doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.03.011

油热处理对竹材声学振动性能的影响

梁雨薇,何澜,张梁,张海洋,蒋桂章,刘睿哲,刘镇波*
(生物质材料科学与技术教育部重点实验室(东北林业大学),哈尔滨 150040)

摘　要:为探究油热处理对竹材声学振动性能、尺寸稳定性的影响规律,减少竹乐器在使用过程中出现开裂、变形,从而导致音质受损的不利影响,以大豆油为加热介质对竹材进行热处理,热处理温度分别为 140、170、200 ℃,加热时间分别为 2 h 和 4 h,利用双通道快速傅里叶变换分析仪得到试件处理前后的振动频谱图,读取其前五阶弯曲振动频率,分析声学振动性能参数,研究油热处理对竹材声学振动性能、尺寸稳定性的影响。处理后竹材的比动弹性模量(E_{sp})、声辐射品质常数(R)有明显提高,密度(ρ)、声阻抗(ω)、动力学损耗角正切($\tan\delta$)和 E/G 呈下降趋势,声学振动效率得到提高。其中,经 200 ℃、4 h 处理后带有竹节的竹材声学振动性能提升最大,E_{sp} 增幅为 29.20%、ρ 降幅为 15.12%、R 增幅为 33.75%、ω 降幅为 3.41%、$\tan\delta$ 降幅为 40.52%,E/G 降幅为 2.33%。最小体积干缩率和最大抗吸湿膨胀率分别为 0.33%、56.95%,体积干缩率和体积吸湿膨胀率随处理时间和温度的增大而减小。结果表明,当油热处理时间为 200 ℃,时间为 4 h 时,试件的声学振动性能得到了较好的改善,油热处理对竹材声学振动性能和尺寸稳定性的提升有积极作用。

关键词:竹材;油热处理;声学振动性能;尺寸稳定性;微观构造
中图分类号:S781.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)03-0115-10

Effect of Oil Heat Treatment on the Acoustic Vibration Performance of Bamboo

LIANG Yuwei, HE Lan, ZHANG Liang, ZHANG Haiyang, JIANG Guizhang, LIU Ruizhe, LIU Zhenbo*
(Key Laboratory of Bio-Based Material Science and Technology (Northeast Forestry University), Ministry of Education, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to explore the impact of oil heat treatment on the acoustic vibration performance and dimensional stability of bamboo materials, and to reduce the adverse effects of cracking, deformation, and damage to sound quality of bamboo musical instruments during use, the experiment used soybean oil as the heating medium to heat treat bamboo, with heat treatment temperatures of 140 ℃, 170 ℃, and 200 ℃ and heating times of 2 and 4 hours. The vibration spectrum of the specimens before and after treatment was obtained using the dual channel FFT analyzer, and took the first to fifth bending vibration frequencies. Its acoustic vibration performance parameters were analyzed to study the effect of oil heat treatment on the acoustic vibration performance and dimensional stability of bamboo. After treatment, the specific dynamic modulus of elasticity (E_{sp}) and sound radiation quality constant (R) of bamboo had significantly increased, and the density (ρ), acoustic impedance (ω), dynamic loss angle tangent ($\tan\delta$), E/G showed a downward trend, and the acoustic vibration efficiency had been improved. After being treated at 200 ℃ for 4 hours, the materials with bamboo nodes showed the greatest improvement in acoustic vibration performance, with an increase in E_{sp} of 29.20%, a decrease in ρ of 15.12%, an increase in R of 33.75%, a decrease in ω of 3.41%, a decrease in $\tan\delta$ of 40.52%, and a decrease in E/G value of 2.33%. The minimum volume dry shrinkage and maximum anti hygroscopic expansion were 0.33% and 56.95%, respectively. The volume dry shrinkage and volume hygroscopic expansion decreased with increasing treatment time and temperature. Results showed that when the oil heat treatment time was 200 ℃ and the time was 4 hours, the acoustic vibration performance of the specimens was better improved. Oil heat treatment had positive effects on improving the acoustic vibration performance and dimensional stability of bamboo.

Keywords: oil treatment; acoustic vibration performance; dimensional stability; microstructure

收稿日期:2023-11-20
基金项目:国家自然科学基金项目(31670559、32271781);国家级大学生创新训练项目资助(202310225160)。
第一作者简介:梁雨薇,硕士研究生。研究方向为竹材声学。E-mail: 245992005@qq.com
*通信作者:刘镇波,博士,教授。研究方向为木材声学、木材功能性改良。E-mail: liu.zhenbo@foxmail.com
引文格式:梁雨薇, 何澜, 张梁, 等. 油热处理对竹材声学振动性能的影响[J]. 森林工程, 40(3):115-124.
LIANG Y W, HE L, ZHANG L, et al. Effect of oil heat treatment on the acoustic vibration performance of bamboo[J]. Forest Engineering, 2024, 40(3):115-124.

0 引言

竹类植物种类繁多,分布广泛,是世界上仅次于木材的第二大植物资源[1]。我国竹子资源丰富,竹林面积达 756 万 hm^2,年产竹材量居世界首位。自古以来竹子就在人们的生活中扮演着重要角色,在金属材料出现前的古代社会更是占据着举足轻重的地位。古人利用燃烧竹子发出噼啪声驱散邪气,这是最早的原始音乐[2]。竹乐器在商代时开始增多,繁荣于周代,秦汉时期发展基本完成,各类竹乐器相互辉映,齐聚一堂,唐朝一半以上的乐器都是由竹子制成的[3]。可以说竹乐器是人类最早使用的乐器之一,是群众精神文化生活中不可缺少的重要组成部分[4-5]。竹子强度高、弯曲延展性好、硬度适宜,作为乐器用材展现出了优良的声学特性,最常用来制作竹乐器的竹子有毛竹、紫竹、白竹和苦竹等[6-9]。但由于其本身的特性难以长久保存,许多竹乐器消失在了历史长河中,直至近年来随着人们对精神文化需求的日益增加,民族竹制乐器受到了越来越多的关注,因此竹乐器的保护和传承就显得尤为重要。

