

文章编号 1004-924X(2026)01-0026-09

基于增材制造的碳化硅双面反射镜设计与 可靠性验证

王成彬*, 孙胜利, 孙小进, 马孝浩, 胡 凯

(中国科学院 上海技术物理研究所 红外探测全国重点实验室, 上海 200083)

摘要:为实现同轴四反光学系统中主镜和四镜所构成的 $\Phi 516$ mm 双面共体反射镜轻量化、高刚度的设计目标,提出一种在传统轻量化设计基础上,融合多参数优化与碳化硅增材制造技术的方法。基于工程经验建立反射镜初始模型,选择主要结构尺寸建立多参数优化模型,并基于多目标遗传算法进行结构参数优化,优化后的反射镜质量为 6.8 kg,相对初始方案降低 32.6%。最后,完成碳化硅双面反射镜 3D 打印及结构模态测试,所得一阶频率为 1 964 Hz。对两个镜面光学加工后,开展了重力影响试验、真空高低温试验和振动试验。结果表明,试验前后反射镜面形精度最大变化为 0.001λ ($\lambda = 632$ nm)。碳化硅双面反射镜结构设计和增材制造工艺具有良好的可靠性和稳定性。

关键词:增材制造;碳化硅;双面反射镜;轻量化;可靠性验证

中图分类号:TH703 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20263401.0026 CSTR:32169.14.OPE.20263401.0026

Design and reliability verification of SiC double-sided reflector based on additive manufacturing

WANG Chengbin*, SUN Shengli, SUN Xiaojin, MA Xiaohao, HU Kai

(Nation Key Laboratory of Infrared Detection, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

* Corresponding author, E-mail: sitp305@163.com

Abstract: To meet the requirements of high lightweighting and high stiffness for a $\Phi 516$ mm double-sided integral reflector-comprising the primary and quaternary mirrors in a coaxial four-mirror optical system-a method integrating multi-parameter optimization with silicon carbide (SiC) additive manufacturing is proposed based on conventional lightweight design principles. First, an initial reflector model was established from engineering experience, and key structural dimensions were selected to formulate a multi-parameter optimization framework. The parametric model was then optimized using a multi-objective genetic algorithm. The optimized reflector weighs 6.8 kg, achieving a 32.6% reduction relative to the initial design. After completion of 3D printing, a structural modal test was conducted, yielding a first-order natural frequency of 1 964 Hz. Following optical processing of both mirror surfaces, gravity impact, vacuum high - low temperature, and vibration tests were performed. The maximum change in surface figure accuracy be-

收稿日期:2025-10-09;修订日期:2025-11-05.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2021YFB3701500)

fore and after these tests satisfied the specified requirements. These results confirm the reliability and stability of the SiC double-sided reflector design and demonstrate the robustness of the SiC additive manufacturing process for high-performance integral reflectors.

Key words: additive manufacturing; SiC; double-sided reflector; light weighting; reliability verification

1 引言

在同轴四反光学系统中,将主镜和四镜设计成双面共体反射镜能够提高系统的紧凑性和装调效率。但双面共体反射镜有两个光学镜面精度和相对位置的约束,从而增加了结构轻量化设计的难度。随着对光学遥感器件质量、制造效率、发射成本需求的不断提升,科研人员在反射镜材料和轻量化方法上不断地探索,以寻求高精度轻量化的反射镜设计方法。然而,基于经验的传统轻量化设计的反射镜容易实现镜坯的制造,却很难找到最佳轻量化方案。采用现代拓扑优化设计方法所设计的轻量化结构往往因其结构复杂难以通过传统成形工艺制造实现。马霖将186 mm口径同轴四反光学系统主、四镜设计为双面共体反射镜。该双面反射镜材料为铝合金6061-T6,镜坯采用传统铣削加工成形,提高了结构的紧凑性^[1]。近年来,国内外在碳化硅反射镜结构的增材制造技术有了新突破。通过碳化硅增材制造技术加工出复杂碳化硅结构。为碳化硅结构设计提供了更多的自由度^[2-4]。在反射镜上,国内主要集中在铝反射镜的增材制造上^[5]。基于碳化硅增材制造技术的双面共体反射镜报道很少。

