北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

无损检测指标与木材横纹局部抗压强度和密度的相关性

王忠铖 杨娜 李久林

Correlations between nondestructive testing indicators and local transverse compressive strength as well as wood density

Wang Zhongcheng, Yang Na, Li Jiulin

引用本文:
王忠铖, 杨娜, 李久林. 无损检测指标与木材横纹局部抗压强度和密度的相关性[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5):136–142. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230367
Wang Zhongcheng, Yang Na, Li Jiulin. Correlations between nondestructive testing indicators and local transverse compressive strength as well as wood density[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5):136–142. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230367

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230367

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

掺砂对崩岗土壤无侧限抗压强度的影响

Effects of mixing sand on unconfined compressive strength of soil in collapsing gully

北京林业大学学报, 2020, 42(1): 114–120. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20180235

人工林刺槐木材物理力学性质研究

Physical and mechanical properties of *Robinia pseudoacacia* wood in artificial forests

北京林业大学学报, 2018, 40(7): 104–112. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180030

熏蒸处理对落叶松木材颜色和力学强度的影响

Effects of fumigation treatment on wood color and mechanical strength of *Larix gmelinii*

北京林业大学学报, 2017, 39(2): 100–107. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160317

应用AE和DIC原位监测含横纹裂纹木构件的裂纹演化规律试验研究

Experimental study on in situ monitoring of the evolution law of cracks in wood components with transverse cracks based on acoustic emission and image correlation

北京林业大学学报, 2020, 42(1): 142–148. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190276

国产日本落叶松正交胶合木的销槽承压强度

Embedment strength of domestic Japanese larch cross–laminated timber

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 116–126. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210326

妙峰山油松林分结构与地表潜在火行为相关性分析

Correlations between stand structure and surface potential fire behavior of *Pinus tabuliformis* forests in Miaofeng Mountain of Beijing

北京林业大学学报, 2019, 41(1): 73–81. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180304

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230367

无损检测指标与木材横纹局部抗压强度和密度的相关性

王忠铖[1,2]　杨　娜[2]　李久林[1]
（1. 北京城建集团有限责任公司，北京 100088；2. 北京交通大学土木建筑工程学院，北京 100044）

摘要:【目的】探索不同类型和数量的无损检测（NDT）指标与木材横纹局部抗压强度和密度的相关性差异，确定最优 NDT 指标组合，为基于无损检测手段评估木材横纹局部抗压强度和密度的研究提供参考。**【方法】**以某典型藏式古建筑木结构梁构件为研究对象，锯解得到横纹局部抗压无疵试样。通过物理力学试验和 NDT 试验，获得无疵试样的密度 ρ、横纹局部抗压强度 f_{lc}，以及顺纹应力波速 v_l、横纹应力波速 v 和微钻阻力 F，计算不同 NDT 指标或指标组合与 ρ、f_{lc} 的线性相关系数，进而对比讨论。**【结果】**（1）使用单一 NDT 指标预测 ρ 时，v_l 效果较好，两者相关系数绝对值为 0.662，补充微钻阻力均值 F_m 后可提高 15.56%，达到 0.765；使用单一 NDT 指标预测 f_{lc} 时，F_m 效果较好，两者相关系数为 0.526，在此基础上补充横纹应力波速均值 v_m，二者相关系数提升 26.80%，达到 0.667，进一步补充 v_l 后相关系数继续提升 7.20%，达到 0.715。（2）当两组 NDT 指标中的基本指标构成一致时，即便基本指标的形式存在差异，两组 NDT 指标与被预测参数的相关系数也近似。（3）当两个与被预测参数相关性较好的 NDT 指标组合时，相关系数可能进一步提高；当相关性较好的指标与较差的指标组合时，相关系数接近于前者；当相关性较差的指标与不相关指标组合时，相关系数可能大幅提升，也可能仍然较低；当两个均不显著相关的指标组合时，指标组合与被预测参数仍不具有显著相关性。**【结论】**确定合理的 NDT 指标比一味增加指标数量对相关系数的提高影响更大。综合考虑相关系数提升效果以及由此可能增加的测试工作量，预测木材密度和横纹局部抗压强度时建议分别使用“v_l, F_m”和“F_m, v_m”的 NDT 指标组合。

关键词：木结构无损检测；木材密度；横纹局部抗压强度；线性相关性；指标预测
中图分类号：TU366.2; S781.29　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)05−0136−07
引文格式：王忠铖，杨娜，李久林. 无损检测指标与木材横纹局部抗压强度和密度的相关性［J］. 北京林业大学学报，2024，46(5)：136−142. Wang Zhongcheng, Yang Na, Li Jiulin. Correlations between nondestructive testing indicators and local transverse compressive strength as well as wood density［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 136−142.

