

微波真空干燥过程中木材内部的温度分布

李贤军^{1,2} 张璧光² 李文军² 李延军³

(1 中南林业科技大学材料科学与工程学院 2 北京林业大学材料科学与技术学院 3 浙江林学院工程学院)

摘要:该文以马尾松木材为研究对象,对微波真空干燥过程中木材内部的温度分布进行了研究.结果表明:在一定的辐射功率(160 kW/m^3)和厚度(60 mm)范围内,木材内的温度分布比较均匀,基本不呈现出整体性的温度梯度;在干燥的后期,木材内温度分布的局部不均匀性有加大的趋势;在微波真空干燥过程中,木材内部的温度差是由于微波场和湿木材本身不同部位介电特性的差异引起的,这种不均匀性以局部的形式存在于木材中.

关键词:微波真空, 木材, 干燥, 温度分布

中图分类号:S781.71 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2006)06-0128-04

LI Xian-jun^{1,2}; ZHANG Bi-guang²; LI Wen-jun²; LI Yan-jun³. **Temperature distribution inside wood during microwave-vacuum drying.** *Journal of Beijing Forestry University* (2006)28(6) 128-131 [Ch, 11 ref.]

1 Material Science and Engineering School, Central-South Forestry Science and Technology University, Changsha, 410004, P.R.China;

2 College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, 100083, P.R.China;

3 School of Engineering, Zhejiang Forestry College, Lin'an, 311300, P.R.China.

The law of temperature distribution inside wood using *Pinus massoniana* as experimental material had been researched during microwave-vacuum drying for the first time. The results showed that, with a certain scope of radiation power(160 kW/m^3) and wood thickness(60 mm), temperature distribution inside wood was uniform, and there was not regular temperature gradient along the direction of wood thickness; the inner temperature difference of wood presented a growing trend in the last period of drying; during microwave-vacuum drying, inner temperature difference of wood was caused by microwave field and the differences of dielectric characteristics among different locations in wet wood, and this kind of non-uniformity existed locally in wood.

Key words microwave-vacuum, wood, drying, temperature distribution

在常规干燥中,一般认为木材内部的温度通常低于表面的温度,存在外高内低的整体性温度场.而对于微波或微波真空干燥过程中,木材内部的温度分布,不同学者提出了不同的看法.如有的学者认为在微波干燥过程中,木材内部的温度高于外部的温度,木材内存在着内高外低的整体性温度场,并认为该温度场的存在是使木材具有高干燥速率的主要原因^[1-2];而有的学者则认为最高温度并非出现在木材的表面和中间部位,而是出现在距离木材表面几毫米的木材内^[3-4].在本文中,笔者较系统地描述了微波真空干燥过程中,木材内的温度分布规律,以期为进一步阐述微波真空干燥过程中木材内部水

分迁移的机理,干燥工艺的合理制定、控制提供依据.

1 材料与方法

从理论上说,要了解木材内部的温度场分布,就必须通过解由麦克斯韦方程和对应的电磁场边界条件所构成的方程组来了解微波炉和木材内微波场的分布.但由于湿木材的介电特性随水分、温度等的变化而变化,木材中电磁场分布及吸收的微波能是一个动态变化的过程,要准确地求解动态麦克斯韦方程就十分困难,且在工程上显得没有必要^[5],因此本研究仅通过试验测定木材厚度方向的温度分布规律.

收稿日期:2006-01-20

http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(59876005).

第一作者:李贤军,博士,讲师.主要研究方向:木材干燥.电话:0731-2316635 Email:lxjmu@sohu.com 地址:410004 湖南长沙韶山南路498号中南林业科技大学材料科学与工程学院.

1.1 材料与设备

试材为马尾松 (*Pinus massoniana*) 速生人工林木材, 采自广西柳州. 根据试验要求将原木加工成厚度为 25、45 和 65 mm, 长度为 2 m 的整边板, 放入冰柜中保存备用. 试验时, 再将整边板加工成长度和宽度都为 100 mm 的六面光试件.

