

X 射线扫描法和切片法测量干燥过程中杉木 含水率分布的比较研究

余 乐¹, 吕建雄^{1,2}, 李贤军¹, 徐 康¹, 吴义强¹, 蒋佳荔²

(1. 中南林业科技大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 中国林业科学研究院 木材工业研究所 国家林业局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

摘要: 以杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林木材为研究对象, 分别采用 X 射线扫描法和切片法研究了常规干燥过程中木材内含含水率分布规律, 以期检验 X 射线扫描法的测量精度, 探讨采用 X 射线法动态检测干燥过程中木材内含含水率分布的可行性。结果表明: 在各个干燥阶段, X 射线扫描法测得的厚度方向各层含水率测量值与用切片法得到的含水率测量值之间无显著差异($P>0.05$), 且两者之间相关的决定系数在 0.90 以上; 在整个干燥阶段, 切片法测量的每层含水率值大多低于利用 X 射线扫描法的测量值, 在含水率较高阶段(55%, 46%, 34%), 两者之间的差值大于含水率较低阶段(26%, 20%, 12%, 8%)。由此可见, 采用 X 射线扫描法测量干燥过程中木材内含含水率分布是切实可行的。图 1 表 1 参 13

关键词: 林业工程; X 射线扫描法; 切片法; 含水率分布; 决定系数; 木材干燥; 杉木

中图分类号: S781.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2013)04-0543-05

Comparison of X-ray scanning and slice methods for moisture distribution measurements when drying *Cunninghamia lanceolata* plantation wood

YU Le¹, LÜ Jianxiong^{1,2}, LI Xianjun¹, XU Kang¹, WU Yiqiang¹, JIANG Jiali²

(1. College of Material Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Key Laboratory of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: To test measurement accuracy of the X-ray scanning method and to explore its feasibility for determining moisture content distribution with Chinese fir plantation wood (*Cunninghamia lanceolata*), the X-ray scanning and slicing methods were compared during the conventional drying process. Results with the two methods for each drying stage showed no significant differences ($P > 0.05$). In addition, a regression analysis revealed $R^2 > 0.90$ for the two methods. During the entire drying process, the moisture content of each layer measured with the slice method was lower than the X-ray scanning method; however, differences were greater when moisture content was high. Thus, using X-ray scanning to measure the moisture content distribution of wood during the drying process would be practical. [Ch, 1 fig. 1 tab. 13 ref.]

Key words: forest engineering; X-ray scanning; slice method; moisture distribution; coefficient of determination (R^2); wood drying; *Cunninghamia lanceolata*

常规干燥具有历史悠久, 工艺技术成熟, 易于实现大型工业化干燥等特点, 在国内外木材干燥行业中占主要地位, 而准确测量干燥中木材内部含水率动态分布是实现干燥过程优化控制和干燥机制深入研

收稿日期: 2012-08-24; 修回日期: 2012-10-29

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(30825034); 中南林业科技大学木材科学与技术国家重点学科基金资助项目

作者简介: 余乐, 从事木材干燥研究。E-mail: yule731226@126.com。通信作者: 吕建雄, 研究员, 博士生导师, 从事木材物理研究。E-mail: jianxiong@caf.ac.cn

