

文章编号: 1000-5692(2006)04-0424-05

# 龙竹竹材热压干燥工艺

孙照斌<sup>1</sup>, 陈太安<sup>2</sup>, 邓启平<sup>2</sup>

(1. 河北农业大学 林学院, 河北 保定 071000; 2. 西南林学院 木质科学与装饰工程学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 对云南省资源丰富的材用丛生竹种龙竹 *Dendrocalamus giganteus* 竹材进行热压干燥特性和热压干燥工艺试验。结果表明: 热压温度和水煮温度对竹材热压干燥速度和干燥后竹材强度有显著影响, 热压压缩率对竹材强度影响较大, 在保证干燥速度和干燥质量的前提下, 应尽可能降低竹材压缩率, 以减少竹材材积损失。竹材较佳的热压干燥工艺条件是: 60 °C 水煮 1 h, 热压温度 150 °C, 热压压力 0.2 MPa, 呼吸间隔 5 min, 压缩率 10%。表 3 参 11

**关键词:** 林业工程; 木材加工; 龙竹; 热压干燥; 干燥特性; 干燥工艺

**中图分类号:** TS652      **文献标识码:** A

龙竹 *Dendrocalamus giganteus* 是产于中国云南省东南部的一种大型丛生竹种。龙竹在云南省热带地区栽培最为广泛, 生长量较大, 适合于建筑材料和家具材料等, 用它加工的竹地板性能优良<sup>[1]</sup>。竹材干燥是竹材胶合板、竹集成材和竹地板生产中的重要环节。用热压干燥方法干燥竹材, 由于加热板供热温度高, 与被干燥竹材接触紧密, 传热量大, 而使竹材获得快速干燥, 同时, 由于压力作用使竹材表面密度和硬度增加, 板面平整光滑, 翘曲变形小<sup>[2]</sup>。该研究旨在探讨龙竹竹材的热压干燥工艺, 为龙竹竹材的开发利用提供有益参考。

## 1 材料与设备

### 1.1 材料

龙竹采自云南省新平县, 为新采伐鲜竹, 高度 20 m 以上, 胸径约 15 cm, 带竹青竹黄的竹壁厚 15~40 mm。选取从根部以上 0.5~3.0 m 段竹材为试验用材。手工除去竹青竹黄, 然后用锯机和刨床将竹片加工成长×宽×厚为 300 mm×30 mm×16 mm 规格的竹片备用。

### 1.2 仪器设备

恒温水浴锅, 400 mm×400 mm 的小型框架式热压机(有效工作范围 0~60 MPa), 岛津万能力学试验机, 烘箱, 电子天平(感量为 0.01 g), 电子卡尺(精度 0.01 mm), 螺旋测微计(精度 0.01 mm)。

## 2 试验方法和试验设计

### 2.1 试验方法

竹材胶合板和竹材地板等在实际生产中一般是将半圆形或较大弧形竹片软化处理后直接进行压力

收稿日期: 2005-12-03; 修回日期: 2006-03-27

基金项目: 云南省教育厅资助项目(02ZD050)

作者简介: 孙照斌, 副教授, 博士, 从事木材干燥等研究。E-mail: sun19971105@yahoo.com.cn

展平, 展平后的竹材再进行热压干燥处理<sup>[3]</sup>。展平后的竹片宽度较之厚度要大得多, 尽管较宽竹片中间有些裂缝, 热压干燥中会有水分从中溢出, 但由于竹片的表面积较大, 侧面和端面的表面积较小, 且被干燥竹片一般很长, 故该试验忽略竹材宽度方向和端部方向的水分移动。近似认为竹材热压干燥中水分只沿径向厚度方向移动。在此, 对各试件进行封端和涂侧边处理后进行工艺试验。

前人对木材热压干燥的结果表明<sup>[4~7]</sup>, 热压压力和热压呼吸间隔对热压干燥工艺影响不大, 故该研究进行竹材热压干燥试验时, 取热压压力和热压呼吸间隔为定值, 对其他影响热压干燥工艺和干燥质量的因素进行考察和分析。

## 2.2 试验设计和工艺条件

采用正交试验  $L_9(3^4)$ , 因素安排见表 1。A 因素, 水煮温度为 60, 80, 100 °C; B 因素, 水煮时间为 1, 2, 3 h; C 因素, 热压温度为 110, 130, 150 °C; D 因素, 压缩率为 10%, 20%, 30%。

其他工艺参数: 热压压力为 0.2 MPa, 呼吸间隔为 5 min。

## 2.3 试验工艺过程

试件分为 9 组, 每组 7 个试件, 共 63 个试件, 分别予以编号并划线。把试件放入水浴锅中进行水煮预处理。预处理后, 用改性丙烯酸树脂胶封涂试件的端面和侧面, 用螺旋测微器、数显游标卡尺定点测其厚度和宽度。

