

木质材料在乐器与音箱领域的应用进展

吕少一, 刘美宏, 彭立民, 李善明, 陈志林

(中国林业科学研究院木材工业研究所; 木竹资源高效利用湖南省高校 2011 协同创新中心;

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: 介绍木材及木质材料的声学特性及其在音板、指板、木质音箱箱体、木质振膜等领域的使用现状, 归纳乐器与音箱用木质材料对声学振动性质的要求, 总结国内外木质材料声学功能改良研究的进展, 以期为国内木质声学材料的应用研究提供思路。

关键词: 木质材料; 乐器; 音箱; 振膜; 声学特性

中图分类号: S781.38; TS66; TS953 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2020) 01-0025-05

Review of Wood Material's Application in Musical Instruments and Acoustics Products

LYU Shao-yi, LIU Mei-hong, PENG Li-min, LI Shan-ming, CHEN Zhi-lin

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry;

Hunan Collaborative Innovation Centre for Effective Utilizing of Wood & Bamboo Resources;

Key Laboratory of Wood Science and Technology of State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: The authors reviewed the acoustic characteristics of wood and wooden materials, refreshed their application in musical instruments and acoustic products, such as sound board, fingerboard, wooden speaker box and wooden vibrating diaphragm. They also summarized the requirements of musical instruments and acoustic products for vibration properties of wood materials as well as the current research situations in improving acoustic properties of wood materials, to provide insightful reference to the research and development of wood material's application in acoustic fields.

Key words: wood materials; musical instrument; wooden speaker; acoustic diaphragm; acoustic characteristics

作为音乐的载体, 乐器和音箱器材扮演着相当重要的角色。文化娱乐产业的迅猛发展, 带动了我国乐器和音箱产品产业的整体提升, 制作技术及水平快速提高。

收稿日期: 2018-12-31; 修改日期: 2019-11-20

基金项目: 中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“木结构房屋墙板隔声性能的研究”(CAFYBB2019SY041)。

作者简介: 吕少一(1983—), 男, 副研究员。Email: lvsy@caf.ac.cn

责任作者: 彭立民, 男, 研究员。Email: penglm@caf.ac.cn

木材及木质材料自身具有的良好声学振动特性, 使其成为乐器和音箱器材不可或缺的部件材料, 被用于制作乐器的共鸣板、音板、指板、琴身及音箱箱体。木材及木质材料的声学振动性能, 在很大程度上决定着乐器和音箱制品的声学品质, 因而在乐器和音箱的生产制作中占有重要地位。研究乐器和音箱用木材及其木质材料的声学特性, 对于乐器和音箱质量提升具有重要意义^[1-2]。

出于声学性能的考虑, 乐器用材对木材尺寸稳

定性、特定纹理均有较高要求,导致木材的整体利用率低;另外,木材的天然色差,使乐器整体的颜色匹配受到限制。木质音箱及扬声器内木质振膜同样对材料的声学振动性能有着特殊要求。因此,掌握乐器和音箱用木材的性质,改进其加工与处理技术,同时针对木材资源状况,寻找科学有效的解决方法,是乐器和音箱用材研究的基础。

1 木材及其木质材料的声学振动特性

与木材及木质材料声学特性相关的参数主要有:密度(ρ)、传声速度(v)、比动态弹性模量、声辐射阻尼系数、损耗角正切、声阻抗、对数衰减率等。其中:

1) 比动态弹性模量(E/ρ):代表平均动杨氏模量,是判别材料振动加速度大小的物理量。比动态弹性模量越大,材料振动加速度越大,传声速度越快。

2) 声辐射阻尼系数($R=v/\rho=\sqrt{E/\rho^3}$):衡量材料的声辐射能力。声辐射阻尼系数越大,材料的声辐射能力越强。

3) 损耗角正切($\tan \delta$):表示每周期内热损耗能量与介质存贮能量之比,更能直接说明材料的振动效率。

4) 声阻抗($\sqrt{\rho E}$):衡量声音在传播过程中所发生的阻力。

5) 对数衰减率(δ):表示材料因摩擦损耗所引起的能量损耗^[3]。

声阻抗、对数衰减率和损耗角正切,都是表示声波在传播过程中的阻力和内摩擦损耗量,其值越大,阻力和损耗量越大,产生的声音就细弱;反之则洪亮强大。利用声学特性参数值,可以较好地评估木材及木质材料是否适合制作乐器或音箱制品。

