

线性振动摩擦作用下木材表面材色与硬度的变化

张海洋^{1,2}, 鞠泽辉¹, 何 倩¹, 詹先旭², 梅长彤¹, 卢晓宁¹

(1. 南京林业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 德华兔宝宝装饰新材料股份有限公司, 浙江 德清 313200)

摘 要:将线性振动摩擦技术应用于木材表面色泽改善和密实化的可行性,着重研究了不同压力和时间振动摩擦作用下的木材表面材色和硬度的变化规律,同时还建立了动态传热模型,研究了摩擦改性过程中的温度和摩擦系数的变化规律。结果表明,摩擦过程中的温度随着时间的延长达到动态平衡的状态,摩擦系数呈现先增大后降低的趋势。材色研究发现,随着摩擦压力的提高和摩擦时间的延长,木材表面的明度值降低较快,红绿轴色品指数有所提高,而黄蓝轴色品指数呈现先增大后降低的趋势;色彩角的研究显示改性后的木材呈现偏向于红黄的颜色。木材表面颜色的变化是由于摩擦生热导致的木材表面化学成分的变化所引起的,线性振动摩擦过程中的压力和时间对于木材表面颜色变化具有显著性影响。木材表面的硬度增加较大,2 MPa 摩擦 30 s 的工艺条件下木材表面硬度增加达到 70.9%。在改性木材厚度为 15 mm 的情况下,改性后木材压缩率的大小随着压力 and 时间的增大而增大,2 MPa 摩擦 30 s 的工艺条件下其压缩率可达 12.4%,木材表面的硬度也是随着压缩率的增大而增大。结果表明线性振动摩擦技术在木材表面材色和硬度改性方面的应用具有较大可行性。

关键词:振动摩擦;改性木材;摩擦系数;木材碳化;表面密实

中图分类号:S781.61 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)02-0227-07

The Application of Linear Vibrational Friction in the Modification of Wood Surface

ZHANG Hai-yang^{1,2}, JU Ze-hui¹, HE Qian¹, ZHAN Xian-xu², MEI Chang-tong¹, LU Xiao-ning¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. Dehua TB New Decoration Materials Co. Ltd, Deqing 313200, Zhejiang, China)

Abstract: The feasibility of linear vibrational friction used as a wood surface modification technique was studied in this paper with the emphasis of the changes wood color and surface hardness. Meanwhile, a dynamic heat transfer model was established to study the interface temperature and friction coefficient during modification. The temperature in the interface reached a state of dynamic equilibrium with the extension of time and the friction coefficient first increased and then decreased. The results indicated that ,the lightness index L^* decreased and the red/green index a^* raised as the friction pressure and time increased. The yellow/blue index b^* first increased and then decreased as the friction time prolonged. The calculation of the color angle showed that the modified wood surface was partial to red and yellow. The chemical changes occurred due to the friction heat produced during the wood surface modification resulted in the change of wood surface color, and the friction pressure and time had significant influence on the final color. The hardness of the wood surface was improved a lot and the maximum improvement was 70.9% with 2 MPa friction pressure and 30 s friction time. The compression ratio increased with the friction pressure and time and reached 12.4% with 2 MPa friction pressure and 30 s friction time. The surface hardness of the wood also increased with the compression ratio. The experimental results showed that the application of linear vibra-

收稿日期:2018-05-18 修回日期:2018-08-02

基金项目:国家林业局 948 项目(2015-4-57);江苏省自然科学基金青年项目(BK20150878)。

作者简介:张海洋,男,博士,讲师,研究方向:生物质复合材料及改性。E-mail:zhynjfu@njfu.edu.cn

tion friction technology in the modification of wood surface color and hardness was feasible.

Key words: vibrational friction; modified wood; friction coefficient; wood carbonization; densified surface

木材的材色极大程度上影响着木材的外观和使用价值,然而深受人们喜爱的具有较好材色的木材主要来自于天然林。随着天然林保护工程在全球范围内的严格实施,能够作为商品材的天然林木材呈现降低的趋势,这与人们日益增长的对于高品质木材资源需求量的提升形成了鲜明的对比^[1-2]。所以人们将目光转向了速生材的使用,希望能够对速生材的改性来替代部分天然林木材。但是速生材存在着材色浅和表面硬度低的缺陷,所以能够开发出快速、高效且绿色环保的速生材材色和硬度改性方法具有重要理论和实践意义^[3-7]。

