

# 升温速率对木材红外干燥影响的实验研究\*

褚治德 许铁柱 刘嘉智 王德新 王 群 吕 巍

(天津大学热能工程系, 天津, 300072)

**摘要**——针对木材干燥的红外工程应用, 提出了红外辐射脱水的物理模型, 测量了木板的多点温度、湿度和干燥速率, 总结了升温阶段的干燥规律。认为升温速率对木材红外干燥有重要的影响, 并从理论进行了分析。

**关键词**——干燥动力学, 红外干燥。

## 1. 引 言

已有的研究表明, 干燥分表面气化控制与内部扩散控制<sup>[1]</sup>。纸、皮革等物质属于表面气化控制, 其内部水分能迅速到达物料表面, 因此, 脱出的水分受物料表面水分的气化速率所限制。对木材、陶土, 肥皂、阿胶等物质, 其内部水分扩散速率较表面气化速率为小, 因此提高内部水分的扩散速率即成为干燥的决定因素。传统认为, 木材干燥速率是物料湿度梯度与温度梯度的函数<sup>[2]</sup>, 即

$$U = -K' \rho_0 \left( \frac{\partial W}{\partial x} + \delta \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (1)$$

式(1)中,  $U$  为干燥速率( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ),  $K'$  为导水系数( $\text{m}^2/\text{h}$ ),  $\rho_0$  为绝干木材的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\partial W/\partial x$  为含水率梯度( $\%/ \text{m}$ ),  $\partial t/\partial x$  为温度梯度( $^\circ\text{C}/\text{m}$ ),  $\delta$  为热湿传导系数( $1/^\circ\text{C}$ ), 负号表示水分从内向外移动。

式(1)对认识干燥机理是有益的。如何增加内部水分的扩散速率和控制含水率梯度与温度梯度, 使之与供热条件及物料的变化特性直接联系起来, 指导工程实验, 这一问题已为各国研究者所关注<sup>[3~6]</sup>。为此, 我们也开展了这方面的实验研究。

## 2. 干燥动力学实验

干燥过程是控制传热速率与传质速率的过程。由于对干燥速率基本机理了解得不充分,

---

本文 1989 年 3 月 27 日收到, 修改稿于 1990 年 5 月 31 日收到。

\* 国家自然科学基金资助项目。

干燥速率通常必须由实验方法确定<sup>[6]</sup>。

研究木板在干燥过程中任一瞬时的脱水量与各种支配因素的关系属于干燥动力学范畴,这些因素主要包括两方面,即物料本身的特性参数与外界供热的各种参数。为了全面认识干燥的动态特性及分析干燥机理,在实验中应提供干燥速率曲线、干燥曲线、辐射器温度曲线、干球与湿球温度曲线、功率曲线以及物料的表层与中层的温度曲线及升降温速率曲线,后者对认识干燥机理尤为重要。本实验研究均是在初始条件基本相同的情况下(包括木板尺寸、材质、初湿度等),改变供热方式,即干燥工艺参数,以寻求优质、高产、节能与节时的工艺方案,并探明其干燥机理。

## 2.1 升温速率对木材红外干燥动力学的影响

模拟工程干燥炉的实验装置见图 1。木板放在秤盘上,通过吊绳由 RO 161 型精密电子秤测量干燥速率,该秤分辨率为 0.1g;用 HP 3054 A 数据采集系统测量炉内干球湿球温度、木板上下表面温度(各 9 点)、三层温度(在木板侧面分三层,每层三点,深度均为 80 mm)及辐射板温度等;用 DWK-702 精密控温仪控制炉内的干球温度及升温速率;用 KPML-G 高温木材湿度计测量木板湿度。

