

复合材料桁架结构成型研究进展

王 琪¹ 刘建军^{1,2} 韩 笑²

(1.西安航天复合材料研究所,西安,710025;2.西安康本材料有限公司,西安,710089)

摘 要 桁架结构在航空航天和建筑业领域有着广泛的应用。复合材料桁架结构在充分发挥复合材料低密度、高比强度、高比模量、耐腐蚀和抗疲劳等优异性能的基础上,不仅可以减轻构件质量,还能够增加有效载荷,因此在研究与应用方面日益得到重视。介绍了组成复合材料桁架的杆件、接头的典型成型工艺方法,比较了复合材料桁架结构中常见连接方式的优缺点。

关键词 复合材料,桁架,成型工艺,连接

Research progress on forming process of composite truss structure

Wang Qi¹ Liu Jianjun^{1,2} Han Xiao²

(1.Xi'an Aerospace Composites Research Institute,Xi'an 710025;
2.Xi'an Carbon Materials Co.,Ltd.,Xi'an 710089)

Abstract Truss system has been widely applied in aerospace and construction industries.Based on the excellent performance of low density,high specific strength,high specific modulus,corrosion resistance and fatigue resistance of the composite material,composite truss not only can reduce the component quality,but also increase the payload.Composite truss structures have attracted more and more attention on research and application.Several typical methods for manufacturing composite truss and joint were introduced.Besides, the advantages and disadvantages of the connection methods in composite truss structures were compared.

Key words composite material,truss,forming process,connection

桁架结构一般由杆件和接头连接组成(图 1),是一种高次超静定构件,可实现大跨度连接和多样化的形状。桁架结构设计灵活,整体性好,结构载荷能够以三维方式更均匀地分布,可显著改善整体结构刚度,承担较大的载荷。

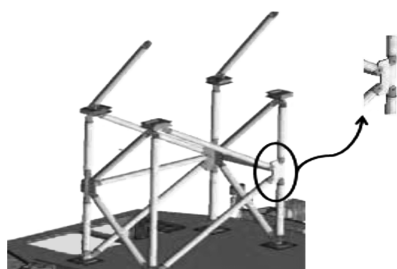


图 1 桁架结构

复合材料由于具有质量轻、比强度高、耐腐蚀、抗疲劳和结构可设计等优点已成为航空航天领域的重要材料。随着复合材料的兴起,用复合材料代替以往桁架结构中的铝合金、钛合金等金属材料,可以有效地减轻结构质量,增加有效载荷,是当今航空航

天和工业建筑新材料的研究重点和发展方向^[1-2]。通过复合材料接头的连接,桁架杆件主要承受轴向力,并且空间桁架具有通过结构几何刚度弥补材料刚度不足的优点,抗变形能力优异,可以充分发挥复合材料的力学性能,实现构件的轻量化,得到高强、高模、轻质的桁架结构^[3]。

复合材料桁架在浮空器、空间站、通用航空器和大小卫星等航空航天产品中具有广泛的应用。例如,Zhang 等^[4]设计开发了一种航天器用的空间可展开桁架结构,桁架由多层碳纤维增强环氧树脂形状记忆聚合物复合材料制成,室温下储能模量为 14.5GPa,并随着温度降低,储能模量逐渐升高,其展开过程开始时的恢复力矩为 0.32Nm,最后阶段仅为 0.22Nm。哈尔滨工业大学熊波^[5]开发了一种适合飞艇应用的三角形截面狭长构型复合材料桁架,根据飞艇的受力特点,对桁架的弯曲、轴压和扭转 3 种力学性能进行了分析,通过桁架稳定性分析得到了飞艇骨架用的复合材料桁架结构。在民用建