速生木材的改性方式主要可以分为 2 种:一种是借助木材本身之外的其他化学药剂来提高木质材料的整体性能。这些其他物质是指石油基或者煤炭基的具有不可再生性的物质。主要是通过化学原料对木材进行浸渍处理,已达到改善木材物理力学性能的目的。但是这些方法不仅是不可持续的,而且处理的成本较高,工艺较为复杂,同时造成的污染也较为严重。另外一种方式是利用木材本身所含有的天然物质来改善木材的材色和物理力学性能,一般是指水热机械力的作用。随着人们对于可持续发展和环保问题的重视,如何能够开发出利用木材本身的细胞壁物质改性,而无需添加任何其他化学药剂,来改善木材的材色和表面硬度的方法,是一直困扰着研究者们的问题。

本研究提出了一种利用线性振动摩擦技术来改变木材表面材色和硬度的方法,该方法利用摩擦生热的原理,同时借助于木材本身具有的水分,在木材表面产生高温水热作用和机械力的作用,达到不添加任何其他物质而对木材表面进行色泽改善和密实化的双重作用。

1 材料与方

1.1 材料和设备

试验所用樟子松(*Pinus sylvestris*)板材购于南京木材市场,所选用的板材为径切板。板材的年轮与中心线相交点的切线与板材中心线的夹角为 60~85°,厚度为 16 mm,宽度为 38 mm,长度为 2 000 mm,绝对含水率为 12.5%。首先将板材表面进行砂光处理,所用设备为装有 400 目砂带的带式砂光机,砂光处理成厚度为 15 mm 的板材。然后将其截断成长度为 50 mm 的木块进行摩擦振动表面改性。摩擦振动表面改性的木材尺寸为顺纤维方向长度为

50 mm,垂直纤维方向宽度为 38 mm,厚度为 15 mm,摩擦振动方向为顺着木材纤维方向。

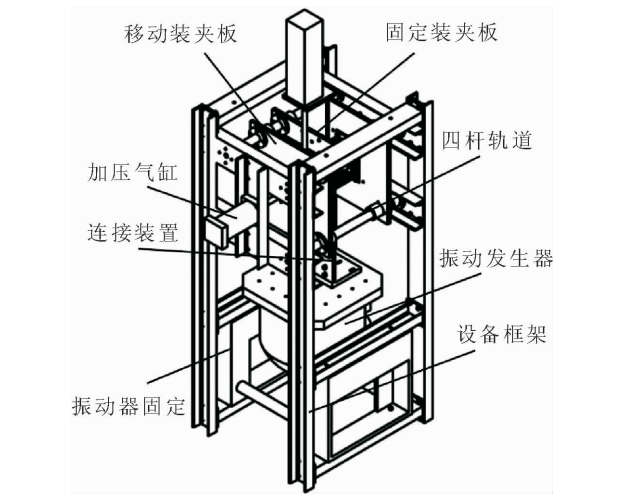


图 1 线性振动摩擦设备结构

Fig. 1 The structure of the linear vibrational friction machine

试验所用线性振动摩擦设备为自制,结构如图 1 中所示。水平方向利用气压加载,振动方向为竖直方向,并沿木材纵向,主要的工艺流程如图 2 所示。表面改性所用振动摩擦参数如表 1 所示,与木材表面相对应的摩擦表面为聚四氟乙烯塑料(PTFE),每组试验重复 5 次。所有试件在完成木材表面改性后放入温度为 20℃和相对湿度为 65%的条件下质量恒定后再进行性能测试。

表 1 木材振动摩擦表面改性所用参数和材料
Table 1 Parameters and material used in the wood surface linear vibrational friction modification

工艺参数	数值
摩擦压力/MPa	1.0、2.0
摩擦时间/s	10、20、30
振幅/mm	2
频率/Hz	50
保压时间/s	30
保压压力/MPa	2.0
试件含水率/%	12.5
摩擦材料	PTFE

1.2 温度测试

本试验中通过热电偶来测量木材表面改性过程中的温度变化。所用的温度传感器为 K 型热电偶,可以测量温度范围为-270~1 372℃。所用的温度采集模块为四川德阳立创电子科技有限公司生产的 8 通道 M1303 模块,并配套相应的 RS485/RS232 通讯接口和 CSADA 软件进行温度的采集和记录。分别在改性木材的中心位置以及中轴线相距 10

