

超声波预处理对桉木干燥时间的影响

姚幸之, 姚孜银, 何正斌, 伊松林

(北京林业大学木材科学与工程北京市重点实验室; 木质材料科学与应用教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以巨尾桉 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*) 木材为试材, 在功率为 340 W, 频率为 25 和 59 kHz 的条件下, 分别进行 30、60 和 90 min 的超声波预处理, 对比分析超声波预处理对桉木干燥时间的影响。结果表明, 试材的干燥速率和水分扩散系数, 均随超声波频率提高、预处理时间增加而增大; 尤其当含水率在纤维饱和点以上时, 超声波预处理对试材干燥时间的缩短效果更明显。

关键词: 超声波; 预处理; 干燥时间; 水分扩散系数; 纤维饱和点

中图分类号: S792.39; S782.31

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654 (2016) 05-0009-04

Effects of Ultrasound Pretreatment on Drying Time of Eucalyptus Wood

YAO Xing-zhi, YAO Zi-yin, HE Zheng-bin, YI Song-lin

(Beijing Forestry University, Beijing Key Laboratory of Wood Science and Engineering;

Ministry of Education, Key Laboratory of Wooden Material Science and Application, Beijing 100083, China)

Abstract: *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* wood samples were pretreated by ultrasound at 340 W power with frequency of 25 and 59 kHz for 30, 60 and 90 minutes, respectively, and the effects of ultrasound pretreatment on drying time of the eucalyptus wood samples were investigated. Results indicated that ultrasound pretreatment could decrease drying time and increase water diffusivity of the wood samples. Moreover, drying rates and water diffusivity increased along with increase of ultrasound frequency and pretreatment time. The effect of ultrasound pretreatment on shortening drying time was very obvious when wood moisture content of the samples was above fiber saturation point.

Key words: ultrasound; pre-treatment; drying time; water diffusivity; fiber saturation point (FSP)

桉树是我国主要造林树种之一, 相比于杨木和杉木, 多数桉木质地坚硬、强度较高、花纹美观, 具有加工成实木家具的巨大潜力。至 2010 年时, 我国南方林区的桉树种植面积已达 368 万 hm^2 , 位居世界第三^[1]。由于桉树生长速率较快, 导致其木材生长应力大、抽提物丰富、渗透性较差、难干易裂, 极

大限制了实木化利用^[2-3]。

超声波能产生空化作用、机械振动、微射流等多级物理效应, 在传播过程中可使木材内部水分产生一系列快速而且连续的压缩和拉伸效应(海绵效应), 在被干木材内部产生许多微小孔道, 促进木材内部水分的移动^[4], 脱除木材内部结合水^[5], 还能在木材与空气接触界面上产生“声波流”和“微小流”, 有利于表面水分蒸发及吸着水的干燥^[6], 进而加快木材干燥过程。

目前, 超声波在食品干燥行业应用较广泛, 且效果较好, 但在木材干燥中的研究还处于起步阶段。

收稿日期: 2015-11-18; 修改日期: 2016-07-29

基金项目: 国家自然科学基金“超声波协同下的木材真空过热蒸汽干燥水分迁移机制”(31270604); 北京林业大学“北京市大学生科学研究与创业行动计划”(S201510022048)。

作者简介: 姚幸之(1994—), 女, 北京林业大学硕士研究生。

责任作者: 何正斌, 男, 北京林业大学讲师, 博士。

已有研究表明,超声波可大大缩短干燥时间、提高干燥速率和水分扩散系数^[8-9],强化边界层的热质传递过程^[10-11],提高木材的渗透性,但是直接采用超声波对木材进行干燥,超声波在空气中传播时能耗损失较大,耗能较高^[6]。

桉木速生材的超声波干燥研究鲜见报道。为了拓展超声波干燥技术的应用,及解决桉木速生材干燥缺陷问题,笔者尝试应用超声波技术对桉木进行干燥前的预处理,探究不同超声波处理条件对试材干燥时间的影响,以发掘改善桉木渗透性、加快干燥速率的方法,为桉木速生材的实木化利用和超声波技术在木材干燥中的应用,提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

巨尾桉(*Eucalyptus grandis* × *E.urophylla*),采自广东中山,初含水率60%以上。从生材锯材中截取尺寸为200 mm×100 mm×20 mm(长×宽×厚)的弦切板试件,选取没有缺陷且初含水率相近的试件进行刨光、标号。

