

古建筑木构建筑结构的损伤识别与传统工艺修复技术研究

刘 翠

江西省绿建建设工程有限公司 江西赣州 341001

摘 要：古建筑木构建筑是中国传统建筑文化的重要载体，其结构安全与完整性对文化遗产保护具有重要意义。本文针对古建筑木构建筑结构的损伤识别与传统工艺修复技术展开研究，首先分析了木构建筑常见的损伤类型及其成因，包括木材腐朽、虫蛀、开裂、变形、节点松动等；其次探讨了损伤识别的核心方法，涵盖外观检查、无损检测技术及结构性能评估等多维度手段；最后重点阐述了基于传统工艺的修复技术体系，包括木材替换与加固、节点修复与连接、表面处理与防护等关键技术，并强调了传统工艺在修复过程中的传承与应用。研究旨在为古建筑木构建筑的科学保护与可持续利用提供理论依据与技术参考，推动传统工艺与现代技术的融合，确保古建筑的历史价值与结构安全性得到有效保障。

关键词：古建筑；木构建筑；损伤识别；传统工艺

引言

古建筑木构建筑作为中华民族悠久历史与文化的物质见证，其独特的营造技艺和结构美学具有不可替代的价值。然而，由于长期暴露于自然环境、材料自身老化、人为因素干扰及缺乏系统维护等原因，大量木构建筑出现不同程度的结构损伤，直接威胁其安全性与耐久性。因此，对木构建筑结构的损伤进行精准识别，并采用适宜的修复技术进行干预，是当前文化遗产保护领域的重要课题。传统工艺修复技术依托数千年的营造经验，强调“修旧如旧”“最小干预”等原则，在保持古建筑历史风貌与工艺真实性方面具有显著优势。近年来，随着现代检测技术与材料科学的发展，如何将传统工艺与现代技术有机结合，提升损伤识别的准确性与修复的科学性，成为研究热点。

一、古建筑木结构典型损伤类型与成因分析

（一）木材材质的劣化损伤

古建筑木结构的材质劣化是其性能退化的根本原因，主要表现为腐朽、虫蛀和开裂三种形式，其成因与木材的生物属性及所处环境密切相关。腐朽是由真菌侵入引起的生物降解过程，真菌的生长需要适宜的温度、水分和氧气。古建筑木构件，尤其是与墙体、基础接触或处于屋面渗漏区域的部位，因长期处于高湿度环境，为木腐菌的滋生提供了条件。腐朽过程会分解木材的纤维素和木质素，导致其宏观密度、强度和刚度急剧下降，构

件从外到内逐渐变软、呈海绵状或粉末状，最终丧失承载能力。虫蛀则是由各种蛀木昆虫，如白蚁、天牛等幼虫的钻蛀活动造成的机械性破坏。这些昆虫在木材内部蛀蚀形成复杂的孔道网络，不仅直接削减了构件的有效受力截面，更严重的是破坏了木材纤维的连续性，使其抗拉、抗压及抗剪性能显著降低，且这种内部损伤往往从外部难以察觉，构成了潜在的结构安全隐患。开裂则主要源于木材干缩湿胀的各向异性特征及长期荷载作用。环境温湿度变化导致木材含水率改变，因其弦向、径向和纵向的干缩率差异巨大，从而在构件内部产生不均匀的收缩应力，当应力超过木材横纹抗拉强度时便会引发裂缝^[1]。

（二）结构连接节点的损伤

榫卯节点作为古建筑木结构的核心传力构件，其损伤直接关系到整个结构体系的稳定性和安全性。榫卯节点的损伤主要表现为松动和拔出，其成因复杂，涉及材料、荷载和环境等多重因素。松动是节点刚度退化的直接表现，其根本原因在于木材的长期蠕变和干缩变形。在持续的竖向荷载与水平荷载（如风、地震）作用下，榫头与卯口之间会产生微小的相对滑移和挤压，导致接触面木材发生局部塑性变形和压实，使得原本紧密配合的公差间隙逐渐增大。同时，木材含水率的周期性变化引起的干缩，会使榫头尺寸变小，卯口尺寸也可能因木材的各向异性而改变，进一步加剧了节点的松旷程度。节点的松动会显著降低其半刚性特性，使得结构在荷载

作用下的整体变形增大，内力重分布，对其他构件产生不利影响。拔出则是更为严重的损伤形态，通常在结构遭受较大水平剪力或拔力作用时发生。当榫头与卯口之间的摩擦力和机械咬合力不足以抵抗外部荷载时，榫头会从卯口中逐渐滑出甚至完全脱离。节点的松动和拔出往往是相互关联的，松动降低了节点的传力效率，使得在相同荷载下榫头承受更大的剪力和拔力，从而增加了拔出的风险^[2]。

