



一种异形轻量化空间光谱仪铝反射镜结构设计

肖大舟, 王立科, 韩超, 刘宇翔, 贺瑞聪, 曹倩

A New Structural Design of Special-Shaped Lightweight Aluminum Mirror for Space Spectrometer

XIAO Dazhou, WANG Like, HAN Chao, LIU Yuxiang, HE Ruicong, and CAO Qian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

主带彗星探测的科学目的及光谱仪设计构想

Scientific Objectives and Design Concepts of Onboard Spectrometers for Main Belt Comets Exploration

深空探测学报(中英文). 2019, 6(5): 488-495

直径五米大型箭体结构设计与优化

Structural Design and Optimization of $\Phi 5$ m Diameter Large Arrow Body

深空探测学报(中英文). 2021, 8(4): 380-388

新一代单体月球激光角反射器方案设计

Schematic Design of New Generation of Lunar Corner Cube Retroreflector with Single Aperture

深空探测学报(中英文). 2021, 8(4): 416-422

深空探测中的激光诱导击穿光谱探测仪

Laser Induced Breakdown Spectroscopy Detector in Deep Space Exploration

深空探测学报(中英文). 2018, 5(5): 450-457

基于点云测量的运载火箭异形管路数字化制造技术

Digital Manufacturing Technology of Special-shaped Pipe of Launch Vehicle Based on Point Cloud Measurement

深空探测学报(中英文). 2021, 8(1): 34-41

火星探测高分辨率可见光相机光学系统设计

The Optical System Design of the High-Resolution Visible Spectral Camera for China Mars Exploration

深空探测学报(中英文). 2018, 5(5): 458-464



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

一种异形轻量化空间光谱仪铝反射镜结构设计

肖大舟, 王立科, 韩超, 刘宇翔, 贺瑞聪, 曹倩

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 针对多通道探测, 体积、质量要求严苛, 光路在空间中交叉折叠, 反射镜数量多, 易发生干涉的复杂光机系统中铝反射镜结构设计和轻量化需求, 提出了一种新型空间光谱仪用异形轻量化铝反射镜结构设计方法, 包括材料选择、构型设计、装配变形卸载方式、轻量化设计方法、表面镀层、测试和检测等关键技术。对某空间光谱仪的研制和测试验证表明, 利用本文方法设计的所有铝镜均能满足系统性能要求, 且轻量化率均优于50%。本文方法可适用于涉及铝反射镜的多种类型空间光机系统, 可为其中铝反射镜设计和紧凑化光机系统设计提供参考。

关键词: 空间光谱仪; 异形铝反射镜; 轻量化; 光机结构设计

中图分类号: TH74

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)05-0542-09

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220012

引用格式: 肖大舟, 王立科, 韩超, 等. 一种异形轻量化空间光谱仪铝反射镜结构设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(5): 542-550.

Reference format: XIAO D Z, WANG L K, HAN C, et al. A new structural design of special-shaped lightweight aluminum mirror for space spectrometer[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(5): 542-550.

引言

空间光谱探测技术可以实现对物质成分、含量或结构等的探测, 应用于环境(包括雾霾、大气、水体、土壤等)监测、植被(包括类型识别、生物参量估算与长势估产等)监测、军事应用(伪装识别、战场环境评估)等, 是空间遥感发展的重要战略方向。随着用户对定量化遥感应用认识水平和需求的不断提升, 以及空间光谱探测技术的持续发展, 空间光谱遥感仪器的探测谱段不断细分, 光谱分辨率不断提高。

为实现高精度探测和定量反演, 空间光谱仪需要采用多通道探测, 并具有较高的光谱分辨率和光谱畸变性能, 以及良好的稳定性, 这就导致其光学系统较为复杂, 光学件众多; 而另一方面, 为了满足体积、重量等工程限制, 提高产品竞争力, 空间光谱仪还需实现轻小型、紧凑化设计。空间光谱仪光机系统研制时, 可考虑采用铝反射镜及全铝结构设计, 即除一些透射光学元件外, 所有反射镜、主承力框、连接支架等支撑结构都可选用铝合金材料, 仪器底板采用铝合金机加成形, 或选用铝蒙皮-铝蜂窝复合材料。全铝结构(铝反射镜、铝支撑结构)作为一种消热化光机结构, 与采用玻璃反射镜的光机结构相比, 具有重量轻、热稳定性好、工作温度范围大、集成性高、便于

与本体安装连接等优势, 可应用于各类空间遥感器, 尤其适用于低温光学系统, 或者工作温度变化范围较大的光学系统。铝反射镜技术是实现光机系统全铝结构设计的关键环节之一, 具有广阔的应用前景。

