

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 1.2 m高轻量化率主反射镜镜坯结构设计

袁健, 张雷, 姜启福, 裴思宇, 龚小雪

#### 引用本文:

袁健, 张雷, 姜启福, 等. 1.2 m高轻量化率主反射镜镜坯结构设计[J]. 光电工程, 2023, 50(4): 220225.

Yuan J, Zhang L, Jiang Q F, et al. Structure design of 1.2 m high lightweight primary mirror blank[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220225.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220225>

收稿日期: 2022-09-15; 修改日期: 2023-01-24; 录用日期: 2023-01-31

### 相关论文

#### 基于环氧复制法的光学反射镜制备技术研究

张颖, 刘红, 陈小安, 闵攀, 罗瑞

光电工程 2021, 48(8): 210069 doi: 10.12086/oe.2021.210069

#### Φ1.05 m轻量化反射镜设计与制造

胡瑞, 陈志强, 张媛媛, 徐涛, 刘红, 张继友

光电工程 2020, 47(10): 200317 doi: 10.12086/oe.2020.200317

#### 三十米中国未来巨型望远镜主桁架结构的概念设计

胡守伟, 张勇, 王跃飞, 王佑

光电工程 2022, 49(6): 210402 doi: 10.12086/oe.2022.210402

#### 轻质长条形反射镜结构优化设计

王朋朋, 辛宏伟, 朱俊青, 王永宪, 许艳军, 陈长征

光电工程 2020, 47(8): 200109 doi: 10.12086/oe.2020.200109

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程  
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



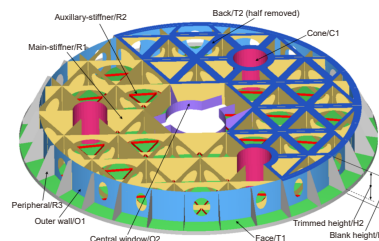
OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.220225

## 1.2 m 高轻量化率主反射镜 镜坯结构设计

袁健<sup>1,2</sup>, 张雷<sup>1\*</sup>, 姜启福<sup>1</sup>, 裴思宇<sup>1</sup>, 龚小雪<sup>1,2</sup><sup>1</sup>长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130033;<sup>2</sup>东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819

**摘要:** 如何进一步提升高性能米级空间反射镜轻量化率是大口径光机结构研制领域内的核心问题之一。本文为某高分辨率空间相机研制了通光口径  $\Phi 1200$  mm 的主反射镜, 实现了面密度  $40 \text{ kg/m}^2$  的设计目标。碳化硅镜体采用凝胶注模成型及反应烧结工艺制备, 将光轴水平状态作为检测状态以简化支撑结构, 在半封闭式镜体内使用了主副筋交叉布置、立壁增加减重孔等轻量化手段, 用分布式基准面取代传统基准设置, 将基准面加工面积减少 80% 以上, 提高了加工效率。通过参数化建模与集成优化, 确定了镜体最优结构参数组合, 最终镜体设计重量为 46.9 kg。光轴水平时主镜自重变形 RMS 值仅 2.87 nm, 镜体自由基频为 602 Hz, 主镜具有良好的动、静力学特性。镜坯经机械加工后实测重量为 51.3 kg、超重约 9.4%, 镜面厚度不均匀性小于 1 mm, 当前镜面已抛光至面形精度 RMS  $\lambda/8$  ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ), 未见印透效应。

**关键词:** 空间光学; 反射镜; 轻量化; 大口径; 反应烧结碳化硅

**中图分类号:** V447.1

**文献标志码:** A

袁健, 张雷, 姜启福, 等. 1.2 m 高轻量化率主反射镜镜坯结构设计 [J]. 光电工程, 2023, 50(4): 220225

Yuan J, Zhang L, Jiang Q F, et al. Structure design of 1.2 m high lightweight primary mirror blank [J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220225

## Structure design of 1.2 m high lightweight primary mirror blank

Yuan Jian<sup>1,2</sup>, Zhang Lei<sup>1\*</sup>, Jiang Qifu<sup>1</sup>, Pei Siyu<sup>1</sup>, Gong Xiaoxue<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Chang Guang Satellite Technology Co., LTD, Changchun, Jilin 130033, China;<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

**Abstract:** How to further improve the lightweight ratio of high-performance meter-level space mirrors is one of the core issues in the field of large aperture optomechanical structure design. In this paper, a primary mirror with a clear aperture of  $\Phi 1200$  mm was developed for a high-resolution space camera, which achieves the goal of designing area density below  $40 \text{ kg/m}^2$ . The SiC mirror blank was prepared by gel injection molding and reaction sintering process. The state of the optical axis being horizontal was taken as the testing state to simplify the supporting structure. Novel lightweight measures such as an alternate arrangement of main and auxiliary stiffeners and the addition of lightweight holes on vertical walls were used inside the semi-closed mirror blank. The distributed datums were used to replace traditional datum settings, which reduces the machining area of datums by more than 80% and improves machining efficiency. Through parametric modeling and integrated optimization, the optimal

收稿日期: 2022-09-15; 修回日期: 2023-01-24; 录用日期: 2023-01-31

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20210509052RQ)

\*通信作者: 张雷, 18686344285@163.com。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

structural parameter combination of the mirror blank was determined, with the final design weight of 46.9 kg. The RMS value of self-weight deformation of the mirror blank is only 2.87 nm under the state of the optical axis being horizontal, and its free fundamental frequency is 602 Hz, indicating that the primary mirror proposed in this paper has good dynamic and static characteristics. After machining, the measured weight of the mirror blank is 51.3 kg, about 9.4% overweight, and the facesheet is about 1-mm thicker than the design. At present, the mirror has already been polished to RMS  $\lambda/8$  ( $\lambda=632.8$  nm) of surface shape accuracy, with no obvious print-through effect observed.

