

DOI: 10.13245/j.hust.239150

空间光学大型镜面若干关键力学问题综述

胡海飞¹ 郭鹏¹ 乔冠博^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 回顾了国内外空间光学大型镜面相关领域的发展现状和趋势。结合已经开展的工作, 讨论了在极端约束条件下, 先进空间光机结构所要解决的材料选择、结构优化和超轻量化设计、表面应力调控和预应力加工技术等問題; 指出了超大口径镜面减重、超轻量化镜面面形稳定性、离轴非球面宽动态范围精密面形调节等须进一步研究的方向。

关键词 空间光学; 面形精度; 应力调控; 面形稳定性; 预应力加工; 光学非球面

中图分类号 O439 文献标志码 A 文章编号 1671-4512(2023)01-0042-06

Review on some key mechanical problems for large mirrors in space optics

HU Haifei¹ GUO Peng¹ QIAO Guanbo^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The development status and trend of large mirrors in space optics at home and abroad were reviewed. Combined with the existing works, the problems of material selection, structural optimization and ultra-lightweight design, surface stress regulation and stressed mirror polishing technology for advanced space opto-mechanical structures under extreme constraints were discussed. Further research directions such as weight reduction of ultra-large aperture mirror, shape stability of ultra-light mirror and precision shape adjustment of off-axis aspheric surface with wide dynamic range were pointed out.

Key words space optics; surface figure accuracy; stress control; surface stability; prestress processing; optical aspheric surface

当前, 大国之间的竞争与对抗愈演愈烈, 已经从传统的海陆空域拓展到了太空领域。作为人类视觉感官能力延伸的空间光学系统, 在侦察测绘、导弹预警、态势感知和深空探测等诸多领域有着广泛的应用, 其成像性能的高低基本决定了各国在相关领域的主动权和话语权。其中集光能力和角分辨率是体现空间光学系统性能的两个核心指标。在衍射极限成像条件下, 角分辨率 α 与其通光口径 D 成反比, 集光能力与 D^2 成正比^[1], 因此增大口径和提高角分辨率是提高光学系统总体性能的有效途径。

从总体精度角度来说, 瑞利判据认为: 当经过

光学系统传输的光束波面与参考球面最大偏差(PV) $\leq \lambda/4$ (λ 为光学成像的波长, 一般取 $\lambda=632.8$ nm)时, 系统可以达到衍射极限完善成像^[2], 相应系统波前差的均方根误差(RMS) $\leq \lambda/14$ 。斯特列尔定义了艾里斑^[3]光强与理想光强的比值(SD), 并认为当比值 ≥ 0.8 时, 光学系统是完善的, 对应的均方根误差 $\leq \lambda/14$ ^[4]。这两个判据确定了光学系统的总体精度要求。

光学系统中的光机结构相当于其骨架, 须保持各光学表面、仪器终端的位置和形状^[5], 确保系统满足衍射极限成像精度要求。在制造能力和检测精

收稿日期 2022-01-28.

作者简介 胡海飞(1984-), 男, 副研究员, E-mail: huhf@ciomp.ac.cn.

基金项目 国家自然科学基金资助项目(62175234, 11873007, 11973040).

度不断逼近各自极限的情况下, 镜面在光机结构支撑状态下的姿态和面形精度及稳定性, 已经成为制约先进光电系统性能提升的瓶颈。

现如今, 先进光电装备研制的核心难点之一转变成保证其中主要光学元件的精度。例如, 为实现可见光波段($\lambda=632.8\text{ nm}$)的衍射极限成像, 典型大型镜面在 4 m 口径范围内实现上述 $PV \leq \lambda/4 \approx 158\text{ nm}$ 的要求, 尺寸/精度比值均超过了 10^7 量级 (2.53×10^7), 与射电望远镜(如贵州 500 m 口径球面射电望远镜, FAST) 10^5 量级的尺寸/精度比值相比, 具有突出的全制造链路和多学科集成难度, 也面临更大的研制周期压力^[6]。

超大口径、超轻量化、极高精度、极高效率等特点体现了当前空间光学工程的需求极限, 本文讨论这些极限需求所对应的关键力学问题。

1 空间大型镜面材料选择

过去十年, 我国高分辨率对地观测专项先后发射了十余型高分辨率遥感卫星, 初步形成了全天时、全天候、全球性米级、亚米级分辨率观测能力。然而, 其中绝大多数卫星分布于较低轨道, 轨道周期 1~2 h、热点地区重访时间只能按天计算, 无法满足时敏目标跟踪、抢险救灾、环境监测等应用领域的高时效性需求。其中地球同步轨道(GEO)卫星具有凝视地球的高时间分辨率优势, 但空间分辨能力明显不足, 亟待数量级提升。