国际上, 美国、欧洲等国家很早就开始开展铝反射镜技术和应用研究。早在20世纪90年代, 在一些地基望远镜、光谱仪的研制中就已经开始采用铝反射镜。Yoder^[1]在其著作《Opto-Mechanical Systems Design》中对早期的金属反射镜, 特别是铝合金反射镜的设计、加工和安装方法进行了总结。2003年美国斯韦尔斯航空航天公司(Swales Aerospace)联合美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)戈达德宇宙飞行中心(Goddard Space Flight Center, GSFC)研制了用于基特峰国家天文台(Kitt Peak)“梅耶尔”(Mayall)望远镜的红外多目标光谱仪(Infrared Multi-Object Spectrograph, IRMOS)。IRMOS为全铝结构, 7个反射镜都采用6061铝合金制造, 单点金刚石车削加工成型, 其中最大反射镜尺寸284 mm × 264 mm。IRMOS的反射镜和底板都由铝6061-T651制成, 如图1所示。

将铝合金6061-T651用于反射镜和底板, 可以获得相似的热膨胀系数, 避免与双金属应力相关的影响^[2]。美国SDL实验室先后完成了中段试验卫星(Mid-course

Experiment Satellite, MSX, 1996年发射) 红外相机 PIRIT-III和可见光相机SBV两个全铝光学系统的研制以及红外天文卫星WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, 2009年发射) 全铝光学系统的研制。WISE中的10个反射镜和3个平面镜均为铝合金材料RSA-6061, 可以工作在10 K (-263°C) 的超低温环境。

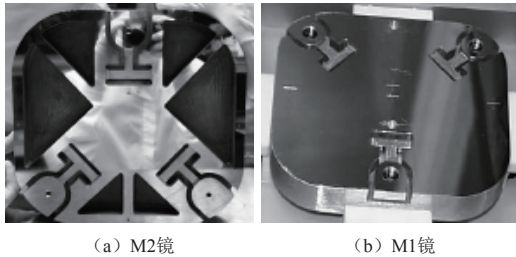


图1 IRMOS M2镜和M1镜

Fig. 1 Rear surface of M2 and M1 mirror substrate of IRMOS

针对不断增长的低成本光谱仪市场, 德国Jena Optronik公司开发的JSS系列产品采用全铝结构望远镜, 实现了准消热化结构和反射镜与主结构间的高精度机械接口^[3]。图2为JSS-56成像仪光学系统, 采用铝反射镜实现。

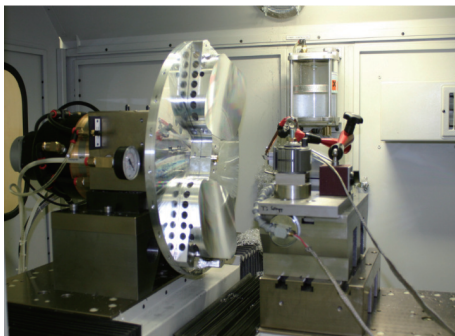


图2 Jena optronic开发的离轴非球面铝镜

Fig. 2 Off-axis aspheres developed by Jena optronic

荷兰应用科学研究院 (The Netherlands Organization for applied scientific research, TNO) 对空间光谱仪系统研制及遥感器定标技术有丰富的实践经验, 其研制的大气监测载荷 (Scanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Cartography, SCIAM-ACXX, 2002年发射)、臭氧监测仪 (Ozone Monitoring Instrument, OMI, 2004年发射)、对流层监测仪 (Tropospheric Monitoring Instrument, TROPOMI, 2017年发射) 等均采用了全铝结构。图3为TNO为詹姆斯韦望远镜 (James Clerk Maxwell Telescope) 上的亚毫米阵列热辐射探测器2 (Submillimetre Common-User Bolometer Array 2, SCUBA-2) 研制的铝合金自由曲

面镜和光学支撑结构^[4]。



图3 SCUBA-2的自由曲面镜和光学支撑结构

Fig. 3 The freeform mirror and the optical support structure of SCUBA-2

与传统的玻璃反射镜相比, 铝反射镜具有成本低、制造时间短、安装牢固、热膨胀系数一致等优点。然而, 铝反射镜也存在尺寸稳定性差和表面散射较高的不足。雷声 (Raytheon) 公司已开发出提高长期稳定性和减少表面散射的工艺。这些工艺用于制造两个600 mm铝镜, 表面粗糙度可以达到20埃, 如图4所示^[5]。

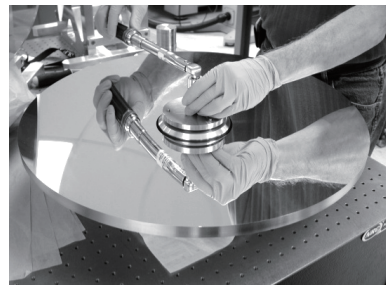


图4 雷声公司的600 mm铝主镜

Fig. 4 Raytheon 600 mm aluminium primary mirror

大气遥感系外行星红外成像仪 (Atmospheric Remote-Sensing Infrared Exoplanet Large Survey, ARIEL) 是欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 将于2028年发射的一项任务。因为铝镜在可用性、成本效益、热机械性能和轻量化方面的突出表现, 该仪器也选择6061铝合金作为主镜基板和望远镜支撑结构的材料, 图5为该仪器为热环境实验研制的铝镜^[6]。

