

# 短周期工业材干燥过程中木材内部水分迁移特点的研究

滕通濂 周永东 孟京明 陈省兰 朴成汉

**摘要** 研究了短周期工业材新伐材和气干材在干燥过程中木材厚度方向含水率分布和水分迁移特点,考察了干燥过程中介质温度变化及其对表层和中心层干燥速度的影响。研究表明,原木初含水率径向、纵向存在变异,导致板材初含水率分布无规律。在非稳态干燥中,逐渐呈外低内高近似抛物线分布,直至平衡处理后,内外层含水率才接近一致。平均干燥速度随介质温度的提高而增加,不同干燥阶段介质温度的影响程度也不同,在相同的平衡含水率条件下,提高介质温度对中心层干燥速度的增加比表层显著。

**关键词** 短周期工业材; 含水率; 介质温度; 干燥速度

## Study on Water Movement During Drying Process of Fast-growing Plantation Wood

Teng Tonglian Zhou Yongdong Meng Jingming Chen Shenglan Piao Chenhan

(Research Institute of Wood Industry, CAF, Beijing 100091)

**Abstract** Moisture content ( $MC$ ) distribution and water movement of both green and air-dried boards from fast-growing plantation wood along thickness direction during drying process were studied. In the same time, influence of drying temperature on drying rate in both surface layer and core layer was studied. Results showed that due to sawnlog's  $MC$  varied in both radial and longitudinal directions, initial  $MC$  of testing boards was not the same. During drying, the  $MC$  distributions along the thickness direction of all testing boards were gradually changed into parabola distributions with low  $MC$  in surface layer and high in core layer. After equilibrium treatment, the  $MC$  in surface layer was almost equal to that in core layer. Although drying temperature had different influence in different stages of drying, the average drying rate increased with temperature rising. With same equilibrium moisture content ( $EMC$ ), rising temperature made drying rate in core layer change more obviously than that in surface layer.

**Keywords** Fast-growing plantation wood;  $MC$ ; Drying temperature; Drying rate

### 1 前言

木材中所含水分的分布和迁移过程不仅对木材本身的物理力学性能有重大的影响,而且对木材干燥质量起着决定的作用。随着含水率的降低,木材内部结构和物理力学性能要发生很大变化。木材内外各层含水率不均匀,可能发生各层干缩不均匀,严重时导致木材缺陷增加,品质下降,干燥成本提高。因此在干燥过程中木材内部传热传质特点和规律一直是国内外研究的热点。本文将通过对毛白杨、马尾松、落叶松等几种有代表性的速生树种、两种厚度的木材

在对流干燥过程中传热传质特点的研究,探讨短周期工业材干燥速度和质量关系及控制机理,为制订优质高效节能的干燥工艺提供理论依据。

### 2 试验材料和试验方法

#### 2.1 试验材料

8种试材分别采自河北、江西、东北、福建和陕西,详见表1。试材由本所试样制作室制成规格为600 mm×100 mm×50 mm和600 mm×100 mm×25 mm、四面刨光的试样,再经编号、称重并记录后存放在2℃左右的冷藏箱中保管备用。

