

# The Damage and Reinforcement of Timber Beams in Historical Buildings

Yingmin Jiang

College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai  
Email: [emmajiang1@126.com](mailto:emmajiang1@126.com)

Received: May 7<sup>th</sup>, 2015; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2015; published: May 28<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Historical buildings are important historical and cultural heritage in our country, in which timber buildings are the main structural styles. Timber beams experience destruction of decay, fracture, and pulling out during the service. So it is necessary to reinforce the beams of historical buildings. Many existing reinforcement methods have a good effect to a certain extent, but they all have limitations and cannot be widely used. The method of reinforcing beams using self-tapping screws has a good reinforcement effect and no effect on the external appearance. However before widely used in reinforcing historical building beams, there is a need for further deeply study.

## Keywords

Historical Buildings, Timber Beams, Destruction Style, Reinforcement Method, Self-Tapping Screws

---

# 古建筑木梁的破坏及加固方法

姜英敏

同济大学土木工程学院, 上海  
Email: [emmajiang1@126.com](mailto:emmajiang1@126.com)

收稿日期: 2015年5月7日; 录用日期: 2015年5月23日; 发布日期: 2015年5月28日

## 摘要

古建筑是我国的重要历史和文化遗产，而木结构是其中的主要结构形式。结构中的木梁会在其服役期间产生腐朽、开裂及拔榫破坏，因此需要对其进行必要的修复加固。已有的许多加固方法能在一定程度上对梁有修复效果，但均有其局限性，而自攻螺丝修复加固木梁的方法由于其良好的修复效果和对外貌毫无影响的特点，能广泛应用于古建筑木梁的加固，但需进行进一步深入的研究。

## 关键词

古建筑，木梁，破坏形式，加固方法，自攻螺丝

## 1. 引言

木结构是我国古建筑中的主要结构形式，在历史性城镇中仍保留有许多历经百年甚至千年的古木建筑。例如我国现存最高、最古老的古代木结构建筑——山西应县木塔，其在遭受近千年的强风、地震以及人为破坏等作用后，依然屹立不倒[1]，以及宁波保国寺大殿、山西五台县佛光寺大殿等[2]。这些古建筑是我国的重要历史文化遗产，但由于受到环境温湿度变化的长期影响及木材本身的缺陷，木构件中产生了开裂的现象，使得构件的承载力降低，进而影响整个结构的安全，因此对这些构件进行加固非常必要。

木梁作为木结构中的主要受力构件，其受力性能对整个结构安全至关重要。由于木材是一种各向异性的自然材料，其顺纹抗剪强度和横纹抗拉强度很低[3]，且古建筑中的木梁由于处于荷载长期作用，木梁中产生沿纵向的裂缝。本文主要研究了古建筑中木梁的可能破坏形式，并讨论了木梁的加固方法。

## 2. 木梁的主要破坏形式

古建筑中的木梁由于受到自然环境的长期作用及服役时间长，其物理力学性能会下降，因而产生不同的破坏类型，主要包括如下3种破坏形式。

### 2.1. 腐朽破坏

对于长期处于潮湿环境中的古建筑木梁，会发生构件的腐朽破坏，例如屋面的角梁(如图1所示)。由于角梁的位置在屋面，当屋面漏雨时，会因为积水而对木梁产生腐朽破坏。腐朽会造成梁构件的抗拉、压、弯、剪等截面面积的减小，从而导致其承载力降低，对整个木结构非常不利。

### 2.2. 开裂破坏

木梁中主要会产生两种裂缝。一种为由于木材横纹抗拉强度和顺纹抗剪强度低导致的沿木梁纵向的受力裂缝(如图2所示)，该裂缝一般尺寸较大；一种是由于构件在制作当时含水率较大，又由于环境中含水率的变化，木梁中的水分会和环境中的水分含量达到平衡，在这个过程中，木梁表面会产生干缩裂缝。裂缝会使木梁的材质下降导致其抗拉、压、弯、剪等性能降低，木梁在荷载作用下初始裂缝会进一步开展。

