

组合式力热动态载荷光学窗口的光学特性研究

刘圉辰 马国鹭 赵涌 宋子军 胡亮子

Optical properties of combined dynamic thermal dynamicloading optical window

LIU Youchen, MA Guolu, ZHAO Yong, SONG Zijun, HU Liangzi

引用本文:

刘圉辰, 马国鹭, 赵涌, 等. 组合式力热动态载荷光学窗口的光学特性研究[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1122–1126. DOI: 10.5768/JAO202142.0605003

LIU Youchen, MA Guolu, ZHAO Yong, et al. Optical properties of combined dynamic thermal dynamicloading optical window[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 1122–1126. DOI: 10.5768/JAO202142.0605003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0605003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多光束激光相干成像孔径偏差对成像质量影响

Research on distribution of aperture position error in multi-beam coherent imaging and its impact on image quality

应用光学. 2019, 40(3): 411–415 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0302001>

大口径光学元件表面疵病在位检测与评价研究

In situ detection and evaluation of surface defects for large-aperture optical elements

应用光学. 2019, 40(6): 1167–1173 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0605005>

机载相机非球面光学系统热光学特性分析

Analysis of thermal optical properties of airborne camera aspheric optical system

应用光学. 2020, 41(2): 270–275 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201006>

拼接式光学窗口装配关键技术研究

Research on assembly key technologies for stitched optical window

应用光学. 2018, 39(6): 896–901 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0605004>

光学窗口电磁屏蔽性能分析与验证

Analysis and test of electromagnetic shielding effectiveness of optical window

应用光学. 2020, 41(1): 55–59 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0101008>

FFT动态相位重建算法的滤波窗影响分析

Analysis for effect of filter window on fast Fourier transform dynamic phase reconstruction algorithm

应用光学. 2020, 41(1): 163–169 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0105002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2021) 06-1122-05

组合式力热动态载荷光学窗口的光学特性研究

刘圉辰¹, 马国鹭¹, 赵涌^{2,3}, 宋子军^{2,3}, 胡亮子¹

(1. 西南科技大学 制造过程测试技术教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010; 2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621010; 3. 航空发动机高空模拟技术重点实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要: 针对在一定压差及温度梯度等复合环境下工作的大口径光学窗口, 提出了一种由光学玻璃与亚克力板组成的光学窗口组合方案, 并以热光学分析为基础, 对光学窗口整体强度及热环境进行了理论分析计算, 得出光学窗口玻璃最小厚度。利用有限元软件将压力场及轴向温度场映射至三维结构模型, 计算得到直径为 380 mm 的光学窗口在不同玻璃厚度下力热耦合的面形变化及成像质量评价指标, 并通过相应的环境性试验对仿真结果进行验证。实验结果表明: 以 K9 光学玻璃为原材料的大口径光学窗口在此工作环境下的厚度不小于 32.5 mm; 当光学窗口厚度为 35 mm 时, 其所受热力学影响可以忽略。因此, 35 mm 的大口径组合式光学窗口既能满足强度要求, 又能满足多光谱相机成像质量要求, 为该类窗口的设计提供了依据。

关键词: 大口径光学窗口; 最小厚度; 力热动态载荷; 面形评价指标; 成像质量

中图分类号: TN204; TQ171.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0605003

Optical properties of combined dynamic thermal dynamic loading optical window

LIU Youchen¹, MA Guolu¹, ZHAO Yong^{2,3}, SONG Zijun^{2,3}, HU Liangzi¹

(1. Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process (Ministry of Education), Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621010, China; 3. Key Laboratory of Aero-engine Altitude Simulation Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Aiming at the large aperture optical window working in the complex environment such as pressure difference and temperature gradient, a combination scheme of optical window was proposed, which was composed of optical glass and acrylic plate. Based on the thermal-optical analysis, the overall strength and thermal environment of optical window were analyzed and calculated theoretically, and the minimum thickness of optical window glass was obtained. The pressure field and axial temperature field were mapped to three-dimensional structure model by finite element software. The surface shape change and imaging quality evaluation index of 380 mm diameter optical window under different glass thickness were calculated. The simulation results were verified by corresponding environmental tests. The results show that the thickness of large aperture optical window with K9 optical glass as raw material is not less than 32.5 mm under this working environment; when the thickness of optical window is 35 mm, the thermodynamic effect can be ignored. Therefore, the large aperture combined optical window of 35 mm can not only meet the intensity, but also meet the imaging quality requirements of multi-spectral camera, which provides a basis for the design of this kind of window.

