

专题论述

木竹材声学振动特性研究进展*

江泽慧 邓丽萍 宋荣臻 陈复明 刘杏娥

(国际竹藤中心,北京 100102)

摘要:木材声学振动特性科学机理与评价方法的研究正逐渐兴起,而针对竹材声学振动特性的相关研究则少有报道。文中重点围绕木竹材声学振动特性,从声振动效率、音色和发音效果稳定性3个方面介绍了木竹材声学振动特性的定量评价方法;从不同尺度(宏观—微观)、不同层次(化学组分—物理性质)和不同方式(选材—加工)系统阐述其主要影响因素;在此基础上,总结了木竹材声学特性功能性改良的主要方法,并提出今后科学研究的具体建议。

关键词:木材,竹材,声学振动,功能性改良

中图分类号:S781.38

文献标识码:A

文章编号:1001-4241(2021)02-0001-07

DOI:10.13348/j.cnki.sjlyyj.2021.0011.y

Research Progress on the Acoustic Vibration Performance of Wood and Bamboo

Jiang Zehui Deng Liping Song Rongzhen Chen Fuming Liu Xinge

(International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

Abstract: The research on the mechanism and evaluation method of wood acoustic vibration performances (AVP) is gradually rising. However, few studies on bamboo AVP were reported. In this paper, both wood and bamboo AVP were reviewed. A series of quantitative evaluation methods of acoustic vibration efficiency, tone, and pronunciation effect stability were introduced. The main influence factors of AVP were analyzed at different levels from macro to micro, and the effects of chemical components, physical properties, as well as processing methods on AVP were also discussed. On this basis, the methods used for wood and bamboo AVP functional improvement were systematically summarized. Some specific suggestions for future scientific research on the wood and bamboo AVP were also given.

Keywords: wood, bamboo, acoustic vibration, functional improvement

木竹材由于其特殊的解剖构造和材性特征,自古以来就是天然的乐器材料。无论是体鸣乐器、膜鸣乐器、弦鸣乐器、气鸣乐器还是电子乐器,大多数乐器的重要构件均可由木、竹、皮革等天然材料制成^[1-3]。当前木竹材的研究主要集中在结构建筑用材等方面,而在乐器用材方面的深入研究相对较少。竹材是唯一一种能够单独制造所有类别乐器的天然材料,包括管乐器、打击乐器、弦乐器甚至琴弦等^[4-5]。随着人

们对精神文化需求的增加以及天然名贵乐器用材的减少,通过木竹材声学振动特性研究开发高附加值木竹产品,有利于促进材料科学与音乐艺术的有机融合,具有重要的科学与文化价值。

本文将重点围绕木竹材声学振动特性的研究现状,从乐器用木材与竹材的声学振动特性的评价参数、影响因素及其功能性改良方法3个方面进行分析,以期揭示木竹材声学振动机理、木竹制乐器声学品质

*收稿日期:2020-12-07;修回日期:2021-02-10;网络出版日期:2021-02-22。

基金项目:国际竹藤中心基本科研业务专项“竹材细胞结构和声学特性对京胡等乐器音色的影响”(1630219001)。

第一作者:江泽慧,教授,博士生导师,国际木材科学院院士,主要研究方向为森林利用学、木材科学与技术、生态学。

通信作者:宋荣臻,女,讲师,研究领域为竹材声学振动机理,E-mail: songronzheng@icbr.ac.cn。

客观评价方法及指导乐器行业科学选材等提供理论参考和科学方法。

1 木竹材声学振动特性评价参数

音调、音色和响度是组成声音的三要素。音调的高低由基频的振动频率决定,可由乐器的弦或管的长短、粗细与松紧来调整。音色可从发声体材质、演奏者技巧和听众的感受等方面来作主观判断。发音体的振动一般是由多种谐音组成的,其中有基音(整体振动)和泛音(二阶、三阶、四阶等部位振动),泛音的多寡(频率和波形)及泛音之间互相强弱(振幅、相位等)关系等决定音色。响度的大小由振幅决定,乐器演奏中的强弱变化就能改变音量。因此,乐器的制造材料、特殊结构、加工工艺、振动部位等诸多因素影响其声学品质。

