

木材微波-真空干燥基本规律

李贤军¹, 张璧光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. 北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 对微波-真空干燥马尾松木材的干燥规律进行研究。结果表明:微波-真空干燥过程可分为加速、恒速和减速3个阶段,其中恒速干燥占整个干燥时间的50%以上;随着微波辐射时间和木材初含水率的增加,平均干燥速率显著增加;干燥室的真空度与木材的微波-真空干燥速率存在微弱正相关关系;木材厚度对干燥速率影响不显著。

关键词: 干燥; 微波真空; 基本规律; 马尾松

中图分类号:TS652 文献标识码:A 文章编号:1001-8654(2008)03-0023-03

Wood Drying Characteristics under Microwave-Vacuum Conditions

LI Xian-jun¹, ZHANG Bi-guang²

(1. School of Material Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China;

2. School of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Drying characteristics of Masson Pine (*Pinus massoniana*), under different microwave-vacuum conditions, were studied systematically in this paper. The results showed: 1) The process of microwave-vacuum wood drying could be divided into three stages; a short period of accelerating drying rate, a long stable period drying rate, and a period of decelerating drying rate, with the second period occupying 50% of the whole drying process; 2) Increasing initial wood moisture content and microwave radiation time increased the drying rate of wood accordingly; 3) The vacuum levels affected the drying rate proportionally; and 4) The effect of sample thickness on the drying rate could be negligible.

Key words: drying; microwave-vacuum; basic laws; Masson Pine

微波-真空干燥是一种具有干燥速率快、对环境友好等优点的低温高效干燥新技术,不仅能克服单独微波干燥过程中,因能量供给过高易出现木材内裂和内部烧焦等干燥缺陷,又能较易解决单独真空干燥过程中,因介质稀少而使热量传递困难的问题。目前,微波-真空干燥技术已经被广泛应用于医药、食品以及化工等领域^[1-2]。近几年来,国外已有学者^[3-5]对木材的微波-真空干燥进行适应性研究,取得了良好的试验效果,但我国未曾见有文献报道。在本研究中,笔者对影响木材微波-真空干燥的因素及其影响程度进行了较系统研究,总结了木材微波-真空干燥的基

本规律,以期为今后木材微波-真空干燥的进一步研究和工业化应用提供参考和科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试材为速生人工林马尾松(*Pinus massoniana*),采自广西柳州。将原木锯解成厚度为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,将整边板加工成厚度为20、40和60 mm,长、宽各为100 mm的六面刨光试件。

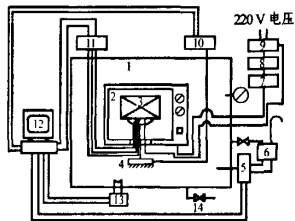
1.2 试验装置

微波-真空干燥装置,由真空系统、质量连续在线检测系统、温度检测系统、微波加热系统和数据采集系统构成(见图1)。其中微波加热系统由家用微波

收稿日期:2007-07-23; 修改日期:2008-04-13

基金项目:湖南省自然科学基金项目(07JJ6166);中南林业科技大学青年科学研究基金重点项目(06005A)。

作者简介:李贤军(1972—),男,中南林业科技大学副教授,博士。



1. 真空箱; 2. 微波炉; 3. 试件; 4. 质量传感器; 5. 压力控制器;
6. 真空泵; 7. 时间控制器; 8. 稳压器; 9. 调压器; 10. 质量显示仪;
11. 温度显示仪; 12. 计算机; 13. 加热器; 14. 进气阀

图 1 木材微波-真空干燥原理图

Fig. 1 Schematic diagram of microwave-vacuum drying

炉改造而成,输出功率为 575 W^[6]。

1.3 试验方法

分别研究辐射时间、真空度、初含水率和试件厚度对干燥速率的影响规律,试验参数如表 1 所示。

表 1 试验参数

Tab. 1 Experimental parameters and their levels

试验编号	试件厚度/mm	辐射时间/s	真空度/MPa	初含水率/%
1	60	10、15、20、25	0.04	38~43
2	40	20	0、0.02、0.04、0.06	48~52
3	60	20	0.04	44、65、92、120、170
4	20、40、60	9、18、27	0.04	37~45

