

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020165

古建筑木结构多发残损的特征及防控分析

袁 霄, 陈勇平, 郭文静

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 以古建筑木结构的现场勘察大数据为研究对象, 通过构件外部开裂、竖向变形、隐蔽处腐朽、内部腐朽、虫蛀等残损信息的统计分析, 开展古建筑木结构多发残损的特征和防控研究。研究发现, 构件的开裂大多并不影响结构安全, 但应关注大跨度梁和枋的竖向变形及其下部是否存在断裂迹象; 构件的腐朽多出现在埋墙柱和檩的隐蔽处, 主要因潮湿和通风不良等环境所致; 构件的虫害防治应防重于治, 其害虫多来源于原木料、修缮木料或其他木质材料等。通过研究分析木结构古建筑中影响结构安全的残损特征和残损区域, 并根据残损成因分析提出针对性防控措施, 可更好地保护木结构古建筑。

关键词: 古建筑木结构; 木材残损; 防控

中图分类号: S781.5; TS67; TU366.2

文献标识码: B

文章编号: 2096-9694 (2021) 05-0054-06

Features and Prevention of Common Damages in Ancient Timber Structures

YUAN Xiao, CHEN Yong-ping, GUO Wen-jing

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

Abstract: The data from on-site investigation of ancient timber structures were taken as the research objects. The features of common wood damages of the ancient timber structures were analyzed by means of statistical and analytical research on exterior cracks, vertical deformation, hidden decay, internal decay, and insect damage of wooden components. The results indicated that the exterior cracks of wooden components did not affect the safety of the timber structure, but the effects of vertical deformation and bottom splits on long span beams need to be further analyzed. The wood decay often occurred in embedded columns and purlins due to the conditions of high moisture and poor ventilation. The prevention of insect damage in wood components is more important than the afterward treatments, since the insects were brought into the structure mainly from the original wood components, repairing wood materials, or other wood-based products. Based on findings of the damage features and locations, which affected the building safety in the ancient timber building, the damage prevention and control plans were proposed to effectively conserve the ancient timber building.

Key words: ancient timber structure; wood damage; prevention and control

收稿日期: 2020-11-14; 修改日期: 2020-12-05

基金项目: 国家重点研发计划课题资助“明清官式建筑材料科学化认知研究”(2020YFC1522402); 中国林业科学研究院林业新技术研究所基本科研业务费专项资助“刺入式探测对木柱承载能力的影响机制”(CAFYBB2019SY033)。

作者简介: 袁霄 (1997—), 女, 硕士研究生。Email: 1393877048@qq.com

通讯作者: 陈勇平, 男, 副研究员。Email: chenyp@caf.ac.cn

木材是人类建筑史上应用时间最长的建筑材料之一, 已有数千年的使用历史, 木结构是单纯或主要由木材承受荷载的结构, 在中国现存的古建筑中, 木结构占有相当大的比例。据不完全统计, 北京现有国保、市保、区保等文物建筑1 700余处, 其中木结构建筑有1 200余处, 约占71%。然而木材作为木结构建筑最主要的组成部分, 由于其生物材料特性, 容易发生开裂、虫蛀和腐朽等缺陷^[1-2], 尤其在屋顶漏雨、空气潮湿时, 腐朽发生率更高、速度更快^[3]; 同时木构件在长期局部受压情况下也会产生构件变形或节点破坏等问题^[4-6], 严重时甚至导致构件断裂, 这些都成为结构隐患。长时间实践证明, 古建筑的修缮大都缘起于木结构的损坏^[7-8], 而木结构的损坏又多是由于木材本身的损坏造成的。因此, 为保护这些古建筑, 保存历史文化信息, 除做好现有的古建筑木结构日常保护和修复加固工作外^[9-11], 开展相应

的勘察统计与研究同样不可或缺^[12-13]。鉴于此, 笔者基于北京、浙江、江苏等地木结构古建筑勘察情况, 总结古建筑木结构最容易残损的位置和主要残损类型, 分析残损产生的原因, 并提出避免残损发生的措施, 为更有效地保护木结构古建筑提供技术支撑。