收稿日期: 1996-07-28

本文第一作者为: 中国林科院木材工业研究所研究员, 北京 100091

表 1 试材明细表

Tab. 1 Descriptions of testing specimens

| 树种    | 拉丁名                            | 产地   | 树龄<br>(a) | 直径<br>(cm) | 基本密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 初含水率<br>(%) |
|-------|--------------------------------|------|-----------|------------|------------------------------|-------------|
| 毛白杨   | <i>Populus tomentosa</i>       | 河北易县 | 26~30     | 30~40      | 0.432/11.7                   | 91.1/19.0   |
| 马尾松   | <i>Pinus massoniana</i>        | 江西分宜 | 16~18     | 18~30      | 0.389/16.8                   | 146.9/14.3  |
| 日本落叶松 | <i>Larix kaempferi</i>         | 辽宁清远 | 46~49     | 30~38      | 0.504/6.0                    | 54.0/21.6   |
| 长白落叶松 | <i>Larix olgensis</i>          | 辽宁清远 | 46~49     | 30~38      | 0.530/6.2                    | 52.8/20.6   |
| 火炬松   | <i>Pinus taeda</i>             | 福建顺昌 | 13~15     | 18~30      | 0.422/22.6                   | 126.9/12.3  |
| 湿地松   | <i>Pinus elliotii</i>          | 江西分宜 | 12~14     | 16~25      | 0.368/12.3                   | 126.7/26.3  |
| 杉木    | <i>Cunninghamia lanceolata</i> | 江西分宜 | 13~20     | 20~30      | 0.291/15.4                   | 132.9/28.7  |
| 刺槐    | <i>Robinia pseudoacacia</i>    | 陕西眉县 | 10~18     | 18~30      | 0.619/8.9                    | 34.7/4.7    |

注: 1. 基本密度和初含水率两项中分子部分是平均值, 分母为变异系数(%);  
2. 刺槐试材采集后, 由于未能及时运到(存放车站约 3 个月), 初含水率的数值可能偏低。

2.2 试验方法

对比试验是在实验室小型干燥机内进行, 试验中选用多阶段含水率基准(略)。为了观察基准硬度对干燥的影响, 试验时风速保持 2 m/s 不变。

干燥介质干、湿球温度的测量和调节 以一对误差 不大于 0.5℃ 的玻璃水银温度计指示值为准, 由控制精度为 ±1℃ 的控温仪来调节。

木材内部温度的测量 选用铜-康铜材料做成的热电偶测温系统, 测量误差约 1℃。因热电偶测量头被分别埋在试验板从中心到表面等距离、孔径为 2 mm 的孔洞中(用锯末和 703 胶混合填满孔隙), 板厚 5 cm 为 5 个孔, 2.5 cm 为 3 个孔, 依次测量和记录。因而测量时间最大间隔约为 30~60 s。

含水率和含水率梯度的测定 含水率分平均含水率和分层含水率, 平均含水率是从各次试验板上切下的含水率试验片用烘干法测得, 每次试验取样测定 8~10 次, 每次间隔时间依干燥过程的含水率降低的快慢来确定。最后按下式计算:

$$W = \frac{G_1 - G_0}{G_0} \dots\dots\dots (1)$$

式中: W—含水率(%);  
G<sub>1</sub>、G<sub>0</sub>—分别为初重和全干重(g)。

含水率梯度是沿木材厚度方向分成若干层, 将内部各层的和表层的含水率差值与垂直距离的比值定义为含水率梯度, 按下式计算:

$$\Delta W = \frac{W_{内} - W_{外}}{H} \dots\dots\dots (2)$$

式中: ΔW—含水率梯度(%/mm);  
W<sub>内</sub>、W<sub>外</sub>—内层、外层的含水率(%);  
H—内层与外层的垂直距离(mm)。

3 试验结果和讨论

3.1 干燥过程曲线特征

几种短周期工业材干燥过程曲线随干燥时间变化的规律基本上是一致的。

预热阶段, 这阶段的目的仅是使木材内部能较快速上升到一定温度, 而不希望木材表面过早蒸发水分, 因此, 虽然基准相对湿度一般预定为 100%, 但是实际操作却有一定的误差, 如果预热温度为 80℃, 干湿球温度差为 0.5℃, 木材平衡含水率约为 18% 左右, 此时含水率较高的木材表面要蒸发一部分水分, 不过这个阶段相对较短。

干燥阶段, 由于木材初含水率比较高, 除了刺槐及日本落叶松和长白落叶松平均含水率低于 60% 以外, 其他几种试材含水率都高于 60%, 最高达 200%。试验结果表明, 马尾松、火炬松、湿地松木材前期和后期干燥均很快, 从初含水率干到 20%~15% 近似直线关系。从第一阶段到第二阶段拐点后移, 第二减速阶段却不明显。相反两种落叶松和刺槐干燥过程曲线从第一阶段到第二阶段都有明显的过渡期, 两个阶段的干燥速度有显著的差异。毛白杨(见图 1)和杉木介于二者之中。

