

应力波在树木不同角度纵截面的传播速度模型

张春晓^{1,2}, 冯海林^{1,2}, 李光辉^{1,2}, 王燕凤^{1,2}, 杜晓晨^{1,2}

(1. 浙江农林大学 信息工程学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室, 浙江 临安 311300)

摘要: 研究应力波在立木内部纵截面上的传播规律及影响因素, 建立传播速度模型。以浙江农林大学植物园内 4 个树种共计 40 株树木作为实验样本, 采用 ArborSonic 3D 应力波成像系统测量应力波在不同角度纵截面上各点间的传播速度。结果表明: 同一截面上任意 2 点间的传播速度随方向角的增大而增大; 不同纵截面上任意 2 点间的传播速度与所在纵截面与径切面的夹角相关。对健康样本试验数据的拟合结果为 $v(\theta, \alpha)/v_0 \approx kx^2 + 1$ ($0 \leq k \leq 1$), k 值取决于被测树木的物理力学参数; 所有建立的回归模型决定系数 R^2 均大于 0.93, 表明具有较高的拟合优度。不同树种应力波速度各不相同。纵截面上应力波传播规律与方向角 θ 和 α 相关, θ 决定速度大小, α 决定速度变化, 即决定拟合方程二次项系数 k 的大小。健康树木纵截面上 θ , α 和 $v(\theta, \alpha)/v_0$ 满足如下关系: $f(\theta, \alpha) = 1 + [v_l - (-0.2\alpha^2 + 1)v_R]/v_l \cdot \theta^2$ 。对不同树种的检测结果均表明了该模型的有效性, 在木材无损检测方向具有重要实际应用价值。图 5 表 5 参 17

关键词: 木材科学与技术; 应力波; 纵截面; 传播速度; 无损检测

中图分类号: S781.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2017)05-0926-08

Stress wave propagation velocity model for different angles in a longitudinal section of standing trees

ZHANG Chunxiao^{1,2}, FENG Hailin^{1,2}, LI Guanghui^{1,2}, WANG Yanfeng^{1,2}, DU Xiaochen^{1,2}

(1. School of Information Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Intelligent Monitoring in Forestry and Information Technology, Zhejiang A & F University Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To establish a propagation velocity model of stress wave in longitudinal section, standing trees of different species were selected as samples to study their stress wave velocity pattern for different angles in the longitudinal section of wood. Using a theoretical analysis, the velocity model of stress waves in the longitudinal section of wood was built. Then within the Zhejiang A & F University Botanical Gardens, a total of 40 test samples from four species of trees was selected. The experimental ArborSonic 3D stress wave imaging system was used with a comparative analysis of the results to determine the stress wave propagation velocity. Analysis of the model included fitting an equation to a healthy sample and a regression analysis. Results showed that the propagation velocity between any two points in the same section increases with increasing direction angle. And the propagation velocity between any two points in different longitudinal sections is related to the angle between the longitudinal section and the diameter section. Healthy sample test data were fitted to: $v(\theta, \alpha)/v_0 \approx kx^2 + 1$ ($0 \leq k \leq 1$) where k was dependent on the size of angle α between the longitudinal section and the radial section of the tree under test. In the established regression model the $R^2 > 0.93$ indicated that the model had a

收稿日期: 2016-09-20; 修回日期: 2016-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61272313, 61302185, 61472368); 浙江省自然科学基金资助项目(LY15F020034); 浙江省新苗人才计划项目(2015R412048)

作者简介: 张春晓, 从事木材无损检测技术研究。E-mail: 15385891127@189.cn。通信作者: 冯海林, 教授, 博士, 从事智能信息处理、大数据、物联网等研究。E-mail: sealinfeng@126.com

high goodness of fit. For different species, due to different internal characteristics, stress wave velocities also differed. The propagation law of stress wave in longitudinal section is related to the direction angle θ and α . θ determines the velocity, and α determines the velocity change, which means the size of the quadratic coefficient k of the fitting equation. For the longitudinal section of healthy trees, θ and α and $v(\theta, \alpha)/v_0$ satisfied the geometric relationships: $f(\theta, \alpha) = 1 + \{[v_l - (-0.2\alpha^2 + 1)v_r] / v_l\} \cdot \theta^2$. Overall, detection results of different species showed the validity of the model which could have important practical applications for nondestructive testing of wood. [Ch, 5 fig. 5 tab. 17 ref.]