木竹材具有良好的声学振动特性是其能够用于制作共鸣板、共鸣筒等乐器构件的重要依据。将琴弦的振动放大并传播到空气中,听众由此听到各种乐音。木竹材振动效率的高低是评价材料是否适于制作乐器共鸣构件的基本标准之一。若要制作品质上乘的乐器产品,在对共鸣材料振动效率严格要求的基础上,还要求材料具有优良的音色表现,即能够辐射出悦耳动听的乐音。此外,由于木竹材对环境温湿度比较敏感,乐器共鸣构件用木竹材还要具有一定的抵抗外界温湿度变化能力,以保证稳定而良好的发音效果。对木竹材声学振动特性的评价参数主要总结为振动效率、音色和发音效果稳定性评价3个方面^[6-7]。

1.1 振动效率评价参数

1) 比动弹性模量(E'/ρ),表示竹材或木材顺纹方向细胞壁的平均动弹性模量,其值越大,材料振动效率越高。 E' 为动弹性模量(GPa), ρ 为密度(g/cm^3)。

2) 声阻抗(z),又叫特性阻抗,表示的是在声振动传播过程中(特别是当振动能量从声阻抗为 z_1 的一种介质传输到另一种声阻抗为 z_2 的介质时)受到阻力的大小。

$$z = \rho v = \sqrt{\rho E'} \quad (1)$$

式(1)中, v 为声速(m/s)。

3) 声辐射品质常数(R),描述了物体的振动因声辐射而衰减的程度。尤其是对于体鸣乐器和音板, R 越大发出的声音越响亮。

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

4) 损耗角正切($\tan\delta$),表示每个振动周期内热损耗能量与介质存储能量之比。其值越低,振动效率越高、衰减速度越慢,乐音越饱满且有余韵。

$$\tan\delta = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{Q} \quad (3)$$

式(3)中, δ 为对数衰减率, Q 为品质常数。

1.2 音色评价参数

音色评判是对材料振动的频谱特性进行分析。对乐器音板和共鸣箱的要求之一是能够将来自弦的各种频率的振动很均匀地增强并辐射出去,以保证声音在整个频域的均匀性,其体现为从基频开始向各高次谐频峰值连接形成的“包络线”(随频率升高而下降)的平缓连续程度。

动弹性模量与动刚性模量之比(E'/G)是描述材料在外力作用下变形方式的指标,其幅频特性(传递函数的幅值随被测频率的变化规律)与“包络线”特性十分相近,两者测量值呈紧密正线性相关。故采用 E'/G 间接表示频谱特性曲线的“包络线”特性,其值越大表明频谱在整个频域内分布越均匀,音色效果越好,给人以亲切、自然的听觉感受。

1.3 发音效果稳定性评价参数

作为发音效果稳定性评价参数,声转化率(ACE)值越大,发音效果稳定性越好。

$$ACE = \frac{\sqrt{E'/\rho}}{(\tan\delta \times \rho)} \quad (4)$$

2 木竹材声学振动特性的影响因素

影响木竹材声学振动特性的因素主要包括材料宏观构造、微观构造、化学组分及物理性质等内在因素,以及采伐时间、选材部位、锯切方式等外在加工条件。目前对竹材宏观及微观构造与其声学振动特性相关性的研究较少。这可能是由于竹子的种类和数量远不及树木,且在世界范围内分布不均,同时还受到自身形状及尺寸的制约,不能满足部分乐器构件的尺寸及美学要求,造成对竹材声学振动特性及声学品质研究的广度和深度远不及木材。

2.1 宏观构造

乐器用木材与竹材的宏观构造特征在材料初期

筛选阶段发挥着重要作用,如木材的生长轮与晚材率、竹材的梯度结构等,通过简单识别即可对材料优劣进行初步筛分。阐明其宏观构造与声学振动特性间的相关关系,是推动乐器用木竹材实现科学选材的首要步骤。

