

综述与进展

木结构螺栓连接的力学性能研究进展

张俊珍, 钟永, 赵荣军, 周海宾

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 螺栓连接已广泛用于现代木结构建筑中,系统研究其力学性能对建筑结构的安全性评估意义重大。本文从螺栓连接强度的预测方法、力学行为模拟、螺栓预紧、螺栓连接的破坏方式,以及抗火抗震条件下的力学性能等方面进行了总结归纳,针对目前的木结构螺栓连接中尚未解决的问题及有待进一步开展的研究项目,建议加强复螺栓连接的力学行为模拟、可靠性评价等研究。

关键词: 木结构; 螺栓连接; 承载力; 破坏方式; 抗火抗震条件

中图分类号: TU366.2 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654(2012)04-0039-04

Reviews of Mechanical Properties for Timber Bolted Joints

ZHANG Jun-zhen, ZHONG Yong, ZHAO Rong-jun, ZHOU Hai-bin

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

Abstract: Bolted connections have been widely used in modern timber structures. Their mechanical properties are very important for designing safe and durable wood structures. The authors have summarized studies on timber bolt connections for predicting failure, as well as modeling strength and mechanical behaviors under fire and seismic conditions. The authors also have made some suggestions for future modeling mechanical behavior and reliability based on previous development in modern timber bolted joints.

Key words: timber structure; bolted joint; bearing capacity; failure modes; fire and seismic conditions

传统木结构主要采用榫卯结构连接,一般不使用金属连接件,结合部件具有一定的强度、韧性和变形能力,但刚性较低。轻型木结构中,齿板连接和钉连接为主要连接方式,齿板连接主要应用于木桁架,其受压承载力低,不能用于传递压力;钉连接应用于墙体和楼板。螺栓连接与钉连接都属于销类连接,作用原理相同,但螺栓直径大,故其承载能力比钉连接有很大提高。

随着木结构建筑向大跨度、大空间的方向发展,螺栓连接成为重型大跨度木结构建筑中主要的连接形式,具有制作简单、安全可靠、施工快捷的特点,已广泛应用于现代胶合木结构,如梁柱结构、木钢架、木桁架、木拱、索-木等木结构建筑中^[1-2]。目前,国内外学者就螺栓连接的承载力、破坏模式,及抗火抗震条件下的力学性能等进行了大量研究。本文通过对相关研究的总结概述,以期为我国木结构螺栓连接的进一步研究提供参考。

投稿日期: 2012-01-15; 修改日期: 2012-06-05

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项项目(200904016; 201104027)。

作者简介: 张俊珍(1987—),女,中国林科院木材工业研究所硕士研究生。

通信作者: 赵荣军,女,中国林科院木材工业研究所副研究员。

1 螺栓连接的承载力分析

木结构的整体寿命往往取决于节点连接的承载力。由于螺栓连接节点设计的复杂性,很多国家仍采

用经验法来确定节点设计值^[3]。为了完善此方面研究,国内外学者就测试方法、行为模拟和提高承载力等方面开展了许多研究,为现代木结构螺栓连接承载力的深入研究奠定了基础。

1.1 承载力的测试和预测方法

木结构螺栓连接承载力的测试方法主要有:经验法、木材断裂力学分析方法和非线性分析方法等。

20世纪30年代,木结构螺栓连接的设计值主要依靠经验确定,该方法目前仍具有一定的可行性和参考价值。随着对螺栓连接设计值的精确性要求越来越高,以及研究的不断深入,木材断裂力学分析方法和非线性分析方法,逐渐应用到木结构螺栓连接的强度值测试中。

法国机械技术实验室用木材断裂分析方法测试了螺栓连接的载荷承载力,节点破坏的蔓延采用了线性断裂力学中的有限元方法进行分析,得出结论:考虑木材断裂因素,可以更准确地预测极限载荷,木材断裂力学分析方法可以用来提高木结构螺栓节点设计准则的准确性^[4]。

非线性分析方法可以用来测试节点的屈服强度和极限强度,计算的螺栓节点屈服强度和极限强度与试验值较吻合^[5]。通过比较非线性分析方法与欧洲屈服理论发现,在运用屈服理论时,如果考虑木材的极限强度与螺栓的弯曲力矩,预测效果更佳。

1.2 力学行为模拟和可靠性研究

1.2.1 力学行为模拟

随着木结构螺栓连接载荷承载力研究的发展,用科学可靠的模型来模拟其力学行为,开拓了另一个重要的研究领域。木结构螺栓连接力学性能模拟的复杂性在于木材为各向异性材料,节点材料性质差异和连接形式多样化等。国内外学者的研究经历了从试验测试、数值分析,到模型预测和完善的三个阶段,主要研究出以下几个模型:

1) 欧洲屈服模型,包括与木材构件有关的屈服机理经验方程,其关键假设就是连接件都有延展性,同时考虑了连接件的尺寸、屈服强度,及木材销槽承压强度,并根据材料力学方法,推导出螺栓连接承载力的计算公式。

欧洲屈服模型应用较广,已被大多数国家的木结构设计规范所采用,但是如果将垫圈产生的附加承

载力考虑在内,欧洲屈服模型预测螺栓连接的载荷承载力,与试验结果的吻合较弱^[6]。

在欧洲屈服模型的基础上,弗吉尼亚理工学院(Virginia Polytechnic Institute)提出了单螺栓连接的载荷-滑移特性的新模型,可以准确预测单螺栓连接的载荷-位移关系^[7]。

2) 有学者在二维压缩区域,将木材假设成弹塑性各向同性材料,采用最大应力值作为预测破坏的标准,研究了木结构单/双螺栓连接的行为。但是,此模型有一定局限性,仅适用于木材构件的厚度与螺栓直径的比值较小的场合^[8]。

3) 美国农业部林务局针对螺栓连接承受平行于纹理受力,设计了一个三维数值模型,用三线应力-应变关系,描述了木材承受平行于纹理的非线性压力、剪切应力和刚度减小的过程。预测的载荷-位移曲线没有实际试验曲线平滑,此模型有待于完善^[9]。

4) 还有研究提出了当木材承受垂直于纹理方向受力时的数值模型,能够预测销连接(包括螺栓连接)时木材的破坏形式,也能准确预测当发生延性破坏时的塑性变形等,但此模型要求材料的参数尽可能与真实值一致^[10]。

研究节点材料的参数对于模拟模型的建立非常必要。目前,螺栓连接的模拟研究还较单一,螺栓连接的受力非常复杂,不仅仅是平行于纹理和垂直于纹理两种受力形式,而且在整个木结构中的受力方向亦受多种因素的影响。若要真实地模拟螺栓连接并将其应用于工程实践,还需要开展大量连接试验及分析模型研究。

1.2.2 可靠性研究

我国学者在单根圆钢梢连接的承弯、承压承载能力设计计算公式的可靠度校准方面,进行了单根螺栓连接的模拟研究,为复螺栓连接性能研究奠定了基础。当今,木结构螺栓连接可靠性研究主要集中在单螺栓连接方面,而在工程实践中,复螺栓连接的应用更加广泛,因此需要加大复螺栓连接的可靠性评价等研究。四川大学建筑与环境学院以木结构设计规范为基础,建立了复螺栓抗弯承载能力可靠度分析模型,列出了复螺栓连接抗弯承载能力可靠度水平,有效地解决了复螺栓连接的抗弯承载能力缺乏评估方法的问题^[11]。

1.3 螺栓预紧

螺栓预紧在很大程度上可提高螺栓连接的初始刚度和载荷承载力,对于结构设计者来说,充分了解预紧力对螺栓连接的载荷承受能力非常重要。螺栓预紧的研究主要集中在预紧的作用、预紧节点的力学性质以及预紧节点的应力松弛等方面。

螺栓预紧力的引入,可以明显提高节点的抗滑移能力,降低极限螺栓弯曲角。日本北海道大学(Hokkaido University)提出了螺栓连接预紧力的扩展屈服模型,对施加预紧力螺栓节点进行试验,并将其结果与数学模型进行比较。结果表明:当预紧螺栓连接在垂直于木材纹理受力时,其实测承载能力比模型分析值偏低,说明该数学模型尚需不断优化。

通过螺栓预紧对木结构钢夹板节点滞后效应和力学极限特性研究发现,预紧节点比未预紧节点的迟滞阻尼、等效粘性阻尼和循环高度更高;在未预紧节点滞回曲线的基础上,增加由预紧力产生的摩擦滞回曲线,可以得到预紧节点的滞回曲线。钢连接件进行轴向预紧的效率亦有所研究,经过一年之后,未预紧螺栓和预紧螺栓的残余应力分别是初始预紧力的0.23和0.66,残余应力能够引进足够的摩擦阻尼,来提高节点的等效粘性阻尼率^[12-14]。

