文章编号:1001-5078(2010)03-0293-05

光学材料器件与薄膜・

空间相机机身桁架结构装配技术

张 凯1,2,何 成1,崔永鹏1

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;2. 中国科学院研究生院光学工程系, 北京 100039)

摘 要:为了提高空间相机机身的结构刚度和稳定性,本文针对机身的装配环节进行了研究, 通过制定合理的装配方法和装配工艺,提高了机身的力学性能、减小了装配应力和装配变形, 保证了机身结构的刚度和稳定性。文中介绍胶接装配方法及其相对于传统机械连接法的优势,对胶接法的装配精度进行了分析,并进行了装配实验。装配结果表明,胶接法的装配变形 可以控制在0.01 mm 以内。文中还对胶接装配的接头形式、黏接剂选用、表面处理和胶层厚 度等黏接要素进行了分析和试验,制定了合理的胶接工艺保证各黏接要素符合要求。最后对 装配后的机身进行了力学和热学试验,释放了装配应力,验证了机身的力学性能。结果证明采 用胶接方法并按照装配工艺进行装配,更有利于减少装配应力,提高机身的装配精度和稳定 性,符合机身结构的要求。

关键词:空间相机;杆系结构;碳纤维复合材料;精密装配;结构稳定性 中图分类号:TH745;V19 文献标识码:A

Precision assembly technology of space camera framed structure

ZHANG Kai^{1,2}, HE Xin¹, CUI Yong-peng¹

(1. Changchun Institute of Opitics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 2. Graduate School of the Chinese Academy of Scinces, Beijing 100039, China)

Abstract: Frame structure was needed to provided a stable basic to the aerial remote camera, and it could be influnced directly by the links of assemble. In order to get a high accuracy and good stablity frame structure, assembly stress shoule be reduced. The principle of mechinery connected method and the cementecl were introduced, on the basic of the structure of a camera and the request of assemble were explaned shortly. Two methods were adopted, and the results of them were analyzed. It showed that the assembly distort of mechinery connected method is about 0.03mm ~ 0.04mm, while the assembly distort of cementecl could be controled less than 0.01mm. Both of them could be used in assemble, but cementecl may reduce assembly stress and improve the accuracy and the stability of frame better. Key words:space camera; framed structure; carbon fiber reinforced polymer(CFRP); precision assembly; structural stability

1 引 言

为了适应空间遥感技术的不断发展,大信息量 需求和灵活多变的任务要求,现代社会中对空间遥 感相机的重视程度越来越高,在我国遥感相机经过 多年的发展,已经形成了自己的系列。相机机身结 构是遥感相机的重要组成部分,是影响成像质量的 关键,机身要承受地面试验和发射阶段对相机的冲 击和过载,还要满足空间环境下的使用要求。所以 机身结构需要具有足够的动、静态刚度和结构稳定性。

当今国际上在大中型空间相机结构设计中,普 遍采用的是桁架型结构设计,如哈勃望远镜等。该

收稿日期:2009-09-14;修订日期:2009-10-26

作者简介: 张 凯(1981 -), 男, 在读硕士研究生, 主要从事机 械结构设计, 机械制造, 系统装调等方面的研究。E-mail: zhangkaihai @ sohu. com

结构设计思想符合"变结构件弯曲载荷为拉压载 荷"的结构优化设计原则。优点是比刚度高,适合轻 量化程度要求较高的空间光学系统。桁架型结构在 国外应用较多,在国内尚无成功应用的先例,所以对 桁架型结构机身的研究,有助于填补国内空白,对提 高我国在该领域的研制水平,具有非常重要的意义。

桁架型结构机身主要依靠桁架支杆作为承力结构,所以支杆的装配是保证机身结构性能的重要环节。对于空间光学系统,机身结构的性能在很大程度上取决于机身装配,可以说机身装配与结构设计同样重要。本文主要针对机身结构的装配进行探讨,通过分析和试验寻找合适的装配方法和装配工艺,用于指导桁架结构机身的装配工作。

2 机身装配精度要求

为满足空间相机较高的轻量化要求,桁架支杆 多用碳纤维材料取代金属材料,以达到减重的作用。 本文所涉及的空间相机,机身结构为1617 mm × 1160 mm × 812 mm,如图1所示。由8根碳纤维支 杆连接前、后两个钛合金框架组成机身结构,为了增 强机身桁架结构的刚度,支杆采用全约束的方式与 框架连接。所以支杆与框架之间的连接是机身装配 的主要任务。



图 1 机身结构 Fig. 1 the structure of the frame

由于机身最终要与反射镜连接组成光学系统, 机身结构的微小变形就会对光学系统造成相当大的 影响。所以要求机身结构稳定而精确,其中保证机 身稳定性是最重要的,这也是装配的技术难点。

