



林业工程学报
Journal of Forestry Engineering
ISSN 2096-1359, CN 32-1862/S

《林业工程学报》网络首发论文

题目：基于超声波声速评估木结构中金属钉锈蚀状态及抗弯能力
作者：王芸，雷珈，金辰阳，金苞蕾，阙泽利
DOI：10.13360/j.issn.2096-1359.202512013
收稿日期：2025-12-18
网络首发日期：2026-09-18
引用格式：王芸，雷珈，金辰阳，金苞蕾，阙泽利. 基于超声波声速评估木结构中金属钉锈蚀状态及抗弯能力[J/OL]. 林业工程学报.
<https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202512013>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

林业工程学报, 2026, 11
Journal of Forestry Engineering
DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.202512013

基于超声波声速评估木结构中金属 钉锈蚀状态及抗弯能力

王芸, 雷珈, 金辰阳, 金苞蕾, 阙泽利*

(南京林业大学材料科学与工程学院, 南京 210037)

摘要:采用超声波声速法,对木结构中金属钉的锈蚀程度及其剩余抗弯强度开展检测与评估分析。通过对钉入深度分别为 40 和 50 mm 的铁钉进行多轮干湿循环处理,系统测定不同锈蚀状态下的超声波声速与抗弯强度。声速测量采用直接法、半直接法和间接法 3 种方法。结果表明:金属钉锈蚀过程中,超声波声速测量方法不同,声速的下降趋势和速率不同,但在质量残存率为 95.1% 时出现明显转折点,此后声速短暂回升再下降;金属钉的抗弯强度呈现“先微升后波动下降”的变化趋势,在质量残存率 98.0% 以上出现小幅上升(最大增幅 5.84%),随后下降(最大降幅 6.82%)。声速测量方法的选择受钉入深度影响,不同测量方法的声速变化范围可用于评估钉锈蚀程度:钉未完全钉入,应优先选择测量结果最稳定的直接法,次之间接法,两者所获声速均随锈蚀程度增加而呈下降趋势;钉完全钉入,优先选择间接法评估钉的生锈等级,辅以半直接法评估钉的抗弯强度。因此,在实际工程中,应根据具体检测需求选择合适的声速测量方法,根据声速的变化评估钉的生锈等级,再估计其抗弯性能。

关键词:超声波;声速;金属钉;抗弯能力;锈蚀程度

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 2096-1359(2026)0-0000-10

Evaluation of corrosion status and flexural capacity of metal nails in timber structures based on ultrasonic wave velocity

WANG Yun, LEI Jia, JIN Chenyang, JIN Baolei, QUE Zeli*

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: This study focused on the hidden corrosion of metal nails in timber structures, which led to a reduction in bending resistance. A quantitative relationship among nail corrosion degree, ultrasonic wave velocity, and residual bending resistance was established, and optimal measurement methods were recommended for different nail penetration depths. In the experiments, iron nails were driven into spruce, pine, and fir (SPF) timber at depths of 40 and 50 mm. Accelerated corrosion was induced by wet-dry cycles (soaking in a mixed solution of 1.0% NaCl and 0.5% acetic acid, followed by air drying). After 1, 3, 5, 7, 10, 13, 16, and 18 cycles, ultrasonic wave velocities were measured using direct, semi-direct, and indirect methods. The nails were then extracted, derusted, and subjected to three-point bending tests. The mass retention rate (C_i) and corrosion grade (0-5) were recorded. The ultrasonic wave velocity generally decreased with increasing corrosion. A turning point was observed at a mass retention rate of approximately 95.1%; below this threshold, the velocity initially increased slightly before declining again. The direct method gave the most stable measurements (coefficient of variation <10%). The indirect method showed the best correlation with changes in bending resistance. The bending resistance initially increased slightly (up to 5.84% at mass retention rate of approximately 98.0%), which can be attributed to a dense rust layer filling surface micro-cracks. It then decreased (reaching a maximum reduction of 6.82% at mass retention rate of approximately 95.1%), due to rust spalling and cross-section loss. The choice of measurement method depended on nail penetration depth. At a depth of 40 mm (nail not fully embedded), the direct method was preferred for corrosion assessment, followed by the indirect method. At a depth of 50 mm (fully embedded), the indirect method was most suitable for grading corrosion, supplemented by the semi-direct method for evaluating the bending strength. The velocity change ratio (corroded velocity/intact velocity) is recommended for field applications to reduce the influence of testing

收稿日期: 2025-12-18

修回日期: 2026-03-02

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划 (KYCX22-1080)。

作者简介: 王芸, 女, 研究方向为木结构建筑。通信作者: 阙泽利, 男, 教授。E-mail: zeliqie@njfu.edu.cn

conditions. In summary, ultrasonic wave velocity can effectively characterize the corrosion status of nails. By selecting an appropriate measurement method according to penetration depth and adopting the velocity change ratio, a non-destructive evaluation framework can be established to estimate corrosion grade and residual bending resistance, providing a practical tool for safety assessment of timber structures.

Keywords: ultrasonic wave; sound velocity; nail; bending resistance; degree of corrosion

在环保和可持续发展的趋势下,木结构因其低碳排放、生态友好特性及良好的建筑美学外观,已广泛应用于住宅、商业建筑及桥梁等领域中^[1-2]。金属钉作为木结构中的关键连接件,其性能直接影响结构的整体稳定性与承载能力。然而,在高盐雾的沿海地区或长期潮湿环境中,金属钉易发生锈蚀,导致其截面尺寸减小及力学性能退化^[3]。由于锈蚀过程通常具有隐蔽性,难以通过常规目视及时发现其潜在危害可能随使用年限延长而累积,严重影响木结构的长期耐久性与安全性,同时增加维护成本。

当前,无损检测技术已在木构件缺陷识别、物理力学性能评估^[4-6]、节点性能分析^[7]以及材料劣化检测^[8]等方面得到广泛应用,且多采用多参数融合的研究方法。相比之下,针对木结构中连接件锈蚀状态的无损检测研究仍相对有限,且评价指标较为单一。相关研究表明,木材腐朽程度与金属连接件腐蚀程度之间相关性并不显著^[9],这进一步凸显了开展相关检测研究的必要性。在金属钉锈蚀对其力学性能影响的研究中,现有方法主要包括两类:一是通过加速腐蚀试验获取不同锈蚀程度的钉样^[10];二是从在役木结构中截取锈蚀钉样,进行抗拔、剪切等破坏性试验^[11]。例如,今村浩人等^[12]根据钉的表面锈蚀面积和形态完整性,对从木结构中截取的锈蚀钉样进行分类,建立了锈蚀程度评估表。然而,上述方法往往导致试件损毁或对原有结构造成破坏,限制了其在实际工程中的应用推广。为克服这一局限,学者们开始探索采用无损检测手段评估木结构中金属钉的锈蚀状态。例如,石山央樹^[13]通过测量金属钉的导电性发现,当钉的锈蚀程度达到3~4度时,钉体显示出绝缘性;而未生锈或劣化度在2~3的钉则具有较高的导电性。行夏樹等^[14]通过超声波法测量锈蚀钉的声速变化发现,钉质量残余率每下降1%,直接法测得声速上升约16.0 m/s、半直接法上升约22.0 m/s、间接法上升约4.8 m/s。関根亮太等^[15]同样比较了不同超声传播方式的测量效果,结果显示直接法的测试时间稳定性好,测得结果偏差较小;而半直接法测得的传播时间有所缩短。石山央樹^[16]结合超声波声速与振动法评估钉的锈蚀量,结果表明钉

