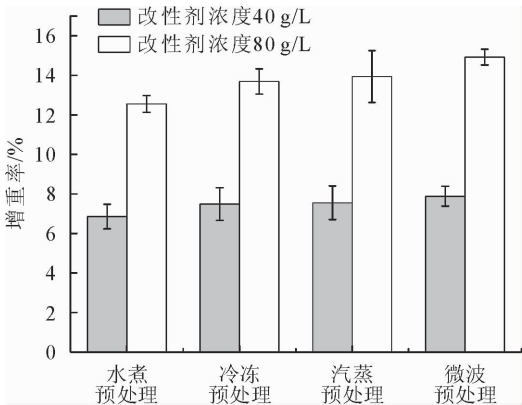


图1 不同预处理下改性材的增重率

Fig.1 Weight gain rate of modified timber under different pretreatments

2.1.2 尺寸稳定性 由图 2 可知,不同预处理条件下的改性材,其径向线吸湿膨胀率、弦向线吸湿膨胀率、体积吸湿膨胀率均低于素材。且微波预处理下的改性材湿胀率最低,这可能是由于微波预处理下的改性材增重率最高、浸渍性最好,使茶多酚经由起主要疏导作用的管胞进入木材组织内部,并均匀分散附着于马尾松木材内部的微观组织结构表面,类似于混合薄膜贴面的效果<sup>[18]</sup>,当改性材置于高湿环境中时,茶多酚将空气中的水分子与木材隔离开来,使水分很难通过孔隙结构与木材内的羟基结合来影响改性材的尺寸稳定性。由图 2 还可发现,汽蒸预处理下的改性材吸湿膨胀率较其他 3 种预处理要高,这是由于汽蒸处理会使脂类物质和水在木材内部及表面产生共沸现象,树脂和水蒸气一道蒸发出来起到脱脂效果<sup>[19-20]</sup>,且汽蒸处理会使大量纹孔膜破裂而疏通了汽、水通道<sup>[21]</sup>,综合导致水分进入并接触木材的机会增多,造成了吸湿膨胀率相比于其他 3 种预处理而偏高。综上可知,微波预处理后的马尾松改性材尺寸稳定性最好,即较优预处理条件为微波预处理。

2.2 茶多酚浓度的影响

2.2.1 不同浸渍浓度对改性材密度的影响 经微

波预处理并干燥后,对马尾松以不同浓度进行真空浸渍茶多酚改性处理。由图 3 可知,马尾松经改性处理后密度增大,当改性剂浓度成倍增大时,全干密度得增加量也接近成比例增大,即密度增大的趋势与改性剂浸渍浓度基本呈正相关,当浸渍浓度为 80 g/L 时,改性材密度相对于素材增加量最大,达到 26.25%。

