

# 空间多用途双面反射镜的设计与制备

汪逸群 王 龙 郭万存 郑玉权

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 空间多用途双面反射镜是某型星载高光谱成像仪的关键光学元件,其设计与制备是高光谱成像仪工程研制阶段必须解决的重要问题。介绍了一面为光学反射面、一面为漫反射面的双面反射镜构成方案;综合考虑了两种反射面特性要求选用了6061铝合金作为镜体材料;从径厚比、轻量化结构形式、安装界面等方面开展了反射镜的结构设计和有限元分析;在此基础上探索了合理的制备工艺并完成了研制工作;介绍了双面反射镜性能测试装置并给出了测试结果。测试结果表明,6061铝合金双面反射镜光学面形均方根值达到 $0.023\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ );正入射条件下漫反射面的归一化漫反射特性与标准漫反射板相当,能够满足工程研制需要。

**关键词** 光学器件;高光谱成像仪;双面反射镜;漫反射面;6061铝合金

**中图分类号** TP70;TH74 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0428001

## Design and Manufacture of Space All-Purpose Double-Faced Reflective Mirror

Wang Yiqun Wang Long Guo Wancun Zheng Yuquan

*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science,  
Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** Space all-purpose double-faced reflective mirror is a key optical component of a certain space-borne hyper-spectral imager. Its design and manufacture technology are important problems which must be solved during the hyper-spectral imager engineering development phase. Firstly, the composing project of double-faced reflective mirror, one face optical reflective surface and the other diffuse surface, is introduced. Furthermore, the structure design and finite element analysis of reflective mirror have been carried through taking into account ratio of diameter and thickness, lightweight form and mounting interface. Based on these works, the manufacture technology of double-faced reflective mirror has been explored, and then the mirror development has been finished. Finally, the double-faced reflective mirror testing devices and the mirror's testing results are presented. The testing results indicate that root mean square values of the optical surface figure of double-faced reflective mirror is  $0.023\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ), the diffuse characteristic is close to the normative diffuser at vertical incidence. The results prove that the space all-purpose double-faced reflective mirror satisfies the requirements of hyper-spectral imager.

**Key words** optical devices; hyper-spectral imager; double-faced reflective mirror; diffuse surface; 6061 aluminum alloy

**OCIS codes** 280.4788; 120.5800; 120.7280; 110.2960

## 1 引言

双面反射镜是某些空间光学遥感器的关键光学元件,它常用来实现旋转扫描成像、选择成像目标、引入星上定标光源等功能。某型高光谱成像仪是我国某型号卫星的主载荷之一,为了实现在轨辐射与光谱定

收稿日期: 2014-11-18; 收到修改稿日期: 2014-12-04

基金项目: 国家863计划(2011AA12A102)

作者简介: 汪逸群(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事空间精密扫描机构设计与检测技术、航空航天高光谱成像技术等方面的研究。E-mail: hitwyq@126.com

标、选取地面探测目标等功能,该仪器在光学系统前端设置了指向镜,它是一块双面反射镜,与传统双面反射镜不同的是这块反射镜一面是光学镜面,而另一面则是漫反射面,这给反射镜的材料选取、结构设计、制造与测试带来了一系列困难。

单独的光学镜面反射镜和漫反射板的设计与制备都有大量的文献予以阐述,但是两者结合为一体的双面反射镜还未见诸报道。对于单独的光学镜面反射镜,刘震<sup>[1]</sup>研究了用于空间太阳望远镜的双波段极紫外反射镜,设计并制备了多层膜系结构,提高了极紫外特征谱线处的反射率;龙波等<sup>[2-3]</sup>研究铝镜消应力支撑及SPDT辅助装配设计,给出了典型铝镜消应力支撑结构形式及设计原则;陈新东研究了9点促动变形镜性能测试及其空间相机中的应用,证明变形镜能够有效校正空间相机的系统像差;李俊峰<sup>[4]</sup>开展了碳化硅凸非球面反射镜的加工与检测方面的研究,凸非球面加工精度达到了 $\lambda/30$ ,张峰<sup>[5]</sup>开展了空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层的组合式抛光工作,抛光试验结果表明反射镜的面形均方根(RMS)达到 $0.014\lambda$ ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )。对于单独漫反射板的设计与制备,赵敏杰等<sup>[6-7]</sup>开展了星载光谱仪定标铝漫反射板的设计与实验测量研究;李博等<sup>[8]</sup>开展了紫外-真空紫外空间遥感仪器漫反射板的制备工艺方面的研究,取得了较好效果;陈福春等<sup>[9]</sup>对用于地球同步轨道遥感仪器星上定标的漫反射板特性进行了分析研究,得到了聚四氟乙烯(PTFE)漫反射板的双向反射特性随着真空紫外辐照时间延长的变化情况;张子辉等<sup>[10]</sup>开展了漫反射板光谱定标波长差异的研究,得出倾斜漫反射板是造成定标结果差异的主要原因的结论。李俊麟等<sup>[11]</sup>开展了双向反射分布函数绝对测量装置的研制工作,为漫反射板的性能测试提供了技术装备。美国蓝菲光学公司Spectralon系列宇航级特种漫反射材料具有99%的反射率、近乎完美的朗伯特特性、机械及化学稳定性良好、紫外照射下性能不退化等性能特点,在美国、欧洲等多个光学遥感器中得到了成功应用。