锈蚀量越多,超声波传播时间越长(即传播速度越慢),而试件的敲击振动频率与钉锈蚀程度之间并未呈现明显相关性。Yermán 等^[10]则利用衰减全反射傅里叶变换红外光谱仪分析了钉腐蚀对木材细胞壁聚合物的影响,未观察到木材结构的显著变化。

当前研究多聚焦于锈蚀状态的单一评估,较少涉及金属钉锈蚀程度与其自身抗弯能力的关联分析。在众多无损检测技术中,如目视、超声、射线、涡流、磁粉、声发射、渗透与泄漏检测等^[17-19],超声波法因其对微小损伤敏感、操作便捷且适用于多种场景,成为本研究的首选方法。

现有基于超声波的检测研究大多仅单一评估木结构金属钉的锈蚀状态,未关联其抗弯强度,也未明确不同测量方法在不同锈蚀阶段、钉入深度下的适配性,缺乏工程应用的检测依据。为此,本研究旨在构建“锈蚀程度-超声波声速-抗弯强度”三者间的关联体系,明确不同场景下的最优测量方法,提出可用于工程判别的声速参考阈值,探索钉锈蚀状态与剩余抗弯能力的同步无损评估方法,期为木结构的安全评估与寿命预测提供技术依据,推动该技术在木结构工程实践中的应用。

1 材料与方法

1.1 材料和试件制备

本研究所用金属钉为低碳圆钢钉[规格2.5 mm(直径)×50 mm(长)],购自钉固钉业(上海)有限公司。木材试件采用国产二级SPF(云杉-松木-冷杉),购自江苏森之虎建筑工程有限公司,尺寸为38 mm×89 mm×3 050 mm。参考GB/T 1927.5—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第5部分:密度测定》和GB/T 1927.4—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第4部分:含水率测定》,测得SPF的平均密度为 $(0.49 \pm 0.09) \text{ g/cm}^3$,平均含水率为 $(13.36 \pm 0.30) \%$ 。

将SPF锯切为38 mm×89 mm×300 mm的试件,在距样本端面50 mm处钉入1枚金属钉,钉入深度分别为50和40 mm(试件制备示意图见图1)。所有试件表面均无明显缺棱、裂缝和节子等缺陷,钉的端距和边距均满足GB 50005—2017《木

结构设计标准》的要求。每组深度各制备 54 个试件,分别标记为#50(钉入 50 mm)与#40(钉入 40 mm)。所有试件在制备完成后均经严格筛选,确保测试范围内(超声波传播路径及换能器布置区

域)无裂纹、缺棱等缺陷;后续干湿循环过程中 SPF 端面若产生纵向裂纹,其纵向开裂深度不得超过换能器边缘到端面的最小距离,符合上述条件的试件方可进行后续测试与数据分析。

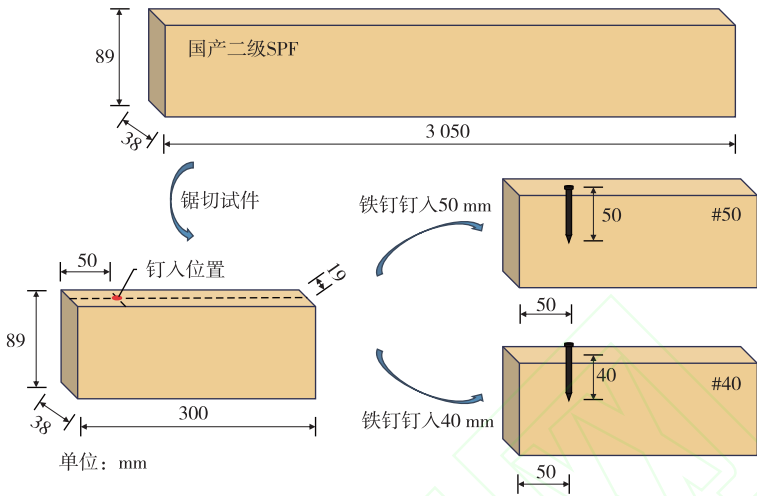


图 1 试件制备示意图
Fig. 1 Schematic diagram of specimen preparation

1.2 钉锈蚀加速处理

为模拟实际环境中金属钉的锈蚀过程,本研究参考盐环境^[20]以及木材中抽提物、水分与有机酸对锈蚀的促进作用^[21],将试件浸入由 1.0%(质量分数,下同)氯化钠与 0.5%乙酸配制的混合溶液,对试件进行加速锈蚀处理。试验于南京地区 9 月中旬至 12 月中旬开展,混合溶液温度随环境自然变化,与当地同期自然水环境温度一致。同时,采用干湿循环方式模拟木构件在实际使用中经历的“受潮-干燥”交替过程。单次循环流程包括:将试件完全浸泡于混合溶液中(70±5) h,使其含水率达 40.0%~50.0%;随后取出置于通风处晾晒(45±

5) h,晾晒期间的温湿度随季节自然波动,未进行人工控制,以使试件含水率降至(13.0±0.5)%。本试验以“目标含水率”作为循环有效性的核心控制指标,每批次试件完成浸泡与晾晒后均实测其含水率,仅当实测值达到上述目标范围时,才判定该次循环有效并进入后续流程,以规避环境波动对锈蚀加速效果的干扰。试件浸泡与晾晒示意图见图 2。每完成 1 次干湿循环,均更换 1 次溶液。分别在 1,3,5,7,10,13,16 和 18 次循环后,各取出 6 个 #50 试件和 6 个 #40 试件,将其含水率平衡至(12.0±1.0)%后,进行超声波声速测量和后续破坏性试验。



图 2 试件浸泡(a)和晾晒(b)示意图
Fig. 2 Schematic diagram of specimen soaking (a) and drying (b)

1.3 超声波声速测量

参考行夏樹等^[14]和関根亮太等^[15]的方法,采用 MC-6310 型非金属超声检测仪进行声速测量。测量前将试件含水率调节至(12.0±1.0)%,并用粒径为 120 μm(120 目)的砂纸对测点进行打磨处理,确保表面平整无毛刺。测量时环境温度控制在 20 ℃。测量方式包括直接法(超声波传播信号垂

直穿透钉身)、半直接法(信号斜穿钉木界面)与间接法(信号平行木材纤维),沿试件长度方向每间隔 50 mm 设置 1 个测点,最大测距为 200 mm。其中,直接法和半直接法的测点为 5 个,间接法的测点为 4 个(以#40 试件为例,测量布置见图 3a~c)。测量过程中,若通过试件的声速信号能稳定捕捉,同试件仅测量 1 次;若声速信号稳定性不足,同试