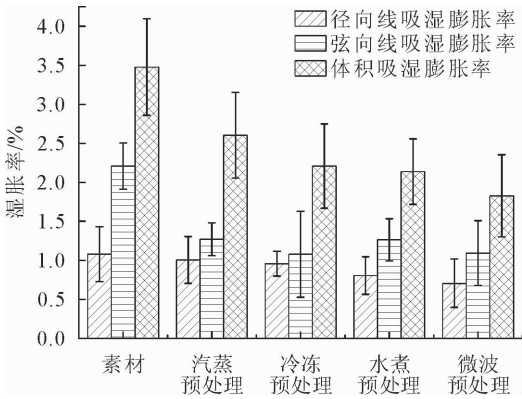


图2 不同预处理后进行浸渍的改性材湿胀率

Fig.2 Swelling rate of modified timber impregnated after different pretreatments

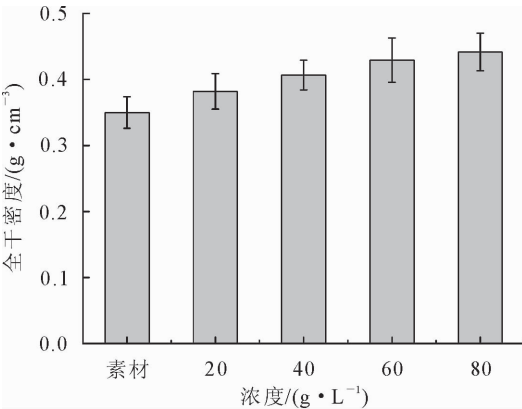


图3 不同浸渍浓度的改性材全干密度

Fig.3 Full dry density of modified timber with different infusion concentrations

2.2.2 不同浸渍浓度对改性材色差的影响 对微波预处理条件下的不同浓度浸渍改性材进行色差测量,马尾松素材与改性材的颜色值变化见表 1。由表 1 可知,经过浸渍茶多酚改性后马尾松的明度值 ( $L^*$ )、红绿值 ( $a^*$ ) 和黄蓝值 ( $b^*$ ) 都发生了变化,导致改性材与素材产生色差<sup>[22-24]</sup>。相比素材,改性材的明度值  $L^*$ 、黄蓝值  $b^*$  都有明显的降低,且随着浸渍浓度的增大使明度值和黄蓝值的差值  $\Delta L^*$ 、 $\Delta b^*$  越大,而红绿值  $a^*$  变化却很小,基本是在素材的红绿值  $a^* = 10.78$  左右变化,3 个颜色值的变化综合导致色差值  $\Delta E^*$  随着浸渍浓度的增大而增大,当浸渍浓度为 80 g/L 时,色差值  $\Delta E^*$  最高达到了 45.45,颜色变化体现为偏黑少红少黄。由此可见浸

表 1 马尾松素材与改性材颜色值  
Table 1 Color values *Pinus massoniana* timbers

	<i>L</i> <sup>*</sup>	<i>a</i> <sup>*</sup>	<i>b</i> <sup>*</sup>	Δ <i>L</i> <sup>*</sup>	Δ <i>a</i> <sup>*</sup>	Δ <i>b</i> <sup>*</sup>	Δ <i>E</i> <sup>*</sup>
素材	71.66	10.78	32.14				
浸渍浓度 20 g/L	50.66	11.93	25.52	−21.00	1.15	−6.62	22.05
浸渍浓度 40 g/L	42.21	10.63	20.08	−29.45	−0.15	−12.06	31.83
浸渍浓度 60 g/L	38.32	11.68	16.80	−33.34	0.90	−15.34	36.71
浸渍浓度 80 g/L	31.59	9.28	10.75	−40.07	−1.50	−21.40	45.45

渍茶多酚改性材会使马尾松颜色发生变化,而由于浸渍浓度不同使木材对改性剂茶多酚的吸收量不同,导致颜色变化的程度不同,经 80 g/L 浓度浸渍改性处理的改性材颜色变化最明显。

2.2.3 茶多酚溶出释放性能 对微波预处理条件下的不同浓度浸渍改性材做茶多酚溶出释放性能检测。由图 4 可知,浓度为 80 g/L 的改性材在 60 min 之前的曲线斜率趋于一定,说明释放速率接近于匀速下降的趋势,以 60 min 处为拐点,之后释放速率的下降速度明显减缓,并逐渐恒定;而浓度为 40 g/L 的改性材释放速率在 40 min 之前的曲线斜率趋于一定,即释放速率接近于匀速下降,在 40 min 处之后的释放速率明显减缓,也在 60 min 后趋于恒定。由图 4 还可看出,在相同的浸泡时间下,改性剂浓度为 80 g/L 的改性材溶出释放速率始终高于 40 g/L 浓度的改性材,且在 30 min 后的释放速率接近于 2 : 1 的关系。由此可见在相同的浸泡时间下,改性材中茶多酚改性剂浓度越高则溶出释放速率越高,且对于释放速率趋于恒定的拐点出现的时间,浸渍浓度为 80 g/L 下的改性材要比 40 g/L 浓度的改性材有很大的延迟,说明 80 g/L 浸渍浓度下的改性材药剂释放更持久。

