

应用技术

# 人工林落叶松髓心方材高频/真空干燥工艺研究

李晓玲, 高瑞清, 构涛, 何清慧, 张立宾

(中国林科院木材工业研究所; 国家林业局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

**摘要:** 对人工林落叶松髓心方材进行高频真空干燥试验, 以确定高频真空干燥工艺参数。结果表明, 适宜的高频真空干燥工艺, 不但能保证落叶松髓心方材干燥质量, 而且能大幅度提高干燥速度。试验得出较佳的干燥工艺条件为: 电流 0.4 A, 输入电压 2 kV; 高频开启 3 min 停 1 min, 控制温度 50 ℃; 干燥初期真空度为 13.33 kPa, 干燥后期真空度为 6.67 kPa。

**关键字:** 高频真空(RF/V)干燥; 落叶松髓心方材; 干燥质量; 干燥工艺

中图分类号: S782.31 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654(2010)01-0029-04

## Radio Frequency/Vacuum Drying for Boxed-heart Timber of Plantation Larch

LI Xiao-ling, GAO Rui-qing, GOU Tao, HE Qing-hui, ZHANG Li-bin

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry;

Key Lab of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

**Abstract:** A series of radio frequency/vacuum (RF/V) drying tests were conducted on boxed-heart timbers of plantation larch. Various RF/V conditions were analyzed to optimize the drying quality and drying speed. We found that the optimized RF/V parameters were: 0.4 A input current, 2 kV electrode voltage, 50 ℃ temperature, 3 minutes oscillation circle then 1 minute for stopping; and 13.33 kPa vacuum pressure at the early drying stage and 6.67 kPa at the final stage.

**Key words:** radio frequency/vacuum (RF/V) drying; boxed-heart timber of larch; drying quality; drying techniques

随着我国木结构建筑的兴起, 大规格板方材的需求量逐年增加<sup>[1]</sup>。落叶松木材有优良的顺纹抗压强度和静曲强度, 是优良的建筑用材。然而由于落叶松木材生长应力大, 尤其是速生材原木径级普遍偏小, 锯成大截面板方材时大多带有髓心, 易产生干燥缺陷, 增加了干燥难度, 因此有必要研究适合落叶松大截面板方材的干燥技术, 以满足市场需求。

木材高频真空干燥法, 综合了高频和真空干燥的特点: 即真空干燥利用负压条件降低水的沸点, 使木材中水分可在低温下快速移出; 而高频干燥则利用高频电磁波的高速振荡使木材水分子迅速极化, 水分子

相互摩擦产生大量热量, 使木材的表层和芯层同时加热。由于木材表层的放热和水分蒸发, 形成了内高外低的温度梯度<sup>[2]</sup>; 在温度梯度和负压条件的共同作用下, 水分由内层向外层迅速移动而蒸发, 从而大大提高了干燥速度。由于是在低温下干燥, 木材的开裂和皱缩现象可明显减少。

本研究借助 HED-0603 型高频真空干燥机, 对人工林落叶松髓心方材进行系列工艺性试验, 提出落叶松髓心方材的高频真空干燥基准, 为该技术的推广应用提供依据。

### 1 试验材料和方法

#### 1.1 试验材料

试材: 人工林落叶松(*Larix gmelinii*), 采自牡丹江江山娇林场, 树龄 20 年, 初含水率 38%~69%, 平

收稿日期: 2009-09-28; 修改日期: 2009-11-20

基金项目: 院所基本科研业务费专项资金项目(CAFINT2007C09)。

作者简介: 李晓玲(1969—), 女, 中国林科院木材工业研究所高级工程师。

均气干密度 0.63 g/cm<sup>3</sup>; 试材规格为 1 800 mm × 100 mm × 100 mm, 每组试验合材积 0.11 m<sup>3</sup>。

设备: HED-0603 型高频真空试验机, 最大装载量 0.8 m<sup>3</sup>, 直流最大输出电压 (EL) 为 6 kV, 最大输出电流 (IP) 为 0.8 A, 高频震荡频率 6.78 MHz, 最低真空度 2.40 kPa。

1.2 试验方法

原木锯成方材后四面刨光, 然后沿长度方向截取 2 块含水率试片; 同时确定试件长度, 将制作好的试件用塑料布包裹后放入冷库以备试验。

每组试验 6 块试件并随机标号, 记录试件的可见缺陷, 然后在试件长度方向的中间位置, 确定干缩变化测量点, 并记录试件原始宽度和厚度。按图 1 所示在真空罐中摆放试件, 试验结束后, 再次观察记录可见缺陷, 并测量干燥后试件宽度和厚度以计算干缩量。按 GB 6491-1999《锯材干燥质量》, 从每块试验板上截取分层含水率试片, 采用烘干法测定试件干燥后的终含水率。

