

## 轻小型金属基增材制造光学系统

付强 闫磊 谭双龙 刘洋 王灵杰 张新

### Light-and-small optical systems by metal-based additive manufacturing

FU Qiang, YAN Lei, TAN Shuang-long, LIU Yang, WANG Ling-jie, ZHANG Xin

引用本文:

付强, 闫磊, 谭双龙, 刘洋, 王灵杰, 张新. 轻小型金属基增材制造光学系统[J]. *中国光学*, 2022, 15(5): 1019–1028. doi: 10.37188/CO.2022–0128

FU Qiang, YAN Lei, TAN Shuang-long, LIU Yang, WANG Ling-jie, ZHANG Xin. Light-and-small optical systems by metal-based additive manufacturing[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 1019–1028. doi: 10.37188/CO.2022–0128

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0128>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 大相对孔径紫外成像仪光学系统设计

Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera

*中国光学 (中英文)*. 2018, 11(2): 212 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0212>

#### 激光位移传感器传感探头微小型光学系统设计

Design of micro-optical system for laser displacement sensor sensing probe

*中国光学 (中英文)*. 2018, 11(6): 1001 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1001>

#### 大视场高像质简单光学系统的光学-算法协同设计

Optical/algorithmic co-design of large-field high-quality simple optical system

*中国光学 (中英文)*. 2019, 12(5): 1090 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1090>

#### 多角度耦合分幅相机光学系统设计

Optical system design of multi-angle coupled framing camera

*中国光学 (中英文)*. 2018, 11(4): 615 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0615>

#### 双压电片镜在同步辐射光源光学系统中的应用

Application of bimorph mirror in the optical system of synchrotron radiation light source

*中国光学 (中英文)*. 2017, 10(6): 699 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0699>

#### 简单光学系统的宽光谱点扩散函数估计

Wide-spectrum PSF estimation for simple optical system

*中国光学 (中英文)*. 2019, 12(6): 1418 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1418>

文章编号 2097-1842(2022)05-1019-10

## 轻小型金属基增材制造光学系统

付强<sup>1\*</sup>, 闫磊<sup>1</sup>, 谭双龙<sup>1,2</sup>, 刘洋<sup>1,2</sup>, 王灵杰<sup>1</sup>, 张新<sup>1</sup>  
(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院  
光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了实现用于深空低冷目标探测的长波红外折反射式光学系统的进一步轻小型、低辐射和大视场, 对局部制冷光学系统、拓扑优化金属基反射镜设计、增材制造、金属基光学加工与表面改性等进行研究。首先, 设计完成了紧凑型局部制冷折反射式光学系统, 口径为 55 mm, 焦距为 110 mm, 视场达到  $4^\circ \times 4^\circ$ ; 其次, 利用拓扑优化理论, 设计完成了主镜组件、次镜组件和连接筒, 三阶和四阶模态达到 1213.7 Hz; 接着, 采用增材制造、单点金刚石车削、表面改性、表面镀金等手段完成前组光学元件的研制, 利用定心装配工艺完成光机装调; 最后, 对光机装调后的系统性能进行了测试。测试结果表明: 光学系统全视场范围内调制传递函数均达到衍射极限, 重量仅为 96.04 g。金属基增材制造方法可以作为提升光学系统性能的有效手段。

**关键词:** 光学系统; 金属反射镜; 增材制造; 局部制冷光学系统; 拓扑优化

中图分类号: TG665; V261.8 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0128

## Light-and-small optical systems by metal-based additive manufacturing

FU Qiang<sup>1\*</sup>, YAN Lei<sup>1</sup>, TAN Shuang-long<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1,2</sup>, WANG Ling-jie<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>  
(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)  
\* Corresponding author, E-mail: fuqianghit@163.com

**Abstract:** In order to realize the target of light and small, low radiation and large field of view of the long-wave infrared catadioptric optical system for deep-space low-temperature target detection, the local cooling optical system, topology optimization, metal-based mirror design, additive manufacturing, Single Point Diamond Turning (SPDT) for metal mirrors and surface modification are studied. First of all, a compact cata-

收稿日期: 2022-06-14; 修订日期: 2022-07-07

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助 (No. 2021221); 吉林省科技发展计划青年成长科技计划项目 (No. 20210508054RQ)

Supported by Youth Innovation Promotion Association, CAS (No. 2021221); Youth Growth Technology Program of Jilin Province Science and Technology Development Plan (No. 20210508054RQ)

dioptric optical system with partially cooled is designed, in which the aperture is 55 millimeters, the focal length is 110 millimeters and the field of view is 4 degrees by 4 degrees. Secondly, the primary mirror assembly, the secondary mirror assembly and the connecting baffle are designed using the topology optimization theory, and the third order mode and fourth order mode reach 1213.7 Hz. Then, the front group optical mirrors assembly are developed by means of additive manufacturing, SPDT, surface modification and surface gold plating. We complete the optical mechanical assembly using the centering assembly method. Finally, the performance of the system after optical mechanical centering is tested. The test results show that the Modulation Transfer Function (MTF) curves of the optical system reach the diffraction limit in the whole field of views, and the weight is only 96.04 grams. Additive manufacturing method can be used as an effective means to improve the performance of optical systems.

