中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

460 mm口径单轴支撑碳化硅主镜的优化设计

王涛 汪向阳 赵新宇 刘瑞起 曹永刚

Optimized design of single-axis supported SiC mirror with aperture of 460 mm

WANG Tao, WANG Xiang-yang, ZHAO Xin-yu, LIU Rui-qi, CAO Yong-gang

引用本文:
王涛, 汪向阳, 赵新宇, 刘瑞起, 曹永刚. 460 mm口径单轴支撑碳化硅主镜的优化设计[J]. 中国光学, 2025, 18(3): 460−466. doi: 10.37188/CO.2024−0172
WANG Tao, WANG Xiang-yang, ZHAO Xin-yu, LIU Rui-qi, CAO Yong-gang. Optimized design of single-axis supported SiC mirror with aperture of 460 mm[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 460-466. doi: 10.37188/CO.2024-0172

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024−0172

文章编号 2097-1842(2025)03-0460-07

460 mm 口径单轴支撑碳化硅主镜的优化设计

王 涛[1], 汪向阳[2], 赵新宇[1], 刘瑞起[1], 曹永刚[1*]
（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. 中国人民解放军 63861 部队, 吉林 白城 137000）

摘要: 为简化某地基望远镜主镜的支撑方式, 兼顾保障望远镜成像质量和精度, 研究了 460 mm 口径单轴支撑碳化硅主镜的优化设计。首先, 确定了相近线胀系数材料的单轴支撑方案和扇形的主镜背部结构, 针对支撑结构和材料特性, 利用先进的碳化硅烧结技术可制备异性结构的特性, 结合优化设计理论, 在满足主镜面型精度的前提下, 对主镜进行了轻量化设计。优化后的主镜质量仅为 4.82 kg, 主镜水平状态下面型仿真分析 RMS 为 λ/51.4。经实际工程验证, 主镜支撑后水平状态下面型精度检测结果优于 λ/42, 轻量化效果显著并满足实际使用要求。本研究为工程项目提供了理论基础和技术储备。

关 键 词: 碳化硅主镜; 轻量化; 有限元分析; 优化设计
中图分类号: TH745 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2024-0172 **CSTR:** 32171.14.CO.2024-0172

Optimized design of single-axis supported SiC mirror with aperture of 460 mm

WANG Tao[1], WANG Xiang-yang[2], ZHAO Xin-yu[1], LIU Rui-qi[1], CAO Yong-gang[1*]
（1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *PLA* 63861 *Army, Baicheng* 137000, *China*）
* *Corresponding author, E-mail*: 20023003@163.com

Abstract: In order to simplify the support method of the mirror of a ground-based telescope and ensure the imaging quality and accuracy of the telescope, the optimization design of a uniaxial supported SiC mirror with 460 mm aperture was studied. First, a uniaxial support scheme for materials with similar linear expansion coefficients and a fan-shaped mirror back structure were determined. Advanced SiC sintering technology was used to prepare anisotropic structures according to the support structure and the material characteristics. Combined with optimization design theory, the mirror was designed to be lightweight while meeting the required accuracy. The optimized mirror weighs only 4.82 kg, and the RMS of the horizontal simulation analysis of the mirror is λ/51.4. After actual engineering verification, the accuracy detection results of the horizontal state under the mirror support are found to be better than λ/42. The lightweight effect is significant and meets the requirements of practical use. This research provides a theoretical foundation and technical reserve for engineering projects.

收稿日期: 2024-11-22; **修订日期:** 2024-12-26
基金项目: 国家自然科学基金（No. 62105330）
Supported by National Science Foundation of China (No. 62105330)

Key words: SiC mirror; lightweight; finite element analysis; optimization

1　引　言

随着天文学和靶场光学测量技术的发展, 地基望远镜已经广泛应用于天文观测、目标识别、弹道测量以及外太空人造目标编目定轨等领域。望远镜的通光口径从几十毫米发展到几十米, 伴随地基望远镜的主镜口径的增大, 受重力影响, 其自重对主镜面型精度的影响也随之增大。依据常规主镜材料的物理性能, 通常口径 300 mm 以下的主镜可以采用单轴支撑, 口径超过 300 mm 以后, 就需要增加底支撑、侧支撑等辅助支撑, 否则主镜面型难以满足要求。支撑方式的复杂化不仅会增加制造成本和集成难度, 也会导致视轴稳定性等性能指标的不稳定。

