

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。

木材微波处理技术与应用进展

徐恩光, 林兰英, 李善明, 彭立民, 周永东, 傅峰

(中国林业科学研究院木材工业研究所; 国家林业和草原局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

摘要: 木材在微波作用下可迅速升温超过 180 °C, 内部水分汽化后以蒸汽形式逸出, 冲破木材内部薄弱组织。处理后木材的微观结构变化可分为 7 级, 宏观处理效果分为 3 型。微波技术主要用于木材干燥、膨化、弯曲和检疫等。通过微波膨化技术获得的“微波膨化木”可用于加工制造高性能的改性木、防腐木、阻燃木、木质装饰材料和高导热木材等。

关键词: 木材; 微波处理; 机理; 木材微波干燥; 木材微波膨化; 木材弯曲; 木材检疫

中图分类号: S781.7; TS61 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2020) 01-0020-05

Wood Microwave Treatment Technology and Its Applications

XU En-guang, LIN Lan-ying, LI Shan-ming, PENG Li-min, ZHOU Yong-dong, FU Feng

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Wood Science and Technology of State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: Under a microwave radiation, internal wood temperature could rise rapidly to over 180 °C, resulting in water vapor to evaporate. The authors divided the treated wood into 7 levels according to microstructure of the treated wood and the treatment effects into 3 types. Microwave treatment technology could be used in wood drying, puffing, bending and quarantine fields. And the microwave-puffed wood could be used for making high performance modified wood, preserved wood, flame retardant wood, as well as decorative wood materials and high thermal conductivity wood materials.

Key words: wood; microwave modification; mechanism; microwave drying; microwave puffing; bending; timber quarantine

收稿日期: 2019-11-07; 修改日期: 2019-12-16

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划“木质隔声和发热新材料制造关键技术与示范”(2015BAD14B04); 国家林草局林业科技成果推广计划项目“基于高能微波处理的节材高效利用技术”([2019]42号); 浙江省与中国林业科学研究院省院合作林业科技项目“大功率微波膨化重组装饰材制备技术研究及示范”(2017SY15); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“基于微波膨化木材的弯曲特性和机制研究”(CAFYBB2018SY030)。

作者简介: 徐恩光(1988—), 男, 博士研究生。Email: enguangxu@foxmail.com

责任作者: 傅峰, 男, 研究员。Email: feng@caf.ac.cn

微波的电磁波特性, 最先用于雷达和通讯领域, 随着微波热效应的发现, 微波加热以其具有选择性, 穿透能力强、速度快、均匀性好, 热惯性小, 易控制等特点, 被广泛用于各工业领域。

在木材领域, 微波最先用于木材干燥, 但由于木材各向异性及微波技术水平限制, 木材微波干燥成本高、技术难度大, 没有得到大范围推广。在木材微波干燥的基础上, 发展出了木材干燥微波预处理

理技术,借助微波辐射,使木材内部水分迅速汽化,汽化的水蒸气体积膨胀,并从木材内部逸出,可改善木材的渗透性,释放木材应力,从而提高木材的干燥效率与干燥质量。

在木材干燥用微波预处理技术开发的基础上,又获得了木材改性用微波预处理技术和木质功能材料制备用微波膨化处理技术,即借助微波处理时的木材内部蒸汽,冲破木材的薄弱组织,在木材内部和表面产生大量的微观裂隙和宏观裂缝,构成新的流体通道,便于改性剂和各类功能体导入。此外,微波技术还可用于木材弯曲和木材检疫。微波技术在木材领域的推广应用,为木材的快速、高质量干燥提供了新方法,也为木材尤其是人工林木材的增值提效利用提供了新思路。

但目前专用的木材微波处理设备研发较少,针对不同用途的木材微波处理工艺系统研究亦不足,限制了木材用微波处理技术的推广。另一方面,人工速生林木材目前主要用于人造板生产,产品能耗高,木材利用附加值低。而木材经过微波处理,渗透性改善,使人工林木材用于木材改性、防腐、阻燃、木质装饰材料、高导热木材制备等领域,对实现人工林木材的整体、实木化利用,弥补实木资源不足及短缺现状,具有重要意义。