收稿日期: 2021-04-21; 修回日期: 2021-06-21

基金项目: 国家自然科学基金 (61505169); 航空发动机尾喷流中颗粒物参数检测关键技术研究 (20zh0074)

作者简介: 刘圉辰 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事几何精密测量方面的研究。E-mail: 229027065@qq.com

通信作者: 马国鹭 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事几何精密测量方面的研究。E-mail: maguolu999@163.com

Key words: large aperture optical window; minimum thickness; dynamic-thermal dynamic loads; surface shape evaluation index; imaging quality

引言

光学窗口作为环境和测量系统的光学通道,其光学作用将直接叠加到光学传递路径上,尤其是在多场载荷环境下光学窗口的影响愈加明显。光学窗口在工作过程中不仅是光学成像通道,还作为压力隔离气密窗口承受内外环境压力,以及作为温度隔离窗口与周围环境进行热交换^[1]。从窗口的强度和集光能力考虑,需要保证窗口玻璃的厚度和口径足够大,但当窗口玻璃厚度及口径太大时,温度场和压力场会引起光学窗口面形变形和波像差均方根值变化,明显降低光学系统成像质量^[2-3]。

在高超声速风洞中对试验段流场观测的光学窗口,承载压差范围为 0~40 kPa,瞬时温度变化范围为 0~40℃,光学口径直径不大于 400 mm,常规光学窗口将难以适应该环境条件。因此,本文提出一种能够适应于在一定力热动态载荷复合环境下工作的大口径组合式光学窗口。综合考虑压差、温度梯度对光学玻璃面形的影响,对该环境下光学窗口厚度进行了计算,实现了对该条件下光学玻璃成像质量的评价,并进行了环境性试验验证。对解决大口径组合式光学窗口的光学特性研究具有指导意义。

1 组合式光学窗口结构设计

大口径光学窗口一般采用单片光学玻璃制造,但其加工难度大、成本高、环境适应性差。使用组合式光学窗口既保留了平板窗口无相差、易于加工的优点,又能在保证光学系统集光能力前提下提高窗口结构强度^[4-5]。针对大口径光学窗口出现的问题提出了由 K9 光学玻璃、亚克力板及亚克力环组成的环压式光学窗口组合方案。利用亚克力环将亚克力窗板与光学玻璃固定,光学玻璃与亚克力材料连接处采用光学胶水填充,亚克力环与亚克力窗板接触处采用亚克力热熔工艺连接,为防止两者热膨胀系数不匹配需要设置配合公差,如图 1 所示。K9 光学玻璃透过光谱范围宽,具有较好的透明性且易于加工。亚克力板具有极佳的耐气候性,加工性能良好且易热成型。通过两种材料配合既保证了光学窗口观察视场范围,又提高了光学玻璃利用率。

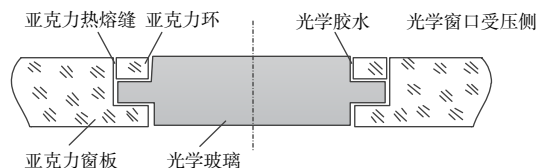


图 1 光学窗口结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of optical window

由于机械加工玻璃表面时出现应力集中以及大气中的水分子在玻璃表面发生应力腐蚀问题,会导致玻璃表面出现微裂纹,严重时会导致玻璃断裂。因此从断裂力学理论出发,光学玻璃表面最大微裂纹尺寸 c 与其断裂强度 σ_F 的关系为^[6-7]

$$K_{IC} = \sigma_F Y \sqrt{c} \quad (1)$$

式中: K_{IC} 为玻璃本征强度,受微裂纹尺寸最大值和尖端曲率半径影响,与裂纹数量无关; Y 为无量纲参数,表示玻璃表面微裂纹的几何特征。其中 K9 光学玻璃 $Y=1.24$, $c=60 \mu\text{m}$, $K_{IC}=2.63 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$, 可计算得出断裂强度 $\sigma_F=4.05 \text{ MPa}$ 。

