

文章编号:1673-9469(2022)04-0001-11

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.04.001

胶合木空间网格结构研究进展与展望

刘红波^{1,2},赵敬贤¹,邱 灿²,赵仕兴³,杨姝恒³,何 飞³,陈志华¹

(1. 天津大学 建筑工程学院,天津 300072;2. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;

3. 四川省建筑设计研究院有限公司,四川 成都 610000)

摘要: 胶合木具有环保节能、轻质高强、抗震性能优越等优点,已广泛应用于现代结构中,其中胶合木空间网格结构作为一种重要的结构体系,得到了广泛应用。本文结合已有胶合木空间网格结构实际工程,总结了现有胶合木空间网格结构的分类,并对节点力学性能和整体结构力学性能的研究现状进行了阐述,讨论了胶合木空间网格结构研究尚需解决的问题,可为该类体系的推广与应用提供参考。

关键词: 胶合木空间网格结构;销式节点;植筋节点;力学性能;蠕变性能

中图分类号:TU366.3

文献标识码:A

Research Progress and Prospective of Glulam Space Frame Structures

LIU Hongbo^{1,2}, ZHAO Jingxian¹, QIU Can², ZHAO Shixing³, YANG Shuheng³, HE Fei³, CHEN Zhihua¹

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

3. Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: With the advantages of environmentally friendliness, high strength-to-weight ratio and good seismic performance, glulam has been widely applied to modern structures. The glulam space frame structure is a representative large-span spatial structure. In this paper, the main existing forms of glulam space frame structures are summarized and classified based on practical engineering applications. A comprehensive review of the main research advances of the glulam space frame structure is presented and mainly expounded from the aspects of mechanical behaviors of joints and overall structures. Several issues that should be paid attention to the study of overall structures were proposed. Finally, the further researches worth investigating were put forward. This paper has certain reference significance for the research and can also promote the development of relative engineering applications.

Key words: glulam space frame structures; dowel-type joints; glued-in rod joints; mechanical behavior; creep characteristics

2020年9月22日,习近平总书记在联合国大会一般性辩论上郑重宣布:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放量力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”^[1],以“低能耗、低排放、低污染”为基本特征的低碳经济逐渐成为各行业发展的主要趋势。在当前,建筑能耗已成为与工业能耗、交通能耗并列的三大能耗之一,木材这种绿色建材以其低碳价值得到了越来越多的关注。近年来,随着木材产业工业化程度的提高和制造技术的成熟,各类工程

木产品的出现破除了木材尺寸的限制,为大跨度木结构的发展奠定了基础,其中,胶合木以其材性规格化、尺寸自由化等优势在实际工程中得到了广泛应用。胶合木是以厚度为20~45 mm的板材,沿顺纹方向叠层胶合而成的木制品^[2],可被加工成不同的形状,如变截面构件、弧形或自由曲线形构件等。因制作胶合木层板的过程中通过目测分等或机械分等剔除了大的木材缺陷,使得胶合木缺陷分布更加均匀,因此其强度较原木、方木、锯材等的强度有较大提升,极大地提高了木材资源的利用率。

收稿日期:2022-11-12

基金项目:国家重点研发计划(2019YFD1101005);住房和城乡建设部科技计划项目(2019-S-044);四川华西集团科技项目(HXKX2019/001)

作者简介:刘红波(1983-),男,河北平山人,工学博士,教授,主要从事钢结构与空间结构的研究。

本文结合工程实例,对胶合木空间网格结构进行分类总结,分析了不同结构类型的受力特点。作为胶合木空间网格结构的关键组成部分,销式节点和植筋式节点是应用最广泛的两种节点,本文对不同节点的受力机理和关键性能进行了总结,并对胶合木空间网格结构整体力学性能研究中存在的关键问题进行了探讨。

1 胶合木空间网格结构

胶合木空间网格结构是指按照一定规律布置的杆件、构件通过节点连接而构成的空间结构,包括网架结构、网壳结构、后成形空间网格结构、互承式结构等。

1.1 网架结构

木网架结构的定义和钢网架结构类似,是指按照一定规律布置的杆件通过节点连接形成的平板型或微曲面型空间杆系结构,主要承受整体弯曲内力^[3]。节点处一般使用钢连接件,常见的连接方式包括螺栓连接、植筋连接等。木网架结构具有空间刚度大、构件规格统一等特点,多用于公共建筑中。日本小国町民体育馆^[4]采用了木网架结构,1988年建造完成,最大跨度达56 m,见图1(a)。

1.2 网壳结构

木网壳结构是指按一定规律布置的杆件通过节点连接而形成的曲面状空间杆系或梁系结构,主要承受整体薄膜内力^[3]。大部分荷载由网壳杆件轴力承受,杆件可以为直线形,也可以为曲线形。网壳造型美观、受力合理,是大跨度木结构的理想形式。美国塔科马穹顶^[5]采用了球面木网壳结构,直径达162 m,为目前全球最大的单层胶合木网壳结构,见图1(b)。

1.3 后成形空间网格结构

后成形空间网格结构可以利用平面网格通过推拉或提升等手段形成空间围合,又可以细分为两种方式,一种是可展结构,即通过平面均匀网格

提升或推拉成形,解除约束后可以恢复平面形式;一种是不可展结构,同样也是用板条弯曲成形,但是在空间中组装,网格尺寸不统一且不可展。曼海姆多功能厅^[6]是Frei Otto的代表作,如图1(c)所示,跨度超过60 m。

1.4 互承式结构

互承式结构的特点是每根构件都被相邻的构件支承,同时又支承着相邻的构件,因此互承结构在几何上和结构上均无主次层次可言,从而形成了一种独特的建筑美感。在互承结构中,杆件相互搭接,避免了多个杆件交汇于一点,从而简化了节点的构造,再加上互承结构是通过杆件之间的相互支撑解决弯矩传递的问题,可以利用小尺寸构件实现大跨度结构,因此特别适用于木结构(图1(d))。

2 胶合木节点

在胶合木空间网格结构中,节点通常是结构设计的关键因素。按照连接不同方式分类,节点可以分为销式连接节点、植筋连接节点、榫卯连接节点、胶连接节点、齿连接节点等。考虑到胶合木空间网格结构对节点传力明确、受力可靠、安装便捷的要求,销式连接节点(图2(a)(b))和植筋连接节点(图2(c))是目前应用最广泛的两种节点。

2.1 销式节点

销类连接件包括螺栓、螺钉、销等细长的杆状连接件,它们承受的荷载与连接件长度方向垂直,故称为抗剪连接。销的抗剪是基于销的弯曲和销槽木材的受压,因此具有良好的韧性,其中,螺栓连接和螺钉连接具有连接紧密、韧性好、制作简单、安全可靠的优点,是目前应用最广泛的连接形式。

销连接的失效模式是建立销式连接节点承载能力计算理论的基础,目前国际上广泛采用的是Johansen提出的屈服模式^[8],表1列出了典型单剪连接和双剪连接的失效模式,包括销槽承压破坏(I_m 、 I_s 、II)和销屈服(III_m、III_s、IV)。