新伐竹材含水率过高,含有许多有机组分,且抽提物中抗腐成分少、天然耐久性低,不宜马上制作乐器,应储存 1 a 以上,待含水率趋于稳定后进行下一步的加工[10-11]。工匠制作乐器时基本采用风干和烘烤 2 种方式对竹材进行处理,烘烤时要不断移动以防竹材炸裂[12],这种处理方式不仅费时且对工匠的技术能力要求很高,因此在工艺上进行改良,对竹制乐器的加工和产品稳定性的提高有很大帮助。为减少竹材陈放时间、提高使用效率,可以选择物理方法对竹材进行处理,在保证其声学振动性能不减弱的同时提高制作乐器的效率。王思敏[13]对毛竹竹片、毛竹地板和木质人造板的声学振动特性进行了研究,对不同种类人造板的声学品质进行了细致分析,寻找出了影响板材声学振动性能的因素。霍鑫升等[14]对竹材热处理工艺进行了分析总结,得出单一的处理工艺会对竹材产生负面影响,今后的研究应侧重于多工艺结合的结论。毛竹材经甲基硅油、桐油热处理后,其物理、化学和防腐等性能均有不同程度的提升,温度提升至 200 ℃后,竹材的力学性能急速下降,满足不了建筑、包装等领域的性能需求[15-16]。

目前用物理法处理竹材的研究多集中在处理后竹材成分组成[17-18]、防霉性能[19-21]、力学性能[22-24]和颜色变化[25-27]等方面的研究,对竹材声学振动性能改良的研究较为少见。研究竹材声学振动性能对竹乐器的加工制造,延长乐器的使用寿命有很大帮助。相较于甲基硅油、桐油等加热介质,经大豆油处理过的乐器竹材安全性更高,且成本较低。本研究以大豆油为加热介质对毛竹材进行高温油热处理,研究竹材处理前后声学振动性能、尺寸稳定性的变化,为提高竹乐器的使用价值,延长使用寿命提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为安徽省芜湖市 5 年生毛竹(*Phyllostachys edulis*),尺寸为 200 mm(纵向,L)×20 mm(弦向,T)×10 mm(径向,R),表面无明显缺陷。试件分 6 组,每组 10 块:无竹节竹片 5 块、距端部 2 cm 处有竹节的竹片 5 块。

1.2 试验方法

1.2.1 油热处理

将试件放入恒温恒湿箱(20 ℃、65% RH)平衡含水率至 12%,待质量稳定后测量毛竹的物理参数及声学振动性能参数,而后将试件置于 140、170、200 ℃的大豆油中分别常压处理 2 h 和 4 h(表 1)。试验开始前将试件平铺在油浴锅中,因竹片密度小于大豆油,所以在油浴锅边放置挂钩悬挂放置铁网,将试件完全压入油中。取出处理完的试件,使用无尘擦拭纸擦去表面油分,在室温条件下放置 24 h 后进行物理参数、声学振动性能的测试。声学振动性能测试试验如图 1 所示。

表 1 6 组试件油热处理温度时间参数设定

Tab. 1 Setting of temperature and time parameters for oil heat treatment of 6 sets of specimens

组别 Group	温度/℃ Temperature	时间/h Time
A	140	2
B	140	4
C	170	2
D	170	4
E	200	2
F	200	4

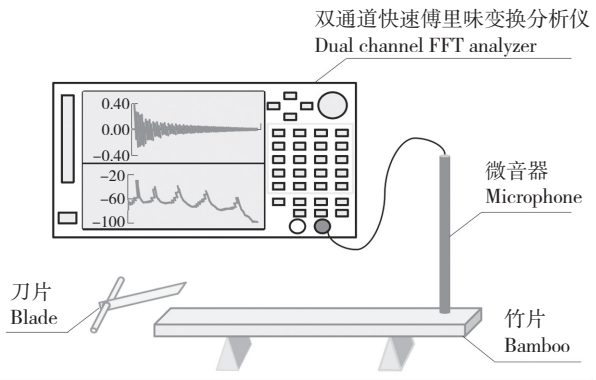


图 1　声学振动性能测试试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of acoustic vibration performance test

1.2.2　声学振动性能测试

本试验基于梁的振动理论,采用弯曲振动的试验方法进行测试。用刀背对处于两端自由边界条件下的试件进行瞬时敲击,经另一侧传感器接受振动信号,再由双通道快速傅里叶变换分析仪(ONO SOKKI,CF-5220Z)得到振动频谱,进而计算出毛竹各项声学振动性能参数,动态弹性模量(E)、比动弹性模量(E_{sp})、声辐射品质常数(R)、声阻抗(ω)、对数衰减率(δ)、动力学损耗角正切($\tan\delta$)、动态弹性模量 E 与动态刚性模量 G 之比(E/G)等。

$$E = \frac{48\pi^2 dL^4 f_i^2}{\beta^4 h^2} \times 10^{-9} 。 \tag{1}$$

式中:E 为动态弹性模量,GPa;ρ 为密度,kg/m^3;L 为长度,m;f_i 为共振频率,Hz;i 表示振动阶次;d 为不同共振阶数对应的系数;h 为厚度,m。

$$E_{sp} = \frac{E}{d} 。 \tag{2}$$

式中,E_{sp} 为比动弹性模量,GPa。

$$R = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} 。 \tag{3}$$

式中,R 为声辐射品质常数,m^4/(kg·s)。

$$\omega = \sqrt{\rho E} 。 \tag{4}$$

式中,ω 为声阻抗,(Pa·s)/m。

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} 。 \tag{5}$$

$$\tan\delta = \frac{\delta}{\pi} 。 \tag{6}$$

式中:δ 为对数衰减率;$\tan\delta$ 为动力学损耗角正切;A_i 为试件时域正弦波的第 i 个振幅。

1.2.3　尺寸稳定性测试

竹材发音效果稳定性主要取决于其抗吸湿能力和尺寸稳定性,外界湿度变化会影响竹材的含水率,进而导致音色产生变化。通过对竹材进行物理或化学等方面的处理能够减小这种不利影响,提高乐器用竹材的使用价值和寿命。根据 GB/T 15780—1995[28] 对试件的尺寸稳定性进行测试,通过体积变化计算试件的体积干缩率和抗吸湿膨胀率。

$$\alpha = \frac{V_m - V_n}{V_m} \times 100\% 。 \tag{7}$$

$$\beta = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100\% 。 \tag{8}$$

$$\gamma = \frac{\beta_a - \beta_b}{\beta_a} \times 100\% 。 \tag{9}$$

式中:α 为干缩率,%;V_m、V_n 为竹材绝干前、后的体积,mm^3;β 为体积吸湿膨胀率,%;V_0、V_1 分别为竹材水浴处理前、后的体积,mm^3;γ 为改性竹材的抗吸湿体积膨胀率,%;β_a 为未改性竹材的体积吸湿膨胀率,%;β_b 为改性竹材的体积吸湿膨胀率,%。