1 木材微波处理技术及机理研究概况

木材微波处理是微波的热效应和非热效应共同作用的结果,木材置于微波场后,木材分子和木材内水分子都随着微波场的变化不停的旋转、摩擦,但由于木材分子和水分子的极性差异,主要是木材内水分子吸收微波能。因此木材的微波处理主要利用了微波的热效应,木材微波处理机理研究主要集中在处理过程中木材温度变化及处理后木材的结构变化,对于微波对木材的非热效应作用研究较少。

1.1 微波处理过程中木材温度变化

木材的微波加热效果与微波频率、微波功率、处理时间和木材介电性能有关^[1],其中微波功率大小和处理时间长短决定了馈入木材的微波能总量,木材的介电特性决定了木材与微波场的耦合作用,微波频率决定了木材的加热深度。一般木材用微波频率为 2 450 MHz 和 915 MHz,对应波长为 12 cm 和

33.5 cm,对于单口馈入的微波系统来说,木材厚度不能超过微波波长。

在微波处理时木材内部的温度均匀性,由电磁场均匀性和木材介电特性均匀性决定,受谐振腔尺寸、微波馈入形式^[2]、木材位置^[3]、木材各向异性、内部含水率分布影响^[4],木材表面和内部的水蒸发速率差异亦影响均匀性^[5]。单向微波辐射时,木材内部温度沿微波入射方向逐渐降低,整体均匀性差;双向微波辐射的均匀性较好^[5]。

木材微波处理时,内部温度变化过程分为快速升温、恒温和后升温三个阶段。在快速升温阶段,内部温度迅速到达 100 ℃,并恒温保持一定时间。如果木材初含水率较低或整体渗透性好,水蒸气逸出速度快,则无恒温阶段。当恒温阶段积累了足够的能量,进入后升温阶段,此时升温速率更大,最高温度可 ≥ 180 ℃^[3,6]。在微波处理后期,当木材含水率降到 15%以下时,木材介电弛豫频率小于微波加热频率,介电常数随温度升高不断增大,升温速率急剧增加,控制不当,容易引起木材炭化^[7]。

1.2 微波处理后木材结构变化

微波处理后木材纹孔膜打开,导管内的侵填体借蒸汽逸出,含量减少并重新分布,薄壁细胞被破坏,胞间层被撕裂,管胞、木纤维等厚壁细胞的细胞壁亦被破坏^[8-9]。根据树种和微波工艺的不同,处理后木材的结构变化可分为 6 级,见表 1^[10]。

表 1 不同微波处理等级的木材结构特点
Tab.1 Characteristics of wood structure at different microwave treatments

处理等级	特点	树种	应用
0 级	材性未改变	大多数树种	微波杀菌、微波软化、微波干燥
1 级	纹孔膜打开	针叶材	木材干燥
2 级	侵填体减少	阔叶材	木材干燥
3 级	射线组织	部分针叶材和阔叶材	木材改性与保护
4 级	木射线/木纤维破坏;横截面尺寸不变	大多数树种	功能材料制备、制浆
5 级	木射线/木纤维破坏;横截面尺寸变大	大多数树种	功能材料制备、制浆
6 级	木射线/木纤维破坏;表面处理	大多数树种	木材改性与保护

木材微波干燥和干燥用微波预处理时,木材的结构变化主要是1~2级;改性微波预处理和微波膨化处理木材的结构变化对应1~5级;表面膨化的微波处理木材结构变化达到6级。

2 木材微波干燥

常规木材干燥主要靠含水率梯度和温度梯度促进水分移动,干燥速率受木材厚度影响;而微波干燥时,只要木材处于微波可穿透范围内,木材同时受热,木材厚度对干燥速率没有显著影响。当木材内部温度高于100℃后,在常规水分移动作用力外,还有蒸汽压力作用,加快水分移动速度,因此,微波干燥速度快^[11]。

