

文章编号: 1000-5692(2007)02-0121-04

非稳态法测定杉木板材的水分扩散系数

李延军¹, 李 梁², 张璧光²

(1. 浙江林学院 工程学院, 浙江 临安 311300 2. 北京林业大学 材料科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 用非稳态法在一定的实验条件下测定了人工林杉木 *Cunninghamia lanceolata* 板材的水分扩散系数, 并且探讨了干燥介质温度、初含水率和纹理方向等对杉木板材水分扩散系数的影响。结果表明, 干燥介质温度越高, 扩散系数越大; 初含水率越高, 扩散系数越大, 在纤维饱和点附近达最大。当木材含水率在纤维饱和点以下时, 杉木板材水分扩散系数都随着初含水率的增加而增大; 当木材含水率在纤维饱和点以上时, 扩散系数基本保持恒定; 杉木板材的纵向水分扩散系数远大于横向水分扩散系数, 其比值为 5~7; 杉木板材的径向水分扩散系数略大于弦向水分扩散系数, 其比值为 1.0~1.5。表 3 参 11

关键词: 林业工程; 杉木板材; 水分扩散系数; 非稳态; 木材干燥

中图分类号: S781.33 **文献标志码:** A

木材是湿润性材料, 自然状态下都含有一定的水分。木材中的水分在一定条件下可以在木材内部移动, 此特性又可以称为木材的水分扩散特性。在木材干燥过程中, 当水分受到一定的驱动作用力时, 会以气体、液体和结合水的形式由木材内部向外部移动, 从而达到干燥的目的^[1-3]。通过对木材中水分扩散系数的测定和研究, 可以为木材干燥过程的数字模拟提供理论参数, 对有效地模拟实际干燥过程具有重要的意义。笔者的研究主要是利用非稳态法测定杉木板材在各个特定条件下的水分扩散系数, 分析影响木材水分扩散系数的因素及其影响规律^[4,5]。

1 试验材料和方法

1.1 试验试材

试验所用为人工林杉木 *Cunninghamia lanceolata* 木材, 采自浙江省临安市板桥林场, 为人工间伐材, 5~8 年生, 含水率为 60%~80%, 平均气干密度为 0.30~0.35 g·cm⁻³。所选杉木板材节子少, 无虫蛀, 无明显缺陷。根据试验要求将原木加工成厚度为 5 mm 和 50 mm, 长度为 1 m 的整边板, 放入冰柜中保存备用。试验时, 再将整边板取出锯制成温度试件、含水率组试件(100 mm×100 mm×5 mm)和纹理方向试件(50 mm×50 mm×50 mm)。试件表面光滑。

1.2 试验设备

EB-280-12 电子天平, 精度为 0.001 g; 302A 型调温调湿箱; 自制质量在线检测系统等。

1.3 试验方法

在杉木板材实际干燥过程中, 由于板材的长度和宽度远大于厚度, 可以认为木材中的水分扩散主

收稿日期: 2006-08-26; 修回日期: 2006-11-20

基金项目: 科学技术部攻关项目(03EFN213300104); 浙江林学院博士基金项目(2351000585, 2070000018)

作者简介: 李延军, 副教授, 博士, 从事木材干燥技术研究。E-mail: Lalyj@126.com

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

要是沿着厚度方向进行的^[6-8]。试验中,将试件按规定尺寸制好。为了防止水分从试件的4个侧面流失,以保证水分只在厚度方向上移动,用环氧树脂胶涂布于试件4个侧面,然后用铝箔密封,使木材中水分沿着厚度方向传递。封闭前后称取板材质量,确定树脂的质量。待树脂固化后,用天平准确称量试件的初质量,再将木材试件置于已调制好的调温调湿箱内的托盘上,通过与托盘相连的质量传感器可以实现木材试件质量的实时检测。一般每隔0.5 h或1.0 h读数1次,记下数据。当试件达到稳定状态后,取出送至烘箱中烘至绝干,用质量法测定试件含水率,通过公式可算出试件中水分的扩散系数(平均值)。

试验条件是:在温度试验中设定干燥温度分别为50, 60, 70, 80, 90 °C;介质相对湿度处于一个恒定状态,在47%下进行测定;含水率和纹理试验中设定干燥温度分别为60和70 °C。介质相对湿度在47%下进行测定。

2 理论基础

因为杉木板材中水分的扩散是沿着板材的厚度方向进行的。故板材中水分的非稳态扩散可用简化的菲克第二定律表示^[8]:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial W}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式(1)中: W 为木材含水率(%); D 为木材中水分的扩散系数($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); x 为板中任意点到板中心层的距离(cm); τ 为无因次时间。