欲在 GEO 获得较高分辨率(米级), 即使借助超分辨成像、计算光学等先进技术, 其空间相机的口径大约也需要 10 m 量级^[7]。而空间相机口径的增大, 为其光学性能保证、结构值量控制带来了双重困难, 对此 Nelson 曾有过以下预测^[8]

$$\begin{cases} \delta \propto D^4/t^2; \\ m \propto D^{3.5}, \end{cases}$$

式中: δ 为镜面变形幅值; D 为镜面口径; t 为镜坯厚度, 理想成像条件要求系统波像差 $PV \leq \lambda/4$, 或 RMS 应优于 $\lambda/14$, 对应 δ 在镜面 RMS 值优于 $\lambda/40$, 该指标对于大型镜面而言极难实现; m 为空间相机的质量, 决定发射成本, 大致每减轻 1 kg 可节省发射成本约 2 万美元, 因此须在保证成像性能基础上使空间相机的质量最小化。

目前已有许多科研人员针对中小口径镜体的优化设计开展了研究工作^[9-10]。超大口径镜面(地基 4 m 以上、天基 2 m 以上)的设计由于构型复杂、计算量大、制造约束复杂等原因, 目前主要还是依赖于

经验。

现阶段, 中国 4 m 反射镜和美国 8.4 m 反射镜, 分别代表国内外单镜制造的能力极限^[11-13]。由于我国新一代大型运载火箭包络尺寸为 5 m, 因此高分辨率遥感所需的大型主镜只能采取拼接方案。进一步地, 采用拼接镜面还将带来两大显著优势: 大幅降低自重, 放松对制造条件、运载发射能力的要求; 系列化、型谱化子镜设计可使批量化加工成为可能, 从而显著提高制造精度和效率。

自 Nelson 提出拼接镜面概念起^[8], 人们先后实施了地基 Keck 双子望远镜、天基詹姆斯·韦伯望远镜(James Webb space telescope, JWST)、地基三十米望远镜(thirty meter telescope, TMT)和欧洲极大望远镜(European extremely large telescope, E-ELT)等望远镜计划。我国已建成地基拼接式光纤光谱望远镜(the large sky aera multi-object fiber spectroscopy telescope, LAMOST)^[14-15], 按计划天基 4~10 m 口径望远镜也将步入拼接时代^[16-17]。

图 1 所示为三个著名空间望远镜与拼接望远镜 KECK 的镜面构型对比^[6], 包括已经服役的 0.85 m 斯皮策空间望远镜、2.4 m 的哈勃望远镜(Hubble space telescope, HST)及刚发射不久的 6.5 m JWST。从总体上看, 采用拼接方案建造大型空间望远镜已是大势所趋。

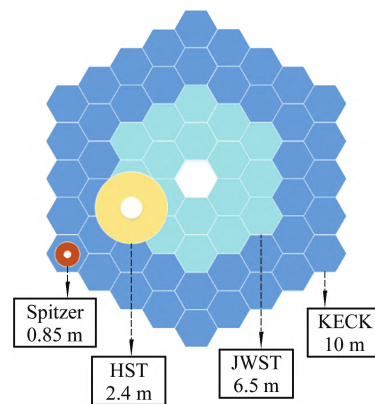


图 1 三个著名空间望远镜与拼接望远镜 KECK 的镜面构型对比

90 年代发射的 HST 使用了玻璃材料, 而刚刚发射的 JWST 则选用性能更优的铍材料, 但其粉末有毒^[18]。考虑到综合力热性能和加工环保性, 当前碳化硅材料(SiC)已成为较有优势的空间大型镜面材料。

受到国外 Herschel 3.5 m 反射镜^[19]的应用启发, 我国实现了 SiC 材料在地基 2 m^[20]和 4 m 超大反射镜^[11]、天基载人航天工程专项和高分专项系列空间

望远镜的成功应用^[21-23]”，表明我国突破了围绕 SiC 光学材料研制空间望远镜的全链路自主可控技术，也证实了 SiC 材料在空间光学镜面应用上的显著优势。美、法、德、中等国家都已投入巨资积极研制大口径 SiC 反射镜，目前 1.5 m 量级的 SiC 反射镜制造技术已趋于成熟。据公开报道，国外尺寸最大的 SiC 反射镜是 3.5 m Herschel 焊接式主镜，但受焊接应力影响，其面形 RMS 只达到微米级精度，无法用于可见光成像。

