

文章编号 1004-924X(2009)01-0058-07

# 空间太阳望远镜中的轻量化铍镜研究

宋立强<sup>1,2</sup>, 杨世模<sup>1</sup>, 陈志远<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:**为提高空间太阳望远镜相关跟踪系统的动态性能,验证金属铍作为可见光波段反射镜材料的可行性与可靠性,对空间太阳望远镜相关跟踪器中的摆镜进行了研究,设计与研制了 $\Phi 84$  mm轻量化铍镜。利用冲击研磨工艺得到铍粉,再通过热等静压工艺和机械加工得到铍镜镜坯。使用化学镀镍工艺在镜坯基体上镀覆镍磷合金过渡层,再经过光学加工完成铍镜研制。镜面干涉检测后得到面形精度为RMS:0.012 $\lambda$ ,PV:0.114 $\lambda$ ,铍镜轻量化率为43.68%。检测结果满足空间太阳望远镜的技术要求。

**关键词:**空间天文仪器;空间太阳望远镜;摆镜;铍镜;轻量化

**中图分类号:**TH75;P111.41 **文献标识码:**A

## Study on lightweight beryllium mirror of space solar telescope

SONG Li-qiang<sup>1,2</sup>, YANG Shi-mo<sup>1</sup>, CHEN Zhi-yuan<sup>1</sup>

(1. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** In order to improve the dynamic performance of the correlation tracker in a Space Solar Telescope, and to verify the feasibility and reliability of a beryllium mirror working in visible band, the tip-tilt mirror of the correlation tracker in the space solar telescope was studied. A  $\Phi 84$  mm lightweight beryllium mirror was designed and fabricated. Beryllium powder was obtained by impact attrition technique, and the beryllium mirror blank was fabricated by hot isostatic pressing technique and mechanical processing. The nickel-phosphorus alloy layer was plated onto the substrate of beryllium mirror by electroless nickel plating, and the beryllium mirror was completed by optical processing. Surface testing results indicate that the surface figure errors of beryllium mirror are PV value of 0.114 $\lambda$  and RMS of 0.012 $\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm), and the lightweight ratio is 43.68%. The results of surface figure error satisfy the technical requirements for the space solar telescope, which shows that beryllium can be used as mirror substrate materials of space astronomical instruments.

**Key words:** space astronomical instrument; space solar telescope; tip-tilt mirror; beryllium mirror; lightweight

收稿日期:2008-04-28;修订日期:2008-06-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10778628);中国科学院国家天文台知识创新工程青年人才领域前沿项目资助

## 1 引言

随着对宇宙空间探测的不断深入,人们对天文仪器特别是空间天文仪器的性能提出了越来越高的要求。反射镜是空间天文光学仪器中的核心部件,其综合性能的优劣直接影响空间天文仪器的成像质量、使用寿命、仪器重量以及制造和发射成本等因素。因此研制综合性能更加优异的反射镜有着重要意义。

摆镜是空间太阳望远镜相关跟踪器中的主要光学元件,在光学系统中做二维摆动使光束受控地产生快速、小角度变化以补偿因卫星振动而引起的图像抖动。相关跟踪系统的动态范围、精度由摆镜的动态范围、精度决定,有效带宽也受到摆镜谐振频率的影响,摆镜综合性能的好坏也会影响相关跟踪系统的性能。摆镜的综合性能受反射镜材料、镜体结构等因素的影响。常用的反射镜材料有碳化硅、微晶玻璃、超低膨胀石英、熔石英、金属铝等。金属铍是一种新型的反射镜材料,与常用的反射镜材料相比优势明显,其比刚度大、热变形系数小、材料稳定性好等,已被国外发达国家成功应用于研制天文仪器中的大口径反射镜,如美国的 JWST<sup>[1]</sup>、ITTT<sup>[2]</sup>、日本的 JAMI<sup>[3]</sup>、欧南台的 VLT<sup>[4]</sup> 等项目。我国对铍镜研究和应用起步较晚,始于上个世纪末期,在资源、风云系列卫星上应用了工作在红外波段且面形精度较低的铍扫描镜<sup>[5-7]</sup>。

