

# 游泳馆钢-木混合结构的体系选型和关键设计问题

张月强<sup>1,2</sup>, 丁洁民<sup>1</sup>, 张 峰<sup>1</sup>

(1. 同济大学建筑设计研究院, 上海200092; 2. 同济大学土木工程学院, 上海200092)

**摘要:** 崇明游泳馆采用钢-胶合木混合网壳结构。通过对胶合木力学特性和游泳馆结构静力的分析, 计算屋面网壳结构钢和胶合木的合理应用范围。讨论了钢夹板木结构连接节点刚度对结构整体刚度的影响, 并通过节点试验得到了节点的实际刚度。参考《空间网格结构技术规程》中关于网壳结构的稳定性分析和极限承载力的计算方法, 考虑木材的材质缺陷和无塑性发展能力, 钢-木混合网壳结构的弹塑性极限承载力安全系数建议取4.2。

**关键词:** 大跨度钢-木混合结构; 体系选型; 筒壳结构; 节点刚度; 极限承载力

中图分类号: TP393.3

文献标志码: A

## System Selection and Key Design Issues for Steel-timber Hybrid Structure of Natatorium

ZHANG Yueqiang<sup>1,2</sup>, DING Jiemin<sup>1</sup>, ZHANG Zheng<sup>1</sup>

(1. Architecture Design & Research Institute of Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A steel-glulam hybrid reticulated shell structure is adopted in the Chongming Natatorium. Based on the analysis of the mechanical properties of glulam and the static force of the natatorium structure, the reasonable application range of steel and glulam for the reticulated roof is calculated. Then, the effect of the stiffness of steel splint-timber structure connection node on the overall stiffness of the structure is discussed, and the actual stiffness of the node is obtained by node experiments. Referring to "Technical Specification for Spatial Reticulated Structures" on the stability analysis and ultimate bearing capacity calculation method of the reticulated shell structure, due to the material defects and non-plastic development capacity of the timber, the safety

factor of elasto-plastic ultimate bearing capacity for the steel-timber hybrid reticulated shell structure is recommended to be 4.2.

**Key words:** steel-timber hybrid structure with large span; system selection; cylindrical shell structure; joint stiffness; ultimate bearing capacity

木材因其温暖自然的特性给人以积极向上、幸福安宁的感觉, 同时木材绿色环保、耐久性好, 因此大型的公共建筑(如游泳馆、体育馆、展览馆)采用木结构较为合适<sup>[1-2]</sup>。基于现代木结构材料的发展<sup>[3]</sup>以及大跨度钢-木结构抗震性能研究<sup>[4]</sup>、钢-木混合结构体系在大跨度建筑中的应用研究<sup>[5]</sup>、施工技术研究<sup>[6]</sup>, 使大跨度钢-木混合结构在建筑中的应用成为可能。在大跨度空间结构中常采用钢-木混合结构, 以充分利用钢材和木材的优点。以上海市崇明区体育训练中心游泳馆(下文简称崇明游泳馆)的钢-木混合结构为例, 研究大跨度钢-木混合结构的体系选型和关键设计问题。本工程的设计难点在于: 如何利用胶合木的力学特性选择合理的木结构体系和木结构应用范围, 以最经济的结构型式实现建筑效果; 木结构连接节点的设计及节点刚度的确定; 在结构分析中考虑木结构连接节点刚度的影响, 并采取构造手段防止由节点破坏而造成的单层筒壳破坏。

## 1 崇明游泳馆简介

崇明游泳馆位于上海市崇明区陈家镇, 地处长江入海口。屋盖投影为矩形, 轴网正交布置, 如图1所示。根据建筑造型、建筑功能和受力性能, 采用钢-木混合筒壳结构, 筒壳的矢高为6 m, 跨度为45

收稿日期: 2020-11-20

第一作者: 张月强(1983—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为大跨度钢结构、木结构体系的设计。

E-mail: 52zyq@tjadri.com



论文  
拓展  
介绍

m,矢跨比为1/7.5。结构的中间27 m采用胶合木结构,两边跨各9 m范围采用钢结构。游泳馆纵向长64 m,屋盖筒壳两端处的标高为7.5 m,钢木转换节点的标高为11.5 m,屋盖最高处的标高为13.5 m。崇明游泳馆结构体系如图2所示。



图1 建筑效果图

Fig.1 Architectural rendering

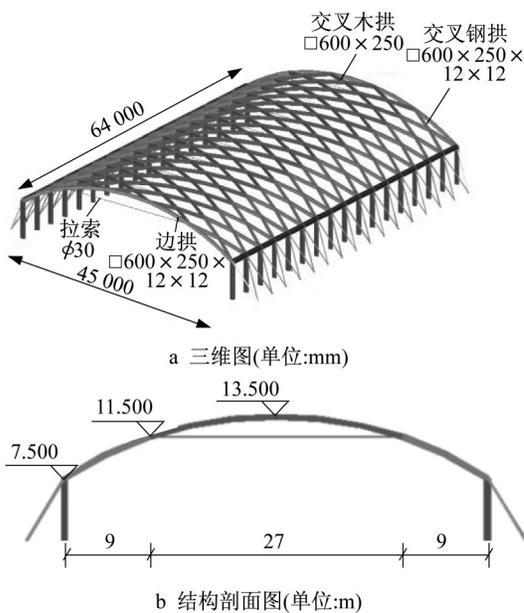


图2 崇明游泳馆结构体系

Fig.2 Structural system of the Chongming natatorium

## 2 胶合木材料性能分析

胶合木顺纹为工程中主要使用方向,顺纹抗压、抗拉强度均较大,但顺纹抗拉强度略小于顺纹抗压强度,顺纹抗剪强度最小。由表1可知,胶合木顺纹抗压强度为钢材的1/20,顺纹抗拉强度为钢材的1/28,顺纹抗弯强度为钢材的1/18,顺纹抗剪强度为钢材的1/85。因此,胶合木结构应尽量利用其抗压强度,并避免在木构件中承受剪力。

