

文章编号: 1000-5692(2006)05-0482-04

马尾松木材微波干燥特性的研究

刘志军^{1,2}, 李延军³, 张璧光², 刘智¹

(1. 河北农业大学 木材科学与工程系, 河北 保定 071000; 2. 北京林业大学 材料科学与技术学院, 北京 100083; 3. 浙江林学院 工程学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 研究了马尾松 *Pinus massoniana* 木材微波干燥速度、温度梯度和含水率梯度随时间的变化规律。实验结果表明, 微波连续干燥过程明显分为加速段、等速段和减速段3个阶段, 等速段在整个干燥过程中占的比例最大。微波干燥过程中, 温度的变化大致分为初期升温、等温和后期升温3个阶段, 初期升温和等温阶段木材内温度分布比较均匀, 后期升温阶段木材内的温差逐渐增大。微波干燥过程中, 在整个横断面上, 木材初含水率梯度没有被加大, 而是被均匀化, 甚至还出现木材表面含水率提高的情况。图6 参10

关键词: 林业工程; 马尾松; 微波干燥; 干燥特性; 含水率梯度

中图分类号: S782.31 **文献标识码:** A

木材微波干燥是一种较新的干燥技术, 它具有干燥速度快, 对环境友好等优点。我国科技工作者在木材微波干燥领域做出了许多有意义的探索和尝试, 他们的研究主要集中在微波干燥设备、工艺和微波电磁场作用下木材的介电特性^[1~6], 在木材微波干燥的传热传质理论方面研究较少。作者研究了微波加热条件下, 马尾松 *Pinus massoniana* 板材干燥速度、温度场和含水率场, 现报道如下, 为制定木材微波干燥工艺提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试材为马尾松成熟材, 采自广西壮族自治区柳州市。根据试验要求将原木加工成厚度为 50 mm 和 65 mm, 长度为 2 m 的整边板, 放入冰柜中保存备用。试验时, 再将整边板锯制成厚度为 45 mm 和 60 mm, 长度为 100, 200, 300 mm 表面光滑的试件。

1.2 试验装置

试验装置如图 1 所示。该试验装置主要由质量称量系统、温度检测系统、微波加热系统和数据采集系统构成。为避免微波场对测量系统的影响, 用铝箔纸对温度传感器和质量传感器进行包裹, 屏蔽微波场。所用微波炉为家用松下变频微波炉, 在试验前对微波炉进行了改造, 使之能满足试验过程中对质量和温度实时检测的要求。

1.3 试验方法

1.3.1 温度的测定方法 先用环氧树脂和铝箔对尺寸(长 100 mm, 宽 100 mm, 高 45 mm)和初含水率

收稿日期: 2005-10-28; 修回日期: 2006-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(598760005)

作者简介: 刘志军, 副教授, 博士研究生, 从事木材干燥技术研究。E-mail: meckxxl@126.com

相同的木材试件进行封闭处理(端面 and 侧面), 使水分迁移和热量传递仅沿着木材的厚度方向进行, 待树脂充分固化后在已封闭的侧面上用直径为 1 mm 的钻头, 在木材厚度方向钻 3 个孔, 孔的深度为试件宽度的一半, 孔中心距表面的距离分别为 2, 15 和 30 mm, 然后再埋入直径为 1 mm 的双铂铑热电偶, 分别测定在微波干燥过程中木材表层、中间层和中心层的温度。试验分 3 组进行, 3 组微波功率分别为 200, 500 和 800 W, 每组 2 块, 测量温度取 2 次测量温度的平均值。

1.3.2 质量连续实时检测方法 微波功率 600 W, 连续加热。将规格 300 mm×100 mm×60 mm (长×宽×高), 初含水率为 40%~47% 的试件的端面, 用环氧树脂和铝箔封闭, 使能量和水分都沿着木材的厚度方向进行传递。封闭前后称取树脂的质量。待树脂充分固化后, 用天平准确称取试件的初质量, 再将木材试件置于微波炉内的托盘上(材料为聚四氟乙烯), 通过与托盘相连的质量传感器可以实现对微波干燥过程中木材试件的实时检测。