为了提高空间太阳望远镜相关跟踪系统的动态性能,本项目组针对空间太阳望远镜中摆镜研制,开展了工作在可见光波段的铍镜研究。完成了铍镜镜坯研制、铍镜基体镀覆过渡层、光学加工和光学检测等系列工作,探索出了一条工作在可见光波段、高精度金属铍平面反射镜的技术路线,为在我国空间天文仪器中应用铍镜奠定了基础。

## 2 摆镜材料选择与结构设计

选择性能优异的反射镜材料和设计合理的镜体结构有利于提高摆镜的综合性能。

### 2.1 摆镜材料选择

摆镜材料选择需要考虑相关跟踪系统的光学

要求、环境要求、反射镜材料性能和生产成本等因素。空间太阳望远镜所在的环境为太空环境,使用条件是微重力或无重力、低温或者是大温差,同时要考虑到发射时对整个系统的要求,因此选取摆镜材料时主要考虑以下几个因素<sup>[8]</sup>:1. 比刚度(弹性模量  $E$ /密度  $\rho$ )大;2. 热变形系数(热膨胀系数  $\alpha$ /热导率  $\lambda$ )小;3. 材料本身稳定性好;4. 易于加工、制造等。

表 1 反射镜材料参数对比表<sup>[10]</sup>

Tab. 1 Comparison table of mirror material parameters

反射镜材料	密度 $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	弹性模量 $E$ (GPa)	热膨胀系数 $\alpha$ ( $10^{-6}/\text{K}$ )	热导率 $\lambda$ ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )	比刚度 $E/\rho$ $\text{GN}\cdot\text{m}/\text{g}10^{-6}\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$	热变形系数 $\alpha/\lambda$
铍	1.85	287	11.3	216	155	0.052
碳化硅	3.04	330	2.4	170	112	0.014
微晶玻璃	2.53	92	-0.09	1.6	36.4	0.056
超低膨胀玻璃	2.21	67	0.015	1.30	30.3	0.012
铝	2.70	68	22.5	167	25.2	0.13
硅	2.33	131	2.6	156	56.2	0.017
熔石英	2.19	73	0.50	1.40	33.3	0.36

在天文仪器反射镜材料(如表 1)中,金属铍与其它反射镜材料相比具备一定优势<sup>[9]</sup>:铍密度最小,约为碳化硅等材料的 2/3;铍比刚度最大,是 SiC 的 1.5 倍,是其它反射镜材料的 4~6 倍;铍作为空间反射镜材料既减轻了镜体重量,又减轻了支撑系统的重量,可降低仪器的发射成本;铍的比热容也最高,当温度变化时,镜体能很快达到热平衡,避免因温度梯度导致镜体扭曲变形;铍材的工艺性能良好,尽管铍粉有毒,但操作时可用防护措施进行防护;铍材虽然较贵,但对于空间天文仪器来说,性能是首要考虑的因素。因此,性能优异的铍,是空间光学系统中首选的反射镜材料。经过反射镜材料对比分析,确定金属铍为空间太阳望远镜中的摆镜材料。

### 2.2 摆镜结构设计及有限元分析

建立摆镜有限元模型并进行结构优化,得到摆镜优化后的有限元模型(如图 1)和结构尺寸(如表 2),摆镜装卡后的分析结果如表 3 所示。分析结果不仅满足相关跟踪器中摆镜  $\text{RMS} \leq \lambda/40$ 、 $\text{PV} \leq \lambda/10$ 、机械谐振频率  $\geq 950$  Hz 的技术

要求,而且也优于相同结构碳化硅材料摆镜,对比结果如表 3。

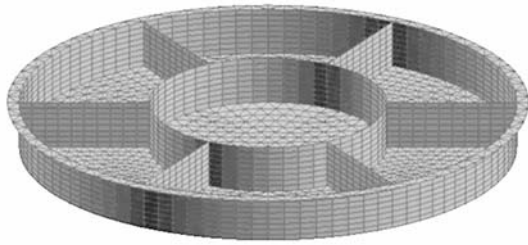


图 1 摆镜的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of tip-tilt mirror

表 2 铍摆镜的结构尺寸

Tab. 2 Structure dimensions of beryllium tip-tilt mirror

符号	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$H$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$
尺寸/mm	84	88	78	36	8	3	2.5	3	3

