

空间相机桁架杆接头结构研究

田富湘, 何 欣, 张 凯

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 在大跨度空间结构中广泛应用的桁架结构在大尺寸空间相机主支撑结构中的应用越来越多。桁架杆与安装光学元件的框架之间的连接接头是桁架式主支撑结构的重要组成部分之一。综合比较了桁架杆接头的几种常用结构形式, 结合复合材料零件与金属零件的3种连接方式, 提出了一种一端与桁架杆胶接、另一端与框架螺钉连接的桁架杆接头。该桁架杆接头设计有十字柔性铰链环节, 减小了桁架杆所承受次应力, 更充分发挥了桁架杆的材料强度。

关键词: 空间相机; 主支撑结构; 桁架杆接头; 胶接; 铰接; 次应力

中图分类号: V447.3

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112808.0051

Truss Rod-connector of Space Camera

TIAN Fu-xiang, HE Xin, ZHANG Kai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: The truss structures, which were used widely in the long-span spatial structures, were applied more and more in the main supporting structures of the space cameras. The connectors of the truss rod and the frames which were used to mount the optical components were important parts of the truss structures. Compared several common structures of the truss rod-connector and the three methods to connect the composite material parts with the metal parts, a truss rod-connector was developed, which one end adhered to the truss rod and the other end connected with the frames by bolts. A cross flexible hinge was designed in the truss rod-connector to reduce the secondary stress, fully impose the material strength of the truss rod.

Keywords: space camera; main supporting structure; truss rod-connector; adhesive bonding; hinged; secondary stress

1 引言

近年来,空间对地遥感领域朝着大视场、高分辨率方向迅速发展,大口径、长焦距的大尺寸空间相机越来越多地被人们所研究。空间相机主支撑结构是相机光学系统的载体,需要为各成像光学元件相对位置的长期稳定准确提供有力保证。空间相机体积增大,其主支撑结构的设计难度也随之增大。传统空间相机主支撑结构大多数采用整体式箱型结构,该结构采用加强筋和薄壁组合整体铸造成型,结构型式和设计方法都比较成熟,稳定性好。但对于具有大视场、高分辨率的大尺寸空间相机来说,主支撑结构采用整体式箱型结构实现的难度很大。一方面,现有航天材料的铸造技术还不能或很难铸造如此大尺寸的零件;另一方面,整体式箱型结构的轻量化程度较低,不太适合应用在有高轻量化程度要求的大尺寸空间相机中。而被广泛应用于大跨度空间结构中的桁架结构比较适合作为大尺寸空间相机的主支撑结构,该结构的设计思想符合变弯曲应力为拉压应力的结构优化设计原则,充分发挥了材料的强度,结构比刚度高,轻量化程度高。美国哈勃太空望远镜^[1]、法国 spot 系列空间相机^[2]等均采用此类结构。随着大口径、长焦距空间相机的迅速发展,桁架结构在空间相机主支撑结构中的应用将越来越多。

桁架结构作为空间相机的主支撑结构,主要用于装载各光学元件并保证其相对位置,如图1所示,为离轴三反(TMA)空间相机的桁架式主支撑结构简图。该结构主要由3部分组成:前后框架、桁架杆、桁架杆接头。前后框架用于安装各光学元件,一般为薄壁加强筋组成的金属框。桁架杆通常为管状杆件,一般采用低热膨胀系数、高比刚度的复合材料。桁架杆接头实现桁架杆与前后框架的连接。目前,相关文献主要对空间相机桁架式主支撑结构的整体结构布局的优化设计等方面进行了研究^[3],关于桁架杆接头方面的研究还比较少。实际上,桁

