

## 柱面加压法对木材表面密实的机理研究

刘丹丹<sup>1</sup>, 张佳琦<sup>2</sup>, 宋杰<sup>3</sup>, 关惠元<sup>4\*</sup>

(1. 上海中国航海博物馆, 上海 201306; 2. 广东生态工程职业学院, 广州 510520;

3. 华南农业大学材料与能源学院, 广州 510642; 4. 南京林业大学家居与工业设计学院, 南京 210037)

**摘要:** 木材表面密实化是提高木材表面密度和硬度的有效方法, 以往研究中大多采用平压法, 木材表面密度提高的同时中心层也得到了密实, 损耗了材积, 因此有必要探索一种低材积损耗的木材表面密实方法。采用柱面加压法对木材进行表面密实, 以半无限平面的线载荷理论为基础, 利用有限元分析软件对柱面加压法木材表面密实进行模拟, 优选出了柱面加载头的半径大小, 并进行实验验证, 探求加载头半径对木材表面密实效果的影响。半无限平面的线载荷理论分析表明, 柱面法加压时, 应力分布由表层向下逐渐衰减, 与平压法中力的等值传递相比更适合木材的表面密实, 且圆柱体半径越小, 表面密实效果越好; 有限元模拟结果更直观地表明了柱面加压时的应力分布情况, 密实层均集中于表层, 且加载头半径越小, 密实层越集中于表层且越密实, 压缩量越大, 表面密实层厚度越大且越密实, 根据模拟结果优选加载头半径的大小为 10 mm 及以下; 实验验证的结果与理论分析及有限元模拟结果一致, 当采用半径 5 mm 加载头压缩 3 mm 时, 表面密实层最大密度达到  $783 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 比未密实前提高了 82.6%, 表面硬度和耐磨性也显著提高, 但材积损耗仅为 12%, 较平压法大大减少了材积损耗。柱面加压法较平压法更适合于木材的表面密实, 提高木材表面性能的同时材积损耗大大减少。

**关键词:** 柱面加压法; 表面密实; 有限元法; 实验验证

中图分类号: S781.31

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2020)03-0391-06

### Study on wood surface densification mechanism in cylinder method

LIU Dandan<sup>1</sup>, ZHANG Jiaqi<sup>2</sup>, SONG Jie<sup>3</sup>, GUAN Huiyuan<sup>4</sup>

(1. Shanghai China Maritime Museum, Shanghai 201306; 2. Guangdong Eco-engineering Polytechnic, Guangzhou 510520;

3. College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642;

4. College of Furnishings and Industrial Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

**Abstract:** Wood surface densification is an effective method to improve the density and hardness of wood, flat pressing method was widely used in previous studies, the density of wood surface increased while the central layer was also compressed, which caused the volume loss, so it is necessary to explore a method for efficient compression of wood surface. In the study, cylindrical compression method was used for wood surface densification, based on the linear loading theory of half infinite plane, finite element analysis software was used to simulate wood surface densification in cylinder method, the radius of cylindrical loading head was optimized, and experimental verification was carried out to explore the effect of loading head radius on the compression of wood surface. The linear loading theory of half infinite plane showed that the stress distribution was decreasing from the surface in cylindrical compression method, which was more suitable for wood surface densification compared with the equivalent transfer of stress in traditional flat pressing method, and the smaller the radius of the cylinder was, the better the surface compression effect was; the results of finite element simulation intuitively showed the stress distribution, the densified layer was concentrated on the surface, the smaller the radius of loading head was, the more concentrated on the surface and denser the compression layer was, and the larger the compression amount was, the thicker and denser the surface compression layer was, optimized radius of cylindrical loading head was 10 mm and below according to simulation results; the experimental results were consistent with theoretical analysis and finite element simulation results, when