装配的精确性通过装配前,零件定位时对位置、 角度的精确测量和调整来保证。稳定性主要通过减 小应力来实现,应力会因时效而释放引起变形,是影 响机身稳定性的最主要因素。零件在装配前都经过 多次热真空时效处理,充分释放加工应力。装配应 力则通过控制装配变形来实现。由于光学系统允许 机身结构最大变形量为10"转角,换算到结构尺寸 变形量为:

$812 \times \tan 10'' = 0.039 \text{ mm}$

所以机身装配要求为:装配后两框架平行度不 大于0.05 mm,底面共面度不大于0.05 mm,装配前 后的装配变形量不得大于0.039 mm。

3 接头和胶黏剂的选择

装配的主要工作为金属与碳纤维的连接,而胶接是碳纤维结构件最普遍采用的一种连接方法,优点是:①强度较高,整个胶面均能承受载荷,相同面积的接头,胶接比焊接和铆接剪切强度高40%~100%,疲劳强度高5~6倍;②应力分布均匀,不削弱结构,避免螺钉孔造成的应力集中。

选择了胶接工艺进行装配,就需要进行黏接接 头设计。由于桁架支杆为圆管结构,所以接头设计 为适合圆管黏接的套接形式,即将接头一端插入支 杆内孔黏接,一端与框架机械连接。套接形式胶层 主要承受剪切载荷,黏接面积大,受力状况好,承载 能力强,只是中心位置不好定正,胶层厚度不易控 制。为此设计了几种套接形式,并试验验证了各自 的力学性能,如图2所示,出于对工艺和力学性能的 综合考虑,接头选用套对接形式。



黏接剂也是保证机身结构刚度和稳定性的一个 重要因素。黏接剂首先要有较高的强度和一定的韧 性,以承受剪切力和机械振动;其次是收缩率小,以 减小黏接应力;由于套接形式无法施压,装配过程要 求温度恒定,所以黏接剂要能在室温和接触压力下 固化;同时黏接剂要能满足航天环境要求,真空环境 下不能有过多的可凝性挥发物。

目前国内外普遍使用环氧树脂黏接剂,其黏接 强度高,环氧基还能与金属表面形成化学键增大结 合力;收缩率低,尺寸稳定;几乎不放出低分子产物; 工艺性好室温接触压力即可固化;使用温度宽,适应 性强,毒性小。所以黏接剂选用环氧树脂黏接剂,牌 号为J-133,剪切强度约20 MPa,收缩率为1.97%, 可室温接触压力固化,对金属和碳纤维有很好的黏 接性能,且在航天领域有成功应用的先例,所以适合 应用于机身装配。

4 机身装配方法

因为测量、加工和装配时都存在误差,所以装配 时必然会产生装配应力。装配应力虽然无法完全消 除,但必须采用适当的装配方法尽量减小。

4.1 机械连接法

机械连接法是目前在传统精密装配中通常使用 的方法,即通过精确测量框架和接头两端面之间的 间距,然后修整垫片的厚度和角度以适应该间距的 方法。该方法可调整范围相对较大,对零件之间位 置精度要求较低^[1-2]。

但是机械连接法存在如下缺点:

1)垫片通常为带有一定空间倾角的斜垫片,测 量、制造难度较大,产生的误差也大许多,从而产生 测量和制造误差;

2)装配时垫片无法与测量时的状态保持一致, 总会有一点旋转和偏移存在,从而产生装配误差;

3)累积误差会造成连接面之间接触面积下降, 使受力状态更加复杂;

4)螺钉紧固时,摩擦力会使被连接件之间产生 少量相对位移,导致零件产生偏移。

机械连接法装配环节众多,累积误差较大,降低 了装配精度和结构稳定性,所以不采用该方法进行 装配^[3-4]。

4.2 胶接法

由于各零件的加工精度和定位精度均较高,所 以可以用胶接法进行机身装配,即在胶黏剂固化前 完成机身各零件之间的定位,依靠胶黏剂固化完成 最后的连接任务的方法。胶接法的特点是将胶层作 为机身装配的闭环尺寸,装配精度和装配应力取决 于胶层变形量的大小。但是该方法可调整范围较 小,要求零件之间有较高的位置精度,图 3 为胶接法 示意图^[5]。