Correlations between nondestructive testing indicators and local transverse compressive strength as well as wood density

Wang Zhongcheng[1,2]　Yang Na[2]　Li Jiulin[1]
(1. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China;
2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: ［**Objective**］ The differences in correlations between different types and quantities of nondestructive testing (NDT) indicators and the local transverse compressive strength as well as density of wood were studied, and the optimal combination of NDT indicators was determined to provide reference for the evaluation of transverse local compressive strength and density of wood based on NDT methods. ［**Method**］ The beam components from a typical Tibetan ancient building wooden structure were taken as the research object, and the local transverse compressive samples were sawn off. By conducting physical and mechanical tests and NDT tests, the density (ρ), local transverse compressive strength (f_{lc}), longitudinal and

收稿日期: 2023−12−20　**修回日期:** 2024−04−15
基金项目: 北京市博士后工作经费资助项目（2023-ZZ-129）。
第一作者: 王忠铖，博士。主要研究方向：现代木结构、古建筑木结构。Email：16115317@bjtu.edu.cn　地址：100088 北京市海淀区北太平庄路 18 号城建大厦 C405。
责任作者: 杨娜，教授，博士生导师。主要研究方向：木结构、钢结构。Email：nyang@bjtu.eud.cn　地址：100044 北京市海淀区上园村 3 号北京交通大学土木建筑工程学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

transverse stress wave velocity (v_l and v), and micro drilling resistance (F) were measured. The linear correlation coefficients between different NDT indicators or indicator combinations and ρ, f_{lc} were calculated, and then comparatively discussed. [**Result**] (1) The correlation coefficients between v_l and ρ were the highest when using single NDT index, at 0.662, after supplementing the F_m (the mean value of F), it can be increased by 15.56%, reaching 0.765. The correlation coefficient between F_m and f_{lc} was the highest when using single NDT indicator, at 0.526, after supplementing the v_m (mean value of v), it can be increased by 26.80%, reaching 0.667; after further supplementing the v_l, it can be further increased by 7.20%, reaching 0.715. (2) When the basic indicators in two sets of NDT indicator combinations were consistent, even if there were differences in the form of basic indicators, the correlation coefficients between the two sets and the predicted parameters were also similar. (3) When two NDT indicators with good correlation with the predicted parameters were combined, the correlation coefficient of the combined model may further increase; when NDT indicators with good correlation were combined with indicators with poor correlation, the correlation coefficients of the combination model was close to the former; when NDT indicators with poor correlation were combined with unrelated indicators, the correlation coefficient may increase significantly or remain poor; when two NDT indicators which are not significantly correlated were combined,thecombinationofNDTindicatorsstilldoesnothasasignificantcorrelationwiththepredictedparameters. [**Conclusion**] Determining reasonable NDT indicators has a greater impact on improving the correlation than simply increasing the number of indicators. Taking into account the improvement effect of correlation coefficients and the potential increase in testing workload, it is recommended to use the combination of "v_l, F_m" and "F_m, v_m" for predicting the density and local transverse compressive strength of wood, respectively.

Key words: nondestructive testing of wooden structures; wood density; local transverse compressive strength; linear correlation; index prediction

无损检测(nondestructive testing，NDT)技术是勘查木材内部残损状况的常用方法，此类检测方法具有对木构件损伤小、适合现场操作等优点[1]。近年来，学者发现 NDT 指标与木材密度和抗压强度参数之间存在一定的相关性。孙燕良等[2]对比了红松(*Pinus koraiensis*)和落叶松(*Larix gmelinii*)顺纹应力波速 v_l 和微钻阻力 F 与抗压强度 f_c 之间的相关性，发现落叶松新材的 v_l、F 与 f_c 的相关系数分别为 0.539 和 0.845，均高于红松。黄荣凤等[3]区分了 F 曲线的波峰、波谷和加权平均值，分别研究了三者与落叶松构件的密度 ρ 和 f_c 之间的相关性，发现使用加权平均值的 NDT 指标与此两类参数之间的相关系数较高。朱磊等[4]对比了 v_l、F 和波阻模量 Fv_l^2 与落叶松旧材 f_c 的相关性，发现三者与 f_c 的相关系数分别为 0.43、0.49 和 0.69。随后进一步提出了 Fv_l^2 的 95% 置信区间的改进指标，发现其与落叶松旧材 f_c 的相关系数为 0.477[5]。Calderoni 等[6]研究了顺纹微钻阻力与栗木(*Castanea sativa*)旧材 f_c 之间的关系，发现两者的校正决定系数为 0.581。Ceraldi 等[7]、Zhang 等[8]分别研究了虫蛀的山毛榉(*Fagus sylvatica*)木和花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)旧材 F 与 f_c 的相关性。Faggiano 等[9−11]研究了硬度计顺纹和横纹方向刻痕深度、超声波速以及 F 等 NDT 指标在预测栗木旧材顺纹及横纹抗压强度时的差异。

