

共基准一体化铝合金反射镜结构工艺协同设计

王佳宁 陈顺发 薛志鹏 尚俊豪 刘畅 张雷

Integrated design and manufacturing of monolithic aluminum alloy mirrors

WANG Jia-ning, CHEN Shun-fa, XUE Zhipeng, SHANG Jun-hao, LIU Chang, ZHANG Lei

引用本文:

王佳宁, 陈顺发, 薛志鹏, 尚俊豪, 刘畅, 张雷. 共基准一体化铝合金反射镜结构工艺协同设计[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0156

WANG Jia-ning, CHEN Shun-fa, XUE Zhipeng, SHANG Jun-hao, LIU Chang, ZHANG Lei. Integrated design and manufacturing of monolithic aluminum alloy mirrors[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0156

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0156>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

轻小型全铝高分相机

All-aluminum high-resolution camera with lightweight and compact size

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1450 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0062>

大口径宽温反射镜中心支撑结构设计

Design of the central support structure of a large aperture mirror with a wide working temperature

中国光学 (中英文). 2025, 18(1): 150 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0060>

单一透镜材料宽温度范围空间相机无热化设计

Athermal design of a space camera using a single lens material over a wide temperature range

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1388 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0065>

快速反射镜恒偏差故障观测器设计

Design of constant bias fault observer for fast steering mirrors

中国光学 (中英文). 2025, 18(1): 121 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0136>

机载宽温条件下反射镜组件与粘接层设计

Design of reflector assembly and adhesive layer under airborne wide temperature conditions

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 578 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0194>

运动探测及可见光通信一体化氮化物光电子芯片

Integrated Nitride optoelectronic chip for motion detection and visible light communication

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1257 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0028>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-09

共基准一体化铝合金反射镜结构工艺协同设计

王佳宁^{1,2}, 陈顺发¹, 薛志鹏^{1*}, 尚俊豪¹, 刘畅¹, 张雷¹

(1. 长光卫星技术股份有限公司 长春 130000;

2. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要: 反射镜是空间相机的核心部组件, 其性能直接影响了空间相机在轨成像质量, 铝合金反射镜凭借其良好的加工工艺性成为了空间相机反射镜的发展方向之一。**目的:** 为了降低空间相机装调难度, 开展了共基准一体化铝合金反射镜结构和工艺协同设计研究。**过程:** 首先, 基于镜面、柔性结构、安装基准等多功能要素集成于一体的理念, 开展一体化反射镜结构设计。然后, 在结构设计同时开展共基准工艺设计, 建立了加工过程误差传递数学模型和精度分配方案。最后, 针对所设计的反射镜开展了仿真分析和加工验证。**结果:** 结果表明: 一体化反射镜在典型工况下面形误差变化小于 $RMS0.01\lambda@632.8\text{ nm}$, 加工面形精度可达到 $RMS0.016\lambda@632.8\text{ nm}$, 共基准一体化反射镜光学基准和机械基准偏差优于 $2''$ 。**结论:** 本文设计的共基准一体化铝合金反射镜能够满足空间金属反射镜稳定可靠、面形精度高、光机基准一致性优异等要求。

关键词: 空间相机; 一体化铝合金反射镜; 光机共基准; 结构-工艺协同设计

中图分类号: V11 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0156 CSTR: 32171.14.CO.2025-0156

Integrated design and manufacturing of monolithic aluminum alloy mirrors

WANG Jia-ning^{1,2}, CHEN Shun-fa¹, XUE Zhipeng^{1*}, SHANG Jun-hao¹, LIU Chang¹, ZHANG Lei¹

(1. Changguang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130000, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: xuezhipeng@sjtu.cn

Abstract: The mirror is one of the great significance components of the space camera, and the aluminum alloy mirror is becoming one of the development directions of space camera mirrors with its excellent processability. **Objective:** To reduce the difficulty of installing and adjusting space cameras, an monolithic aluminum alloy mirror structure design was carried out. **Method:** First, based on the concept of integrating multiple functions such as mirror surface, flexible support, installation reference and so on, the structure design of an monolithic mirror was carried out. Besides, while designing the structure, co-reference process design was conducted simultaneously. This design was informed by establishing an error transmission model and a corresponding precision allocation scheme. Finally, simulation analysis and processing were carried out on the designed mirror. **Result:** The results show that the surface accuracy variation of the monolithic mirror was

收稿日期: 2025-12-12; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No. 20240602077RC)

Supported by Department of Science and Technology of Jilin Province (No.20240602077RC)

less than RMS $0.01\lambda@632.8$ nm under typical working conditions, and the precision of the processed mirror could reached up to RMS $0.016\lambda@632.8$ nm, and the deviation between the mechanical and optical references was better than $2''$. Conclusion: The monolithic aluminum alloy mirrors designed in this study can satisfy the space mirror requirements of stability, high precision and excellent consistency.

