

XPS 和 FTIR 分析仿生呼吸法对硅酸盐改性杉木浸渍效果的影响

李 萍^{1,2}, 吴义强¹, 吕建雄³, 袁光明¹, 左迎峰^{1*}

1. 中南林业科技大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410004

2. 湘南学院美术与设计学院, 湖南 郴州 423000

3. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091

摘 要 杉木进行硅酸盐浸渍改性处理后, 木材内部的改性剂相关元素含量与分布是衡量浸渍效果的重要指标, 对改性杉木的各项物理力学性能有着至关重要的作用。以硅酸盐为浸渍改性剂, 采用仿生呼吸法对杉木进行浸渍改性。研究了仿生呼吸法对硅酸盐改性杉木的密度、抗弯强度、抗压强度、三切面硬度和 24 h 吸水率影响, 利用 XPS 和 FTIR 分析了杉木素材与改性材的化学成份与化学结构, 并对硅酸盐改性剂在改性杉木中的分布深度与分布规律进行了探讨。结果表明: 经过硅酸盐浸渍改性后, 改性杉木平均密度大于 $0.721 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 抗弯强度和抗压强度分别增大了 170.19% 和 286.64%。改性杉木横切面、径切面和弦切面的硬度均有不同程度的提高。硅酸盐改性使杉木的 24 h 吸水率从 $91.17\% \pm 2.51\%$ 降至 $39.23\% \pm 1.62\%$, 表明杉木的尺寸稳定性大幅度提高。相比于杉木素材, 改性杉木木材的 XPS 全谱扫描中出现了 Na 元素和 Si 元素的吸收峰, 窄扫谱图中出现了 Si—O—C 和 Na—O 化学结构。同时, 改性杉木木材的 FTIR 谱图中出现了 Si—O—Si 的吸收峰, 并且游离羟基含量减少, 缔合羟基增多。XPS 和 FTIR 分析都表明硅酸盐浸注到了杉木木材的孔隙中, 且硅酸钠与杉木木材中羟基形成了化学键结合和氢键结合。这也是改性杉木的力学性能和耐水性能提高的重要原因。另外, 通过 XPS 测试发现改性杉木木材沿横向从表面到 30 mm 处都出现了 C, O, Na 和 Si 元素, 并且沿横向从表面到 30 mm 处, Si—O—C 结合结构的吸收峰强度基本相同, 说明从表面到中间部位, 硅酸钠与杉木木材中的羟基都较均匀地形成了化学键。对各元素进行定量分析发现, 改性杉木木材中 C, O, Na 和 Si 元素的相对含量从表面到中间部位(30 mm)差异较小, 进一步表明改性剂能较好地浸入杉木木材中间, 并且均匀性较好。研究结果将为杉木浸渍改性效果提供数据支撑, 并为优化改性工艺与方法、进一步提高改性杉木的物理力学性能提供依据。

关键词 杉木; 硅酸盐; 仿生呼吸法; XPS; FTIR

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)05-1430-06

引 言

杉木在我国栽培历史悠久、分布广、产量高, 但实际生产中的应用却与其产量相差悬殊。其主要的原因在于杉木具有结构疏松、强度和硬度低、不耐磨、易吸湿、尺寸不稳定等缺点; 导致制作的家具、地板等产品使用寿命偏低^[1-2]。尤其是人工培育的杉木速生林, 其材质的缺陷极大的限制了它的应用。研究发现将人工林木材浸泡到改性剂溶液中, 通过压力使改性剂扩散进入木材细胞腔和细胞壁使木材增容, 再经干燥除去水分, 最后加热使改性剂固化得到浸渍改性木