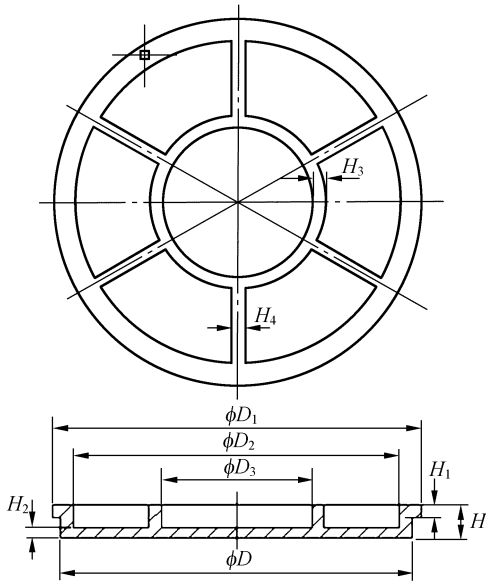


图 2 摆镜结构图

Fig. 2 Structure of tip-tilt mirror

表 3 相同结构的铍和碳化硅摆镜分析结果

Tab. 3 Analysis results of beryllium and silicon carbide tip-tilt mirrors in the same structure

摆镜材料	RMS /mm	PV /mm	一阶谐振 频率/Hz	质量 /g	转动惯量 /kg·mm <sup>2</sup>
铍	$2.18 \times 10^{-6}$	$1.69 \times 10^{-5}$	1 609	47.88	53.44
碳化硅	$2.20 \times 10^{-6}$	$1.66 \times 10^{-5}$	1 461	87.57	96.20

## 2.3 铍镜的轻量化度

轻量化度是轻型反射镜相对于相同尺寸实体结构减轻的质量,它与蜂窝结构的尺寸以及反射镜厚度有着直接关系<sup>[14]</sup>。这里铍镜轻量化度公式为:

$$\eta = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100\%,$$

其中, $W$ 为轻量化摆镜的重量, $W_0$ 为未经轻量化摆镜的重量。经计算,铍摆镜的轻量化度为 43.68%。

## 3 铍镜镜坯的制造

### 3.1 铍镜镜坯制造工艺流程

铍镜镜坯的加工需要考虑铍的粉尘及烟雾对人体的危害,要在专门配有降尘设备、密闭车间内进行。由于通过镁热还原的铍珠杂质仍然很高,故需经过真空感应熔炼进一步提纯,制成锭,铸锭经过扒皮制成屑,接下来再制粉和固结成型。图 3 是铍镜镜坯制造的工艺流程<sup>[15]</sup>。

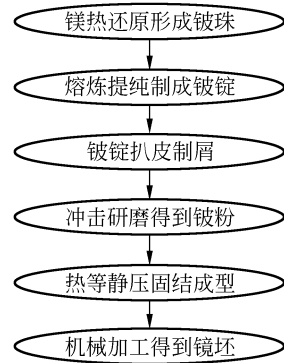


图 3 铍镜镜坯制造工艺流程

Fig. 3 Flow chart of beryllium blank production process

### 3.2 冲击研磨铍粉工艺

镜坯在被固结之前必须将其研磨或粉碎成细小的粉末颗粒,这样才能得到组织均匀、晶粒细小且强度较高的坯件,因此研磨制粉采用制造镜坯的关键环节之一。早期的制粉方法是圆盘磨粉,是用振动给料机将铍屑送入惰性气体保护的立式圆盘磨内,磨至  $76 \sim 59 \mu\text{m}$  后进行筛分。随着科技的发展,圆盘磨粉已不能满足新一代光学系统提出高强度、高延性铍材的要求。冲击研磨制粉是利用金属的冷脆性而发展起来的粉末新工艺<sup>[16]</sup>,是利用高速、高压气体带着较粗的颗粒通

过喷嘴轰击在铍靶上,压力立刻从高压降到大气压产生绝热膨胀,使铍靶和击碎时的温度降至室温甚至零度以下。此时,冷却了的颗粒经撞击被粉碎,即可得到晶粒细小的铍粉。本镜坯的制粉工艺是利用冲击研磨制粉,得到铍粉的平均晶粒