mm 的位置放入 3 个热电偶。放入热电偶时,首先从木材试件背面相对位置钻一个直径为 2 mm、深

度为 10 mm 的沉孔,然后用刀片从表面刻入深度为 5 mm,最后再将热电偶埋入木材的表面。

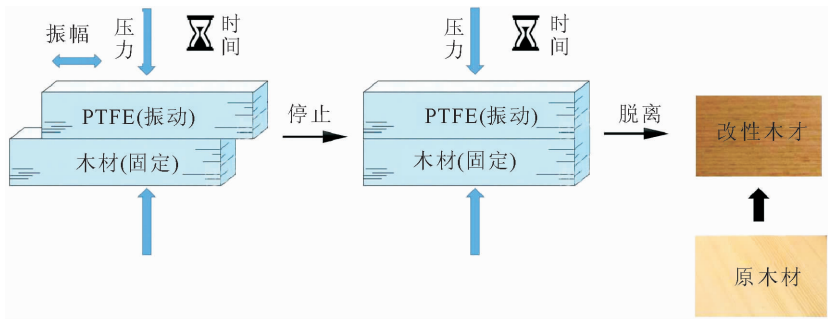


图 2 木材表面改性的主要工艺流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of main process flow of wood surface modification

1.3 色差测试

根据 GB/T 7921-2008 均匀色空间和色差公式,同 CR-400 侧色仪测定颜色参数 L 、 a 、 b ,并计算色差,彩度和色调角。每个试件选择 5 个点进行测试,分别位于中心点和与 4 个边相距 20 mm 的地方,每组测 5 个试件。

1.4 表面硬度测试

根据 GB/T 1941-2009 木材硬度测试方法,对改性后的木材表面进行硬度的测试。利用半径为 (5.64 ± 0.01) mm 的半球形钢制压头,在力学试验机上以 5 mm/min 的均匀速度将半球型压头压入试材的表面,直至压入 5.64 mm 为止,这时立即读出荷载的大小,即为木材的硬度值,单位为 kN。每个试件选择与颜色测量同样的 4 角和中心 5 个测试点进行硬度测试,计算其平均值和方差。硬度测完之后立即对试件的含水率进行测试,结果发现含水率为 $(12 \pm 0.2)\%$,所以试验中并未考虑含水率差异对于木材表面硬度的影响,每组测 5 个试件。

1.5 动态摩擦系数计算模型

以图 2 所示的固定表面改性木材为研究对象,可以将其简化成一维的动态传热模型,垂直于木材改性面的方向为 x 轴的方向,则根据热力学模型可以得到:

$$-\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \tag{1}$$

式中, α 为材料的热扩散系数,单位: m^2/s ; T 为温度,单位: $^\circ\text{C}$; t 为时间,单位: s 。

初始条件:

$$t=0; T=T_\infty \tag{2}$$

式中, T_∞ 为环境温度,单位: $^\circ\text{C}$ 。

边界条件:

$$x=0; -h \frac{\partial T}{\partial x} = \varphi \tag{3}$$

$$x=\infty; T=T_\infty \tag{4}$$

其中,

$$\varphi = fv = 2\mu\sigma A\gamma \tag{5}$$

式中, φ 为热流量,单位: W/m^2 ; f 为单位面积内的摩擦力,单位: N/m^2 ; μ 为摩擦系数; σ 振动摩擦压强,单位: MPa ; A 为振动摩擦振幅,单位: m ; γ 为振动摩擦频率,单位: Hz 。

计算得到改性木材表面的温度函数:

$$T_0 = \frac{4\mu\sigma A\gamma}{h} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} + T_\infty \tag{6}$$

从而得到摩擦系数的计算公式:

$$\mu = \frac{(T_0 - T_\infty)}{4\sigma A\gamma} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha t}} \tag{7}$$

其中所选择的木材的热力学参数:导热系数 h 为 $0.15 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$,木材的密度为 $421 \text{ kg}/\text{m}^3$,木材的比热容 C_p 为 $1700 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$,从而计算得到木材的热扩散系数 a 为 $2.1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。将上述数据带入式(7)就可以估算出木材表面改性过程中摩擦系数的变化情况。

2 结果与分析

2.1 木材表面改性过程中温度和摩擦系数的变化

由图 3a 可知,在 4 s 时 1 MPa 和 2 MPa 摩擦压力作用下界面温度分别达到 98°C 和 153°C ,而到 10 s 时分别达到 174°C 和 207°C ,20 s 时分别达到 228°C 和 250°C ,30 s 时分别达到 250°C 和 259°C 。界面温度的变化主要是由摩擦生热所引起的,而摩擦热量主要取决于摩擦力的做功大小,摩擦力的做功受到加载压力、摩擦系数和做功距离的影响,更高的压力和更长的时间自然就对应界面温度的升高^[14-16]。但同时可以发现温度的升高速度是越来越慢的,在 1 MPa 的压力作用下 26 s 后温度升高极为有限,2 MPa 在 24 s 后温度升高也几乎停止。这主要是由于摩擦开始时,界面的摩擦系数较大,由摩擦