材。通过浸渍改性可显著提高木材的密度, 可实现低质人工林木材的高值利用^[3-4]。现有浸渍改性剂中, 有机物改性药剂价格高, 改性材在生产与使用过程中容易释放有毒有害气体, 威胁人与环境的安全^[5]。而以硅酸盐类为代表的无机物改性不仅可以大幅度提高杉木的物理力学性能, 克服杉木结构疏松、密度小、强度低的缺陷; 且能保持木材的环境学特性且成本低廉、环境友好。但杉木作为无孔材且存在大量闭塞纹孔, 浸渍时改性剂仅通过轴向管胞和纹孔进行径向、弦向渗透, 其渗透深度与均匀性对于最终改性杉木的性能有着至关重要的影响^[6]。

为探明仿生呼吸法对硅酸盐改性杉木浸渍效果、增强效

收稿日期: 2020-05-14, 修订日期: 2020-09-06

基金项目: 湖湘青年英才支持计划(2019RS2040), 国家自然科学基金面上项目(31770606)和湖南省研究生科研创新项目(CX20190600)资助

作者简介: 李 萍, 1988 年生, 中南林业科技大学材料科学与工程学院博士研究生 e-mail: pzxiaomei@163.com

* 通讯作者 e-mail: zuoyf1986@163.com

果、尺寸稳定效果的影响,采用X-射线光电子能谱和傅里叶变换红外光谱对硅酸盐改性杉木的元素组成和含量、化学环境、分子结构等信息进行了测试。旨在探明硅酸盐改性剂在杉木中的分布深度及均匀性,从而验证其浸渍效果。同时分析硅酸盐与杉木的化学结合形式,解释硅酸盐改性杉木力学性能和耐水性能提高的原因。为优化硅酸盐改性杉木浸渍工艺,进一步提高杉木各项性能提供参考与依据。

1 实验部分

1.1 材料

试验用杉木(*Cunninghamia lanceolata*)采自湖南省永州市,木段纵向长度2 m,直径15~20 cm,气干密度为0.35~0.45 g·cm⁻³,含水率15%~20%,心材比例约30%,边材比例约70%;硅酸钠溶液购自湖南荷塘化工有限公司,工业级,模数3.4,浓度(质量分数)为44.5%;固化剂主要成分包括硫酸盐、钙盐和磷酸盐,均购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 方法

1.2.1 试件制备

将杉木放入80℃的鼓风烘箱中干燥至含水率为10%~12%,放入浸渍罐中,将浸渍罐密封;先对浸渍罐抽真空至-0.098 MPa,保压12.5 min;将硅酸钠配成31.60%的溶液(A组分),利用浸渍罐中负压将A组份吸入到浸渍罐中,卸压;再通过空气压缩机对浸渍体系进行加压至0.7 MPa,保压25 min;卸压并将A组分排出后,再将浸渍罐中抽真空至-0.098 MPa,保压12.5 min;将B组份(固化剂)吸入浸渍罐中,卸压;对浸渍罐进行加压至0.7 MPa,保压25 min,并将B组份排出。以此负-正交替方法进行循环3次。卸压,将浸渍后的杉木拿出,冲洗并擦干表面。采用梯级升温法对样品进行干燥,先在60℃烘箱中干燥4 h,然后在80℃烘箱中干燥1.5 h,最后120℃烘箱中干燥0.5 h,得到硅酸盐浸渍改性杉木。

1.2.2 物理力学性能测试

杉木素材和改性杉木的密度参照GB/T 1933—2009《木材密度测定方法》进行检测,试件尺寸为20 mm×20 mm×20 mm(纵向×径向×弦向,下同);抗弯强度参照GB/T 1936.1—2009《木材抗弯强度试验方法》进行测试,试件尺寸为300 mm×20 mm×20 mm;顺纹抗压强度参照GB/T 1935—2009《木材顺纹抗压强度试验方法》进行试验,试件尺寸为30 mm×20 mm×20 mm;硬度参照GB/T 1941—2009《木材硬度试验方法》进行测试,70 mm×50 mm×50 mm;吸水率参照GB/T 1934.1—2009《木材吸水性测定方法》进行测试,70 mm×50 mm×50 mm。