本试验采用微波真空联合干燥装置^[6]进行试验. 该装置由真空系统、质量连续在线检测系统、多点温度检测系统、微波加热系统和数据采集系统构成. 其中微波加热系统由家用微波炉(格兰仕家用微波炉, 型号为 WD800)改造而成, 实际的微波辐射功率为 575 W. 温度检测系统由 3 对铠装镍铬-康铜热电偶(直径为 1 mm)和智能数字显示仪构成. 为了尽量减少微波场对热电偶测温准确性的影响, 在微波真空干燥过程中, 采用间歇微波的辐射方式, 且在微波辐射停止 20 s 后再读取温度值^[6-7].

1.2 内容与方法

试验采用间歇微波辐射的加热方式, 2 min 为 1 个干燥周期, 通过调节每 1 干燥周期内的实际微波辐射时间来控制微波输出功率.

当研究微波辐射功率对温度分布的影响时, 试件的厚度为 60 mm, 初含水率约为 40%; 干燥室的真空度为 0.04 MPa; 辐射时间取每个干燥周期分别辐射 10、15、20、25 s 4 个水平.

当研究真空度对温度分布的影响时, 试件的厚度为 40 mm; 含水率约为 45%; 干燥室真空度取 0、

0.02、0.04、0.06 MPa 4 个水平; 每一干燥周期的实际辐射时间为 20 s.

当研究厚度对温度分布的影响时, 试件的厚度取 20、40 和 60 mm 3 个不同的水平, 初含水率约为 40%, 其相应的辐射时间分别为 9、18、27 s; 干燥室的真空度为 0.04 MPa.

试验前先用环氧树脂和铝箔封闭试件的端面和侧面, 使水分迁移和热量传递仅沿着木材的厚度方向进行. 待树脂充分固化后再在试件侧面上用直径为 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, 孔中心距离表面的距离分别为 2 mm、试件厚度的 1/4 和试件厚度的 1/2, 然后再埋入热电偶, 分别测定干燥过程中木材表层、中间层和中心层的温度. 每组实验重复 1 次.

2 结果与讨论

不同条件下, 微波真空干燥过程中, 木材内部的温度分布规律见图 1~3. 从图 3 中可以看出, 在微波真空干燥过程中的绝大部分时间内木材中的温度分布都比较均匀, 但在干燥后期, 木材内的温度差有增大的趋势. 这一结论与部分学者得出的微波干燥过程中木材厚度方向上的温度分布规律基本一致^[8-9].