为了实现碳化硅双面反射镜高精度、高刚度、轻量化的目标,本文提出一种融合多参数优化与碳化硅增材制造技术的反射镜轻量化方法,并以碳化硅双面反射镜为实施对象进行了设计和验证。基于双面反射镜的初始方案,建立了以刚度和重力变形为目标的多参数优化模型。基于优化后的结构方案,采用碳化硅增材制造技术完成双面反射镜镜坯的制造,并加工了光学镜面。通过模态测试、重力影响测试、真空高低温和振动试验考核,验证了反射镜结构设计和碳化硅增材制造工艺的可靠性。

2 初始结构设计

2.1 约束条件

碳化硅双面反射镜结构设计和分析要从质量、光学面形精度要求、反射镜安装接口形式、制造工艺等角度出发,设计约束如下:

(1) 根据项目指标,要求碳化硅双面反射镜质量 ≤ 7 kg;

(2) 光轴水平状态,碳化硅双面反射镜在重力作用下面形精度变化优于12 nm;

(3) 碳化硅双面反射镜支撑方式为周向3点支撑,预留匹配的安装接口。

2.2 结构建模

研究验证对象为同轴四反光学系统的光学元件,光学系统光路如图1所示。光学系统由第一反射镜(简称“主镜”,代号S1)、第二反射镜(简称“次镜”,代号S2)、第三反射镜(简称“三镜”,代号S3)和第四反射镜(简称“四镜”,代号S4)。其中,主镜口径为516 mm,四镜口径为320 mm。

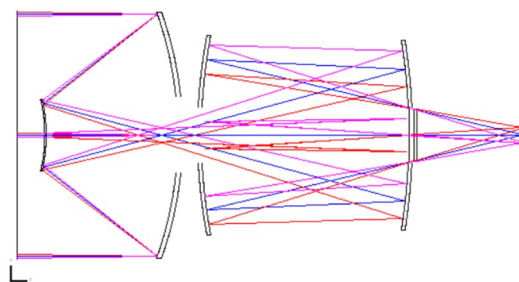


图1 同轴四反光路

Fig. 1 Optical path of coaxial four-mirror

本文将主镜和四镜设计成双面共体反射镜结构。双面共体反射镜是将两个反射镜面加工到同一反射镜结构上,通过结构和光学加工以保证两镜面的相对位置。该方案可减少反射镜支撑结构数量,提高相机结构的紧凑性,降低反射镜组件重量。然而,双面共体反射镜在结构设

计和实现上也面临一定难度;一方面,碳化硅双面反射镜与传统单镜面反射镜相比,碳化硅双面反射镜设计约束较多;另一方面,光学设计中主镜和四镜的镜面间距决定了碳化硅双面反射镜的厚度,在此基础上,要保证一定的反射镜结构刚度,才能同时保证两个镜面的面形精度。此外,双面反射镜可设计、可轻量化设计空间少,如果碳化硅反射镜采用常压烧结或反应烧结,两种工艺过程都是通过铣削加工成形,受铣削可加工空间限制,对镜坯轻量化结构形式有很多限制和约束,铣刀很难进行封闭或半封闭轻量化孔的加工。而碳化硅增材制造技术不仅增加了结构设计的自由度,可实现复杂的形状和腔体结构的制造,还能够提高碳化硅镜坯的制造效率^[6-7],特别适合高轻量化、高刚度、双面高精度的双面反射镜制造。

同轴四反光学系统主镜和四镜的口径、镜面间距确定了碳化硅双面反射镜的厚度和直径。在光学设计时,为了克服其在地面重力变形,通过光学和结构协同设计,确定合理的主镜和四镜间距,根据经验公式对主镜和四镜间距进行评估,间距决定了双面反射镜的径厚比。

反射镜的径厚比与自重变形的关系公式为:

$$\delta = \frac{3\rho g a^4}{16Et^2} = \frac{3\rho g \Delta^2 D^2}{256E}, \quad (1)$$

其中: δ 为最大重力变形; ρ 为材料密度; a 为镜子半径且 $a=D/2$; t 为镜子厚度; E 为弹性模量; g 是重力加速度; Δ 为径厚比。根据经验公式初步计算,碳化硅双面反射镜的径厚比为 10,此时其重力变形小于光学设计要求。