**Keywords:** space optics; mirror; lightweight; large aperture; reaction bonded silicon carbide

## 1 引言

随着空间遥感数据应用场景的不断拓展,用户对图像分辨率和传函的要求逐步提高,具备长焦距大口径特征的遥感器的研制越来越受到世界各国重视,作为此类遥感器的核心部件,大口径空间反射镜工作性能的优劣直接影响光学系统的成像质量<sup>[1-2]</sup>。在确保空间相机具有良好动、静力学特性的前提下尽量降低发射重量、充分利用运载能力是科研人员不断追求的目标,在此背景下,深入研究大口径高性能反射镜的轻量化技术具有重要的工程意义<sup>[3-4]</sup>。

詹姆斯韦伯望远镜代表着国际上大口径高轻量化率空间反射镜研制的最高水平,其主镜由 18 块六边形子镜拼接而成,主要开展红外观测,每块子镜对边尺寸为 1.32 m,采用金属铍制造,面密度优于 18 kg/m<sup>2</sup><sup>[5-6]</sup>;欧空局研制的赫谢尔空间红外望远镜,其 SiC 主镜由 12 块背部开放的子镜焊接而成,整体口径 3.5 m、面密度达到 22 kg/m<sup>2</sup><sup>[7]</sup>;美国的超新星加速探测器工作在 0.35  $\mu\text{m}$ ~1.7  $\mu\text{m}$  波段,其主镜采用了背部封闭式结构、口径 2 m,材料为康宁公司的 ULE 玻璃,面密度约为 73 kg/m<sup>2</sup><sup>[8]</sup>。近年来,大口径反射镜的轻量化设计也受到国内学者们的广泛关注<sup>[9-13]</sup>,较为典型的研究成果包括: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  $\Phi$ 2 m 量级 SiC 反射镜镜坯的轻量化结构设计,镜体设计重量 326 kg、轻量化率为 82.5%,面密度约为 104 kg/m<sup>2</sup>,自重变形 RMS 仿真分析值优于 4.9 nm<sup>[12]</sup>;郭疆等针

对某  $\Phi$ 1.5 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 0.016 $\lambda$ ,镜体实测重量 160.68 kg、轻量化率为 82.1%,对应面密度约为 90 kg/m<sup>2</sup><sup>[13]</sup>。

从文献报道的设计案例中不难看出,我国研制的大口径反射镜面密度普遍较高,存在较大的潜在减重空间。本文以某高分辨率可见光波段空间相机中  $\Phi$ 1.2 m 量级主反射镜(以下简称主镜)为研究对象,将面密度 40 kg/m<sup>2</sup> 作为镜坯轻量化设计目标,首先从镜坯材料、制备工艺、镜体形式、基准设置等要素出发阐述了该镜坯的结构特征,然后运用多种轻量化措施和集成优化方法确定镜坯最终方案,最后报道了主镜实物目前的研制进展。

## 2 镜坯结构特征

### 2.1 光学系统

文中空间相机采用同轴三反 Korsch 望远镜光学系统,光路如图 1 所示,系统通光口径 1200 mm、焦距 18 m,沿轨方向偏视场 0.385°,此类光学系统具有结构紧凑、热稳定好等优点,在天文观测、行星探测、对地观测等多种用途的遥感器中得到普遍应用<sup>[14-15]</sup>。主反射镜自身的面密度要达到 40 kg/m<sup>2</sup>、组件重量不超过 70 kg,方能适应遥感器整机设计重量不超过 300 kg 的轻量化率设计目标。

### 2.2 材料与制备工艺

用来制备大口径空间反射镜的材料应同时具备比

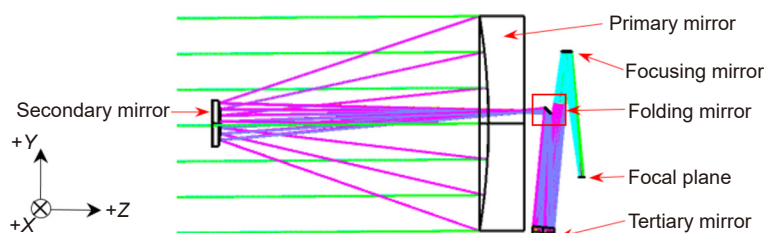


图 1 同轴三反相机光路

Fig. 1 Optical path of the coaxial three mirror camera

刚度高和热稳定性好两个特点, 如碳化硅陶瓷、金属铍、超低膨胀熔石英玻璃(如美国 Corning 的 ULE®)、微晶玻璃(如德国 Schott 的 Zerodur®、日本 Ohara 的 CLEARCERAM®-Z)等, 其主要的物理属性如表 1 所示。其中, 碳化硅的综合表现最佳, 不仅可以降低镜体自重变形、提升轻量化率, 还有助于消除镜面热畸变、稳定系统成像质量, 是目前可见光波段高分辨空间遥感器中反射镜材料的重要选择。

