

空间相机机身桁架装配工艺

张 凯^{1,2}, 何 欣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, 北京 100039)

摘 要: 机身装配作为空间相机制造的一个关键环节, 对保证机身的力学性能至关重要。为了提高空间相机机身的结构刚度和稳定性, 针对机身的装配环节进行了研究。研究了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。研究了胶接装配的各种粘接要素, 并进行了分析和实验。最后对装配后的机身进行了力学和热学实验, 释放了装配应力, 验证了机身的力学性能。实验结果表明: 胶接法的装配变形可以控制在 0.01 mm 以内。采用胶接方法并按照装配工艺进行装配, 可以减少装配应力, 提高机身的装配精度和稳定性, 符合机身结构的装配要求。

关键词: 空间相机; 杆系结构; 装配工艺; 碳纤维复合材料

中图分类号: TH745; V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)01-0091-05

Assembly technology of frame structure of space camera's body

Zhang Kai^{1,2}, He Xin¹, Cui Yongpeng¹

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

Abstract: As a key link of the space camera manufacture, assembly of space camera's body is very important to ensure that the mechanical properties of the structure. To improve the stiffness and stability of space camera frame structure, the assembly sections of space camera's body were studied in this paper. Compared with the traditional mechanical connection method, the advantages of bonding assembly method were studied, and assembly precision of bonding methods was analyzed. The various elements about the bonding assembly method were studied and tested. At last, the mechanical and thermal test of the frame structure were completed, the assembly stress was released, the mechanical properties of camera's body was verified. The experimental results show that the deformation of the bonding assembly can be controlled in less than 0.01 mm, the bonding assembly technology is helpful to reduce the assembly stress, improve the accuracy and stability of the camera's body, meet the requirements of the frame structure assembly of the space camera.

Key words: space camera; framed structure; assembly technology; carbon fiber reinforced polymer(CFRP)

收稿日期: 2010-04-10; 修订日期: 2010-06-05

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程资助项目(ZJ99130B)

作者简介: 张凯(1981-), 男, 硕士生, 主要从事机械结构设计、机械制造、系统装调等方面的研究。Email: zhangkaihai@sohu.com

导师简介: 何欣(1970-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事航天仪器结构设计等方面的研究。Email: hexinxp@yahoo.com.cn

0 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,是高质量成像的关键,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。

目前,在大中型空间相机的结构设计中,国际上普遍采用的是桁架型结构设计,如哈勃望远镜等。该设计思想符合“变结构件弯曲载荷为拉压载荷”的结构优化原则。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的装配,可以说机身装配与结构设计同样重要。文中主要针对机身结构的装配进行探讨,通过分析和实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。

1 机身装配精度的要求

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。文中所涉及的空间相机,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

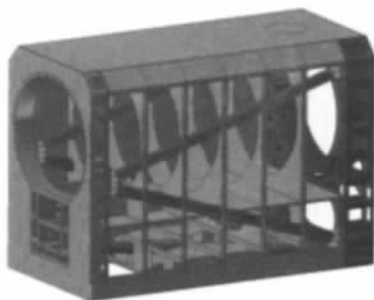


图 1 机身结构

Fig.1 Structure of the frame

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。

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都会对光学系统造成很大的影响,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,这也是装配技术的难点。

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,应力会因时效释放而引起变形,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。由于反射镜允许机身结构的最大变形量为 10"转角,换算到结构尺寸变形量为:

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

所以机身的装配要求为: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。

2 接头和胶粘剂的选择

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,其优点是:(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,需要进行粘接接头的设计。由于桁架支杆为圆管结构,所以接头设计为适合圆管粘接的套接形式,即将接头一端插入支杆内孔粘接,一端与框架机械连接。套接形式胶层主要承受剪切载荷,粘接面积大,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,并实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。

粘接剂也是保证机身结构刚度和稳定性的一个重要因素。粘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;其次是收缩小,以减小粘接应力;由于套接形式无法施压,装配过程要求温度恒定,所以粘接剂要能在室温和接触压力下固化;同时粘接剂要能满足航天环境要求,真空环境下不能

