

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.039

某光机系统的窗口镜框设计

侯瑞

(上海恒益光学精密机械有限公司, 上海 201821)

摘要:在光机系统中,镜框材料的选择影响着面型质量。以实际项目为研究背景,采用6061、TC4和4J32这3种材料设计光机系统窗口镜框,并利用有限元方法对镜框组件进行热分析和静力学分析,得到其温度梯度和热力耦合后应力结果,以此评估窗口镜框的综合特性。研究表明:3种材料的镜框在太阳辐射强度 800 W/m^2 照射10 min的工况下,6061材料的镜框产生了 $7.4\text{ }^\circ\text{C}$ 的最大温度梯度,高出其余两种材料约 $3\text{ }^\circ\text{C}$;热力耦合分析中,TC4和4J32的面型RMS值均小于等于 $(1/30)\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),满足设计要求。

关键词:光学;703硅胶;6061;TC4;4J32;有限元

中图分类号:TH74 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)02-0201-05

Design of Window Frame for a Certain Optical and Mechanical System

HOU Rui

(Shanghai Hengyi Optics and Fine Mechanics Co., Ltd., Shanghai 201821, China)

Abstract:In optical mechanical systems, the selection of frame materials affects the surface quality. Taking the actual project as the research background, the window frame of the optical and mechanical system is designed with 6061, TC4 and 4J32 materials, and the thermal analysis and Statics analysis of the frame components are carried out using the finite element method to obtain the temperature gradient and stress results after thermal mechanical coupling, by which the comprehensive characteristics of the window frame is evaluated. The research shows that the maximum temperature gradient of $7.4\text{ }^\circ\text{C}$ is produced by 6061 material when the frame of three materials is exposed to 800 W/m^2 of solar Radiant intensity for 10 minutes, which is about $3\text{ }^\circ\text{C}$ higher than the other two materials. In thermal coupling analysis, the RMS of TC4 and 4J32 surface shapes is less than or equal to $(1/30)\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), which meets design requirements.

Keywords:optics; 703 rtv-silicone-rubber; 6061; TC4; 4J32; finite element analysis

0 引言

在光机结构中,金属材料除了被直接加工成镜子,更多的是被用于制作仪器的壳体、镜筒、镜框等机械部件^[1]。不同于石英、微晶等光学材料,金属材料有着更高的密度、热膨胀系数、导热率和强度^[2]。当其被用于制作镜框、镜筒等与光学部件直接接触的零件时,金属材料的选择和处理,则直接影响整个光机系统的精度和稳定性^[3]。

基于上述问题,本研究对某光机系统的窗口镜框进行了应用设计和分析,介绍了技术要求和环境,分析了硅胶收缩对镜子面型的影响,并利用有限元软件 Ansys Workbench 分别对光机结构中常用的3种材料:铝合金6061^[4]、钛合金TC4^[5]和低膨胀Fe-Ni合金4J32^[6-7]制作的镜框进行了“热-力耦合”分析,综合性能、使用环境、对面型的影响等因素对其进行分析评价,以期

光学结构设计提供有借鉴价值的参考。

1 项目概述

1.1 项目背景

项目基于某舰载光机系统上的一块窗口镜,尺寸为: $(\phi 80\times 13)\text{ mm}$,材料为石英7980,使用环境温度 $-10\text{ }^\circ\text{C}\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$,表面面型 $R_{\text{MS}}\leq(1/30)\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。

根据需方的设计要求,结构需满足下列条件:

- 1) 为避免返回光的干涉,镜片倾斜 2.3° 安装;
- 2) 为满足不同透过率,镜片可更换;
- 3) 结构需满足气密要求;

4) 结构需满足GJB 150.16A—2009《军用装备实验室环境试验方法第16部分:振动试验》^[8]试验程序I未加速的振动条件;

5) 镜片在结构表面温度 $48\text{ }^\circ\text{C}$ 、太阳辐射强度 800 W/m^2 照射10 min的环境下,面型变化不超过

作者简介:侯瑞(1992—),男,山东德州人,工程师,硕士,研究方向为光机结构设计、有限元分析,hrdjin1129@163.com。

$(1/10)\lambda (\lambda = 632.8 \text{ nm})$ 。

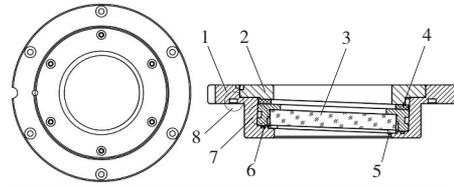
1.2 项目内容

为满足上述要求,采用“镜室+镜框”的形式,实现镜片的快速换型,镜框直接加工出 2.3° 的倾斜角,镜框与镜室之间采用聚四氟乙烯调节垫片,镜室与镜片之间采用硅胶点胶粘接,镜框和镜室分别采用 O 型圈进行端面和径向密封,方案详情如图 1 所示。