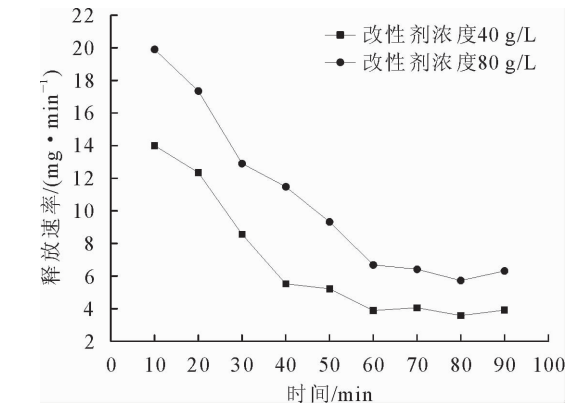


图 4 改性材中茶多酚的溶出释放速率曲线  
Fig. 4 Tea polyphenol release rate of modified timbers

2.3 表征分析

2.3.1 SEM 图像分析 对马尾松素材和微波预处理条件下的浸渍改性材进行扫描电镜观察,如图 5

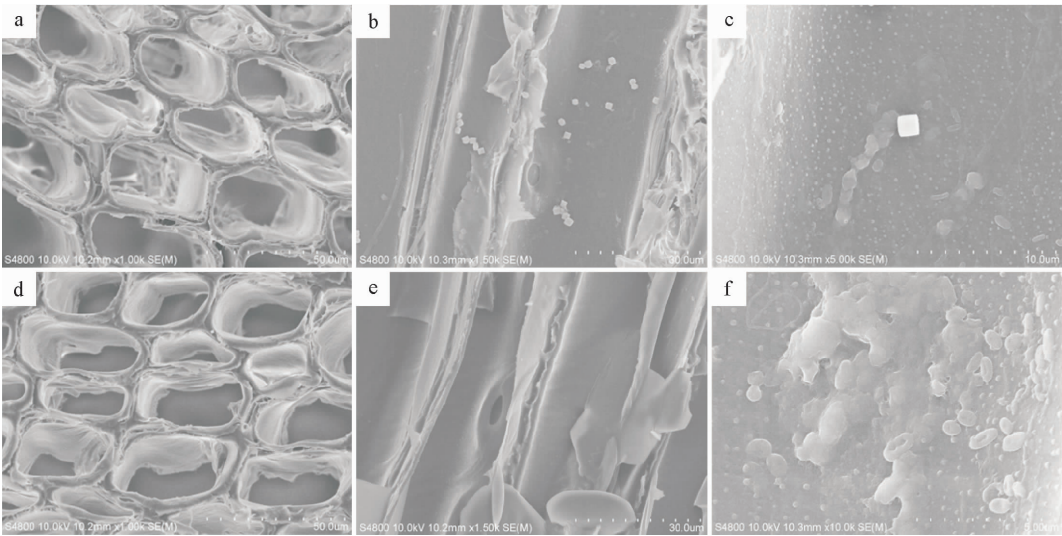
所示。对比图 5a 和图 5d 可以看出,改性材横切面管胞孔腔内壁上可见有颗粒物、球状物或团聚状物质附着;对比图 5b 与图 5e 来看,改性材管胞壁上有结晶物以颗粒状或球状附着,呈分散或聚集分布,可见是改性剂茶多酚经过干燥后结晶析出导致,而对比素材的管胞切面纹路清晰可见,内壁整洁平滑、干净无附着物;由图 5c 和图 5f 可以发现,有小颗粒状的改性剂均匀分散附着于改性材管胞壁上,整体呈现出一种磨砂涂层状,还有以较大圆球或椭圆状颗粒存在,直径在 10~50 μm,这与李朝建等<sup>[25]</sup>的研究相符,在聚集较多的地方改性剂并未能以具体形状结晶,而是以不规则的团聚状整体附着于管胞壁上。茶多酚改性剂通过这一系列的分布方式,以间隔层形式将进入管胞内的汽水分子和木材内部组织结构分隔开来,使水分对马尾松尺寸稳定性的影响有所降低。