收稿日期: 2019-07-08

基金项目: 江苏省林业资源高效加工利用协同创新中心发展规划和江苏省高校优势学科建设工程项目 PAPD 共同资助。

作者简介: 刘丹丹, 博士。E-mail: 1041642082@qq.com

\* 通信作者: 关惠元, 教授, 博士生导师。E-mail: guanhuiyuan@njfu.com.cn

compressed by 3 mm with radius 5 mm loading head, the maximum density of the surface densified specimen could reached 783 kg·m<sup>-3</sup>, which was 82.6% higher than undensified specimen, surface hardness and wear resistance were also significantly improved, but the volume loss was only 12%, the volume loss was greatly reduced compared with flat pressing method. Cylindrical compression method was more suitable for wood surface densification compared with flat pressing method, wood surface properties was increased while the volume loss was greatly reduced.

**Key words:** cylindrical compression method; surface densification; finite element method; experimental verification

速生材材质疏松、密度低、硬度小、强度低的缺陷严重影响了其质量和应用<sup>[1-2]</sup>, 为克服其自身缺陷, 提高其附加值, 扩大其应用领域, 缓解天然林供需不足, 迫切地需要对速生材进行改性。

木材表面密实化是提高木材表面密度和硬度的有效方法, 木材经过压缩后, 细胞壁变形, 细胞腔减小, 密度增加, 物理力学性能显著提高<sup>[3-4]</sup>。通常采用树脂浸渍法<sup>[5-6]</sup>和热压机平压法<sup>[7-8]</sup>对木材进行表面密实, 但树脂浸渍法存在产品全生命周期的环保问题, 因此该方法的应用受到限制; 热压机平压法, 即采用热压板对木材表面进行压缩密实, 当压缩率较小时, 得到的压缩层较薄, 随着压缩率的加大, 压缩层逐渐加厚, 压缩层和未压缩层密度增大<sup>[9]</sup>, 这是由于平压法载荷分布比较均匀, 表层密度提高的同时芯层也得到了密实, 因而损耗了材积。

本研究以半无限平面的线载荷理论为基础, 利用有限元分析软件对柱面加压法木材表面密实进行模拟, 优选出柱面加载头半径大小, 并进行实验验证, 探究柱面加压法对木材表面密实效果的影响。

### 1 柱面加压法木材表面密实理论分析

假设木材为均质的弹性体, 圆柱体与半无限平面的接触如图 1 所示, 结合 Hertz 接触理论, 接触产生的分布压力及切向牵引力所引起的应力场可按 Jonhson<sup>[10]</sup>给出的公式计算。

应力函数通解:

$$\sigma_x = -\frac{2z}{\pi} \int_{-a}^a \frac{p(s)(x-s)^2 ds}{[(x-s)^2 + z^2]^2} \quad (1)$$

$$\sigma_z = -\frac{2z^3}{\pi} \int_{-a}^a \frac{p(s) ds}{[(x-s)^2 + z^2]^2} \quad (2)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{2z^2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{p(s)(x-s) ds}{[(x-s)^2 + z^2]^2} \quad (3)$$

其中  $p(s)$  表示接触面上的分布接触压力;  $s$  表示接触区中任意一点至接触中心的距离;  $x$ 、 $z$  表示平面内任意一点的坐标;  $a$  是压缩接触边缘到力的作用线的距离。

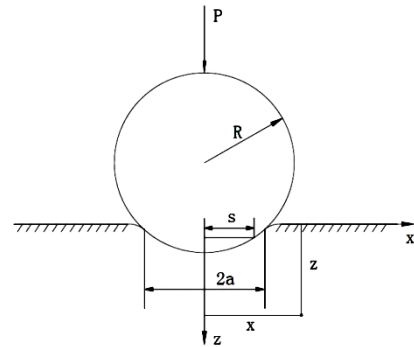


图 1 圆柱体与半无限平面的接触模型

Figure 1 Contact model of cylinder and semi-infinite plane

接触区域的接触压力分布<sup>[11]</sup>:

$$p(s) = \frac{2P}{\pi a^2} (a^2 - s^2)^{1/2} \quad (4)$$

将  $p(s)$  代入 (1)、(2)、(3) 中, 可得法向  $z$  轴上的应力函数特解为:

$$\sigma_x = -\frac{p_0}{a} \left\{ (a^2 + 2z^2)(a^2 + z^2)^{-1/2} - 2z \right\} \quad (5)$$

$$\sigma_z = -p_0 a (a^2 + z^2)^{-1/2} \quad (6)$$

$$\tau_{xz} = p_0 a \left\{ z - z^2 (a^2 - z^2)^{-1/2} \right\} \quad (7)$$

其中,  $p_0$  为  $p(s)$  的最大值

$$p_0 = \frac{2P}{\pi a} = \left( \frac{PE^*}{\pi R} \right)^{1/2} \quad (8)$$

对  $\sigma_x$ 、 $\sigma_z$ 、 $\tau_{xz}$  进行函数变换, 可得:

$$\frac{\sigma_x}{p_0} = \frac{2z}{a} - \frac{1 + 2\left(\frac{z}{a}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2}} \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_z}{p_0} = -\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2}} \quad (10)$$

$$\frac{\tau_{xz}}{p_0} = a^2 \left[ \frac{z}{a} - \frac{\left(\frac{z}{a}\right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{z}{a}\right)^2}} \right] \quad (11)$$

分别绘制  $\frac{\sigma_x}{p_0}$ 、 $\frac{\sigma_z}{p_0}$ 、 $\frac{\tau_{xz}}{p_0}$  与  $\frac{z}{a}$  的关系曲线图, 如下:

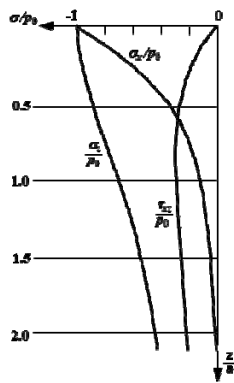


图 2 法向 z 轴的应力<sup>[12]</sup>  
Figure 2 The stress on the z axis

由图 2 可以看出, 对于  $\sigma_x$  和  $\sigma_z$ , 随着  $z$  的增大,  $\sigma_x$  和  $\sigma_z$  逐渐减小; 对于  $\tau_{xz}$ , 在较小的范围内波动, 并随着  $z$  的增大逐渐趋于零, 因此, 此物体受力状态下的应力也带有局部性质, 与平压法中力的等值传递相比, 更适合木材的表面密实。

另外, 以  $\sigma_x$  为例, 由图可以看出, 在接触表面, 即  $z=0$  处, 应力值达到最大, 为  $p_0$ ,  $p_0$  等于  $\left(\frac{PE^*}{\pi R}\right)^{\frac{1}{2}}$ , 可知对于给定  $P$  值,  $p_0$  与  $R$  成反比, 即  $R$  越小,  $p_0$  越大, 表面的应力越大, 表面密实效果也越好。

## 2 有限元法圆柱加载头半径的优选

奥古曼试件的规格及物理性能参数如表 1 所示, 本研究是对奥古曼软化后的试件进行表面压缩模拟, 因此表 1 中的弹性模量以及屈服强度均是将试件采用 100℃ 水蒸气软化 5 min 后测得的参数值, 另外木材软化后的泊松比由于应变片及胶层不耐高温不防水等问题无法测量, 本研究中采用未软化处理试件测得的  $\mu_{RT}$  进行模拟。

本研究采用 Abaqus 软件进行模拟, 假设木材为均

质的弹性体, 设定加载头的材料属性为不变形刚体, 将试件非压缩的底面及两个侧面进行固定约束, 划分网格单元为 1 mm, 对奥古曼试件分别设置加载头半径为 10 mm、20 mm 和 30 mm, 压缩量为 3 mm、4 mm 和 5 mm 进行模拟。