碳化硅(Silicon carbide, SiC)是强共价键化合物, 由于扩散效率低、成型困难, 在烧结成型时需使用添加剂、渗硅反应或外部压力等方式才能实现致密化。工业上应用的高密度碳化硅成型方法主要有无压烧结、反应烧结、热压烧结<sup>[16-17]</sup>, 其中, 热压烧结需要对素坯进行封装, 适合制备形状简单、数量少的零件; 无压烧结和反应烧结理论上均能够制备大尺寸复杂形状镜坯, 但反应烧结的烧结温度较低、工艺相对简单, 因此, 本文选择反应烧结碳化硅(reaction burned silicon carbide, RB-SiC)作为主反射镜材料。此外, 将凝胶注模成型与反应烧结方法相结合的碳化硅镜坯制备工艺非常适合用来制造大口径低面密度反射镜, 先

使用组合模具近似成型复杂的轻量化镜体, 再利用素坯硬度小、强度适中的特点, 在渗硅前通过精细加工去除镜体冗余重量, 减少后期镜坯机械加工量, 该工艺显著提升了成品率、缩短了大型镜坯的制备周期。

### 2.3 镜体形式

主镜外径  $\Phi 1240$  mm, 采用半封闭式结构, 在腔体开口处增设翻边形成背板, 以提升镜体刚度, 中部和边缘对镜体刚度贡献较小, 做削边处理以减轻重量, 如图 2 所示。主镜主体区域的轻量化腔体为等边三角形, 边缘位置则为扇形, 三角形腔体不仅刚度高、模具加工方便, 且加强筋的布置与支撑点位置相适应, 镜体受力稳定。镜体中心位置设计成异形通孔, 其轮廓可看作是次镜遮拦在主镜上投影(近似为椭圆形)与垂轨方向各视场成像光束在主镜上投影(近似为矩形)的组合, 从而最大程度利用通光口径, 提高系统光通量与传函值。

### 2.4 检测状态

光轴竖直状态下, 等厚的实心反射镜在一定的自

表 1 主要大口径空间反射镜材料物理属性

Table 1 Physical properties of main materials for the large aperture mirror

Property	RB-SiC	Beryllium	ULE	Zerodur
Density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	3050	1850	2210	2530
Elastic modulus $E/\text{GPa}$	340	287	67	91
Poisson ratio $\mu$	0.2	0.08	0.17	0.24
Thermal conductivity $\lambda/(\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	155	216	1.31	1.64
Thermal expansion coefficient $a/(10^{-6}\cdot\text{K}^{-1})$	2.50	11.4	0.03	0.05
Specific stiffness $E/\rho$	111.5	155	30.3	36
Thermal stability $\lambda/a$	62	18.9	43.7	32.8
Comprehensive performance $(E/\rho)\cdot(\lambda/a)$	6913	2939	1324	1180

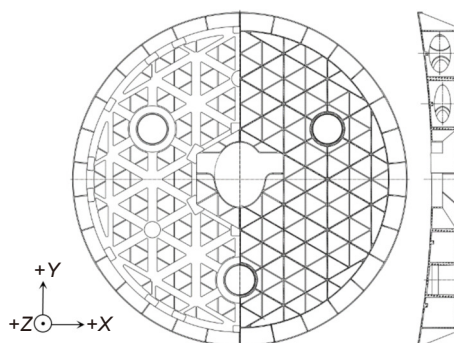


图 2 主镜结构形式

Fig. 2 Structure form of the primary mirror

重变形下所需的最少支撑点数目可以用 Hall 经验公式来评估<sup>[18]</sup>:

$$N = \left( \frac{0.375 D_G^2}{t_A} \right) \left( \frac{\rho_G}{E_G \delta} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

其中:  $D_G$  和  $t_A$  分别是镜体直径、厚度,  $\rho_G$  和  $E_G$  分别是镜体材料密度、弹性模量,  $\delta$  是镜面自重变形 PV 值。假定镜体直径  $\Phi 1200$  mm、厚 120 mm、材料为 RB-SiC, 镜面 PV 值为  $1/10\lambda$  时 ( $\lambda=632.8$  nm, 对应 RMS 值约为  $1/50\lambda$ ), 得到支撑点数目至少为 6。可见, 文中主镜若采用光轴竖直检测状态, 由于反射面面积大、局部刚度低, 势必导致支撑结构复杂、组件重量激增。当光轴水平时, 由于镜体各处相对中性面的惯性矩小, 镜体刚度显著大于镜体竖直状态, 参考工程案例, 此时采用背部三点支撑即可保证镜体自重变形在很小的范围内<sup>[10,12-13]</sup>, 且该支撑方案在结构可靠性、面形的长期稳定性都具有显著优势。因此, 本文选择光轴水平状态作为主镜的检测状态。