1.3.3 含水率分布的测定方法 试验材料规格为: 200 mm×100 mm×60 mm。由于在微波干燥过程中, 总的干燥时间很短, 若从微波炉中取出试件, 再锯解和封边, 等胶层固化后再继续干燥, 测得的木材分层含水率与实际值会相差很大。为了尽量减小试验偏差, 在试验前将厚度为 60 mm, 宽度为 100 mm, 长度为 1 200 mm 的一块板上去掉 100 mm 端头后依次截取长度为 200 mm 的试材 5 块, 其中一块测定初始状态时木材含水率分布, 另外 4 块分别用环氧树脂和铝箔进行封闭处理, 分别测定经不同时间微波干燥后木材内的含水率分布。4 块试件的微波处理时间分别为 5, 10, 15 和 20 min, 在每块试件中间锯取 40 mm 宽的含水率试片, 并均分劈为薄的分层含水率试片, 用称量法测定含水率。

2 结果与分析

2.1 木材微波干燥过程

图 2 是微波干燥过程中典型的干燥速率随时间的变化曲线。从图 2 中可以看出, 木材微波干燥过程可以分为 3 个阶段: 加速段(干燥速率逐渐增加)、恒速段(干燥速率保持恒定)和减速段(干燥速率逐渐降低)。木材吸收的微波能大致可以分为 2 部分: 一部分用于蒸发木材中的水分, 另一部分用于提高湿木材的温度。在加速段, 微波辐射提供的热量主要用来升高湿木材的温度, 用于蒸发水分的能量较少; 在恒速段, 木材吸收的微波辐射能主要用来蒸发木材中的水分, 木材中的温度基本维持不变。由于在微波干燥过程中, 木材得到热量不需要经历“漫长”的对流换热和热传导过程, 微波能以电磁波的形式直接穿透到木材的内部, 并通过电磁场与水分子、木材的极化分子(主要为羟基)间的直接相互作用, 能瞬间将电磁能转化为热能, 使湿木材的温度迅速升高, 水分快速迁移和蒸发。因此, 加速段在干燥过程中所占的比例较小, 而恒速段在整个干燥过程中所占的比例非常大, 这与常规干燥中恒速段所占的比例小, 甚至不存在恒速干燥段的特点形成了鲜明的对比^[7,8]。在干燥后期, 木材中的自由水已经大部分被排除, 此时, 辐射的微波能除了少部分用于蒸发木材中残余的水分外, 大部分能量被用来提高木材的温度, 干燥速率逐渐下降^[9]。微波加热过程中, 干燥速率有些波动, 其原因一方面可能是由于微波场不是固定的, 而是不断变化的, 另一方面木材含水率和木材结构的不均匀性, 也会导致木材内水分移动的变化。

2.2 微波干燥过程中木材内的温度变化

从图 3、图 4 和图 5 可以看出, 微波干燥过程中, 木材温度的变化大致分为初期加热升温、等温

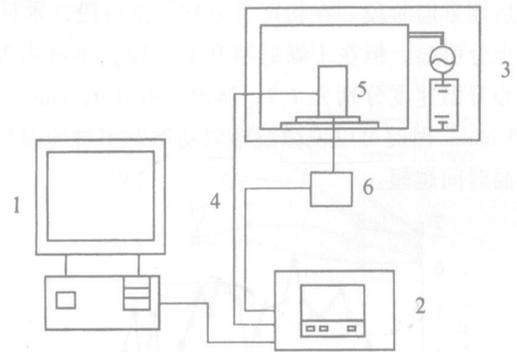


图 1 木材微波干燥试验装置原理图

1. 计算机; 2. 数据采集器; 3. 变频微波炉;
4. 温度传感器; 5. 试材; 6. 质量传感器

Figure 1 Schematic diagram of experimental apparatus for wood microwave drying
(1. computer; 2. data acquisition instrument; 3. frequency conversion microwave oven; 4. temperature sensor; 5. test piece; 6. weight transducer)

和后期升温阶段。在初期升温和等温阶段，木材内温度分布比较均匀，从中心到木材表面温度梯度并不十分明显，但在干燥后期升温阶段，木材内温度差有增大趋势。功率分别为 200, 500, 800 W 时，中心升温速度分别为 7.7, 14.0, 40.0 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ，木材中心保温(100~110 $^{\circ}\text{C}$)时间分别为 8.5, 6.0 和 1.5 min。因此可以说微波辐射功率对木材的温变特性有明显的影响，功率密度越大，升温速度越快，等温时间越短。