究的前提条件。现阶段,在研究干燥过程中木材内部水分分布规律时,主要有以下2种方法:①分层切片法^[1-2],这也是最常用的方法。通过对干燥过程中木材试件按照一定厚度进行切片,得出干燥过程中木材内含水率分布情况,但这种方法无法连续测量同一木材试件干燥过程中的含水率分布规律,而且在切片过程中会受到水分蒸发的影响从而影响测量精度。②计算机断层扫描(CT)^[3-4]。近年来,部分学者采用CT扫描法来研究干燥过程中木材内部含水率分布规律。一般利用该方法进行扫描得到的都是可视化图像,只能进行定性分析,而且该方法扫描速度慢,设备昂贵,在实际工业生产中缺乏应用价值。因此,干燥过程中木材厚度方向水分动态分布的准确测量一直是木材干燥领域的研究难点。近年来,X射线扫描法的应用为干燥过程中测量木材内含水率及其分布提供了一种能实现在线连续检测、精确、便捷的测量方法。李贤军等^[5-6]等用X射线扫描方法测量红橡 *Quercus rubra* 和黑胡桃 *Juglans nigra* 含水率和含水率分布,并与称重法含水率测量值进行比较。结果表明:采用X射线扫描法测量木材含水率时具有较高的测量精度,X射线扫描法测定值与称重法测定值之间相关的决定系数在0.97以上。Baettig等^[7]、Cai等^[8]和Cai^[9]用X射线扫描方法测量木材含水率和含水率分布,结果发现:利用X射线扫描测定的含水率值与称重法测定值之间相关的决定系数在0.95以上。余乐等^[10]等用X射线扫描法和称重法测量了恒温恒湿干燥过程中杉木 *Cunninghamia lanceolata* 平均含水率的变化规律,探讨了采用X射线法动态在线检测干燥过程中木材平均含水率的可行性。结果表明:采用X射线扫描法测量干燥过程中木材平均含水率是切实可行的,其测量值与用称重法得到的含水率测量值十分接近,两者之间相关的决定系数在0.99以上,绝对偏差在2%以内。本研究以杉木人工林木材为研究对象,分别采用X射线扫描法和切片法测量干燥过程中木材内含水率分布,并对2种方法得到的含水率分布曲线进行拟合,得到两者之间的相关系数,以期检验X射线扫描法测定杉木木材含水率分布的测量精度。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为杉木人工林木材,采自湖南省常德市花岩溪林场。在相同立地条件下采集2株树木,均为28年生,径级为38 cm。在各干燥介质条件下,从同一株树木上截取2节原木段,从原木段上截取尺寸为1 000 mm(长)×185 mm(宽)×45 mm(厚)的径切中心板锯材,然后通过髓心将径切中心板锯材锯成规格为1 000 mm(长)×90 mm(宽)×45 mm(厚)的干燥板材2块。

1.2 干燥试验

在干燥试验中,干燥介质相对湿度为0%,干燥介质温度为75℃,恒定不变。共有7个干燥阶段(根据板材干燥目标含水率划分,分别为55%,46%,34%,26%,20%,12%和8%)。试验时,径切中心板锯材、干燥板材以及扫描试样的材性基本一致,干燥板材初含水率为50%左右。试验时用耐高温防水环氧树脂(最高使用环境温度250℃)和铝箔封闭干燥板材端面 and 侧面,以确保试件中的水分从上、下2个表面蒸发。本试验所使用的德国产X射线扫描设备(DENSE-LAB mark3),由X射线发射与接收系统、数据采集系统、机械步进系统和计算机控制与数据处理系统4个部分构成。干燥试验在干燥烘箱中进行。

1.3 X射线扫描法与切片法

试验时,从干燥板材上依次截取3个重复扫描试样和3个重复用于切片试样,并分别测量扫描试样和切片试样的初始尺寸和质量,沿着扫描试样厚度方向扫描(步长为0.02 mm),测量木材厚度方向的密度分布。同时,将切片试样分为21层并切片,依次对切片编号,并对每层切片称质量。将剩下的干燥板材放置在干燥烘箱中继续干燥。如此反复,直到木材含水率降低至10%左右为止。干燥结束后,将所有扫描试样及切片试样置于温度设定为(103±2)℃的恒温干燥箱中绝干处理,最后再测量绝干扫描试样的尺寸和质量,并扫描其厚度方向,得到扫描试样的绝干密度分布。对于扫描试样,根据X射线扫描获得的试件厚度方向密度分布数据,采用直线插值和加权平均方法,求出每层平均密度,再根据任意时刻木材每层密度、尺寸和对应层绝干状态下的密度、尺寸,就可以计算出任意时刻木材中任意层的含水率。取每组实验中初始状态、干燥条件相同的3个试件平均测量值作为试验结果。对于切片试样,根据绝干前后的质量,可以依次求出干燥过程中每层的含水率值。取每组实验中初始状态、干燥条件相同

的 3 个试件平均测量值作为试验结果。

2 结果与讨论

根据木材试件在干燥前初始状态、干燥过程中、绝干状态下的断面密度分布曲线,将木材均分为 21 层时,得到厚度方向的断面密度分布。由于在干燥过程中,木材厚度方向会发生干缩,采用直线插值和加权平均数学方法,求出每层的平均密度。为消除木材表面微小加工缺陷及界面测量数据容易失真对测量结果的影响,在计算表层(第 1 层和第 21 层)的平均密度时,剔除最表层 5 个扫描步长的密度数据(厚度约为 0.1 mm)。