2 仿真与分析

在设计阶段利用有限元技术对结构进行热传导的评估和分析,可以有效地提升部件的可靠性

和设备整体的稳定性^[9]。因此,在结构设计完成后,对镜框结构进行了热传导和热-力耦合分析,以验证设计的合理性和可行性。表 1 所示为所用材料的相关参数。



1—镜框;2—压板;3—镜片;4—聚四氟乙烯压圈;
5—垫圈;6—镜室;7—径向密封槽;8—端面密封槽。

图 1 镜框初步结构设计

表 1 6061、TC4 和 4J32 的材料参数

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	膨胀系数/ ($1/^\circ\text{C}$)	导热系数/ ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$)	比热容/ ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
6061	6.9×10^{10}	0.33	2 700	2.3×10^{-5}	167.00	896.00
TC4	1.05×10^{11}	0.31	4 420	8.0×10^{-6}	5.50	612.00
4J32	1.4×10^{11}	0.32	8 100	1.0×10^{-6}	13.90	460.00
7 980	7.3×10^{10}	0.16	2 200	5.2×10^{-7}	1.38	0.77
PTFE	2.8×10^8	0.40	2 250	1.1×10^{-4}	0.24	1 050.00

2.1 胶层收缩力仿真

在分析镜框材料对镜子光束质量影响之前,首先应排除硅胶固化收缩过程对镜子本身的影响。为保证黏接强度和结构柔性,硅胶选用 703 硅胶^[10],其参数如表 2 所示。

表 2 703 硅胶参数

参数	数值及说明
表面固化时间/min	3~30
拉伸强度/MPa	≥ 0.8
剪切强度/MPa	≥ 0.85
耐温/ $^\circ\text{C}$	-60~160
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^3$)	1.02
弹性模量/MPa	1.2
泊松比	0.48
外观	黑色黏稠液

首先对固化过程进行等效计算。由文献[11]可知,703 硅胶的胶层固化收缩率 45%。因此,可利用线胀系数进行复核,获取测试用线胀系数如下:

$$\pi \times [(1-c)^2 \times r_1^2 - (1-c)^2 \times r_2^2] \times (1-c) \times h = 55\% \times V \quad (1)$$

式中: r_1 为胶层外圈半径,41.5 mm; r_2 为胶层内圈半径,40 mm; c 为线胀系数, $1/^\circ\text{C}$; h 为胶层高度,5 mm; V 为胶原体积,1 920.3 mm^3 。

文献[12-13]指出:进行光机系统分析时,不要忽略胶层影响;胶层与镜片/镜筒之间千万不能设置为绑定接触;胶层厚度很薄,可以采用实体单元,厚度方向网格层数不少于 4 层^[14]。因此,本研究胶层采用 6 面体,厚度方向 6 层,网格尺寸约 0.25 mm,如图 2 所示。

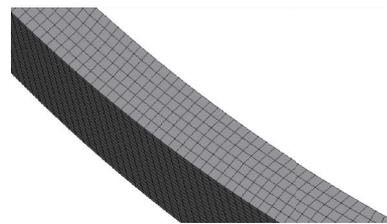


图 2 胶层网格划分

最终计算得出等效线胀系数 $c = 0.1807/^\circ\text{C}$ 。将上述获得的线胀系数带入硅胶参数进行热仿真,当温度变化为 1°C 时,得到结果如图 3 所示。