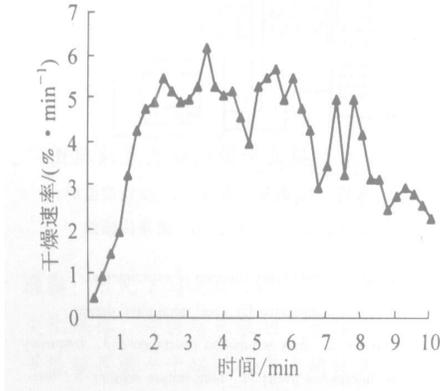


图2 微波干燥过程中干燥速率随时间变化
Figure 2 Relationship between drying rate and drying time in microwave drying

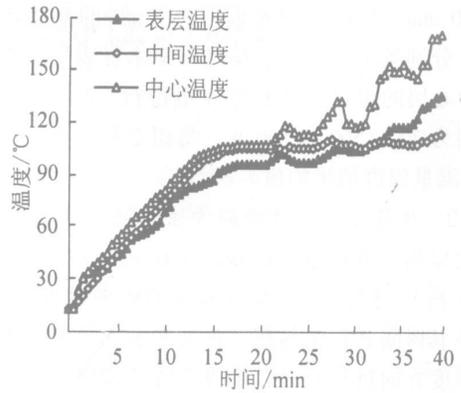


图3 微波干燥条件下木材内部温度分布随时间变化(功率 200 W, 厚度 45 mm)
Figure 3 Change of wood internal temperature with time during microwave heating (power 200 W, thickness 45 mm)

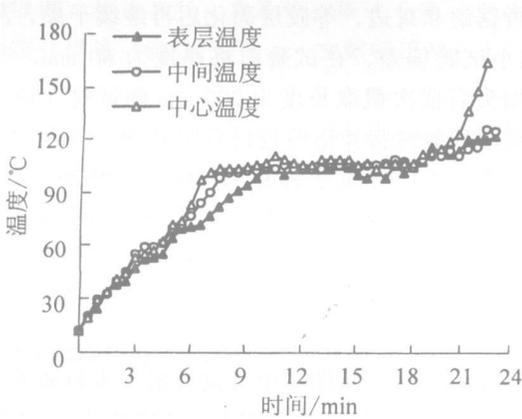


图4 微波加热条件下木材内部温度分布随时间的变化(功率 500 W, 厚度 45 mm)
Figure 4 Change of wood internal temperature distribution with time during microwave heating (power 500 W, thickness 45 mm)

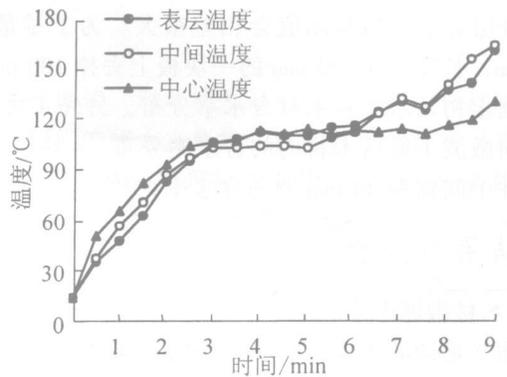


图5 微波加热条件下木材内部温度分布随时间变化(功率 800 W, 厚度 45 mm)
Figure 5 Change of wood internal temperature with time during microwave heating (power 800 W, thickness 45 mm)

2.3 微波干燥过程中木材内含水率的分布与变化

从图6可以看出，在微波干燥过程中，木材内部的水分分布与常规干燥中木材内部的水分分布规律存在很大的不同。在常规干燥中，通常情况下内部水分移动的速度小于木材表面蒸发速度，表层迅速达到纤维饱和点以下，与中心部位形成较大的含水率梯度。在微波干燥过程中，木材内的含水率分布却表现出了不同的规律：在整个横断面上，木材内原有的含水率梯度没有被加大，而是被均匀化，甚至在干燥过程中还出现木材表面含水率提高的情况。这一结果充分说明在微波干燥过程中，木材内部水分迁移不是受到含水率梯度的作用，而是由于微波能量以辐射的方式直接穿透到木材的内部，迅速产生大量的热，使木材细胞腔内的水分迅速蒸发，压力急剧升高^[10]。木材内部的水分在木材内外压力差的作用下快速“涌”出，当木材表面水分蒸发的速率小于木材内水分“涌”出的速率时，水分就会在木材表面发生“积聚”现象，木材表面的含水率会超过其初始含水率。