1.2 主要设备

扫频超声波清洗机,内槽尺寸为:300 mm×240 mm×200 mm,输出频率可在25、28、40、59 kHz之间转换,功率和时间可分别在40%~99%和1~99 min之间无级调节。

电热恒温鼓风干燥箱,控温范围10~250 ℃,控温精度0.1 ℃。

1.3 试验方法

1)在锯材纵向截取厚度为10 mm的含水率检测试板,放入(103±2) ℃烘箱中烘至绝干,根据GB/T 1931-2009《木材含水率测定方法》,计算试件的初含水率。

2)根据前期试验经验,设定超声波预处理的功率为340 W,在25、59 kHz两种频率条件下,分别对试件进行30、60和90 min三种时间的预处理。

首先在超声波预处理设备槽内加入蒸馏水,然后将试件放入,保证整个处理过程中试件均浸没于水中。处理完毕后取出试件,去除表面水分并称质量,用塑料膜包裹。每种预处理条件下选取6块试件进行试验。

3)为了模拟实际生产过程,用环氧树脂将预处理试件和对照未处理试件的侧边与两端封闭,用保鲜膜包裹,防止试件水分蒸发。

4)将超声波预处理试件与未处理试件均放入60 ℃烘箱中干燥,每隔2 h称质量,直到试件含水率低于10%。

5)将干燥后试件放入(103±2) ℃烘箱中干燥至绝干,称其绝干质量,并根据干燥过程中的质量,计算各个干燥时间下试件的含水率。

1.4 干燥时间分析

1)根据预处理试材和未处理试材在干燥过程中的含水率变化情况,分析超声波预处理对桉木干燥时间的影响规律;

2)纤维饱和点(FSP)作为影响木材物理力学性质的含水率转折点,对木材的干燥速率有着重要意义。根据木材纤维饱和点与温度的关系(公式1)^[9]可知,在本试验设定的干燥温度60 ℃时,木材FSP为26%。因此,以FSP=26%为界,分析不同时间预处理试件在不同含水率阶段的干燥时间。

$$M_{FSP}=0.3-0.001(T-20) \quad (1)$$

式中: M_{FSP} 为纤维饱和点,%; T 为温度,℃。

3)水分扩散系数,是衡量木材干燥过程中内部水分移动速度的重要参数。由公式2^[12]可计算出不同处理条件下木材的水分扩散系数,探讨超声波预处理对桉木干燥时间的影响规律。

$$D_e=kL^2/\pi^2 \quad (2)$$

其中: D_e —水分扩散系数, m^2/s ; k —干燥常数, s^{-1} ; L —试材厚度,m。

2 结果与分析

2.1 超声波预处理对桉木干燥时间的影响

在不同超声波预处理条件下,试件的干燥时间列于表1,方差分析结果列于表2;在25、59 kHz频率下的预处理试件,其干燥过程中的含水率-时间变化曲线,如图1所示。

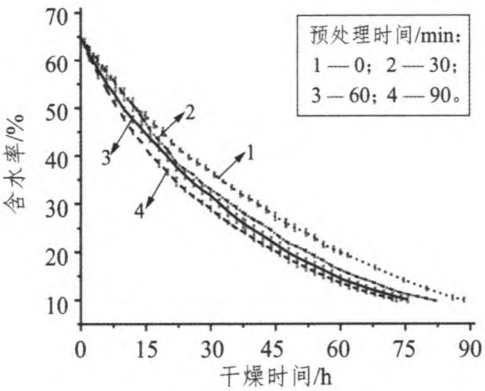
表1和图1结果均表明,超声波预处理试件的干燥时间明显短于对照未处理试件,表明超声波预处理在一定程度上提高了木材的干燥速率。随超声波处理频率的增加和预处理时间的延长,试件的干燥时间有所缩短。

表 1 不同超声波预处理条件下的桉木试件干燥时间
Tab.1 Drying time of Eucalyptus wood samples pretreated by ultrasound at different conditions

