

编者按: 依托国家“十二五”科技支撑计划、林业科学技术推广等项目, 中国林业科学研究院木材工业研究所进行了木材大功率微波处理技术的研究与系列产品开发, 经产学研联合攻关, 突破了木材微波处理效果可控的技术瓶颈, 取得了“微波膨化木材制备技术”成果, 开发了“微波膨化木”“微波膨化木装饰表板实木复合地板”等新产品。本刊于2020年系列报道相关研究的成果。

微波处理木材微观构造变化及破坏机理研究进展

翁翔, 周永东, 傅峰, 林兰英, 江京辉

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 利用微波技术改变木材的微观构造, 提高木材渗透性, 从而实现木材改性处理, 改性效果在一定程度上取决于木材微观构造的破坏情况。在总结国内外微波处理木材微观构造变化及破坏机理研究进展的基础上, 分析存在的问题, 并从观察手段和建立微力学模型两方面, 提出微波改性机理后续研究的建议。

关键词: 微波处理; 微观构造; 渗透性; 破坏机理

中图分类号: S781; TS65 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654 (2020) 02-0024-05

Research Progress of Microwave Treatment on Microstructural Changes and Destructive Mechanism of Wood

WENG Xiang, ZHOU Yong-dong, FU Feng, LIN Lan-ying, JIANG Jing-hui

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Microwave treatment can increase wood permeability by changing microstructure of wood. The effectiveness of the microwave treatment rely on destructiveness of the wood microstructure. The author presented a comprehensive literature review of research progress on microstructural changes and destructive mechanism of wood after the microwave treatment, Then discussed current challenges faced in the research field. Suggestions like establishing micromechanical models and improving observations in the research field should be given more attention in future.

Key words: microwave treatment; microstructure; permeability; destructive mechanism

微波是一种高频率的电磁波, 由于其良好的加热特性, 近几十年来被广泛应用于医药、食品、化学工业等领域。20世纪60年代, 国内外学者对木材

微波干燥技术进行研究并取得了一定的成果, 但由于成本较高、设备复杂等原因, 没有实现广泛的工业化应用。90年代以后, 研究人员开始探索将微波作为一种预处理手段对木材进行改性处理。其原理在于: 较高含水率(在纤维饱和点以上)的木材在微波交变电场中, 会吸收大量的微波能, 转化为自身加热的热能, 处理材温度迅速升高, 内部水分快速汽化。瞬间增大的蒸汽压力会对木材各级微观

收稿日期: 2019-11-07; 修改日期: 2020-02-12

基金项目: 国家重点研发计划项目“木材节能环保料与质量控制技术研究”(2016YFD0600701)。

作者简介: 翁翔(1991—), 男, 博士研究生。Email: razerhh@163.com

责任作者: 周永东, 男, 研究员。Email: zhouyd@criwi.org.cn

组织造成不同程度的破坏,从而形成新的流体通道,提高木材渗透性,有利于干燥、浸渍等改性处理^[1-6]。同时,微波处理过程中的高温环境,会造成木材纤维素、半纤维素和木质素软化,产生应力松弛现象,释放其内部的残余生长应力,进而改善干燥质量^[2,7]。

通过调整微波工艺参数,可以获得不同程度的改性效果。含水率在纤维饱和点以上的木材,经过低能量密度(250~350 MJ/m³)的微波处理,渗透性可以提高1.1~1.5倍,且密度和强度性能不会受到明显影响,适用于加速木材干燥;中等能量密度的处理,可以使木材渗透性上千倍地提高,但其静曲强度和弹性模量也会降低12%~26%;而高能量密度(高达1 200 MJ/m³)的处理,会使木材成为一种高度多孔及宏观裂纹的材料,极大地提高功能改性剂的浸注效果,再经过浸渍树脂和密实化处理后,可以获得比普通木材更高的强度和尺寸稳定性,为低等级木材的高值利用提供了新途径^[2]。