现有研究大多关注 NDT 指标与木材顺纹抗压强度之间的相关性，鲜有研究关注横纹抗压强度，而对横纹局部抗压强度的研究则更少。木材横纹局部抗压强度是木材的重要力学性质参数之一，受木纤维的影响，其与横纹抗压强度存在一定差异，在木结构建筑中，横纹局部受压构件应用广泛。因此，研究 NDT 指标与横纹局部抗压强度的相关性十分必要。基于此，本文首先测试了木材无疵试样的密度与横纹局部抗压强度，随后分别测试了试样的应力波速与微钻阻力等 NDT 指标，通过对两者进行线性相关性分析，讨论了不同 NDT 指标与木材密度和横纹局部抗压强度的相关性，以期为无损检测法评估木材横纹局部抗压强度和密度的研究提供参考。

1　材料与方法

1.1　材　料

本研究所使用的木材取自某典型藏式古建筑木结构修缮时替换下来的梁构件。树种为藏青杨(*Populus cathayana*)，服役期约 300 年。根据 GB/T 1929—2009《木材物理力学试材锯解及试样截取方法》锯解无疵试样，有效试样共计 121 个，试样尺寸为 60 mm(长) × 20 mm(宽) × 20 mm(高)，其中长度方向为木材顺纹方向。试样制备完成后，首先进行密度测试，测得试样平均密度为 401.85 kg/m^3。

1.2 研究方法

获得密度参数后，首先进行力学试验，测试试样横纹局部抗压强度 f_{lc}。局部受压试验采用 INSTRON 5582 万能材料试验机，加载采用位移控制，压头下降速率为 1 mm/min。荷载和应变数据通过 TDS-530 数据采集系统进行采集。为了保证试样局部受压时压头传递的荷载以 45°角扩散，取试样长高比 3∶1。本试验参考 GB/T 1939—2009《木材横纹抗压试验方法》，加载块宽度 20 mm，置于试样中间位置（图 1）。

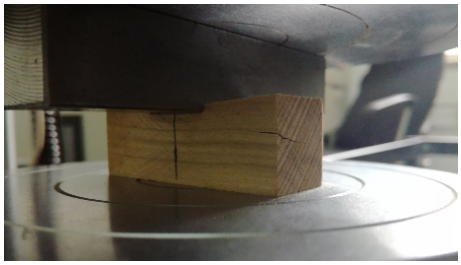


图 1 加载过程中的局部受压试样

Fig. 1 Local compression sample during loading

为了研究木材在真实环境中的横纹局部抗压强度，试样不进行含水率统一调整，力学试验后测试含水率 M_C，测得平均含水率为 8.37%。测试采用探针式含水率测试仪，测试位置如图 2。

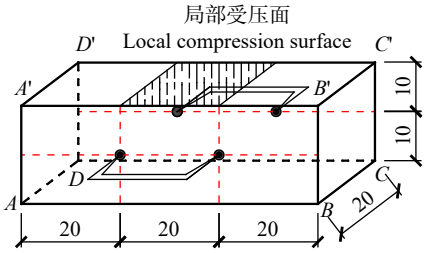
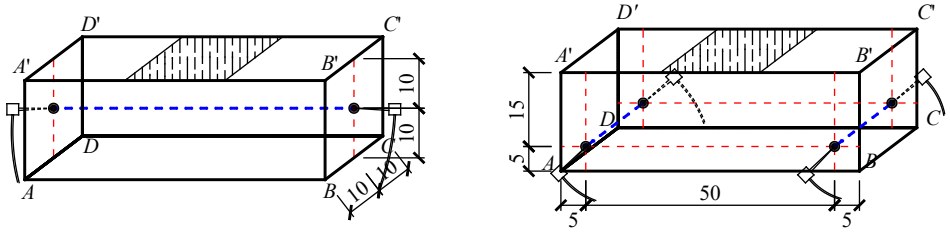


图 2 含水率测试位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water content testing location

最后进行应力波和阻力测试，分别获得顺纹应力波速 v_l、横纹应力波速 v 和微钻阻力 F。测试位置分别如图 3、图 4 所示。横纹应力波速和微钻阻力的测点位置选取考虑了横纹局部受压试验对木材纤维的影响，选取离受压面较远处，即木纤维更接近原始状态的位置[12]。

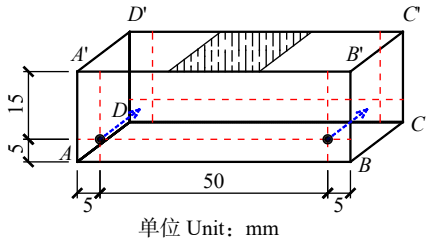


a 顺纹 Longitudinal stripe　　b 横纹 Transverse stripe

单位 Unit：mm

图 3 应力波测试位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stress wave testing location



单位 Unit：mm

图 4 阻力测试位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of drilling resistance testing location

