

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2022101

# 压缩工艺和热处理对单侧表层压缩木 涂饰性能的影响

刘梓灵<sup>1</sup>, 涂登云<sup>1</sup>, 周桥芳<sup>1</sup>, 朱志鹏<sup>1</sup>, 胡传双<sup>1</sup>, 王先菊<sup>1,2</sup>, 刘祥浩<sup>3</sup>

(1. 华南农业大学生物基材料与能源教育部重点实验室; 广东广州 510642; 2. 华南农业大学电子工程学院人工智能学院  
应用物理系, 广东广州 510642; 3. 广东祥通供应链管理有限公司, 广东东莞 523000)



**摘要:** 以毛白杨 (*Populus tomentosa*) 板材为研究对象, 以预热处理时间和压缩时间为变量制备单侧表层压缩木, 并进行热处理减小回弹, 采用水性UV漆对压缩表面进行涂饰处理后, 评价其漆膜性能。结果表明: 经过预热处理和延长压缩时间, 试件剖面密度峰值与压缩表面距离增大, 表层密度减小; 试件的漆膜抗落球冲击性能、漆膜附着力和漆膜硬度亦减小, 压缩时间对漆膜耐磨性有显著影响; 热处理未对单侧表层压缩木的漆膜性能产生不利影响。单侧表层压缩木的漆膜性能指标均达到GB/T 15036—2009《实木地板技术要求》中优等实木地板的等级要求。综合考虑涂饰性能和成本因素, 建议设置预热处理时间为0 s (不预热处理), 压缩时间为60 s时, 制得试件的漆膜磨损量为0.1203 g, 抗落球冲击压痕直径为10.155 mm, 漆膜附着力和硬度分别为0级和4H。

**关键词:** 单侧表层压缩木; 水性UV漆; 剖面密度; 涂饰性能

中图分类号: S792; S781; TS65 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2022) 06-0075-07

## Effect of Compression Process and Heat Treatment on Coating Performance of Unilaterally Surface-Densified Wood

LIU Zi-ling<sup>1</sup>, TU Deng-yun<sup>1</sup>, ZHOU Qiao-fang<sup>1</sup>, ZHU Zhi-peng<sup>1</sup>, HU Chuan-shuang<sup>1</sup>,  
WANG Xian-ju<sup>1,2</sup>, LIU Xiang-hao<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Bio-based Materials and Energy, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 2. Department of Applied Physics, School of Electronic Engineering, School of Artificial Intelligence, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 3. Guangdong Xiangtong Supply Chain Management Co., Ltd., Dongguan 523000, Guangdong, China)

**Abstract:** *Populus tomentosa* sawn timber were densified with different preheating time and compression time, and heat treatment was performed to reduce spring-back. Then the unilaterally surface-densified wood were coated with the water-based UV paint. The properties of the paint film were evaluated. The results showed that after preheating treatment and with the increase of compression time, the distance between the peak density of the specimen and the compression surface gradually increased, while the

收稿日期: 2022-05-27; 修改日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目“木材非对称单侧表层压缩热质耦合迁移机理”(31770601); 广东省企业科技特派员专项资助项目“环保稳定型木材压缩改性技术”(GDKTP2021058500)。

作者简介: 刘梓灵 (1997—), 女, 硕士研究生。Email: liuziling43@163.com

通讯作者: 王先菊, 女, 副教授。Email: xianju@scau.edu.cn

density of the surface layer decreased gradually. The impact resistance to falling balls, the adhesion property, and the hardness of the paint film were also reduced. The compression time has a significant effect on the wear resistance of the paint film. The heat treatment does not adversely affect the performance of the unilaterally surface-densified wood paint film. The above performance properties all reach the standard of the high-quality solid wood floor specified in GB/T 15036—2009 "*Technical Requirements for Solid Wood Flooring*". To optimize the coating performance and costs, it was recommended to set the preheating time at 0 s (no preheating) and the compression time at 60 s. The wear amount of the paint film was 0.1203 g; the diameter of the anti-falling ball impact indentation was 10.155 mm; the adhesion and hardness of the paint film were grade 0 and 4H, respectively.