**Key words:** optical system; metal mirrors; additive manufacturing; local cooling optical system; topology optimization

## 1 引言

深空低冷背景环境下目标探测是一个相对广阔的领域,如深空探测、天基预警、空间攻防等任务都属于该领域范畴,是各大国必争之地<sup>[1]</sup>。折反射式光学系统被广泛用于低冷目标探测领域<sup>[2]</sup>。随着科学技术的不断发展,折反射光学系统向着灵巧型、轻质、低辐射、大视场和高分辨率等方向发展。

对于折反射式光学系统前端的反射光学元件,随着单点金刚石加工技术的发展,金属反射镜因其具有加工工艺性好、材料价格较低等优势逐渐获得认可和应用,典型的金属基材料包括铝合金、镁铝合金、铍铝合金等<sup>[3-5]</sup>。随着轻质高刚度指标要求的进一步提高,传统机械加工方式加工的铝合金反射镜越来越不能满足需求,这在一定程度上限制了铝合金反射镜的应用。为解决上述问题,基于增材制造的铝合金反射镜技术应运而生,成为近年来的研究热点<sup>[6-7]</sup>。增材制造金属基反射镜的加工工艺与传统金属反射镜相同,同时可以将拓扑优化思想应用于金属反射镜的设计,设计封闭式金属反射镜,从而获得传统金属反射镜难以实现的轻质和高刚度。

2015年,美国康宁公司通过增材制造技术制备了一个蜂窝状轻质高性能铝镜,与传统金属反射镜基体制备相比,提高了加工成形效率<sup>[8-9]</sup>。

德国弗琅禾费研究所提出一种夹层式封闭

蜂窝状结构,通过内部加强筋上的孔使所有蜂窝状空间连通,反射镜刚度高于传统金属反射镜<sup>[10]</sup>。

2017年,Hilpert E等人通过对比5种结构形式的金属反射镜,分析了增材制造技术制备的金属反射镜的优势<sup>[11]</sup>。2019年,Hilpert E等人对反射镜的轻量化形式进行了进一步的优化设计,使其在保证金属反射镜刚度的情况下,达到了60.5%的轻量化效果<sup>[12]</sup>。

本文针对深空低冷目标的探测需求,提出一种光学系统局部制冷方法,将传统常温折反射式光学系统中的透镜组部分,放置到探测器杜瓦内部,与探测器芯片一起封装到杜瓦中制冷,实现光学自辐射抑制。在此基础上,设计完成了局部制冷型折反射式光学系统,光学系统口径为55 mm,焦距为110 mm,视场达到 $4^\circ \times 4^\circ$ 。利用拓扑优化方法对前组反射式系统进行了优化设计,利用增材制造方法打印完成主镜组件、次镜组件和连接筒。利用单点金刚石车削的方法进行光学加工,针对打印表面存在的缺陷,采用镍磷改性工艺加以解决,最终完成的主镜和次镜面形精度高。最后,对光机装调后的系统性能进行了测试。

## 2 金属反射镜拓扑优化设计

拓扑优化方法本质上是对于特定的设计区间,寻求最佳的分布,以实现最优设计构型。目前

常用的拓扑表达形式包括:变厚度法、均匀化方法和相对密度法等<sup>[13]</sup>。

采取相对密度法进行拓扑优化设计,相对密度法是在均匀化方法的基础上改进的一种方法,以单元相对密度作为设计变量,相对密度设置为0~1,相对密度越接近1,说明该单元在设计中越发重要,表明该单元应该保留;而当相对密度接近零时,表明该单元材料可以去除。目前相对密度法中最为常用的是各向正交惩罚材料密度(SIMP)法,该方法在许多通用有限元分析软件中应用广泛,其单元弹性模量和相对密度关系式为:

$$E_i = (\alpha_0 + (\alpha_1 - \alpha_0)\alpha_i^p)E_0 \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

其中,  $E_i$ 为弹性模量,  $\alpha_i$ 为单元相对密度,  $\alpha_0$ 为单元相对密度下限,  $\alpha_1$ 为单元相对密度上限,  $E_0$ 为材料弹性模量,  $N$ 为设计区间的单元数量,  $p$ 为惩罚因子。

通过设定拓扑优化单元阈值 $\alpha_c$ , 并对比 $\alpha_i$ 和 $\alpha_c$ 大小对设计区间内单元进行取舍, 可以将设计变量表述为:

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)^T \quad (2)$$

基于此, 对反射镜支撑结构展开拓扑优化设计, 通过分析传力路径, 寻求设计空间内最优材料分布, 以实现支撑区域高刚度、高轻量化设计。以体积为约束条件, 最小应变能为设计目标, 建立数学优化模型, 具体如式(3)所示:

$$\min : J(\alpha) = U^T K U i \quad (3)$$

$$s.t. \begin{cases} K U = F \\ V(\alpha) = f V_0 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1 \end{cases}$$

其中,  $J$ 为反射镜支撑区域应变能,  $\alpha$ 为设计变量向量,  $\alpha_i$ 为第 $i$ 个设计变量,  $K$ 为全局刚度矩阵,  $U$ 为全局位移向量,  $F$ 为全局载荷向量,  $V$ 为设计域体积约束,  $f$ 为体积分数,  $V_0$ 设计域体积。

