

古建用落叶松木材物理力学性能预测及其影响因素

袁霄^{1,2}, 钟慧娴^{1,2}, 钟永², 陈勇平^{1,2*}

(1. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要:为实现对木结构古建筑的预防性保护,有必要对木构件的材质性能进行及时有效的预测和评价。采取小试样-缩尺-足尺递进的方式,将微钻阻抗仪和应力波检测等无损检测方法与实验室物理力学性能测试相结合,构建并检验了落叶松木材物理力学性能与微钻阻抗值和波阻模量关系预测模型,进而提出了古建用落叶松木材物理力学性能的现场无损检测分析方法。研究表明:落叶松小试件密度与微钻阻抗值呈现明显的线性正相关关系,木材密度与微钻阻抗值线性方程相关系数为0.91;落叶松小试样顺纹抗压强度、抗弯强度及抗弯弹性模量与波阻模量呈现较明显的线性正相关关系,木材顺纹抗压强度、抗弯强度、抗弯弹性模量与波阻模量线性方程相关系数分别为0.86, 0.74, 0.74;通过微钻阻抗仪和应力波检测可推算落叶松木材物理力学性能。利用小试件测试数据所建立的预测方程进行落叶松大试件物理力学性能推算存在一定的误差,其缩尺试件密度和顺纹抗压强度预测值与实际值平均偏差分别为12%和16%,足尺试件密度和顺纹抗压强度预测值与实际值平均偏差分别为16%和17%。现场预测应同时考虑测试路径因素,自心材至边材区域,落叶松木材密度、顺纹抗压强度、微钻阻抗值沿径向表现为增大趋势,外层微钻阻抗值比整体平均微钻阻抗值大4%~16%。在古建筑木构件强度检测评估中,应进行木构件的整体微钻检测;若条件所限无法进行整体检测时,应针对不同树种的径向变化规律进行微钻阻抗值的修正。

关键词:古建筑;木构件;落叶松木材;物理力学性能;无损检测

中图分类号:S781.2

文献标志码:A

文章编号:2096-1359(2024)02-0063-07

Prediction of physical and mechanical properties and influencing factors of larch wood in historic building

YUAN Xiao^{1,2}, ZHONG Huixian^{1,2}, ZHONG Yong², CHEN Yongping^{1,2*}

(1. Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Historic wooden buildings having a long history in China, being a testament to the country's rich cultural heritage. In view of the preventive conservation of historic wooden buildings, it is important to predict and evaluate the properties of wooden components timely and effectively, which can be completed using non-destructive testing to assess the wood structural integrity of the building without any damage. In this study, non-destructive testing techniques like stress wave and micro-drilling resistance were combined with physical and mechanical properties testing in laboratory. The prediction equation of non-destructive testing parameters and physical and mechanical properties of larch wood was established, according to the progressive way of small specimens, reduced-scale specimens and full-scale specimens. Moreover, a field non-destructive testing and analysis method for the physical and mechanical properties of larch wood in historic buildings was proposed. The results showed that, there was an obvious linear positive correlation between the wood density and the micro-drilling resistance in small specimens, and the correlation coefficient of the linear equation between wood density and micro-drilling resistance was 0.91. However, the ultimate compressive strength, modulus of rupture and modulus of elasticity showed an obvious linear positive correlation with modulus of wave-resistance in small specimens. The correlation coefficients of the linear equations of ultimate compressive strength, modulus of rupture, modulus of elasticity and modulus of wave-resistance were 0.86, 0.74 and 0.74, respectively. It was proved that the physical and mechanical properties of larch wood can be predicted by micro-drilling resistance and stress wave velocity test. Furthermore, there was a certain error in predicting the physical and mechanical properties of large specimens based on the prediction equation established by the test data of small speci-

收稿日期:2023-07-10

修回日期:2023-11-07

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2019SY033);国家重点研发计划(2020YFC1522402)。

作者简介:袁霄,女,研究方向为木材无损检测。通信作者:陈勇平,男,研究员。E-mail: chenyp@caf.ac.cn

mens. The difference between predicted average value for density and compressive strength parallel to grain and the actual average values were 12% and 16% to reduced-scale specimens, and the difference between predicted average values for density and compressive strength parallel to grain and the actual average values were 16% and 17% to full-scale specimens. The testing path factors should be considered in the field testing for wood property, the density, compressive strength parallel to grain, and micro-drilling resistance value of larch wood all showed a gradual increase trend from the heartwood to the sapwood, and the external micro-drilling resistance value was 4%–16% larger than the overall micro-drilling resistance value. The full path micro-drilling test of the wooden component should be performed in the actual testing and evaluation, and if the full path micro-drilling test was limited by condition, the micro-drilling resistance value should be corrected on the basis of radial variation of different wood species.

