

负压场中木材水分移动的机理

蔡英春¹ 林和男² 刘一星¹ 王逢湖¹

(1 东北林业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040; 2 爱媛大学, 日本松山 790-8566)

摘要: 检测了负压场中的相对湿度, 考察了负压场中木材表面的水分蒸发现象及木材内部水分的迁移速度, 分析了其影响因素, 同时测试分析了高频真空干燥过程中的木材表面水分蒸发现象, 进而分析探讨了水分移动机理。结果表明, 负压场中的相对湿度基本上仅受罐体内湿空气和冷凝器冷却水的温度差影响, 而不受压力影响; 高频真空干燥及其它加热形式的负压干燥等干燥过程中, 木材中水分除以水蒸汽形式在内外压力差作用下流动外, 还存在着表面蒸发及内部扩散迁移, 且扩散迁移速度与木材环境压力成反比。

关键词: 负压场 高频 木材水分 移动 机理

The mechanism of moisture transfer in wood under the vacuum field

Cai Yingchun¹ Hyashi Kazuo² Liu Yinxing¹ Wang Fenghu¹

(1, Northeast Forestry University, Harbin, 150040; 2, Ehime University, Matsuyama, 790-8566, Japan)

Abstract: Measured the relative humidity in the vacuum field. Investigated evaporation from timber surface and the rate of moisture transfer during vacuum drying, and discussed the influence factor on them. Investigated evaporation from timber surface during RF/ vacuum drying. And then, we discussed the mechanism of moisture transfer in wood during vacuum drying. The results show that the relative humidity in the vacuum field is influenced only by the temperature difference between air in the vacuum chamber and water in the condenser, but almost is not affected by the ambient pressure. Moisture in wood not only moves in the vapor state under the pressure difference between inside and outside of the wood, but also evaporates from wood surface and diffuses in wood. And than diffusion rate is inversely proportional to ambient pressure.

Keywords: Vacuum field, RF, Moisture in wood, Transfer, Mechanism

理论上, 置于密封良好之真空罐体内的容器内的水, 除在开始抽真空的很短时间以表面蒸发的形式发生汽化外, 整个真空过程中由于水蒸汽压力等于罐体内总压力, 所以总是在水温高于沸点时以沸腾的形式汽化^[1,2]。而实际上, 笔者认为, 真空罐体会存在某种程度的漏气, 因而罐体内将残存少量干空气与水蒸汽的混合物, 其接受由温度较高部位以热辐射及热传导形式传递的热量而温度升高, 这将使罐体内部相对湿度有所下降, 并引起木材表面水分的蒸发。在此, 我们对此以及实际高频真空干燥过程中木材表面的蒸发现象等进行了测试、对蒸发的影响因子及负压场中木材水分移动的机理进行了考察分析。

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动金资助项目;

黑龙江省博士后资助基金。

第一作者简介: 蔡英春, 1960年生, 男, 东北林业大学材料科学与工程学院, 副教授, 博士。主要从事木材干燥, 木材物理方面的研究。

电话: 0451-86307318;

电子邮件: yhccai@yahoo.com.cn

1 真空罐体加热时罐体内的相对湿度

1.1 实验方法

作为模拟负压干燥过程中木材的环境条件以及木材表层温度的模型，如图 1 所示，将盛有水的容器放入真空罐内，并用电热丝对罐体加热。调解设定罐体温度、以保证在其热辐射下使得干球温度 t_d 维持在约 38℃，此时容器内水温稳定在 32℃。此外，控制罐内压力在 52torr(6.9kPa) 至 101torr(13.5kPa) 间变化。用铂金电阻温度传感器检测干球温度 t_d 和湿球温度 t_w 的变化，并按下式计算罐内相对湿度 ϕ 。

