

## 木束高温干燥过程中的热质传递模型

李延军<sup>1</sup>, 张璧光<sup>2</sup>, 张齐生<sup>1</sup>, 李贤军<sup>2</sup>, 刘志坤<sup>1</sup>

(1. 浙江林学院 工程学院, 浙江 临安 311300; 2. 北京林业大学 材料科学与技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 描述了用杉木 *Cunninghamia lanceolata* 制造杉木积成材的原料单元——杉木木束的高温对流干燥热质传递模型。建立了模型以纤维饱和点为界的木束内部水分迁移和热量迁移的数学方程。通过杉木木束高温干燥实验对模型的准确性和可行性进行验证。结果表明: 数学模拟结果和试验实际测定结果相吻合, 木束温度实测值与模拟值之间的相关系数的平方为 0.97~0.98, 木束含水率的相关系数的平方为 0.96~0.99。用该模型来模拟木束的高温干燥过程具有较高的精度。图 1 参 9

**关键词:** 林业工程; 高温干燥; 杉木木束; 水分迁移; 热质传递; 模型

**中图分类号:** S781      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5692(2008)02-0131-06

## A heat and mass transfer model for high temperature drying of Chinese fir wood stick

LI Yan-jun<sup>1</sup>, ZHANG Bi-guang<sup>2</sup>, ZHANG Qi-sheng<sup>1</sup>, LI Xian-jun<sup>2</sup>, LIU Zhi-kun<sup>1</sup>

(1. School of Engineering, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This objective is to determine the process parameters and control way in drying wood stick. A model for heat and mass transfer during high temperature convection drying of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) wood stick was developed for use with Chinese fir oriented laminated stick lumber (CFOLSL). From the model, an equation of internal moisture migration and heat transfer at the point of fiber saturation was created. Model authenticity and feasibility were validated through an experiment with Chinese fir wood stick. Results of measurements versus the simulation model for moisture content ( $R_{MC}^2=0.96-0.99$ ) and temperature ( $R_T^2=0.97-0.98$ ) showed strong agreement. The high-accuracy of the model used to analyze high temperature drying of wood stick could contribute to the theoretical basis for calculation of technical parameters as well as to a working solution for drying wood stick. [Ch, 1 fig. 9 ref.]

**Key words:** forest engineering; high temperature drying; Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) wood stick; moisture movement; heat and mass transfer; model

在杉木 *Cunninghamia lanceolata* 制造杉木积成材<sup>[1,2]</sup> 过程中, 杉木木束的干燥质量是制成杉木积成材的关键工序之一。杉木木束是杉木积成材的生产用原料, 由于它的尺寸较小, 类似于日常生活中筷子的形状, 与木碎料相比, 在同样干燥条件下, 木束的干燥时间相对较长, 能耗大, 因此, 开展木束干燥研究具有较大的现实意义。作者主要是研究在高温对流干燥过程中木束内部水分迁移和热量传导过程的规律, 建立并求解传热传质的数学模型, 为确定木束干燥生产的工艺参数及控制方案提供理论依据。

收稿日期: 2007-09-10; 修回日期: 2007-11-16

基金项目: 科学技术部农业转化项目(03EFN213300104); 浙江省科学技术重点项目(011102164)

作者简介: 李延军, 副教授, 博士, 从事木材干燥等研究。E-mail: lalyj@126.com。通信作者: 张璧光, 教授, 博士生导师, 从事木材干燥等研究。E-mail: zhangbg@bjfu.edu.cn

# 1 模型的建立

## 1.1 模型的假设

①假设单一木束为一理想的细长圆柱体,而实际的木束长度又为直径的20倍以上,所以可以将对流干燥过程中木束内热质传递看作只沿圆周方向进行,即热质传递为一维。②当木束含水率在纤维饱和点以上时,单根木束内木束实质、自由水和水蒸气呈连续状态,木束内的水分是分别在毛细张力梯度和水蒸气压力梯度作用下的自由水和水蒸气渗透流;在纤维饱和点以下时,木束内的水分是在含水率梯度作用下的扩散流。③自由水和水蒸气的渗透流都遵循达西定律,而水蒸气和吸着水的扩散流都遵循菲克扩散定律。④木束内局部处于热力平衡状态,同一部位各组分物质具有相同的温度。⑤在干燥过程中,木束尺寸和内部结构不发生变化。⑥将木束内的气相看作为理想气体<sup>[3]</sup>。