从上述分析可以看出:胶层收缩导致的应力很小,约 0.08 MPa,对面型影响约 5.7 nm,只占总体变形限值的 9%(5.7/63.28)左右。

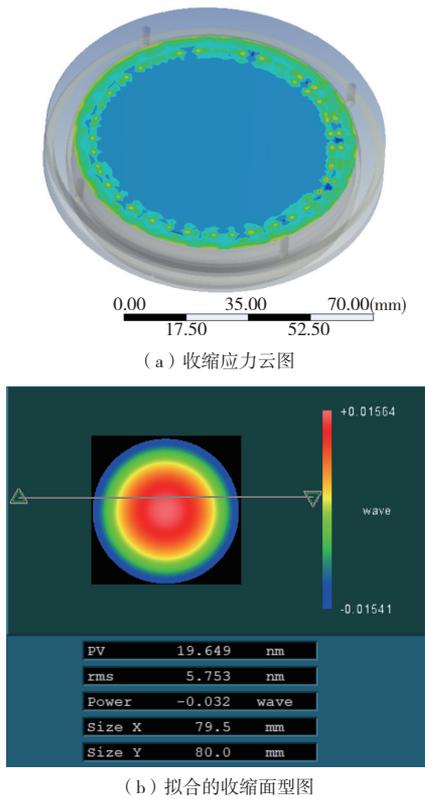


图3 收缩应力云图及拟合的收缩面型图

2.2 热分析结果

确认了胶层收缩对镜子本身影响较小后,首先对结构进行热传导的分析和评估,考察结构的温度梯度分布情况^[15]。3种材料镜框及镜片温度分布如图4—图6所示。

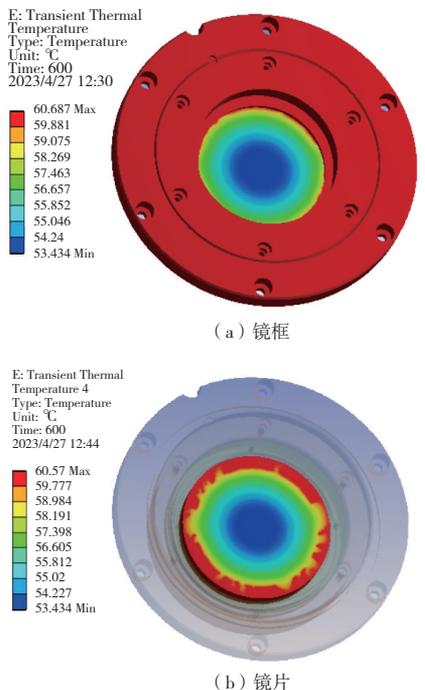


图4 6061镜框及镜片温度分布图

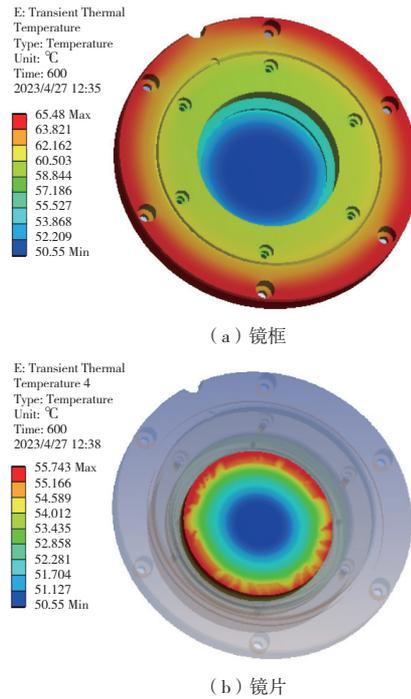


图5 TC4镜框及镜片温度分布图

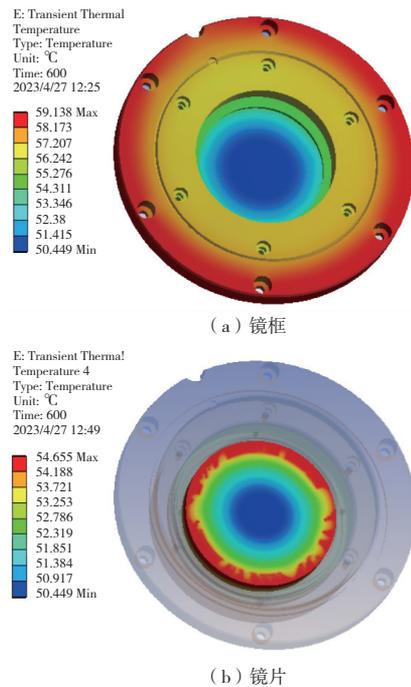


图6 4J32镜框及镜片温度分布图

从图4、图5和图6看出:在受到10min的热辐射后,装在3种镜框中的镜片出现了不同程度的温度梯度:温度最高的是被装在6061镜框中的镜片,周围温度达到了60.6℃,温差为7.14℃;温度最低的是被装在4J32镜框中的镜片,周围温度达到了54.6℃,温差为4.2℃。就温度变化梯度而言,4J32在3种材料中表现出更小的温度差。