2.3.2 红外光谱分析 由图 6 可知,高于 3 500 cm<sup>-1</sup>处没有出现吸收峰,是因为木粉经过干燥已不存在气态 H<sub>2</sub>O;3 500 cm<sup>-1</sup>附近处为缔合羟基峰,对比素材,改性处理后的木材羟基数量明显减少,是由于茶多酚改性剂中儿茶素分子起到供氢体的作用,与木材中的游离羟基相结合而发挥其抗氧化作用使整体羟基数量减少<sup>[26-28]</sup>;2 920 cm<sup>-1</sup>附近 C-H 的伸缩振动是纤维素的特征峰,改性材的振动与素材相比减弱,说明加入改性剂后导致改性材纤维素相对含量降低;在低波数区,改性剂与木材的结构发生交联作用,使改性材的羧基含量减少,导致改性材在 1 740 cm<sup>-1</sup>处的 C=O 的伸缩振动减弱;1 245 cm<sup>-1</sup>处半纤维素 O=C-O 键和木质素中芳环骨架的 C-OR 的振动也有所减弱,1 103 cm<sup>-1</sup>处-OH 的伸缩振动吸收峰减弱,说明改性剂可与分布于木材结构组织内的某些基团发生交联反应,进而更好地发挥其抗氧化作用;1 100~1 000 cm<sup>-1</sup>处的糖环 C-OH 伸缩振动减弱,可能是由于茶多酚与木材中的某些糖产生络合反应所致<sup>[29]</sup>。

3 结论与讨论

对比 4 种不同方法预处理后对马尾松进行真空





注:a. 改性材横切面(1.00 k);b. 改性材纵切面(1.50 k);c. 改性材纵切面(5.00 k);d. 素材横切面(1.00 k);e. 素材纵切面(1.50 k);f. 改性材纵切面(10.0 k)。

图 5 素材和改性材的 SEM 图

Fig. 5 SEM images of original and modified timbers

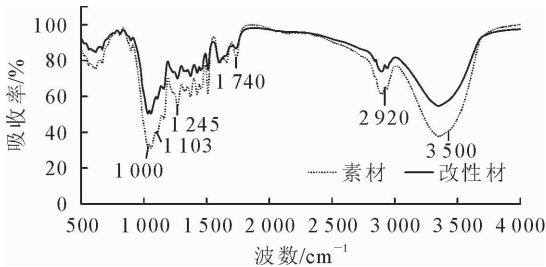


图 6 素材和改性材的红外光谱

Fig. 6 FTIR spectrum of materials and modified materials

浸渍茶多酚改性处理,发现微波预处理下的马尾松浸渍增重率最高,不同预处理条件下的改性材吸湿膨胀率均低于素材,且微波预处理后的改性材尺寸稳定性最好,即对改性效果较优的预处理条件为微波预处理。对微波预处理后不同浸渍浓度下的改性材密度、色差测试发现,密度提高最大,颜色改变最明显的浸渍浓度为 80 g/L;并对改性材做改性剂溶出释放性能检测发现,在相同的浸泡时间下,改性剂浓度为 80 g/L 的改性材溶出释放速率始终高于 40 g/L 浓度的改性材,且在 30 min 后的溶出释放速率接近于 2 : 1 的关系,且对于释放速率趋于恒定的拐点出现的时间,浸渍浓度为 80 g/L 下的改性材要有很大的延迟,药剂释放更持久;综合得出较优改性浸渍浓度为 80 g/L。