度为  $5.4 \mu\text{m}$ ,得到的晶粒度在技术要求之内。经过冲击研磨制粉,铍材晶体的排列变得更加无序,其延性得到改善,减小了镜坯的各向异性,提高了镜坯的力学性能。镜坯的力学性能见表 4。

表 4 铍镜镜坯的力学性能

Tab. 4 Mechanics performance of beryllium mirror blank

力学参量	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	抗拉强度 $\sigma_b/(\text{MPa})$	屈服强度 $\sigma_{0.2}/(\text{MPa})$	弹性模量 $E/(\text{MPa})$	延伸率 $\delta/(\%)$	平均晶粒度 $d/(\mu\text{m})$	线膨胀系数 $\alpha/(10^{-6}/\text{K})$	热导率 $\lambda/(\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s})$
技术要求	—	315	245	280 000	$>1.5$	$<25$	—	—
镜坯	1.861	492.5	401.2	297 400	3.05	5.4	10.88	0.363

### 3.3 热等静压工艺

铍材压制成型工艺主要有真空热压和热等静压两种。在制造铍镜镜坯方面,热等静压工艺优于真空热压工艺。热等静压是在高温下利用各向均等的静压力进行压制成型的方法<sup>[17]</sup>,其关键是温度和压力的确定,压力一般为 105 MPa,温度范围为  $1\ 083 \sim 1\ 152 \text{ K}$ ,在热压容器内进行。该工艺特点是:1. 节约原料,降低成本;2. 获得全

致密的制品;3. 获得无序的晶体结构,组织均匀、晶粒较细,并具有高的拉伸强度和延伸率。经过热等静压工艺得到的铍镜镜坯,测得其力学性能和化学成分具体数据如表 4、表 5,得到铍的含量  $>98.5\%$ ,只是密度稍高于理论密度  $1.85 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,其它力学性能均满足技术要求,这充分说明铍镜镜坯的研制,热等静压工艺是可行的。

表 5 铍镜镜坯的化学成分(%)

Tab. 5 Chemistry components of beryllium mirror blank (%)

BO	Be <sub>2</sub> C	Fe	Al	Si	Mg	Ni	Cr	Mn	Cu	Be
1.30	0.027	0.10	0.024	0.012	0.004 7	0.003 1	0.004 5	0.002 6	0.005 3	$> 98.5$

### 3.4 铍镜镜坯的机械加工

铍镜结构尺寸为: $\Phi 88 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ,外形为圆形,正面为反射镜面,背面为扇形轻量化孔结构。轻量化孔的壁厚为 3 mm,深度为 5.5 mm。由于铍的粉尘和碎屑对人体有害,会引起铍疾病,铍材加工过程是在有良好的通风的控制系统中进行的。由于铍性较脆,其加工性能类似铸铁,铍材对加工损伤较敏感,易发生裂、碎、掉渣等问题,所以机械加工时尽量减小或控制切削进给量以避免轻量化孔薄壁出现裂痕、棱边掉渣现象。

同时,加工时要严格控制切削参数,以尽量减小加工表面损伤层,并在后续处理中采用化学铣切和冷热循环处理去除表面损伤层,以保持镜坯尺寸稳定、恢复坯材原有的力学和加工性能<sup>[15]</sup>。铍镜镜坯如图 4 所示,镜坯外形完好。