1.2.3　微观形貌测试

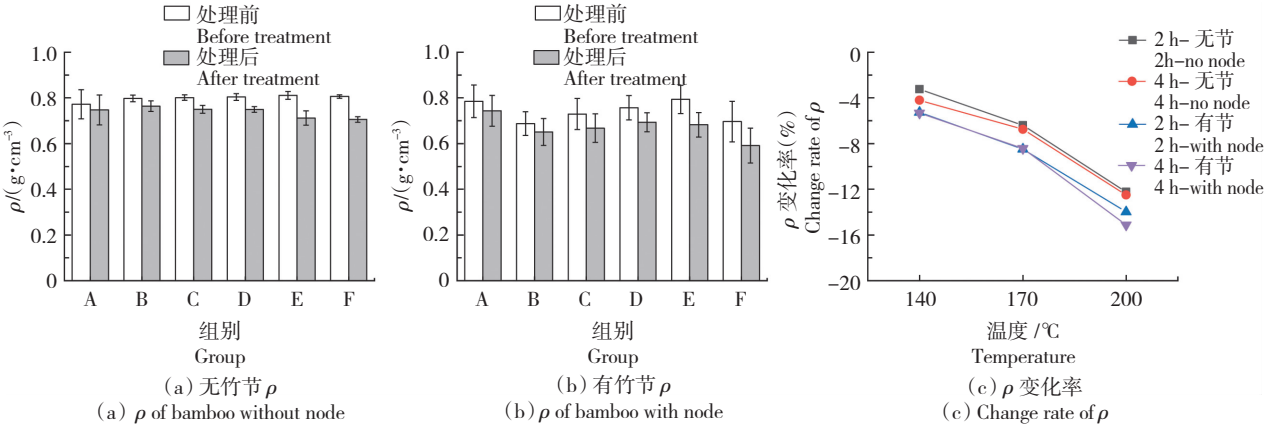
本试验选取含水率 12%的未处理材和经 200 ℃、4 h 油热处理后的试件进行微观形貌的观察。设备采用美国 FEI 公司制造的 QUANTA 200 型扫描电子显微镜,选取倍数为 100 倍和 1 000 倍的照片进行分析。

2　结果与分析

2.1　油热处理对竹材声学振动性能的影响

竹材密度指单位体积内细胞壁实质物质含量多少的物理量,是一个重要的物理力学指标,也是乐器用材选材的重要指标之一。油热处理后密度变化如图 2 所示。A、B、C、D、E、F 表示不同温度时间的组别名称。

由图 2 可知,6 组试件经油热处理后,密度有不同程度的降低,带有竹节的竹材密度变化率最大,竹节组的变化率分别为-5.26%、-5.33%、-8.48%、-8.42%、-13.98%和-15.12%,比相同时间温度条件下的无节组高 2%左右,经 200 ℃、4 h 处理后 ρ 降幅最大,无节组降幅为 12.50%,竹节组降幅为 15.12%,竹节处的纵向、径向和环向维管束等组成的纤维排列结构参与了液体和离子的运输,有利于水分、抽提物等物质的析出,密度下降得更为明显[29-30]。