把试件放入热压机里进行热压, 每隔一段时间, 称一次试件的质量, 记录好实验数据, 直到达到目标质量(含水率 15%左右)为止。压缩率用多种规格厚度规进行控制。

把达到目标质量的试件取出测定其宽度和厚度尺寸, 放在空气中平衡 2 d 后, 在万能力学试验机上测其弹性模量和静曲强度, 并称试件破坏后的质量, 把试件放入烘箱, 在  $(100 \pm 3)$  °C 时, 把试件烘到绝干, 计算其破坏时含水率及试验过程各阶段含水率。

## 2.4 评价指标和数据计算

以试件的厚度干缩率、宽度干缩率、压缩变形回弹率、干燥速度、静曲强度、静曲弹性模量为评价指标, 比较各种干燥条件对竹材干燥工艺和干燥质量的影响, 数据计算参相关文献<sup>[8,9]</sup>。

## 3 结果与分析

正交试验的试验结果见表 1, 对试验结果所做的方差分析见表 2。直观分析表和直观分析图略。

表 1 试验结果

Table 1 Test results of *Dendrocalamus giganteus* bamboo wood

试验号	因素				含水率从 125% 左右降到 15% 左右所用时间 /min	终含 水率/ %	厚度干 缩率/ %	宽度干 缩率/ %	压缩变 形回弹 率/%	弹性模 量/MPa	静曲强 度/MPa
	A(水煮温 度/°C)	B(水煮时 间/h)	C(热压温 度/°C)	D(压缩 率/%)							
1	1 (60)	1 (1)	1 (110)	1 (10)	160	14.50	19.01	12.92	0.59	10 046.42	98.04
2	1	2 (2)	2 (130)	2 (20)	135	14.39	26.14	12.22	1.61	9 365.27	104.79
3	1	3 (3)	3 (150)	3 (30)	115	13.65	39.22	13.78	1.10	6 044.13	71.05
4	2 (80)	1	2	3	145	13.45	32.89	9.14	1.71	10 351.91	100.41
5	2	2	3	1	120	12.38	29.31	13.04	1.80	11 858.70	105.62
6	2	3	1	2	145	14.39	27.71	9.57	0.48	11 428.20	96.25
7	3 (100)	1	3	2	125	10.19	28.47	13.06	1.69	10 884.40	100.63
8	3	2	1	3	135	12.35	38.29	10.90	1.54	10 983.40	90.94
9	3	3	2	1	145	14.14	21.51	9.70	2.88	11 205.1	90.48

### 3.1 热压干燥竹材宽度干缩率

从表 1 中数据看, 150 °C 热压干燥时, 宽度干缩率达最大值 13.06%, 而 110 °C 热压干燥时, 其宽度干缩率为 9.70%, 是最小值, 而相同处理条件下试件在 100 °C 烘箱中宽度干缩率为 15% 左右<sup>[10]</sup>。

表2 方差分析结果汇总

Table 2 Results of variance analysis

因素	静曲强度	弹性模量	厚度 干缩率	宽度 干缩率	干燥 速度	压缩变形 回弹率
水煮温度	4.331	3.876	1.076	16.212*	2.013	3.793
水煮时间	2.617	1	1	1	1.243	1.407
热压温度	3.573	2.668	123.269**	24.564**	10.671*	5.721
压缩率	1	2.078	4.343	2.947	1	3.592

说明:  $F_{0.10}(2, 2)=9$ ,  $F_{0.05}(2, 2)=19$ ,  $F_{0.01}(2, 2)=99$ ; \*表示影响显著, \*\*表示影响极显著。

100℃水煮试件组的宽度干缩率较80℃和60℃水煮试件组的宽度干缩率大,而不同压缩率试件组的竹材宽度干缩率差异不大。通过对热压干燥竹材宽度干缩率直观分析及方差分析可以看出,热压温度和水煮温度对宽度干缩率影响显著。

温度越高,通过热压板传递给竹材的热量就越多,竹材内部水分得到的热量也就越多,升温速度就快。热压温度越高,含水率下降越快,在宽度上干缩越大。水煮温度对竹材宽度干缩率也产生较显著影响,水煮温度高,竹材内部水溶性内含物溶出越多,水分移动的通道越畅通,水分移动的速度就越快,在一定温度下干燥时,干缩率就越大。

压缩率对竹材宽度干缩率影响不显著,原因可能是竹材厚度方向压缩率用厚度规控制,压缩率较小,其所产生的泊松效应较小,即压力作用下所产生的宽度方向伸长(尺寸变大)较干缩所引起的宽度干缩数值要小,竹材宏观上表现出宽度方向干缩。