## 1.2 模型的建立

### 1.2.1 木束内部的水分迁移模型

1.2.1.1 木束含水率在纤维饱和点(FSP)以上 根据质量守恒方程,在木束对流干燥过程中,对于单一木束内自由水和水蒸气的迁移分别遵循下列方程。

$$\text{自由水:} \quad \frac{\partial C_l}{\partial t} + \rho_l \operatorname{div}(v_l) = -m_l, \quad (1)$$

$$\text{水蒸气:} \quad \frac{\partial C_v}{\partial t} + \rho_v \operatorname{div}(v_v) = -m_v. \quad (2)$$

式(1)(2)中:  $C_l$ ,  $C_v$  分别为湿木束中自由水和水蒸气的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $\rho_l$ ,  $\rho_v$ , 分别为自由水和水蒸气的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\operatorname{div}(v_l)$ ,  $\operatorname{div}(v_v)$  分别为木束中自由水和水蒸气迁移速度向量的散度;  $v_l$ ,  $v_v$  分别为木束中自由水和水蒸气的迁移速率,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $m_l$  为单位体积木束内自由水的蒸发速率,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由于木束长度方向的尺寸远大于其直径方向的尺寸,因此,在建立和求解模型时,可以将木束看成一无限长的圆柱体,即认为在干燥过程中,水分仅沿着木束的半径方向进行迁移,则对于一维的水分迁移(沿木束半径  $r$  方向),经过系列推导得到木束含水率在纤维饱和点以上的水分迁移方程为<sup>[4]</sup>:

$$\rho_s \frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \left( \rho_l \frac{K_l}{\mu_l} \frac{A \times n \times (M - M_{\text{FSP}})^{n-1}}{(M_{\text{MAX}} - M_{\text{FSP}})^n} \nabla M \right) + \nabla \left( \rho_v \frac{K_v}{\mu_v} \times 10 \times GRT \nabla M \right). \quad (3)$$

式中:  $\rho_s$  为木束的基本密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $M$  为某一时刻木束的含水率,%;  $M_{\text{FSP}}$  为木束纤维饱和点时木束的含水率,取30;  $M_{\text{MAX}}$  为木束细胞腔都充满自由水时的含水率,%;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $\nabla$  为哈密顿运算符,向量;  $K_l$ ,  $K_v$  分别为自由水,水蒸气的比渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\mu_l$ ,  $\mu_v$  分别为自由水和水蒸气的动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $A$ ,  $n$  为常数,对于针叶材,  $A = 124\,000 \text{ Pa}$ ,  $n = -0.61$ ;  $G$  为木束密度;  $R$  为气体常数;  $T$  为温度,  $\text{K}$ 。

1.2.1.2 木束含水率在纤维饱和点(FSP)以下 在木束干燥过程中,当木束含水率在 FSP 以下时,木束内只存在吸着水和水蒸气,其水分的迁移属于扩散现象,其迁移规律遵循菲克定律。吸着水和水蒸气的迁移速率可以分别表示为:

$$v_b = -D_b \nabla M, \quad (4)$$

$$v_v = -D_v \nabla M. \quad (5)$$

式(4)(5)中  $D_b$ ,  $D_v$  分别为吸着水和水蒸气的扩散系数,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $v_b$ ,  $v_v$  分别为木束中吸着水和水蒸气的迁移速率,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $M$  为某一时刻木束的含水率,%。经过推导后,可以得到纤维饱和点以下,木束内部的水分迁移的一维数学模型:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \{ (D_b + D_v) \nabla M \}. \quad (6)$$

但在实际的干燥过程中,为简化方程的计算,将吸着水的扩散系数  $D_b$  和水蒸气的  $D_v$  合二为一,合并为一个总的水分扩散系数  $D$ 。 $D$  值的大小可以通过试验方法求得<sup>[5]</sup>。因此,当用  $D$  代替  $D_v$  和  $D_b$  后,