件重复测量 2~3 次,以稳定采集到的声速数据作为有效数据。另外,测试试件中木材产生端面裂纹的最大开裂范围需小于换能器边缘近端面侧的最

小距离(31 mm),以免对声速测量结果造成干扰。声速测量结束后,从试件中拔出钉,直接测量其声速(图 3d)。

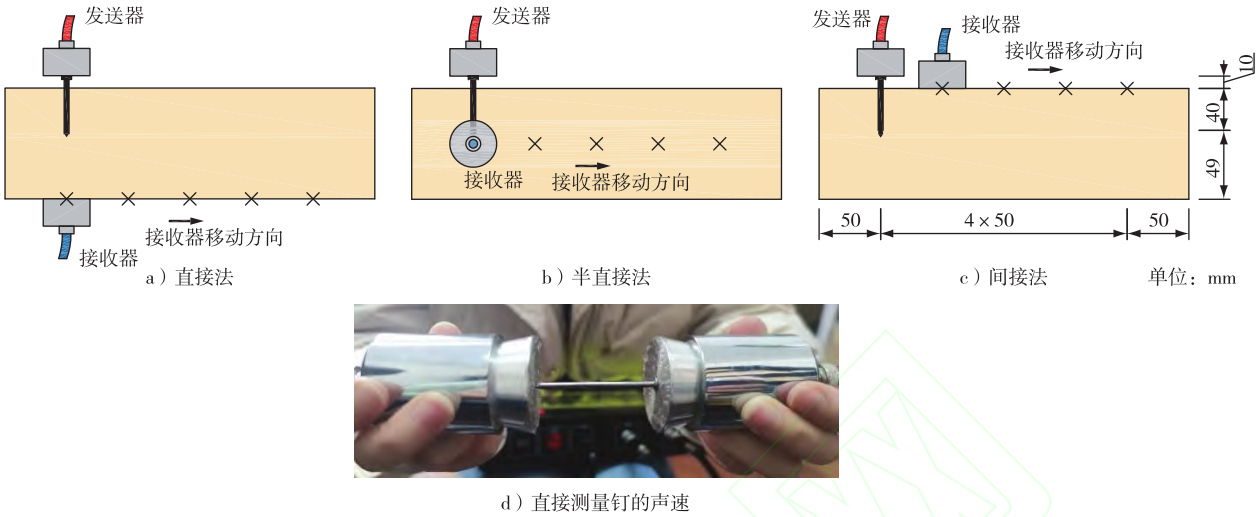


图 3 超声波声速测量方法示意图
Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic sound velocity measurement method

1.4 钉表面除锈处理

声速测量完成后,采用中性除锈剂(Evapo-Rust,美国)对钉表面进行除锈处理^[22]。除锈可剥离表面锈层对钉体本征性能测试的干扰,精准评估钉体本身因锈蚀导致的退化程度。具体步骤如下:用海绵初步清除钉表面附着的腐蚀产物;将钉浸入盛有中性除锈剂的玻璃烧杯中,静置 1.5~2.0 h,直至锈层完全消除;迅速用清水冲洗并立即干燥;待钉冷却到室温后,使用精度为 0.001 g 的电子天平称得质量。

1.5 钉锈蚀程度评价

依据今村浩人等^[12]建立的锈蚀等级评估表,根据钉表面锈蚀面积、形状变化及缺损情况,将锈蚀程度分为 0~5 级,级间以 0.5 级为间隔,具体分级标准见表 1。

表 1 钉锈蚀评估标准	
Table 1 Nail corrosion assessment criteria	
生锈等级	锈蚀状态描述
0	未锈蚀,表面光滑
1	轻微锈蚀,锈点散布
2	表面部分生锈,无明显损伤
3	表面锈蚀明显,内部仍完整
4	局部损坏,长度基本保持
5	形状缺损

为量化锈蚀程度,引入质量残存率 C_i 与质量损失率 L_i 作为辅助评价指标,二者计算公式如下:

$$C_i = \frac{m_i}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

$$L_i = 1 - C_i \tag{2}$$

式中: m_0 为未锈蚀钉初始质量; m_i 为第 i 次循环后钉的质量; i 为循环次数,本研究中取 0,1,3,5,7,10,13,16,18。

1.6 抗弯试验

除锈后的钉参照 LY/T 3140—2019《木结构销类紧固件屈服弯矩试验方法》,在万能力学试验机(UTM4304,最大载荷 30 kN)上进行三点弯曲试验。支座跨距设为 40 mm,加载速率控制为 1 mm/min。试验加载示意图见图 4。



图 4 钉抗弯试验加载示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the nail bending test loading

2 结果与分析

2.1 钉锈蚀现象与分析

金属钉在大气环境中的腐蚀行为遵循公式(3)^[23]的动力学规律,其中 $n \leq 1$ 。通常,铁钉在空气中会因铁锈钝化膜的形成而使腐蚀速率随时间

延长而下降。然而,在木材环境中,有机酸对锈层的溶解作用抑制了钝化膜的形成与稳定,腐蚀过程常表现为“线性质量损失”特征,即 $n \approx 1$, 腐蚀速率相对恒定^[24]。本研究采用干湿循环进行加速腐蚀,若将单次循环(包括浸泡与晾晒过程)时间简化为 5 d,铁钉质量变化(锈蚀量)与时间之间呈现出良好的线性关系(图 5),与上述木材环境中金属的腐蚀规律相吻合,表明本研究所采用的混合溶液加速锈蚀方法能够有效模拟实际工况。

$$\Delta W = Kt^n \tag{3}$$

式中: ΔW 为质量变化; K 为 1 年腐蚀速率; t 为以年为单位的时间; n 为控制动力学指数。

各循环周期下钉的宏观锈蚀形貌见图 6。需要说明的是,每周期钉入深度 40 和 50 mm 的试件各 6 个,共 12 个。由于钉入 50 mm 的钉在剖开木材取钉时,锯切过程易造成部分钉体缺损,因此图 6 仅展示了其中 10 个外观完整的钉(两种深度均有)。所有钉的超声波声速均在取出前测量完毕,故钉体后期缺损不影响声速数据。两种钉入深度下钉的锈蚀形貌演变规律无明显差异,图 6 足以反映锈蚀进程的总体特征。根据钉在锈蚀过程中的外观形貌变化,结合表 1,将钉的锈蚀进程划分为具体的生锈等级。0 级即钉未进行锈蚀处理时的原始状态,此时铁钉表面呈均匀金属光泽,光滑且

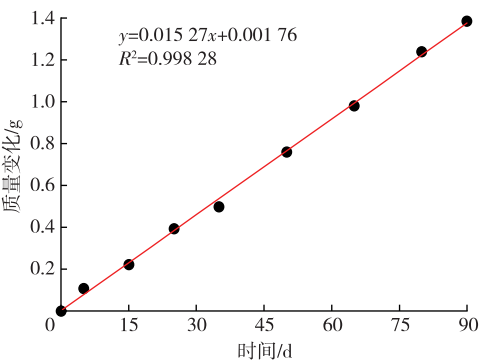


图 5 铁钉质量变化与时间的关系
Fig. 5 Relationship between the mass change of the nail and time