表2为钢与胶合木的弹性模量对比。胶合木的弹性模量为钢材的1/31,同时胶合木的弹性模量因环境或荷载条件不同而变化。胶合木的强度比与钢材基本相当,因此在工程中可以采用钢-胶合木组合结构。

表1 钢与胶合木的强度对比

Tab.1 Comparison of strength between steel and glulam

材料	抗压强度/ (N·mm <sup>-2</sup> )	抗拉强度/ (N·mm <sup>-2</sup> )	抗弯强度/ (N·mm <sup>-2</sup> )	抗剪强度/ (N·mm <sup>-2</sup> )
钢材(Q355B)	295.0	295.0	295.0	170.0
胶合木(TC <sub>T</sub> 24)	14.8	10.5	16.7	2.0
胶合木/钢材	1/20	1/28	1/18	1/85

表2 钢与胶合木的弹性模量对比

Tab.2 Comparison of elastic modulus between steel and glulam

材料	弹性模量/(N·mm <sup>-2</sup> )	强度比
钢材(Q355B)	2.06×10 <sup>5</sup>	14.3×10 <sup>-4</sup>
胶合木(TC <sub>T</sub> 24)	0.65×10 <sup>4</sup>	22.8×10 <sup>-4</sup>
胶合木/钢材	1/31	8/5

由表3可见,胶合木的线膨胀系数为钢材的2/3。因此,对大跨度胶合木结构或大跨度钢-胶合木组合结构,温度的影响不可忽视。

表3 钢与胶合木的线膨胀系数对比

Tab.3 Comparison of linear expansion coefficient between steel and glulam

材料	(顺纹)线膨胀系数
钢材(Q355B)	12×10 <sup>-6</sup>
胶合木(TC <sub>T</sub> 24)	8×10 <sup>-6</sup>
胶合木/钢材	2/3

通过胶合木与钢的力学性能对比可知,胶合木与钢有共同作用的力学基础和物理基础,在使用时应扬长避短,尽量利用胶合木的抗压强度,在剪力和弯矩较大时,可采用钢-胶合木组合构件或者钢夹板连接节点。

## 3 体系选型

木结构体系选型是指,在屋面网格布置确定的情况下,选择木结构的应用范围,以及在节点无法实现刚接的情况下通过结构体系布置来保证单层网壳结构的稳定性。采用SAP2000软件进行结构分析。对于梁柱构件采用梁单元,对于拉索采用两端弯矩释放的只拉单元。采用Q355B钢材、高钒索、强度等级为TC<sub>T</sub>24的胶合木。对于钢材采用理想的弹塑性模型,对于拉索与木材采用线弹性模型<sup>[7-10]</sup>。筒壳结构下部为混凝土框架柱,采用固定支座模拟柱底端;对于外部支撑柱与下部基础进行销轴连接,并采用固定铰支座模拟。屋面采用金属屋面系统,附加恒载取0.8 kN·m<sup>-2</sup>,不上人屋面活荷载取0.5 kN·m<sup>-2</sup>,结构构件重力按照材料容重由软件自行计算。金属屋面通过连接件

安装在钢-木网壳结构的上方,实际设计中不考虑金属屋面对主体结构的蒙皮效应,只作为安全储备。

### 3.1 网格形式与胶合木结构的应用范围

对于屋盖结构采用四边形交叉菱形网格的筒壳结构(见图3a),该结构具有较好的纵向和横向刚度,为空间作用结构体系。交叉菱形网格结构更能适应建筑的外表皮纹理和内部空间效果,如图3b所示。

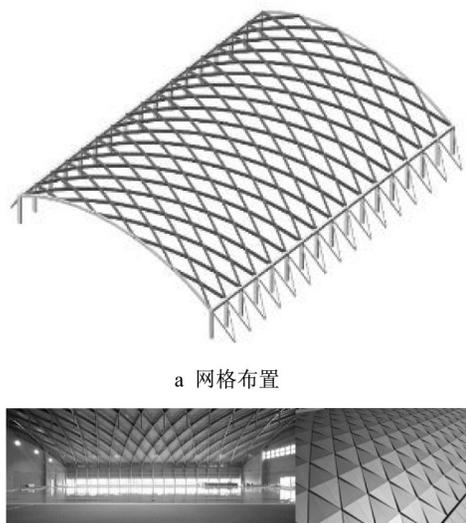


图3 网格布置与建筑效果

Fig.3 Grid layout and architectural effect

如图4所示,结构中间三跨以受压为主,弯矩较小,端部两跨的弯矩较大。中间三跨的最大弯矩为27 kN·m,端部两跨的弯矩分别为97 kN·m和174 kN·m。由表1可知,胶合木适用于顺纹轴心受压结构,对于弯矩较大的位置木构件材料利用不充分,同时在节点处存在较大的剪力。为充分利用钢材和胶合木的各自优势,结构的中间采用木结构,两端采用钢结构,如图5所示

### 3.2 拉索的布置形式

木网壳结构连接节点无法完全实现刚接,为保证木网壳结构的稳定性,在中间木结构下部布置拉索。下部拉索施加预应力后,一方面可以提高结构的竖向刚度,减小结构的竖向变形,同时提高结构的极限承载力,另一方面拉索作为上部结构的第二道防线,防止了由于局部木结构节点破坏而造成的结构连续性倒塌,提高了整个结构的安全性<sup>[1]</sup>。拉索的布置如图6所示。