(a) 无竹节 ρ
(a) ρ of bamboo without node

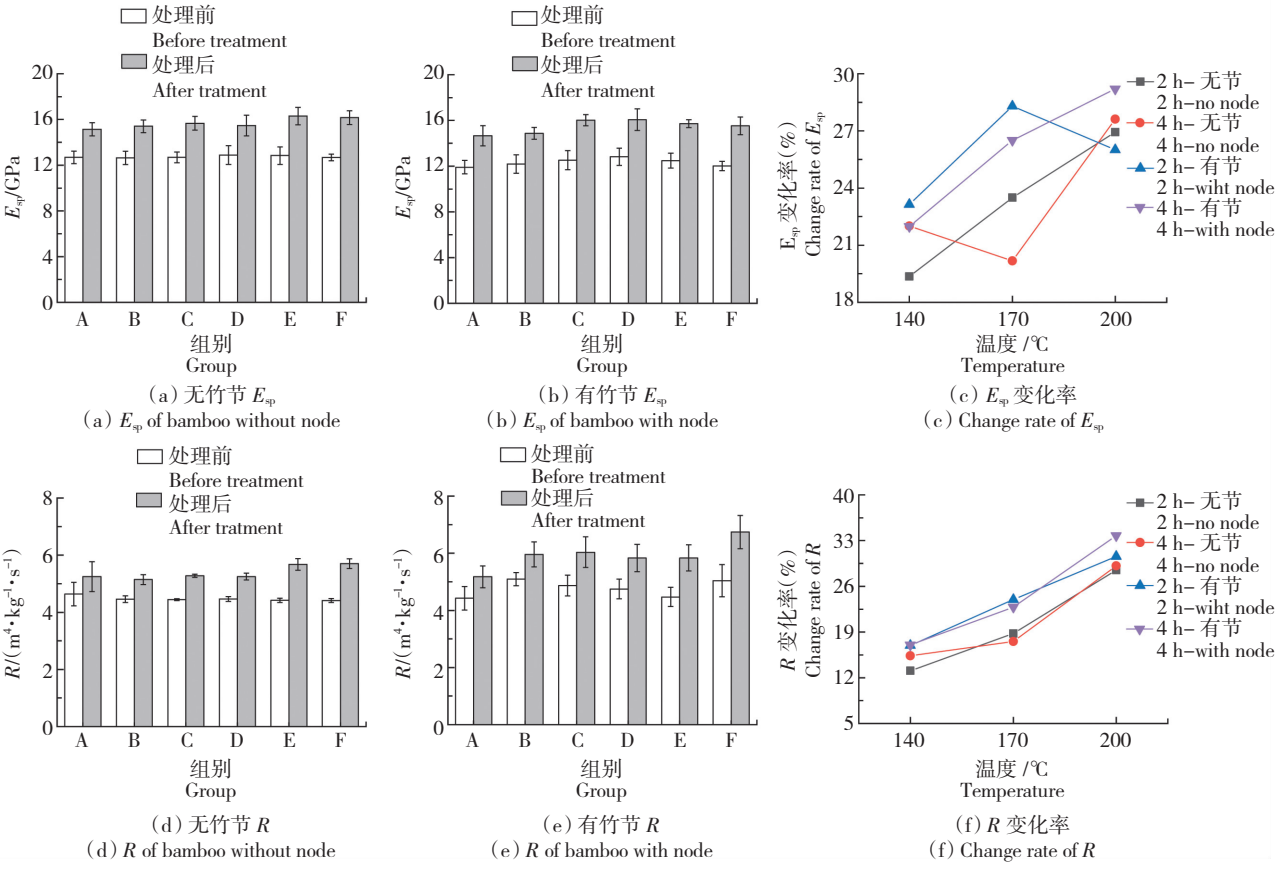
(b) 有竹节 ρ
(b) ρ of bamboo with node

(c) ρ 变化率
(c) Change rate of ρ

图 2 油热处理前后 ρ 值及变化率

Fig. 2 The value and change rate of ρ before and after oil heat treatment

E_{sp} 是试件的动态弹性模量(E)与相对密度(ρ)之比,表示竹材单位细胞壁物质的振动加速度,值越大,其振动效率越高,乐器声学品质就越好[31]。经过处理后的竹材 E_{sp} 有明显提升,随时间和温度的增加,变化率整体呈上升趋势,如图 3 所示。由图 3(c)可知,A 无节组、B 竹节组增幅最小,分别为 19.35%、21.98%;F 无节组和竹节组增幅最大,分别为 27.62%、29.20%,这表明处理温度和时间的增加对 E_{sp} 的提升有积极作用。6 组试件中 A、C、D、F 组的 E_{sp} 分别为 2.75、3.53、3.40、3.51 GPa,2.46、2.98、2.60、3.50 GPa,带竹节竹材的 E_{sp} 均大于无节组,B、E 两组变化率差值在 1% 内。本研究中经 200 ℃、4 h 处理的带竹节竹材 E_{sp} 增幅最大,从 12.02 GPa 提高至 15.53 GPa,表明油热处理对含竹节竹材的 E_{sp} 提升效果更好。



(a) 无竹节 E_{sp}
(a) E_{sp} of bamboo without node

(b) 有竹节 E_{sp}
(b) E_{sp} of bamboo with node

(c) E_{sp} 变化率
(c) Change rate of E_{sp}

(d) 无竹节 R
(d) R of bamboo without node

(e) 有竹节 R
(e) R of bamboo with node

(f) R 变化率
(f) Change rate of R

图 3 油热处理前后 E_{sp}、R 及变化率

Fig. 3 The value and change rate of E_{sp}、R before and after oil heat treatment

声辐射品质常指竹材向周围空气辐射声功率的大小，是表征竹材音质的重要参数，乐器用材通常选用 R 较大的竹材[32]。由图 3(f)可知，无节组和竹节组的 R 变化范围分别为 13.06%～29.12%、16.96%～33.75%，F 竹节组 R 增长最大，达到了 6.73 $m^4/(kg \cdot s)$。处理时间不变的情况下，处理温度高时 R 变化率更大，A、C、E 无节组变化率为 13.06%、18.76%、28.50%，A、C、E 竹节组变化率为 16.96%、23.97%、30.60%；B、D、F 无节组变化率为 15.37%、17.57%、29.12%，B、D、F 竹节组变化率为 17.00%、22.82%、33.75%，这表明在加热时间相同的情况下，选用较高的温度更有利于提高竹材的 R(170、200 ℃)。加热温度相同时，带有竹节竹材的 R 增幅大于无竹节竹材的增幅，6 组试件中 140 ℃和 200 ℃条件下经 4 h 处理后的竹材 R 增幅大于经 2 h 处理后的增幅。油热处理对竹材 R 有明显提升作用，200 ℃、4 h 组处理效果最佳。

声阻抗(ω)指介质对声波传播的阻力大小，与振动的时间响应特性有关[33]，决定了竹材的声音传播效果，是表征竹材声学振动特性的一个重要参数，如图 4 所示。由图 4(c)可知，A、B、C、D 无节组和竹节组 ω 的变化率范围为 2.22%～5.82%、2.89%～5.24%，E、F 的变化率分别为－1.08%和－3.45%、－1.17%和－3.14%，随着时间温度的增加，ω 的变化率呈下降趋势。当处理温度达到 200 ℃时，纤维素和半纤维素发生降解使竹材的密度降低[15]，E、F 组试件的密度下降幅度最大，而动态弹性模量的增幅达到最低，声阻抗与密度和动弹性模量的乘积呈正比例关系，二者乘积变小，ω 随之下降，这是 ω 降低的主要原因[34]。6 组试件中只有经 200 ℃、2 h 和 200 ℃、4 h 油热处理后的 2 组试件 ω 下降，其余 4 组的 ω 均有所增长。在乐器选材方面优先选取 ω 小的竹材，ω 越小，则代表着其声学振动特性更为优良。在本研究中，较高的处理温度(200 ℃)有利于竹材获取较低的 ω，且油热处理对带有竹节竹材的声阻抗值降低效果更佳。