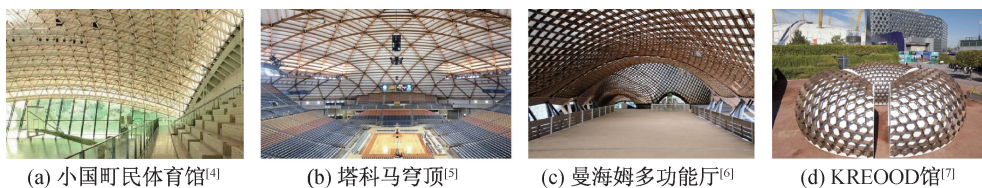


图1 胶合木空间网格结构工程实例

Fig. 1 Practical engineering of glulam space frame structures

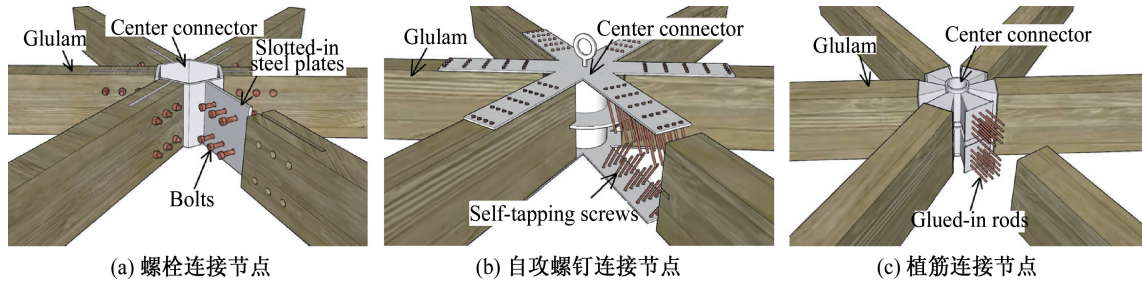


图 2 典型胶合木节点

Fig. 2 Typical glulam connection

表 1 销式紧固件的失效模式

Tab. 1 Failure modes of fasteners

失效模式	I_m	I_s	II	III_m	III_s	IV
单向剪切						
双向剪切						

注: I_m 为主构件销槽承压破坏, I_s 为侧构件销槽承压破坏, II 为销槽局部挤压破坏, III_m 为单剪连接时侧构件中出现单个塑性铰破坏, III_s 为单剪连接或双剪连接主构件出现单个塑性铰破坏, IV 为主侧构件中出现两个塑性铰破坏。

2. 1. 1 螺栓连接节点

对于螺栓连接,木材销槽承压强度与木材一般的抗压强度不同,瞬间荷载作用与长期荷载作用也不同,有学者对单个螺栓受力性能及销槽承压强度进行了研究^[9-11],欧洲规范^[12]、美国规范^[13]和中国规范^[2]也综合考虑上述复杂因素,提出了胶合木中销轴类紧固件连接的承载力设计值。

在实际工程中,考虑到杆件通常承担轴力、弯矩和剪力的复合作用,因此关键节点连接通常采用螺栓群的布置形式,对于此类节点,每个螺栓承担的荷载并不完全相同,有学者针对胶合木螺栓连接节点的静力性能^[14-17]和动力性能^[17-18]进行了研究,发现螺栓连接的承载能力和失效模式与初始裂纹^[14,18]、加载方向^[15]、螺栓布置^[16-17]和几何尺寸^[16]有关。使用小直径螺栓可以实现相对较大的耗能性能和延性,在螺栓连接的胶合木节点中首选细长螺栓以避免脆性破坏^[17]。转动中心的选取是胶合木螺栓连接节点理论计算中的关键问题,在加载过程中,胶合木梁段并不是绕某一固定的中心转动,这个转动中心会随着荷载的增加而改变,祝恩淳等^[19]提出瞬时转动中心法能准确计算螺栓节点的受弯承载力,但是瞬时转动中心的位置需要经过迭代计算确定,有学者提出简化考虑方法,假设旋转中心在接触面与挤压区侧外排螺栓水平线交界处,采取折减系数来考虑由此带来的偏大影响^[18]。

现有胶合木空间网格结构中的节点主要以钢板-螺栓连接为主,而随着结构跨度的增加,杆件轴力显著增加,节点可能因木材销槽承压刚度有限发生明显变形,甚至发生木材开裂现象,且轴力和剪力对节点的刚度存在一定的耦合效应,也会影响节点的半刚性特征,从而对网壳的整体稳定性产生影响,因此对此类半刚性节点的研究具有重要意义。刘志周^[20]设计了一种木构件-钢夹板螺栓连接节点并进行了轴力荷载作用下的抗弯试验(图 3(a)),提出了三参数幂函数模型,李牧原^[21]针对现代木网壳节点中钢材外露、钢连接件过重的问题设计了一种异型销式连接节点(图 3(b)),舒展等^[22]考虑了网壳中杆件角度不同,对胶合木螺栓连接节点进行了研究(图 3(c)),并提出了四折线计算模型。Harada 等^[23]对节点的平面内和平面外受力性能进行了试验研究(图 3(d)),并提出了计算公式。

对于螺栓连接,虽然希望根据规范要求控制螺栓最小端距、边距和间距来避免木材的脆性劈裂,但是实际上脆性劈裂现象时有发生,难以充分发挥螺栓和钢板的强度,因此研究人员提出了一系列改进措施。最常用的方法之一就是通过贴层加固螺栓周围的木材,有多位学者对不同的加固材料进行了研究,包括加密的木基材料(Densified Veneer Wood, DVW)^[24]、纤维材料^[25]、钉板^[26]、高强钢带^[27]等,发现贴层加固一方面提升了螺栓周围木材的承压能力,另一方面也降低了木材发生