3.2 木材内部温度变化特点

预热阶段, 木材表层温度随介质温度的升高迅速上升, 中心层温度上升滞后于表层, 当温度到达预热阶段温度后, 表层和中心层温度接近于介质温度, 当预热阶段结束, 基准下调到干燥初始阶段温度时, 木材表层温度也迅速下降, 此时中心层温度缓慢下降, 在木材内部出现中心层温度稍高于外部的一段时间, 发现预热温度愈高、预热温度与干燥温度差愈大, 则这种内高外低的温度梯度保持时间愈长。这种现象高温基准比低温基准更明显。

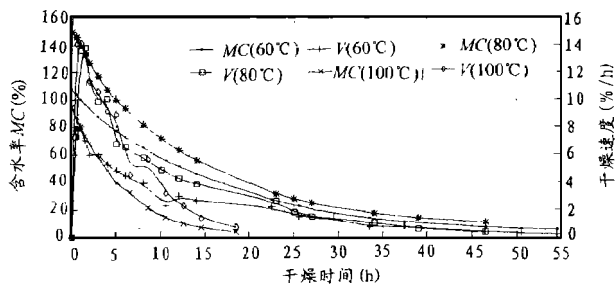


图 1 三种温度下毛白杨木材干燥过程和干燥速度曲线

Fig. 1 Drying courses and drying rate curves of *Populus tomentosa* wood at 3 drying temperatures

干燥前期,干球温度和干湿球温度差保持恒定时,木材表层和内层温度的差异也保持相对恒定,当基准进入升温阶段骤然调温时,表层温度紧跟着呈曲线缓慢上升,而中心层温度总是滞后一些缓慢上升。本次试验观测到厚板比薄板更明显。

干燥后期,表层与中心层温度靠近基准温度,如果基准温度往下波动时,可能出现中心层温度高于表层,内部温度高,将使木材温度梯度方向和含水率梯度方向一致,提高了内部水分向表层移动的速度。此种现象高温比低温更明显。

3.3 木材内部各层干燥速度变化特点

本次试验的 8 种短周期工业材在不同温度下的干燥速度见表 2。试验结果表明,在其他条件基本相同的情况下,平均干燥速度随着介质温度升高而增加。这是因为,随着温度的升高,无论存在于细胞腔中的自由水还是存在于细胞壁微毛细管中的吸着水都能得到更多的能量,就会脱离原来的吸附位置以扩散方式迁移,经过细胞通道移动到表面而蒸发。温度愈高,水分子得到动能愈高,处于活化状态水分子数量就越多,木材内部水分向表面扩散速度就愈快。

为了分析介质温度对干燥过程不同阶段的影响,把干燥过程分为干燥前期 ( $W>30\%$ ) 和干燥后期 ( $W<30\%$ )。干燥前期主要是蒸发自由水,因为前期木材含水率比较高,木材内部水分向表面移动阻力小,此时,木材干燥速度取决于木材表面的蒸发强度,干燥速度可以用下式表示<sup>[3]</sup>:

$$-dW/dt = AK_p(P_W - P_0) = AK_t(T_D - T_W)$$

式中:  $dW/dt$ —水分蒸发速度(g/h);

$A$ —蒸发面积( $\text{cm}^2$ );

$P_W$ —表面的蒸汽压,指对应于湿球温度的饱和蒸汽压(kPa);

$P_0$ —空气的蒸汽压(kPa);

$T_D$ —干球温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_W$ —湿球温度( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $K_p, K_t$ —蒸发系数( $\text{g/h} \cdot ^{\circ}\text{C}^2 \cdot \text{kPa}$ ,  $\text{g/h} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )。