## 2.5 基准设置

RB-SiC 镜坯表面粗糙, 需要加工出定位基准并初步铣磨反射面, 以方便后续光学加工、组件装配的

开展, 镜体基准设置将会影响最终主镜光轴的空间位置, 对于大口径长焦距相机系统装调至关重要。制备镜坯时在镜体外圆布置六处均布径向凸台, 在背板上预留 30 处凸台, 均布在锥孔边缘、筋交点等处, 如图 3 所示, 精加工这些位置作为铣磨球面和光学抛光时光轴的定位基准。分布式凸台将大基准面转化为多处独立的小平面, 分别将背板、外圆基准面的加工面积减少了 84% 和 91%, RB-SiC 硬度大、加工时要使用金刚石刀具缓慢去量, 该方法可以提升大型反射镜机械加工效率、降低风险。锥孔间相对位置通过机床的定位精度保证, 并通过人工研磨修正锥孔相对于背板的形位公差, 从而确保锥套与镜体间粘接时光轴基准可以传递至整个组件。

## 3 分析与优化

### 3.1 减重措施

为了实现  $40 \text{ kg/m}^2$  面密度, 要在镜体常规轻量化结构的基础上, 结合 RB-SiC 的制备工艺运用更多的减重措施。主镜轻量化腔体为三角形, 夹层结构内的加强筋采用“主-副筋交错布置”方案, 如图 4 所示

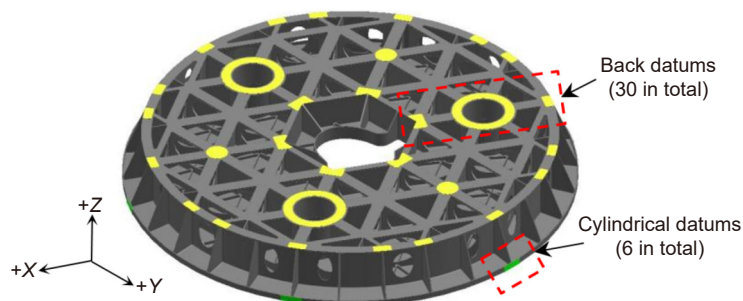


图 3 镜体分布式基准布置

Fig. 3 Layout of distributed datums on the mirror blank

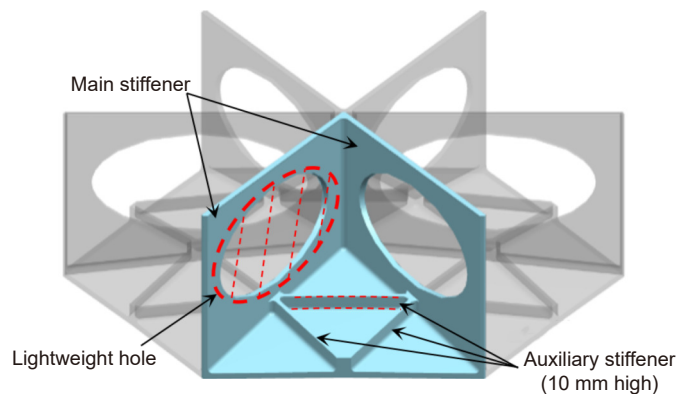


图 4 更高轻量化率镜体减重措施

Fig. 4 Measures for the higher lightweight mirror

(图中镜体背板已移除), 主筋连接背板与面板, 承担主要的载荷, 对镜体刚度起到主要作用, 副筋高度仅 10 mm, 位于面板一侧, 起到加强镜面局部刚度, 防止抛光印透效应的作用。加强筋在相交处发挥主要作用、中间位置作用较小, 除锥孔附近的内部加强筋上布置了椭圆形减重孔, 镜体圆周外壁上也布置了多处此类减重孔。上述减重结构可在注模时初步成型, 后在素坯状态下手工修磨至设计尺寸。

### 3.2 检测状态

主镜轻量化程度高, 在确定加强筋密度时既要考虑锥孔中心布置在筋交点上, 从而使镜体受力均匀、刚度对称, 还要避免筋间距过大导致抛光过程中镜面发生印透效应。锥孔所在分度圆半径  $r$  与镜体半径  $R$  之间通常满足经验关系  $r=0.6R\sim 0.7R$ , 本文主镜最终确定主筋间距为 162 mm, 主、副筋间距 81 mm, 锥孔所在分度圆直径为  $\Phi 748.25$  mm。使用机械臂配合特制的抛光工具开展主镜抛光, 该方法不仅去除效率高, 还可以有效控制镜面正压力。为主镜抛光准备的典型工具直径  $\Phi 120$  mm、正压力为 20 N, 将其等效压强 1.77 kPa 施加到三角形腔体有限元模型的中心区域, 如图 5 所示, 面板厚 4 mm, 仿真分析此时镜面变形量 PV 值为 47 nm, 一般认为抛光压力导致的镜面局部变形量小于 PV 值  $1/10\lambda$  时印透效应可以得到有效控制。

### 3.3 结构参数优化

确定初始方案后, 需对镜坯开展结构参数优化, 进一步提升镜坯的工作性能。结构参数优化时, 要在保证镜体面密度的前提下尽量提升镜体刚度, 因此, 将镜体重量 Mass 作为约束条件、镜体刚度作为目标函数, 并以检测重力状态下 (+X 向重力作用) 的变形值 RMS\_X 为镜体刚度评价指标, 在各结构参数合理

的取值范围内寻找最优组合, 该优化问题的数学表达式如下:

$$\begin{aligned} & \text{Find } X = (X_1, X_2, \dots, X_N), \\ & \text{where minimum}(\text{RMS}_X), \\ & \text{s.t. } L_X \leq X \leq U_X, \text{ Mass} \leq M_{\max}, \end{aligned}$$