表 1 奥古曼试件规格及物理性能参数

Table 1 The dimension and physical parameters of the Okoume specimen

规格及物理性能参数 Specifications and physical property parameters	参数值 Parameter values
长度/mm Length	100
厚度/mm Thickness	25
气干密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ Air-dried density	440
径向弹性模量/MPa Radial elastic modulus	1 861
径向屈服强度/MPa Radial yield strength	4.51
$\mu_{RT}$	0.5

### 2.1 表层塑性变形区域

由图 3 和图 4 可见, 采用柱面加压法对木材进行表面密实, 试件受压处厚度方向上的应力均呈云状分布, 最大应力值集中在试件的表层, 应力值由表层向内逐渐减小。

同一压缩量不同半径加载头压缩时的表层塑性变形区域如图 3 所示。红色区域部分为超过屈服强度区域, 即发生塑性变形区域, 由图 3 可以看出, 同一压缩量, 加载头半径越小, 试件表层发生塑性变形的区域也越小, 即表面密实层厚度越小, 但区域内应力的均值更大, 说明表面密实程度越好, 例如同样压缩 5 mm, 加载头半径为 10 mm 时, 试件表层约 7 mm 发生了塑性变形, 应力变化范围为 5.259~4.510 MPa, 而加载头半径为 20 mm 时, 试件表层约 11 mm 发生了塑性变形, 应力变化范围 5.137~4.510 MPa。

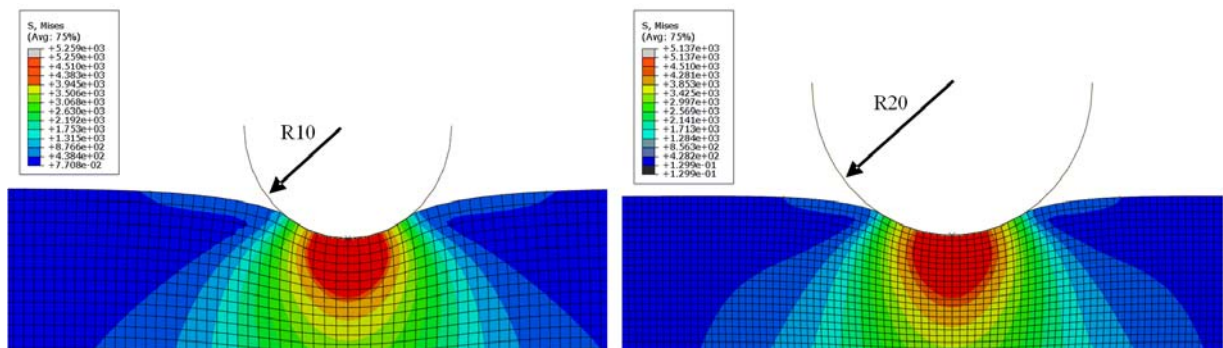


图 3 不同半径加载头压缩 5 mm 时表层塑性变形区域  
Figure 3 The surface plastic deformation zone when compressed by 5 mm with different radius of cylinder

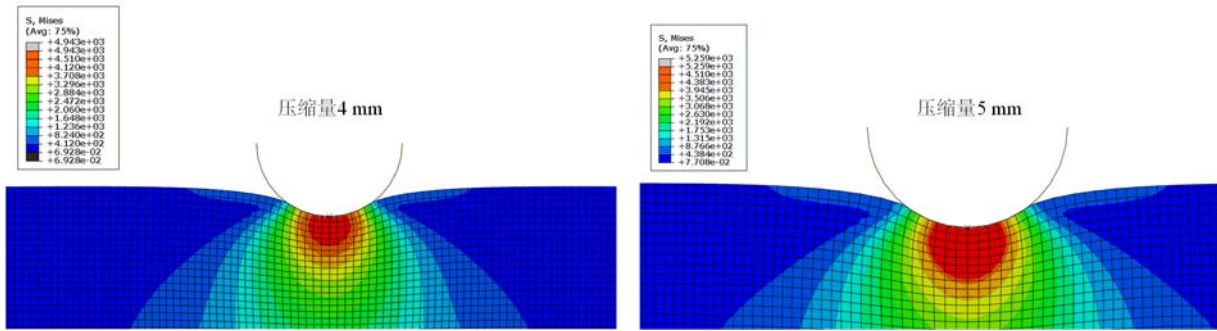


图 4 加载头半径 10 mm 时不同压缩量压缩后表层塑性变形区域

Figure 4 The surface plastic deformation zone when compressed by different compression amount with radius 10 mm cylinder

