

# 航天器复合材料桁架结构的工程进展

马立<sup>1</sup> 徐志红<sup>1</sup> 陈维强<sup>1</sup> 王洋<sup>1</sup> 陈天智<sup>2</sup>

(1. 北京卫星制造厂, 北京 100190; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)



**摘要:** 介绍了中国空间技术研究院在航天器复合材料桁架结构方面的研究现状及工程进展。针对桁架结构的接头和杆件, 分别阐述了设计原则、材料选择和制造工艺。最后, 展望了桁架结构的应用前景。

**关键词:** 复合材料; 桁架结构; 接头; 杆件; 设计; 制造

## Engineering Progress in Composite Material Truss of Spacecrafts

Ma Li<sup>1</sup> Xu Zhihong<sup>1</sup> Chen Weiqiang<sup>1</sup> Wang Yang<sup>1</sup> Chen Tianzhi<sup>2</sup>

(1. Beijing Spacecrafts CAST, Beijing 100190;

2. Institute of Spacecraft System Engineering CAST, Beijing 100094)

**Abstract:** The paper demonstrates R&D situation and engineering progress in composite material truss of China Academy of Space Technology (CAST)'s Spacecrafts. Regarding to truss joint and rod, design principle, material selection and process are put forward. Application prospect of truss has been made.

**Key words:** composite material; truss; joint; rod; design; manufacture

### 1 引言

桁架结构由若干杆件及连接杆件的接头以一定构型组合而成。桁架结构往往用来构造较大跨度、较高刚度的空间构架。因为应用桁架结构可以用最少的材料及简易的外形获得高强度、高刚性的受力载体, 并且桁架结构形式简单、拆装运输方便快捷, 被广泛应用于国民经济的各行各业, 如: 桥梁、建筑、航空、航天等领域。

桁架结构具有优良的空间性能, 特别适合在大跨度甚至超大跨结构中应用; 桁架结构是高次超静定结构, 具有承受多向载荷的性能, 其刚度和整体性较好, 能有效地承受集中荷载、非对称荷载以及各种动力荷载。如果使用复合材料制造桁架, 经过结构设计可使热膨胀系数接近于零, 这对于保持结构的稳定性非常有利。

在航天领域, 中国空间技术研究院已将复合材料桁架结构应用于航天器的主结构、高精度刚性支撑结

构、空间可展开结构和机构, 以及大跨度的刚性连接结构。桁架结构已从简单的平面桁架(如图1所示)发展到复杂的空间桁架(如图2所示)。

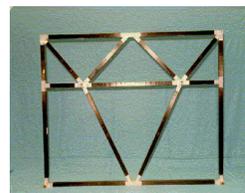


图1 平面桁架



图2 空间桁架

### 2 桁架接头

#### 2.1 设计

桁架结构中,接头的作用是把两根或更多的杆件连接在一起,或把杆件与其它结构相连,以便在杆件之间或杆件与其它结构之间传递载荷。

设计桁架接头时,首先要知道桁架杆件的一些基本特征,如极限强度、弹性模量、线膨胀系数、最大延伸率等;其次,要考虑载荷的大小、工作环境条件等因素。桁架接头的基本设计原则是:

- a. 设计为由整个连接区域承受载荷;
- b. 设计为使载荷主要引起剪应力。

此外,接头的设计还应考虑工艺实现的可能性及后续装配的方便性。

接头部位的受力形式复杂,单纯的计算分析可能会有一定的误差,试验是对设计的进一步验证。可通过单独的静力试验考核桁架接头的强度性能和工艺性能。

## 2.2 制造

### 2.2.1 材料

目前,航天器复合材料桁架接头常用的材料有碳纤维复合材料和芳纶纤维复合材料。

碳纤维复合材料的主要优点是:比模量高、比强度高、热稳定性好、热导率低,具有良好的抗疲劳性、振动阻尼性、抗腐蚀性和耐磨性;缺点是:性脆、抗冲击性能较低、成本较高。

芳纶纤维复合材料的主要优点是:很高的比强度,较高的抗冲击性、抗疲劳性,良好的热稳定性、隔热性、阻尼性、绝缘性和透波性;缺点是:压缩强度较低,模量不高,有吸湿性,机械加工性能较差。

桁架接头一般按照强度设计原则进行设计,因此,多数情况下接头采用高强系列纤维,除非对结构的刚度有特殊要求才采用高模系列纤维或高强与高模系列纤维混杂使用。

### 2.2.2 工艺

按照接头的设计要求(如:结构形式、尺寸、使用环境等),可以选择不同的成型工艺制造复合材料接头。目前,成型桁架接头的主要工艺方法有:铺层-模压工艺<sup>[1]</sup>、铺层-热压罐工艺、缠绕-热压罐工艺<sup>[2]</sup>、自动铺丝工艺<sup>[3]</sup>、三维编织-RTM 工艺、三维机织-RTM 工艺、缝合-RTM 工艺、热胀软模工艺等。