国内中科院长春光机所、上海硅酸盐所、光电所和哈尔滨工业大学等单位均已掌握米级 SiC 反射镜技术，并用于诸多项目中。笔者参与的若干超大型单体式反射镜均已完成验收^[11,24-25]，面形达到 20 nm RMS。尽管如此，还是遗留了一些问题，如面密度超过 100 kg/m²，为后续装调、快速精密控制带来极大挑战，将其作为空间光学元件使用，还须展开大量的结构轻量化工作。

2 超轻量化结构设计与优化

近年来 SiC 材料在空间光学系统中得到了大量应用^[26-27]。美、法、德等国家在 SiC 镜面材料研制领域起步早、基础好，技术相对先进，相关技术对外严密封锁。我国立足自主创新，取得了较为丰硕的成果，并逐步推动 SiC 反射镜向两大趋势快速发展：一是前述口径大型化、不断突破制造极限；二是结构轻量化水平越来越高、面密度越来越低，越来越适用于航天场景。

SiC 材料强度刚度高、热稳定性好，并具有轻量化结构近净尺寸成形等优势，具有巨大的轻量化设计空间。尽管学术界开展过比较多的关于镜体优化的工作，但目前在实际工程中主要还是依赖于设计经验、具体制造工艺和主动光学技术进行镜体的轻量化设计和制造。

美国喷气动力实验室(jet propulsion laboratory, JPL)已实现面向空间应用的 1.35 m 口径超轻 SiC 镜面研制。镜体面密度低于 15 kg/m²(仅为哈勃太空望远镜主镜的 8%)，加上面形校正系统后的组件面密度约为 25 kg/m²。镜面加工后的面形 PV 值大约为 1.88 μm，经 342 个促动器校正后，面形 RMS 值达到 14 nm^[28]。由于技术先进和用途敏感，因此许多关键信息均未披露。

与此同时，我国在 SiC 镜体轻型化方面取得了一些标志性进展，已实现工程应用的 1~1.5 m 镜体面密度一般都能达到 100 kg/m²的轻量化水平。中

科院光电所研制了面密度 11 kg/m²的 Φ500 mm 超轻量化 SiC 镜坯，后续镜面制造进展未见报道^[29]。笔者参与研制了面密度 10 kg/m² 级的 Φ200 mm 和 Φ500 mm 的超轻量化 SiC 反射镜^[30]，最近郭疆团队^[31]设计了一面口径为 2m、面密度为 34 kg/m² 的 SiC 反射镜，将传统大型空间镜面设计水平推向了一个新高度。

总体上这类轻薄型镜面成形后面形精度较低且不稳定，加工难度较大，制造效率不高。

3 面形精度保持及稳定性问题分析

空间光学望远镜一般运行在 500 km 以上轨道，镜面入轨后将由于重力释放而产生面形变化。为保持地面检测精度和空间使用精度的一致性，1 m 以上大型镜面均应将其变形控制到均方根误差在 λ/40 以内的水平。如何获取失重环境下的镜面面形尤为重要，可采用以下两种方法：一是多姿态面形检测法，检测反射镜在不同姿态下的面形变化，再利用插值或平均算法预测反射镜的无重力工况下的面形数据^[22,32]；二是基于多点浮动支撑的原位检测，通过杠杆衡力结构、液压或气动支撑，在多支点施加支撑力，实现模拟失重环境下的面形预测^[6]。

除了重力释放变形，对大口径轻薄型镜面而言，光学制造过程还会额外引起镜面的大幅变形，其幅值容易超过材料去除量，使得光学检测面形真伪难辨，制造过程陷入盲区后较难收敛。

这种镜面变形含有显著的外力变形和内力变形。对于外力变形，可通过优化支撑结构将其妥善解决^[10]。在内力变形方面，人们已达成共识：在相同边界条件下，加工后的镜面变形与亚表面残余应力有关^[33-34]。虽然对 SiC 材料残余应力已有一些测试工作^[35]，但对其引发的镜面变形问题研究较少，且未深入研究镜面变形、残余应力和制造、装调工艺之间的联系。