碳化硅陶瓷是一类重要的陶瓷材料, 具有抗氧化、耐磨损和耐腐蚀等特点, 同时也具有优异的力学性能。随着国内碳化硅材料制造以及加工工艺的不断进步, 碳化硅材料已经广泛应用于光学望远镜的主镜制造。利用先进的反应烧结工艺, 可制备各种形状的轻量化碳化硅反射镜, 利用材料本身的高刚度等物理性能, 可保障其面型精度的长期稳定。王克军等综合了经验公式、拓扑优化、尺寸优化等常规设计手段, 完成了 Φ2 m 量级 SiC 反射镜镜坯的轻量化结构设计, 反射镜设计重量为 326 kg、轻量化率为 82.5%, 自重变形 RMS 仿真分析值优于 4.9 nm[1]。郭疆等针对某 Φ1.5 m 高精度空间反射镜开展工程化研究, 开发了具有大容差特性的支撑结构, SiC 反射镜面形精度达到 RMS 0.016λ, 反射镜实测重量 160.68 kg、轻量化率为 82.1% [2]。

本文利用碳化硅材料优异的物理性能, 尝试采用单轴支撑方案, 即采用线膨胀系数与碳化硅材料相近的铁镍合金芯轴, 通过与主镜内孔做小间隙配合和注胶的方式, 对某地基望远镜的 460 mm 口径碳化硅主镜进行支撑, 极大改善温度解耦。对碳化硅主镜进行优化设计, 通过简单的直接求解法, 在可行区域内选择几个差别较大的初始点分别进行计算, 选择更好的最优解。在满足主镜面型精度的前提下进行了轻量化设计, 重量仅为 4.82 kg, 面密度达 29 kg/m^2, 同等尺寸的微晶玻璃主镜重量约为 26.68 kg, 相比之下质量轻了 81.9%。对主镜光轴指向分别为 0°和 45°的不同工况进行仿真分析, 结果表明主镜面型满足光学设计要求。通过工程项目的实施和实际检测, 主镜最终面型检测结果为 PV 优于 λ/7、RMS 优于 λ/42, 满足任务要求, 本文研究为工程设计提供了理论基础和技术储备。

2　主镜支撑方式的选择

主镜的支撑设计是光学望远镜结构设计中比较关键的技术之一。主镜的支撑方式直接影响其面型精度和视轴稳定性, 从而影响望远镜的成像质量和测角精度[3]。对于常规地基光学望远镜来说, 主镜口径小于 300 mm, 由于其镜坯自身刚度较好, 通常仅采用芯轴支撑即可实现较好的面型精度。对于口径大于 300 mm 的主镜, 其刚度已不能克服自身重力的影响, 通常采用基于三点定位原理的 whiffletree 结构的底支撑和平衡锤侧支撑方案来保障主镜的面型精度[4]。

近年来, 采用凝胶注膜与反应烧结相结合的工艺路线制备的碳化硅反射镜坯, 具有重量轻、热稳定性好、刚度高等特点, 已广泛应用于航天及地基观测系统的光电设备中[5-8]。碳化硅陶瓷材料与其他常用主镜材料如微晶玻璃等材料的物理性能, 详见表 1。

从表中可以看出, 碳化硅材料的刚度比其它材料均大, 导热性能好, 而且其制备性能优异, 工艺成熟, 可制备各种复杂形状的镜坯。碳化硅材料主镜特点分析见表 2。

表 1　常用主镜材料参数

Tab. 1　Properties of mirror's materials commonly used

	ρ(g/cm^3)	E(GPa)	υ	α(10^{-6}/K)	K(W/m•K)	E/ρ(GPa•cm^3/g)
Zerodur	2.53	93	0.24	0.01	1.46	36.8
ULE	2.21	67	0.17	0.015	1.3	30.3
Fused silica	2.02	74.6	0.167	0.56		36.9
SiC	2.7	390	0.14	2.4	185	111.8
K9	2.52	81.3	0.25	7.8	1.207	32.1
Be	1.85	280	0.25	11.4	160	151

表 2 碳化硅主镜特点分析

Tab. 2 Analysis of SiC mirror characteristics

	优点	缺点
重量	合理设计结构形式和先进的烧结工艺，可达到较高的轻量化程度。	
弹性模量	高弹性模量使得同等应力作用下，材料的弹性变形更小。	刚度高导致加工难度大、增加加工成本。
热膨胀系数	可选择热膨胀系数接近的金属材料作为支撑，降低环境温度变化导致的局部应力。	热膨胀会导致镜面曲率半径变化，可通过温度调焦解决。
导热率	高导热率可缩短热平衡时间，降低环境温度变化导致的局部应力。	