筑领域,Pfeil 等^[6]研制了一种复合材料-铝合金桁架桥,用作装备式公路钢桥拼装构件,桥面板采用铝合金材料,杆件为纤维增强的复合材料,铝合金接头通过焊接或螺栓进行连接,通过抗弯和抗扭测试,验证了桁架桥的承载能力完全符合承载要求。Bai 等^[7]设计了一种跨度为 12.50m 的人行桁架桥梁,该桥由拉挤玻璃纤维复合材料(GFRP)组成,桥梁总宽度为 1.93m,可以通过直升机轻松拆卸和安装,并对其进行了动态载荷测试,研究发现,GFRP 桁架桥梁完全可以代替金属桥梁作为承力构件。

1 复合材料桁架的构造

1.1 复合材料桁架杆件

复合材料桁架由复合材料杆件通过接头连接组成,杆件的截面形状可以是圆形、矩形或异型。矩形和圆形杆件又可以分为有夹层和无夹层两类,无夹层的可称为层合杆件,有夹层的可称为夹层杆件^[8]。夹层杆件一般采用轻质复合材料芯层,外侧采用强度和刚度更高的复合材料层,这种复合材料杆件不会增加构件更多质量,反而具有更高的强度,可以承受更多的载荷^[9-10]。异型型材桁架杆件有闭合型和开口型两种。闭合型杆件又可叫薄壁杆件,杆件中可填充其他材料以增加结构的稳定性。而开口型杆件的截面受稳定性限制,不能承受正交荷载的作用,因而在应力复杂场合应用较少。

1.2 复合材料桁架接头

桁架接头结构复杂,对桁架承载作用的大小有着极其重要的影响。根据材料的不同,可以分为复合材料接头和金属接头两种。金属接头虽然加工方便,材料刚度大,但是由于其不耐腐蚀、质量大,不利于航空航天材料的减重目的。随着复合材料成型工艺日趋成熟,已经大量代替金属材料作为桁架的接头使用。

2 复合材料桁架的制造工艺

2.1 杆件制造工艺

杆件是复合材料桁架的重要组成部分,对整个桁架的力学性能有着决定性的作用。目前制造复合材料桁架杆件比较成熟的工艺有缠绕成型、拉挤成型和树脂传递模塑成型工艺(RTM)^[11]。

2.1.1 缠绕成型工艺

缠绕成型工艺是将纤维丝束浸渍树脂,通过缠绕机的作用,在一定张力下,按照规律将其缠绕到芯模上,然后在常温或加热条件下固化成型。缠绕工

艺是目前使用最广泛、成熟度最高的杆件成型方法,具有质量稳定、效率高、自动化程度较高等优点^[12]。鞠苏等^[13]通过纤维缠绕芯模制得了一种超轻质全复合材料桁架,其线密度不超过 1.0kg/m,拉伸强度达到 747.5MPa,拉伸模量达到 48.56GPa,抗弯载荷达到 2000N。Li 等^[14]采用缠绕-模压技术制备了一种新型的夹芯结构的复合材料桁架制品,芯层采用模压工艺,碳纤维缠绕桁架表皮,通过共固化得到高界面强度的轻质复合材料桁架。

2.1.2 拉挤成型工艺

拉挤成型工艺是将浸渍树脂的纤维通过加热口模,挤出多余树脂,在牵引条件下进行固化成型。应用拉挤工艺生产复合材料桁架杆件也较为广泛。拉挤成型可以生产较长的复合材料杆件,成本低,自动化程度高,能连续生产。Bai 等^[15]使用拉挤成型工艺制造一种玻璃纤维增强的全复合材料空间桁架结构,接头部分使用螺栓连接,其轴向拉伸强度达到约 293MPa,经过对其他力学性能进行有限元分析和测试,表明其完全可以代替钢类桁架作为结构材料使用。但是常规的拉挤工艺生产的复合材料制品中,纤维是单轴取向,抵抗层间破坏的能力稍差,在一定程度上制约了其在高性能结构中的大规模应用。