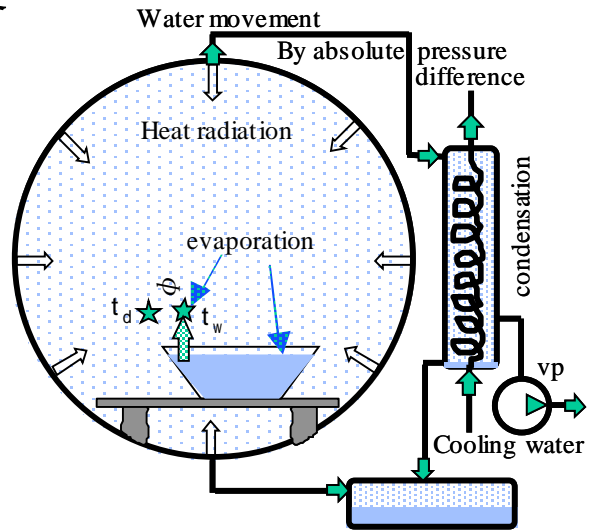


图 1 真空罐体加热时罐内相对湿度的检测

Fig. 1 The measured of the relative humidity in vacuum chamber during chamber body heating

1.2 罐内相对湿度 ϕ 的计算

罐内相对湿度 ϕ 按下式^[3]计算，即，

$$f = \frac{p_w - k \frac{P}{755} (t_d - t_w)}{p_s} \times 100 \quad (1)$$

式中， p_s 是干球温度下的饱和蒸汽压， p_w 是湿球温度下的饱和蒸汽压， p 为湿空气总压力、即真空罐内压力 p_A ， t_d 、 t_w 分别为干、湿球温度。空气流动时系数 k 取 0.5，而真空罐内空气很少，所以 k 取 0.6。

1.3 结果和分析

结果如图 2 所示，表明真空罐内相对湿度 ϕ 基本上不受罐内压力 p_A 影响，仅由罐内温度决定。温度维持在约 38℃ 时，相对湿度 ϕ 约为 73%。由此可推知，负压场中的木材在受到外部热辐射而温度升高时，表面水分必将产生某种程度的蒸发。

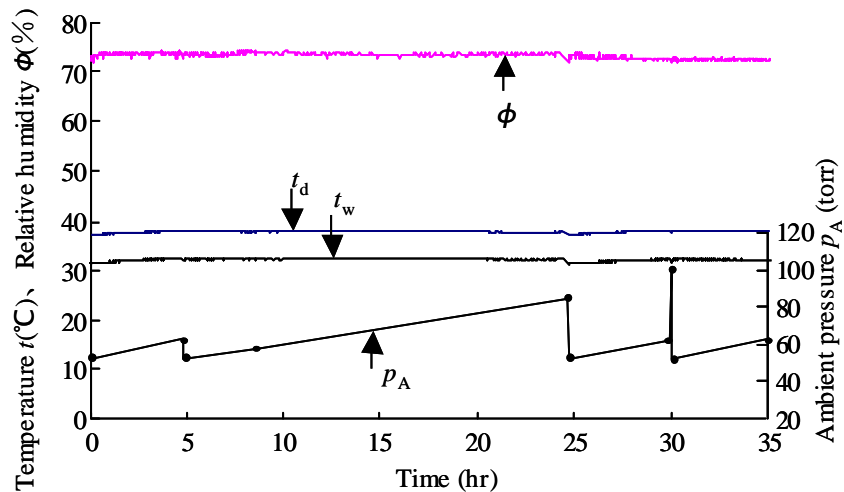


图2 真空罐体加热时罐内温度和压力的变化过程

Fig.2 Process of temperatures and the relative humidity in vacuum chamber
 T_d, t_w : Dry-bulb temperature and wet-bulb temperature in drying chamber, respectively.

2 罐内相对湿度的影响因子及负压干燥与常规蒸汽干燥过程中干燥速度的比较

2.1 实验方法

将日本柳杉 (*Cryptomeria japonica*) 及美国花旗松 (*Pseudotsuga menziesii*) 分别制成 2 根尺寸相同且端部纤维相适配(End match)的试件。柳杉尺寸为 12×12×35cm，花旗松尺寸为 9×9×22cm。