传统类似口径的主镜支撑方式通常采用中心轴定位和辅助支撑相结合的方式来弥补重力对主镜面型精度的影响。辅助支撑通常采用基于 whiffletree 结构的底支撑和平衡锤侧支撑相结合的方案。相比简化后的碳化硅主镜中心轴支撑方案，传统方案虽然也能够满足主镜面型精度要求，但较单轴支撑增加了底支撑和侧支撑两种结构组件。侧支撑增加了主镜结构的外形尺寸，使径向增加约 50 mm，轴向增加约 100 mm。整个主镜室重量也较简化后的重约 60 kg。基于传统主镜支撑方式的经验，以及碳化硅材料的性能，此 460 mm 口径主镜采用中心轴支撑定位，镜坯选用扇形结构以达到最大程度的边缘轻量化设计，既用简单的支撑方式实现高精度的面型[9-10]。460 主镜的支撑方式如图 1 所示。

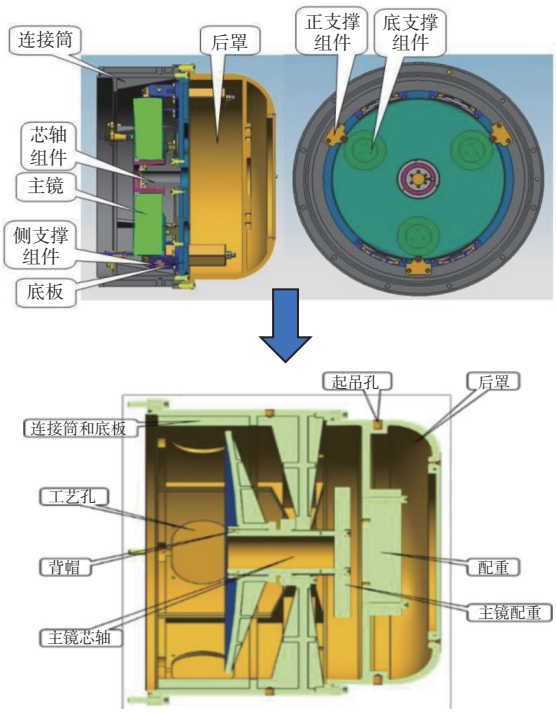


图 1 主镜支撑方式

Fig. 1 Support method for mirror

碳化硅主镜材料的线膨胀系数约为 2.5×10^{-6}/℃，主镜芯轴选用具有低线膨胀系数的铁镍合金，其在−60 ℃~+100 ℃ 温度范围内平均线膨胀系数小于 1.2×10^{-6}/℃。加工时，主镜芯轴直径和长度尺寸与主镜内孔做小间隙配合，避免温度变化时主镜芯轴与主镜之间因线膨胀系数不同而产生应力。装配时，主镜直接穿过主镜芯轴，对主镜进行中心定位，通过向主镜芯轴上的流道注胶的方式，避免主镜绕光轴发生转动。薄壁胶膜的形成也对线胀系数的差异起到一定的缓冲作用。

3 主镜的优化设计

确定了支撑方案后，对碳化硅主镜进行优化设计。优化设计理论是现代化设计理论和方法的一个重要领域，已广泛应用于各工业部门。其主要思想是将设计原理、优化原理和计算机技术相结合应用于设计领域，为工程实现提供一种重要的科学设计方法[11]。利用这种方法可以从多种设计方案中找出最佳设计结果，从而提高设计效率和质量。

通常情况下，光学设计完成后，主镜的通光口径、遮拦比以及镜面的曲率均已确定，待定的主镜结构设计参数为镜面厚度、背部加强筋的高度、厚度等。其中，镜面的厚度是主镜结构设计的主要参数，其自重将直接影响重力变形引起的面型误差。利用 Roberts 等人对反射镜的径厚比与自重变形间的关系，归结出以下经验公式[12]：

$$\delta = \frac{3\rho g R d^2}{256E}, \tag{1}$$

式中：δ 是自重引起的面型误差，ρ 是材料自身的密度，g 是重力加速度，Rd 为主镜直径与厚度的比值，E 为材料自身的弹性模量。按主镜加工后面型 PV 可优于 λ/6 计算，可计算出碳化硅材料主镜的径厚比为<11.5。国内外研制的碳化硅材料镜坯，镜厚比通常达到了 20∶1。主镜背部加强筋的数量直接影响局部重量，从而导致局部重力引起的镜面面型精度变差。根据镜面厚度初始设计值 8 mm，参照镜厚比，用最少的加强筋将主镜进行分割。径向采用两组环筋，将径向分割为 70 mm、50 mm、50 mm 三组空间。圆周方向采用 8 组均布加强筋，将空间进行分割，外径最大弧长约为