本文针对星载高光谱成像仪的研制需求,从反射镜构成方案、镜体材料选用、反射镜结构设计、制备工艺流程等方面开展研究工作,设计并制造了镜面面形优于 $1/40\lambda$ ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ),漫反射特性接近朗伯曲线的一体化双面反射镜,提供了一种有效的工程实现解决方案。

## 2 双面反射镜构成方案优选

根据仪器总体要求,双面反射镜尺寸为 $330\text{ mm}\times 180\text{ mm}$ ,一面为镜面[面形精度优于 $1/30\lambda$ ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ),RMS],而另一面为漫反射面(漫反射特性接近朗伯曲线),此外,由于双面反射镜属于活动部件,要求镜体具有中心对称性且质量和转动惯量尽可能小。对于这种特殊要求反射镜,可借鉴经验较少,考虑主要有两种构成方案:一种方案是采用两块反射镜,一块为镜面,另一块为漫反射面,分别独立加工后拼接成一块双面反射镜;另一种方案是采用同一镜体,一面加工成镜面,另一面加工成漫反射面。下面分别就这两种方案的优缺点展开比较。

第一种方案的优点是加工制造简单,两种反射面都有成熟材料及制造工艺可以得到符合总体要求的反射镜,比如镜面采用碳化硅,目前一般可加工至面形优于 $1/50\lambda$ ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ );而漫反射面可以采购到标准的漫反射板(具有几乎完美的朗伯特特性、反射率、均匀性等指标,如蓝菲公司的Spectralon系列宇航级漫反射板)或者采用单独铝板加工成漫反射面(目前可在空间应用的漫反射板只有这两种材料)。需要说明的是蓝菲公司的宇航级漫反射板价格非常昂贵,项目经费预算难以承受;如果采用单独的铝板加工成漫反射面,那么就需要解决碳化硅与铝合金这两种镜体拼接后存在线胀系数不匹配问题,即便通过技术手段解决这一问题,也会使得反射镜镜体结构偏大、偏沉,静平衡设计也是一个难题。

第二种方案的优点是镜体结构紧凑,避免了第一种方案各项缺点,随之而来的却是材料选用、加工制造等方面的困难。目前已知的能用来加工漫反射面的材料只有有限的几种,而同时又可以作为镜体材料的更是屈指可数,此外,在同一镜体上既加工漫反射面又加工光学反射面,两种工艺过程会相互影响,后一工艺过程有可能会对前一工艺成果产生破坏性的影响。

综合比较优缺点和总体指标要求,认为第二种方案对工程研制来说更具有吸引力。也就是说采用同一镜体材料,在两个表面上分别加工光学镜面和漫反射面,在这一方案中材料选用和制造工艺流程至关重要,它直接决定双面镜制备的成败。

### 3 双面反射镜镜体材料选用与结构设计

#### 3.1 双面反射镜镜体材料选用

目前,空间光学遥感器常用的反射镜镜体材料主要有:碳化硅、微晶玻璃、石英玻璃、铝合金、钛合金等;而常用的漫反射板材料主要有:硫酸钡、聚四氟乙烯、铝合金、美国蓝菲公司的 Spectralon 材料。显然,只有铝合金是能满足两种反射面加工要求的材料,作为双面反射镜镜体的优选材料,与 7075 和 2024 等牌号的铝合金相比,6061 铝合金具有长期稳定性和易加工性,是金属反射镜的主要应用材料<sup>[12]</sup>。然而,铝合金比刚度只有 25,是所有常见光学反射镜材料中最低的,常用于红外系统等对光学面形要求不高的场合,而实验要求光学反射镜面形优于  $1/30\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ),且尺寸较大(外接圆直径达到了  $\phi 376\text{ mm}$ ),这样 6061 铝合金反射镜加工存在一定的风险,需要在结构设计、坯料应力释放、加工工艺和装配工艺等方面特别注意。