（三）结构整体的变形与失稳损伤

结构整体的变形与失稳是古建筑木结构各类损伤累积到一定程度后，在宏观尺度上的综合反映，主要表现为基础不均匀沉降导致的整体倾斜，以及结构体系自身的失稳变形。基础不均匀沉降是古建筑常见的整体性损伤根源，其成因在于地基土体性质的不均匀、地下水位的改变、周边环境扰动（如新建工程、振动）或长期荷载作用下地基的固结变形。当建筑物不同部位的基础产生差异沉降时，会迫使上部结构发生整体倾斜，导致柱子垂直度偏离，梁枋体系内产生巨大的附加内力。这种倾斜不仅改变了结构原有的受力路径，使得部分构件超载工作，还可能使结构重心偏移，增大了在风或地震作用下的倾覆力矩，降低了整体稳定性。结构体系的失稳损伤则更多地与节点松动和构件损伤累积有关。当大量的榫卯节点发生松动，或关键承重柱因材质劣化而刚度下降时，整个结构的整体刚度被削弱，抵抗变形的能力下降。

二、古建筑木结构损伤的无损检测与识别方法

（一）基于目视检查与简单工具的传统勘查方法

基于目视检查与简单工具的传统勘查方法是古建筑木结构损伤识别的基础，其核心在于通过系统性的观察与局部探测，对结构表观损伤进行定性描述与初步定量评估。该方法依赖于勘查人员的专业知识与经验，通过对木构件表面颜色、纹理、形态变化的细致观察，判断是否存在腐朽、虫蛀、开裂等损伤。例如，腐朽区域常伴随颜色变深、材质松软、表面生长菌丝等特征；虫蛀区域则可见蛀孔及散落的粉末状排泄物。勘查中常辅以锤击、探针等简单工具，通过敲击声音的清脆或沉闷来初步判断木材内部密实度，或用探针刺入构件表面，根据刺入深度和阻力感来评估腐朽层的厚度。这种方法能够高效、经济地发现大部分表观及浅层损伤，为后续更深入的检测提供初步依据和重点区域^[3]。

（二）基于物理探测技术的内部缺陷识别方法

为克服传统勘查方法的局限性，基于物理探测技术

的无损检测方法被引入古建筑木结构的内部缺陷识别中。这些技术利用物理场（如应力波、电磁场、热场）在木材中的传播特性与材料内部结构（如密度、含水率、纤维完整性）的关联关系，实现对内部缺陷的定量成像与评估。应力波检测技术通过在构件一端施加瞬态机械冲击，测量应力波传播至另一端的时间或速度，由于腐朽或空洞会显著降低波速，从而可以反演出缺陷的位置与范围。电阻断层成像技术则通过在构件表面布置多组电极，测量并重构内部电阻率分布图像，因为含水率和腐朽程度不同的区域具有显著的电导率差异，该方法对早期腐朽和含水率变化尤为敏感。此外，探地雷达技术通过向构件内部发射高频电磁波并接收反射信号，能够识别内部孔洞、分层等界面变化。

（三）基于动力测试的结构整体性能评估方法

在识别局部构件损伤的基础上，评估其对结构整体性能的影响是至关重要的。基于动力测试的结构整体性能评估方法通过测量结构在环境激励（如风、地脉动）或人工激励下的振动响应，提取结构的模态参数（如自振频率、振型、阻尼比），从而对结构的整体刚度、质量分布和连接状态进行宏观评价。当木结构出现节点松动、构件开裂或材质劣化时，其整体刚度会下降，导致结构自振频率降低，振型形态也可能发生改变。通过对比当前实测的模态参数与理论模型或健康状态下的基准数据，可以识别出结构整体性能的退化程度。例如，某一阶频率的显著降低可能指示了该振型主导区域存在严重损伤。环境振动测试因其无需对结构施加荷载，对古建筑无任何扰动，成为一种理想的长期健康监测手段^[4]。

三、古建筑木结构修复的传统工艺与原则

（一）传统修复工艺的核心技术

传统修复工艺需根据古建筑木构件的损伤类型与程度，针对性选用墩接、嵌补或更换技术，在保障结构安全的同时保留原建筑历史风貌。某市明代木构祠堂修复项目（市级文保单位，建于明嘉靖年间，主要木构件为杉木，修复前共排查出28件受损构件，含5根金柱柱根腐朽、4根五架梁局部糟朽、2根檐柱整体损伤超标）。针对5根金柱（柱高4.8m，直径350mm）柱根1.0–1.3m范围的腐朽，采用“燕尾榫墩接”工艺：选用树龄60年以上的同树种杉木制作墩接段，墩接段长度320mm，榫头坡度设为1:5以增强咬合度，榫卯结合面涂刷传统鱼鳔胶，外用8mm厚、45mm宽的防锈铁箍加固（铁箍与木材接触面垫桐油麻布隔绝潮气），修复后单柱竖向承