其中:  $X_i$  是轻量化镜体中第  $i$  个结构参数,  $L_X$ 、 $U_X$  分别表示各参数的下限和上限,  $M_{\max}$  为镜坯最大重量。

开展优化前需要建立主镜的参数化模型。简化镜坯初始方案, 采用壳单元对各板壳结构进行建模, 使用壳单元可以在有限元分析中方便地修改单元厚度参数, 简化了复杂结构的参数化建模过程, 特别适用于轻量化镜体板壳厚度的优化问题<sup>[4]</sup>。主镜初始方案中待优化的轻量化结构参数主要包括: 面板厚度 T1、背板厚度 T2、锥孔壁厚 C1、主筋厚度 R1、副筋厚度 R2、镜体高度 H1、外圆壁厚 O1、中心窗口壁厚 O2 及削边加强筋厚度 R3、高度 H2, 如图 6 所示, 各变量用不同颜色表示。为减小相应的支撑结构重量, 锥孔内径结合设计经验确定为  $\Phi 110$  mm, 不参与优化。根据凝胶注模成型 RB-SiC 制备工艺给出镜坯各参数的取值范围, 如表 2 所示, 其中: 面板厚度对镜体刚度贡献最大, T1 不小于 4 mm; 锥孔壁厚 C1 不大于 12 mm, 以避免材料聚集处出现气孔、疏松; 为减少因浆料收缩导致的缺陷, 加强筋和背板等处最小厚度规定为 3 mm。参考文献中案例, 高轻量化率镜体径厚比 (即直径与高度之比) 极限值通常约为 10:1, 故在优化中约束镜体高度 H1 不小于 125 mm。

基于主镜镜坯的参数化模型, 使用集成优化的方法求解上述优化问题, 将参数修改、仿真分析、节点输出、面形拟合等环节融合在一起, 提高计算效率。仿真分析时约束锥孔内壁位于镜体中性面 (垂直于光轴并通过镜体质心的平面) 附近的三层节点, 并将有

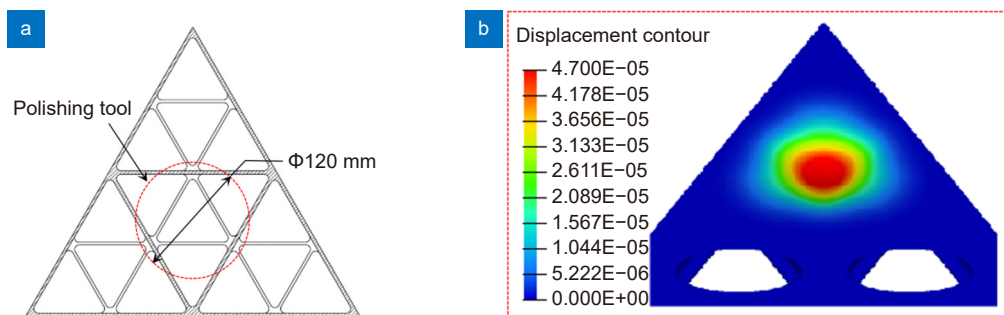


图 5 主镜抛光中的印透效应  
Fig. 5 Print-through effective of the primary mirror under polishing

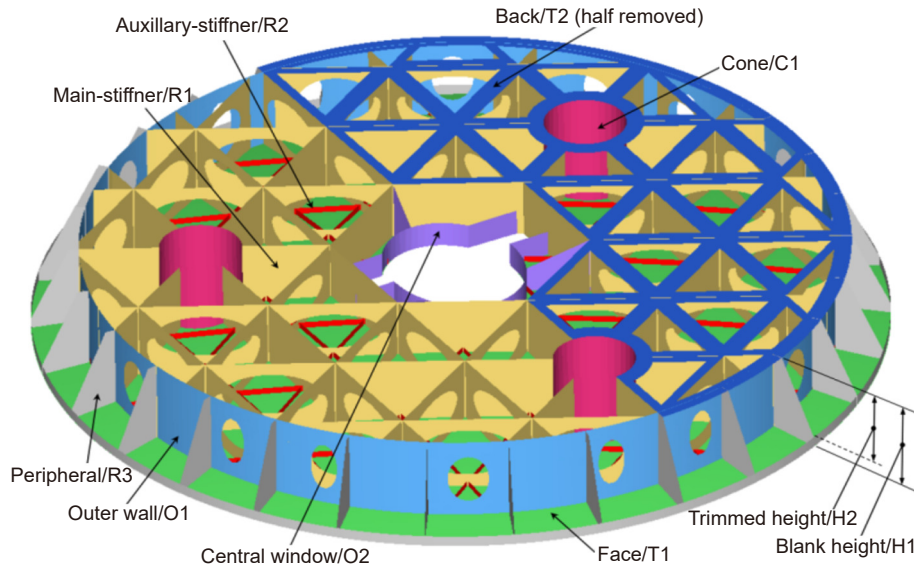


图 6 主镜镜坯参数化模型

Fig. 6 Parametric modeling of the primary mirror blank

表 2 参数取值范围及优化结果 (单位: mm)

Table 2 Parameter ranges and optimization results (unit: mm)