由上式已知,蒸发速度与干湿球温度差和蒸发系数成正比,而蒸发系数与风速( $>1\text{ m/s}$ )成线性关系<sup>[3]</sup>,当风速高于  $1\text{ m/s}$  时,蒸发系数随表面风速的增加而增加。因此,在干燥前期,提高风速和增加干湿球温度差可以提高干燥速度。干燥后期,木材含水率已低于纤维饱和点后,随着含水率的降低,木材收缩,致使有效扩散空间减少,木材内部水分移动阻力增加。水分扩散系数作用增大,此时干燥速度取决于木材内部水分移动的速度,与木材内水分扩散系数成正比。而吸着水的水分扩散系数可以表示为<sup>[7]</sup>:

$$D_T = C \exp[-(9\,200 - 70\,W)/RT]$$

式中:  $C$  为常数;  $R$  为气体常数。

由上式可知,吸着水的扩散系数与温度成指数关系。因此介质温度对吸着水的影响明显大于对自由水的影响。试验表明,提高介质温度对增加长白落叶松、日本落叶松、刺槐、毛白杨四种短周期工业材的后期干燥速度有显著作用。

木材内部各层典型的干燥过程(以毛白杨为例)见图 2,内部各层的干燥速度比较列表 3。试验表明,沿厚度方向各个薄层的干燥前期和后期的干燥速度也是不相同的。本次试验条件下,干燥前期,当含水率高于纤维饱和点时,表层干燥速度一般大于中心层,如两种厚度的毛白杨表层干燥速度为中心层干燥速度的 2.5~2.7 倍,马尾松(5.0 cm) 1.3~1.4 倍。火炬松却是例外,只有 0.53~0.55 倍。而干燥后期,表层与中心层的干燥速度相当接近,依树种和干燥条件而异,没有一定的规律。如日本落叶松初含水率低于纤维饱和点,表层干燥速度稍大,而内层和中心层差异不明显。

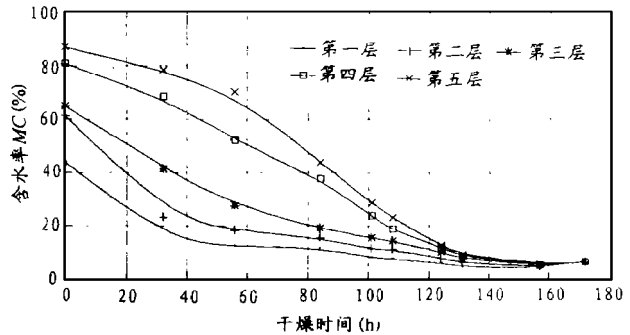


图 2 毛白杨木材内部各层干燥过程曲线

Fig. 2 Drying courses in different layers of *Populus tomentosa* wood

表 2 三种温度条件下不同树种木材的干燥速度和干燥缺陷

Tab. 2 Drying rates and drying defects of various species of wood at 3 drying temperatures