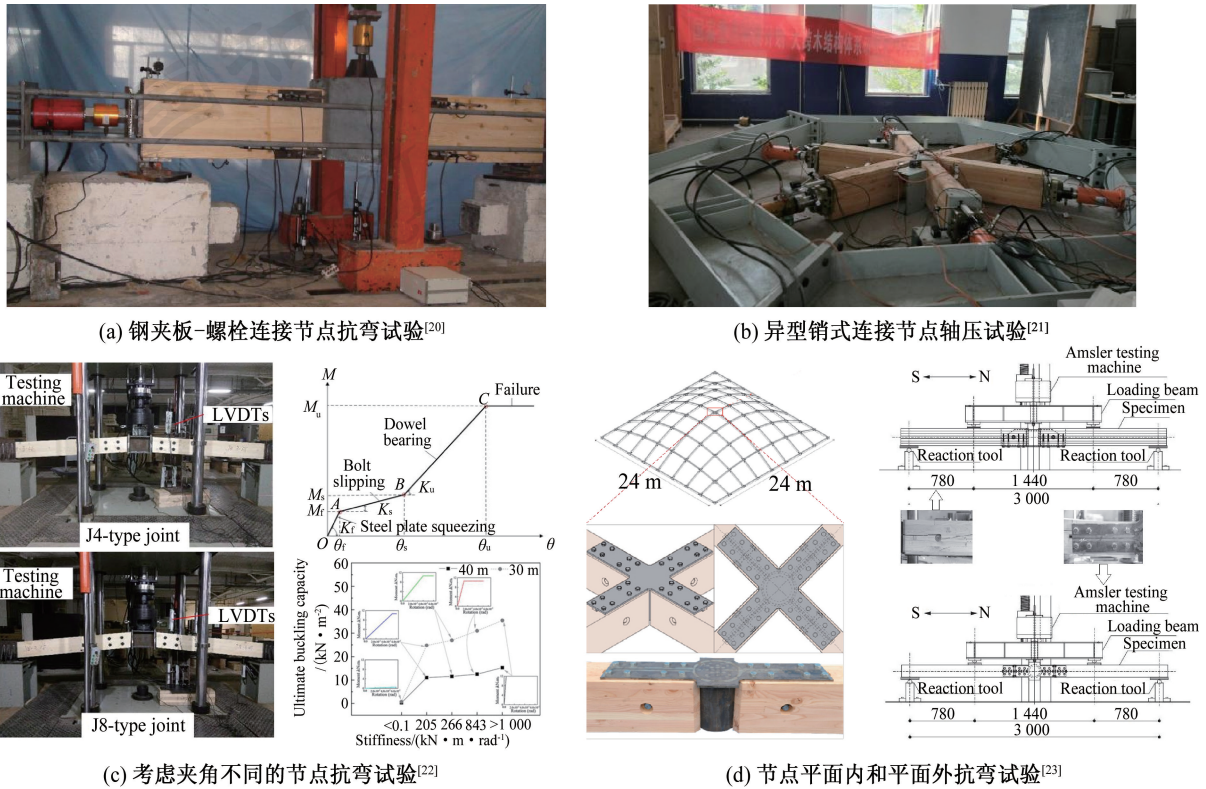


图3 螺栓连接节点受力性能研究

Fig. 3 Investigation of the mechanical behavior of bolted connections

顺纹劈裂和列剪切破坏发生的可能性,从而使得节点的强度和延性都得以有所提升。将自攻螺钉打入木材,可以传递横纹拉应力和顺纹剪应力,有效避免木材开裂,与贴层加固相比,自攻螺钉加固简单易行,且不会影响结构外观,研究发现,加固后节点的抗弯承载力得到很大提高,但是节点刚度和耗能能力并未得到明显改善^[28]。除此之外,还有空心销连接^[29]、预应力套管连接^[30]等改进措施。

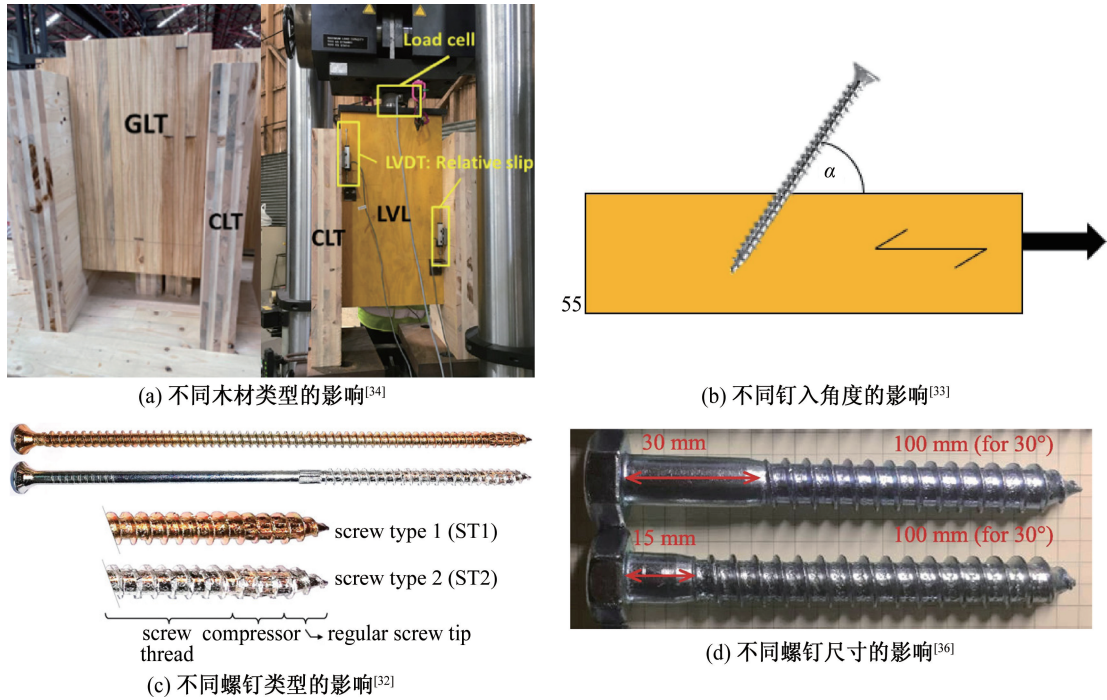
2.1.2 自攻螺钉连接节点

随着金属连接件制作工艺的进步,以及人们对节点美观性及施工便利性的追求,自攻螺钉作为一种连接件在现代木结构节点中的应用获得了更多的关注,自攻螺钉节点在保证木结构节点美观的同时拥有良好的力学性能,同时自攻螺钉可加强木材横纹方向受力,减小木材开裂的概率。已有学者对自攻螺钉应用于木-木连接^[31-35]、钢-木连接^[35-37]和混凝土-木连接^[38]进行了广泛深入的研究,研究主要集中于自攻螺钉钉入不同材料时的抗剪和抗拔性能,分析了螺钉连接模型界面的破坏模式。

考虑到不同的木材类型^[31-34]、螺钉类型^[32]、钉入角度^[31-33,35-36]和自攻螺钉尺寸^[31,33-34,36],国内外

学者对自攻螺钉的拉拔性能进行了广泛深入的研究,如图4所示。研究发现木材种类的变化对节点的受力性能有一定的影响,但是螺钉类型、钉入角度和嵌入长度等改变显著影响节点的破坏模式,提出在垂直于木纹的轴拉和轴压荷载下,自攻螺钉应垂直于木纹方向设置;当用于受到高剪切应力区域的加固时,自攻螺钉的轴线方向应尽量与木纹方向呈45°角设置;当用于剪应力和拉应力复合区域的加固时,自攻螺钉建议垂直于木纹方向设置。

自攻螺钉在木材中的锚固性能是影响木结构中自攻螺钉连接节点的重要因素,建立合理且适用的自攻螺钉抗拔承载力计算公式是设计该连接的前提,欧洲规范 EC5 根据螺钉钉入深度(l_{ef})、螺钉公称直径(d)、木材密度(ρ_k)和螺钉与木材纹理所成的角度(α)等参数来计算“木-螺钉”复合模型中的抗拔力($f_{ax,k}$)。大跨度胶合木结构不仅对连接的强度,更是对连接的刚度有了更严格的要求,而欧洲规范 EC5 中并未给出轴向受力螺钉拔出刚度的计算公式,但一些相关的技术许可文件^[39-40]中给出了拔出刚度计算公式,但是现有公式并未考虑自攻螺钉与木纹方向夹角的影响,且难以准确反映不同锚固长度的螺钉拔出刚度。