纤维饱和点以下时木束内沿半径  $r$  方向的水分迁移方程为<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (7)$$

### 1.2.2 木束内部的热量迁移模型

1.2.2.1 木束含水率在纤维饱和点(FSP)以上 当含水率在 FSP 以上时, 木束可以视为有木束实质、自由水、吸着水和水蒸气构成的混合多相体系, 其各组分的能量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (C_l h_l + C_b h_b + C_v h_v + C_s h_s) = \nabla (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) - \text{div} (h_l \rho_l v_l) - \text{div} (h_v \rho_v v_v) - m_l r_l \quad (8)$$

式(8)中:  $T$  为木束的温度, K;  $C_l$ ,  $C_b$ ,  $C_v$ ,  $C_s$  分别为木束中自由水、吸着水、水蒸气和木束实质的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $h_l$ ,  $h_b$ ,  $h_v$ ,  $h_s$  分别为木束中自由水、吸着水、水蒸气和木束实质的比焓,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $v_l$ ,  $v_v$  为自由水、水蒸气的迁移速率,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\rho_l$ ,  $\rho_v$  分别为自由水、水蒸气的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\lambda_l$ ,  $\lambda_b$ ,  $\lambda_v$ ,  $\lambda_s$  分别为木束中自由水、吸着水、水蒸气和木束实质的导热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $m_l$ ,  $m_b$  分别为单位体积木束中自由水、吸着水的蒸发速率,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $r_l$ ,  $r_b$  分别为自由水、吸着水的气化潜热,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

式(8)左边第 1 项中的  $C_l h_l + C_b h_b + C_v h_v + C_s h_s$  表示单位体积湿木束所具有的总能量。它可以表示为:

$$C_l h_l + C_b h_b + C_v h_v + C_s h_s = \rho H \quad (9)$$

$$\text{且} \quad H = c_p T \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为湿木束的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $H$  为湿木束的比焓,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $c_p$  为湿木束的比热,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T$  为湿木束的温度, K。

一般认为, 在干燥过程中木束内的水分运动足够慢, 液体与木束实质等各组分都具有相同的温度。因此, 对于一维的热量迁移, 当不考虑水分迁移所引起的热迁移时, (8)式可以转化为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) - m_l r_l \quad (11)$$

式(11)中  $c_{pl}$ ,  $c_{pv}$  分别为为自由水和水蒸气的比热,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $\lambda_{\text{eff}}$  为湿木束的有效导热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

上式可以继续变为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - m_l r_l \quad (12)$$

1.2.2.2 木束含水率在纤维饱和点(FSP)以下 当木束含水率在 FSP 以下时, 木束是由吸着水、水蒸气和木束实质构成的多相体系。同理, 若不考虑水蒸气和吸着水迁移所引起的热迁移, 经过整理和化简后, 可以得到:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - m_b r_b \quad (13)$$

## 2 模型的求解及验证

### 2.1 模型及边界条件

当将湿木束置于高温热空气中时, 木束表面的水分首先开始快速蒸发, 表层的含水率迅速降低到纤维饱和点以下, 此时在木束厚度方向上就形成了 2 个干燥区域: 含水率低于 FSP 的外区和含水率高于 FSP 的内区。外区与内区的交界处存在一个蒸发面。在蒸发面以外的外区, 水分以吸着水和水蒸气的形式存在, 并在含水率梯度或水蒸气分压力梯度的驱动下, 以扩散的形式进行迁移; 而在蒸发面以内的内区, 水分以自由水和水蒸气的形式存在, 并分别在毛细张力差和水蒸气压力差的作用下以渗透流的形式由内区迁移到蒸发面。随着干燥过程的进一步进行, 木材中的蒸发面逐步向中心层推移, 直至蒸发面消失。此时, 木材整个断面的含水率都在 FSP 以下, 木材中不再存在自由水, 木材的干燥过程完全受到吸着水和水蒸气扩散过程的控制。当木材含水率在纤维饱和点以上时, 木束中水分的