### 2.3. 拔榫破坏

古建筑中连接(梁与梁之间及梁与柱之间)主要采用榫卯连接的形式，这些连接作为结构的重要组成部分



Figure 1. Decadent destruction

图 1. 腐朽破坏



Figure 2. Cracking destruction

图 2. 开裂破坏

分，其力学性能对整个结构的性能至关重要。在长时间外力作用或木材本身收缩等因素影响下，这些连接处很容易发生拔榫破坏(如图 3 所示)。拔榫使得梁、柱构件有效受力截面面积减小，容易产生受拉、压、弯、剪破坏，对结构整体性造成一定影响。

### 3. 木梁加固方法

#### 3.1. 古建筑木梁加固原则

我国的古建筑保护主要依据以下三部法规施行。首先为保护文物建筑及历史地段国际宪章中规定的古建筑保护原则[4]，主要为 1964 年在意大利威尼斯通过的《威尼斯宪章》，宪章指出“修复过程是一个高度专业性的工作，其目的旨在保存和展示古迹的美学与历史价值，并以尊重原始材料和确凿文献为依据。”，当加固对象为与社会公益相关的文物建筑时，宪章规定“决不可以变动它的平面布局或装饰”。其次为 1982 年国家颁布的《中华人民共和国文物保护法》，它将文物保护的概念纳入法律范畴；在 1992 年 9 月发布了国家标准《古建筑木结构维护与加固技术规范》，其中规定“古建筑的维护与加固，必须遵守不改变文物原状的原则。原状系指古建筑个体或群体中一切有历史意义的遗存现状。若需恢复到创建时原状或恢复到一定历史时期特点的原状时，必须根据需要与可能，并具备可靠的历史考证和充分的技术论证。” [5]。

由以上综述可知，古建筑木梁加固主要遵循历史建筑保护的“原真性、必要性和可逆性”，最大限



Figure 3. Pulling tenon failure  
图 3. 拔榫破坏

度地保持古建筑的原有风貌，满足“修旧如旧”的修缮原则。

## 3.2. 已有工程中的修复方法

### 3.2.1. 剔补和嵌补

剔补的方法是直接将构件中的腐朽部分清除，经防腐处理后根据原尺寸形状补上干燥木材，并用耐水性胶黏剂粘牢(如图 4 所示)；嵌补的方法适用于梁的水平裂缝深度小于梁宽或直径的 1/4 时，用木条和耐水性胶黏剂粘牢，并将缝隙粘贴严实[6]。

剔补和嵌补的修复方法仅在外观上对构件有一定修复作用，但难以恢复木梁的整体工作性能，不是一种行之有效的修复方法。

### 3.2.2. 加铁箍加固

可在木梁的表面进行铁件环箍处理来修复木梁，该对受损构件进行修复加固方法的工程应用历史较悠久，在清代的《工程做法》中就有关于加铁箍对木构件进行修复的详细规定[7]。该方法对木梁的修复有一定效果，但是铁件容易锈蚀，锈蚀后的加固效果会大大削弱。

### 3.2.3. 下撑式钢拉杆加固

下撑式钢拉杆加固木梁的形式较多，图 5 左列出了一种较简单的加固形式，该方法一般适用于加固截面小、承载力不足或者挠度过大的梁。在加固前，需检查木梁端头的材质是否腐朽或虫蛀，只有在材质较完好的条件下才能保证拉杆的固定牢靠。

### 3.2.4. 夹接、托接方法加固

对于梁端木材发生腐朽、虫蛀时，可采用夹接或者托接的方法来加固木梁。将木梁进行临时支撑，当多个楼层的梁加固时，各支撑点应上下对齐，在临时支撑完成后，锯去木梁损坏的部分，采用夹接、托接方法进行加固，图 5 右为该方法的示意图。这种加固方法对构件的外观影响较大，不适用于对外貌有严格要求的建筑。

由以上综述可知，已有工程中的修复方法不能实质上增强木梁的整体工作性能，或者在环境长期作用下存在耐久性问题，或其仅适用于木材本身材质较好的情况，或对构件的外貌影响较大，这些修复方法均存在不足和局限性。