**Key words:** unilaterally surface-densified wood; water-based UV paint; profile density; coating performance

随着天然林商业性采伐全面禁止, 人工林速生材实木化高值利用成为缓解我国当前木材供需矛盾的重要途径<sup>[1]</sup>。杨木是我国常见的一种速生材, 但由于材质软、强度低, 高附加值的实木化利用程度不高, 为扩大杨木的实木化利用范围, 需对其进行增强改性。强化改性能提高软质速生材的密度、尺寸稳定性等性能, 是实现速生材实木化高值利用的重要方法, 主要方法包括浸渍改性<sup>[2]</sup>、压缩改性<sup>[3]</sup>、浸渍-压缩<sup>[4-5]</sup>联合改性等。其中, 木材压缩技术因具有产品环境友好、易于产业化生产等优点, 成为拓宽速生材实木化高值利用范围的重要技术支撑, 已有整体压缩木<sup>[6]</sup>、整形压缩木<sup>[7]</sup>、双侧表层压缩木<sup>[8]</sup>、层状压缩木<sup>[9]</sup>及单侧表层压缩木产品<sup>[10]</sup>相继得到开发, 相关产品已在实木地板、实木家具部件、实木工艺品及木结构连接件等领域得到应用。

单侧表层压缩木是木材只有一个面的表层被压缩密实化, 木材内部在压缩方向形成非对称结构的密度分布, 具有材积损失小, 单侧表面硬度高等优点, 适合地板、家具等仅需单面硬度要求较高的场所<sup>[10]</sup>。但单侧表层压缩木在干湿反复的环境中会发生一定的吸湿回弹, 高温热处理使木材细胞壁组分发生热降解, 降低羟基数量, 是提高其尺寸稳定性的有效手段。对单侧表层压缩木材而言, 由于不同工艺下制得的木材剖面密度分布不同, 表层密度不同, 高温热处理后表层密度也会轻微下降, 因此可能会对其涂饰性能产生影响。而关于单侧表层压缩木涂饰性能方面的研究鲜有报道, 单侧表层压缩工艺及热处理对其涂饰性能

的影响规律尚不明晰。

课题组前期研究探明了不同压缩工艺对杨木剖面密度分布的影响规律, 构建了单侧表层压缩木剖面密度分布定量评价方法, 通过高温热处理解决了单侧表层压缩木使用稳定性的问题, 并获得了单侧表层压缩木的优化工艺及热处理工艺参数<sup>[11-12]</sup>。本研究在前期研究的基础上, 设计6组热压工艺制备单侧表层压缩木, 并对单侧表层压缩木进行热处理, 采用水性UV漆对压缩表面进行涂饰处理, 通过对漆膜耐磨性、抗落球冲击性、附着力、硬度和渗透性等进行表征, 进一步探究不同单侧表层压缩工艺对木材涂饰性能的影响, 明晰压缩工艺对单侧表层压缩木涂饰性能的影响规律, 为单侧压缩木表面涂饰生产提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1) 毛白杨 (*Populus tomentosa*), 外购。气干密度范围 450~500 kg/m<sup>3</sup>。将木材制成尺寸规格为 350 mm×100 mm×20 mm (长×宽×厚) 的试件, 无明显可见缺陷。将试件放在 20 °C, 相对湿度 65% 的恒温恒湿箱内平衡至恒重, 试件含水率约 12%。

2) 水性UV漆, 由广州某公司提供。丙烯酸酯UV光固化水性涂料, 黏度 8 882 mPa·s, 固体含量 95.37%, 无色透明, 是工厂常用地板漆。

### 1.2 仪器设备

电热鼓风干燥箱、木材高温炭化箱、压辊带式砂光机、漆膜磨耗仪、X-射线剖面密度分布测定仪、落球冲击试验机、平板硫化机、漆膜硬度

测定仪、扫描电镜和能谱分析仪（SEM-EDS）等。

### 1.3 试验方法

由于压缩木密实层的位置和厚度不同，漆膜在压缩木试件表层的渗透情况也不同，从而影响漆膜性能。因此，本文通过控制预热处理时间和压缩时间，来制得具有不同剖面密度的压缩木试件。

1) 单侧表层压缩材制备：采用平板硫化机对杨木试件进行单侧表层压缩处理。上压板温度设置 150 ℃，下压板为常温 25 ℃。将板材置于下压板上，两边放置 15 mm 的厚度规控制压缩厚度，压力 3 MPa，板材压缩比为 25%。在热压过程中，保持不同的预热处理时间（热压板接触到板材但没有施压的时间）和压缩时间（热压板从接触板材到加压将板材压缩到目标厚度的时间），根据表 1 的工艺参数，制备 6 组剖面密度分布不同的单侧表层压缩材（Unilaterally surface-densified wood, USD），每组工艺重复样为 12 个。未进行压缩处理的素材作为对照。