含水率高于纤维饱和点时,在足够的微波功率下,初含水率对微波干燥速率影响不大^[12],不同初含水率木材内部达到最大蒸汽压力的时间相近,但蒸汽压力的峰值不同^[13],干燥速率可以达到0.20%~0.45%/min^[14]。如果此阶段提高微波处理功率,木材的升温速率、内部蒸汽量、蒸汽压力和最高温度均可增加。木材含水率越高,蒸汽压峰值越高,相应的最高温度也越高^[13]。当木材含水率低于纤维饱和点,结合水主要以蒸汽形式通过相邻细胞向木材外表面扩散并排出^[15],适宜的微波干燥速率为0.10%~0.20%/min^[14]。在干燥后期,木材升温速度快,并伴有大幅波动。若当温度高于150℃时,容易引起木材干燥缺陷和炭化。需采用间歇式微波干燥工艺,控制木材内部温度、升温速率和水蒸汽含量,保证干燥质量。

整个干燥过程中,木材内部的蒸汽压力应控制在0.84 MPa以内^[16],升温速率控制在0.2~3℃/min之间^[17],还可配合真空干燥技术,提高木材干燥速率和质量。干燥后的木材如果内部水分分布不均匀,可以利用水分对微波的强吸收特性,通过微波辐射进行含水率平衡处理。

在木材微波干燥过程中,没有使用重物对变形进行抑制,对干燥工艺要求较高。目前多限于50 mm以下厚度的木材干燥,推广应用受到限制。

3 木材微波膨化

木材微波膨化,与木材干燥微波预处理、木材改性微波预处理的机理相同,区别在于微波工艺调控不同。为了规范木材微波膨化处理效果的评价指标,便于产业化推广,根据微波处理前后木材的体积膨胀率、裂隙面积比例、单位面积裂隙数量和静曲强度等指标,分为I、II、III型,见表2^[18-19]。

3.1 I型微波膨化处理

I型微波膨化是以提高木材渗透性为目标,处理后木材尺寸和力学性能不发生明显改变,可用于阔叶材和针叶材的干燥预处理。微波处理作用:一是直接降低木材含水率;二是提高木材渗透性,释放应力,缩短干燥时间,提高干燥质量,提升干燥效率,降低成本。

预处理效果与微波功率密度密切相关,30~50 mm厚硬阔叶材,经过70~110 kWh/m³微波处理后,含水率降低了4%~11%,后续干燥时,相同工艺下干燥时间缩短了50%左右。提高微波功率密度,可以

表2 微波膨化木质量分级表
Tab.2 Classification of microwave-puffed wood

分级	I 型	II 型	III型
宏观特征			
体积膨胀率/%	≤4	4~9	≥9
裂隙面积比例/%	≤7	7~14	≥14
裂隙数量/(个/m ²)	≤3 000	3 000~6 000	≥6 000
抗弯强度降低率/%	≤5	5~15	≥15
用途	渗透性改善、快速干燥	大分子改性剂浸渍、防腐、阻燃	难浸渍型改性剂浸渍、高导热木材

进一步提高干燥速率, 100~180 kWh/m³ 的微波处理后, 含水率降低了 12%~32%, 干燥速度提高 5~10 倍, 但干燥速率过快容易引起干燥缺陷^[20]。对于以桉树木材为代表的难干材, 按照 I 型膨化标准处理后, 不再需要 3~6 个月时间的预气干, 处理后可直接进行窑干, 且窑干时间也缩短了 2~3 周, 干燥材没有明显皱缩, 干燥质量提高^[20]。

3.2 II 型微波膨化处理

II 型微波膨化亦以提高木材的流体渗透性为目标, 膨化木的体积膨胀率 < 9%, 孔隙率增加 2.72%~6.15%, 比表面积增加, 液体渗透性提高, 抗弯强度降幅低于 15%^[21], 满足木材改性和药剂浸渍的需求。

其制备工艺要求木材的初含水率高于纤维饱和点, 微波能量密度控制在 75~110 kWh/m³ 范围内^[22], 处理时木材内部温度约 100 °C, 一次辐射处理后含水率降低了 4%~13%, 长时间、低功率的微波处理工艺更有利于改性剂的浸渍^[23]。