2 木质材料在乐器制作领域的使用

2.1 音板

在乐器的发音系统中,音板具有重要的作用,决定乐器音色及音量大小^[4-5]。制作音板需采用传播声波快,且弹性好、密度小(材质轻)的木材。

音板一般由共振板、肋木、音板框和弦码等组成。共振板的材质,是决定音板共振特性的重要条件之一。共振板的厚度需根据要求选择,厚度偏大,

重量增加,不利于共振,音响效果不好;偏薄则共振时峰谷差度过大而破坏声音的均匀与谐调性^[6]。

传统音板采用实木共振板拼接而成,为了保证音板的高弹性与密度均匀,需对实木音板用材进行严格筛选。选材多用云杉(*Picea* spp.),其结构细致、均匀,边材与心材不明显,纹理直,密度中等,材质松软易加工,具有良好的共鸣性能。应注意选用径切板,纹理顺直、均匀,不应有腐朽、变色、节疤等缺陷。还需严格的加工及干燥处理,以保证音板品质,因而成本及价格高,多用于高档乐器产品。

目前,国内外也有采用复合音板,即由多层松木单板胶合制成芯板,表面再压贴优质云杉单板。其声学振动品质要逊色于实木音板,但拉伸强度和尺寸稳定性好,可用于中、低档钢琴上。

2.2 指板

指板是木吉他、电吉他、贝斯、尤克里里、小提琴等乐器的重要部件之一,主要起到共振与能量传递的作用^[7-8]。

吉他指板的木材直接影响弹奏时声音的延音效果及声音衰减的均匀度,尤其是电吉他,弹奏力度和按弦方式均会对音色产生明显的影响。指板木材的品质直接影响到弹奏者手指在指板上移动的顺滑程度,从而影响按弦的角度和音色。

指板材料要求其具有良好的耐磨性和尺寸稳定性。一般而言,密度大的木材其耐磨和尺寸稳定性越好。常用木材有:

1) 乌木(*Diospyro ebenum*),属散孔材,生长轮不明显,密度高,硬度大,尺寸稳定,并具有良好的声音高频表现力,音色亮度仅次于枫木。音色的均衡表现以及漂亮的外观,很多昂贵的吉他都采用乌木制作指板。

2) 美洲硬槭木(*Acer* spp.),木材结构细密,纹理通直,密度较高,是指板材料中最为坚硬的材料之一,也具备非常突出的高频表现力。枫木制作的指板音色清亮、硬朗,且延音效果也较好,也被用作琴颈材料。

3) 巴西黑黄檀(*Dalbergia nigra*),又名巴西玫瑰木,产自南美的巴西等地,其颜色呈现深棕红色,有纵向暗条纹,优质的玫瑰木材质较枫木偏软,故高音相对差一些,但音色饱满,低音浑厚。由于巴

西玫瑰木的产量极少,并且是国家保护树种,目前多用阔叶黄檀(*Dalbergia latifolia*),又名印度玫瑰木作为替代品。印度玫瑰木颜色呈现深色,声音上具有非常强的低音效果和很好的延展性,也用作乐器的背侧板及拉弦板。

珍贵木材生长周期长,随着资源逐年减少,这类乐器指板的成本逐渐升高。近年来,乐器指板采用的部分天然珍贵木材,先后被列入“濒危野生动植物国际贸易公约(CITES)”之中,大多数国家禁伐、禁运。为此,国内已开展相关研究,对软质木材进行声学功能改良处理,代替濒危珍贵树种木材。

3 木质材料在音箱领域的使用

3.1 木质音箱箱体

随着多媒体时代的到来,音箱作为一类消费电子产品,成为众多音乐爱好者的选择。音箱箱体材料对其音质效果影响很大^[9-10],市售音箱箱体材料通常分为塑料材质和木质材料两种,除了材料本身的价格和加工成本外,最主要取决于材料本身的声学振动特性,高档音箱大多采用实木木材制作。

乐器用材要求其能产生很好的共鸣,而音箱用材则要尽量避免共鸣,所以要求材料的密度高、硬度大,同时还需在箱体内侧贴覆吸音材料。音箱发出声音时,箱体材料的密度越大,箱体所产生的振动越小,特别是大功率放大器的有源音箱更是如此,能使声音得到更真实和准确地还原。