为应对残余应力引起镜面复杂变形的问题，研究人员采取的策略主要有：基于面形检测结果，不断缩小磨料粒径，实现应力释放和面形收敛；使用低应力抛光技术(如磁流变加工技术、离子束修形技术等)完成镜面的最终修形。这些策略用于轻薄型 SiC 镜面制造时，存在以下不足。

a. 检测面形真伪难辨，容易误导加工。本团队在参与 900 mm 口径厚 12.5 mm 的玻璃研抛中，发现了 22 μm 的残余应力变形^[36]，而 SiC 材料去除效率不到玻璃的 1/4、残余应力可能比玻璃大 1~2

个数量级, 造成的镜面变形更不容忽视. 一方面, 直接采信检测面形将误导加工、延长制造周期; 另一方面, 采用效率较低的低应力抛光技术难以解决轻薄镜面的大变形问题.

b. 缺少对制造和装调残余应力的调控手段. 现有制造质量评价方法只以面形收敛为目标, 忽略了对镜面应力的调控, 存在安全、质量和效率隐患. 如, SiC 材料研磨残余应力达 1.5 GPa^[37-38], 抛光残余应力达 600 MPa^[34], 亚表面将由此萌生微裂纹, 导致薄镜面碎裂; 又如, 文献[39]中就报道了在镜面制造接近完成的阶段, 由于光机结构黏结应力导致镜面面形 RMS 由 0.033 λ 退化到 0.127 λ 的质量事故. 最近还发现了由于表面工艺残余应力引起的轻薄型 SiC 镜面的低、中阶面形误差耦合现象, 某轻薄型 SiC 镜面的制造工艺残余应力变形如图 2 所示^[40]. 制造工艺残余应力主要造成镜面的曲率改变, 即产生离焦误差, 如图 2(a)所示. 从宏观变形扣除离焦分量后, 镜面仍然遗留了如图 2(b)所示最大偏差 1.8 λ 量级的中频变形, 其产生机理尚不明确.

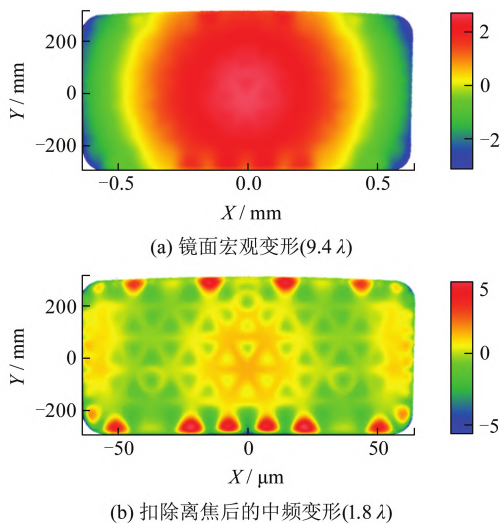


图 2 某轻薄型 SiC 镜面的制造工艺残余应力变形

为深入理解制造工艺所致镜面多尺度变形机理, 并指导制造质量和效率提升, 笔者认为可基于检测面形重构、应力调控思想, 建立驱动轻薄型 SiC 镜面制造装调工艺升级的协同评价新方法, 并完成可用性验证, 为空间光学系统提供高质量核心元件.

4 制造效率提升途径

除了面形精度及其稳定性, 制造效率太低是空间光学系统面临的另一大瓶颈问题.

除了前述大型拼接式望远镜的动辄数十至数百片离轴非球面的制造需求, 在低轨星座中也需要为数众多的非球面元件, 如美国太空发展局下一代太空体系中, 传输层和跟踪层都需要数百套非球面光学系统用于激光通信和导弹预警. 这些系统中, 为了同时实现大视场和高分辨需求, 并考虑到快速机动、批量制造、成本控制和弹性部署等因素, 超轻量化光学非球面必将大显身手.

目前, 加工这类非球面的传统技术路线还存在不确定性大、费用昂贵和效率低下等问题. 作为一种提质增效的镜面加工方式, 预应力加工技术最早由美国加州大学的 Nelson 提出^[41-42], 并用该方法加工了口径 360 mm 的离轴抛物面样镜, 经 10 m 级 Keck 望远镜建造趋于成熟, 目前也在美国三十米望远镜 TMT 及欧洲极大望远镜 E-ELT 项目中得到了充分应用.

预应力镜面加工的主要原理是: 首先, 根据板壳力学理论, 利用加载机构在镜坯边缘加载一定形式的横向剪力和弯矩(外载), 使镜面产生弹性变形位移场, 该位移场恰好与所需非球面及其最接近球面面形差异的幅值相同、方向相反; 然后, 在保持加载的情况下采用经典球面研磨抛光工艺将镜面加工为最接近球面; 最后, 在球面加工收敛后卸去外载, 理论上得到的镜面将反弹为所需的非球面面形. 采用球面加工工艺, 可以使用曲率半径贴合较好的大口径磨盘, 实现快速加工, 还可避免子口径加工(如小磨头技术、磁流变抛光技术和离子束抛光等)带来的镜面中高频面形误差.

