

# 超声波和汽蒸预处理对桉木干燥速率的影响

李 桓, 徐熠雯, 赵紫剑, 何正斌, 伊松林

(木材科学与工程北京市重点实验室, 木质材料科学与应用教育部重点实验室, 北京林业大学, 北京 100083)

**摘要:** 对巨尾桉木材分别进行超声波、汽蒸预处理, 分析预处理前后桉木干燥速率的变化。结果表明, 超声波和汽蒸预处理均可加快桉木的干燥速率, 且随超声波频率的增加和汽蒸处理温度的升高而明显提高; 两种预处理方式中, 汽蒸预处理对桉木干燥速率和干燥质量的改善效果更明显。

**关键词:** 桉木; 超声波预处理; 汽蒸预处理; 干燥速率

中图分类号: S781.7 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654 (2018) 01-0044-04

## Effects of Ultrasonic and Steam Pretreatment on Drying Rate of Eucalyptus Wood

LI Huan, XU Yi-wen, ZHAO Zi-jian, HE Zheng-bin, YI Song-lin

(Beijing Key Laboratory of Wood Science and Engineering, MOE Key Laboratory of Wooden Material Science and Application, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Eucalyptus wood samples were treated by ultrasonic and steaming, respectively. The drying rate of the wood samples, before and after pretreatment, were compared and analyzed. The results showed that both ultrasonic and steam pretreatment could be used to speed up drying rate, which were significantly improved by increasing the ultrasonic frequency and/or raising the steaming temperature. Effect of steaming pretreatment on the drying rate and drying quality for the Eucalyptus wood samples was better than that of ultrasonic pretreatment.

**Key words:** Eucalyptus wood; ultrasonic pretreatment; steam pretreatment; drying rates

桉木作为一种重要的速生林树种, 具有种类多、生长快、适应性强等优点, 近年来得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。但由于其生长应力大, 桉树在干燥过程中容易产生内裂、皱缩等缺陷, 且木材干燥速度缓慢, 使干燥过程耗能大, 成本高。为了获得更好的干燥效果及降低生产成本, 通常在桉木干燥之前对其进行预处理。

目前, 预处理方式主要包括超声波预处理和汽

蒸预处理。超声波主要用于对木材进行协同干燥<sup>[2-6]</sup>; 汽蒸预处理可以加快木材的干燥速率, 释放应力, 提高塑性, 改善干燥质量<sup>[7]</sup>, 且简单易行。为此, 笔者分别对桉木进行超声波和汽蒸预处理, 通过分析和比较不同处理条件下桉木的干燥速率, 旨在找出优化的预处理工艺, 为桉木高附加值的实木化利用, 提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

巨尾桉 (*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*) 采自广东中山, 初含水率 (MC) 100%~120%。选取无结疤、皱缩等明显缺陷、且初含水率相近的巨尾桉试

收稿日期: 2017-06-05; 修改日期: 2017-11-18

基金项目: 国家自然科学基金“预处理方式对桉木干燥特性影响的比较研究”(10022051)。

作者简介: 李桓 (1995—), 男, 北京林业大学材料学院学生。

责任作者: 伊松林, 男, 北京林业大学材料学院教授。

板 6 块, 每块试板锯成尺寸为 100 mm × 50 mm × 20 mm (长×宽×厚) 的弦切板试样 4 个, 共 24 个。

试样随机分成 6 组, 分别标记为: A、B、C、D、E、F 组, 其中 A<sub>0</sub>~F<sub>0</sub> 为对照组, 其余为试验组。

### 1.2 试验设备

SB-400DTY 扫频超声波清洗机; DF204 电热恒温鼓风干燥箱; 汽蒸预处理试验箱; DZFFZ-6 全自动电热蒸汽发生器; S-3400N II 场发射扫描电子显微镜; FTIR-650 傅里叶变换红外光谱仪; 索氏提取器。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 超声波预处理

A、B、C 组试样用于超声波预处理。根据前期预试验结果, 设定超声波处理的频率分别为 25、28、40 KHz, 处理时间为 60 min。

首先在超声波清洗机中加入蒸馏水, 将试样完全浸没, 分别按不同频率处理 60 min; 对照组试样仅用蒸馏水浸泡。处理完毕后取出全部试样, 用保鲜膜包好备用。

#### 1.3.2 汽蒸预处理

D、E、F 组试样用于汽蒸预处理。同样根据前期试验结果, 设定汽蒸温度分别为 80、100、120 °C, 处理时间为 2 h。

将试样置于汽蒸箱中, 首先调节温度到 50 °C, 保温 20 min 后, 再分别调节汽蒸箱温度到 80、100、120 °C, 待试样温度达到设定温度后通入蒸汽, 2 h 后取出试件, 用保鲜膜包好备用。