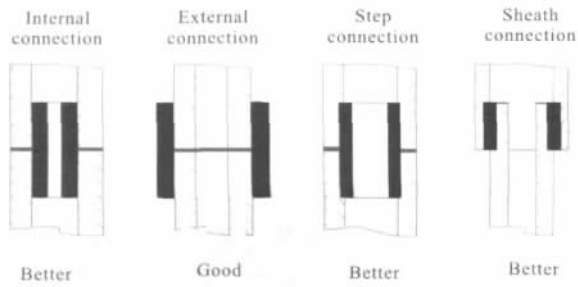


图 2 套接形式和力学性能

Fig.2 Bonding forms and mechanical properties

有过多的可凝性挥发物。

目前国内外普遍使用环氧树脂粘接剂,其粘接强度高,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。文中选用 J-133 环氧树脂粘接剂,剪切强度约为 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粘接性能,且在航天领域有成功应用的先例,适用于机身装配。

3 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。

3.1 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,从而造成测量和制造误差;

(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的接触面积减小,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,所以不宜采用该方法^[3-4]。

3.2 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,即在胶粘剂固化前完成机身各零件之间的定位,依靠胶粘剂固化完成最后的连接任务。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]。

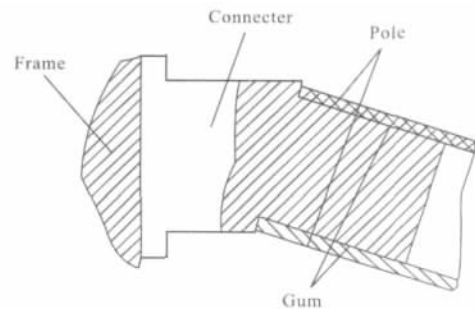


图 3 胶接法示意图

Fig.3 Schematic of adapting gum assembly

胶接法的理论依据为:胶粘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,胶粘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。

胶粘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。而胶层在沿支杆径向收缩时会受被粘接件的约束,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 粘接剂的最佳胶层厚度在 0.1~0.2 mm 之间,胶粘剂收缩率略小于 2%,所以收缩量约为 0.004 mm,产生的粘接应力相对较小,如表 2 所示。

采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

沿支杆的径向。胶接法减少了机身结构在机身敏感方向(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]。

4 胶接工艺

4.1 胶接面的表面处理

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,进行了专门的实验,实验数据如表 1 所示。

表 1 表面处理与力学性能

Tab.1 Surface treatment and mechanical properties

| Surface treatment | Mechanical properties/MPa |
|--------------------|---------------------------|
| Unsettled | 14.5 |
| Polished | 18.8 |
| Chemical corrosion | 17.4 |

由表 1 可见,粘接件的表面处理方式对粘接强度有明显影响,粘接前必须对表面进行处理。碳纤维材料用机械打磨表面即可满足要求。钛合金表面的处理方法为: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 30s,水洗后在放入溶液(磷酸三纳 50g,氟化钾 20g,50%氢氟酸 26ml,水 1000ml)中浸泡 2 min 后烘干即可。

4.2 胶层厚度的控制

胶层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的平均应力减少,而在临近被粘物表面处应力几乎不变,但胶层所受剥离力矩反而增大。从粘接剂性能看,每种胶粘剂都有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,超出该范围力学性能就明显下降。经实验测得,J-133 胶粘剂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 mechanical properties

| Thickness/mm | Mechanical properties/MPa |
|--------------|---------------------------|
| 0.1±0.02 | 19.83 |
| 0.2±0.02 | 18.98 |
| 0.3±0.02 | 16.54 |

套接形式粘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而下方胶层受拉力,胶粘剂产生流动,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,代替原先一部分胶粘剂的位置。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,其余地方仍以胶粘剂填满。此时,重力通过金属带传递到接头再传递到框架上,胶粘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。