拉索采用直径30 mm抗拉强度1 570 MPa的高钒索。拉索通过撑杆与上部木构件连接,撑杆上端采用铰接,下端采用梭子端头,并伸出4个耳板与索头节点

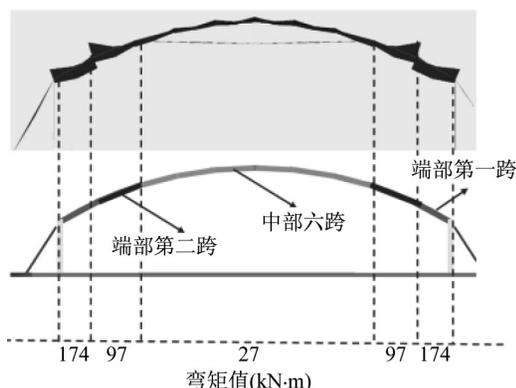


图4 沿跨度方向的弯矩分布

Fig.4 Bending moment distribution along the span

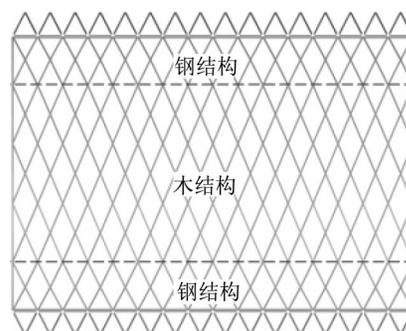


图5 钢-木结构布置

Fig.5 Arrangement of steel-timber structure

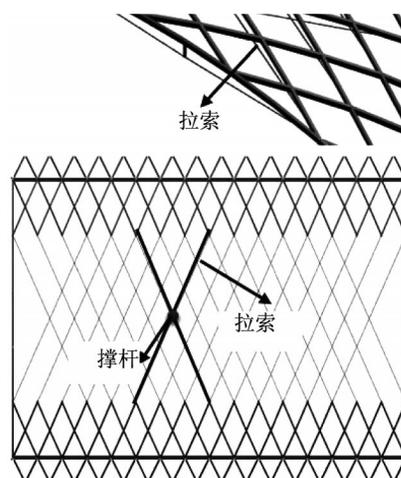


图6 拉索布置

Fig.6 Layout of the cable

相连(见图7)。撑杆的上端节点板与木结构节点做成一体化,既保证传力的直接性,又使节点板隐藏在木构件中。整个节点不但受力合理,而且轻巧美观。

通过分析可知,拉索能够提高木结构区域的竖向静力刚度,中间区域的变形从25 mm减小到16 mm,变形减小36%。布置拉索后,屋面变形趋于均匀,屋盖竖向静力刚度增加30%。图8为有无拉索

结构变形对比。

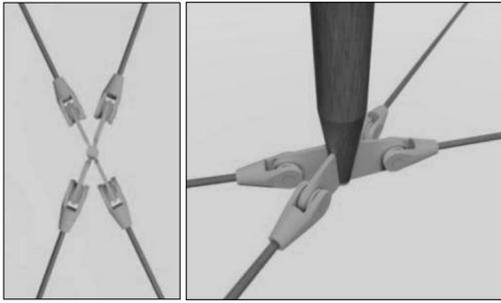


图7 拉索与撑杆节点

Fig.7 Joint of the cable and braced rod

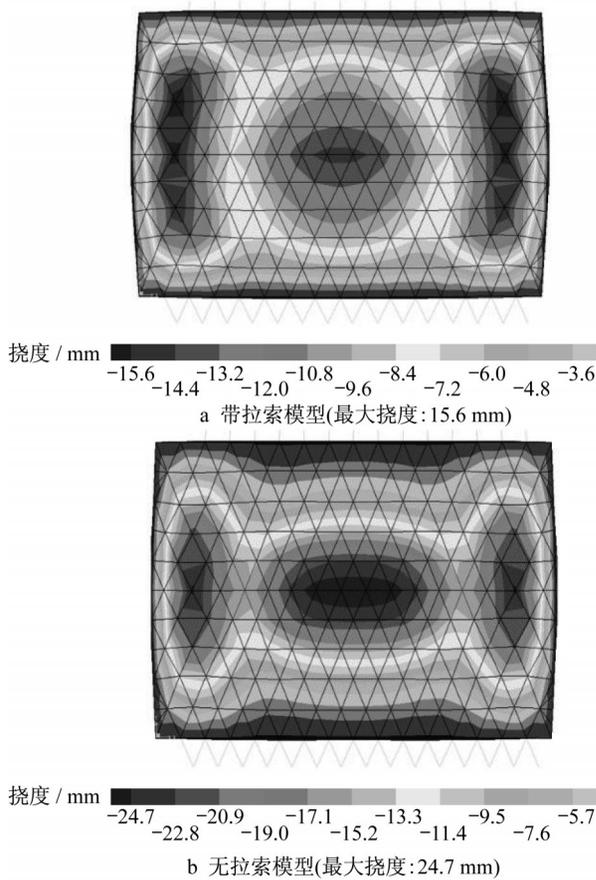


图8 有无拉索结构变形对比

Fig.8 Comparison of structural deformation with and without the cable

### 4 节点刚度对结构受力性能的影响

钢-胶合木节点无法实现刚接,本节中主要研究木结构的构造,并通过试验验证节点的实际刚度。

#### 4.1 节点构造及抗弯刚度试验

木构件连接节点为镀锌钢板+螺栓+销钉的混合连接节点,其中镀锌钢板厚30 mm,螺栓和销钉直径均为24 mm。木构件截面尺寸为600 mm×250

mm,主次梁连接处采用25颗螺栓连接,竖向间距80 mm,水平间距140 mm。为提高节点的抗拉能力和抗弯能力,对于连接的上下两排采用8颗8.8级M24带套筒的高强度螺栓,钢套筒的主要作用是防止由高强度螺栓施加的预紧力而造成的木构件螺栓孔附近的劈裂裂纹;其余连接采用5.6级M24的普通螺栓(见图9a和图9b)。次梁与镀锌钢板连接采用5排5列M24的销钉连接(见图9c)<sup>[11-14]</sup>。

