

基于剖面密度梯度(VDP)技术的意杨板材剖面密实梯度

徐信武, 崔悦, 汤正捷

(南京林业大学 木材工业学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 以 12 mm 厚意杨 *Populus deltoids* 板材为试材, 在 1 MPa, 100 °C 和 2 ~ 5 min 条件下, 实施横向热压密实试验, 采用剖面密度梯度(VDP)测试仪获取了密实后速生杨木锯材的断面密度分布, 并利用建立的“密度-压缩率”转换公式, 转换为压缩率数据, 从而实现了木材断面压缩率的准连续定量和定位。结果表明: ①VDP 技术可以准确定量密实后木材各厚度微层的压缩率; ②意杨木材断面压缩率分布与剖面密度梯度类似, 呈现表高芯低的宽“V”形; 在试验工艺条件下, 表层约 50% 厚度受到不同程度的压缩, 最大压缩率达到 34%~37%, 而芯层未受到显著压缩。图 4 参 7

关键词: 林业工程; 意杨; 速生木材; 密实化; 剖面密度梯度

中图分类号: S781 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2010)05-0799-04

Vertical densification gradient of *Populus deltoides* lumber with vertical density profile (VDP) technology

XU Xin-wu, CUI Yue, TANG Zheng-jie

(College of Wood Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: Plantation wood, as a potential substitute for naturally grown wood used in flooring or furniture manufacture, is normally characterized by low-density and low-hardness, which compression can improve. To accurately locate and quantify the compression rate (CR) of *Populus deltoides* (poplar) lumber at each micro-layer of densified fast-growing wood, vertical density profile (VDP) technology was introduced. The 12 mm thick, fast-growing poplar lumber was compressed under 1 MPa at 100 °C for 2, 3, and 5 min. Corresponding VDP data were transformed into CR data following a deduced mathematical equation and then graphically analyzed. Results showed that the compression rate distribution (CRD), having a V-shaped curve, was similar to VDP with a maximum surface CR of 34% - 37%. Meanwhile, the thickness in a core showed no great compression. Overall, VDP technology precisely quantified the different compression rates for different micro-layers of *P. deltoides* lumber. [Ch, 4 fig. 7 ref.]

Key words: forest engineering; *Populus deltoides*; fast-growing wood; densification; vertical density profile

据第 7 次森林资源普查, 中国现存人工林为 0.62 亿 hm^2 , 蓄积量高达 19.61 亿 m^3 , 具备显著的资源优势。研究表明, 速生树种木材普遍具有易变形、材质软、强度低等缺陷, 不能直接用于地板、家具等对板材强度、硬度、耐磨等性能要求较高的场合^[1], 但通过密实化改性处理, 上述缺陷将得到显著改善^[2-6]。板材密实过程中, 在确保表面密实性能的前提下, 准确控制压缩率及其在板材断面的分布, 是节约木材资源和合理控制密实工艺的关键。为了获取木材的剖面压缩率及其分布(CRD), 可以采用分层取样或显微镜测量等常规测试方法, 但存在制样繁琐、数据误差较大且连续度不高等缺陷, 且不适于试件厚度较小的场合。剖面密度梯度(VDP)无损检测技术可以在较高步进精度(0.05 mm)条件下, 实现对试件的准连续扫描, 获取大量的、定位于各微层的密度数据^[7]。本研究借助 X-射线剖

收稿日期: 2009-11-11; 修回日期: 2010-01-14

基金项目: 江苏省苏北科技发展计划项目(BC2009476)

作者简介: 徐信武, 副教授, 博士, 从事速生木材改性及应用研究。E-mail: xucarpenter@yahoo.com.cn

面密度梯度测试仪, 获取密度数据并建立“密度-压缩率”转换公式, 实现板材剖面压缩率分布的连续定量。

1 材料与方法

1.1 材料

意杨 *Populus deltoids* 板材取自江苏省泗阳县德伟木业有限公司, 含水率为 10%, 名义厚度为 12 mm。

1.2 方法

1.2.1 密实化处理 将板材锯成 300 mm × 50 mm 的试件, 在小幅面(300 mm × 300 mm)热压机上实施密实试验, 温度为 100 °C, 时间 2, 3 和 5 min, 压力 1 MPa。各种条件重复 3 次实验。密实试验后, 试件在温度 20 °C, 湿度 65% 环境中陈放 48 h, 再进行剖面密度梯度(VDP)分析。

1.2.2 密度-压缩率转换 本研究借助 VDP 无损检测技术间接反应其厚度变化, 基于如下理论推导。假设: 在压缩过程中, 板材平面(即: X-Y 平面, 图 1)内各点受压程度相同, 则对于厚度 Z 处(图 1 中取微层 ΔZ_0), 木材压缩率 R(%)可按式(1)计算:

$$R(\%) = \frac{\Delta Z_0 - \Delta Z_1}{\Delta Z_0} \times 100 = \left(1 - \frac{\Delta Z_1}{\Delta Z_0}\right) \times 100. \quad (1)$$

