

研究与开发

不同供热方式对木材干燥特性的影响

夏萍, 刘盛全, 周亮

(安徽农业大学, 合肥 230036)

摘要: 以松木和杨木为试材,研究热风对流、红外线和微波3种供热方式的干燥速度和能耗变化规律,分析供热方式、板材厚度和树种对干燥特性的影响。结果表明:1) 供热方式对干燥速度影响显著。热风对流和红外线的干燥速度与板厚之间关系显著;2) 微波干燥能耗低。3种供热方式的平均能耗比为1:1.01:0.64;3) 热风对流干燥周期长,易产生表裂和内裂缺陷;微波干燥速度快,但易出现内裂和炭化等缺陷,适于干燥厚板;红外干燥仅适于薄板干燥。

关键词: 木材干燥; 热风对流; 红外线; 微波; 供热方式; 干燥特性

中图分类号:TS652 文献标识码:A 文章编号:1001-8654(2007)01-0018-03

Effect of Different Heating Methods on Wood Drying Characteristics

XIA Ping, LIU Sheng-quan, ZHOU Liang

(Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China)

Abstract: A series of drying experiments was conducted on plantation grown Poplar (*Populus deltoids* cv. I-69-55) and Masson's pine (*Pinus massoniana*) lumber by three different heating methods, namely, convection, infrared and microwave. This paper determined the drying rate and energy consumption for those three drying methods, and also analyzed how the wood drying characteristics were influenced by the heating methods, wood species and lumber thickness. Results found that: 1) The heating method affected the drying rate significantly. One-way hyperbola model indicated that the relationship between heating method and drying rate was close for the convection and infrared method, but not clear for the microwave method; 2) The average energy consumption ratio of the 3 heating ways of convection, infrared and microwave, was 1:1.01:0.64; 3) As for the drying quality, convection drying had a long cycle which easily developed defects such as surface or internal cracks in the wood; microwave drying had a more rapid rate, but was likely to result in internal cracks or carbonization, so it was suitable for slabs; infrared drying was inferior in quality, and was only suitable for thin panels.

Key words: wood drying; convection; infrared; microwave; heating method; drying characteristic

根据供热方式的不同,木材干燥可分为热风对流干燥、微波干燥和红外线辐射干燥等^[1]。为了比较这3种供热方式对木材干燥特性的影响,笔者进行了干燥动力学对比试验,测定并分析树种、板材厚度对干燥速度和能耗的影响规律,研究不同干燥方法的最佳分界点,旨在为合理制定干燥工艺提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试件准备

速生马尾松(*Pinus massoniana*)、杨树(*Populus deltoids* cv. I-69-55),采自合肥,其气干密度分别为0.42和0.48 g/cm³。将原木加工成2 m长的木段,并锯解成10、20、30和40 mm等4种不同厚度规格的弦切板,厚度允许误差±0.1 mm。挑选质地均匀,无裂纹、树瘤、虫眼等缺陷的板材备用。为了减少锯材端头和侧面在干燥过程中的水分蒸发,每块试样的端头和侧面用耐高温硅胶封涂。

收稿日期:2006-01-12; 修改稿:2006-12-28

基金项目:国家自然科学基金项目“人工林马尾松、桉树生产应力形成机制与调控”(30371131)。

作者简介:夏萍(1964—),女,安徽农业大学副教授,博士。

1.2 仪器设备与方法选用

热风对流干燥:选用 DHG-9240A 型电热恒温鼓风干燥机,总功率为 400 W,干燥温度、风速可调。干球温度恒为 105 ℃,湿球温度为 85 ℃,风速为 1.0 m/s;微波干燥:选用格兰仕微波炉,额定功率 1 200 W,频率 2 450 MHz,试验采用 60%火力间歇加热;远红外干燥:选用 JH 型石英红外辐射加热器,功率为 400 W。

含水率测试采用称重法,能耗测定选用数字式功率表。热风对流、红外线辐射干燥的测试间隔为 1 h;微波干燥测试间隔为 10 min。采用混合正交表设计试验方案,每组试验重复 3 次,取其平均值。

2 结果与分析

2.1 干燥速度

2.1.1 随时间的变化 不同供热方式下,不同厚度的松木和杨木锯材的干燥速度,随时间的变化见图 1。

由图 1a 可知,热风对流供热方式下,木材含水率从 60%降至 8%需 8~13 h;全过程可分为加速、恒速和降速 3 个阶段。薄板材恒速阶段不明显,降速阶段占全过程的 60%,总体干燥时间长、速度慢。

图 1b 显示,在红外线供热方式下,木材含水率从 60%降至 8%需 6~14 h,无明显的恒速阶段,加速阶

段时间仅占全过程 10%。这是因为红外线辐射加热无需中间介质,直接传递热量,木材表面自由水可迅速蒸发。木材吸收到的辐射能主要集中在表层,而木材内部主要以水分传导的方式从表面传导热量,热转移的速度慢,对厚板的干燥时间长。