### 3 轻小型金属基光学系统

#### 3.1 指标要求

光学系统具体设计指标要求见表1。光学系

统的谱段为长波红外, 选择的长波红外探测器指标见表2。由于所选探测器为制冷型探测器, 故有冷光阑效率的要求, 需要达到100%。主次镜组件重量要求较苛刻, 要求不大于100g。

表1 光学系统设计指标

Tab. 1 Design index of the optical system

参数	指标要求
波段/ $\mu\text{m}$	8~10
相对孔径	1:2
焦距/mm	110
视场/ $^\circ$	4×4
冷光阑效率	100%
主次镜组件重量	不大于100g

表2 长波红外探测器指标

Tab. 2 Index of the long-wave infrared detector

参数	指标数据
阵列尺寸	256×256
像元间距	30 $\mu\text{m}$ ×30 $\mu\text{m}$
F数	2

#### 3.2 光学系统设计

为实现光学系统的轻小型化, 在光学系统结构形式上, 采用同轴折反射式结构形式。指标中光学系统的视场较大, 达到4°×4°。考虑将由透镜组成的中继镜组放置在红外探测器的杜瓦中, 光学系统元件数尽量少, 数量少于等于3片为宜。考虑中继镜组的第一片透镜同时作为探测器杜瓦的窗口片, 中继透镜组的口径和间隔尺寸应尽量紧凑, 上述的一系列要求给光学系统设计带来了一定挑战。

设计后的光学系统二维图如图1所示。光学系统由主镜、次镜以及中继镜组组成, 其中主镜和次镜为非球面设计, 均为高次非球面; 中继镜组由三片透镜组成, 正光焦度材料为锗, 负光焦度材料为硒化锌, 冷阑放置在透镜2的后表面上。系统为了冷阑匹配采用二次成像结构形式, 中间像面位于主镜和次镜之间。为尽量减小镜体自身辐射对探测性能的影响, 光阑匹配是设计的重点, 冷光阑效率达到100%。中心遮拦影响能量

集中度和光学传递函数,设计后系统面遮拦比为 18.3%。

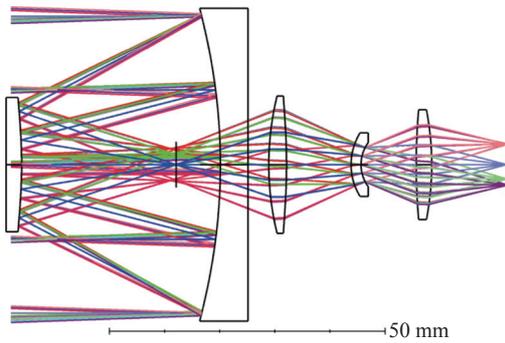


图 1 光学系统二维图

Fig. 1 2-D diagram of the optical system

图 2 给出了光学调制传递函数曲线,由图 2 可以看出,全视场范围内各视场点像质均达到衍射极限。

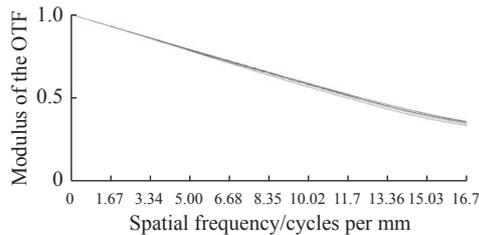


图 2 光学系统调制传递函数曲线

Fig. 2 Modulation transfer function curves of the optical system

对于点目标探测系统来说,能量集中度是一个重要的衡量指标,图 3 给出了光学系统的能量集中度曲线。可见,在一个像元范围内,能量集中度大于 50%,受中心遮拦的影响,能量集中度低于传统透射式系统。

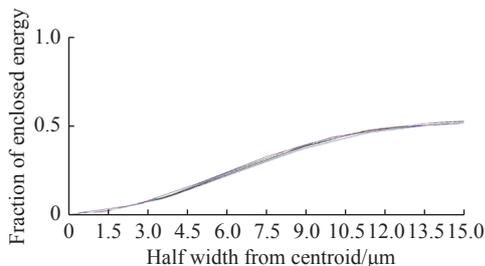


图 3 光学系统能量集中度曲线

Fig. 3 Enclosed energy curves of the optical system

### 3.3 光机结构设计

轻小型金属基光学系统结构包含前组和后组

两部分。其中,前组包括:主镜组件、遮光筒、次镜组件;后组包括:透镜组和透镜壳等。为了实现结构超轻设计,同时考虑到光学系统与总体的接口关系,在设计上,采用拓扑优化方法对前组进行设计,工艺上采用 3D 打印方式实现。设计完成的系统结构如图 4 所示。