该光学窗口中采用直径 $D=380 \text{ mm}$ 的阶梯状圆形 K9 光学玻璃,在承压情况下光学窗口的厚度 S 与断裂强度 σ_F 的关系为^[8]

$$s = 0.5D \sqrt{\frac{k f_s \Delta P}{\sigma_F}} \quad (2)$$

式中: f_s 为安全系数,取值为 4; k 为支撑条件系数,光窗受外部夹具夹持时取值为 0.75。在高超声速风洞中压差为 40 kPa, 计算得到光窗最小厚度 $S=32.705 \text{ mm}$ 。

2 力热载荷对光学窗口的影响

2.1 光学窗口力热载荷分析

该光学窗口为薄板结构,四周为无应力密封,采用的玻璃材料为 K9 光学玻璃,其热膨胀系数较小。光学窗口为平板式光学窗口,为零光焦度元件,可以忽略周向和径向热膨胀,仅考虑轴向热膨胀影响^[9]。为分析轴向温度梯度及压力差对光学窗口面形的影响,将光学窗口内侧的温度 20℃ 设置为参考温度及压强 101.325 kPa 设置为参考气压,选取光学窗口外侧的温度梯度为 0~40℃,步长为 5℃、气压为 141.325 kPa。基于有限元仿真软件的多物理场耦合,将固体力学分析和固体传热分析结合得到热单元模型,求解得到光学窗口

在不同厚度下表面的面形变化。光学窗口材料特性如表 1 所示。

表 1 K9 光学玻璃材料特性

Table 1 Material properties of K9 optical glass

恒压热容/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	导热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	杨氏模量/ GPa	泊松比
879	1.1	2 510	86	0.21

光学窗口在实际安装时,采用的是周向固定,通过光学胶水将光学玻璃与亚克力板固定,光学胶水可以有效减缓光学玻璃与亚克力材料热膨胀系数不匹配等问题^[10]。窗口在轴向温度和压差的作用下,支撑固定结构会引起窗口轴向移动,该平板式光学窗口为零光焦度元件,可忽略支撑结构带来的影响^[11]。对 35 mm 厚光学窗口进行力热耦合分析后的表面形变分布图如图 2 所示,其变形大小呈径向梯度变化,变形最大处为光学窗口中心处。

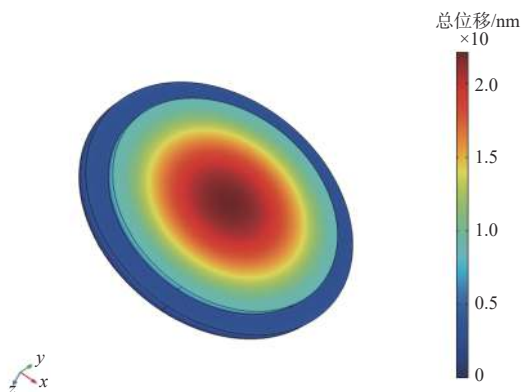


图 2 35 mm 厚光学窗口表面形变分布图

Fig. 2 Surface deformation distribution of 35 mm thick optical window

2.2 光学窗口形变对成像质量的影响

光学窗口表面的面形质量是决定光学系统性能的重要指标之一,目前常用的面形评价指标有 PV(peak to valley)值和 RMS(root mean square)值^[12]。提取有限元软件分析中得到的光学窗口原始节点坐标数据以及在力热耦合作用下面形变化后的位移数据,可计算出光学窗口表面面形数据,如图 3 所示。