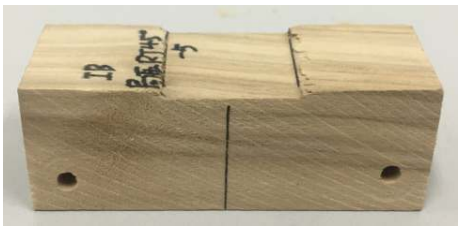


图 5 力学试验和无损检测后的试样

Fig. 5 Samples after mechanical testing and NDT

应力波速的测试使用匈牙利 FAKOPP 公司的 Microsecond Timber 一维应力波检测仪。微钻阻力的测试使用德国 Rinntech 公司的 Resistograph 650-SC 阻力仪，通过对钻入路径上所有阻力（微钻阻力，单位 resi）[13]求和作为该测试点的阻力值。所有测试完成后的试样如图 5。

除应力波速和微钻阻力外，由两者构成的波阻模量 M 也常被用作 NDT 指标[14]。

$$M_i = F_m v_i^2 \quad (i = m,l) \tag{1}$$

式中：F_m 为微钻阻力均值，resi。

2 结果与分析

线性模型形式简单，具有较好的预测效果，是基于无损检测手段预测木材力学性质的常用方法。因此，本文主要讨论 NDT 指标与木材密度和横纹局部抗压强度在 0.05 显著性水平下的线性相关性。

2.1　NDT 指标与木材密度相关性

2.1.1　NDT 指标与木材密度一元线性相关性

NDT 指标横纹应力波速均值 v_m、顺纹应力波速 v_l、微钻阻力均值 F_m、$F_m v_m^2$、$F_m v_l^2$ 与 ρ 的相关系数列于表 1。v_l、F_m 与 ρ 的相关系数绝对值较大，分别为 0.662 和 0.627(表 1)，两者与 ρ 的拟合曲线如图 6。$F_m v_m^2$ 与 ρ 也存在显著相关性，但相关系数较低，仅为 0.219。v_m、$F_m v_l^2$ 与 ρ 之间不存在显著相关性。

2.1.2　NDT 指标与木材密度多元线性相关性

多个 NDT 指标组合与 ρ 的相关性分析列于表 2。表 2 中，对比组 2-1 ~ 2-10 显示："v_l, F_m"二元模型与 ρ 的相关系数最高，为 0.765，较最优的 v_l 一元模型相关系数($r = -0.662$)的绝对值提升了 15.56%。此外，通过表 2 结果的对比可知，两个 NDT 指标组合的情形大致可以分为以下 4 类。

(1)当两个与 ρ 相关性均较好的 NDT 指标组合时，组合模型的相关系数可能出现一定提升，可解释表 2 中对比组 2-4、2-7 相关系数较高的原因。

(2)当一个与 ρ 相关性较好和一个与 ρ 相关性较差的 NDT 指标组合时，组合的相关系数会接近于相关性较好的 NDT 一元模型，例如对比组 2-1 和 2-5。

(3)当一个与 ρ 相关性较差的 NDT 指标和另一个与 ρ 不相关的 NDT 指标组合时，新的组合也可能出现两种情况：相关性大幅提升，例如对比组 2-8，其在 $F_m v_m^2$ 一元模型($r = 0.219$)的基础上，相关系数

表 1　NDT 指标与木材密度一元线性相关性

Tab. 1　Unary linear correlation between wood density and NDT index

对比组序号 Comparison group No.	自变量 Independent variable	P	r	R^2_{adj}
1-1	v_m	1.50×10^{-1}	0.132	0.009
1-2	v_l	$1.11 \times 10^{-16*}$	−0.662	0.434
1-3	F_m	$1.45 \times 10^{-14*}$	0.627	0.388
1-4	$F_m v_m^2$	$1.60 \times 10^{-2*}$	0.219	0.040
1-5	$F_m v_l^2$	8.95×10^{-2}	0.155	0.016

注：v_m表示横纹应力波速均值，v_l表示顺纹应力波速，F_m表示微钻阻力均值。*代表0.05水平下显著相关。下同。Notes: v_m is the mean value of transverse stress wave velocity, v_l is the longitudinal stress wave velocity, F_m is the mean value of micro drilling resistance. The symbol * represents a significant correlation at the 0.05 level. The same below.