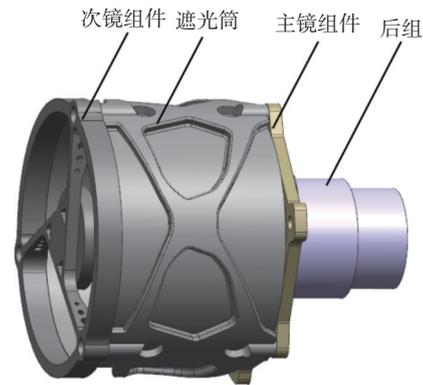


图 4 轻小型金属基光机系统图

Fig. 4 Diagram of light-and-small metal-based optical system

#### 3.3.1 主镜组件设计

为了使零部件最少,同时尽量避免安装过程中引入的外力等,将主镜及其背板进行一体式设计,在镜体和支撑之间添加柔性设计,有效起到隔绝外力及温度变化产生的应力的作用。运行 Hypermesh 软件中的 Optistruct 优化模块,对初始结构进行拓扑优化设计,为保证主镜的面形精度,结合点阵结构对镜体内部进行适度填充,在满足轻量化设计思想下,有效提高镜面刚度。拓扑优化完成的主镜组件如图 5 所示,在自重条件下的变形情况如图 6(彩图见期刊电子版)所示,对主镜的面形进行拟合分析,主镜面形 RMS 为 3 nm(约  $\lambda/210$ ,  $\lambda=632.8$  nm),对成像质量影响很小,可以忽略。

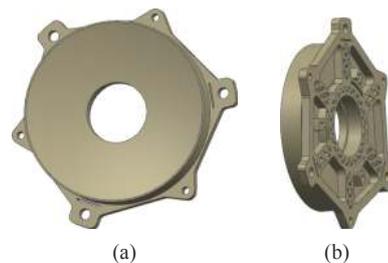


图 5 主镜组件的 (a) 正视图和 (b) 侧视图

Fig. 5 (a) Front view and (b) side view of primary mirror assembly

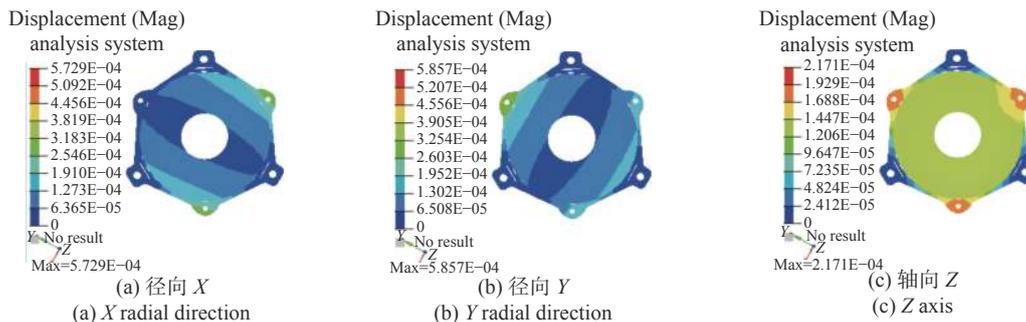


图 6 主镜在自重下的变形情况

Fig. 6 Deformation of the primary mirror under its own gravity

### 3.3.2 次镜组件设计

与主镜组件形式类似, 次镜及其支撑进行一体化设计, 对次镜组件支撑筋形式进行多轮优化, 组件内部多处采用中空设计, 采用放射形三根筋支撑方案, 三根筋呈环切式分布, 可有效减小组件弯曲应力, 提高结构承受强冲击和振动能力。经优化后, 每根筋径向宽度为 1.8 mm, 在满足光学通光要求下, 具备足够刚度。

同时, 次镜背部结构采用共面设计, 可为光加和装调阶段提供高定位基准。次镜组件结构形式如图 7 所示。



图 7 次镜组件

Fig. 7 Secondary mirror assembly

### 3.3.3 遮光筒设计

遮光筒作为连接主镜组件和次镜组件的转接结构, 需承载次镜组件的重量, 同时起到遮挡杂光的作用。

在设计上, 遮光筒与主次组件类似, 经拓扑优化, 确定了遮光筒外形尺寸, 结合光学系统要求, 同时考虑加工工艺性, 对遮光筒筒壁进行封闭处理, 优化后遮光筒最薄壁厚 0.8 mm, 在拓扑优化结果的基础上, 进一步进行轻量化设计, 采用中空结构结合局部支撑的方式, 进一步实现超轻量化