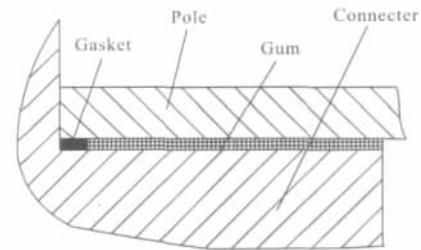


图 4 胶层厚度控制示意图

Fig.4 Schematic of gum layer depth control

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未呈正比关系,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:

$$L=0.8D+6$$

式中: 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

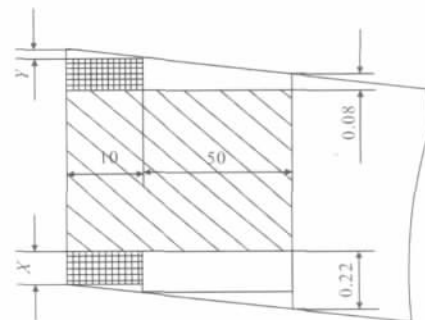


图 5 垫片厚度和配合间隙

Fig.5 Thickness of gasket and fit clearance

度, y 为支杆与接头单侧配合间隙, 两者函数关系为:

$$\begin{cases} \frac{x-0.08}{50} = \frac{y}{10} \\ \frac{0.22-x-y}{50} = \frac{y}{10} \end{cases}$$

解方程组得:

$$\begin{cases} x=0.144 \\ y=0.013 \end{cases}$$

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。

经下式计算, 当胶接法装配变形量取 0.025 mm 时, 上支杆的胶层变形量为:

$$X=0.025\sin(\arctan \frac{812}{1617})=0.011 \text{ mm}$$

中间支杆的胶层变形量为:

$$X=0.025\sin(\arctan \frac{580}{1617})=0.008 \text{ mm}$$

下支杆的胶层变形量为:

$$X=\frac{1}{2} \times 0.025\sin(\arctan \frac{406}{1617})=0.003 \text{ mm}$$

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的要求。

5 力学和热学实验

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, 对机身结构进行了振动实验和热真空实验。

5.1 振动实验

振动实验可以检测机身的固有频率, 验证其力学性能, 同时可以使装配应力均匀分布, 并通过振动时效释放一定的应力, 机身随机振动实验条件见表 3。

表 3 随机振动条件

Tab.3 Condition of random libration

| Item | 2 g acceleration | 4 g acceleration |
|--------------|--------------------------|--------------------------|
| 20-100 Hz | 3 dB/oct | 3 dB/oct |
| 100-600 Hz | 0.005 g ² /Hz | 0.005 g ² /Hz |
| 600-2 000 Hz | -9 dB/oct | -9 dB/oct |
| RMS | 2 grms | 4 grms |
| Duration | 300 s | 120 s |

实验结果为: 机身一阶谐振频率为 90 Hz, 实验前后频率特性未发生变化, 所以机身结构具有较好的刚性, 并满足设计指标要求。振动实验后, 机身并没有产生变形, 说明振动实验对装配应力的释放效果不明显。

5.2 热真空实验

为消除碳纤维支杆因加工、粘接和装配等产生的应力, 对机身结构进行热真空时效实验。实验条件为压力小于 1.3×10^{-3} Pa, 实验流程如图 6 所示。

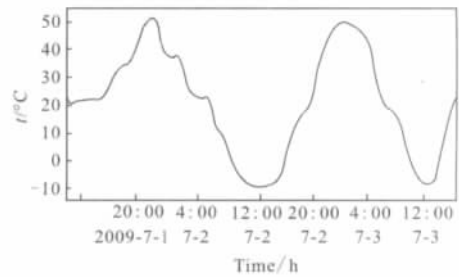


图 6 热真空循环监测点温度曲线图

Fig.6 Monitoring point temperature profile of the vacuum cycling

实验结果为: 机身变形约为 3" 转角, 变形方向与装配变形方向恰好相反, 说明热真空实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。

6 结论

胶接是一个十分复杂的过程, 每一个环节都能对胶接性能产生较大的影响, 操作不当极易产生无法察觉的缺陷。只有通过制订完善的工艺流程, 并严格执行, 才能确保胶接性能。文中研究了胶接的若干环节, 通过分析和实验表明, 胶接法装配与传统机械装配相比, 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, 降低了生产成本, 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。同时制定了切实可行的装配工艺配合胶接法一同使用, 进一步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] Lu Bingheng. Fundamentals of Mechanical Manufacturing Technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1999. (in Chinese)
卢秉恒. 机械制造技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
[2] Sun Huan. Theory of Mechanics [M]. Xi'an: Northwest