如图 3 所示, 首先将一根柳杉和花旗松置入真空罐内, 以罐体加热方式进行干燥, 检测干燥过程中的干湿球温度、测算试件温度分布及干燥速度的变化过程, 计算罐内相对湿度。为究明罐内温度和压力对相对湿度的影响以及试件周围压力对试件水分迁移的影响, 确定了如下干燥条件, 即, 0~96hr 间以罐体加热方式维持罐内干球温度 t_d 约为 35°C , 96~192hr 停止加热。关于罐内压力, 在最初由大气压连续降低至 56torr(7.5kPa)后真空泵停机 24hr, 压力增到 102torr(13.6kPa), 这之后至 120hr 间设定为 60torr(8kPa), 120~144hr 间为 50torr(6.7kPa), 144~192hr 间为 70torr(9.3kPa); 另一根柳杉和花旗松以常规蒸汽加热方式进行干燥。为比较上述两种干燥过程中的试件水分迁移速度, 后者将干球温度和相对湿度设定为与前者完全一致。

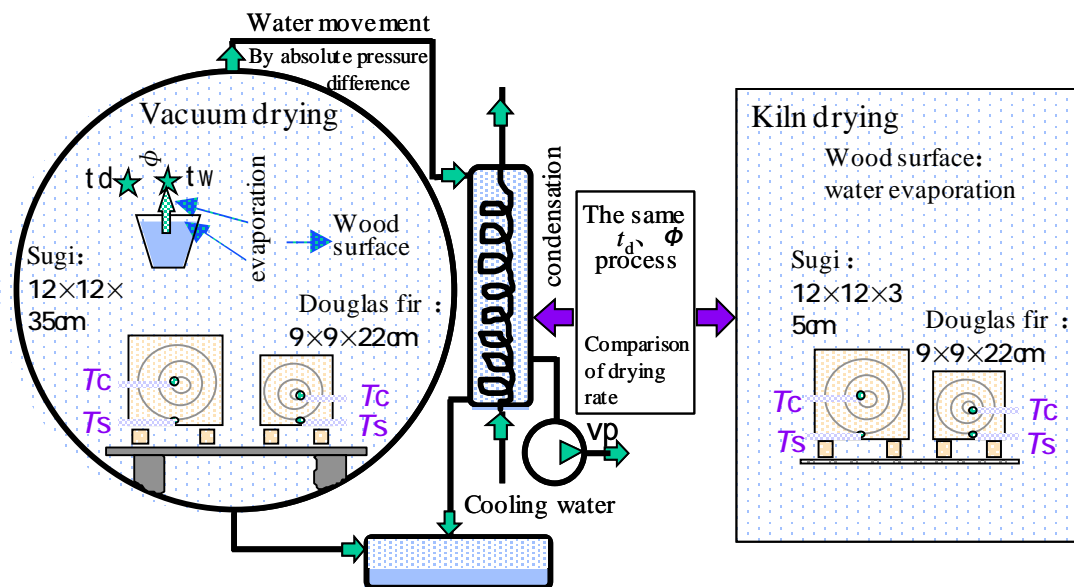


图 3 真空罐内相对湿度的检测及真空干燥与常规蒸汽干燥在干燥速度上比较的实验

Fig. 3 The measured of the relative humidity in vacuum chamber and comparison of drying rate during vacuum drying and that during kiln drying

T_d , t_w and ϕ : Dry-bulb temperature, wet-bulb temperature and the relative humidity in drying chamber, respectively. T_c, T_s : Temperature of specimen at center and surface, respectively.