胶接法的理论依据为:胶黏剂在固化之前为液体,装配产生的应力和变形传递到胶层环节时,胶黏剂可以通过流动来吸收这些应力和变形。在装配应

力得以释放机身结构达到稳定状态后,胶层会在这种状态下进行固化,完全固化后机身仍然会处于这种稳定状态之中,从而满足机身的高装配精度和低装配应力的要求。

胶黏剂在固化到一定阶段,失去流动性后,会因 挥发、冷却、交联和结晶等因素,导致体积收缩产生 胶接应力。应力是影响胶接强度和稳定性的重要因 素。由于胶层在沿支杆轴向收缩时不受约束,所以轴 向胶接应力较小。胶层在沿支杆径向收缩时受被黏接 件的约束,所以胶接应力作用方向主要为沿支杆径向, 即胶层厚度方向。由于J-133 黏接剂的最佳胶层厚度 在 0.1~0.2 mm 之间,胶黏剂收缩率略小于 2%,所以 收缩量约为0.004 mm,产生的黏接应力相对较小。

用胶接法装配产生的最大变形量可控制在 0.01 mm 以内,装配周期在15 d 以内。机械连接法 装配应力的主要作用方向为螺钉紧固方向,即沿支 杆的轴向。胶接法装配应力的作用方向为胶层收缩 方向,主要为沿支杆的径向。胶接法减少了机身结 构在光学系统敏感方向(即支杆轴向)上的应力,优 化了机身的受力状态,同时胶接法取消了会产生较 大误差的垫片,减小了装配应力,提高了机身的装配 精度和结构稳定性^[6]。

5 胶接工艺

5.1 胶接面表面处理

因为胶接的实质是一种界面行为,表面处理直 接决定界面的理化状态,所以表面处理是胶接工艺 的重要环节。为验证表面处理对胶层力学性能的影 响,进行了专门的试验,试验数据如表1所示。

表1 表面处理与力学性能

Tab. 1 surface treatment and pull force

剪切强度/MPa
14.5
18.8
17.4

可见必须对黏接件进行表面处理。碳纤维材料 用机械打磨表面即可满足要求。钛合金表面处理方 法为:首先喷砂去除钛合金表面的氧化膜。然后用 15%硝酸(浓度 70%)和3%氢氟酸(浓度 50%)的 溶液浸泡 30 s,水洗后在放入下述溶液中浸泡 2 min 后烘干即可完成钛合金的表面处理:

磷酸三钠 50 g	氟化钾 20 g
50% 氢氟酸 26 mL	水 1000 mL

5.2 胶层厚度控制

胶层的厚度对胶接性能也有决定作用。从力学

角度看,单纯增加胶层厚度,只能使胶层在厚度方向 平均应力减少,而在临近被黏物表面处应力几乎不 变,但胶层所受剥离力矩反而增大。从黏接剂性能 看,每种胶黏剂都有特定的胶层厚度范围,在该范围 内胶层具有较好力学性能,超出该范围力学性能就 明显下降。J-133 胶黏剂经实验测得,胶层厚度与 力学性能的关系如表2 所示。

表 2 胶层厚度与力学性能

Tab. 2 thickness of gum and pull force

胶层厚度/mm	拉脱力/MPa
0.1 ± 0.02	19.83
0.2 ± 0.02	18.98
0.3 ± 0.02	16.54

套接形式黏接的主要缺点就是胶层厚度不易控制。当接头与支杆胶接时,由于重力因素使上方胶 层受压力下方胶层受拉力,胶黏剂产生流动,固化后 导致上方胶层偏薄下方胶层偏厚。胶接处胶层厚度 不均匀,甚至可能超出允许范围,造成胶接处力学性 能不一致,使胶接强度下降。

为控制胶层厚度,采用金属带缠绕在接头末端, 代替原先一部分胶黏剂的位置。接头与支杆内孔小 间隙配合,以便于装配和胶层吸收装配变形,其余地 方仍以胶黏剂填满。此时重力通过金属带传递到接 头最终传递到框架上,胶黏剂在不受外力的情况下 自然固化,从而控制胶层厚度在允许范围内,保证了 较好的力学性能^[7],如图4所示。



图 4 胶层厚度控制示意图 Fig. 4 symmetrical gum handle

虽然垫片会占用一部分胶接长度,但胶接强度 与胶接长度并没有正比关系,超过一定胶接长度后 承载能力将不再提高。胶接长度的经验公式为:

L = (0.8D + 6)

其中,L为胶接长度;D为插入管直径。由公式得:

 $L = 0.8 \times 50 + 6 = 46 \text{ mm}$

由于接头插入长度为 60 mm,在保证胶接长度的基础上,选择 10 mm 宽的垫片。为保证胶层厚度 在 0.08 ~ 0.22 mm 之间,如图 5 所示,则假设 x 为垫

片厚度,y为支杆与接头单侧配合间隙,两者函数关系为:

所以在选用 10 mm 宽、0.14 mm 厚的垫片控制 胶层厚度的情况下,胶层可吸收 0.026 mm 的变形 量,减去零件的定位误差 0.015 mm,则胶层仍可吸 收 0.011 mm的变形量。