无任何氧化痕迹。在 1~3 次干湿循环期间,钉的生锈等级增加到 1~1.5 级,锈迹从“点状分散”向“局部连片”演变,钉质量损失约为 1%。锈蚀处理增加至 5~10 次,钉锈蚀达到 2~2.5 级,锈迹范围大幅扩展,从“裸露部分”向“未裸露部分”蔓延,质量损失为 2%~4%。当循环次数达 13 次及以上,钉的生锈等级突破 3 级,此阶段锈层全面覆盖、锈层脱落及钉体结构破损,质量损失大于 5%。钉在锈蚀过程中每阶段具体的锈蚀形态、质量损失和生锈等级评估见表 2。值得注意的是,自第 10 次循环起,部分铁钉出现弯曲变形,标志锈蚀从“表面氧化”向“结构失效”发展。



图 6 各周期钉锈蚀图
Fig. 6 Corrosion diagrams of nails in different cycles

表 2 各周期钉锈蚀描述、等级分类及质量残存率

Table 2 Description, grade classification, and mass retention rates of nail corrosion in each cycle

周期	锈蚀描述	生锈等级	m_0/g	m_i/g	$C_i/\%$
0	未生锈,表面光滑,裸露的金属光泽。	0	—	—	100.0
1	微锈蚀,钉身散布锈点,光泽减弱;裸露部分和钉身锈迹呈黄棕色。	1	19.959	19.851	99.5
3	微锈蚀,钉身锈蚀部分连片,光泽趋于黑色;裸露部分锈迹出现红褐色。	1.5	19.983	19.760	98.9
5	裸露部分出现明显的红褐色锈蚀;钉尖部分呈红褐色。	2	20.148	19.755	98.0
7	裸露部分红褐色锈迹向未裸露部分漫延;钉身基本被锈迹覆盖,呈红棕色。	2	20.069	19.570	97.5
10	裸露部分红褐色锈迹向未裸露部分漫延;部分钉表面基本覆盖红褐色锈迹,个别钉的钉身弯曲。	2.5	20.001	19.241	96.2
13	钉身大面积覆盖红褐色、红棕色锈迹;裸露部分红褐色锈迹出现脱落。	3	19.999	19.018	95.1
16	钉身整体覆盖红褐色(为主)、红棕色锈迹;钉身锈蚀出现脱落,部分钉的钉身弯曲。	3.5	19.939	18.699	93.8
18	钉整体锈斑轻触可脱落,钉帽出现破损(缺口),个别钉的钉头弯曲。	3.5	20.005	18.620	93.1

注:钉的质量为 10 枚钉之和。

从生锈等级演变趋势来看,其变化呈现“快-慢-快-稳”的阶段特征。在 0~3 次循环期间,每 2 次循环提升锈蚀等级约 0.5 级,属快速起步期;5~10 次循环期间,每 5 次循环提升 0.5 级,进入缓慢提升期;13~16 次循环期间,锈蚀等级提升速度再次加快,每 3 次循环提升 0.5 级;此后增速放缓,进入高锈蚀等级的稳定期。

从质量残存率(C_i)的变化趋势来看,钉锈蚀整体呈“持续下降,前期快、后期缓”的特点。前期(1~5 次循环) C_i 累计下降 2.0%,平均每次循环下降约 0.40%,此阶段锈层较薄,质量损失以表面氧化为主,速率较快。中期(7~13 次循环) C_i 累计下降 2.4%,平均降速约为 0.40%,锈层增厚但未大量脱落,质量损失速率稳定。后期(16~18 次循环) C_i 累计下降 0.7%,平均降速约为 0.35%,因部分锈层在前期已发生脱落,后期质量损失速率略有减缓。

2.2 超声波声速测量

为排除 SPF 试件自身经干湿循环处理后物理性质变化对超声波声速的影响,本研究对未经干湿循环处理(0 周期)和 18 周期干湿循环处理的 SPF 进行声速测量。结果表明,二者的超声波声速分别为 1.493 ± 0.088 和 1.460 ± 0.086 km/s,变化幅度不足 2.2%,远小于锈蚀钉引起的声速变化。因此,后续分析可忽略 SPF 自身变化对声速测量的影响。

2.2.1 锈蚀钉的声速测量

直接测量锈蚀钉超声波声速的结果表明,声速随锈蚀程度增加呈持续下降趋势(图 7)。未锈蚀钉($C_0=100.0\%$)的声速为 4.594 km/s;经 18 次循环锈蚀后($C_{18}=93.1\%$),声速降至 3.908 km/s。这主要源于锈蚀导致的铁钉基体与生成氧化铁锈层在物理特性上的显著差异,且锈蚀过程中产生的微观孔隙降低了材料的整体均匀性与密度,从而影响了超声波的传播速度^[25]。该方法在不同阶段均表现出较高的测量稳定性,所有数据点的变异系数

均低于 6%。

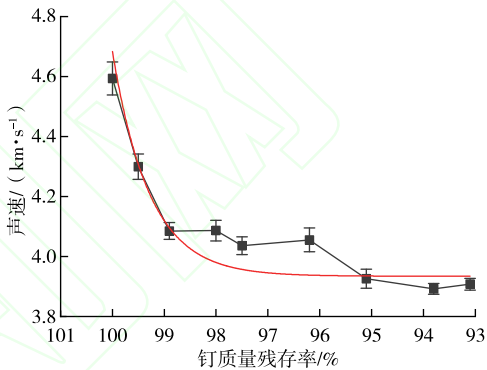


图 7 钉质量残存率与超声波声速的关系
Fig. 7 Relationship between nail mass retention rate and ultrasonic velocity

2.2.2 木构件中锈蚀钉的声速测量

1) 钉入深度 40 mm (#40 试件)。

不同测量方法测得的超声波声速均随钉锈蚀程度加剧呈下降趋势(图 8),但下降趋势和下降速率存在差异。

采用直接法测量(图 8a)时,当质量残存率 C_i 从 100.0%降至 95.1%,声速近似线性下降,质量损失每增加 1%,声速平均下降 0.066 km/s;当 $C_i < 95.1\%$ 时,声速出现一定回升,这可能与锈蚀深入基体并引发钉身变形,从而改变超声波传播路径有关。

采用半直接法测量(图 8b)时,声速变化整体呈现先升后降的趋势。以 C_i 达 98.9%为界点,此前声速由 2.470 km/s 上升至 2.783 km/s,这可能与微锈蚀阶段“钉-木”界面声阻抗匹配的变化有关;此后声速缓慢波动下降至 2.466 km/s。

采用间接法测量(图 8c)时, C_i 从 100.0%降至 95.1%时,声速呈现分段非线性下降规律:在 99.5% 以上,声速下降速率为 0.667 km/s;99.5%~96.2%时,声速呈波动微升趋势,平均速率为 0.031 km/s;小于 96.2%时,声速再次急剧下降,速率为 0.546 km/s。与直接法相似, $C_i < 95.1\%$

