

空间环境模拟系统光学窗口组件设计

徐明林, 解 鹏

(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: 光学窗口组件作为空间环境模拟系统与外界的接口, 是不可或缺的重要组成部分。空间环境模拟系统共有两类光学窗口组件, 针对两类光窗组件分别进行了结构方案设计。通过强度理论公式对光窗组件进行了强度校核, 采用有限元分析软件计算了压力对光学玻璃表面变形的影响, 并分析了光学玻璃表面变形对光窗组件光学性能的影响。计算结果表明: 工作过程中, 通光口径为 $\Phi 150$ mm 的光窗组件光学玻璃产生的应力为 0.82 MPa; 通光口径为 $\Phi 350$ mm 的光窗组件光学玻璃产生的应力为 3.28 MPa, 均满足强度要求。利用 Zemax 软件分析得到, 通光口径为 $\Phi 150$ mm 的光窗组件波像差 PV 值为 $\lambda/8$; 通过计算得到通光口径为 $\Phi 350$ mm 的光窗组件在 $\Phi 170$ mm~ $\Phi 190$ mm 环带区域内光程差为 0.8 nm, 均满足光学性能要求。因此, 光学窗口组件结构方案设计既满足强度和可靠性要求, 又满足光学性能要求, 整个光学窗口组件安全可靠。

关键词: 光学窗口; 空间环境模拟系统; 波像差; 光程差

中图分类号: V416.8 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)S-0030-06

Design for optical window in space environment simulation system

Xu Minglin, Xie Peng

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

Abstract: As the interface with the outside space environment simulation system, optical window is an indispensable important component parts. Space environment simulation system consists of two types of optical window. Based on both the windows, in this paper, components structure scheme design was carried out respectively. The strength theory formula was used to check the intensity of the window components; The finite element analysis software was used to calculate the effect of pressure on the optical glass surface deformation, and to analyze the impact of optical glass surface deformation results of the optical properties of the optical window assembly. The results show that aperture $\Phi 150$ mm, the work stress of optical window assembly is 0.82 MPa; Aperture $\Phi 350$ mm, the work stress is 3.28 MPa, meet the strength requirements. Zemax software was used to calculate the wavefront error(PV)of aperture $\Phi 150$ mm optical window assembly is $\lambda/8$; within $\Phi 170$ mm- $\Phi 190$ mm band area, the optical path difference of aperture $\Phi 350$ mm optical window assembly is 0.8 nm; Both of them can satisfy the requirements of optical performance. Therefore, this design meets not only the strength and reliability requirements, but also the optical performance requirements, So the design of entire window assembly is safe and reliable.

Key words: optical window; space environment simulation system; wavefront error; optical path difference

收稿日期: 2014-10-17; 修订日期: 2014-11-20

作者简介: 徐明林(1988-), 男, 研究实习员, 硕士, 主要从事空间机构设计方面的工作。Email: xuminglin_hit@126.com

0 引言

在轨运行的空间相机长时间处于高真空、冷黑以及强辐射等太空环境中,苛刻的环境因素可能会导致空间相机光学系统成像质量严重下降,有时甚至直接造成相机损坏而无法工作^[1]。因此,十分有必要通过空间环境模拟系统针对空间相机进行各种环境模拟试验,验证相关设计的合理性及其空间环境的适应性。光学窗口组件作为空间环境模拟系统与外界的接口,是不可或缺的重要组成部分。它不仅作为气密性窗口,隔离外界环境,保证空间环境模拟系统的气密性;而且作为通光窗口,是入射光束的必经路径,其光学性能直接影响检测结果的准确性^[2-4]。因此,光学窗口组件在设计过程中不仅需要考虑光窗组件的强度、刚度及气密性,还需要考虑检测过程中其光学性能对检测结果的影响。