国内外有关木材宏观构造与其声学特性相关性研究已取得重要进展。木材的生长轮特征不仅与其物理力学性质密切相关,也是声学振动特性的重要影响因素。不同树种,木材的生长轮宽度、晚材率及其变异系数存在明显差异。大多数云杉属木材的生长轮宽度在 1.0 ~ 1.5 mm 时,其比动弹性模量和声辐射品质常数较大且损耗角正切值较小,具有优良的声学振动特性^[8-9]。云杉属木材的晚材率与比动弹性模量、声辐射品质常数及损耗角正切密切相关,其值在适宜范围内时木材可达到优良的声学振动特性^[10]。Obataya 等^[11] 研究认为:晚材率越小,比动弹性模量和声辐射品质常数越大,声学振动性能越好;一般要求,乐器共鸣板用木材每个年轮的晚材率在 1/4 左右。

与木材不同,竹材在径向没有木射线,组成简单,主要由刚性的维管束与均匀的薄壁细胞构成。竹纤维的定向性好,且纤维体积分数从竹青到竹黄呈梯度分布,强度大、模量高。针对竹材的径向梯度结构,王思敏等^[12] 采用共振法分层测定了竹青、竹黄、竹节的密度和声学振动参数后发现,竹材中的声速和动弹性模量在径向上也呈梯度分布,呈现由竹青到竹黄梯度下降的趋势,且与密度呈明显线性相关。这种性质变化同样存在于不同高度的竹秆中。张爱珍^[13] 研究表明,竹材部位越高、竹节越长,其动弹性模量也越大。在径向上和生长方向上,竹材的声学振动性能均存在差异。

2.2 微观构造

木竹材的微观解剖构造,包括各类细胞的形态参数、种类、含量、细胞壁 S₂ 层微纤丝角等,与其声学振动特性均存在密切的内在联系。

木材的纤维长度、纤维长宽比、管胞长度、管胞壁厚、胞壁率、管胞壁腔比等解剖构造特征指标在一定范围内时,木材具有最佳的综合声学振动特性^[8,14]。解剖构造规则性和均一性好的木材其声学品质较好,导管和纤维形态对声学品质影响不明显;轴向薄壁组织和射线是影响声学品质的重要因素;傍管型轴向薄壁组织含量少、木射线短、结构均匀且数量不多的木材声学品质良好^[15]。细胞壁 S₂ 层微纤丝角也是影响

木材声学振动特性的重要构造特征,其值在适宜范围内(9° ~ 13°)越小,比动弹性模量和声辐射品质常数越大,而声阻抗及损耗角正切值越小,声学振动特性越优良^[16-17]。竹材的微纤丝角与其在竹秆中所处高度呈负相关,即高度越高微纤丝角越小,声学振动特性越好^[13]。木竹材的微纤丝角对其声学振动特性的影响程度仅次于密度^[12-13,18]。

2.3 化学组分

因树种和竹种不同,其纤维素、半纤维素和木质素的含量及其对声学振动的影响存在差异。抽提物含量的降低、纤维素相对结晶度的提高,有利于声学振动特性的提升。

随着综纤维素含量的增加,泡桐的比动弹性模量和声阻抗减小;随木质素含量的增加其值呈先减后增的趋势。综纤维素和木质素对声辐射品质常数的影响不明显,苯醇抽提物及 1%NaOH 抽提物含量与声学振动特性呈显著线性相关,1%NaOH 抽提物含量较低时振动特性较好^[7,19]。纤维素结晶度同样与木材的声学振动特性密切相关,不同树种木材的结晶度与声学振动参数间的关系也有所差异。随着纤维素结晶度的增加,吸湿性降低而 E/G 值上升,有利于提升振动效率、发音稳定性及其音色表现^[8,15]。结晶度是声学振动特性的第 3 大影响因素,大多数木材在纤维素结晶度处于 56% ~ 65% 时具有最优的声学振动特性^[18]。