时,声速也出现回升现象。值得注意的是, C_i 为 99.5%~96.2%时,声速趋于稳定,表明钉裸露部分的红褐色锈迹未出现脱落时,对邻近木材中超声波传播的影响有限。

从测量稳定性来看,直接法的变异系数最小(<10%),结果最稳定;而间接法在钉未生锈时变异系数最大(25.95%),但锈蚀后稳定性明显提高(3.34%~12.87%)。

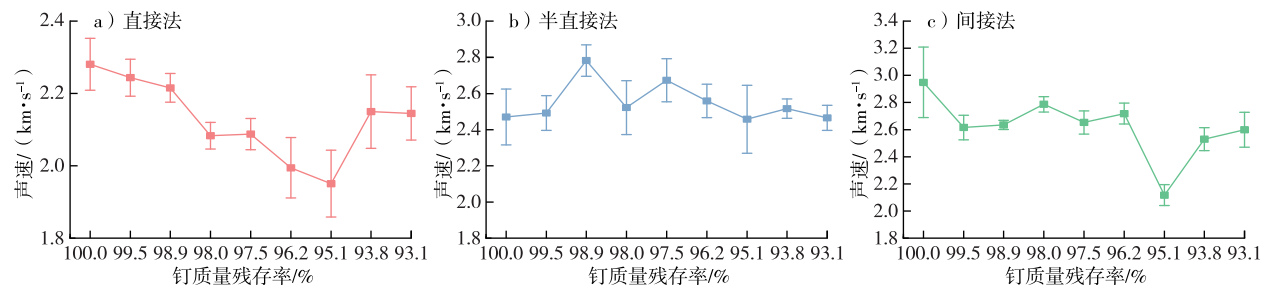


图 8 钉入深度 40 mm 时不同测量方法下超声波声速与锈蚀程度的关系

Fig. 8 Correlation between nail corrosion and ultrasonic velocity at a depth of 40 mm in wood under different corrosion degrees and measurement methods

直接法与间接法(Z-J)、直接法与半直接法(Z-BZ)所获声速之间的差异随锈蚀程度增加整体呈现先增后减的趋势,半直接法与间接法(BZ-J)平均声速差异最小(图 9),但在不同锈蚀阶段差异特征不同。在 C_i 为 98.0%~96.2%的中度锈蚀加速阶段,Z-J、Z-BZ 声速差异达到峰值,绝对值分别超过 0.7 和 0.5 km/s,说明此阶段不同方法对锈蚀损伤的响应分化最明显。BZ-J 则在 C_i 为 100.0%时声速差异最大,超过 0.4 km/s。结果表明,直接法和间接法可用于快速判断钉是否生锈,因为钉一旦发生锈蚀,两者的声速一定会低于未锈蚀钉的声速;而在 $C_i > 95.1\%$ 时,直接法测得声速与钉质量损失近似呈线性负相关,可根据声速下降率判断钉的生锈等级。虽然半直接法测得声速呈波动下降趋势,难以直接用于判断钉的生锈等级,但是可根据与直接法和间接法的声速差异作为验证测量使用。

2) 钉入深度 50 mm (#50 试件)。

与钉入深度 40 mm 时相同,50 mm 时的声速因测量方法不同,其下降趋势和下降速率存在差异(图 10),同样在钉裸露部分形成的红褐色锈迹开

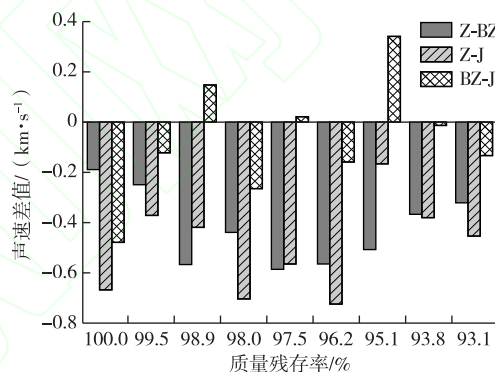


图 9 钉入深度 40 mm 时不同锈蚀程度下各测量方法间的声速差异

Fig. 9 Differences in sound velocity among different measurement methods at a nail penetration depth of 40 mm under different degrees of corrosion

始脱落时(C_i 为 95.1%~93.1%)出现回升。质量残存率超过 95.1%时,直接法测得声速的下降率先快速后平缓波动下降(图 10a),在 C_i 在 99.5%以上最快为 0.385 km/s,之后平均速率为 0.004 km/s;半直接法声速的变化趋势同 40 mm 深度基本一致(图 10b),均以 C_i 为 98.9%为临界点,此前上升,此后波动下降;间接法测量下,当 C_i 超

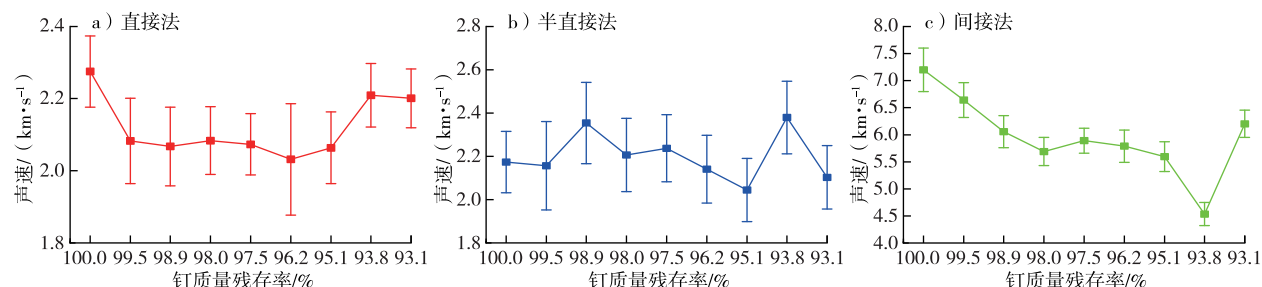


图 10 钉入深度 50 mm 时不同测量方法下超声波声速与锈蚀程度的关系

Fig. 10 Correlation between nail corrosion and ultrasonic velocity at a depth of 50 mm in wood under different corrosion degrees and measurement methods

过 98.0% 时呈线性下降,之后平缓下降(图 10c),下降速率分别为 0.755 和 0.032 km/s。

在测量稳定性方面,直接法依然表现最佳,其变异系数主要在 10% 以内(整体范围为 8%~15%);间接法的稳定性最差,变异系数多集中在 20%~30%(整体范围为 21%~40%)。综合分析表明,锈蚀程度变化并未对测量方法本身的稳定性造成系统性影响。