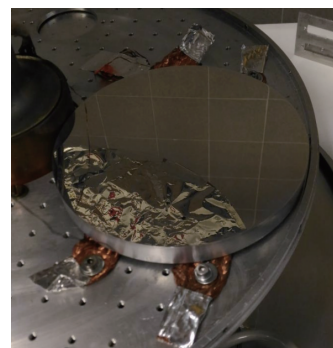


图5 使用6061-T651铝合金的ARIEL铝镜

Fig. 5 Sample mirror using 6061-T651 aluminium

国内,中国科学院上海技术物理研究所张东阁等^[7]综述了国内外铝合金反射镜的发展现状、最新应用和技术参数,总结了铝合金反射镜的共同特点和共性技术,并对铝合金反射镜的应用前景提出了展望。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所采用铝合金材料设计了一种大口径红外相机主反射镜,反射镜口径420 mm,有限元分析表明该反射镜具有较高的动态刚度和热稳定性,为大口径铝合金反射镜的设计提供了理论依据^[8]。国防科技大学针对复杂曲面铝反射镜所具有的独特优势,对超精密车削、磁流变抛光、计算机控制表面成形(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)的组合加工工艺进行了综述,为复杂曲面铝合金反射镜的推广奠定了制造基础^[9]。

在技术和方法方面,文献[10]针对铝镜的残余应力消除问题,对几种低温铝镜应力消除方法进行了比较。文献[4]总结了用于新型TMA望远镜的超轻型非球面金属反射镜的设计、制造和表面光洁度的技术和结果。文献[6]介绍了雷声公司开发的提高长期稳定性和减少表面散射的工艺。文献[11]对常规AA-6061和RSA AA-6061两种材料在大型镜子中的应用进行了研究,通过热处理和应力消除,硬度测量和拉伸试验对两种材料的性能进行了比较。文献[12]提出了一种连续加工工装,有效地降低了车削冲击对镜面粗糙度的影响。利用该工艺制作了有效直径为50 mm、离轴角为90°的离轴抛物面铝反射镜,并对其性能进行了验证。所有这些技术指标都接近于传统的玻璃基反射镜,使铝反射镜在激光损伤阈值(Laser Induced Damage Threshold, LIDT)要求较高的系统或紫外成像系统中使用成为可能。文献[13]基于一个示例性的镜子设计,描述了内部轻量化结构的优化,然后介绍了从制造到金刚石车削、电镀和抛光的过程。

可以看出,国际上,由于对铝反射镜技术研究较早,其基础雄厚、技术成熟,研究相对全面、深入,铝反射镜产品已大量应用于美国、欧洲、日本等西方国家的空间仪器。国内对全铝光学系统的研制和铝镜加工方面的研究起步晚,产品应用数量也较少。目前的产品应用限于布局简单的低复杂系统,铝镜外形多为传统的圆形或环形,镜体构型为简单的板式构型(光学面平行于安装面),轻量化设计也较为简单。本文针对多通道探测,反射镜数量大,体积、质量要求严苛,光路在空间中交叉折叠,且光学件距离近,易反射镜数量多,易发生干涉的复杂光机系统中铝反射镜结构轻量化设计等问题,针对传统方法要么轻量化率高,但工艺复杂,要么轻量化率有限的问题,提出了一种新型空间光谱仪用异形轻量化铝反射镜结构设计方法,包括材料选择、构型设计、装配变形卸载方式、轻量化设计方法、表面镀层、测试和检测等关键技术。对某型号空间光谱仪的实验验证表明,利用本文方法进行设计的所有铝镜的轻量化率均优于50%。本文方法可适用于涉及铝反射镜的多种镜类型空间光机系统,可为空间光谱仪其中铝反射镜设计和紧凑化光机系统设计提供参考。

1 异形轻量化铝反射镜结构设计方法

本节在对设计技术要求和约束条件进行分析的基础上,对异形轻量化铝反射镜的各类设计要素进行分析和归纳。

1.1 设计技术要求和约束条件分析

异形轻量化铝反射镜结构设计需要考虑的技术要求和约束条件包括光学面性能要求、布局要求、几何精度要求、稳定性要求、刚度要求、强度要求和重量要求,表1对这些要求的具体内容进行了说明。

表1 技术要求和约束条件

Table 1 Technical requirements and constraints

项目	具体内容
光学面性能要求	铝镜产品在经过加工、镀膜、安装等环节后,光学面面形精度、表面粗糙度仍应满足要求
布局要求	各铝镜光学面、安装面布局和结构外形,应保证不发生结构干涉或结构与光路干涉,并且满足铝镜及主结构框的加工工艺性、装调工艺性要求
几何精度要求	经过加工、装调后,铝镜光学面在系统中的位置和方向应满足要求
稳定性要求	铝镜产品在完成加工后,经过长期储存、使用,光学面面形、光学面在系统中的位置和方向,变化量应足够小,满足稳定性要求
刚度要求	铝镜产品应具有适当的结构刚度,满足加工工艺性要求;同时满足发射段力学环境要求、重力变形等要求
强度要求	铝镜产品在经历地面、发射段力学环境时,不发生破坏
重量要求	满足各项要求的前提下,尽量进行轻量化设计