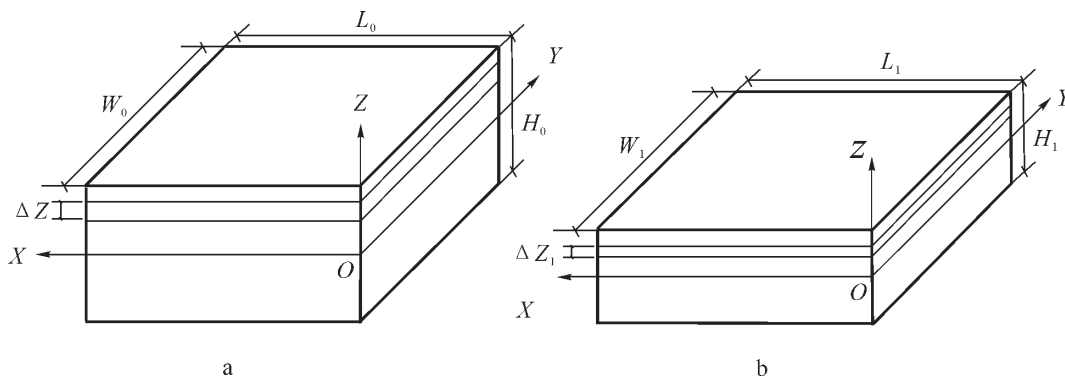


图 1 试件压缩前(a)后(b)的三维示意图

Figure 1 Schematic diagram of wood sample before (a) and after (b) densification

对于压缩前后, 微层的木材密度为:

$$\rho_0 = \frac{\Delta m}{L_0 W_0 \Delta Z_0}; \rho_1 = \frac{\Delta m_1}{L_1 W_1 \Delta Z_1}. \quad (2)$$

式中: L_0 , W_0 , H_0 和 L_1 , W_1 , H_1 分别为压缩前后试件的长、宽和厚度, Δm_0 , Δm_1 为微层木材质量, ρ_0 和 ρ_1 为压缩前后在位置 Z 处的木材密度。结合式(1)和(2), 同时, $\Delta m_0 = \Delta m_1$, 可得:

$$R(\%) = \left(1 - \frac{L_0 W_0 \rho_0}{L_1 W_1 \rho_1}\right) \times 100. \quad (3)$$

在木材压缩过程中, 板材的幅面尺寸变化可以忽略, 即: $L_0 \approx L_1$, $W_0 \approx W_1$, 则式(3)可简化为:

$$R(\%) = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_1}\right) \times 100. \quad (4)$$

至此, 压缩率 R 已转化为密度 ρ 。根据式(4), 结合压缩前后木材的 VDP 数据, 即可计算得到相应厚度位置的木材压缩率。目前, VDP 测试仪器普遍配备步进式数据采集软件, 且数据格式可转化。

1.2.3 仪器 试验仪器为德国 EWS 公司的 DENSE-LAB X 剖面密度测试仪, 步进厚度为 0.05 mm, 密度数据通过格式转换, 进入 MS EXCEL(2003 版本)软件实施数据处理。

2 结果与分析

2.1 剖面密度分布

2.1.1 密实前剖面密度梯度 图 2 为密实前杨木板材的 VDP 曲线。为反应板材上下面压缩的对称程度, VDP 曲线以及后续的压缩率曲线均以板材的 1/2 厚度作为坐标 (0, 0, 0) 点。从图 2 可以看出,

压缩前, 杨木的平均密度约为 $0.53 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 剖面密度分布基本呈现散布、均匀特征。值得注意的是, 板材中心层两侧的密度分布并非严格对称, 这是因为所有试材均为弦切板, 基于速生杨木的生长特性, 各年轮木材的密度存在细微差异所致。这将对木材的压缩结果产生影响(见 2.2), 但不影响本研究 VDP 与 CRD 之间相关性的研究。

2.1.2 密实后剖面密度梯度 在 $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下热压 $2 \sim 5 \text{ min}$ 后, 试件的剖面密度分布如图 3 所示。VDP 曲线呈现两端高、中间低的宽“V”形。对于初始平均密度约 $0.53 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的杨木(图 2), 经过热压密实后, 最高密度达到 $0.78 \sim 0.85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 提高 $47\% \sim 60\%$; 板材芯部区域密度没有出现显著变化, 基本与热压前一致。相对而言, 热压时间越长, 密实化程度越高。与图 2 类似, 图 3 同样出现了非对称 VDP 曲线, 而且更为显著。在 1 MPa , $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2 \sim 5 \text{ min}$ 密实工艺条件下, “V”型 VDP 曲线的两侧峰值相差 $15\% \sim 18\%$ 。这表明, 基于木材本身的密度(硬度)差异, 尽管板材上下两面承受的热压压力对称、上下压板温度一致, 木材的密实程度却有所不同。结合图 2 和图 3 可以看出, 密度越大, 压缩率越低; 密度低, 则压缩程度高。这从侧面显示了热压对低密度速生木材的密实作用。