(a) 不同木材类型的影响^[34]

(b) 不同钉入角度的影响^[33]

(c) 不同螺钉类型的影响^[32]

(d) 不同螺钉尺寸的影响^[36]

图 4 不同参数对自攻螺钉连接性能的影响

Fig. 4 Influence of different parameters on the performance of self-tapping screws

2.2 植筋节点

作为另外一种在胶合木空间网格结构中常见的连接形式,植筋连接节点具有承载力和刚度较大、外观优美的优点。植筋连接是将带肋钢筋插入木材上的预钻孔中,并注入胶结剂,以传递构件间的拉力和剪力的连接方式。为了增强钢筋和胶之间的机械咬合力,保证节点承载力和刚度,植入木材中的钢筋建议采用刻痕钢筋或螺纹钢。

胶合木的植筋连接是不同材料的复合连接,材料的性能决定了连接破坏的模式,如表 2 所示,植筋连接节点存在 5 种可能的破坏模式:(1)沿杆的剪切破坏;(2)木材的拉伸破坏;(3)木材开裂破坏;(4)植筋杆屈服破坏;(5)块的剪切破坏(多杆连接)。其中,木材的拉伸和开裂破坏可以采用合理的边距、端距和间距避免,胶层破坏一般是由于锚固长度过短或植筋材料使用了光圆钢杆造成

的,也可以通过合理的设计避免。植筋在受拉时较为普遍的破坏形式是植筋孔周围木材沿杆的剪切破坏和植筋杆屈服破坏,因此可以通过增加锚固长度、减小植筋直径的措施,提高节点承载力。

目前关于植筋连接,现有研究主要集中在植筋节点的极限承载力、破坏模式及影响因素的试验研究,理论分析还不够系统和完善。总结过去学者完成的有关植筋连接的研究,大多数学者将研究重点集中在单植筋受拉试验,单根植筋的轴向拉拔强度取决于各种参数,例如锚固长度^[41-45]、胶层厚度^[41-42]、植筋直径^[43-44]、受力角度^[45]、粘合剂类型^[46]、植筋类型^[46]和工程木类型^[46-47]。对于多植筋节点^[48-49],除了上述失效模式外,还可以观察到块剪切失效的破坏模式。许多学者提出了植筋节点承载力计算的公式,但由于植筋连接试件的制作目前尚未有统一的技术标准,而且木

表 2 植筋节点失效模式

Tab. 2 Failure modes of glued-in rod connections

失效模式	沿杆的剪切破坏	木材的拉伸破坏	木材开裂破坏	植筋杆屈服破坏	块剪切破坏
示意图					

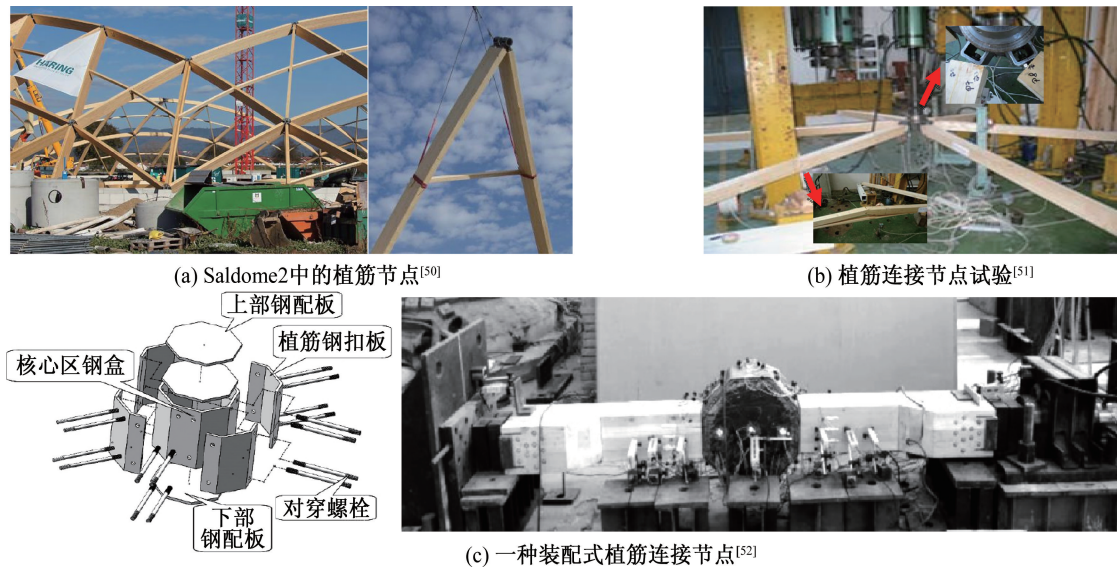


图5 胶合木空间网格结构中的植筋连接节点

Fig. 5 Glued-in rod connection in the glulam spaceframe structures

材、胶粘剂、植筋类型等选择不同,导致各个学者的研究结果并不一致,且木材与胶层和胶层与植筋之间的应力不均匀分布也导致这种复合节点的承载力和刚度难以被一套公式准确预估。

木结构植筋连接节点在欧洲、澳大利亚和日本等地应用较多。2000年悉尼奥运会会展大楼采用胶合木穹顶结构,跨度为97 m,木构件最大截面尺寸为230 mm×800 mm,木构件之间的连接均为植筋连接。2012年5月,瑞士Rheinsalinen AG公司新的储盐大楼 Saldome2^[50] 正式启用,跨度为120 m,高度为31.6 m,节点部位均采用植筋连接,如图5所示。有学者对胶合木植筋连接节点进行了试验研究,并研究了此类节点半刚性对空间网格结构整体力学性能的影响^[51-52]。

3 胶合木空间网格结构的力学性能

3.1 静力稳定性和抗震性能

失稳破坏是空间网格结构的主要破坏形式,因此稳定性分析是胶合木空间网格结构研究中的关键问题之一,目前对胶合木空间网格结构稳定性的研究主要集中在稳定性影响因素和节点半刚性研究两个方面。有学者采用有限元的方法,考虑材料非线性和几何非线性,研究了网壳跨度和矢跨比、杆件截面尺寸、初始几何缺陷和荷载分布形式的影响^[53-54]。See等在研究中发现,采用半刚性节点和铰接节点的网壳结构,其力学性能与刚接节点的网壳结构有显著不同^[55]。在钢空间网格结构和铝合金空间网格结构领域,有学者对螺栓