从图 3 可以看出,光学窗口表面面形的 PV 值和 RMS 值随着光学窗口厚度及轴向温度的不同而发生变化。随着光学窗口轴向温度的增大和厚度的减小,光学窗口的 PV 值与 RMS 值随之增大,光学窗口表面出现变形。

当一束平面光波通过有压差及温度梯度的光学玻璃时会产生一定的波面畸变,从而影响光学

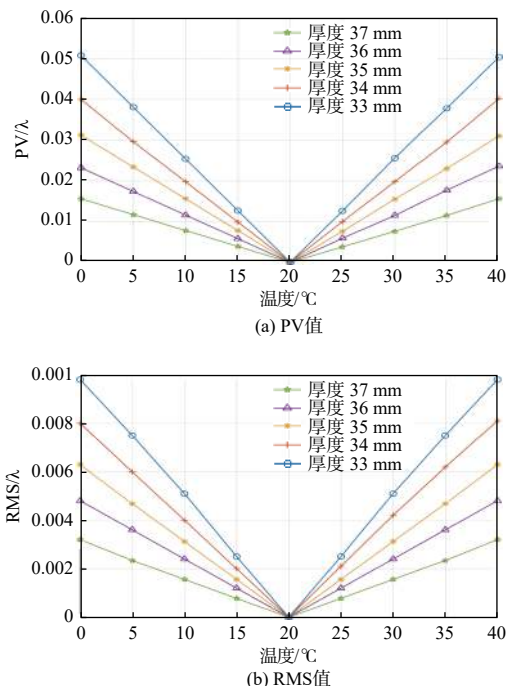


图 3 环境因素对光窗面形的影响

Fig. 3 Influence of environmental factors on surface shape of optical window

窗口内多光谱相机成像质量,降低分辨率。利用均方根波像差进行光学系统成像质量分析是较为常用的热光学分析方法之一^[13]。依据有限元软件分析光学窗口面形变化结果及波像差计算方法,计算出光学窗口在不同厚度及不同轴向温度时整个窗口的均方根波像差值,如图 4 所示。

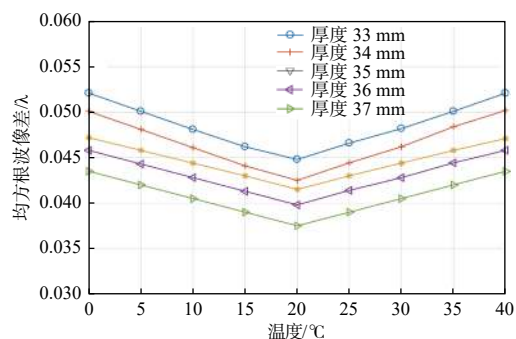


图 4 均方根波像差

Fig. 4 Wave aberration of root-mean-square

根据多光谱光学系统提出的技术要求^[14],单层光学窗口的均方根波像差值需要优于 $(1/14)\lambda$,面形 PV 值优于 $(1/10)\lambda$,面形 RMS 值优于 $(1/40)\lambda$ 。从图 4 中数据可以看出,当光学窗口厚度为 35 mm 时,其均方根波像差、面形 PV 值、面形 RMS 值优于其他厚度理论值,且变化值最小。温度场和压力场对 35 mm 厚光学窗口面形的影响以 Zernike

多项式拟合系数表示, 并将 Zernike 多项式拟合系数代入 ZEMAX 软件, 得到光学窗口在工作环境下的光学调制传递函数。以此分析环境因素对光学窗口成像质量的影响^[15], 结果如表 2 所示。

表 2 35 mm 厚光学窗口热光学分析结果

Table 2 Thermal-optical analysis results of 35 mm thick optical window

温度梯度	面形精度		均方根波像差	光学系统的调制传递函数MTF(@56 lp/mm)		
	PV(λ)	RMS(λ)	RMS(λ)	0视场	0.71视场	1.0视场
20 ℃	0.031 2	0.006 24	0.046 2	0.587 628	0.606 471	0.612 189
15 ℃	0.023 4	0.004 68	0.045 2	0.566 751	0.576 952	0.609 516
10 ℃	0.015 6	0.003 12	0.044 2	0.539 257	0.554 986	0.588 423
5 ℃	0.007 8	0.001 56	0.043 2	0.525 354	0.546 482	0.567 463
0 ℃	0	0	0.042 0	0.507 837	0.513 579	0.536 431