1.2.3 X射线光电子能谱测试

采用K-Alpha型X射线光电子能谱仪(ThermoFisher公司)对杉木素材和改性杉木中各元素的化学环境和相对含量进行测试。分析采用Al-K α 靶(1486.6 eV),X射线束能量为100 W,光栅直径为200 mm,灵敏度350 kcps,分析室真空度10⁻⁸ bar。

1.2.4 傅里叶变换红外光谱测试

从尺寸为60 mm×60 mm×700 mm的杉木试件中间部位取样,通过粉碎机进行粉碎并过200目筛网。采用KBr压片法制备样品,在日本SHIMADU公司生产的Raffinity-1型傅里叶变换红外光谱仪上进行测试。扫描波长范围为400~4000 cm⁻¹,分辨率为0.35 cm⁻¹,单点反射法测试。

2 结果与讨论

2.1 增强和尺寸稳定效果验证

杉木的物理力学性能是其在家具、地板、室内装饰和建筑结构等领域应用的重要指标。为验证硅酸盐仿生呼吸改性杉木增强和尺寸稳定效果的影响,分别对杉木素材和改性杉木的密度、抗弯强度、抗压强度、三切面硬度和24 h吸水率进行了测试,结果如表1所示。

表1 杉木素材和改性杉木物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of unmodified and modified Chinese fir

杉木种类	密度/ (g·cm ⁻³)	抗弯强度/ MPa	抗压强度/ MPa	横切面硬度/ kN	径切面硬度/ kN	弦切面硬度/ kN	24 h吸水率/ %
杉木素材	0.384±0.004	45.5±2.58	22.54±1.97	3.63±0.16	1.10±0.11	1.28±0.07	91.17±2.51
改性杉木	0.725±0.003	122.91±3.27	87.15±2.79	8.14±0.30	2.74±0.15	2.75±0.23	39.23±1.62

表1中可知,杉木素材密度小,其中孔隙较多,必然导致力学强度低、硬度低、尺寸稳定性差。这种轻质低强的杉木并不能直接用作实木家具、地板等。通过硅酸盐改性后,改性杉木的密度达到(0.725±0.003) g·cm⁻³。这是因为浸渍改性剂有效地将木材中的细胞腔等孔隙填充,使得木材在体积不变的情况下,质量却得到了显著提高,最终体现为密度的显著增大。杉木素材的抗弯强度和抗压强度分别仅为(45.5±2.58)和(22.54±1.97) MPa。经过硅酸盐仿生呼吸改性后,改性杉木的抗弯强度和抗压强度分别增大至

(122.91±3.28)和(87.15±2.79) MPa,分别增大了170.19%和286.64%。改性杉木横切面、径切面和弦切面的硬度分别增大至(8.14±0.30), (2.74±0.15)和(2.75±0.23) kN,分别增大了124.24%, 149.09%和114.84%。证明硅酸盐浸入到杉木中,显著提高了木材的力学强度。一方面是因为硅酸盐较好地填充了杉木中的固有缺陷(孔隙),填充到杉木中的硅酸盐固体成分能够为木材基体分担载荷,从而显著提高了杉木承载能力。另一方面,硅酸盐固体成分填充杉木木材的孔隙后,能够有效抑制承载时的开裂现象,从

而提高力学强度。杉木素材的 24 h 吸水率高达 $91.17\% \pm 2.51\%$ ，这是由于杉木结构中有大量的孔隙，化学结构中存在大量的亲水基团。因此，杉木在潮湿的环境里会发生吸湿现象，导致木材产生变形、开裂等缺陷。经过硅酸盐改性后，24 h 吸水率降至 $39.23\% \pm 1.62\%$ 。这表明经过硅酸盐改性有效提高了杉木的耐水性能，从而提高其尺寸稳定性。杉木经过硅酸盐浸渍处理后，木材中的大部分孔隙被填满，使得储存水分的空间减少，从而有效降低了杉木的吸水率。综上，杉木密度的增大，力学强度和尺寸稳定性的提高，可实现低劣质杉木在家具、地板、室内装饰甚至建筑领域的高附