1 古建筑木结构残损勘察技术

古建筑木结构勘察技术是指以外部损伤检查、内部损伤探测、病虫害检测、木材强度检测和木材取样分析为基础的木构件现状评估, 以及结合结构布局调查和建模的木结构建筑整体安全状况评价, 并根据残损点分析, 提出构件针对性保护以及预防性保护措施的技术, 如图1所示。其中, 残损勘察技术包括外部损伤检查、内部损伤探测、病虫害检测和取样分析等多方面, 构件开裂、腐朽、变形、虫蛀等均为残损。

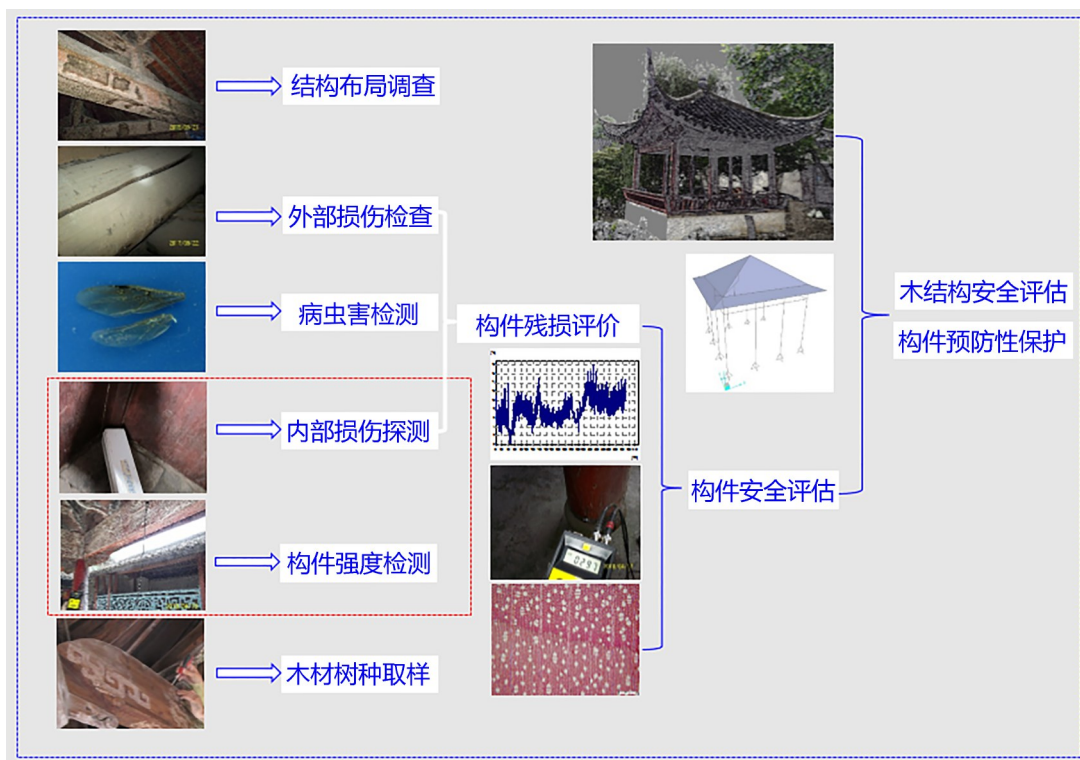


图1 古建筑木结构现场勘察技术

Fig.1 On-site investigation technologies of ancient timber structures

2 古建筑木结构残损结果与分析

笔者前期对北京、浙江、江苏等多地木结构古建筑的勘察结果表明, 木结构古建筑的木构件

或多或少地存在一定程度的残损, 其中占比最高的为构件开裂, 该类型残损在所有残损中的占比大于50%; 其次为构件腐朽, 占比虽低, 但危害

较大；此外，构件的变形和虫蛀也偶有出现。本文以前期多处古建筑木结构的勘察数据为基础，对多发残损进行相关统计和分析。

2.1 大多数的构件开裂并不影响结构安全

古建筑木结构最常见的残损为干缩裂缝，几乎所有木结构建筑的柱、梁、檩、枋等构件会出现一定程度的开裂，如图2所示。一般的开裂不会影响结构安全，其表征分析可通过探针刺探深度、尺量长宽进行判定。