Key words: wood science and technology; stress wave; a longitudinal section; propagation velocity; non-destructive testing

应用于木材检测领域的无损检测方法多达十几种, 在立木材质和内部缺陷辨识过程中应用较为广泛的方法是应力波检测^[1-3]。随着森林资源的日益减少和需求量的日益增加, 木材无损检测技术的发展对木材的保护显得尤为重要。国内外的相关研究主要集中在应力波横向二维传播规律领域^[4-6], ROSS 等^[7]认为木材的弹性模量 E 与应力波速度 v 和木质材料密度 ρ 有关, 并可通过测量应力波传播速度来确定木质材料的弹性模量。在对应力波的木材缺陷二维成像技术^[8]研究中, 学者们发现应力波可以有效检测样本内部缺陷状况^[9-10]。应力波在木材内部的传播速度易受外界因素影响, 徐华东等^[11-12]提出红松 *Pinus koraiensis* 木材中应力波传播速度随含水率增加或温度升高呈逐渐下降趋势。为提高应力波技术在木材无损检测应用领域的可行性, 刘光林等^[13]分析了应力波在健康树木中的传播规律, 并建立了应力波传播速度数学模型, 发现在健康树木中, 方向角 θ 与传播方向速度 v_T 和径向速度 v_R 比值之间的关系为 $v_T/v_R = -0.2\theta^2 + 1$, 与冯海林等^[14]提出的理论模型吻合; 方向角 θ 与应力波传播速度 v 之间的线性回归模型拟合度较高, 决定系数高于 0.95, 从而认为应力波传播速度模型不受树种变化影响。随着应力波无损检测技术的不断发展和成像系统的不断完善, 该模型还被应用到云杉 *Picea aspoerata* 等缺陷材的监测上^[15]。目前, 应力波在木材无损检测领域内的应用大多集中在树木横截面上的传播规律的研究上^[16], 在树木纵向上的传播规律还有待研究。本研究以应力波在树木不同角度纵截面上的传播规律为切入点, 建立理论模型, 通过对不同角度纵截面上应力波传播规律、不同树种纵截面上传播速度模型验证、应力波传播模型影响因素的研究、有缺陷活立木纵截面上的应力波传播速度模型等 4 个方面对应力波在纵截面上的传播做出相关分析, 以期为高精度的三维成像技术提供新的理论依据。

1 应力波在树木纵截面上的传播理论分析及理论速度模型

木材具有中空的细胞组成的蜂窝状结构, 而细胞壁的主体是厚度最大的次生壁中层, 其中微细纤维紧密靠拢, 与纵轴呈 $10^\circ \sim 30^\circ$ 的交角, 这是木材各向异性的原因。大量试验和研究表明, 木材的这种各向异性可以简化为正交各向异性, 即在 3 个相互垂直的材料主轴, 横纹径向、横纹切向和顺纹纵向, 分别具有不同的物理力学性质。木材的这种材料性质对其破坏特征具有显著的影响。

在实际应用中, 木材的受力方向可能与木材天然形成的木纹方向不同, 此时需要考虑木材斜纹的承受能力。1921 年, HANKINSON 在大量试验结果的基础上总结出了木材斜纹抗压强度公式, 即 HANKINSON 公式:

$$f_{c\theta} = f_{c0} \cdot f_{c90} / (f_{c0} \cdot \sin^2\theta + f_{c90} \cdot \cos^2\theta) \quad (1)$$

式(1)中: θ 为作用力方向与木纹方向的夹角; $f_{c\theta}$ 为木材斜纹抗压强度; f_{c0} 为木材顺纹抗压强度; f_{c90} 为木材横纹抗压强度。从 HANKINSON 公式可以推导出应力波传播速度, 若传播方向与木材纹理方向所成角度为 θ , 则有:

$$v(\theta) = v_l \cdot v_r / (v_l \cdot \sin^2\theta + v_r \cdot \cos^2\theta) \quad (2)$$

式(2)中: v_l 表示顺木材纹理方向的应力波速度, v_r 表示木材横纹方向的应力波速度。公式(2)可转变为:

$$v(\theta)/v_r = v_l / (v_l \cdot \sin^2\theta + v_r \cdot \cos^2\theta) \quad (3)$$

令 $y = v(\theta)/v_r$, 若 $\theta = 90^\circ$, 则有 $y = v_l/v_r$; 若 $\theta = 0^\circ$, 则有 $y = 1$ 。在 $\theta = 0^\circ$ 处用二阶泰勒展开公式(3)得到:

$$y \approx 1 + [(v_l - v_r)/v_l] \cdot \theta^2. \quad (4)$$

DIKRALLAH 等通过导波实验分析了湿材的声学各向异性, 研究了应力波与纵截面夹角之间的数学关系, 得到应力波速度 v 与纵截面夹角 α 之间的数学关系。方程如下:

$$v(\alpha) = v_r \cdot \cos^2 \alpha \sqrt{[1 + E_T/E_R \cdot \tan^4 \alpha + 2 \cdot G_{RT}/E_R \cdot \tan^2 \alpha]}. \quad (5)$$