图 4 为同一半径加载头不同压缩量压缩时的表层塑性变形区域情况，由图 4 可以看出，同一半径加载头，压缩量越大，试件表层发生塑性变形的区域也越大，表层更多的细胞层发生了塑性变形，即表面密实层厚度越大，且表面的应力值也越大，表面密实程度越好，例如采用半径为 10 mm 的加载头分别压缩 4 mm 和 5 mm，试件表层发生塑性变形的区域分别为 5 mm 和 7 mm，压缩 4 mm 时，应力变化范围为 4.943~4.510 MPa；压缩 5 mm 时，应力变化范围为 5.259~4.510 MPa。

4.943 MPa。这与前面理论分析的结果是一致的，即加载头半径越小，试件表面所受的力越大。

奥古曼径向屈服强度为 4.510 MPa，3 个加载头半径压缩 5 mm 以及加载头半径为 10 mm 压缩 4 mm 时的最大应力值超过了屈服强度值。最大应力值集中在表层，且应力由表及里逐渐递减，表层应力超过屈服强度的区域发生了塑性变形，试件芯层及底层受力较小，均低于屈服强度值，仅发生了弹性变形，从而实现了木材的表面密实，根据最大应力值与加载头半径及压缩量的关系，可以通过减小加载头半径或者增加压缩量的方式实现木材的表面密实，然而增加压缩量势必会增加材积损耗，因此优选加载头半径范围为 10 mm 及以下。

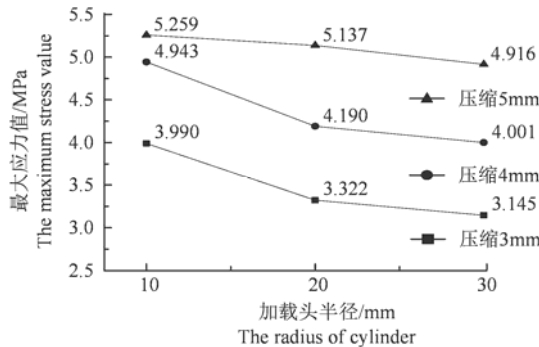


图 5 不同压缩条件下的最大应力值

Figure 5 The maximum stress value under different compression conditions

### 2.2 表面最大应力值

奥古曼不同半径加载头及不同压缩量压缩时的最大应力值如图 5 所示，同一半径加载头加压，试件受压处厚度方向上的最大应力值均随压缩量的增加而提高，如同样采用半径为 10 mm 的加载头压缩 3 mm、4 mm 和 5 mm，试件受压处厚度方向上的最大应力值分别为 3.990 MPa、4.943 MPa 和 5.259 MPa；同一压缩量，试件受压处厚度方向上的最大应力值与加载头半径的大小成反比，如压缩 4 mm，加载头半径为 20 mm 时，最大应力值为 4.190 MPa，而当加载头半径为 10 mm 时，最大应力值提高至

## 3 柱面加压法对木材表面密实实验验证

### 3.1 材料

奥古曼，产自非洲加蓬，气干密度在 440 kg·m<sup>-3</sup> 左右，将锯材气干至含水率 13%~15% 左右之后，锯切成 300 mm (纵向) × 110 mm (弦向) × 25 mm (径向)。