Keywords: historic building; wooden component; larch wood; physical and mechanical property; non-destructive testing

古建筑木构件不同于传统意义上的木材,对其进行物理力学性能评价无法使用传统的破坏性检测方法。在不破坏木构件使用性能和外观的基础上,利用无损检测技术^[1-4]科学准确地预测木构件物理力学性能是近年来科研工作者们的重点研究方向之一。

相关研究表明,在众多无损检测方法中,微钻阻抗仪检测^[5-7]获得的阻抗相对值和应力波检测^[8-9]获得的应力波速度与木材物理力学性能有显著的相关性。王晓欢^[10]利用故宫武英殿修缮过程中拆卸的落叶松旧木构件,对其物理力学性能与微钻阻力检测值之间的相关性进行研究,结果表明,利用阻力仪检测结果可以对木构件物理力学性能进行定量分析。段新芳等^[11]利用了应力波测定仪对塔尔寺大金瓦殿5种木构件的弹性模量进行了检测,结果表明,应力波无损检测可以有效测定木构件的力学强度。张厚江等^[12]以北京圆明园正觉寺鼓楼拆卸下来的落叶松材为试验对象,对力学试件进行应力波传播速度、微钻阻力、密度等检测,结果表明,应力波-阻力模量与被测材料主要力学性能指标之间有良好的线性相关性。朱磊等^[13]以古建筑落叶松木构件材料为试验对象,对比了应力波技术与微钻阻力技术对材料力学的检测效果,结果表明:应力波检测方法在推算木构件材料抗弯弹性模量、抗弯强度方面的准确度要高于微钻阻力检测方法;而在推算抗压强度方面,微钻阻力检测方法的准确度略高,结合了应力波和微钻阻力的波阻模量检测方法推算木构件力学性能有比单一方法更高的准确度。王忠铖^[14]基于实验室力学试验、现场无损检测、数值模拟和理论分析等方法,对藏式古建筑木材力学性能及其预测方法等进行了一系列研究,结果表明:对于木材密度的预测,使用微钻阻力即可得到较高的预测精度;对于木材力学性能的预测,有必要综合考虑构件的实际受荷形式、

木材的纹理方向以及无损检测的方向等多种因素,以获得最高的预测精度。Divos等^[15]利用应力波检测仪,对一座巴洛克风格宫殿天花板等部位的木构件进行无损检测,试验结果表明,利用应力波检测技术可以较为准确地预测单个木构件的抗弯强度。Ceraldi等^[16]使用微钻阻力仪对古建筑榫木构件的密度和抗压强度进行了预测评估,发现微钻阻力值和木材密度有较好的相关性。Calderoni等^[17]对旧栗木构件进行了微钻阻力仪检测和传统力学试验,建立了微钻阻力值与横纹和顺纹抗压强度之间的数值关系模型。纵观以往的相关研究,其实实验室检测对象基本集中为小试样,未过多考虑现场实际应用的验证效果,故本研究采取小试样-缩尺试件-足尺试件递进的方式建立并评估预测模型。

笔者选取古建筑木构件常用树种落叶松(*Larix* sp.),将微钻阻抗仪、应力波检测等无损检测技术和实验室物理力学性能测试相结合,构建落叶松木材密度、抗压强度、抗弯强度以及抗弯弹性模量与微钻阻抗值、波阻模量关系预测模型,分析比较不同物理力学性能预测模型的相关系数,并对密度、抗压强度预测模型进行进一步的缩尺、足尺试件验证试验,检验预测方法的可行性。除此之外,古建筑木构件现场检测过程中受到木构件位置的影响,可能无法获取完整路径的无损检测参数,而木材由心材至边材的径向路径上,其物理力学性能是发生变化的。因此,需探讨木材物理力学性能和无损检测参数的径向变化规律,以便在进行物理力学性能预测时根据实际情况对所获取的无损检测参数进行修正。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用落叶松古建材来源于北京故宫和万寿寺,为建筑修缮替换下的脊檩(距今约270 a)

和檐柱(距今约130 a)等构件;落叶松现代材来源于河北张家口市等地。试材选定后均放置于气干棚至平衡含水率(约9%)。

1.2 试验仪器

本试验所用仪器主要为微钻阻抗仪(Resistograph 4452-P)、应力波检测仪(FAKOPP)、万能力学试验机(INSTRON 5582)、微机控制电子万能试验机(WDW-300E)、微机控制电液伺服压力试验机(YAW-3000A)以及X射线剖面密度测试仪(DENSE-LABX)。