式(5)中: $v(\alpha)$, v_r , E_R , E_T , G_{RT} 分别代表纵截面夹角为 α 的传播速度、径向速度、径向弹性模量、切向弹性模量、剪切模量。令 $f(\alpha) = v(\alpha)/v_r$, 可得:

$$f(\alpha) = \cos^2 \alpha \sqrt{g(\alpha)}. \quad (6)$$

式(6)中: $g(\alpha) = \sqrt{[1 + E_T/E_R \cdot \tan^4 \alpha + 2 \cdot G_{RT}/E_R \cdot \tan^2 \alpha]}$; 由式(6)可知: $f(0) = 1$, $f'(0) = 0$, $f''(0) = -2(1 - G_{RT}/E_R)$ 。当 $\theta = 0$ 时, 通过麦克劳林公式将方程展开为一个关于多项式和一个余项的和, 化简得到如下方程:

$$v(\alpha)/v_r = f(\alpha) \approx -(1 - G_{RT}/E_R)\alpha^2 + 1, \quad (0 < G_{RT}/E_R < 1). \quad (7)$$

由式(7)可知: 在横截面近似为理想圆的情况下, $v(\alpha)/v_r$ 与 α 间的曲线近似为二次抛物线, 且关于 $\alpha = 0$ 对称。而在计算应力波在纵截面上传播的速度时应考虑方向角和纵截面夹角大小, 将木材任意 2 点间的应力波传播速度定义为方向角 θ 和纵截面夹角 α , 所测树木的纵向传播速度 v_l , 径向应力波传播速度 v_r 。由式(2)和式(6)可得出: $v(\theta, \alpha) = v_l \cdot v_r / (v_l \cdot \sin^2 \theta + v_r \cdot \cos^2 \theta) = v_l \cdot v_r (-0.2\alpha^2 + 1) / [v_l \cdot \sin^2 \theta + v_r (-0.2\alpha^2 + 1) \cdot \cos^2 \theta]$, 令 $f(\theta, \alpha) = v(\theta, \alpha)/v_r$, 即:

$$f(\theta, \alpha) = 1 + [(v_l - v_r)(-0.2\alpha^2 + 1)] / v_l \cdot \theta^2. \quad (8)$$

理论分析表明, 在纵截面夹角 α 固定的情况下, 沿方向角 θ 的应力波速度和径向速度比值近似为一条二次曲线, 我们把式(8)作为健康树木中应力波在纵截面上的传播理论模型, 将方向角 θ 定义为 x , $k = [(v_l - v_r)(-0.2\alpha^2 + 1)] / v_l$, 则可将式(8)转化为 $y = 1 + kx^2$ 。从中可知: 应力波在纵截面上的传播速度曲线图呈二次曲线型, α 的大小决定着 k 的大小, 即决定着二次曲线开口大小, 增长速率的快慢。

2 材料与方法

2.1 材料与设备

选取浙江农林大学植物园樟树 *Cinnamomum camphora*, 白杨 *Populus alba*, 鹅掌楸 *Liriodendron chinensis*, 雪松 *Cedrus deodara* 等 4 个树种为测试样本。实验分为 2 个部分: 一是针对正常活立木检测应力波在其内部的传播规律; 二是通过比较雪松健康部位与缺陷部位之间的应力波传播速度差异, 得出缺陷木材中应力波传播方式的变化。实验选用 ArborSonic 3D 木材无损检测仪(匈牙利 Fakopp 公司), 该仪器包含 12 个传感器及主机和成像软件, 能够测量各个传感器间的应力波传播时间及速度, 并生成 2D 断层图像和检测报告。

2.2 实验方法及内容

选取健康活立木样本和带有缺陷的样本共 40 株, 皮卷尺、卡尺测得立木样本的胸径、直径, 将传感器布置在立木纵截面两侧(图 1A), 6 个·侧⁻¹, 同侧传感器间距 10 cm·个⁻¹。测试时按 1~12 号传感器顺序敲击, 4 次·个⁻¹。同个截面测量 3 次取平均值。换至不同角度的纵截面重复上述进行测量。立木所