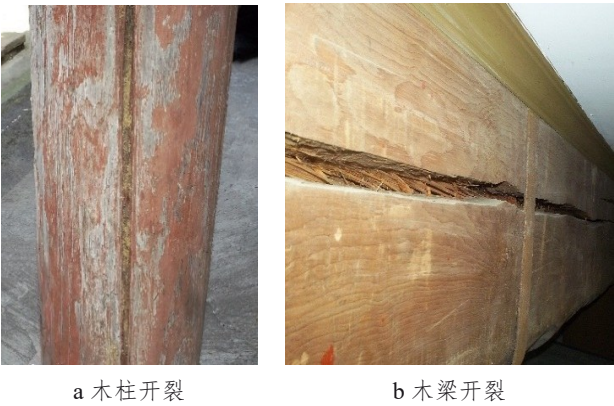


图2 木构件的开裂
Fig.2 Cracks of wooden components

木材开裂与其含水率及木材本身的生物材质料特性有关，尤其是木材使用前如果未干燥至当地的平衡含水率，或者干燥方法不当使得木材内外存在一定的含水率梯度，使用后随着时间推移水分散失，木材将产生收缩开裂。一般来说，檩的开裂多从端头边缘位置开始；梁和枋经过了机械加工，在加工过程中应力得以释放，从而在一定程度上可降低开裂发生的概率。在原材料相同情况下，所加工的木构件越小，木材应力释放得越多，内外含水率梯度更容易均衡，开裂概率及程度越低。

从古建筑用木材开裂的树种统计结果（表1）来看，常用木材树种中容易产生开裂的有落叶松等，这是因为落叶松等木材的弦径干缩比较大（弦径干缩比>2.0），更容易产生干缩变形。同理，云杉等木材的弦径干缩比较小，因此相对于落叶松等木材不容易产生干缩变形^[14-15]。此外，早晚材差异、密度等因素也会在一定程度上影响木材的开裂。

表1 古建筑木结构常用树种的分布及干缩性
Tab.1 Common wood species used in ancient timber structures at varied geographical locations and their shrinkage

木材名称	分布	弦径向干缩比
落叶松 (<i>Larix</i> spp.)	黑龙江、吉林、内蒙古、山西、河北等	2.4
硬木松 (<i>Pinus</i> spp.)	湖南、湖北、江西、河南、陕西等	1.8
软木松 (<i>Pinus</i> spp.)	云南、陕西、湖北、贵州、河南等	2.4
云杉 (<i>Picea</i> spp.)	四川、甘肃、陕西、宁夏、青海等	1.9
冷杉 (<i>Abies</i> spp.)	四川、甘肃、青海、陕西、云南等	1.9
杉木 (<i>Cunninghamia lanceolata</i>)	云南、广西、贵州、湖北、江西等	2.0
柏木 (<i>Cupressus</i> spp.)	贵州、湖北、四川、安徽、江西等	1.5
楠木 (<i>Phoebe</i> spp.)	四川、贵州和湖北等	1.7

2.2 大跨度的梁和枋是否存在断裂迹象应被关注

古建筑木梁和枋承受的荷载方向以竖向为主，当梁、枋界面尺寸较小或随着时间的推移在长期荷载作用下，木梁、枋在竖向可能会产生过大变形，进而发生断裂，如图3所示。因此，对于大跨度梁、枋构件，若发现变形时，应测定其竖向挠度，并检测其受力点是否有断裂迹象。