基于相机结构布局,碳化硅双面反射镜采用周向 3 点支撑固定的方式,即在反射镜周向均布 3 个安装位置。在双面反射镜安装位置胶结与碳

化硅热膨胀系数匹配的殷钢件,通过殷钢件提供对外安装接口。

碳化硅双面反射镜的前后两个面均为镜面,若采用传统开放式轻量化孔方案,则可轻量化设计区域有限。碳化硅增材制造工艺为设计半封闭腔体形轻量化结构提供了支撑,可在保证反射镜刚度下,提高结构轻量化率。在反射镜轻量化研究方面,已经有很多理论方法、经验公式以及应用实践。反射镜轻量化结构形式的选择根据反射镜面形精度、外形轮廓、轻量化率、反射镜刚度等多种因素综合考虑开展工作,常见的有四边形、三角形、六边形,以及几种形状的混合形等轻量化结构形式。三角形轻量化孔以其轻量化、高刚度的特点,被广泛应用于反射镜轻量化结构形式。本文研究的碳化硅双面反射镜为圆形对称结构,更适合采用三角形轻量化结构。在肋板交叉位置设计圆形轻量化结构,减小肋板交叉处应力集中。同时,依托碳化硅增材制造加工优势,在肋板上开长圆形通孔。在外侧肋板上开圆形孔,进一步提高反射镜轻量化率。基于碳化硅双面反射镜接口、布局、精度、工艺等约束,建立碳化硅双面反射镜的初始方案模型,如图 2 所示。碳化硅双面反射镜的初始结构参数如表 1 所示。

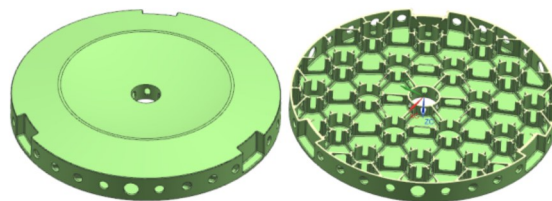


图 2 碳化硅双面反射镜初始轻量化结构模型

Fig. 2 Initial lightweight structural model of SiC double-sided reflector

表 1 碳化硅双面反射镜的初始主要结构参数

Tab. 1 Initial main structural parameters of SiC double-sided reflector

参数	肋板间距/mm	内肋板厚度/mm	外肋板厚度/mm	镜面板厚度/mm	反射镜质量/kg
数值	86	3.5	4.5	4.6	9.6

2.3 仿真分析

反射镜重力作用下的面形精度变化是设计过程中重点关注的指标。针对碳化硅双面反射镜初始结构方案,建立了有限元分析模型,仿真

在重力作用下反射镜的镜面变形,基于仿真镜面变形数据,利用求解 Zernike 多项式系数的方法拟合反射镜面形精度的变化。表 2 给出了碳化硅双面反射镜在重力作用下的两个反射镜面的面

形精度变化。其中,碳化硅双面反射镜坐标系定义为: X, Y 分别代表双面反射镜径向正交的两个方向, Z 轴为光轴方向。

表 2 重力作用下的反射镜面形精度变化

Tab. 2 Changes in surface shape accuracy of reflectors under gravity load

镜面	工况	面形精度变化 RMS/nm
S1	Y	1.36
	X	1.36
S4	Y	0.34
	X	0.34

自由模态反应了结构的动力学特性,是开展结构优化的重要依据之一。对初始方案碳化硅双面反射镜进行了自由模态仿真分析,其一阶自由模态频率为 2 264 Hz,具有较高的频率特性,图 3 给出了其一阶自由模态振型。

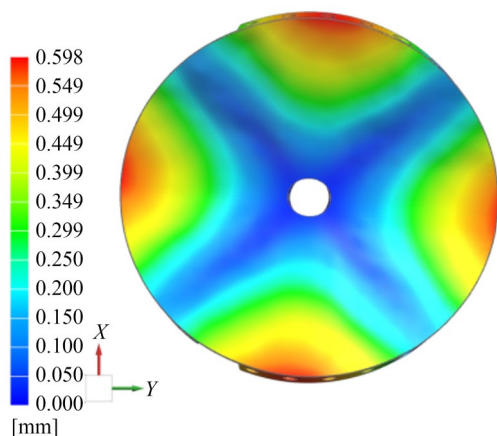


图 3 初始方案碳化硅双面反射镜的一阶自由模态振型

Fig. 3 First-order free modal shape of SiC double-sided reflector in initial scheme

3 多参数建模和优化

3.1 参数化建模

碳化硅双面反射镜初始结构是基于传统公式和工程经验完成的,是进一步开展结构优化的基础。为了实现模型的快速迭代优化,采用参数化模型的方法。参数化模型是通过参数驱动,自