干燥过程中含水率用无因次转移势 E 表示:

$$E = \frac{W_p - W_e}{W_0 - W_e} \quad (2)$$

式(2)中: W_p 为时间 τ 时试件平均含水率(%); W_e 为木材平衡含水率(%); W_0 为木材初含水率。

由于在实际的木材干燥过程中,扩散系数是随着木材本身的状况及周围的环境而变化的,是一个不稳定值。因此,取 $E=0.5$ 时所算出的扩散系数为整个干燥过程中的平均值。

对式(1)进行如下3点假设:①试件内含水率是均匀分布的;②水分移动过程中表面换水系数忽略不计;③干燥过程中试件尺寸不变。当 $E=0.5$ 时,将 $W=W_e$, 在 $x=\pm a$, $t \geq 0$ 时代入方程(1)中,就得到了方程(1)的简化方程:

$$E = 1 - 2 \left(\frac{Dt}{\pi a^2} \right) \quad (3)$$

经过换算得:

$$D = \frac{\pi a^2}{4t} (1 - E)^2 \quad (4)$$

3 结果与分析

根据试验结果,可计算出杉木板材干燥过程中在不同的介质温度条件下,不同初含水率,不同纹理方向下的水分扩散系数 D ,并将计算结果列于表1~3。

干燥介质的温度越高,杉木板材的水分扩散系数越大(表1)。这是由于随着温度的升高,木材细胞壁中的结合水分子能获得更多的能量,有更多的水分子能摆脱吸附点对它的束缚而产生迁移,从而使水分扩散速度增大,扩散系数增加^[7,8]。

从表2可以看出当木材含水率在纤维饱和点以下时,随着含水率的增加,木材的水分扩散系数增大;而当木材含水率在纤维饱和点以上时,其扩散系数变化不大^[7-9]。木材内的吸着水分为2个部分,即初级吸着水和次级吸着水,其中初级吸着水吸附在初级吸着点上,具有较高的束缚能和较低的能量状态,不容易产生迁移;而次级吸着水具有较低的束缚能,能更容易产生迁移。随着木材含水率的提高,次级吸着水在总的水分中所占的比例越大,即有更多数量的水分能产生迁移^[10]。

杉木板材的纵向水分扩散远大于横向水分扩散,径向水分扩散系数略大于弦向水分扩散系数(表

表 1 不同介质温度下杉木板材的扩散系数

Table 1 Diffusion coefficients of *Cunninghamia lanceolata* board at different temperatures

介质温度 / $^{\circ}\text{C}$	扩散系数 / ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
50	3.25×10^{-6}
60	4.17×10^{-6}
70	4.62×10^{-6}
80	6.38×10^{-6}
90	9.26×10^{-6}

表 2 不同初含水率杉木板材的扩散系数

Table 2 Diffusion coefficients of *Cunninghamia lanceolata* board with different initial moisture contents

初含水率 /%	扩散系数 / ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
55.1	2.40×10^{-6}
45.9	2.48×10^{-6}
35.1	2.08×10^{-6}
28.9	3.39×10^{-6}
13.9	1.46×10^{-6}

3)。这与杉木板材的内部结构和水分的扩散径路有关。杉木木材构造的各向异性决定了木材横向扩散的各向异性。当木材含水率在纤维饱和点以下时,木材中的水分主要沿着连续的胞壁、断续的胞壁-胞腔和连续的胞腔-纹孔 3 条径路进行迁移。其中断续的胞腔-胞壁径路是木材中水分迁移的最重要途径。由于杉木木材是各向异性材

料,木材细胞绝大部分是纵向排列的管胞,横向排列的细胞只存在于木射线中。而纵向排列的细胞长宽比大,那么在单位长度上,细胞壁所占的比例小,水分在纵向迁移时遇到的障碍相对横向来说要小得多,故而纵向的水分扩散系数远大于横向的扩散系数。管胞之间的横向通道由径、弦面壁上的具缘纹孔构成,杉木径面壁上的纹孔大且丰富。另外,木射线中横向排列的细胞,可以看成是在径向上纵向排列。如此,径向上的细胞在单位长度上,细胞壁所占的比例小于弦向,水分子在径向上迁移时遇到的障碍小于弦向,故而径向的水分扩散系数略大于弦向水分扩散系数^[8,11]。

表 3 不同纹理方向杉木板材的扩散系数

Table 3 Diffusion coefficient of *Cunninghamia lanceolata* board on different grain directions

纹理方向	扩散系数 / ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
纵向	73.0×10^{-6}
径向	14.3×10^{-6}
弦向	10.2×10^{-6}