图3 木构件的竖向变形及断裂
Fig.3 Vertical deformation and fracture of wooden components

2.3 埋墙柱为腐朽残损多发区域

古建筑木结构的腐朽大多发生在埋墙柱(包括半露明柱和墙内暗柱),以北京某古建筑群木柱的勘察统计结果为例,中度以上腐朽的木柱中,埋墙柱占比超过了62.29%;重度腐朽的木柱中,埋墙柱占比超过了75.00%。这充分说明,埋墙柱是木结构古建筑中容易发生腐朽的木构件,应作为检测和监测的重点。对于此类位置木构件,因裸露空间较少难以进行木柱内部整体扫描;对具有一定裸露空间的,可以使用阻抗仪等刺入式探测手段,利用有限的裸露空间通过发散探测分析木材腐朽体量,如图4所示。

不具备检测操作条件的埋墙柱,可尝试采取排气孔等开口探针刺探,必须要破开墙体进行勘察。木材腐朽是因为木材本身的生物质材料特性,随着使用时间的推移不可避免会出现材质的下降,其次木材是由纤维素、半纤维素、木质素等有机高分子组成的,这种材料是一些木腐菌和昆虫的营养物质,在合适的温、湿度条件下危害生物便会加速繁殖,使木材发生腐朽,造成木结构损毁。一般来说,木构件易发生腐朽的位置多为潮湿和通风不良的区域,比如埋墙柱和隐蔽的漏雨区域,这是因为墙体中立柱或漏雨区域构件长期处于潮湿环境,形成了危害生物的繁殖条件。



a 局部埋墙柱

b 埋墙柱的检测方法

图4 埋墙柱及探测方法

Fig.4 Embedded columns and the relevant detection method

2.4 檩构件隐蔽处易产生不易察觉的腐朽

檩构件隐蔽处指的是檩条与椽子望板交接处,大多数檩构件处于建筑高处,往往因位置关系不易于被勘察。檩构件隐蔽处产生腐朽是瓦面或者

该位置结构松动等原因,导致雨水从屋顶渗入后首先进入椽子望板,然后接触到脊檩、金檩或正心檩等构件,长期交替的潮湿致使残损。如图5所示,腐朽的檩条上有漏雨痕迹。



a 檩腐朽

b 漏雨痕迹

图5 木构件的腐朽

Fig.5 Wood decay in wooden components

判定檩构件隐蔽处是否存在腐朽：1) 认真刺探每一根檩的隐蔽部位，确定其表面是否存在腐朽；2) 观察是否存在雨水痕迹，当某处构件上存在雨水痕迹，该处区域内的构件均应详细刺探，以确定是否存在腐朽和其他残损。

2.5 木材虫害大多表现为陈旧性蛀孔

木材虫害是木结构古建筑的一大安全隐患，一般在木结构材质状况勘查中很难发现活虫，而是由它们造成的木材危害状，常见的形式为陈旧性蛀孔及残留蛀屑，如图6所示。陈旧性蛀孔是指原有虫蛀，现在已没有活虫危害，这种情况在古建筑木结构中比较多见。蛀孔、蛀屑的存在往往为木材腐朽菌的滋生创造了良好条件，因此，木构件的腐朽和虫蛀多是伴生的。