研究表明, 人工林杨树 II 型微波膨化木树脂浸渍改性时, 改性材的平均密度比同条件的未处理材提高了 46%, 抗弯强度提高了 59%, 体积湿胀率降低了 5.4%^[24]。樟子松、水曲柳、杨木和杉木经 II 型微波膨化工艺处理后 30 min 加压浸渍阻燃剂载药率增加了 1.77%~9.75%, 氧指数提高了 2 倍以上^[25-26]。防腐处理时浸渍时间缩短, 载药率提高了 2~3 倍^[27], 浸渍深度增加了 3.5 倍^[28], 浸渍均匀性增加。对于心材渗透性较差的木材, 微波处理后心材的载药量明显提升^[22]; 木材染色时, 30 mm 厚的杨树板材, 使用 12 kW 的微波源辐射处理 90 s 后, 上染率提高 21.25%, 固色率提高 21.44%, 视觉效果增加^[29]。

3.3 III 型微波膨化处理

III 型微波膨化处理最大的特点是, 处理材横截面尺寸变大, 体积膨胀率 ≥ 9%, 木材内部和表面出现大量的微观裂隙和宏观裂缝, 形成新的流体通道, 分布在木材径向和生长轮附近, 大大地缩短水分在木材内部的横向传输路径。

澳大利亚学者将 III 型微波膨化木称为 “Torgvin” 木材^[30], 主要用于各类木质功能材料制备。使用时还可根据需要再将材料压缩至指定尺寸, 以提高其力学强度, 尤其对一些低密度木材, 改性效果更为明显^[30]。

III 型微波膨化木可以浸渍常规树脂, 处理后获得 “Vintorg” 系列改性木材^[30]。使用异氰酸酯 (PMDI) 改性的木材, 静曲强度值高于用三聚氰胺甲醛树脂 (MF) 和糠醇树脂 (FA) 改性的木材; 而 MF 树脂和 FA 树脂改性材则具有较高的表面硬度; MF 树脂和 PMDI 树脂改性材具有更低的蠕变, 以及较好的蠕变恢复性能^[31-32]。

在浸渍过程中加入染料, 还可制备力学强度提高的木质装饰材, 可用于实木复合地板表板等木质材料装饰领域^[33]。但 III 型微波膨化木改性材并不能克服木材自身的节子和应力木等构造缺陷, 对有明显缺陷的木材, 力学强度提高程度有限^[34]。

利用 III 型微波膨化木, 浸渍密度为 7 400 kg/m³ 的金属合金, 可以获得密度在 2 520~4 020 kg/m³ 之间的金属化木材, 木材所占质量比在 15.8%~28.4% 之间, 金属主要分布在木材裂缝和导管中^[30]。与天然木材相比, 金属改性木材具有高的电导率和热导率, 独特的声学性能和收缩、湿胀性能, 利用其高导热性可制备电热地板^[35]等新产品, 为木材应用领域拓展提供了更多可能。

4 木材微波弯曲

木材弯曲领域, 微波技术应用主要有 3 个方面:

1) 两步法弯曲技术: 将适宜含水率的木材利用微波进行独立加热软化, 或联合水热处理共同软化, 再进行弯曲和干燥定型处理。微波技术的引入可以提高木材顺纹压缩率, 减小弯曲的曲率半径^[36-37]。阔叶材可弯曲至半径为 30~70 mm; 针叶材能弯曲至半径为 70~100 mm^[36], 但两步操作之间存在时间差, 易导致木材热量损失, 温度降低, 影响弯曲效果^[38]。

2) 一步法弯曲技术: 通过微波工艺调控木材的软化程度, 并在微波辐射过程中同步弯曲, 弯曲后再利用微波进行干燥定型。该方法需要专用的木材微波弯曲设备, 弯曲效率高, 产品质量好^[39]。

3) 定型: 使用微波对软化后弯曲的木材进行干燥处理定型, 速度快、质量好。

5 木材微波检疫

微波具有穿透性强、选择性吸收的特点, 可用于木材中的白蚁、甲虫、木蛀幼虫、天牛幼虫等病

虫害^[40-41]的杀除,具有快速、高效和经济的优点。

根据处理工艺,微波杀虫分为干热杀虫和湿热杀虫两种。

1) 干热杀虫:直接作用于虫体,利用微波使虫体快速脱水,蛋白质凝固,破坏生物细胞壁杀死害虫,整个处理过程还与高温对有机物的氧化有关^[41],同时微波辐射还会像X射线、 γ 射线一样引起电离作用,导致虫体蛋白质变性,失去生理功能^[43]。