1.2 设计要素分析

异形轻量化铝反射镜技术按研制流程可分为设计、加工、测试、装调等多个方面。铝镜设计需综合考虑多种因素: 光学性能要求、布局要求、测试装调可操作性、装配变形卸载设计、轻量化设计、加工单位的工程经验和技術能力、加工工艺性、装调中的误差补偿等。

本文对复杂空间光机系统中可能出现的各种铝镜形式进行了总结, 对各类设计要素进行了归纳和分析, 主要包括材料选择、构型设计、装配变形卸载方式、轻量化设计、表面镀层5个方面, 如图6所示。

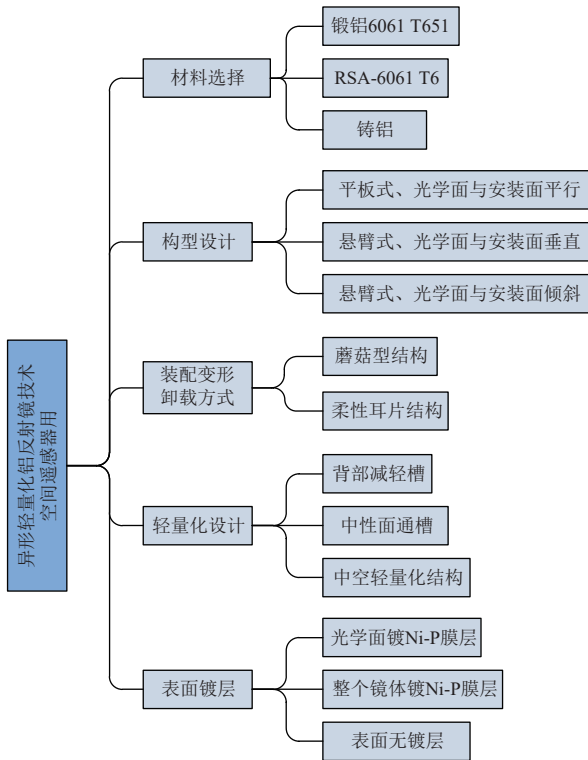


图 6 异形轻量化铝反射镜设计要素

Fig. 6 Design elements of special-shaped lightweight aluminum mirrors

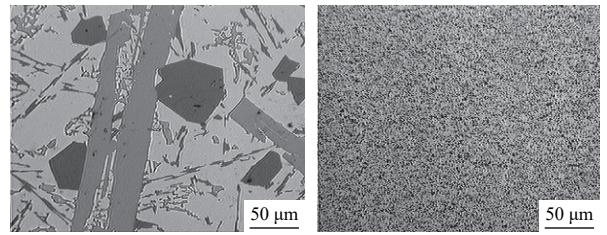
2 基于某空间光谱仪的铝反射镜结构与验证

为了验证本文所提方法的有效性, 本节以某空间光谱仪中包括异形铝反射镜在内的多个铝反射镜的结构设计为例, 给出了利用上述方法对异形铝反射镜进行结构设计的详细过程。

2.1 材料选择

铝镜材料和毛坯选择主要有3种方案: 锻铝6061 T651; RSA-6061 T6; 铸铝。其中, 铸铝毛坯材料牌号可为356-T6、Tenzalloy Aluminium等。在长期稳定性方面, 铸铝毛坯制作的铝镜在一年内面形变化可能

超过一个波长 (633 nm), 因此不建议采用铸铝方案。铝合金6061材料 (含镁1.0%、铁0.7%、硅0.6%、铜0.3%) 有较好的长期稳定性, 是目前铝镜的主要材料, 具体型号为6061 T651。RSA (Rapid Solidification Aluminum) -6061是一种新型材料, 与普通6061铝合金相比, 成分基本一致, 但如图7所示, RSA-6061的致密性更好, 组织粒度细微, 有更为均匀的弹性模量和硬度分布, 有利于加工得到更优的表面粗糙度。表2给出了铝合金6061和RSA-6061 T6两种材料的机械特性参数。



(a) 铝合金6061

(b) RSA-6061

图 7 铝合金6061材料和RSA-6061的微观结构

Fig. 7 Microstructure of Al 6061 and RSA-6061

表 2 铝镜材料机械特性

Table 2 Mechanical properties of materials

牌号	密度/ (g·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	极限拉 伸强度/MPa	屈服强 度/MPa	断后伸 长率/%	硬度/ HB
6061 T651	2.70	70	310	276	12	95
RSA- 6061 T6	2.70	70	330	295	10	100

表3给出了3种材料在尺寸稳定性、微观结构、成本和供货周期方面的对比。

表 3 材料性能对比

Table 3 Material performance comparison

材料名称	尺寸稳定性	微观结构	成本	供货周期
铸铝	较差	一般	低	
6061 T651	好	致密性好, 组织 粒度大、均匀性差	低	现货, 2周
RSA-6061 T6	好	致密性好, 组织 粒度细微、均匀性好	高	需定制, 2个月