加值利用。

2.2 硅酸盐与杉木木材化学结合分析

硅酸盐浸入到杉木后，杉木的化学元素和元素的化学环境必然会发生变化。XPS 是以 X 射线作为激发源，将样品表面原子中不同能级的电子激发成自由电子，收集这些带有样品表面信息并具有特征能量的电子，研究它们的能量分布，从而确定样品表面的组成和结构^[7]。因此，为探究杉木浸渍改性后化学元素和化学环境，采用 XPS 对改性杉木进行全谱扫描和窄谱扫描，结果如图 1 所示。

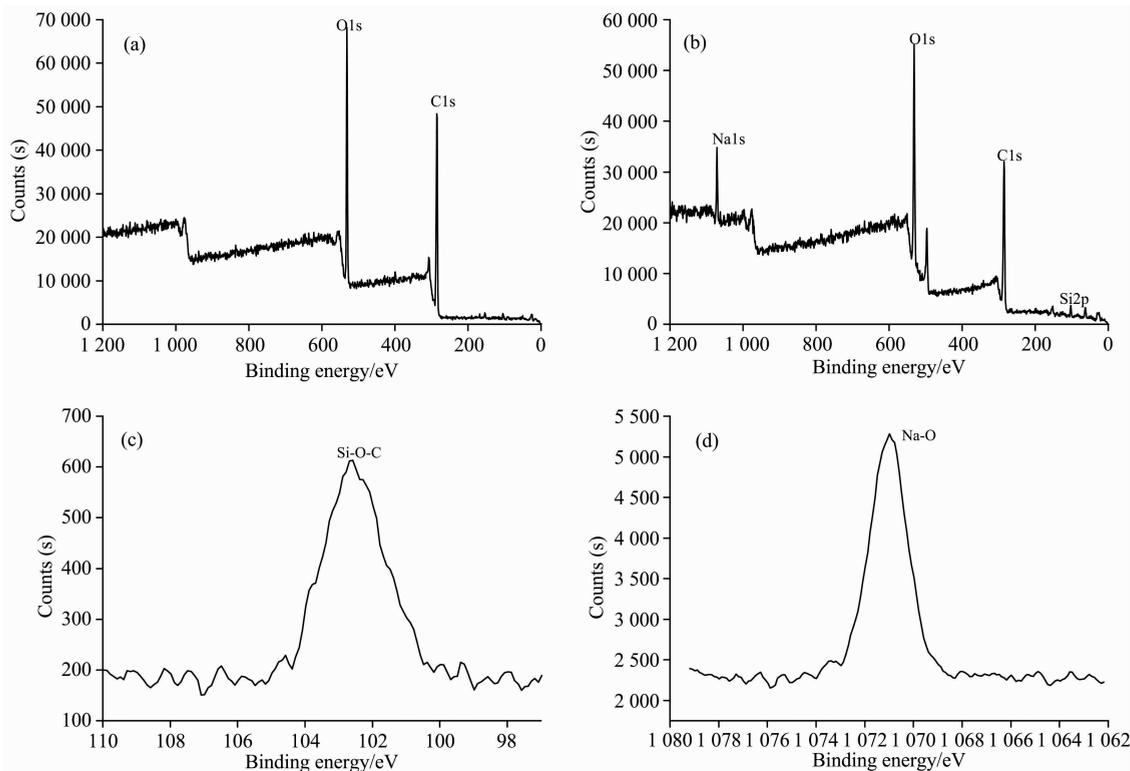


图 1 杉木素材和改性杉木的 XPS 谱图

(a): 杉木素材全谱扫描; (b): 改性杉木全谱扫描; (c): 改性杉木 Si 元素窄区扫描; (d): 改性杉木 Na 元素窄区扫描

Fig. 1 XPS spectra of untreated and modified Chinese fir

(a): Full spectrum scanning of unmodified Chinese fir; (b): Full spectrum scanning of modified Chinese fir;