在实际应用中,需要根据不同树种和改性效果制定不同的处理工艺。由于木材树种的多样性和变异性,亟需找到一种能够快速预测结果、优化工艺的办法。不同改性效果的本质是木材微观构造对不同强度微波处理的力学响应结果,即微观构造产生了不同程度的破坏。研究微波作用下木材内部的微观构造变化及破坏机理,有助于建立微波工艺参数与处理过程中木材内部的温度压力变化情况、微观构造破坏情况和最终改性效果之间的对应关系,对预测改性效果、快速优化处理工艺具有重要意义。

1 微波处理木材的微观构造变化

在针叶树材中,管胞上的具缘纹孔是控制渗透性的首要结构因子。在微波处理过程中,细胞腔内迅速升高的蒸汽压力首先对纹孔造成冲击,其中纹孔缘和纹孔膜(塞、塞缘)都有可能被破坏^[8-11]。部分闭塞纹孔的纹孔塞会发生偏移,产生复位现象^[12]。另外,还会造成部分射线薄壁细胞和树脂道破裂,射线薄壁细胞和轴向管胞之间的胞间层、轴向管胞之间的胞间层产生裂纹,甚至管胞壁破坏^[13-16]。

在阔叶树材中,导管主要负责流体的纵向输导,而侵填体是导管中常见的内含物,严重影响木材的渗透性,会造成木材干燥、防腐和改性等浸渍处理

困难。微波处理可以破坏侵填体并使其重新分布^[1,5,13,17],导管内的纹孔膜也会被破坏^[5,17]。同时,由于薄壁细胞与木纤维之间、薄壁细胞与薄壁细胞之间、木纤维与木纤维之间等木材细胞结合部位的胞间层强度较低,在蒸汽压力作用下,这些区域比较容易出现裂纹^[5,13]。除此之外,射线薄壁细胞、木纤维和导管也可能被破坏^[1-3]。

在木材微观构造中,射线薄壁细胞属于较为薄弱的组织,在微波作用下容易被破坏。有文献记载,在微波处理尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)时,发现木纤维间的复合胞间层和木纤维壁上出现了裂纹,但射线薄壁细胞只产生了一定程度的变形,并未破裂^[18],说明不同树种中所含射线细胞的尺寸、分布和组织比量均有差异,使得破坏程度有所不同。

另外,笔者在人工林杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的微波处理试验中,仅在开裂位置发现部分射线薄壁细胞被破坏,在未开裂位置发现管胞与管胞之间、管胞与射线薄壁细胞之间产生了微裂纹,但射线薄壁细胞未见破坏(图1)。有两种可能:

1) 管胞/木纤维之间、管胞/木纤维和射线薄壁细胞之间的胞间层强度弱于射线薄壁细胞的强度,在蒸汽压力下更容易被破坏;2) 胞间层与相邻壁层的力学性质有较大差异,在外载荷作用下,易产生应力集中,故更容易被破坏。

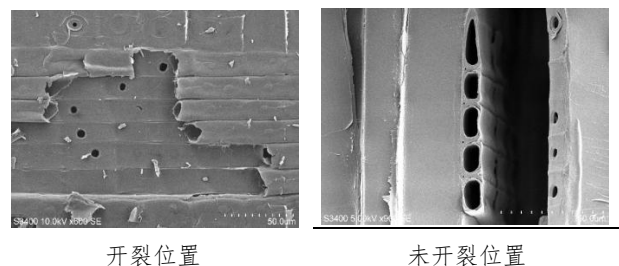


图1 微波处理杉木的微观构造变化

Fig.1 SEM images of microstructure of Chinese fir after microwave treatment

学者们也对微波处理过程中各级微观构造产生破坏的难易程度和先后顺序进行了分析。澳大利亚墨尔本大学将微观破坏程度分为3个阶段:

第1阶段,纹孔膜和部分侵填体破裂,通道中的树脂发生融化和交换;第2阶段,射线薄壁细胞的破裂增加;第3阶段,木材内部的主要细胞(管胞、木纤维和薄壁组织)壁和导管产生破裂,在径

切面上形成了大量空腔^[1]。

微观构造破坏的顺序依次为：纹孔膜、侵填体、射线薄壁细胞、主要细胞（管胞、木纤维和薄壁组织）壁和导管。

国内学者对落叶松（*Larix gmelinii*）进行不同强度微波辐射处理后发现，在蒸汽压力的作用下，管胞间的胞间层会先于管胞壁产生破坏^[19]。另有研究发现，管胞与射线薄壁细胞之间的胞间层比管胞间的胞间层更容易被破坏。轴向管胞与横向射线薄壁细胞之间的微纤丝排列方式不同，可导致该区域的胞间层强度较轴向管胞之间更弱^[12]。

由此可见，目前对微波处理过程中，木材各级微观构造产生破坏的难易程度和先后顺序，尚未形成统一和明晰的结论。

微波处理对木材内部微观构造的破坏，是处理材渗透性提高的主要原因。蒸汽压力对纹孔结构的破坏和对纹孔塞位置的改变，提高了水分在木材内部的弦向和纵向输导能力；导管中侵填体的破坏和重新分布，使流体在导管中的流通更通畅；再有射线薄壁细胞和轴向管胞/木纤维之间的胞间层、轴向管胞/木纤维之间的胞间层破坏导致的分离，更是增加了水分迁移的通道；最后，细胞壁的破裂，进一步加快了流体在木材内部的渗透速率，从而使木材整体的渗透性得到显著提升。

2 微波处理木材微观构造破坏机理

微波处理木材是一个涉及电磁场、温度场等多物理场耦合作用的复杂过程。研究微观构造的破坏机理，需要解决处理过程中的材料性质（细胞壁结构与力学性能）、载荷（蒸汽压力）和微观构造受力分析三个方面的问题。

木材细胞壁由胞间层、初生壁和次生壁组成，其中胞间层和初生壁一起被称为复合胞间层，次生壁因微纤丝角不同，分为 S_1 、 S_2 、 S_3 层。细胞壁各层可以看作纤维增强复合材料，其中增强相为纤维素组成的微纤丝，基体为半纤维素和木质素组成的混合物^[20-21]。根据 Halpin-Tsai 公式^[22]，纤维素、半纤维素和木质素三大素的弹性性能和体积分数，可以用来计算各壁层的弹性性能，而且在高温高湿的微波处理环境下，细胞壁的弹性力学性能会显著降低^[21]。

蒸汽压力是导致微观构造变形和破坏的主要载荷。在微波处理过程中，木材的厚度和长度方向上，分别存在明显的蒸汽压力梯度^[23]。随着微波功率的增加，温度和压力上升越快，峰值越高^[24]，木材微观构造破坏越严重。

此外，通过对单个微观构造进行受力分析，建立微力学模型，可以预测相应构造被破坏所需要的临界条件。尾叶桉薄壁细胞破坏的临界压差和温度分别为 0.84 MPa 和 168 °C，且半径大的薄壁细胞更容易被破坏^[25]；当樟子松木材内部的温度达到 146.3 °C 时，射线薄壁细胞会被破坏，而早材管胞内壁的屈服温度为 185 °C，早材管胞的爆破温度为 223 °C^[26]。由于木材内部的温度和压力与微波工艺参数有关，通过建立临界条件与微波工艺参数之间的对应关系，即可实现对微观构造破坏的预测^[27]。

木材的微观结构由不同类型的细胞通过不同的方式排列组成，这些微组织相互影响，共同决定木材对载荷的响应。因此，建立一个包含多种类型微组织，可模拟真实状态的木材微力学模型，对研究微观构造破坏机理非常关键，但目前在微波木材处理领域尚未见相关报道。