动调整预结构参数的数值,无需重新绘制整体结构,从而实现设计方案的快速迭代与优化。而本文基于传统经验建立的模型结构形式简单,也便于进行参数化尺寸约束,在初始方案模型基础上进行结构参数建模,如图 4 所示。

根据碳化硅双面反射镜的结构形式,将肋板间距、肋板厚度、外肋板厚度和镜面背部球面直径作为参数尺寸进行结构参数化。建立相应的变量参数 P 如下:

$$P = (D_1, H_1, H_2, SR_1, SR_2)^T, \quad (2)$$

其中:对肋板间距 D_1 、肋板厚度 H_1 、外肋板厚度 H_2 、镜面背部球面直径 SR_1 , 镜面背部球面直径 SR_1, SR_1 和 SR_2 决定了相应镜面面板厚度。根据双面反射镜的结构形式、镜坯加工工艺、可靠性等约束和限制,对各参数给定优化范围: D_1 (80~100 mm), H_1 (2~4 mm), H_2 (3~6 mm), SR_1 (620.5~624.5 mm), SR_2 (1 586.5~1 590.5 mm)。

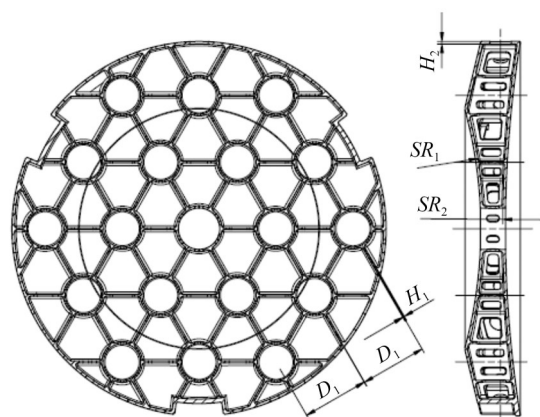


图 4 碳化硅双面反射镜的参数化尺寸

Fig. 4 Parametric dimensions of SiC double-sided reflector

3.2 基于多目标遗传算法的结构参数优化

碳化硅双面反射镜结构优化涉及多尺寸参数,以及两个反射镜面面形精度、反射镜质量多优化目标。而第二代多目标遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)的结构优化方法正适合多目标、多参数的优化。NSGA-II是NSGA的改进算法, $O(MN^2)$ 为总计算复杂度,其中 M 为优化目标总数, N 为种群规模,通过复杂性的快速非支配排序机制、优势点保持和无外部参数的拥挤距离计算方法,来寻找

多目标约束问题的 Pareto 最优集,从而在该解集中选出一个最优解。NSGA-II 算法具有更高的运算效率和稳定性^[8-10]。

参数优化的目标是质量最小、面形最优。其中,反射镜面形用 Zernike 进行拟合,并在拟合过程获得反射镜面形的均方根 RMS。基于碳化硅双面反射镜的参数化模型建立,其目标优化数学模型简述如下:

设计变量:

$$P=(D_1,H_1,H_2,SR_1,SR_2)^T. \tag{3}$$

优化目标:

$$\text{Min}(S_1\text{RMS},S_2\text{RMS},m). \tag{4}$$

优化约束:

$$\begin{cases} D_1\in(80,100) \\ H_1\in(2,4) \\ H_2\in(3,6) \\ SR_1\in(620.5,624.5) \\ SR_2\in(1\,586.5,1\,590.5) \\ \text{RMS}\leqslant 12\text{ nm} \\ m\leqslant 7\text{ kg} \end{cases} \tag{5}$$

以镜面面形精度 RMS 优于 12 nm,反射镜质量 $m\leqslant 7\text{ kg}$ 为目标,求解迭代碳化硅双面反射镜结构的合适参数组合。经过多轮迭代优化,碳化硅双面反射镜各参数收敛如表 3 所示。优化后双面反射镜的两个面形如表 4 所示。

表 3 优化后碳化硅双面反射镜主要结构参数

Tab. 3 Main structural parameters of optimized SiC double-sided reflector

	肋板间距 D_1/mm	内肋板厚度 H_1/mm	外肋板厚度 H_2/mm	镜面板厚度 A_3/mm	反射镜重量 m/kg
数值	90.2	2.6	3.4	3.5	6.7

表 4 优化后重力作用下的反射镜面形精度变化

Tab. 4 Changes in surface shape accuracy of reflectors under gravity load (After optimization)

