

研究与开发

马尾松微波间歇干燥对干燥效率与速率的影响

刘志军^{1,2}, 张璧光², 李延军³

(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. 浙江林学院工学院, 浙江临安 311300)

摘要: 分析马尾松木材微波干燥速率随时间的变化规律, 比较微波连续辐射和间歇辐射对木材干燥速率和微波能利用效率的影响。结果表明: 木材微波干燥过程可以分成加速段、恒速段和减速段 3 个阶段; 在微波干燥过程中, 木材含水率在纤维饱和点以上时, 其平均干燥速率和水分蒸发效率比在纤维饱和点以下时的高; 采用适当间歇辐射对木材输入微波能, 微波能利用率较高。

关键词: 马尾松; 微波干燥; 间歇干燥; 干燥速率; 水分蒸发效率

中图分类号: S781.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8654(2006)04-0013-03

Drying Efficiency and Rate for Masson Pine Using an Intermittent Microwave Drying Method

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

(1. Faculty of Wood Science and Engineering, Hebei Agriculture University, Baoding 071000, Hebei, China;
2. College 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 authors analyzed the relationship between drying rate and time in microwave drying. They also studied the effects between continuous and intermittent microwave drying with respect to drying rate and microwave utilization efficiency. The results showed that: 1) the microwave drying process of wood was divided into three stages; accelerating, constant-speed and decelerating; 2) during the microwave drying process, the average drying rate and specific moisture evaporation rate were higher when the wood moisture content was above the fiber saturation point than when below it; 3) using the proper radiation frequency to obtain the optimum microwave energy utilization efficiency, such as one minute on and two minutes off.

Key words: *Pinus massoniana*; microwave drying; batch drying (intermittent drying); drying rate; moisture evaporation rate

木材干燥工序是木材加工中极为重要的一环, 不仅消耗能源多, 工序周期长, 而且干燥质量直接关系到后续加工及最终产品质量。近年来随着技术的进步, 微波干燥在木材干燥中的应用发展较快。与常规对流干燥相比, 微波干燥具有干燥速度快、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

出了许多有意的探索和尝试, 特别是在微波干燥设备、连续干燥工艺, 以及木材在微波电磁场作用下的介电特性等方面取得了显著的成绩^[1-2]。但目前微波干燥在应用方面也还存在一些问题, 与传统能源相比, 微波干燥耗电量大, 干燥成本较高。

本研究采用适当间歇的方式对木材进行微波加热干燥, 旨在探寻既可保证木材干燥质量, 又能提高微波能利用率的方法。

收稿日期: 2005-10-20; 修改稿: 2006-06-23

作者简介: 刘志军 (1965—), 男, 河北农业大学副教授, 博士研究生。

1 材料与方法

1.1 材料

试材为马尾松(*Pinus massoniana*), 采自广西柳州速生人工林。试验时将木材锯制成规格为 100 mm×100 mm×45 mm(长×宽×厚)的试件, 其初含水率为 37%~47%。

1.2 方法

用环氧树脂和铝箔封闭试件的端面和两个侧面, 使能量和水分沿着木材的厚度方向传递。封闭前后称质量, 确定树脂的质量; 待树脂充分固化后, 再称取试件的初始质量; 然后将试件置于微波炉内的托盘(材料为聚四氟乙烯)上, 通过与托盘相连的传感器, 实现对微波干燥过程中试件质量的实时检测。

微波辐射方式有 6 种: 连续辐射, 辐射 1 min 停 1 min, 辐射 1 min 停 2 min, 辐射 2 min 停 1 min, 辐射 1 min 停 4 min 和辐射 4 min 停 1 min。辐射功率均为 600 W。

当试件在每个辐射周期的质量减少量明显呈下降趋势时, 停止微波辐射。称取试件干燥后的质量, 再将其放入温度为 $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至绝干。根据试件的绝干质量, 计算其在干燥各个阶段的含水率, 绘制干燥曲线。每一个试件重复试验一次。

2 试验装置

试验所用的微波干燥装置原理如图 1 所示, 主要有质量连续实时检测系统、微波加热系统(家用微波炉改造而成)和数据采集系统构成。质量连续实时检测系统由托盘 4 和质量传感器 5 组成; 微波加热系统由微波炉 2 和稳压器 7 构成。微波炉(松下变频微波炉, 型号: NN-K5540MF)的额定功率为 1 000 W, 微波功率设置共为 5 档。