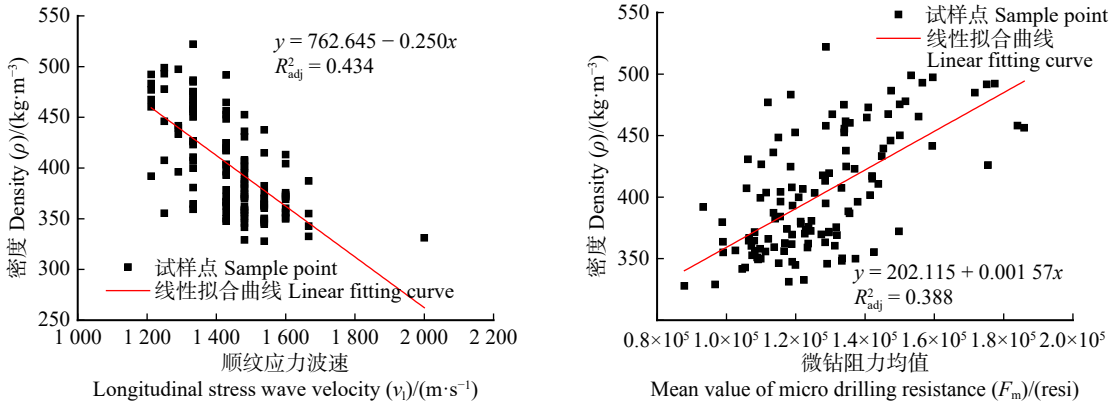


图 6　NDT 指标与木材密度一元线性拟合结果

Fig. 6　Unary linear fitting results between wood density and NDT index

表 2　NDT 指标与木材密度多元线性相关性

Tab. 2　Linear correlations between wood density and multiple NDT indexes

对比组序号 Comparison group No.	自变量 Independent variable	P	r	R^2_{adj}
2-1	v_l, v_m	$1.22 \times 10^{-15*}$	0.665	0.432
2-2	F_m, v_l	0.00^*	0.765	0.578
2-3	v_l, $F_m v_m^2$	$2.22 \times 10^{-16*}$	0.675	0.447
2-4	v_l, $F_m v_l^2$	0.00^*	0.763	0.575
2-5	F_m, v_m	$1.57 \times 10^{-13*}$	0.627	0.383
2-6	F_m, $F_m v_m^2$	$1.59 \times 10^{-13*}$	0.627	0.383
2-7	F_m, $F_m v_l^2$	0.00^*	0.762	0.573
2-8	v_m, $F_m v_m^2$	$5.28 \times 10^{-13*}$	0.617	0.370
2-9	v_m, $F_m v_l^2$	7.39×10^{-2}	0.208	0.027
2-10	$F_m v_m^2$, $F_m v_l^2$	$5.36 \times 10^{-3*}$	0.291	0.069
2-11	v_l, v_m, M_C	$1.44 \times 10^{-15*}$	0.678	0.445
2-12	F_m, v_l, M_C	0.00^*	0.787	0.609
2-13	F_m, v_m, v_l, $F_m v_m^2$, $F_m v_l^2$	0.00^*	0.765	0.567

注：M_C为试样含水率。Note: M_C is the moisture content of samples.

提升了 181.74%；相关性仍较差，如表 2 中的对比组 2-10，相关系数仅为 0.291。

（4）当两个与 ρ 均不存在显著相关性的 NDT 指标组合时，组合可能仍然与 ρ 不存在显著相关性，如表 2 中的对比组 2-9。

对比 2-11、2-1 以及对比 2-12、2-2 可知，在相关系数较高的二元模型基础上，增加含水率指标，并不能显著提升其相关性。此外，对比组 2-13 虽然是五元模型，但其与 ρ 的相关系数也仅与“v_l, F_m”二元模型相等。由此可知，确定合理的 NDT 指标比一味增加指标数量对提高相关系数影响更大。

2.2 NDT 指标与横纹局部抗压强度相关性

木材横纹局部抗压试验的荷载–位移曲线在大变形过程中呈典型的“弹性段—塑性流动段—陡升段”3 段式变化特征[14]。本文讨论的横纹局部抗压强度取弹性段的比例极限抗压强度。

2.2.1 NDT 指标与横纹局部抗压强度一元线性相关性

分别计算 ρ、v_m、v_l、F_m、$F_m v_l^2$、$F_m v_m^2$、ρv_m^2、ρv_l^2 与横纹局部抗压强度 f_{lc} 的相关系数，并列于表 3。其中横纹一维应力波速和微钻阻力指标均测试了试样的两个部位，作为对比，表中列出了这两类 NDT 指标的二元相关性结果。

一元模型中，ρ 与 f_{lc} 的相关系数最高，为 0.687（表 3），但密度并非 NDT 指标，实际检测中一般作为被预测参数。一元 NDT 指标中，F_m 与 f_{lc} 相关系数最高，为 0.526。v_m、v_l 与 f_{lc} 均成负相关，相关系数分别为−0.498 和−0.471。$F_m v_m^2$、ρv_m^2 与 f_{lc} 同样成负相关，但相关性较差，相关系数仅为−0.194 和−0.183；$F_m v_l^2$、ρv_l^2 与 f_{lc} 则不存在显著相关性。除此之外，对比组 3-4、3-5 以及对比组 3-7、3-8 显示，当 NDT 指标相同时，二元模型与一元均值模型的相关系数相近。相关系数较高的 ρ、F_m、v_m、v_l 与 f_{lc} 的线性拟合结果见图 7。