Key words: space Camera; integrated aluminum alloy mirror; optomechanical co-axial; structure and process collaborative design

1 引言

随着我国遥感卫星星座建设步伐的加快,空间相机正朝着批量化生产的方向发展,故对空间相机反射镜的加工精度和效率提出了更高的要求。相较于微晶玻璃、碳化硅等脆硬材料^[1],铝合金材料在机械性能、切削性能和导热性能等方面均具有明显优势^[2],因此铝合金材料成为了未来空间相机反射镜镜体的主要材料之一。

单点金刚石超精密车削加工工艺是利用超精密车床轴系之间的配合进给,通过金刚石刀具将铝合金反射镜加工到光学精度要求的一种加工工艺,其加工表面可直接获得亚微米级的形状精度和纳米级的表面粗糙度^[3-5],从而能极大的提高光学加工的效率。因此,通过单点金刚石超精密车削加工的铝合金反射镜在航天先进制造领域具有广泛的研究价值和应用前景。

铝合金反射镜可将支撑结构与镜体一体化设计,避免了光机系统膨胀不一致降低反射镜面形精度,从而保证光学系统具有良好的力热承载性能,故一体化铝合金反射镜在光学载荷领域有着广阔的发展前景^[6-7]。德国 IOF 研究所研制了 JSS-56 全铝合金离轴三反光学系统^[8-9],反射镜及各安装基准面都采用超精密车削一次加工成型,简化了系统的装调且能够很好地保证位置精度,从而大大降低光学系统的装调难度,实现了光学系统的快速制造和装配。国内研究学者也尝试将铝合金反射镜应用于光学系统中,谭双龙等^[10]设计了主三反射镜一体化的铝合金反射镜结构,主镜和三镜共用一个加工基准,保证两个反射镜同轴度的要求。范磊等人^[11]将一体化反射镜设计成等厚的平凹结构,提出了基于 Kinematic 定位和柔性去应力相结合的结构。王上等人^[12]设计了一体化铝合金反射镜,采用内圈作为主要支撑结构,所设计的反射镜结构在典型工况下的面形

精度变形 RMS 小于 $1/50\lambda$ 。

已有研究多针对铝合金反射镜结构开展设计缺少对于机械加工工艺性、加工基准和精度等方面的设计研究。因此,本文对共基准一体化铝合金反射镜开展了结构-工艺的协同设计,通过结构设计可实现多种功能要素集成一体,通过工艺设计可保证加工、检测和装调共用同一基准,还可实现机械基准和光学基准的精准传递。所设计的共基准一体化铝合金反射镜具有高功能密度和轻质的特性,满足高稳定、高精度的空间相机反射镜指标要求,还可减小机械基准和光学基准偏差,降低空间相机的装调难度。

2 一体化结构设计

2.1 设计指标

空间相机需要能够承受发射及在轨运行过程中力热载荷的变化,故相机各部件必须具有良好的结构刚度和热稳定性,使各光学元件能够在重力工况下保持相对稳定的空间位置,在温度场变化时各反射镜在柔性结构支撑下的热变形满足光学设计的要求^[15],表 1 为某型号反射镜的主要技术指标要求。

表 1 某空间相机反射镜的主要指标要求

Tab. 1 Indicators of the space mirror

项目	指标要求
通光口径/mm	≥ 220
面形精度/nm	$\leq \text{RMS}1/50\lambda@632.8$ nm
算术平均表面粗糙度/nm	≤ 5
质量/kg	≤ 5
工作温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	± 4
载荷作用下面形变化/nm (光轴重力变形除外)	$\leq \text{RMS}1/50\lambda@632.8$ nm
重力载荷下镜面偏心/ μm	≤ 10
重力载荷下镜面倾斜/ $''$	≤ 10

2.2 材料选择

6061-T6 铝合金被认为是制造光学反射镜的理想材料, 根据热处理制备工艺不同可分为普通 AA6061-T6 铝合金和快速冷凝 RSA6061-T6 铝合金, 两种材料的性能参数接近, 如表 2 所示, 可作为结构性能分析的参数依据。

表 2 铝合金材料参数

Tab. 2 Parameters of the Aluminum alloy

参数	AA6061-T6	RSA6061-T6
密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2700	2700
弹性模量 E/GPa	69	70
泊松比 μ -	0.33	0.33
抗拉强度 σ_b/MPa	320	330
线胀系数 $\alpha/10^{-6}\cdot\text{C}^{-1}$	22.8	23
热导率 $\lambda/\text{mW}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	155	160

为进一步分析铝合金在晶粒形貌及尺寸等方面的结构特征, 对两种铝合金进行电子背散射衍射扫描分析, 如图 1 所示。普通 AA6061-T6 铝合金材料晶粒大小不均匀, 晶粒尺寸差异较大, 晶粒尺寸范围为 4.7~135.6 μm , 晶粒尺寸不均匀性导致材料硬度存在差异, 进而影响切削加工表面粗糙度和修形抛光收敛效率。快速冷凝 RSA6061-T6 铝合金呈等轴晶, 具有晶粒尺寸均一且细小的微观特性^[13-14], 晶粒尺寸范围为 0.6~5.3 μm 。晶粒细化后晶界面积增加, 位错运动受阻, 故可获得均匀的塑性变形层, 可有效改善车削加工表面粗糙度和修形抛光收敛效率^[15-16], 因此选用 RSA6061-T6 铝合金为一体化反射镜的材料。