表 1 单侧表层压缩木的制备工艺参数  
Tab.1 Process parameters of making unilaterally surface-densified wood

| 工艺  | 预热处理时间/s | 压缩时间/s | 保压时间/s | 冷却时间/s |
|-----|----------|--------|--------|--------|
| I   | 0        | 60     | 60     | 600    |
| II  |          | 80     |        |        |
| III |          | 100    |        |        |
| IV  | 60       | 60     | 60     | 600    |
| V   |          | 120    |        |        |
| VI  |          | 180    |        |        |

2) 热处理单侧表层压缩材制备：对压缩材进行热处理可固定回弹，减小单侧表层压缩材在较高温湿度环境中的瓦弯变形。从 6 组 USD 和 1 组素材（Ctrl）中取一半重复样，在 190 ℃热处理 3 h<sup>[12]</sup>，制得单侧表层压缩热处理材（Heat treated unilaterally surface-densified wood, HUSD）和热处理材（Heat treated wood, HTW）。

3) 水性 UV 漆涂饰：试件压缩表面用 320 目的压辊带式砂光机砂光，砂光量为 0.5 mm。采用“一底三面”的涂饰工艺，仅在压缩表面涂饰，每遍涂布量 80~120 g/m<sup>2</sup>。

### 1.4 性能检测

1) 剖面密度：用 X-射线剖面密度分布测定仪

测定 USD、Ctrl、HUSD 和 HTW 的剖面密度分布曲线，X-射线沿木材厚度方向的扫描步长为 0.05 mm。用于剖面密度测试的试件尺寸为 50 mm×50 mm。每个工艺测试试件数量为 10 个。

2) 参照 GB/T 1768—2006《耐磨性的测定 旋转橡胶砂轮法》、GB/T 17657—2013《人造板理化性能测试》、GB/T 9286—1998《漆膜的划格试验》和 GB/T 6739—2006《铅笔法测定漆膜硬度》测定漆膜的耐磨性能、抗落球冲击性能、附着力和硬度。每个性能重复测试试件的数量为 6 个。

3) 界面微观形貌与漆膜渗透量：在试件横截面切割漆膜与木材结合部分的样品，规格为 4 mm×4 mm×3 mm。利用扫描电子显微镜观察木材与漆膜结合界面的微观形貌，并结合能谱仪追踪水性 UV 漆中 Si 元素的质量和原子百分比，来推断 UV 漆的渗透量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 剖面密度分布

不同试件的剖面密度曲线，如图 1 所示。

图 1 显示，单侧表层压缩试件的剖面密度曲线呈非对称单峰结构，压缩面密度明显增大，到达峰值后逐渐减小，另一侧则保持未压缩状态。图 1c、1d 为试件表层密度定点分布图。根据前期预试验中计算漆膜渗透深度最大范围为 151 μm 以内，故从剖面密度曲线的数据中选取距离压缩表面 0.05 mm、0.10 mm 和 0.15 mm 三个位置的密度值绘制。由图可知，经过预热处理以及延长压缩时间，六组试件的剖面密度峰值与压缩表面的距离逐渐增大，密度逐渐减小。这是由于未经预热处理以及压缩时间短时，表层含水率变化较小，表面温度提高，导致表层木材细胞壁中聚合物软化<sup>[13-14]</sup>，在机械力作用下表面细胞腔被压实；经过预热处理同时延长压缩时间，试件表面水分蒸发，同时部分水分向木材内部迁移，使试件内部含水率增加，而水分对木材纤维素非结晶区、半纤维素以及木质素的润胀作用，使木材细胞壁塑性增加<sup>[15]</sup>，因此压缩后在木材内部形成密实层。热处理后的试件剖面密度分布规律不变，整体密度略有降低，这是因为热处理材细胞壁基质化学组分发生轻微热降解所致<sup>[16]</sup>。

