

乐器用木材声学振动性能改良研究的进展

刘美宏, 彭立民, 吕少一, 吕建雄, 高玉磊, 樊正强

(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, 北京, 100091)

摘要: 结合乐器用木材的宏观和微观构造、物理力学性能要求及评价指标, 总结乐器用木材声学振动性能的影响因素及参数要求, 归纳化学、物理、生物等处理方法在木材声学振动性能改良方面的应用研究及进展, 分析各改良方法存在的问题, 为木材声学振动特性功能改良的进一步研究提供思路。

关键词: 乐器用材; 声学振动特性; 评价指标; 功能性改良

中图分类号: S781.38; TS62; TS953 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654 (2020) 02-0029-05

Research Progress of Wood Treatment to Improve Acoustic Vibration Performance for Making Musical Instruments

LIU Mei-hong, PENG Li-min, LYU Shao-yi, LYU Jian-xiong, GAO Yu-lei, FAN Zheng-qiang

(Research Institute of Wood Industry of Chinese Academy of Forestry; Hunan Collaborative Innovation Center for Effective Utilizing of Wood & Bamboo Resources, Beijing 100091, China)

Abstracts: The authors summarized the influencing factors and parameters of acoustic vibration performance of wood for musical instruments by combining the performance requirements and performance evaluation indexes from the points of macroscopic to microscopic characteristics as well as physical-mechanical properties of wood. They also reviewed the research and application progress of chemical, physical and biological treatment methods to improve acoustic vibration performance of wood, as well as the problems existed in the above-mentioned treatments, aiming at providing reference for future research and development of functional improvement of wood acoustic vibration characteristics.

Key words: wood for musical instrument; acoustic vibration characteristics; evaluation indicator; functional improvement

乐器行业中除铜管乐器外, 几乎所有的乐器生产都离不开木材, 木材的声学性振动能在很大程度上直接决定乐器的声学质量^[1]。乐器对木材树种、构造以及物理力学性能均具有极高要求, 乐器的不同部件对木材的要求亦不相同。如小提琴的面板以云

杉 (*Picea* spp.) 为主, 背板、侧板及颈板以卷曲枫木 (*Acer saccharum*) 为主, 指板以乌木 (*Diospyros crassiflora*) 或玫瑰木 (*Dalbergia latifolia*) 为主。

弦乐器的面板、背板及侧板, 要求木材纹理通直、结构规则、尺寸稳定性良好、密度低、生长应力低, 生长轮平均宽度在 0.8~2.5 mm 范围内, 生长轮内晚材率应占 1/4 左右, 早晚材之间的密度差异应尽可能大, 才能具有优良的声共振特性、振动频谱特性及音效稳定性^[2]。弦乐器的指板要求木材密度、硬度要大, 具有较高的动态剪切模量, 木材表面具

收稿日期: 2019-03-17; 修改日期: 2020-02-24

基金项目: 国家重点研发计划项目“木材材质改良的物理与化学基础”(2017YFD0600202)。

作者简介: 刘美宏 (1992—), 女, 博士研究生。Email: lmh1566@163.com

责任作者: 吕建雄, 男, 研究员。Email: jianxiong@caf.ac.cn

有良好的耐磨擦性能。能满足以上严苛要求,且适用于乐器制作的树种及其资源有限^[3]。为缓解资源匮乏,学者开展了大量乐器用木材声学振动性能及功能性改良的研究,以期开发一些资源丰富且成本低的普通树种,通过一定的改良手段,代替传统乐器用材使其适合乐器制作并可进行规模生产^[4]。

1 乐器木材声学性能评价指标及影响因素

1.1 木材声学振动性能评价指标

目前,乐器用木材主要进行宏观构造和声学振动性能的评价,根据宏观构造及纹理,可直接判断是否能够用于乐器制作;其次是木材声学振动特性参数评估。主要指标包括^[5]:

1) 比动弹性模量(E_{sp}) 表示木材单位细胞壁物质的振动加速度,其值越大,木材振动效率越高。

$$E_{sp}=E/\rho \quad (1)$$

式中: E —杨氏模量, GPa; ρ —密度, g/cm³。

2) 声辐射品质常数(R) 指木材及其制品向周围空气辐射声功率的大小。乐器的共鸣板(音板)需选用 R 较高的木材。

$$R = \frac{v}{\rho} = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \quad (2)$$