(c): Narrow spectrum scanning of Si element in modified Chinese fir; (d): Narrow spectrum scanning of Na element in modified Chinese fir

全谱扫描可初步判定其表面的化学成分，可在一次全谱扫描中检出全部或大部分元素，明确辨识存在的主要元素特征峰。对比图 1(a)杉木素材和图 1(b)改性杉木的全谱扫描图，杉木素材中主要存在 C 元素和 O 元素，而改性杉木中不仅存在 C 元素和 O 元素，还出现了 Na 元素和 Si 元素的吸收峰。这表明硅酸钠有效地浸入到了杉木中。图 1(c)改性杉木 Si 元素窄扫谱图，可以看到改性杉木的中出现了 Si—O—C 化学结构；而图 1(d)改性杉木 Na 元素窄扫谱图中出现了 Na—O 化学结构。由此可以推断：第一，硅酸钠与水反应生成了 NaOH，因此 XPS 窄扫谱图中出现了 Na—O 化学结构；第二，硅酸钠与水反应生成的 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 与杉木中的羟基反应形成了 Si—O—C 化学结构。这也证实了硅酸钠与杉木形成

了化学键结合。

木材是以纤维素、半纤维素和木质素为主要成分的天然复合物，含有大量羟基等亲水性基团^[8]。而硅酸盐分子中则含有 SiO_3^{2-} 离子。因此，硅酸盐可与木材中羟基形成氢键和部分化学键结合。为了验证硅酸盐与杉木的结合情况，分别对杉木素材和改性杉木进行了 FTIR 检测，结果如图 2 所示。与杉木素材相比较，改性杉木在 $1\ 042$ 和 $464\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了 Si—O—Si 的振动峰^[9]。这表明硅酸盐浸入到木材中，与杉木中的羟基形成了化学键结合，而非简单的物理填充。同时，仿生呼吸法改性杉木在 $3\ 200 \sim 3\ 500\ \text{cm}^{-1}$ 范围内羟基吸收振动峰带明显变宽，同时 $1\ 635\ \text{cm}^{-1}$ 附近的—OH 伸缩振动吸收峰强度也增强。表明杉木中的游离羟基含量减少，缔

合羟基增多,说明了硅酸盐还与杉木中羟基形成了氢键结合。通过以上分析说明,杉木中大量羟基被封闭或结合,使得硅酸盐仿生改性杉木的各项性能明显提高。这也是其力学性能和防水性能提高的重要原因。