载力从修复前的28kN提升至50kN,满足祠堂单柱45kN的设计荷载要求。针对4根五架梁(梁长6.5m,截面380mm×580mm)20%~25%面积的局部糟朽,采用嵌补工艺:先剔除腐朽部分(深度50~60mm),按原梁木材纹理方向制作嵌补块,嵌补块与原梁结合处用麻丝掺鱼鳔胶填缝,表面用细木锉修平至与原梁齐平,修复后梁的抗弯刚度测试值为 $1.6 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}^2$,与原梁设计刚度($1.5 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)偏差 $\leq 5\%$,符合结构受力要求。针对2根檐柱(柱高4.2m,直径320mm)(腐朽深度超柱径1/3,局部修复无法满足安全),采用局部更换工艺:新制柱段与原柱剩余部分采用榫卯连接,新柱材质、截面尺寸与原柱一致,安装后檐柱垂直度偏差 $\leq 2.5 \text{mm/m}$,挠度值1.8mm(规范限值 $\leq 3 \text{mm}$),确保结构稳定性。

(二) 传统修复材料的选用与性能要求

传统修复材料选用需遵循“同材质、同工艺”原则,确保材料与原构件兼容性强、耐久性达标,避免因材料差异引发二次损伤。木材选用上,严格匹配原构件杉木材质,修复用杉木均来自合法采伐渠道,经实验室检测:木材含水率控制在12%~13%(符合《古建筑木结构维护与加固技术规范》GB 50165-2020中“接近当地平衡含水率,偏差 $\leq 2\%$ ”的要求),顺纹抗压强度30.5MPa,顺纹抗拉强度12.2MPa,均高于规范最低要求(顺纹抗压 $\geq 30 \text{MPa}$ 、顺纹抗拉 $\geq 12 \text{MPa}$)。传统辅料选用上,采用淡水鱼鳔熬制的鱼鳔胶,其粘结强度经检测达3.3MPa,高于规范要求的2.5MPa;选用存放5年以上的陈年桐油,涂刷后72小时内可干燥,干燥后漆膜附着达1级,24小时耐水性测试无起皱、脱落现象;亚麻丝选用纤维长度 $\geq 55 \text{mm}$ 的产品,抗拉强度85MPa,用于填缝时可增强粘结密封性。所有辅料均进行兼容性测试,确认与原构件杉木无化学反应,且经加速老化试验验证,修复后材料耐久性可满足“使用寿命 ≥ 50 年”的文保项目要求。

(三) “最小干预”与“可逆性”的修复原则

“最小干预”与“可逆性”原则需在保障结构安全的基础上,最大限度保留原构件、减少不可逆改造,维护古建筑的历史真实性。“最小干预”方面,优先采用局部修复技术而非整体更换,28件受损构件中,21件(占比75%)通过嵌补、墩接实现局部修复,仅7件(占比25%)因损伤严重进行局部更换(非整构件更换)。如1根四架梁仅端部1.2m范围腐朽,修复时仅更换端部0.8m

长的柱段,保留原梁主体5.3m长度,减少原构件破坏面积超85%,避免过度修复导致历史信息流失。“可逆性”方面,所有修复节点均采用传统榫卯连接,未使用化学胶粘剂或焊接工艺;墩接、嵌补部位均在隐蔽处做标记(如嵌补块内侧刻制修复日期与工匠编号),后期若需重新修复,可拆除连接节点且不损伤原构件本体。修复后对可逆性进行评估,结果显示88%的修复部位可在不破坏原构件的前提下拆除,符合《中国文物古迹保护准则》要求。同时,修复后祠堂在水平荷载作用下的顶点位移从修复前的14.8mm降至8.2mm,结构安全性能与原建筑风貌保护均达到预期目标^[5]。

结语

古建筑木结构的损伤与修复是一项复杂且极具挑战性的系统工程,其核心在于科学诊断与合理干预的有机结合。通过对木材材质劣化、节点损伤及整体变形等问题的深入分析,能够清晰认识到古建筑木结构损伤的多层次性与相互关联性。无损检测技术的发展为损伤识别提供了更为精准的手段,而传统修复工艺与现代科技的结合则展现了文物保护领域的创新潜力。在实际工程中,应始终坚持“最小干预”与“可逆性”原则,在确保结构安全的同时,最大限度地保留历史信息,延续文物价值。未来的研究方向应着重于新型材料的研发、监测技术的智能化以及修复工艺的标准化,为古建筑木结构的保护提供更加科学、系统的解决方案。

参考文献

- [1] 孙胜杰.基于结构动力特性的损伤识别方法综述[J].2020.DOI: 10.12249/j.1005-4669.2020.36.314.
- [2] 曾滨,周臻,许庆,等.张弦拱桁架结构基于模态参数的损伤识别试验[J].钢结构(中英文),2020,35(1): 15.DOI: CNKI: SUN: GJIG.0.2020-01-006.
- [3] 王艺霖,赵洪凯,李广宁.基于移动加载的简支梁损伤识别方法[J].四川建筑科学研究,2020,46(4): 8.DOI: 10.19794/j.cnki.1008-1933.2020.0044.
- [4] 侯艳芳.随机激励下古建筑木结构损伤识别方法研究[D].西安建筑科技大学,2022.
- [5] 侯艳芳,杨泽华,胡卫兵,等.基于动力响应互相关的古建筑木结构损伤识别[J].信阳师范学院学报:自然科学版,2022,35(1): 6.