从表3可以看出, 对于口径较大 (大于460 mm) 的铝镜, 考虑到材料成本和可获得性, 可采用铝合金6061 T651。对于口径相对较小的铝镜, 材料费在整个加工费用中占比较小, 可采用RSA-6061。对于表面粗糙度指标低于5 nm的部分铝镜产品, 采用RSA-6061材料, 可在铝基底上直接加工实现该表面粗糙度指标。

2.2 构型设计

铝反射镜构型设计的主要任务是确定光学面的形

状和大小、安装面的位置、形式和大小、光学面与安装面间的连接形式等。

由于该光谱仪光学系统较为复杂,且对体积、重量有严苛约束,导致光路空间布局复杂,在有限体积中交叉折叠,为了实现光路折转,需要数量众多的反射镜,并通过若干球面反射镜、柱面反射镜等元件实现光焦度。本文采用了铝镜构型与主承力框一体化设计方法,对铝反射镜的布局、构型进行灵活设计,如图8所示。

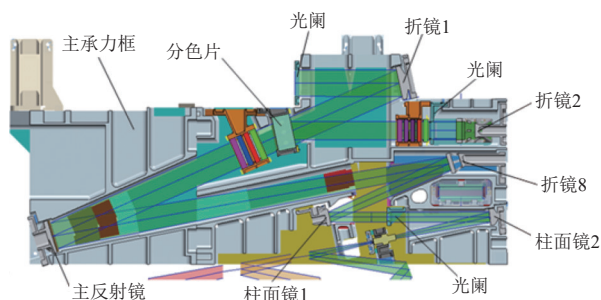


图8 铝镜与主承力框一体化设计

Fig. 8 Integrated design of aluminum mirror and main bearing frame

铝镜光学面的位置和方向需满足光学系统要求。光学系统在各光学面的脚印多为狭长矩形,为了实现

紧凑、轻量化,铝镜光学面也采用狭长口径设计,基于光学脚印,适当选择口径余量,减小无用重量。

主承力框采用高集成的薄壁式框架结构,为包括铝镜在内的众多光学件提供支撑。为降低过约束及装配应力的影响,增强系统稳定性,铝镜安装面设计全部采用三点支撑。铝镜安装面设置在铝镜一侧,主要考虑铝镜刚度、铝镜的加工可实现性;在主承力框一侧还需考虑加工通路、铣削加工精度保证、检测通路、装调操作空间、深腔加工工艺性等因素。

铝镜光学面与安装面的空间几何关系,涉及平行、垂直、倾斜3种。一般情况下,优先选择光学面与安装面平行安装,具有结构紧凑、装调便利、悬臂短、力学特性好等优点;但是考虑光学面布局及主承力框加工限制,则需根据各个铝镜实际情况,灵活确定安装面位置和方向。在本文中,如图9所示,折镜1采用了光学面与安装面平行的安装方式;折镜7采用了光学面与安装面垂直的安装方式;折镜6采用了光学面与安装面倾斜的安装方式。由于体积限制,在某些特殊情况下,也可在同一件铝镜上集成两个倾斜反射面,例如折镜10,就采用了集成两个倾斜反射面的安装方式。

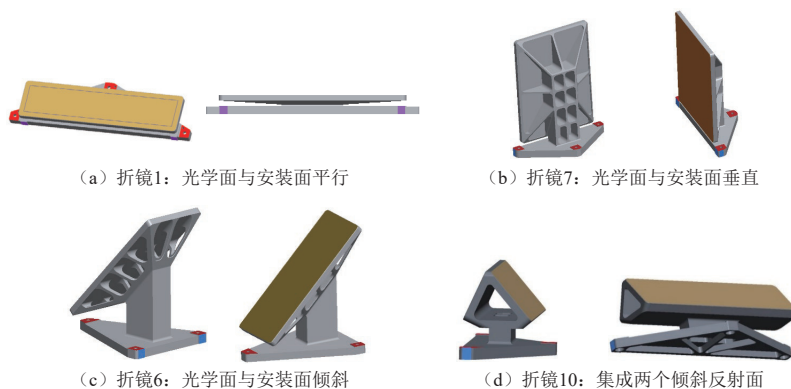


图9 铝镜的几种安装方案

Fig. 9 Several installation schemes of aluminum mirror

2.3 装配变形卸载方式

由于实际加工得到的铝镜安装面和主承力框安装面均存在平面度误差,安装时会产生装配应力和变形,传导到镜面将引起面形精度下降,因此铝镜设计应考虑对装配变形的卸载方式,本文主要分析对比了两种方案:柔性耳片结构和蘑菇型结构。