产生的热量都用于界面温度的提高,少部分扩散掉。而随着温度的升高,界面温度超过 100℃,木材中的水分蒸发加剧,会消耗一部分热量,同时由于水蒸气的作用也会使得加载力和摩擦系数降低,产生的热量也会相应降低。除此之外,由于界面温度与环境温度差的变大,也加大了热量的对流耗散,使得温度提升速度降低。但温度进一步提高,这时木材表面

的半纤维素会发生降解,木质素会发生熔融等状态,这些物质的流动性使得摩擦系数进一步降低,界面的热量产生和耗散基本就渐渐处于平衡状态^[17-21]。总的来说,振动摩擦过程伴随着摩擦生热所提供热量的降低,表面对流扩散热量提高,水分、小分子等的蒸发所带走热量提高,最后达到平衡的过程。

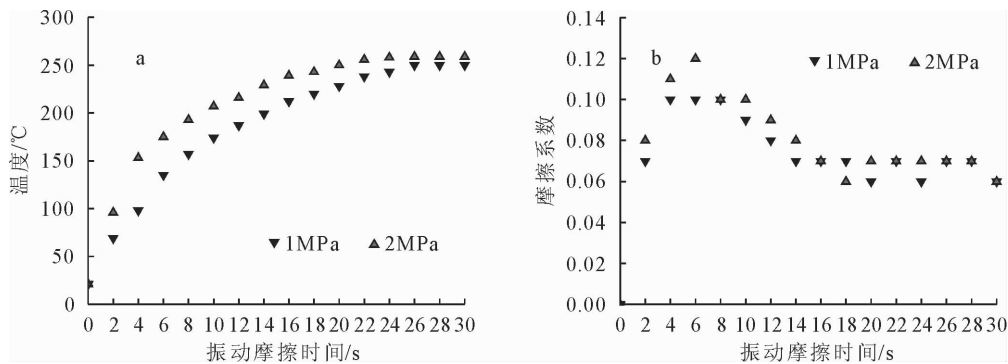


图 3 木材表面改性过程中表面的温度变化情况(a)和计算得到的摩擦系数随时间的变化规律(b)

Fig. 3 Changes of surface temperature (a) and friction coefficient (b) during modification of wood

由图 3b 可知,所计算得到的聚四氟乙烯塑料与木材表面的摩擦系数范围为 0.06~0.12。在 2 种不同的摩擦压力 1 MPa 和 2 MPa 作用下,16 s 之后摩擦系数都趋于稳定,在 0.06~0.07;而在 16 s 之前,不同压力情况下表现出不同的摩擦系数变化情况。2 MPa 的振动摩擦情况下,其摩擦系数最大达到 0.12,>1 MPa 情况下为 0.10。但是最大摩擦系数对应的时间都是 6 s,这主要是由于摩擦 5~6 s 时,界面的温度刚刚超过 100℃,这时界面产生的水蒸气较少,对摩擦系数的影响有限。而随着时间的延长,水蒸气对界面的作用越来越大,特别是软化作用和润滑作用等使得摩擦系数开始降低。高摩擦压力下前 6 s,摩擦系数升高得跟快,这也就使得高压摩擦作用下木材表面的温度更高。

2.2 木材表面颜色的变化

对木材表面改性处理后的木材明度 L^* 、红绿色品指数 a^* 和黄蓝色品指数 b^* 的变化规律进行定量分析。从图 4a1 和图 4b1 可以看出,随着振动摩擦压力的提高和时间的延长,木材表面的明度 L^* 整体呈现下降趋势。与未处理木材相比,通过 1 MPa 振动摩擦表面处理的木材明度降低了 15%~50%,2 MPa 处理木材表面明度降低了 17%~62%。即使在砂光了 0.5 mm 之后木材表面的明度也能分别达到 25%和 40%的降低。方差分析表面振动摩擦时间和压力对木材表面的改性都具有显著性影响($P<0.5$)。砂光会提高木材表面的明度,特别是在处理时间为 10~20 s,这主要是由于界面摩

擦温度对于木材表面的改性作用随着木材深度的提高,影响越来越小所致。试验选择 0.5 mm 的砂光厚度主要是为了研究较大砂光厚度情况下摩擦振动的影响规律,实际应用中不需要这么大的砂光厚度。