1.3 试验方法

木材微钻阻抗值和应力波传播速度根据DB11/T 1190.1—2015《古建筑结构安全性鉴定技术规范第1部分:木结构》测定,木材密度、顺纹抗压强度、抗弯强度和抗弯弹性模量分别根据GB/T 1927.5—2021《木材密度测定方法》、GB/T 1927.11—2022《顺纹抗压强度测试方法》、GB/T 1927.9—2021《木材抗弯强度试验方法》、GB/T 1927.10—2021《木材抗弯弹性模量测定方法》测定。

1.3.1 模型用标准小试件的加工与测试

将落叶松古建材和现代材经过除钉、锯解、划线等加工程序后,制作成400 mm×20 mm×20 mm的无疵试件共60个,其中古建材试件41个、现代材试件19个,进行试件的质量测定、尺寸测量、相

关无损检测以及物理力学性能测试。相关检测示意图如图1所示。

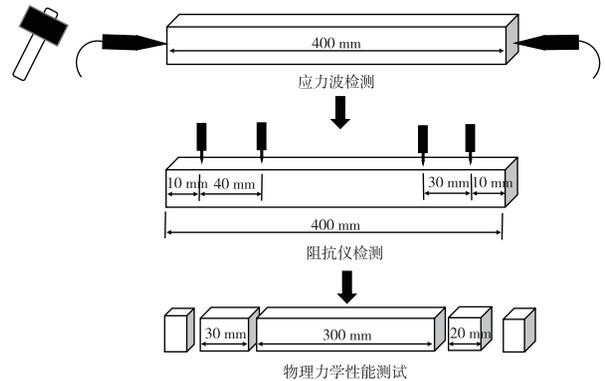


图1 小试件检测示意图

Fig. 1 Testing sketch map of small specimens

1.3.2 验证用大尺寸试件的加工与测试

缩尺验证试件取自落叶松现代材锯截圆盘的4个方向,每个方向取1~2个试件。每个圆盘4~8个试件。经过筛选,6个圆盘共取30个试件,初加工试件开展无损检测后制成75 mm×50 mm×50 mm的缩尺试件,进行质量测定、尺寸测量和顺纹抗压强度测试。足尺验证试验随机选择5个落叶松木段,根据木段的尺寸统一加工成484 mm×218 mm×218 mm试件,进行质量测定、尺寸测量、无损检测和顺纹抗压强度测试。相关检测示意图如图2所示。

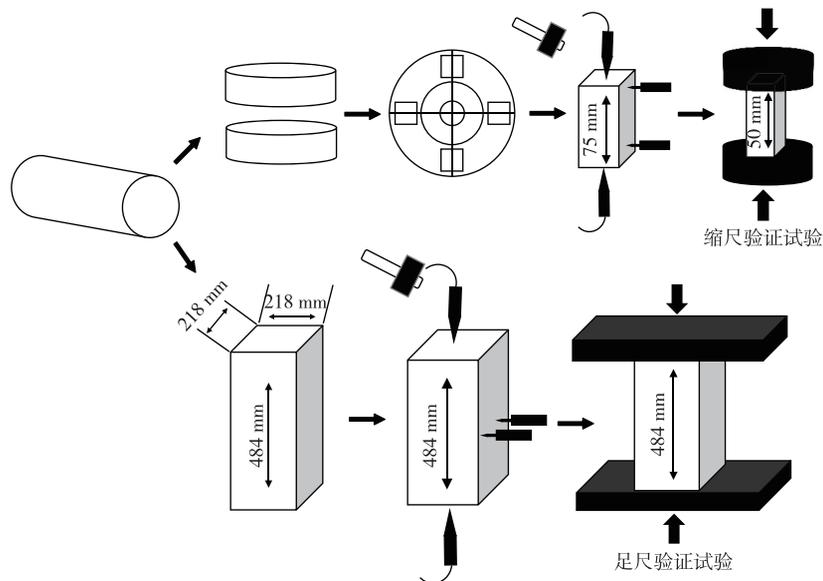


图2 大试件检测示意图

Fig. 2 Testing sketch map of large specimens

1.3.3 修正用径向小试件的加工与测试

修正用小试件取自落叶松现代材锯截圆盘的4个方向,每个方向沿径向(从心材至边材方向)取3个试件,每个圆盘12个试件,3个圆盘共36个试

件。从心材至边材依次编号为位置1、2、3,试件规格初加工为80 mm×20 mm×20 mm开展无损检测,然后加工成标准试件进行密度和顺纹抗压强度测试。相关检测示意图如图3所示。