### 3.2 实验方法

采用自制的木材柱面连续滑动加压密实装置对试件进行表面密实处理，根据有限元模拟结果选用半径为 10 mm、7.5 mm 和 5 mm 3 种规格的柱面加载头进行实验验证，压缩量为 3 mm。

(1) 预先安装好所需半径大小的柱面加载头，调节好加载头与工作台面水平度以保证试件表面压缩密实的均匀性，调节好柱面加载头到工作台面的距离(即压缩量)，设定柱面加载头的进给速度为 8 m·min<sup>-1</sup>；

(2) 将试件采用 100 °C 水蒸气软化处理 10 min 后，立即放置于自制的木材柱面连续滑动加压密实装置中进行表面滑动加压密实，由于柱面加压法木材表面密实无保压环节，为了防止木材表面发

生破裂以及减少瞬时回弹, 采用 1 mm 后 0.5 mm 梯度逐层压缩至设定压缩量后反复 5 次压缩工艺, 每个实验条件重复 5 次;

(3) 将不同实验条件处理后的表面密实材放置于大气环境中平衡处理一个月后, 按不同性能检测要求锯切成相应的规格, 分别进行各项性能的检测。

### 3.3 性能检测

**3.3.1 密度分布测定** 将试件加工成 50 mm(纵向) × 50 mm(弦向), 采用 X 射线剖面密度仪 DAX6000-GreCon 对试件依次由上表面到下表面进行扫描, 可以得到试件厚度方向上的密度分布。

**3.3.2 表面硬度测定** 试件表面硬度的测定采用日本标准 JIS Z 2117, 将试件加工成 50 mm(纵向) × 50 mm(弦向), 在力学实验机 AG-IC100KN 上以  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的速度将直径为 10 mm 的钢球压入木材, 压入表面深度 1 mm, 每个面测量 5 个点。表面硬度的计算公式如下:

$$H = \frac{P}{2\pi rh} = \frac{P}{31.4} \quad (12)$$

式中:  $H$  为表面硬度 (MPa),  $P$  为钢头压入时的最大载荷 (N),  $R$  为钢球半径 (mm),  $h$  为压入深度 (mm)。

**3.3.3 耐磨性测定** 耐磨性用磨耗量表示, 按照《GB/T 1768-2006 色漆和清漆耐磨性测定 旋转橡胶砂轮法》<sup>[13]</sup>进行, 将试件加工成 100 mm(长) × 100 mm(宽), 漆膜磨耗仪砂轮直径为 51.6 mm, 砂轮荷重 500 g, 选用 180 目、宽度为 12 mm 的纱布条, 磨耗量的计算公式<sup>[14]</sup>如下:

$$d = \frac{10(W_0 - W_1)}{\rho A} \quad (13)$$

式中:  $d$  为磨耗量, mm;  $W_0$  为磨耗前试件的重量, g;  $W_1$  为磨耗后试件的重量, g;  $\rho$  为试件表面密实层的密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $A$  为试件表面被磨耗的圆环面积,  $\text{cm}^2$ 。

### 3.4 结果与分析

**3.4.1 表面密实层分布** 图 6 为不同实验条件压缩后试件厚度方向上的密度分布, 由图可以看出, 柱面加压法木材表面密实处理后, 试件的密实层均集中于表层, 且加载头半径越小, 表面密实层的密度也越大, 密实层越集中于表层。当采用半径 5 mm 加载头压缩 3 mm 时, 表面密实层最大密度达到  $783 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 比未密实前提高了 82.6%。这是由于加载头半径越小, 试件表面所受的应力越大, 表面层导管及细胞腔的变形程度越大, 孔隙率越低, 因而表面密度越大。