在选定反射镜材料后,在反射镜设计期间主要是确定必要的尺寸(外接圆直径和厚度)、轻量化形式的选择、安装界面设计。

#### 3.2 双面反射镜径厚比的选择

反射镜的径厚比直接决定了反射镜的轻量化程度,它受到材料比刚度、安装界面及轻量化形式等因素的影响。对实心基板,厚度与直径之比(径厚比)通常是 1:5~1:10,径厚比太小可能会导致无法加工至所需光学面形或者自重变形就足以导致面形不能满足要求,而径厚比过大则无法满足轻量化要求。

对于圆饼形实心反射镜,Robert 等研究了径厚比  $D/t$  与自重变形的关系,并给出了如下经验公式<sup>[13-14]</sup>:

$$\delta = \frac{3\rho g a^4}{16Et^2} = \frac{3\rho g d r^2 D^2}{256E}, \quad (1)$$

式中  $\delta$  为最大自重变形,单位为  $\mu\text{m}$ ,  $\rho$  为材料密度,单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $g$  为重力加速度,  $a$  为圆盘半径,  $a = D/2$ , 单位为  $\text{m}$ ,  $E$  为材料弹性模量,单位为  $\text{GPa}$ ,  $t$  为圆盘厚度,单位为  $\text{m}$ 。从(1)式可以看出,反射镜的自重变形与材料比刚度 ( $E/\rho$ ) 的一次方成反比,与径厚比及口径的平方成正比。表 1 列出了不同材料 380 mm 口径反射镜重力变形小于  $0.127\text{ }\mu\text{m}$  ( $\lambda/5, \lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$ ) 时的最小径厚比。

表 1 不同材料 380 mm 口径反射镜自重变形的最小径厚比

Table 1 Minimum ratio of  $D/t$  for 380 mm mirrors of different materials

|               | $\rho /(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $E / \text{GPa}$ | $E/\rho /(\text{GNm}\cdot\text{kg}^{-1})$ | $D/t$ |
|---------------|---------------------------------------|------------------|---|-------|
| SiC           | 3040                                  | 330              | 0.109                                     | 28.95 |
| ULE           | 2210                                  | 67               | 0.03                                      | 15.2  |
| Zerodur       | 2530                                  | 92               | 0.036                                     | 16.45 |
| Be            | 1850                                  | 287              | 0.151                                     | 34.1  |
| Al            | 2700                                  | 68               | 0.025                                     | 13.87 |
| Si            | 2330                                  | 131              | 0.056                                     | 20.68 |
| Fused silicon | 2190                                  | 73               | 0.033                                     | 15.98 |

由表 1 可知,在满足自重变形约束的条件下,380 mm 口径的实心铝反射镜径厚比可以做到 1:13,这可以作为双面反射镜径厚比的最初设计准则。

#### 3.2 双面反射镜轻量化结构形式的选择

反射镜的轻量化结构形式主要包括对称夹层形式、不对称夹层形式、半开放式结构、开放式结构、泡沫夹芯结构等 5 种<sup>[15]</sup>,如图 1 所示。对于双面反射镜来说,只有对称夹层形式、不对称夹层形式和泡沫夹芯结构

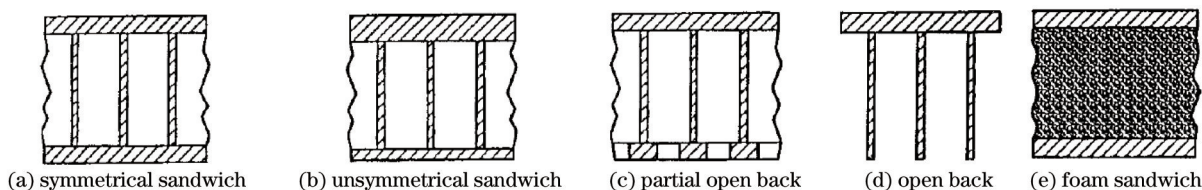


图 1 反射镜的五种轻量化结构形式

Fig.1 5 kinds of reflective mirror lightweight structure

3种是可用的,为便于控制系统设计,双面反射镜要求尽可能采用中心对称结构,排除不对称夹层形式,至于泡沫夹芯结构,国内工艺水平尚不成熟,因此双面反射镜的最终轻量化形式选择为对称夹层式。考虑到加工工艺,对称夹层式双面反射镜主要通过加工通孔来实现。通孔的形状,主要有圆形、正方形和三角形三种,综合考虑轻量化率、结构刚度、加工方便性等因素,三角形轻量化孔是一种较优方案。

对于轻量化反射镜,前面板厚度通常可取3~8 mm,要综合考虑反射镜材料、轻量化孔的结构形式与尺寸、镜面加工方法等因素来决定。而支撑筋的厚度及高度主要根据反射镜厚度、反射镜口径和轻量化孔结构形式综合考虑。