用环氧树脂和铝箔封闭试件的 4 个侧面和 1 个端面,加热时使热量和水分沿着木材的厚度方向迁移。待树脂充分固化后,用天平准确称取试件的初质量,再将试件置于微波炉内的托盘上,通过质量传感器,可实现对微波-真空干燥过程中试件质量的在线检测。真空室的真空度达到并维持试验设定值,对试件进行间歇微波辐射,2 min 为一个辐射周期。当试件在连续 2 个辐射周期内的质量恒定时,停止微波辐射,结束干燥。卸真空后,称取木材试件干燥后的质量,再将其放入温度为(103±2)℃的烘箱中烘至绝干,然后计算其在干燥过程中各个阶段的含水率,绘制木材的含水率变化曲线。每个试验编号重复一次,取其平均值。

2 结果与分析

2.1 辐射时间对干燥速率的影响

从图 2 可看出,随着微波辐射时间的增加,干燥时间明显缩短,干燥速率显著增加。当微波辐射时间为 10、15、20、25 s 时,木材平均干燥速率分别为 0.1830、0.2995、0.3667、0.4795 %/min。回归分析表明,木材干燥速率与辐射时间之间存在着显著的线性关系,两者相关系数的平方(R^2)在 0.99 以上。这是

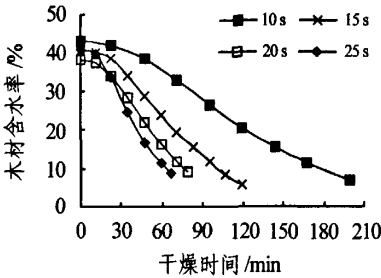


图 2 不同微波辐射时间木材的干燥曲线

Fig. 2 Drying curves of samples with different microwave power levels

因为微波辐射时间增加,木材中的水分能吸收更多的能量,蒸发速率加快;同时木材内快速蒸发的水分会使细胞腔内形成更高的压力,导致木材内外形成更大的压力差,木材内部水分向表面迁移的速率加快,使得木材干燥速率随着微波辐射时间的增加而显著提高。

2.2 真空度对干燥速率的影响

随着真空度增加,木材的干燥速率有增加的趋势(图 3)。当干燥室的真空度为 0、0.02、0.04 和 0.06 MPa 时,木材干燥速率分别为 0.6194、0.6832、0.7602、0.8365 %/min。这是由于当真空度增加时,水的沸点降低,木材表面的水分蒸发速率加快;并且随着真空度的增加,干燥室内和木材外表面的压力随之降低,而木材内部的压力基本不变,使木材内外的总压力差增大,水分向木材表面迁移的速率加快。

但方差分析显示,真空度对干燥速率的影响并不十分显著。这与前人对非木质多孔介质材料的研究结果一致^[1]。由于试验条件所限,本研究所选的最大真空度只有 0.06 MPa,真空度是否对木材干燥速率有明显影响,还有待进行更深入的研究。

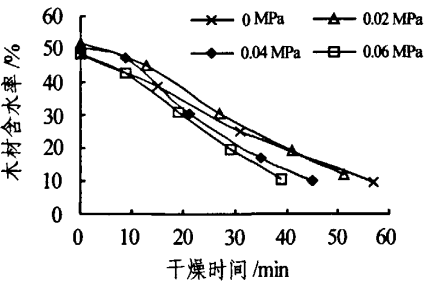


图 3 不同真空度条件木材的干燥曲线

Fig. 3 Drying curves of samples with different vacuum levels

2.3 初含水率对干燥速率的影响

从图4中可以看出,当木材初含水率不同时,含水率高的试样,其总的干燥时间延长,干燥速率也呈递增趋势。在本试验中,当木材初含水率为44%、65%、92%、120%、170%时,其平均干燥速率分别为0.6336、0.7061、0.7224、0.7481、0.8321 %/min。这一试验结果可以从木材内水分的存在状态和Dent水分吸着理论^[7-8]中得到合理解释。这是因为随着木材初含水率的增加,吸着水在木材内总的水分中所占的比例将降低,排除单位质量的水分需要较短的时间和更少的微波能,因而使得木材的平均干燥速率增加。