### 3.2 干燥竹材厚度干缩率

竹材厚度方向的尺寸缩小包括干缩和压缩两部分。从表1数据看,试验中竹材热压干燥后,厚度方向尺寸收缩最大缩小了39.22%(150℃热压干燥时),最小缩小了19.01%(110℃热压干燥时)。通过干燥竹材厚度收缩率直观分析及方差分析可以看出,热压温度对厚度干缩率影响显著。原因分析与宽度干缩理论分析基本相同。

热压干燥时,压缩占主要地位,干缩占次要地位。热压干燥时,在持续压力作用下,高含水率竹材与热压板接触的同时,压缩过程即开始,在厚度规的作用下,压缩量保持不变;而在高温下,高含水率的竹材由于温度作用,水分不断向外移动,当含水率低于纤维饱和点时,竹材就会发生干缩,并持续至干燥结束。

### 3.3 压缩变形回弹率

从表1数据看,压缩变形回弹率最大值为2.88%,最小值为0.48%,压缩变形回弹率数值总体较小。从直观分析及方差分析可以看出热压干燥温度对压缩变形回弹率有影响但不显著,其他因素则基本没有影响。竹材试件水煮处理后,径向加压情况下进行干燥,竹材在径向产生了干缩,干缩后,继续轻轻夹紧,竹材在热作用之下,水分继续蒸发,竹材继续干缩,每一次的干缩量都逐渐减小,试件径向的尺寸也逐渐减小,直至竹材中的粗大空隙消失时,竹材大体上就不干缩了。停止热压干燥后,竹材径向尺寸会出现恢复趋势,但由于热压干燥时,竹材内部细胞发生变形,排列也发生了变化,因此,不能回弹到原来形状和大小,所以,竹材在大气中平衡后,尺寸有所恢复,但数值较小。

### 3.4 热压干燥竹材强度

从表1数据看,竹材热压干燥后,弹性模量和静曲强度最大值分别为105.62 MPa和11 858.70 MPa,而弹性模量和静曲强度最小值分别为71.05 MPa和6 044.13 MPa。通过弹性模量和静曲强度直观分析及方差分析可以看出各因素对板强度影响都不显著,但水煮温度和热压温度的影响相对大些。竹材经过水热处理(水煮)后,竹材的冷水抽提物和竹材的热水抽提物大部分溶出,使竹材纵横向水分渗透性提高,竹材内部空隙增加,水分移动通路更畅通,水分移动更容易,因而干燥速度加快;同时,竹材经过水热处理后,淀粉和树胶等阻碍竹材收缩的内含物大量排出,竹材收缩加剧,故竹材经

过水热处理后干缩率变大。从数据结果看, 相同压缩率时, 100 °C 水煮 3 h 试件的热压干燥竹材强度较低。可见, 较长时间高温水热处理, 将使竹材强度有所降低, 从而减小竹材的使用强度。另一方面, 高压压缩率竹材的密度较低压缩率竹材大, 其强度较后者大。

### 3.5 干燥速度

木材窑干时, 温度对板材干燥速度影响很大, 在竹材热压干燥过程中也是这样。从表 1 中看, 150 °C 热压干燥的试件, 干燥到相近终含水率所需时间明显少于其他试件组; 从表 2 方差分析可以看出, 热压温度对干燥速度影响较显著, 而其他因素对干燥速度基本没有影响。这是因为温度的高低, 决定了供给竹材热量的多少, 最终导致竹材干燥速度的不同。从干燥速度角度看, 较佳的工艺参数为 A3B2C3D3, 即水煮温度为 100 °C, 水煮时间 2 h, 热压温度为 150 °C, 压缩率 30%。

## 4 工艺优化

热压干燥最佳工艺参数的评价涉及多个指标(试验中有 6 个指标), 因而判断较难。有关多指标评价的方法有多种, 试验采用综合评分法来进行多指标分析。综合评分法是根据各个指标的重要性不同, 按照得出的试验结果综合分析, 给每一个试验评出一个分数, 作为这个试验的总指标<sup>[11]</sup>。根据这个总指标(分数), 利用直观分析法或方差分析法作进一步的分析, 从而选出较好的试验方案。

在该研究热压干燥试验结果评价中, 干燥速度、厚度干缩率、宽度干缩率、静曲强度、静曲弹性模量和压缩变形回弹率的重要性是不同的。该研究给定各因素的权重依次为干燥速度 30%, 厚度干缩率 20%, 宽度干缩率 20%, 静曲强度 10%, 静曲弹性模量 10%, 压缩变形回弹率 10%。干燥速度、静曲强度和静曲弹性模量评价时是数值越大越好, 而厚度干缩率、宽度干缩率和压缩变形回弹率是越小越好。按以上权重给出每个试验的总分为: 总分 = 3 × 干燥速度 + 2 × 厚度干缩率倒数 + 2 × 宽度干缩率倒数 + 1 × 静曲强度 + 1 × 静曲弹性模量 + 1 × 压缩变形回弹率倒数。