钉完全钉入木材时,不同方法间的声速差异见图 11。直接法与半直接法的声速差异最小,始终接近 0,最大差异不超过 0.5 km/s ($C_i = 98.9\%$),表明这两种方法的测量结果具有高度一致性,在木材完整、无明显损伤时,这两种方法可等效使用,结果可相互印证。直接法与间接法、半直接法与间接法的声速差异整体随质量残存率降低而降低,但在低残存率(C_i 为 93.1%)时突然增大,两者的最大差异均超过 4.5 km/s,最小差异在 2.0~2.5 km/s。结果表明,钉完全钉入,直接法和间接法可快速判断钉是否生锈;相较于直接法, $C_i > 98.0\%$ 时间接法测得声速与钉质量损失呈线性负相关,因此间接法更适于确定钉的生锈等级;同钉入 40 mm 情况类

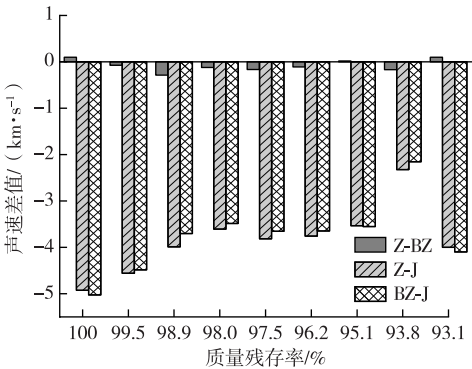


图 11 钉入深度 50 mm 时不同锈蚀程度下各测量方法间的声速差异

Fig. 11 Differences in sound velocity among different measurement methods at a nail penetration depth of 50 mm under different degrees of corrosion

似,半直接法只适用于验证测量。

2.3 锈蚀钉的剩余抗弯强度

钉锈蚀过程中,其自身抗弯强度呈现“先微升、后微降”的波动趋势(图 12、13)。金属钉的质量残存率为 100.0%~96.2%,其生锈等级不大于 2.5 级,形成薄而相对致密的锈层。此阶段锈蚀未破坏钉体结构完整性,反而对钉身表面的加工微裂

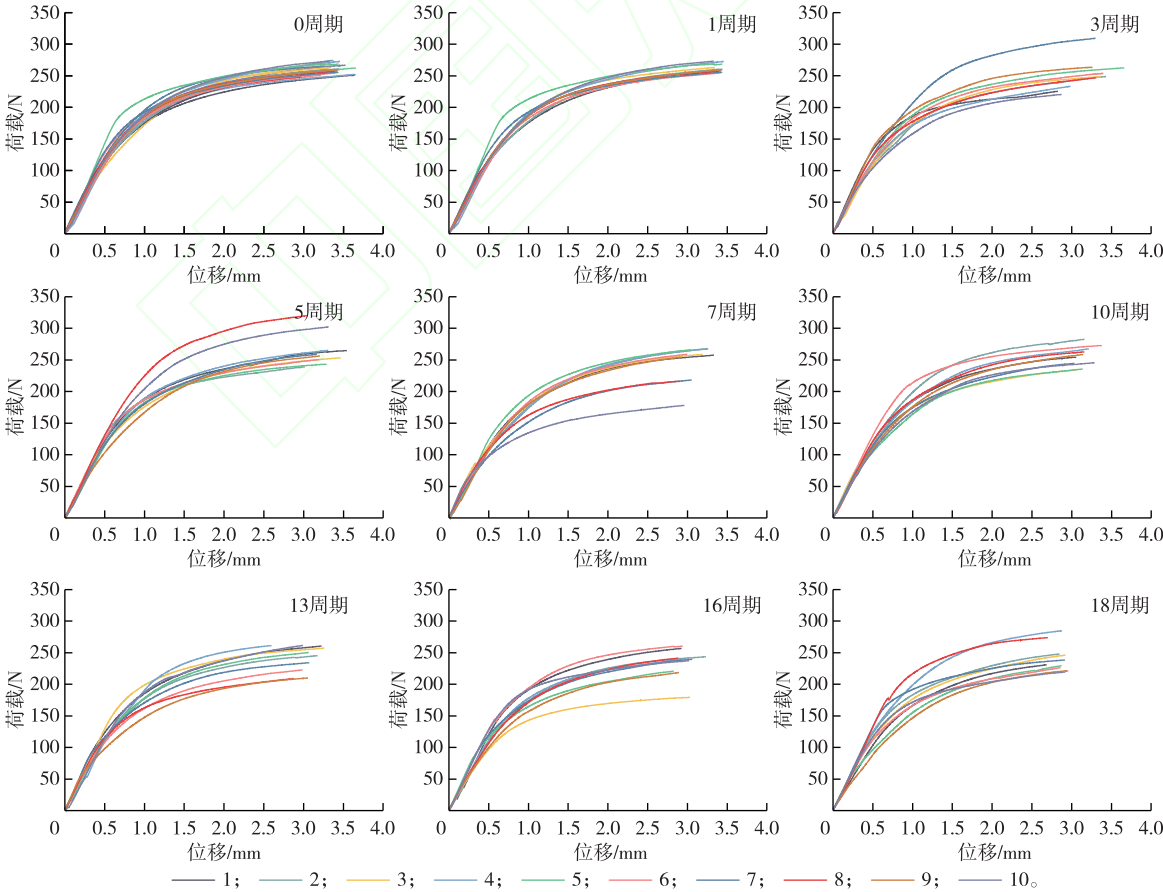


图 12 钉不同锈蚀程度下的载荷-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves of nails under different corrosion degrees

纹等缺陷有“填充钝化”作用,使得抗弯强度略高于未锈蚀状态。随着锈蚀进一步发展,当质量残存率小于 96.2%时,锈层疏松多孔并逐渐脱落,钉体有效截面减小,锈蚀向基体扩展,抗弯强度随锈蚀加剧而降低。

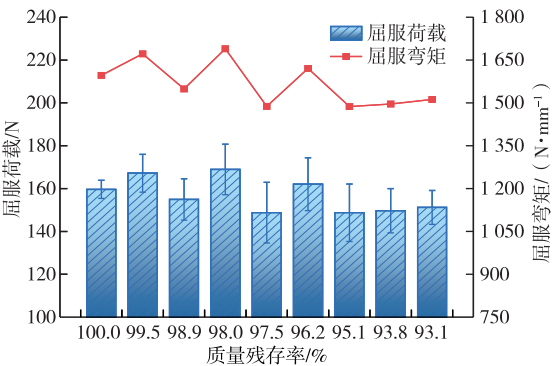


图 13 钉不同锈蚀程度下的屈服荷载和屈服弯矩
Fig. 13 Yield load and yield moment of nails under different degrees of corrosion

虽然铁钉的屈服强度整体随锈蚀程度增大呈先上升再下降的趋势,但波动幅度相对有限。在质量残存率为 98.0%时,屈服荷载达到峰值,较未生锈时高 5.84%;在 18 周期锈蚀最严重时,屈服荷载较未生锈时下降 5.27%。而在质量残存率为 95.1%