2.2 结果和分析

真空干燥与常规蒸汽干燥在试件温度分布及含水率等变化过程方面相互比较的结果如图 4 (柳杉) 和图 5 (花旗松) 所示。由 2 个图的 (a) 可知, 罐内温度对相对湿度 ϕ 具有很大影响。其原因可能为, 罐内饱和蒸汽压将随着温度升高而增大, 而与罐内水蒸汽分压基本上相等的冷凝器内的饱和蒸汽压则由于冷凝器冷却水温度保持一定而维持不变, 因而导致相对湿度随着温度的升高而减小。下面我们将结合本试验的实际作进一步分析。本试验中冷凝器内的温度为 32°C , 则不论罐体是否加热, 罐内水蒸汽分压都基本上一定, 等于 36torr (4.8kPa, 对应 32°C)。若罐体加热停止, 罐体内部温度将下降, 饱和蒸汽压降低, ϕ 增大, 蒸发减缓, 水蒸汽在冷凝器中的凝缩减少。试件温度降至与冷凝器内温度相等时, 在冷凝器中将停止水蒸汽的凝缩, 罐内水蒸汽分压将与饱和蒸汽压相等, ϕ 增至 100%, 蒸发停止。即使此时降低冷却水温, 蒸发也是短暂的。因为, 蒸发将吸收汽化潜热, 使材温很快降低至与冷凝器内温度相等, 因而水蒸汽凝缩和蒸发停止。这意味着在无外部加热时, 材温总是受冷凝器温度制约。但是, 由于本试验装置存在泄漏, 所以最大相对湿度只能达 97%。这表明, 在负压场下若无外部加热将基本上不发生蒸发;

2 个图的 (a) 与图 2 所示结果相同, 都没有显示罐内压力对湿度有影响;

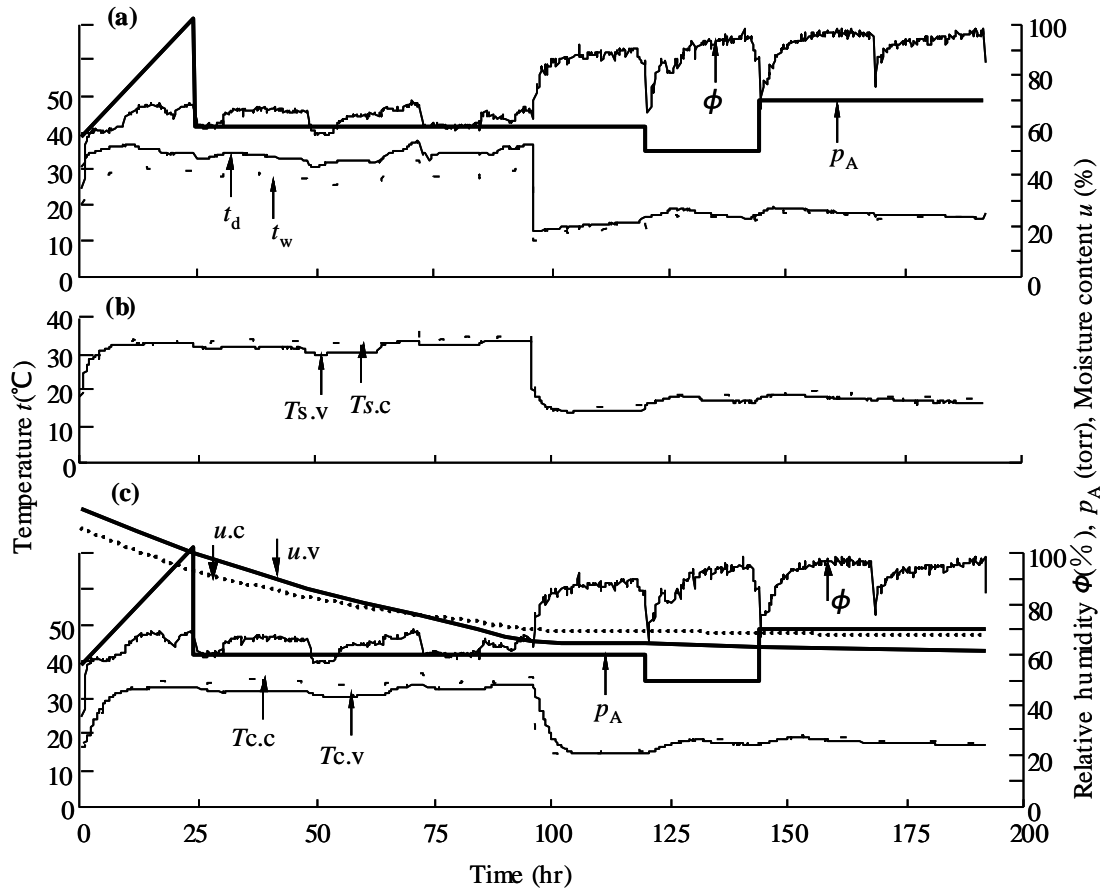


图4 日本柳杉在真空干燥与常规蒸汽干燥过程中的温度、干燥曲线的比较
v:真空干燥, c:常规蒸汽干燥.