空间环境模拟系统共有两类光学窗口组件,通光口径分别为 $\Phi 150\text{ mm}$ 和 $\Phi 350\text{ mm}$ 。文中针对两种类型的光学窗口组件分别进行了结构方案设计。由于尺寸较小,通光口径为 $\Phi 150\text{ mm}$ 的光窗组件选择单层窗口玻璃结构方案;为了保证光窗组件的气密性,提高光窗组件安全可靠,通光口径为 $\Phi 350\text{ mm}$ 的光窗组件采用双层窗口玻璃结构方案,该方案可以实现逐级减压。

文中通过强度理论公式分别校核了两类光窗组件的安全可靠性。采用有限元分析软件 Patran/Nastran 计算了压力对光学玻璃表面变形的影响,利用 Zemax 软件分析计算了通光口径为 $\Phi 150\text{ mm}$ 的光窗组件光学玻璃表面变形对波像差 PV 值的影响;计算分析了通光口径为 $\Phi 350\text{ mm}$ 的光窗组件光学玻璃表面变形对光程差的影响。计算分析结果表明,文中光学窗口组件结构方案设计既满足强度和可靠性要求,又满足光学性能要求,整个光窗组件安全可靠。

1 主要技术指标要求

空间环境模拟系统共包含 7 个光学窗口组件,如图 1 所示。根据通光口径大小不同,7 个光窗组件共分为两类。其中光窗组件 1 和光窗组件 4 通光口径为 $\Phi 350\text{ mm}$,其余光窗组件通光口径为 $\Phi 150\text{ mm}$ 。两类光窗组件作用有所不同,通光口径为 $\Phi 150\text{ mm}$ 的光

窗组件用作成像,通光口径为 $\Phi 350\text{ mm}$ 的光窗组件作用为通过入射激光束。光窗组件主要技术指标要求如下:

(1) 工作过程中,光学玻璃不得发生断裂、不得产生裂纹。

(2) 工作过程中,光窗组件必须保证空间环境模拟系统内部真空环境,不得存在漏气情况。

(3) 通光口径为 $\Phi 150\text{ mm}$ 的光窗组件在一个标准大气压的压力差下,波像差 PV 值优于 $\lambda/5(\lambda=632\text{ nm})$;

(4) 一个标准大气压的压力差下,通光口径为 $\Phi 350\text{ mm}$ 的光窗组件在 $\Phi 170\text{ mm}\sim\Phi 190\text{ mm}$ 环带区域内光程差优于 5 nm 。

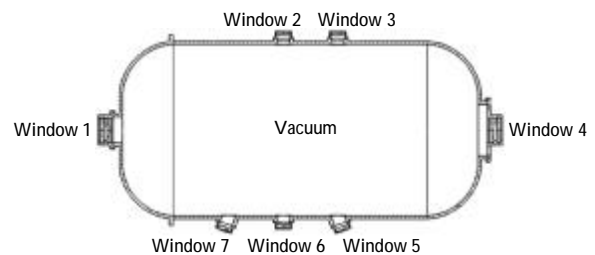


图 1 空间环境模拟系统示意图

Fig.1 Space environment simulation system

2 光学窗口组件结构方案设计

综合考虑光窗组件气密性要求、安全可靠要求以及光学性能要求,文中针对两种类型的光学窗口分别设计了不同的结构方案。

2.1 通光口径 $\Phi 150\text{ mm}$ 光窗组件结构方案

由于整体结构尺寸较小,通光口径为 $\Phi 150\text{ mm}$ 的光学窗口组件采用单层光学玻璃结构方案,如图 2 所示。该方案主要有外压板、单层光学玻璃、壳体、密封胶层和光学玻璃保护盖等组成。