对两块均为  $34 \times 160 \times 500 \text{ mm}^3$  的红松木板进行了快速与慢速升温对比实验,快速升温木板初湿度为 36% (干基,下同),木板表面升温速率为  $15^\circ\text{C}/\text{h}$ ,4 块辐射板供电电压为 120 V,空间电功率密度为  $1.4 \text{ kW}/\text{m}^3$ ;慢速升温,木板初湿度为 37%,木板表面升温速率为  $6^\circ\text{C}/\text{h}$ ,4 块辐射板从 40 V 开始供电,每小时升压 10 V,阶梯升压到 120 V,空间电功率密度从  $0.15 \text{ kW}/\text{m}^3$  逐步升到  $1.4 \text{ kW}/\text{m}^3$ 。

实验数据的对照见表 1。干燥速率对比曲线见图 2。从图 2 中可见,两曲线明显的差异在于快速升温干燥速率没有出现恒速干燥阶段,而且干燥周期长(26h)。从表 1 可见,快慢升温的终湿度分别为 2.5% 与 0.5%,但快速升温比慢速升温多耗时 7h,多耗电  $7.2 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,少脱水 17.4g,而且木板表面有裂纹;裂纹的原因主要是木板表面与中心层形成了大温差( $16^\circ\text{C}$ )。多次实验表明:此温差超过  $10^\circ\text{C}$  时就有产生表面裂纹的危险,而慢速升温时此温差只有  $5^\circ\text{C}$ 。

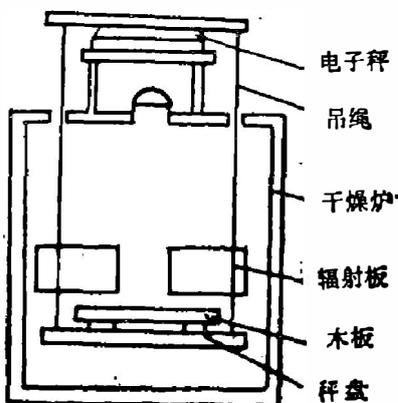


图 1 干燥实验装置

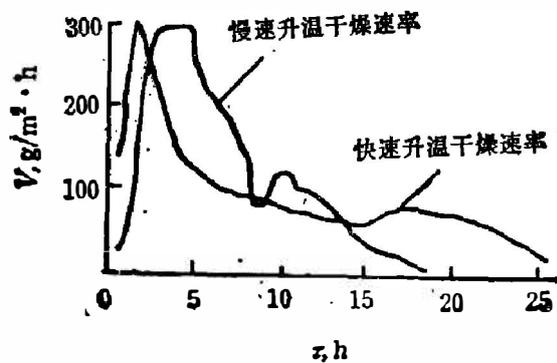


图 2 干燥速率对比曲线

Fig. 1 Drying experimental apparatus.

Fig. 2 The curves of drying rate in different conditions.

表 1 实验数据对照表  
Table 1 Experimental data.

试 参 数	快速升温数据					慢速升温数据				
热辐射器供电电压(V)	120	40	50	60	70	80	90	100	110	120
空间电功率密度(kW/m <sup>2</sup> )	1.40	0.15	0.21	0.34	0.47	0.61	0.77	0.95	1.15	1.40
干球升温速率(°C/h)	44					17				
木材表面升温速率(°C/h)	15					6				
初湿度(%)	36					37				
终湿度(%)	2.5					0.5				
供电时间(h)	23.5					19				
耗电量(kW·h)	21.8					14.6				
总干燥时间(h)	26					19				
总排出水分(g)	517.3					534.7				

图 3 是木板表面与中心层温度曲线。图 4 是木板干燥曲线。从图 4 可以看出，慢速升温曲线中 0~2h 为升速段，2~6h 为恒速段，6~16h 为降速段；从  $K_2$  点可得到临界含水量  $W_0$  为 17.4%，[而快速升温临界含水量( $W'_0$ )为 28%，此值太高。同时还可看出，快速升温造成不良后果，使整个干燥过程脱水缓慢。由此可见，木材红外干燥的升温速率对木材红外干燥动力学有着重要的影响，它关系到整个干燥过程的能耗、周期与干燥的质量，可见木板的升温速率与干燥速率及其内部水分的扩散速率均密切相关。