球节点单层网壳^[56]、焊接空心球节点单层网壳^[57-58]、铝合金板式节点单层网壳^[59-60]、圆钢管相贯节点单层柱面网壳^[61]等结构进行了研究,提出了多种弹簧组合模型。目前应用于胶合木网壳的节点转动刚度介于刚接节点和铰接节点之间,因此研究节点半刚性对胶合木网壳稳定性能的影响至关重要。现有研究大多基于节点试验结果得到节点弯矩-转角曲线,将相应参数输入有限元分析软件中,建立考虑节点半刚性的有限元模型^[62-65],研究发现,含半刚性节点的胶合木网壳的整体稳定承载力会随着矢跨比、节点刚度的增大而提高,随着初始几何缺陷和半跨活荷载比例的增大而降低,但是目前尚未提出统一的半刚性节点弯矩-转角曲线计算方法。根据《空间网格技术规程》^[66],钢空间网格结构塑性稳定安全系数为2,弹性稳定安全系数为4.2,但是对于木空间网格结构的弹性稳定安全系数和塑性稳定安全系数尚未有明确的结论。

胶合木材料轻质高强,抗震性能良好,但是胶合木空间网格结构的质量分布特征及阻尼特性都与钢结构不同,由于所受地震力相对较小,对抗震设防的要求也有所不同,基于性能的抗震目标有待确定,这些需要进一步的理论和试验研究。目前对胶合木空间网格结构动力特性的研究比较缺乏,现有研究大多采用数值模拟的手段进行分析^[66-68]。

为了进一步研究木空间网格结构的静力稳定性和抗震性能,有学者对整体结构进行了一系列静力试验^[69-73]和动力试验^[73-74],如图6所示,研究

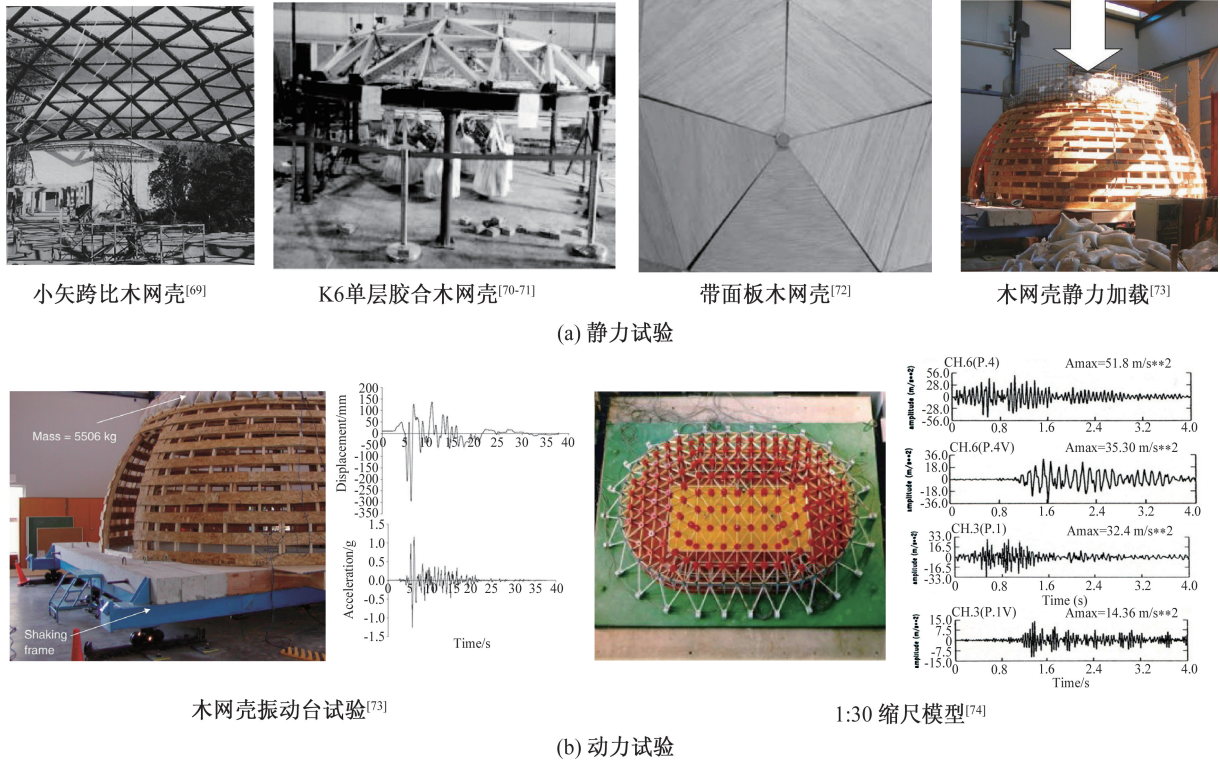


图 6 木空间网格结构试验研究

Fig. 6 Experimental investigation of timber space frame structures

发现,全跨荷载作用下,网壳顶点位移最大,且最易发生整体失稳,半跨加载对网壳承载力不利,易发生局部失稳,节点抗弯刚度的增加有利于提高木网壳的稳定临界荷载。

3.2 蠕变特性

在持久应力作用下,材料的应变随着时间增加而逐渐增大的特性称为蠕变。木材作为一种天然多孔性高分子聚合物,其蠕变和松弛是在自身复杂的特性和多种环境条件制约下发生的现象。对木材蠕变性能的研究可以追溯至 20 世纪 40 年代,1947 年,Wood 首次进行了清材小试件蠕变试验,总结了强度与时间的关系,即著名的 Madison 曲线,具体形式为木材发生蠕变断裂的应力率与时间的对数成线性关系^[75-76]。此后,国内外学者针对荷载模式^[77-78]、湿度^[79-80]、温度^[81]对蠕变的性能进行了大量的试验研究。通过对木材的蠕变试验数据进行总结,Hunt 提出了通过短期蠕变试验数据预测木材长期蠕变的方法,并用 8 年的蠕变试验数据对该方法进行了验证^[82]。

蠕变屈曲是指承受压应力的结构由于蠕变变形的增长导致结构丧失稳定的现象,也称为延迟失稳。蠕变屈曲主要是研究结构的变形与时间的关系,以及蠕变屈曲荷载与临界时间的关系。关

于蠕变屈曲的研究根据研究对象可以分为木梁的蠕变屈曲^[83-84]、木拱的蠕变屈曲^[85-86]、网壳的蠕变屈曲^[86-87]、弦支穹顶的蠕变屈曲^[88],以及木-混凝土组合结构^[89-90]的蠕变屈曲。有学者在 2001—2013 年期间对木屋顶进行了长期测量(图 7(a)),发现变形的实际值很小,结构模型与理论变形模型很好地吻合^[91]。有学者提出了能预测单层网壳长期性能的有限元模型(图 7(b)),通过分析揭示了网壳蠕变屈曲荷载与时间的关系,提出了网壳在使用期间的抗蠕变屈曲荷载^[92]。

4 结论

本文回顾了胶合木空间网格结构的研究进展和工程实践,系统介绍了胶合木空间结构中应用的主要节点的性能和研究现状,提出了空间网格结构研究应注意的几个问题,如整体稳定性、抗震性能和蠕变特性。但是,仍有如下课题值得研究:

1) 木材在建筑行业的应用不仅迎合国家对低碳发展的迫切需要,也为大跨度建筑结构的的发展提供了新思路、新契机,但目前我国胶合木材的制备主要依靠国外进口树种及配套技术进行加工,而对国产树种,尤其是国产速生木材,制备工艺和物理力学性能的研究,特别是材料疲劳性能、荷载

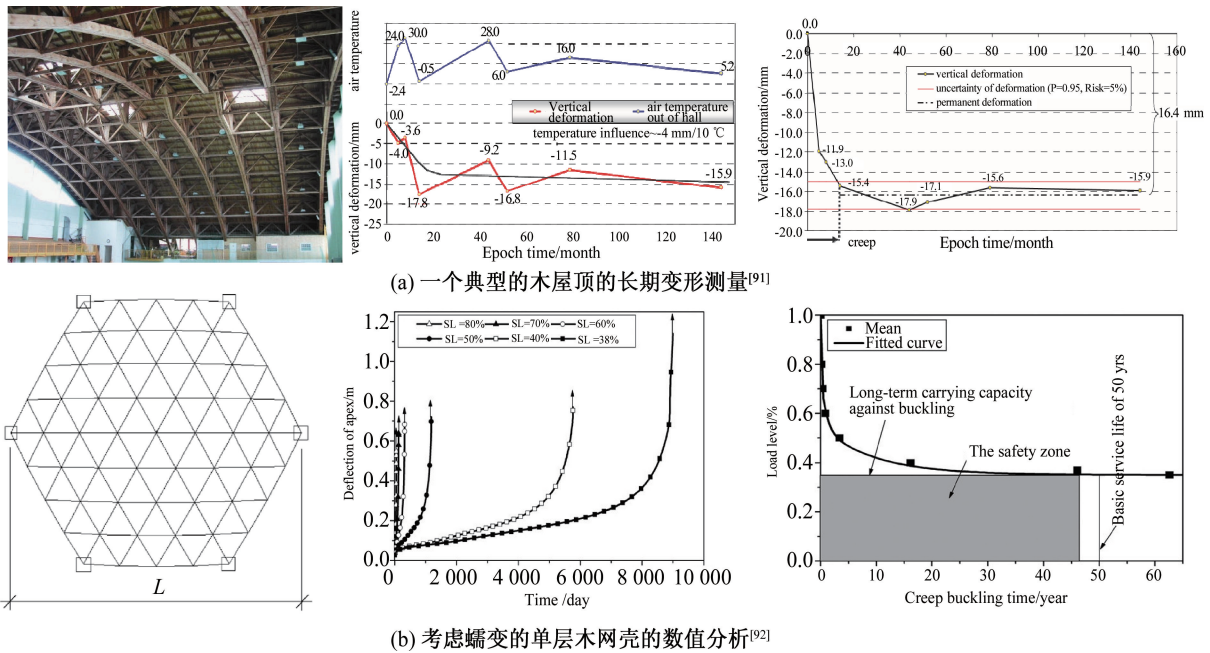


图7 木空间网格结构蠕变特征

Fig. 7 Creep characteristics of timber space frame structures

持续作用效应、蠕变效应等复杂力学性能的研究较少,同时,如何在保证胶合木产品质量的前提下,优化胶合木生产工艺,提高材料利用率,降低生产成本,成为一个行业内关注的热点问题,对胶合板加工生产、安装组装、维护修复工艺等进行升级改造,对于胶合木材这种绿色建材在整个建筑行业的应用和推广具有重要的现实意义。

2) 钢-木结构、铝-木结构等新型组合结构体系的出现和发展进一步拓宽了木材在建筑工程领域的应用,将不同材料与木材装配在一起,充分发挥材料各自的优势,不仅符合我国倡导绿色建筑的理念,可以缓解建筑业的减碳压力,而且在钢、铝等协同作用下大大加强了结构整体强度和刚度,在抗震、节能、防灾和装配式建筑等方面均有很大优势,作为一种新型组合结构,预应力胶合木结构既继承了节能环保的优点,又具备轻质高强的结构性能,预应力的引入不仅减少了木材用量,还使得结构更适应大跨度结构的承载需求,因此,对组合结构体系及对应连接件和预应力胶合木结构体系等新型结构体系受力性能的研究具有广阔的发展前景。

3) 随着技术发展和社会进步,木结构建筑向更大跨度、更大高度的发展是大势所趋,这也对木结构及其连接节点的力学性能提出了更高的要求。为避免建筑结构在灾害作用下发生损伤甚至倒塌,导致较大的人员伤亡和经济损失,推动胶合

木在空间结构中的进一步发展和应用,应当对胶合木空间网格结构的耐久性、抗风、抗火、抗震性能及相应防灾减灾技术进行深入研究,为胶合木在大跨度空间结构中的应用提供技术支撑,作为结构中的关键组成部分,节点的力学性能至关重要,而针对胶合木节点疲劳性能、蠕变性能、抗火性能等力学性能的研究尚不完善,此外,胶合木结构中新型减震耗能节点的研究尚处于起步阶段,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] RUNA A, ZHANG Z B, ZHANG H. Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality Under the New Target and Vision, 2021 International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation, October 15-17, 2021[C]. Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineer, 2021.
- [2] GB/T 50708—2012, 胶合木结构技术规范[S].
- [3] JGJ 7—2010, 空间网格结构技术规程[S].
- [4] 斋藤公男. 空间结构的发展与展望[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [5] GILHAM P C, PE. The Tacoma Dome: A Case History of a Successful Timber Multipurpose Arena[J]. World Architecture, 2002, 9: 80-81.
- [6] LIDDELL I. Frei Otto and the Development of Gridshells[J]. Case Studies in Structural Engineering, 2015, 4: 39-49.
- [7] DRUMM P. Last Weekend to See London Design Festi-