(13 周期)时,屈服荷载受锈蚀影响最大,降幅达到 6.82%。这与声速的变化趋势基本一致:在 13 周期左右时声速降至最低,之后略微回升。

2.4 基于声速的钉锈蚀状态与抗弯强度评估方法

不同钉入状态下声速和抗弯强度随锈蚀程度增大的变化趋势见图 14。当钉入深度为 40 mm 时,间接法所获声速与锈蚀钉抗弯强度变化趋势最接近,声速在质量残存率为 98.0%和 96.2%时均出现上升,与屈服荷载波动特征吻合(图 14a)。而当钉入深度为 50 mm 时,半直接法测得的声速变化与抗弯强度的演变趋势更为接近(图 14b)。另外通过 Pearson 相关性分析显示,虽然不同钉入状态下 3 种测量方法所获声速与锈蚀钉抗弯强度的整体相关性呈非显著相关,但是各方法的局部相关性较整体相关性均有明显提高,个别阶段的相关性超过 0.60。因此根据钉是否完全钉入及置换器可达位置,选择相应检测方法,利用声速-锈蚀状态关键节点,可构建一套无需拆解木构件的现场声速-钉锈蚀等级评估对照表(表 3、4),再由评估得到的钉锈蚀等级间接估计锈蚀钉的剩余抗弯能力。考虑到现场测试条件的改变对声速大小的影响,宜用声速的变化率(锈蚀声速/未锈蚀声速)替代声速的大小。

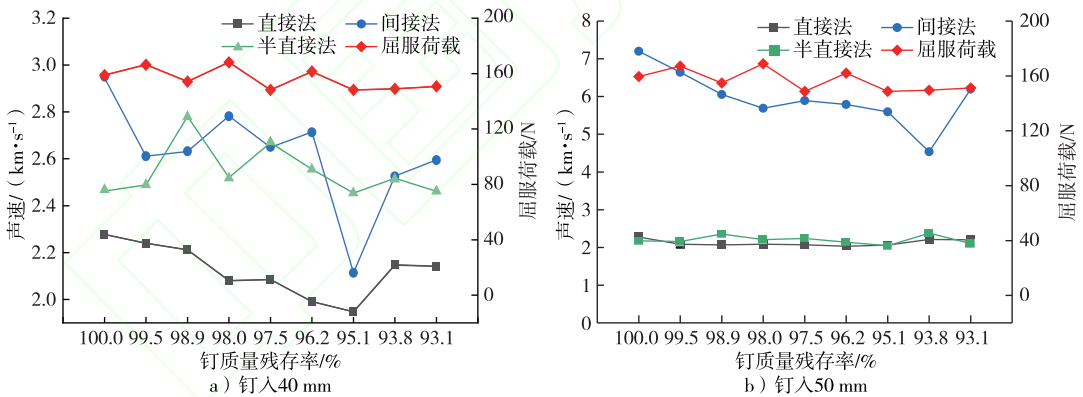


图 14 不同钉入状态下声速和抗弯强度与锈蚀程度的关系
Fig. 14 Relationship between sound velocity and yield strength under different nailing conditions and corrosion degrees

表 3 基于声速的钉生锈等级评估对照表(钉入 40 mm)

Table 3 Speed of sound-based rust level assessment table for nails (driven 40 mm)

测量方法	声速变化率	对应质量残存率 C 及生锈等级
直接法	0.971 ± 0.079 ** ~ 1.000	98.9% < C ≤ 100%, 生锈等级: 0~1.5
	0.855 ± 0.100 ~ 0.915 ± 0.077	93.8% < C ≤ 98.0%, 生锈等级: 2~3.5
	0.915 ± 0.077 ~ 0.943 ± 0.117	93.1% < C ≤ 93.8%, 生锈等级: 3.5
半直接法	1.082 ± 0.212 ~ 1.127 ± 0.200	97.5% ≤ C < 99.5%, 生锈等级: 1~2
间接法	0.887 ± 0.244 ~ 1.000	96.2% ≤ C ≤ 100%, 生锈等级: 0~2.5
	0.718 ± 0.194 ~ 0.858 ± 0.234	93.8% < C < 96.2%, 生锈等级: 2.5~3.5
	0.858 ± 0.234 ~ 0.887 ± 0.244	93.1% ≤ C ≤ 93.8%, 生锈等级: 3.5

注: * = V_i/V_0 , ** = $\sqrt{C_{Vi}^2 + C_{V0}^2}$, * 为声速变化率, ** 为声速变化率的标准差(由误差传递公式推导), V_i 为锈蚀 i 周期的声速, V_0 为未锈蚀的声速, C_{Vi} 为锈蚀 i 周期声速的变异系数, C_{V0} 为未锈蚀声速的变异系数, V_i 与 V_0 相互独立。

表 4 基于声速的钉生锈等级评估对照表(钉入 50 mm)

Table 4 Speed of sound-based rust level assessment table for nails (driven 50 mm)

测量方法	声速变化率	对应质量残存率 C 及生锈等级
间接法	0.841±0.422~1.000	98.9%≤C≤100%,生锈等级:0~1.5
	0.777±0.380~0.818±0.380	95.1%≤C<98.9%,生锈等级:1.5~3
	0.630±0.288~0.777±0.380	93.1%<C<95.1%,生锈等级:3~3.5

由图 14a 可知,半直接法所获声速小于 2.6 km/s 时对应的钉质量残余率主要分布在 100.0%~99.5%和 96.2%~93.1%段,钉的锈蚀等级有两种情况:0~1 级和 2.5~3.5 级,难以由此判断钉的锈蚀程度,因此在表 3 中未引入此阶段的声速评估,表 4 同理。钉未完全钉入可用直接法和间接法评估锈蚀程度(表 3),半直接法所获声速可间接估计屈服荷载(图 14a 中随钉质量残存率降低,半直接法所获声速和屈服荷载的局部相关性最强)。钉完全钉入用间接法评估锈蚀程度(表 4),半直接法所获声速虽然和屈服荷载的曲线镜像相似,但是敏锐度不够。

当钉入 40 mm 的直接法和间接法声速变化率分别为 0.915±0.077~0.943±0.117 与 0.858±0.234~0.887±0.244、钉入 50 mm 的间接法变化率为 0.630±0.288~0.777±0.380 时,锈蚀钉的屈服强度降至稳定阶段,降幅超过 6%。

3 结 论

本研究通过系统试验,分析了金属钉锈蚀对其超声波声速及抗弯性能的影响机制,建立了声速测量方法与锈蚀状态评估之间的对应关系。主要结论如下:

1)超声波声速可有效表征金属钉的锈蚀状态,但测量方法的选择受钉入深度和评估目的的影响。若判断钉的生锈等级,直接法适用于预测未完全钉入木材时,而间接法则更适用于钉完全钉入木材。若预测木材中钉的剩余抗弯强度,间接法更适用于钉未完全钉入时,而半直接法则适用于钉完全钉入的情况。

2)金属钉锈蚀对抗弯强度的影响呈阶段性特征。生锈等级不大于 2(质量残存率≥98.0%)时,表面致密锈层对钉身加工缺陷具有“填充钝化”效应,抗弯强度最大增幅可达 5.84%。生锈等级超过 2 且不大于 3(质量残存率<96.2%)时,疏松锈层脱落、基体点蚀与有效截面减小共同导致应力集中,抗弯强度持续下降,最大降幅达 6.82%。可根据声速的降幅,大概判断屈服强度是否进入稳定下降阶段。

3)超声波检测易受现场环境影响。在实际检测中,建议以数据稳定性最高的直接法检测数据为主要评估基准,再跟据钉入状态辅以其他检测方法。

参考文献(References):

[1] 王彬,孙海林,何敏娟,等. 国外现代木结构建筑发展现状研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(17): 127-134. DOI: 10.19701/j. jzjg. JG25005.
Wang B, Sun H L, He M J, et al. Research on development situation of modern wood structure buildings in foreign countries [J]. Building Structure, 2025, 55(17): 127-134.

