

文章编号: 0253-2239(2010)01-0210-04

基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化

黎 明^{1,2} 吴清文¹ 余 飞^{1,2}

(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 100049

摘要 以热光学分析为基础,对复杂环境下光学窗口的玻璃厚度进行了优化设计。对光学窗口的强度及其所处的热环境进行了分析和仿真,计算出稳态的温度场,将温度场映射到结构模型中计算了光学窗口在力-热耦合情况下的光学玻璃的变形量,结合光学窗口的折射率梯度分析和玻璃面形变化进行热光学分析,计算出了直径是 350 mm 的光学窗口在不同的玻璃厚度下光程的均方根(RMS)误差值,确定光学窗口的玻璃厚度为 18 mm。结果表明,光学窗口既能满足强度和可靠性要求,又能在有效通光口径内满足光学指标,为窗口的设计提供了依据。

关键词 光学设计;光学窗口;热光学分析;玻璃厚度;力热耦合

中图分类号 V416.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0210

Optimization of Optical Window Glass Thickness Based on the Thermal Optical Analysis

Li Ming^{1,2} Wu Qingwen¹ Yu Fei^{1,2}

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the thermal optical analysis, the glass thickness of optical window under the complex environment is optimized. Intensity and the thermal environment of optical window is analyzed. steady-state temperature field is calculated. By mapping the temperature field to structural model, the deformation of optical window under the force-thermal coupling condition is calculated. Combining refractive index gradient analysis and glass surface change of optical window, thermal optical analysis is carried out. When the glass thickness is different, the optical path in root mean square error(RMS) of optical window with diameter of 350 mm is calculated. Thickness of the optical window is determined as 18 mm. The results show that the optical window can not only meet the strength and reliability requirements, but also meet the optic index in the effective optical aperture. These results provide the guidance for the optical window design.

Key words optical design; optical window; thermal optical analysis; glass thickness; force-thermal coupling

1 引 言

光学窗口作为空间模拟器的一部分,外接平行光管,是空间相机光源与空间环境模拟器的接口。作为零光焦度的元件,窗口是光学系统中最简单的元件。它位于真空罐与平行光管之间,既为照相通光窗口,又是压力隔离气密窗口(将罐内的真空与外

部的大气环境隔离),同时又是温度隔离窗口(将罐内的热沉与外部室温环境隔离)。要求光学窗口可靠性大于 0.9,在大于热光学试验测试相机口径 173 mm 内透射光学波面光程差的均方根(RMS)小于 $\lambda/10$ 。加载环境条件的复杂性使这种“简单”元件的设计复杂化。光学窗口的光学性能直接关系到

收稿日期: 2009-03-17; 收到修改稿日期: 2009-04-07

作者简介: 黎 明(1983—)男,博士研究生,主要从事航天光学遥感器热控制技术方面的研究。

E-mail: dawn75918@126.com

导师简介: 吴清文(1968—)男,研究员,主要从事航天光学遥感起环境工程方面的研究。E-mail: wuqw@ciomp.ac.cn

相机的分辨力和成像质量及实验结果的可信性,光学窗口的气密性及强度等可靠性又关系着实验的成败。

光学窗口要将罐内的真空与外部大气环境隔离,因此光学窗口要承受 1 标准大气压 (1.01×10^5 Pa) 的压力,从窗口的强度及可靠性考虑,需要保证窗口玻璃的厚度足够大;而窗口玻璃厚度太大时,由温度场变化引起的折射率梯度变化和热变形等会更加明显,严重时会导致窗口不满足其光学指标要求。国际空间站的高质量光学窗口中间两层为 $508 \text{ cm} \times 31.75 \text{ cm}$;美国“天空实验室”的光学窗口为长方形的单层窗口,采用 40.6 mm 厚的 BK7 玻璃,通光面积为 $501.9 \text{ mm} \times 342.9 \text{ mm}$,承受 0.42 个大气压 (0.42×10^5 Pa);美国“双子星座”的光学窗口为近似椭圆形,长轴 355 mm,短轴 203 mm,两层承压玻璃的厚度均为 9.6 mm;俄罗斯“联盟号”飞船的光学窗口内两层的承压层为 $220 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ^[1~3]。本文拟结合某窗口设计任务,寻找一个合理的玻璃厚度,以解决这类工程设计问题的盲目性,使光学窗口的设计更加合理可靠。