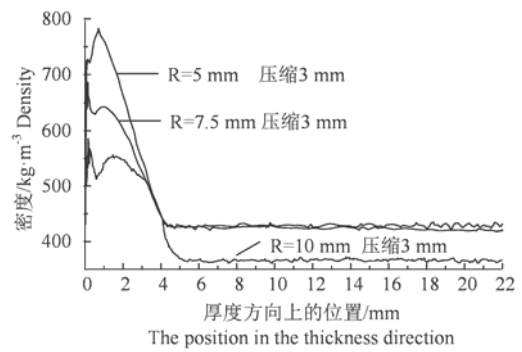


图 6 试件厚度方向上的密度分布

Figure 6 The density distribution in the direction of thickness

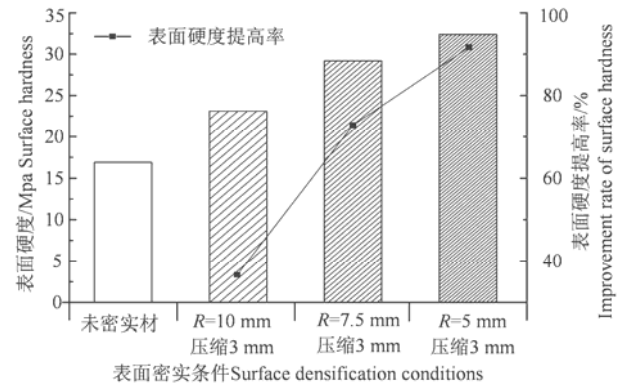


图 7 不同表面密实条件对表面硬度的影响

Figure 7 The influence of the different surface densification conditions on surface hardness

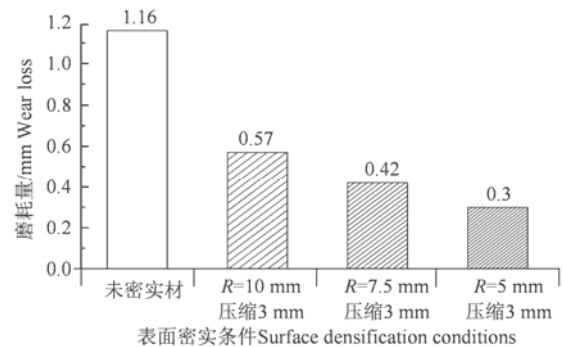


图 8 不同表面密实条件对耐磨性的影响

Figure 8 The influence of the different surface densification conditions on surface abrasion resistance

**3.4.2 表面硬度** 不同实验条件压缩对试件表面硬度的影响如图 7 所示。试件的表面硬度随着加载头半径的减小而提高, 统一设定压缩量为 3 mm, 采用半径 10 mm 加载头压缩时, 表面硬度为 23.1 MPa, 较未密实材提高了 36.7%; 半径 7.5 mm 加载头压缩时, 表面硬度为 29.2 MPa, 较未密实材提高了 72.8%; 半径 5 mm 加载头压缩时, 表面硬度为 32.4 MPa, 较未密实材提高了 91.7%。木材的硬度与木材的密度有关, 加载头半径越小, 木材表面密

实层的密度越大,表面硬度也随之提高。

与传统的平压法相比,柱面加压法制成的表面密实材表面硬度提高的同时材积损耗大大减少,例如平压法将初始厚度为 33 mm 的木材压缩至 20 mm,表面硬度提高了约 90%,其材积损耗约 40%<sup>[15]</sup>,而在本实验中,采用柱面加压法将表面硬度提高到相同程度,仅需将木材压缩 3 mm,材积损耗约为 12%,材积损耗大大减少。

**3.4.3 耐磨性** 奥古曼不同实验条件压缩对表面耐磨性的影响如图 8 所示。耐磨性用磨耗量来表征,磨耗量越少代表表面耐磨性越好。试件的表面耐磨性同样表现出随加载头半径的减小而提高的趋势。素材的表面磨耗量为 1.16 mm,同样压缩 3 mm,加载头半径为 10 mm 时,试件的表面磨耗量为 0.57 mm;加载头半径为 7.5 mm 时,试件的表面磨耗量为 0.42 mm;加载头半径为 5 mm 时,试件的表面磨耗量为 0.3 mm。