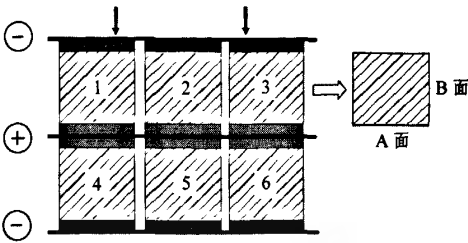


图 1 RF/V 干燥试件堆材方式  
Fig. 1 Lumber stacking for RF/V drying

由于是针对落叶松髓心方材, 本研究相对调整了高频真空参数, 在综合分析干燥质量和干燥速度的基础上, 确定适合人工林落叶松髓心方材高频真空干燥的干燥基准。

2 试验结果和讨论

2.1 干燥工艺参数的确定及干燥过程曲线

表 1 是部分试验的试验参数和结果。

表 1 部分试验的参数及结果  
Tab. 1 Selected experimental parameters and their results

| 工艺参数                        | 试验编号    |         |         |                       |         |         |          |
|-----------------------------|---------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|----------|
|                             | 1       | 2       | 3       | 4                     | 5       | 6       | 11       |
| EL/kV                       | 5       | 2       | 2       | 2                     | 2       | 2       | 2        |
| IP/A                        | 0.6     | 0.4     | 0.4     | 0.4                   | 0.4     | 0.4     | 0.4      |
| 高频状态(开-停)/min               | 9~1     | 9~1     | 3~1     | 3~1                   | 3~1     | 3~1     | 3~1      |
| 控制温度/℃                      | 60      | 55      | 55      | 50                    | 50      | 50      | 50       |
| 真空度/kPa                     |         | 6.67    |         | 干燥初期 13.33, 干燥后期 6.67 |         |         |          |
| 试件预处理情况                     | -       | -       | -       | -                     | 切口      | 过热蒸汽    | 切口, 过热蒸汽 |
| 过热蒸汽温度/℃                    |         |         |         |                       |         | 110     | 105      |
| 平均初含水率/%                    | 53.8    | 47.2    | 47.8    | 45.6                  | 45.9    | 38.3    | 30.9     |
| 平均终含水率/%                    | 5.9     | 11.6    | 11.5    | 11.1                  | 10.8    | 13.1    | 13.0     |
| 宽度 A 方向干缩/%                 | 4.3     | 3.0     | 3.2     | 3.2                   | 3.2     | 2.7     | 3.0      |
| 宽度 B 方向干缩/%                 | 5.1     | 3.8     | 3.5     | 3.3                   | 3.5     | 3.2     | 3.9      |
| 表裂条数/开裂板数                   | 41/6    | 32/6    | 23/6    | 21/5                  | 15/5    | 17/4    | 4/2      |
| 表裂宽度/mm                     | 0.5~4.8 | 0.5~3.2 | 0.5~2.9 | 0.5~3.1               | 0.5~2.5 | 0.5~2.3 | 0.5~1.8  |
| 总表裂长度/(cm·m <sup>-1</sup> ) | 47.7    | 38.9    | 30.5    | 27.1                  | 16.5    | 22.6    | 8.7      |
| 存在内裂的试件/块                   | 6       | 3       | 1       | -                     | -       | -       | -        |
| 总干燥时间/h                     | 75.3    | 59.5    | 80.6    | 77.7                  | 76.8    | 58.5    | 45.5     |
| 平均干燥速度/(%·h <sup>-1</sup> ) | 0.64    | 0.6     | 0.45    | 0.44                  | 0.46    | 0.43    | 0.39     |
| 总电能消耗/(kW·h)                | 234     | 164     | 199     | 204                   | 198     | 157     | 119      |

图 2 是落叶松髓心方材干燥曲线, IP 为正极板上的电流, EL 为两极板间的电压, 两者是决定高频振荡电场强弱的主要参数。由图 2 可以看出, 随着干燥的进行, 木材中水分不断蒸发, 木材含水率降低, 木材的介电常数降低, 电阻增大, 因此 IP 曲线呈下降趋势, 而 EL 呈增大趋势, 这一规律在每组试验中表现均一致。另外还可看出, 用 RF/V 法干燥木材, 木