2.1 微波辐射功率对温度分布的影响

木材受到不同功率密度的微波辐射时, 木材内的温度分布情况见图 1. 从图 1 中可以看出, 当辐射

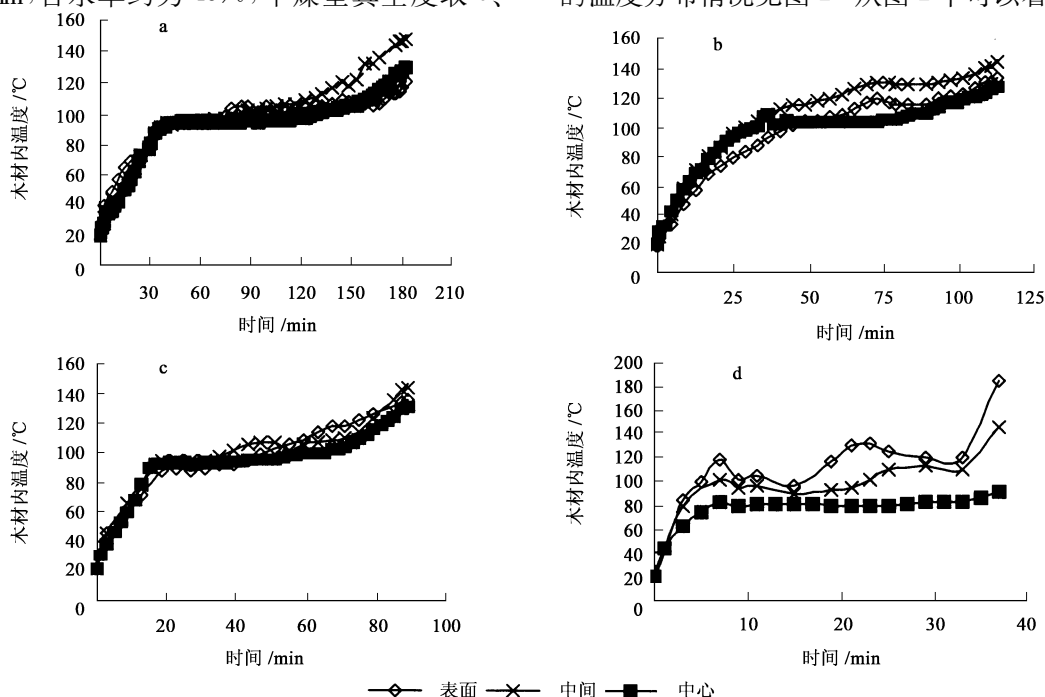


图 1 微波辐射功率对木材内温度分布的影响

FIGURE 1 Effects of microwave radiation power on temperature distribution in wood

注: a、b、c、d 分别是辐射时间取每个干燥周期分别辐射 10、15、20、25 s.

时间在 20 s(相应的辐射功率密度为 160 kW/m^3) 以内时,木材内的温度分布比较均匀,且中间层的温度略大于表层和中心层的温度,而当微波辐射时间达到 25 s 时,木材表层与中间层的温度明显高于中心层的温度.这可能是由于当微波辐射强度很大时,木材表面得到的微波能量远大于水分蒸发所需要的能量,引起木材表面含水率的急剧降低和温度快速

升高,而在一定的含水率范围内,木材的损耗因素与温度呈现正的相关关系,即温度越高,木材吸收微波的能力越强,使得木材的温度进一步升高.

2.2 真空度对温度分布的影响

在不同的真空度下木材内部的温度分布也都比较均匀(图 2),且呈现出中心层温度略低于表层和中间层温度的趋势(除图 2c 外).

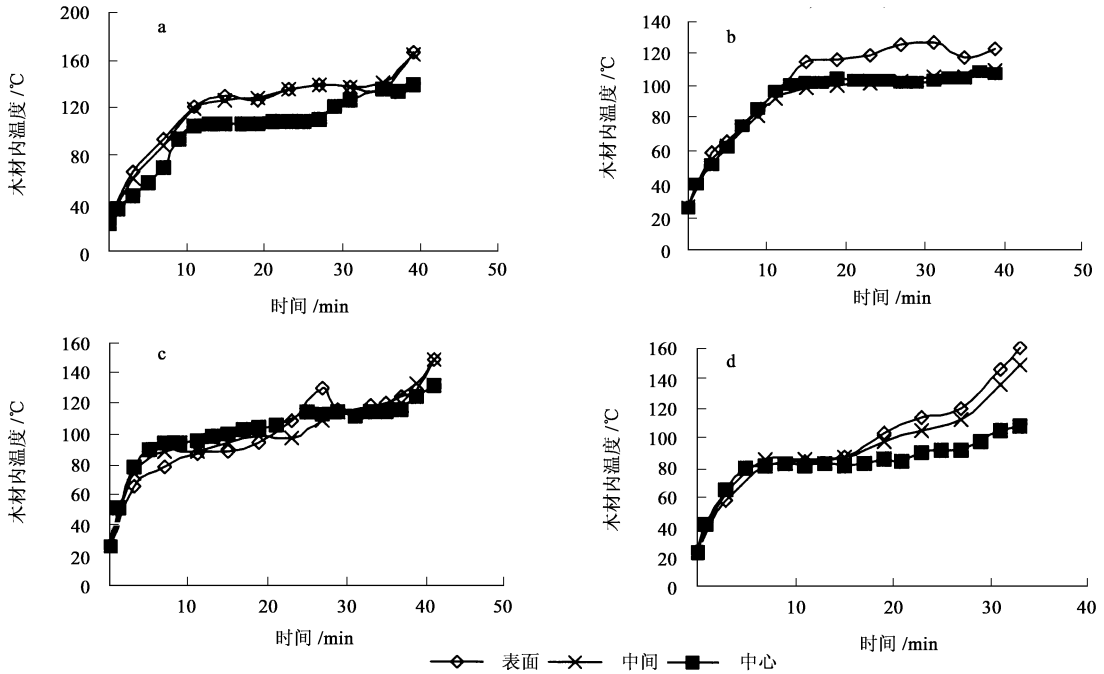


图 2 真空度对木材内温度分布的影响

FIGURE 2 Effects of vacuum level on temperature distribution in wood

注: a、b、c、d 分别是干燥室真空度为 0、0.02、0.04、0.06 MPa.