160 mm。按此背部设计结构进行分析, 初始结果满足面型精度要求。为进一步减轻重量, 对初始结果进行了优化设计。

其余参数根据材料成型限制以及结构尺寸限制确定, 设计变量如图 2 所示。

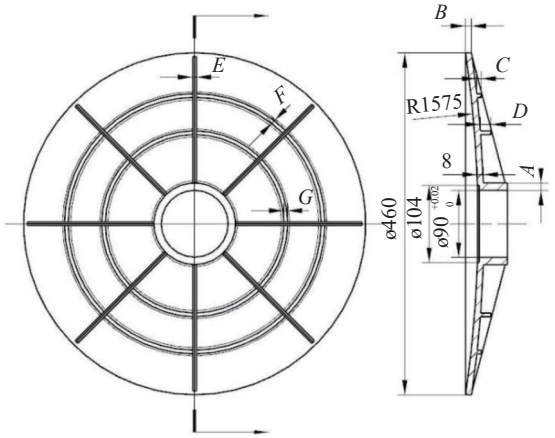


图 2　优化的设计变量

Fig. 2　Optimized design variables

优化时以减轻主镜质量作为目标函数, 以镜面厚度和各加强筋的厚度、高度作为设计变量, 以主镜光轴水平下面型精度仿真分析结果 $G(x)$ 和设计变量自身允许的范围作为约束条件, 为主镜面型加工误差预留余量, 仿真时 $G(x)$ 取值按面型 PV 优于 λ/15, 建立了数学模型如下:

求 $\boldsymbol{x}=[A,B,C,D,E,F,G]^{\mathrm{T}}$, 使主镜的质量: $f(x)\rightarrow\min$,

且满足约束条件:

$G(x)\leqslant 0.000\,04$ mm; 5 mm < A <15 mm; 5 mm < B < 8 mm; 5 mm < C < 10 mm; 5 mm < D < 15 mm; 3 mm < E < 8 mm; 3 mm < F < 8 mm; 3 mm < G < 8 mm。

随着镜面厚度的增加, 反射镜重量增大, 自重面形精度变差。随着加强筋厚度的增加, 反射镜重量增大, 但刚度得以提高, 自重面形精度提升。优化问题仅含不等式约束, 采用直接求解法进行求解。直接求解法通常适用于仅含不等式约束的问题, 它的基本思路是在 m 个不等式约束所确定的可行域内, 选择一个初始点 x^0, 然后决定可行搜索方向 d, 且以适当的步长 α, 沿 d 方向进行搜索, 得到一个使目标函数值下降的可行的新点 x^1,即完成一次迭代。再以新点为起点, 重复上述搜索过程, 满足收敛后, 迭代终止。在可行区域内随机选择几个差别较大的初始点分别进行计算, 以便从求得的多个局部最优解中选择更好的最优解。迭代基本格式如下:

$$x^{k+1}=x^k+\alpha^k d^k(k=1,2,\cdots)\quad,\qquad(2)$$

式中: α^k 为步长; d^k 为可行搜索方向。

可行搜索方向是指, 当设计点沿该方向做微量移动时, 目标函数将下降, 且不会超出可行域。经过迭代优化后得出设计结果如表 3 所示。

表 3　优化设计结果

Tab. 3　Optimized design results　(mm)

设计变量	初始值	优化值
A	8	10.24
B	8	5.9
C	5	6.1
D	15	13.9
E	6	4.42
F	6	5.84
G	8	6.42

优化后主镜的质量降至 4.82 kg, 面密度达 29 kg/m^2, 同等尺寸的微晶玻璃主镜重量约为 26.68 kg, 相比之下质量轻量率为 81.9%。

按芯轴支撑方式对优化后的碳化硅主镜的面型精度进行仿真分析。以中心作为约束, 以垂直主镜光轴方向的自身重力做负载, 主镜面型仿真分析结果如图 3(彩图见期刊电子版)所示。