| 树 种   | 温 度<br>(℃) | 平均含水率(%) |       |                 | 干燥缺陷     |          |        | 干燥速度(%/h)         |                    |                    |                    | 干燥速度比较            |                    |                    |                    |
|-------|------------|----------|-------|-----------------|----------|----------|--------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|       |            | 初 终      |       | 干燥<br>时间<br>(h) | 初期<br>开裂 | 截面<br>变形 | 瓦<br>弯 |                   |                    |                    |                    |                   |                    |                    |                    |
|       |            | 初        | 终     |                 |          |          |        | 1                 | 2                  | 3                  | 4                  | 1                 | 2                  | 3                  | 4                  |
|       |            |          |       |                 |          |          |        | 初~W <sub>10</sub> | W <sub>60</sub> 以上 | W <sub>60-30</sub> | W <sub>30-10</sub> | 初~W <sub>10</sub> | W <sub>60</sub> 以上 | W <sub>60-30</sub> | W <sub>30-10</sub> |
| 毛白杨   | 100        | 94.43    | 2.53  | 22.5            | 1        | 2        | 0.82   | 7.11              | 12.50              | 7.52               | 3.65               | 2.62              | 2.45               | 3.04               | 3.38               |
| 毛白杨   | 80         | 149.60   | 11.03 | 47.0            | 1        | 1        | 0      | 3.19              | 11.5               | 2.72               | 0.80               | 1.18              | 2.26               | 1.10               | 0.74               |
| 毛白杨   | 60         | 107.97   | 2.87  | 82.5            | 1        | 1        | 0      | 2.71              | 5.10               | 2.47               | 1.08               | 1                 | 1                  | 1                  | 1                  |
| 马尾松   | 100        | 140.05   | 2.73  | 26.5            | 2        | 1        | 2.23   | 6.68              | 21.58              | 10.90              | 1.57               | 0.57              | 1.26               | 1.47               | 0.70               |
| 马尾松   | 80         | 157.39   | 4.47  | 42.0            | 2        | 1        | 1.43   | 10.76             | 20.42              | 9.59               | 3.42               | 0.92              | 1.20               | 1.32               | 1.53               |
| 马尾松   | 60         | 182.88   | 2.33  | 42.8            | 2        | 1        | 1.40   | 11.68             | 17.07              | 7.28               | 2.23               | 1                 | 1                  | 1                  | 1                  |
| 火炬松   | 100        | 133.70   | 2.03  | 14.5            | 3        | 2        | 0.85   | 11.97             | 17.68              | 11.08              | 5.86               | 2.48              | 2.11               | 2.72               | 1.83               |
| 火炬松   | 80         | 177.55   | 9.70  | 39.0            | 2        | 1        | 0.90   | 6.06              | 14.66              | 7.30               | 1.11               | 1.25              | 1.75               | 1.79               | 0.35               |
| 火炬松   | 60         | 133.29   | 1.96  | 62.5            | 2        | 1        | 0.27   | 4.83              | 8.38               | 4.08               | 3.20               | 1                 | 1                  | 1                  | 1                  |
| 湿地松   | 100        | 99.60    | 3.17  | 26.5            | 2        | 1        | 0.25   | 5.11              | 15.71              | 12.87              | 1.20               | 0.97              | 1.44               | 2.23               | 0.60               |
| 湿地松   | 80         | 123.61   | 4.38  | 42.0            | 1        | 1        | 0      | 10.12             | 17.52              | 9.22               | 4.02               | 1.92              | 1.60               | 1.6                | 2.01               |
| 湿地松   | 60         | 118.59   | 2.54  | 46.3            | 2        | 1        | 0      | 5.28              | 10.98              | 5.78               | 2.00               | 1                 | 1                  | 1                  | 1                  |
| 杉木    | 100        | 106.28   | 1.56  | 22.0            | 1        | 2        | 0.73   | 7.81              | 18.47              | 9.13               | 3.36               | 3.24              | —                  | —                  | 1.52               |
| 杉木    | 80         | 43.71    | 6.78  | 39.0            | 2        | 1        | 1.47   | 3.68              | —                  | —                  | 2.13               | 1.53              | —                  | —                  | 0.96               |
| 杉木    | 60         | 33.19    | 3.11  | 54.5            | 2        | 1        | 0      | 2.41              | —                  | —                  | 2.21               | 1                 | —                  | —                  | 1                  |
| 长白落叶松 | 100        | 46.03    | 2.13  | 30.5            | 3        | 2        | 1.23   | 2.57              | —                  | —                  | 1.62               | 1.86              | —                  | —                  | 1.74               |
| 长白落叶松 | 80         | 31.32    | 4.47  | 42.0            | 2        | 1        | 1.43   | 2.26              | —                  | —                  | 1.61               | 1.83              | —                  | —                  | 1.73               |
| 长白落叶松 | 60         | 28.28    | 4.89  | 61.5            | 3        | 1        | 1.00   | 0.87              | —                  | —                  | 0.93               | 1                 | —                  | —                  | 1                  |
| 日本落叶松 | 100        | 44.68    | 4.40  | 22.0            | 3        | 2        | 0.65   | 3.05              | —                  | —                  | 1.78               | 3.46              | —                  | —                  | 2.74               |
| 日本落叶松 | 80         | 38.67    | 4.85  | 42.0            | 2        | 1        | 0.60   | 2.26              | —                  | —                  | 1.28               | 1.55              | —                  | —                  | 1.97               |
| 日本落叶松 | 60         | 87.58    | 8.75  | 61.5            | 3        | 1        | 0.27   | 1.46              | 4.63               | 1.94               | 0.65               | 1                 | —                  | —                  | 1                  |
| 刺槐    | 100        | 38.07    | 4.70  | 30.5            | 2        | 2        | 1.52   | 1.75              | —                  | —                  | 1.39               | 2.92              | —                  | —                  | 2.90               |
| 刺槐    | 80         | 53.47    | 19.18 | 47.0            | 2        | 1        | 1.57   | —                 | —                  | 2.00               | —                  | —                 | —                  | —                  | —                  |
| 刺槐    | 60         | 37.42    | 5.99  | 85.5            | 2        | 1        | 1.47   | 0.60              | —                  | —                  | 0.48               | 1                 | —                  | —                  | 1                  |