### 3.3 双面反射镜安装界面设计

对于有旋转运动要求的反射镜来说,常用的支撑方式有周边支撑、侧面支撑及背部支撑等三种形式,随着尺寸、形状、工作环境及面形精度的不同,反射镜的支撑方式有很大不同。对于双面反射镜来说,只有周边支撑和侧面支撑两种方式是可用的,由于周边支撑方式附加结构较多,质量和体积较大,作为空间旋转运动反射镜的支撑结构资源开销较大,因此选用侧面支撑方式作为双面反射镜安装界面设计的初始准则。

考虑到双面反射镜是金属镜,能在反射镜基体上直接加工螺纹孔等固联措施,利用螺钉通过柔性联接结构将主轴与反射镜固联在一起。

### 3.4 双面反射镜结构设计

根据以上设计原则,结合工程实际指标约束条件,双面反射镜厚度取为40 mm(径厚比取保守值为9.4),光学镜面及漫反射面板厚度为5 mm,加强筋厚度为4 mm,轻量化孔为等边三角形通孔(线切割加工实现),双面反射镜两端中心孔处设计有凸台,凸台上开有螺纹孔及腰型孔便于与主轴柔性联接,设计完成的双面反射镜如图2所示,质量约为2.5 kg。

利用Patran软件对设计完成的双面反射镜进行了有限元分析(FEA),有限元模型根据三维实体模型生成,以保证几何数据与设计结构一致。对于双面反射镜主要采用六面体单元对其进行网格划分,个别拐角处采用楔形单元过渡,整个双面反射镜节点数36387个,划分单元19688个,如图3所示。有限元分析结果表明三个方向自重变形分别为7 nm(X向,RMS)、11 nm(Y向,RMS)、5 nm(Z向,RMS)分析结果如图4所示。