图 1c 表明,在微波供热方式下,木材含水率从 60%降至 8%仅需 40~60 min;全过程也可分为加速、恒速和降速 3 个阶段,其中加速阶段时间占全过程 10%,恒速阶段占 70%,总体干燥时间短、速度快。主要原因是,微波加热的热量是由木材内部蒸汽生成,并形成压力梯度,导致木材在失水过程中可保持较高的干燥速度,且基本处于恒速。从图 1c 还可以看出,微波加热恒速阶段(10~30 min)有一个明显的波动,这是因为干燥初期木材的含水率高于纤维饱和点,自由水迅速向外渗透,干燥速度上升并趋于稳定;随着木材内部温度迅速升至 100 ℃时,在蒸汽压力的作用下,大量水分排出,干燥速度再次上升,致使恒速阶段出现明显的波动。

2.1.2 随板材厚度、树种的变化 干燥速度是多因素函数,不仅与供热方式、加热器参数有关,还与干燥对象参数(板材含水率、树种、厚度)有关。为了比较不同厚度、不同树种板材的干燥速度,将试材初始含水率统一调为 60%,并设定最终含水率为 8%。图 2 为板材厚度、树种对其干燥速度的影响曲线。可以看出,热风对流和红外线供热方式下,干燥速度随板材厚度增加而降低;对 10 mm 薄板红外线的干燥速度比热风干燥方式快,说明红外适宜干燥薄板;微波干燥时,板材厚度对干燥速度的影响复杂,以 20 mm 厚板的干燥速度最快。

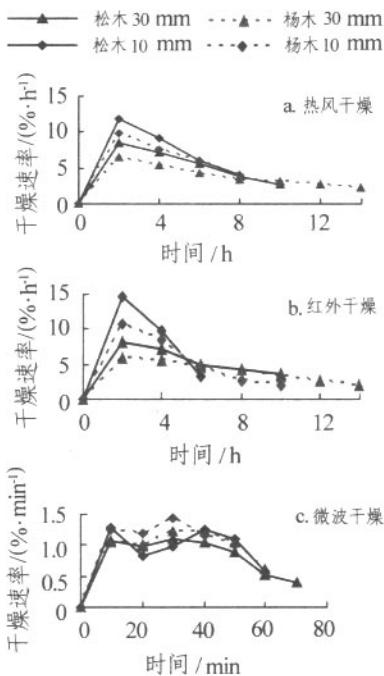


图 1 3 种供热方式的干燥速度随时间的变化

Fig. 1 Drying rate vs. time

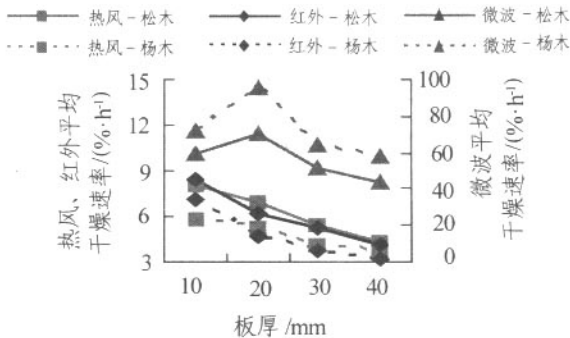


图 2 板材厚度、树种对干燥速度的影响

Fig. 2 Influence of wood thickness and species on drying rate

将干燥速度与板材厚度进行回归分析,结果(表 1)表明,对 2 种木材,热风对流干燥速度与板厚的相

关性均达 0.1 水平显著;红外干燥速度与板厚的相关性达 0.05 水平显著;微波干燥速度与板厚不相关。

表 1 干燥速度与板材厚度的回归分析
Tab. 1 Regression analysis between drying rate and lumber thickness

供热方式	树种	回归方程	相关系数	F 值	显著性
热风	杨木	$Y=3.86+44.76X^{-1}$	0.9266	12.15	*
对流	松木	$Y=3.36+25.72X^{-1}$	0.9096	9.59	*
红外	杨木	$Y=3.13+54.64X^{-1}$	0.9802	49.03	**
	松木	$Y=1.98+51.36X^{-1}$	0.9979	487.01	**
微波	杨木	$Y=12.40+207.98X^{-1}$	0.4808	0.60	
	松木	$Y=64.75+150.67X^{-1}$	0.3031	0.20	

注 1: Y 为平均干燥速度, (% · h⁻¹); X 为板材厚度, mm。
注 2: F_{0.05}(4, 2)=19.25, F_{0.1}(4, 2)=9.24; *、** 分别表示在 0.1 和 0.05 水平下差异显著。以下同。