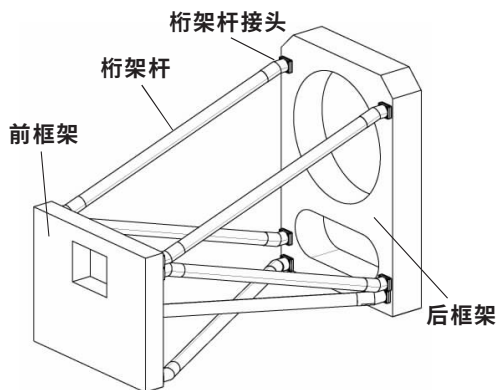


图1 桁架式主支撑结构

架杆接头也是桁架结构的重要组成环节之一。通常桁架杆接头的受力较复杂,存在较集中的弯矩和剪力,是保证桁架式主支撑结构刚度和强度的重要部位^[4]。另外,桁架杆与框架连接接头的设计还涉及到两方面难题:一方面,桁架杆与框架的连接属于复合材料与金属材料的连接问题,已经有很多研究人员对此做了深入研究,但在像空间相机这样的航天精密光学仪器上应用的相关资料还较少;另一方面,理想的桁架结构桁架杆两端是通过球铰链与其他零件相连,桁架杆为纯二力杆,只受轴向力,可充分发挥桁架杆材料的强度。但在实际应用中,往往不容易做到完全的球铰接,甚至直接采用刚性连接,这样桁架杆不仅要承受轴向力,还不可避免地要承受弯矩和剪力,弯矩和剪力所产生的应力即所谓的次应力^[5]。次应力的引入使得桁架杆同一横截面上的应力分布不均,不能同时达到材料的最大强度,材料未得到充分利用。因此,桁架杆接头设计时还需考虑如何减小桁架杆所承受的次应力。

本文综合分析了复合材料零件与金属材料零件的各种连接方式,总结了桁架杆接头的各种类型,在保证桁架杆接头具有足够强度的前提下,选择合适的复合材料零件与金属材料零件的连接方式,设计一个能减小桁架杆所承受的次应力、更充分发挥桁架结构优势的桁架杆接头。

2 复合材料与金属材料的连接

与金属结构相比,复合材料的连接部位是结构

的薄弱环节, 复合材料有 70%以上的破坏都发生在连接部位^[6]。因此, 解决复合材料的连接问题具有重要意义。复合材料零件与金属材料零件的连接方式主要有 3 种: 机械连接法, 胶接, 混合连接^[7]。

机械连接法能传递大载荷, 可拆卸, 但机械连接难免在复合材料零件上钻孔, 钻孔和安装过程中易使孔周围产生分层和掉渣等缺陷, 影响连接强度。另外, 复合材料各向异性显著, 开孔引起应力集中更高。

胶接法能保持复合材料构件材料的连续性, 传递效率高, 结构重量轻, 抗疲劳性能好, 但胶接质量控制比较困难, 胶接性能受环境(湿度、温度、腐蚀介质)影响大, 存在一定老化问题, 胶接后不可拆卸, 传递载荷较小。不过, 随着胶接工艺技术的发展, 胶接传递载荷也在不断增大。

混合连接将胶接与机械连接结合起来, 主要应用于胶接连接的维修, 改善胶接的抗剥离性能, 提高结构的破损-安全特性等场合^[7]。

3 桁架杆接头的结构形式

桁架杆与金属框架的连接方式对相机主支撑结构的力学性能影响很大。在实际工程应用中, 由于桁架杆接头不能做到理想的球铰接, 桁架杆不可避免地存在次应力, 未能充分发挥桁架杆的强度。因此, 选择合理的连接方式, 减小桁架杆接头弯矩和剪力的传递, 对充分发挥桁架结构的优势、减轻相机主支撑结构重量意义重大。

通常桁架杆的连接方式有刚性连接和铰接。在建筑等领域, 为减少结构复杂程度, 经常采用更简单、经济、可靠的刚性连接。刚性连接主要有螺钉连接、焊接、胶接等。刚性连接不仅传递轴向力, 还传递弯矩和剪力。这样, 桁架杆不仅承受轴向力, 还承受次应力。次应力的引入降低了桁架杆所能承受的最大轴向力, 影响了桁架结构的刚度。因此, 本文着重介绍采用铰接方式实现的桁架杆接头的结构形式。

铰接主要有以下几种实现方式:

(1) 球轴承。可实现真正意义上的铰接, 但轴承精度要求高, 结构比较复杂, 质量大, 价格昂贵, 还需防冷焊处理, 应用较少^[4]。

(2) 平面铰链。平面铰链一般为销轴结构, 结构简单, 容易实现, 应用较多。

(3) 柔性铰链。柔性铰链接头是局部削弱接头处的结构刚度, 使其释放所需的自由度, 减少弯矩和剪力的传递, 并保持轴向刚度。常见的柔性接头有十字铰链柔性接头[如图 2(b)], 细颈柔性接头[如图 2(c)], 前者释放两个弯曲自由度, 能减少弯矩的传递; 后者释放两个弯曲自由度和一个扭转自由度, 能减少弯矩和剪力的传递。