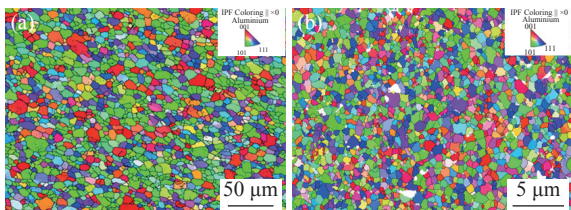


图 1 铝合金金相组织图

Fig. 1 Metallographic image analysis of aluminum alloy

2.3 一体化结构设计

2.3.1 轻量化结构设计

为了达到通光口径大于 $\phi 220\text{ mm}$ 的要求, 单边增加 5 mm 边缘延拓, 故将反射镜镜面尺寸设

计为 $\phi 230\text{ mm}$ 。根据 Roberts 经验公式可初步确定反射镜的厚度, 如下式所示:

$$\delta = \frac{3\rho g R^4}{16Et^2} \quad (1)$$

式中: δ 为镜面面形精度, ρ 为材料密度, R 为反射镜半径, E 为材料弹性模量, t 为镜体厚度, g 为重力加速度。结合式 (1)、表 1 反射镜技术指标要求和表 2 材料性能参数, 可计算得出镜体厚度 t 约为 31 mm。

考虑到平背式反射镜不但刚度最优且热稳定性好, 还可增加反射镜边缘轮廓与加工工装的接触面积, 故将反射镜后表面设计成平背式。此外, 对于回转对称反射镜, 背部开放轻量化形式的轻量化系数较高(可达到 85% 以上), 且具有良好的加工工艺性, 故选用背部开放式镜体。反射镜轻量化筋可采用多种设计形式, 主要包括三角形、四边形、六边形、圆形等, 综合考虑轻量化率、加工性和抗变形性能等, 选取了三角形轻量化结构^[17]。

2.3.2 一体化结构设计

在反射镜镜面边缘还设计了单边宽度为 5 mm 的标定平面, 将反射镜镜面和标定平面一体加工成型, 通过测量该平面的倾斜角度可表征出所加工反射镜镜面的倾斜角度, 从而实现光学基准的有效测量。

反射镜支撑点数目选取需要考虑约束问题和反射镜变形问题等, 考虑到静定安装原则, 避免超定位造成不必要的镜面变形, 故将反射镜的支撑点数目取 3 个。柔性环节虽然会降低反射镜整体刚度, 但可释放安装应力和热应力, 故在一体化铝合金反射镜镜体周围设计了三个柔性连接结构, 呈 120° 等角度间隔分布, 并为相机主承力结构预留安装定位孔, 如图 2 所示。结合已有设计经验, 将镜体外轮廓尺寸设计为 $\phi 320\text{ mm}$, 反射镜镜面尺寸与一体化反射镜外轮廓尺寸的比例系数为 0.75。柔性槽的尺寸参数经过尺寸-性能优化迭代结果确定, 最终柔性槽尺寸为 2 mm × 16 mm。

为了保证一体化反射镜从机械加工、光学检测到最终系统装调过程中采用同一基准, 故将背部平面和限位平台设计为反射镜的参考基准, 二者共同约束反射镜的 5 个自由度, 背部平面约束反射镜绕 X、Y 轴的转动自由度和 Z 轴的移动自

由度,底部平台与辅助块约束 Y 轴的移动自由度和 Z 轴的转动自由度,释放沿 Y 轴的移动自由度,如图 3 所示。

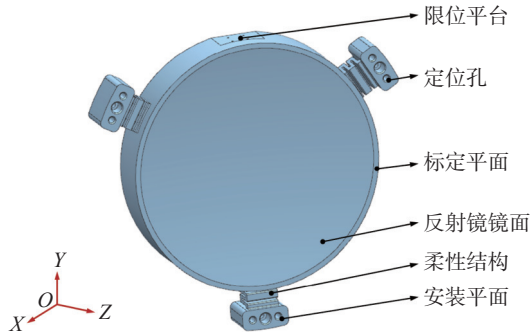


图 2 一体化反射镜结构设计

Fig. 2 Structure design of monolithic aluminum alloy mirror

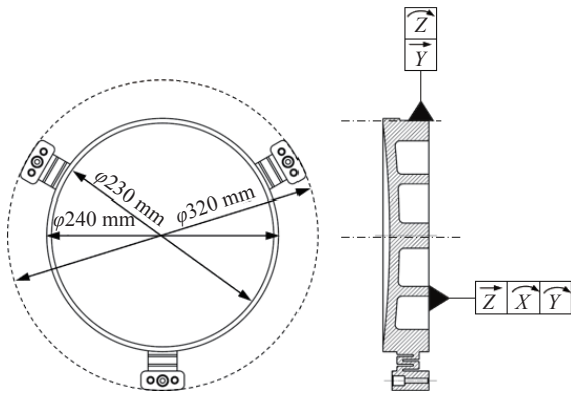


图 3 一体化反射镜自由度设计

Fig. 3 DOF design of monolithic aluminum alloy mirror

综上所述,根据反射镜镜面尺寸、面形精度及材料特性等,确定反射镜镜体厚度为 31 mm。并将反射镜设计为平背式、背部开放式镜体,配合三角形轻量化筋。所设计的一体化铝合金反射镜结构集成了镜面、柔性支撑、安装平面、标定平面和定位孔等多种功能要素,镜面尺寸为 $\phi 230$ mm, 外轮廓尺寸为 $\phi 320$ mm。