总之,螺栓连接预紧方面的研究还处于起步阶段,研究范围较窄,鉴于预紧对螺栓连接的重要作用,需要加强螺栓预紧的效果评价、影响因素及螺栓预紧后的使用寿命等研究,进而在工程中采用螺栓预紧,以提高结构安全性。

2 螺栓连接的破坏模式

2.1 破坏方式

通常整体结构的破坏往往起始于连接处,因此,准确了解和有效预测螺栓连接的破坏形式至关重要。螺栓连接受力破坏一般包括:木材剪切破坏、木材撕裂破坏、木材销槽承压破坏和螺栓抗弯屈服破坏,木材与钢材的螺栓连接受力破坏模式还包括:钢板受拉破坏和孔壁受压破坏等^[15]。

螺栓连接的破坏形式可分为:延性破坏和脆性破坏。受力方向不同,破坏形式有所差异。延性破坏在结构或构件破坏前,有明显变形或其他预兆破坏;而脆性破坏则相反,在线弹性阶段或初始塑性阶段,破

坏力极大。在冲击和振动荷载作用下,要求木结构材料和连接处能够吸收较多能量,同时能产生一定变形而不致破坏,即要求结构或构件有较好的延性。在工程实践中,如何将脆性破坏转换为延性破坏甚至不发生破坏,保证结构破坏前有明显的预兆和逃离时间,对保护人们的生命财产安全有重要的意义。

2.2 破坏模式预测和模拟

在对木结构螺栓连接破坏进行准确预测和模拟前,首先要分析破坏产生的原因。断裂力学概念可以用于分析单螺栓或者销节点由于平行于纹理劈裂的破坏,模拟节点断裂的试验结果和数值结果的对比显示,线弹性断裂力学能够提供螺栓节点的载荷-承载能力的近似值^[16]。欧洲屈服模型可以用来解释木结构节点的脆性断裂,通过将垂直于纹理的平均张应力和平均剪切应力与断裂力学模型的数值比较发现,欧洲屈服模型低估了垂直于纹理的张应力,若增加一个螺栓孔周围假定的垂直于纹理的峰值应力,使得破坏理论能够检测到裂缝的开始,并且给欧洲屈服模型做了限定^[17]。

另外,美国俄勒冈州立大学(Oregon State University)用X射线扫描技术,将节点螺栓的弯曲和整体的位移量化,并与节点的滑移值结合,从而估算出整个节点木材的变形,和沿着螺栓直径方向的变化^[18],最后发现影响破坏模式的因素,并建立预测模型。

节点的破坏方式由螺栓的长细比、螺栓个数、螺栓间距等参数决定,弹性分析可以预测螺栓之间受力分配的不均衡性^[19]。为了解决自攻螺栓加固木结构容易产生劈裂的问题,哥伦比亚国立自治大学(Universidad Nacional de Colombia)^[20-21]研究出计算节点销受力孔周围的应力分布模型,能够计算出加固螺栓的载荷;同时,设计出预测木结构螺栓节点脆性破坏的分析模型。

随着研究进一步深入,学者们对模型进行了不断的完善。例如奥克兰大学(University of Auckland)针对澳大利亚标准 AS1720 条款中某些错误假设,提出了一种解决所有潜在脆性和延性破坏模式的方法,这种方法是材料力学性能为依据,运用连接中不同材料的特性,如抗压、剪切和抗拉强度特点等进行模拟^[22]。

综合上述分析,木结构螺栓连接的破坏方式有多种,产生的原因各异,目前研究仅集中于垂直或平行材料纹理受力时的破坏方式分析和模拟,量化破坏过程中节点各部分变形的方法也比较单一,还需不断深入螺栓连接的模拟研究,将现有模型应用于实际工程中,从而建立有效的预测体系。

3 在抗火、抗震条件下节点力学性能

为了木结构的安全,在特定条件(火灾、地震等)下的力学行为特征亦不容忽视,已成为关注的热点。

有学者测试了在浴火、地震条件下螺栓连接的力学性能,并且提出了相应的测量方法。新西兰坎特伯雷大学(University of Canterbury)研究发现,在浴火条件下,没有钢板的连接,或者钢板嵌入木构件之间的连接,比钢材暴露在外面的连接性能好;约翰森公式(the Johansen formulae)是预测螺栓连接抗火能力简单易行的方法,此方法包括随着温度变化,嵌入强度随之变化的模型^[23-24]。

重型木建筑的抗震性能主要依赖于螺栓的长细比,高长细比螺栓的连接延性更好,在破坏之前,伴随着钢的屈服和木材压溃^[25]。

木结构螺栓节点抗火、抗震条件下节点的力学性能方面研究才刚刚起步,尚未涉及特殊条件下节点的主要破坏方式、力学性质的比较研究、节点的保护和修复等内容。考虑到建筑的安全性,在提高螺栓连接耐火抗震性能方法和优化节点设计等方面,有待加大研究力度。

