

一种复合材料桁架的制备及弯曲承载性能分析

熊波¹, 林国昌¹, 张印桐², 罗锡林¹, 谭惠丰¹

(1. 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 150080 哈尔滨; 2. 深圳海油工程水下技术有限公司, 518067 广东 深圳)

摘要: 为提高复合材料桁架成型几何精度和杆件连接效率, 提出一种一体化成型的复合材料桁架制备方法, 同时设计了杆件固定工装, 通过胶接薄壳、缠绕纤维束和包裹织物实现杆件连接, 制备过程表明该制备方法操作性强、稳定性好, 制备桁架几何精度高; 通过3点弯曲实验和有限元仿真分析了桁架的弯曲承载性能. 结果表明: 杆件连接效率高, 桁架比弯曲刚度; 基于简化模型的有限元模拟方法计算效率高, 结果可靠, 可用于桁架弯曲刚度的表征.

关键词: 复合材料桁架; 一体化成型; 弯曲承载性能

中图分类号: TB322

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)05-0046-05

Fabrication and bending bearing capacity analysis of an integrated manufacturing composite truss

XIONG Bo¹, LIN Guochang¹, ZHANG Yintong², LUO Xilin¹, TAN Huifeng¹

(1. Center for Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China;

2. COOEC Subsea Technology Co. LTD, 518067 Shenzhen, Guangdong, China)

Abstract: An innovative fabrication method of integrated manufacturing composite truss is developed to improve the geometric accuracy and rods connecting efficiency. Unlike previous research, the rods are connected by bonding composite shell, winding fiber tow and wrapping fabric together with the designed rod fixture. Fabrication process demonstrates good operability and stability of truss manufacture and advanced geometry accuracy of fabrication. Three-point bending test on bending bearing capacity of the truss suggests a high specific bending stiffness with rods connection of high efficiency. In addition, consistent results from a finite element simulation based on a simplified model show its potential in high computational efficiency to evaluate the bending stiffness of the truss.

Keywords: composite truss; integrated manufacturing; bending bearing capacity

桁架式结构是一种历史悠久, 目前广泛使用的成熟结构形式. 它由杆件和接头组成, 能够很方便地根据具体载荷形式调整构形; 以杆件轴向受力来抵抗外部载荷, 能够充分发挥材料性能, 有利于实现结构的轻量化^[1-2], 纤维轴向分布的复合材料杆件尤其适合作为桁架构件. 复合材料比强度高、比刚度大^[3-4], 在航空、航天领域得到大量应用. 随着航空、航天技术的快速发展, 复合材料桁架会得到

更多的应用, 同时也对其提出了更大结构尺度、更高承载效率和更高可靠性的要求^[5-6].

桁架接头受到附近杆件传递的多种载荷作用, 并且接头几何构形复杂, 存在几何薄弱区域. 因此, 接头应力状态复杂, 力学性能表征难度大, 接头材料为各向异性时, 这一问题更加突出. 实际使用时接头易成为薄弱部位, 或者具有过于保守的设计, 不能适应结构轻量化的要求. 目前, 复合材料桁架主要由预先成型的杆和接头装配而成, 接头为金属接头, 连接处存在质量大、热膨胀系数不匹配, 以及电偶腐蚀现象, 并且黏结强度低, 而机械连接又会导致复合材料损伤和应力集中^[7-8]. 此外, 桁架精确装配难以实现, 实际加工时常以牺

收稿日期: 2013-06-18.

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET-08-0150).

作者简介: 熊波(1987—), 男, 博士研究生;

谭惠丰(1969—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 熊波, 12B918029@hit.edu.cn.