(4) 平面铰链与柔性铰链混合使用。一个方向的弯曲自由度通过平面铰链释放, 另一个方向弯曲自由度的释放通过柔性铰链实现, 如图 2(d)所示。

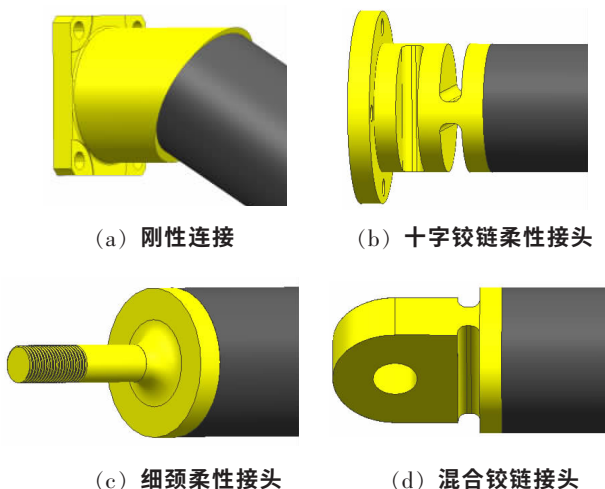


图2 常用桁架杆接头的结构形式

4 桁架杆接头的设计

本文以图 1 所示的空间相机桁架式主支撑结构为例, 设计该桁架结构的桁架杆接头。该桁架结构的桁架杆为碳纤维增强环氧树脂基复合材料管件, 前后框架采用钛合金铸造成型。

桁架杆连接接头在桁架结构中受到的载荷比较复杂, 存在较集中的弯矩和剪力, 且结构外形一般

比较不规则。因此,接头材料一般选择强度高、机加性能好的金属材料。综合比较复合材料与金属件的3种连接方式,考虑到空间相机主支撑结构对高刚度、轻重量、高可靠性、高稳定性的要求,选择胶接来实现金属接头与桁架杆的连接。这样可以避免机械连接法制孔引起的应力集中及对桁架杆强度的削弱,且能使结构减重5%~25%。碳纤维复合材料与金属材料胶接时,为防止电位腐蚀,需选择电位与之接近的金属材料。另外,由于碳纤维复合材料热胀系数小,为防止温度变化产生较大内应力,与其胶接的金属件的热胀系数需与桁架杆材料相匹配。综合考虑以上两因素,选择钛合金作为桁架杆接头的材料。关于胶接接头的详细设计及其胶接工艺,文献[8]已经做了深入研究,在此不再赘述。

为减小桁架杆所受的次应力,充分利用碳纤维复合材料桁架杆的材料强度,本文所研究的桁架杆与框架的连接将采用铰接方式。球铰链和平面铰链一般都采用间隙配合,对加工和装配要求较高,间隙不容易控制,容易影响相机主支撑结构的稳定性。而柔性铰链可整体设计加工,无需装配,结构简单,体积质量较小,无间隙和摩擦,与球铰链和平面铰链相比,具有无可比拟的优势。因此,本文采用柔性设计技术来实现。如上所述,常见柔性接头有十字铰链柔性接头和细颈柔性接头。从释放的自由度上看,前者比后者少释放1个绕轴向扭转的自由度,但当两者所能承受的轴向力一致时,即柔性处横截面积相等时,前者比后者传递的弯矩小。由于桁架式空间相机主支撑结构的桁架杆受剪切力的机会较小,因此,本文所研究的桁架杆与框架的连接采用十字铰链柔性接头形式。

最终设计的桁架杆接头的结构形式如图3(a)所示,该桁架杆接头由3部分组成:胶接部分、十字柔性铰链部分和法兰盘部分。胶接部分实现接头与碳纤维桁架杆的连接;十字柔性铰链用于减少接头传递的弯矩;接头通过法兰盘与前后框架螺钉连接。设计该接头时,应注意图3(b)所示3个参数的