4 结语

针对目前螺栓连接研究中存在的问题和不足,提出以下几点建议。

1) 进一步探究屈服理论在木结构螺栓连接可靠性设计中的应用,加大对螺栓节点材料参数的研究,不同受力方向情况下的节点破坏,提高木结构螺栓连接承载力的新方法以及完善螺栓预紧研究。

2) 继续完善木结构螺栓连接破坏过程中的节点变形、模拟及有效预测等研究。同时,引进有限元软件,建立特定螺栓节点的本构模型和数值模型,掌握木结构螺栓连接的应力分布与失效机理,对木结构螺栓节点的力学监控和破坏预测有重要意义。

3) 尽快开展对耐火抗震条件下,提高螺栓连接的力学性能方法和优化节点设计等研究。探究螺栓连接与传统榫卯连接方式相结合的新型连接方式。

木结构螺栓连接的力学性能与其抗震性和结构力学等,与建筑的安全性密切相关,合理借鉴欧美等国的研究经验和成果,对我国开展相关研究大有裨益。系统进行国产人工林结构用工程材料螺栓连接力学性能研究,将为我国现代木结构设计与建造提供科学依据。

参考文献:

- [1] Sven Thelandersson. Timber Engineering [M]. London: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [2] 徐德良,刘伟庆. 三次样条插值函数拟合木拱桥拱轴线[J]. 江苏建筑, 2008 (5): 36-44.
- [3] 王振家. 圆钢梢连接承弯、承压承载能力可靠度分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1984(4): 32-45.
- [4] Daudeville L, Davenne L, Yasumura M. Prediction of the load carrying capacity of bolted timber joints[J]. Wood Science and Technology, 1999, 33(1): 15-29.
- [5] Kei Sawata, Motoi Yasumura. Estimation of yield and ultimate strengths of bolted timber joints by nonlinear analysis and yield theory[J]. Journal of Wood Science, 2003, 49(5): 383-391.
- [6] Leijten A J M. Withdrawal capacity of washers in bolted timber connections[J]. Wood Material Science and Engineering, 2009, 4 (3-4): 131-139.
- [7] Christian P Heine, J Daniel Dolan. A new model to predict the load-slip relationship of bolted connections in timber[J]. Wood and Fiber Science, 2001, 33(4): 534-549.
- [8] Kharouf N, McClure G, Smith I. Postelastic behavior of single- and double-bolt timber connections [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 188-196.
- [9] Patton-Mallory M, Cramer S, Smith F, et al. Nonlinear material models for analysis of bolted wood connections [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1997, 123(8): 1063-1070.
- [10] Franke, Bettina, Quenneville P. Numerical modeling of the failure behavior of dowel connections in wood [J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 2011, 137(3): 186-195.
- [11] 张新培. 建筑结构可靠度分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [12] Ali Awaludin, Takuro Hirai, Toshiro Hayashikawa, et al. Load-carrying capacity of steel-to-timber joints with a pre-tensioned bolt[J]. Journal of Wood Science, 2008, 54(5): 362-368.
- [13] Ali Awaludin, Takuro Hirai, Toshiro Hayashikawa, et al. Effects of pretension in bolts on hysteretic responses of

(下转第 52 页)

小。燃烧过程中,试件的有效燃烧热和 CO_2 释放量测定结果,列于表 1。

表 1 燃烧过程中试件的有效燃烧热和 CO_2 释放量

Tab. 1 Effective heat of combustion and carbon dioxide yield of samples

评价指标	DAP 质量 分数/%	燃烧时间/s					
		60	120	180	240	300	360
有效燃烧热/ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0	8.10	8.70	8.50	8.20	8.40	8.40
	4	6.00	6.10	5.60	5.50	5.40	5.20
	6	4.70	3.40	3.00	2.70	2.70	2.60
	8	4.70	4.00	3.40	2.90	2.60	2.40
CO_2 释放量/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0	0.84	0.94	0.95	0.94	0.96	0.98
	4	0.74	0.77	0.74	0.73	0.72	0.70
	6	0.66	0.63	0.61	0.59	0.57	0.56
	8	0.59	0.64	0.64	0.61	0.59	0.57