[2] 武晓珊. 我国现代木结构建筑发展关键影响因素及策略研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2024. DOI: 10.27263/d.cnki.gqude.2024.000535.
Wu X S. Research on the key influencing factors and strategies of the development of modern wood structure buildings in China [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2024.

[3] Nguyen M N, Leicester R H, Wang C H, et al. Corrosion effects in the structural design of metal fasteners for timber construction [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2013, 9(3): 275-284. DOI: 10.1080/15732479.2010.546416.

[4] 廖春晖,张厚江,黎冬青,等. 古建筑木构件缺陷检测方法发展现状[J]. 森林工程, 2011, 27(4): 51-53. DOI: 10.16270/j.cnki.slge.2011.04.010.
Liao C H, Zhang H J, Li D Q, et al. Development of defect detection methods for ancient architecture components[J]. Forest Engineering, 2011, 27(4): 51-53.

[5] Xin Z B, Ke D F, Zhang H J, et al. Non-destructive evaluating the density and mechanical properties of ancient timber members based on machine learning approach [J]. Construction and Building Materials, 2022, 341: 127855. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127855.

[6] 白晓彬,陈慧慧,梁宁博,等. 基于无损检测的残损古建筑木结构受力性能研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(5): 86-91, 24. DOI:10.19701/j. jzjg. 20211519.
Bai X B, Chen H H, Liang N B, et al. Study on mechanical properties of damaged ancient timber structure based on nondestructive testing[J]. Building Structure, 2024, 54(5): 86-91, 24.

[7] Ding Y W, Xiong H B, Chen L, et al. Non-destructive sensing data-driven hysteretic behavior prediction of CLT joints based on recurrent neural networks[J]. Structures, 2023, 56: 104974. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.104974.

[8] Kim Y J, Ha T. Nondestructive and destructive tests for damage quantification of deteriorated structural timber[J]. Construction and Building Materials, 2025, 469: 140542. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140542.

[9] 和田央. 木材腐朽と接合具の発錆が接合部の構造性能に及

- ばす影響[C]//修士論文概要集, 2021.
- Wada N. The effects of decayed wood and ruse of connector on the structural performance [C]//Master's Thesis Abstracts, 2021.
- [10] Yermán L, Ottenhaus L M, Montoya C, et al. Effect of repeated wetting and drying on withdrawal capacity and corrosion of nails in treated and untreated timber [J]. Construction and Building Materials, 2021, 284: 122878. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122878.
- [11] Ishiyama H, Koshihara M. Experimental study on the performance of the nailed joint with the rust [J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2009, 74(646): 2281–2289. DOI: 10.3130/aifs.74.2281.
- [12] 今村浩人, 金谷紀行, 高木純, ら他. 30年経過した木造住宅における鉄釘の劣化調査[J]. 林業試験場研究報告, 1983, 332:95–104.
- Imamura H, Kanaya N, Takagi J, et al. Investigation of deterioration of iron nails in wooden houses after 30 years [J]. Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute, 1983, 332: 95–104.
- [13] 石山央樹. 木材内の釘錆の電気的計測の試行[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021: 97–98.
- Ishiyama H. Trial of electrical measurement of rust of nail in wood [C]//Proceedings of the Annual Conference of the Architectural Institute of Japan, 2021: 97–98.
- [14] 行夏樹, 石山央樹, 徳尾野徹, ら他. 超音波を用いた木材に打ち込まれた釘の発錆量推定の試み[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 2022: 107–108.
- Yuki N, Ishiyama H, Tokuono T, et al. Attempt of quantitative evaluation of nail rust in the wood using ultrasonic testing machine [C]//Proceedings of the Annual Conference of the Architectural Institute of Japan, 2022: 107–108.
- [15] 関根亮太, 石山央樹. 超音波試験機を用いた木材内部の釘錆の定量評価の試み[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019: 619–620.
- Sekine R, Ishiyama H. Attempt at quantitative evaluation of nail rust inside wood using an ultrasonic testing machine [C]//Proceedings of the Annual Conference of the Architectural Institute of Japan, 2019: 619–620.
- [16] 石山央樹. 木造建築における釘接合部に生じた錆の非破壊検査方法の開発と実態調査[R].
- Ishiyama H. Development of non-destructive inspection method for rust at nailed joints in wooden buildings and field survey[R].
- [17] Chen L, Kong Q Z, Xiong Q S, et al. Research and application of non-destructive testing technology for timber structures: a review [J]. Structures, 2025, 80: 109790. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.109790.
- [18] Zaki A, Chai H, Aggelis D, et al. Non-destructive evaluation for corrosion monitoring in concrete: a review and capability of acoustic emission technique [J]. Sensors, 2015, 15(8): 19069–19101. DOI: 10.3390/s150819069.
- [19] Kurz J H, Boller C. Some background of monitoring and NDT also useful for timber structures [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(2): 99–106. DOI: 10.1007/s13349-015-0105-z.
- [20] 阙泽利, 杨玲, 王菲彬, 等. 盐溶液对木结构规格材握钉力的影响[J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(4): 100–103.
- Que Z L, Yang L, Wang F B, et al. The effect of salinity on the nail-holding power of dimension lumber [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2014, 34(4): 100–103.
- [21] Samuel L. Corrosion of metals in wood products [M]//Developments in Corrosion Protection. 2014. DOI: 10.5772/57296.
- [22] Strifas A, Budinski M K, Komarnicki E, et al. The efficacy of a chelating agent-based oxide remover to clean corrosion products from ferrous fracture surfaces [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2019, 19(6): 1860–1865. DOI: 10.1007/s11668-019-00785-w.
- [23] Legault R A, Preban A G. Kinetics of the atmospheric corrosion of low-alloy steels in an industrial environment [J]. Corrosion, 1975, 31(4): 117–122. DOI: 10.5006/0010-9312-31.4.117.
- [24] Baker A J. Corrosion of nails in CCA- and ACA-treated wood in two environments [J]. Forest Products Journal, 1992, 42(9): 39–41.
- [25] 汪佳宇, 陈铭刚, 布占宇. 基于超声波换能器的钢筋机械损伤与锈蚀损伤检测及其对比研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2024, 37(1): 67–76. DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0415.
- Wang J Y, Chen M G, Bu Z Y. Ultrasonic transducer-based mechanical damage and rust damage detection of steel bars and comparative study [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2024, 37(1): 67–76.

(责任编辑 孙仪)