2.4 物理性质

木竹材物理性质对其声学振动特性的影响最大,材料的密度、含水率、干缩湿胀特性能够对其声学振动效率、音色与发音效果稳定性产生直接影响。

1) 密度。密度是影响竹木材声学振动特性最为重要的因素^[12-13,18]。随着密度的增大,其动弹性模量、声阻抗增大,而声辐射品质常数、 $\tan \delta/E$ 减小, E/G 与木材密度没有固定的规律;当大部分树种的密度为 0.4 ~ 0.5 g/cm³ 时具有较大的比动弹性模量及良好的振动特性^[7,19-20]。竹材密度与其在竹秆中所处的高度呈正相关,即高度越高,其密度与动弹性模量越大^[13]。

2) 含水率。含水率的变化不仅会影响材料的尺寸及发音效果稳定性,还会对其振动效率及音色产生影响^[21-23]。随着含水率的降低,木材的动弹性模量和比动弹性模量显著增大,而与能量损耗相关的声学振动参数显著减小^[7]。当木材含水率降至 7% 左右时,其损耗角正切达到最小值,同时具有较高的比动弹性

模量,具有优良的振动效率及音色表现^[18]。与稳定含水率状态下的木材相比,含水率变化状态下的木材具有较低的动弹性模量及较高的对数衰减率,且吸湿过程中对数衰减率的增加程度大于解吸过程^[24]。

3)干缩湿胀。木材与竹材等天然材料具有干缩湿胀特性,会因环境湿度的变化发生吸湿或者解吸,尺寸稳定性好的木竹材相对不易发生形变及开裂,具有良好的发音稳定性。与木材相比,暴露在相对湿度变化环境中的竹材更容易开裂。竹秆内侧竹黄的密度低而吸放水分速率快,外侧竹青密度大而吸放水分速率慢,导致内侧的尺寸变化程度大于外侧,产生内应力,从而发生竹材劈裂^[5]。

4)各向异性。木竹材具有正交各向异性,大部分木竹材的声波传播速度为纵向>径向>弦向。这也正是各向异性材料适于制造乐器原因——木竹材纵向声速大而响应频率高,径向声速小而响应频率低,可以获得较宽的频谱响应域范围,由此满足不同声音特色乐器的声学要求^[25-26]。

2.5 选材加工

决定木竹材声学品质的影响因素除了其自身的结构与性质,科学合理地选材、锯切加工、干燥等也是造就优良乐器用材的必要条件。

1)选材。特定的乐器需要选用特定的竹种或树种,辅以特殊的工艺制作完成^[27]。一般认为,乐器用竹木材较适宜在冬季下弦月月相时采伐,此时太阳的能量及竹木的含水率和营养量最低,干燥质量最好,且遭受昆虫、真菌侵害的程度较低^[5]。同时,乐器材应避免夹皮、节疤、虫眼、斜纹、涡旋、偏宽年轮及腐朽的存在,并根据竹或木的顺直程度、径级、树心的位置等因素看料下锯。

2)锯切加工。由于径向板比弦向板的传声速度快且弹性模量高,为获得满足声学特性要求的音板,原木必须采用径向锯切的方法^[28-30]。此外,共振音板的音质优劣还与板的厚度分布有关。一件好的乐器音色是十分丰富的,这就需要根据乐器音色的要求对音板厚度合理分布^[31]。

3)干燥方式。乐器用木材与竹材都需要经过精心的干燥处理,尤其是用于制作高端乐器的材料,通常需要经历漫长的自然干燥过程。为避免生长应力及干燥缺陷对材料声学品质的不利影响,大多采用谨慎缓慢的自然干燥方式,在这一过程中竹材需要数月甚至数年,而木材则需要数年乃至数十年^[5,32]。