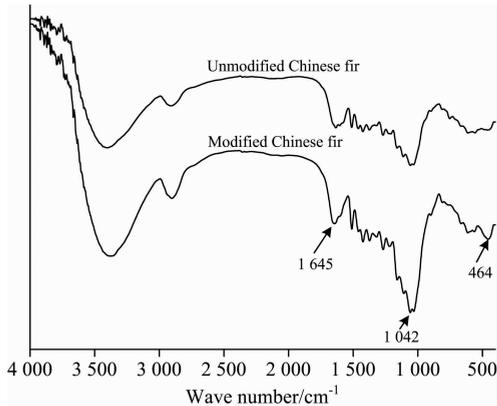


图 2 杉木素材和改性杉木的红外光谱图

Fig. 2 Infrared spectra of untreated and modified Chinese fir

2.3 硅酸盐在杉木木材中通透性分析

传统方法对木材进行浸渍改性时,改性剂的浸入深度一般较浅,不能实现改性剂在木材全尺寸通透改性,导致浸渍改性木材性能存在较大的变异性。课题组前期以硅酸盐为改性剂,采用呼吸法对杉木进行浸渍改性,对改性杉木的密度、力学性能、防水性能、内部形貌、化学结构、结晶结构和阻燃抑烟性能进行了分析^[10]。研究发现,一方面呼吸法能够有效打开杉木的闭塞纹孔;另一方面每一次呼吸过程负压-正压能够再次打通浸注通道,实现外在动力和内在渗透压动力的重复。两方面的原因实现改性剂在杉木纵向和横向的浸注,从而能够实现改性剂在杉木中浸注深度和均匀性。因此,为验证改性剂浸入杉木的深度和分布均匀性,选取尺寸为 60 mm×60 mm×700 mm 的杉木进行呼吸仿生改性。在

干燥后的改性杉木中间位置取样,采用 XPS 对改性杉木中在横向从表面往内部,每隔 6 mm 取样进行测试。改性杉木表面(0),6,12,18,24 和 30 mm 处的宽扫谱图和 Si 元素的窄扫谱图分别如图 3 和图 4 所示,各元素相对含量如表 2 所示。

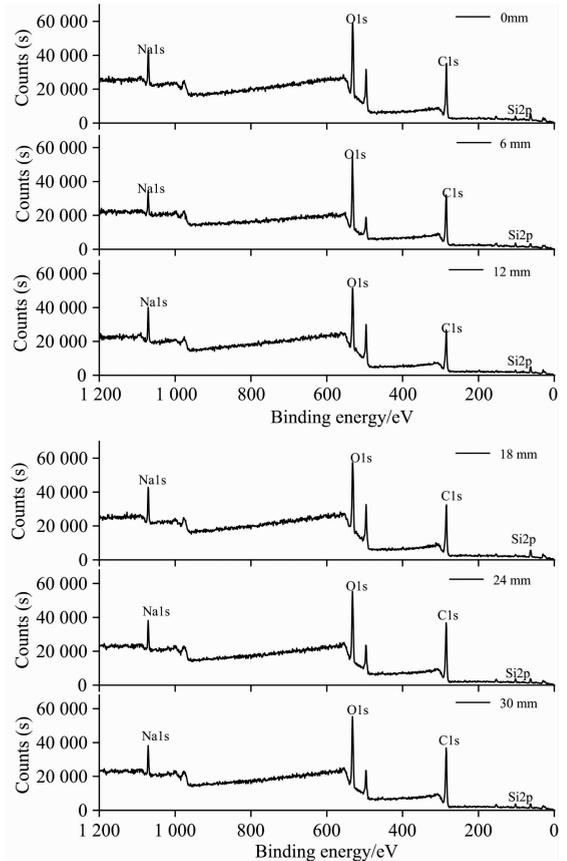


图 3 改性杉木木材横向 0~30 mm XPS 全谱扫描图

Fig. 3 XPS full scan spectra of modified Chinese fir collected in the transverse direction from 0 to 30 mm

表 2 改性杉木横向 0~30 mm 处的元素相对含量

Table 2 The relative content of elements of modified Chinese fir in the transverse direction from 0 to 30 mm

元素	结合能/eV	相对含量/%					
		0 mm	6 mm	12 mm	18 mm	24 mm	30 mm
C	279.28~298.08	59.15	59.24	59.52	59.54	59.52	59.09
O	525.28~545.08	31.39	31.60	31.02	31.15	31.60	31.59
Na	1 062.28~1 079.08	5.79	5.68	5.89	5.87	5.76	5.92
Si	95.28~110.08	3.67	3.48	3.57	3.44	3.32	3.40

从图 3 中可以看到,改性杉木表面(0),6,12,18,24 和 30 mm 的全扫谱图结合能在 95.28~110.08 eV 处出现 Si 元素吸收峰,279.28~298.08 eV 处出现 C 元素吸收峰,525.28~545.08 eV 处出现 O 元素吸收峰,1 062.28~1 079.08 eV 处出现 Na 元素吸收峰。这表明硅酸盐在杉木沿横向从表面到 30 mm 处都有浸注,说明沿横向方向硅酸盐能够有效浸注到杉木中间。同时,对比改性杉木表面(0),6,12,18,24 和 30 mm 处各元素的吸收峰强度,发现各元素吸收峰强度差别不大。表明硅酸盐在改性杉木中能够比较均匀