图5 垫片厚度和配合间隙

Fig. 5 thickness of gasket and fit clearance

经下式计算,当胶接法装配变形量取0.025 mm 时上支杆胶层变形量为:

 $X = 0.025 \sin(\arctan \frac{812}{1617}) = 0.011 \text{ mm}$ 中间支杆胶层变形量为: $X = 0.025 \sin(\arctan \frac{580}{1617}) = 0.008 \text{ mm}$ 下支杆胶层变形量为: $X = \frac{1}{2} \times 0.025 \sin(\arctan \frac{406}{1617}) = 0.003 \text{ mm}$

各支杆变形量均不大于 0.011 mm, 不超出胶层 对变形的吸收能力^[8]。由于胶接法装配的机身变 形量可控制在 0.01 mm 以内, 所以能够满足装配工 艺要求。

6 力学和热学试验

为验证装配后机身的力学性能,并释放装配应 力,获得更稳定的机身结构,所以对机身结构进行了 振动试验和热真空试验。

6.1 振动试验

振动试验可以检测机身的固有频率,固有频率 是评价机身结构刚度的重要标准,同时可以通过振 动时效释放一定应力,机身随机振动试验条件如表 3 所示。

表3 随机振动条件

Tab. 3 surface treatment and pull force

频谱范围/Hz	2 g 幅值	4 g 幅值
20 ~ 100	3 dB/oct	3 dB/oct
100 ~ 600	$0.005 \text{ g}^2/\text{Hz}$	0.005 g ² /Hz
600 ~ 2000	−9 dB/oct	−9 dB∕oct
均方根值	2 grms	4 grms
试验持续时间	300 s/ 向	120 s/向

试验结果为:机身一阶谐振频率为90 Hz,试验 前后频率特性未发生变化,所以机身具有较好的结 构刚度,并满足设计指标要求。振动试验后机身没 有产生变形,说明振动试验对装配应力释放效果不 明显。

6.2 热真空试验

为清除碳纤维支杆因加工、黏接和装配等产生的应力,对机身结构进行热真空时效试验。试验条件为压力小于1.3×10⁻³ Pa,试验结果如图6所示。



Fig. 6 thickness of gasket and fit clearance

试验结果为:机身变形约为3"转角,变形方向 与装配变形方向恰好相反,说明热真空试验使机身 装配应力得以释放,从数值上看装配应力基本全部 释放,所以提高了机身的稳定性。

7 装配结论

胶接法装配精度高、应力小,而且方法简单,不 需要精密加工仪器及人员配合,降低了成本。更有 利于提高装配精度和结构稳定性,更适合在光学精 密产品的装配中使用。同时通过制定切实可行的装 配工艺,提高了胶接处的力学性能。为以后光学元 件的装配提供了更稳定的基础,具有更高的可靠性。

参考文献:

[1] 卢秉恒.机械制造技术基础[M].北京:机械工业出版 社,1999.

Lu Bing-heng. Fundamentals of mechanical manufacturing technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1999. (in Chinese)

[2] 张伟社.机械原理[M].西安:西北工业大学出版社, 2001.

Zhang Wei-she. Theory of Mechanics [M]. Xi'an: Northwest Institute of Technology Press, 2001.

- [3] 韩增尧,曲广吉.梁结构的高频响应研究[J].中国空间科学技术,2001,10(5):7-11.
 Han Zeng-yao, Qu Guang-ji. High-frequency response research of gearn structure[J]. Chinese Space Science And Technology,2001. (in Chinese)
- [4] 苗健宇,张立平,吴清文,等. 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.

Miao Jian-yu, Zhang Li-ping, Wu Qing wen, et al. Manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16 (9): 1649 – 1653.

[5] 王志敏.红外探测器组件的结构[J].激光与红外, 1996,26(1):51-53.

Wang Zhi-min. The frames of IR detector assembly [J]. Laser & Infrared, 1996, 26(1):51 - 53. (in Chinese)

[6] 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.

Li Zhi-lai, Xue Dong-lin, Zhang Xue-jun. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16 (12):2486 - 2490. (in Chinese)

[7] 王春生,喻松林,宁汝新,等.制导用红外成像系统的 可装配性设计[J].激光与红外,2008,38(11): 1100-1102.

Wang Chun-sheng, Yu Song-lin, Ning Ru-xin, et al. DFA of IR imaging system used in IR seeker [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(11):1100 - 1102. (in Chinese)

[8] 程时远. 胶黏剂[M]. 第2版. 北京:化学工业出版社, 2008.

Cheng Shi-yuan. Adhesive [M]. Version 2. Beijing; Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)