设计。遮光筒结构如图 8 所示。



图 8 遮光筒结构

Fig. 8 Shading baffle structure

### 3.3.4 系统模态及静力分析

对光学系统进行整机模态分析, 以验证整机及各组件刚度分布。整机模态分析结果如图 9

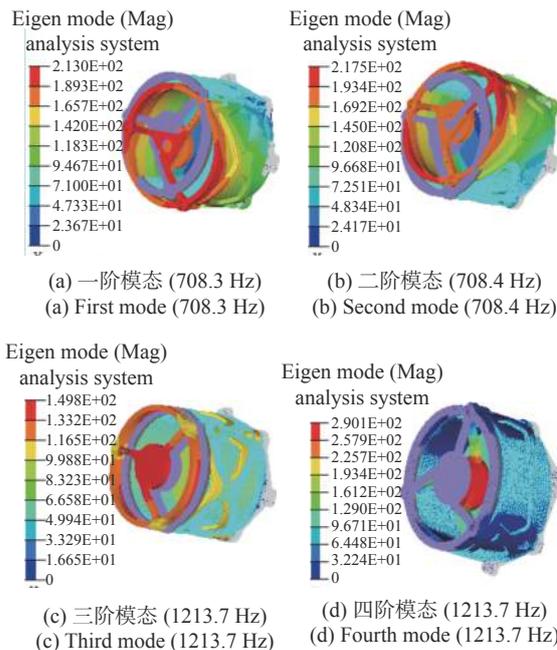


图 9 光学系统整体模态分析结果

Fig. 9 Results of mode analysis of the whole optical system

(彩图见期刊电子版) 所示, 系统三阶和四阶模态达到 1213.7 Hz, 整机刚度高。

为了考察系统在自身重力下, 因重力导致的系统变形情况, 开展系统自重下静力分析, 模拟实际安装状态, 对主镜背板 3 个安装孔进行 6 个自由度全约束处理, 模拟系统在 1 g 重力下的变形情况, 分析结果如图 10(彩图见期刊电子版) 所示。由分析可知, 系统在自身重力下, 最大合成位移为  $5.86 \times 10^{-4}$  mm, 属于亚微米量级, 结合模态分析结果, 结构具备足够刚度。

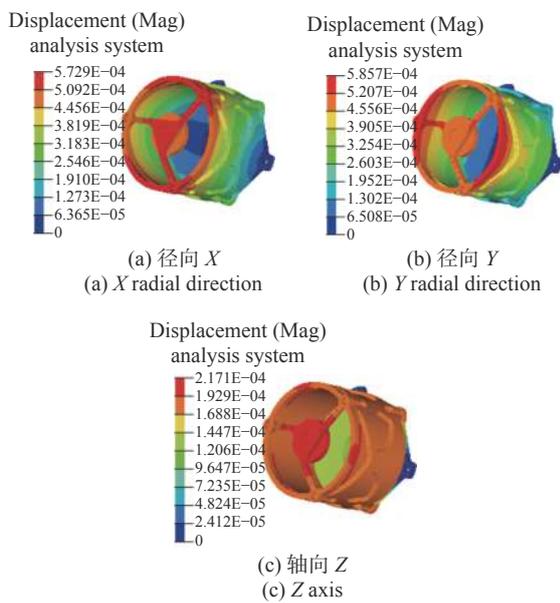


图 10 系统自重下的静力分析结果

Fig. 10 Results of system static analysis under its own gravity

### 3.3.5 重量估算

对主镜组件、次镜组件、遮光筒和螺钉进行估算, 总质量为 91.1 g, 小于 100 g, 满足指标要求, 详见表 3。

表 3 主、次镜组件、遮光筒和螺钉的重量估算

Tab. 3 Weight estimation of primary and secondary mirror assemblies, shading baffle and screws

名称	重量/g
主镜组件	40.6
次镜组件	16.8
遮光筒	32.2
螺钉	1.50
合计	91.1

## 4 样机研制

### 4.1 增材制造

主镜组件、次镜组件和连接筒均由增材制造 3D 打印完成, 反射镜的材料为  $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ 。打印完成后对组件进行了高低温时效处理, 图 11~图 13 分别为打印完成的主镜组件、次镜组件和连接筒。

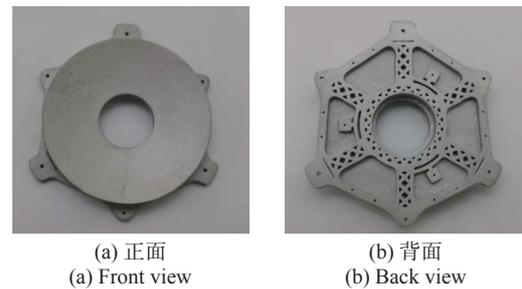


图 11 打印完成的主镜组件

Fig. 11 Primary mirror assembly by additive manufacturing

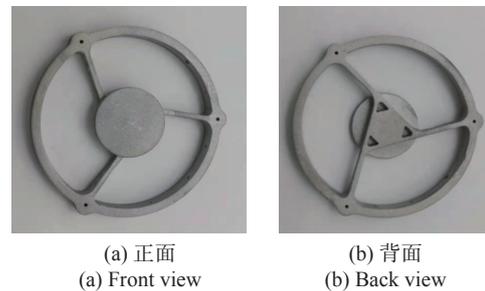


图 12 打印完成的次镜组件

Fig. 12 Secondary mirror assembly by additive manufacturing



图 13 打印完成的连接筒

Fig. 13 Shading baffle by additive manufacturing

### 4.2 光学加工

用单点金刚石车床对主镜和次镜进行光学加

工, 光学加工后的主镜和次镜分别如图 14(a) 和图 15(a) 所示, 主镜面形 RMS 值达到  $0.044 \mu\text{m}$ , 见图 14(b)(彩图见期刊电子版), 次镜面形 RMS 值达到  $0.028 \mu\text{m}$ , 见图 15(b)(彩图见期刊电子版)。虽然面形满足使用要求, 但从图中可以看出, 镜子表面有明显的环带和点状斑点。