#### 1.3.3 干燥

将预处理后的所有试样放入 60 °C 干燥箱中进行干燥。每隔 2 h 称重一次, 记录质量变化, 直到试样的含水率降至 10% 左右; 再放入 (103 ± 2) °C 的烘箱中, 干燥至绝干, 称重并计算不同处理条件下的干燥速率。

### 1.4 性能评价

1) 干燥速率: 计算试样的含水率, 并绘制含水率随时间的变化曲线, 计算、比较不同处理条件下试样的干燥速率。

2) 抽提物: 将试样粉碎成 40~50 目粉末, 参照 GB/T 2677.6-1994 《造纸原料有机溶剂抽出物含量的测定》, 用苯醇抽提。每个试样重复 3 次, 结果取平均值。

3) 微观结构: 锯制规格为 8 mm × 8 mm × 3 mm (长×宽×厚) 小试样, 电镜观察其微观结构的变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 预处理方法的影响

#### 2.1.1 超声波预处理

不同频率超声处理后, 桉木试样含水率随干燥时间的变化曲线, 如图 1 所示; 试样的干燥时间和速率见表 1。

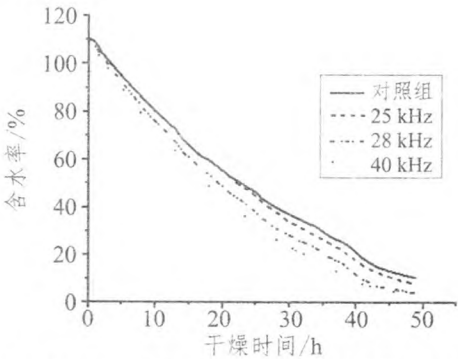


图 1 超声预处理频率对桉木含水率变化的影响

Fig.1 Effect of ultrasonic pretreatment frequency on moisture content of wood samples

图 1 显示, 随着超声波预处理频率的增大, 曲线斜率也逐渐增大, 表明试件的干燥速率加快。

表 1 不同超声波频率预处理桉木试样的干燥时间和速率

Tab.1 Drying time and rate of wood samples under different frequencies of ultrasonic pretreatments

| 处理<br>频率/<br>kHz | 干燥时间/h      |                   |      | 平均干燥速率/(%·h <sup>-1</sup> ) |                   |       |
|------------------|-------------|-------------------|------|-----------------------------|-------------------|-------|
|                  | MC ≥<br>30% | 10% ≤ MC<br>< 30% | 总时间  | MC ≥<br>30%                 | 10% ≤ MC<br>< 30% | 总速率   |
| 0                | 37.1        | 13.1              | 50.2 | 2.156                       | 1.527             | 1.992 |
| 25               | 33.5        | 15.4              | 48.9 | 2.388                       | 1.299             | 2.045 |
| 28               | 30.2        | 16.7              | 46.9 | 2.649                       | 1.198             | 2.132 |
| 40               | 28.8        | 17.9              | 46.7 | 2.778                       | 1.117             | 2.141 |

由表 1 可知, 经过超声波预处理后, 试样的干燥时间缩短, 干燥速率提高, 尤其是试样含水率在纤维饱和点 (FSP) 以上时更为显著; 超声波频率越高, 干燥时间缩短的幅度越大, 干燥速率提升越多。

在 FSP 以上时, 与对照组相比, 经过不同超声频率处理后, 试样的干燥时间分别缩短了 9.7%、18.6% 和 22.4%; 平均干燥速率分别提升了 10.8%、22.9% 和 28.9%。在 FSP 以下时, 超声波预处理对提

高桉木干燥速率的作用并不明显,甚至随着超声波频率的升高干燥速率减慢。但总的干燥时间随超声波频率的增大逐渐缩短,干燥速率也逐渐加快。

超声波预处理对干燥速率的影响机理是,超声波在水中产生空化效应,形成局部高温高压和微射流等,使木材内部形成微小孔道,减少了木材的抽提物含量,加快了水分移动的速度<sup>[8-9]</sup>,从而提高了木材的干燥速率。

### 2.1.2 汽蒸预处理

不同汽蒸温度处理后,桉木试样含水率的降低值(初含水率与预处理后试件含水率之差)见图 2。经 120 °C 汽蒸处理后,桉木试件的含水率下降最多,达 35.7%。

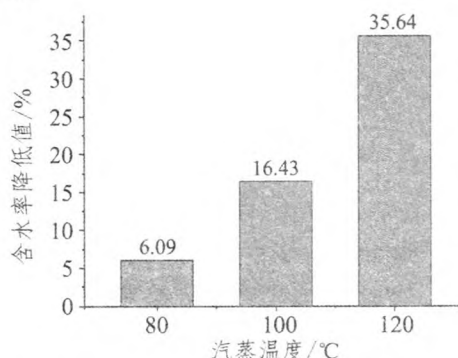


图 2 汽蒸预处理后桉木试样的含水率

Fig.2 Moisture content of wood samples after being pretreated with different steam temperatures