表 3 NDT 指标与横纹抗压强度一元线性相关性

Tab. 3 Unary linear correlations between local compressive strength perpendicular to grain and NDT index

对比组序号 Comparison group No.	自变量 Independent variable	P	r	R^2_{adj}
3-1	ρ	$3.12\times10^{-18*}$	0.687	0.468
3-2	ρv_l^2	6.68×10^{-1}	−0.039	−0.007
3-3	ρv_m^2	$4.49\times10^{-2*}$	−0.183	0.025
3-4	v_m	$6.21\times10^{-9*}$	−0.498	0.242
3-5	v_i, v_{ii}	$2.38\times10^{-8*}$	−0.507	0.245
3-6	v_l	$4.80\times10^{-8*}$	−0.471	0.216
3-7	F_m	$5.76\times10^{-10*}$	0.526	0.271
3-8	F_i, F_{ii}	$8.27\times10^{-10*}$	0.546	0.287
3-9	$F_m v_l^2$	5.90×10^{-1}	−0.049	−0.006
3-10	$F_m v_m^2$	$3.35\times10^{-2*}$	−0.194	0.029

注：v_i，v_{ii} 和 F_i，F_{ii} 分别为两个不同测试点的应力波速测试结果和微钻阻力测试结果。Notes: v_i, v_{ii} and F_i, F_{ii} are the stress wave velocity test results and micro drilling resistance test results for two different measurement points.

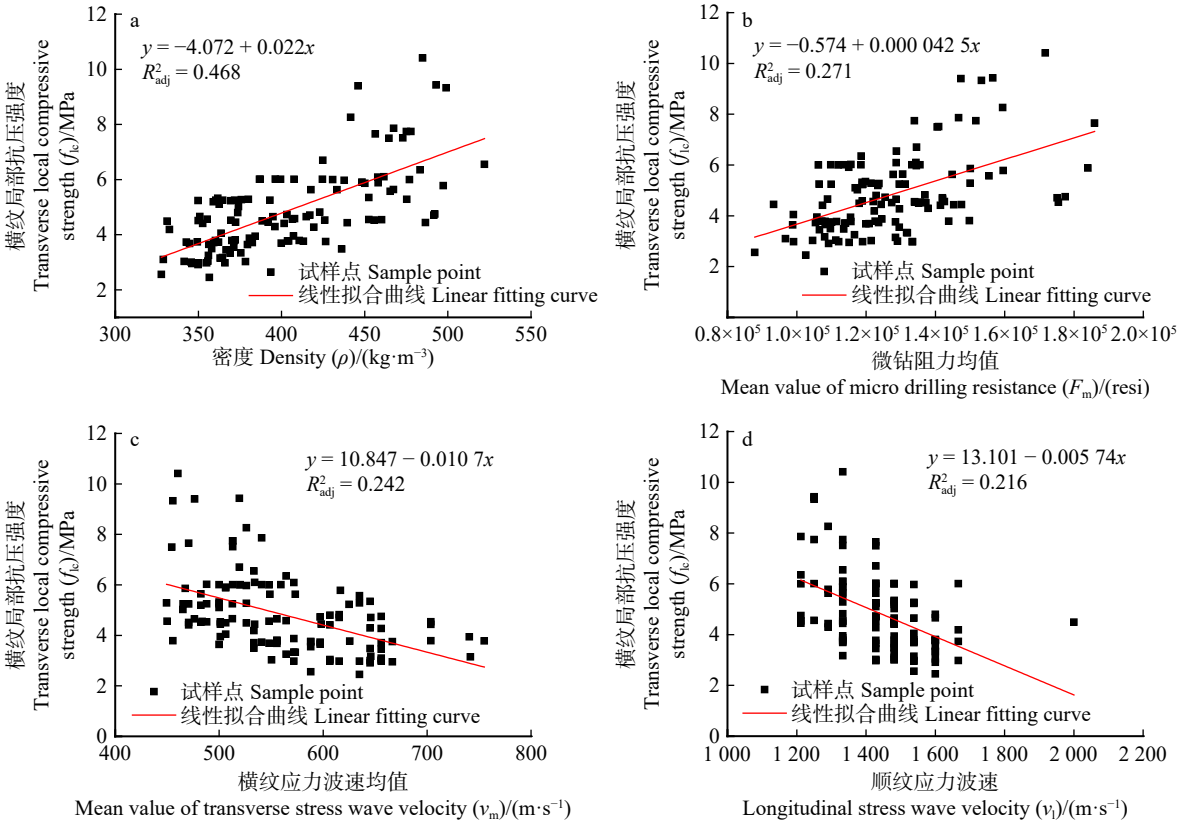


图 7 密度及 NDT 指标与横纹局部抗压强度一元线性拟合结果

Fig. 7 Unary linear fitting results of local transverse compressive strength and NDT index and wood density