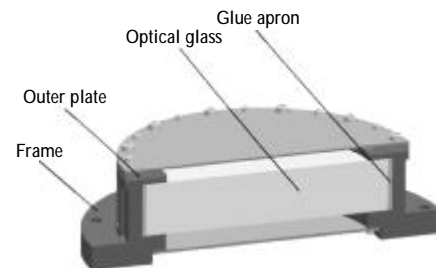


图 2 通光口径 $\Phi 150\text{ mm}$ 光窗组件结构简图

Fig.2 Structure of aperture diameter $\Phi 150\text{ mm}$ optical window

光学玻璃上下分别采用密封垫进行密封,通过

外压板将光学玻璃固定在壳体内。壳体周向设置 4 个注胶孔,可以通过注胶孔注入室温硫化密封剂,填充密封垫与光学玻璃之间的缝隙,提高整个光窗组件的气密性。光窗组件内外两侧分别设有光学玻璃保护盖,在运输及安装过程中可以有效保护光学玻璃,防止灰尘及异物污染或者破坏光学玻璃。综合考虑光学加工工艺、气密性工艺、装配工艺等因素,通光口径为 $\Phi 150\text{ mm}$ 的光窗组件光学玻璃尺寸最终确定为 $\Phi 180\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 。

2.2 通光口径 $\Phi 350\text{ mm}$ 光窗组件结构方案

为保证光窗组件的气密性,提高安全可靠,通光口径为 $\Phi 350\text{ mm}$ 的光窗组件采用双层光学玻璃结构方案,如图 3 所示。该方案主要由外压板、双层光学玻璃、密封胶层、壳体、内压板、光学玻璃保护盖、压力测试系统和抽真空充气系统等组成。

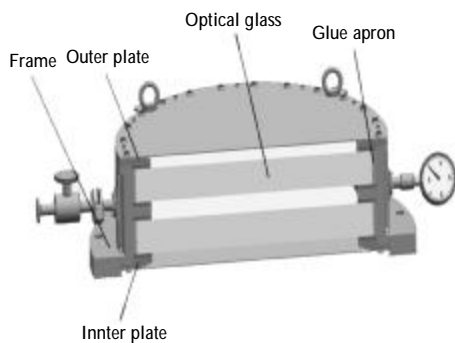


图 3 通光口径 $\Phi 350\text{ mm}$ 光窗组件结构简图

Fig. 3 Structure of aperture diameter $\Phi 350\text{ mm}$ optical window

光学窗口组件内部为真空环境,外部为一个标准大气压,两层光学玻璃之间的间隙在抽真空后充入 0.5 个标准大气压(1 个标准大气压=101 325 Pa)的干燥氮气。该方案可以实现逐级减压,减小每层光学玻璃承受的压差,有效提高整个光窗组件的安全可靠性。为了便于装配,壳体选择内外两腔式结构,通过外压板及内压板将两块光学玻璃固定在壳体内。壳体周向设置 16 个注胶孔,可以通过注胶孔注入室温硫化密封剂,提高光学窗口组件的气密性。抽真空充气系统可以完成抽真空及氮气充入,工作过程中该系统组件可以自由拆卸及安装。压力测试系统实时监测两层光学玻璃之间的压力,可以起到故障预警作用。光学窗口组件壳体上共设有 8 个吊环接口,便于进行运输及安装。综合考虑光学加工工艺、气密性工艺、装配工艺等因素,通光口径 $\Phi 350\text{ mm}$ 的光

窗组件光学玻璃尺寸最终确定为 $\Phi 400\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 。

3 光学窗口组件强度分析

光学窗口组件中所用的光学玻璃材料均为熔石英,熔石英属于脆性材料,压力作用下其表面会发生塑性变形。光学玻璃表面变形会导致光学性能下降,变形严重时甚至会损坏光学玻璃。当光学玻璃表面塑性变形小于压力引起的变形时,其表面就会出现裂纹或者断裂。因此,十分必要对光学窗口进行强度分析,进而确定光学窗口是否具有足够的强度。

简单支撑的圆形光学玻璃在压力条件下产生的应力为^[5]:

$$\sigma = \frac{3\Delta p(3+u)}{32} \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^2 \quad (1)$$