由此可见,生长轮、晚材率、竹材梯度结构等宏观构造以及细胞形态参数、微纤丝角等微观构造特征均是在木竹材生长过程中形成的,主要受立地条件的影响,一般只能通过营林培育进行适当调控,很难通过其他人工手段进行直接改变。木竹材的选材、锯切加工、干燥方式等因素则易于在人为选材和加工过程中直接进行控制,而抽提物含量、纤维素相对结晶度等化学性质以及密度、含水率等物理性质,则可以通过一定的化学物理方法处理进行改变。以上内因和外因是木竹材声学振动特性改良的主要切入点。

3 木竹材声学振动特性的功能性改良方法

自然干燥会赋予木竹材优质的声学振动特性以及音色与发音效果稳定性,但耗时过长,无法适应现代乐器生产节奏。为缩短乐器用材的处理时长、增强其声学品质,目前主要采取物理、化学和生物处理方法对其声学振动特性进行改良。虽然化学法改良效果明显,但其安全性及环保性不如物理法和生物法。

3.1 化学处理

化学处理是木竹材材性改良常用的方法,通常使用1种或几种化学试剂对木竹材进行处理,以改善木竹材某个或多个方面的性能,如声学振动特性、尺寸稳定性、阻燃性、防腐性等。针对木竹材声学振动特性的改良,主要是改变引起其吸湿特性变化的化学基团与抽提物的含量,以实现声学振动特性的改善。

经化学浸渍处理后,云杉属木材的羟基间形成甲醛化交联,使其声学效果稳定性与抗吸湿特性得到改善。研究木材不同频段内振动能量衰减后发现,改性处理木材顺纹和横纹方向的振动内摩擦在150~500 Hz频率范围内分别降低了40%与50%,但高频段的振动内摩擦降低量较小;横纹方向的比动弹性模量提高了10%,而顺纹方向的比动弹性模量变化不大^[33]。采用适当的化学试剂处理可使木材内部形成交联网络结构,有效改善木材的声学振动特性^[34]。针对木质吹管乐器的开裂变形问题,采用活性酚醛树脂溶液和苯乙烯塑料单体分别处理硬木管乐器用材与低音双簧管用材,均取得了良好的防开裂、防变形效果^[35]。经不同化学成分处理后发现,刺猬紫檀木材的各类抽提物含量与密度、动弹性模量的数值呈正相关关系,与损耗角正切值呈负相关关系^[36]。

3.2 物理处理

物理处理法是通过物理或机械的方式,无需加水

以外的化学试剂对木竹材进行功能性改良, 以提升其声振动性能、尺寸稳定性等。高温热处理和射线辐照处理是较为常用的物理改性方法。

3.2.1 高温热处理

高温热处理是乐器用材常用的改性方法, 具有绿色安全、操作简单、效果明显等优点^[37]。该方法对木竹材细胞壁组分及其声学振动特性的影响机制如图1所示。在高温(接近或高于 200 ℃)、较低含氧量和水蒸气(或惰性气体、热油等)保护下, 木竹材内部

的高分子组分和结构发生改变, 材料的尺寸稳定性及耐候性得以提升^[38-39]。在该过程中, 因细胞壁内耐热性较差的半纤维素部分水解、纤维素结晶度提高、木质素发生酯化反应而导致游离羟基数量显著减少, 木竹材的吸湿性下降。同时, 细胞腔中的淀粉、糖类等有机营养物质受热分解和挥发, 木竹材的质量下降, 细胞内空腔体积增加, 共振性能提升^[40-41]。然而, 过高温度和过长时间则会导致木竹材的力学性能下降, 材性变脆, 降低其声学振动特性^[39, 42]。