从仿真结果可以看出, 主镜面型的理论分析 PV 值为 0.039 91 μm, RMS 值为 0.012 307 μm, 即 PV 值 λ/15.5, RMS 值为 λ/51.4, 能够满足光学设计的指标要求。同等约束条件下, 以主镜光轴方向夹角 45°的自身重力做负载, 主镜面型仿真分析结果如图 4(彩图见期刊电子版)所示。从 45° 仿真结果可以看出, 主镜面型的理论分析 PV 值为 0.047 58 μm, RMS 值为 0.014 473 μm, 即 PV 值为 λ/13.2, RMS 值为 λ/43.7, 均能够满足光学设计的指标要求。

当环境温度变化时, 主镜的面型大部分表现为刚体位移和离焦, 地基望远镜均设置有调焦机构, 此分量可通过调焦来进行补偿, 通常在大口径主镜或支撑结构复杂的情况下对温度解耦能力进行仿真分析, 分析是否存在应力集中等导致局部面型变化的情况。此主镜为单轴支撑的小口径主镜, 支撑结构简单, 温度变化对面型的影响几乎均

为位移和离焦[13]。对主镜进行 10 °C 温差的面型仿真，去除刚体位移和离焦后的主镜热变形云图仿真结果如图 5(彩图见期刊电子版)所示。PV 变化约为 0.076 μm。

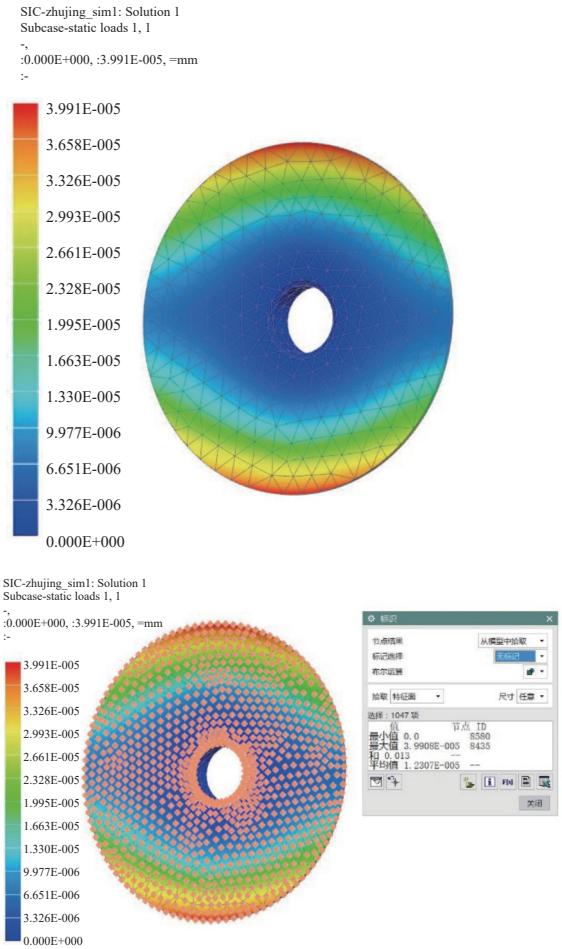
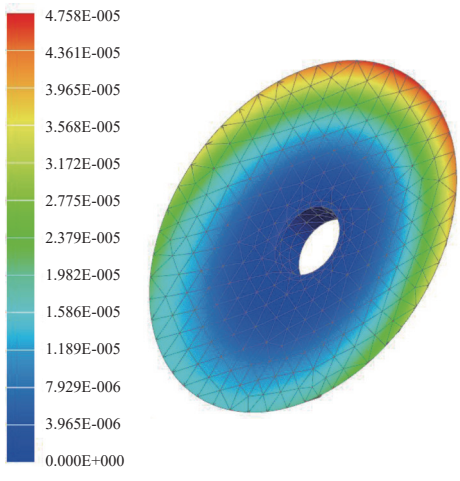