2.1.3 RTM 工艺

RTM 工艺也叫压注成型,是将纤维按一定的取向在模具中排列成预制体,然后再向模具中注入树脂,最后固化成型复合材料制品。通过 RTM 成型的制品,尺寸精度较高,整体性好,也是制造复合材料桁架的典型方法之一。但是由于其模具成本较高,对于成型复杂制品需要增加注胶孔数量,造价较高。

2.2 接头制造工艺

桁架接头主要是将复合材料杆连接在一起,形成整体的空间结构。桁架接头的结构形式主要由接头承载能力等设计要求来决定。复合材料桁架接头的成型方法有铺贴-模压成型、缠绕成型、RTM 成型、自动铺丝工艺和热胀软模工艺^[16]。

2.2.1 铺贴-模压成型

铺贴-模压成型是目前较为常见的工艺方法。铺贴主要是指将预浸料在模具中逐层铺放成预成型体,然后通过模压的方法将坯件固化成型。铺贴-模压成型工艺能够成型复杂的接头制品,且成本较低,模具设计相对简单。通过合理的铺层设计,可以得到力学性能接近面内各向同性的材料结构,应用范围最为广。主要缺点是桁架接头的层与层之间通过

树脂粘接,层间强度相对较低。杨红娜^[17]使用铺贴-模压工艺制造了一种空间桁架用的六向碳纤维复合材料接头,弯曲刚度平均值为 4.828×10^6 N/m,弯曲刚度最小接头的破坏载荷为 3.646kN。夏英伟等^[18]采用 $[0/\pm 45/90]_s$ 铺层方式,通过模压成型工艺制造了碳纤维增强环氧树脂复合材料桁架接头,其扭转刚度为 17.64×10^3 N·m/rad,弯曲破坏载荷为 3.288kN。胡晓蒙^[19]通过模压成型了两种 Y 型和 K 型复合材料桁架接头,采用 $[0/90]_s$ 的铺层方式,对其承载性能作了仿真分析,发现最大应力位于接头的主管和辅管相贯处,是其最易破坏的薄弱区域。

2.2.2 缠绕成型

缠绕成型工艺制造的复合材料接头具有各向异性,受技术限制,只能成型简单、几何形状规整的桁架接头制品。接头的缠绕成型对硬件和软件的要求较高,需要四轴或者四轴以上的缠绕机以及相应的缠绕程序,因此实际应用有很大的局限性^[12]。目前,国内对缠绕成型接头的报道较少。

2.2.3 RTM 成型

RTM 成型的复合材料桁架接头是目前较为成熟的复合材料成型工艺。RTM 工艺可以和三维编织或机织相结合,使用三维编织或机织技术得到接头的预成型体,然后将其放入模腔中,通过 RTM 设备注入低黏度的树脂,最后固化成型。三维编织-RTM 或三维机织-RTM 工艺成型的接头力学性能可设计,制品整体性好,尺寸精度高,表面质量好,纤维可以在空间取向贯穿,不像铺贴-模压工艺得到的制品层与层之间单纯地依靠树脂粘结,界面强度较低。Wang 等^[20]通过 RTM 工艺制备了两种 K/T 型接头,先用 Fiber SIM 软件优化了纤维织物的铺层设计,对 K 型和 T 型接头进行了 RTM 注射模拟;并通过实验验证,从接头主管中心线注胶,多余的树脂从接头侧管中心线流出,使树脂分布更均匀,注胶时间更短。对于成型结构复杂的桁架接头,制作预成型件较为困难,对 RTM 模具的要求也更高,需要添加更多的注胶孔,大大提高了技术成本。

2.2.4 自动铺丝工艺

随着 CAD/CAM 技术的发展,自动铺丝工艺近年来在复合材料制造业逐渐兴起。自动铺丝主要依靠编程通过铺丝头将预浸料丝束铺贴在芯模表面,不需要控制纤维张力,整个成型过程中纤维的铺放、切断以及局部的加厚等由机器完成,可以实现全自动化操作^[11]。铺放工艺对零部件质量的影响因素较多,铺放温度、铺放压力、铺放速度、环境温湿度及