2 光学窗口的强度分析

多数光学玻璃材料是脆性材料,在压力作用下,不仅会使通过窗口的光波产生误差,而且还会损坏窗口玻璃。当窗口玻璃没有足够的塑性变形时,表面会出现裂纹或断裂,因此需要对窗口玻璃进行强度分析,以确定满足强度要求的最小窗口玻璃的厚度。对脆性材料,压力差引起的最大抗拉应力不应超过 $\sigma_{\max} = \sigma_F / F_s$ 。式中 σ_{\max} 为最大允许抗拉应力, σ_F 为窗口材料的折断应力, F_s 为安全系数。光学机械工程通常采用的安全系数为 4。简单支撑的圆形窗口的厚度与直径的最小比值或最小纵横比^[4]为

$$\frac{d}{h} = 2 \left[\frac{8\sigma_F}{3\Delta p(3+u)F_s} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 d/h 为窗口纵横比; Δp 为窗口内外表面的压力差; u 为玻璃材料的泊松比。

光学窗口的最大通光口径为 350 mm,通过计算可以得到仅仅考虑强度的情况下,窗口玻璃的最小厚度为 12 mm。

3 光学窗口的温度场分析

窗口的热环境主要由空间环境模拟器内的热沉及实验大厅的外部环境构成如图 1 所示。外窗口玻璃与实验大厅的恒温环境进行辐射和对流形式的换

热;内窗口玻璃与空间模拟器内的热沉进行辐射换热,同时两块玻璃之间也存在热交换;玻璃的周向采用灌胶密封的方式安装,玻璃与通过胶层与窗口的框架存在热传导。由于内窗口玻璃内表面对热沉的视角系数沿径向逐渐变化,所以由内表面辐射出的热量不同,是造成窗口径向温差的主要原因。为了减小光学窗口的温度梯度,对光学窗口采取了在窗口壳体铝外框设置电加热片的方式进行热控^[5]。通过有限元软件建立热分析模型,计算了全口径为 350 mm 的窗口玻璃厚度从 12 mm 到 27 mm 厚度变化情况下窗口的温度分布数据如图 2 所示。

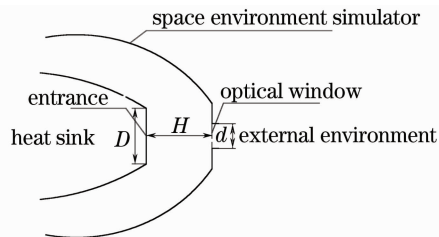


图 1 光学窗口热环境示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical window thermal environment

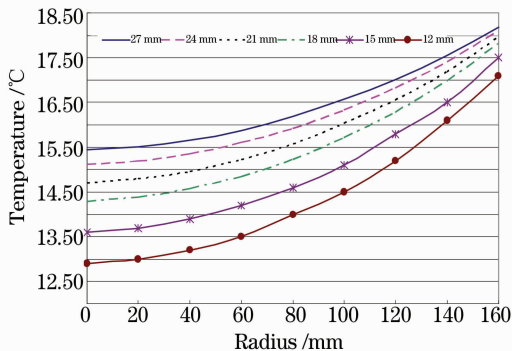


图 2 不同厚度下光学窗口的径向温度分布

Fig. 2 Radial temperature distribution of optical window in different glass thickness

从图 2 中可以看出,随着光学玻璃厚度的增加,温度水平逐渐上升,径向温差逐渐减小。

4 光学窗口的热光学评价

在现有条件下,采用修等光程的方法,可以把每层光学窗口的加工误差 RMS 值控制在不大于 $\lambda/30$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。采用液态灌胶、室温固化的无应力装配工艺,可以做到对光学窗口光程差的影响降到很小,因此光学窗口的光程差主要由两部分构成:一部分是由于压力差和温度梯度等原因而引起的玻璃的面形变形,这种面形变化将使光学系统的光程发生变化进而产生光程差;另一部分是由于温度梯