3 共基准工艺设计

3.1 共基准设计

在已有结构设计的基础上开展基准设计,在制造过程、检测过程和最终装配过程中使用相同的辅助定位元件,可以使反射镜的位置精度满足公差要求,有效提高了系统装调的效率。超精密车削加工所用到的基准为加工基准平面和限

位平台,一体化反射镜面形检测和相机系统装调所用到的基准为安装基准平面和限位平台,其中安装基准平面是以加工基准平面为基准,通过超精密车削加工得到的,故可确保加工基准平面和安装基准平面的平行度,从而保证基准的有效传递。

假设加工基准平面的平面度误差为 $B(x, y)$,超精密车削吸盘的平面度误差为 $C(x, y)$,安装基准面的平面度误差为 $F(x, y)$,如图 4 所示。当工件被吸附在吸盘上时,为了寻求最稳定的接触状态,工件会发生一个微小的刚体位姿变换,以最小化其背面 $B(x, y)$ 与吸盘 $C(x, y)$ 之间的间隙。误差的根本来源是 $B(x, y)$ 与 $C(x, y)$ 的失配 ($B-C$)。

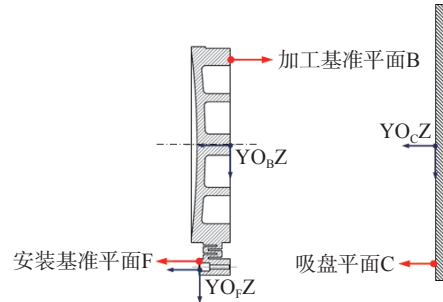


图 4 一体化反射镜基准平面

Fig. 4 Reference design of monolithic aluminum alloy mirror

该刚体变换可用一个齐次变换矩阵 T 表示。在小误差假设下, T 可写为:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & \delta_x \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & \delta_y \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, δ_x 、 δ_y 、 δ_z 分别为沿 X、Y 和 Z 轴的平移误差, ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为沿 X、Y 和 Z 轴的转动误差。

加工基准面上一个点 $P_b = [x, y, B(x, y), 1]^T$, 在装夹后获得新的位置 P'_b 为:

$$P'_b = T \cdot P_b, \quad (3)$$

根据上式可以计算得到加工基准面上一个点的 Z 坐标为:

$$z'_b \approx B(x, y) + \delta_z - y \cdot \varepsilon_x + x \cdot \varepsilon_y, \quad (4)$$

同理,安装基准面上一个点 $P_f = [x, y, F(x, y), 1]^T$, 在装夹后获得新的位置 P'_f , 同上,安装基准面

上一个点 Z 坐标为:

$$z'_f \approx H + \delta_z - y \cdot \varepsilon_x + x \cdot \varepsilon_y, \quad (5)$$

式中, H 为安装基准平面的目标厚度, 则安装基准平面的平面度误差为 $F(x, y)$ 为:

$$F(x, y) = z'_f - H = \delta_z - y \cdot \varepsilon_x + x \cdot \varepsilon_y, \quad (6)$$

式中, δ_z 、 ε_x 、 ε_y 并非自变量, 它们是由加工基准平面误差 $B(x, y)$ 和吸盘误差 $C(x, y)$ 通过最佳拟合过程决定的。采用最小二乘法最小化函数:

$$\min_{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \delta_z} \iint [B(x, y) - C(x, y) + F(x, y)]^2 dx dy, \quad (7)$$

通过求解这个最优化问题可以得到最优参数 ε_x^* 、 ε_y^* 、 δ_z^* 。将求得的参数代入即可得到镜面上任意点 F(x, y) 的误差:

$$F(x, y) = \delta_z^* - y \cdot \varepsilon_x^* + x \cdot \varepsilon_y^*, \quad (8)$$

将加工基准平面 $(x, y, B(x, y))$ 和吸盘误差 $(x, y, C(x, y))$ 的检测结果的离散点云导入公式中, 可以求解出 ε_x^* 、 ε_y^* 、 δ_z^* , 从而估算出镜面误差。对于外轮廓尺寸 $\phi 320 \text{ mm}$ 的一体化反射镜, 加工基准平面通过研磨加工可实现平面度精度控制在 $1 \mu\text{m}$ 以内, 同尺寸真空吸盘通过超精密车削加工后平面度精度约为 $0.5 \mu\text{m}$, 最终安装基准面的平面度误差小于 $1.5 \mu\text{m}$ 。