Fig. 4 Comparison of temperature, drying process during vacuum drying and that during kiln drying for Sugi v: vacuum drying, c: kiln drying.

T_d, t_w : Dry-bulb temperature and wet-bulb temperature in vacuum chamber, respectively.

$T_{c.v}, T_{c.c}$: temperature of specimen at center during vacuum drying and kiln drying, respectively.

$T_{s.v}, T_{s.c}$: temperature of specimen at surface during vacuum drying and kiln drying, respectively.

由2个图的(b)、(c)可知, 负压干燥与常规蒸汽干燥相比, 不论是柳杉还是花旗松, 即使在完全相同的周围相对湿度、材中心及表层温度下, 干燥速度都是负压干燥时快。其原因可能是因为真空泵工作时由于材外压力低于材内压力而产生短时间的内外压力差, 在其作用下木材内部渗透性非常好的组织内的很少一部分自由水被驱出所致。但是, 欲克服材内毛细管张力将自由水驱出将需要相当大的压力, 因而上述压力差对干燥速度的影响是极其有限的。下面我们将讨论负压场下水分扩散系数发生变化这一影响干燥速度的主因。

气相扩散系数 D 用下面的实验式^[4]来确定。即,

$$D = \frac{0.0043T^{1.5} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{p(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})} \quad (\text{cm}^2/\text{sec}) \quad (2)$$

式中, T 是绝对温度[K], M_A, M_B 分别为两成分 A 和 B 的分子量, π 是总压力(Atm)、 V_A, V_B 分别为 A 和 B 的分子容。由上式可知, 扩散系数 D 与总压力 π 成反比。我们可以用压力与分子自由行程成反比这一关系来理解它。即, 随着总压力 π 的降低, 分子自由行程会变长, 因而扩散系数会增大。本实验中除总压力之外其它参数都相同, 因而若总压力由大气压力降到 60torr(8kPa) 时, 扩散系数将是大气压下的约 12.7 倍, 但实际干燥速度差却很小。其原因是, 上式适用于自由