由图 4a2、图 4b2 可以看出,红绿色色品指数 a^* 随着振动摩擦时间和压力则有相应的提升,说明表面改性后颜色向红色一端发展。振动摩擦压力为 1 MPa 情况下红绿色色品指数 a^* 提升了 9%~33%,在 2 MPa 情况下提升了 17%~42%。相较于 0.5 mm 砂光量对明度的提升而言,该砂光量对红绿色色品指数的变化的影响要小一些。在 30 s 处理时间下,0.5 mm 的砂光量根本不会影响其红绿色色品指数,该现象值得进一步的研究和探讨。振动摩擦时间和压力对木材表面改性的红绿色色品指数 a^* 都有显著信影响,自信度水平达到 99%。由图 4a3、图 4b3 可以看出,黄蓝色品指数 b^* ,在不同压力振动摩擦表面改性处理条件下其数值是先增大后减小的趋势,说明表面改性处理后颜色先向黄色方向发展,然后又逐渐降低,向蓝色方向发展。这与明度值的单调减小和红绿色色品指数的单调升高具有明显的区别。同时 0.5 mm 的砂光在 10 s 和 20 s 作用下都降低了其黄蓝色品指数值,而在 30 s 作用下 0.5 mm 的砂光则提高了其黄蓝色品指数值,再次证明了先增大后减小的这一变化趋势。因为砂光后表面的颜色变化与更短时间的振动摩擦表面处理效果变化效果具有一定的相似性。

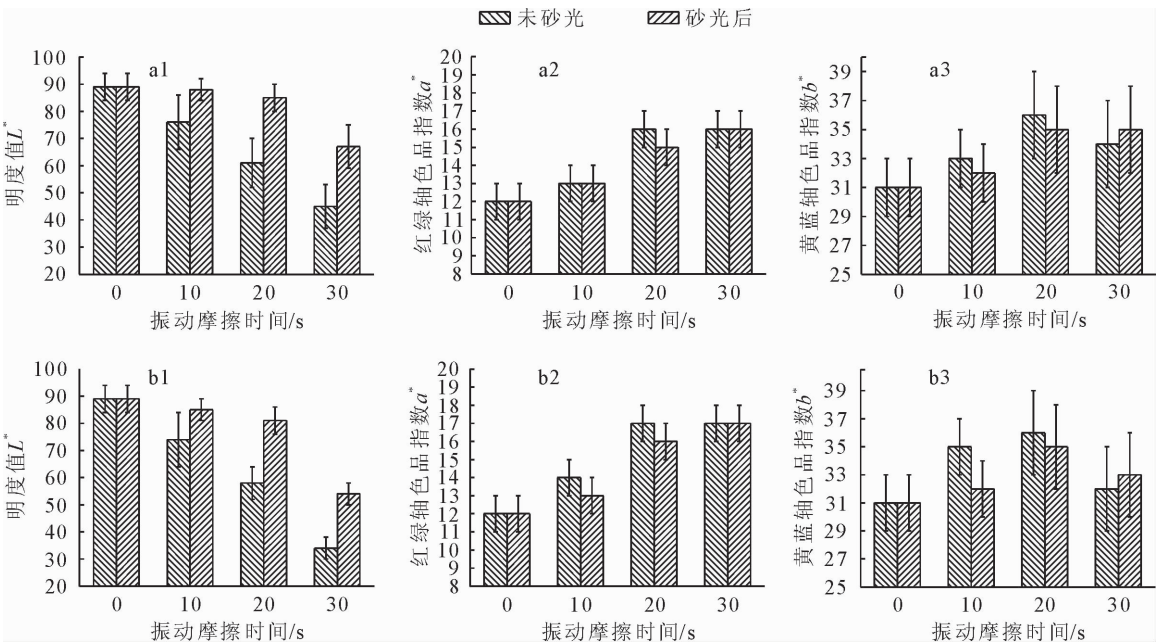


图 4 振动摩擦压强分别为 1 MPa(a)和 2 MPa(b)下木材表面的明度值 L^* (1),红绿轴色品指数 a^* (2)和黄蓝轴色品指数 b^* (3),NS-未砂光表面,S-0.5 mm 砂光表面

Fig. 4 The lightness index L^* (1),red/green index a^* (2) and yellow/blue index b^* (3) change of the wood surface after 1 MPa (a) and 2 MPa (b) linear vibrational friction,NS-not sanded wood surface,S-sanded wood surface

色差 ΔE_{ab}^* 的定量研究如表 2 所示。在相同摩擦压力作用下,表面改性后的色差都越来越大,而且随着摩擦时间的延长,色差值变化的速率都有增大的趋势。如 1 MPa 情况下,前 10 s 产生的色差值为 11.19,中间 10 s 产生的色差值为 14.42,后 10 s 产生的色差值为 18.54。在相同时间处理情况下,高压压力作用下色差都比低压压力要大,同时也是随着时间的延长,高低压力作用下的色差值更大。砂光大大降低了色差数值,特别是在 1 MPa 的振动摩擦处理时间 10 s 时,色差 <3 ,这时很难察觉色差的存在,其他情况肉眼都能察觉色差的存在。