根据这个算式, 算出每个试验的分数。根据这个分数, 用直观分析法作进一步的分析即可得出最优试验方案。从评分结果看, 5 号试验组综合评分最高, 即方案 A2B2C3D1 较好。

从试样结果可以看出, C 因素(热压温度)和 A 因素(水煮温度)的极差和方差都很大, 是对试验影响很大的两个因素。还可以看出 C 因素是第三水平较好, A 因素是第一水平较好。D 因素的极差和方差较小, 以第一水平较好; B 因素极差和方差最小, 是影响最小的因素, 以第一水平较好。综合评分认为 A1B1C3D1 为较优方案, 即竹材最佳热压干燥工艺条件为: 60 °C 水煮 1 h, 热压温度 150 °C, 压缩率 10%, 压力 0.2 MPa, 呼吸间隔 5 min。此方案与 5 号方案接近。

验证性试验结果见表 3, 验证结果表明上述工艺条件确为该试验研究的最佳工艺条件。

表 3 验证试验结果

Table 3 Results of test validated

含水率从 120% 降低到 10% 时间 / min	压缩变形回弹率 / %	宽度干缩率 / %	厚度干缩率 / %	静曲强度 / MPa	弹性模量 / MPa
130	0.58	9.52	20	112.38	12 356.84

## 5 结论

热压温度对竹材热压干燥速度和干燥质量有影响, 高温干燥速度快, 但干燥变形大, 低温干燥速度慢, 但干燥变形相对较小。热压压缩率对竹材强度影响较大, 在保证干燥速度和干燥质量的前提下, 应尽可能地降低竹材压缩率, 以减少竹材材积损失。建议竹材压缩率保持在 10% 左右。

利用综合评分法, 得到竹材较佳的热压干燥工艺条件是: 60 °C 水煮 1 h, 热压温度 150 °C, 压缩率 10%, 热压压力 0.2 MPa, 呼吸间隔 5 min。

## 参考文献:

- [1] 辉朝茂, 杨宇明. 材用竹资源工业化利用[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1998: 103-105.
- [2] 张齐生. 我国竹材加工利用要重视科学与创新[J]. 浙江林学院学报, 2003, 20(1): 1-4.
- [3] 张齐生. 中国竹材工业化利用[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995: 103-104.
- [4] 毕克新, 崔志敏, 张守诚, 等. 单板热板干燥工艺研究[J]. 东北林业大学学报, 1990, 18(6): 54-61.
- [5] 蔡家斌. 速生杉木薄板热压干燥的试验研究[J]. 南京林业大学学报, 1997, 21(3): 34-38.
- [6] 汪佑宏. 马尾松速生材热压干燥及表面强化[D]. 南京: 南京林业大学, 2003: 91-92.
- [7] ANON. Press drying birch lumber[J]. *For Prod J*, 1996, 46(2): 17-19.
- [8] 中华人民共和国国家技术监督局. GB/T 15780-1995 竹材物理力学性质试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [9] 於琼花, 俞友明, 金永明, 等. 雷竹人工林竹材物理力学性质[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(2): 130-133.
- [10] 孙照斌, 顾炼百. 龙竹干燥特性初步研究[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(2): 107-111.
- [11] 郑少华, 姜奉华. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004: 67-75.

## Hot pressing technology for *Dendrocalamus giganteus* bamboo wood

SUN Zhao-bin<sup>1</sup>, CHEN Tai-an<sup>2</sup>, DENG Qi-ping<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, Hebei, China; 2. College of Wood Science and Interior Decoration, Southwest Forestry College, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** The drying properties of *Dendrocalamus giganteus*, a typical sympodial bamboo in Yunnan Province, were studied with hot pressing technology. The results showed that the hot pressing temperature and the steaming temperature had comparatively significant effects on the drying rate and the quality of bamboo timber; the hot compression rate had vital effects on strength properties of bamboo wood. With the guaranteed drying rate and drying quality, it was suggested that the compression rate of bamboo timber should be lowered to reduce the volume loss of bamboo wood. The optimum hot pressing conditions for the bamboo wood were as follows: steaming the timber with 60 °C water for 1 hour, 150 °C hot pressing temperature, 0.2 MPa hot pressing pressure, 5 minutes breath interval and 10% compression rate. [Ch, 3 tab, 11 ref.]

**Key words:** forest engineering; wood processing; *Dendrocalamus giganteus*; hot pressing; drying characteristics; drying technology