扩散，而木材由于扩散路径较复杂，所以使得压力对扩散系数的影响程度较上式所表示的要大大减弱。

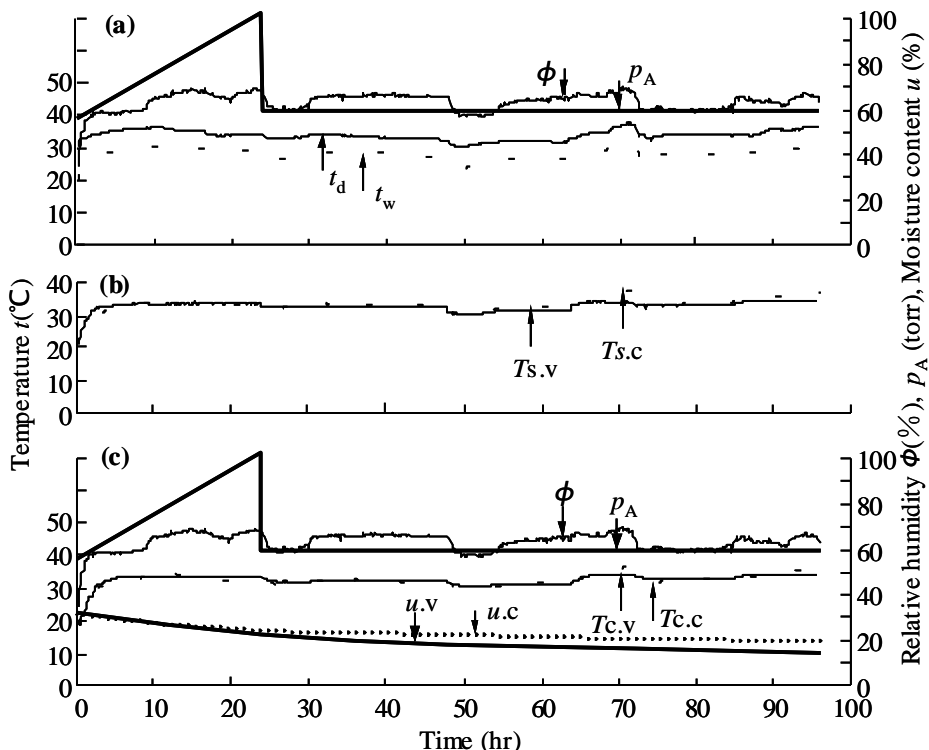


图 5 美国花旗松在真空干燥与常规蒸汽干燥过程中的温度、干燥曲线的比较
v:真空干燥, c:常规蒸汽干燥.

Fig. 5 Comparison of temperature, drying process during vacuum drying and that during kiln drying for Douglas fir v: vacuum drying, c: kiln drying.

T_d, t_w : Dry-bulb temperature and wet-bulb temperature in vacuum chamber, respectively. $T_{c.v}, T_{c.c}$: temperature of specimen at center during vacuum drying and kiln drying, respectively. $T_{s.v}, T_{s.c}$: temperature of specimen at surface during vacuum drying and kiln drying, respectively.

3 高频加热下真空罐内的相对湿度

3.1 实验方法

如图 6 所示，使用 $12 \times 12 \times 50\text{cm}$ 含有心材的日本柳杉方材，采用下述干燥条件实施干燥。即，试材中心温度 T_c 控制在 70°C ， T_c 下的饱和蒸汽压与材周围压力的差 (ΔP) 设定为 $50\text{torr}(6.7\text{kPa})$ 。检测干燥过程中材周围的干球温度 t_d 、湿球温度 t_w ，并计算相对湿度。

3.2 结果和分析

结果如图 7 所示。由此观察到，在高频发射停止后干球温度 t_d 没有发生多大变化，而湿球温度 t_w 却急剧下降。这表明，在电极板之外也存在泄漏的高频电磁场，湿球温度计上所缠纱布在高频发射时将被其加热，因而在高频发射中难于实现高精度湿球温度检测。为此，可以将高频完全停止发射时的相对湿度作为高频发射中的相对湿度。在本试验条件下，该相对湿度约为 80% 。

当然高频真空场中相对湿度的影响因子也如在项目 1 和 2 中所探讨的负压场中相对湿度的影响因子一样，罐内温度、材温、即干燥条件是决定性因子，加热升温将使相对湿度降低。据此以及项目 2 所探讨的木材水分扩散与周围环境压力的关系可推论，高频真空干燥过程中木材水分的迁移，除以水蒸气形式在内外压力差作用下流动外，还存在着表面蒸发及内部扩散迁移，且扩散迁移速度与木材环境压力成反比。这在实际干燥过程中是不容忽视的。

4 结 论

综合以上 3 项实验的结果及分析，概括出如下结论。

① 负压场中的相对湿度 ϕ 受罐体内温度和冷凝器冷却水温度差的影响很大。若冷却水温度一定，则罐体内水蒸汽分压一定，因而温度差越大，罐体内饱和蒸汽压越高， ϕ 越低。

② 相对湿度 ϕ 几乎不受罐内压力影响。

③ 罐体加热方式的负压干燥与使用相同干球温度、湿度条件的常规蒸汽干燥相比干燥速度快。其主要原因可用负压下分子平均自由路径增长，扩散系数增大来说明。抽真空的瞬间，木材内部渗透性非常好的组织内的很少一部分自由水也有被驱出的可能，但其影响很小。

④ 高频真空场下的相对湿度可以在高频发射完全停止期间内测算。

⑤ 高频真空干燥及其他加热形式的负压干燥过程中，木材中水分除以水蒸气形式在内外压力差作用下流动^[5]外，还存在着表面蒸发及内部扩散迁移，且扩散迁移量与木材环境压力成反比。