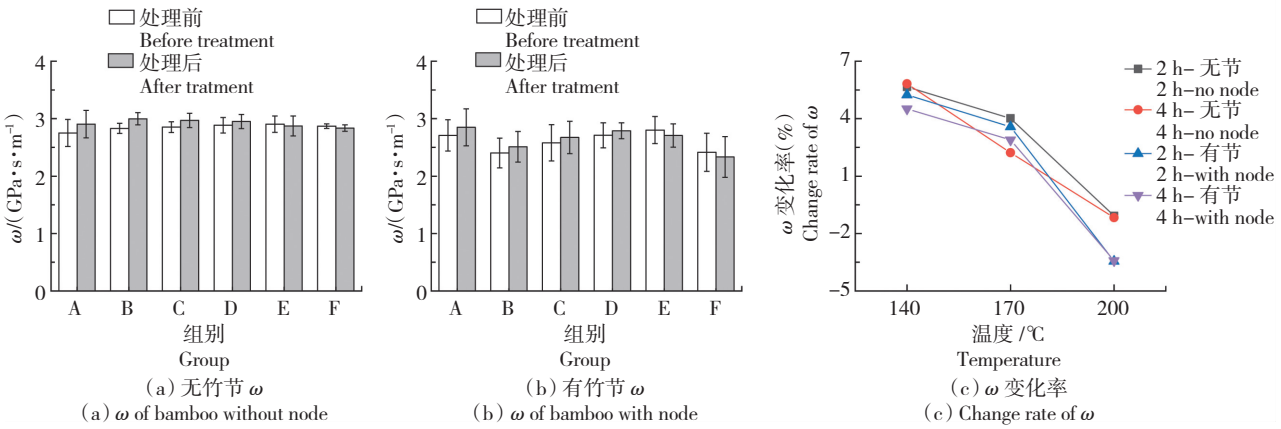


图 4　油热处理前后 ω 及变化率

Fig. 4 The value and change rate of ω before and after oil heat treatment

由图 5(a)和图 5(b)可知，6 组试件经处理后损耗角正切值明显降低，F 组的 tanδ 降幅最大，分别为 33.12%、40.52%。tanδ 越小，竹材的振动能量损失越小，振动效率越高。由图 5(c)可知，在较低的加热温度下(140、170 ℃)，经 4 h 处理后竹材的 tanδ 降幅比经 2 h 处理后的降幅更大。处理时间相同时，在温度较高的条件下竹材的 tanδ 降幅大于处理温度较低时的降幅。带有竹节竹材的 tanδ 降幅大于相同处理温度时间条件下无竹节竹材 tanδ 的降幅，这表明油热处理有利于降低竹材的动力学损耗角正切值，能使乐器的声音更加宏亮饱满，且对带竹节竹材效果更好。

动态弹性模量(E)与动态刚性模量(G)的比值(E/G)是用来描述材料在外力作用下变形方式的指标，是有关音色品质评价的重要参数，E/G 越高，竹材的音色效果越好。由图 6 可以看出，6 组试件经过油热处理后 E/G 均有不同程度的降低，随着处理时间和温度的增加，变化率的降幅呈负相关关系逐渐减小，无节组由－13.23%变为－3.11%，竹节组从－15.99%变为－2.33%，可见处理后竹材的频谱分布均匀性降低，对音色没有较好的提升效果。经 200 ℃、4 h 处理后，竹材的 E/G 降幅最小，虽然在音色方面没有明显的提升效果，但相较于其他 5 组数据稍显优异。

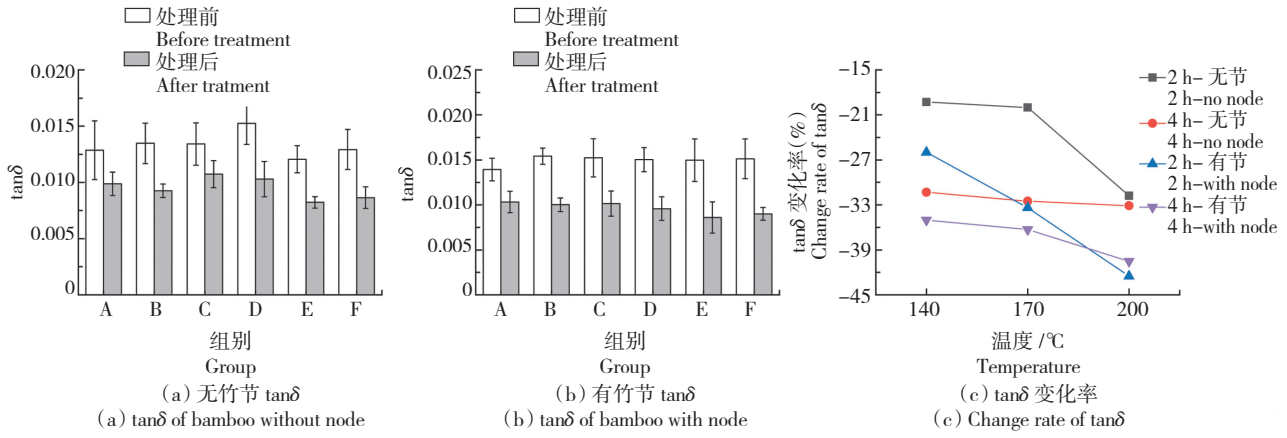


图 5 油热处理前后 tanδ 值及变化率

Fig. 5 The value and change rate of tanδ before and after oil heat treatment

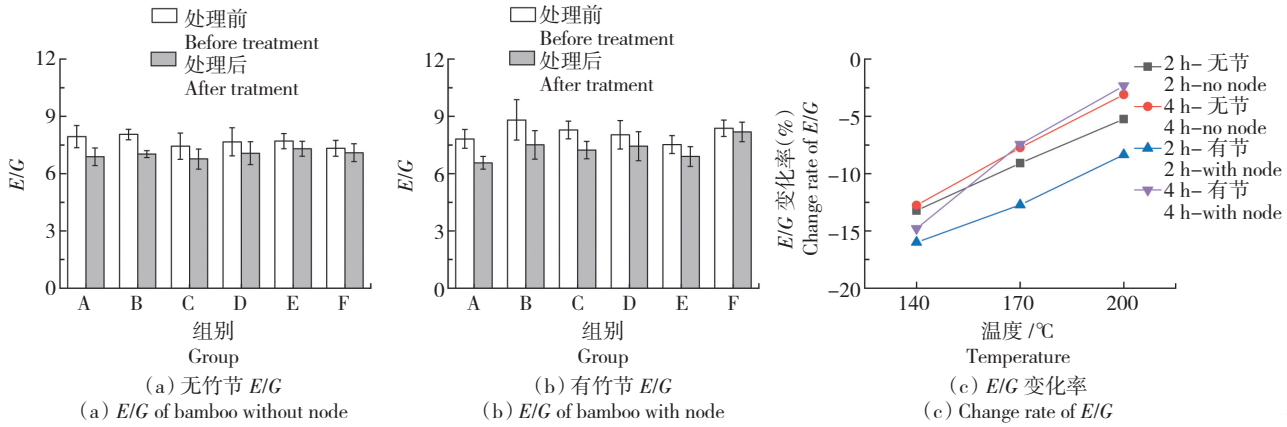


图 6 油热处理前后 *E/G* 值及变化率

Fig. 6 The value and change rate of *E/G* before and after oil heat treatment

2.2 油热处理对竹材尺寸稳定性的影响

竹材的发音效果稳定性主要取决于其尺寸稳定性和抗吸湿能力,油热处理竹材经过绝干和水浴处理后的干缩率和抗吸湿膨胀率,见表 2。

表 2 油热处理后竹材体积干缩率和抗吸湿膨胀率

Tab. 2 Volume dry shrinkage rate and anti hygroscopic expansion rate after oil heat treatment

温度/℃ Temperature	时间/h Time	体积干缩率 α_w(%) Volume dry shrinkage rate α_w	体积干缩率 α_y(%) Volume dry shrinkage rate α_y	抗吸湿膨胀率 γ_w(%) Anti hygroscopic expansion rate γ_w	抗吸湿膨胀率 γ_y(%) Anti hygroscopic expansion rate γ_y
25	—	2.69	3.68	—	—
140	2	1.26	3.30	19.97	24.79
140	4	1.24	1.26	27.18	27.44
170	2	0.77	0.81	27.80	24.03
170	4	0.52	0.51	33.44	23.55
200	2	0.33	0.60	50.08	44.17
200	4	0.40	0.50	56.95	56.80