2) 湿热杀虫:主要利用微波处理产生的饱和蒸汽破坏虫体组织,并在虫体表面凝结形成高温水膜,使虫体窒息,并在高温作用下使蛋白质组织凝固。整体而言,湿热杀虫的效果好于干热杀虫,一是虫体窒息死亡的速度大于蛋白质凝固作用的速度,二是干热状态下,蛋白质由于脱水对微波能的吸收能力逐渐下降,凝固速度较慢^[41]。

6 展望

目前木材微波处理技术发展的主要问题是,微波干燥或膨化工艺研究的系统性及木材微波处理专用设备研究不足,建议在以下几个方面加强研究。

1) 微波工艺的精准调控。以专用微波设备研发为基础,结合处理过程中木材内部温度、压力、结构、成分变化,系统研究微波处理效果与木材介电特性、木材含水率、微波功率密度、木材纹理方向、电场方向的关系,实现处理效果的精准控制。

2) 以微波膨化木为基材开发终端产品。① 利用I型、II型微波膨化木的高渗透性特点,通过功能剂浸渍,橡胶、金属填充,乙酰化处理等技术制备微波膨化木功能化产品;② 利用II型、III型微波膨化木内部的新型流体通道构建木材内部的功能化网络,用于木材的防腐、阻燃处理;③ 利用II型、III型微波膨化木各向异性的多孔性结构特点,开发吸声、吸附过滤、储能、缓冲等木质材料;④ 利用微波处理木材药剂可及度提高、酶解效率增加的特点,结合木材结构与成分变化,用于木材资源化利用的预处理,提高效率降低能耗,或用于大尺寸木材的组分离调控,制备超强致密木质材料。

3) 拓展微波技术的应用范围。例如借助微波加热快速高效的特点,促进微波在木材脱脂和生物质材料制炭领域的应用。

参考文献:

- [1] 李贤军,傅峰,周永东. 高强度微波预处理对桉木渗透性的影响规律[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(12): 145-149.
LI X J, FU F, ZHOU Y D. Effect of microwave pretreatment on permeability of Eucalyptus wood[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(12): 145-149.
- [2] 罗勇锋,李羲,李贤军,等. 木材微波预处理圆柱形谐振腔理论模拟与设计[J]. 林业科学, 2014, 50(3): 117-122.
LUO Y F, LI X, LI X J, et al. Mathematical simulation and design of cylindrical cavity of microwave pretreatment equipment used for wood modification[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(3): 117-122.
- [3] 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.
- [4] 欧阳婧,林兰英,傅峰,等. 冷冻预处理对樟子松微波膨化程度及均匀性的影响[J]. 木材工业, 2016, 30(3): 13-16.
OU YANG J, LIN L Y, FU F, et al. Effect of Freezing on bulking of *Pinus sylvestris* wood treated by microwave[J]. China Wood Industry, 2016, 30(3): 13-16.
- [5] 李贤军,孙伟圣,周涛,等. 微波处理中木材内温度分布的数学模拟[J]. 林业科学, 2012, 48(3): 117-121.
LI X J, SUN W S, ZHOU T, et al. Mathematical modeling of temperature profiles in wood during microwave heating[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(3): 117-121.
- [6] Zielonka P, Gierlik E. Temperature distribution during conventional and microwave wood heating[J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 1999, 57(4): 247-249.
- [7] 刘志军,张璧光,刘智. 间歇和连续微波干燥对木材内蒸汽压力与温度变化的影响[J]. 林业科学, 2008(7): 68-72.
- [8] 何盛,于辉,吴再兴,等. 微波处理对樟子松木材液体浸注性能影响[J]. 微波学报, 2016, 32(6): 90-96.
- [9] Torgovnikov G, Vinden P. High-intensity microwave wood modification for increasing permeability[J]. Forest Products Journal, 2009, 59(4): 84-92.
- [10] Vinden P, Torgovnikov G, Przewlaka S, et al. The manufacture of solid wood composites from microwave modified wood[C]// Proceedings of the International Panel Products Symposium. 2007: 111-120.
- [11] 周永东,GrigoryTorgovnikov, PeterVinden,等. 微波预处理加速阔叶树材干燥的技术分析[J]. 木材工业, 2011, 25(1): 23-25.
ZHOU Y D, GrigoryTorgovnikov, PeterVinden, et al. Technological analysis of microwave pretreatment for fast drying of hardwood[J]. Chian Wood Industry, 2011, 25(1): 23-25.
- [12] 刘媛,卢翠香,陈健波,等. 微波干燥过程中尾巨桉木材含水率变化特性[J]. 广西林业科学, 2017, 46(3): 262-265.
- [13] 刘志军,张璧光,芦春莲. 含水率对微波干燥过程中木材内蒸汽压力与温度的影响[J]. 河北农业大学学报, 2007(1): 101-104.
- [14] Antti A L. Microwave drying of pine and spruce[J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 1995, 53(5): 333-338.
- [15] 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(S1): 51-55.
- [16] LI X, ZHOU Y, YAN Y, et al. A single cell model for pretreatment of wood by microwave explosion[J]. Holzforschung - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood, 2010, 64(5): 633-637.
- [17] Antti L. Microwave drying of hardwood: simultaneous measurements of pressure, temperature, and weight reduction[J]. Forest Products Journal, 1992, 42(6): 49-54.