图 1A~G 分别表示了干燥过程中各个含水率阶段,利用 X 射线扫描法和切片法得到的木材内含含水率分布曲线。从图中可以看出,在整个干燥阶段,无论是采用 X 射线扫描法还是切片法,木材内部含

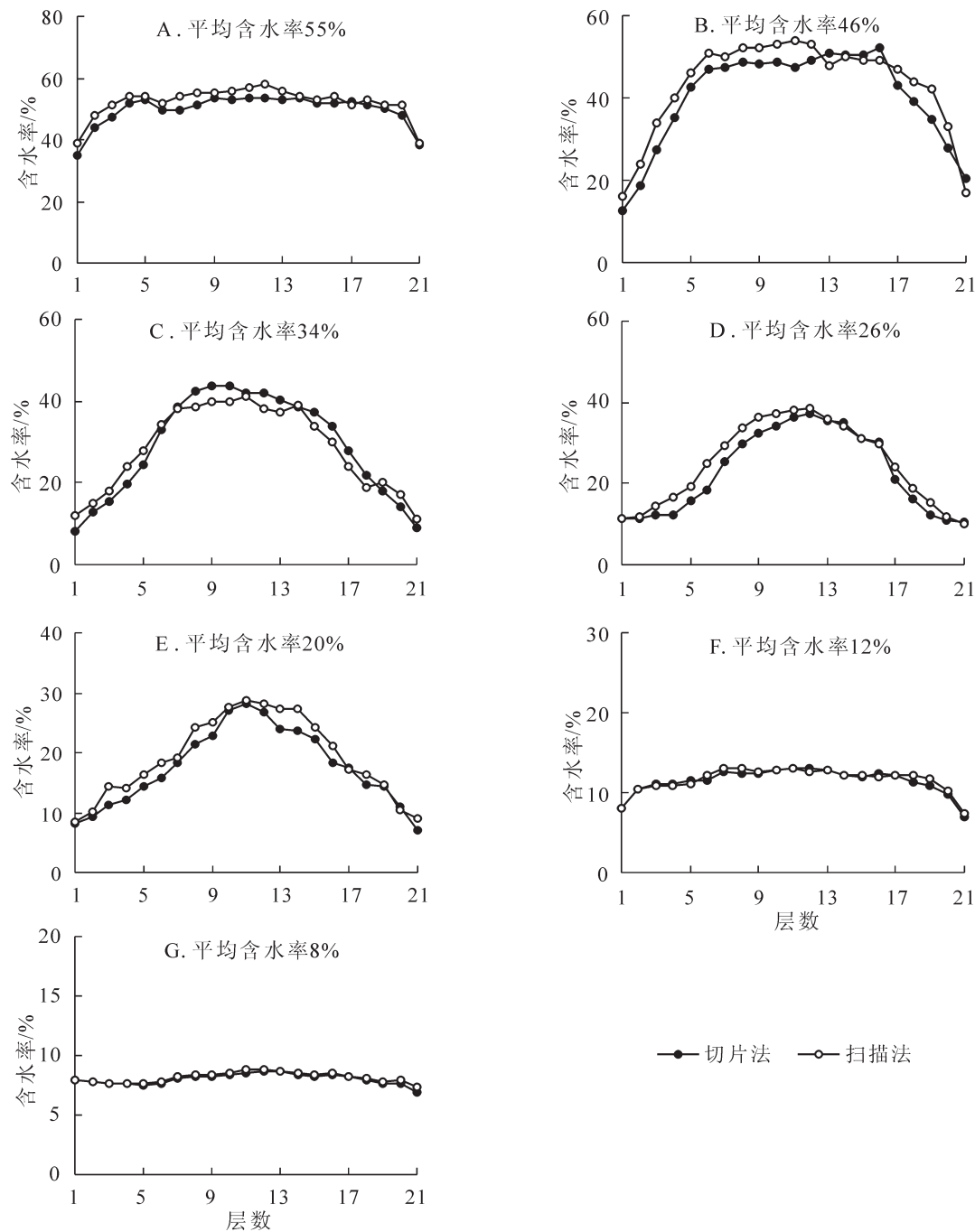


图 1 不同平均含水率下 X 射线扫描法和切片法含水率分布比较

Figure 1 Comparison of moisture content distribution by the method of X-ray scanning and slicing at different moisture contents