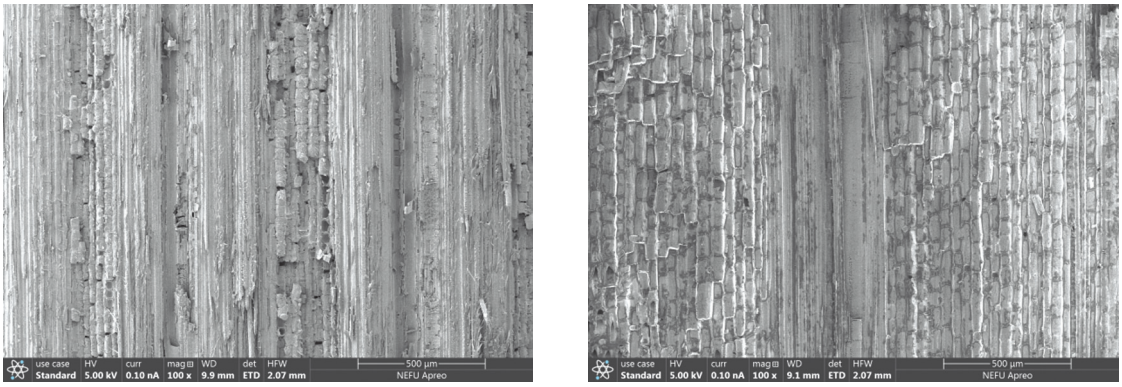
注:w 表示无竹节竹材,y 表示有竹节竹材。

Note: w represents bamboo without nodes, y represents bamboo with nodes.

由表 2 可以看出,未经改性处理的竹材绝干后体积变化最大,无竹节组和竹节组的体积干缩率分别为 2.69%、3.68%,无竹节竹材经 200 ℃、2 h 处理后干缩率最小,为 0.33%,带竹节竹材经 200 ℃、4 h 处理后干缩率最小,为 0.50%。经 15 d 水浴处理后,经 200 ℃、4 h 处理后的竹材抗吸湿膨胀率最大,分别为 56.95%、56.80%,试件的体积干缩率和抗吸湿膨胀率随着处理时间、温度的增加总体呈下降趋势。在相同的湿度环境下,抗吸湿能力强的竹材会表现出更优异的声学品质,同时有较高的尺寸稳定性。经 200 ℃油热处理后竹材的体积干缩率最小,这主要是由于高温处理后,竹材的半纤维素和木质素发生热解,使得游离羟基变少,从而导致竹材的体积干缩率下降,尺寸稳定性提升[35]。油热处理后竹材中的水分与油进行了替换浸入到竹纤维中[36],不易渗出,这是导致干缩率和抗吸湿膨胀率变化的主要原因。竹节由纵向、径向、横向、环向维管束构成,试件经过绝干处理后,细胞壁与细胞腔产生收缩,竹材各个方向的尺寸发生变化,体积干缩率大于只由轴向维管束构成的无节部分。

2.3　油热处理对竹材微观形貌的影响

利用扫描电镜观察毛竹未处理材和经过 200 ℃、4 h 油热处理竹材的径切面,包括竹材的导管、薄壁细胞、初生韧皮部和纤维鞘等,如图 7 和图 8 所示。

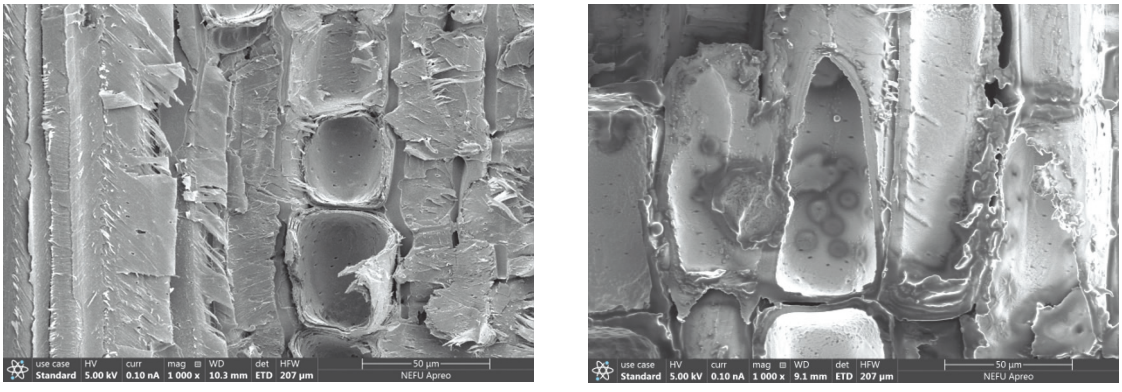


(a) 未处理
(a) Untreated

(b) 经 200 ℃、4 h 处理
(b) Treated at 200 ℃ for 4 h

图 7　放大 100 倍的未处理竹材和经 200 ℃、4 h 处理后竹材电镜图

Fig. 7 Electron microscope images of untreated bamboo and bamboo treated at 200 ℃ for 4 hours magnified of 100 times



(a) 未处理
(a) Untreated

(b) 经 200 ℃、4 h 处理
(b) Treated at 200 ℃ for 4 h

图 8　放大 1 000 倍的未处理竹材和经 200 ℃、4 h 处理后竹材电镜图

Fig. 8 Electron microscope images of untreated bamboo and bamboo treated at 200 ℃ for 4 hours magnified of 1 000 times

2 组试件均用刀片劈开,由图 7 可知,经油热处理后试件表面较未处理材更加光滑,极少出现撕裂、分层等现象。油热处理后的竹材薄壁细胞间隙以及靠近导管方向的纤维帽被大豆油填充,不仅能

隔绝水分的进出,减少开裂、霉变等不利影响,更能维持乐器材本身性能的稳定性,以便在后续使用中维持其原本的音质音色。由图8可知,少量大豆油从纹孔中进入细胞腔,以纹孔为中心小范围扩散,堵塞了纹孔,会对竹材声音的传播产生影响。从数据得知油热处理后试件的声学振动性能有所提高,这表明纹孔数量适当减小有利于声音的传播,对试件声学振动性能的提高有积极作用。

