

文章编号: 1672-8785(2013)10-0010-05

空间遥感相机桁架机身接头结构的设计和分析

张 凯 何 欣 赵海平

(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: 大型空间相机需要使用力学特性强、质量轻以及体积小的机身结构对光学系统和其他系统进行支撑与固定, 以保证镜头的成像质量。分析了铰链连接和螺栓连接-胶接方案的特点, 并对比了各方案的力学性能。根据支杆材料和机身框架材料的性能, 优先选择钛合金作为连接结构的制作材料。考虑到复合材料制造工艺的复杂性以及胶接的高强度和高刚度要求, 制定了合理的胶接工艺以避免和控制胶接所产生的应力。最后通过静/动力学试验验证了接头设计方案的有效性。结果表明, 螺栓-胶接设计方案是一种优化、合理的设计方案。

关键词: 空间相机; 桁架结构; 接头结构; 力学试验

中图分类号: TH745; V19 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.10.003

Design and Analysis of Joints for Truss Structure of Space Camera

ZHANG Kai, HE Xin, ZHAO Hai-ping

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

Abstract: To ensure imaging quality, the optical and other subsystems of a large space camera need to be supported and fixed by using a structure with good mechanical property, low weight and small volume. The features of a hinge joint and a bolt-glue joint are analyzed and both joints are compared with each other in mechanical property. According to the performance of rod material and frame material used, the titanium alloy is selected as the material for joints. In view of the complexity of composite manufacturing processes and the high strength and stiffness requirements of bonding, a reasonable bonding process which can avoid and control the stress generated during bonding is established. Finally, the effectiveness of this joint design is verified in static and dynamic mechanical tests. The test results show that this bolt-glue joint design is an optimized and reasonable one.

Key words: space camera; truss structure; joint design; mechanical test

0 引言

空间光学相机采用光学成像手段对目标进

行遥感观测和探测, 主要应用于气象、资源、海洋遥感和军事等领域。在保证空间分辨率、地面覆盖宽度和定位精度要求的前提下, 现代高分

收稿日期: 2013-09-04

作者简介: 张凯 (1981-), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事机械结构设计、机械制造以及系统装调等方面的研究。E-mail: zhangkaihai@sohu.com

分辨率可见光相机还需满足热控、质量和体积等总体设计要求^[1]。为了保证相机结构具有高的静动态特性以满足发射阶段和空间工作中的复杂力学环境,相机的主体机械结构通常采用比刚度高的铝合金、镁合金、钛合金和碳纤维复合材料^[2]。目前,在大中型空间相机的结构设计中,国际上普遍采用桁架型结构方案,如哈勃望远镜和KH-12等。桁架结构的优点主要包括比刚度、重量轻、通用性好、空间利用率高以及适合轻量化程度要求较高的空间光学系统。桁架型结构方案一般都采用高度很高的合金基础件。这些基础件不但需要采用由合金或复合材料制成的支杆支撑和固定,同时还需要满足总体结构的刚度和质量要求^[3-4]。

本文对某高分辨率可见光相机的结构进行研究。该相机的主体机械结构用碳纤维支杆对前后金属框架进行支撑和固定。由于碳纤维复合材料无法直接承载集中、高强载荷,碳纤维支杆不能直接与金属框架紧固连接。因此需要用接头作为中间连接环节。由于接头的合适与否会直接影响相机主体结构的静动态特性和精度性能,本文主要对接头的设计和连接方式进行探讨,并通过力学分析和计算寻找合理的材料、结构方式和安装工艺。

1 接头的连接方式

图1所示为某空间相机的机身结构以及坐标定义。该相机通过用8根碳纤维支杆连接2个钛合金框架来形成机身桁架结构。根据碳纤维支杆的几何参数,碳纤维支杆共有3种,组成4个三角形结构。支杆与框架之间存在一定的连接角度,因此需要用一种接头来承担有角度的金属件与非金属件的连接。该接头的结构必须具有足够大的连接强度和刚度,而且只能产生较小的连接应力,以保证机身结构的精度和稳定性。



图1 机身结构及坐标定义

在机械设计中,常用的连接方式有铰链连接、螺纹连接、胶接和焊接等方式。其中,焊接方式会产生较大的残余应力,不宜在后期精密装配时采用。而且焊接温度过高,会导致碳纤维复合材料的本体胶失效,所以不予采用^[6]。下面结合相机特点,分析铰链连接、螺栓连接以及胶接方案的可行性。

1.1 铰链结构

铰链连接属于间隙连接,是一种非全约束连接方式。它可通过不同的连接方式实现不同的结构自由度。铰链连接具有以下优点:

- (1) 承载能力强,具有较高的阻尼特性,可以使振动衰减。
- (2) 可产生运动,能适应设计误差,便于装配。
- (3) 碳纤维支杆的受力状态简单,便于分析、计算以及碳纤维铺层的设计。尤其在使用球铰连接时,支杆处于二力杆状态,只承受拉压载荷,而不承受弯曲和扭转载荷,可提高承载能力。

图2所示为铰链连接的主要形式。

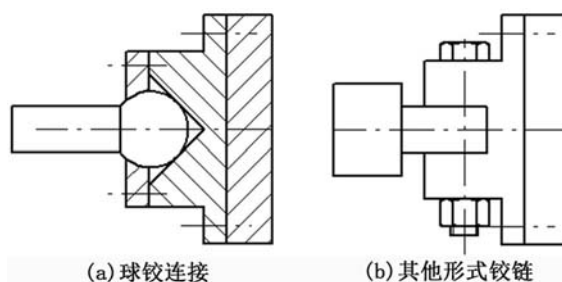


图2 不同铰链连接形式的示意图

铰链连接具有以下缺点:

(1) 只有使用球铰链支杆才为二力杆, 其余铰链结构支杆仍有少量的弯曲和扭转力矩存在。

(2) 铰链结构不是连续体, 零件较多, 加工复杂, 精度要求高。

(3) 铰链连接存在的间隙是造成桁架结构产生非线性特性的重要根源, 会降低机身结构的精度和稳定性。

(4) 每个运动件的表面均需进行防冷焊处理, 既会增加成本, 又会降低可靠性。

(5) 铰链连接具有自由度。机身结构在受力时, 部分支杆不分担载荷, 其余支杆受力较大, 易产生破坏。

采用球铰连接的机身结构。在承载 X 向量级为 T 的载荷时, 只有 4 根侧支杆受力, 其余 4 根支杆在 X 方向上存在自由度, 只有在变形较大时才会承载载荷。决定支杆受力大小的参数主要是连接角度。3 种支杆的角度分别为 60° 、 72° 和 79° 。经计算, 侧支杆的受力大小为

$$F_s = \frac{T}{4 \cos 72^\circ} = 0.81T \quad (1)$$

在承载 Y 向载荷时, 同样只有上、下 4 根支杆受力, 其受力大小分别为

$$F_u = \frac{T}{4 \cos 79^\circ} = 1.31T \quad (2)$$

$$F_d = \frac{T}{4 \cos 60^\circ} = 0.5T \quad (3)$$

在承载 Z 向载荷时, 8 根支杆都受力, 支杆受力处于最佳状态。经计算, 受力最大的是下支杆:

$$F_d = \frac{T}{8 \cos 60^\circ} = 0.144T \quad (4)$$

1.2 全约束连接

螺栓连接和胶接都属于全约束连接。其中, 被连接件之间不存在间隙, 不会产生相对运动, 如图 3 所示。

为了有效利用两种全约束连接的优点, 考虑到不同的材料特性, 采用胶接与螺栓连接配合使用的方案。当接头采用上述全约束连接方

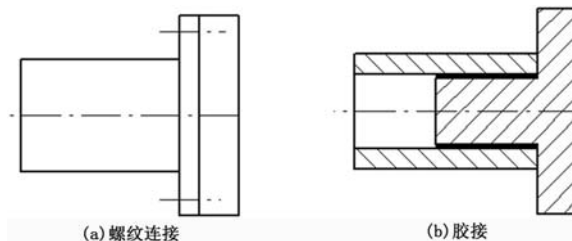


图 3 螺栓连接和胶接的示意图

案时, 支杆为横梁结构。横梁结构具有以下优点:

- (1) 结构简单, 加工方便;
- (2) 连接强度高, 疲劳强度高, 抗冲击性能好;
- (3) 胶层有阻尼特性, 减振效果好;
- (4) 应力分布均匀, 不易造成应力集中, 结构稳定性高;
- (5) 机身结构在受力时, 所有支杆都按比例分担载荷, 机身结构的受力状态好。