利用有限元软件，建立比较全面的微力学模型，包括单细胞模型、早晚材管胞模型和纹孔、射线薄壁细胞模型，可用来分析蒸汽压力作用下，细胞壁各层的响应和功能、细胞形状对变形的影响、早晚材管胞的变形程度差异和微观裂纹最先产生的位置^[21, 28]。在木材蒸汽爆破处理条件下，具缘纹孔周围和交叉场纹孔的两端会出现高应力区域，即这两个位置在蒸汽压力作用下最容易产生破坏^[28]，这一结果对于微波木材处理相关研究，具有一定借鉴意义。

3 问题及建议

3.1 问题

在微波处理材的微观构造方面，国内外学者已经进行了大量的观察研究，对可能破坏的位置有了较为全面的了解，但仍有些问题未取得突破。

1) 对破坏过程没有形成定论，仅是通过二维静态观察，来推测各级微观构造产生破坏的难易程度和先后顺序，存在很大的局限性，需要结合破坏机理进行综合分析；

2) 由于观察手段的限制,在细胞壁分层结构甚至高分子结构尺度上的研究较少,无法从更深层次上解释破坏原因;需要利用更先进的仪器设备,对破坏形貌和破坏过程进行更细致、更直观的分析;

3) 某些观察前的预处理,可能会给微观构造带来二次损伤,特别是样品干燥处理,可能会使纹孔膜发生偏移,造成观测结果不准确。

在微波处理木材微观构造破坏机理研究方面,国内外研究均较少,并且存在以下几个问题:

1) 不同树种的细胞壁力学性能参数缺乏,测量难度较大,仅部分弹性参数可以通过理论模型计算;

2) 高强度微波辐射下,木材内部的压力数据未见报道;

3) 现有的单细胞模型,弱化了细胞间的相互作用,在解释复杂的多类型细胞问题时,存在一定的局限性。

此外,微波工艺参数与处理过程中木材内部的温度压力变化情况、微观构造破坏情况和最终改性效果之间的对应关系,尚未建立。

3.2 建议

1) 升级微观构造观察手段。采用透射电镜、原子力显微镜等设备进行更细致的分析,在细胞壁分层尺度上,明确破坏位置。通过高分辨率CT设备的三维重构技术,可以对破坏形貌和破坏位置进行更直观的分析,且不会对目标位置造成二次损伤。

利用普通扫描电子显微镜观察纹孔开闭状态前,采用溶剂置换法进行干燥,可以减少对纹孔膜位置的影响,或者采用可进行含水样品测试的环境扫描电镜进行直接观察;通过环境扫描电镜的动态力学加载装置,可以模拟样品在微波处理过程中的受载状态,实现对胞间层从起始破坏到裂纹扩展过程的动态观察。

2) 深化微观构造破坏机理研究,建立木材微力学模型。

① 在细胞壁力学性能数据获取方面,需要利用一些高精尖设备来进行测量,例如纳米压痕仪和微拉伸计等;对于管胞的横向力学性质等难以直接测量的性能参数,可以采用间接测量方法。即先测量出其纵向力学性质后,根据两者之间的比例关系,计算后获取。

② 在蒸汽压力数据获取方面,可以采用抗微波干扰、耐高温的微型光纤压力传感器进行采集;借助计算机仿真技术,建立包含多种类型细胞的木材微力学模型,模拟微观构造在微波作用下的变形及应力分布,预测破坏产生位置,揭示木材内部破坏发生及发展机制。

③ 通过研究微波工艺参数与处理过程中木材内部温度压力之间、微观构造破坏情况和最终改性效果之间的对应关系,最终达到通过微波工艺参数及模型预测改性效果的目标。

参考文献:

- [1] Torgovnikov G, Vinden P. High-intensity microwave wood modification for increasing permeability[J]. Forest Products Journal, 2009, 59(4): 84-92.
- [2] Torgovnikov G, Vinden P. Microwave wood modification technology and its applications[J]. Forest Products Journal, 2010, 60(60): 173-182.
- [3] Vinden P, Torgovnikov G, Hann J. Microwave modification of *Radiata pine* railway sleepers for preservative treatment[J]. European Journal of Wood & Wood Products, 2011, 69(2): 271-279.
- [4] Harris G A, Torgovnikov G, Vinden P, et al. Microwave pretreatment of backsawn messmate boards to improve drying quality: Part 1[J]. Drying Technology, 2008, 26(5): 579-584.
- [5] HE X, XIONG X, XIE J, et al. Effect of Microwave pretreatment on permeability and drying properties of wood[J]. BioResources, 2017, 12(2): 3850-3863.
- [6] Balboni B M, Ozarska B, Garcia J N, et al. Microwave treatment of *Eucalyptus macrorhyncha* timber for reducing drying defects and its impact on physical and mechanical wood properties[J]. European Journal of Wood & Wood Products, 2017(1): 1-10.
- [7] 周永东,傅峰,李贤军,等.微波处理对桉树应力及微观构造的影响[J].北京林业大学学报,2009,31(2): 147-150.
ZHOU Y D, FU F, LI X J, et al. Effects of microwave treatment on residue growth stress and microstructure of *Eucalyptus urophylla*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(2): 147-150.
- [8] LI X, ZHANG B, LI W, et al. Research on the effect of microwave pretreatment on moisture diffusion coefficient of wood[J]. Wood Science and Technology, 2005, 39(7): 521-528.
- [9] 江涛.微波细胞爆破法改性落叶松木材的脱脂技术[D].哈尔滨:东北林业大学,2006.
JIANG T. Deresination of larch wood modified by microwave-cell-explosion[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2006.
- [10] 江涛,周志芳,王清文.高强度微波辐射对落叶松木材渗透性的影响[J].林业科学,2006,42(11): 87-92.
JIANG T, ZHOU Z F, Wang Q W. Effects of intensive microwave irradiation on the permeability of larch wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(11): 87-92.
- [11] 周志芳,江涛,王清文.高强度微波处理对落叶松木材力学性质的影响[J].东北林业大学学报,2007,35(2): 7-8.
ZHOU Z F, JIANG T, WANG Q W. Influence of intensive microwave treatment on mechanical properties of larch wood[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2007, 35(2): 7-8.
- [12] 何盛.微波处理改善木材浸注性及其机理研究[D].北京:中国林业科学研究院,2014.