牲桁架几何精度为代价完成装配。目前,国外已经出现了“IsoTruss®”、“DragonPlate”等全复合材料桁架结构。前者为整体成型复合材料桁架,质量轻、跨度大,但缺乏有效、经济的成型工艺^[9]。后者为斜杆铰接、接头拼合式碳纤维桁架,可灵活调整结构形式和尺寸,但其接头强度并不高,目前主要以民用为主。国内鞠苏等^[10-11]采用手工引导纤维束缠绕加纤维纱绑束工艺,制备出轻质全复合材料桁架,其弯曲失效模式表现为次杆失稳,其次杆为实心,材料性能并未充分发挥。

为解决上述问题,提高杆件连接效率(连接性能与连接附加质量之比)和桁架几何精度是关键,为此本文提出一种一体化成型复合材料桁架,直接对预先成型的杆件进行连接。通过所设计的杆件固定工装和杆件连接方法,保证桁架的成型几何精度和杆件连接效率。为考察制备桁架的弯曲承载性能,同时研究其弯曲刚度表征方法,设计了桁架3点弯曲实验方案,并完成实验;提出简化桁架模型,并借助有限元软件进行桁架的弯曲刚度仿真。

1 一体化成型复合材料桁架制备

三角形具有稳定性,在式样繁多的桁架结构中,正三角形截面桁架具有良好的承载性能,是目前应用最广泛的一种桁架结构形式。此种桁架的质量与其截面尺寸密切相关,为适应轻量化要求,选择狭长构型的梁式桁架。具体空间构形见图1,桁架截面为外接圆直径0.3 m的正三角形,总长度为3.2 m(含6节,两端主杆各延伸0.1 m),主杆(弦杆)、次杆(腹杆)截面外径分别为20.0、16.0 mm,壁厚分别为2.0、1.5 mm。综合考虑市场供需行情及价格、工艺等因素,碳纤维选取T700-12K高强度碳纤维束,树脂基体选取强度高、耐高温性好的TDE-85环氧树脂;选用咪唑类固化剂,咪唑作为环氧树脂固化剂时既有叔胺的催化作用,又有仲胺的作用^[12]。

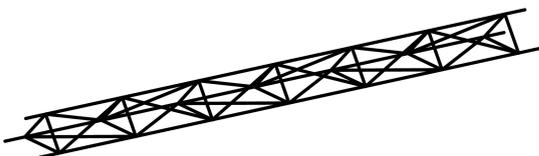


图1 制备一体化成型复合材料桁架空间构形

首先在桁架节点处胶接薄壳,实现桁架杆件的初步连接,因此桁架初步连接时,需完成所有杆件及薄壳的制备。考虑成本及轴向受力特点,杆件采用成熟的拉挤工艺制备。为增强拉挤杆件环向力学性能,拉挤时在纱束外面包覆一层碳纤维织

物。薄壳由织物预浸料按照 $[\pm 45^\circ]$ 手工铺层,并经真空袋加压固化制备,固化时保持120℃环境温度3 h,再升温至170℃环境固化4 h,之后随炉自然冷却。

1.1 杆件固定

桁架杆件连接时,杆件空间位置必须固定。为此,本文专门设计了一种桁架杆件固定工装,该工装由垫块和三角板组成,如图2所示。三角板垂直置于水平工作台上,顶点为直径20 mm的半圆开口。三角板为金属板,以保证刚度满足要求。桁架主杆在节点处贯通,将3根主杆分别置于3组开口中,调整前、后位置使它们保持齐整,然后将主杆与三角板上螺栓固定,从而实现主杆与三角板的固定。三角板由两部分拼成,以便于初步连接完成后三角板的拆卸。次杆裁切长度及杆端形状处理以尽量减少连接处杆端空隙为原则,这样次杆就可以通过连接处杆端形状配合,以及桁架整体形状配合保持相对位置固定。首先,完成底部平面上连接斜杆的桁架节点的初步连接;然后,旋转桁架使另一侧面位于底部平面,进行同样的操作;最后,再旋转,完成最后一个平面上的初步连接。斜杆初步连接时,中部嵌入固定垫块的槽中,斜杆位置得到进一步固定。该固定工装组成简单,使用过程表明固定操作也较方便。