#### a. 铺层-模压工艺

在芯模表面用织物预浸料或单向预浸料(也称为无纬布)一层层地铺叠而成,也可以两种预浸料混用,如:表层使用织物预浸料,内部根据受力要求采用单向预浸料按一定的铺层方式铺叠。铺叠完成后,装入

金属阴模,在压机上加温、加压固化,模具温度降至一定温度后,脱模即得到复合材料接头。

#### b. 铺层-热压罐工艺

铺层-热压罐工艺与铺层-模压工艺的唯一区别是加压方式不同:铺层-热压罐工艺的加压方法是使用热压罐均匀地从各个方向施加外压;铺层-模压工艺是将模具放在压机的上、下压板之间,依靠液压装置在上、下方向加压。

#### c. 缠绕-热压罐工艺

按照设计的线型,依靠数控缠绕机将浸胶的纤维束缠绕到在芯模表面,缠绕完毕,放入烘箱或热压罐中固化成型。

复杂结构接头的缠绕对硬件和软件的要求均较高,需要四轴或四轴以上的缠绕机并配备相应的缠绕软件才能实现。

#### d. 自动铺丝工艺

借助机械臂头端的铺丝头将预浸纤维丝束直接压在芯模表面,不需要控制纤维张力,可实现纤维铺放、压实、丝束切断和局部加厚、铺层递减等功能。在纤维丝束的铺放过程中,设备对制品加压、加温,当自动铺丝机按照既定的线型铺丝结束时,接头就固化成型了。

这种工艺方法的自动化程度高,但同时对设备的要求也很高,自动铺丝机需要六轴以上的自由度。

#### e. 三维编织-RTM 工艺

利用三维编织技术将纤维织造成所需形状的、干态的接头预制件,然后将预制件装入密闭的模具,利用树脂注射设备(RTM 设备)将液态的、低粘度的树脂注入模腔,当树脂将接头预制件浸透后,封闭模具,按照树脂的固化制度升温固化。当模具温度降至一定温度后,脱模即得到复合材料接头。图 3 是采用三维编织-RTM 工艺研制的碳纤维复合材料接头,已应用于某系列卫星远地点发动机支架。



图 3 三维编织-RTM 工艺接头

#### f. 三维机织-RTM 工艺

接头预制件是采用三维机织技术织造的整体结构,成型工艺同上,为 RTM 工艺。图 4 是采用三维

机织-RTM 工艺制造的芳纶纤维复合材料接头, 已应用于中欧合作 XX 卫星的天线支架。



图4 三维机织-RTM 工艺接头

#### g. 缝合-RTM 工艺

采用干态的二维织物一层层地铺叠, 并用缝纫线缝合在一起, 成为三维结构的接头预制件, 然后利用 RTM 工艺固化成型。图 5 是采用缝合-RTM 工艺制造的碳纤维复合材料接头, 已应用于某资源勘察卫星的星敏支架。



图5 缝合-RTM 工艺接头

#### h. 热胀软模工艺

热胀软模工艺类似于铺层-热压罐工艺, 也是使用织物预浸料或单向预浸料一层层地铺叠而成, 但是芯模不是采用金属材料, 而是采用线膨胀系数很大的材料, 如: 橡胶、聚四氟乙烯或其它非金属材料; 外模采用金属材料, 以保持接头的外形尺寸。固化时, 将模具放入烘箱, 随着温度的升高, 依靠芯模膨胀产生的压力实现加压。

#### 2.2.3 小结

按照纤维预制件是二维结构还是三维结构可将以上 8 种制造工艺分为两类, 其中属于二维结构接头的制造工艺包括: 铺层-模压工艺、铺层-热压罐工艺、缠绕-热压罐工艺、自动铺丝工艺、热胀软模工艺; 属于三维结构接头的制造工艺包括: 三维编织-RTM 工艺、三维机织-RTM 工艺、缝合-RTM 工艺。二维结构是指纤维只分布在面内, 层间无纤维连接, 层与层之间只是依靠树脂粘合在一起, 属于层合结构。而三维结构是指利用纺织技术使纤维相互交织或交叉,

并且沿多个方向取向, 不但在平面内取向, 而且沿平面间取向, 即沿厚度方向取向, 从而形成一个不分层的整体结构。相对于二维结构接头, 三维结构接头的抗冲击性好、损伤容限高、尺寸稳定、结构的整体性高。

### 3 桁架杆件

#### 3.1 设计

桁架结构中的杆件主要承受轴向载荷。对于承拉杆件, 只要使设计应力等于或小于材料的屈服或极限应力, 即只要提供足够的横截面积保证杆件不破坏就可满足要求。然而对于承压杆件, 还要考虑稳定性, 必须选择截面使杆件保持稳定。