水率都呈现整体的内高外低的含水率梯度。当木材内平均含水率为 10% 时, 木材内含水率分布更加均匀。在干燥初期, 木材内芯表层含水率差小于初始状态下内芯表层含水率差值。随着干燥过程进行, 木材内芯表层的含水率差值低于初始状态下内芯表层含水率差值, 并逐渐减小。整个干燥过程中, 木材内芯表层含水率差值呈现先增加后减小的趋势。这与 Gu 等^[11], Pang 等^[12], Anders^[13]研究结果一致。

从图 1 A~G 中可以明显看出: 在干燥过程的各个阶段, 利用 X 射线扫描法和切片法得到的木材内各层含水率值十分接近。表 1 分别表示了木材在干燥过程中不同阶段 X 射线扫描法和切片法得到的木材各层含水率值, 以及 2 种方法所得到的含水率之间的偏差和相关系数。单因素方差分析结果表明, 不同干燥阶段利用 X 射线扫描法和切片法得到的木材各层含水率值之间的显著性检验 P 值均大于 0.05 (表 1), 说明 2 种方法得到的含水率值无显著差异, 2 种方法之间相关的决定系数分别为 0.91, 0.93, 0.96, 0.96, 0.97, 0.95 和 0.97, 平均值为 0.95。从表 1 中同样可以看出, 切片法测量的每层含水率值大多低于 X 射线扫描法的测量值。这是由于切片过程持续时间长, X 射线扫描持续时间短, 切片过程中的水分蒸发量大于 X 射线扫描过程中的水分蒸发量, 在含水率较高阶段 (55%, 46%, 34%), 两者之间的差值要大于含水率较低阶段 (26%, 20%, 12%, 8%)。这是由于利用 2 种方法检测过程中, 在高含水率阶段木材内水分蒸发更快所致。上述结果表明在杉木常规干燥过程中, 采用 X 射线扫描法测量宽含水率范围 (50% ~ 10%) 内木材内部的含水率分布精度较高, 将它用于杉木含水率在线连续测试具有一定的可行性。

表 1 2 种不同方法含水率测量值比较和方差分析

Table1 Comparison of moisture content measured with different methods and analysis of variances

含水率阶段/%	测量方法	不同层次含水率/%								R^2	P 值
		1	4	7	10	13	16	19	21 层		
55	X 射线	39.04	54.11	54.07	56.02	56.00	54.13	51.08	39.02	0.91	0.144
	切片法	35.13	52.00	49.80	53.24	53.20	52.01	49.99	38.40		
	偏差	-3.91	-2.11	-4.27	-2.78	-2.80	-2.12	-1.09	-0.62		
46	X 射线	16.04	40.01	50.00	53.02	48.11	49.24	42.13	17.07	0.93	0.420
	切片法	12.80	35.21	46.75	48.66	50.78	52.15	35.00	20.45		
	偏差	-3.24	-4.80	-3.25	-4.46	2.76	2.91	7.13	3.38		
34	X 射线	12.03	24.11	38.01	40.21	37.23	30.14	20.06	11.01	0.96	0.913
	切片法	8.15	19.66	38.39	43.67	40.36	33.87	14.12	8.88		
	偏差	-3.88	-4.45	0.38	3.46	3.13	3.73	-5.94	-2.13		
26	X 射线	11.44	16.59	29.36	37.11	36.04	29.86	15.22	10.13	0.96	0.517
	切片法	11.58	12.26	25.22	34.15	35.29	30.18	12.14	10.56		
	偏差	0.14	-4.33	-4.14	-2.96	-0.75	0.32	-3.08	0.43		
20	X 射线	8.57	14.19	19.1	27.56	27.19	21.11	14.67	9.08	0.97	0.426
	切片法	8.25	12.04	18.25	26.95	23.86	18.26	14.42	7.16		
	偏差	-0.32	-2.15	-0.85	-0.61	-3.33	-2.85	-0.25	-1.92		
12	X 射线	8.04	10.92	12.96	12.82	12.92	12.02	11.67	7.48	0.95	0.750
	切片法	7.99	11.01	12.69	12.75	12.89	12.46	10.97	7.02		
	偏差	-0.05	0.09	-0.27	-0.07	-0.03	0.44	-0.70	-0.46		
8	X 射线	7.96	7.66	8.24	8.56	8.74	8.51	7.78	7.29	0.97	0.322
	切片法	7.89	7.58	8.11	8.45	8.68	8.38	7.59	6.98		
	偏差	-0.07	-0.08	-0.13	-0.11	-0.06	-0.13	-0.19	-0.31		