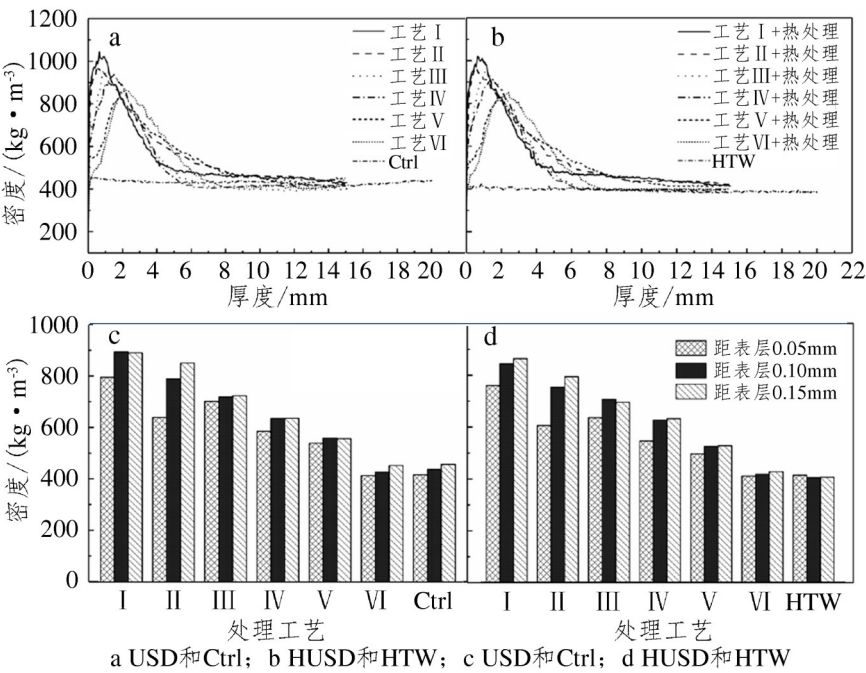


图1 试件剖面密度曲线分布图  
Fig.1 Profile density distribution of the specimen

2.2 漆膜性能

2.2.1 漆膜耐磨性

不同试件磨 500 转后的漆膜磨损量，见图 2。比较发现，不同试件的漆膜磨损量均达到 GB/T 15036—2009《实木地板技术要求》中优等实木地板的要求。不同压缩工艺间漆膜磨损量的  $F$  检验结果，见表 2。

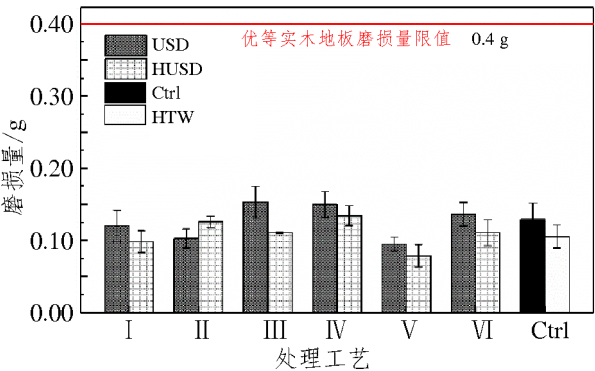


图2 不同压缩工艺试件的漆膜磨损量  
Fig.2 Paint film wear with different compression processes

由图 2 可知，工艺 V 的漆膜磨损量最小，漆膜耐磨性最优，工艺 II 和工艺 I 次之。根据统计结果， $F$  检验中，压缩时间的  $\text{sig.}=0.014<0.05$ ，表明压缩时间对漆膜磨损量有显著影响。压缩时间不

表 2 不同压缩工艺间漆膜磨损量的  $F$  检验结果

Tab.2  $F$ -test results of paint film abrasion resistance between different compression processes

| 变异来源   | III 型平方和           | df | 均方    | $F$     | sig.  |
|--------|--------------------|----|-------|---------|-------|
| 校正模型   | 0.009 <sup>a</sup> | 5  | 0.002 | 3.936   | 0.024 |
| 截距     | 0.258              | 1  | 0.258 | 574.942 | 0.000 |
| 预热处理时间 | 0.001              | 1  | 0.001 | 2.905   | 0.114 |
| 压缩时间   | 0.009              | 4  | 0.002 | 4.913   | 0.014 |
| 误差     | 0.005              | 12 | 0.000 |         |       |
| 总计     | 0.301              | 18 |       |         |       |
| 校正的总计  | 0.014              | 17 |       |         |       |

a 表示  $R^2=0.621$  (调整  $R^2=0.463$ )。

同会导致单侧表层压缩木密实层的位置和厚度不同，密实层越接近表面，则试件表层密度越大，孔隙率越低，表面硬度越大，水性漆润湿性变差，导致漆膜质量降低。漆膜耐磨性与漆料类型、涂布量、测试方法、表面特性等因素密切相关，是多因素综合的结果<sup>[17-19, 24-26]</sup>，因此导致不同压缩工艺制备试件的漆膜磨损量未呈现变化规律。压缩木经过热处理后，漆膜磨损量减少，表明热处理可以改善压缩木的漆膜耐磨性。