镜面	工况	面形精度变化 RMS/nm
S1	Y	1.62
	X	1.61
S4	Y	0.61
	X	0.61

基于碳化硅双面反射镜多参数模型,利用第二代多目标遗传算法对各参数进行迭代优化后,重力作用下的反射镜面面形未有明显变化,但反射镜质量降至 6.8 kg,其反射镜面密度也达到了 24.5 kg/m^2 ,与传统轻量化方式相比,效果显著,实现了较低的面密度,相对初始状态 9.6 kg 降低了 32.6%。

对优化后的反射镜进行了自由模态仿真分析。碳化硅双面反射镜一阶自由模态频率为 1 977 Hz,优化后反射镜仍有较高的频率特性,图 5 给出了其一阶自由模态振型。

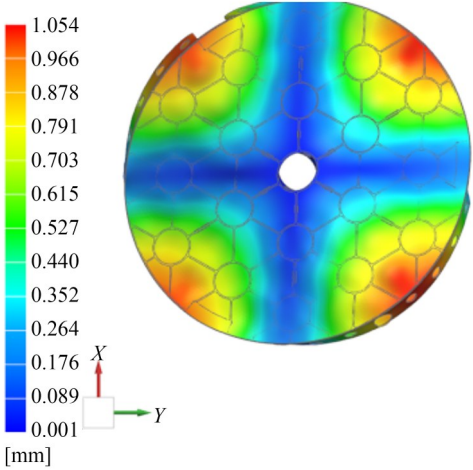


图 5 优化后碳化硅双面反射镜一阶自由模态振型
Fig. 5 First-order free modal shape of optimized SiC double-sided reflector

4 模态测试

4.1 测试原理

碳化硅双面反射镜的一阶频率表征了碳化硅双面反射镜的结构刚度。两个镜面在重力作用下的面形精度与反射镜镜体的刚度直接相关。为了验证仿真分析模型,以获得碳化硅双面反射

镜的频率特性,对碳化硅双面反射镜进行了自由模态测试。

试验模态分析方法有主模态法、频响函数法等。其中,主模态法试验要求较高,采用多点激励使结构模态振动,根据结构振动形态求得模态参数。频响函数法一般先将结构划分不同区域,对区域布置测点,利用单点激振获得结构的频响函数,再由频响函数来确定模态参数。模态参数主要包括固有频率 ω_r ,固有振型 $\{\varphi\}_r$,模态质量 m_r ,模态刚度 k_r 和模态阻尼 c_r 。固有频率和固有振型能直接反映系统的振动特性,在工程应用中尤为重要。

对于多自由度系统,结构的动态特性可由微分方程矩阵描述:

$$\begin{cases} [M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\}=\{F\}, \\ \{x(0)\}=\{x_0\}, \{\dot{x}(0)\}=\{\dot{x}_0\} \end{cases}, \quad (6)$$

其中: F 为激振力向量; $x, \dot{x}, \ddot{x}$ 分别位移、速度和加速度响应矢量; M, K, C 分别为结构的质量,刚度和阻尼矩阵。对上式两边进行拉氏变换得到:

$$(s^2 M + sC + K)X(s) = F(s), \quad (7)$$

其中: $s = \sigma + j\tau$ 为拉氏变换因子, $X(s)$ 和 $F(s)$ 分别为位移响应和激励响应的拉氏变换(初始条件为零)。

$$H_p(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\varphi_{ir} \varphi_{pr}}{m_r [(\omega_r^2 - \omega^2) + j2\xi_r \omega_r \omega]}, \quad (8)$$

其中: $\omega_r^2 = k_r/m_r$, $\xi_r = c_r/(2m_r \omega_r)$, m_r, k_r 分别为第 r 阶模态质量、模态刚度, $\omega_r, \xi_r, \varphi_r$ 分别为第 r 阶模态频率、模态阻尼比和模态振型。

4.2 测试结果

在模态测试时,反射镜处于悬挂状态。依据仿真分析结果,在双面反射镜上共布置9个加速度传感器测点,通过对反射镜的锤击,数据采集仪接收加速度传感器的响应信号,处理得到其对应振幅和频率,并计算其阻尼系数。