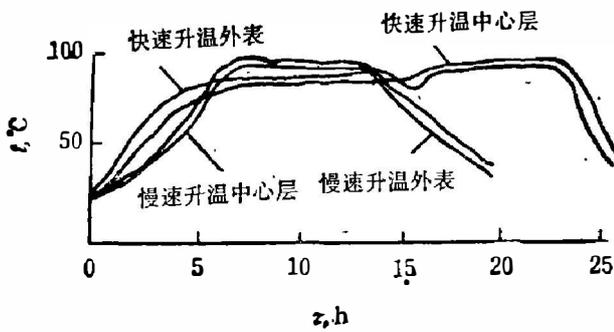


图 3 木板表面与中心层温度曲线

Fig. 3 Surface and center layer temperature curves of wood planking.

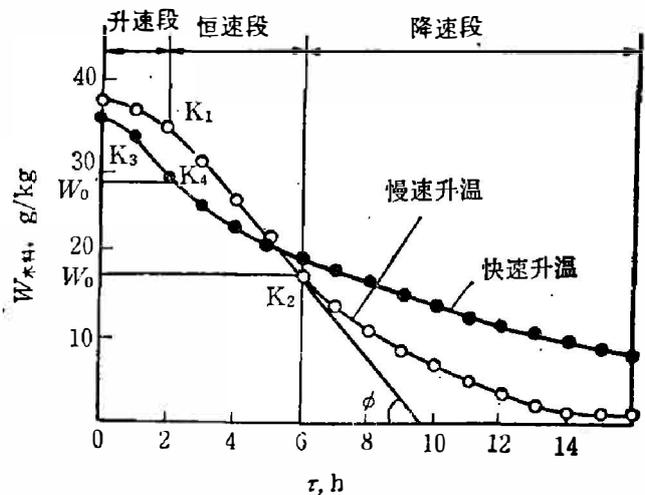


图 4 木板干燥曲线

Fig 4. Moisture contents as a function of time.

Joly et al.<sup>[7]</sup> 用红外灯两面照射 30 mm 厚山毛榉板，木板外表面升温速率为 150°C/h，中心层为 60°C/h，分别为正常升温速率的 15 倍与 6 倍，仅干燥 50 min 木板表面与中心层的温度差已达 40°C，为正常温差的 4 倍，这一实验的结果是耗能大，木板产生裂纹。这一结果与我们快速的实验结果是一致的。

### 2.2 升温速率对木材红外干燥工程的意义

天津家具七厂 38 m<sup>3</sup> 木材红外干燥炉的木板堆垛体积长×宽×高=6×1.5×1.6 m<sup>3</sup>，每

炉装 30 mm 厚松木或硬杂木板 30 层, 层与层之间用  $25 \times 40 \text{ mm}^2$  的垫条隔开以增加对流换热并防止翘曲, 其中堆垛四周与上层的木板易干, 而堆垛的中心最难干。每炉约测试 7000 个数据, 这里提供的是与本文密切相关的上层与堆垛中心层的木板温度。从图 5 可见, 改进前上层木板的升温速率为  $5^\circ\text{C}/\text{h}$ , 而堆垛中心只有  $3^\circ\text{C}/\text{h}$ , 两个温度曲线的最大温差达  $25^\circ\text{C}$ ; 改进后上层与堆垛中心木板的升温速率分别为  $7.6^\circ\text{C}/\text{h}$  与  $7.0^\circ\text{C}/\text{h}$ , 两曲线的最大温差只有  $12^\circ\text{C}$ 。改进前干燥周期为 85h, 每脱水 1kg 耗电  $1.5 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ; 而改进后干燥周期为 45h, 脱水 1g 仅需  $0.96 \text{ kW}\cdot\text{h}$ , 平均节电 35.6%, 节时 47%, 能源利用率为 77%。目前国际上用蒸汽法干燥木材, 对松木每脱水 1kg 耗电  $1.5 \text{ kW}\cdot\text{h}$ , 能源利用率为 49%, 而干燥硬杂木则需  $3\sim 5 \text{ kW}\cdot\text{h}$ , 能源利用率只有 20%。法国的对流加热真空干燥机, 从木材中脱水 1kg 耗电为  $3.5\sim 5.0 \text{ kW}\cdot\text{h}$ , 日本的微波干燥机从木材中脱水 1kg 耗电为  $3.0\sim 5.0 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。由此可见, 我们经改进的木材红外干燥炉的干燥指标是先进的; 使用过高或过低的木板升温速率干燥效果均不好, 适当的升温速率是干燥木板、优化传热传质的重要条件。