注:干燥速度比较是以 60℃时的干燥速度为 1,与 100℃和 80℃时干燥速度的比值。

表 3 木材内部各层干燥速度

Tab. 3 Drying rates in different layers of different drying specimens

| 树种    | 厚度<br>(mm) | 基<br>准<br>号 | 平均<br>初含<br>水率<br>(%) | 平 均<br>终 含<br>水 率<br>(%) | 干<br>燥<br>时 间<br>(h) | $W_{60} \sim W_{30}$ |      |      |      |      | $W_{30} \sim W_{10}$ |      |      |      |      | 表面与中心层<br>干燥速度比值 |      |
|-------|------------|-------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|------|------|------|------|----------------------|------|------|------|------|------------------|------|
|       |            |             |                       |                          |                      | (%)                  |      |      |      |      | (%)                  |      |      |      |      | 前 期              | 后 期  |
|       |            |             |                       |                          |                      | 层次                   |      |      |      |      | 层次                   |      |      |      |      |                  |      |
|       |            |             |                       |                          |                      | 1                    | 2    | 3    | 4    | 5    | 1                    | 2    | 3    | 4    | 5    |                  |      |
| 毛 白 杨 | 25         | 1           | 79.0                  | 9.68                     | 84.0                 | 1.95                 | 1.07 | 0.78 | —    | —    | 0.40                 | 0.69 | 0.70 | —    | —    | 2.50             | 0.57 |
| 毛 白 杨 | 25         | 2           | 77.4                  | 4.28                     | 71.0                 | 1.83                 | 1.04 | 0.73 | —    | —    | 0.54                 | 0.92 | 2.06 | —    | —    | 2.51             | 0.26 |
| 毛 白 杨 | 50         | 3           | 48.7                  | 16.69                    | 111.5                | 0.61                 | 0.48 | 0.25 | 0.23 | 0.22 | 0.23                 | 0.21 | —    | —    | —    | 2.77             | —    |
| 毛 白 杨 | 50         | 4           | 45.7                  | 7.79                     | 166.0                |                      | 0.25 | 0.34 | 0.40 | 0.43 | 0.22                 | 0.21 | 0.20 | 0.20 | 0.27 | —                | 0.81 |
| 火 炬 松 | 25         | 1           | 149                   | 8.01                     | 77.0                 | 1.78                 | 2.41 | 3.36 | —    | —    | 1.50                 | 1.63 | 0.57 | —    | —    | 0.53             | 2.63 |
| 火 炬 松 | 25         | 2           | 92.2                  | 3.29                     | 74.0                 | 1.09                 | 1.84 | 2.00 | —    | —    | 1.01                 | 1.48 | 1.73 | —    | —    | 0.55             | 0.58 |
| 日本落叶松 | 25         | 1           | 23.5                  | 6.65                     | 80.0                 | —                    | —    | —    | —    | —    | 0.39                 | 0.28 | 0.28 | —    | —    | —                | 1.39 |
| 日本落叶松 | 25         | 2           | 25.4                  | 4.70                     | 71.0                 | —                    | —    | —    | —    | —    | 0.56                 | 0.40 | 0.44 | —    | —    | —                | 1.27 |
| 马 尾 松 | 50         | 3           | 35.8                  | 5.96                     | 111.5                | 0.35                 | 0.38 | 0.31 | 0.24 | 0.27 | 0.19                 | 0.24 | 0.29 | 0.37 | 0.32 | 1.30             | 0.57 |
| 马 尾 松 | 50         | 4           | 46.3                  | 3.75                     | 167.0                | 0.41                 | 0.49 | 0.38 | 0.31 | 0.29 | 0.33                 | 0.38 | 0.50 | 0.62 | 0.67 | 1.41             | 0.49 |