Figure 4. Repair method of replacement  
图 4. 剔补的修复方法

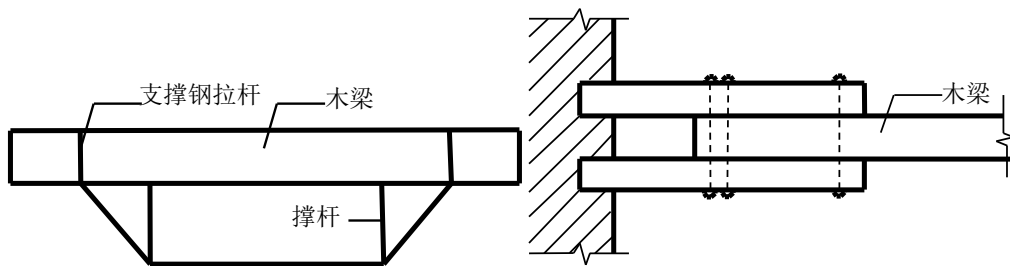


Figure 5. Reinforcement of strut-framed steel rod (left) and clip (right)  
图 5. 下撑式钢拉杆加固(左)及夹接加固方法(右)

### 3.3. 现代加固技术

#### 3.3.1. 纤维布加固木梁

纤维布(fiber reinforced plastics, FRP)由于其几何可塑性强及自重轻等特点而广泛应用于木结构的加固,纤维布沿其纹路方向的抗拉强度很高,而木材的顺纹抗压强度较高,在 FRP 加固的木梁中(如图 6 所示),这两种材料的性能都能得到很好的利用,并且材料间具有良好的粘结性能,能够很好地协同工作[8]。

杨会峰等通过对比分析 6 根普通木梁和 21 根 FRP 加固木梁的极限荷载与抗弯刚度等结构性能[8],发现 FRP 避免或延缓了木梁的受拉脆性破坏,降低了木材缺陷对木梁受弯性能的影响,充分利用了木材的抗压强度并提高了构件的延性,加固构件的极限承载力比未加固构件提高了 17.7%~77.3%,刚度提高了 10.9%~105.0%。

Borri 等通过 20 根经 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)布加固的矩形木梁的四点弯曲试验研究[9]发现,在木梁底面粘贴 CFRP 布是一种有效的加固方式,加固后木梁的刚度提高了 28%,而强度提高了 60%。

学者马建勋、张大照等通过 CFRP 布加固木梁的试验研究及相关的理论分析研究发现[10] [11],CFRP 布加固木梁是一种加固效果较好的方法,加固后木梁的承载力和刚度均明显提高,且延性也得到显著改善。

FRP 加固木梁是一种行之有效的加固方法,但其主要依赖于粘结胶传递木梁和纤维材料间的应力,而粘结胶在荷载和环境的长期作用下存在耐久性问题,且由于该方法在木梁表面进行施工,会影响构件的外观,并不适用于对外貌要求严格的建筑。

### 3.3.2. 自攻螺丝加固木梁

自攻螺丝是一种随着现代工艺发展而制造出的新型的产品，由于其带有自攻钻头，能方便贯入木梁中而不影响木梁本身的性能，自攻螺丝的抗拉强度较高[12]，当其沿着垂直木材横纹方向贯入木梁中时，能和木材间建立良好的粘结，提高木梁的横纹抗拉能力和顺纹抗剪能力，增强木梁整体工作性能，从而达到提高木梁承载力的作用(如图7所示)。

作为一种新型的加固木梁的方法，其研究和应用尚处于起步阶段，对于自攻螺丝加固木梁的研究涉及较少。

蒋锐采用自攻螺丝对开裂的木柱进行了轴压的试验研究，由于开裂木柱在竖向压力作用下会形成独立的两肢分别变形[13]，降低了木柱的承载力，降低幅度最高达 19%，而采用自攻螺丝加固后的试件由于自攻螺丝的拉结作用，整体变形能力强，承载力显著提高。由于自攻螺丝加固木柱的机理与其加固木梁的类似，可同样将自攻螺丝应用于木梁的加固。

Jonsson 通过自攻螺丝加固胶合木曲梁的试验研究发现自攻螺丝能有效地加固木梁[14]。试验发现未加固梁的破坏形式主要是脆性的横纹受拉破坏，在达极限荷载前力与位移是线性相关关系；对已经发生破坏的梁用自攻螺丝加固后，其承载力相比未加固梁最大提高了 20%，梁的整体工作性能提高，其极限变形得到了极大的改善，达到未加固梁的 2 倍；对于预先进行了加固的梁，其承载力提高幅度最高达 50%，极限变形提高 1.5 倍。