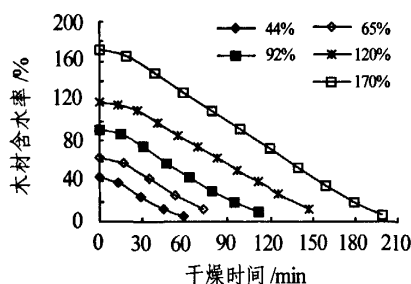


图4 不同初含水率木材的干燥曲线

Fig. 4 Drying curves of samples with different initial moisture contents

2.4 试件厚度对干燥速率的影响

在其他参数相同的情况下,不同厚度的试件,干燥曲线几乎完全重合(图5)。在本试验范围内,试件厚度对其干燥速率无显著影响。如木材的通透性较好,微波的辐射功率适当,木材内部的水分会向表面快速迁移,并有可能发生“聚集”现象,使木材表面的含水率高于内部含水率^[6],此时木材干燥速率主要取决于木材表面水分的散失速率。木材表面的水分散失速率又主要取决于真空度、木材表面积与体积的比率和微波辐射功率。

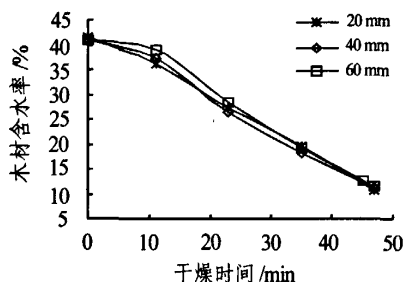


图5 不同厚度试件的干燥曲线

Fig. 5 Drying curves of samples with different thicknesses

在本试验中,干燥室的真空度和每个试件得到的微波辐射功率密度相同,因此,木材的干燥速率就决定于单位体积木材所具有的表面积,表面积越大,木材的干燥速率越快。对于不同厚度的木材,虽然越薄的木材具有越大的表面积与体积比,具有潜在的高干燥速率,但由于水分的蒸发需要能量,没有有效的能量供给,再大的表面积与体积比也无济于事。因此,表现出木材厚度对干燥速率无显著影响的规律。但可以推断,在微波-真空干燥过程中,不同厚度的木材,由于其表面积与体积比的差异较大,将具有不同的临界干燥速率(不产生干燥缺陷的最大干燥速率),木材厚度越薄,其临界干燥速率越大,但其实际干燥速率受到辐射功率的制约。

综上所述,木材的整个微波-真空干燥过程大致可分为:加速干燥段、恒速干燥段和减速干燥段3个阶段,其中恒速干燥段向减速干燥段过渡的区域大约发生在含水率在10%~20%的范围内。在微波-真空干燥过程中,恒速段在整个干燥过程中所占的比例非常大(>50%),且有随着木材初含水率增加而增大的趋势^[6],这与常规干燥中恒速干燥段所占比例小^[9],甚至不存在恒速干燥段的特点形成了鲜明对比。

3 结论

1)木材的整个微波-真空干燥过程可分为三个阶段:加速干燥段、恒速干燥段和减速干燥段,其中恒速干燥段在整个干燥过程中占的比例较大,一般在50%以上。恒速干燥段与减速干燥段之间发生转变的含水率区域大约在10%~20%之间;

2)在微波-真空干燥过程中,微波辐射时间和木材初含水率是影响木材干燥速率的主要因素,随着微波辐射时间和木材初含水率的增加,木材的干燥速率显著增加;干燥室的真空度与木材的干燥速率之间存在微弱的正相关关系;木材的干燥速率基本不受木材试件厚度的影响。

参考文献:

- [1] Kiranoudis C T, Tsami E, Maroulis Z B. Microwave vacuum drying kinetics of some fruits[J]. Drying Technology, 1997, 15 (10): 2421-2440.
- [2] Lombraña J L, Zuazo L, Ikra J. Moisture diffusivity behavior during freeze drying under microwave heating power application [J]. Drying Technology, 2002, 19(8): 1613-1627.
- [3] Seyfarth R, Leiker M, Mollekopf N. Continuous drying of lumber in a microwave vacuum kiln[C]. 8th international IUFRO Wood Drying Conference, Romania, 2003;159-163.