4 结论

杉木板材的水分扩散系数随着干燥介质的温度增加而增加。当含水率在纤维饱和点以下时,杉木板材水分扩散系数都随着初含水率的增加而增大;而当木材含水率在纤维饱和点以上时,其扩散系数基本保持恒定。杉木板材纵向、径向和弦向 3 个纹理方向的水分扩散系数,均是纵向的水分扩散系数远大于横向的水分扩散系数,其比值约为 5~7;径向的水分扩散系数略大于弦向的水分扩散系数,两者之比约为 1.0~1.5。

致谢: 研究得到蒋丽艳、王文辉、庞伟宁等的支持,并得到李贤军博士的协助。谨致谢意。

参考文献:

- [1] NELSON R M J. Diffusion of bound water in wood [J]. *Wood Sci Techn*, 1986, **20**: 309-328.
- [2] AVRAMIDIS S, SIAU J F. An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood [J]. *Wood Sci Techn*, 1987, **21**: 249-256.
- [3] SIMPSON W T. Determination and use of moisture diffusion coefficient to characterize drying of northern red oak (*Quercus rubra*) [J]. *Wood Sci Techn*, 1993, **27**: 409-420.
- [4] 李延军, 张宏, 张璧光, 等. 梳解前后小径杉木板材细胞的微观形态及力学性能[J]. 浙江林学院学报, 2004, **21** (2): 6-9.
- [5] 李延军. 杉木板材木束干燥特性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [6] SIMPSON W T, LIN J Y. Dependence of the water vapor diffusion coefficient of aspen (*Populus sp.*) on moisture content [J]. *Wood Sci Techn*, 1991, **26**: 9-21.
- [7] 杜国兴. 木材水分非稳定扩散的研究[J]. 南京林业大学学报, 1991, **15** (2): 76-81.
- [8] 苗平. 马尾松木材高温干燥的水分迁移和热量传递[D]. 南京: 南京林业大学, 2000.

- [9] 李大纲. 马尾松木材干燥过程中水分的非稳态扩散[J]. 南京林业大学学报, 1997, 21(1): 75—79.
- [10] 李延军, 张璧光, 李贤军, 等. 杉木木束干燥过程中水分的非稳态扩散[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(增刊): 61—63.
- [11] 申宗圻. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1990: 68—83.

Moisture diffusion coefficient of *Cunninghamia lanceolata* board with non-steady state conditions

LI Yan-jun¹, LI Liang², ZHANG Bi-guang²

(1. School of Engineering, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir) board was tested systematically in non-steady state conditions to determine the moisture diffusion coefficient when the temperature of the drying medium, the initial moisture content (IMC), and the texture direction varied. Results showed that the moisture diffusion coefficient increased with the increase of the drying medium temperature or IMC, reaching a maximum near the fiber saturation point (FSP). When the moisture content was below the FSP, the moisture diffusion coefficient increased with the increase of the initial moisture content, but when the moisture content was above the FSP, the coefficient remained stable. The longitudinal diffusion coefficient was significantly larger than the radial and tangential diffusion coefficients, with ratios between 5—7, and the radial diffusion coefficient was clearly larger than the tangential diffusion coefficient with a ratio of about 1.0—1.5. [Ch, 3 tab. 11 ref.]

Key words: forest engineering; *Cunninghamia lanceolata* board; moisture diffusion coefficient; non-steady state; wood drying

浙江省领导周国富鲁松庭一行调研浙江林学院 服务社会主义新农村建设工作

2006年12月7日, 浙江省委副书记周国富、浙江省人大常委会副主任鲁松庭在省委副秘书长童健、省农办副主任邵峰、省教育厅厅长沈敏光及省委办公厅、临安市有关领导陪同下到浙江林学院调研服务社会主义新农村建设工作。

周国富对浙江林学院近年来的建设和发展, 以及面向基层, 服务“三农”所取得的成绩给予充分肯定, 并就学校如何更好地服务社会主义新农村建设工作提出希望和要求。他表示支持学校更名, 希望浙江林学院能培养更多人才, 创造和转化更多的科研成果, 为社会主义新农村建设工作提供人才和科技支撑, 为浙江省农业乃至全国农业的发展做出更大更积极的贡献。

鲁松庭对浙江林学院服务社会主义新农村建设工作成效予以赞赏, 指出学校今后要加强学科建设、师资队伍建设和校园文化建设, 建设高层次的教学研究型大学; 要努力在怎样面向“三农”, 服务“三农”和科研成果转化上下功夫, 通过灵活多样的形式更好地服务社会主义新农村建设工作。

浙江林学院党委书记陈敬佑代表全校师生对周国富、鲁松庭一行来校指导工作表示热烈欢迎, 衷心感谢他们长期以来对学校发展的支持和帮助。

周国富一行还与师生亲切交谈, 鼓励同学们勤奋学习, 立志服务“三农”, 积极参与新农村建设工作, 并勉励科研工作者多出科研成果, 为学校和社会发展出力。