2.2.2 漆膜抗落球冲击性

不同试件的落球冲击压痕直径测试结果，如图 3 所示。不同压缩工艺间漆膜抗落球冲击性的  $F$  检验结果，见表 3。

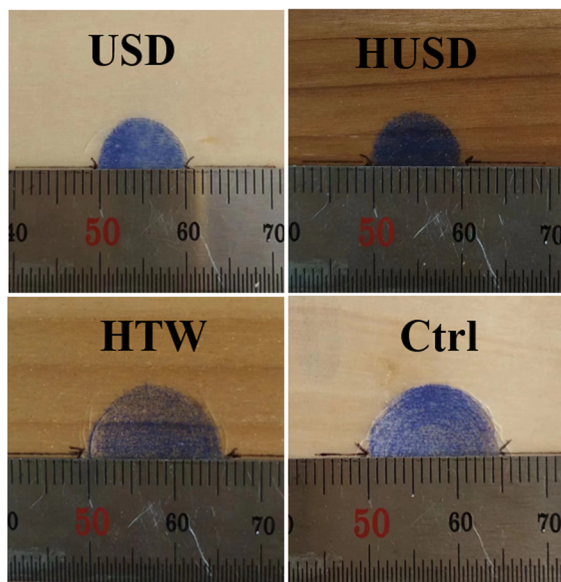
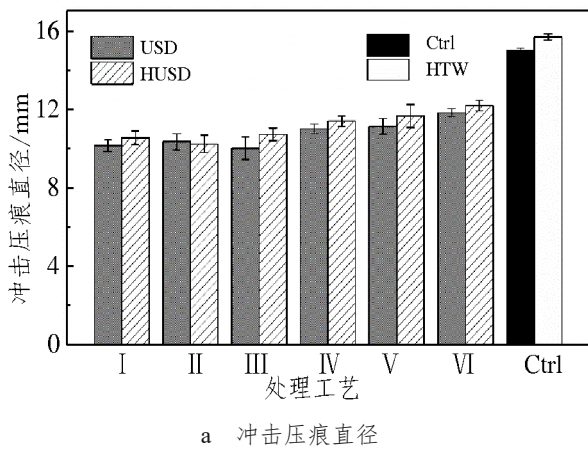


图3 不同压缩工艺试件的漆膜抗落球冲击性  
Fig.3 Falling ball impact resistance of paint film specimens with different compression processes

表3 不同压缩工艺间漆膜抗落球冲击性的F检验结果  
Tab.3 F-test results of paint film's resistance to falling ball impact between different compression processes

| 变异来源   | III型平方和             | df | 均方        | F          | sig.  |
|--------|---------------------|----|-----------|------------|-------|
| 校正模型   | 10.793 <sup>a</sup> | 5  | 2.159     | 13.504     | 0.000 |
| 截距     | 2 606.661           | 1  | 2 606.661 | 16 306.634 | 0.000 |
| 预热处理时间 | 2.398               | 1  | 2.398     | 15.002     | 0.001 |
| 压缩时间   | 1.167               | 4  | 0.292     | 1.825      | 0.168 |
| 误差     | 2.877               | 18 | 0.160     |            |       |
| 总计     | 2 817.785           | 24 |           |            |       |
| 校正的总计  | 13.671              | 23 |           |            |       |

a  $R^2=0.721$ (调整 $R^2=0.644$ )。

由图3a可知，板材经过单侧表层压缩后，漆膜抗落球冲击性能比素材明显提高，冲击压痕直径减少21%~33%。六组工艺中，前三组未经预热处理

板材的冲击压痕直径小于后三组工艺，根据统计结果， $F$ 检验中，预热处理时间的 $\text{sig.}=0.001<0.01$ ，表明预热处理对漆膜抗落球冲击性有极显著影响，这与前期对单侧表层压缩木抗落球冲击性的研究结果一致<sup>[1]</sup>。这是因为未经预热处理时，试件的剖面密度峰值与压缩表面距离小，表层密度大，密实化程度高，故涂饰后整体的漆膜抗落球冲击性好。经过热处理后，由于试件密度下降，其漆膜抗落球冲击性能有所降低。