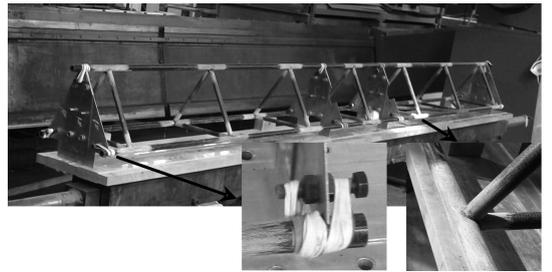


图2 桁架杆件空间位置固定工装

1.2 杆件连接

杆件首先通过胶接复合材料薄壳实现初步连接,如图3所示,根据连接处整体几何外形,设计使用4瓣薄壳(共3种)刚好完全包裹连接部位。胶黏剂为环氧树脂E51,胶接步骤按照一般复合材料胶接工艺要求执行,另外薄壳背面也需要进行丙酮清洗及砂纸打磨,固化环境为70℃并保持6 h,之后随炉自然冷却;杆件所有连接处初步连接完成后,手工引导浸润过树脂的碳纤维束缠绕初步连接部位,如图4所示,缠绕时使纤维束具有一定预紧力,并使各杆上纤维缠绕密度相当,缠绕纤维束连续;设计并加工外模具用于对连接部位加压,在所有外模紧固面上铺放连续T700-3K平纹织物,然后用螺栓紧固外模实现对连接部位加

压,如图 5 所示,对连接处进行 70 °C 固化且时间为 6 h,之后随炉自然冷却;脱模修整后,一体化成型复合材料桁架即完成制备,如图 6 所示.成型桁架总质量为 4.6 kg,连接部位连接附加质量平均为 60 g.