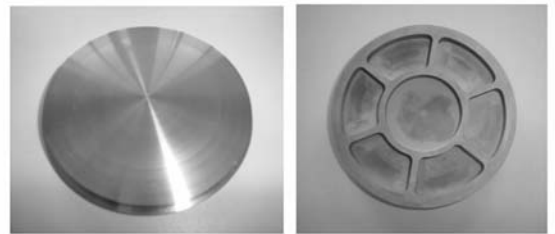


图 4 铍摆镜镜坯

Fig. 4 Beryllium tip-tilt mirror blank

## 4 铍镜的光学加工与检测

由于铍材在加工时易产生粉尘或烟雾,对人体产生危害,而且铍材也不能直接作为可见光波

段的 光学表面,这需要在 其基底上 结合致密 的过渡层 再进行光 学加工, 同时也 要求过渡 层材料与 铍材料具 有非常好 的温度匹 配和结合 力。常用 的过渡层 材料有镍、 玻璃、铜 等。从光 学可加工 性能上看, 镍和玻璃 过渡层的 加工技术 都很成熟, 而从热性 能上看, 镍与铍更 为相近。 为了避开 因环境温 度变化导 致过渡层 与基体热 性能不匹 配而引起 的镜面翘 曲,同时 提高过渡 层与反射 镜基体的 结合力等, 采用了在 铍镜基体 上镀覆镍 磷合金过 渡层。而 对于常用 的镀镍层 工艺为化 学镀镍和 电镀镍。 化学镀镍 相对于电 镀镍的优 点是:可 以在任何 复杂形状 的基体上 得到厚度 均匀的镀 层、镀层 与基体的 结合力高、 镀层针孔 较少、过 程操作方 便等。经 过对比分 析,采用 化学镀镍 工艺进行 了镀覆 镍磷合金 镀层,并 进行光学 加工镍磷 过渡层。

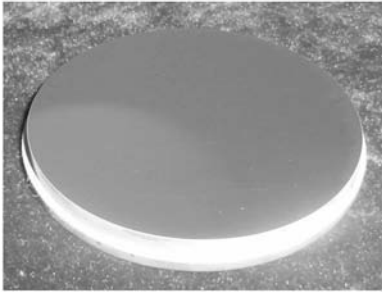


图 5 铍镜镀膜前的照片

Fig. 5 Beryllium mirror picture before coating

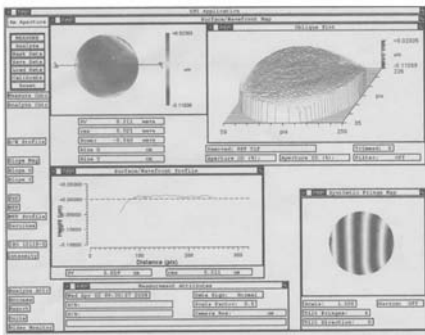


图 6 铍镜镀膜前光学检测干涉图

Fig. 6 Interference pattern before coating

铍镜光学加工完成后,使用 ZYGO 干涉仪进行铍镜面形精度检测,得到面形精度, RMS:  $0.021 \lambda$ , PV:  $0.214 \lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )。抛光后的铍镜照片和干涉图如图 5、图 6 所示。反射镜镀铝反射膜后,再次进行干涉检测,得到的面形精度

为, RMS:  $0.012 \lambda$ , PV:  $0.114 \lambda$ , 检测后发现,铍镜镀膜后,没有对面形精度产生负面影响,检测结果满足相关跟踪器的技术要求。铍镜的重量为 45.2 g。抛光后的铍镜照片和干涉图如图 7、图 8 所示。