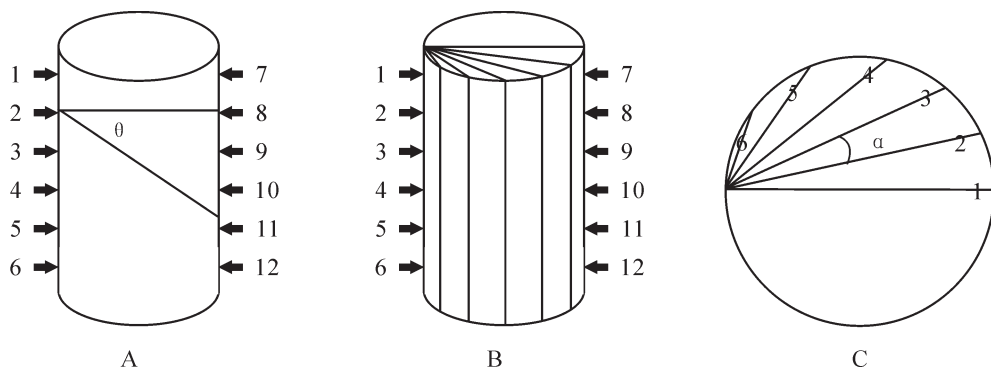


图 1 待测样本纵截面及传感器分布示意

Figure 1 Cross-section and the number of test samples

测纵截面间的夹角为 $15^{\circ}\cdot\text{个}^{-1}$ ，共测得纵截面数量 $6\text{个}\cdot\text{样本}^{-1}$ (图 1B，图 1C)。ArborSonic 3D 木材无损检测仪获取传播速度、时间等数据并传送至电脑端。

为进一步了解纵截面应力波传播规律，分析不同的方向角和纵截面夹角对应力波传播速度的影响，将敲击传感器产生应力波的敲击方向与传播速度方向之间的夹角称为方向角 θ (图 1A)，所测纵截面与径切面的夹角称为截面夹角 α ；取所选树种不同尺寸的样本各 3 株，分析传播速度模型在不同树种上的变化；分析敲击力度，测量时的起始高度，木材本身缺陷等客观影响因素对实验的影响。选取人工凿的缺陷雪松，缺陷大小为长度 10 cm 的正方形缺口，检测应力波经过缺陷和不经缺陷时的传播速度。如图 2 所示，测量 4 个不同纵截面，其中 2 个经过缺陷(图 2A，图 2B)，2 个不经过缺陷(图 2C，图 2D)。

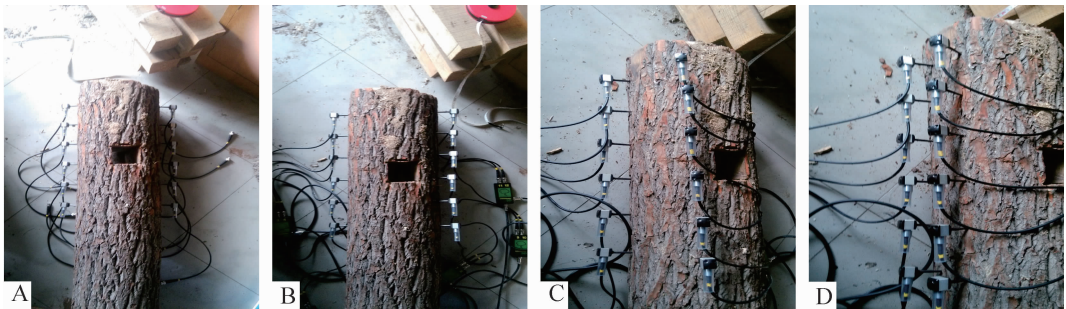


图 2 含缺陷雪松在不同纵截面上应力波传播速度检测
Figure 2 *Cedrus deodara* containing defects detected stress wave propagation velocity at different longitudinal cross sections

3 结果与分析

3.1 纵截面上应力波传播速度变化

分析所测健康活立木样本的应力波传播速度数据，得到应力波传播速度散点图并进行曲线拟合，由图 3 可知：在不同纵截面上(以 α 为 15° 为例)应力波传播速度随着方向角 θ 的增大而增大，水平方向上传播速度最小。