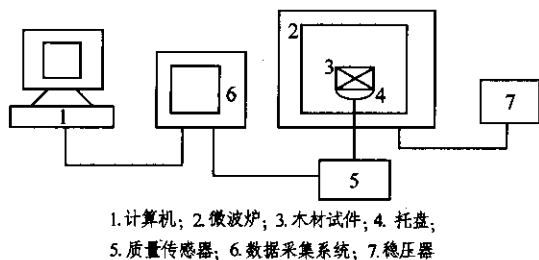


图1 木材微波干燥试验装置原理图

Fig. 1 Apparatus for wood microwave drying experiment

3 结果与分析

3.1 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-时间曲

线。从图中可以看出, 根据木材干燥速率的变化, 微波干燥过程可以分成 3 个阶段: 加速段、恒速段、减速段。木材吸收的微波能大致可以分为两部分: 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。

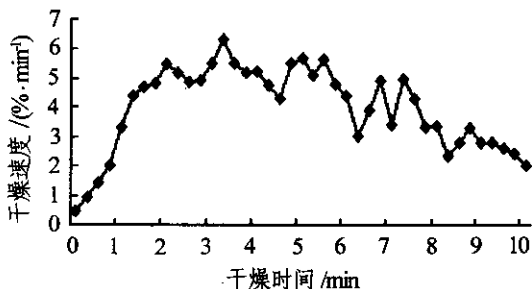


图2 微波干燥过程中干燥速率随时间变化曲线

Fig. 2 The relationship between drying rate and drying time in microwave drying process

在加速段, 微波辐射能量主要用来升高木材的温度, 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, 使木材的温度迅速升高, 水分快速迁移和蒸发^[3]。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比例小, 甚至不存在的特点, 形成了鲜明的对比。

在干燥的后期, 木材中的水分已经大部分排除完毕, 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, 大部分的能量被用来提高木材的温度, 干燥速率逐渐下降。

3.2 微波辐射方式对木材干燥速率和微波能利用率的影响

由图 3 可以看出, 当微波连续辐射时, 木材的干燥时间明显缩短, 干燥速率显著增加。这是因为在辐射功率相同时, 辐射的时间越长, 木材吸收的热量越多, 温度升高的速率越大, 水分蒸发的速度越快; 另外, 木材内部快速的水分蒸发使细胞内形成更高的压力, 与外界形成更大的总静压力差, 促使木材内部水分向表面迁移的速率大大加快^[4-6]。在这两方面的共同作用下, 木材的干燥速率随着单位时间内微波辐射能的增加而增加。

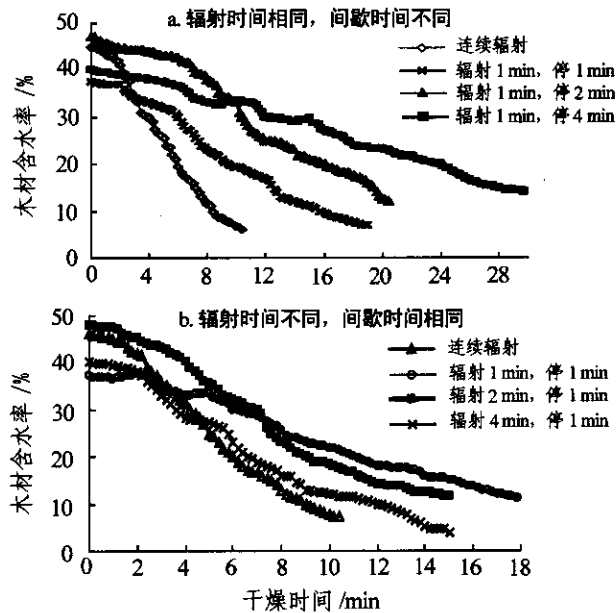


图 3 不同微波辐射条件下木材含水率随时间变化曲线
Fig. 3 The relationship between wood moisture content and drying time in different microwave radiation methods

从图 3 中还可以看出, 间歇输入微波能时, 木材内含水率随干燥时间呈明显的梯状变化。当输入微波能时, 木材内含水率明显下降; 当停止微波辐射时, 木材内的含水率缓慢下降。这是因为即使停止微波辐射, 木材内的温度仍然很高, 水分在热能的作用下缓慢地向外移动。