承拉杆件的铺层设计应将大部分纤维沿杆件轴向, 即载荷作用的方向 ( $0^\circ$ ) 铺设, 同时应有约 10% 的  $90^\circ$  层。

承压杆件受轴向压缩载荷作用, 增强纤维应主要沿杆件的轴向 ( $0^\circ$ ) 铺设, 以充分发挥纤维的性能, 这样可以得到较高的总体临界屈曲应力。在设计中还应考虑杆件的局部屈曲性能。因此, 沿杆件周向应铺设  $90^\circ$  层和  $\pm 45^\circ$  层, 以提高局部承压刚度和承扭刚度。一般来说,  $\pm 45^\circ$  层除提供扭转刚度外, 在提高临界屈曲应力方面比  $90^\circ$  层更见效。

#### 3.2 制造

##### 3.2.1 材料

与桁架接头相同, 桁架杆件的增强材料通常选用碳纤维或芳纶纤维。如果选用碳纤维, 并且要求桁架结构的刚度高、尺寸稳定性好、基频高, 则选用高模系列碳纤维 (也称为石墨纤维); 若只要求桁架结构的强度高, 对其它性能无特殊要求, 则选用高强系列碳纤维。

根据力学性能、使用温度和损伤容限等要求, 桁架杆件的树脂基体可选择环氧、双马、酚醛、氰酸酯等树脂体系。

##### 3.2.2 工艺

目前复合材料杆件的制造工艺主要包括: 纤维缠绕、预浸带缠绕、拉挤成型、2D (3D) 编织-RTM 和手糊成型等。

###### a. 缠绕工艺

纤维缠绕工艺的要点是连续纤维纱束浸渍树脂后, 在张力控制下按预定路径精确地缠绕在转动的模芯上, 按一定的规范固化, 固化后脱模。缠绕线型可

分为极向缠绕、螺旋缠绕和周向缠绕三种类型。按工艺方法,纤维缠绕可分为干法缠绕、湿法缠绕和预浸湿法缠绕三种。

预浸带缠绕工艺是纤维缠绕的衍生工艺。工艺过程是:在缠绕前先将纤维浸胶制成预浸带,使用时将预浸带加热软化后直接缠绕在芯模上固化成形。优点是固化压力较低,部件的缠绕和固化同时完成。

图6是湿法缠绕工艺制造的碳纤维复合材料圆杆和方杆。



图6 圆杆和方杆

#### b. 拉挤成型工艺

拉挤成型是一种自动化连续生产复合材料杆件的工艺方法,它是将连续的增强纤维进行浸渍后,牵引经过成型模具,在模具内固化为规定形状,脱模后成为最终制品的加工方法。

#### c. 2D(3D)编织-RTM工艺

2D(3D)编织-RTM成型的工艺过程是,首先采用二维编织(三维编织)技术织造杆件的纤维预制件,然后装模,利用树脂注射设备将低粘度的液态树脂注入密闭的模具内,直至整个模腔内的纤维预制件被完全浸润,最后固化成型、脱模。

#### d. 手糊成型工艺

手糊成型是在涂好脱模剂的杆件模具上,手工铺设织物的同时涂刷树脂,直到所需厚度为止,然后经过固化、脱模而制得复合材料杆件。

### 3.2.3 小结

在以上4种桁架杆件的制造工艺中,使用最广泛的是缠绕工艺,这种方法的生产效率高、质量稳定、自动化程度高;拉挤成型工艺生产的杆件,纤维主要分布在轴向,一般用于民用产品,适于大批量生产;2D(3D)编织-RTM工艺用于对杆件力学性能有较高要求的场合;当要求杆件抗层间剪切、抗弯曲性能好时,采用3D编织-RTM工艺;手糊成型工艺的生产效率较低,质量稳定性较差,适用于价格低廉、力学性能不作要求的小批量生产。另外,这4种工艺制造的杆件,除了3D编织-RTM工艺制造的杆件外,都

属于二维结构。

## 4 复合材料桁架结构的工程产品

近年来,复合材料桁架结构作为航天器结构的一种重要形式在航天领域得到了愈来愈广泛的应用,中国空间技术研究院设计、研制了多种桁架结构的工程产品,下面介绍几种有代表性的桁架结构:作为高精度刚性支撑结构的XX卫星天线支架,如图7所示;作为空间可展开结构和机构的卫星太阳翼连接架,如图8所示;作为大跨度刚性连接结构的60m天线支撑臂,如图9所示。



图7 卫星天线支架 图8 卫星太阳翼连接架



图9 60m天线支撑臂

## 5 结束语

以上工程产品均是已通过飞行验证或地面验证的航天器复合材料桁架结构。由于桁架结构具有优异的空间性能,未来5~10年内,还将应用于长度14m的载人三期空间站的骨架结构、高度4m的深空太阳天文望远镜构架和长度200m的临近空间飞艇的龙骨结构等。

### 参考文献

- 1 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, 24(4): 44~48
- 2 赵渠森. 先进复合材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 1280~1293
- 3 鞠苏, 曾竟成, 江大志, 等. 复合材料桁架接头研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(12): 28~31