横梁结构的缺点主要是支杆的受力状态比较复杂, 既承受拉压载荷又承受弯曲和扭转载荷, 容易使应力集中, 不利于工程分析和计算。

采用全约束连接的机身结构在承载任何方向上的载荷时, 8 根支杆都承受弯曲载荷。除了角度因素之外, 支杆长度也会影响受力大小。3 种支杆的长度分别为 1.25 m、1.28 m 和 1.4 m。在承载 X 向量级为 T 的载荷时, 支杆的受力大小为

$$M_u = \frac{TL}{8} = 0.15T \quad (5)$$

$$M_s = \frac{TL \sin \alpha}{8} = \frac{1.28T \sin 72^\circ}{8} = 0.15T \quad (6)$$

$$M_d = \frac{TL}{8} = 0.17T \quad (7)$$

在承载 Y 向量级为 T 的载荷时, 支杆的受力大小为

$$M_u = \frac{TL \sin \alpha}{8} = \frac{1.25T \sin 79^\circ}{8} = 0.15T \quad (8)$$

$$M_s = \frac{TL}{8} = 0.16T \quad (9)$$

$$M_d = \frac{TL \sin \alpha}{8} = \frac{1.4T \sin 60^\circ}{8} = 0.15T \quad (10)$$

在承载 Z 向量级为 T 的载荷时, 受力最大的是下支杆:

$$M_d = \frac{TL \cos \alpha}{8} = \frac{TL \cos 60^\circ}{8} = 0.09T \quad (11)$$

通过对比铰链连接和全约束连接这两种方案可以得到: 在铰链连接中, 支杆的最大受力为 $0.8T$; 在全约束连接中, 支杆的最大受力为 $0.17T$, 而且此方案中支杆受力更加均匀。综合考虑几种连接方式的不同特点, 为了保证机身结构稳定、可靠, 本相机结构采用全约束连接方案作为接头的连接形式, 即接头的一端与支杆胶接, 另一端与框架螺纹紧固连接。图4所示为接头结构的初步设计形式。

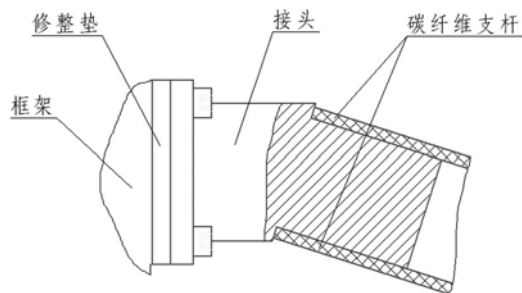


图4 全约束连接

2 接头的材料选择

金属与复合材料之间存在电位差, 两者接触后会产生电偶腐蚀, 使连接处遭到破坏。碳纤维结构件常用的接头材料有铝合金、钛合金和铁镍合金等。因为上述几种金属材料与复合材料之间的电位差较小, 所以不易发生腐蚀现象。

铝合金的线胀系数为 $23 \times 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$, 与碳纤维支杆的线胀系数 (设计值为 $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$) 不匹配。这在温度发生变化的情况下会产生较大的热应力。而且铝合金的弹性模量低 (为 70 GPa), 因此如果主要承力结构采用铝合金材料制作, 其安全裕度相对较低。

铁镍合金的线胀系数为 $11 \times 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$, 弹性模量为 210 GPa , 但是其密度为 7.8 g/mm^3 。由于空间相机对重量要求极为严格, 所以并不采用铁镍合金材料。

钛合金材料是空间相机结构中广泛使用的一种材料。当被用作连接材料时, 钛合金材料主要具有以下优点:

- (1) 与碳纤维材料之间具有良好的粘接性;
- (2) 密度为 4.4 g/mm^3 , 弹性模量为 110 GPa , 比刚度高, 能承受较大载荷;
- (3) 线胀系数为 $8 \times 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$, 最接近于碳纤维复合材料, 而且与钛合金框架具有相同的热特性, 与框架之间不会产生热应力。

所以, 可选用钛合金作为支杆接头的制造材料。

3 接头的胶接工艺

胶接接头中的应力是影响胶接强度和耐久性的重要因素之一。应力主要有两个来源: 胶粘剂固化过程中由于体积收缩而产生的收缩应力; 由于胶粘剂和被粘物的热膨胀系数不同在温度变化时会产生热应力。

收缩应力的控制方法主要是选用固化收缩率较小的胶粘剂 [7]。

热应力的控制方法主要是采用可室温固化的胶粘剂, 以免产生大范围的温度变化。

由于将支杆设计成圆管结构可以避免碳纤维缠绕, 采用套接形式进行粘接。套接形式在胶层厚度方向上的固化收缩受阻不仅会在粘接面内产生剪切应力, 而且还会在胶层厚度方向上产生拉应力。另外, 套接形式固化时无法进行加压, 所以必须选用能够在常压下完全固化的粘接剂。