2.2.2　NDT 指标与横纹局部抗压强度多元线性相关性

由于结构中木材的密度参数并非 NDT 指标，因此后文讨论两类及多类 NDT 指标与 f_{lc} 的相关性时，不考虑密度参数，结果分别示于表 4 和表 5。

表 4　NDT 指标与横纹局部抗压强度二元线性相关性分析

Tab. 4　Linear correlations between local transverse compressive strength and two NDT indexes

对比组序号 Comparison group No.	自变量 Independent variable	P	r	R^2_{adj}
4-1	F_m, v_m	$8.88\times10^{-16*}$	0.667	0.435
4-2	F_m, v_l	$7.37\times10^{-12*}$	0.594	0.341
4-3	F_m, $F_m v_m^2$	$4.44\times10^{-16*}$	0.671	0.441
4-4	F_m, $F_m v_l^2$	$7.20\times10^{-12*}$	0.594	0.342
4-5	v_m, v_l	$8.10\times10^{-15*}$	0.650	0.413
4-6	v_m, $F_m v_m^2$	$1.68\times10^{-14*}$	0.645	0.406
4-7	v_m, $F_m v_l^2$	$3.38\times10^{-8*}$	0.503	0.240
4-8	v_l, $F_m v_m^2$	$1.84\times10^{-9*}$	0.537	0.277
4-9	v_l, $F_m v_l^2$	$1.33\times10^{-11*}$	0.588	0.335
4-10	$F_m v_m^2$, $F_m v_l^2$	1.03×10^{-1}	0.194	0.021

表 5　NDT 指标与横纹局部抗压强度的多元线性相关性分析

Tab. 5　Linear correlations between local transverse compressive strength and multiple NDT indexes

对比组序号 Comparison group No.	自变量 Independent variable	P	r	R^2_{adj}
5-1	F_m, v_m, v_l	0.00*	0.715	0.499
5-2	v_m, v_l, $F_m v_m^2$	0.00*	0.700	0.477
5-3	v_m, v_l, $F_m v_l^2$	0.00*	0.710	0.492
5-4	F_m, v_m, $F_m v_m^2$	$3.55\times10^{-15*}$	0.671	0.436
5-5	F_m, v_m, $F_m v_l^2$	0.00*	0.717	0.501
5-6	F_m, v_l, $F_m v_m^2$	0.00*	0.721	0.507
5-7	F_m, v_l, $F_m v_l^2$	$4.58\times10^{-11*}$	0.594	0.336
5-8	v_m, $F_m v_m^2$, $F_m v_l^2$	$4.44\times10^{-16*}$	0.686	0.456
5-9	v_l, $F_m v_m^2$, $F_m v_l^2$	0.00*	0.710	0.492
5-10	F_m, $F_m v_m^2$, $F_m v_l^2$	0.00*	0.722	0.509
5-11	F_m, v_m, v_l, $F_m v_m^2$	0.00*	0.722	0.505
5-12	F_m, v_m, v_l, $F_m v_l^2$	0.00*	0.717	0.497
5-13	v_m, v_l, $F_m v_m^2$, $F_m v_l^2$	$1.11\times10^{-16*}$	0.711	0.488
5-14	F_m, v_m, $F_m v_m^2$, $F_m v_l^2$	0.00*	0.723	0.507
5-15	F_m, v_l, $F_m v_m^2$, $F_m v_l^2$	0.00*	0.722	0.505
5-16	F_m, v_m, v_l, $F_m v_m^2$, $F_m v_l^2$	0.00*	0.723	0.503

表 4 显示：在 F_m 一元模型（$r=0.526$）的基础上增加不同类型的 NDT 指标后，“F_m, $F_m v_m^2$”二元模型与 f_{lc} 的相关系数最高，为 0.671，较 F_m 一元模型提升 27.57%，具有近似提升效果的是“F_m, v_m”二元模型，如对比组 4-1 和 4-3。类似的，“F_m, $F_m v_l^2$”二元模型和“F_m, v_l”二元模型与 f_{lc} 的相关系数也十分相近，如对比组 4-2 和 4-4。由此可见，当两组 NDT 指标中的基本指标（例如 F_m, v_l, v_m）构成一致时，即便基本指标的形式存在差异，两组 NDT 指标与被预测参数的相关系数也近似。其余两个 NDT 指标的组合类似于 2.1.2 节讨论的情形。

3 个 NDT 指标的组合中，对比组 5-6、5-10 的相关系数较高，分别为 0.721 和 0.722（表 5），较最优的二元 NDT 指标组合“F_m, $F_m v_m^2$”提升约 7.5%。两者均是在最优二元 NDT 指标组合的基础上补充了 v_l 指标后出现的提升。作为对比，当补充一项原有的 NDT 指标时，相关系数并不会出现明显变化，例如对比组 5-4。同理也可分析出表 5 中其他 NDT 指标组合与 f_{lc} 的相关系数提升与否的原因。