## 4 结论

对半无限平面的线载荷理论分析可知,柱面法压缩时,应力分布由表层向下逐渐衰减,与平压法中力的等值传递相比,更适合木材的表面密实;另外,相同条件下,圆柱体半径越小,表面的应力越大,表面密实效果也越好。

采用有限元分析软件对柱面加压法木材表面密实进行模拟,直观地观察到木材受压处的应力分布由表层往下逐渐递减,最大应力值出现在接触表面,且随加载头半径的减小及压缩量的增加而提高;加载头半径越小,密实层越集中于表层且越密实,压缩量越大,表面密实层厚度越大且越密实,根据模拟结果优选加载头半径范围为 10 mm 及以下。

木材柱面加压法表面密实的实验验证结果与理论分析及有限元模拟结果一致,当采用半径 5 mm 加载头压缩 3 mm 时,表面密实层最大密度达到 783 kg·m<sup>-3</sup>,比未密实前提高了 82.6%,表面硬度提高至 32.4 MPa,较未密实材提高了 91.7%,表面磨耗量降低为 0.3 mm,而材积损耗仅为 12%左右,较平压法大大降低了材积损耗。

## 参考文献:

[1] PELIT H, BUDAKÇI M, SÖNMEZ A. Density and some

mechanical properties of densified and heat post-treated Uludağ fir, linden and black poplar woods[J]. Eur J Wood Prod, 2018, 76(1): 79-87.

- [2] POPESCU M C, LISA G, FROIDEVAUX J, et al. Evaluation of the thermal stability and set recovery of thermo-hydro-mechanically treated lime (*Tilia cordata*) wood[J]. Wood Sci Technol, 2014, 48(1): 85-97.
- [3] WELZBACHER C R, WEHSENER J, RAPP A O, et al. Thermo-mechanical densification combined with thermal modification of Norway spruce (*Picea abies* Karst) in industrial scale-Dimensional stability and durability aspects[J]. Holz Roh Werkst, 2008, 66(1): 39-49.
- [4] BELT T, RAUTKARI L, LAINE K, et al. Cupping behaviour of surface densified Scots pine wood: the effect of process parameters and correlation with density profile characteristics[J]. J Mater Sci, 2013, 48(18): 6426-6430.
- [5] 贺宏奎, 常建民. 软质木材的表面密实化[J]. 木材工业, 2007, 21(2): 16-18.
- [6] 王薇. 硅溶胶/VAE 改性速生杨木的研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2014.
- [7] INOUE M, NORIMOTO M, OTSUKA Y, et al. Surface compression of coniferous wood lumber I. A new technique to compress the surface layer[J]. Journal of the Japan Wood Research Society, 1990, 36(11): 969-975.
- [8] INOUE M, NORIMOTO M, OTSUKA Y, et al. Surface compression of coniferous wood lumber II: Permanent set of compression wood by low molecular weight phenolic resin and some physical properties of the products[J]. Mokuzai Gakkaishi, 1991, 35(3): 227-239.
- [9] RAUTKARI L, LAINE K, KUTNAR A, et al. Hardness and density profile of surface densified and thermally modified Scots pine in relation to degree of densification[J]. J Mater Sci, 2013, 48(6): 2370-2375.
- [10] JOHNSON K L, 徐秉业, 罗学富, 等. 接触力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [11] JOHNSON K L, JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. Cambridge: Cambridge university press, 1987.
- [12] 徐芝纶. 弹性力学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 中国石油和化工协会. 色漆和清漆 耐磨性的测定 旋转橡胶砂轮法: GB/T 1768-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] YI X H, KINOSHITA N, YOSHINOBU M, et al. Sugi rotary veneers compressed by hygro-thermal treatment with an airtight device using moisture in the veneers[J]. J Soc Mater Sci Jpn, 2004, 53(6): 686-691.
- [15] 夏捷. 毛白杨木材层状压缩位置和厚度可控性及其变形固定[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.