图3b为冲击试验后试件受损区域图，发现HTW和Ctrl表面漆膜存在较多裂痕，而USD和HUSD表面压痕减少，表明单侧表层压缩材由于密度大，涂饰后整体能承受住局部的高应力冲击。

### 2.2.3 漆膜附着力和硬度

不同试件的漆膜附着力和硬度等级见表4。与素材相比，经过单侧表层压缩后，试件的漆膜附着力等级从2级提高到1级或0级，漆膜硬度等级从2H提高到3H或4H，均达到GB/T 15036—2009《实木地板技术要求》中优等实木地板的要求。

表4 不同压缩工艺试件的漆膜附着力和硬度等级

Tab.4 Adhesion and hardness grades of paint film specimens with different compression processes

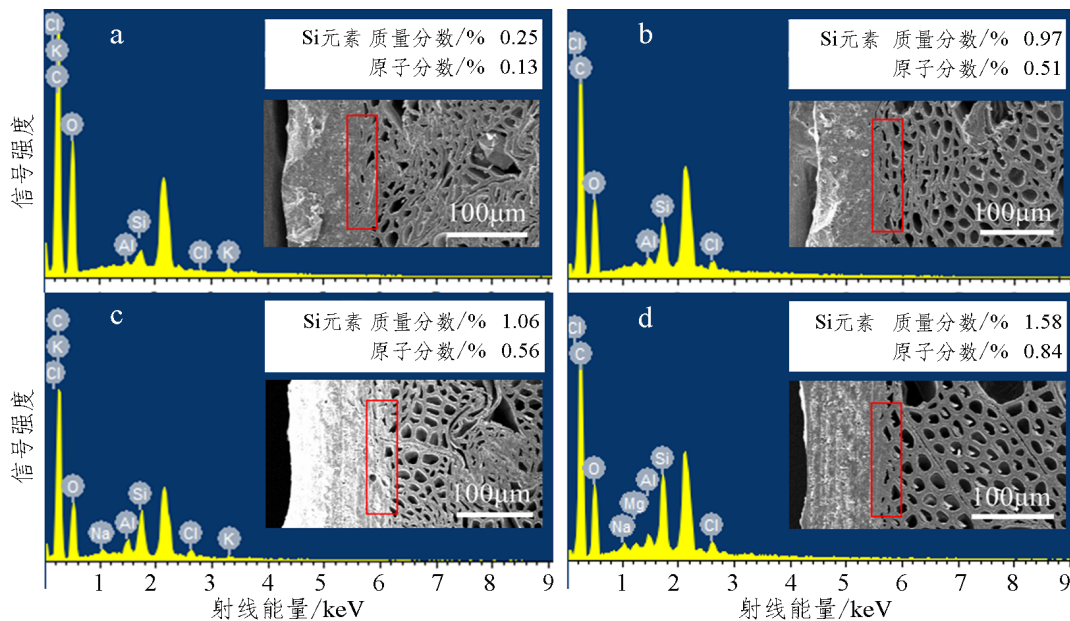
| 工艺类别                          | 附着力等级 | 硬度等级   |        |
|-------------------------------|-------|--------|--------|
|                               |       | 平行纹理方向 | 垂直纹理方向 |
| 工艺I                           | 0级    | 4H     | 4H     |
| 工艺I+热处理                       | 0级    | 4H     | 4H     |
| 工艺II                          | 0级    | 4H     | 4H     |
| 工艺II+热处理                      | 0级    | 4H     | 4H     |
| 工艺III                         | 1级    | 3H     | 3H     |
| 工艺III+热处理                     | 1级    | 3H     | 3H     |
| 工艺IV                          | 1级    | 3H     | 3H     |
| 工艺IV+热处理                      | 1级    | 3H     | 3H     |
| 工艺V                           | 1级    | 3H     | 3H     |
| 工艺V+热处理                       | 1级    | 3H     | 3H     |
| 工艺VI                          | 1级    | 3H     | 3H     |
| 工艺VI+热处理                      | 1级    | 3H     | 3H     |
| Ctrl                          | 2级    | 2H     | 2H     |
| HTW                           | 2级    | 2H     | 2H     |
| GB/T 15036—2009<br>《实木地板技术要求》 | ≤1级   | ≥2H    | ≥2H    |