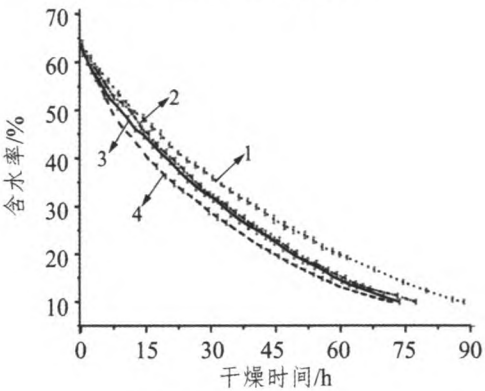
预处理时间/min	预处理频率/kHz	干燥时间/h
0	0	88.5
30	25	81.1
	59	77.5
60	25	75.5
	59	73.7
90	25	72.9
	59	72.0

表 2 超声波预处理时间对桉木干燥时间的方差分析
Tab.2 Variance of analysis of drying time of Eucalyptus wood samples pretreated by ultrasound at different conditions

项目	平方和	自由度	均方	F 检验	P 值
组间	454.925	3	151.642	298.230	0.000
组内	4.068	8	0.508		
总数	458.993	11			



a. 超声波频率 25 kHz



b. 超声波频率 59 kHz

图 1 桉木试件含水率随干燥时间的变化曲线
Fig.1 Moisture content/drying time curves of Eucalyptus wood samples pretreated by ultrasound with different durations

从表 2 方差分析可知, 预处理时间对试件干燥时间的影响非常显著 ($p<0.05$)。随着处理时间从 30 min 延长至 90 min, 25 kHz 频率超声波预处理试件的干燥时间缩短约 10%; 59 kHz 频率超声波预处理试件的干燥时间亦缩短了 7%。这是由于随着预处理时间的增加, 超声波空化作用持久, 木材内部水分通道被打通, 更多吸着水转变为自由水, 从而干燥速度加快, 与以往研究结论相符^[11]。

预处理频率对干燥时间的影响亦较为明显。试材含水率从 65% 降至 10%, 在超声波频率为 25 kHz 时, 平均干燥时间为 76.7 h; 频率为 59 kHz 时, 平均干燥时间为 74.4 h。与未处理对照试材的平均干燥时间 88.5 h 相比, 干燥时间分别缩短了 13.3% 和 15.9%。这是由于在预处理过程中, 超声波在水中产生一系列压缩和拉伸运动, 使木材内部产生微小孔道, 减少木材抽提物含量, 并促进水分的移动^[13-14]; 并且, 超声波频率越高, 振动周期越短, 空化过程中气泡从产生到破裂几乎在瞬间完成, 从而产生高温、高压, 促进热量传递, 提高干燥速率。

2.2 超声波预处理对含水率在纤维饱和点上下桉木干燥速率的影响

木材中水分主要以自由水和吸着水两种形式存在^[15]。当木材含水率高于 SFP 时, 细胞腔中自由水含量的变化并不会影响木材的力学性质; 当含水率低于 SFP 时, 水分主要以细胞壁里的吸着水存在, 木材性质会随吸着水的增加或减少产生大幅变化。因此, 探究超声波预处理对纤维饱和点附近木材干燥速率的影响, 可为桉木干燥提供理论依据。

表 3 列出在不同预处理条件下, 以 FSP=26% 为界, 各试件在不同含水率阶段的干燥时间统计结果。

表 3 纤维饱和点上下桉木试件干燥时间对比
Tab.3 Drying time of Eucalyptus wood samples beyond and below Fiber Saturation Point

处理频率/kHz	处理时间/min	干燥时间/h	
		含水率 $\geq 26\%$	含水率 $< 26\%$
0	0	47.3	41.2
	30	41.5	39.6
	60	37.5	38.0
	90	34.3	38.6
25	30	40.2	37.3
	60	39.1	34.6
	90	34.9	37.1

表3结果显示,在本试验条件下,对照未处理试件含水率从65%降至26%时,干燥用时47.3 h;含水率从26%降至10%时,平均干燥时间为41.2 h。

当超声波频率为25 kHz时,试件含水率在65%~26%、26%~10%两个不同阶段,平均干燥时间分别为37.8、38.7 h,相对未处理试件,分别提高了20.1%、6.1%。

当超声波频率增至59 kHz时,试件在含水率 $\geq 26\%$ 和 $< 26\%$ 时两个阶段,平均干燥时间分别为38.1、36.3 h,相对未处理试件,提高幅度分别为19.5%、11.9%。