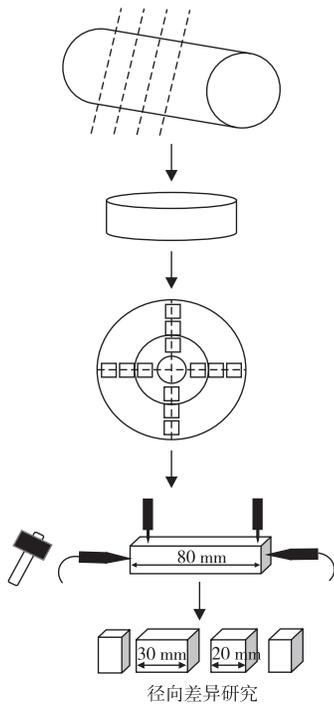


图3 径向试件检测示意图
Fig. 3 Testing sketch map of radial specimens

2 结果与分析

2.1 原始回归模型建立与评价

2.1.1 微钻阻抗值与密度的相关性

密度是木材的基本物理力学性能之一,一定程度上也决定着其他的物理力学性能。本研究分析了落叶松气干密度与微钻阻抗值 F 的相关性,结果表明,落叶松古建材和现代材的微钻阻抗值与密度均呈现显著的线性相关,且呈正相关性,即随着密度的

增加,阻抗仪检测值增加,其结果如图4所示。

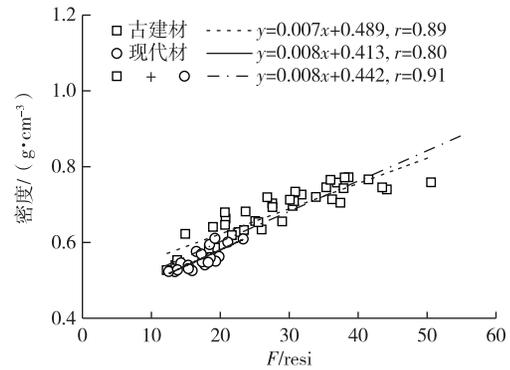


图4 微钻阻抗值与密度的关系
Fig. 4 Relationships between micro-drilling resistance and wood density

2.1.2 波阻模量与顺纹抗压强度、抗弯强度及抗弯弹性模量的相关性

相关研究已证明,波阻模量 Fv^2 可作为无损检测指标进行材料性能的推算^[18],其单位为 $\text{resi} \cdot \text{km}^2/\text{s}^2$ 。因此,本研究尝试建立了落叶松木材顺纹抗压强度 UCS、抗弯强度 MOR 及抗弯弹性模量 MOE 与波阻模量的相关模型,其回归方程如图5所示。由图5可知,落叶松古建材和现代材的波阻模量与顺纹抗压强度、抗弯强度及抗弯弹性模量均呈线性相关。从落叶松木材密度、顺纹抗压强度、抗弯强度及抗弯弹性模量与无损检测参数的相关模型也可以看出,所用样本的物理力学性能区间覆盖越广,模型预测准确度和适应性越高。

为便于模型应用和验证,对落叶松整体样本相关回归方程进行整理,如表1所示。

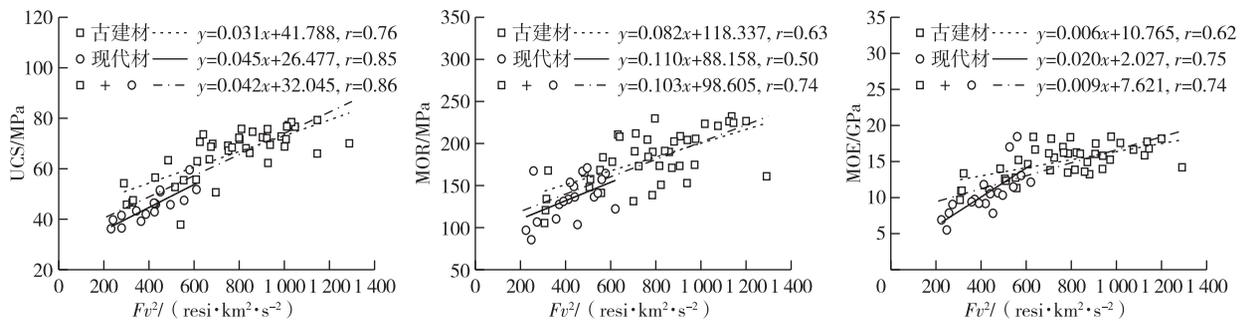


图5 波阻模量与力学强度的关系
Fig. 5 Relationships between velocity-resistance modulus and mechanical strength