表 2 振动摩擦木材表面处理工艺条件下
色差 ΔE_{ab}^* 的变化

Table 2 The color difference ΔE_{ab}^* change of the linear vibrational friction modified wood surface

摩擦压力 /MPa	摩擦时间 /s	ΔE_{ab}^*	
		未砂光	砂光
1	10	11.19(1.52)	2.45(0.13)
	20	25.61(2.31)	6.4(0.24)
	30	44.15(3.82)	22.72(1.78)
2	10	15.65(1.54)	4.12(0.23)
	20	31.79(2.92)	8.61(0.56)
	30	55.26(1.95)	35.41(1.43)

由图 5a 可以发现,在相同压力作用下处理后木材表面的彩度 C^* 首先是提高,然后降低。只是在压力较大时(2 MPa 压力)的作用下,20 s 时间内彩度提高的更快,同时 30 s 时彩度也下降得更快。由

图 5b 可以看出,色调角 h^* 随着处理时间的延长都是不断降低的,说明颜色落在红黄象限内。

2.3 木材表面硬度的变化

由表 3 可知,1 MPa 的表面振动摩擦改性使得硬度提升了 8.3%~59.6%,2 MPa 的表面振动摩擦改性使得硬度提升了 10.9%~70.9%。压力大的情况下,相同振动摩擦时间内硬度提升更为明显。这时由于在压力大的情况下,摩擦作用的机械能转化为界面的热能更多,界面温度也相对更高,高压力的作用也就是的受到表面摩擦影响的木材厚度更大,压缩程度更大,使得木材表面的硬度升高更多。

同时振动摩擦时间对于木材表面硬度的影响也较为重要,其影响规律是先增大后降低的趋势。由表 3 可知,在 1 MPa 情况下,第 1 个 10 s 木材表面的硬度增加了 8.3%;第 2 个 10 s 木材表面硬度增加了 31.3%;而第 3 个 10 s 木材表面的硬度增加了 20%。在 2 MPa 情况下也显示了相同的变化规律,第 1 个 10 s 木材表面的硬度增加了10.9%;第 2 个 10 s 木材表面硬度增加了 50.8%;而第 3 个 10 s 木材表面的硬度增加了 9.2%。这主要是由于第 1 个 10 s,木材表面温度较低,软化程度小,很难对木材表面进行压缩。而第 2 个 10 s,木材温度都几乎达到了最高的温度,木材伴随着水热机械力的作用,软化程度大大提升,压力作用下,其表面硬度也会相应地大大提升。而最后 1 个 10 s 主要提升的是木材相对较为内部的压缩,因为这时表面已经完全被压

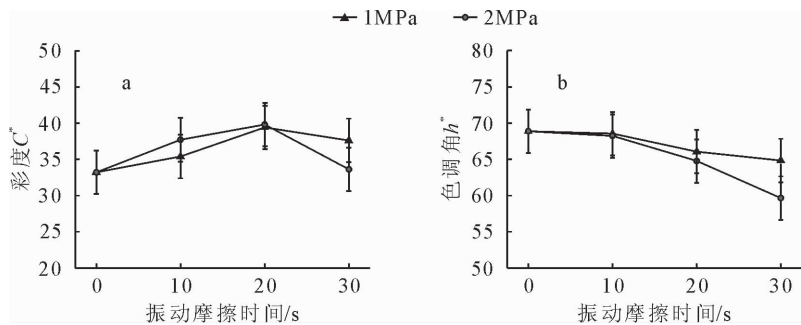


图5 木材表面振动摩擦改性后木材表面彩度的变化(a)和木材表面色彩角的变化(b)

Fig. 5 The color saturation C^* change (a) and color angle h^* change (b) of the linear vibrational friction modified wood surface

表3 振动摩擦木材表面处理工艺条件下的压缩率和硬度

Table 3 The compression ratio and hardness of the wood surface after linear vibrational friction modified

摩擦压力 /MPa	摩擦时间 /s	压缩率 /%	表面硬度 /kN	硬度增加率* /%
1	10	1.59(0.12)	2.49(0.19)	8.3
	20	5.86(0.43)	3.21(0.23)	39.6
	30	8.76(0.67)	3.67(0.27)	59.6
2	10	2.97(0.19)	2.55(0.26)	10.9
	20	8.12(0.69)	3.72(0.31)	61.7
	30	12.4(0.98)	3.94(0.33)	70.9