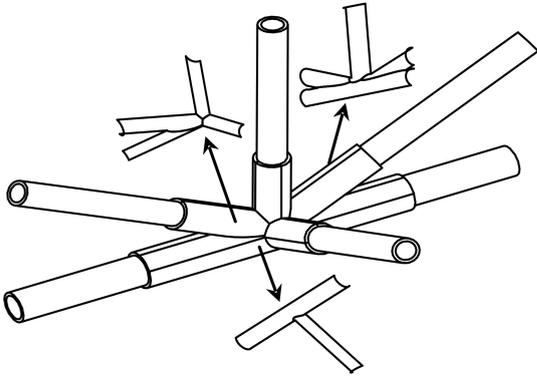


图 3 桁架连接处胶接复合材料薄壳

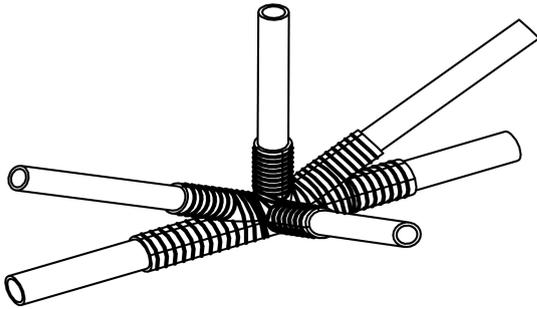


图 4 连续预浸纤维束缠绕初步连接部位

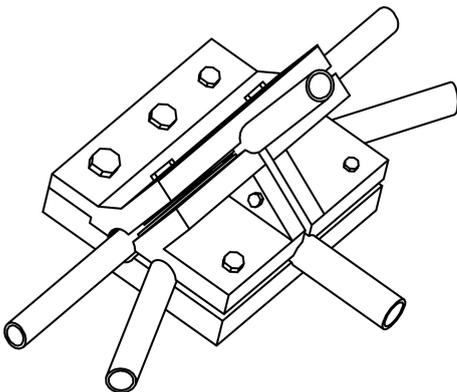


图 5 外模具合模及对桁架连接处加压示意

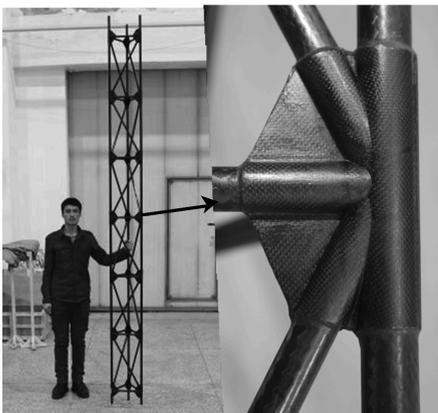


图 6 一体化成型复合材料桁架实物及其连接部位

加压外模间保持一定空隙,这一点需在模具设计时得到保证,合模前所有模具受压面均铺放连续碳纤维织物,使杆件根部之间均能形成碳纤维增强片,修整后如图 6 所示.预浸纤维束缠绕初步连接部位,增强了连接处垂直于薄壳接缝线方向的力学性能,使多瓣薄壳形成整体.桁架制备过程表明,本文提出的一体化成型复合材料桁架制备方法具有较强的工艺实现性,工艺稳定性也比较好;所设计桁架杆件固定工装简单易操作,成本低廉,实物几何测量表明成型桁架具有较高的尺寸精度.

2 一体化成型复合材料桁架弯曲承载性能分析

相对于传统材料桁架,复合材料桁架最大的优势在于质量轻,比弯曲刚度是一项重要承载性能指标.本文从抗弯刚度角度分析一体化成型复合材料桁架的弯曲承载性能,并探索其弯曲刚度表征方法,具体采用实验和有限元模拟相结合的手段.

2.1 桁架 3 点弯曲实验

桁架弯曲实验采取目前广泛使用的 3 点弯曲实验方法,实验方案及挠度测量点编号如图 7 所示.桁架为简支边界条件,加载位置位于桁架中部平面,通过悬挂重物对桁架进行加载,使用全站仪记录测量点的坐标.

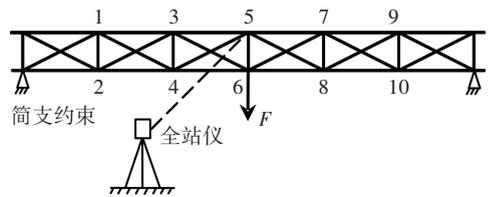


图 7 桁架 3 点弯曲实验方案及测量点编号示意

桁架 3 点弯曲实验装置如图 8 所示,实验时测量桁架节点位置坐标.桁架两端分别放置在两个等高度的刚性平台上,为限制桁架刚体位移,使桁架只能绕光学平台边缘转动,在桁架底部两主杆顶端均设置两个磁性吸座以限制其位移.加载位置位于桁架中部,采用高强尼龙带绕过桁架顶部主杆,在尼龙带下端悬挂重物.全站仪工作时向待测位置投射激光光斑,并自动计算待测位置三维坐标,为保证测量精度,在待测位置粘贴画有十字线的反射标志点,测量时将激光投射到十字线交叉点.由于桁架中部节点被尼龙带遮挡,实际测量时在节点两侧设置两对称点,将它们的测量均值作为桁架中部节点测量值.逐级加载至最大载荷 1 314.5 N,测量并记录每一级载荷作用下桁架节点坐标值.