材温度升高较快。试验结果亦显示, 窑内不同位置的温度有差异, 靠近正极板的试材温度 > 靠近负极板处的试材温度。

2.2 干燥质量分析

2.2.1 干燥开裂

落叶松板材即使在气干条件下也容易发生开裂, 因此在试验 1 中选择电压 5 kV, 电流 0.6 A, 高频加

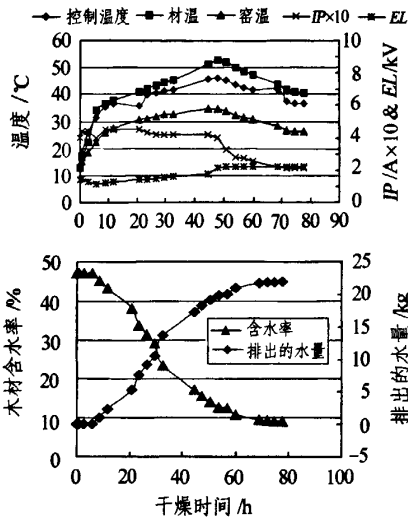


图 2 落叶松髓心方材 RF/V 干燥过程曲线(试验 4)

Fig. 2 Temperature and moisture content of boxed-heart larch lumber in drying process

热 9 min 停 1 min, 控制温度 60 ℃, 真空度 6.67 kPa 的工艺参数, 试验结果 6 个试件均发生表裂和内裂。在试验 2 中, 电压为 2 kV, 电流为 0.4 A, 控制温度为 55 ℃, 其余条件不变。结果发现, 表裂和内裂均明显减少。在试验 2 的基础上, 试验 3 只将高频加热时间改为加热 3 min 停 1 min, 其余参数不变。结果只有一个试件出现了内裂, 表裂也有改善。为了消除内裂并减少表裂, 在试验 4 中, 控制温度设为 50 ℃, 在干燥初期(木材含水率 > 纤维饱和点), 真空度设为 13.33 kPa, 而在干燥后期(木材含水率 < 纤维饱和点), 将真空度设为 6.67 kPa, 其余参数同试验 3。试验后发现, 所有试件均未产生内裂, 表裂亦比试验 3 稍有减少。

2.2.2 含水率分布

分层含水率试片按图 3 所示制作。图 4 是试验 4 中 6 个试件干燥前、后不同层次的平均含水率分布曲线。可以看出, 6 个试件不同层次上的初始含水率

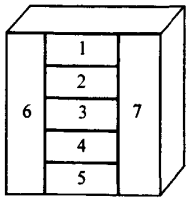


图 3 含水率试片制作示意图

Fig. 3 Diagram of slicing MC distribution samples

分布很不均匀, 但采用高频真空干燥后, 终含水率已趋于均匀(见图 4 中下半部分)。由数据分析得知, 干燥后所有试件不同层次上的含水率偏差小于 5%。对于作为建筑用方材来说, 这样的含水率偏差符合使用要求。

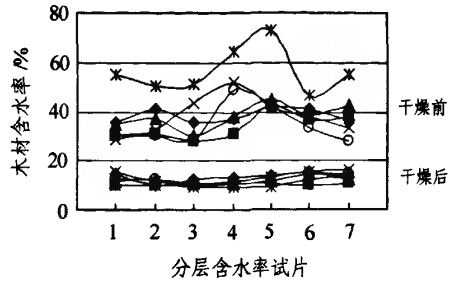


图 4 试验 4 干燥前、后试件的分层含水率曲线

Fig. 4 MC distribution of samples before and after drying in test No. 4

2.2.3 干燥收缩

图 5 显示了 7 组试验中, 试件 A 面和 B 面平均干缩情况。试件 A 面和 B 面平均干缩率在 7 组试验中表现不一, 平均值分别为 3.2% 和 3.8%, B 面干缩率稍大于 A 面。产生差异的主要原因是, 在干燥过程中, 为了减轻木材变形, 在材堆顶部有持续的压力作用, 从而导致试件 B 面收缩率增大。在试验 4 中, 试件 B 面的干缩率为 3.3%, A 面的干缩率为 3.1%, 对大截面方材而言, 已满足干燥质量要求。

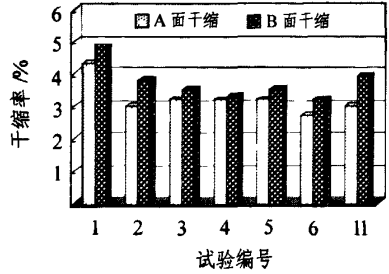


图 5 不同试验中试件 A 面和 B 面干缩率

Fig. 5 Drying shrinkage on surfaces A and B

2.2.4 干燥速度

根据表 1 的统计数据, 用图 6 显示了不同高频真空条件下试材的平均干燥速度。可以看出, 试验 1、2 的干燥速度最快, 其次是试验 5, 其余几组试验的干燥速度相对较慢, 但相差不大。这主要是因为试验 1、2, 都采用了较强的高频真空干燥参数, 木材内部升温较快, 且温度高、水分蒸发剧烈, 从而加快了干燥速