(下转第29页)

- and dimensional stability of batai tropical wood impregnated with polyvinyl alcohol [J]. Journal of Scientific Research, 2010, 2(2): 227-236.
- [18] 张辅刚. 木管乐器用材防裂防变形处理[J]. 中国木材, 1992(2): 38-40.
- [19] 郑荃. 提琴木材的化学处理[J]. 乐器, 2003(7): 20-23.
- [20] 吕少一, 李善明, 彭立民, 等. 乐器指板木质材料及其制备方法及其声学功能体浸渍液: 中国, 201710269915.6 [P]. 2017-04-24.
- [21] 吕少一, 李善明, 彭立民, 等. 一种乐器琴颈: 中国, 201720431716.6 [P]. 2017-04-24.
- [22] 朱玲静, 刘一星, 刘镇波, 等. 高温热处理对尾叶桉木材声学振动性能的影响[J]. 广西林业科学, 2017, 46(2): 140-145.
- ZHU L J, LIU Y X, LIU Z B, et al. Effect of high-temperature heat treatment on the acoustic-vibration performance of eucalyptus urophylla[J]. Guangxi Forestry Science, 2017, 46(2): 140-145.
- [23] 赵美霞, 康柳, 储德森, 等. 超声/高温热处理对古琴面板声学性能的影响[J]. 木材加工机械, 2016, 27(4): 45-50.
- ZHAO M X, KANG L, CHU D M, et al. Impact of ultrasonic/high temperature heat treatment on acoustics performance of Chinese zither-instruments plates[J]. Wood Processing Machinery, 2016, 27(4): 45-50.
- [24] 刘镇波, 孙凤亮, 朱玲静. 辐射技术及其在木材科学研究中的应用[J]. 世界林业研究, 2014, 27(6): 48-53.
- LIU Z B, SUN F L, ZHU L J. Radiation techniques and its application to wood science[J]. World Forestry Research, 2014, 27(6): 48-53.
- [25] 孙凤亮. γ 射线辐射对木材振动特性影响及机理研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- [26] 徐岩, 李书, 杨广鑫, 等. 用生物和光电技术进行木材改性的方法: 中国, 200410014615.6 [P]. 2004-04-12.
- [27] 姚坤, 姚望, 王传稳, 等. 一种木质新型耳机振膜的制备方法: 中国, 201610391578.3 [P]. 2016-06-06.
- [28] Gan W, Chen C, Kim H T, et al. Single-digit-micrometer thickness wood speaker[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1-8.
- [29] 马利鹏, 于忠良, 令狐荣林. 振膜: 中国, 201520816448.0 [P]. 2015-10-20.
- [30] Kumo H, Ono Y. Loudspeaker diaphragm: U.S. Patent Application 15/341,054 [P]. 2017-6-29.
- [31] Kumo H, Fujii T. Acoustic diaphragm: U.S. Patent 9,818,395 [P]. 2017-11-14.
- [32] Shibuya T, Takahashi Y, Kajihara Y, et al. Loudspeaker diaphragm, and loudspeaker, electronic device and mobile device including the diaphragm: U.S. Patent 9,781,515 [P]. 2017-10-03.