式中: v —声速, m/s。

3) 声阻抗表(Z) 即介质对声波传播的阻力,与振动的响应特性有关。声阻抗越小,声学振动效率越高。

$$Z = \rho v = \sqrt{E\rho} \quad (3)$$

4) 对数衰减率(λ) 是指木材受外部冲击力或周期力作用而振动,当外力作用停止后,两个连续振动周期振幅之比的自然对数。 λ 越低的木材,振动衰减速度慢,有利于乐器声音的余韵饱满,较适合制作乐器的共鸣板。

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{x_1}{x_{n+1}} \right| \quad (4)$$

5) E/G 即动态弹性模量 E 和刚性模量 G 之比, E/G 比值高者,音色较好,其频谱分布较均匀,具有提高低频域的响应、并适度抑制高频域的特征,可间接评价木材的声振动效率和音色的综合品质。

6) 损耗角正切值($\tan\delta$) 其值越小,木材声学振动特性越好。

$$\tan\delta = \frac{\lambda}{\pi} \quad (5)$$

7) 声转化率(ACE) 其值越大,木材发音效果越稳定。

$$ACE = \frac{\sqrt{E/\rho}}{(\tan\delta \times \rho)} \quad (6)$$

1.2 木材声学振动性能影响因素

1.2.1 木材物理性质

不同乐器及其组件,对木材密度要求不同。小提琴的共鸣板,一般要求木材密度在 0.4~0.5 g/cm³ 范围内,密度越低,其 E_{sp} 值较大, $\tan\delta$ 值较小,声学振动效率越高,乐器共鸣板的声音洪亮且清脆^[5]。背板及肋板主要利用中低密度的木材,指板则要求用高密度的木材。

木材含水率的变化影响其尺寸稳定性,将导致乐器发音效果不稳定^[6]。乐器用木材一般含水率在 5% 左右时的性能最佳。超过 7% 时,随着含水率的增加, E_{sp} 下降、 $\tan\delta$ 值增大,以及尺寸变化产生应力等原因,将导致乐器音色受到严重影响^[7]; 低于 5%,会引起木材微观结构出现微裂纹等缺陷,导致木材力学性能及声学振动性能降低^[5]。

木材尺寸稳定性越好,乐器发音效果越稳定。大多数树种的木材都是径向干缩率小于弦向干缩率,径切板的尺寸稳定性最好,因此,乐器选材主要是径切板。

木材的各向异性,是乐器音质及发音效果稳定性的重要影响因素。声波在木材中传播主要分为轴向波和剪切波,大部分木材的声波传播速度均满足: 轴向>径向>弦向; 剪切波速度满足: 径切面>弦切面>横切面^[8]。因此,共鸣板要求选择各向异性适中,纵向、径向振动受剪切影响小的木材^[9]。

1.2.2 木材宏观构造参数

生长轮宽度及变异系数是影响木材物理力学性质的重要因素,与木材声振动特性也密切相关^[5,10]。木材生长轮因受气候条件、地理环境和遗传因素等限制,其宽度具有变异性。生长轮宽度变异系数越小,木材材质越均匀,木材的 E_{sp} 和 R 值较大, $\tan\delta$ 值较小,木材的声学振动效率就越高。

不同类型及等级的乐器用木材,对生长轮宽度要求不同。吉他面板要求木材生长轮宽度 1.0 mm 左

右;提琴类1.5 mm左右;其他乐器2.5 mm左右。乐器品质越高,要求的木材生长轮宽度越窄,不超过1.0 mm。大多数云杉属木材的生长轮宽度在1.0~1.5 mm范围内,其 E_{sp} 和 R 值较大, $\tan\delta$ 值较小,故其木材声学质量好^[10]。

乐器共鸣板用木材则对同一个生长轮内的晚材率有一定的要求,一般要求在1/4左右,晚材率越小,其 E_{sp} 和 R 值越大, $\tan\delta$ 及 λ 值越小。晚材和早材的密度之差越大,木材声学振动性能越佳^[11]。表1列出了挪威云杉(*Picea abies*)用作不同乐器材料时,对其密度、生长轮宽度、晚材率的要求^[11]。

表1 木材用作不同乐器的物理性能要求
Tab.1 physical properties of wood for different musical instruments

乐器类别	密度/(kg/m ³)	生长轮宽度/mm	晚材率/%	径向声速/(m/s)	径向弹性模量/(10 ⁸ N/m ²)	损耗因子/10 ⁻²
吉他	413	1.08	21	1190	5.9	1.8
小提琴	528	1.46	26	1380	10.0	1.8
钢琴	463	1.64	25	1110	5.7	1.6
其他弦乐器	456	2.65	41	510	12.0	2.8
建筑木材	378	4.25	13	730	1.9	2.2