式中: $\frac{d}{h}$ 为光学玻璃径厚比; Δp 为光学玻璃内外表面承受的压力差; u 为光学玻璃材料的泊松比(0.15)。

判定光学窗口组件具有足够强度的条件为:

$$\sigma \leq \frac{\sigma_F}{F_S} = 12\text{ MPa} \quad (2)$$

式中: σ_F 为光学玻璃材料的断裂应力(48 MPa); F_S 为安全系数(光学机械工程中通常采用的安全系数为 4)。

通过公式(1)计算可以得出:一个标准大气压压力差条件下,通光口径 $\Phi 150\text{ mm}$ 光窗组件光学玻璃产生的应力 $\sigma_{\Phi 150}$ 为 0.82 MPa,满足强度要求;通光口径 $\Phi 350\text{ mm}$ 光窗组件光学玻璃产生的应力 $\sigma_{\Phi 350}$ 为 3.28 MPa,满足强度要求。综上所述,两种规格尺寸的光学玻璃均具有足够的强度,安全可靠。

4 压力对光窗组件光学性能的影响

除了考虑强度因素之外,光学性能也是光学窗口组件必须考虑的因素。当光窗组件内外存在压力差时,压力差会使得光学玻璃表面发生变形,进而直接影响其光学性能。光学性能的改变直接影响测试结果的准确性。因此,十分有必要验证光学窗口组件在压力条件下是否满足光学性能要求。由于两类光窗组件作用不同,因此,光学性能的评价指标也有所不同。通光口径为 $\Phi 150\text{ mm}$ 的光窗组件用作成像,因此,选择波形差 PV 值作为其光学性能评价指标;通光口径为 $\Phi 350\text{ mm}$ 的光窗组件作为激光束的入

口,因此选择光程差作为其光学性能评价指标。光学窗口组件材料属性如表 1 所示。

表 1 光学窗口组件材料参数

Tab.1 Material properties of optical window

Part	Material	Elastic modulus /kg·mm ⁻²	Poisson ration	Density /kg·mm ⁻³
Optical glass	Quartz	7459	0.167	2.2E-6
Frame plate	304	20000	0.288	7.9E-6
Gale apron	XM31	0.09	0.34	1.49E-6

4.1 通光口径 $\Phi 150$ mm 光窗组件光学性能

通过有限元分析软件 Patran/Nastran 建立光学窗口组件有限元模型并进行网格划分,结果如图 4 所示,共有 17 266 个节点,14 044 个单元。

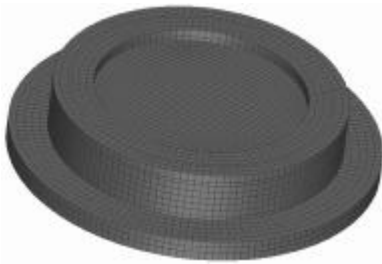


图 4 通光口径 $\Phi 150$ mm 光窗组件网格划分

Fig.4 Grid of aperture diameter $\Phi 150$ mm optical window



图 5 通光口径 $\Phi 150$ mm 光窗组件光学玻璃变形云图

Fig.5 Deformation of aperture diameter $\Phi 150$ mm optical window

获得光学玻璃表面变形数据之后,为了分析光学玻璃表面变形对整个光窗组件光学性能的影响,需要对光学玻璃内外变形表面进行 Zernike 多项式拟合^[6-8]。Zernike 多项式对于拟合光学玻璃面形具有如下优点^[9-10]:

(1) 在单位圆上正交。函数系的正交使得不同多项式的系数相互独立,利于消除偶然因素的干扰。

(2) Zernike 多项式容易与 Seidel 像差项对应,为有选择地单独处理各相差系数、优化系统性能提供

了有效的方法。

(3) Zernike 多项式各项物理意义明了,是结构分析与光学分析程序之间的接口工具。在常用的光学设计软件 Zemax 中包含面形,可以直接输入拟合后的相应各项系数附加于原本窗口表面,然后就可以利用软件分析附加变形后的光窗组件光学性能。