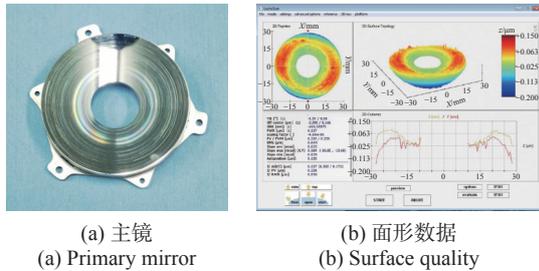


图 14 单点车削后的主镜及其面形数据  
Fig. 14 Primary mirror after SPDT and its surface shape data

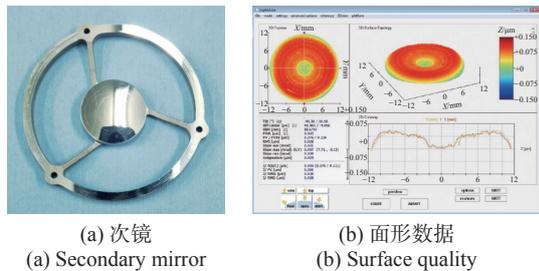


图 15 单点车削后的次镜及其面形数据  
Fig. 15 Secondary mirror after SPDT and its surface shape data

由于光学加工后的主镜和次镜表面有明显的环带和点状斑点, 与通常非 3D 打印的铝合金表面有明显差异, 故用高倍相机对表面进行了测试, 测试图见图 16。从图 16 可以看出, 环带非常明显, 且点状斑点均为小坑, 对图中最大的圆形坑尺寸进行测量, 直径达到了  $0.3 \text{ mm}$ 。预计上述表面对光学系统的能量集中度影响会很大, 不能直接使用。为解决该问题, 对光学元件表面进行镀镍磷合金改性。

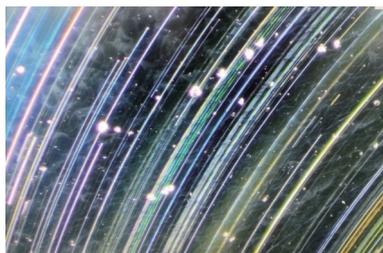


图 16 高倍相机下的主镜表面  
Fig. 16 Primary mirror surface observed by a high magnification camera

对光学加工后的主镜和次镜光学表面进行改性处理, 在表面镀制一层镍磷。为防止镍磷进到 3D 打印金属镜内部, 对金属镜的排粉孔表面进行了保护处理。为了让改性层致密, 对镜面进行喷砂处理。图 17 给出了镀镍磷改性完成的主镜。

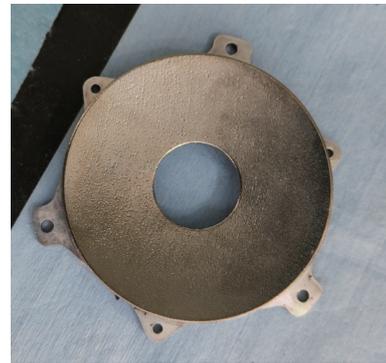


图 17 镍磷改性完成的主镜  
Fig. 17 Primary mirror modified by Ni-P coating

镀完镍磷后, 对主镜和次镜重新进行光学加工, 加工后的主镜和次镜分别如图 18(a) 和图 19(a) 所示。从图中可以看出, 镜子表面质量得到明显改善。主镜面形 RMS 值为  $0.044 \mu\text{m}$ , 见图 18(b) (彩图见期刊电子版)。次镜面形 RMS 值达到了  $0.018 \mu\text{m}$ , 见图 19(b)(彩图见期刊电子版)。

光学加工完成后对主镜和次镜进行镀膜处

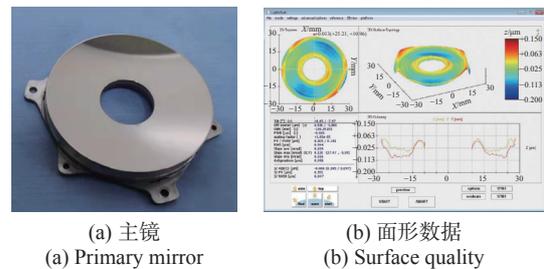


图 18 改性后光学加工完成的主镜及面形数据  
Fig. 18 Primary mirror and surface shape data after optical processing

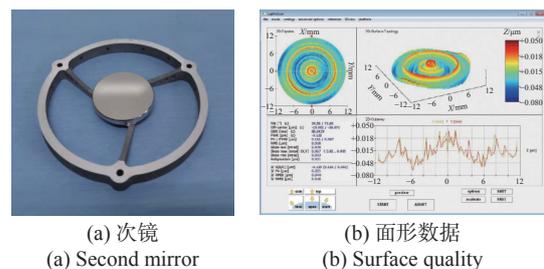


图 19 改性后光学加工完成的次镜及其面形数据  
Fig. 19 Second mirror and surface shape data after optical processing