高密度的实木是音箱最为理想的木质材料,但由于天然木材的各向异性,实木音箱无法实现规模化生产,只能做高端小众产品。

对于大部分木质音箱来说,选用的制作材料多为纤维板,并在其表面粘贴木皮进行装饰。纤维板按密度的不同,可分为高密度纤维板(密度 $>0.80\text{ g/cm}^3$)、中密度纤维板($0.65\sim0.80\text{ g/cm}^3$)、低密度纤维板($\geq 0.55\text{ g/cm}^3$, $<0.65\text{ g/cm}^3$)及超低密度纤维板($<0.50\text{ g/cm}^3$)。中密度纤维板的密度适中,质地坚硬,不易弯曲,强度较高,制作音箱时易加工成型和装饰,成本适中,且其声学性能可满足音箱要求,被广泛应用于木质音箱制造。

3.2 木质振膜

音箱除箱体之外,其最主要的部件是其内部的

扬声器,而振膜是扬声器品质最为关键的部件之一。当电信号通过线圈的时候,磁场产生变化,导致振膜受力变形。由于电信号变化很快,导致振膜高速振动,再通过振膜的振动传递给空气,从而产生了声波。因此,振膜的声学性能决定了扬声器的整体品质^[11]。

振膜是一种弹性介质,在弹性介质中的波速决定于介质的密度和弹性模量。对振膜的要求主要是:稳态振动方面和可靠性角度。

从稳态振动方面考虑,要求振膜的比动态弹性模量(E/ρ)尽量大;同时,为保证扬声器失真小,要求振膜的弯曲刚性也要大;此外还需有适当的内阻尼(损耗角正切 $\tan\delta$)。

从可靠性角度考虑,需要振膜具有良好的防潮、抗湿强度、防霉性能,且外观、色泽较好,经久耐用。

振膜的种类有:纸质振膜、木质振膜、塑料振膜、金属振膜、生物振膜等。其中纸质振膜是目前广泛使用的振膜材料,其具有较好的刚性、高内阻尼及适宜的重量等优点,而且价格便宜,一般通用型扬声器均以纸质振膜为主。

纸质振膜的声音特性取决于原料纸(木)浆、打浆、捞制、成型和二次处理等综合影响。由于针叶木浆比阔叶木浆的强度大,纸质振膜多用针叶木浆制备。但单纯的纸质振膜防潮性能较差,需在纸基上喷涂某种涂层,形成纸基复合材料,使得纸质振膜性能较稳定,并相应提高其阻尼性能^[12]。

木质振膜最具科技含量,以日本某公司的木质振膜处于领先地位^[13]。其木质振膜采用新西兰桉木切片,厚度 $80\text{ }\mu\text{m}$,经润滑剂浸渍后进行软化处理,再经冲压、固定成型等工艺制作而成。通过上述工艺处理的木质振膜,避免了木材易开裂、变形以及韧度不够等缺陷,提高了木质振膜的使用寿命。在最新一代产品中,薄木切片的厚度从 $80\text{ }\mu\text{m}$ 进一步降至 $50\text{ }\mu\text{m}$,其木质振膜的声学特性也更加优异。

4 木质材料的声学功能改良技术进展

木材各向异性,对于乐器用材的选择充满了挑战;而某些珍贵硬阔叶树材资源日益匮乏,这些问题都将制约乐器行业的发展^[14]。

4.1 改良技术

利用科技手段,对人工林木材或价廉软质木材进行功能化处理,可制备出具有优良声学振动性能的功能实木,其密度和声学振动性能,堪比天然珍贵木材。在改善乐器用材声学性能方面,围绕提高其声学性能指标展开的研究主要有:

1) 化学处理:包括利用水杨醇甲醛^[15]、苏木精^[16]、聚乙烯醇^[17]、酚醛树脂^[18]、硅烷及甲醛^[19]等处理。化学处理可显著提高原有木材的比动态弹性模量,从而改善其声学振动性能。

笔者团队最近开发出一种新型糠醇树脂浸渍液处理木材技术,使指板材料的含水率和密度可控,实木质感强,且声学振动性能良好,有望代替濒危珍贵树种木材^[20-21]。

2) 物理处理:主要有高温热处理^[22]、超声/高温热处理^[23]和射线辐射处理^[24-25],也是以显著提高木材的比动态弹性模量为目的。

3) 生物法:通过酶制剂对木材进行脱糖处理,消除其内部应力并降低其密度,处理后的木材亦具有优良的声学振动特性^[26]。

4.2 技术应用

在振膜方面,将薄木经过乙醇/二氧化钛/丙三醇处理,可以获得弹性和声学性能良好的木质振膜材料^[27];经氢氧化钠/亚硫酸钠脱木质素的巴沙木薄木,通过100℃热压,厚度由300μm压缩到8.5μm,可得到致密超薄的木质振膜。得益于氢键作用,该木质振膜具有342MPa的拉伸强度和43.6GPa的杨氏模量,同时,共振频率达到25.4kHz,位移振幅达到88.1nm/V,表现出优异的声学性能^[28]。