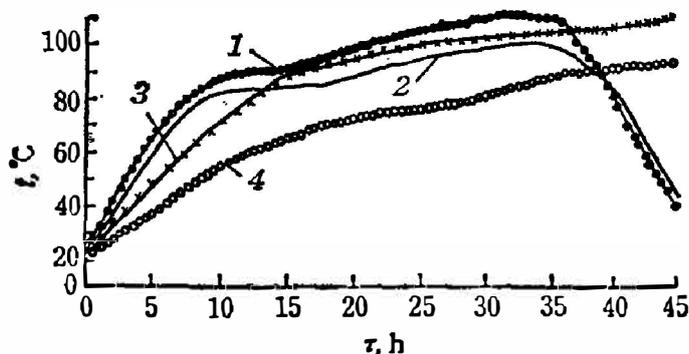


图 5 木板中心层温度对时间曲线

1—改进后 2 层中间板中心层; 2—改进后 15 层中间板中心层;  
3—改进前 2 层中间板中心层; 4—改进前 15 层中间板中心层

Fig. 5 Central layer temperature of planking as a function of time.

2.3 升温速率的综合实验分析

多次的实验及工程干燥测试表明, 对厚而难干的木材红外干燥, 升温率至关重要, 该类别物料的干燥属内部扩散控制过程, 而适当的干燥速率会使木板深层的传热传质得到改善, 木板表面与中心层的温差减小, 而过高的升温速率将使传热传质通道受到破坏, 表面温度高湿度低, 而中心层温度低湿度高, 形成很大的温度与湿度梯度, 致使木板裂纹翘曲。实验数据综合对照见表 2。从表 2 可见, 当快速升温(速率为  $15^\circ\text{C}/\text{h}$ )时, 耗电多、干燥周期长、木板裂翘; 慢速升温(速率为  $6^\circ\text{C}/\text{h}$ )时相对地干燥周期短, 耗电少且质量好; 但过慢的升温速率也是不好的。多次实验表明, 难干木板的升温速率以  $5\sim 10^\circ\text{C}/\text{h}$  为宜。

表 2 综合实验数据表

Table 2 Synthetic experimental data.

实 验	参 数				
	升温段时间 (h)	升温速率 ( $^\circ\text{C}/\text{h}$ )	单位脱水耗电 ( $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ )	干燥周期 (h)	干燥质量
快速升温	1.5	15	42	26	裂翘
慢速升温	3	6	27	19	好
改进前木材红外 外 层	15	5	1.5	85	外层干 垛中心湿
干燥炉 垛中心	20	3			
改进后木材红外 外 层	10	7.6	0.96	45	好
干燥炉 垛中心	11	7.0			

### 3. 理论分析

从宏观来看,一块被干燥的木板从辐射器获得热源  $Q_1$ , 从对流换热获得热源  $Q_2$ , 从湿蒸气获得辐射热流  $Q_3$ .