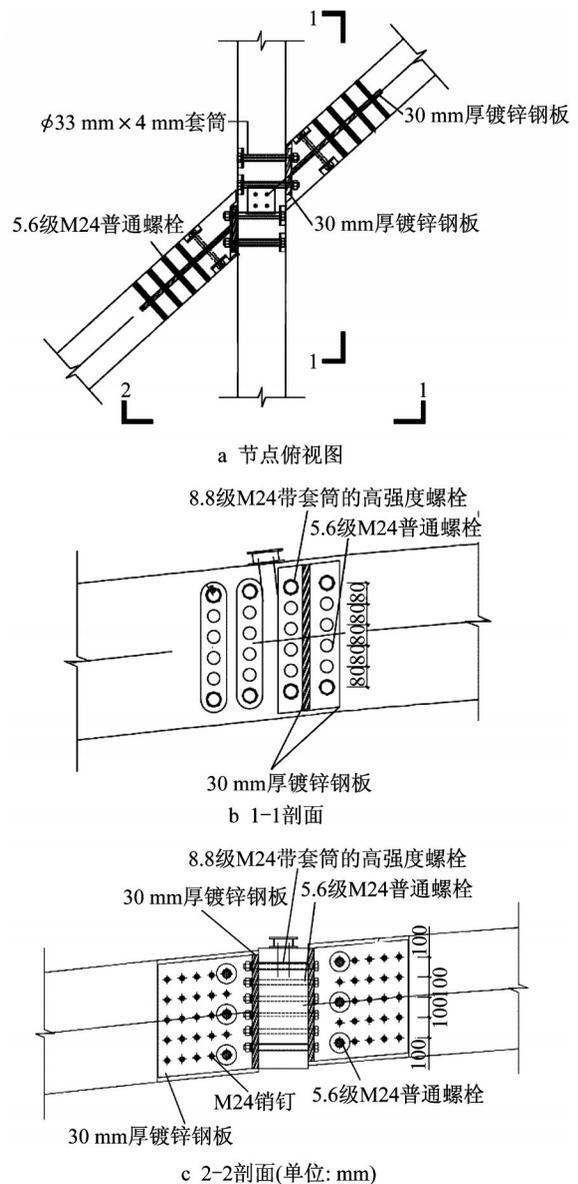


图9 木结构连接节点构造

Fig.9 Joint form of timber structure

对于钢-木构件连接节点(见图10)采用铸钢件节点,与钢结构采用焊接,与木结构连接采用5排5列M20的销钉连接。模型计算中假定木构件与铸钢件连接为铰接,钢构件与铸钢件连接为刚接。

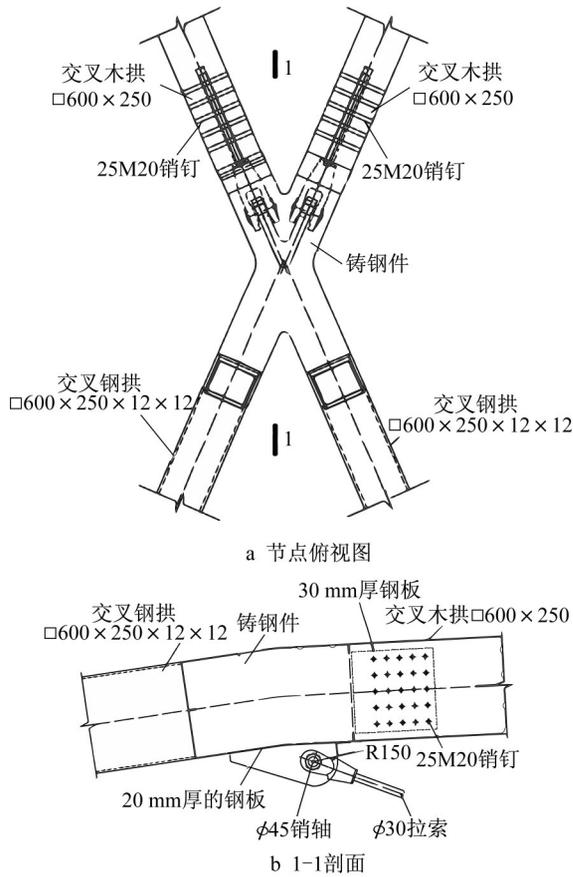


图10 钢-木结构连接节点构造

Fig.10 Joint form of steel-timber structure

为验证节点的受力性能和抗弯刚度,进行了节点试验。通过液压千斤顶对构件缓慢加载,并利用位移计测量节点转角。节点试验简图和实际加载如图11所示,节点试验装置如图12所示。

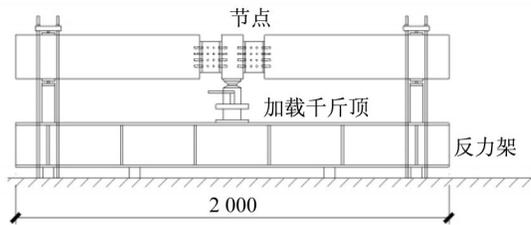


图11 节点试验简图

Fig.11 Diagram of joint test

由图13和图14可知,节点具有一定的转动能力,随着弯矩的增大,节点的抗弯刚度先增大后减小。节点的抗弯刚度指节点发生单位弧度的转角所要施加的弯矩。弯矩达到42 kN·m时,连接节点处沿最外侧螺栓产生纵向劈裂裂纹(见图15)。节点的最大抗弯刚度为2 128 kN·m,发生破坏时节点抗弯刚度为1 520 kN·m。