1) 柔性耳片结构

柔性耳片结构通过在安装耳附近设计卸载槽,降低安装应力影响。表4给出了典型柔性耳片结构的有限元仿真结果,该仿真结果表明,在重力工况和强迫位

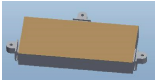
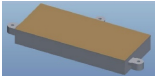
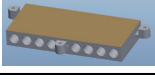
移工况下,柔性耳片卸载结构装配变形卸载能力一般,结构刚度一般,加工工艺性较差。

2) 蘑菇型结构

蘑菇型结构为在安装底板和镜面间采用截面较小的颈状过渡结构,可有效降低安装应力对镜面面形的影响。表5对典型铝镜蘑菇型结构进行了有限元仿真分析,仿真结果表明,在重力工况和强迫位移工况下,蘑菇型卸载结构装配变形卸载能力较好,结构刚度好,加工工艺性好。蘑菇型卸载结构相比柔性耳片结构,具有更好的性能。

表 4 耳片卸载结构仿真结果



Table 4 Simulation results of ear piece unloading structure

典型铝镜柔性耳片结构	基频/Hz	载荷	面形		
			PV(λ)	RMS(λ)	
	1001	自重分析	Z向 1 g	0.206 3	0.046 8
		强迫位移	连接孔3处0.015 mm	0.675 0	0.148 7
	1432	自重分析	Z向 1 g	0.251 9	0.027 9
		强迫位移	连接孔3处0.015 mm	0.940 8	0.222 3
	1668	自重分析	Z向 1 g	0.197 4	0.041 6
		强迫位移	连接孔3处0.015 mm	0.654 9	0.115 5

注: λ 为测试波长, $\lambda = 632.8\text{nm}$ 。

表 5 蘑菇型卸载结构仿真结果

Table 5 Simulation results of mushroom unloading structure

典型铝镜蘑菇型结构	载荷	未去Power		去Power		
		PV(λ)	RMS(λ)	PV(λ)	RMS(λ)	
	自重分析	Z向 1 g	0.367	0.112	0.093	0.021
	强迫位移	连接孔1处0.015 mm	0.308	0.083	0.156	0.031
连接孔3处0.015 mm		0.396	0.09	0.335	0.077	
	自重分析	Z向 1 g	0.069	0.021	0.042	0.008
	强迫位移	连接孔1处0.015 mm	0.005	0.001	0.004	0.001
连接孔3处0.015 mm		0.060	0.011	0.06	0.011	

2.4 轻量化设计

铝反射镜在构型设计时, 通过采用长方形光学面、紧凑化布局设计, 已实现了一部分轻量化工作; 但为了充分减轻重量, 并获得良好的动力学特性, 还需进行专门的轻量化结构设计, 通过设置减轻槽、孔

或采用镂空结构, 实现材料的合理布置, 充分减重, 并保证足够的结构刚度。

铝镜轻量化结构设计可归纳为背部减轻槽、中性面通槽和中空轻量化结构3种方案, 表6对这3种方案的轻量化率、结构刚度和加工工艺进行了比较。

表 6 铝镜轻量化设计方案

Table 6 Lightweight design scheme of aluminum mirror

方案	结构形式	轻量化率	结构刚度	加工工艺
1	背部减轻槽	较好	一般	简单
2	中性面通槽	较差	较好	简单
3	中空轻量化结构	最好	好, 但设计难度大	复杂

当铝镜口径较大, 且镜体外形较为规则时, 可采用在中性层通过慢走丝加工通槽的方式进行减重, 保留镜体前后面板, 具有较好的结构刚度。图10为指向镜采用中性层通槽的方案进行减重的设计实例, 其轻量化率可达54%。

如采用中空轻量化结构, 需通过多轴机床加工, 刀具从后面板小孔进入进行各方向铣削, 实现中空薄壁结构, 具有最优的重量和结构刚度特性; 但不足是设计难度大、工艺复杂, 对加工设备和加工工艺有一定要求。

当铝镜为中小口径, 且光学面与安装面关系复杂时, 可综合应用镜体或安装板背部减轻槽、蘑菇头镂空、悬臂中空等多种形式的轻量化方案。图11为对折镜6进行轻量化设计的实例, 通过综合优化, 其轻量化率可达82%。



图 10 指向镜轻量化设计

Fig. 10 Lightweight design of a large diameter aluminum mirror

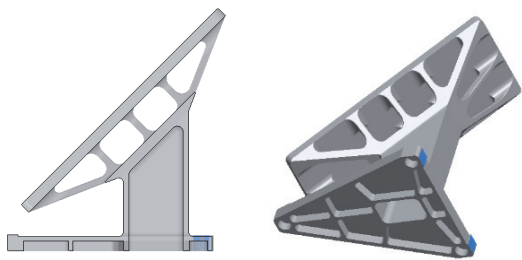


图 11 折镜6的轻量化设计

Fig. 11 Lightweight design of a special-shaped aluminum mirror 6

2.5 表面镀层

由于铝合金材料具有微观上的多孔性和较差的抛光特性，当光学面的面形精度、表面精度要求较高时，可在光学面完成精加工后，表面镀镍磷层，以获得较好的抛光特性，获得更好的表面粗糙度性能。