2.3 热-力耦合分析结果

将上述热分析结果数据导入静力学分析中,再施加固定约束、重力加速度,分别考察镜片的应力和变形情况,如图 7—图 9 所示。

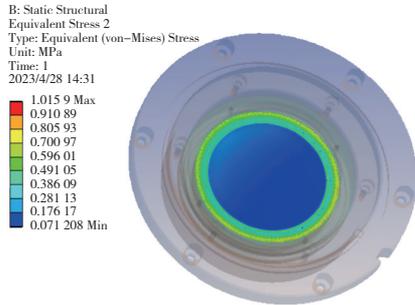


图 7 6061 镜片应力云图

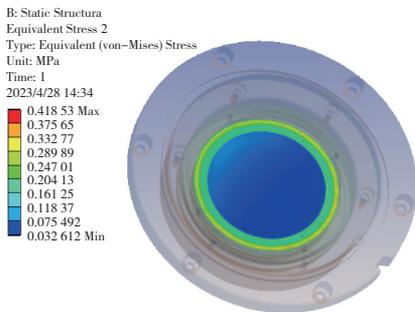


图 8 TC4 镜片应力云图

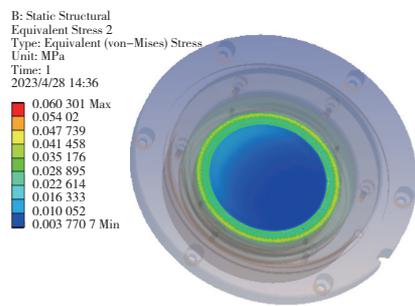
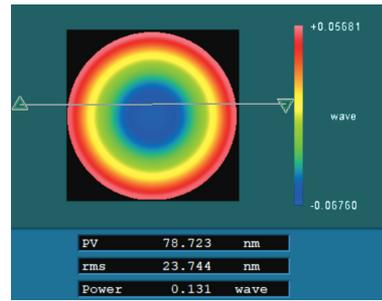
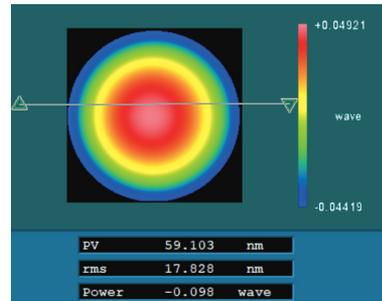


图 9 4J32 镜片应力云图

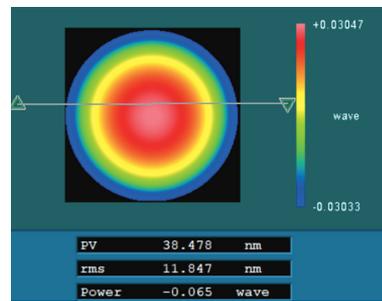
从图 7、图 8 和图 9 看出,装在 3 种镜框中的镜片出现了不同程度的应力,应力趋势相似,应力最大的是被装在 6061 镜框中的镜片,约受 1 MPa 应力;最小的是被装在 4J32 镜框中的镜片,约受 0.06 MPa 应力。进一步将镜面的变形数据以 x 、 y 、 z 三坐标点的形式导出,导入 zygo 分析软件进行数据拟合^[16],得到数据如图 10 所示。拟合数值结果汇总如表 3 所示。



(a) 6061



(b) TC4



(c) 4J32

图 10 镜片装在 3 种材料中的等效面型图

表 3 RMS 及 PV 拟合数值结果汇总 单位: nm

项目	高温水平	高温竖直	低温水平	低温竖直
RMS	7.187	6.965	6.596	6.444
PV	50.934	50.789	49.631	49.486

可以看出:面型 RMS 值最大的是装在 6061 镜框中的镜片,约 23.74 nm,超过了要求的($(1/30)\lambda \approx 20$ nm);TC4 和 4J32 镜框中的镜片,面型 RMS 值分别为 17.83 nm 和 11.85 nm,均满足设计要求。

考虑到使用环境和结构的轻量化,TC4 组件质量只占 4J32 组件质量的 60%左右,且 TC4 不易生锈和腐蚀。综合考虑,本项目中窗口镜框采用 TC4 作为镜框材料最为合适。

3 应用结果

经过上述理论校核后,对项目进行了实施:以锻打 TC4 作为镜框主材料,环形分层式点胶法固

定镜片,氟橡胶 O 型圈作为密封。在装配和点胶固化 48 h 后,进行了 2 次、间隔 1 h 的实物面型检测,RMS 值只相差约 1 nm,如图 11 所示。在实际使用中,暴露在空气环境中,镜框未发生漏气、生锈、腐蚀等问题,完成效果如图 12 所示。