a 试验模型

b 节点加载装置

图12 节点试验装置

Fig.12 Joint test device

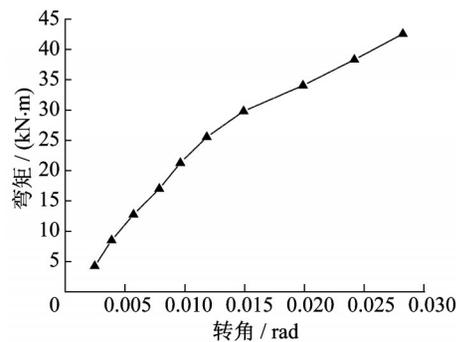


图13 节点转角和位移关系

Fig.13 Relationship between angle and displacement of the joint

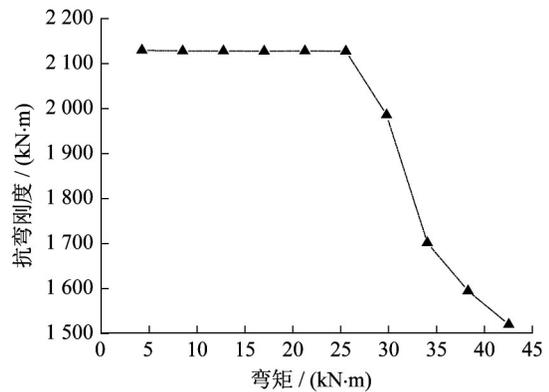


图14 节点抗弯刚度和弯矩关系

Fig.14 Relationship between bending stiffness and moment of the joint

#### 4.2 节点对结构受力性能的影响

大跨度木结构连接节点通常采用钢夹板连接节点,节点一般为弹性节点,无法实现刚接。为了研究节点刚度对结构受力性能的影响,提出了全节点体系结构和Zolinger体系结构。

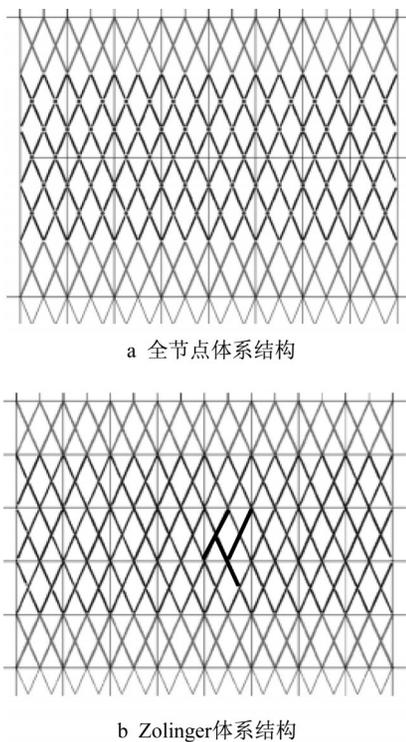
全节点体系结构中所有构件在节点处断开(见图16a),而Zolinger体系结构在节点处由一根木构件贯通,其余2个构件与木结构连接。图16中黑色部分为木结构,加粗黑实线部分为一个Zolinger单元



图15 木节点破坏形态

Fig.15 Failure mode of timber joint

的木构件连接形式(见图16b)。Zolinger体系结构的节点构造优点是由一个构件贯通,节点的刚度大,结构整体刚度较好。



b Zolinger体系结构

图16 体系结构

Fig.16 System structure

全节点体系结构的整体刚度对节点刚度依赖性大,随着节点刚度的增加结构整体刚度增加,当节点的抗弯刚度小于1750 kN·m时,结构整体刚度出现突变,屋盖变形剧增。Zolinger体系结构整体刚度对节点刚度依赖性小,节点刚度的变化不会带来整体刚度的变化。当节点刚度达到3500 kN·m时,2种体系结构的整体静力刚度相同(见图17)。本工程中采用Zolinger体系结构。

#### 4.3 考虑节点刚度的结构极限承载力分析

取节点试验中的最低刚度1507 kN·m。结构分

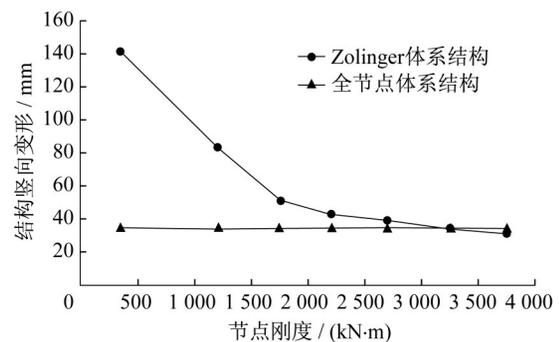


图17 结构变形随节点刚度变化

Fig.17 Variation of structural deformation with joint stiffness

析中采用连接单元模拟节点刚度。由于木结构(壳结构)的极限承载力分析没有规范可供参考,因此借鉴《空间网格结构技术规程》中关于空间结构屈曲和极限承载力的分析方法<sup>[15]</sup>,同时考虑木材材质的天然缺陷(木材本身没有塑性),钢-木网壳结构的非线性极限承载力因子按照《空间网格结构技术规程》中弹性极限承载力取值,建议大于4.2。

在全跨荷载和半跨荷载作用下筒壳结构的稳定性和极限承载力为结构设计的难点和重点。结构的极限承载力分析采用Ansys12.0,对于梁和柱刚性构件采用beam188单元,对于拉索采用LINK10单元。支撑柱下部为铰接,其余柱子下端为刚接。结构极限承载力分析时采用S+D+L的荷载组合,其中S为结构自重,D为附加恒荷载,L为屋面活荷载。

#### 4.3.1 特征屈曲模态分析

通过特征屈曲模态分析可判断结构的整体失稳方式。图18表明,屋盖以反对称失稳为主,符合筒壳结构发生失稳破坏的一般特征。结构的第1阶屈曲模态因子为18.63,说明结构有足够的稳定承载力。