利用 Zernike 多项式拟合光学窗口表面变形,可以得到光学玻璃内外表面面形前 10 项 Zernike 系数,如表 2 所示。

表 2 光学玻璃内外表面面形前 10 项 Zernike 系数

Tab.2 Top 10 Zernike coefficients of internal and external surface on optical glass

Array	Inner surface	Outer surface
1	-1.9094×10^{-1}	1.9096×10^{-1}
2	1.5159×10^{-4}	-1.5159×10^{-4}
3	1.0855×10^{-4}	1.0855×10^{-4}
4	3.6219×10^{-4}	-3.6369×10^{-4}
5	-6.8558×10^{-7}	-6.8341×10^{-7}
6	-1.1365×10^{-6}	1.1351×10^{-6}
7	1.4409×10^{-7}	1.3173×10^{-7}
8	2.0022×10^{-7}	-1.8377×10^{-7}
9	-4.2537×10^{-8}	-3.6140×10^{-8}
10	-3.4393×10^{-7}	3.3269×10^{-7}

4.2 通光口径 $\Phi 350$ mm 光窗组件光学性能

通过有限元分析软件 Patran/Nastran 建立光学窗口组件有限元模型并进行网格划分,结果如图 6 所示,共有 35 820 个节点,29 520 个单元。图 7 为压力条件下通光口径为 $\Phi 350$ mm 的光窗组件中光学玻璃的变形云图。由图 7 可知,每层光学玻璃在相同直径处产生的表面变形相同,然而两层光学玻璃表面变形程度却有所差异。

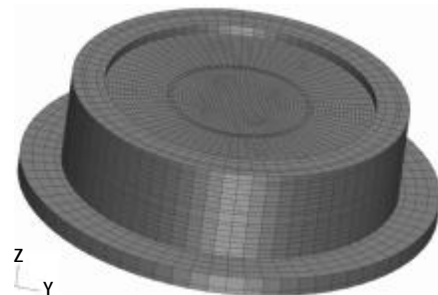


图 6 通光口径 $\Phi 350$ mm 光窗组件网格划分

Fig.6 Grid of aperture diameter $\Phi 350$ mm optical window

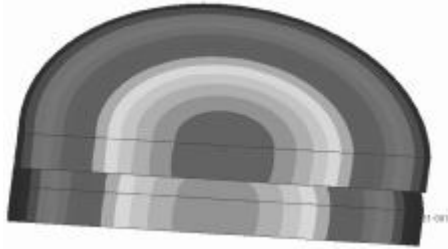


图 7 通光口径 $\Phi 350$ mm 光窗组件光学玻璃变形云图

Fig.7 Deformation of aperture diameter $\Phi 350$ mm optical window

获得光学玻璃表面变形数据之后,为了分析光学玻璃表面变形对整个光窗组件光学性能的影响,需要计算光窗组件的光程差。光学窗口组件光程定义如下:

$$L = n_{\text{真空}} l_1 + n_{\text{玻璃}} l_2 + n_{\text{氮气}} l_3 + n_{\text{氮气}} l_4 + n_{\text{空气}} l_5 \quad (3)$$

式中: n 为材料折射率($n_{\text{真空}} = n_{\text{空气}} = n_{\text{氮气}} = 1, n_{\text{玻璃}} = 1.4$); l_1 为测试目标到内层窗口玻璃内表面的距离; l_2 为内层窗口玻璃内表面到外表面的距离; l_3 内层窗口玻璃外表面到内表面的距离; l_4 内层窗口玻璃外表面到外层窗口玻璃内表面的距离; l_5 外层窗口玻璃外表面到内表面的距离。通过公式(3)计算可以得出,通光口径 $\Phi 350$ mm 的光学窗口组件工作过程中光学玻璃内外表面变形引起的光程差如表 3 所示。一个标准大气压压力差下,通光口径 $\Phi 350$ mm 的光窗组件在 $\Phi 170$ mm~ $\Phi 190$ mm 环带区域内光程差为 0.8 nm,满足光学性能要求。