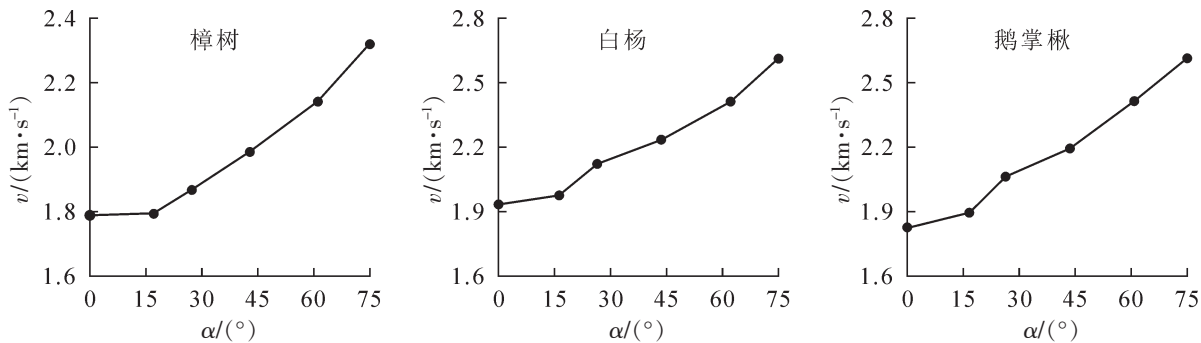


图 3 不同树种试样纵截面的应力波传播速度变化趋势
Figure 3 Stress wave propagation velocity trend longitudinal section of different trees

为了更加直观地观测到纵截面上应力波传播模型，使速度模型更具有代表性，表 1 给出了相对应的拟合方程。其中令 $y=v_{(\theta,\alpha)}/v_0$ ， v_{θ} 表示方向角速度， v_0 表示水平方向应力波速度， x 表示方向角 θ ，得出一条一次项系数为 0 的二次曲线，回归分析中决定系数 R^2 均在 0.93 以上，拟合度较高。从拟合结果来看，在纵截面上应力波传播速度与方向角 θ 和截面夹角 α 具有较强的相关性，随着 θ 的增大，速度随之变大。通过图 3 和表 1 可以看出，在不同纵截面上随着 θ 的增大，速度随之增大。而随着 α 的增大，木材内部应力波传播速度增长加快。随着方向角 θ 的增大，应力波速度会呈二次曲线式增长， α 的增大会使增长的二次曲线增长率增加。 θ 和 α 的变化与前文提出的理论传播模型具有较强一致性。

通过分析可以知道应力波在木材纵截面上的传播速度大于在横向上的传播速度，这是由木材内部各向异性所导致，纵截面上的传播是顺着木材纹理方向，传播速度较快。不同角度纵截面上的应力波传播

表 1 健康树木径向纵截面上 $v(\theta, \alpha)/v_0$ 与 θ 的回归模型

Table 1 The regression model between $v(\theta, \alpha)/v_0$ and θ in healthy tree radial longitudinal section

树种	拟合方程	R^2
樟树	$y=0.253x^2+0.987$	0.935
白杨	$y=0.256x^2+1.013$	0.941
鹅掌楸	$y=0.381x^2+0.986$	0.932

速度随着 α 的增大会使传播速进一步增大。这是由于随着 α 的增大，所测量的纵截面越来越靠近木材表层，所受木材内部各向异性的影响逐渐减小造成。

3.2 不同树种纵截面上传播速度模型验证

同一纵截面上任意 2 点间的传播速度随着方向角度的变化而变化，同一纵截面上速度随着方向角的增大而增大；在不同纵截面上，随着截面夹角 α 的增大应力波传播速度的增长率加大，即在方向角 θ 不变的情况下， α 的增大速度随之增大；相同树种胸径较大则应力波在纵截面上传播的速度将更快。而在不同角度的纵截面上，由于内部的各向异性，应力波速度也各不相同。随着截面夹角 α 的变化 k 值的大小也随之改变，由 $k=[v_l-v_r(-0.2\alpha^2+1)]/v_l$ 得出理论 k 值。表 2 为樟树不同角度纵截面上应力波传播速度回归方程。

表 2 樟树不同角度纵截面上的回归方程

Table 2 Each longitudinal cross-section regression model of *Cinnamomum camphora*

不同纵截面角度/ $^\circ$	拟合方程	理论 k 值	R^2
0	$y=0.253x^2+0.987$	0.29	0.935
15	$y=0.431x^2+0.988$	0.41	0.934
30	$y=0.493x^2+0.983$	0.47	0.958
45	$y=0.592x^2+0.969$	0.53	0.946
60	$y=0.597x^2+0.958$	0.56	0.938
75	$y=0.582x^2+1.012$	0.57	0.949