#### 4.3.2 弹性与弹塑性极限承载力分析

为了真实模拟结构的极限承载力,分别采用弹性全过程分析和弹塑性全过程分析模拟结构发生极限承载力破坏的过程。

弹性极限承载力分析时,只考虑几何非线性,并按一致模态法对结构施加跨度1/300的初始缺陷。达到极限承载力时荷载因子为8.55,木构件发生破坏,钢-木结构发生破坏。达到极限状态时,中间的木结构下挠,两端的钢结构上拱(见图19)。结构的荷载因子-位移曲线如图20所示。

在弹塑性极限承载力分析时,考虑几何非线性和材料非线性,同时按一致模态法给结构施加跨度1/300的初始缺陷。结构达到极限承载力时荷载因

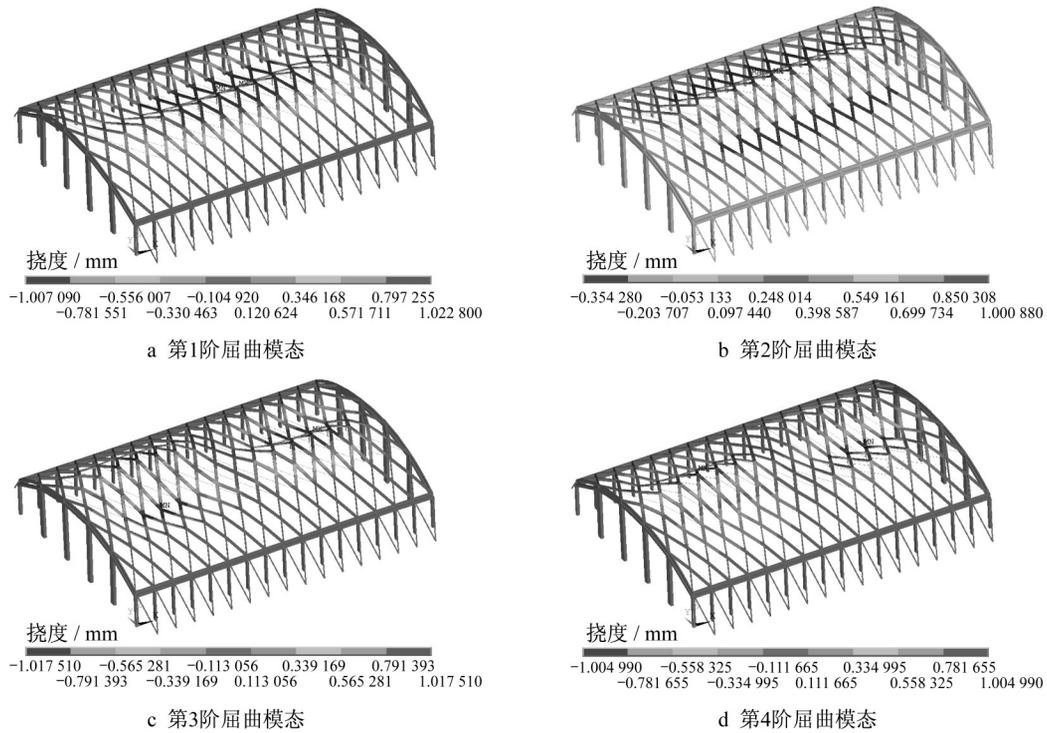


图 18 屈曲模态

Fig.18 Buckling modes

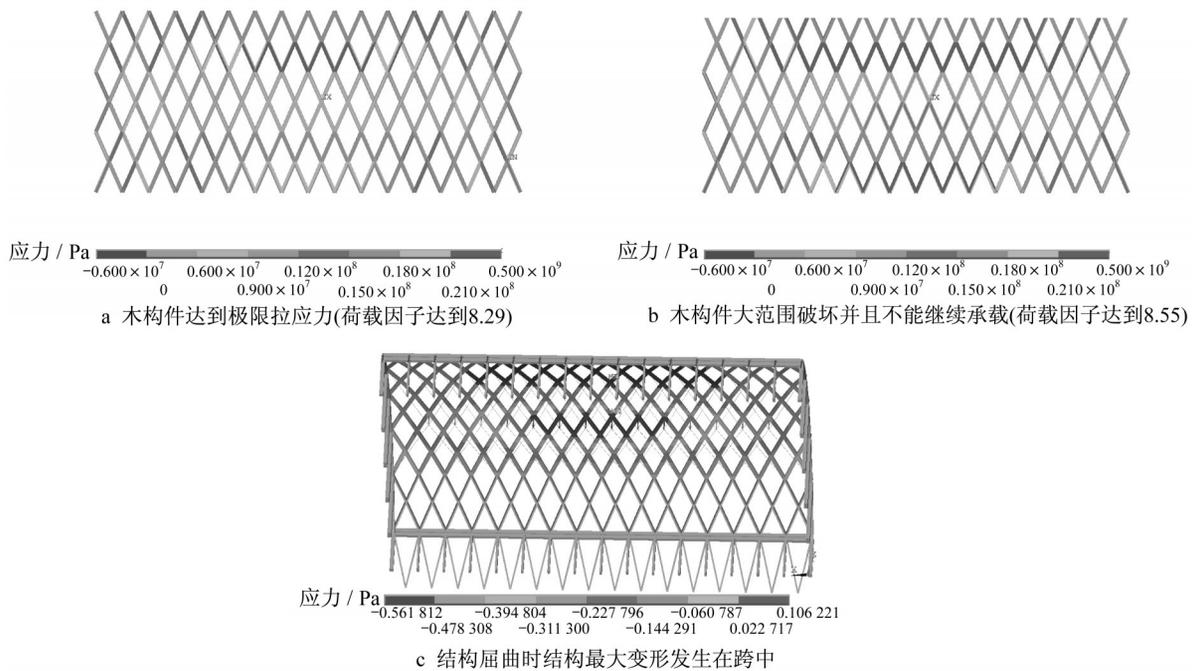


图 19 结构塑性发展机制(弹性极限承载力)