在六组工艺中，工艺I和工艺II的漆膜附着力和硬度性能最优，这是因为工艺I和工艺II制备压缩木的表层密度最大，密实化程度最高，在测试

时,漆膜及木材表面不易被划破,这也表明未经预热的压缩工艺,试件漆膜附着力和硬度性能好。六组工艺的试件经过热处理后,其漆膜附着力和硬度保持不变,原因是热处理后试件仍保持与压缩材相近的表层密度,这也表明热处理不会对压缩木的漆膜附着力和硬度产生不利影响。

### 2.3 界面微观形貌与漆膜渗透量

通过扫描电镜结合能谱可以得到漆膜和板材结合界面的水性UV漆中Si元素的质量和原子百分比,可分析不同工艺下水性UV漆在板材结合界面的渗透量。图4为四组不同工艺试件的扫描电镜图和能谱图。



注: a—工艺II; b—工艺V; c—工艺V+热处理; d—Ctrl。

图4 不同压缩工艺试件的电镜图和能谱图

Fig.4 Electron micrograph and energy spectrum of the specimen

图4显示,在漆膜与木材结合界面,UV漆渗透量 $a < b < c < d$ 。扫描电镜图中可以明显看出,与素材相比,木材压缩后细胞腔体积大幅度减小。未经预热处理时,试件表层细胞腔体积小,致密化程度高,表层密度大,这与2.1中试件的剖面密度分布结果一致,UV漆渗透量少。此外,对比图4b和图4c,发现经过热处理后,由于木材细胞壁组分降解,更有利于水性漆渗透。

因此,在相同的涂饰工艺下,未经预热的工艺制得试件的水性UV渗透量少,即当选择压缩木未经过预热处理(预热时间为0 s),压缩时间为60 s时,制得试件的漆膜磨损量为0.1203 g,抗落球冲击压痕直径为10.155 mm,漆膜附着力和硬度分别为0级和4H。

### 3 结论

1) 经预热处理同时延长压缩时间,单侧表层

压缩木的剖面密度峰值与压缩表面的距离增大,表层密度减小。热处理后的试件剖面密度分布规律不变,整体密度略有降低。

2) 单侧表层压缩木的漆膜耐磨性与压缩时间显著相关,因影响耐磨性的因素较多,本试验中耐磨性并没有随压缩时间的改变呈规律性变化;漆膜抗落球冲击性与预热处理时间极显著相关,即未经预热处理时,漆膜抗落球冲击性能高;单侧表层压缩木表面的UV漆渗透量少;未经预热处理同时缩短压缩时间,单侧表层压缩木的漆膜附着力和硬度性能提高,热处理不会对漆膜的耐磨性、附着力和硬度产生不利影响,甚至对漆膜的耐磨性和渗透性有改善作用。六组工艺的漆膜耐磨性、附着力和硬度性能指标均达到GB/T 15036—2009《实木地板技术要求》中优等实木地板等级的要求。

3) 综合考虑UV漆膜性能和成本因素,建议

选择压缩木未经预热处理(预热时间为0 s), 压缩时间为60 s, 制得试件的漆膜磨损量为0.1203 g, 抗落球冲击压痕直径为10.155 mm, 漆膜附着力和硬度分别为0级和4H。