度引起折射率梯度造成的光程差^[2]。

4.1 热对光学窗口的影响

光学玻璃在某一温度 t_1 下的绝对折射率 λ_{t_1} 是透过光波长和玻璃温度的函数,当波长一定时,它随温度变化的变化值为

$$n_{t_1} = 1.000272n_0 + \alpha(t_1 - 20), \quad (2)$$

式中 n_0 为在 20 °C 时玻璃材料的相对折射率, α 为玻璃材料的折射率温度变化率。

光学玻璃在某一温度 t_2 下的厚度 L_{t_2} 为

$$L_{t_2} = L_0[1 + \beta(t_2 - 20)], \quad (3)$$

式中 L_0 为光学玻璃在 20 °C 时的厚度; β 为光学玻璃的线胀系数。

因为光学窗口为薄板结构,采用热膨胀系数较小的熔石英材料,周边约束为无应力密封,而且窗口为零光焦度元件,因此可以忽略径向和周向热膨胀,仅考虑轴向热膨胀的影响^[6],所以光学窗口的实际光程公式为 $n_t L_t$ 。

4.2 压力对光学窗口的影响

当窗口内外表面存在压力差时,压力差会引起窗口玻璃面形变化进而引起通过窗口的光程发生变化。通过有限元软件计算了全口径为 350 mm 的窗口玻璃厚度从 12 mm 到 27 mm,步长为 3 mm,6 组玻璃厚度不同时窗口的压力变形情况,结果如图 3 所示。

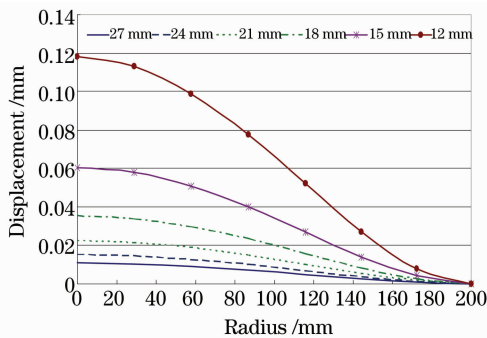


图 3 不同厚度时玻璃的压力变形量

Fig. 3 Deformation of glass in the different glass thickness

4.3 力热耦合的影响

光学窗口在力热耦合场下的光程差主要由两部分组成:一部分是由于存在温度梯度而导致的折射率梯度引起的光程的变化,其中折射率的变化量可以通过(1)式求得;另一部分是由于在温度和压力综合作用下产生的玻璃面形变化引起的光程差 L_1 和由于玻璃面形变化而引起的中间介质的传播距离的变化引起的光程差 L_2 两部分组成。

通过有限元软件将已求得温度场代入到力学模型中,计算窗口玻璃在温度和压力情况下的变形,并将计算的结果通过接口程序计算出光学窗口在热和压力在耦合情况下的面形,通过编程分别计算出光学窗口在不同厚度时的 n_t 和 L_1, L_2 ,进而求出光学窗口在窗口玻璃厚度不同时整个光学窗口的均方根光程差 L_{RMS} 值以及在同一厚度下,有效通光口径变化时光学窗口的 RMS 值^[7,8],计算结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,随着厚度的增加,光学窗口整体的 RMS 也逐渐增大;满足光学系统要求 RMS 小于 $\lambda/10$ 的有效通光口径随玻璃厚度的变化情况如表 1 所示。

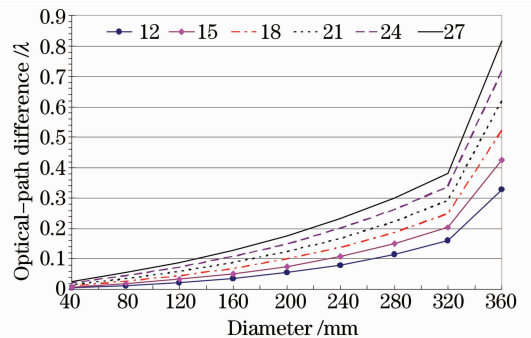


图 4 不同厚度时窗口玻璃的均方根光程差

Fig. 4 Optical-path difference of optical window in the different glass thickness