Fig.19 Development mechanism of structural plasticity(elastic ultimate bearing capacity)

子为 5.81,木网壳发生破坏,而达到极限状态时钢构件只有部分支撑柱发生屈曲。达到极限状态时,中间的木结构下挠,两端的钢结构上拱(见图 21)。

由图 22 可见,考虑材料非线性后,结构的弹塑性极限承载力(荷载因子 5.81)与弹性极限承载力(荷载

因子 8.55)相比有所下降,弹塑性极限承载力大于结构设计设定的弹塑性全过程分析时的 4.2 限值,结构偏于安全。

4.3.3 半跨活荷载对结构弹塑性极限承载力的影响  
筒壳结构对半跨活荷载比较敏感,因此需要分

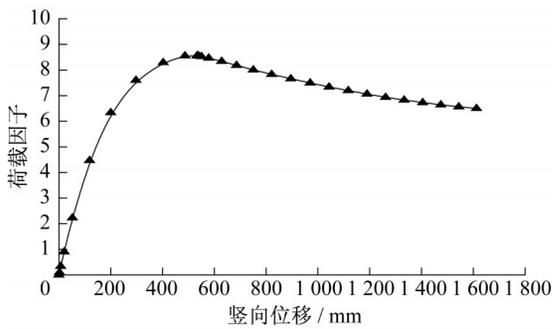
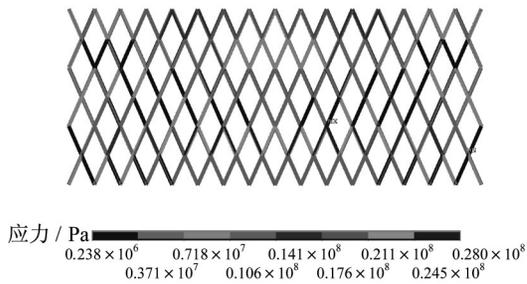
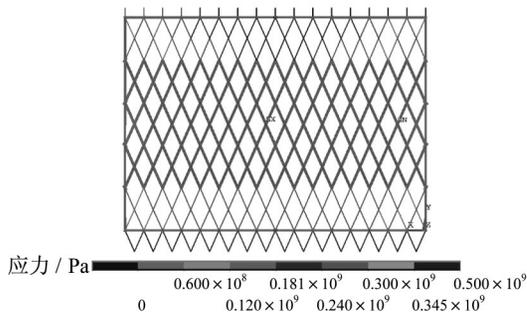


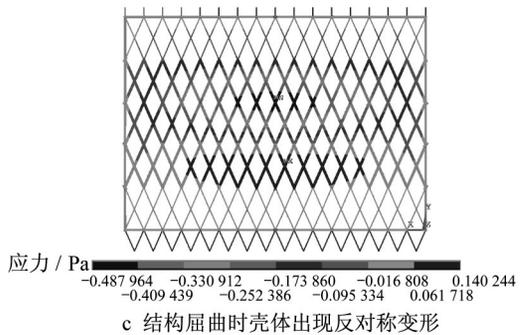
图20 带缺陷结构的荷载因子-位移曲线(极限荷载因子8.55)  
Fig.20 Load factor-displacement curve of the structure with defect (limit load factor is 8.55)



a 部分木构件达到极限拉应力(荷载因子达到5.70)



b 达到极限状态时钢构件只有部分支撑柱发生屈曲



c 结构屈曲时壳体出现反对称变形

图21 结构塑性发展机制(弹塑性极限承载力)

Fig.21 Development mechanism of structural plasticity (elastoplasticity ultimate bearing capacity)

析半跨活荷载对屋盖结构弹塑性极限承载力的影响。半跨活荷载作用下的弹塑性极限承载力分析时,考虑几何非线性和材料非线性,同时按一致模态法给结构施加跨度1/300的初始缺陷。结构达到极

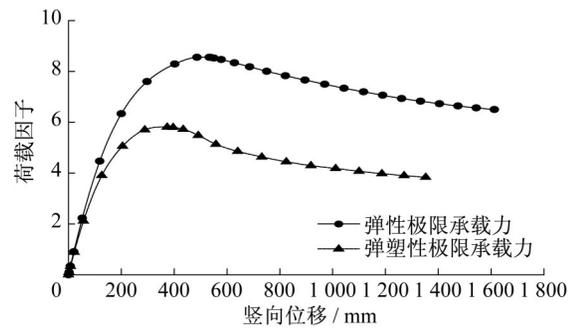
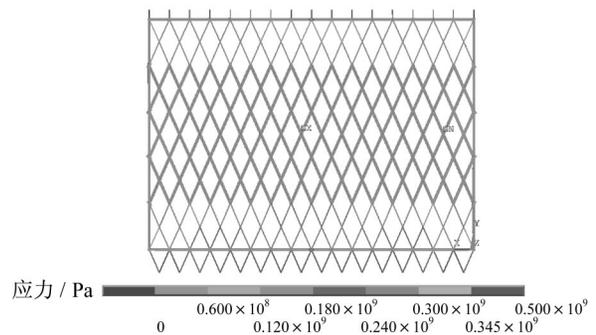


图22 弹性与弹塑性极限承载力下荷载因子-位移曲线  
Fig.22 Load factor-displacement curve at elastic and elastoplasticity ultimate bearing capacity