木板从辐射器获得热流  $Q_1$  为

$$Q_1 = \iint_F K_F C_0 \varepsilon_s \left[ \left( \frac{T_{Ri}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{Si}}{100} \right)^4 \right] dF (W), \quad (2)$$

式(2)中  $T_{Ri}$  为辐射器瞬时表面温度(K);  $T_{Si}$  为木板表面瞬时温度(K);  $K_F$  为面积换算系数,  $K_F = F_1/F$ ;  $F$  为木板表面积( $m^2$ ),  $F_1$  为辐射器的表面积( $m^2$ );  $C_0$  为辐射系数, 其值为  $5.67(W/m^2 \cdot K^4)$ ;  $\varepsilon_s$  为辐射器与木板的系统黑度<sup>[8]</sup>,

$$\varepsilon_s = \frac{1}{\left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \frac{1}{X_{FF_1}} + \frac{F_1}{F} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (3)$$

式(3)中  $\varepsilon_1$  为辐射器表面发射率;  $X_{FF_1}$  为辐射器对木板的角系数;  $F_1$  和  $F$  分别为辐射器及木板的表面积( $m^2$ );  $\varepsilon_2$  为木板发射率,  $\varepsilon_2 = f(\lambda, W, E)$ , 即  $\varepsilon_2$  是波长  $\lambda$  与木板含水量  $W$  及辐照密度  $E(kW/m^2)$  的函数. 实验表明, 过大的辐照密度会使木板表面及深层传热变坏, 而木板的发射率随木板含水量的上升而增大<sup>[9]</sup>.

炉内干球温度与木板表面的对流换热为  $Q_2$ ,

$$Q_2 = \iint_F \alpha (t_{di} - t_{si}) dF (W), \quad (4)$$

式(4)中  $\alpha$  为对流换热系数( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),  $t_{di}$  为干球瞬时温度( $^\circ C$ ),  $t_{si}$  为木板表面瞬时温度( $^\circ C$ ).

气体辐射对波长有强烈的选择性, 水蒸气的红外吸收波段为  $2.55 \sim 2.84 \mu m$ 、 $5.6 \sim 7.6 \mu m$ 、 $12 \sim 30 \mu m$ , 当辐射器表面温度为  $100 \sim 250^\circ C$  时, 干燥炉内的水蒸气会吸收红外辐射, 导致温度升高并改善木板的深层传热, 使木板获得水蒸气辐射热流  $Q_3$ <sup>[8]</sup>,

$$Q_3 = \iint_F \left[ \varepsilon_g \left( \frac{T_{di}}{100} \right)^4 - \alpha_g \left( \frac{T_{si}}{100} \right)^4 \right] C_0 dF (W), \quad (5)$$

式(5)中  $T_{di}$  为干球瞬时温度(K);  $T_{si}$  为木板表面瞬时温度(K);  $\alpha_g$  为气体吸收率;  $\varepsilon_g$  为气体发射率, 是空气湿度的函数,  $C_0$  为辐射系数.

辐射热流  $Q_1$ 、对流热流  $Q_2$  及气体辐射热流  $Q_3$  使木板温度升高, 并使木板表面水分气化,

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = \iiint_V C_w \rho_w' \frac{\partial t}{\partial \tau} dv + r_w \frac{dM}{d\tau}, \quad (6)$$

式(6)中  $C_w$  为木材比热( $kJ/kg \cdot K$ ), 是木材含水量与温度的函数<sup>[2]</sup>;  $\rho_w$  为木材的密度( $kg/m^3$ ), 是木材含水量的函数<sup>[2]</sup>;  $r_w$  为对应不同木材表面温度的气化潜热( $kJ/kg$ );  $M$  为木材脱去的水分( $kg$ );  $V$  为被干燥木材的体积( $m^3$ );  $\tau$  为干燥时间(h);  $t$  为木板的平均温度(K).