2.3 厚度对温度分布的影响

从图 3(厚度为 20 和 40 mm 板材的温度分布曲线与此图基本相同)可以看出,当厚度在 60 mm 以内时,在干燥过程的绝大部分时间里,木材内部的温度分布比较均匀,没有呈现出整体性的温度梯度.但在干燥后期,木材内部的温度不均匀性增大,且表现出木材心层温度略低于木材表层温度的趋势.这也间接表明了用微波对厚度在 60 mm 以内的木材进行干燥是可行的,不会在木材内部产生过大的温度应力.

根据上述试验结果可知:在一定的辐射功率(160 kW/m^3)和厚度(60 mm)范围内,干燥过程的绝大多数时间里,木材内的温度分布比较均匀,但在干燥后期,木材内温度分布的局部不均匀性有加大的趋势;在干燥过程中,木材内部的温度分布可能是表层最高,也可能是中间层或中心层最高^[6],具有一定的随机性,并不呈现出内高外低或者内低外高的固定分布模式.这是由于在微波真空干燥过程中,木材不同部位介电特性的差异是影响木材内温度分布的重要因素.在干燥的绝大多数时间内,木材含水

率较高,此时木材各部位介电特性的差异主要取决于木材内含水率的分布.由于在微波真空干燥过程中木材内部的含水率分布比较均匀^[6],所以木材内部的温度分布自然也就比较均匀.但在干燥后期,木材内的大部分水分已经被排除,此时木材内部的温度分布就取决于木材各部位对微波吸收的能力,即主要取决木材实质本身的介电特性的差异.众所周知,木材是一个具有很大变异性的非均质有机生物体,木材内部各部位的介电特性存在着较大的差异,造成了其对微波的吸收能力的不同,因此在干燥后期,木材内部的温度分布均匀性较差.且在干燥后期,木材的介电弛豫频率低于微波的工作频率,使得木材损耗因素与温度具有正效应,即温度越高的地方对微波的吸收能力越强,使得木材内的温度差进一步加大.所以在干燥后期,木材内的温度差有加大的趋势.

若假设木材是一个完全的均质体,则可以认为此时木材表面得到的微波能量最多,随着渗透深度的增加,微波能在木材内部呈指数形式衰减,当不考虑木材表面的散热作用时,木材内的温度分布应该

是表层高、内层低;当考虑木材表面向环境的散热作用时,木材内厚度方向的温度分布(从表到里)可能会出现从小到大,再从大到小,即先升高后降低的过程.这一分析结果与文献[3]中的理论求解结果相符.总之,在微波真空干燥过程中,木材内的温度分布受到微波场分布的均匀性、木材不同部位介电特性的差异和木材表面散热等因素的共同影响,其分布非常复杂.

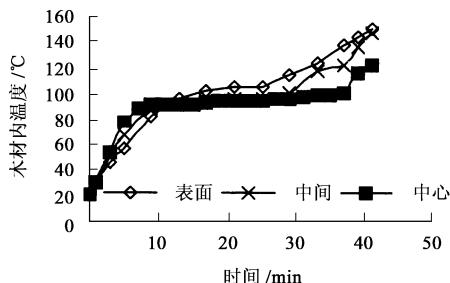


图3 木材内温度分布

FIGURE 3 Temperature distribution in wood

注:试件厚度为60 mm.