工装表面状态等都对零部件质量有明显影响^[21]。因此,成型复杂制品对于铺丝机的要求也较高,使用起来也有很大的局限性。自动铺丝技术与纤维缠绕技术的明显不同之处在于,后者通过张力控制将纤维缠绕在芯模表面并形成成型压力,而自动铺丝则是在较低的张力下用压辊将预浸纱压实在芯模表面上,因而无论是进行 0° 、 90° ,还是 $\pm 45^\circ$ 线型设计,都不存在稳定性问题,也不会出现悬空架桥现象^[22]。

2.2.5 热胀软模工艺

热胀软模工艺类似于铺层-热压罐成型工艺,是使用织物预浸料或单向预浸料一层层地铺叠而成^[16]。但是热胀软模采用热胀系数较大的橡胶等非金属材料作为芯模,使用金属外模固定制品尺寸,通过芯模受热膨胀产生压力成型复合材料接头。

3 桁架结构的连接方式

3.1 机械连接

桁架结构的机械连接方式有螺栓连接、铰接、铆接等。机械连接的主要优点是便于重复装配和拆卸,连接件不需要过多的表面处理,连接强度高,不产生类似胶接固化的残余应力;缺点主要有易产生局部应力集中,增加结构件的质量,机械制孔对复合材料造成损伤,且不耐腐蚀等。目前较为常用的机械连接是螺栓连接,成本低且易于使用^[23]。哈尔滨工业大学的孙洋^[24]以螺栓连接的碳纤维复合材料为研究对象,对其破坏模式和连接强度进行了研究,发现随着螺栓孔与复合材料板材边缘距离的增加,连接件由剪切破坏逐渐转变为挤压破坏,且螺栓连接位置不同,最大承受载荷也不相同。Bai 等^[15]使用螺栓连接全复合材料桁架结构,并对弦杆的螺栓连接进行了静应力测试,其剪切强度最大可达到 34.5MPa,最小为 27.6MPa。李凤明等^[25]研究了铰接桁架的动力学特性,结果表明,铰的存在对桁架结构动力学行为具有显著影响,含铰接结构可以增加桁架的柔性。

3.2 胶粘连接

胶粘连接主要是通过胶粘剂将杆件和接头连接在一起,可以避免机械连接产生的局部应力集中。并且与机械连接相比,胶粘连接更耐腐蚀,减轻连接重量,对复合材料不会产生损伤,抗疲劳效果好。但是胶粘连接连接前要进行严格的表面处理,强度分散性较大,抗剥离强度小,胶接后无法重复拆卸装配,且胶接的机械强度受湿、热环境影响大。Shah-verdi 等^[26]测试了纤维增强复合材料的胶粘连接的

抗疲劳特性,发现复合材料粘接连接在 1000 万次疲劳循环后没有失效。Hai 等^[27]发现,对粘结件进行表面处理,增加其粗糙度可以显著提高粘结强度和粘结件刚度。刘良威等^[28]研究了碳纤维复合材料桁架胶接装配技术,对胶接桁架进行了力学性能测试和无损检测,证实了胶接工艺对碳纤维复合材料桁架具有通用性。Lavalette 等^[29]设计了如图 2 所示的 3 种复合材料桁架杆的粘接结构,每种结构均有圆形和矩形两种截面形状。研究表明,方形截面桁架杆的粘接结构的剪切强度略高于圆形截面的剪切强度,并且 3 种结构中,“插接+胶粘”连接方式的剪切强度最高。