将每个测点的3次锤击信号引起的传感器响应信号经频域转换,可得到不同频率下锤击响应下的振幅。经分析计算得到碳化硅双面反射镜的一阶频率及阻尼比如图6和表5所示。

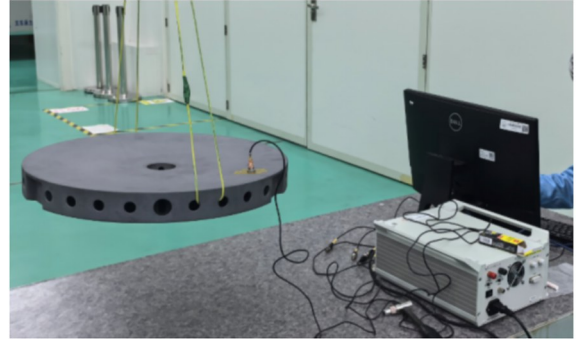


图6 碳化硅双面反射镜模态测试

Fig. 6 Modal test of SiC double-sided reflector

表5 碳化硅双面反射镜模态测试结果

Tab. 5 Modal test results of SiC double-sided reflector

模态	频率/Hz	阻尼比/%
1	1 964	0.159

5 重力影响验证

根据光学设计要求,分别对碳化硅双面反射镜的两个镜面进行了光学加工。各镜面经过磨粗加工、粗抛光、镜面改性、精抛光等工序,直至面形精度达到光学设计要求,加工过程反射镜面形精度稳定收敛。

为了验证重力对碳化硅双面反射镜面形精度的影响,在碳化硅双面反射镜光轴水平状态,绕光轴旋转 180° ,改变重力作用方向。在不同角度时,用激光干涉仪测试反射镜两个反射镜的面形精度。在初始 0° 和 180° 状态下的两个镜面的干涉图如图7和图8所示。

碳化硅双面反射镜旋转 180° 测试时,S1镜面面形精度未发生变化,S4镜面变化RMS为

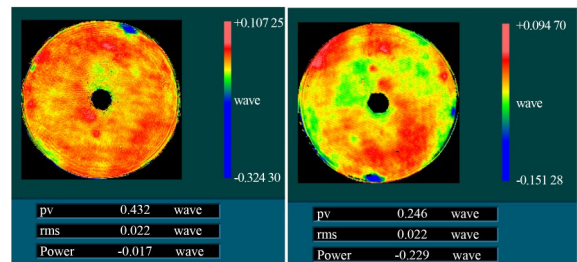


图7 镜面S1初始状态和旋转 180° 干涉仪测量面形

Fig. 7 Interferometer-measured surface shape of mirror S1 in initial state and after 180° rotation

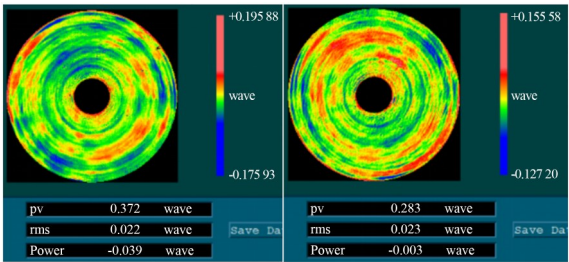


图 8 镜面 S4 初始状态和旋转 180°干涉仪测量面形
Fig. 8 Interferometer-measured surface shape of mirror S4 in initial state and after 180° rotation

$0.001\lambda(\lambda=632\text{ nm})$ 。重力作用方向改变没有对反射镜面形精度产生明显影响,表明碳化硅双面反射镜具有良好的刚度特性。

6 力热可靠性验证

6.1 真空高低温试验

在真空环境下,碳化硅双面反射镜镜坯受交变温度载荷作用或材料放气影响,镜坯内部残余应力可能重新分布,导致镜面面形精度退化问题。为验证结构和镜坯制造工艺的可靠性,在完成镜面光学加工后进行了真空高低温循环试验。试验时,将碳化硅双面反射镜放置于真空环境模拟器中,如图 9 所示。按照 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行高低温交变。其中,在高、低温分别保温 4 小时,交变进行 5 个循环。