理,镀膜为金膜。镀膜后的主镜和次镜见图 20。接着,对镀膜后的主镜和次镜进行面形测试,主镜的面形测试结果见图 21(彩图见期刊电子版),主镜面形 RMS 值为  $0.076\lambda$ , 为 48 nm。与镀膜前相比, RMS 值改变量为 4 nm, 考虑到测量误差, 这个变化可忽略。次镜的面形测试结果见图 22 (彩图见期刊电子版), 次镜面形 RMS 值为  $0.03\lambda$ , 为 19 nm, 与镀膜前 18 nm 相比, RMS 值改变量为 1 nm, 考虑到测量误差, 面形镀膜前后可视为无变化。



图 20 镀金后的主镜和次镜

Fig. 20 Primary and secondary mirrors after gold plating

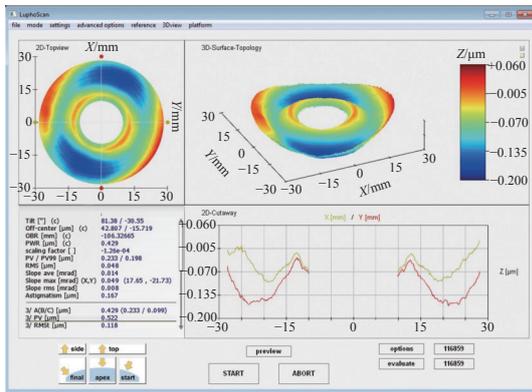


图 21 镀金后的主镜面形数据

Fig. 21 Surface quality of the primary mirror after gold plating

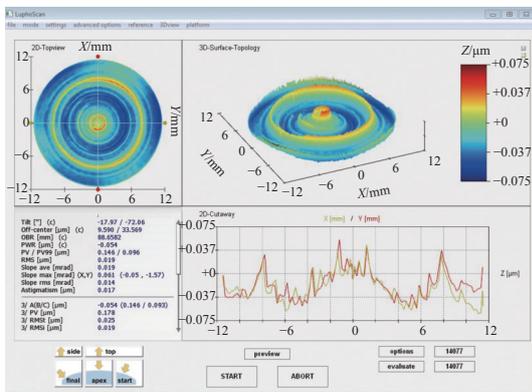
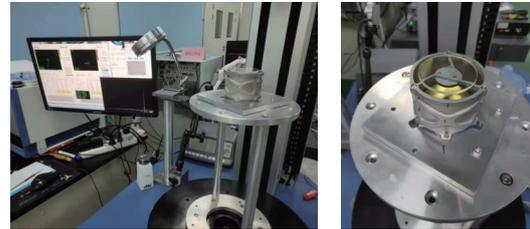


图 22 镀金后的次镜面形数据

Fig. 22 Surface quality of the second mirror after gold plating

### 4.3 整机装调

利用定心仪对主镜组件和次镜组件进行定心装调, 见图 23。



(a) 装调现场 (b) 定心完成主次镜  
(a) Alignment worksite (b) Mirrors after centering

图 23 主次镜组件定心装调实验图

Fig. 23 Centering alignment experiment of the primary and secondary mirror assembly

### 4.4 性能测试

整机装配完成后, 利用传递函数测试仪对核心指标进行测试, 测试现场如图 24 所示。光学系统焦距测试结果为 108.26 mm, 与设计值 110 mm 偏差为 1.74 mm, 在  $\pm 3\%$  的公差范围内, 见图 25。



图 24 整机性能测试实验图片

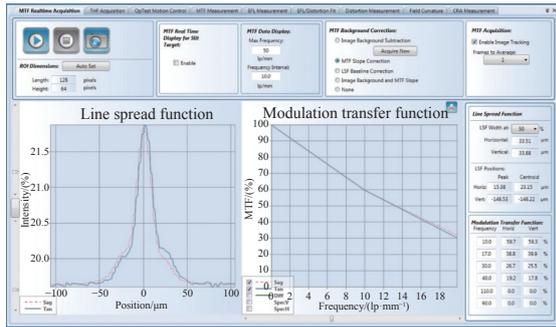
Fig. 24 The performance test of the optical system



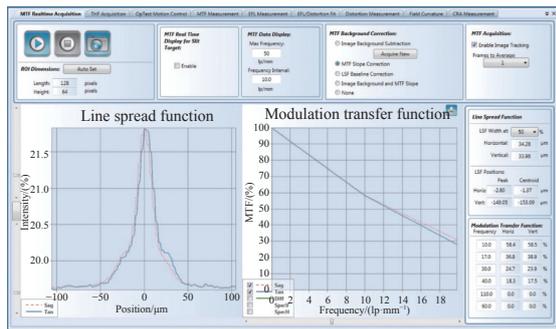
图 25 焦距测量结果

Fig. 25 The measurement result of the focal length

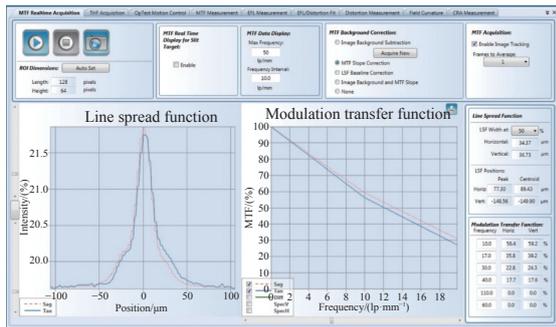
对光学系统不同视场的 MTF 进行了测试, 图 26 分别给出了中心视场、0.7 视场和 1 视场下的 MTF 曲线, 在 Nyquist 频率 16.7 lp/mm 处的测试值均大于 0.35, 接近衍射极限。