表 3 光学玻璃内外表面变形引起的光程差

Tab.3 OPD caused by internal and external surface deformation of optical glass

D/mm	Optical path length/mm	OPD/nm
$\Phi 170$	162.000 021 6	0.8
$\Phi 174$	162.000 022 0	
$\Phi 178$	162.000 022 4	
$\Phi 182$	162.000 022 0	
$\Phi 186$	162.000 022 4	
$\Phi 190$	162.000 022	

5 结论

文中针对两种不同类型光学窗口组件分别设计了不同的结构方案。通过强度理论公式对两类光窗组件进行了强度分析。工作工程中,通光口径为 $\Phi 150$ mm 的光窗组件光学玻璃产生的应力为 0.82 MPa;通光口径为 $\Phi 350$ mm 的光窗组件光学玻璃产生的应力

为 3.28 MPa,结果表明:两类光窗组件均具有较好的强度可靠性。采用有限元分析软件分析了压力对光学窗口玻璃变形的影响,利用 Zemax 软件计算得到通光口径为 $\Phi 150$ mm 的光窗组件波像差 PV 值为 $\lambda/8$;通过计算得到通光口径 $\Phi 350$ mm 的光窗组件在 $\Phi 170$ mm~ $\Phi 190$ mm 环带区域内光程差为 0.8 nm,均满足光学性能要求。理论计算及分析结果表明:光学窗口组件不仅满足安全可靠,同时满足光学性能要求,整个光学窗口组件设计安全可靠。

参考文献:

- [1] Pi Guiying, Shi Qingguo. Analysis on domestic and international space environment simulation test conditions[J]. Environmental Technology, 2013(4): 41-42. (in Chinese). 皮桂英,石庆国.国内外空间环境模拟试验条件分析[J].环境技术,2013(4):41-42.
- [2] Li Ming, Wu Qingwen, Yu Fei. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis[J]. Acta Optica Sinaica, 2010, 30(1): 210-213. (in Chinese). 黎明,吴清文,余飞.基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化[J].光学学报,2010,30(1):210-213.
- [3] Zhao Lixin. Thermal-optical evaluation to optical windows of space camera [J]. Acta Optica Sinaica, 1988, 18(10): 1440-1444. (in Chinese) 赵立新.空间相机光学窗口的热光学评价 [J].光学学报,1998,18(10):1440-1444.
- [4] Chen Hua, Shi Zhenguang, Sui Yongxin, et al. Thermal deformation analysis of optical surface caused by environmental temperature during intrferometric testing [J]. Acta Optica Sinaica, 2011(1): 135-139. (in Chinese) 陈华,史振广,隋永新,等.干涉检测中环境温度引起的镜面变形分析[J].光学学报,2011(1):135-139.
- [5] Bames W P, Jr. Some effects of aerospace thermal environments on high-acuity optical systems [J]. Appl Opt, 1966, 5(5): 671-675.
- [6] Pearson E, Stepp L. Response of large optical mirror to thermal distributions[C]//SPIE, 1987, 748: 215-228.
- [7] Noreen Harned, Robert Harped, Ramsey Melugin. Alignment and evaluation of the cryogenic corrected infrared astronomical satellite (IRAS)telescope [J]. Opt Eng, 1981, 20(2): 202195.
- [8] Pepi J W, Barnes W P. Thermal distortion of a thin low expansion fused silica mirror[C]//SPIE, 1983, 450: 40-49.

- [9] Yang Jiawen, Huang Qiaolin, Han Youmin. Application and simulation in fitting optical surface with Zernike polynomial [J]. Spacecraft Recovery Remote Sensing, 2010, 31(5): 49-55. (in Chinese)
杨佳文, 黄巧林, 韩友民. Zernike 多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31 (5): 49-55.
- [10] Shan Baozhong, Wang Shuyan, Niu Hanben, et al. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. Opt Precision Engineering, 2012, 10(3): 318-323. (in Chinese)
单宝忠, 王淑岩, 牛憨笨, 等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. 光学 精密工程, 2012, 10(3): 318-323.