但表面镍磷镀层与铝基底热胀系数不匹配，会引起双金属效应，温度变化时产生的热变形将降低光学面面形精度，导致铝镜不能用于工作温度变化较大的场景。如果将整个镜体前后表面均镀镍磷层，可平衡掉一部分双金属效应，但镀镍后的镜体发黑工艺复杂，不利于杂散光抑制，降低系统性能。铝镜光学面的镀层方案及性能比较如表7所示。

表 7 光学面镀层方案比较

Table 7 Comparison of optical surface coating schemes

方案	光学面镀层	抛光工艺	工艺复杂性	双金属效应	可实现表面粗糙度Ra
1	光学面镀镍磷层	可采用磁流变MRF抛光	较复杂	有	≤2 nm
2	镜体头部镀镍磷层	可采用磁流变MRF抛光	较复杂	有所改善	≤2 nm
3	不镀镍磷层	不能采用MRF抛光，可采用传统抛光	简单	无	≤5 nm

如镀镍磷层，需先通过有限元仿真评估双金属效应对光学面面形的影响。镍磷层厚度越厚，双金属效应对面形精度影响越大，因此在满足工艺要求前提下，应将最终产品的镍磷层厚度控制在20 μm以下。

2.6 测试验证

通过上述方法完成了某光谱仪所有铝反射镜的设计、加工、检测、系统装调等工作。所有铝镜轻量化率均在50%以上。图12为折镜10的实物图，在同一件铝镜上，实现了2个光学面。图13为利用4D动态波面干涉仪进行铝镜面形检测的实验图。

图14为折镜6的面形实测数据，检测结果PV值为0.313λ，RMS为0.049λ。图15为折镜6的粗糙度实测数据，表面粗糙度为0.577 nm。



图 12 折镜10的实物图

Fig. 12 Physical drawing of mirror 10

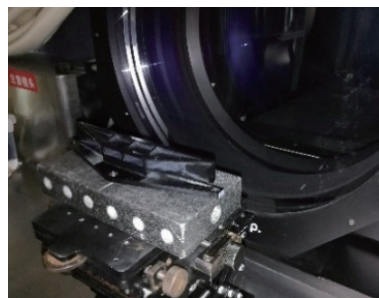


图 13 铝镜面形检测的实验图

Fig. 13 Picture of aluminum mirror surface shape detection

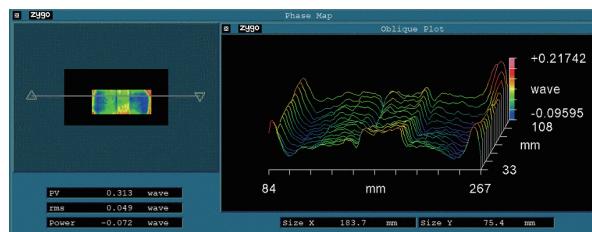


图 14 折镜6的面形数据

Fig. 14 Surface shape data of mirror 6

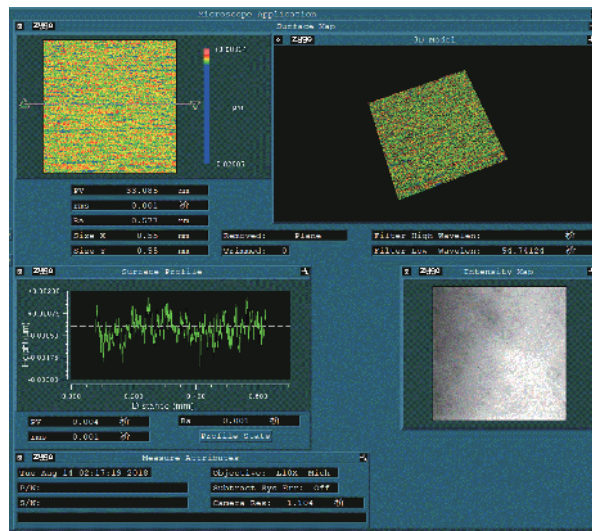


图 15 折镜6的粗糙度测试数据

Fig. 15 Roughness test data of mirror 6

3 结 论

本文针对复杂光机系统中铝反射镜结构设计问题,提出了一种新型空间光谱仪用异形轻量化铝反射镜设计方法。利用该方法设计的系列异形轻量化铝镜产品已应用于某高光谱遥感器项目。各铝反射镜经过仿真验证,加工、镀膜、测试,光学面面形、表面粗糙度、几何精度、基频等各项性能指标满足要求。经过集成安装、装调和测试,光学系统性能满足要求。有效降低了研制技术风险,缩短了研制周期,相关技术、工艺路线、核心产品等已应用于各类空间光谱仪项目。未来对于不同铝材料与表面镀层的关系等问题还需要深入探索。