地分布。从 Si 元素的窄扫谱图 4 可以看到,改性杉木沿横向从表面到 30 mm 处, Si—O—C 结合结构的吸收峰强度基本相同。这也表明从表面到中间部位,硅酸钠与杉木中的羟基都较均匀地形成了化学键结合。

XPS 可对元素含量进行定量分析,将所观测到的信号强度转变成元素的含量,即将谱峰面积转变成相应元素的含量^[11]。表 2 中改性杉木中主要元素 C, O, Na 和 Si 的相对含量可以看到,从改性杉木表面到中间部位(30 mm),各元素的相对含量差异较小。这进一步表明改性剂能较好浸入的杉

木中间,并且均匀性较好,即是杉木基本实现了全尺寸通透浸渍。以上分析都表明,通过仿生呼吸法,硅酸盐有效地、均匀地浸入到杉木中。一方面实现了对杉木中孔隙的有效填充,另一方面与杉木中基团形成了化学键结合。

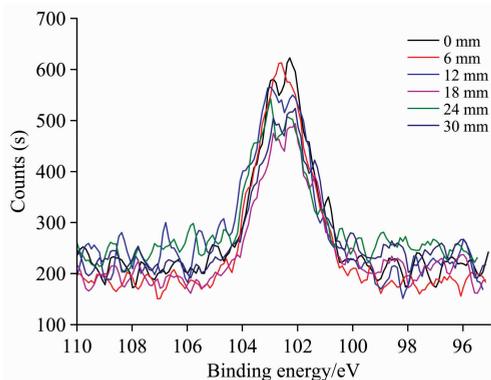


图 4 改性杉木横向 0~30 mm 的 Si 元素 XPS 谱图

Fig. 4 XPS spectra of Si element in the modified Chinese fir collected in the transverse direction with a range of 0~30 mm

3 结 论

测试了基于仿生呼吸法的硅酸盐改性杉木材密度、三切面硬度、抗弯强度和抗压强度等物理力学性能,并通过 X 射线光电子能谱及傅里叶变换红外光谱分析了改性杉木的元素组成和含量,讨论了硅酸盐改性剂在杉木中的分布规律与分布深度及其对木材力学性能的影响。得出以下结论:(1)经过硅酸盐浸渍改性后,改性杉木的密度、抗弯强度、抗压强度、三切面的硬度和耐水性能都显著提高;(2)XPS 和 FTIR 分析都表明硅酸盐浸注到了杉木木材的孔隙中,且硅酸钠与杉木木材中羟基形成了化学键结合和氢键结合,这也是改性杉木的力学性能和耐水性能提高的重要原因;(3)沿改性杉木横向从表面到 30 mm 处, Si—O—C 结合结构的吸收峰强度基本相同,同时改性杉木木材中 C, O, Na 和 Si 元素的相对含量从表面到中间部位(30 mm)差异较小,表明改性剂能较好浸入杉木木材中间,并且均匀性较好。以上研究可为优化杉木仿生呼吸法浸渍改性工艺、进一步提高杉木各项性能奠定基础。