表1 落叶松木材物理力学性能预测方程

Table 1 Prediction equations of physical and mechanical property of larch wood

材质性能指标 y	线性回归方程 $y=ax+b$			相关系数 r
	x	a	b	
密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	F/resi	0.008	0.442	0.91
顺纹抗压强度/MPa	$Fv^2/(\text{resi} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	0.042	32.045	0.86
抗弯弹性模量/MPa	$Fv^2/(\text{resi} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	0.009	7.621	0.74
抗弯强度/MPa	$Fv^2/(\text{resi} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	0.103	98.605	0.74

2.2 预测模型的验证与偏差分析

根据表1,将30个缩尺试件和5个足尺试件测得的微钻阻抗值和波阻模量代入对应的落叶松密度及顺纹抗压强度相关方程中,得到木材密度及顺纹抗压强度预测值,并与其实际测得的密度及顺纹抗压强度进行对比。

2.2.1 缩尺试验验证

将缩尺试件的微钻阻抗值和波阻模量分别代入方程 $y = 0.008x + 0.442$ 及 $y = 0.042x + 32.045$, 得到缩尺试件密度和顺纹抗压强度的预测值, 与实际值对比如图6所示。经统计分析, 缩尺试件实际密度平均值为 0.530 g/cm^3 , 预测密度平均值为 0.592 g/cm^3 , 平均相差 0.062 g/cm^3 , 密度预测值与

实测值平均偏差约为12%, 其中最大相差 0.085 g/cm^3 , 最小仅相差 0.033 g/cm^3 。缩尺试件实际顺纹抗压强度平均值为 58.35 MPa , 预测顺纹抗压强度平均值为 48.68 MPa , 平均相差 9.67 MPa , 顺纹抗压强度预测值与实测值平均偏差约为16%, 其中最大相差 16.79 MPa , 最小仅相差 0.52 MPa 。缩尺验证试验相关性分析结果表明, 前期所建立的预测模型对落叶松木材物理力学性能的评估效果良好, 其密度、顺纹抗压强度预测值与实测值之间的相关系数分别为0.831和0.634, 密度预测效果优于顺纹抗压强度。通过该方法能较好地预测古建筑木构件的密度和承载能力。

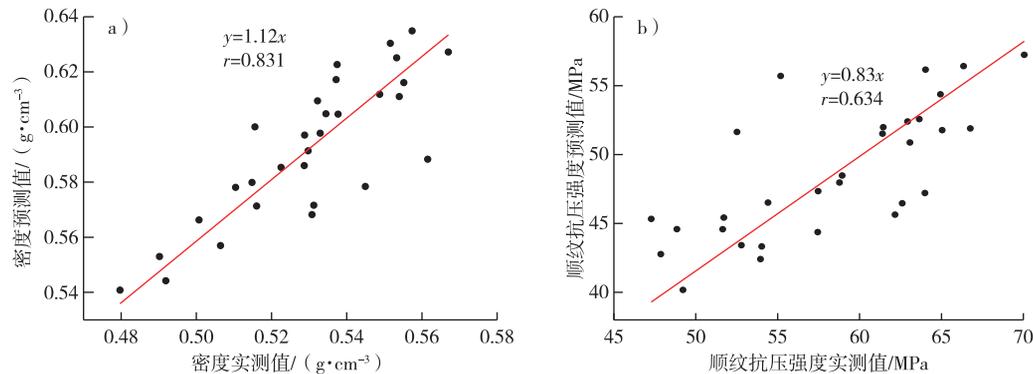


图6 缩尺试件木材密度和抗压强度预测

Fig. 6 Predictions of wood density and compressive strength of reduced-scale specimens

2.2.2 足尺试验验证

将足尺试件的微钻阻抗值和波阻模量分别代入方程 $y = 0.008x + 0.442$ 及 $y = 0.042x + 32.045$, 得到足尺试件密度和顺纹抗压强度的预测值, 与实际值对比。经统计分析, 足尺试件实际密度平均值为 0.545 g/cm^3 , 预测密度平均值为 0.631 g/cm^3 , 平均相差 0.086 g/cm^3 , 密度预测值与实测值平均偏差约为16%, 其中最大相差 0.096 g/cm^3 , 最小仅相差 0.067 g/cm^3 。足尺试件实际顺纹抗压强度平均值为 47.84 MPa , 预测顺纹抗压强度平均值为 55.70 MPa , 平均相差 7.86 MPa , 顺纹抗压强度预测值与实测值平均偏差约为17%, 其中最大相差 11.72 MPa , 最小仅相差 3.37 MPa 。足尺验证试验进一步表明, 所建立的预测模型对落叶松足尺构件进行物理力学性能评估同样适用, 木材密度和顺纹抗压强度预测误差均在20%以内。足尺试件顺纹抗压强度预测值均略大于实际值, 这可能是因为足尺试件的变异性更大, 其内部缺陷一定程度上影响了木材的物理力学性能。