由表 2 可知：拟合曲线满足一元二次方程。为使结论更具普遍性，增加鹅掌楸、白杨实验样本数据，采用与樟树样本相同的数据处理方式，得到不同树种在不同角度纵截面上的拟合方程，如表 3 所示。结果表明：该模型具有很好的拟合优度，且对不同树种都适用，能够很好地反映应力波在不同角度纵截面上的传播规律；对于所检测健康树种，应力波在不同角度纵截面上的传播回归模型与本研究建立的理论模型(8)非常吻合。上述实验和数据分析同时说明，应力波在不同树种上传播时，木材密度越大，则传播速度越大；相同树种的不同纵截面，随着纵截面角度 α 的不断增大，其速度的增长率也逐渐增大。推测原因是应力波作为一种声波，在质地坚硬密度大的树种内传播速度较快；相同树种中随着 α 的增大，应力波在木材内部的传播逐渐从髓心转向木质部，而其速度发生明显变化，即木质部内的应力波传播速度大于髓心的传播速度。

表 3 不同树种在各个纵截面上的回归方程

Table 3 Regression models of different species on each longitudinal section

树种	截面角度/ $^\circ$	拟合方程	理论 k 值	R^2
樟树	0	$y=0.253x^2+0.987$	0.24	0.935
	15	$y=0.431x^2+0.988$	0.43	0.934
	30	$y=0.493x^2+0.983$	0.48	0.958
鹅掌楸	0	$y=0.381x^2+0.986$	0.37	0.932
	15	$y=0.446x^2+0.989$	0.44	0.932
	30	$y=0.521x^2+1.014$	0.52	0.936
白杨	0	$y=0.256x^2+1.013$	0.25	0.941
	15	$y=0.389x^2+0.946$	0.38	0.933
	30	$y=0.513x^2+0.976$	0.50	0.945

3.3 应力波传播模型影响因素研究

选取与径切面夹角为 15°的一个纵截面，在传感器布置位置不变的情况下，邀请 6 位实验人员，分别编号为 1~6 号，每人采用其常用的敲击力度完成测试。由于实测时每个人的力度均不同，所以以此来探究敲击力度对本研究建立的传播速度模型的影响。6 组数据采集完成后，拟合方程如表 4 所示。

表 4 不同敲击力度下 $v(\theta, \alpha)/v_r$ 与 θ, α 的关系
Table 4 Relationship between $v(\theta, \alpha)/v_r$ and θ, α under different forces

实验次数	拟合方程	理论 k 值	R^2
1	$y=0.438x^2+0.993$	0.44	0.932
2	$y=0.463x^2+0.992$	0.45	0.927
3	$y=0.427x^2+0.989$	0.43	0.928
4	$y=0.412x^2+0.976$	0.41	0.932
5	$y=0.445x^2+0.996$	0.44	0.939
6	$y=0.436x^2+0.988$	0.43	0.938

由 6 次测试结果可以看出：拟合曲线整体趋势为一条开口向上的抛物线，符合本研究提出的传播速度模型； k 值相差不大，也可以说明在一般情况下敲击力度大小对所提出模型的影响不大。

为测量在不同起始高度下应力波在木材内部传播速度的变化。实验选取离地 80 cm，100 cm，120 cm 处为起始位置，按照之前的测试方法进行实验，记录数据。完成采集后对应不同离地高度的数据进行拟合，得到拟合方程如表 5 所示。

表 5 不同起始高度情况下 $v(\theta, \alpha)/v_r$ 与 θ, α 间的关系
Table 5 Relationship between $v(\theta, \alpha)/v_r$ and θ, α at different heights

树种	离地高度/cm	拟合方程	理论 k 值	R^2
樟树	80	$y=0.354x^2+1.027$	0.36	0.934
	100	$y=0.356x^2+1.022$	0.36	0.951
	120	$y=0.366x^2+1.033$	0.36	0.946
鹅掌楸	80	$y=0.442x^2+1.011$	0.44	0.977
	100	$y=0.436x^2+0.993$	0.44	0.974
	120	$y=0.454x^2+0.989$	0.45	0.943
白杨	80	$y=0.381x^2+1.016$	0.38	0.931
	100	$y=0.376x^2+0.994$	0.38	0.962
	120	$y=0.386x^2+0.975$	0.39	0.938

由表 5 可知：3 个不同样本在不同起始高度下的曲线均符合所提出的模型，并且 k 值大致相同。相同树种内部，不同的起始高度对理论模型的影响不大；这是由于在木材内部不同高度上的结构大致相同，应力波在其内部传播速度也大致相同。同时应力波作为振动波，不同力度所产生的振动效果是一致的，因此在合理的力度范围内其传播速度变化较小。