选择,分别为接头总长 $L1$ 、胶接长度 $L2$ 及柔性环节处的宽度 $L3$ 。其中,胶接长度 $L2$ 的选取可参考文献[8]。

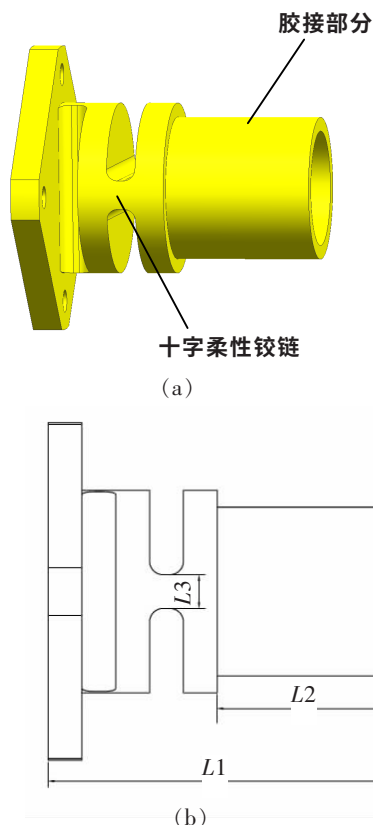


图3 桁架杆接头: (a) 桁架杆接头三维造型; (b) 桁架杆接头重要参数。

接头总长度 $L1$ 的确定主要从消热设计角度出发,考虑到碳纤维增强环氧树脂基复合材料桁架杆的热胀系数可设计为负,可通过选取适当的接头长度,使整根桁架杆的热膨胀系数为0或接近0。这样,空间相机各成像光学元件的间隔受温度影响就比较小。接头总长度 $L1$ 可通过下式计算得到:

$$L1 = -L\alpha_2/2\alpha_1 \quad (1)$$

其中, α_1 、 α_2 分别为接头和桁架杆的热膨胀系数, L 为碳纤维杆的长度。

根据结构设计的等应力准则,柔性环节处宽度 $L3$ 的选取应根据桁架杆所需承受的额定轴向力 F 来确定。假设接头和桁架杆的弹性模量分别为 E_1 、 E_2 ,接头柔性处的横截面积为 A_1 ,桁架杆横截面积

为 A_2 。则

$$E_1 A_1 = E_2 A_2 = F \quad (2)$$

L3 可根据上式所得柔性处得横截面积 A_1 计算得到。

另外, 由于接头还承受较大的弯矩和剪力, 因此, 宽度值应比以上计算值稍大。

5 结 论

本文综合分析比较了复合材料与金属材料的

3 种连接方式, 选择不需要在复合材料构件制孔的胶接方式将钛合金接头镶嵌在复合材料桁架杆两端。为减小桁架杆所受次应力, 在桁架杆接头上设计了一个十字柔性铰链环节, 减少弯矩的传递, 充分利用桁架杆的材料强度, 发挥桁架结构的优势, 理论上可减轻桁架式主支撑结构的重量。该接头对整个桁架式主支撑结构的影响还有待通过工程分析和试验进一步深入研究。

参考文献

- [1] Yoder P R, Jr. *Opto-mechanical Systems Design*[M]. Washington: SPIE Press, 2005.
- [2] Gueguen F, Bettés A, Toulemont Y, *et al.* SPOT series camera improvement for the HRG, very high resolution instrument of SPOT 5[C]. *EUROPTO Conference on Design and Engineering of Optical Systems. Berlin: SPIE*, 1999: 301-312.
- [3] 张雷, 贾学志. 大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(3): 603-608.
- [4] 范斌, 王艳. 国外长焦距高分辨率遥感相机桁架结构研究[J]. *航天返回与遥感*, 2009, 29(2): 35-41.
- [5] 刘浩. 钢管桁架次应力分析[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2007.
- [6] 郭金树. 复合材料件可制造性技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009: 172-185.
- [7] 汪裕炳, 张全纯. 复合材料的结构连接[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [8] 张凯, 何欣, 崔永鹏. 空间相机机身桁架结构装配技术[J]. *激光与红外*, 2010, 40(3): 293-297.

作者简介: 田富湘(1983-), 男, 福建大田人, 研究实习员, 2009年于东南大学获得硕士学位, 主要从事空间光学仪器结构设计方面研究。E-mail: tian.fuxiang@qq.com