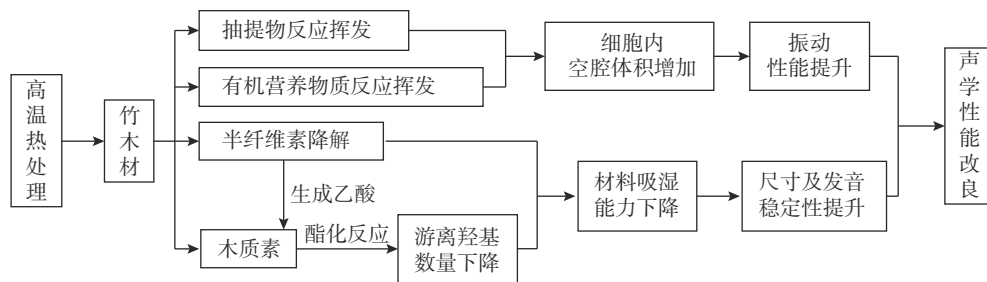


图1 高温热处理对竹木材细胞壁组分及其声学性能的影响机理

贾东宇^[43]选择温度分别为 120 ℃、140 ℃、160 ℃、180 ℃、200 ℃及 220 ℃, 保温时间为 2 h, 对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)高温热处理后发现, 随着处理温度的升高, 木材密度、弹性模量、声阻抗及对数衰减率等指标均下降, 比动弹性模量与声辐射品质常数则提高, 高温热处理杉木的音色不仅比未处理材好, 整体效果甚至要优于百年杉木及古杉木。但这与 Kubojimd 等^[44]对云杉(*Picea stichensis* Carr.)木材的研究结果稍有差异, 即比动弹性模量、比剪切模量在 120 ℃、160 ℃的初始加热阶段先增加而后保持稳定, 而在 200 ℃加热温度下先增加后下降; 纵向损耗角正切在所有加热条件下均增加, 而径向损耗角正切在 120 ℃条件时增加, 在 160 ℃和 200 ℃条件时下降。与未处理的共鸣板用云杉木材相比, 热处理材的吸湿性降低, 尺寸稳定性、耐久性及声学振动特性显著提高, 更符合共鸣板用材的要求^[45]。竹材吸收 100 ℃的桐油, 密度和力学性能增加, 而细胞结构与化学组分变化不大^[46]。在尺寸稳定性方面, 油热处理方法要优于以空气和氮气为介质的热处理方法^[47]。然而, 油热处理的竹材及其制品在应用中存在着出油、散发难闻气味等问题。因此, 以油为介质的热处理方法并不适合于要求苛刻的乐器制造行业。

3.2.2 γ 射线辐照处理

γ 射线辐照技术通过对生物质材料结构和关键组

分产生作用, 原位进行功能性改良。将 γ 射线辐照技术引入乐器用木竹材声学功能性改良领域, 以辐射能代替热能、 γ 射线辐照代替化学试剂浸渍, 在提升产品尺寸稳定性与声学振动特性的同时, 可显著降低改性过程中的能量消耗, 同时符合绿色安全的产品标准。

γ 射线辐照对不同树种木材效果存在差异, 需要根据材料的种类来选择适宜的辐照工艺参数^[48]。在 50 kGy 的辐照剂量下, 鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)和泡桐(*Paulownia elongata*)的振动特性总体改善效果较为理想^[39]。随着辐照剂量的增加, 毛竹(*Phyllostachys pubescens* Mazel ex H de Lehaie)的吸湿性能持续降低且降低幅度愈加剧烈^[49]。 γ 射线辐照具有杀灭竹材内部细菌和破坏淀粉的作用, 可有效提高竹材的防霉性能^[50], 对于乐器收藏和使用起到重要的防护作用。

3.3 生物处理

生物处理是采用特定腐朽菌对木竹材进行处理的方法, 这类腐朽菌不具有降解木质素的作用。即使在腐朽末期, 木素含量较高的复合胞间层、细胞壁骨架仍能得以完整保存。生物处理的优点是在降低材料密度、提高其振动性能的同时, 又保证了声音在材料中传递的连续性, 避免了对其声学特性的不利影响。

采用腐朽菌降解处理挪威云杉和美国梧桐木材的研究表明, 随着腐朽的进行半纤维素逐步降解, 细胞腔增大、细胞壁变薄、密度下降, 而对弹性模量等力

学性质和声速的影响不明显,同时其损耗角正切值降低,声辐射品质常数显著提高,材料整体声学品质得到改善^[51]。由此可见,腐朽菌生物处理是一种安全有效的方法,但用该方法处理后的材料会存在局部颜色加深而材色不匀的问题,导致其表面质量降低,可能无法满足高档乐器制造的外观标准。