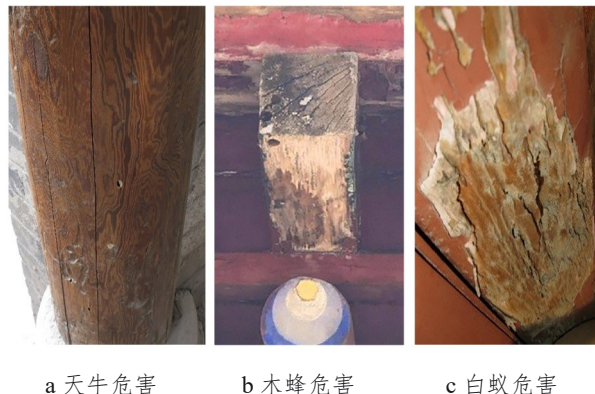


图6 木构件蛀孔及蛀屑

Fig.6 Wormholes and sawdust in wooden components

从分类学角度来说，危害古建筑木结构的昆虫主要分为：蛀木甲虫（包括天牛、粉蠹、长蠹、窃蠹等）、白蚁和木蜂。若现场勘察发现活虫，进行虫体鉴定分析，并针对性防治即可。对于现场勘察未发现活虫，但具有明显危害状的构件，可以根据虫孔、虫道、蛀屑以及整体危害状的表现形式进行鉴定，如图7所示。一般来说，小虫孔多为粉蠹类等蠹虫危害所致，数量不多时，对木材使用影响不大。钻蛀大虫孔的蛀虫有天牛和木蜂，木蜂钻蛀直径可达1 cm以上，两者的区分除虫孔和整体危害状外，对虫道和残留蛀屑进行显微观察和残体提取，可以更好地鉴别。白蚁是既不同于天牛和木蜂，也不同于蠹虫的另一类重要害虫，白蚁蛀入木材内部，喜好蛀食木材较柔软的部分，故木材被害成沟状、深缝状，严重时整个木材仅残存片状或条状。长期现场勘察发现，木材遭受

害虫蛀蚀已严重损坏的，即使反复查勘也很难发现活虫。因此，木构件的危害状及现场木屑，成为鉴定害虫种类的重要依据。



a 天牛危害 b 木蜂危害 c 白蚁危害

图7 木构件危害状

Fig.7 Insect damages of wooden components

木材害虫多是在建筑初建或修缮时，由于原木加工处理不当而被带入建筑中的，因使用木材未严格干燥且未进行防虫处理，害虫得以生长和繁殖。此外，古建筑室内布置隔断或布局改造时木质装饰材料使用不当，也可能带入木材害虫，这种情况亦不少见。有些虫害的发生也与建筑周围环境相关，如建筑物周围存在树木花草茂密的地方更容易发生木蜂危害，白蚁多发地区易出现白蚁危害。

除常见害虫蛀蚀外，部分木构件上存在蝙蝠粪便、鸟类粪便等，如图8所示。这些残留不会严重影响木结构的安全，但会产生一定的表层腐朽。此外，部分木构件的连接区域也曾发现泥蜂巢，泥蜂不钻蛀木头，对木构件无危害。



a 蝙蝠粪便

b 泥蜂巢

图8 蝙蝠及泥蜂危害状

Fig.8 Damages caused by bats and sphecidae

3 建议

1) 古建筑内使用任何木质材料均应进行科学合理的干燥。

木材的干燥既可以减少木材开裂的发生, 又可以灭杀可能潜藏在木材中的部分木材害虫。木构件的修缮、更换以及木质装修材料使用前, 均应进行科学合理的干燥, 使其达到使用地区的平衡含水率。从材料源头上保证木结构不出现残损隐患, 是非常重要的一环。

2) 古建筑上层构件部分区域设置温湿度监控。

在材料质量符合要求情况下, 保证良好使用环境也尤为重要。对于非立柱构件而言, 最重要的是确保屋面没有雨水渗入, 当难以避免雨水渗入时, 应做好重点区域温湿度的监控, 以确保及时察觉和处理隐患。监控木构件所处环境的相对湿度, 及时发现引起环境湿度变化的雨水渗入点, 对保护古建筑木结构至关重要。

3) 古建筑木柱的处理将是研究的重点。

古建筑木柱的安全始终是建筑安全重中之重。对于露明柱可以采取柱础隔离其与地面的接触, 而对于埋墙柱而言, 不可避免地需要接触到墙体, 在通风不良和潮湿的条件下, 如何从材料、工艺等方式入手, 防止或延缓埋墙柱腐朽的发生, 将是以后研究的重点。

4) 古建筑木结构的虫害防治应该防重于治。

古建筑木结构的虫害防治除主动防御外, 还应结合区域特征进行预防保护, 如出现天牛危害建筑应定期在木料表面进行药剂处理, 避免天牛等成虫产卵, 建筑物周围存在树木花草茂密的地方应警惕木蜂危害, 而白蚁多发区域可以设置防护层或诱杀坑进行预防或预警。