表 2~4 为供热方式、板厚及树种对干燥速度影响的双因素方差分析。通过表 2~4 的方差显著性分析可知, 供热方式、加热器功率是影响干燥速度的主要因素。

表 2 供热方式与板厚双因素方差分析
Tab. 2 Variance of analysis on heat pattern and lumber thickness

差异源	离差平方和	自由度	均方平方和	F	显著性
供热方式	6550.6	2	3275.297	95.04702	***
板厚	192.81	3	64.27072	1.865095	
误差	206.76	6	34.45976		
总计	6950.2	11			

注: F_{0.01}(2, 6)=10.92, F_{0.05}(3, 6)=4.76; *、*、* 表示在 0.01 水平下差异显著。下同。

表 3 供热方式与树种双因素方差分析
Tab. 3 Variance of analysis on heat pattern and wood species

差异源	离差平方和	自由度	均方平方和	F	显著性
供热方式	16404.89	8	2050.611	38.4061	***
树种	103.8721	1	103.8721	1.945435	
误差	427.1419	8	53.393		
总计	16935.9	17			

注: F_{0.01}(8, 8)=6.03, F_{0.05}(1, 8)=5.32。

表 4 树种与板厚双因素方差分析
Tab. 4 Variance of analysis on wood species and lumber thickness

差异源	离差平方和	自由度	均方平方和	F	显著性
树种	4.161613	1	4.161613	17.05725	**
板厚	10.06134	3	3.353779	13.74617	**
误差	0.731937	3	0.243979		
总计	14.95489	7			

注: F_{0.05}(1, 3)=10.13, F_{0.05}(3, 3)=9.28。

2.2 干燥能耗

为了减少干燥缺陷, 本试验确定: 热风对流干燥、红外辐射干燥功率密度为 0.025 W/g, 微波干燥功率

密度为 0.2 W/g。考虑到在微波干燥中, 木材处于整体加热, 加热速度高于水分汽化和扩散速度, 因此, 微波干燥采用 60% 的火力间歇加热, 以增加水分继续汽化和中心水分向外迁移的时间, 减少干燥能耗^[2-5]。

图 3 为板材厚度、树种对干燥能耗的影响曲线。由图可见, 微波干燥能耗比热风对流、红外低。对 10 mm 薄板干燥, 3 种供热方式的平均能耗比为: 1 : 0.87 : 0.82; 20 mm 厚板干燥的能耗比为: 1 : 1.06 : 0.56; 40 mm 厚板的能耗比为: 1 : 1.10 : 0.60。

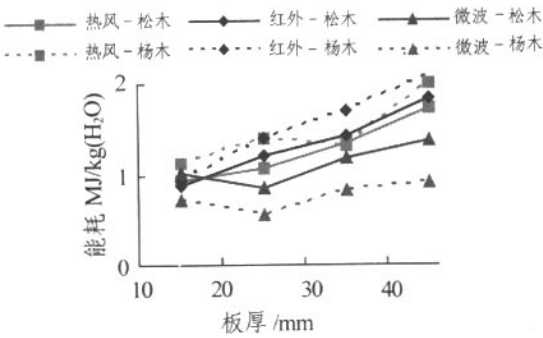


图 3 板材厚度对能耗的影响
Fig. 3 Energy consumption vs. lumber thickness

就树种而言, 在热风对流和红外干燥方式下, 松木比杨木的速度快、能耗低, 微波干燥则相反。其原因是微波干燥效果与树种密度有关, 通常密度越大, 木材的介电系数和损耗角正切也越大, 木材的加热速度就越快。杨木属散孔材, 具有良好的透气性及透水性^[6], 适于高温微波干燥。

2.3 干燥质量

1) 热风对流干燥易产生表裂和内裂缺陷, 其原因是, 在干燥初期高温使木材外表的水分迅速蒸发, 而内部仍处于冷湿状况, 存在温度梯度, 外部由于不能达到应有的干缩程度而产生表裂缺陷;

随着热量的传递, 木材内部水分开始蒸发, 同样由于不能达到应有的干缩程度而产生内裂缺陷。试验结果表明, 马尾松比杨木更易产生表裂和内裂缺陷。

2) 微波加热属于体积加热, 温度梯度小, 可解决带髓心方材的干燥问题。微波干燥速度快, 若工艺操作不当, 易出现内裂和炭化等干燥缺陷。其原因是在干燥初期, 木材内部水分形成大量的水蒸气, 过量的水蒸气压力易使木材内部沿木射线方向内裂; 干燥后期木材含水率低, 内部温度高, 由于过热易炭化。试验结果显示, 马尾松比杨木易产生炭化。

(下转第 23 页)