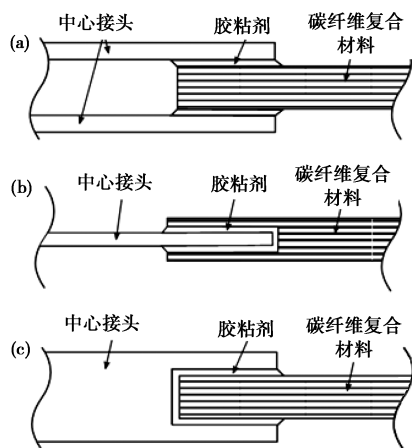


图 2 复合材料桁架杆粘接结构

3.3 混合连接

有时为了提高连接强度可以采用粘接和机械连接相结合的混合连接,这种连接方式能够起到互补的作用,提高抗剥离、抗疲劳、抗冲击等特性,与单一的连接强度相比,连接强度会有显著提高。Manalo 等^[30]分别测试了螺栓连接的桁架结构和混合连接的桁架结构,研究发现,单独使用螺栓连接的桁架梁的刚度只有螺栓和环氧树脂胶粘剂组合式连接结构桁架梁刚度的 65%。但是,使用混合式连接并不能消除机械连接造成的应力集中,还会增加连接件的重量和连接成本。

4 结语

复合材料桁架结构充分发挥了复合材料轻质、高比强度、高比模量的特性,呈现出蓬勃发展的趋势。不断优化复合材料桁架结构设计,采用先进自动化成型工艺和连接方式,在提升桁架架杆、接头以及连接强度的基础上,降低制造成本,扩大应用领域已成为主要发展方向。

参考文献

- [1] 梅贵,翟岩,苗健宇,等.离轴多反射镜系统支撑结构的设计与装调[J].光学精密工程,2015(8):2280-2287.
- [2] Jacobson M, Chen W, Rodini B, et al. Space based truss design for demise using graphite epoxy and metal matrix composites, 2005[C]. California: AIAA, 2013.
- [3] Xiong J, Ma L, Wu L, et al. Fabrication and crushing behavior of low density carbon fiber composite pyramidal truss structures[J]. Composite Structures, 2010, 92(11): 2695-2702.
- [4] Zhang R, Guo X, Liu Y, et al. Theoretical analysis and experiments of a space deployable truss structure[J]. Composite Structures, 2014, 112: 226-230.
- [5] 熊波.三角截面狭长构型复合材料桁架承载性能分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [6] Pfeil M S, Teixeira A M A J, Battista R C. Experimental tests on GFRP truss modules for dismantable bridges[J]. Composite Structures, 2009, 89(1): 70-76.
- [7] Bai Y, Keller T. Modal parameter identification for a GFRP pedestrian bridge[J]. Composite Structures, 2008, 82(1): 90-100.
- [8] 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.
- [9] George T, Deshpande V S, Wadley H N G. Mechanical response of carbon fiber composite sandwich panels with pyramidal truss cores[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 47: 31-40.
- [10] 周在东.轻质夹芯结构的有限元分析和多目标优化[D].大连:大连理工大学,2008.
- [11] 匡博洋,赵启林,陈立.复合材料桁架结构研究进展[C].重庆:中国土木工程学会 FRP 及工程应用专业委员会,2015.
- [12] 章令晖,李甲申,王琦洁,等.航天器用复合材料桁架结构研究进展[J].纤维复合材料,2013(4):62-68.
- [13] 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(3):1-6.
- [14] Li W, Sun F, Wang P, et al. A novel carbon fiber reinforced lattice truss sandwich cylinder: fabrication and experiments[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 81: 313-322.
- [15] Bai Y, Yang X. Novel joint for assembly of all-composite space truss structures: conceptual design and preliminary study[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(1): 130-138.
- [16] 马立,徐志红,陈维强,等.航天器复合材料桁架结构的工程进展[J].航天制造技术,2012(4):6-9.
- [17] 杨红娜.铺层-模压法碳/环氧桁架接头的成型工艺研究[J].航天返回与遥感,2003(4):44-48.
- [18] 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(3):49-54.
- [19] 胡晓蒙.Y型和K型复合材料桁架接头承载性能分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

(下转第 236 页)