35 mm 厚光学窗口在引入轴向温度和压差后, 在 56 lp/mm 空间频率处 3 个视场的 MTF 值分别略有降低或升高, 但变化幅度均在 0.03 以内。MTF 设计标准为变化值小于 0.06^[16-17], 故 35 mm 厚光学窗口在该工作环境下的光学系统调制传递函数变化情况符合设计标准, 环境因素对光学系统成像性能的影响可以忽略。

3 光学窗口力热载荷测试

为模拟高超声速风洞中光学窗口承受压差及瞬时温度, 按照其环境适应性要求, 设计相应的加压试验及温度试验。根据仿真结果加工 35 mm 厚光学窗口作为试验对象。基于光学玻璃尺寸大小, 设计加工相适应的安装夹具与试验箱体, 采用 PLC 控制器对空压机以及电阻丝进行调节, 从而实现试验箱体中加压及升温等功能, 实验环境如图 5 所示。光学窗口内外压差为 40 kPa, 热载荷为 40℃, 测试时间为 10 h。采用 Zygo 干涉仪对经过加压与温度试验后的 35 mm 厚光学窗口面型精度进行多次检测, 测量云图如图 6 所示。

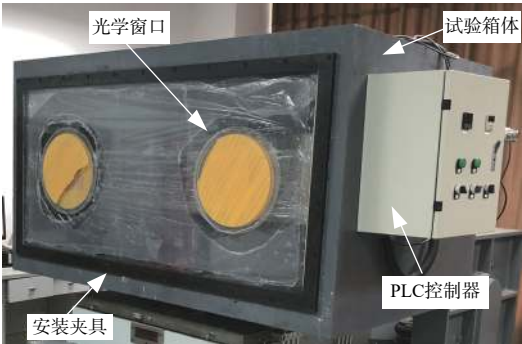
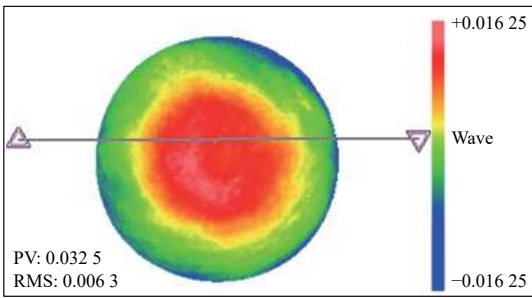
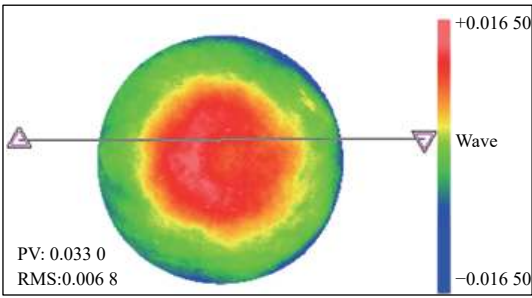


图 5 光学窗口试验箱体

Fig. 5 Optical window test box



(a) 加压



(b) 升温

图 6 Zygo 干涉仪测量结果

Fig. 6 Measurement results of Zygo interferometer

根据以上分析及试验结果可知, 基于有限元软件仿真计算得到 35 mm 厚光学窗口的面形指标变化与通过实验得到 35 mm 厚光学玻璃的面形指标基本一致, 均在合理范围内。

4 结论

本文采用断裂力学分析方法对在多环境因素下大口径 K9 拼接式光学窗口的厚度进行了分析设计, 并对不同厚度的光学窗口在一定轴向温度梯度和压差下的热光学性能进行评价。通过有限元软件分析与环境性试验相结合的方式验证了该类光学窗口光学特性的可靠性要求。实验结果表

明, 35 mm 厚光学窗口在给定的高超声速风洞环境下能够正常工作, 光学窗口的面形变化对光学窗口成像质量的影响可以忽略。

参考文献:

- [1] 徐钰蕾, 王乃祥, 许永森. 高速航空遥感器的双层光学窗口设计研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 378-386.
XU Yulei, WANG Naixiang, XU Yongsan. Design analysis of double optical window of high speed aerial remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 378-386.
- [2] 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.
LI Ming, WU Qingwen, YU Fei. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 210-213.
- [3] 吕保斌, 杨利华, 马臻, 等. 光学窗口形变对平行光管像质影响[J]. 光电技术应用, 2009, 24(2): 13-17.
LYU Baobin, YANG Lihua, MA Zhen, et al. Influence of optic window deformation on collimator image quality[J]. Electro-Optic Technology Application, 2009, 24(2): 13-17.
- [4] 刘旭堂, 高云国. 大口径激光发射窗口拼接方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 251-256.
LIU Xutang, GAO Yunguo. Study of large-diameter laser emission window stitching program[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 251-256.
- [5] 张燕, 苏瑛, 许小雷, 等. 拼接式光学窗口装配关键技术研究[J]. 应用光学, 2018, 39(6): 896-901.
ZHANG Yan, SU Ying, XU Xiaolei, et al. Research on assembly key technologies for stitched optical window[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(6): 896-901.
- [6] 方煜, 相里斌, 吕群波, 等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 220-225.
FANG Yu, XIANG Libin, LYU Qunbo, et al. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 220-225.
- [7] 史宇同. 基于SPH方法的K9玻璃加工损伤及裂纹扩展研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
SHI Yutong. Study on the machining damage and crack propagation of K9 glass based on SPH method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [8] 张庆鹏, 谭毅, 任戈, 等. 大口径光学窗口结构及支撑技术[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(12): 19-25.
ZHANG Qingpeng, TAN Yi, REN Ge, et al. Technology for the structure and supporting form of large aperture optic window[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(12): 19-25.
- [9] 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): 161-165.
ZHAO Lixin. Thermal-optical evaluation of optical window of space camera[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(10): 161-165.
- [10] 范志刚, 常虹, 陈守谦. 胶粘光学元件的热应力和变形分析[J]. 光学技术, 2011, 37(3): 366-369.
FAN Zhigang, CHANG Hong, CHEN Shouqian. Thermal stress and deformation analysis of bonded optics[J]. Optical Technique, 2011, 37(3): 366-369.
- [11] 张英屹, 苏文. 基于多变环境条件下的光学窗口设计[J]. 光电技术应用, 2007(4): 24-26.
ZHANG Yingyi, SU Wen. Design of optical window based on the changeable environment[J]. Electro-Optic Technology Application, 2007(4): 24-26.
- [12] 姬文晨, 张宇, 黄攀, 等. 轴向温度梯度对红外透镜光学性能的影响[J]. 激光与红外, 2015, 45(9): 1100-1104.
JI Wenchen, ZHANG Yu, HUANG Pan, et al. Effect of axial temperature gradient on optical performance of infrared lens[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(9): 1100-1104.
- [13] 杨烽, 张伟, 陈时锦. 空间望远镜主镜的热光学特性分析[J]. 光学技术, 2006(1): 144-147.
YANG Yi, ZHANG Wei, CHEN Shijin. Study on the thermal optics property of primary mirror applied on a space telescope[J]. Optical Technique, 2006(1): 144-147.
- [14] 王红, 田铁印. 轴向温差对空间遥感器光学系统成像质量的影响[J]. 光学精密工程, 2019, 40(2): 349-355.
WANG Hong, TIAN Tieyin. Effect of axial temperature difference on imaging quality of space remote sensor optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 40(2): 349-355.
- [15] 吴清文, 卢泽生, 卢钊, 等. 空间遥感器中窗口的热光学特性研究[J]. 光学技术, 2001(3): 260-261.
WU Qingwen, LU Zesheng, LU E, et al. Study on the thermal optics property of a window applied on a space remote sensor[J]. Optical Technique, 2001(3): 260-261.

(下转第 1132 页)