3.2 光机同轴工艺设计

利用超精密车削加工技术可以将反射镜外圆柱面、镜面边缘的标定平面、加工基准平面以及反射镜镜面均在同一工序中加工成型。由于反射镜与加工基准平面存在不平度会影响反射镜面形精度以及光轴的倾斜角度, 因此需要控制反射镜加工基准平面的平面度。

通过超精密车削后可保证标定平面、安装基准平面的平面度、外圆柱面的圆柱度、以及安装基准平面与外圆柱的垂直度等反射镜的形位公差精度均达到亚微米级。在一次装夹下同时完成外圆柱面和镜面的加工, 故可通过外圆柱面的轴线表示反射镜光轴的偏心位置精度, 即由 YOZ 坐标系变化为 $Y'O'Z'$ 坐标系, 如图 5 所示。此外, 在一次装夹下还同时完成外标定平面、安装平面和镜面的加工, 故可将标定平面的倾斜角度代替反射镜光轴的偏斜角度, 即由 YOZ 坐标系变化为 $Y''O'Z''$ 坐标系。在此精度下, 可助力光学系统只

装不调, 从而大大提升光学系统的装调效率。

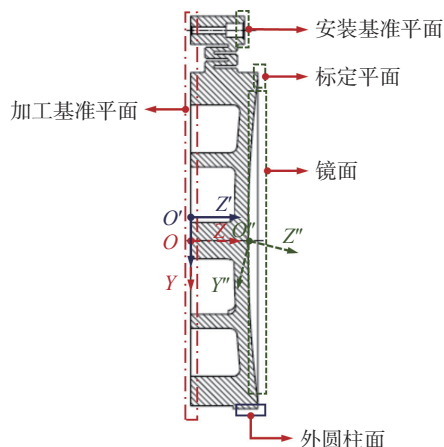


图 5 一体化反射镜工艺设计

Fig. 5 Manufacturing design of monolithic aluminum alloy mirror

安装基准平面与反射镜镜面在同一工序中加工成型。故根据式可知, 所加工镜面误差 $F(x, y)$ 表现为一个平移加上一个倾斜的一阶线性函数, 而不会复制加工基准平面和吸盘面形中可能包含的复杂高阶形状(如马鞍形、拱形等)。

加工镜面误差 $F(x, y)$ 可能会导致镜面产生倾斜加工, 即 YOZ 坐标系变化为 $Y''O'Z''$ 的最大倾斜角误差可近似估算为:

$$\alpha = \arctan \frac{F(x, y)}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (9)$$

式中, α 为倾斜角度, D 为一体化反射镜外轮廓尺寸。

反射镜外圆柱面与反射镜镜面在同一工序中加工成型, 故外圆柱轴线与光轴的偏心量可近似为外圆柱的圆柱度误差。

$$c = \frac{\varepsilon_c}{2}, \quad (10)$$

式中, c 为偏心量, ε_c 为圆柱度。对于外轮廓尺寸 $\phi 320 \text{ mm}$ 的一体化反射镜, 外圆柱面通过精密加工可实现圆柱度误差在 $1 \mu\text{m}$ 以内, 故可保证所加工反射镜的偏心量可小于 $0.5 \mu\text{m}$, 倾斜角度优于 $1.93''$ 。

综上所述, 在反射镜设计过程中考虑到加工、检测及装调所用到的基准传递, 通过超精密车削加工工艺, 在一次装夹中同步完成安装基准面、外圆柱基准面和光学镜面的制造, 并最终实现机械轴与光轴误差的有效控制。

4 性能分析与测试

4.1 建立有限元模型

为了验证所设计结构的性能满足指标要求,需要开展有限元仿真分析。将三维几何模型导入到有限元仿真分析软件中进行网格划分,所设计的一体化反射镜采用八节点六面体单元划分网格单元,网格划分后的模型如图 6 所示,共包含 123407 个节点,共 111594 个六面体单元。

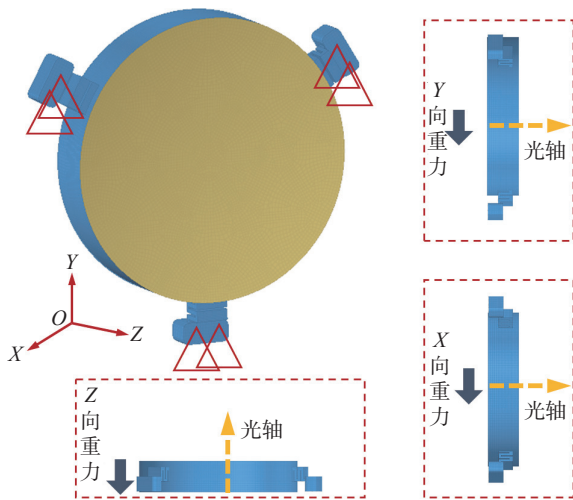


图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

4.2 性能分析

4.2.1 重力变形分析

重力变形分析的目的是比较反射镜抵抗重力变形能力,重力变形分析的载荷条件为分别施加 X、Y 和 Z 三个方向的重力载荷,约束定位孔的 6 个自由度来模拟反射镜装调后定位孔通过螺栓紧固,在上述载荷和约束条件下对反射镜组件进行有限元分析,如图 6 所示。