5) 古建筑木构件应逐步建立健康档案。

随着时间的推移, 古建筑木构件由于生物质材料特性均会产生一定的残损, 对所有木构件尤其是存在一定残损的木构件, 进行残损信息数字化, 同时对该构件进行相应的树种鉴定和木材强度测定, 以此构建古建筑木构件残损及相关材质信息的数据档案, 从而为科学研究和修缮设计提供快速的个体查询和信息提取渠道。这也是保护木结构古建筑及保存历史信息的有效方式。

参考文献:

- [1] Brandon G W. Quantifying tree health[J]. Arbor Age, 2014, 34(6): 14-16.
- [2] Ridout B. Timber decay in building: the conservation approach to treatment[J]. APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology, 2001, 32(1): 58-60.
- [3] 陈允适. 古建筑木结构与木质文物保护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [4] Villar J R, Guaita M, Vidal P, et al. Analysis of the stress state at the cogging joint in timber structures[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(1): 79-90.
- [5] Dina F D, Pin H T. Seismic vulnerability of historic Dieh-Dou timber structures in Taiwan[J]. Engineering Structures, 2008, 30(8): 2101-2113.
- [6] 淳庆, 潘建伍, 董运宏. 南方地区古建筑木结构的整体性残损点指标研究[J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(6): 76-83.
CHUN Q, PAN J W, DONG Y H. Research on integrity damage indexes of the ancient timber frame buildings in the south China[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2017, 29(6): 76-83.
- [7] 周乾. 故宫古建筑木柱典型残损问题分析及建议[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(6): 107-112.
ZHOU Q. Typical structural problems of wooden columns in the ancient buildings of the Forbidden City[J]. Journal of Water Resources Architectural Engineering, 2015, 13(6): 107-112.
- [8] 李世民, 邱冬妮, 黄斌, 等. 指林寺大殿建筑构造与残损探析[J]. 西南林业大学学报(社会科学), 2019, 3(4): 47-53.
LI S M, QIU D N, HUANG B, et al. Investigation and analysis on the structure and damage reasons of Zhilin Temple[J]. Journal of Southwest Forestry University (Social Sciences), 2019, 3(4): 47-53.
- [9] 益田兼房, 亚历杭德罗·马丁内斯, 温静. 从国际观点看日本木结构建筑遗产的保护与传承[J]. 建筑遗产, 2017(2): 1-7.
KANEFUSA Masuda, ALEJANDRO Martinez, WEN J. Introduction to the conservation and transmission of the wooden architectural heritage in Japan from an international perspective[J]. Heritage Architecture, 2017(2): 1-7.
- [10] 陈民生. 日本传统木构建筑保护与可持续利用[J]. 建筑创作, 2011(3): 142-170.
CHEN M S. Protection and sustainable utilization of traditional wooden construction in Japan[J]. Architectural Creation, 2011(3): 142-170.
- [11] 段春辉, 郭小东, 吴洋. 基于残损特点的古建筑木结构修复加固[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(1): 126-130.
DUAN C H, GUO X D, WU Y. Repairing and strengthening of ancient wood structure on the basis of damage characteristics[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(1): 126-130.
- [12] 秦术杰, 杨娜, 胡浩然, 等. 残损明清古建筑木结构动力特性研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 130-137.
QIN S J, YANG N, HU H R, et al. Study on dynamic characteristics of a damaged ancient timber structure of Ming-Qing Dynasty[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 130-137.
- [13] 周乾, 杨娜. 故宫古建三件典型残损问题[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5): 61-69.
ZHOU Q, YANG N. Typical structural health problems of purlin components of ancient buildings in the Forbidden City[J]. Journal of Water Resources Architectural Engineering, 2016, 14(5): 61-69.
- [14] 成俊卿, 杨家驹, 刘鹏, 等. 中国木材志[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [15] 姜笑梅, 程业明, 殷亚方, 等. 中国裸子植物木材志[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

(本文编校 向 琴)