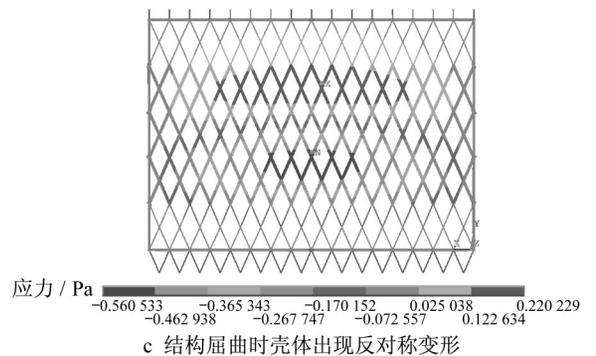
限承载力时荷载因子为5.28,达到极限状态时结构呈反对称屈曲(见图23)。



a 部分木构件达到极限拉应力(荷载因子达到4.52)



b 结构达到极限状态时钢构件只有2根支撑柱发生屈曲



c 结构屈曲时壳体出现反对称变形

图23 半跨活荷载下结构塑性发展机制

Fig.23 Development mechanism of structural plasticity under half-span live load

由图24可知,木网壳结构的弹塑性极限承载力在半跨活荷载作用下有所下降,弹塑性极限承载力

荷载因子为5.28,大于结构设计设定的弹塑性全过程分析时的4.2限值,结构偏于安全。

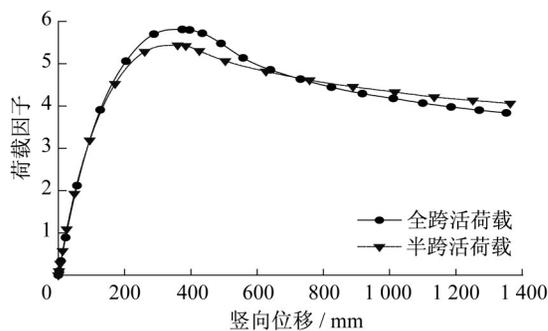


图24 全跨活荷载与半跨活荷载下弹塑性极限承载力的荷载因子-位移曲线

Fig.24 Load factor-displacement curve for elastoplasticity ultimate bearing capacity under full-span and half-span live load

## 5 结论

(1)在建筑造型确定的情况下,应根据内力分布选择木结构应用范围,避免木构件应用在弯矩和剪力较大部分。对于大跨度空间结构,采用钢-木混合结构体系是一种经济可行的方案。

(2)木结构体系和节点应结合起来设计,可采用一根构件贯通,其余构件与之相连的结构体系,最大程度提高节点刚度。

(3)木结构连接节点构造无法实现全刚接,设计中应根据实际构造计算结构的等效刚度,并在结构分析中考虑节点实际刚度对整体受力性能的影响。

(4)木结构网壳极限承载力没有规范可依据。对于钢-木混合空间结构极限承载力计算可以参考《空间网格结构技术规程》的规定,但由于木材材质的天然缺陷,钢-木网壳结构的双非线性极限承载力荷载因子建议大于4.2。

### 作者贡献说明:

张月强:试验数据处理,论文初稿撰写并修改。

丁洁民:指导研究,修改论文。

张 峥:指导研究,修改论文。

### 参考文献:

[1] 张月强,丁洁民,张峥.大跨度钢木组合结构的应用特点与实践[J].建筑技艺,2018(11):16.  
ZHANG Yueqiang, DING Jiemin, ZHANG Zheng. Innovation and practice in architectural structure design [J].

Architectural Technique, 2018(11):16.  
[2] 张月强,丁洁民,张峥.体育建筑中建筑与结构的协调设计[J].建筑技艺,2017(8):86.  
ZHANG Yueqiang, DING Jiemin, ZHANG Zheng. Harmony of architectural concept and structural design in gyms [J]. Architectural Technique, 2017(8):86.  
[3] 刘伟庆,杨会峰.现代木结构研究进展[J].建筑结构学报,2019,40(2):16.  
LIU Weiqing, YANG Huifeng. Research progress of modern wood structure [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40 (2): 16.  
[4] 夏建中,淡浩.大跨度钢、木混合结构屋盖设计并基于实例分析对抗震性能的研究[J].地震工程学报,2019,41(4):853.  
XIA Jianzhong, DAN Hao. Study on aseismic performance of large-span steel wood hybrid structure roof design and case study [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41 (4): 853.  
[5] 朱红,张翔.钢木混合结构在大跨度结构体系中的应用[J].建筑技术,2019,50(4):433.  
ZHU Hong, ZHANG Xiang. Application of steel wood composite structure in long span structural system [J]. Architectural Technology, 2019,50(4): 433.  
[6] 陈路伟,曹辉.大跨度钢、木混合结构屋盖施工工艺研究[J].建筑施工,2018,40(2):195.  
CHEN Luwei, CAO Hui. Study on construction technology of large-span steel and wood composite structure roof [J]. Building Construction, 2018,40(2):195.  
[7] WEBER J, HUGUES T, STEIGER L. Timber construction: details, products, case studies [M]. Munich: GmbH & Co. KG., 2004.  
[8] MCMULLIN P W, PRICE J S. Timber design [M]. New York: Routledge,2017.  
[9] BANGASH M Y H. Structural detailing in timber: a comparative study of international codes and practices [M]. Caithness: Whittles Publishing Limited, 2009.  
[10] VILJAKAINEN M. The open timber construction system: architectural design [M]. [S.l.]: Vammalan Kirjapaino Oy., 1999.  
[11] LARSEN H J, ENJILY V. Practical design of timber structures to Eurocode 5 [M]. London: Thomas Telford Publishing, 2009.  
[12] PORTEOUS J, KERMANI A. Structural timber design to Eurocode 5 [M]. Malden: Blackwell Publishing,2007.  
[13] 《木结构设计手册》编委会.木结构设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.  
Editorial Board of Wood Structure Design Manual. Wood structure design manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2005.  
[14] 胶合木结构技术规范:GB50708—2012 [S].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Technical specification for glulam structure: GB50708—2012 [S].Beijing :China Architecture & Building Press,2012.  
[15] 空间网格结构技术规程:JGJ7—2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Technical specification for space frame structures: JGJ7—2010 [S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2010.