3 结论

本研究以竹材为研究对象,对油热处理前后竹材的声学振动性能和尺寸稳定性进行分析,得到以下结论。

1)竹材的声学振动效率随油热处理温度和时间的增加逐渐提高,比动弹性模量、声辐射品质常数值增大,动力学损耗角正切、密度值降低,声阻抗变化率呈下降趋势,E/G 下降幅度逐渐减小(由-15.99%提高到-2.33%)。

2)油热处理后竹材的体积干缩率降低,无节组的降幅范围为0.33%~2.69%,竹节组降幅为0.50%~3.68%,F组的抗吸湿膨胀率最大,分别为56.95%、56.80%。处理时间相同时,经200 ℃油热处理后的竹材尺寸稳定性好,发音效果更稳定;同一温度条件下,经4 h处理后的竹材声学振动性能更好。

3)油热处理对带有竹节竹材的声学振动性能提高效果更好。

4)总体来看,经200 ℃、4 h油热处理后的竹材声学振动性能提高得更显著,油热处理是一种提高竹材声学振动效率的有效方法。

【参 考 文 献】

[1] 徐丹丹,李新林,邓伟芬,等.竹子基因资源和应用技术研究进展[J].竹子学报,2022,41(4):76-85.
XU D D, LI X L, DENG W F, et al. Research progress of gene resources and application technology in bamboo[J]. Journal of Bamboo Research, 2022, 41(4): 76-85.

[2] 徐华铛. Bamboo and musical instruments [J].竹子研究汇刊,2002,21(3):76-78.
XU H D. Bamboo and musical instruments[J]. Journal of Bamboo Research, 2002, 21(3): 76-78.

[3] 李丽敏.中国古代竹乐器探源[J].乐器,2014(7):41-43.
LI L M. Exploring the origin of ancient Chinese bamboo musical instruments[J]. Musical Instrument, 2014(7): 41-43.

[4] HAMDAN S, RAHMAN M R, ABIDIN A S Z, et al. Study on vibro-acoustic characteristics of bamboo-based angklung instrument[J]. BioResources, 2022, 17(1): 1670-1679.

[5] 刘高扬.大竹竹乐器音乐文化研究[J].四川戏剧,2013(5):108-109.
LIU G Y. Research on the music culture of bamboo instruments[J]. Sichuan Drama, 2013(5): 108-109.

[6] 连彩萍,钟婧玮,陈红,等.中国竹乐器及其文化内涵分析[J].家具,2022,43(2):73-78.
LIAN C P, ZHONG J W, CHEN H, et al. Chinese bamboo musical instrument and its cultural connotation[J]. Furniture, 2022, 43(2): 73-78.

[7] DENG L P, CHEN F M, REN X Y, et al. An environmentally friendly and efficient method to improve the acoustic vibration performance of bamboo for musical instruments: nitrogen-protected heat treatment[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 188: 1-11.

[8] 王艺达,郝骞,解彭博,等.不同气流速度对竹笛边棱振动声学频率的影响[J].东北林业大学学报,2023,51(8):113-120,126.
WANG Y D, HAO Q, XIE P B, et al. Effect of different air velocities on frequency of bamboo flute edges[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(8): 113-120, 126.

[9] 顾君怡.鼻腔激励方式管乐器的音响特性研究[D].南京:南京艺术学院,2022.
GU J Y. A study on the sound characteristics of wind instruments with nasal excitation method [D]. Nanjing: Nanjing University of the Arts, 2022.

[10] 邵瑞,王相见.竹材乐器的制作工艺及其在地区性音乐中的应用:以竹笛为例[J].竹子学报,2021,40(2):69-73.
SHAO R, WANG X J. The manufacturing technology of bamboo musical instrument and its application in regional music-a case study of bamboo flute[J]. Journal of Bamboo Research, 2021, 40(2): 69-73.

[11] 董友明,王娜,薛秋霞,等.竹材防霉研究现状及展望[J].林业工程学报,2023,8(6):24-32.
DONG Y M, WANG N, XUE Q X, et al. Research progress and prospects in anti-mildew performance of bamboo[J]. Journal of Forestry Engineering, 2023, 8(6): 24-32.

[12] 黄丽娜.当代竹笛制造的工艺流程及发展分析[J].轻工标准与质量,2019(4):105-106.

HUANG L N. Technological process and development analysis of contemporary bamboo flute manufacturing[J]. Standard & Quality of Light Industry, 2019(4): 105-106.

[13] 王思敏. 竹及竹地板与人造板的声学振动特性研究[D]. 南京:南京林业大学,2011.
WANG S M. Acoustic vibrational properties of bamboo, bamboo floor and wood-based panels[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.

[14] 霍鑫升,杨国超,张求慧. 热处理对竹材理化性能影响研究进展[J]. 包装工程,2023,44(5):24-33.
HUO X S, YANG G C, ZHANG Q H. Research progress of effects of heat treatment on physical and chemical properties of bamboo[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(5): 24-33.

[15] 曹钰. 高温油热处理对毛竹材性能影响的研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2019.
CAO Y. Study on the performance effect of high temperature oil heat treatment of moso bamboo[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2019.

[16] TANG T, CHEN X F, 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.

[17] 张建,袁少飞,王洪艳,等. 漂白和热处理对竹材化学组成及重组竹材理化性能的影响[J]. 竹子学报,2018,37(2):18-22.
ZHANG J, YUAN S F, WANG H Y, et al. Effects of bleaching and heat treatment on chemical composition of bamboo and physical-chemical properties of bamboo scrimber[J]. Journal of Bamboo Research, 2018, 37(2): 18-22.

[18] MENG F D, YU Y L, ZHANG Y M, et al. Surface chemical composition analysis of heat-treated bamboo[J]. Applied Surface Science, 2016, 371: 383-390.

[19] 李延军,王兆顺,娄志超,等. 饱和蒸汽热处理工艺对毛竹材理化性能及防霉性能的影响[J]. 林产工业,2022,59(9):13-18.
LI Y J, WANG Z S, LOU Z C, et al. Effects of saturated steam heat treatment on physical, chemical, and anti-mildew properties of moso bamboo[J]. China Forest Products Industry, 2022, 59(9): 13-18.

[20] 郭志豪,何文,袁欣怡,等. 高温热处理对毛竹防霉性能的影响[J]. 林业工程学报,2023,8(3):32-38.
GUO Z H, HE W, YUAN X Y, et al. Effect of high-temperature heat-treatment on the mould resistance of moso bamboo[J]. Journal of Forestry Engineering, 2023, 8(3): 32-38.