迁移不全属于扩散现象,但木束内区水分的移动仍然受到外区水分扩散迁移的控制和制约,因此从干燥过程模拟的角度出发,在木束干燥的整个过程中,都可以将其内部水分的迁移当成一种扩散现象来处理,即对木束整体而言,其水分迁移规律可以统一用方程来描述<sup>[4]</sup>。此时,在木束的整个干燥过程中,木束内的水分迁移和热量传递的控制方程分别为:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right), \quad (14)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - m_b r_b. \quad (15)$$

上述热量控制方程中  $m$  为单位体积木材中水分(含自由水和吸着水)的蒸发速率,单位为  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对单一木束而言,其值为  $\rho_s \frac{\partial M}{\partial t}$ 。

边界条件( $r=R$ ):

$$-D \frac{\partial M}{\partial r} \Big|_{r=R} = h_M (M_s - M_e), \quad (16)$$

$$-\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = h_T (T_s - T_0). \quad (17)$$

式中:  $h_M$  为木材表面与环境的换水系数,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $h_T$  为木材表面温度传递系数,  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $M_s$ ,  $T_s$  分别为木材表面含水率和温度;  $M_e$ ,  $T_0$  分别为木材的平衡含水率和环境温度。

以上边界条件为木材表面( $x=0$ 处)的边界条件,而木材中心层的边界条件为:

$$\frac{\partial M}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (18)$$

## 2.2 模型的解法

在求解模型时,必须知道在高温干燥过程中木束表面与环境之间的热量和水分交换系数及其他有关参数。为了使模型更贴近实际,本研究先通过一组木束的高温干燥试验直接测定相关的参数,再将相关的参数代入模型中进行理论模拟<sup>[7,8]</sup>。

**2.2.1 参数的确定** 试验材料:杉木木束;含水率为101.81%;规格为(长×直径)400.0 mm×12.2 mm。干燥条件:温度160℃;湿度不控制。试验步骤:每次试验,取2根已调制好的同一尺寸和含水率的试件,用环氧树脂和铝箔封闭试件的端面,使能量和水分都沿着木束的圆周方向进行传递。待树脂充分固化后,用天平准确称取试件的初质量,再将其中一根木束试件置于烘箱内的托架上(材料为金属筛网),通过与托架直接相连的外置电子天平可以实现对木束干燥过程中木束试件质量的在线检测。在试验刚开始,每隔30~60 s时记录木束的质量,直到干燥过程结束。然后将木束烘至绝干并称量,再根据木束试件的绝干质量反算木束在干燥过程中各个阶段的含水率,绘制木束的含水率变化曲线。

在试验中,木束的平均干燥速率为  $2.79 \% \cdot \text{min}^{-1}$ ; 平均的排水速率为  $0.386 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ , 木束表面单位面积的水分迁移速率为  $0.00050580 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 将得到的水分迁移速率除以干燥过程中木束内外的平均干燥势差,就得到在高温干燥过程中木束表面与环境的水分交换系数,其值为  $0.00000522 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而在高温干燥过程中,木束与环境间的热交换系数参照文献[9]和研究结果选取,为  $21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。另外,杉木木束的基本密度为  $0.27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

**2.2.2 模型的求解与验证** 在本研究中采用有限差分法对木束内的热、质迁移方程和边界方程进行转换。利用有限差分法将上述水分和温度控制方程分别变换为:

$$\frac{M_{(i,k+1)} - M_{(i,k)}}{l} = D \left[ \frac{M_{(i+1,k)} - 2M_{(i,k)} + M_{(i-1,k)}}{h^2} + \frac{1}{r} \frac{(M_{(i+1,k)} - M_{(i,k)})}{h} \right], \quad (19)$$

$$\rho c_p \frac{T_{(i,k+1)} - T_{(i,k)}}{l} = \lambda_{\text{eff}} \left[ \frac{T_{(i+1,k)} - 2T_{(i,k)} + T_{(i-1,k)}}{h^2} + \frac{1}{r} \frac{(T_{(i+1,k)} - T_{(i,k)})}{h} \right] + \rho_s \frac{M_{k+1} - M_k}{l} r. \quad (20)$$