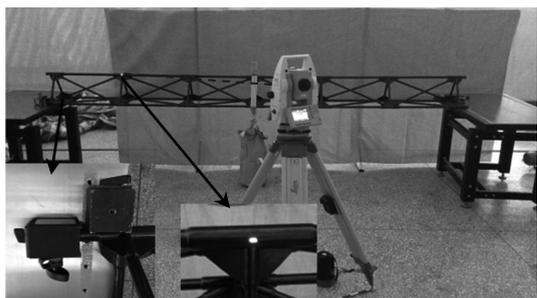


图8 桁架3点弯曲实验装置

测量完成后处理实验数据,得到桁架各节点在不同弯曲载荷作用下的挠度,如图9所示。由图9可知,桁架各节点的载荷-挠度曲线均近似为线性,上弦奇数点的挠度大于下弦偶数点的挠度,桁架节点距离加载点越近挠度越大。选取最大挠度点5号点为弯曲刚度控制点,根据5号点载荷-挠度实验值确定桁架弯曲刚度。采用最小二乘法拟合的5号点载荷-挠度曲线如图10所示。由该曲线得到的桁架弯曲刚度为575 N/mm,桁架弯曲刚度与自身质量之比为125 N/(mm·kg)。目前还没有可直接用于比弯曲刚度对比的已公开文献数据,为此,本文对相同构型及尺寸的“DragonPlate”桁架及装配式桁架进行3点弯曲刚度测试,实测比弯曲刚度结果分别为66、104 N/(mm·kg)。本文提出的一体化成型复合材料桁架,比弯曲刚度分别比“DragonPlate”桁架和装配式桁架高89%和20%,一体化成型复合材料桁架具有较高承载效率。

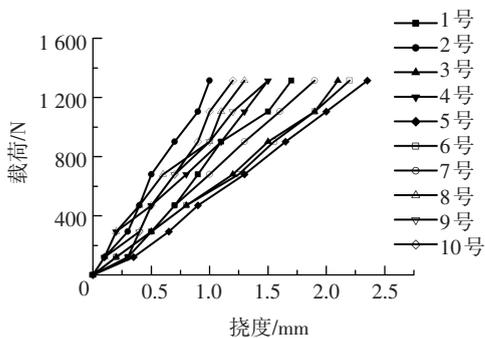


图9 桁架3点弯曲工况各节点载荷-挠度曲线的实验值

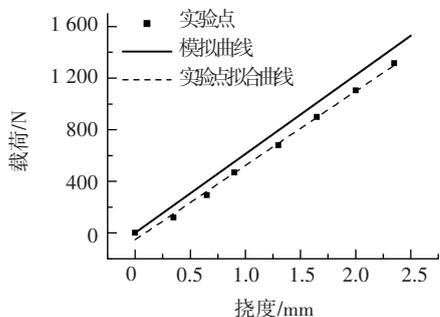


图10 桁架3点弯曲工况加载点载荷-挠度曲线的实验及模拟结果

2.2 桁架弯曲模拟

基于商业有限元软件 ABAQUS 6.12,针对实验所采用的边界条件及加载工况,对所制备桁架进行几何非线性计算。模拟过程必须特别注意计算效率,以适应梁式桁架组成的整体结构计算。桁架杆件为细长等截面圆杆,材料均匀,受轴向力及杆端弯矩作用,实际应力状态又主要以轴向应力为主,选择梁单元进行模拟能够满足精度要求,同时可以明显降低计算成本。具体选择三维二次梁单元 B32,其节点均有3个平动自由度及3个转动自由度,可以考虑横向剪切变形,适合模拟细长及短粗梁,这与本文杆件计算特点相符合。由于杆端单元力学行为较中间单元复杂,杆件单元划分时,单元尺寸应由中间至两端逐渐减小。综合考虑计算精度及效率,杆件中间单元尺寸设置为端部的3倍,整体桁架共划分1227个单元。桁架杆件连接简化为完全刚性连接,即连接处各杆端共节点,以进一步提高计算效率。梁单元材料属性的确定需要依据杆件具体制备工艺,针对拉挤杆件外壁为一层织物,内部纤维全部沿杆轴向的情况,可通过杆件轴向拉压实验或有限元计算得到所需梁单元材料参数,编写材料子程序,然后通过 UMAT 接口嵌入 ABAQUS 主程序,以此赋予梁单元材料属性。本文采用实体单元对杆件进行建模,通过设置不同铺层模拟外壁织物层和内部单向层,然后将模拟结果进行等效,得到桁架分析时所需梁单元材料参数。