No.	Parameter	Limits	Original	Optimal	Ultimate
1	Face thickness/T1	[4, 8]	6	4.282	4
2	Bottom thickness/T2	[3, 6]	5	4.419	4
3	Cone thickness/C1	[6, 12]	10	8.154	10
4	Main-stiffener thickness/R1	[3, 6]	5	4.143	4
5	Sub-stiffener thickness/R2	[3, 6]	5	3.246	3
6	Outer wall thickness/O1	[3, 6]	5	3.440	3
7	Central window thickness/O2	[3, 6]	5	3.222	3
8	Peripheral thickness/R3	[3, 6]	5	3.203	3
9	Blank height/H1	[125, 150]	130	146.660	142.5
10	Trimmed height/H2	[100, 125]	100	115.325	125

限元软件求解得到的镜面节点位移进行拟合, 得到镜坯自重变形值; 求解优化问题时采用多岛遗传算法 (multi-island genetic algorithm, MIGA), 该算法具有适应性好、全局求解能力强的特点, 在工程分析中得到广泛应用。设置子代规模、岛屿数量、进化代数均为 6, 总迭代次数为 216 次, 既可以有效搜索解空间, 还能控制计算量、提高优化效率; 交叉概率、子代迁移率、变异概率分别为 100%、10%、3%, 迁移间隔代数为 2, 各变量的初始值及优化结果见表 2, 该优化问题的迭代求解过程如图 7 所示, 最优点对应的镜面 RMS 值为 2.931 nm; 对优化结果进行圆整并适当调整各厚度值, 根据主镜外包络要求微调镜体高度及

削边高度, 确定了镜坯最终参数, 其中, 镜体高度为 142.5 mm、对应的径厚比为 8.7:1, 面板厚 4 mm, 除主筋外其余加强筋厚度均为 3 mm。

### 3.4 设计结果

将前文的优化结果复现到三维模型中并添加工艺细节, 最终得到的镜坯设计重量为 46.9 kg, 轻量化率达到 91.2%、面密度为 38.8 kg/m<sup>2</sup>。前文参数优化时使用壳单元对主镜建模, 而壳单元的刚度略小于实体单元, 因此, 此处需要采用实体单元重新建立主镜镜坯的有限元模型, 对前文优化结果加以复算和确认; 约束锥孔内壁中性面附近的节点, 分析光轴水平时镜体自重变形 RMS 值为 2.87 nm, 变形云图如图 8(a)

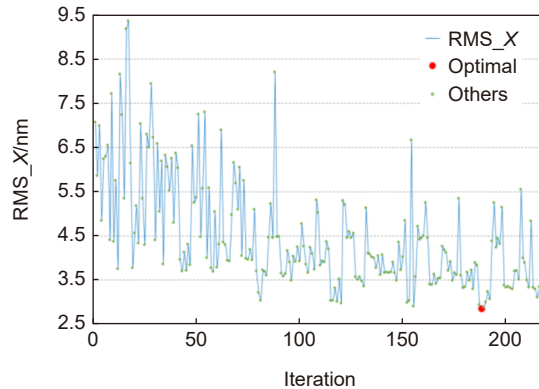


图7 主镜镜坯优化迭代历程

Fig. 7 Iteration of optimization process for the primary mirror blank

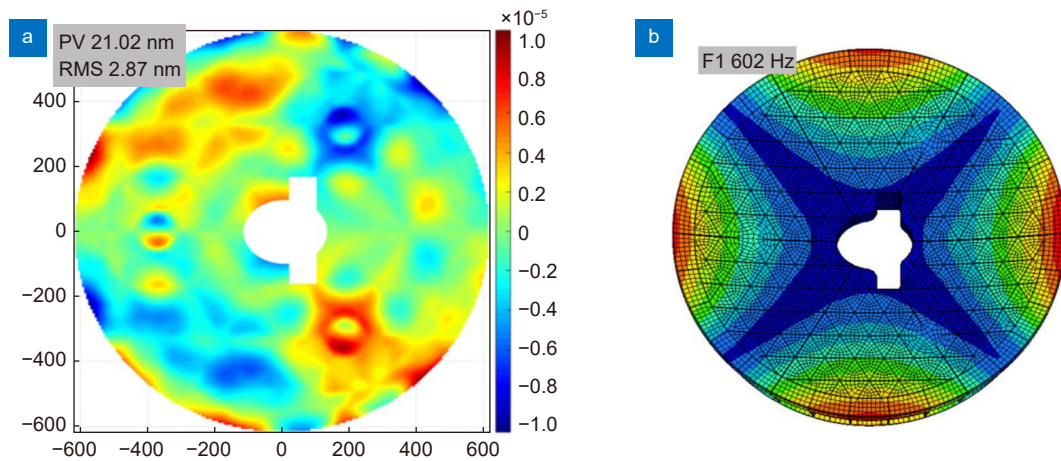


图8 主镜镜坯力学特性。(a) 重力工况变形云图; (b) 反射镜1阶自由模态振型

Fig. 8 Mechanical properties of the primary mirror blank. (a) Gravitational deformation nephogram; (b) The 1<sup>st</sup> order free vibration mode

所示, 可见, 镜体自身具有较高的刚度, 能够满足大口径空间反射镜的使用需求; 抛光过程中镜体平放在加工桌面上、保持光轴竖直状态, 在仿真模型中约束背部分布式基准面, 分析该状态下的镜体自重变形 RMS 值为 5.43 nm, 说明在抛光状态下镜体因重力导致的变形很小。此外, 还分析了镜体在无约束状态下的自由振动模态, 一阶频率为 602 Hz, 对应的振型如图 8(b) 所示, 主要体现为镜面整体的马鞍形振动模态且各区域变形对称, 表明除边缘位置刚度相对较低外, 镜体整体结构刚度充裕且均匀。