表 1 有效通光口径与玻璃厚度的关系

Table 1 Relation between effective optical aperture and glass thickness

Glass thickness /mm	Effective optical aperture /mm
27	130
24	150
21	170
18	200
15	230
12	270

从可靠性的角度考虑,在满足有效通光口径的情况下,应尽量使厚度较大。所研究的窗口是 173 mm 口径,为相机提供热光学实验接口,因此结合工艺制造性选用的厚度为 18 mm。

5 光学窗口的可靠性分析

依据概率分布的分析方法对窗口玻璃力学性能进行可靠性分析,分析公式如下^[9]:

$$P_{w(x)} = \exp[-(\sigma/\sigma_0)^x], \quad (4)$$

式中 $P_{w(x)}$ 为窗口玻璃可靠度, σ 为窗口玻璃的工作应力, σ_0 为窗口玻璃的许用应力, x 为窗口玻璃的韦

伯参数。

玻璃的许用应力 $\sigma_0 = 48 \text{ MPa}$, $x = 4$ 而窗口工作时承受的最大应力值 $\sigma = 3.7 \text{ MPa}$ (工程分析数据), 将以上数据代入(4)式, 则 $P_{w(x)} = \exp[-(3.7/48)^4] = 0.9999$, 窗口玻璃在该厚度下的机械性能可靠度 $P_{w(x)} = 0.9999$, 满足系统可靠性的要求。

6 结 论

本文介绍了在热光学分析的基础上, 以350 mm 口径光学窗口为例, 对窗口玻璃的厚度进行了优化, 通过温度场分析, 压力变形分析和力热耦合分析等方法, 计算出了既能满足强度可靠性要求, 又能满足有效通光口径内的等光程要求的玻璃厚度, 解决了这类工程设计问题的盲目性, 使光学窗口的设计更加合理可靠。

参 考 文 献

- 1 Zhao Lixin. Thermal Optical Analysis and Engineering Application of Space Optical Window and Outer Baffle [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 1996
赵立新. 空间光学窗口和外遮光罩的热光学分析及其在工程中的应用[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 1996
- 2 Wang Lei. Space Camera Optical Window Thermal-Optical, Thermal Environment and Thermal Control Research [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005
王 雷. 空间相机光学窗口的热光学、热环境和热控制研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005
- 3 Song Zhaohui. Application of Artificial Neural Network to the Thermal-Optical Performance Research of the Space Optical Window [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000
宋朝辉. 神经网络在空间光学窗口热光学性能研究中的应用[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000
- 4 Bames W P, Jr. Some effects of aerospace thermal environments on high-acuity optical systems [J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(5): 671~675
- 5 Niu Xiaoming, Wu Qingwen. The analysis of on-orbit thermal stability for optical window of space CCD-camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, **6**(6): 45~50
牛晓明, 吴清文. 空间 CCD 相机光学窗口在轨热稳定性分析 [J]. 光学精密工程, 1998, **6**(6): 45~50
- 6 Zhao Lixin. Thermal-Optical evaluation to optical windows of space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1440~1444
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
- 7 Ding Yanwei, Han Shuangli, Li Jihui. Analysis for thermo-optical sensitivity of space optical window [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(5): 15~18
丁延卫, 韩双丽, 李积慧. 空间光学窗口的热光学灵敏度分析 [J]. 光电工程, 2002, **29**(5): 15~18
- 8 Tan Fanjiao, Qiao Yanfeng, Li Yaobin *et al.*. Finite element analysis for surface shape deformation of photo-electronic theodolite primary mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 756~763
谭凡教, 乔彦峰, 李耀彬 等. 光电经纬仪主镜面形变化的有限元分析 [J]. 光学学报, 2008, **28**(4): 756~763
- 9 R. H. Doremus. Fracture statistics: a comparison of the normal, Weibull, and type 1 extreme value distributions [J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**: 6130~6139
- 10 Li Hongzhuang, Han Changyuan, Ma Dongmei. Assessment method of modulation transfer function of on-orbit space optical remote sensor using neural network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 631~637
李宏壮, 韩昌元, 马冬梅. 航天光学遥感器在轨调制传递函数神经网络评价方法 [J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 631~637