经过化简后,上述方程的关系递推式为:

$$M_{(i,k+1)} = Dl \left[ \frac{M_{(i+1,k)} - 2M_{(i,k)} + M_{(i-1,k)}}{h^2} + \frac{1}{r} \frac{(M_{(i+1,k)} - M_{(i,k)})}{h} \right] + M_{(i,k)}, \quad (21)$$

$$T_{(i,k+1)} = \frac{k_{\text{eff}} l}{\rho c_p} \left[ \frac{T_{(i+1,k)} - 2T_{(i,k)} + T_{(i-1,k)}}{h^2} + \frac{1}{r} \frac{(T_{(i+1,k)} - T_{(i,k)})}{h} \right] + \rho_s \frac{M_{k+1} - M_k}{\rho C_p} r + T_{(i,k)}. \quad (22)$$

同理，将边界条件通过有限差分法转化为代数形式：

$$-D \frac{M_{(n,k)} - M_{(n-1,k)}}{h} = h_m (M_{(n,k)} - M_e), \quad (23)$$

$$-\lambda_{\text{eff}} \frac{T_{(n,k)} - T_{(n-1,k)}}{h} = h_T (T_{(n,k)} - T_0). \quad (24)$$

经过化简后，上述边界方程的关系递推式为：

$$M_{(n,k)} = \frac{h_m h M_e + D M_{(n-1,k)}}{D + h h_m}, \quad (25)$$

$$T_{(n,k)} = \frac{h_T h T_0 + k_{\text{eff}} T_{(n-1,k)}}{\lambda_{\text{eff}} + h_T h}. \quad (26)$$

木束中心层的边界控制方程为：

$$M_{(0,k+1)} = Dl \left[ \frac{2(M_{(1,k)} - M_{(0,k)})}{h^2} + \frac{1}{r} \frac{(M_{(1,k)} - M_{(0,k)})}{h} \right] + M_{(0,k)}, \quad (27)$$

$$T_{(0,k+1)} = \frac{\lambda_{\text{eff}} l}{\rho c_p} \left[ \frac{2(T_{(1,k)} - T_{(0,k)})}{h^2} + \frac{1}{r} \frac{(T_{(1,k)} - T_{(0,k)})}{h} \right] + \rho_s \frac{M_{k+1} - M_k}{\rho C_p} r + T_{(0,k)}. \quad (28)$$

初始条件： $T_{(i,0)} = T_0; M_{(i,0)} = M_0.$  (29)

根据上述各有限差分方程，利用计算机进行模拟运算，就可以模拟出木束在高温干燥过程中的平均含水率和平均温度的变化。为了验证模型的正确性和检验其模拟的精度，在本研究中将试验测定结果与模拟结果进行对比分析，运用最小二乘法求得试验数据与模拟数据的相关系数，用以检验其模拟精度。

图 1 表示了木束在高温干燥过程中温度和含水率变化的数学模拟结果和试验实际测定结果。从图中可看出：由于木束直径比较小，木束的温度模拟曲线在木束干燥过程中一直处于上升态势；而含水率模拟曲线却恰好相反。温度的上升趋势在木束开始干燥时比较显著，具体表现就是曲线较陡，后来趋于平稳上升。这样可将温度模拟曲线分为初期快速升温段和中期缓慢升温段，到后期温度趋于稳定状态；同理，含水率模拟曲线可以分为加速干燥段、等速干燥段和减速干燥段。这一模拟结果与干燥试验的结果完全相同，证明了用该模型模拟木束高温干燥过程的可行性。从温度和含水率模拟曲线与试验测定曲线的拟合程度来看，试验测定值与模拟值之间相关程度很高，数学计算结果表明，温度实