## 4 研制进展

### 4.1 镜坯制备结果

本文研制的主镜镜坯如图 9(a) 所示, 镜坯原始重量为 58.5 kg, 经机械加工后重 51.3 kg, 与设计值

46.9 kg 相比, 目前超重约 9.4%。对镜坯开展了质心位置测试, 如图 9(b) 所示, 实测质心沿光轴向的位置与理论值之间相差 3.7 mm, 横向位置的偏差为 2.0 mm, 可见镜坯质量分布相对均匀, 该量级的制造误差对主镜镜面变形造成的影响有限。使用改制卡规测量各腔体处镜面厚度典型值, 镜面整体上偏厚约 1 mm 且中心位置比边缘位置更显著, 侧壁、翻边等位置也略厚, 说明镜坯在制备成型过程中各处收缩率存在一定差异。

### 4.2 光学加工情况

主镜镜坯已经转入光学加工阶段, 目前, 主镜面形精度已达到 RMS  $1/8\lambda$  量级, 如图 10 所示, 镜坯材料致密, 未出现疏松孔洞等现象, 抛光过程中镜面表面质量良好, 面形精度逐步收敛, 干涉图中未见明显的印透效应。





图 9 主镜镜坯制备结果。(a) 镜坯实物; (b) 质心位置测试  
Fig. 9 Manufacturing results of the primary mirror blank. (a) Mirror blank; (b) Centroid position test

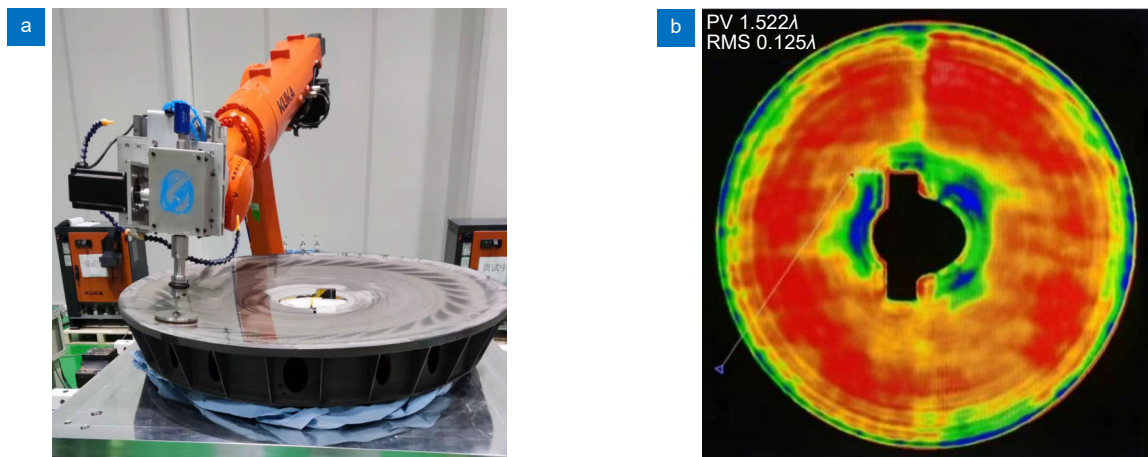


图 10 主镜光学加工。(a) 机械臂抛光; (b) 干涉图  
Fig. 10 Optical processing of the primary mirror. (a) Polishing with the robot arm; (b) Interferogram

## 5 结论

本文讨论了某高分辨率相机中通光口径  $\Phi 1200$  mm 主反射镜的镜坯设计过程, 运用凝胶注模成型和反应烧结工艺制备了半封闭式 SiC 镜坯, 将光轴水平作为检测状态以减轻支撑结构的复杂程度和组件重量, 采用分布式基准面减少加工面积, 通过集成优化确定镜坯轻量化结构参数, 最终实现了 1.2 m 量级空间反射镜面密度达到  $40 \text{ kg/m}^2$  的设计目标。

镜坯制备情况表明本文镜坯结构方案切实可行, 主、副筋交替布置方案可以进一步提升镜体轻量化率, 机械臂抛光能够控制印透效应; 镜坯实物偏重约 9.4%, 且各处板壳结构厚度存在一定不均匀性, 质心实测位置与理论值间偏差较小, 组件装配时可以通过微调柔性支撑光轴向位置来消除该偏差带来的不利影

响。文中的镜坯结构方案和优化方法可以为今后同类的高轻量化率、低面密度大口径空间反射镜的设计提供重要的参考。

## 参考文献

- [1] Zhang C J, Xi X H, Wang Y X, et al. Structural optimization design of large-aperture mirror for space remote sensing camera[J]. *Infrared Laser Eng*, 2020, 49(2): 0214002. 张超杰, 习兴华, 王永宪, 等. 空间遥感相机大口径反射镜结构优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(2): 0214002.
- [2] Zhang B W, Wang X Y, Zhao Y, et al. Progress of support technique of space-based large aperture mirror[J]. *Infrared Laser Eng*, 2018, 47(11): 1113001. 张博文, 王小勇, 赵野, 等. 天基大口径反射镜支撑技术的发展[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1113001.
- [3] Hu R, Chen Z Q, Zhang Y Y, et al. Design and manufacture of  $\Phi 1.05$  m lightweight mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(10): 200317.