图 3 主镜 0°面型仿真计算结果

Fig. 3 Simulation calculation results of surface shape of the mirror at 0°



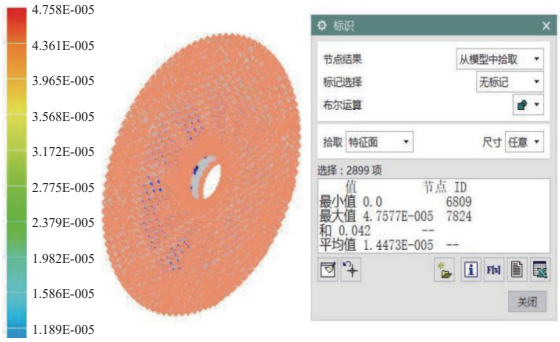


图 4 主镜 45°面型仿真计算结果

Fig. 4 Simulation calculation results of surface shape of the mirror at 45°

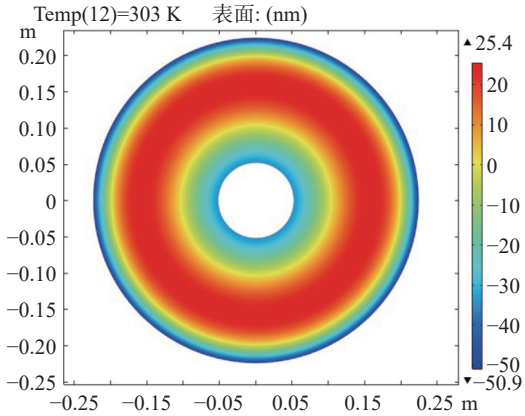


图 5 主镜 10 °C 温差面型仿真计算结果

Fig. 5 Simulation calculation results of the surface shape of the mirror with a temperature difference of 10 °C

4 主镜面型精度的检测验证

经过主镜的毛坯制造、加工、改性、镀膜以及主镜室的装调，完成了 460 mm 碳化硅优化设计主镜的研制工作，镜坯如图 6 所示，

图 6 460 mm 主镜

Fig. 6 Mirror with 460 mm aperture

利用 4D 干涉仪和标准平面镜对主镜的面型精度进行检测，因主镜支撑设计为单轴支撑结构，加工的检测状态与安装支撑后的检测状态均为芯

轴支撑, 状态一致。主镜支撑后的最终面型精度 PV 达 0.137λ, λ/7.29, 满足主镜支撑后 PV 优于 λ/6 的光学设计指标要求; RMS 达 0.023 7λ, λ/42, 满足主镜支撑后 RMS 优于 λ/30 的光学设计指标要求。检测结果如图 7 所示。

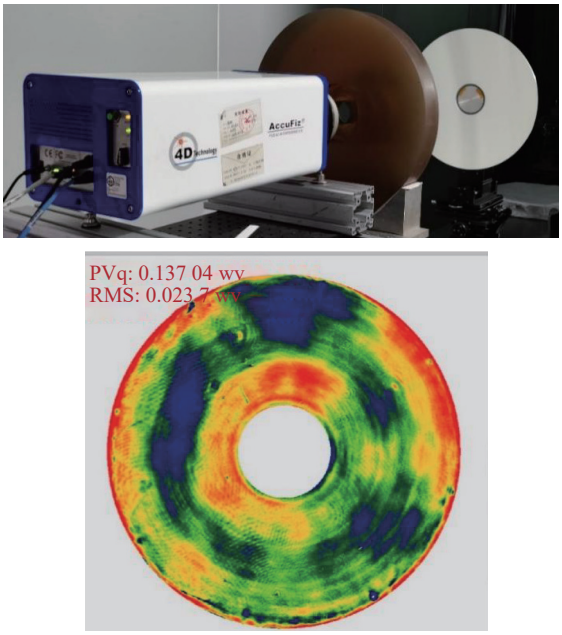


图 7　镜面干涉仪检测图

Fig. 7　Mirror interferogram inspection

5　结　论

本文针对 460 mm 口径地基望远镜的主镜, 利用碳化硅材料的优异物理性能, 尝试采用单轴支撑方案完成对主镜的支撑, 并通过有限元分析和优化设计理论, 对碳化硅主镜进行了超轻量化设计。通过改变镜面、筋的厚度, 以及筋的高度, 在满足主镜面型精度的前提下进行优化, 优化设计后的主镜质量仅为 4.82 kg, 面密度达 29 kg/m^2, 相比同等尺寸的微晶玻璃主镜(26.68 kg)质量轻量 81.9%。通过光轴指向分别为 0°和 45°的不同工况的仿真分析, 光轴指向 0°时主镜面型的理论分析 PV 值为 λ/15.5, RMS 值为 λ/51.4, 光轴指向 45°时主镜面型的理论分析 PV 值为 λ/13.2, RMS 值为 λ/43.7, 主镜的面型精度均可满足光学设计要求。经过实际工程项目实施, 验证了主镜支撑后面型的实际效果。结果表明, 该碳化硅主镜最终面型检测结果为 PV 优于 λ/7、RMS 优于 λ/42, 满足光学设计要求, 为后续工程项目研制提供了理论基础和技术储备。