试验后用干涉仪对双面反射镜面形精度进行了测试,并保持与试验前测试状态一致。真空

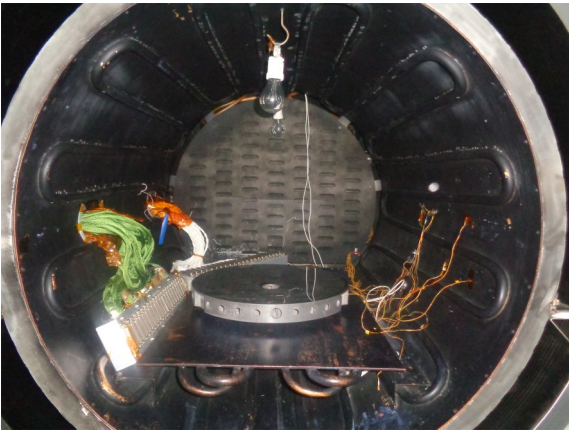


图 9 碳化硅双面反射镜真空高低温试验
Fig. 9 Vacuum high-low temperature test of SiC double-sided reflector

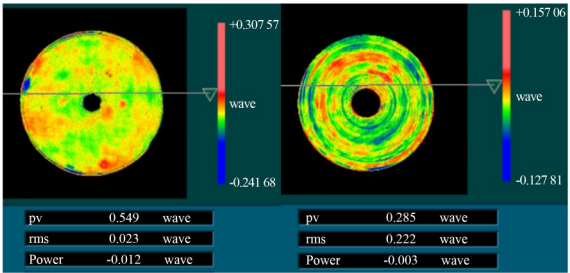


图 10 镜面 S1 和 S4 热真空后测量面形
Fig. 10 Measured surface shape of mirrors S1 and S4 after thermal vacuum test

高低温试验前后反射镜面形精度变化 RMS 为 $0.001\lambda(\lambda=632\text{ nm})$ 。面形精度未发生明显变化,验证了镜坯结构的稳定性。

6.2 振动试验测试

碳化硅双面反射镜在应用过程会经历运输、火箭发射过程带来的振动,为了提前发现产品结构和材料缺陷,对碳化硅双面反射镜进行了振动试验,如图 11 所示。表 6 和表 7 为正弦和随机振动条件。

表 6 碳化硅双面反射镜正弦振动试验条件

Tab. 6 Sinusoidal vibration test conditions of SiC double-sided reflector

频率/Hz	量级	备注	扫描速率
5~10	17.25 mm	P-P	2 oct/min
10~100	5 g		

表 7 碳化硅双面反射镜随机振动试验条件

Tab. 7 Random vibration test conditions of SiC double-sided reflector

频率范围/Hz	功率谱密度	总均方根加速度	试验方向	试验时间
20~80	+3 dB/oct	RMS 6 g	X, Y, Z 三轴向	2 min/轴向
80~350	0.04g ² /Hz			
350~2 000	-3 dB/oct			

试验时,反射镜通过支撑工装固定到振动台上。用激光干涉仪对双面反射镜面形精度进行了测试,并保持与试验前测试状态一致,结果如图 12 所示。振动试验后碳化硅双面反射镜的两个镜面面形精度变化 RMS 为 $0.001\lambda(\lambda=632\text{ nm})$,验证了镜坯结构的稳定性和强度的可靠性。



图11 碳化硅双面反射镜振动试验

Fig. 11 Vibration test of SiC double-sided reflector

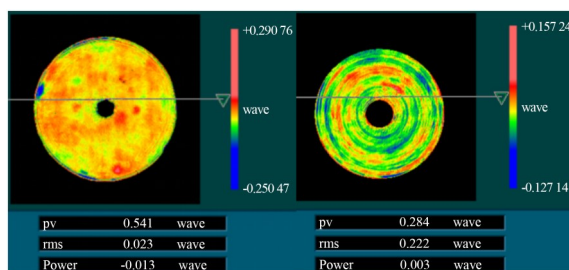


图12 镜面S1和S4振动试验后测量面形

Fig. 12 Measured surface shape of mirrors S1 and S4 after vibration test

7 结 论

本文为满足同轴四反光学系统中由主镜和

四镜构成的双面共体反射镜轻量化、高刚度的设计要求,提出一种在传统轻量化设计基础上融合多参数优化与增材制造技术的方法。优化设计后的反射镜质量为6.8 kg,相对初始方案降低32.6%。优化后重力径向作用下反射镜面形精度最大为1.36 nm。为验证设计和碳化硅增材制造的可靠性,完成双面共体碳化硅3D打印后,对其镜坯进行模态测试,一阶频率为1 964 Hz,具有良好的结构刚度。镜面光学加工面形精度RMS达到了 0.022λ ($\lambda=632\text{ nm}$)。通过反射镜旋转 180° 的方法验证重力对面形精度的影响,结果表明,重力对反射镜面形精度没有明显影响。通过真空高低温试验和振动力学试验验证了结构设计和碳化硅增材制造工艺的可靠性。本文在传统轻量化设计经验基础上,融合了现代多参数优化与增材制造技术的碳化硅反射镜轻量化方法,既继承了碳化硅反射镜结构设计传统经验,又结合了现代优化和制造方法,对其他碳化硅反射镜的结构设计也有很好的借鉴意义。