2.2 压缩率分布

根据式(4), 结合 VDP 测试数据, 计算所得木材的剖面压缩率分布如图 4 所示。从图 4 中可见, 在试验工艺条件下, 意杨板材由表及里, 压缩率曲线先升后降再平缓, 呈现与密度梯度分布(图 3)类似的“V”形。基于 VDP 曲线的非对称性, 压缩率曲线同样呈现不对称特征。该“V”形曲线可分为如下 4 个区域: ①边缘区(横坐标 $-6.0 \sim -5.5 \text{ mm}$ 和 $5.5 \sim 6.0 \text{ mm}$): 由表及里, 板材的压缩率呈上升趋势, 近板表处压缩率仅约 5% 。这是因为热压卸载后, 在陈放时间内, 试件表层发生回弹所致。因此, 需要采取特殊的定型措施, 确保表层密实率, 否则难以达到表层强化的目的。②峰值区(横坐标 $\pm 5.5 \text{ mm}$ 附近): 板材压缩率峰值出现在“V”形曲线两侧, 距板表面约 0.5 mm 处, 左右峰值分别达到 $22\% \sim 29\%$ 和 $34\% \sim 37\%$ 。③渐变和过渡区(横坐标 $-5.5 \text{ mm} \sim -4.0 \text{ mm}$ 和 $2.0 \sim 5.5 \text{ mm}$ 为渐变区, -4 mm 和 2 mm 附近为过渡区): 压缩率先呈现迅速降低趋势, 而在横坐标 -4 mm 和 2 mm 附近则呈现缓慢过渡。从图中可以看出, 热压时间越长(例如 5 min), 过渡区越短; 热压时间越短(例如 2 min), 则过渡区越长。上述现象表明, 通过合理控制热压密实工艺条件, 木材密实化深度是完全可控的。这为速生木材的表层强化奠定了基础。实际上, 在地板工业化生产中, 期望达到“表层密实, 芯层保留”, 从而实现板材表面“密度大, 硬度高”而整体“密度低, 弹性足”的最佳效果。与此同时, 木材材积损失率最小化、原料成本最大化。④中心区(横坐标 $-4.0 \sim 2.0 \text{ mm}$): 在板材内部约 6 mm 区域, 木材尚未受到显著压缩, 密度接近本底密度 $0.53 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 约占比总厚度的 50% 。

2.3 压缩率的差异性分析

通过 VDP 工具, 揭示和量化了意杨木材在承受横向热压作用时发生的差异压缩率。这种宏观的压缩程度差异, 可以从能量的吸收/释放和木材组织的弹/塑性两个微观角度来解释。在热压机内, 木材同时置于力场和热场, 从力的角度, 木材厚度方向各层承受的力相等(满足牛顿第三定律: 力的平衡), 但热量的传递和木材中水分的移动具有滞后性, 表层木材细胞最先受热, 发生热塑变形, 从而将热压板对木材所做的功进行吸收和转化; 内部木材虽受力却尚未受热, 呈现较高的弹性, 卸载后将能量释放, 从而迅速恢复。因此, 在有限的热压时间内, 表层木材压缩率显著高于内部木材。可以预见, 只要热压时间足够长, 木材的压缩将最终传递到芯层。