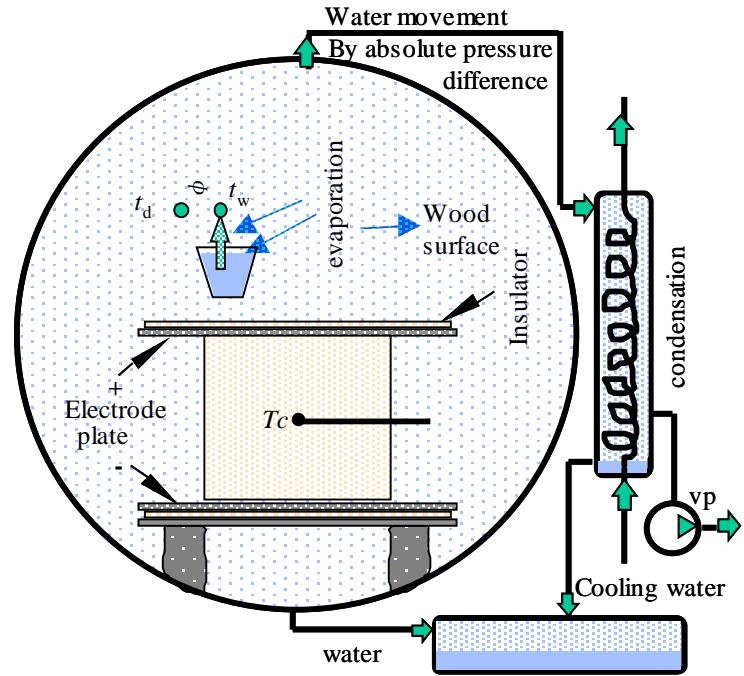


图6 高频真空干燥过程中罐内相对湿度的检测

Fig.6 The measured of the relative humidity in drying chamber during RF/Vacuum drying

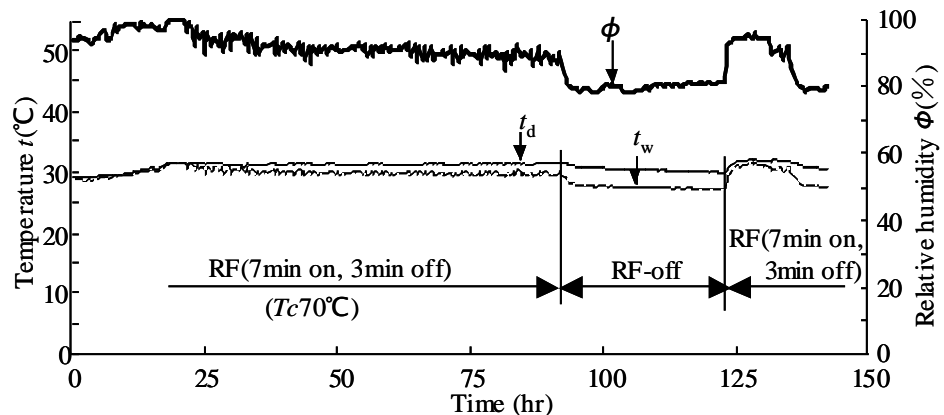


图7 高频真空干燥过程中罐内温度和压力的变化过程

Fig.7 Process of temperatures and the relative humidity in drying chamber

T_d, t_w : Dry-bulb temperature and wet-bulb temperature in drying chamber, respectively.
Drying condition: control temperature at center (T_c): 70°C, ambient pressure: 184 torr.

参考文献

- 1 寺澤眞等. 木材の高周波真空乾燥. 日本:海青社, 1998
- 2 JOHN F.SIAU. Wood:Influence of moisture on physical properties. Department of wood science and forest products, 1995
- 3 日本機械学会編. 湿度・水分計測と環境のモニタ. 技報堂出版株式会社, 1959
- 4 亀井三郎編. 化学機械の理論と計算. 産業図書株式会社, 1959
- 5 Yingchun CAI, Kazuo HAYASHI. Contribution of Evaporation from Transverse Section to Drying Rate during Radio-Frequency/Vacuum Drying, 木材学会誌, 2002, 48(2): 73-79