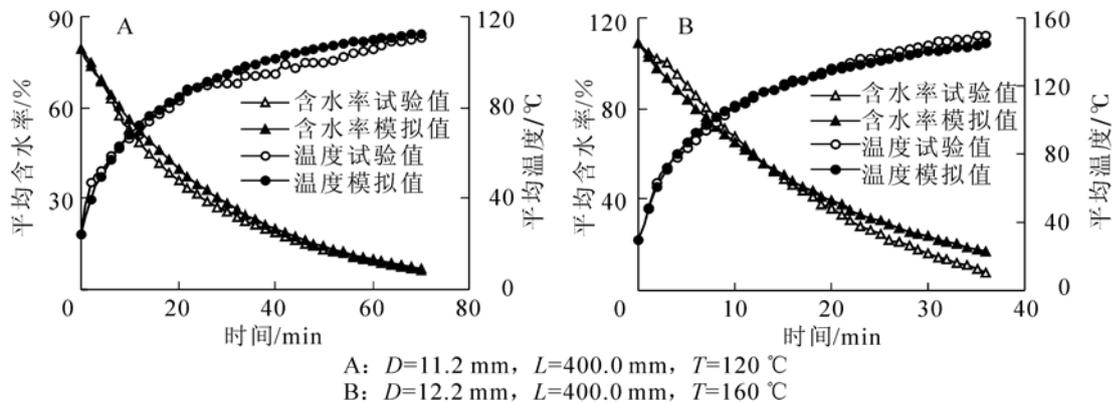


图 1 试验与模拟结果对比

Figure 1 The comparison of experimental results and calculated results

测值与模拟值之间的相关系数的平方分别为 0.97 和 0.98；木束含水率实测值与模拟值之间的相关性略低，但其相关系数的平方分别为 0.99 和 0.96，这充分说明了用该模型来模拟木束的高温干燥过程具有较高的精度。

在建立模型时，是根据设定温度来计算参数的，而在实际测量中，开始时，木束还处于升温阶段，温度在木束内不可能马上升到设定的温度值，所以在开始阶段，木束实际的干燥速度较慢，而模拟值较快；到了一定阶段，木束内部温度已升高，干燥速度加大，但模拟的还是以设定值为基准进行，因此会出现两者接近，甚至重合的可能；继续干燥下去，温度达到一定值，比较稳定，由于木束直径较小，水分排得快，实际的木束表面与环境的水分交换系数可能比整个干燥阶段的平均值大，就会出现木束的实测含水率要低于数学模拟值。另外，温度的实测值与模拟值之间也同样由于上面的原因出现差异，但其影响要比前者小。另外，在测量过程中，还会因热电偶本身精度的原因，使得木束温度的测量值不同于实际温度。

### 3 结论

作者建立了充分考虑整个含水率范围的木束高温干燥的热质传递模型，模型以纤维饱和点为界建立了木束内部水分迁移和热量迁移的数学方程。从温度和含水率模拟曲线与试验测定曲线的拟合程度来看，试验测定值与模拟值之间相关程度很高。数学计算结果表明，温度实测值与模拟值之间的相关系数的平方为 0.97~0.98，木束含水率实测值与模拟值之间的相关性略低，但其相关系数的平方为 0.96~0.99，这充分说明了用该模型来模拟木束的高温干燥过程具有较高的精度。模型的建立为确定木束干燥生产的工艺参数及控制方案提供了理论依据，但由于木束干燥的特殊性，该模型建立时，在木束干燥的整个过程内，是将其内部水分的迁移当成一种扩散现象来处理的。模型系数物理意义明确，并且可以由常规试验测定。

#### 参考文献：

- [1] 刘志坤, 杜春贵, 李延军, 等. 小径杉木梳解加工工艺研究[J]. 林产工业, 2003, 30(3): 10-13.
- [2] 李延军, 张宏, 张璧光, 等. 梳解前后小径杉木细胞的微观形态及力学性能[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(2): 6-9.
- [3] 伊松林, 张璧光. 常建民. 木材真空—浮压干燥过程热质传递的数学模型[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(2): 68-71.
- [4] 李延军. 杉木木束干燥特性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [5] 李延军, 张璧光, 李贤军, 等. 杉木木束干燥过程中水分的非稳态扩散[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(增刊): 61-63.
- [6] JOHN F S. 木材传热传质过程[M]. 肖亦华, 滕通濂, 郭焰明, 译. 北京: 中国林业出版, 1989.
- [7] LIU J Y. A new method for separating diffusion coefficient and surface emission coefficient [J]. *Wood Fib Sci*, 1989, 21(2): 133-141.
- [8] CHEN Z J, FRED M L. Investigation of boiling front during vacuum drying of wood [J]. *Wood Fib Sci*, 2001, 33(4): 639-647.
- [9] DATTA A K, NI H. Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture [J]. *J Food Eng*, 2002, 51: 355-364.