3 结论

在整个干燥阶段,切片法测量的每层含水率值大多低于X射线扫描法的测量值,在含水率较高阶段(55%, 46%, 34%),两者之间的差值要大于含水率较低阶段(26%, 20%, 12%, 8%)。

在各个干燥阶段,X射线扫描法测得的厚度方向各层含水率测量值与用切片法得到的含水率测量值之间无显著差异($P>0.05$),两者之间相关的决定系数在0.90以上,表明采用X射线扫描法测量干燥过程中木材内含水率分布是切实可行的。

参考文献:

- [1] JIA Donghua, MUHAMMAD T A. Modeling of moisture diffusion in microwave drying of hardwood[J]. *Drying Technol*, 2007, **25**: 449 – 454.
- [2] 李贤军, 吴庆利, 姜伟, 等. 微波真空干燥过程中木材内的水分迁移机理[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28** (3): 150 – 153.
LI Xianjun, WU Qingli, JIANG Wei, *et al.* Mechanism of moisture movement in wood during microwave-vacuum drying [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28**(3): 150 – 153.
- [3] ANTTI A, PERRE P. A microwave application for on line wood drying: temperature and moisture distribution in wood [J]. *Wood Sci Technol*, 1999, **33**: 123 – 138.
- [4] HANSSON L, ANTTI L. Modeling microwave heating and moisture redistribution in wood[J]. *Drying Technol*, 2008, **26**: 552 – 559.
- [5] 李贤军, 乔建政, 蔡智勇, 等. 微波干燥与常规干燥中木材内含水率动态分布[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, **29**(6): 99 – 103.
LI Xianjun, QIAO Jianzheng, CAI Zhiyong, *et al.* Dynamic distribution of wood moisture content during microwave drying and hot air drying [J]. *J Cent South Univ For & Technol*, 2009, **29**(6): 99 – 103.
- [6] 李贤军, 蔡智勇, 傅峰. 干燥过程中木材内部含水率检测的X射线扫描方法[J]. 林业科学, 2010, **46**(2): 122 – 127.
LI Xianjun, CAI Zhiyong, FU Feng. A new X-ray scanning method for measuring the internal moisture content in wood drying [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46**(2): 122 – 127.
- [7] BAETTIG R, ROMAIN R, PATRICK P. Measuring moisture content profiles in a board during drying: a polychromatic X-ray system interfaced with a vacuum/pressure laboratory kiln [J]. *Wood Sci Technol*, 2006, **40**: 261 – 274.
- [8] CAI Yingchun, HAYASHI K. New monitoring concept of moisture content distribution in wood during RF/vacuum drying [J]. *Wood Sci Technol*, 2007, **53**: 1 – 4.
- [9] CAI Zhiyong. A new method of determining moisture gradient in wood [J]. *For Prod J*, 2008, **58**(7–8): 41 – 45.
- [10] 余乐, 吕建雄, 李贤军, 等. 采用X射线扫描法测量木材含水率的初步研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(1): 43 – 47.
YU Le, LÜ Jianxiong, LI Xianjun, *et al.* Studies on measurement of moisture content by X-ray scanning method [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2012, **32**(1): 43 – 47.
- [11] GU Lianbai, GARRAHAN P. The temperature and moisture content in lumber during preheating and drying [J]. *Wood Sci Technol*, 1984, **18**: 121 – 135.
- [12] PANG Shusheng. Moisture content gradient in a softwood board during drying: simulation from a 2-D model and measurement [J]. *Wood Sci Technol*, 1996, **30**: 165 – 178.
- [13] ANDERS R, JESPER A. Measurement and evaluation of moisture transport coefficients during drying of wood [J]. *Holzforschung*, 1997, **51**: 372 – 380.