改性剂以均匀小颗粒状、直径在 10~50 μm 较大圆球或椭圆状颗粒均匀分散附着于木材管胞壁上,整体呈一种磨砂涂层状或团聚状。改性剂茶多酚可与分布于木材结构组织内的游离羟基相结合,发挥其抗氧化作用使木材内部羟基减少,还可与木

材内部某些基团发生交联作用,并可能与木材中的某些糖产生络合反应。

参考文献:

[1] 徐济德. 我国第八次森林资源清查结果及分析[J]. 林业经济, 2014(3):6-8.  
XU J D. The 8th forest resources inventory results and analysis in China[J]. Forestry Economics, 2014(3):6-8. (in Chinese)  
[2] 郎倩,毕增,郑雪,等. 交联型改性剂提高速生杨木材的应用品质及机理分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8):267-275.  
LANG Q, BI Z, ZHENG X, et al. Cross-linking modifier improves applied quality of fast-growing poplar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (8):267-275. (in Chinese)  
[3] 王京雅. 茶叶中多糖及多酚类成分的理化性质及活性研究[D]. 天津:天津大学, 2017.  
[4] 黄皓,毛志方,涂云飞,等. 两种方法测定茶叶中茶多酚含量的比较[J]. 中国茶叶加工, 2009(2):43-44.  
[5] 牛知慧,高原,周露露,等. 三种茶叶中多酚提取物的抑菌活性及其对致病菌膜渗透性的比较分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(3):116-119,198.  
NIU Z H, GAO Y, ZHOU L L, et al. The antibacterial activity of 3 kinds of tea polyphenols extracts and effect on pathogenic cell membrane permeability [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(3):116-119,198. (in Chinese)  
[6] 冯瑛,李洁,王旭捷,等. 内部沸腾法提取茶多酚工艺优化及其与水提法的比较[J]. 食品工业科技, 2019, 40(18):160-164, 176.  
FENG Y, LI J, WANG X J, et al. Optimization of extraction process of tea polyphenols by internal boiling method and comparison with water extraction method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(18):160-164,176. (in Chinese)  
[7] IVANA L, BILJANA P, VESNA T, et al. Physical, sensorial

and bioactive characteristics of white chocolate with encapsulated green tea extract[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(13): 5834-5841.

[8] 姚奉奇, 陶骏骏, 王海晖, 等. 茶多酚热解特性及其反应机理研究[J]. 林产化学与工业, 2017, 37(5): 19-27.

YAO F Q, TAO J J, WANG H H, *et al.* Study of pyrolysis behavior and reaction mechanism of tea polyphenols[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2017, 37(5): 19-27. (in Chinese)

[9] HAN X S, WANG Z X, ZHANG Q Q, *et al.* Negative oxygen ion (NOI) production by enhanced photocatalytic TiO<sub>2</sub>/GO composites anchored on wooden substrates[J]. Holzforschung, 2019, 73(4): 415-422.

[10] 石媛, 刘君良, 吕文华, 等. 酸、碱硅溶胶改性木材的制备与性能研究[J]. 木材工业, 2019, 33(1): 21-24, 33.

SHI Y, LIU J L, LU W H, *et al.* Preparation and properties of wood modified with acidic and alkaline silica sols[J]. China Wood Industry, 2019, 33(1): 21-24, 33. (in Chinese)

[11] LUKAS E, SUSANNE B, HOLGER M. Wood modification with DMDHEU (1, 3-dimethylol-4, 5-dihydroxyethyleneurea)-state of the art, recent research activities and future perspectives[J]. Wood Material Science and Engineering, 2017, 14(1): 1-16.

[12] MIT C Y, SIBEL Y, ENGIN D G. Mechanical properties and decay resistance of wood-polymer composites prepared from fast growing species in Turkey[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(9): 1003-1011.

[13] XIE Y J, FU Q L, WANG Q W, *et al.* Effects of chemical modification on the mechanical properties of wood[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2013, 71(4): 401-416.