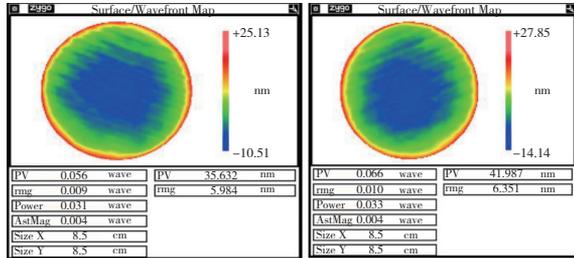


图 11 实物面型检测图

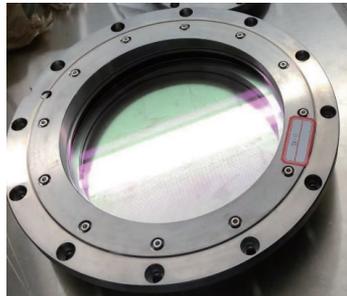


图 12 窗口镜框实物图

4 结语

本文以某航天项目为例,分别采用 6061、TC4 和 4J32 3 种材料设计了光机系统的窗口镜框,按实际使用工况对比分析后,得到以下结论:

1) 对于本研究的镜框组件,在均匀定量点胶后,胶层收缩对面型 RMS 影响占 9% 左右;

2) 在本研究中,6061 铝合金密度虽小,但相对于 TC4 和 4J32 材料,其在受到外部温度时,温度梯度较大,高出其他材料约 3℃;同时对镜片膨胀(或收缩)产生的应力较大,约是其他材料的 2 倍;

3) 4J32 材料在高低温环境中表现出色,但密度太大,加上易生锈腐蚀,不适合用作本研究的镜框材料;

4) 本研究中采用的思路、步骤和分析方法,适用于大部分圆形平面反射镜、透镜、球面镜和非球面镜的镜框设计;

5) 本研究未考虑在气密环境下,内外部气压对镜子面型的影响,后续将进一步分析研究。

本研究最终实施并达到了预期的效果,为镜框设计提供了一定的参考。

参考文献:

- [1] YODER P, VUKOBRATOVICH D. Opto - mechanical systems design, two volume set[M]. [S. l.: s. n.], 2015.
- [2] 谭淞年. 基于增材制造的金属反射镜关键技术研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.
- [3] 王建鹏. 铝材料光学系统光机设计及其力热特性分析[D]. 长沙:国防科技大学, 2018.
- [4] 曹云丽, 余毅权, 臧传相. 新型铝合金材料制动盘热-结构耦合分析[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(1): 164-167.
- [5] 吴韬文, 王宁, 陈明和, 等. TC4 钛合金高温流变行为及微观组织演变研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(6): 36-39.
- [6] 半小龙, 于一鹏, 王嘉彬. 低膨胀合金磁特性及其温度稳定性研究[J]. 金属功能材料, 2020, 27(4): 71-75.
- [7] 侯雅青, 苏航, 张浩, 等. 基于激光选区熔融的高通量制备系统设计及样品制备[J]. 金属功能材料, 2021, 28(4): 50-58.
- [8] GJB 150. 16A—2009 军用装备实验室环境试验方法第 16 部分: 振动试验[S].
- [9] 侯瑞. 变速箱差壳胀套设计及有限元分析[J]. 金属功能材料, 2021, 28(2): 78-82.
- [10] 曹永兴. 单包装室温硫化硅橡胶: 南大 703 704 705 胶[J]. 江苏化工, 1978, 6(2): 16-18.
- [11] 徐尚仲, 陈炳耀, 姚荣茂, 等. 单组分脱醇型室温硫化硅橡胶贮存稳定性的研究[J]. 化学与粘合, 2023, 45(1): 42-45.
- [12] 李福, 阮萍, 赵葆常, 等. 胶固紧平面反射镜的有限元分析[J]. 光学技术, 2006, 32(6): 896-899.
- [13] HATHEWAY A E. Analysis of adhesive bonds in optics[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1993, 1998: 2-7.
- [14] MICHELS G J, GENBERG V L, DOYLE K B. Finite element modeling of nearly incompressible bonds[J]. Proc Spie, 2002, 4771: 287-295.
- [15] 史梦飞, 高天元, 韩旭, 等. 梯度温度场下热不敏系统主反射镜性能的研究[J]. 中国测试, 2022, 48(12): 80-85.
- [16] 郭巧双, 王敏, 廖晓东. 基于插值法波面拟合的球面光学元件检测[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 566-571, 595.

收稿日期: 2023-06-29