在装配时选用环氧胶。这样做具有以下优点: 粘接强度高, 环氧基能与金属表面形成的化学键可以增大结合力; 收缩率低; 几乎不会释放可凝性挥发物; 室温下接触压力即可完全固化; 使用温度范围宽, 适应性强, 毒性小。

胶接是一种界面行为。表面处理会直接决定界面的理化状态, 所以表面处理是胶接工艺中的一个重要环节。在粘接接头时, 必须对其表面进行喷砂处理。对于碳纤维支杆的表面, 则必须进行机械打磨处理。

每种胶粘剂都有其自身特定的胶层厚度范围。在该范围内,胶层具有较好的力学性能;超出该范围后,其力学性能就会明显下降。在粘接接头时,必须采用合适的工艺来控制胶层厚度。

4 接头设计的试验验证

为了验证支杆接头的设计是否合理,强度和刚度是否满足要求以及粘接环节是否具有足够大的安全系数,我们对装配后的相机机身进行了静力学和动力学试验。

试验验证方法是,在接头与支杆的连接处的钛合金表面上粘贴应变片,测量试验中的应变变量,并通过公式 $P = E\varepsilon$ 计算应力值和安全系数。其中, E 为钛合金的弹性模量 (114 GPa), 粘接剂的拉剪强度为 20 MPa。

4.1 静力学试验

在静力学试验中,分别在机身的各个方向上加载 1000 N 大小的拉力。所采集到的各向应变图形见图 5。

表 1 列出了静力学试验的应变变量、应力值和安全系数。由此可知,该接头在满足相机的静力学条件下是安全、可靠的。

4.2 动力学试验

在动力学试验中,对机身加载 4 g 加速度的

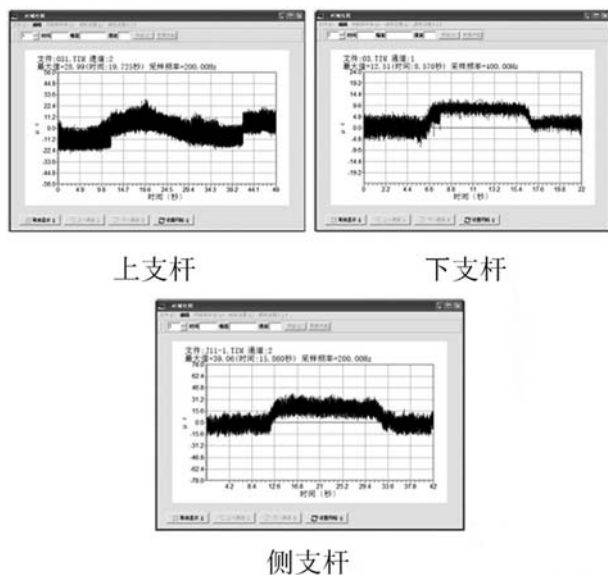


图 5 静态加载试验的应变图

表 1 静态测试数值

	应变 (μm)	应力 (MPa)	安全系数
下支杆	25	2.85	7
侧支杆	39	4.45	4.5
上支杆	28	3.19	6.2

正弦激励,进行振动测试,所采集到的应变图形见图 6。

振动过程中接头处的应变变量、应力值和安全系数见表 2。由此可知,该接头在满足相机的动力学条件下也是安全、可靠的。

5 结束语

本文针对某高分辨率可见光相机的桁架结构形式,从静力学和动力学的角度研究了碳纤维支杆与钛合金框架之间的连接接头。

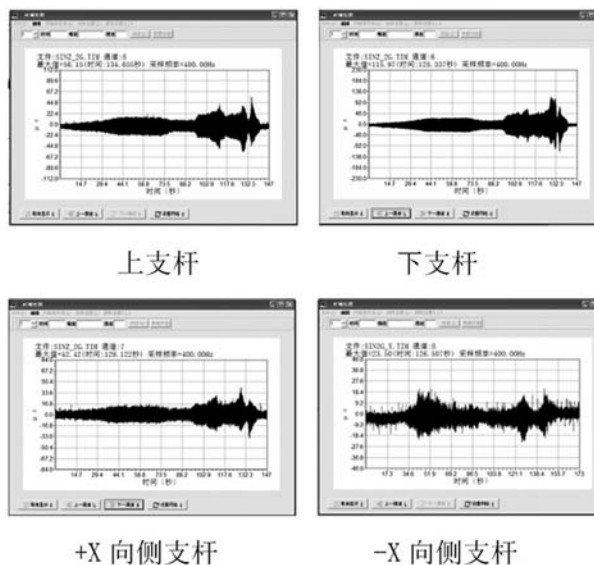


图 6 4g 正弦振动应变图

表 2 动态测试数值

	应变 (μm)	应力 (MPa)	安全系数
上支杆	43.95	5	4
+X 向侧支杆	26.25	3	7
-X 向侧支杆	69.63	8	2.5
下支杆	50.30	5.7	3.5