3 结论

从上述实验可得出以下结论: ①微波连续干燥过程明显可以分为 3 个阶段: 加速段、等速段和减速段, 其中等速段在整个干燥过程中占的比例很大。②微波干燥过程温度的变化大致分为 3 个阶段: 加热升温段、等温段和后期升温段。在加热升温段和等温阶段, 木材内温度分布比较均匀, 在干燥后期升温阶段, 温差有增大的趋势。③在微波干燥过程中, 在整个横断面上, 木材内原有的含水率梯度没有被加大, 而是被均匀化, 甚至还出现木材表面含水率提高的情况。

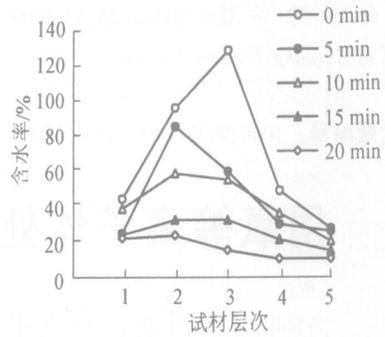


图 6 微波干燥过程中木材内部含水率分布的变化(功率 200 W, 厚度 45 mm)

Figure 6 Change of wood internal MC distribution during microwave heating (power 200 W, thickness 45 mm)

参考文献:

- [1] 朱正贤, 熊民棣, 姜日顺, 等. 木材微波干燥的研究[J]. 东北林业大学学报, 1985, 13(4): 1-9.
- [2] 佟永会. 木材微波干燥工艺的研究[J]. 东北林业大学学报, 1986, 14(3): 67-73.
- [3] 刘昌铎. 木材微波干燥技术[J]. 木材工业, 1996, 10(3): 30-31.
- [4] 朱孝生, 张少纯. 锯材微波干燥机的研究[J]. 林业机械与木工设备, 1997, 25(9): 11-13.
- [5] 王延魁, 时维春. 木材微波干燥的极化理论[J]. 东北林业大学学报, 1988, 16(3): 41-49.
- [6] 时维春. 电磁波场中木材的介质损耗与电学性质[J]. 东北林业大学学报, 1984, 12(2): 99-103.
- [7] 李延军, 马掌法, 张宏, 等. 狄氏黄胆木干燥工艺的初步研究[J]. 浙江林学院学报, 2001, 18(4): 384-388.
- [8] 余德新, 范子. 阔叶材热板干燥技术初探[J]. 浙江林学院学报, 1991, 8(2): 141-146.
- [9] LIU J, ZHENG H, HANG B G, et al. Mechanism of internal moisture migration in wood during microwave drying [C] //GU B, ZHAO Y, LI T. The 9th International Iufro Wood Drying Conference. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005: 200-225.
- [10] 蔡英春, 林和男, 刘一星. 高频真空干燥过程中木材内部水分移动的机理[C] //朱正贤. 第九次全国木材干燥学术讨论会论文集. 哈尔滨: 东北林业大学, 2003: 202-211.

Microwave drying properties of *Pinus massoniana* lumber

LIU Zhi-jun^{1,2}, LI Yan-jun³, ZHANG Bi-guang², LIU Zhi¹

(1. Faculty of Wood Science and Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China; 2. School of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. School of Engineering, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: The variational regularity of drying rate, temperature and moisture distribution with time during wood microwave drying was studied. The objective is to provide the theoretic accordance for microwave drying technology. The results show that the continuous microwave drying process can be divided into three stages: accelerating (speed-up) stage, constant-speed stage and speed-down stage. The constant-speed stage occupied the largest proportion. In the microwave drying process, temperature change process can be divided into coming-up stage, isothermal stage, and late coming-up stage. The temperature inside of the lumber was even both in coming-up stage and isothermal stage, and in the latter coming-up stage, the wood temperature was increased, and so as the temperature difference. The original moisture content gradient was not raised but was averaged in the whole cross section, and the surface moisture content was increased. [Ch, 6 fig. 10 ref.]

Key words: forest engineering; *Pinus massoniana*; microwave drying; drying properties; moisture content gradient