- val's Parametric Kreed Pavilion [N]. The Architect's Newspaper, 2012-10-12.
- [8] JOHANSEN K. Theory of Timber Connection [J]. International Association for Bridge & Structural Engineering, 1949, 9: 249-262.
- [9] SAWATA K, SASAKI T, KANETAKA S. Estimation of Shear Strength of Dowel-Type Timber Connections with Multiple Slotted-in Steel Plates by European Yield Theory [J]. Journal of Wood Science, 2006, 52(6): 496-502.
- [10] SANTOS C L, De Jesus A M P, MORAIS J J L, et al. Quasi-Static Mechanical Behaviour of a Double-Shear Single Dowel Wood Connection [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 171-182.
- [11] DONG W Q, WANG Z Q, ZHOU J H, et al. Embedment Strength of Smooth Dowel-Type Fasteners in Cross-Laminated Timber [J]. Construction and Building Materials, 2020, 233: 117243.
- [12] EN 1995-1-1, Eurocode 5-Design of Timber Structures; Part 1-1 [S]. Belgium: European Committee for Standardization (CEN), 2004.
- [13] NDS 2015, National Design Specification for Wood Construction [S]. Washington: American Forest & Paper Association (AF&PA), 2015.
- [14] ZHANG J, HE M J, LI Z. Mechanical Performance Assessment of Bolted Glulam Joints with Local Cracks [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(6): 0418094.
- [15] CAO J X, XIONG H B, LIU Y Y. Experimental Study and Analytical Model of Bolted Connections Under Monotonic Loading [J]. Construction and Building Materials, 2020, 270(4): 121380.
- [16] CHEN Z H, ZHAO J X, ZHAO S X, et al. Experimental Study and Theoretical Analysis on the Rotational Performance of Large-Size Glulam Bolted Joints with Slotted-in Steel Plates [J]. Construction and Building Materials, 2022, 341: 127785.
- [17] SHU Z, LI Z, YU X S, et al. Rotational Performance of Glulam Bolted Joints: Experimental Investigation and Analytical Approach [J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 675-695.
- [18] ZHANG J, LIU Z F, XU Y, et al. Cyclic Behavior and Modeling of Bolted Glulam Joint with Cracks Loaded Parallel to Grain [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 5: 1-16.
- [19] 祝恩淳, 王笑婷, 牛爽, 等. 木结构钢板螺栓连接节点承载力计算分析及试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 113-121.
- [20] 刘志周. 木网壳半刚性节点连接受力性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [21] 李牧原. 大跨木网壳新型装配式连接节点受力性能研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
- [22] SHU Z, LI Z, HE M J, et al. Bolted Joints for Small and Medium Reticulated Timber Domes: Experimental Study, Numerical Simulation, and Design Strength Estimation [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20(3): 1-24.
- [23] HARADA H, NAKAJIMA S, YAMAZAKI Y, et al. Rotational Stiffness and Bending Strength of Steel Connections in Timber Lattice Shell [J]. Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), 2018, 83(746): 577-587.
- [24] LEIJTEN A J M, BRANDON D. Advances in Moment Transferring Dvw Reinforced Timber Connections-Analysis and Experimental Verification, Part 1 [J]. Construction and Building Materials, 2013, 43: 614-622.
- [25] SONG X B, MA Y R, GU X L, et al. Carbon Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Rotational Behavior of Bolted Glulam Beam-to-Column Connections [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 21(3): 04016096.
- [26] ECHAVARRIA C, CARDEÑO C A C, GUIAO C E. Dowel-Type Timber Joints Reinforced with Steel Nail Plates [J]. Dyna, 2010, 77(164): 98-108.
- [27] LIU H B, ZHAO J X, ZHAO S X, et al. Experimental Study and Theoretical Analysis on the Flexural Behavior of Glulam Bolted Joints with Prestressed Steel Strips [J]. Engineering Structures, 2022, 273: 115024.
- [28] ZHANG C, GUO H B, JUNG K H, et al. Screw Reinforcement on Dowel-Type Moment-Resisting Connections with Cracks [J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 59-72.
- [29] GUAN Z W, RODD P D. Hollow Steel Dowels—A New Application in Semi-Rigid Timber Connections [J]. Engineering Structures, 2001, 23(1): 110-119.
- [30] HE M J, ZHAO Y, MA R. Experimental Investigation on Lateral Performance of Pre-stressed Tube Bolted Connection with High Initial Stiffness [J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(5): 762-776.
- [31] BEDON C, FRAGIACOMO M. Numerical Analysis of Timber-to-Timber Joints and Composite Beams with Inclined Self-tapping Screws [J]. Composite Structures, 2019, 207: 13-28.
- [32] BRANDNER R, RINGHOFER A, REICHINGER T. Performance of Axially-Loaded Self-tapping Screws in Hardwood: Properties and Design [J]. Engineering Structures, 2019, 188: 677-699.
- [33] MIRDAD A H, JUCUTAN A, KHAN R, et al. Embedment and Withdrawal Stiffness Predictions of Self-tapping Screws in Timber [J]. Construction and Building Materi-

- als, 2022, 345: 128394.
- [34] NIE Y, KARIMI-NOBANDEGANI A, VALIPOUR H R. Experimental Behaviour and Numerical Modelling of Timber-Timber Composite (TTC) Joints [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 290(1): 123273.
- [35] SANTIS Y D, FRAGIACOMO M. Timber-to-timber and Steel-to-timber Screw Connections; Derivation of the Slip Modulus Via Beam on Elastic Foundation Model [J]. *Engineering Structures*, 2021, 244: 112798.
- [36] WANG C L, LYU J F, ZHAO J, et al. Experimental Investigation of the Shear Characteristics of Steel-to-timber Composite Joints with Inclined Self-tapping Screws [J]. *Engineering Structures*, 2020, 215: 110683.
- [37] CHEN Z H, NIU X Y, LIU J D, et al. Experimental Study of Thin-Walled Steel-Timber Single-Shear Connection with a Self-tapping Screw [J]. *Structures*, 2021, 34: 4389-4405.
- [38] MIRDADE M, CHUI Y H. Load-Slip Performance of Mass Timber Panel-Concrete (MTPC) Composite Connection with Self-tapping Screws and Insulation Layer [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 696-708.
- [39] ETA-11/0190, Self-tapping Screws for Use in Timber Constructions [S]. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2013.
- [40] ETA-13/0090, Screws for Use in Timber Structures [S]. Göteborg: European Technical Assessment-Danmark, 2016.
- [41] LING Z B, YANG H F, LIU W P, et al. Pull-Out Strength and Bond Behaviour of Axially Loaded Rebar Glued-in Glulam-Sciencedirect [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 65: 440-449.
- [42] BROUGHTON J G, HUTCHINSON A R. Pull-Out Behaviour of Steel Rods Bonded into Timber [J]. *Materials & Structures*, 2001, 34(2): 100-109.
- [43] YAN Y, LIU H, ZHANG X, et al. The Effect of Depth and Diameter of Glued-in Rods on Pull-Out Connection Strength of Bamboo Glulam [J]. *Journal of Wood Science*, 2016, 62(1): 109-115.
- [44] CHANS O, CIMADEVILA J E, EM GUTIÉRREZ, et al. Influence of Timber Density on the Axial Strength of Joints Made with Glued-in Steel Rods: An Experimental Approach [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2010, 30(5): 380-385.
- [45] STAMATOPOULOS H, MALO K A. Withdrawal Stiffness of Threaded Rods Embedded in Timber Elements [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 116: 263-272.
- [46] GRUNWALD C, VALLÉE T, FECHT S, et al. Rods Glued in Engineered Hardwood Products Part I: Experimental Results Under Quasi-Static Loading [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019, 90: 163-181.
- [47] KONNERTH J, KLUGE M, SCHWEIZER G, et al. Survey of Selected Adhesive Bonding Properties of Nine European Softwood and Hardwood Species [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2016, 74(6): 809-819.
- [48] XU B H, LI D F, ZHAO Y H, et al. Load-Carrying Capacity of Timber Joints with Multiple Glued-in Steel Rods Loaded Parallel to Grain [J]. *Engineering Structures*, 2020, 225: 111302.
- [49] NAVARATNAM S, THAMBOO J, PONNAMPALAM T, et al. Mechanical Performance of Glued-in Rod Glulam Beam to Column Moment Connection: An Experimental Study [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 50: 104131.
- [50] HÄRING C. Dome Structures. Saldome 2, Seminário Coberturas de Madeira, April 19, 2012 [C]. Guimarães: Universidade do Minho, 2012.
- [51] VASEK M. Semi Rigid Timber Frame and Space Structure Connections by Glued-in Rods, World Conference on Timber Engineering 2008 Conference Proceedings, June 2-5, 2008 [C]. Miyazaki: Engineered Wood Products Association, 2008.
- [52] 孙小鸾, 陆伟东, 刘伟庆, 等. 木网壳结构半刚性装配式植筋节点受力性能研究 [J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(2): 20-27.
- [53] HOLZER S M, DAVALOS J F, HUANG C V. A Review of Finite Element Stability Investigations of Spatial Wood Structures [J]. *Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 1990, 31(2): 161-171.
- [54] TELANG N M. Stability Analysis of a Glulam Dome with Nonlinear Material Law [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1992.
- [55] SEE T. Large Displacement Elastic Buckling Space Structures [D]. Cambridge: University of Cambridge, 1983.
- [56] CHENAGHLOU M R, NOOSHIN H. Response of Semi-Rigidly Jointed Space Structures [M]. London: Thomas Telford, 2002.
- [57] 顾磊, 丁茂强, 傅学怡, 等. 焊接球单层球面网壳精细化有限元分析 [J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(8): 42-50.
- [58] 刘海锋, 罗尧治, 许贤. 焊接球节点刚度对网壳结构有限元分析精度的影响 [J]. *工程力学*, 2013, 30(1): 350-358.
- [59] XIONG Z, GUO X, LUO Y, et al. Elasto-Plastic Stability of Single-Layer Reticulated Shells with Aluminium Alloy Gusset Joints [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 115: 163-175.
- [60] LIU H, DING Y, CHEN Z. Static Stability Behavior of