此外，由表 5 的对比组 5-1 可见，基本 NDT 指标组合与 f_{lc} 的相关系数已相对较大，在此基础上补充由基本 NDT 指标构成的新指标（例如 $F_m v_m^2$, $F_m v_l^2$）时，相关系数虽有提升，但升幅极小。

3　结　　论

本文针对木材横纹抗压试样开展了物理力学测试和无损检测，并就无损检测指标与木材密度和横纹抗压强度的线性相关性开展了系列讨论，得到以下结论。

（1）使用单一 NDT 指标预测木材密度时，建议使用 v_l，两者相关系数绝对值为 0.662，补充 F_m 后可提高 15.56%，达到 0.765；使用单一 NDT 指标预测木材横纹局部抗压强度时，建议使用 F_m，两者相关系数为 0.526，在此基础上补充 v_m 可使相关系数提升 26.80%，达到 0.667；进一步补充 v_l 后相关系数继续提升 7.20%，达到 0.715。综合考虑相关系数提升效果以及由此可能增加的测试工作量，预测木材密度和横纹局部抗压强度时建议分别使用“v_l, F_m”和“F_m, v_m”的 NDT 指标组合。

（2）当两组 NDT 指标中的基本指标（例如 F_m, v_l, v_m）构成一致时，即便基本指标的形式存在差异（例如 $F_m v_m^2$ 和 v_l, $F_m v_l^2$ 和 v_m），两组 NDT 指标与被预测参数的相关系数也近似。

（3）当两个与被预测参数相关性较好的 NDT 指标组合时，相关系数可能进一步提高；当相关性较好的指标与较差的指标组合时，相关系数接近于前者；当相关性较差的指标与不相关指标组合时，相关系数可能大幅提升，也可能仍然较低；当两个均不显著相关的指标组合时，组合模型仍不具有显著相关性。由此可知，确定合理的 NDT 指标比一味增加指

标数量对相关系数的提高影响更大。

研究结果表明，仅使用应力波速和微钻阻力两类 NDT 指标时，其与木材横纹局部抗压强度、密度建立的线性回归关系的相关系数不高于 0.723，后续研究有必要考虑引入其他类型 NDT 指标，以提高无损检测技术评估木材横纹局部抗压强度和密度的精度。

参 考 文 献

[1] 段新芳, 李玉栋, 王平. 无损检测技术在木材保护中的应用 [J]. 木材工业, 2002, 16(5): 14−16.
Duan X F, Li Y D, Wang P. Review of NDE technology as applied to wood preservation[J]. China Wood Industry, 2002, 16(5): 14−16.

[2] 孙燕良, 张厚江, 朱磊, 等. 木构件材料力学性能快速检测研究 [J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 245−248.
Sun Y L, Zhang H J, Zhu L, et al. Rapid test on mechanical properties of wooden components[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(2): 245−248.

[3] 黄荣凤, 王晓欢, 李华, 等. 古建筑木材内部腐朽状况阻力仪检测结果的定量分析 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(6): 167−171.
Huang R F, Wang X H, Li H, et al. Quantitative analysis on the detected results by resistograph on inside wood decay of ancient architecture[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(6): 167−171.

[4] 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.
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.

[5] 朱磊. 基于应力波的古建筑木构件材料力学性能检测技术研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
Zhu L. Determination the mechanical properties of ancient architectural timber with stress waves[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.

[6] Calderoni C, Matteis G D, Giubileo C, et al. Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements[J]. Engineering Structures, 2010, 32(2): 442−448.

[7] 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.

[8] Zhang J, Xu Q F, Xu Y X, et al. Research on residual bending capacities of used wood members based on the correlation between non-destructive testing results and the mechanical properties of wood[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2015, 16(7): 541−550.

[9] Faggiano B, Grippa M R, Calderoni B. Non-destructive tests and bending tests on chestnut structural timber[J]. Advanced Materials Research, 2013, 778(4): 167−174.

[10] Faggiano B, Grippa M R, Marzo A, et al. Experimental study for non-destructive mechanical evaluation of ancient chestnut timber[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2011, 1(4): 103−112.

[11] Faggiano B, Marzo A. A method for the determination of the timber density through the statistical assessment of ND transverse measurements aimed at in situ mechanical identification of existing timber structures[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101(6): 1235−1240.

[12] 杨娜, 王忠铖, 常鹏. 藏青杨旧材无疵试样力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11): 168−176.
Yang N, Wang Z C, Chang P. Experimental study on mechanical properties of small clear specimens of aged Tibetan *Populus cathayana*[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(11): 168−176.

[13] 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.

[14] 王忠铖, 杨娜. 多测点无损检测法评估古建木材抗弯强度 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49(1): 78−84.
Wang Z C, Yang N. Evaluation of bending strength of ancient building wood by multi-point nondestructive testing method[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(1): 78−84.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 李文彬）