2.3 检测路径影响与趋势修正

测定落叶松木材从心材至边材方向36个试件

的密度、顺纹抗压强度和无损检测参数, 了解其变化趋势, 同时为现场无法进行完整路径无损检测时提供数据参考。

2.3.1 微钻阻抗值和应力波速度径向变化规律

落叶松木材从心材至边材方向微钻阻抗值呈现沿径向逐渐增大的规律。圆盘1从心材至边材的微钻阻抗值依次为20.7, 20.9和21.8 resi, 整体平均微钻阻抗值为21.1 resi, 其整体平均微钻阻抗值指的是3个径向试件所组成的区域进行完整路径定向检测获得的微钻阻抗值平均值; 圆盘2从心材至边材的微钻阻抗值依次为24.8, 27.1和30.1 resi, 整体平均微钻阻抗值为27.3 resi; 圆盘3从心材至边材的微钻阻抗值依次为25.1, 27.4和33.0 resi, 整体平均微钻阻抗值为28.5 resi。3个圆盘外部微钻阻抗值均略大于整体平均微钻阻抗值, 分别比整体平均微钻阻抗值大4%, 10%和16%, 在实际检测中, 要想获取更准确的材质性能, 应进行木构件的整体微钻检测, 若条件所限无法进行整体检测时, 应针对不同树种的径向变化规律进行微钻阻抗值修正。对于古建用落叶松木材而言, 若现场只进行了木构件外部区域的微钻检测, 则该数值应进行

4%和16%的折减后再结合模型进行剩余强度预测,并给出预测值区间;必要时也可现场选取1~2个检测点进行外部区域和完整路径微钻阻抗仪探测,得出两者之间微钻阻抗值的关系进行折减。在气干条件下,落叶松木材应力波速度沿径向变化规律不明显,具体表现为,圆盘1从心材至边材的应力波速度依次为4 423,4 186和4 085 m/s,圆盘2从心材至边材的应力波速度依次为3 963,3 920和

4 197 m/s,圆盘3从心材至边材的应力波速度依次为3 873,4 002和4 075 m/s。从心材至边材方向微钻阻抗值呈现出沿径向逐渐增大的趋势,这主要是因为微钻阻抗值与木材密度正相关,从心材至边材方向所取试件的密度逐渐增大;相对微钻阻抗值而言,落叶松木材应力波速度值在树种相同的条件下,主要受木材含水率和缺陷等影响较大,受正常区间范围内的密度变化影响不显著。

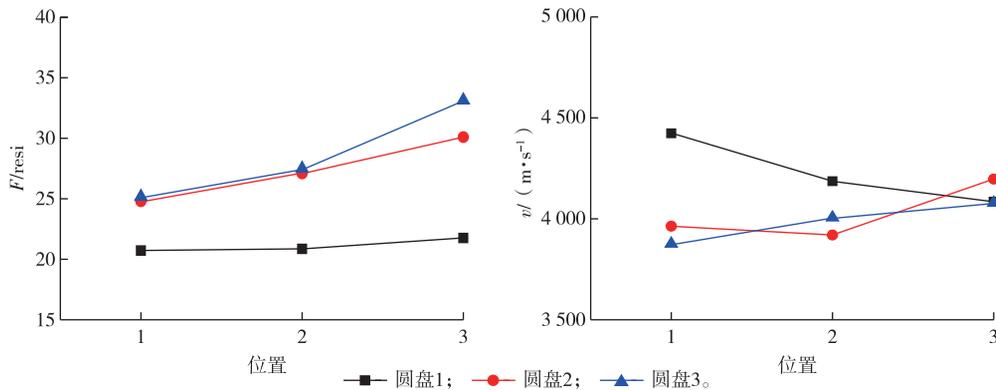


图7 落叶松木材微钻阻抗值和应力波速度径向变化

Fig. 7 Radial variation of micro-drilling resistance and stress wave velocity of larch wood

2.3.2 密度及顺纹抗压强度变化规律

落叶松木材从心材至边材方向密度沿径向逐渐增大。圆盘1从心材至边材的密度依次为0.476,0.513和0.549 g/cm³,圆盘2从心材至边材的密度依次为0.500,0.535和0.538 g/cm³,圆盘3从心材至边材的密度依次为0.501,0.526和0.562 g/cm³。而落叶松顺纹抗压强度沿径向逐渐增大,与密度径向变化规律一致。圆盘1从心材至边材的顺纹抗压强度依次为46.9,48.6和56.2 MPa,圆