(下转第 122 页)

参考文献:

- [1] Koch T B, Davies J B, Wickramasinghe D. Finite element/finite difference propagation algorithm for integrated optical device[J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(8): 514-516.
- [2] Yan Chaojun. Numerical calculation of imaging positions in multimode interference couplers by the three-dimensional beam propagation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 110-114. (in Chinese)
严朝军. 采用三维波束传输法的多模干涉耦合器成像位置的数值计算[J]. *光学学报*, 2008, 28(1): 110-114.
- [3] Wang Shijun, Ma Huilian, Jin Zhonghe. Finite difference beam propagation analysis of wide -angle crossed waveguide [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(2): 231-234. (in Chinese)
王世军, 马慧莲, 金仲和. 基于有限差分的大角度交叉波导光束传输法[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 231-234.
- [4] Rivera M. A finite difference BPM analysis of bent dielectric waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(2): 233-238.
- [5] Han Wenjie, Zhang Wenping, Li Li, et al. Propagation characteristic research about two dimension circle waveguide using a variational polar coordinates BPM [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 438-443. (in Chinese)
韩文杰, 张文平, 李丽, 等. 应用变换极坐标系光束传播法研究二维圆弧波导传播特性[J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 438-443.
- [6] Li Zhihong, He Duiyan, He Lei. Power loss analysis of transitional waveguide by the finite-difference beam propagation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(1): 93-96. (in Chinese)
李志宏, 何对燕, 贺磊. 用有限差分光束传输法分析过渡波导损耗[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(1): 93-96.
- [7] Dai Daoxin, Ao Xianyu, Zhou Qincun et al. Cylindrical coordinate wide -angle BPM with PML boundary condition in a bent waveguide [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(4): 331-335. (in Chinese)
戴道锌, 敖献焜, 周勤存, 等. 弯曲波导中基于 PML 边界条件的柱坐标广角 BPM[J]. *光电子·激光*, 2003, 14(4): 331-335.
- [8] Li Wei, Liu Deming, Huang Dexiu. Design of PM polarizer based on SiO₂/Si PLC waveguide [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(10): 1311-1314. (in Chinese)
李蔚, 刘德明, 黄德修. 硅基二氧化硅保偏光波导起偏器的设计[J]. *半导体学报*, 2004, 25(10): 1311-1314.
- [9] Yu Daoyin, Tan hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: Machine Industry Publishing House, 2002: 49-50. (in Chinese)
郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 49-50.
- [10] Wang Qian, Huang Nairong, He Sailing. Comparison research of transparent boundary condition and its improvement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(5): 575-579. (in Chinese)
王谦, 黄耐容, 何赛灵. 透明边界条件算法的比较研究及改进[J]. *光子学报*, 2002, 31(5): 575-579.
-
- (上接第 95 页)
- Polytechnical University Press, 2008. (in Chinese)
孙桓. *机械原理* [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [3] Han Zengyao, Qu Guangji. High -frequency response research of gear structure[J]. *Chinese Space Science And Technology*, 2001, 10(5): 7-11. (in Chinese)
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.
- [4] Miao Jianyu, Zhang Liping, Wu Qingwen, et al. Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(9): 1649-1653. (in Chinese)
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.
- [5] Li Shimeng, Zhang Rongzhu. Analysis for the surface of thin mirror influenced by the support area [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 82-86. (in Chinese)
李士猛, 张蓉竹. 支撑面积对薄镜面形影响的研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 82-86.
- [6] Li Zhilai, Xue Donglin, Zhang Xuejun. 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)
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
- [7] Dong Bing, Yu Xin, Zhang Xiaofang, et al. Thermal_struct -lral optical integrated analysis of segmented space telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 326-329. (in Chinese)
董冰, 俞信, 张晓芳, 等. 分块式空间望远镜的光机热集成分析[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 326-329.
- [8] Cheng Shiyuan. Adhesive [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)
程时远. *胶黏剂* [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2008.