References

- [1] ZHANG Wei-gang, BAO Bin-fu, LIU Jun-liang, et al(章卫钢, 鲍滨福, 刘君良, 等). China Wood Industry(木材工业), 2009, 23(2): 34.
- [2] Yao M, Yang Y, Song J, et al. Industrial Crops and Products, 2017, 107: 38.
- [3] Kamke F A, Lee J N. Wood and Fiber Science, 2007, 39(2): 205.
- [4] HUANG Yan-hui, FEI Ben-hua, ZHAO Rong-jun(黄艳辉, 费本华, 赵荣军). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2015, 35(12): 3356.
- [5] Lu J, Lin Z, Jiang J, et al. Journal of Forestry Research, 2005, 16(4): 293.
- [6] Mahdian M, Huang L Y, Kirk D W, et al. Microporous and Mesoporous Materials, 2020, 303: 110258.
- [7] Zuo Y, Gu J, Zhang Y, et al. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012, 26(10-11): 1685.
- [8] Pérez J, Munoz-Dorado J, De la Rubia T, et al. International Microbiology, 2002, 5(2): 53.
- [9] Alexandre M, Dubois P. Materials Science & Engineering: R: Reports, 2000, 28(1-2): 1.
- [10] Li P, Zhang Y, Zuo Y, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(1): 1043.
- [11] Powell C J, Larson P E. Applications of Surface Science, 1978, 1(2): 186.

Effect of Biomimetic Respiration Method on the Impregnation Effect of Silicate Modified Chinese Fir by XPS and FTIR Analysis

LI Ping^{1,2}, WU Yi-qiang¹, LÜ Jian-xiong³, YUAN Guang-ming¹, ZUO Ying-feng^{1*}

1. College of Materials Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2. College of Art and Design, Xiangnan University, Chenzhou 423000, China

3. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract After silicate impregnation, the content and distribution of elements in the modifier is an important index to evaluate the impregnation effect, which plays an important role in the physical and mechanical properties of the modified Chinese fir. The effects of the biomimetic respiration method on the density, bending strength, compressive strength, three section hardness and 24 h water absorption of silicate modified Chinese fir were studied. The chemical composition and structure of unmodified and modified Chinese fir were analyzed by XPS and FTIR, and the distribution depth and law of silicate modifier in the modified Chinese fir were discussed. The results showed that the average density of the modified Chinese fir was more than $0.721 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, the bending strength and compressive strength increased by 170.19% and 286.64%, respectively. The hardness of the transverse section, radial section and tangential section of the modified Chinese fir increased in different degrees. The 24h water absorption of Chinese fir decreased from $91.17\% \pm 2.51\%$ to $39.23\% \pm 1.62\%$ after silicate modification, which indicated that the dimensional stability of Chinese fir was greatly improved. Compared with the unmodified Chinese fir, the absorption peaks of Na and Si elements appear in the XPS full-spectrum scanning of the modified Chinese fir wood, and the chemical structures of Si—O—C and Na—O appear in the narrow spectrum scanning. At the same time, the absorption peak of Si—O—Si appeared in the FTIR spectrum of the modified Chinese fir wood, the content of free hydroxyl decreased, and the associated hydroxyl increased. XPS and FTIR analysis showed that silicates were impregnated into the pores of Chinese fir wood, and sodium silicate formed a chemical bond and hydrogen bond with hydroxyl in Chinese fir wood. This was also an important reason for the improvement of mechanical properties and water resistance of modified Chinese fir. In addition, it was found by XPS that C, O, Na and Si elements appeared along the transverse direction from the surface to 30 mm. The absorption peak intensity of Si—O—C bonding structure was basically the same from the surface to 30 mm, which indicated that the chemical bond between sodium silicate and hydroxyl groups in Chinese fir wood was formed more evenly from the surface to the middle part. It was found that the relative contents of C, O, Na and Si element in the modified Chinese fir wood were slightly different from the surface to the middle part (30 mm). The results showed that the modifier was in the middle of Chinese fir wood, and the uniformity was good. The research results will provide data support for the impregnation modification effect of Chinese fir, and provide the basis for optimizing the modification process and method, and further improving the physical and mechanical properties of modified Chinese fir.

Keywords Chinese fir; Silicate; Biomimetic respiration method; XPS; FTIR

(Received May 14, 2020; accepted Sep. 6, 2020)

* Corresponding author