度。试验5采用了纵向切口预处理方法,增加了水分蒸发面积,因而亦加快了干燥速度。但综合分析干燥质量可知,试验1、2的干燥速度虽快,但干燥缺陷多。因此,较温和的高频真空干燥参数,对落叶松髓心方材较为适合。

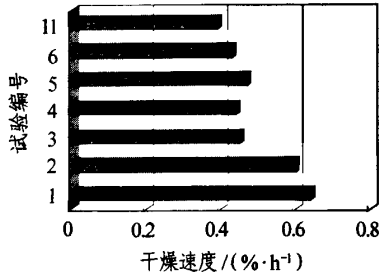


图6 不同试验干燥速度比较  
Fig.6 Drying rates under various drying

2.3 干燥工艺确定

通过对落叶松髓心方材的系列试验和综合分析,确定了试验4的高频真空干燥参数为较佳工艺参数。即高频输入电流0.4 A,输入电压2 kV,高频开启3 min停1 min,控制温度50℃,干燥初期真空度为13.33 kPa,干燥后期真空度为6.67 kPa。按此工艺参数干燥的试材,虽仍含有少量表裂,但按建筑用材的要求,已可满足使用。

为了进一步减少表裂,参照日本柳杉髓心方材高频真空干燥的经验<sup>[3]</sup>,提出了以试验4的干燥参数为基础,在干燥前对试件进行纵向切口处理<sup>[4]</sup>和过热蒸汽预处理<sup>[5]</sup>,有关的结果分析另文介绍。

3 结论和建议

1) 在适宜的高频真空干燥工艺条件下,对人工林落叶松髓心方材进行干燥,不但能保证干燥质量,而且能大幅度提高干燥速度。较佳的干燥工艺条件为电流0.4 A,输入电压2 kV,高频开启3 min停1 min,控制温度50℃。

2) 在保证干燥质量的前提下,加快干燥速度,宜采用不同的真空度。在干燥初期,真空度选择13.33 kPa,在干燥后期,真空度选择6.67 kPa。

3) 为了进一步减少表裂提高干燥质量,在高频真空干燥前,可对落叶松髓心方材进行一定的预处理,以改善干燥质量。

参考文献:

[1] 郭伟,费本华,陈恩灵.我国木结构建筑行业发展现状分析[J].木材工业,2009,23(2):19-22.

[2] Avramidis S. Drying characteristics of thick lumber in a laboratory radio-frequency/vacuum dryer[J]. Drying Technology, 1994, 12(8):1963-1981.

[3] 小林 功,黑田尚宏,久田卓典,等. Superheated steam pre-treatment for the drying process of boxed-heart timeber from sugi[J]. 日本木材工业, 2003, 58(6): 258-263.

[4] G Helsing, R D Graham. Saw kerfs reduce checking and prevent internal decay in pressure-treated Douglas-fir poles [J]. Holzforschung, 1976, 30(6):184-186.

[5] Luiz C oliveira, John W Wallace, Dal M Wright, et al. Development of superheated steam/vacuum drying schedules for western canadian species[D]. Proceedings of 7th International IUFRO Wood Drying Conference, Japan, 2001:140-146.

(责任编辑 鲍加芬)

2008年《木材工业》高被引频次文章题录

依据中国科学技术信息研究所2009年的计量分析,2008年度被引频次排序,前10篇的文献列于下表。特此公布,并向作者致以谢忱!

| 序号 | 题名                       | 作者         | 出版年  | 出版期 |
|----|--------------------------|------------|------|-----|
| 1  | 中国林产品发展的现状与前景            | 江泽慧        | 2006 | 2   |
| 2  | 我国农作物秸秆材料产业的形成与发展        | 周定国,张洋     | 2007 | 1   |
| 3  | 木结构在我国建筑中应用的前景           | 樊承谋        | 2003 | 3   |
| 4  | 酚醛树脂处理杨木、杉木尺寸稳定性分析       | 刘君良,王玉秋    | 2004 | 6   |
| 5  | 漆酶活化木材产生活性氧类自由基的处理条件研究   | 周冠武        | 2006 | 5   |
| 6  | 不锈钢纤维/木纤维复合中纤板的研究        | 张显权,刘一星    | 2005 | 2   |
| 7  | 木材的液化及其利用                | 罗蓓,秦特夫,李改云 | 2004 | 5   |
| 8  | 我国人造板工业“十一五”展望           | 钱小瑜        | 2006 | 2   |
| 9  | 生物质资源农作物秸秆应用于人造板工业的可行性分析 | 于文吉        | 2006 | 2   |
| 10 | 微米木纤维低密度轻质板制造技术探讨        | 马岩         | 2006 | 4   |