表 3 不同循环次数制得水煮再生刨花的筛分值
Tab.3 The screening value of once/twice recycled particles by water boiling

循环次数	筛分值/ %					
	≥10 mm	<10 mm, ≥5 mm	<5mm, ≥3 mm	<3 mm, ≥2 mm	<2 mm, ≥1 mm	<1 mm
一次	0.6	12.0	11.7	43.8	18.9	13.0
二次	0.4	11.6	10.3	41.5	16.1	20.1

表 4 不同循环次数压制的刨花板的检测结果
Tab.4 Properties of recycled particleboards by different circulate times

刨花板	厚度/ mm	密度/ (g·cm ⁻³)	MOR/ MPa	MOE/ MPa	IB/ MPa	TS/ %
对照的废旧刨花板	15.2	0.68	9.6	1368	0.14	10.0
一次循环再生	15.1	0.71	17.5	2920	0.56	2.9
二次循环再生	15.1	0.71	14.6	2448	0.44	3.4
GB/T 4897.3-2003	>13~20		≥13	≥1600	≥0.35	≤8.0

表 3 结果显示,经过二次水煮处理后,刨花形态损伤加重,长刨花减少,粉末、细小刨花增多,长短刨花配比相对较差。从表 4 可知,二次循环再生刨花板各性能比一次循环再生刨花板相比都略有降低,主要是由于刨花形态差异的缘故,但仍能达到 GB/T 4897.3-2003《刨花板 第 3 部分:在干燥状态下使用的家具及室内装修用板要求》指标值,且优于废旧刨花板的性能指标。

(上接第 20 页)

3) 红外加热透入木材的深度有限,辐射能主要集中在木材表层,而木材内部主要以水分传导的方式从表面传导热量,热转移的速度远低于辐射加热速度,因而在木材厚度方向形成较大的温度差和含水率差,导致锯材在干燥过程中易产生表面硬化、干裂和变形缺陷。由此可知,红外辐射加热仅适用于薄板的干燥。

3 结论

- 1) 热风对流、红外线干燥速度与板厚成反比;微波辐射干燥速度与板材厚度无关。
- 2) 微波干燥的能耗比热风对流、红外线辐射干燥的能耗低。不同树种之间,在热风对流和红外辐射干燥方式下,马尾松比杨木的速度快、能耗低;微波干燥则相反。
- 3) 热风对流干燥周期长,易产生表裂和内裂缺陷;微波加热属体积加热,适于干燥厚板,但其干燥速

4 结论

- 1) 废旧刨花板经过合理的处理,循环制造再生刨花板在工艺上可行。
- 2) 用水煮和高压水煮方法分离处理废旧刨花板,能较好地保持原有刨花形态,刨花质量好。出于产业化及操作安全性考虑,水煮方法最为可取。
- 3) 二次水煮循环制得的刨花在反复的高温 and 湿度作用下,刨花形态变差,长刨花减少,粉末、细小刨花增多。
- 4) 用水煮方法对废旧刨花板分离制备刨花,制造的一次循环再生刨花板的性能可达到 GB/T 4897.5-2003 的要求;二次循环再生刨花板比一次循环再生刨花板的性能有所降低,但仍能满足 GB/T 4897.3-2003 的要求。

参考文献:

[1] 刘守华. E₁ 级刨花板可产自城市废料[J]. 亚洲板材与家具, 2001(6):14-15.

[2] 崔积瑞,郭萌. 我国城市木材废弃物亟待重视——关于废旧木材资源再生利用的建议[C]. 中国林学会木材工业分会新世纪生物材料与木材工业可持续发展研讨会论文集,2004.

[3] 叶克林,于文吉,曲岩春. 热处理对废弃刨花板的刨花形态及其再循环利用性能的影响[J]. 木材工业,1998,12(6):7-9.

(责任编辑 向 琴)

度快,若工艺操作不当,易出现木材内裂和炭化等干燥缺陷;红外干燥成本较高,干燥质量较差,仅适于薄板干燥。

参考文献:

[1] 潘永康. 现代干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,1998:579-1021.

[2] Zhou B, Avramidis S. On the loss factor of wood during radio frequency heating[J]. Wood science and technology,1999(33): 299-310.

[3] 李大纲,李坚,刘一星. 木材微波加热过程中的表面温度和干燥速度[J]. 东北林业大学学报,2003,31(6):18-19.

[4] Lee H W. Combined microwave and convective drying of Korea [C]. 8th international IUFRO wood drying,2003:146-149.

[5] Rusli M S, Luecke W. Microwave-assisted convective drying of potato slices [C]. 12th international drying symposium, 2000: 2831.

[6] 鲍甫成,江泽慧. 中国主要人工林树种木材性质[M]. 北京:中国林业出版社,1998:211-259.

(责任编辑 向 琴)