盘2从心材至边材的顺纹抗压强度依次为42.3,50.3和53.1 MPa,圆盘3从心材至边材的顺纹抗压强度依次为42.9,47.2和56.2 MPa。落叶松木材从心材至边材方向密度和顺纹抗压强度沿径向呈现逐渐增大的趋势,该数值和趋势一定程度上也受取样位置的影响。

为进一步表征密度的更细微变化,在同批落叶松圆盘上截取宽20 mm的中心试条,进行X射线剖面密度测试,结果见图8。

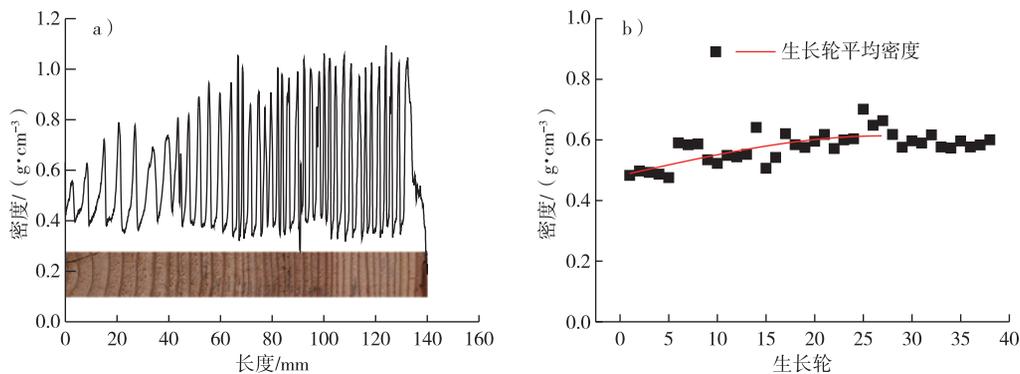


图8 落叶松木材剖面密度分布

Fig. 8 Vertical density profile of larch wood

剖面密度反映了所取试条从髓心至材表在径向上的密度分布情况,如图8所示。木材生长轮由早材和晚材组成,早材的细胞腔大而细胞壁薄,导致其密度较低,晚材的细胞腔小而细胞壁厚,导致其密度较高,连续的生长轮形成密度的高低交替,

因此木材剖面密度一般呈振荡曲线。对图8中落叶松木材剖面密度曲线进行统计分析可知,髓心至材表深度为130.7 mm,剖面密度波动范围为0.2~1.1 g/cm³。落叶松木材剖面密度曲线中相邻的波谷至波峰为一个生长轮,通过计算每个生长轮的平

均密度,可以发现落叶松木材心材至边材区域生长轮平均密度呈现缓慢增加趋势,但至材表位置略有下降,落叶松木材的整体密度为 0.563 g/cm^3 。

3 结论

1)通过微钻阻抗仪和应力波检测可推算落叶松木材物理力学性能。古建筑木构件现场检测中,木构件密度根据微钻阻抗值结合回归模型进行推算,抗压强度、抗弯强度及抗弯弹性模量根据波阻模量结合回归模型进行推算。

2)利用微钻阻抗仪和应力波检测推算落叶松木材物理力学性能存在一定误差。通过微钻阻抗值推算落叶松木材密度时,缩尺试件预测值与实际值的平均偏差约为 12%,足尺试件平均偏差约为 16%;由波阻模量推算落叶松木材顺纹抗压强度时,缩尺试件平均偏差约为 16%,足尺试件平均偏差约为 17%。

3)落叶松木材密度、顺纹抗压强度、微钻阻抗值从心材至边材均表现为逐渐增大的趋势,所取试样中外围区域微钻阻抗值比整体平均微钻阻抗值大 4%~16%。在实际检测中,要想获取更准确的材质性能,应进行木构件的整体微钻检测,若条件所限无法进行整体检测时,应针对不同树种的径向变化规律进行修正。对应力波速度而言,径向位置变化对其影响不显著,外部区域应力波速度值可作为整体材质性能预测的速度值。

参考文献(References):