参 考 文 献

- [1] PAUL R, YODER J. Opto-mechanical systems design, third edition[M]. Third Edition. Florida, Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [2] OHL R G, PREUSS W, SOHN A, et al. Design and fabrication of diamondmachined aspheric mirrors for ground-based near-IR astronomy[C]//Proc. SPIE 4841, Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes. [S. l.]: SPIE, 2003.
- [3] RISSE S, GEBHARDT A, DAMM C, et al. Novel TMA telescope based on ultra precise metal mirrors[C]//Proc. SPIE 7010, Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter. [S. l.]: SPIE, 2008.
- [4] ATAD-ETTEDIGUI E, PEACOCKE T, MONTGOMERY D, et al. Opto-mechanical design of SCUBA-2[C]//Proceedings Volume 6273, Optomechanical Technologies for Astronomy. [S. l.]: SPIE, 2006.
- [5] VUKOBRATOVICH D, SCHAEFER J P. Large stable aluminum optics for aerospace applications[C]// Proc. SPIE 8125, Optomechanics 2011: Innovations and Solutions. [S. l.]: SPIE, 2011.
- [6] CHIOETTO P, DA DEPPO V, ZUPPELLA P, et al. The primary mirror of the ARIEL mission: study of thermal, figuring, and finishing treatments and optical characterization of Al 6061 samples mirrors[C]//Proc. SPIE 11116, Astronomical Optics: Design, Manufacture, and Test of Space and Ground Systems II. [S. l.]: SPIE, 2019.
- [7] 张东阁,傅雨田. 铝合金反射镜的发展与应用[J]. 红外技术, 2015, 37(10): 814-823.
ZHANG D G, FU T Y. Development and application of aluminum mirrors in optical system[J]. Infrared Technology, 2015, 37(10): 814-823.
- [8] 李全超,李蕾,谭淞年,等. 大口径铝合金主反射镜设计与分析[J]. 应用光学, 2016, 37(3): 337-341.
LI Q C, LI L, TAN S N, ZHANG H W. Design and analysis for large aperture primary aluminum mirrors[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(3): 337-341.
- [9] 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 C, 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.
- [10] OHL R G, BARTHELMEY M P, WAHID Z S, et al. Comparison of stress relief procedures for cryogenic aluminum mirrors[C]//Proc. SPIE 4822, Cryogenic Optical Systems and Instruments IX. [S. l.]: SPIE, 2002.
- [11] NEWSWANDER T, CROWTHER B, GUBBELS G, et al. Aluminum alloy AA-6061 and RSA-6061 heat treatment for large mirror applications[C]//Proc. SPIE 8837, Material Technologies and Applications to Optics, Structures, Components, and Sub-Systems. [S. l.]: SPIE, 2013.
- [12] PENG J L, YU Q, SHAO Y J, et al. The improvement of surface roughness for OAP aluminum mirrors: from terahertz to ultraviolet[C]//Proc. SPIE 10623, 2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: IRMMW-THz Technologies and Applications. [S. l.]: SPIE, 2018.
- [13] HILPERT E, HARTUNG J, VON LUKOWICZ H, et al. Design, additive manufacturing, processing, and characterization of metal mirror made of aluminum silicon alloy forspace applications[J]. Optical Engineering, 2019, 58(9): 092613.

作者简介:

肖大舟(1978-),男,工程师,主要研究方向:空间遥感器光机结构设计。

通讯地址:北京空间机电研究所(100094)

电话:(010)68114857

E-mail:xiaodz2002@163.com

A New Structural Design of Special-Shaped Lightweight Aluminum Mirror for Space Spectrometer

XIAO Dazhou, WANG Like, HAN Chao, LIU Yuxiang, HE Ruicong, CAO Qian

(Beijing Space Electromechanical Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The lightweight structure design of aluminum mirrors is a difficult problem in the complex optical mechanical system with multi-channel detection, large number of mirrors, strict requirements for volume and quality, cross folding of optical paths in space, short distance of optical components, and easy interference. Either traditional methods have high lightweight rate, but the process is complex, or the lightweight rate is limited. For solving these problems, a new structural design method of special-shaped lightweight aluminum reflectors for space spectrometer is proposed, which includes material selection, configuration design, assembly deformation unloading, lightweight design method, surface coating, detection and error compensation. The experimental verification of a space spectrometer shows that the lightweight rate of all aluminum mirrors designed by this method is better than 50%. The development and test of a space spectrometer show that all aluminum mirrors designed by this method can meet the requirements of the system, and the lightweight rate is better than 50%. This method can be applied to various types of space opto-mechanical systems involving aluminum mirrors, and can provide reference for aluminum mirror design and compact opto-mechanical system design.

Keywords: space spectrometer; special shaped aluminum reflector; lightweight; opto-mechanical design

Highlights:

- A new light and small aluminum mirror structure design method for space spectrometer and mechanical systems is proposed.
- The configuration design, assembly deformation and unloading mode analysis, lightweight design method. The aluminum mirrors of a hyperspectral remote spectrometer are designed to verify the effectiveness of the method.
- Different load-bearing structures and weight reduction designs are designed for different mirrors, so that the weight of this high complexity and multi temperature spectrometer is reduced by 50% while the accuracy remains unchanged.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]