不同汽蒸温度处理后,桉木试样含水率随干燥时间变化的曲线见图 3。图 3 表明,汽蒸预处理可以加快桉木的干燥速率,且预处理温度越高,干燥速率提高幅度越明显,特别是在干燥初始阶段。

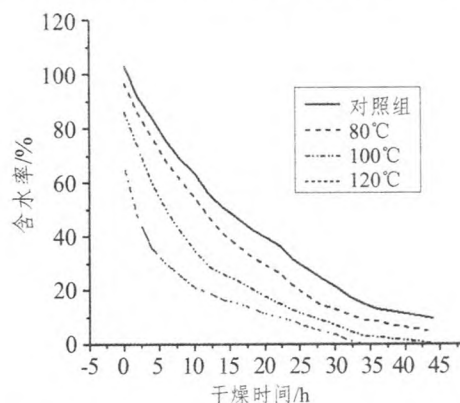


图 3 汽蒸预处理桉木试样的含水率变化曲线

Fig.3 Moisture content of wood samples pretreated with steam in different temperatures

通过计算发现,含水率在 FSP 以上时,未处理材的平均干燥速率为 1.9 %/h,不同汽蒸温度处理后,试样的平均干燥速率分别为:2.5、3.7、5.1 %/h,分别提高了 30.7%、97.0%和 169.3%;在 FSP 以下时,未处理试样的平均干燥速率为 1.1 %/h,而汽蒸处理试样的平均干燥速率分别为:1.3、1.4、1.5 %/h,提升幅度分别为 23.7%、31.5%和 37.2%。

汽蒸处理的机理:在 FSP 以上时,水分主要以渗透的方式进行传递,汽蒸预处理可提高桉木的渗透性,使水分的移动速度加快,故干燥速率明显提升;在 FSP 以下时,水分主要以扩散的形式进行传递<sup>[10]</sup>,汽蒸预处理对桉木干燥速率的提升作用已不明显。

比较超声波预处理和汽蒸预处理两种方法,在本试验中,汽蒸预处理的效果更好。尤其是当蒸汽处理温度为 120 °C 时,干燥时间大幅缩短,干燥速率得到明显提升。

## 2.2 汽蒸预处理材的机理分析

### 2.2.1 桉木试样微观结构

未处理及 120 °C 汽蒸预处理桉木试样的微观结构,如图 4 所示。

由图 4 (左) 可以发现,未处理试样的纹孔膜保持完整;而经过汽蒸处理试样的纹孔膜破裂,甚至

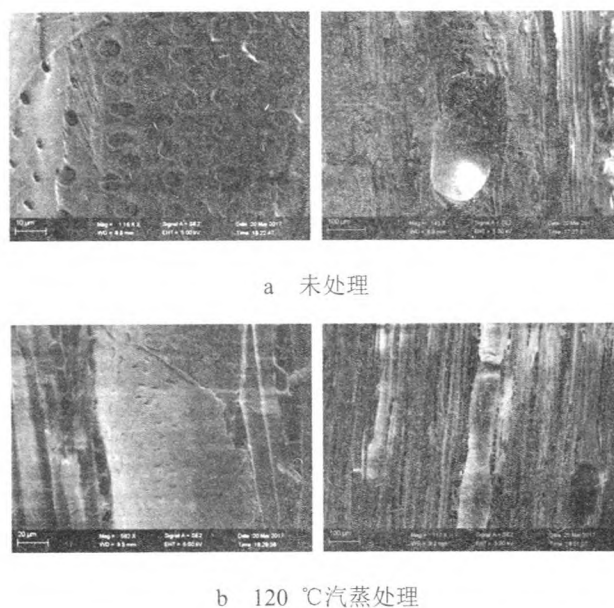


图 4 汽蒸预处理前后桉木试样的微观结构

Fig.4 SEM photograph of wood samples before and after steaming pretreatments

消失。因为汽蒸处理后部分纹孔膜可能发生水解、变薄或脱落，增大了纹孔膜上纹孔口的直径，减少了纹孔对流体的阻碍作用，故渗透性增加<sup>[11]</sup>，从而加快了木材内部水分的蒸发。

图 4（右）显示，未处理试样导管内存在较多的侵填体；经过汽蒸处理后，试样导管壁光滑，侵填体消失，进一步说明在热蒸汽的作用下，木材导管内部的抽提物挥发或移动，使其内部水分蒸发畅通，进而加快了木材的干燥速率。