试验结果表明,超声波预处理有利于木材内部自由水的移动,从而缩短了试材的干燥时间。

2.3 超声波预处理条件对水分扩散系数的影响

根据公式2,不同条件预处理桉木试材的水分扩散系数,计算结果列于表4。

表4 不同预处理条件下桉木试件的水分扩散系数
Tab.4 Water diffusion coefficient (De) of Eucalyptus wood samples pretreated by ultrasound at different conditions

处理频率/ kHz	处理时间/ min	有效水分扩散系数 De/ ($\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)
0	0	8.01
	30	9.48
25	60	9.70
	90	10.75
59	30	10.55
	60	11.06
	90	11.56

从表4中数据可以看出,超声波预处理试件的水分扩散系数相比未处理试件提高,且随着预处理时间的延长和超声波频率的提高而增大。这是由于超声波在处理过程中促使木材内部微小孔道的形成,促进木材内部水分的移动^[16]。

3 结论

1) 桉木试材的干燥时间随超声波处理频率的增加和预处理时间的延长而缩短,且预处理时间对干燥时间的影响显著。

2) 与未处理材相比,桉木含水率在纤维饱和点以上时,预处理试材的干燥速率明显提高,说明超声波预处理有利于促进木材内自由水的移动。

3) 提高超声波预处理的频率,或延长预处理的时间,均可提高桉木的水分扩散系数。

4) 本试验只探讨了超声波预处理时间和频率对桉木干燥时间的影响,超声波预处理对桉木干燥质量、超声波功率对桉木干燥特性的影响、超声波作用机制等,有待进一步研究。

参考文献:

[1] 谢耀坚. 我国桉树种质资源现状及育种目标探讨[J]. 桉树科技, 2012, 29(2): 33-39.

[2] 张樟德. 桉树人工林的发展与可持续经营[J]. 林业科学, 2008(07): 97-102.

[3] 郭月红. 汽蒸-微爆破预处理对巨尾桉干燥特性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2015: 102-104.

[4] Gallego-Juarez J A, Rodriguez-Corral G, GálvezMoraleda J C, et al. A new high-intensity ultrasonic technology for food dehydration [J]. Drying Technology, 1999, 17(3): 597-608.

[5] Muralidhara H S, Ensminger D, Putnam A. Acoustic dewatering and drying (low and high frequency): State of the art review [J]. Drying Technology, 1985, 3(4): 529-566.

[6] 何正斌, 郭月红, 伊松林, 等. 木材超声波-真空协同干燥的动力学研究[J]. 北京林业大学学报, 2012(02): 133-136.

[7] Maria Aversa, Aart-Jan Van der Voort, Wouter de Heij, et al. An experimental analysis of acoustic drying of carrots, evaluation of heat transfer coefficients in different drying conditions [J]. Drying Technology An International Journal, 2011, 29(2): 239-244.

[8] SM Beck, H Sabarez, V Gaukel, et al. Enhancement of convective drying by application of airborne ultrasound-a response surface approach [J]. Ultrason. Sonochem, 2014, 21(6): 2144-2150.

[9] He Z, Fei Y, Peng Y, et al. Ultrasound-assisted vacuum drying of wood: effects on drying time and product quality [J]. BioResources, 2013, 8(1): 855-863.

[10] He Z, Wang Z, Lv H, et al. Effects of ultrasound on mass transfer within the boundary layer during wood vacuum drying [J]. BioResources, 2015, 10(3): 5267-5277.

[11] He Z, Yang F, Yi S, et al. Effect of ultrasound pretreatment on vacuum drying of Chinese catalpa wood [J]. Drying Technology, 2012, 30(15): 1750-1755.

[12] Phoungchandang S, Tochip L, Srijesdaruk V. White mulberry leaf drying by tray and heat pump dehumidified dryers [J]. World J Agric Sci, 2008, 4(5): 844-851.

[13] Simal S, Benedito J, Sánchez E S, et al. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 36(3): 323-336.

[14] Ashokkumar M, Grieser F. A comparison between multibubble sonoluminescence intensity and the temperature within cavitation bubbles[J]. Journal of the American Chemical Society, 2005, 127(15): 5326-5327.

[15] Salin J G. Drying of liquid water in wood as influenced by the capillary fiber network[J]. Drying Technology, 2008, 26(5): 560-567.

[16] Fernandes FAN, MI Gallão, S Rodrigues. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure, Melon dehydration[J]. Lwt-Food Sci Techno, 2008, 41(4): 604-610.

(责任编辑 向 琴)