- HE S. The improvement of wood liquid impregnability by microwave treatment and its mechanism[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [13] 何盛, 林兰英, 傅峰, 等. 六种木材的微波处理实验研究[J]. 微波学报, 2014, 30(4): 90-96.
- HE S, LIN L Y, FU F, et al. Experimental study of six species of wood treated by microwave[J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(4): 90-96.
- [14] 杨琳. 利用微波改善落叶松木材的渗透性[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
- YANG L. Modification on the permeability of larch wood by microwave[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2004.
- [15] LIU H, WANG Q, YANG L, et al. Modification of larch wood by intensive microwave irradiation[J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16(3): 237-240.
- [16] WANG D, PENG L, ZHU G, et al. Improving the sound Absorption capacity of wood by microwave treatment[J]. BioResources, 2014, 9(4).
- [17] 吕悦孝, 薛振华, 薛利忠. 微波改性木材的超微观察[J]. 内蒙古林业科技, 2001(4): 31-33.
- LV Y X, XUE Z H, XUE L Z. Observing ex-microcosmic structure of microwave modified wood[J]. Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2001(4): 31-33.
- [18] 王婧. 微波预处理对尾叶桉人工林木材干燥特性的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- WANG J. The influence of microwave pretreatment on drying characteristics of Eucalyptus urophylla[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [19] 周志芳. 高强度微波处理与干燥对落叶松木材解剖构造和性能的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
- ZHOU Z F. The influence of microwave treatment and drying on performance and anatomy of larch wood[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2007.
- [20] Yamamoto H. Role of the gelatinous layer on the origin of the physical properties of the tension wood[J]. Journal of Wood Science, 2004, 50(3): 197-208.
- [21] Muzamal M, Gamstedt E K, Rasmuson A. Modeling wood fiber deformation caused by vapor expansion during steam explosion of wood[J]. Wood Science and Technology, 2014, 48(2): 353-372.
- [22] Halpin J C, Kardos J L. The Halpin-Tsai equations: A review[J]. Polymer Engineering & Science, 1976, 16(5): 344-352.
- [23] 刘志军, 张璧光, 刘智. 微波干燥过程中木材内部水分移动机理初探[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(S1): 51-55.
- LIU Z J, ZHANG B G, LIU Z. Mechanism of internal moisture migration in wood during the microwave drying[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(S1): 51-55.
- [24] 刘志军, 张璧光, 贺宏奎. 微波干燥过程中木材内蒸汽压力与温度的变化特性[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(6): 124-127.
- LIU Z J, ZHANG B G, HE H K. Variation property of steam pressure and temperature in wood during microwave drying[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(6): 124-127.
- [25] LI X, ZHOU Y, YAN Y, et al. A single cell model for pretreatment of wood by microwave explosion[J]. Holzforschung, 2010, 64(5): 633-637.
- [26] 肖辉. 微波处理樟子松木材机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- XIAO H. Study on the microwave treatment mechanism of *Pinus sylvestris*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017.
- [27] 翟新. 物理方法破裂植物细胞壁的力学模型研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- ZHAI X. The study on the mechanical models of rupturing plant cell wall by physical methods[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [28] Muzamal M, Gamstedt E K, Rasmuson A. Mechanistic study of microstructural deformation and stress in steam-exploded softwood[J]. Wood Science & Technology, 2017, 51(3): 447-462.
- (本文编校 向 琴)

2019 年我国地板行业销量统计数据

根据中国林产工业协会不完全统计, 2019 年我国具有一定规模的地板企业年总销量约 8.91 亿 m^2 。首次新增石木塑地板和木塑地板品类, 与木竹地板合并统计。

1 木竹地板

2019 年中国具有一定规模的木竹地板企业总销量约 42 460 万 m^2 , 同比增长约 1.68%。其中:

强化木地板销售 21 620 万 m^2 , 同比增长 1.22%;
实木复合地板销售 12 700 万 m^2 , 同比增长 5.75%;
实木地板销售 4 660 万 m^2 , 同比下降 1.69%;
竹地板销售 3 020 万 m^2 , 同比下降 5.63%;
其他地板销售 460 万 m^2 , 同比增长 2.22%。

2019 年木竹地板行业特征: 1) 总体平稳发展。内销增长, 出口略下滑; 2) 内销渠道分化愈发显著。工程渠道销量保持较大幅度增长, 拉动实木复合地板销量增长; 零售渠道销量降低, 市场青睐个性化、

差异化、高端化产品和服务; 3) 出口受国际贸易局势影响较大。强化木地板、竹地板出口量下降, 实木复合地板出口量略有增长; 4) 产业集中度提高, 领军企业销量占比加大, 是引领产业发展的重要引擎。

2 石木塑地板

2019 年中国具有一定规模的石木塑地板(含发泡石木塑地板、非发泡石木塑地板、软质石塑地板)企业总销量约 3.96 亿 m^2 , 同比增长 10.0%。其中:

发泡、非发泡石木塑地板销量分别为 1.50 亿 m^2 , 软质石塑地板销量约 0.96 亿 m^2 。

石木塑地板出口量约占总量的 95.00%。

3 木塑地板

2019 年中国具有一定规模的木塑地板企业总销量约 0.70 亿 m^2 , 同比增长 5.0%。

木塑地板出口量约占总量的 50.0%。室外用木塑地板约占总量的 95.0%。