乐器用木材要求纹理通直,与轴向夹角越小,传声效果亦越好^[12]。随着纹理角度的增大,木材 E_{sp} 值呈现先急剧下降,到一定程度之后,则下降趋缓。通常各树种木材顺纹方向的 E_{sp} 为横纹的10.98~21.47倍; λ 随木材纹理角度增大具有增大的趋势,对数衰减率加快,可使得乐器发音的持续性变差。

1.2.3 木材微观结构参数

木材纤维素结晶度增加,其 E_{sp} 、 R 随之增大,木材的吸湿性降低,则尺寸稳定性提高,发音稳定性提高;反之,木材的吸湿性随之增强,且力学性能及声学性能随之降低,影响木材的音色及发音稳定性^[13]。大部分乐器共鸣板用木材,要求纤维结晶度在56%~65%范围内,使其声学振动特性优良^[14]。

微纤丝角是木材重要的超微结构特征,木材细胞壁S₂层微纤丝角越小,其力学性能越好,对其振动特性亦然。木材的 E 、 E_{sp} 与S₂层微纤丝角均呈负相关,随S₂层微纤丝角的减小而不断增大^[15]。

木材细胞结构特征,如管胞长度、直径、壁厚、壁腔比、长宽比、胞壁率等,在一定范围内时,木

材的声学振动性能较佳。轴向薄壁组织为傍管型且极不丰富、射线为短射线、结构均匀而不丰富的木材,均具有良好的声学质量^[16]。

综上所述,木材的宏观结构及微观结构特性是树木在生长过程中形成的,一旦形成不易改变,以往只能通过营林培育进行改良,时间漫长。因此,目前多采用对木材声学振动的功能性改良,主要针对木材,以密度、含水率、吸湿特性及化学成分等为切入点,实施一定的化学、物理、生物等处理。

2 功能性改良技术对乐器木材声学振动特性的影响

2.1 热处理

乐器用木材要求具有较高的尺寸稳定性,较低的吸湿特性,保证乐器在不同环境里发音效果的稳定。热处理是一种环保型的、物理方法,可有效改善木材的尺寸稳定性、耐久性及降低吸湿特性^[17]。乐器用木材主要以高温热处理为主。有研究表明,在110~115℃范围内处理云杉时,其声学振动特性只发生微小的变化,影响不显著^[18-19]。

高温热处理主要使木材内部的半纤维素成分部分降解,木材细胞壁化学成分与结构发生变化,细胞壁中羟基数目减少;纤维素结晶度提高,使水分子不容易接触羟基基团;木质素缩聚反应而发生的交联反应等,从而降低木材的吸湿性。在高温热处理过程中,糖类分解出的化合物的吸水性要低于半纤维素,木材疏水性提高,木材的尺寸稳定性显著提高。

淀粉、糖类的反应、挥发,内含物挥发排出,降低了木材密度,使得 E_{sp} 和 R 值增加, $\tan\delta$ 、 λ 及 Z 值降低,从而改善了木材的声学振动性能^[20]。

有研究分别采用高温热处理的云杉与未处理的云杉,制作小提琴的面板、背板及琴桥,比较发现:处理后的云杉木材吸湿特性降低,尺寸稳定性、耐久性及声学振动特性显著提高,更符合共鸣板用木材的声学性能要求^[21]。

乐器用木材更倾向于使用自然老化的木材,这类木材具有更高的共振质量及较低的生长应力。以自然老化的木材制作的乐器,音色洪亮而饱满及发音效果稳定。然而,木材自然老化耗时较长,有的甚至几十年。

高温热处理可缩短老化过程需要的存储时间,节省大量的存储成本,处理后的性能可与自然老化木材的声学振动性能相媲美^[22]。因此,高温热处理又可称作是木材加速老化的过程^[23]。也有一些研究表明,热处理后的山毛榉(*Fagus spp.*)和桑木(*Mekodze spp.*),其声学 and 力学性能大大提高,可应用制作乐器的高强度部件;利用高温热处理的木材制作吉他,小提琴等乐器时,乐器的声学性能均满足要求^[23]。

在国内,目前对采用热处理方法改善非乐器常用木材性能,以替代传统乐器用木材的研究甚少,研究集中在通过热处理改性木材的尺寸稳定性及声学振动性能等方面。高温热处理木材的尺寸稳定性、疏水性的提高,与力学强度之间呈负相关;另外高温热处理导致木材孔隙度增加,为自由水提供了更多的存储空间,对木材的长期吸水性抑制效果不佳。