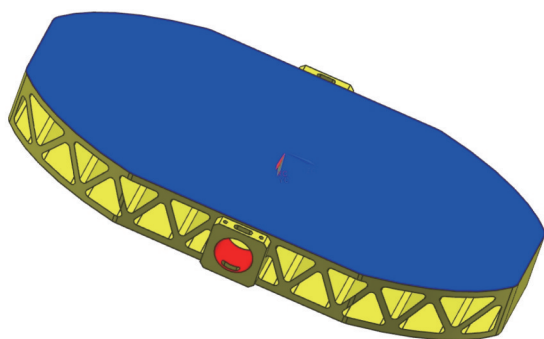


图2 双面反射镜结构形式

Fig.2 Double-faced reflective mirror structure

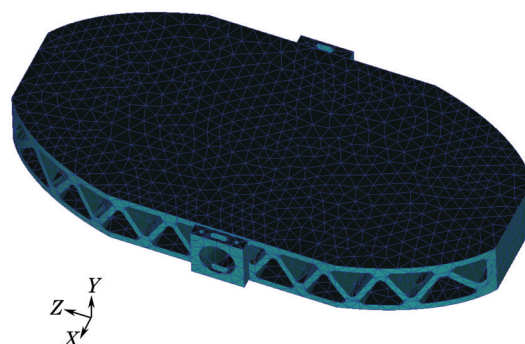


图3 双面反射镜有限元模型

Fig.3 Double-faced reflective mirror FEA model

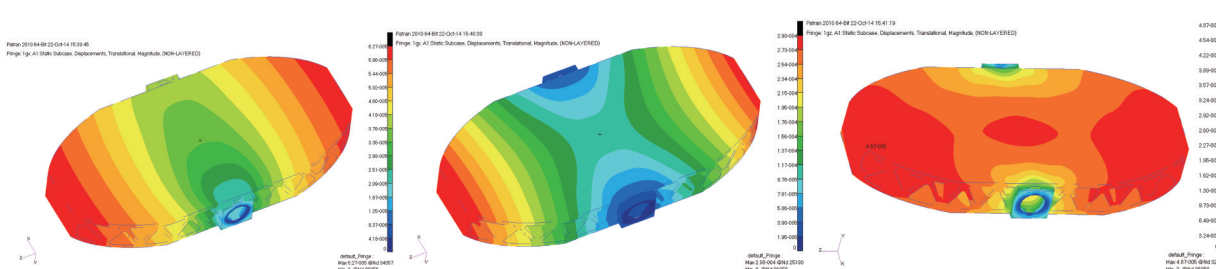


图4 三个方向重力变形云图

Fig.4 Three orientation distortion nephogram by gravity

#### 4 双面反射镜制备工艺

对于金属反射镜,典型的加工过程主要包括如下工序:形成基板(坯)、基板成形、应力释放、电镀(代表性的是非电解镀镍)、光学精加工、测试和镀膜。应力会随着时间或温度的变化而释放,从而造成反射镜表面变形,所以,释放应力这道工序特别重要,是一种可以使基板产生最小内应力的方法。此外,对于铝合金反射镜来说,要想获取优于  $1/30\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ) 的光学面形,铝合金反射镜的光学精加工(光学抛光)工艺也是非常重要的环节,其主要工艺流程是第一步在精磨盘上研磨铝合金反射镜基板表面,直至基板表面平面度达到  $2\mu\text{m}$ ,第二步在环抛机上精加工铝合金反射镜的光学表面,直至达到所需的光学面形要求,精加工过程中需要根据光学表面面形的变化情况及时调整加载物的位置和重量,加载物的调整是干预抛光过程的重要手段,它受到反射镜自身刚度、抛光速度、光学面形变化趋势等多种因素的影响。

而对于铝漫反射面的加工工序则主要包括:碳化硅微粉的筛选与清洗、铝合金基板物理研磨、漫反射表面清洗与除水、漫反射表面化学腐蚀磨砂、超声波清洗、镀纯铝膜与  $\text{MgF}_2$  保护膜。根据加工工艺流程及两表面加工过程相互影响最小的原则,设计了 6061 铝合金双面反射镜的制备工艺流程,如表 2 所示。

表 2 6061 铝合金双面反射镜制备工艺流程

Table 2 6061 Aluminum double-faced reflective mirror manufacture technology flow

| Step | Technics  |
|------|---|
| 1    | Rough machine   |
| 2    | Quench, getting T6 state  |
| 3    | Age at 175 °C, 8 h, finish machine, age at 175 °C   |
| 4    | Physical grinding using SiC powder to get diffusing surface   |
| 5    | Wash: 1.distilled water in ultrasonic cleaning machine; 2.dehydration using distilled acetone   |
| 6    | Chemical corrosion using NaOH solution. temperature, concentration and corrosion time should be controlled to get good diffusing surface          |
| 7    | Ultrasonic cleaning   |
| 8    | Aluminum film and $\text{MgF}_2$ protective film coating on the diffusing surface   |
| 9    | Diffusing property testing, qualified? Or turn to step 3  |
| 10   | Thermal cycle 3× at rate $<1.7\text{ °C/min}$ , cool to 83 K, hold 30 min, heat to 23 °C, hold 15 min, heat to 150 °C, hold 30 min, cool to 23 °C |
| 11   | Testing diffusing property again, if eligible? coating silica gel on the diffusing surface  |
| 12   | Nickel coating on the optical reflective surface  |
| 13   | Optical reflective surface polishing  |
| 14   | Optical reflective surface form testing, if eligible? Coating gold film   |
| 15   | Eliminating silica gel, testing optical reflective surface and diffusing surface property again   |

经过上述工艺流程加工完成的 6061 铝合金双面反射镜如图 5、图 6 所示。

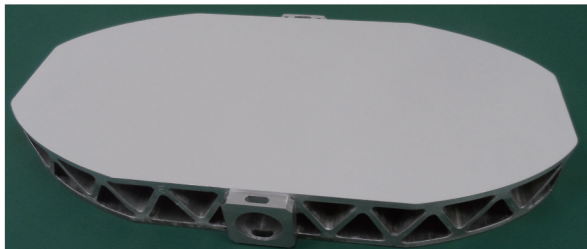


图 5 6061 铝合金双面反射镜的漫反射表面

Fig.5 Diffusing surface of 6061 aluminum double-faced reflective mirror

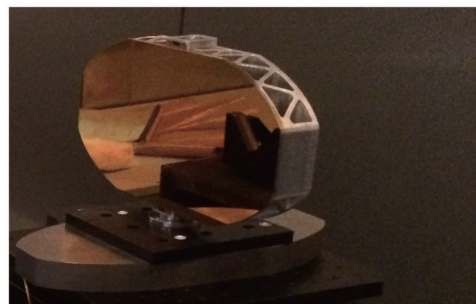


图 6 6061 铝合金双面反射镜的光学反射面

Fig.6 Optical reflective surface of 6061 aluminum double-faced reflective mirror

## 5 双面反射镜性能测试

### 5.1 双面反射镜性能测试装置

在 6061 铝合金双面反射镜的加工过程中,需要多次对光学反射面和漫反射面表面性能进行测试,以测试结果为依据调整加工量、加工方式等。主要涉及的测试装置包括:大口径 ZYGO 干涉仪、光学显微镜和漫反射特性测量装置,前者用于光学表面面形的检测,后两者用于检测漫反射表面的漫反射特性。需要指出的是利用 ZYGO 干涉仪的面形检测结果可以直接指导光学表面的抛光过程,而光学显微镜和漫反射特性测量装置的检测结果只能定性和定量的给出表面的漫反射特性,但不能直接用于指导漫反射表面的加工过程,这一点是漫反射面加工的一个显著特点。