[21] 梁哨,潘昌仁,岑晓倩,等. 涂饰处理对毛竹和炭化毛竹表面视觉性质及防腐性能的影响[J]. 森林工程,2022,38(1):52-57.
LIANG S, PAN C R, CEN X Q, et al. Assessment of the color difference and decay resistance performance of moso bamboo and carbonized moso bamboo treatments with different painting[J]. Forest Engineering, 2022, 38(1): 52-57.

[22] YUAN Z R, WU X W, WANG X Z, et al. Effects of one-step hot oil treatment on the physical, mechanical, and surface properties of bamboo scrimber[J]. Molecules, 2020, 25(19): 4488.

[23] 曹倚中,吴妤婷,徐淑伟,等. 组坯结构对竹材胶合界面破坏行为及细胞壁力学性能的影响[J]. 林业工程学报,2023,8(3):39-45.
CAO Y Z, WU Y T, XU S W, et al. Effects of the assembly structures on the failure behaviors and mechanical performance of bamboo-phenol-formaldehyde adhesive interphase[J]. Journal of Forestry Engineering, 2023, 8(3): 39-45.

[24] 盛叶,黄庚浪,叶小凡,等. 重组竹抗拉力学性能分析[J]. 林业工程学报,2023,8(1):46-52.
SHENG Y, HUANG G L, YE X F, et al. Analysis on mechanical properties of bamboo scrimber under tension stress[J]. Journal of Forestry Engineering, 2023, 8(1): 46-52.

[25] YU H X, HE S L, ZHANG W F, et al. Discoloration and degradation of bamboo under ultraviolet radiation[J]. International Journal of Polymer Science, 2021, 2021: 6803100.

[26] YU H X, PAN X, WANG Z, et al. Effects of heat treatments on photoaging properties of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel)[J]. Wood Science and Technology, 2018, 52(6): 1671-1683.

[27] 娄志超,杨林添,张爱文,等. 饱和蒸汽热处理对竹材颜色的影响[J]. 林业工程学报,2020,5(4):38-44.
LOU Z C, YANG L T, ZHANG A W, et al. Influence of saturated steam heat treatment on the bamboo color[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(4): 38-44.

[28] 国家技术监督局. 竹材物理力学性质试验方法:GB/T 15780—1995[S]. 北京:中国标准出版社,1996.
State Bureau of Quality and Technical Supervision. Testing methods for physical and mechanical properties of bamboos: GB/T 15780-1995[S]. Beijing: Standards Press of China, 1996.

[29] CHEN S M, ZHANG S C, GAO H L, et al. Mechanically robust bamboo node and its hierarchically fibrous struc-

tural design[J]. National Science Review, 2023, 10(2): nwac195.

[30] HAN S Y, LI X P, YE H Z, et al. Three-dimensional visualization structural characteristics and performance of discontinuous coarse fiber bamboo nodes[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 8181-8191.

[31] 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.
SHEN J, LIU Y X, LIU M. Variance coefficient of latewood percentage to sound vibration parameters of *Picea* Genera wood[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2005, 25(3): 225-228.

[32] 郝骞,王艺达,葛颖,等.桦木单板-金属铜网复合材料声学振动性能研究[J].北京林业大学学报,2023,45(1):148-158.
HAO Q, WANG Y D, GE Y, et al. Acoustic vibration performance of birch veneer-metal copper mesh composites[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(1): 148-158.

[33] 江泽慧,邓丽萍,宋荣臻,等.木竹材声学振动特性研究进展[J].世界林业研究,2021,34(2):1-7.
JIANG Z H, DENG L P, SONG R Z, et al. Research progress on the acoustic vibration performance of wood and bamboo[J]. World Forestry Research, 2021, 34(2): 1-7.

[34] 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.
ZHU L J. Improvement and mechanism of acoustic-vibration performance of wood by several physical treatments[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.

[35] 余立琴.热处理对竹材线性干缩率的影响[J].林业机械与木工设备,2013,41(7):32-33,37.
YU L Q. Effect of heat treatment on linear dry shrinkage rate of bamboo[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2013, 41(7): 32-33, 37.

[36] 王汉华.乐器竹材改性方法:CN1557613A[P].2004-12-29.
WANG H H. Method for modifying bamboo wood used for musical instrument: CN1557613A[P]. 2004-12-29.

(上接第114页)

[37] 高慈元.松树蜂和新渡户树蜂相关信息化学物质及林间诱捕技术研究[D].北京:北京林业大学,2020.
GAO C Y. Study on theassociated semiochemicals and trapping techniquesin forest of *Sirex noctilio* Fabricius and S Nitobei[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[38] 伍苏然,周平阳,李正跃,等.云南松健康松与衰弱松针叶挥发物化学成分比较[J].天然产物研究与开发,2010,22(6):1048-1052.
WU S R, ZHOU P Y, LI Z Y, et al. Analysis the volatile constituents of pine needles from health and debility *Pinus yunnanensis*[J]. Natural Product Research and Development, 2010, 22(6): 1048-1052.

[39] 刘敏.影响红脂大小蠹寄主树种选择行为关键因子的研究[D].北京:北京林业大学,2020.
LIU M. Study on key factors affecting host tree species selection behavior of *Dendroctonus valens*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[40] 伍苏然,张淑颖,熊国如,等.不同生理状态云南松木段挥发物化学成分比较[J].东北林业大学学报,2012,40(10):115-119,147.
WU S R, ZHANG S Y, XIONG G R, et al. Analysis of volatile constituents in pine logs from *Pinus yunnanensis* under different physiological states[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(10): 115-119, 147.

[41] 王茹琳,杨伟,杨佐忠,等.华山松大小蠹对几种寄主挥发物组分的EAG和行为反应[J].生态学杂志,2011,30(4):724-729.
WANG R L, YANG W, YANG Z Z, et al. Electroantennographic and behavioral responses of *Dendroctonus armandi* (Coleoptera: Ipidae) to host plant volatiles[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(4): 724-729.

[42] 闫争亮,方宇凌,孙江华,等.红脂大小蠹后肠挥发性物质的鉴定、触角电位和室内趋向实验[J].昆虫学报,2004,47(6):695-700.
YAN Z L, FANG Y L, SUN J H, et al. Identification and electroantennal olfactory and behavioral tests of hindgut-produced volatiles of the red turpentine beetle, *Dendroctonus valens* LeConte (Coleoptera: Scolytidae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2004, 47(6): 695-700.