### 2.2.2 抽提物含量变化

汽蒸处理前后桉木试样抽提物含量的变化，列于表 2。

表 2 汽蒸预处理对桉木试样抽提物含量的影响

Tab.2 Effect of steaming pretreatment on extract content of wood samples

| 组别  | 木粉重/<br>g | 抽提物质量/<br>g | 抽提物含量<br>/% | 抽提物含量<br>平均值/% |
|-----|-----------|-------------|-------------|----------------|
| 未处理 | 3.0106    | 0.06        | 2.00        | 2.00           |
| 汽蒸  | 3.0090    | 0.052       | 1.74        |                |
| 处理  | 3.0026    | 0.051       | 1.71        | 1.72           |
|     | 3.0070    | 0.052       | 1.72        |                |

由表 2 可知，经过汽蒸处理后，试样的抽提物含量降低。这可能是因为汽蒸处理使木材内部的部分抽提物随着水分的蒸发而逐渐转移到表面，或挥发到周围环境中，故抽提物含量减少。

### 2.2.3 红外光谱分析

汽蒸处理前后桉木的红外光谱谱图，见图 5。

羟基的特征吸收峰出现在  $3\ 500\sim 3\ 300\text{ cm}^{-1}$  处<sup>[12]</sup>（图 5 中虚线所示）。经过  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  汽蒸预处理后，试

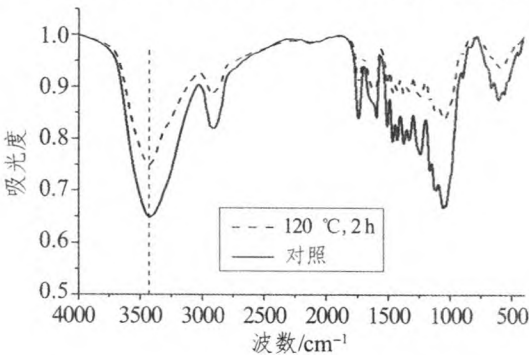


图 5 汽蒸处理前后桉木试样的红外光谱

Fig.5 Infrared spectrogram of wood samples before and after steaming pretreatments

样的羟基特征峰的吸收强度，较未处理材明显减弱。这是因为经过汽蒸处理后，桉木试样内部的亲水基团羟基数量减少，使桉木的亲水性降低，提高了水分在其内部的移动速度，进一步使桉木的干燥速率提高<sup>[13]</sup>。

### 3 结论

1) 超声波预处理和汽蒸预处理均可加快桉木的干燥速率，且随着超声波频率的增加和汽蒸温度的升高，干燥速率显著增加，尤以含水率在纤维饱和点以上时显著。

2) 在本试验范围内，汽蒸预处理对提升桉木干燥速率的效果比超声波预处理更为明显； $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  汽蒸处理时，桉木的干燥速率最快。

3) 汽蒸处理后，桉木的纹孔膜破裂，渗透性提高，抽提物含量减少，羟基数量减少，使水分在木材内部移动通畅，桉木干燥速率提高。

### 参考文献：

- [1] 谢耀坚. 我国桉树种质资源现状及育种目标探讨[J]. 桉树科技, 2012, 29(2): 33-39.
- [2] 邱莹, 王振宇, 何正斌, 等. 超声波预处理对杨木试件干燥特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(2): 35-38.
- [3] He Z, Fei Y, Peng Y, et al. Ultrasound-assisted vacuum drying of wood: effects on drying time and product quality[J]. Bioresources, 2013, 8(1): 855-863.
- [4] He Z, Fei Y, Yi S, et al. Effect of ultrasound pretreatment on vacuum drying of chinese catalpa wood[J]. Drying Technology, 2012, 30(15): 1750-1755.
- [5] 杨飞, 何正斌, 赵阳, 等. 超声波—真空协同干燥自由水迁移速率[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(12): 103-107.
- [6] 何正斌, 郭月红, 伊松林, 等. 木材超声波-真空协同干燥的动力学研究[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 133-136.
- [7] 杨国强. 巨尾桉汽蒸工艺的研究与优化[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [8] Simal S, Benedito J, Sánchez E S, et al. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 36(3): 323-336.
- [9] 赵之平, 陈澄华. 超声传质过程机理[J]. 化工设计, 1997(6): 33-38.
- [10] 魏思文, 苗平, 王晓敏. 汽蒸预处理对速生杨干燥速度的影响[J]. 林产工业, 2011, 38(4): 23-25.
- [11] 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.
- [12] 郑丽霞. 水热预处理对巨尾桉板材性能的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
- [13] 张琳, 顾汉泉, 高仁孝. 辐射对纤维素结晶度的影响[J]. 火炸药学报, 2002, 25(1): 76-77.

（责任编辑 孟凡丹、向 琴）