在不同方向重力载荷下,反射镜变形结果如表 3 所示:当反射镜受到沿 Z 向(光轴)重力作用时,其面形精度变化较大,面形变化 RMS 为 21.029 nm,即 $RMS1/30\lambda@632.8\text{ nm}$;当反射镜受到沿 X 向和 Y 向重力作用时,其面形精度变化均较小,分别为 4.027 nm 和 4.028 nm。此外,三个方向重力变形引起反射镜的偏心和倾斜量均未超过设计指标要求,上述分析数据说明所设计的镜体自身刚度高,特别是对于垂直于光轴方向的重力载荷实现了较好的卸载效果。

表 3 重力变形分析结果

Tab. 3 Gravity deformation analysis results

参数		X	Y	Z
偏心/ μm	ΔX	2.490	1.47E-05	1.68E-08
	ΔY	1.81E-05	2.490	-5.06E-06
	ΔZ	1.05E-05	-5.98E-06	2.799
倾斜/"	θ_x	0.004	0.898	0.004
	θ_y	0.762	0.240	0.748
面形变化/nm	RMS	4.027	4.026	21.029

4.2.2 温度变形分析

反射镜在轨运行过程中会发生温度变化,温度变化可能会引起反射镜的面形发生变化,因此需要分析反射镜在温度梯度工况下的面形精度。将 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 温升作为载荷条件,约束为所设计安装结构定位孔的全部自由度,该工况下的反射镜变形情况如图 7 所示。

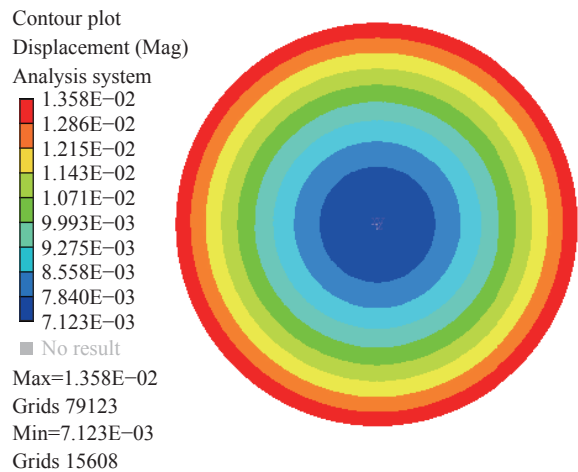


图 7 温升工况下反射镜表面变形云图

Fig. 7 Cloud map of mirror under temperature condition

由图可知,一体化反射镜在温度载荷作用下的变形云图呈现回转对称形,且最大变形量发生在镜体外边缘位置,其值为 $13.582\text{ }\mu\text{m}$ 。根据反射镜在温度载荷下的有限元仿真计算结果,拟合出镜面面形变化为 $RMS5.746\text{ nm}$,该计算结果远小于设计指标要求。

4.2.3 模态分析

模态分析的目的是获得结构特征频率和振型,以分析结构的动态刚度特性^[18],通过有限元仿真分析计算一体化反射镜自由模态的频率和振型,如表 4 所示。所设计的一体化反射镜一阶自然频率为 287.79 Hz ,可避免火箭发射阶段动力学

输入对空间相机的影响。此外,前三阶模态的阵型分别为沿 Z、X 和 Y 轴的移动,四、五、六阶模态的阵型分别为绕 Y、X 和 Z 轴转动。

表 4 模态分析结果

Tab. 4 Mode analysis results

阶数	频率/Hz	振型
1	287.79	绕Z轴移动
2	362.85	绕X轴移动
3	362.86	绕Y轴移动
4	440.33	绕Y轴转动
5	440.35	绕X轴转动
6	675.09	绕Z轴转动

综上所述,在 X 方向重力、Y 方向重力以及 4 °C 温升等工况下,一体化反射镜面形精度变化均小于 6 nm,从而验证了所设计铝合金反射镜具备稳定的面形精度。此外,自由模态的一阶基频远大于设计指标要求,从而避免了在发射阶段产生谐振。通过仿真分析验证了所设计的共基准一体化铝合金反射镜满足其全生命周期在检测、装调、发射及在轨运行等应用场景的性能要求。

4.3 超精密加工及测试

4.3.1 反射镜超精密加工

单点金刚石超精密车削加工是实现反射镜高精度快速制造的有效技术手段,采用 RSA6061-T6 作为一体化铝合金反射镜的材料,使用刀具半径为 R2 的天然金刚石刀具完成超精密车削加工。车削加工的主轴转速设置为 2000rpm,进给速度设置为 3 mm/min,切深为 5 μm,车削加工过程如图 8 所示。