3. 4 干燥过程中厚度方向含水率分布和水分迁移特点

干燥过程中木材(以毛白杨为例)厚度方向典型的含水率分布见图 3。对于新伐原木,经过长途运输后立即锯制的板材含水率分布特点是初含水率甚高,但沿厚度方向分布无规律,这主要是因为短周期工业材原木初含水率在径向和纵向上呈波状不均匀分布。其次,原木从采伐后运到试验室,要经过长途运输、保

管和原木锯制三个阶段,靠近树皮的边材部分的含水率要比内部低些,其中以火炬松、毛白杨、马尾松木材更为明显。对经过一段时间气干的锯材,在板厚方向的初含水率分布特点是:由于木材表面较长时间暴露在周围环境中,使木材表层含水率趋向于与环境条件相平衡的含水率,木材细胞腔大毛细管中的自由水首先蒸发,使木材表层含水率很快降低,沿厚度方向形成了含水率落差。因此锯制后存放在冷藏箱中较长

时间的试材,干燥试验前,大多数试样在厚度上也存在一定含水率落差。

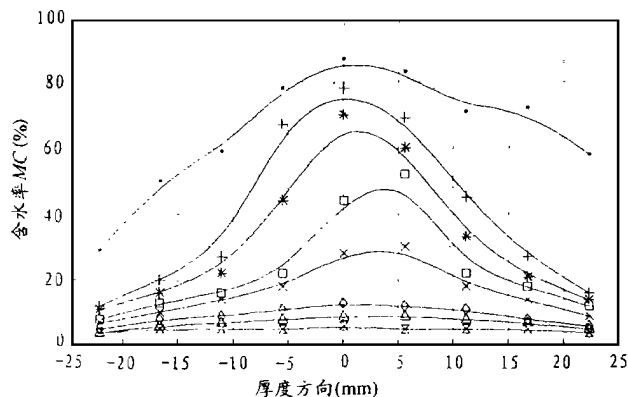


图3 毛白杨木材干燥过程中厚度方向含水率分布

Fig. 3 MC distribution of *P. tomentosa* wood along thickness direction during drying

干燥开始后,木材表面水分首先蒸发,使靠近表面的内层水分往表面的移动速度加快,同时厚度方向上含水率从较高处向含水率较低处移动,在断面上的含水率逐渐形成内高外低的抛物线分布,随着干燥的继续,湿线从外到里移动,在干燥的大多数时间内,在厚度上的含水率分布没有观察到对称分布规律,仅在干燥后期(含水率较低情况下),厚度上的含水率分布接近对称分布。这表明短周期工业材的初含水率和构造在纵向和径向上比天然林木材有更大的变异。

三个树种两种厚度的试验数据表明,木材内部各层的含水率梯度最大值出现在第一层,而且发生在干燥初期。还发现有些试材如马尾松和毛白杨,干燥一开始第一层就出现最大梯度,说明表层初含水率已经很低,在相同的干燥条件下,平均初含水率愈高,含水率梯度最大值也愈大。