[14] 王晓敏. 两种常用速生阔叶材的渗透性及其改善的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.

[15] 李恒, 徐熠雯, 赵紫剑, 等. 超声波和汽蒸预处理对桉木干燥速率的影响[J]. 木材工业, 2018, 32(1): 44-47.

LI H, XU Y W, ZHAO Z J, *et al.* Effects of ultrasonic and steam pretreatment on drying rate of *Eucalyptus* wood[J]. China Wood Industry, 2018, 32(1): 44-47. (in Chinese)

[16] TERZIEV N, DANIEL G. Industrial kiln drying and its effect on microstructure, impregnation and properties of scots pine timber impregnated for above ground use, part 2, effect of drying on microstructure and some mechanical properties of scots pine wood[J]. Holzforschung, 2002, 56(4): 434-439.

[17] 江涛, 李秀荣, 谢延军, 等. 微波预处理对巨尾桉木材渗透性的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 174-177.

JIANG T, LI X R, XIE Y J, *et al.* Effects of microwave pretreatment on the permeability of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(1): 174-177. (in Chinese)

[18] EDGARS K, SILVIJA K, JANIS G, *et al.* Moisture absorption properties of hardwood veneers modified by a sol-gel process [J]. Holzforschung, 2017, 71(7): 1-4.

[19] 汪佑宏, 顾炼百. 汽蒸及干燥温度对马尾松锯材脱脂的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2003, 27(1): 27-29.

WANG Y H, GU L B. Effects of the steaming and drying temperature on deresination of *Pinus massoniana* lumber[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2003, 27(1): 27-29. (in Chinese)

[20] 高建民, 王喜明. 木材干燥学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2018.

[21] 程曦依, 李贤军, 贺霞, 等. 过热蒸汽温度对马尾松干燥速率和力学性能的影响[J]. 林业工程学报, 2016, 1(6): 51-57.

CHENG X Y, LI X J, HE X, *et al.* Effect of superheated steam temperature on the drying rate and mechanical properties of masson pine wood [J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(6): 51-57. (in Chinese)

[22] 王小升, 金权蓉, 陈方敏, 等. 再造烟叶贮存过程中颜色变化的研究[J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2019, 34(2): 290-296.

WANG X S, JIN Q R, CHEN F M, *et al.* Research on color change during the storage of reconstituted tobacco [J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2019, 34(2): 290-296. (in Chinese)

[23] 高力娇, 朱晓冬, 刘乾, 等. 改性热敏黑温致变色木材的耐老化性研究[J]. 森林工程, 2018, 34(4): 63-69.

[24] 王晓倩, 于志明, 张扬, 等. 速生杨木单板染色阻燃性能研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 276-280.

WANG Q Q, YU Z M, ZHANG Y, *et al.* Dyeing and flame retardant properties of poplar veneer [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(5): 276-280. (in Chinese)

[25] 李朝建, 庄亚东, 廖惠云, 等. 茶多酚/β-环糊精复合材料的合成条件对降低卷烟主流烟气 TSNA 的影响[J]. 烟草科技, 2014(4): 55-59.

LI C J, ZHUANG Y D, LIAO H Y, *et al.* Effects of preparation conditions for tea polyphenols/β-cyclodextrin composites on reducing tsnas in mainstream cigarette smoke [J]. Tobacco Science and Technology, 2014(4): 55-59. (in Chinese)

[26] 高智慧. 茶叶生物活性成分分析及其抗氧化作用研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.

[27] ZENG Y W, ZHAO J L, PENG Y H. A comparative study on the free radical scavenging activities of some fresh flowers in Southern China [J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 41(9): 1586-1591.

[28] PRIOR R L, WU X, SCHAICH K. Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(10): 4290-4302.

[29] 梁靖, 陈留记, 杨贤强, 等. 茶多酚的络合作用研究进展[J]. 茶叶, 2003(2): 72-74.