由于 ZYGO 干涉仪、光学显微镜属于常规光学检测仪器,这里仅给出光学反射面在大口径 ZYGO 干涉仪上的检测照片,如图 7 所示。重点介绍自行搭建的漫反射特性测量装置,如图 8 所示。



图 7 光学反射面检测装置图

Fig.7 Optical reflective surface testing device

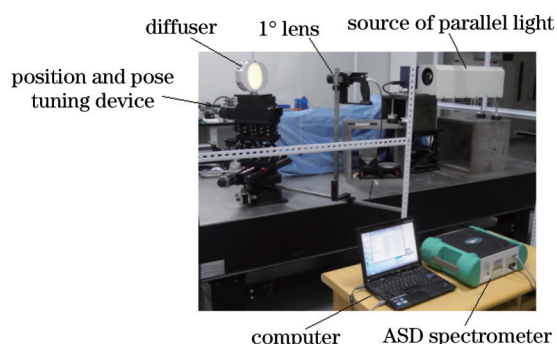


图 8 漫反射特性测量装置

Fig.8 Diffusing property testing device

该装置由平行光源、漫反射板、位姿调整装置、1°镜头、ASD 地物波谱仪、计算机等组成。采用卤钨灯作为光源,经由离轴抛物面平行光管形成平行光源,利用位姿调整装置调整漫反射板的姿态,从而实现平行入射光以不同角度照射漫反射板表面,1°镜头安装在可旋转的导轨上,以实现从不同角度接受漫反射板反射的漫反射光,ASD 地物波谱仪采集光谱数据,计算机对这些数据进行处理并以辐亮度的形式显示在显示器

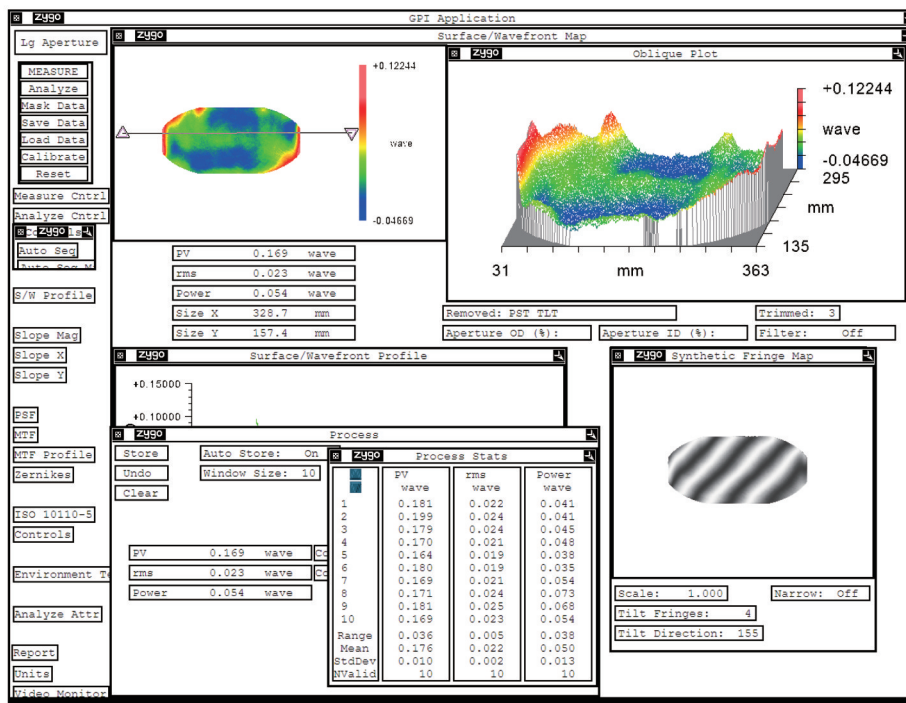


图 9 双面反射镜光学镜面面形测试结果

Fig.9 Optical surface form testing result of double-faced reflective mirror

上,随后利用 Matlab 软件等数学工具对辐亮度数据进行处理后,可获得漫反射板正入射和 45°入射条件下的不同散射角的相对双向反射分布函数。同时,通过与标准半球反射率的聚四氟乙烯漫反射板比对测量,可得漫反射板的半球反射率。

### 5.2 双面反射镜性能测试结果

双面反射镜的主要特性包括光学镜面面形和漫反射面的漫反射特性,如图 9 所示为双面反射镜光学镜面面形的 ZYGO 干涉仪检测结果,光学面形为  $0.023\lambda$  (RMS,  $\lambda=632.8\text{ nm}$ )。