试验结果还表明, 木材含水率在纤维饱和点以上时, 其平均干燥速率和水分蒸发效率, 均比在纤维饱和点以下时要高。根据木材中水分的存在状态和Dent 水分吸着理论, 木材中存在自由水、水蒸汽和吸着水。由于吸着水被吸着在木材细胞壁中的初级和次级吸着点上, 其热力学性质与自由水、水蒸汽的热力学性质存在差异, 如具有较高的束缚能, 其水分的迁移能力弱等^[7]。因此, 与自由水相比, 排出单位质量的吸着水, 需要较长的时间和更多的微波能。

由表 1 可看出, 6 种辐射方式下木材的平均干燥

表 1 不同微波辐射方式木材平均干燥速率和水分蒸发效率的比较

Tab. 1 The comparison of average drying rate and moisture evaporation rate in different microwave radiation methods

辐射方式	初含水率/%	终含水率/%	平均干燥速率/(%·min ⁻¹)	水分蒸发效率/(kg·(kw·h) ⁻¹)
连续辐射	43.81	4.52	4.37	0.7379
辐射 1 min 停 1 min	36.29	9.13	1.89	0.6444
辐射 1 min 停 2 min	45.35	12.24	1.84	0.9225
辐射 2 min 停 1 min	42.34	6.68	2.97	0.7289
辐射 1 min 停 4 min	39.47	13.80	1.03	0.8304
辐射 4 min 停 1 min	39.60	10.38	3.25	0.6603

速率由大到小的顺序为: 连续辐射, 辐射 4 min 停 1 min, 辐射 2 min 停 1 min, 辐射 1 min 停 1 min, 辐射 1 min 停 2 min, 辐射 1 min 停 4 min; 说明单位时间内输入的微波能越多, 干燥速度越快。

6 种辐射方式下的水分蒸发效率由大到小的顺序为: 辐射 1 min 停 2 min, 辐射 1 min 停 4 min, 连续辐射, 辐射 2 min 停 1 min, 辐射 4 min 停 1 min, 辐射 1 min 停 1 min。由此可知, 采用间歇辐射干燥木材时, 使输入的微波能与木材升温和水分蒸发所消耗的能量相匹配, 不仅可以提高微波能的利用效率, 达到节能的目的; 同时, 还可使成材内部的水分有足够的时间移动到成材表面, 减小成材横断面上的含水率梯度, 防止表层和内部的不均匀收缩。

4 结论

- 1) 微波连续干燥过程可以分为 3 个阶段: 加速段、恒速段和减速段, 其中恒速段所占比例较大。
- 2) 在微波干燥过程中, 木材含水率在纤维饱和点以上时的平均干燥速率和水分蒸发效率, 比其在纤维饱和点以下时高。
- 3) 在本试验条件下, 采用间歇式, 辐射 1 min 停 2 min 对木材输入微波能, 微波能利用率最高。

参考文献:

[1] 李贤军, 张璧光. 微波加热及木材微波干燥的应用[J]. 干燥技术与设备, 2003, 1(2): 11-14.

[2] 刘昌铎. 木材微波干燥技术[J]. 木材工业, 1996, 10(3): 30-31.

[3] Yasuo Kawai, Yoshinori Kobayashi, Misato Norimoto. Hybrid drying with high-frequency and hot air under atmospheric pressure II: Relationship between temperature and pressure during high-frequency heating in square *Cryptomeria japonica* lumber[J]. The Japan wood research society, 2001, 47(1): 7-13.

[4] Yasuo Kawai, Yoshinori Kobayashi, Misato Norimoto. Hybrid drying with HF heating and hot-air under atmospheric pressure III: Relationship between pressure and water movement in *Cryptomeria japonica* square lumber[J]. The Japan wood research society, 2002, 48(3): 136-144.

[5] Yasuo Kawai, Yoshinori Kobayashi, Misato Norimoto. Hybrid drying with high-frequency heating and hot air under atmospheric pressure IV: water movement in *Cryptomeria japonica* wood during high-frequency heating[J]. The Japan wood research society, 2003, 49(1): 18-21.

[6] 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]. 哈尔滨: 第九次全国木材干燥学术讨论会论文集, 2003: 202-211.

[7] 赵广杰. 木材细胞壁中吸着水的介电弛豫[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.

(责任编辑 向 琴)