4 研究展望

木竹乐器材产品具有附加值高、受众广、历史悠久等特点。系统开展木竹乐器材声学振动特性的研究,探索木竹材音色发声机理、创新声学改良新方法、将材料科学与音乐艺术有机结合,具有重要的科学价值和社会意义。未来木竹材声学振动特性的研究可重点从以下方面开展。

1) 探明木竹材多尺度结构与其声学振动特性的内在联系,构建基于竹材微观构造、化学组分、物理力学性质等参数的声学振动特性的数学预测模型。

2) 阐明木竹材的材性参数与其频谱特性的内在关系,形成木竹材声学振动特性定量客观的评价方法,制定相应的评价标准。

3) 对竹木材的音色发声机制进行仿生设计,利用复合材料开发高品质音乐产品与艺术功能。

4) 研发木竹材声学振动特性提升的绿色功能性改良方法,为高品质木竹制乐器的加工提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] 江泽慧,王巍. 竹乐器的世界[M]. 北京:文化艺术出版社,2010.
- [2] 田元. 我国古代乐器的主要类型[J]. 音乐天地,2007(3):58-60.
- [3] HORNBOSTEL E M V, SACHS C. Systematik der Musikinstrumente Ein Versuch[J]. Zeitschrift für Ethnologie, 1914, 46(4/5): 553-590.
- [4] 张伯瑜. 中国民族乐器概说之一:辉煌的历史进程[J]. 乐器, 2007(10):74-77.
- [5] WEGST U G K. Bamboo and wood in musical instruments[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2008, 38(1): 323-349.
- [6] WEGST U G K. Wood for sound[J]. *American Journal of Botany*, 2006, 93(10): 1439-1448.
- [7] 刘振波,黄英来,杨扬. 共鸣板用木材的振动特性与民族乐器的声学品质[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [8] 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.
- [9] 沈隽,刘一星,刘明. 云杉属木材晚材率变异系数与声振动特性参数[J]. *福建林学院学报*, 2005, 25(3): 225-228.
- [10] 刘一星,沈隽,田站礼,等. 云杉木材声振动性能与生长轮宽度、晚材率之间关系的研究[J]. *林业科学*, 2001, 37(6): 86-91.
- [11] OBATAYA E, ONO T. Vibrational properties of wood along the grain[J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35: 2993-3001.
- [12] 王思敏,蒋身学. 毛竹材声学振动特性研究[J]. 竹子研究汇刊, 2011, 30(1): 1-4.
- [13] 张爱珍,余观夏,阮锡根. 竹材动态杨氏模量影响因子的分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(5): 43-46.
- [14] 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.
- [15] BRANCHERIAU L, BAILLERES H, DETIENNE 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): 270-273.
- [16] 沈隽,刘一星,刘振波,等. 纤维角对云杉属木材声振动特性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2002, 30(5): 50-52.
- [17] BORLAND M. Investigation of piano soundboard voicing techniques and their impact on tone[D]. Canada: University of Waterloo, 2009.
- [18] 马丽娜. 木材构造与声振性质的关系研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2005.
- [19] 秦丽丽,苗媛媛,刘镇波. 泡桐木材主要物理特征及化学组分对其声学振动性能的影响[J]. *森林工程*, 2017, 33(4): 34-39.
- [20] 沈隽,刘一星,田站礼,等. 云杉属木材密度与声学特性参数之间关系的研究[J]. *华中农业大学学报*, 2001, 20(2): 181-184.
- [21] ONO T, NORIMOTO M. Study on young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1983, 22(4): 611-611.
- [22] MARTINEZ M, 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]//VASQUES C M A, RODRIGUES J D. Vibration and structural acoustics analysis. Dordrecht: Springer, 2011.
- [23] 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.
- [24] LU J X, JIANG J L, WU Y Q, et al. Effect of moisture sorption state on vibrational properties of wood[J]. *Forest Products Journal*, 2012, 62(3): 171-176.
- [25] TONOSAKI M, OKANO T, ASANO I. Vibrational properties of Sitka spruce with longitudinal vibration and flexural vibration[J]. *Mokuzai Gakkaishi*, 1983, 29(9): 547-552.
- [26] NAKAO T, OKANO T, ASANO I. Vibrational properties of a wooden plate[J]. *Mokuzai Gakkaishi*, 1985, 31(10): 793-800.
- [27] 张辅刚. 简述乐器用木材[J]. *中国木材*, 1990(5): 36-37.
- [28] 张辅刚. 民族乐器用材(一)[J]. *中国木材*, 1991(5): 43-45.
- [29] 张辅刚. 民族乐器用材(二)[J]. *中国木材*, 1991(6): 36-38.
- [30] 张辅刚. 音板用材的锯切方法及技术条件[J]. *中国木材*, 1991(1): 28-29.
- [31] 余亚明,王湘. 初探板共振乐器的板厚度分布[J]. *乐器*, 1986(6): 5-6.
- [32] 张辅刚. 乐器用材的自然干燥[J]. *中国木材*, 1992(1): 44-46.