- Aluminum Alloy Single-Layer Spherical Latticed Shell Structure with Temcor Joints [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 120:355-365.
- [61] 范重, 张宇, 李丽. 单层柱面网壳相贯节点刚度影响分析[J]. *建筑钢结构进展*, 2015, 17(1):20-26.
- [62] 刘志周. 木网壳半刚性节点连接受力性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [63] 范耀源. 胶合木网壳结构力学性能研究[D]. 广州:广州大学, 2017.
- [64] 万祥. Varax节点单层木网壳静力稳定性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [65] 孙小鸾, 瞿以恒, 刘伟庆, 等. K6型单层球面木网壳稳定承载力非线性分析[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(2):62-71.
- [66] 黄瑞. 胶合木网壳钢铅组合耗能节点性能研究[D]. 广州:广州大学, 2018.
- [67] 李世光. 中心钢毂节点单层球面木网壳动力性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- [68] 吴智立. 木网壳新型耗能节点受力性能数值模拟研究[D]. 广州:广州大学, 2015.
- [69] SHAN W, ODA K, HANGAI Y, et al. Design and Static Behaviour of a Shallow Lattice Wooden Dome[J]. *Engineering Structures*, 1994, 16(8):602-608.
- [70] 罗伟, 陆伟东, 孙小鸾, 等. 半刚性单层球面木网壳整体稳定性试验[J]. *南京工业大学学报:自然科学版*, 2016, 38(5):81-86.
- [71] 孙小鸾, 刘伟庆, 陆伟东, 等. 单层K6型球面胶合木网壳结构受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(9):121-130.
- [72] GAO Y, OHTA M. Deformation Analysis of Timber-Framed Panel Dome Structure I: Simulation of A Dome Model Connected by Elastic Springs[J]. *Journal of Wood Science*, 2007, 53(2):100-107.
- [73] MEHDI H K, KHARRAZI, ELDEIB S, et al. Experimental Evaluation of An Orthotropic Monolithic, Modular Wooden-Dome Structural System[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2008, 35:1163-1176.
- [74] LJUBOMIR T, LIDIJA K. Shaking Table Test of 1/30 Scale Model of Palasport in Bologna with Timber Shell Roof Structure[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 778:503-510.
- [75] WOOD L W. Behavior of Wood Under Continued Loading [M]. Washington: US Department of Agriculture, Forest Service, 1947.
- [76] WOOD L W. Relation of Strength of Wood to Duration of Load[R]. Madison, Wis.: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1960.
- [77] BENGTTSSON, CHARLOTTE. Creep of Timber in Difference Loading Modes-Material Property Aspects, 6th World Conference on Timber Engineering, 2000 [C]. Whister: University of Helsinki, 2000.
- [78] 王胜伟. 旋切板胶合木(LVL)蠕变性能试验研究及数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.
- [79] MOHAGER S, TORATTI T. Long-Term Bending Creep of Wood in Cyclic Relative Humidity[J]. *Wood Science and Technology*. 1993, 27(1):49-59.
- [80] HANHIJARVI A. Advances in The Knowledge of the Influence of Moisture Changes on the Long-Term Mechanical Performance of Timber Structures [J]. *Materials & Structures*, 2000, 33(1):43-49.
- [81] HANHIJARVI A. Deformation Properties of Finnish Spruce and Pine Wood in Tangential and Radial Directions in Association to High Temperature Drying Part II. Experimental Results under Constant Conditions (Viscoelastic Creep) [J]. *European Journal of Wood & Wood Products*, 1999, 57(5):365-372.
- [82] HUNT D G. The Prediction of Long-Time Viscoelastic Creep from Short Data[J]. *Wood Science and Technology*, 2004, 38(7):479-492.
- [83] HANHIJARVI A. Computational Method for Predicting the Long-Term Performance of Timber Beams in Variable Climates [J]. *Materials & Structures*, 2000, 33(226):127-134.
- [84] 曹磊. 落叶松胶合木梁力学性能研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2017.
- [85] 祝恩淳, 周华樟. 层板胶合木拱的蠕变屈曲[J]. *沈阳建筑大学学报:自然科学版*, 2009, 25(4):640-643+655.
- [86] 周华樟. 旋切板胶合木的蠕变及其对结构稳定性的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- [87] 赵海. 旋切板胶合木网壳的蠕变屈曲[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.
- [88] 吴青青. 蠕变对弦支胶合木穹顶结构受力性能的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [89] FRAGIACOMO M. A Finite Element Model for Long-Term Analysis of Timber-Concrete Composite Beams [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2005, 20(2):173-189.
- [90] KHORSANDNIA N, SCHAEENZLIN J, VALIPOUR H, et al. Coupled Finite Element-Finite Difference Formulation for Long-Term Analysis of Timber-Concrete Composite Structures [J]. *Engineering Structures*, 2015, 96:139-152.
- [91] BUREŠ J, ŠVÁBENSKY, OTAKAR, et al. Long-Term Deformation Measurements of Atypical Roof Timber Structures [J]. *Geoinformatics Fce Ctu*, 2014, 12:22-27.
- [92] ZHOU H Z, FAN F, ZHU E C. Buckling of Reticulated Laminated Veneer Lumber Shells in Consideration of the Creep [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(9):2912-2918.

(责任编辑 周雪梅)