利用木质纳米纤维素也可以制备出质量轻、强度高且具有良好声学振动性能的振膜材料^[29]。如在木浆纸中添加3%~15%(w/w)的纳米纤维素纤维,可获得密度大于0.3g/cm³、刚度9.8~49.1mN、撕裂强度大于1.96N的振膜^[30];而在纳米纤维素中添加2%~5%(w/w)的木浆,可获得密度大于0.5g/cm³、刚度14.7~29.4mN、撕裂强度大于2.94N的振膜^[31]。

此外,通过在竹浆纸基体表面涂覆厚度比例3%~15%竹纳米纤维素纤维,也可以获得高弹性模量、低损耗角正切的振膜^[32]。但目前研究多停留在试验阶段,尚未在实际产品中应用。

5 结语

随着濒危珍贵木材的全球范围内禁伐禁运,乐器木材市场急需开发声学性质和外观相近的替代木材。利用化学或物理技术手段,对人工林木材进行声学性能改良,使其物理性能、声学特性、外观均接近现有乐器用珍贵木材,满足乐器用材标准要求,将是未来研究及技术应用推广的方向。

参考文献:

- [1] 姜笑梅. 我国乐器木材资源现状、思考及对策[J]. 乐器, 2008(2): 6-10.
- [2] 于雪斐, 刘雷, 于文吉. 人造板作为乐器制作材料的发展现状及前景[J]. 木材加工机械, 2010, 21(6): 33-36.
YU X F, LIU L, YU W J. Current status and development of wood-based panels as the materials of musical instruments[J]. Wood Processing Machinery, 2010, 21(6): 33-36.
- [3] 刘镇波, 刘一星, 沈隽, 等. 乐器共鸣板用木材的声学特性研究进展[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(3): 124-129.
LIU Z B, LIU Y X, SHEN J, et al. Advances in study and research on acoustic property of wood for soundboard of musical instrument[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(3): 124-129.
- [4] 黄英来. 几种典型民族乐器木质共鸣体的声学振动性能检测与分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [5] 卢向忱. 浅谈钢琴音板的木材特性[J]. 乐器, 2016(8): 19-21.
- [6] 崔佑群. 钢琴音板的特性与选材[J]. 林区教学, 2007(12): 116-117.
- [7] 晓钱, 梦达. 吉他的制作[J]. 乐器, 2006(3): 24-25.
- [8] 巴雷特·塔利亚里诺, 塔利亚里诺, 刘洋, 等. 吉他指板手册[M]. 北京: 人民音乐出版社, 2014.
- [9] 张新生. 音箱制作经验谈[J]. 电子制作, 1999(3): 4.
- [10] 郝孟辉, 朱南峰. 木质音箱的数控加工[J]. 林业机械与木工设备, 2007, 35(2): 12-15.
HAO M H, ZHU N F. Application of CNC machine in the design and manufacture of wooden acoustic box[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2007, 35(2): 12-15.
- [11] 龚关. 细菌纤维素应用于扬声器振膜的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2011.
- [12] 刘忠, 龚关. 细菌纤维素改善纸质振膜性能的研究[J]. 中国造纸, 2010, 29(12): 31-33.
LIU Z, GONG G. Study on the properties of paper diaphragm improved by bacterial cellulose[J]. China Pulp & Paper, 2010, 29(12): 31-33.
- [13] 张国梁. 乐器般的扬声器, 乐器般的音响效果: 评 JVC EX-A1 DVD 迷你音响组合系统[J]. 现代音响技术, 2004(1): 33-35.
- [14] 刘镇波, 刘一星. 乐器共鸣板用木材声学振动性能改良研究现状及趋势[J]. 世界林业研究, 2012, 25(1): 44-48.
LIU Z B, LIU Y X. Research status and prospect of acoustic vibration properties modification of wood used for soundboard[J]. World Forestry Research, 2012, 25(1): 44-48.
- [15] Yano H, Minato K. Improvement of the acoustic and hygroscopic properties of wood by a chemical treatment and application to the violin parts [J] Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 92(3): 1222-1227.
- [16] Eiichi Obataya, Kazuya Minato, Bunichiro Tomita. Influence of moisture content on the vibrational properties of hematoxylin-impregnated wood[J]. Journal of Wood Science, 2001, 47(4): 317-321.
- [17] Islam M S, Hamdan S, Rahman M R, et al. Dynamic Young's modulus

- 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)