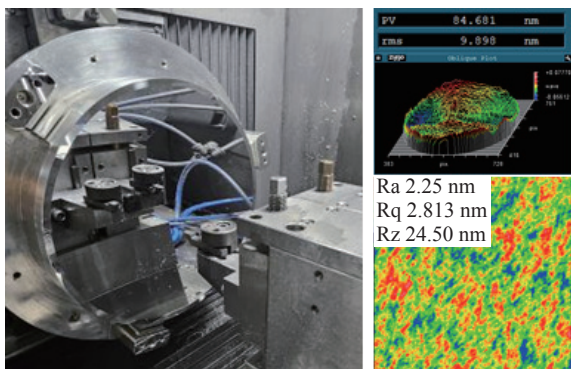


图 8 一体化反射镜加工结果图

Fig. 8 Processing diagram of monolithic aluminum alloy mirror

由于大口径单点金刚石车削加工很难实现可见光级反射镜的面形精度要求,故采用抛光修形手段进一步提高面形精度。通过修形抛光后面形精度为 $RMS0.016\lambda@632.8\text{ nm}$,表面粗糙度 Ra 为 2.251 nm,反射镜面形精度及表面粗糙度的检测结果如图 8 所示。

4.3.2 光轴误差测试

采用带有自准直灯的经纬仪分别测量一体化反射镜安装平面和标定平面的俯仰角度,本文选用徕卡 TM6100A 工业经纬仪。用经纬仪照准镜面,合理设置仪器位置并调整其视准轴方向,使仪器的视准轴与镜面的法线重合,则经纬仪的视准轴方向代表了该方位的角度,测试现场如图 9 所示。

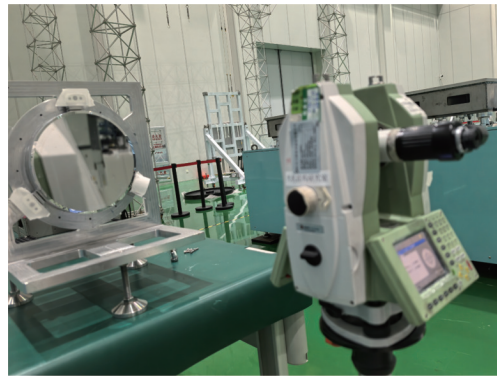


图 9 一体化反射镜标定检测图

Fig. 9 Diagram of optical reference test of monolithic aluminum alloy mirror

通过多次测量取平均值的方式来减小检测误差,安装平面的平均俯仰角度为 90.6522° ,标定平面的平均俯仰角度为 90.6525° 。最终测得反射镜镜面光轴与安装平面机械基准轴线之间的平均偏差为 0.0003° (即 $1.08''$),满足 3.2 中倾斜角度优于 $1.93''$ 的光机同轴工艺设计目标,从而验证了所研制的共基准一体化反射镜能够实现机械轴与光轴误差的有效控制。

上述研究成果验证了共基准一体化铝合金反射镜通过结构和工艺协同设计可实现机械轴与光轴误差的有效控制,反射镜的镜面与安装基准面的倾斜角度误差在秒级,可减少绕 X 轴、Y 轴旋转的相机装调自由度;射镜的镜面与外圆基准圆柱的偏心距离误差在微米级,减少了沿 X 轴、Y 轴移动的相机装调自由度,故主、次镜装调的自由度仅限制在沿 Z 轴移动和绕 Z 轴转动(同轴光

学系统不考虑绕 Z 轴转动)的自由度。相较于传统同轴光机镜头,全铝相机主、次镜的装调仅剩沿 Z 轴移动自由度,从而显著降低了光机镜头的装调难度,提升装调效率。

5 结 论

本文针对空间相机反射镜高效率高精度的研制需求,提出了共基准一体化铝合金反射镜的设计方法,研制了外轮廓尺寸 $\phi 320$ mm 的一体化轻质反射镜结构,并引入结构-工艺协同设计方法,减小机械基准和光学基准偏差,从而降低空间相机装调难度。

(1)采用快速冷凝法制备铝合金的微观晶粒

尺寸范围为 $0.6 \sim 5.3 \mu\text{m}$,晶粒呈均一且细小的等轴晶,RSA6061-T6 是加工铝合金反射镜的理想材料。

(2)共基准一体化铝合金反射镜通过结构设计可实现多种功能要素集成一体,通过工艺设计可保证加工、检测和装调共用同一基准,还可实现机械基准和光学基准的精准传递。

(3)结合试验和仿真结果可以得出,所设计的一体化铝合金反射镜在典型工况下的面形精度变化小于 $\text{RMS } 0.01\lambda@632.8 \text{ nm}$,加工的面形精度优于 $\text{RMS } 0.016\lambda@632.8 \text{ nm}$,光学基准和机械基准的偏差优于 $2''$,从而验证了共基准一体化铝合金反射镜可满足可见光级空间相机反射镜的指标要求。

参考文献:

- [1] 王成彬,孙胜利,孙小进,等.基于增材制造的碳化硅双面反射镜设计与可靠性验证[J].光学精密工程,2026,34(1):26-34.
WANG CH B, SUN SH L, SUN X J, *et al.*. Design and reliability verification of SiC double-sided reflector based on additive manufacturing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2026, 34(1): 26-34. (in Chinese).
- [2] 徐超,彭小强,戴一帆.复杂曲面铝反射镜超精密制造现状[J].光电工程,2020,47(8):200147.
XU CH, PENG X Q, DAI Y F. Current status of ultra-precision manufacturing of complex curved aluminum reflectors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 200147. (in Chinese).
- [3] 王振忠,施晨淳,张鹏飞,等.先进光学制造技术最新进展[J].机械工程学报,2021,57(8):23-56.
WANG ZH ZH, SHI CH CH, ZHANG P F, *et al.*. Recent progress of advanced optical manufacturing technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(8): 23-56. (in Chinese).
- [4] CHEN Z Z, HUANG W W, ZHU ZH W, *et al.*. Ultra-precision diamond turning error compensation via iterative learning from on-machine measured data[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2023, 24(12): 2181-2195.
- [5] DAI Y Q, ZHANG G Q, LUO T, *et al.*. Centre cone generation and its force performance in single-point diamond turning[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 184: 105780.
- [6] ZHANG K, QU H M, GUAN H J, *et al.*. Design and fabrication technology of metal mirrors based on additive manufacturing: a review[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(22): 10630.
- [7] 胡喻阁,王晓伟,陆卫国.全铝合金同轴四反长波红外光学系统设计[J].红外与激光工程,2025,54(11):202503.
HU Y G, WANG X W, LU W G. All-aluminium coaxial four-inverse long-wave infrared optical system design[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(11): 202503. (in Chinese).
- [8] HARTUNG J, VON LUKOWICZ H, KINAST J. Theoretical compensation of static deformations of freeform multimirror substrates[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(15): 4020-4031.
- [9] KIRSCHSTEIN S, KOCH A, SCHÖNEICH J, *et al.*. Metal mirror TMA, telescopes of the JSS product line: design and analysis[C]. *Proceedings of the SPIE 5962, Optical Design and Engineering II*, SPIE, 2005: 59621M.
- [10] 谭双龙,王灵杰,张新,等.可见光级铝合金反射镜一体化设计与分析[J].长春理工大学学报(自然科学版),2017,40(3):5-8,12.
TAN SH L, WANG L J, ZHANG X, *et al.*. Snap together design and analysis of visible quality aluminum mirror[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 40(3): 5-8,12. (in Chinese).
- [11] 范磊,赵勇志,曹玉岩.红外离轴系统金属反射镜设计与分析[J].红外技术,2015,37(5):374-379.

- FAN L, ZHAO Y ZH, CAO Y Y. Design and analysis of metal mirror for infrared off-axial system[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(5): 374-379. (in Chinese).
- [12] 王上, 张星祥, 沙巍, 等. 一体化铝合金反射镜的拓扑优化设计与分析[J]. *红外技术*, 2022, 44(1): 61-65.
WANG SH, ZHANG X X, SHA W, *et al.*. Topology optimization design and analysis of an integrated aluminum alloy mirror[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(1): 61-65. (in Chinese).
- [13] JASINEVICIUS R G, OTOBONI J A, BASSO I, *et al.*. Size effects in ultraprecision machining of aluminum alloys: conventional AA6061-T6 and RSA 6061-T6[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 136-157.
- [14] 陈宜锐, 易幼平, 黄始全. 基于低温挤压的 6061 铝合金光学反射镜材料制备工艺[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2025, 56(5): 1773-1783.
CHEN Y R, YI Y P, HUANG SH Q. Preparation technology of 6061 aluminum alloy optical mirror material based on low temperature extrusion[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2025, 56(5): 1773-1783. (in Chinese).
- [15] 何春雷, 王姝淇, 李东洋, 等. 晶粒对多晶材料超精密切削影响的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(3): 373-392.
HE CH L, WANG SH Q, LI D Y, *et al.*. Research progress on the influence of crystalline grain in ultra-precision cutting of polycrystalline material[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(3): 373-392. (in Chinese).
- [16] KUMAR N. An exploration of microstructural in-homogeneity in the 6082 Al alloy processed through room temperature multi-axial forging[J]. *Materials Characterization*, 2021, 176: 111134.
- [17] 袁健, 裴思宇, 霍占伟, 等. 大口径宽温反射镜中心支撑结构设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2025, 18(1): 150-159.
YUAN J, PEI S Y, HUO ZH W, *et al.*. Design of the central support structure of a large aperture mirror with a wide working temperature[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(1): 150-159. (in Chinese).
- [18] XU K, HU H X, ZHANG X, *et al.*. Accuracy verification methodology for computer-generated hologram used for testing a 3.5-meter mirror based on an equivalent element[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(2): 25.

作者简介:



薛志鹏(1198—), 男, 内蒙古自治区呼伦贝尔人, 博士, 研究员。主要研究方向为空间相机光机系统设计及精密制造、超精密加工技术及装备。E-mail: xuezhipegss1314@126.com