双面反射镜的漫反射面主要进行了以下三项测试:漫反射面漫反射特性测试、反射率测试、面均匀性测试等,如图 10~13 所示。

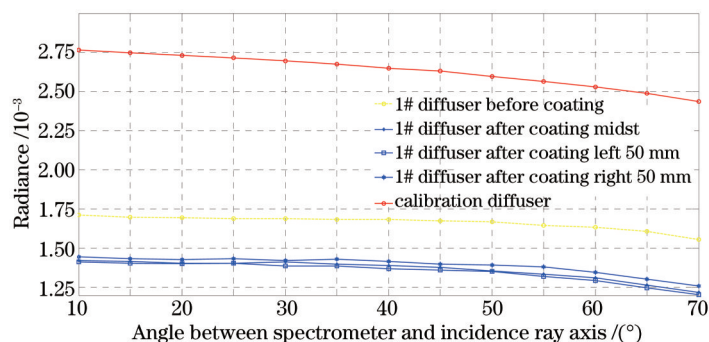


图 10 双面反射镜漫反射面正入射条件下的漫反射特性

Fig.10 Diffuse characteristic of double-faced reflective mirror at vertical incidence

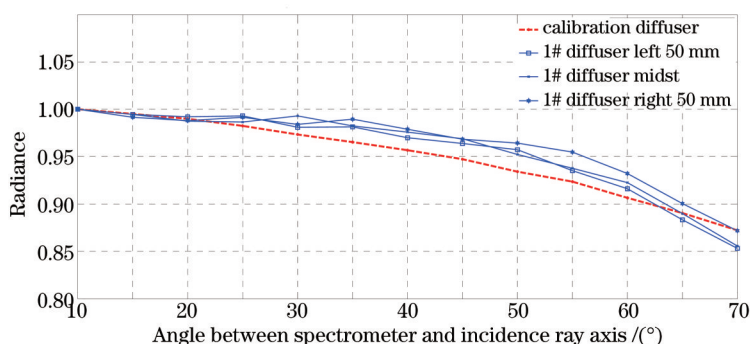


图 11 双面反射镜漫反射面正入射条件下的归一化漫反射特性

Fig.11 Unitary diffuse characteristic of double-faced reflective mirror at vertical incidence

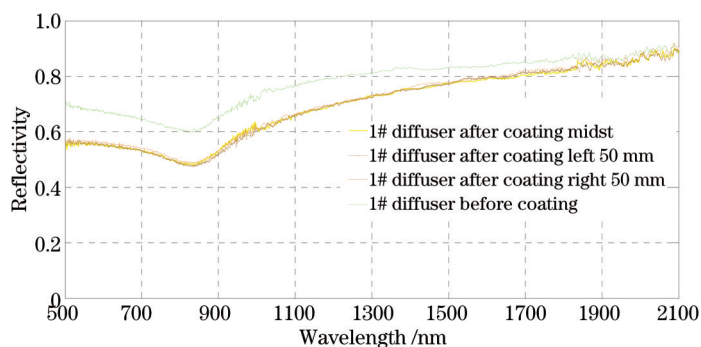


图 12 双面反射镜漫反射面正入射 20°条件下的反射率

Fig.12 Reflectivity of double-faced reflective mirror at 20° vertical incidence

如图 11 所示,正入射的条件下,1#双面反射镜漫反射面的归一化漫反射特性与标准漫反射板相当,不同位置处的漫反射特性较一致。图 12 显示,1#双面反射镜漫反射面镀膜后 760 nm 处的反射率大于 50%,1610 nm 处大于 78%,2060 nm 处大于 84%,而标准漫反射板在上述波段反射率均在 90%以上,因此与图 10 中的绝对辐亮度值有差距。如图 13 所示,标准漫反射板在不同位置的均匀性优于 1.63%,而双面镜漫反射面镀膜前均匀