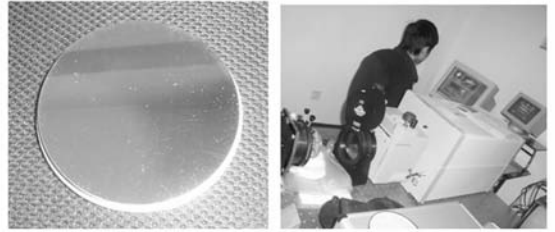


图 7 铍镜与其检测照片

Fig. 7 Beryllium mirror and its measurement picture

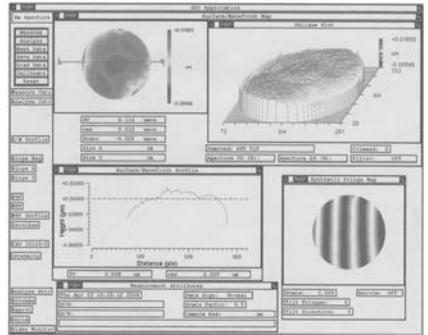


图 8 铍镜镀膜后光学检测干涉图

Fig. 8 Interference pattern after coating

## 5 铍镜研制综合分析

铍镜研制的每个技术环节都会影响铍镜的面形精度和使用性能,在具体的工艺研究中也要不断优化:(1)在铍材制粉方面,尽量减少粉末粒径,可提高材料微屈服强度;粉末颗粒球形化,可提高材料的各向同性;同时探索新工艺,如发达国家的雾化制粉。(2)完善热等静压固结成型工艺,可提高材料的力学性能,改善材料各向异性;也要探索热等静压至近净形工艺,可更加节省原料。(3)采用合适的化学铣切和热处理工艺,消除材料残余应力,必要时结合高低温循环处理,效果更佳。(4)优化镀镍层工艺及参数,稳定镀液的 pH 值,提高镀层沉积速度,增强镀液的稳定性等,以改善镀层与基体的结合力,减少或避免针孔,提高镀层性能。(5)对镍磷合金镀层进行适当热处理,

以提高镀层的力学性能。(6)光学加工时要注意过渡层的厚度、以及过渡层与基体的剥离。

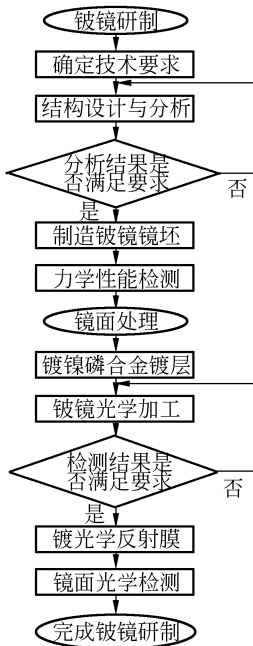


图9 铍镜研制技术路线

Fig.9 Technique route of beryllium mirror fabrication

通过对相关跟踪器中的铍摆镜研究,总结出了一条完整的、高精度、可用在可见光波段的铍镜研制技术路线,如图9所示。

铍镜在国内应用仍然属于起步阶段,主要原因在于铍镜研制具有一定的技术难度。铍镜研制的关键在于铍镜镜坯的固结成型与机械加工,这需要配备专门的车间和设备,才可以避免铍的粉尘和烟雾给人体带来的危害。还需掌握铍材的机械加工和热处理技术,以提高镜坯的力学性能。而铍镜研制的难点在于在镜坯基体上镀覆过渡层

技术。在镀覆过渡层工艺中,既要保证镀层的致密性和厚度,又要保证镀层与基体有很强的结合力,以保证光学加工的顺利进行。国内在铍镜坯基体镀覆过渡层技术仍处于探索阶段,能够成功镀覆性能满足光学加工要求的镀层工艺较少,这方面工作仍需进一步探索。另外铍镜的应用相对较少,这无疑阻碍了铍镜的深入研究,但从本面铍镜研制结果可以看出,金属铍对于空间应用的反射镜来说是具有一定前景,性能优异的反射镜材料。

## 6 结 论

针对空间太阳望远镜相关跟踪器中摆镜的应用需求,开展了摆镜的设计和研制。进行了摆镜材料选择,确定了铍为摆镜材料,完成了摆镜结构优化设计与分析,利用冲击研磨制粉、热等静压工艺制作了铍镜镜坯,进行了镜坯的力学性能检测,结果满足铍镜技术要求。采用化学镀镍工艺在铍镜基体上镀覆镍磷合金镀层,并进行了光学加工,得到了一面直径为84 mm的铍平面反射镜。铍镜面形检测结果,RMS:0.012 $\lambda$ ,PV:0.114 $\lambda$ ,面形精度满足相关跟踪器的技术要求。本铍镜是国内首次研制完成工作在可见光波段的铍平面反射镜,而且通过铍镜结构优化、制造镜坯、镀过渡层、光学加工等工艺,探索出了一条完整的、空间化的、高精度的铍镜研制技术路线,为铍镜应用到我国空间天文仪器当中奠定了基础。

致谢:在本铍镜的研制过程中,本组姜爱民、王慎等老师给了很多建议和指导,在此对他们的大力支持深表谢意!