(下转第32页)

价标准;现有的其它绿色产品的评价标准,多是一些绿色程度的比较标准,大部分尚不具备科学的综合评判标准^[3]。

绿色家具评价标准的制定,一方面,要依据现行的环保标准、产品行业标准及某些地方性法规,这类标准是绝对性标准;另一方面,要根据市场发展和用户需求、现有产品及相关技术,确定参照产品,通过新开发产品与参照产品的对比,来评价产品的绿色程度,这类标准是相对性标准。

相对标准的制定需要引入参照产品的概念。参照产品一般分为:功能参照,即参照市场上现有的某种等效产品;技术参照,即代表新产品技术内容的一个产品集合。在绿色家具评价中,可用参照产品来制定评价标准。

4.2 绿色家具的评价方法

评价方法是评价系统的核心,必须正确、简便,且具有可操作性。绿色家具的评价是一个非常复杂的过程,涉及多个因素或多个目标,而且评价指标中,既有定性指标又有定量指标,必须采取综合评价的方法。

目前用于评价的各类方法有:经济分析法、专家咨询法、加权平均法、成本效益法、价值分析法(功能成本分析法)、模糊评价法、层次分析法(AHP法)等。根据绿色家具的特性,模糊层次评价法较适用^[3]。

一方面,家具产品的绿色属性具有明显的层次性,且绿色属性指标既具有定量成分,又具有定性成分,单纯采用层次分析法,很难对绿色家具的定性因素进行正确描述。而模糊评价法中,隶属函数和隶属度的概念正是针对定性因素,以精确的数学语言,描述定性或不确定因素,解决了统一各项指标量纲的问题。一般来说,每个评价指标都应建立相应的隶属函数。另一方面,绿色家具的绿色程度,贯穿于产品的整个生命周期,而不是某一过程或某一阶段,评价方法必须能够反映这一特性。

基于生命周期(LCA)的绿色家具模糊层次评价

法,是在对家具产品进行分析的基础上,统筹考虑家具产品整个生命周期的绿色属性,根据产品及其绿色属性的层次特性,应用层次分析方法,建立待评对象的递阶层次结构模型;根据评价指标的属性,应用模糊数学原理和模糊综合评判方法,对产品的绿色特性、绿色程度,进行系统化的综合评价,以进行产品方案比较,或进行绿色设计决策。

绿色家具的模糊层次评价过程一般包括:1)建立评价层次结构模型;2)确定相对重要度;3)计算综合重要度;4)确定隶属度;5)进行综合评价计算;6)比较待评产品与参照产品的综合评价计算结果,即确定待评家具产品是否符合绿色家具的要求^[1-3]。

5 结语

建立绿色家具评价体系是一项较为复杂的工作,为了便于家具企业考核其生产的家具产品的“绿色”程度和自身的可持续发展绩效,同时便于各利益相关单位,如环保、工商管理、质量监督、审计评估机构、投资者等,对家具企业的绩效进行监督,家具企业产品的“绿色”评价体系的建立,必须遵循以下总体原则:

1)能使家具企业的经营决策者,对企业的经营绩效进行比较及监控;

2)必须具有广泛的适用性,便于各不同产品类型的企业之间进行横向比较;

3)指标必须定义明确、量化方便、可操作性强,并与现有的考核指标接轨;

4)便于各利益相关部门进行审计与监督。

参考文献:

- [1] 刘光复,刘志峰,李钢. 绿色设计与绿色制造[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 刘志峰,刘光复. 绿色设计[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] 吴智慧. 绿色家具技术[M]. 北京:中国林业出版社,2006.
- [4] 张帝树. 北欧的绿色家具标准[J]. 家具, 2000(5):12-13.

(责任编辑 姜征)

(上接第25页)

- [4] Leiker M, Adamska M A. Energy efficiency and drying rates during vacuum microwave drying of wood[J]. Holz Roh Werkst, 2004(62):203-208.
- [5] Leiker M, Aurich K, Adamska M A. Accelerated drying of single hardwood boards by combined vacuum-microwave application[C]. 9th International IUFRO Wood Drying Conference, Nanjing, China, 2005:185-190.
- [6] 李贤军,张璧光. 木材微波真空干燥特性的研究[D]. 北京林

业大学, 2005.

- [7] Dent R W. A multilayer theory for gas sorption I. sorption of a single gas[J]. Text Res J, 1977(40):145-152.
- [8] 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, 2002:20-33.
- [9] 朱政贤. 木材干燥(第二版)[M]. 北京:中国林业出版社, 1992:76.

(责任编辑 鲍加芬)