缩了。由于木材的传热传质较慢，所以使得其表面的硬度上升的速率大大降低。

硬度的提升与木材表面改性处理后的压缩率成正相关关系，如图6中所示。其主要得益于在高温水热机械力作用下木材表面的部分的压缩密实结果，这与常规的压缩木的硬度提升的原理较为类似。但是在该试验情况下，木材的压缩集中在表面，木材表面细胞的压缩也呈现逐步压缩的趋势。

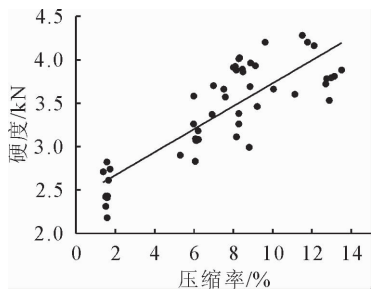


图6 木材表面摩擦振动压缩率与硬度之间的关系

Fig. 6 The relationship between the compression rate and hardness of the friction wood surface

3 结论与讨论

在振动摩擦过程中，并不会产生任何的粉尘现象，所以木材处理的工作环境较好，而且处理后的表面极其光滑密实。聚四氟乙烯塑料在摩擦振动改性实验完成后表面未发现有任何木材粘接，可以无需清理的情况下重复使用。

在不同压力的摩擦作用下会影响木材表面的温

度的升高速率，压力越大升高速率越快。但是最终木材表面所能达到的最高温度却相差不大，这主要是由于热量的动态平衡所决定的。聚四氟乙烯塑料与木材之间的摩擦系数呈现先增大后降低，然后趋于稳定的趋势，这与摩擦过程中木材表面所发生的物理变化较为吻合。木材表面的改性处理过程是伴随着明度值的快速降低，红绿轴色品指数逐渐升高，黄蓝色品指数先升高后降低的规律，这与传统的木材碳化时所得到的颜色变化规律较为类似，主要是由于组成木材的半纤维素的降解，木质素的变化所引起的。改性后木材的表面硬度和耐水性都得到较大提高。摩擦压强 2 MPa、时间为 30 s 的处理条件下，硬度提升达到 70.9%。这主要是由于水热机械力的作用提高了木材的压缩率所引起的。

线性振动摩擦技术较为适合木材表面的密实和色泽改善。因为其效率较高，在 1 min 以内就能够完成木材表面的色泽和密实改性。由于该技术是利用木材表面的摩擦生热的原理进行表面密实改性，最需要温度和热量作用的改性木材表面同时也是温度最高的地方，其能源利用效率较高。同时该技术的生产成本也较低，不需要其他的化学药剂进行处理，也不需要热油或高温蒸汽作为加热介质，处理木材的体积损耗也就是压缩率较低，所以木材表面的改性成本也较低。该方法利用摩擦生热的原理在木材表面形成了高温水热结合机械力作用的条件，能够实现木材表面快速高效和绿色简单的木材表面改性方法。通过本研究可以证明该方法相较于传统方法具有一定优越性。

参考文献：

[1] 董友明, 张世锋, 李建章. 木材细胞壁增强改性研究进展[J]. 林业工程学报, 2017, 2(4): 34-39.
DONG Y M, ZHANG S F, LI J Z. Research progress in wood cell wall modification [J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(4): 34-39. (in Chinese)

[2] 王新爱, 朱玮, 汪玉秀. 杨木材性的化学改良技术[J]. 西北林业

院学报,2001,16(1):76-81.

WANG X A,ZHU W,WANG Y X. Recent developments in chemical modification techniques of poplar wood[J]. Journal of Northwest Forestry University,2001,16(1):76-81. (in Chinese)

[3] HILL C A. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes [M]. John Wiley & Sons,2006.

[4] 陈康乐,冯德君,张英杰,等. 高温热处理对木材力学性能的影响[J]. 西北林学院学报,2013,28(5):164-166.

CHEN K L,FENG D J,ZHANG Y J, *et al.* Effects of high temperature treatment on mechanical properties of wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 164-166. (in Chinese)

[5] 冯德君,赵泾峰. 热处理木材吸湿性及尺寸稳定性研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(2):200-202.

FENG D J,ZHAO J F. Heat treatment of wood hygroscopicity and dimensional stability[J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(2):200-202. (in Chinese)

[6] ESTEVES B M,PEREIRA H M. Wood modification by heat treatment:a review[J]. Bioresources,2009,4(1):370-404.

[7] 李晓文,李民,秦韶山,等. 压力蒸汽热改性橡胶木的物理力学性能分析[J]. 热带农业科学,2016,36(11):106-110.