(本文编校 姜征、向琴)

(上接第24页)

- [18] 傅峰, 林兰英, 周永东, 等. 一种木材的膨化方法及其制备的膨化木材[P]. 北京: CN108340462A, 2018-07-31.
- [19] Q/FDL 001-2017, 膨化基材[S].
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Vinden P, Torgovnikov G, Hann J. Microwave modification of Radiata pine railway sleepers for[J]. European Journal of Wood & Wood Products, 2011, 69(2): 271-279.
- [23] Torgovnikov G, Vinden P. High-intensity microwave wood modification for increasing permeability[J]. Forest Products Journal, 2009, 59(4): 84-92.
- [24] 徐康. 微波预处理杨木浸渍密实化与高温热处理改性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [25] 何盛, 傅峰, 林兰英, 等. 微波处理技术在木材功能化改性研究中的应用[J]. 世界林业研究, 2014, 27(1): 62-67.
- [26] 李晓东, 齐向阳, 郝万新. 微波技术在木材阻燃处理过程中的应用[J]. 连云港职业技术学院学报, 2005(4): 66-68.
- [27] Poonia P K, Hom S K, Sihag K, et al. Effect of microwave treatment on longitudinal air permeability and preservative uptake characteristics of chir pine wood[J]. Maderas. Ciencia y tecnología, 2016, 18(1): 125-132.
- [28] Ramezanpour M, Tarmian A, Taghiyari H R. Improving impregnation properties of fir wood to acid copper chromate (ACC) with microwave pre-treatment[J]. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2015(8): 89-94.
- [29] 胡嘉裕, 刘元, 喻胜飞, 等. 微波预处理对杨木活性染料染色效果的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(12): 123-126.
- HU J Y, LIU Y, YU L F, et al. Effects of microwave pretreatment on poplar veneer dyeing with reactive dyes[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(12): 123-126.
- [30] Torgovnikov G, Vinden P. Microwave wood modification technology and its applications[J]. Forest Products Journal, 2010, 60(2): 173-182.
- [31] Muga M O. Mechanical properties of wood following microwave and resin modification[D]. University of Melbourne, 2002.
- [32] Przewloka S R, Hann J A, Vinden P. Assessment of commercial low viscosity resins as binders in the wood composite material vintorg[J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 2007, 65(3): 209-214.
- [33] Q/FDL 001—2019, 微波膨化木装饰表板实木复合地板[S].
- [34] Dang L D. A study of the creep performance of microwave-modified radiata pine in different external environments[D]. University of Melbourne, 2007.
- [35] CHAI Y, LIANG S Q, ZHOU Y D, et al. 3D Microscale heat transfer model of the thermal properties of wood-metal functional composites based on the microstructure[J]. Materials, 2019, 12(17): 1-16.
- [36] 王云龙, 王宪, 沈华杰, 等. 水热-微波处理木材软化效果模型构建[J]. 轻工科技, 2019, 35(5): 28-30.
- [37] 宋魁彦, 李坚. 水热-微波处理对榆木软化和顺纹压缩及弯曲的影响[J]. 林业科学, 2009, 45(10): 120-125.
- SONG K Y, LI J. Effect of hydrothermal-microwave treatment on softening and longitudinal compressing and bending elm wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(10): 120-125.
- [38] 董玉库. 木材微波弯曲法[J]. 家具, 1984(1): 36-37.
- [39] 陈太安, 李大钢, 王江. 几种木材微波加热弯曲性能的比较研究[J]. 建筑人造板, 2000(3): 24-26.
- [40] Dwinell L D, Avramidis S, Clark J E. Evaluation of a radio-frequency/vacuum dryer for eradicating the pinewood nematode in green sawn wood[J]. Forest Products Journal, 1994, 44(4): 19-24.
- [41] 伍艳梅. 木包装材料高频加热检疫处理技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [42] 沈培垠, 何丹军, 叶西. 微波技术处理木材中天牛和线虫的研究[J]. 检验检疫科学, 2004, 14(1): 12-14.
- [43] Olsen C M, Drake C L, Bunch S L. Some biological effects of microwave energy[J]. Journal of Microwave Power, 1966, 1(2): 45-56.

(本文编校 向琴)