- 胡瑞, 陈志强, 张媛媛, 等.  $\Phi 1.05$  m轻量化反射镜设计与制造[J]. *光电工程*, 2020, **47**(10): 200317.
- [4] Yuan J, Ren J Y. Improvement and optimization of lightweight structure for SiC reflective mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(8): 0812004.  
袁健, 任建岳. 碳化硅反射镜轻量化结构的改进与优化[J]. *光子学报*, 2015, **44**(8): 0812004.
- [5] Liu B. Research on optimization design for large-aperture mirror assembly and adjustable support technique[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 7-14. <https://doi.org/10.27605/d.cnki.gkxgs.2019.000061>.  
刘贝. 空间大口径反射镜组件优化设计及可调节支撑技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2019: 7-14. <https://doi.org/10.27605/d.cnki.gkxgs.2019.000061>.
- [6] Lightsey P A, Atkinson C, Clampin M, et al. James Webb Space Telescope: large deployable cryogenic telescope in space[J]. *Opt Eng*, 2012, **51**(1): 011003.
- [7] Toulemon Y, Passvogel T, Pilbratt G, et al. The 3, 5m all SiC Telescope for Herschel[J]. *Proc SPIE*, 2004, **10568**: 105682F.
- [8] Lampton M L, Sholl M J, Krim M H, et al. SNAP Telescope: an update[J]. *Proc SPIE*, 2004, **5166**: 113-123.
- [9] Wang K J, Dong J H, Xuan M, et al. Compound support structure for large aperture mirror of space remote sensor[J]. *Opt Precis Eng*, 2016, **24**(7): 1719-1730.  
王克军, 董吉洪, 宣明, 等. 空间传感器大口径反射镜的复合支撑结构[J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(7): 1719-1730.
- [10] Wang K J, Dong J H, Zhao Y, et al. Research on high performance support technology of space-based large aperture mirror[J]. *Optik*, 2021, **226**: 165929.
- [11] Liu Y, Zhang H, Liu L M, et al. Preparation and environmental simulation tests of large-size silicon carbide brazed reflection mirrors[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(8): 200088.  
刘岩, 张辉, 刘雷敏, 等. 大尺寸拼接式碳化硅反射镜的研制及环境模拟试验[J]. *光电工程*, 2020, **47**(8): 200088.
- [12] Wang K J, Dong J H. Structural design of  $\Phi 2$ m-level large-diameter SiC reflector used in space remote sensor[J]. *Infrared Laser Eng*, 2017, **46**(7): 0718005.  
王克军, 董吉洪. 空间传感器 $\Phi 2$  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.
- [13] Guo J, Zhu L, Zhao J, et al. Design and optimize of high tolerance support structure for large aperture space mirror[J]. *Opt Precis Eng*, 2019, **27**(5): 1138-1147.  
郭疆, 朱磊, 赵继, 等. 大口径空间反射镜大容差支撑结构设计及优化[J]. *光学精密工程*, 2019, **27**(5): 1138-1147.
- [14] Li J D. *Satellite Remote Sensing Technology*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018: 77-79.  
李劲东. 卫星遥感技术(上册)[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018: 77-79.
- [15] Wang S, Cong S S, Xue Z P, et al. Design of integrated carbon fiber secondary mirror supporting structure[J]. *Acta Opt Sin*, 2022, **42**(5): 0522001.  
王升, 丛杉珊, 薛志鹏, 等. 一体式碳纤维次镜支撑结构设计[J]. *光学学报*, 2022, **42**(5): 0522001.
- [16] Zhang J X, Jiang D L, Lin Q L, et al. Preparation of silicon carbide ceramics by aqueous gelcasting and pressureless sintering[J]. *J Chin Ceram Soc*, 2012, **40**(8): 1154-1157.  
张景贤, 江东亮, 林庆玲, 等. 通过凝胶注模成型和无压烧结制备碳化硅陶瓷[J]. *硅酸盐学报*, 2012, **40**(8): 1154-1157.
- [17] Yang J H, Liu H, Jiao C R, et al. Research on reaction-bonded silicon carbide with near-net-shape prepared by lamination process[J]. *China Ceram*, 2018, **54**(4): 57-61.  
杨金华, 刘虎, 焦春荣, 等. 层压成型工艺制备近净成型反应烧结碳化硅材料的研究[J]. *中国陶瓷*, 2018, **54**(4): 57-61.
- [18] Yoder Jr P R. *Opto-Mechanical Systems Design*[M]. Zhou H X, Cheng Y F, trans. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2008: 471-474.  
保罗·约德尔. 光机系统设计[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008: 471-474.

## 作者简介



袁健(1990-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事空间传感器光机结构设计方面的研究。

E-mail: 13578684079@163.com



【通信作者】张雷(1982-), 男, 博士, 研究员, 现担任长光卫星技术股份有限公司副总经理、卫星型号总师等职务, 主持策划了吉林一号多个卫星型号项目, 主持或参与了 20 余项国家级科研项目, 主要从事光学遥感卫星总体技术方面的研究。

E-mail: 18686344285@163.com



扫描二维码, 获取PDF全文