(a) 中心视场 MTF 曲线  
(a) MTF curves of the central FOV



(b) 0.7 视场 MTF 曲线  
(b) MTF curves of the 0.7 FOV



(c) 1 视场 MTF 曲线  
(c) MTF curves of the 1 FOV

图 26 不同视场调制传递函数测试结果  
Fig. 26 MTF test results for different FOVs

对主次镜组件进行称重, 见图 27, 重量为 96.04 g。各组件详细重量数据见表 4, 比表 3 预估的重量 (91.1 g) 增加了 4.94 g。其中, 主镜组件增加了 4.04 g, 重量增加主要是由 3D 打印偏差、镍磷改性和镀金导致的。遮光筒重量增加了 0.87 g, 3D 打印的实际尺寸与理论设计略有差别, 而次镜组件和螺钉质量基本一致。满足小于 100 g 的技术要求。

参考文献:

[1] 甄政, 王英瑞, 欧文, 等. 一种新型红外多波段低背景探测技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 20190361.  
ZHEN ZH, WANG Y R, OU W, et al.. A novel technology on infrared multi-band low-background detection[J].



图 27 重量测试

Fig. 27 Weight test

表 4 各部件的实测重量

Tab. 4 Weight test results of each assembly

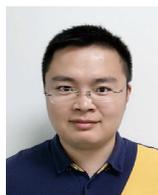
名称	实测质量(g)
主镜组件	44.64
次镜组件	16.8
遮光筒	33.07
螺钉	1.53
合计	96.04

5 结 论

本文针对深空低冷目标探测需求, 设计完成局部制冷型折反射式光学系统, 将透镜组放置在红外探测器的杜瓦中, 光学系统口径为 55 mm, 焦距为 110 mm, 视场达到 4°×4°。利用拓扑优化方法对主次镜组件进行了优化设计, 利用增材制造方法打印完成主镜组件、次镜组件和连接筒。利用单点金刚石车削方法进行光学加工, 针对打印表面存在缺陷的问题, 采用镍磷改性工艺, 再次单点加工完成镜面加工, 测试结果表明其面形精度较高。定心装调后, 对整机性能进行了测试。测试结果如下: 光学系统焦距为 108.26 mm, 满足指标要求; 全视场范围内调制传递函数均达到衍射极限; 重量仅为 96.04 g, 小于 100 g, 满足要求。通过整机研制, 充分说明金属基增材制造方法可以作为提升光学系统性能的有效手段。

- Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20190361. (in Chinese)
- [2] 范晋祥, 侯文涛. 防空反导精确寻的末制导技术的发展与思考[J]. *空天防御*, 2020, 3(3): 31-37.  
FAN J X, HOU W T. Development and thinking of precision homing terminal guidance technology for air and missile defense[J]. *Air & Space Defense*, 2020, 3(3): 31-37. (in Chinese)
- [3] VUKOBRATOVICH D, SCHAEFER J P. Large stable aluminum optics for aerospace applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8125: 81250T.
- [4] MOEGGENBORG K, VINCER T, LESIAK S, *et al.*. Super-polished aluminum mirrors through the application of chemical mechanical polishing techniques[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6288: 62880L.
- [5] XIE Y J, MAO X L, LI J P, *et al.*. Optical design and fabrication of an all-aluminum unobscured two-mirror freeform imaging telescope[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(3): 833-840.
- [6] 谭沁年, 丁亚林, 许永森, 等. 增材制造金属反射镜的发展综述[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 75-86.  
TAN S N, DING Y L, XU Y S, *et al.*. Development of additively manufacturing metal mirrors[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 75-86. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] WOODARD K S, MYRICK B H. Progress on high-performance rapid prototype aluminum mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10181: 101810T.
- [9] WOODARD K S, COMSTOCK L E, WAMBOLDT L, *et al.*. Optimum selection of high performance mirror substrates for diamond finishing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9822: 98220C.
- [10] SCHEIDING S, GEBHARDT A, DAMM C, *et al.*. Method for manufacturing a mirror comprising at least one cavity and optical mirror: USA, 20140247512[P]. 2014-09-04.
- [11] HILPERT E, HARTUNG J, RISSE S, *et al.*. Precision manufacturing of a lightweight mirror body made by selective laser melting[J]. *Precision Engineering*, 2018, 53: 310-317.
- [12] HILPERT E, HARTUNG J, VON LUKOWICZ H, *et al.*. Design, additive manufacturing, processing, and characterization of metal mirror made of aluminum silicon alloy for space applications[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(9): 092613.
- [13] ATKINS C, FELDMAN C, BROOKS D, *et al.*. Topological design of lightweight additively manufactured mirrors for space[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10706: 107060I.

#### 作者简介:



付 强(1985—),男,黑龙江佳木斯人,博士,副研究员,2008年、2010年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2020年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事光学系统设计、红外探测设备总体论证等方面的研究。E-mail: fuqianghit@163.com