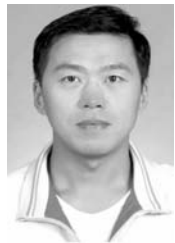
## 参考文献:

- [1] BEMAND D. The james webb space telescope (JWST):hubble's scientific and technological successor [J]. *SPIE*,2003,4850:170-178.
- [2] PHILIP S H, RADACSI D, *et al.*. Fabrication and testing of the ITTT beryllium secondary mirror[J]. *SPIE*, 1997,3134:62-71.
- [3] JAMES L, BELL J, MILUTIN P. Design and analysis of a beryllium three-mirror anastigmat telescope for the japanese advanced meteorological ima-

- ger (JAMI) [J]. *SPIE*, 2004,5658:91-102.
- [4] MARC C, ROGER A, THOMAS B, *et al.*. Use of beryllium for the VLT secondary mirror[J]. *SPIE*, 1996,2857:86-98.
- [5] 郑亲波,胥学荣. 风云一号气象卫星遥感仪器的光学设计[J]. *红外研究*,1990,9(2):91-98.  
ZHENG Q B, XU X R. Optical design of VHRSR for FY-1 meteorological satellite[J]. *Chin. J. Infrared Res.*, 1990,9(2):91-98. (in Chinese)
- [6] 李大耀. 资源一号卫星的红外相机和 CCD 相机[J]. *中国航天*,1999,20(4):27-36.

- LI D Y. Infrared and CCD camera of ZY-1 satellite [J]. *Aerospace China*, 1999, 20(4): 27-36. (in Chinese)
- [7] 葉虎勇, 陈桂林. 地球同步轨道三轴稳定卫星的扫描镜设计及考虑[J]. 红外技术, 2003, 25(6): 1-9.  
YE H Y, CHEN G L. A real-time image processing system based on TMS320C6201 [J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(6): 1-9. (in Chinese)
- [8] 张锐. 空间化反射镜及其支撑系统的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.  
ZHANG R. *Researches on space mirror and supporting system*[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [9] 高明辉, 刘磊, 任建岳. 空间相机反射镜碳化硅材料性能测试[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8): 1170-1174.  
GAO M H, LIU L, REN J Y. Characteristic test of SiC for space camera's mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1170-1174 (in Chinese)
- [10] 宋春涛, 李英才. 空间指向摆镜的轻量化研究[J]. 光子学报, 1998, 27(4): 377-381.  
SONG CH T, LI Y C. Design of space lightweight pointing mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(4): 377-381. (in Chinese)
- [11] 张剑寒, 张宇民. 空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(2): 179-184.  
ZHANG J H, ZHANG Y M. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 179-184. (in Chinese)
- [12] THOMAS B. Selecting mirror materials for high-performance optical systems [J]. *SPIE*, 1900, 1335: 119-126.
- [13] ZHANG X J, ZHANG ZH Y, ZHENG L G, *et al.*. Manufacturing and testing SiC aspherical mirrors in space telescopes[J]. *SPIE*, 2005, 6024: 1-5.
- [14] 张舸, 赵文兴. 轻型反射镜镜体结构参数的分析[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(1): 49-53.  
ZHANG G, ZHAO W X. Analysis on structural parameters of light-weighted mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 49-53. (in Chinese)
- [15] 钟景明, 苏东峰. 光学系统用铍镜的制备[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 1998, 3(4): 297-300.  
ZHONG J M, SU D F. Fabrication of a beryllium mirror used in optical system[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 1998, 3(4): 297-300. (in Chinese)
- [16] 钟景明, 闵学仁. 冲击研磨铍粉及其材料性能[J]. 稀有金属材料与工程, 1999, 28(6): 386-389.  
ZHONG J M, MIN X R. Impact-attributed beryllium powder and its material properties[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 1999, 28(6): 386-389. (in Chinese)
- [17] 孙本双. 铍粉末冶金技术进展[J]. 粉末冶金技术, 1994, 12(2): 126-130.  
SUN B SH. Developments in beryllium P/M technology [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 1994, 12(2): 126-130. (in Chinese)

#### 作者简介:



宋立强(1975—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事空间天文仪器中的反射镜与结构分析方面的研究。E-mail: slqzhy@sina.com

#### 导师简介:

杨世模(1954—),男,北京人,研究员,博士生导师,主要从事空间天文仪器总体结构方面的研究。E-mail: ysm@bao.ac.cn

陈志远(1973—),男,北京人,高级工程师,主要从事空间天文仪器结构设计与研制方面的研究。E-mail: sat@sst.bao.ac.cn