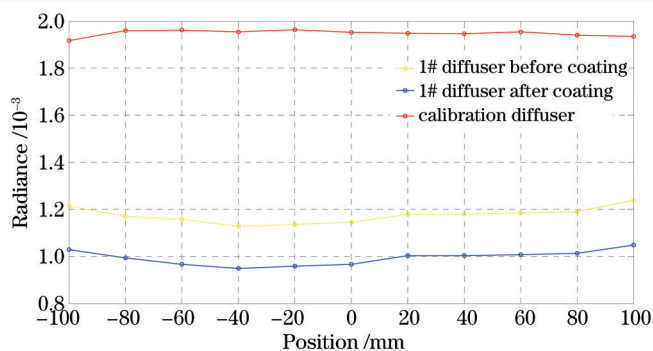


图 13 双面反射镜面均匀性测试

Fig.13 Surface uniformity test of double-faced reflective mirror

性优于 5.49%，双面反射镜漫反射面镀膜后均匀性优于 5.42%。

## 6 结 论

针对超高光谱分辨率光谱成像仪对空间多用途双面反射镜的研制需求,开展了双面反射镜构成、材料选用、结构设计、制备工艺等方面的研究,研制成功一块外接圆直径达到 $\phi 376$  mm的长条形 6061 铝合金双面反射镜,并利用大口径 ZYGO 干涉仪及自行搭建的漫反射特性测试装置对其性能进行了测试,测试结果表明所研制的双面反射镜光学面面形 RMS 达到  $0.023\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm);正入射条件下 6061 铝合金漫反射面的归一化漫反射特性与标准漫反射板相当,镀膜后在 760 nm 处的反射率大于 50%,1610 nm 处大于 78%,2060 nm 处大于 84%,漫反射面不同位置处的均匀性优于 5.5%,能够满足工程研制指标要求。

## 参 考 文 献

- Liu Zhen. Two-band EUV multilayer mirror used for the space solar telescope[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014,25(7): 1298-1302.  
刘震. 用于空间太阳望远镜的双波段极紫外反射镜[J]. 光电子激光, 2014, 25(7): 1298-1302.
- Long Bo, Xing Tingwen, Liao Sheng. Design of stress-relief Support of aluminum mirrors and assembly assisted by SPDT [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(3): 1-6.  
龙波, 邢廷文, 廖胜. 铝镜消应力支撑及 SPDT 辅助装配设计[J]. 光电工程, 2014, 41(3): 1-6.
- Chen Xindong. Testing of a 9-points deformable mirrors and its application in space camera system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1023001.  
陈新东. 9 点促动变形镜性能测试及在空间相机中的应用研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1023001.
- Li Junfeng. Fabrication and test of SIC convex aspheric mirror [J]. Chinese Optics, 2014, 7(2): 287-292.  
李俊峰. 碳化硅凸非球面反射镜的加工与检测[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 287-292.
- Zhang Feng. Combined type polishing of silicon modification layer on silicon carbide mirror for space camera [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0716001.  
张峰. 空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层的组合式抛光[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0716001.
- Zhao Minjie, Si Fuqi, Lu Yihuai, et al.. Experimental measurement of aluminium diffuser applied to calibration system of space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(24): 249301.  
赵敏杰, 司福祺, 陆亦怀, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪定标系统中铝漫反射板实验测量研究[J]. 物理学报, 2013, 62(24): 249301.
- Zhao Minjie, Si Fuqi, Jiang Yu, et al.. Design of calibration mechanism on space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(1): 57-60.  
赵敏杰, 司福祺, 江宇, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪定标机构设计[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(1): 57-60.
- Li Bo, Lin Guanyu, Zhang Mingyu, et al.. Fabrication of diffuser in UV-VUV space remote sensing instrument [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 475-481.  
李博, 林冠宇, 张明宇, 等. 紫外-真空紫外空间遥感仪器漫反射板的制备[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 475-481.
- Chen Fuchun, Chen Guilin. Characteristics analysis of a PTFE diffuser for onboard calibration of geostationary sensors [J]. Science



- Technology and Engineering, 2008, 8(2): 371-375.
- 陈福春, 陈桂林. 用于地球同步轨道遥感仪器星上定标的漫反射板特性分析[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(2): 371-375.
- 10 Zhang Zihui, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Wavelength difference Studies of wavelength calibration based on diffuse reflector [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1212001.
- 张子辉, 王淑荣, 黄煜, 等. 漫反射板光谱定标波长差异研究[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1212001.
- 11 Li Junlin, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.*. Development of BRDF absolute measuring device [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528002.
- 李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528002.
- 12 Zhang Jianhan, Zhang Yumin, Han Jiecai, *et al.*. Study of space mirror material properties [J]. Materials Review, 2006, 20(2): 5-9.
- 张剑寒, 张宇民, 韩杰才, 等. 空间反射镜材料性能的研究[J]. 材料导报, 2006, 20(2): 5-9.
- 13 John Miller, Ed Friedman. Photonics Rules of Thumb [M]. New York: McGraw Hill, 2003.
- 14 Zhang Xuejun, Li Zhilai, Zhang Zhongyu. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007,36(5):577-582.
- 张学军, 李志来, 张忠玉. 基于SiC材料的空间相机非球面反射镜结构设计[J]. 红外与激光工程, 2007,36(5): 577-582.
- 15 Paul R Yoder Jr. Opto-Mechanical Systems Design [M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang Transl. Beijing:China Machine Press, 2008. 349~369.
- 约德. 光机系统设计[M]. 周海宪, 程云芳译. 北京: 机械工业出版社, 2008. 349-369.

栏目编辑: 韩 峰