通过分析不同连接方式的特点以及静态承载能力,选择了螺栓连接和胶接相结合的全约

束连接形式,并选用线胀系数小、比刚度高的钛合金作为接头的制作材料。通过分析和制定粘接环节,选择环氧胶作为粘接剂,并设计了粘接工艺。最后通过静力学和动力学试验,验证了该接头的有效性。

参考文献

- [1] 陈世平,杨秉新,王怀义. 空间相机设计与试验 [M]. 北京:中国宇航出版社,2009.
- [2] 苗健宇,张立平,吴清文. 测绘相机光学镜筒设计,

加工及装配 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1649-1653.

- [3] 李威,刘宏伟. 空间光学传感器中碳纤维复合材料精密支撑构件的结构稳定性 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2174-2179.
- [4] 李志来,薛栋林,张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2486-2490.
- [5] 李广宇. 环氧胶黏剂与应用技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [6] 程时远. 胶黏剂 (第二版) [M]. 北京:化学工业出版社,2008.

(上接第 6 页)

7 量子阱尺寸的改变对波函数的挤出效应

对方势阱中的电子求解薛定谔方程,可得到的相应能量本征值为^[36]

$$E(k) = \frac{k^2 \hbar^2}{8mL_z^2} \quad (4)$$

式中, k 为实数,也可将其视为量子数^[36]; L_z 为势阱宽度; m 为电子质量。当 $k = 0$ 时,态函数恒等于零,所以最低能态是 $k = 1$ 时的能态^[38],称为基态;其他的能态称为激发态,并且按顺序称为第一激发态、第二激发态、……,等等。理论上讲,在 70 K 下,通过将第一激发态置于量子阱顶部,可以将暗电流减至原来的 1/6^[2]。如果能态出现在势阱外的概率为零,则称为束缚态^[36]。如果从实数 k 可取偶数,也可取奇数的角度来看,束缚态又可分为偶态和奇态^[38]。基态始终是偶态,其次是奇态,……,等等,如图 7 所示(该图是用 MATLAB 和 Visio 绘图软件画出的示意图,而并非实际的波函数图)。一维周期性量子阱的束缚态能级可以通过 Kronig-Penney 模型来计算^[2,8]。

在图 7 中,当量子阱的深度 h 逐渐变小时,最高束缚态 E_4 所对应的波函数就要被挤出量子阱,接着是次高束缚态 E_3 所对应的波函数被挤出量子阱,……,等等^[38]。类似地,如果不是让

量子阱深度 h 变小,而是让其宽度 a 逐渐变窄,这样也可以使较高束缚态所对应的波函数被相继排挤出量子阱。由于具有相同能级的束缚态可能不止一个,根据对图 6 所作的描述,这些束缚态所对应的波函数或可重叠形成子带。不妨将这一过程称为量子阱尺寸改变对波函数的挤出效应。如果以势垒顶部为参照点,挤出效应实际上就是量子阱中束缚态所在的位置不断抬高的过程。当高到一定程度时,量子阱中的电子就有可能摆脱束缚而变成自由电子。QWIP 利用的正是这一点。

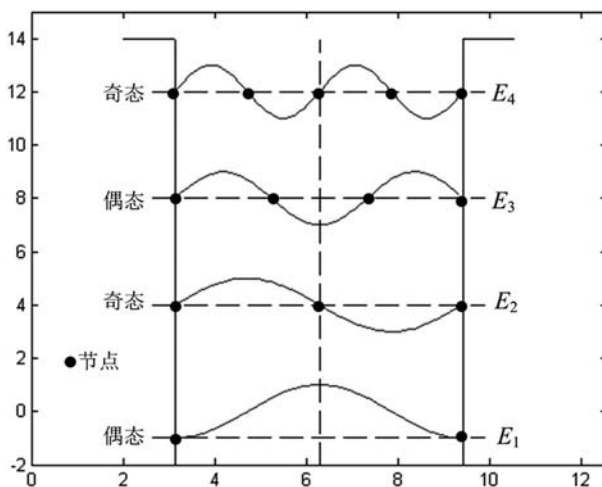


图 7 量子阱中的束缚态和波函数。注意到每一个较高的能态都比前一个能态多一个节点(振幅为零时所在的位置称为节点)

(未完待续)