从试验和理论分析还可以知道,在常规干燥和微波真空干燥过程中,木材内的温度分布都存在一个均匀性的问题,但这一问题的产生原因、存在方式和引起的后果都截然不同.在常规干燥中,温度分布的不均匀是由于传热的特点所决定的,其温度分布的不均匀性以整体的形式表现出来,即木材内部存在整体性的温度梯度.而在微波真空干燥过程中,木材内温度分布的不均匀是由于微波场本身和湿木材不同部位介电特性的差异引起的,这种不均匀性以局部的形式存在于木材中,即具有温度分布的局部不均匀性.在间歇微波真空干燥过程的前期,当木材含水率较高时,这种温度分布的局部不均匀性对自动平衡木材内的含水率分布有积极的作用^[6,10-11].但在干燥后期,当木材含水率较低,微波辐射的功率较大时,特别是在连续微波的辐射下,木材内部的局部可能出现过热现象,容易导致干燥缺陷的产生.鉴于微波真空干燥过程中,木材内部温度分布的这一特点,笔者建议在实际的木材微波真空或者微波干燥过程中最好采用间歇变功率的微波加热方式,而尽量避免采用连续等功率的微波加热方式.

3 结 论

在一定的辐射功率(160 kW/m^3)和厚度(60 mm)范围内,干燥过程的绝大多数时间里,木材内的温度分布比较均匀,基本不呈现出整体性的温度梯度;但在干燥后期,木材内温度分布的局部不均匀性有加大的趋势.在微波真空干燥过程中,木材内部的温度

差主要是由于微波场本身和湿木材不同部位介电特性的差异引起的,这种不均匀性以局部的形式存在于木材中;考虑到微波加热的特点,在实际的木材微波真空或者微波干燥过程中,最好采用间歇变功率的微波加热方式,而尽量避免采用连续等功率的微波加热方式.

由于在微波真空干燥过程中木材内部基本不存在整体性的温度梯度,因此用微波真空干燥木材时,其很高干燥速率的获得并非主要来源于木材内部存在着与含水率梯度一致的温度场.

致谢 本文得到了中南林业科技大学青年科学研究基金重点项目(06005A)和人才引进项目(2005022)的资助,谨致谢忱.

参 考 文 献

- [1] 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.
TONG Y H. Research on the technology of wood dried by microwave [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1986, 14(3): 67-73.
- [2] RAJEEV G J, PERRY N P. Nonisothermal radiofrequency drying of red oak[J]. *Wood and Fiber Science*, 2001, 33(3): 476-485.
- [3] ZIELONKA P, GIERLIK E, MATEJAK M, et al. The comparison of experimental and theoretical temperature distribution during microwave wood heating[J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1997, 55(6): 395-398.
- [4] ZIOTR P P, KRZYSZTOF D. Microwave drying of spruce: Moisture content, temperature and heat energy distribution [J]. *Forest Products Journal*, 1998, 48(6): 77-80.
- [5] 崔正伟, 许时婴, 孙大文. 微波真空干燥技术的进展[J]. 粮油加工与食品机械, 2002(7): 28-30.
CUI Z W, XU S Y, SUN D W. The progress of microwave-vacuum drying technology [J]. *Liang You Jiacong Yu Shipin Jixie*, 2002(7): 28-30.
- [6] 李贤军. 木材微波真空干燥特性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
LI X J. Research on characteristics of wood microwave-vacuum drying [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2005.
- [7] 王朝晖. 微波冷冻干燥过程的传热传质机理[D]. 南京: 东南大学, 1996.
WANG Z H. Heat and mass transfer during microwave freeze-drying [D]. Nanjing: Southeast University, 1996.
- [8] ANTI A L. Microwave drying of hardwood: Simultaneous measurements of pressure, temperature and weight reduction [J]. *Forest Products Journal*, 1992, 42(6): 49-54.
- [9] ANTI A L, PERRÉ P. A microwave applicator for on line wood drying: Temperature and moisture distribution in wood [J]. *Wood Science and Technology*, 1999, 33(2): 123-128.
- [10] ANASTASIOS K, STAVROS A, SAVVAS G H. Radio frequency vacuum drying of wood (I): Mathematical model [J]. *Drying Technology*, 2001, 19(1): 65-84.
- [11] ANASTASIOS K, STAVROS A, SAVVAS G H. Radio frequency vacuum drying of wood (II): Experimental model evaluation [J]. *Drying Technology*, 2001, 19(1): 85-98.