从表 1 可知,随着 DAP 质量分数的提高,处理试件的 EHC 和 CO_2 释放量均有明显降低。因为阻燃处理抑制了板材可燃性挥发物的生成量,使有效燃烧热值降低;热释放主要是由 CO_2 的反应提供的, CO_2 释放量的降低,说明 DAP 阻燃剂很好地抑制了燃烧。同时,质量分数为 6% 和 8% 时,试件的有效燃烧热和 CO_2 释放量相差不大,因此,质量分数为 6% 的 DAP 为适宜的用量。

3 结论

1) 将经 DAP 阻燃剂处理的五节芒茎秆丝条,制

成茎秆板后,板材的阻燃效果显著改善。

2) DAP 质量分数分别为 6% 和 8% 时,五节芒茎秆板的阻燃性能差异不明显,为降低生产成本,宜选择质量分数为 6% DAP 进行处理。

3) 受制备条件所限,试验所用的五节芒丝条的形态均匀性不够理想,对其阻燃处理效果有一定影响。为加强该工艺的推广和应用,还需对五节芒丝条的加工制备方法做进一步研究。

参考文献:

- [1] 萧运峰,王锐,高洁. 五节芒生态——生物学特性的研究[J]. 四川草原,1995(1):25-29.
- [2] 郑凤山,马心. 农作物秸秆工业在国内外发展近况[J]. 林产工业,2003,30(6):36.
- [3] Chunping Dai, Wayne Wasylciw, Juwan Jin. Comparison of the pressing behaviour of wood particleboard and straw board [J]. Wood Science and Technology, 2004, 38(7):529-537.
- [4] 骆介禹. 含氮有机化合物阻燃剂[M]. 北京:化学工业出版社,2010:1-16.
- [5] 许民,王清文,李坚. 锥形量热仪法在木材阻燃性能测试中的应用[J]. 东北林业大学学报,2001,29(3):17-20.
- [6] 杜春贵,张齐生,金春德,等. FRW 阻燃杉木积成材的阻燃性能[J]. 建筑材料学报,2010,13(4):555-559.
- [7] 王清文,李坚. 用 CONE 法研究木材阻燃剂 FRW 的阻燃机理[J]. 林产化学与工业,2004,24(2):29-34.
- [8] 徐晓楠,周政懋. 防火涂料[M]. 北京:化学工业出版社,2004:280-281.

(责任编辑 张一萍、姜 征)

(上接第 42 页)

- moment-carrying timber joints[J]. Journal of Wood Science, 2008, 54(2):114-120.
- [14] Ali Awaludin, Takuro Hirai, Toshiro Hayashikawa, et al. One-year stress relaxation of timber joints assembled with pretensioned bolts [J]. Journal of Wood Science, 2008, 54(6):456-463.
 - [15] 刘柯珍,王朝晖,黄仲华. 木结构螺栓连接研究进展[J]. 木材加工机械,2011(1):40-42.
 - [16] Daudeville L, Yasumura M. Failure analysis of timber bolted joints by fracture mechanics [J]. Materials and Structures, 1996, 29(7):418-425.
 - [17] Jorissen A. Double shear timber connections with dowel type fasteners[J]. Heron, 1988, 4(3):163-186.
 - [18] Philip E Humphrey, Larry J Ostman. Bolted timber connections, part II. bolt bending and associated wood Deformation[J]. Wood and Fiber Science, 1989, 21(4):354-366.
 - [19] Tan D, Smith I. Failure in-the-row model for bolted timber connections[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(7):713-718.

- [20] César Echavarria. Bolted timber joints with self-tapping screws [J]. Revista EIA, 2007(8):37-47.
- [21] César Echavarria, Alexander Salenikovitch. Analytical model for predicting brittle failures of bolted timber joints[J]. Materials and Structures, 2009, 42(7):867-875.
- [22] Quenneville P, Morris H. Proposal for a mechanics-based bolted connection design approach for AS1720. 1 [J]. Australian Journal of Structural Engineering, 2009, 9(3):195-206.
- [23] Peter Moss, Andrew Buchanan, Massimo Fragiaco, et al. Fire performance of bolted connections in laminated veneer lumber[J]. Fire and Materials, 2009, 33(5):223-243.
- [24] Peter Moss, Andrew Buchanan, Massimo Fragiaco, et al. Experimental testing and analytical prediction of the behaviour of timber bolted connections subjected to fire [J]. Fire Technology, 2010, 46(1):129-148.
- [25] Marjan Popovski, Helmut G L Prion, Erol Karacabeyli. Seismic performance of connections in heavy timber construction [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, 29(3):389-399.

(责任编辑 向 琴)