- [33] YAN H, MINATO K. Improvement of the acoustic and hygroscopic properties of wood by a chemical treatment and application to the violin parts[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1992, 92(3): 1222 – 1227.
- [34] CHANG S T, CHANG H T, HUANG Y S, et al. Effects of chemical modification reagents on acoustic properties of wood[J]. *Holzforschung*, 2000, 54(6): 669 – 675.
- [35] 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.
- [36] BAKARY T, BRANCHERIAU L, PATRICK P, et al. Acoustic quality of vene wood (*Pterocarpus erinaceus* Poir.) for xylophone instrument manufacture in Mali[J]. *Annals of Forest Science*, 2010, 67(8): 815 – 815.
- [37] ESTEVES B M, PEREIRA H M. Wood modification by heat treatment: a review[J]. *Bioresources*, 2009, 4(1): 370 – 404.
- [38] MARKKU R. Wood heat treatment replacing chemicals[J]. *Asian Timber*, 2004, 12(3): 36 – 38.
- [39] 朱玲静. 几种物理处理法对木材声学振动性能的改良及其机理研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- [40] 李贤军, 傅峰, 蔡智勇, 等. 高温热处理对木材吸湿性和尺寸稳定性的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(6): 92 – 96.
- [41] 李涛, 顾炼百. 185 °C 高温热处理对水曲柳木材力学性能的影响[J]. *林业科学*, 2009, 45(2): 92 – 92.
- [42] 尹思慈. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [43] 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.
- [44] KUBOJIMA Y, OKANO T, OHTA M. Vibrational properties of Sitka spruce heat-treated in nitrogen gas[J]. *Journal of Wood Science*, 1998, 44(1): 73 – 77.
- [45] WAGENFUHR A, PFRIEM A, GROTHE T, et al. Untersuchungen zur vergleichenden Charakterisierung von Thermisch Modifizierter Fichte für Resonanzdecken von Gitarren[J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2006, 64(4): 313 – 316.
- [46] TANG T, CHEN X, ZHANG B, et al. Research on the physico-mechanical properties of moso bamboo with thermal treatment in tung oil and its influencing factors[J]. *Materials*, 2019, 12(4): 599. DOI: 10.3390/ma12040599.
- [47] YANG T H, LEE C H, LEE C J, et al. Effects of different thermal modification media on physical and mechanical properties of moso bamboo[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 119(30): 251 – 259.
- [48] 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.
- [49] 孙丰波. 竹材 ^{60}Co γ 射线辐照效应及其机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [50] 孙丰波, 江泽慧, 费本华, 等. γ 射线辐照对竹材防霉性能的影响[J]. *木材工业*, 2011(3): 23 – 25.
- [51] BREMAUD I, AMUSANT N, MINATO K, et al. Effect of extractives on vibrational properties of African Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.)[J]. *Wood Science and Technology*, 2011, 45(3): 461 – 472.