热处理是改善传统乐器用木材性能最简单及有效的方法之一,因此也适合于旧乐器的修复。但是,并非所有木材都可以通过热处理,来达到乐器用木材的性能要求。对于传统非乐器用木材,通过热处理,可作为乐器材料的补充,或大众化乐器扩大生产用材^[24]。

2.2 化学处理

化学改性提高木材声学振动特性的机理,主要包括两方面:1)化学试剂与木材的高分子聚合物发生化学反应,减少或者置换木材中游离的羟基,降低其吸湿特性,提高其疏水特性,改善木材的尺寸稳定性,提高乐器发音稳定性;2)化学试剂与木材的成分发生反应,形成网络结构,减少纤维素大分子链分子的自由移动体积,提高了木材的动态力学性能,从而改善了木材声学振动性能。

改善木材声学振动性能的化学方法主要包括:

1)气相甲醛处理方法。采用强酸或无机盐为催化剂,用甲醛蒸汽处理木材。

在化学试剂作用下,木材细胞壁非结晶区纤维素链分子之间形成交联结合,使纤维素链分子间架桥,封闭了游离羟基,降低了木材的吸湿特性。气相甲醛处理后的木材抗胀(缩)率(ASE)为60%~70%,提高了木材的尺寸稳定性,使得乐器在潮湿环境下,发音效果稳定。

利用这种机理处理的西加云杉木材,其声学振动特性和力学性能在空气湿度变化时保持稳定;用处理材制作小提琴的共鸣板及琴桥,与未处理材制作的小提琴相比,音色通透、响亮^[25]。也有学者将气相甲醛与液态的低分子量酚醛树脂相混合后处理乐器用木材,处理后木材的振动特性,明显优于单独气相甲醛处理材。此方法处理的板材,可用于乐器的批量生产^[26]。

2)乙酰化法。是将疏水乙酰基引入木材细胞壁,处理的木材具有良好疏水性。处理过的木材引入了疏水性官能团,提高了木材的尺寸稳定性,但不是提高木材声学性能的必要因素。乙酰化处理木材制作小提琴、吉他、钢琴等共鸣板,与未处理的相比,乐器的发音稳定性提高,其声学性能略有提高^[27]。

除乙酰化外,可能发生酰基化反应。在反应过程中,木质素可能在芳香核的后续反应中发生反应,也可能与基质交联反应。因此,用乙酰化处理木材,交联部分的形成,对材料声学性能的改善轻微。

综上所述,木材成分和化学试剂形成网络结构,才是改善木材声学振动性能的关键因素。

2.3 生物处理

提琴、吉他及钢琴等弦乐器的共鸣板,要求使用低密度木材。有学者提出,在不破坏木材细胞壁的前提下,通过微生物的方法,也可降低木材的密度,提高木材的孔隙率。

腐朽菌对木材化学成分具有选择性降解的特点,在不破坏木材性能的前提下,用于处理挪威云杉和美国梧桐的研究显示。处理后木材的细胞腔增大,密度显著降低,木材的 λ 值及 $\tan\delta$ 值降低,木材的 R 值明显提高,改善了小提琴共鸣板的整体声学品质^[28]。利用腐朽菌处理材制作的小提琴,其声学参数可以与小提琴传统用木材相媲美。

生物方法改性木材的声学振动性能是一种非常有潜力的方法,但是真菌降解的云杉试材,木材颜色加深且不均匀。如何使用真菌获得腐朽均匀及颜色均匀的木材,有待解决。

3 结语

以木材密度、含水率、吸湿特性及化学成分等参数为切入点,通过化学、物理、生物等处理方法,

进行木材用作乐器材的功能性改良研究, 目前在国内外研究较少^[29], 国外研究虽开发了多种方法, 但是每种改良方法尚存在一定的缺陷, 且研究范围较窄。每种改良方法处理的木材, 也几乎很少能用做乐器的大规模生产。

建议今后重点从以下3个方面展开:

1) 深入系统地研究乐器用木材声学振动性能, 从木材微观角度分析木材声学振动机理; 2) 采用先进的技术手段, 表征乐器木材声学振动性能, 对乐器发音品质进行科学的评价; 3) 寻找环境友好及健康、且适合大规模生产的改良手段, 改良那些普通且资源丰富的树种木材, 使其可以替代传统乐器用木材, 用于规模生产。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wegst U G K. Wood for sound[J]. American Journal of Botany, 2006, 93(10): 1439-1448.
- [3] Bennett B C. The sound of trees: wood selection in guitars and other chordophones[J]. Economic botany, 2016, 70(1): 49-63.
- [4] Sproßmann R, Zauer M, Wagenführ A. Characterization of acoustic and mechanical properties of common tropical woods used in classical guitars[J]. Results in Physics, 2017(7): 1737-1742.
- [5] Bucur V. Handbook of Materials for String Musical Instruments[M]. Springer, 2016: 108-897.
- [6] Martínez M A P, Poletti P, Espert L G. Vibration testing for the evaluation of the effects of moisture content on the in-plane elastic constants of wood used in musical instruments[M]//Vibration and Structural Acoustics Analysis. Springer, Dordrecht, 2011: 21-57.
- [7] 熊玮. 含水率对小提琴音板刚度的影响[D]. 北京: 中央音乐学院, 2016: 10-60.
- [8] Roohnia M, Tajdini A, Manouchehri N. Assessing wood in sounding boards considering the ratio of acoustical anisotropy[J]. NDT & E International, 2011, 44(1): 13-20.
- [9] Brancheriau L, Baillères H, Détienne P, et al. Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments[J]. Journal of Wood Science, 2006, 52(3): 270.
- [10] 张超华, 徐伟, 吴智慧, 蔡家斌, 罗建峰. 云杉木材年轮方向对钢琴音板声学性能的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(3): 165-167.
- [11] Obataya E, Ono T, Norimoto M. Vibrational properties of wood along the grain[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(12): 2993-3001.
- [12] Brémaud I, Gril J, Thibaut B. Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data[J]. Wood Science and Technology, 2011, 45(4): 735-754.
- [13] Brémaud I, El Kaïm Y, Guibal D, et al. Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types[J]. Annals of Forest Science, 2012, 69(3): 373-386.
- [14] 沈隽. 云杉属木材构造特征与振动特性参数关系的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2001: 10-45.
- [15] Borland M. Investigation of piano soundboard voicing techniques and their impact on tone[D]. University of Waterloo, 2009.
- [16] 刘明, 沈隽, 刘玉. 细胞平均壁厚对云杉属木材声振动性能的影响[J]. 林业科技, 2005, 30(5): 48-51.
- [17] Ates S, Akyildiz M H, Ozdemir H, et al. Technological and chemical properties of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) wood after heat treatment[J]. Romanian Biotechnological Letters, 2010, 15(1): 4949-4958.
- [18] Zauer M, Kowalewski A, Sproßmann R, et al. Thermal modification of European beech at relatively mild temperatures for the use in electric bass guitars[J]. European Journal of Wood & Wood Products, 2016, 74(1): 43-48.
- [19] Pfriem A. Thermally modified wood for use in musical instruments[J]. Drvna industrija: Znanstveni časopis za pitanja drvne tehnologije, 2015, 66(3): 251-253.
- [20] Pfriem A, Grothe T, Wagenführ A. Einfluss der thermischen Modifikation auf das stationäre Sorptionsverhalten von Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.)[J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 2007, 65(4): 321-323.
- [21] Wagenführ A, Pfriem A, Grothe T, et al. Investigations on the characterisation of thermally modified spruce for sound boards of guitars[J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 2006, 64(4): 313-316.
- [22] Obataya, Eiichi. Effects of natural and artificial ageing on the physical and acoustic properties of wood in musical instruments[J]. Journal of Cultural Heritage, 2016: S1296207416300541.
- [23] Pfriem A, Wagenführ A, Ziegenhals G, et al. Use of wood performed by heat-treatment for musical instruments[C]//Wood modification: processes, properties and commercialisation—the second european conference on wood modification, Göttingen. www.dfwm.ugent.be/woodlab/docs/ecwm2. 2005.
- [24] 贾东宇. 高温热处理对杉木声学性能的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2010: 5-56.
- [25] Yano H, Minato K. Controlling the timbre of wooden musical instruments by chemical modification[J]. Wood science and technology, 1993, 27(4): 287-293.
- [26] K Minato, H Yano. Improvement of dimensional stability and acoustic properties of wood for musical instruments by sulfur dioxide catalysed formalization[J]. Journal of the Japan Wood Research Society, 1990: 362-367.
- [27] Li J Z, Furuno T, Zhou W R, et al. Properties of acetylated wood prepared at low temperature in the presence of catalysts[J]. Journal of wood chemistry and technology, 2009, 29(3): 241-250.
- [28] Schwarze F W M R, Spycher M, Fink S. Superior wood for violins – wood decay fungi as a substitute for cold climate[J]. 2008, 179(4): 1095-1104.
- [29] 吕少一, 李善明, 彭立民, 等. 乐器指板木质材料的制备技术和由其制备的乐器指板木质材料[P]. 中国, 201710269915.6, 2017-04-21.

(本文编校 向琴)