LI X W,LI M,QIN S S, *et al.* Effect of steam pressure on physical and mechanical properties of thermally modified rubber wood [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture,2016, 36(11):106-110. (in Chinese)

[8] 李萍,左迎峰,吴义强,等. 家具和地板用浸渍改性杉木研究进展[J]. 林业工程学报,2016,1(5):133-138.

LI P,ZUO Y F,WU Y Q *et al.* Study of modification of Chinese fir for furniture and floor by resin impregnation[J]. Journal of Forestry Engineering,2016,1(5):133-138. (in Chinese)

[9] 郭伟,牛晓霞,李伟,等. 纳米 ZnO 改性蜂蜡处理缅甸花梨木材表面性能[J]. 北京林业大学学报,2016,38(2):113-119.

GUO W,NIU X T,LI W *et al.* Surface properties of Bruma rosewood polished using beewax modified by nano-ZnO [J]. Journal of Beijing Forestry University,2016,38(2):113-119. (in Chinese)

[10] 肖泽芳,袁沛沛,王清文,等. 蔗糖/DMDHEU 改性对木材涂饰和老化性能的影响[J]. 林业工程学报,2016,1(4):18-24.

XIAO Z F,YUAN P P,WANG Q W *et al.* Coating and weathering performance of wood modified with a mixing solution of sucrose and DMDHEU[J]. Journal of Forestry Engineering,2016,1(4):18-24. (in Chinese)

[11] 黄艳辉,费本华,赵荣军. 低分子量酚醛树脂处理对杉木细胞壁的改性机理研究[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(12):3356-3359.

HUANG Y H,FEI B H,ZHAO R J. Modified mechanism of cell walls from Chinese fir treated with low-molecular-weight phenol formaldehyde resin [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2015,35(12):3356-3359. (in Chinese)

[12] 孙晓珊,王宝生,温煌,等. 木质素磺酸钠取代苯酚改性辐射松木材[J]. 东北林业大学学报,2015,43(2):80-83.

SUN X S,WANG B S,WEN H *et al.* Properties of modified wood by sodium lignin sulfonate substituting phenol [J]. Journal of Northeast Forestry University,2015,43(2):80-83. (in Chinese)

[13] 张彦娟,林兰英,傅峰. 硅溶胶/丙烯酸酯复配乳液改性人工林杉木[J]. 木材工业,2015,29(4):36-39.

ZHANG Y J,LIN L Y,FU F. Modification of Chinese fir with silica sol/acrylate emulsion [J]. China Wood Industry,2015, 29(4):36-39. (in Chinese)

[14] 张海洋,周曦禾,卢晓宁,等. 毛竹线性振动摩擦焊接无胶胶合的研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2015,39(5):135-138.

ZHANG H Y,ZHOU X H,LU X N *et al.* Study on the bonding strength of the linear vibration mechanical welded moso bamboo [J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Science Edition,2015,39(5):135-138. (in Chinese)

[15] 张海洋,罗海,卢晓宁,等. 淡竹增强空心刨花板抗压强度分析[J]. 林业工程学报,2014,15(6):72-75.

ZHANG H Y,LUO H,LU X N, *et al.* The analysis of compression strength of hennon bamboo reinforced extruded particleboard [J]. Journal of Forestry Engineering,2014,28(6):72-74. (in Chinese)

[16] 罗翔亚,朱旭东,张吉荣,等. 木材焊接理论研究及技术进展[J]. 西北林学院学报,2017,32(6):270-275.

LUO X Y,ZHU X D,ZHANG J R, *et al.* Theoretical research and technical progress of wood welding[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(6):270-275. (in Chinese)

[17] ZHANG H Y,PIZZI A,LU X, *et al.* Palmyra palm bonding by vibrational welding [J]. European Journal of Wood and Wood Products,2014,72(5):693-695.

[18] DELMOTTE L,GANNE-CHEDEVILLE C,LEBAN J M, *et al.* CP-MAS 13 C NMR and FT-IR investigation of the degradation reactions of polymer constituents in wood welding [J]. Polymer Degradation and Stability,2008,93(2):406-412.

[19] ZHANG H,PIZZI A,LU X, *et al.* Study of the end-grain butt joints obtained by friction welding of moso bamboo[J]. Bioresources,2017,12(3):6446-6457.

[20] DELMOTTE L,MANSOURI H R,OMRANI P, *et al.* Influence of wood welding frequency on wood constituents chemical modifications[J]. Journal of Adhesion Science and Technology,2009,23(9):1271-1279.

[21] ZHANG H,PIZZI A,ZHOU X, *et al.* The study of linear vibrational welding of moso bamboo [J]. Journal of Adhesion Science and Technology,2018,32(1):1-10.