- [1] SHARAPOV E, BRISCHKE C, MILITZ H. Assessment of preservative-treated wooden poles using drilling-resistance measurements [J]. *Forests*, 2019, 11(1): 20. DOI: 10.3390/f11010020.
- [2] TUMENJARGAL B, ISHIGURI F, TAKAHASHI Y, et al. Predicting the bending properties of *Larix sibirica* lumber using non-destructive-testing methods [J]. *International Wood Products Journal*, 2020, 11(3): 115-121. DOI: 10.1080/20426445.2020.1735754.
- [3] 张厚江,管成,文剑. 木质材料无损检测的应用与研究进展[J]. *林业工程学报*, 2016, 1(6): 1-9. DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.2016.06.001.
- ZHANG H J, GUAN C, WEN J. Applications and research development of nondestructive testing of wood based materials[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, 1(6): 1-9.
- [4] 王珏,李彦杰,陈益存,等. 近红外光谱技术在林业领域的应用[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(3): 237-246.
- WANG J, LI Y J, CHEN Y C, et al. The application of near-infrared spectroscopy in forestry[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 47(3): 237-246.
- [5] KARLINASARI L, DANU M, NANDIKA D, et al. Drilling resistance method to evaluate density and hardness properties of resinous wood of agarwood (*Aquilaria malaccensis*) [J]. *Wood Research*, 2017, 62: 683-690.
- [6] 姚建峰,符利勇,宋新宇,等. 微钻阻力法测量早晚材密度的可行性试验[J]. *林业工程学报*, 2022, 7(5): 66-73. DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.202203028.
- YAO J F, FU L Y, SONG X Y, et al. Feasibility study on measuring density of earlywood and latewood by micro drill resistance method [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2022, 7(5): 66-73.
- [7] 李鑫. 古建筑木构件材质性能与残损检测关键技术研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015.
- LI X. Key technology research on material performance and damage detection for wooden components of ancient Chinese building[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [8] ISHIGURI F, MATSUI R, IIZUKA K, et al. Prediction of the mechanical properties of lumber by stress-wave velocity and Pildyn penetration of 36-year-old Japanese larch trees[J]. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 2008, 66(4): 275-280. DOI: 10.1007/s00107-008-0251-7.
- [9] ROSS R J, ZERBE J I, WANG X P, et al. Stress wave nondestructive evaluation of Douglas-fir peeler cores [J]. *Forest Products Journal*, 2005, 55(3): 90-94.
- [10] 王晓欢. 古建筑旧木材材性变化及其无损检测研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2006.
- WANG X H. Study on the variety and the NDE of aged wood physical and mechanical properties of ancient architecture [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006.
- [11] 段新芳,王平,周冠武,等. 应力波技术检测古建筑木构件残余弹性模量的初步研究[J]. *西北林学院学报*, 2007, 22(1): 112-114. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2007.01.031.
- DUAN X F, WANG P, ZHOU G W, et al. Nondestructive evaluation of dynamic MOE of ancient wooden structure members by stress wave method[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(1): 112-114.
- [12] 张厚江,朱磊,孙燕良,等. 古建筑木构件材料主要力学性能检测方法研究[J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(5): 126-129. DOI: 10.13332/j.1000-1522.2011.05.007.
- ZHANG H J, ZHU L, SUN Y L, et al. Determining main mechanical properties of ancient architectural timber[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(5): 126-129.
- [13] 朱磊,张厚江,孙燕良,等. 基于应力波和微钻阻力的古建筑木构件材料力学性能检测[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(10): 81-83. DOI: 10.13759/j.cnki.dlx.2011.10.010.
- ZHU L, ZHANG H J, SUN Y L, et al. Determination of mechanical properties of ancient architectural timber based on stress wave and micro-drilling resistance[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(10): 81-83.
- [14] 王忠铖. 藏青杨古建木材力学性质试验研究及预测方法[D]. 北京:北京交通大学, 2022. DOI: 10.26944/d.cnki.gbfju.2022.000208.
- WANG Z C. Experimental research and prediction method of mechanical properties of Tibetan *Populus cathayana* in ancient buildings[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [15] DIVOS F, NEMETH L, BEJO L. Evaluation of the wooden structure of a Baroque palace in Papa, Hungary [C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Sopron, Hungary, 1999.
- [16] CERALDI C, MORMONE V, RUSSO E E. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics[J]. *Materials and Structures*, 2001, 34(1): 59-64. DOI: 10.1007/BF02482201.
- [17] CALDERONI C, DE MATTEIS G, GIUBILEO C, et al. Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(2): 442-448. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.10.006.
- [18] 朱磊,张厚江,孙燕良,等. 基于应力波和微钻阻力的红松类木构件力学性能的无损检测[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(2): 156-158. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2013.02.028.
- ZHU L, ZHANG H J, SUN Y L, et al. Mechanical properties non-destructive testing of wooden components of Korean pine based on stress wave and micro-drilling resistance[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2013, 37(2): 156-158.