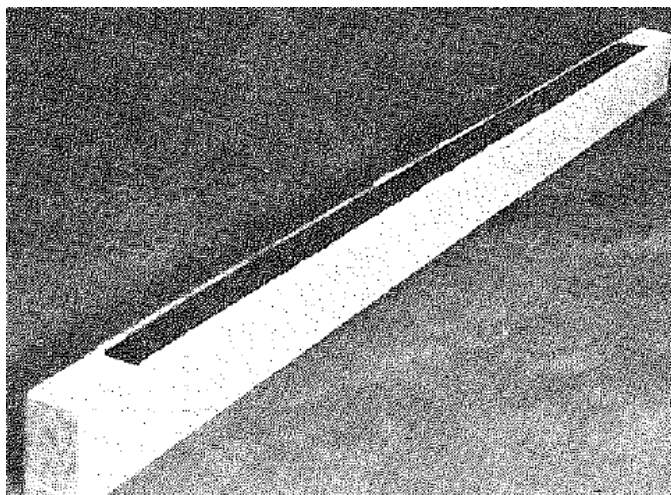


Figure 6. Timber beam reinforced with FRP

图 6. FRP 加固木梁



Figure 7. Self-tapping screws and the bond between self-tapping screws and wood

图 7. 自攻螺丝及其与木材间的粘结

## 4. 结语

本文分析了古建筑木梁可能发生的破坏形式，并对其修复加固方法进行了详细的评述，在此基础上提出了一种新的修复木梁的方法。主要结论可总结如下：

- 1) 古建筑木梁由于木材本身的缺陷或者环境的长期作用，容易发生腐朽、开裂及拔榫破坏等现象。
- 2) 已有工程中有许多修复加固木梁的方法，但均有其局限性，并不能广泛适用于木梁的修复加固。
- 3) 已有相关研究表明 FRP 在修复加固木梁方面有良好的效果，对其承载力、刚度和延性均有一定提高，但其依赖粘结胶的粘结作用，存在耐久性问题，并且会影响构件外观。
- 4) 自攻螺丝作为一种新型修复加固木梁的方法，通过增强木梁的整体工作性能达到较好的修复效果，并且施工方便，施工完成后对外观完全没有影响，该方法将会广泛应用于古建筑木梁的修复加固，但在广泛应用于实际工程前还有待进一步研究。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈志勇, 等 (2012) 应县木塔斗拱竖向受力性能精细化有限元模拟. *科学技术与工程*, **12**, 819-824.
- [2] 吴照华 (2007) 碳纤维布加固古建筑木梁的性能研究. 西安建筑科技大学, 西安.
- [3] Blass, H.J. and Bejtka, I. (2004) Reinforcements perpendicular to the grain using self-tapping screws. *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*, 1001-1006. <http://holz.vaka.kit.edu/public/37.pdf>
- [4] 罗才松, 黄奕辉 (2005) 古建筑木结构的加固维修方法述评. *福建建筑*, **95**, 196-202.
- [5] GB 50165-92 (1992) 古建筑木结构维护与加固技术规范. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [6] 周乾, 等 (2009) 古建筑木结构加固方法研究. *工程抗震与加固改造*, **31**, 84-91.
- [7] 王璞子 (1995) 工程做法注释. 中国建筑工业出版社, 北京, 278-281.
- [8] 杨会峰, 等 (2008) FRP 加固木梁的受弯性能研究. *建筑材料学报*, **11**, 591-597.
- [9] Borri, A., Corradi, M. and Grazini, A. (2005) A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Composite Part B: Engineering*, **36**, 143-152.
- [10] 张大照 (2003) CFRP 布加固修复木柱梁性能研究. 同济大学, 上海.
- [11] 马建勋, 蒋湘闽, 胡平, 等 (2005) 碳纤维布加固木梁抗弯性能的试验研究. *工业建筑*, **8**, 35-39.
- [12] Hansen, K.F. (2002) Mechanical properties of self-tapping screws and nails in wood. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **29**, 725-733.
- [13] Song, X.B., Jiang, R., Zhang, W.P., et al. (2012) Compressive behavior of longitudinally cracked wood columns retrofitted by self-tapping screw. *World*, **15**, 19.
- [14] Jonsson, J. (2005) Load carrying capacity of curved glulam beams reinforced with self-tapping screws. *HolzalsRoh-Und Werkstoff*, **63**, 342-346.