实验最大载荷 1314.5 N 作用下,桁架变形及挠度云图如图11所示,模拟所得变形特征与实验基本一致,5号点具有最大挠度 2.14 mm,比实验值 2.35 mm 小 8.9%;模拟得到加载点载荷-挠度曲线如图10所示,该曲线高度线性,由该曲线得到桁架3点弯曲刚度为612 N/mm,模拟曲线和实验点基本吻合,桁架3点弯曲刚度实验值比模拟值小6%。借助有限元软件计算桁架抗弯刚度,结果能够满足工程精度要求,有限元模拟可以作为桁架弯曲承载性能表征的重要方法。此外,有限元模拟还可以实现高效计算,适合桁架梁组成的整体结构的分析。

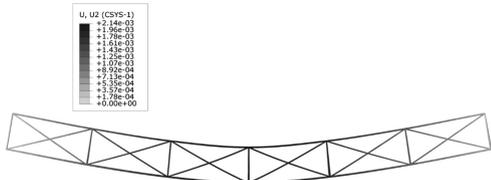


图11 1314.5 N 桁架3点弯曲载荷作用下变形及挠度云图(变形放大100倍)

用完全刚性节点对桁架连接进行简化是造成桁架弯曲刚度模拟值偏大的主要原因,其他原因还包括杆件制备工艺缺陷导致的杆件实际性能弱化,以及模拟中梁单元简化导致的杆件刚化效应。但总计6%的差距并不大,这表明所制备桁架中杆件的连接刚度较高,接近完全刚性连接,杆件连接具有较高的连接效率。

3 结 论

1)一体化成型复合材料桁架的制备过程及弯曲承载性能分析表明,本文提出的通过固定杆件、胶接薄壳、缠绕纤维束和包裹织物等具体步骤制备桁架的方法,以及实际制备过程中的胶接薄壳外形设计、杆件固定工装设计、加压外模具设计,能够保证制备桁架具有较高的比弯曲刚度和成型几何精度,使桁架节点具有较高的连接效率。该制备工艺操作性强、稳定性好;所设计杆件固定工装简单易操作,成本低廉。

2)采用梁单元和刚性节点简化模型的有限元模拟方法具有较高的计算效率,模拟结果与实验结果基本一致,该模拟方法可以用于表征一体化成型复合材料桁架的弯曲刚度,并可在桁架梁组成的整体结构计算中推广应用。

参考文献

- [1] 范华林,杨卫,方岱宁,等. 新型碳纤维点阵复合材料技术研究[J]. 航空材料学报,2007,27(1): 46-50.
- [2] 邵劲松,刘伟庆,蒋桐. 民用工业中复合材料桁架的应用和发展[J]. 玻璃钢/复合材料,2006(5): 35-39.

- [3] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报,2007,24(1): 1-12.
- [4] ANTÓNIO C C, HOFFBAUER L N. An approach for reliability-based robust design optimisation of angle-ply composites[J]. Composite Structure,2009, 90(1): 53-59.
- [5] SHTÜZE. R. Lightweight carbon fibre rods and truss [J]. Materials & Design. 1997, 18(4/6): 231-238.
- [6] 夏英伟,沃西源,徐曼琼,等. 先进复合材料桁架接头的研制与试验[J]. 航天返回与遥感,2004,25(4): 49-54.
- [7] DANIEL K, MAREK A, KRZYSZTOF M. Composite Joint of Aerostructures[M]. Poland: Warsaw University press Inc, 2000.
- [8] 郑百林,张士元,贺鹏飞. 卫星桁架复合材料多连接接头性能的测试与分析[J]. 复合材料学,2005, 22(6): 172-177.
- [9] JENSEN D W. A glimpse into the world of innovative composite IsoTruss structures [J]. SAMPE J, 2000, 36(5): 8-16.
- [10] JU Su, SHENOI R A, JIANG Dazhi, et al. Multi-parameter optimization of lightweight composite triangular truss structure based on response surface methodology[J]. Composite Structures,2013, 97: 107-116.
- [11] 鞠苏,江大志,杜刚,等. 超轻质全复合材料桁架结构的制备及弯曲特性[J]. 复合材料学报,2009,26(3): 172-177.
- [12] 林再文. 纤维缠绕加筋复合材料壳体的设计与性能表征[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

(编辑 张 红)