作者贡献声明:

王成彬:论文构思和撰写,结构仿真;
孙胜利:技术方向和方案指导;
孙小进:设计和分析过程校核;
马孝浩:试验数据处理;
胡凯:镜面面形测试。

参考文献:

- [1] 马霖,谭双龙,闫磊,等. 双面共体反射镜结构优化设计与分析[J]. 应用光学, 2024, 45(1): 45-53. MA L, TAN SH L, YAN L, *et al.* Optimization design and analysis of double-sided integrated mirror structure[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(1): 45-53. (in Chinese)
- [2] 李伟,张舸,崔聪聪,等. 增材制造SiC陶瓷反射镜的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(7): 2661-2671. LI W, ZHANG G, CUI C C, *et al.* Research progress of additive manufacturing SiC ceramic mirror[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(7): 2661-2671. (in Chinese)
- [3] 孙宇欣,樊延超,董得义,等. 增材制造空间反射镜结构拓扑优化技术发展综述[J]. 激光杂志,

2022, 43(7): 1-14.

- SUN Y X, FAN Y CH, DONG D Y, *et al.* A Review of space mirror topology optimization technology based on additive manufacturing[J]. *Laser Journal*, 2022, 43(7): 1-14. (in Chinese)
- [4] 王长顺,吴思琪,闫春泽,等. SiC陶瓷增材制造技术的研究及应用进展[J]. 科学通报, 2022, 67(11): 1137-1154. WANG CH SH, WU S Q, YAN CH Z, *et al.* Research and applications of additive manufacturing technology of SiC ceramics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(11): 1137-1154. (in Chinese)
- [5] 刘多,江显含,董得义,等. 基于增材制造的空间反射镜拓扑优化设计[J]. 机电工程, 2022, 39(7): 1010-1016. LIU D, JIANG Y H, DONG D Y, *et al.* Topologi-

- cal optimization design of space mirror based on additive manufacturing [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(7): 1010-1016. (in Chinese)
- [6] 张舸, 崔聪聪, 李伟, 等. 面向光学/精密结构的碳化硅制备和应用进展[J]. 光学学报, 2024, 44(4): 0400003.
- ZHANG G, CUI C C, LI W, *et al.* Research and development of SiC ceramic fabrication technologies for optics and fine structures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(4): 0400003. (in Chinese)
- [7] GOODMAN W A. A review on the advances in 3D printing and additive manufacturing of ceramics and ceramic matrix composites for optical applications [C]. *Material Technologies and Applications to Optics, Structures, Components, and Sub-Systems III*. August 6-10, 2017. San Diego, USA. SPIE, 2017: 10.
- [8] 邵梦旗, 张雷, 李林, 等. 超轻空间相机主支撑背板的优化设计[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0322001.
- SHAO M Q, ZHANG L, LI L, *et al.* Optimization design of supporting backplate for ultra-light space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0322001. (in Chinese)
- [9] 殷龙海, 李骏驰, 李延伟, 等. 超轻量化碳化硅扫描反射镜组件设计[J]. 2023(6): 641-645.
- YIN L H, LI J CH, LI Y W, *et al.* Design of ultra-lightweight SiC scanning mirror assembly[J]. *Optical Technique*, 2023, 49(6): 641-645. (in Chinese)
- [10] 谢新旺, 殷龙海, 李延伟, 等. 面向多目标集成优化与二次烧结工艺的 SiC 反射镜组件超轻量化结构设计[J]. 光学技术, 2024, 50(1): 1-6, 47.
- XIE X W, YIN L H, LI Y W, *et al.* Design of Ultra-lightweight structure SiC mirror assembly for multi-objective integrated optimization and secondary sintering process [J]. *Optical Technique*, 2024, 50(1): 1-6, 47. (in Chinese)

作者简介:



王成彬(1982—),男,河北唐山人,博士,副研究员,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,2015年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感仪器结构设计、优化和光机热集成分析的研究。E-mail: sitp305@163.com