3.4 树木内部缺陷对传播速度模型的影响

对缺陷木材中应力波的传播分析可知，在不同夹角的纵截面上，经过缺陷位置的应力波传播速度明显低于正常数值；推测原因是应力波经过缺陷位置时会绕过缺陷传播，传播时间变长，相应的传播速度会变小。图 4 为应力波经过缺陷时，3D 木材无损检测仪精确定位到的缺陷位置及大小。

通过判断是否符合前文所建传播模型可以确定树木内部是否含有缺陷。对 15°纵截面和 30°纵截面上的应力波传播数据进行拟合，得到拟合曲线(图 5)。从图 5 可知：当应力波经过 3~9，3~10 传感器时，其速度拟合曲线明显下降，波速比先前所测树种的拟合曲线降低 15%以上，可判断该路径经过缺陷区域。这与王立海等^[17]认为的在树木横截面上测得某条传播路径上应力波传播时间大于其参考值 10% 时，可视为缺陷的观点一致。

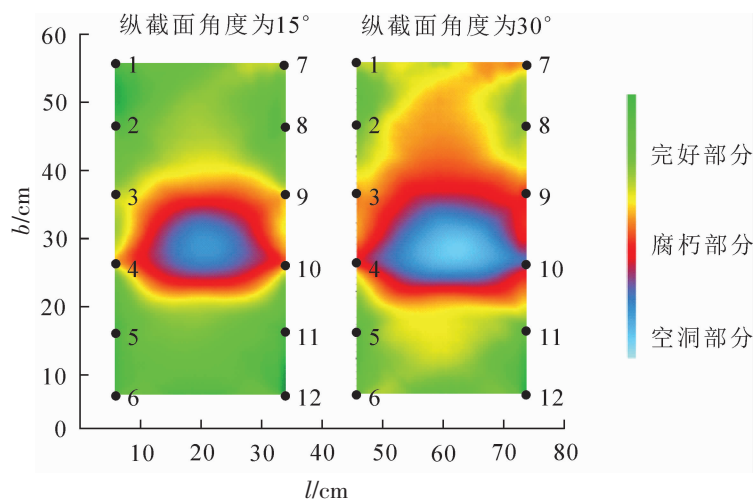


图 4 含缺陷雪松在不同纵截面上的应力波二维呈像图

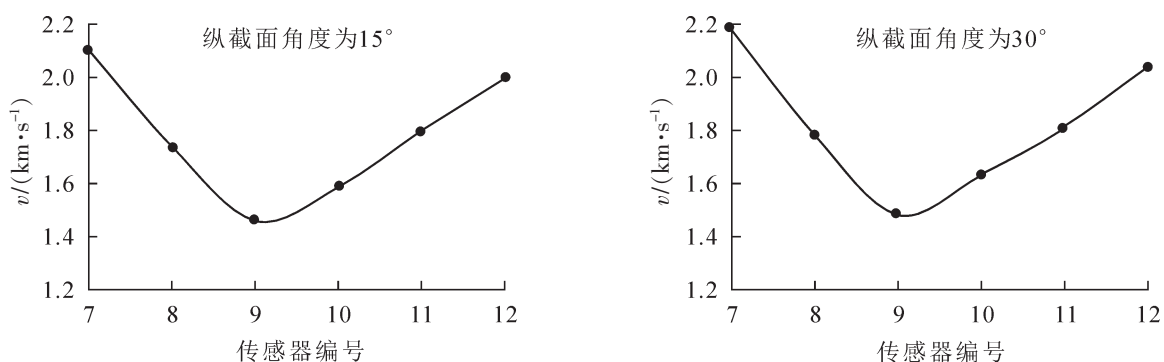
Figure 4 *Cedrus deodara* dimensional stress wave with defects in different longitudinal section showing diagram

图 5 不同纵截面上的应力波速度拟合曲线

Figure 5 Stress wave velocity different longitudinal section of the fitting curve