将式(3)~(5)代入式(6)并整理得

$$\frac{dM}{F d\tau} = K_F \frac{C_0 \varepsilon_s}{r_w} \left[ \left( \frac{T_{Ri}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{Si}}{100} \right)^4 \right] + \frac{\alpha}{r_w} (t_{di} - t_{si}) + \frac{C_0}{r_w} \left[ \varepsilon_p \left( \frac{T_{di}}{100} \right)^4 - \alpha_p \left( \frac{T_{si}}{100} \right)^4 \right] - \frac{C_w \rho_w V}{F r_w} \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right), \quad (7)$$

式(7)中,  $dM/F d\tau$  为干燥速率,即木材单位表面积气化的水分增量随对应采样时间的变化率,该公式即为适合于全干燥过程的非稳态干燥动力学方程,从该方程可看出:

(1) 干燥速率是多变参数的函数,它不仅与辐射器表面温度及供热方式有关,还与被干燥木料的吸收率、含水量、比热、密度及介质的温度和湿度有关。

(2) 对流换热与湿空气辐射换热不可忽视,尤其对工程干燥炉的堆垛木材的干燥。

(3) 木板的升温速率对整个干燥至关重要,过高的干燥速率使式(7)最后一项负值上升,因而干燥速率下降,过低的升温速率将使干燥周期加长,费时、费电,堆垛内外干燥速率不一致将会导致过干和不干的现象。合适的木板升温速率是保证厚而难干木板深层优化传热传质的重要标志,并为恒速干燥阶段的优化干燥打下了良好基础。

(4) 降温速率对木材的红外干燥亦有重要意义,实验表明,阶梯降温供热,不仅会节能(25%),而且物料温度不会继续上升,对需保持生理活性及有效成分的中药等干燥更有意义,降温速率增加会使式(7)最后一项正值变大,可提高干燥速率。

## 4. 结 论

(1) 干燥动力学实验研究表明,木材红外干燥分升速、恒速与降速三个干燥阶段,其中升速干燥阶段有重要意义。

(2) 对厚而难干的木板的红外干燥,升温速率至关重要,它是优化传热传质的重要标志,升温速率应控制在  $5 \sim 10^\circ\text{C}/\text{h}$ 。

(3) 木板表面与中心层的温度差应控制在  $10^\circ\text{C}$  以内。

(4) 小型工程木材红外干燥炉,建炉投资少、易操作、能耗低、周期短且干燥质量好。

## 参 考 文 献

- [1] 张洪元等, 化学工业过程及设备(下册), 北京: 高等教育出版社, 1957, p306.
- [2] 成俊卿主编, 木材学, 北京: 中国林业出版社, 1985, p825, 826, 491, 464.
- [3] 褚治德等, 天津大学学报, (1983), 1: 62~63.
- [4] Sanchez S. and Cervantes J., *Proceedings of the Fifth International Symposium on Drying, Dry'86*, Vol. II, (1986), p537~541.
- [5] Lydersen A. L., *Mass Transfer in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, 1983. 沈复等译, 工程传质, 北京: 轻加工出版社, 1988, p280.
- [6] Geankoples P., *Transport processes and unit operations*, Boston, 1978, p382.
- [7] Joly P. et al., *Theorie pratique d'conomie du sechage des bois*, H. Vial, 1980, p101, 宋 闯译, 木材干燥理论、实践和经济, 北京: 中国林业出版社, 1985, p134~136.
- [8] 杨世铭, 传热学, 北京: 高等教育出版社 1987, p307~330.
- [9] Дололиц Я. А., *Воздействие ИК-излучения на Бревесину*, Знание РИГА, 1973, p176, 195.
- [10] 褚治德等, 工程热物理学报, (1989), 3: 290~294.

---

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF TEMPERATURE-RISING RATE ONWOOD DRYING BY INFRARED RADIATION\*

ZHU ZHIDE, XU TIESHUAN, LIU JIAZHI

WANG DEXIN, WANG QUN, LU WEI

*(Department of Thermal Energy Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)*

### ABSTRACT

On the basis of infrared engineering application of wood drying, a physical model of wood drying by infrared radiation is presented. Multiple-point measurements for plank temperature, moisture and drying rate are made. Rules are summarized for wood drying in the temperature rising period. It is thought that the drying rate is one of the important factors in infrared wood drying, for which the theoretical analysis is made.

---

\* The Project Supported by National Natural Science Foundation of China.