## 4 结论

**4.1** 马尾松、火炬松、湿地松木材从初含水率干至20%左右,干燥过程曲线呈现近似直线关系,过渡阶段(拐点)后移。相反两种落叶松和刺槐干燥过程呈现两个减速阶段,有明显的过渡期。毛白杨和杉木介于二者之中。

**4.2** 干燥过程中木材内部温度变化特点是:预热阶段,木材表层温度随介质温度的升高而迅速上升,中心层温度上升比表层滞后,厚板比薄板明显,当基准下调进入初期干燥阶段,表层温度也迅速下降,而中心层温度延时缓慢下降,木材内部出现中心层温度稍高于表层温度一段时间,预热温度愈高和下调温差愈大,这种内高外低的温度梯度保持时间愈长,发现高

温基准波动时造成这种现象比低温基准更明显。

**4.3** 在其他条件相同的情况下,平均干燥速度随温度的升高而增加,温度升高对短周期工业材全过程干燥速度的提高都有影响,对马尾松、火炬松、湿地松的初期和中期干燥速度影响显著,而对长白落叶松、日本落叶松、刺槐、毛白杨的后期干燥速度影响显著。温度对中心层干燥速度的影响比表层显著。

**4.4** 短周期工业材初含水率沿板厚度方向分布:新伐材初含水率分布沿板厚度方向不均匀,如火炬松、马尾松、湿地松呈无规律,原木制材后存放一段时间(气干材),板材含水率一般是中心高,两边表层低,在板厚方向存在一定含水率差异。干燥开始后,表面继续蒸发水分,在含水率梯度作用下使靠近表面的内部各层中水分向表面移动,同时木材内部水分从较高含水率向较低含水率位置移动,随着干燥的进行,在断面上的含水率形成内高外低近似抛物线的分布,干燥终了平衡处理后,内外层含水率才接近一致。木材内部各层含水率梯度最大值出现在干燥初期,发生在靠近表面层,含水率梯度的最大值与干燥条件、木材树种、平均初含水率等密切相关。

## 5 参考文献

- 1 成俊卿主编. 木材学. 中国林业出版社, 1985, 9
- 2 满久崇磨(日)著, 马寿康译. 木材的干燥. 轻工业出版社, 1983, 8
- 3 农林水产省林业试验场编(日), 高家炽等译. 木材工业手册. 中国林业出版社, 1988, 9
- 4 何定华. 红松薄板高温干燥的研究. 林业科学, 1988, 24(3): 307~312
- 5 郭焰明等. 干燥过程中木材温度的变化规律以及与含水率关系的研究. 林业科学, 1990, 26(5): 435~442
- 6 杜国兴. 木材水分非稳定扩散的研究. 南京林业大学学报, 1991, 7
- 7 约翰 F. 肖若著, 萧亦华, 滕通瀛, 郭焰明译. 木材传热传质过程. 中国林业出版社, 1989, 8
- 8 Howard N Rosen. Recent Advances in the Theory of Drying Lumber. Proceeding of the Wood Drying Working Party, 1983, 6~7
- 9 Frans F P K, Wilfred A C Jr. Principles of Wood Science and Technology, Solid Wood. Springer-verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1968
- 10 Funayama F. Mechanism of Free Water Movement in Wood Drying. 4th IUFRO International Wood Drying Conference, 1994, 8
- 11 Liu Jen Y. A New Method for Separating Diffusion and Surface Emission Coefficient. Wood and Fiber Science, 1988, 3
- 12 Wiley A T and Choong E T. An Analysis of Free-water Flow during Drying in Softwood. Wood Science, 1982, 7(4)
- 13 Rosen H N. Empirical Model for Characterizing Wood Drying Curves. Wood Science, 1980, 12(4)
- 14 Christen Skaar. Water in Wood. Syracuse University Press, 1972