参考文献:

[1]　王克军, 董吉洪. 空间遥感器Φ2 m 量级大口径 SiC 反射镜镜坯结构设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0718005.
WANG K J, DONG J H. Structural design of Φ2 m-level large-diameter SiC reflector used in space remote sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0718005. (in Chinese).

[2]　郭疆, 朱磊, 赵继, 等. 大口径空间反射镜大容差支撑结构设计与优化[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(5): 1138-1147.
GUO J, ZHU L, ZHAO J, *et al*.. Design and optimize of high tolerance support structure for large aperture space mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 1138-1147. (in Chinese).

[3]　王洪浩, 王建立, 陈涛, 等. 地基大口径望远镜重力弯曲引起的指向变化检测与修正[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(23): 3021-3030.
WANG H H, WANG J L, CHEN T, *et al*.. Measurement and calibration of optical axis changes caused by gravity for ground-based large-aperture telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(23): 3021-3030. (in Chinese).

[4]　张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescope[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese).

[5]　董斌超, 张舸. 超轻量化 SiC 反射镜的制备及性能[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(8): 2185-2491.
DONG B CH, ZHANG G. Fabrication and properties of ultra-lightweight SiC mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2185-2491. (in Chinese).

[6]　马昕, 刘海韬, 孙逊. 连续纤维增强陶瓷基复合材料连接件的研究进展[J]. 材料工程, 2023, 51(8): 1-11.
MA X, LIU H T, SUN X. Research progress in continuous fiber reinforced ceramic matrix composite joints[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(8): 1-11. (in Chinese).

[7]　康健, 宣斌, 谢京江. 表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 824-833.
KANG J, XUAN B, XIE J J. Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors[J]. *Chinese*

Optics, 2013, 6(6): 824-833. (in Chinese).

[8] 邢邵美, 马建平. 碳化硅铝基复合材料的应用与加工[J]. 航天返回与遥感, 1998, 19(2): 45-49.
XING SH M, MA J P. The application and process of SiC/Al composite materials[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1998, 19(2): 45-49. (in Chinese).

[9] 祝汉旺, 薛向尧, 邵明振, 等. 地基光电成像系统中单芯轴的设计与优化[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(3): 20230629.
ZHU H W, XUE X Y, SHAO M ZH, *et al*.. Design and optimization of a single-core axis in a ground-based photoelectric imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(3): 20230629. (in Chinese).

[10] 高世林, 魏梦琦, 张赛, 等. 一种卡塞格林反射系统的光机结构设计与分析[J]. 激光与红外, 2024, 54(7): 1136-1140.
GAO SH L, WEI M Q, ZHANG S, *et al*.. The optical-mechanical structure design and analysis of a Cassegrain reflection system[J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(7): 1136-1140. (in Chinese).

[11] 魏钰轩, 王振宇, 李治国, 等. 星载二维转台 U 型架结构轻量化与优化设计[J]. 中国光学 (中英文), 2024, 17(4): 896-908.
WEI Y X, WANG ZH Y, LI ZH G, *et al*.. Lightweight and optimized U-frame design for space-borne two-dimensional turntable[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 896-908. (in Chinese).

[12] VUKOBRATOVICH D. *Introduction to Optomechanical Design*[M]. US: SPIE Short Course SC014, 2003.

[13] 孙景旭, 谢虹波, 李淑贤, 等. 轻小型全铝高分相机[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(6): 1450-1462.
SUN J X, XIE H B, LI SH X, *et al*.. All-aluminum high-resolution camera with lightweight and compact size[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1450-1462. (in Chinese).

作者简介：

王　涛(1981—)，男，黑龙江虎林市人，硕士，副研究员，主要从事地基光电望远镜结构总体技术等方面的研究。E-mail: wangtao@ciomp.ac.cn

曹永刚(1972—)，男，河北滦县人，研究员，长期从事靶场光电测控技术理论及应用方向的研究，以及大数据高速传输技术、单站测量、机动高精度测量、动平台测量技术等研究。E-mail: 20023003@163.com