4 参考文献

- [1] 徐华东, 徐国祺, 王立海, 等. 原木横截面应力波传播时间等值线绘制及影响因素分析[J]. 林业科学, 2014, **50**(4): 95 – 100.
XU Huadong, XU Guoqi, WANG Lihai, *et al.* Construction of stress wave time isolines on log cross section and analysis of its effect factors [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **50**(4): 95 – 100.
- [2] 戚大伟. 木材无损检测图像处理系统的研究[J]. 林业科学, 2001, **37**(6): 92 – 96.
QI Dawei. A study on image processing system of non-destructive log dection [J]. *Sci Silv Sin*, 2001, **37**(6): 92 – 96.
- [3] WANG Xiping, DIVOS F, PILON C, *et al.* *Assessment of Decay in Ctanding Timber Using Stress Wave Timing Non-destructive Evaluation Tools: A Guide for Use and Interpretation* [R]. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboralory, 2004.
- [4] 梁善庆, 蔡智勇, 王喜平, 等. 北美木材无损检测技术的研究与应用[J]. 木材工业, 2008, **22**(3): 5 – 8.
LIANG Shanqing, CAI Zhiyong, WANG Xiping, *et al.* Developments and applications of nondestructive tests for wood in North America [J]. *Chin Wood Ind*, 2008, **22**(3): 5 – 8.
- [5] 张厚江, 王喜平, 苏娟, 等. 应力波在美国红松立木中传播机理的试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, **32**(2): 145 – 148.
ZHANG Houjiang, WANG Xiping, SU Juan, *et al.* Investigation of stress wave propagation mechanism in American red pine trees [J]. *J Beijing For Univ*, 2010, **32**(2): 145 – 148.
- [6] WANG Xiping, ROSS R J, McCLELLAN M, *et al.* Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method [J]. *Wood Fiber Sci J Soc Wood Sci Technol*, 2001, **33**(4): 522 – 533.
- [7] ROSS R J, ZERBE J I, WANG Xijing, *et al.* Stress wave nondestructive evaluation of Douglas-fir peeler cores [J].

- For Prod J*, 2005, **55**(3): 90 – 94.
- [8] 安源. 基于应力波的木材缺陷二维成像技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
AN Yuan. *Two-dimensional Imaging Technique of Wood Defects Based on Stress Wave* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [9] 杨学春, 王立海. 应力波在原木中传播理论的研究[J]. 林业科学, 2005, **41**(5): 132 – 138.
YANG Xuechun, WANG Lihai. Study on the propagation theories of stress wave in log [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41**(5): 132 – 138.
- [10] 梁善庆. 古树名木应力波断层成像诊断与评价技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
LIANG Shanqing. *Study on Diagnosis and Assessment Technology of Stress Wave Tomography in Old and Famous Trees* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2008.
- [11] 徐华东, 王立海. 温度和含水率对红松木材中应力波传播速度的影响[J]. 林业科学, 2011, **47**(9): 123 – 128.
XU Huadong, WANG Lihai. Effects of moisture content and temperature on propagation velocity of stress waves in Korean pine wood [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **47**(9): 123 – 128.
- [12] 王立海, 徐华东, 闫在兴, 等. 传感器的数量与分布对应应力波检测原木缺陷效果的影响[J]. 林业科学, 2008, **44**(5): 115 – 121.
WANG Lihai, XU Huadong, YAN Zaixing, *et al.* Effects of sensor quantity and planar distribution on testing results of log defects based on stress wave [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44**(5): 115 – 121.
- [13] 刘光林, 李光辉, 孙晔, 等. 树木内部应力波传播速度模型[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(1): 18 – 24.
LIU Guanglin, LI Guanghui, SUN Ye, *et al.* A stress wave propagation velocity model of standing trees [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2015, **32**(1): 18 – 24.
- [14] 冯海林, 李光辉, 方益明, 等. 应力波传播模型及其在木材检测中的应用[J]. 系统仿真学报, 2010, **22**(6): 1490 – 1493.
FENG Hailin, LI Guanghui, Fang Yiming, *et al.* Stress wave propagation modeling and application in wood testing [J]. *J Syst Simul*, 2010, **22**(6): 1490 – 1493.
- [15] 陈勇平, 刘秀英, 李华, 等. 不同数量传感器下云杉模拟缺陷材应力波成像规律探讨[J]. 林业科学, 2012, **48**(4): 97 – 107.
CHEN Yongping, LIU Xiuying, LI Hua, *et al.* Research on stress wave tomography of spruce logs with artificial defects under different number sensors [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48**(4): 97 – 107.
- [16] 王立海, 王洋, 徐华东. 弦向角对应应力波在原木横截面传播速度的影响[J]. 林业科学, 2011, **47**(8): 139 – 142.
WANG Lihai, WANG Yang, XU Huadong. Effects of tangential angles on stress wave propagation velocities in log's cross sections [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(8): 139 – 142.
- [17] 王立海, 杨学春, 徐凯宏. 木材无损检测技术的研究现状与进展[J]. 森林工程, 2001, **17**(6): 1 – 3.
WANG LiHai, YANG Xuechun, XU Kaihong. Current situations and research development of non-destructive testing for wood properties [J]. *For Eng*, 2001, **17**(6): 1 – 3.