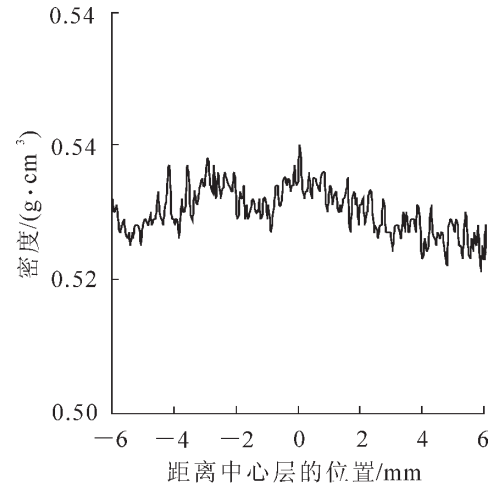


图 2 压缩前杨木的剖面密度分布

Figure 2 Vertical density profile of wood samples before densification

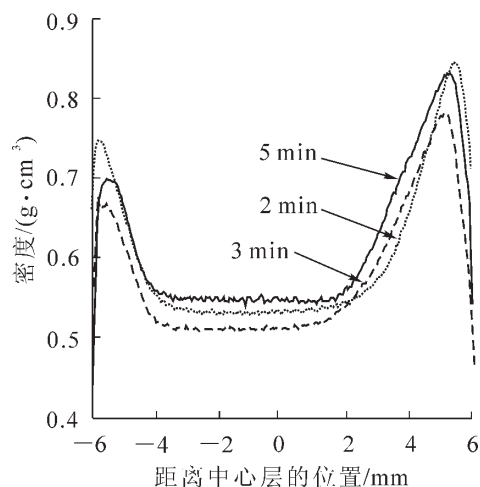


图3 100 °C压缩不同时间后杨木的剖面密度分布

Figure 3 Vertical density profile of wood sample after densification at 100 °C

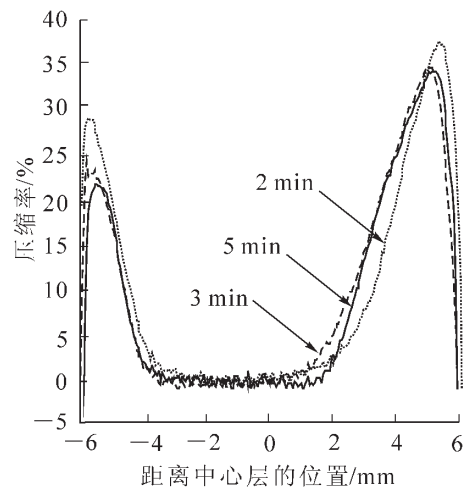


图4 压缩不同时间后杨木的剖面压缩率分布

Figure 4 Vertical compression rate distribution of wood sample after densification

3 结论

①基于密度和压缩率之间的数据转换, VDP无损检测技术可以在步进精度下, 准确定位和精确定量木材厚度方向各微层的压缩率。②在1 MPa, 100 °C和2~5 min的热压密实工艺条件下, 意杨木材断面压缩率分布与剖面密实梯度类似, 呈现“V”形, 上下表层受到不同程度的压缩, 最大压缩率达到34%~37%, 而芯部约50%厚度未受到显著压缩。③借助VDP无损检测技术, 可以合理控制热压密实工艺, 以准确把握木材宏观压缩率及其剖面压缩率分布。

参考文献:

- [1] 席佳, 赵荣军, 费本华, 等. 国内杨树培育、木材性质及其加工利用研究进展[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(5): 125-132.
XI Jia, ZHAO Rongjun, FEI Benhua, et al. Overview of research on tree breeding, wood property & utilization of poplar in China [J]. *J Northwest A & F Univ Nat Sci Ed*, 2009, 37(5): 125-132.
- [2] 寇建良, 孙照斌, 刘宇化. 毛白杨速生材压缩密实化工艺初步研究[J]. 河北林果研究, 2009, 24(3): 288-292.
KOU Jianliang, SUN Zhaobin, LIU Yuhua. Primary study on compression technology in wood of *Populus tomentosa* [J]. *Hebei J For Orchard Res*, 2009, 24(3): 288-292.
- [3] 刘君良, 江泽慧, 许忠允. 人工林软质木材表面密实化新技术[J]. 木材工业, 2002, 16(1): 20-22.
LIU Junliang, JIANG Zehui, XU Zhongyun. New technology on surface compression of plantation softwood [J]. *China Wood Ind*, 2002, 16(1): 20-22.
- [4] 刘君良, 刘一星, 罗志刚. 杨木、柳杉表面压密材的研究[J]. 吉林林学院学报, 1998, 14(3): 125-128.
LIU Junliang, LIU Yixing, LUO Zhigang. On the surface compressed wood of polar and sugi [J]. *J Jilin For Univ*, 1998, 14(3): 125-128.
- [5] 黄广华, 陈瑞英. 人工林巨尾桉木材压缩密化的研究[J]. 福建林学院学报, 2007, 27(4): 380-384.
HUANG Guanghua, CHEN Ruiying. Study on the compression of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* plantation [J]. *J Fujian Coll For*, 2007, 27(4): 380-384.
- [6] 贺宏奎, 常建民. 三倍体毛白杨木材压缩密实化研究[J]. 木材加工机械, 2006, 17(3): 24-27.
HE Hongkui, CHANG Jianmin. Study on the compression and hardening of triploid *Populus Tomentosa* lumber [J]. *Wood Process Mach*, 2006, 17(3): 24-27.
- [7] 程放, 高可城, 施建平. 人造板剖面密度测定仪的研制[J]. 木材工业, 2001, 15(2): 29-32.
CHENG Fang, GAO Kecheng, SHI Jianping. Development of profile density analyzer for wood-based panel [J]. *China Wood Ind*, 2001, 15(2): 29-32.