### 参考文献:

- [1] 杨洋, 张蕾, 宋菲菲, 等. 人工林速生材高值化利用研究进展[J]. 林产工业, 2020, 57(5): 53-55.  
YANG Y, ZHANG L, SONG F F, et al. Research progress on high value utilization of fast-growing wood in plantation[J]. China Forest Products Industry, 2020, 57(5): 53-55.
- [2] 应俏, 唐辉, 朱漫白, 等. 酚醛树脂组合浸渍增强改性速生木材的研究[J]. 热固性树脂, 2021, 36(5): 48-52, 58.  
YING Q, TANG H, ZHU M B, et al. Phenolic resin composite impregnation to strengthen and modify fast-growing wood[J]. Thermosetting Resin, 2021, 36(5): 48-52, 58.
- [3] 涂登云, 陈川富, 周桥芳, 等. 木材压缩改性技术研究进展[J]. 林业工程学报, 2021, 6(1): 13-20.  
TU D Y, CHEN C F, ZHOU Q F, et al. Research progress of thermo-mechanical compression techniques for wood products[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(1): 13-20.
- [4] 汪嘉君, 刘君良, 倪林, 等. 浸渍及压缩制备密实化木材的研究进展[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(4): 25-29.  
WANG J J, LIU J L, NI L, et al. Research status of densified wood by impregnation and compression methods[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(4): 25-29.
- [5] WU J W, FAN Q, WANG Q W, et al. Improved performance of poplar wood by an environmentally-friendly process combining surface impregnation of a reactive waterborne acrylic resin and unilateral surface densification[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121022.
- [6] Parviz N, Fred G. Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood[J]. Holzforschung, 2000, 54(3): 287-293.
- [7] 刘一星, 李坚, 刘君良, 沈隽. 水蒸气处理法制作压缩整形木的研究(I)—构造变化和尺寸稳定性[J]. 东北林业大学学报, 2000, 28(4): 9-12.  
LIU Y X, LI J, LIU J L, et al. Study on compressive orthopaedy wood by stream treating at high temperature(I): structure change and dimension stability[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2000, 28(4): 9-12.
- [8] 王艳伟, 黄荣凤, 张耀明. 水热控制下杨木的表层密实化及固定技术[J]. 木材工业, 2012, 26(2): 18-21.  
WANG Y W, HUANG R F, ZHANG Y M. Surface densification and heat fixation of Chinese white poplar by hydro-thermal control[J]. China Wood Industry, 2012, 26(2): 18-21.
- [9] 夏捷, 黄荣凤, 吕建雄, 等. 水热预处理对毛白杨木材压缩层形成的影响[J]. 木材工业, 2013, 27(4): 42-45.  
XIA J, HUANG R F, LV J X, et al. Effect of hydro-thermal pretreatment on compression layer formation during densification of Chinese white poplar[J]. China Wood Industry, 2013, 27(4): 42-45.
- [10] 涂登云, 杜超, 周桥芳, 等. 表层压缩技术在杨木实木地板生产中的应用[J]. 木材工业, 2012, 26(4): 46-48, 55.  
TU D Y, DU C, ZHOU Q F, et al. Poplar wood flooring surface densification[J]. China Wood Industry, 2012, 26(4): 46-48, 55.
- [11] CHEN C F, TU D Y, ZHOU Q F, et al. Development and evaluation of a surface-densified wood composite with an asymmetric structure[J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118007.
- [12] 涂登云, 周桥芳. 木材压缩技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
- [13] Kristiina L, Lauri R, Mark H, et al. Reduzierung der rückverformung von oberflächenverdichtetem kiefernmassivholz durch hydrothermische nachbehandlung[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2013, 71(1): 17-23.
- [14] Sadatnezhad S H, Khazaeian A, Sandberg D, et al. Continuous surface densification of wood: A new concept for large-scale industrial processing[J]. BioResources, 2017, 12(2): 3122-3132.
- [15] 曹上秋, 解林坤. 浅析实木弯曲及其软化处理技术[J]. 家具与室内装饰, 2005(5): 74-75.  
CAO S Q, XIE L K. Tentative discuss on the bending and softening of solid wood[J]. Furniture & Interior Decoration, 2005(5): 74-75.
- [16] 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]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(4): 1-11.
- [17] 王泽坤, 龙涛, 夏俊伟, 等. 火力楠木材涂饰聚氨酯清漆工艺研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 265-270.  
WANG Z K, LONG T, XIA J W, et al. Coating process of polyurethane varnish for *Michelia macclurei* timber[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 265-270.
- [18] 路则光, 申利明, 黄河浪, 等. 木器用水性涂料涂布量对漆膜耐磨性的影响[J]. 涂料工业, 2007, 37(3): 56-58, 61.  
LU Z G, SHEN L M, HUANG H L, et al. Influence of coatings coverage of waterborne furniture coatings on abrasion resistance of film[J]. Paint & Coatings Industry, 2007, 37(3): 56-58, 61.
- [19] 孙伟圣, 姜俊, 沈斌华, 等. 新型弹性漆面实木地板漆膜耐磨性的测试[J]. 木材工业, 2011, 25(2): 40-42.  
SUN W S, JIANG J, SHEN B H, et al. Abrasion resistance of solid wood flooring with elastic coating[J]. China Wood Industry, 2011, 25(2): 40-42.

(本文编校 孟凡丹)