国内研究团队也于 20 世纪初开始了相关的研究工作, 2009 年中科院光电所孙天祥等对基于可控应力变形理论的非球面制造技术展开了研究^[43], 针对口径 314 mm 同轴抛物面开展预应力抛光研究, 在各个加载杆上施加相同的力, 获得了预应力抛光试验初步结果. 2012 年中科院天光所李新南等^[44]提出加工离轴非球面的预应力环抛方法, 计算了镜面离焦、像散和彗差, 在口径 330 mm、非球面度 16 μm 离轴镜面上完成了加载力与偏离量重复性实验; 随后姜自波等^[45]通过预应力细磨实验展示了在接近条件下, 实现加工时间从 40 h 到 6 h 的效率提升.

前述低轨预警系统一般采用小 F 数离轴非球面镜, 其非球面度增加 1 个数量级以上, 须对现行方法体系补充镜面高阶误差理论, 并从系统工程角度提出对加载、加工、装调系统的误差分配要求; 此外, 加载结构的调节行程/精度比值, 也相应提高

一个数量级以上, 将制约其加载结构的动态范围和结构可实现性。

欲对小 F 数镜面进行快速低成本预应力加工, 须解决设计-制造-集成-测试全链路中较为突出的高陡度/大偏离量离轴非球面形误差理论分析、高质量轻量化镜面预应力加载技术和非可逆集成工艺适应性等关键问题。

本团队通过理论推导、有限元仿真和相关概念设计, 从原理上分析了采用预应力抛光法加工这类大非球面度镜面的可行性^[46-47], 后续工作有待进一步开展。

参 考 文 献

- [1] CHENG J. The principles of astronomical telescopes design[M]. New York: Springer, 2009.
- [2] DOYLE K, GENBERG V, MICHELS G. Integrated optomechanical analysis[M]. Bellingham: SPIE Press, 2002: 35-62.
- [3] RIVOLTA C. Airy disk diffraction pattern: comparison of some values of F/NO and obscuration ratio[J]. Applied Optics, 1986, 25(14): 2404-2408.
- [4] WANG Z, WANG P. Rayleigh criterion and K strehl criterion[J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(7): 621-625.
- [5] AHMAD A. Optomechanical engineering handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [6] 胡海飞. 大型镜面原位光学加工-检测多点复合支撑系统研究[D]. 长春: 吉林大学图书馆, 2020.
- [7] EARLY J, HYDE R, BARON R. Twenty meter space telescope based on diffractive Fresnel lens[C]// Proc of SPIE. Bellingham: SPIE Press, 2004: 148-156.
- [8] NELSON J. Segmented mirror design for a 10-meter telescope[J]. Instrumentation in Astronomy, 1979, 172: 31-38.
- [9] 胡海飞, 关英俊, 赵思宏, 等. 大口径反射镜分析驱动设计与优化[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(5): 990-994.
- [10] 胡瑞. 基于拓扑优化的空间反射镜与柔性支撑结构设计方法[D]. 大连: 大连理工大学图书馆, 2017.
- [11] HU H, LUO X, LIU Z, et al. Designing a hydraulic support system for large monolithic mirror's precise in-situ testing-polishing iteration[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3746-3760.
- [12] ZHAO H, LIX, FAN B, et al. Deformation verification and surface improvement of active stressed lap for 4 m-class primary mirror fabrication[J]. Appl Optics, 2015, 54(10): 2658-2664.
- [13] MARTIN H, ALLENA R, BURGE J, et al. Production of 8.4 m segments for the giant magellan telescope [C]// Proc of SPIE. Bellingham: SPIE Press, 2012: 84502D.
- [14] LI X, JIANG Z, GONG X, et al. Stressed mirror annular polishing for scale-down TMT primary segments [C]// Proc of SPIE. Bellingham: SPIE Press, 2016: 99120A.
- [15] SU D, LIANG M, YUAN X, et al. A suggested 12-m telescope optical system configuration for China[J]. Mon Not R Astron Soc, 2016, 460(5): 2286-2295.
- [16] 张学军, 樊延超, 鲍赫, 等. 超大口径空间光学遥感器的发展和应用[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2613-2626.
- [17] 李果, 孔祥皓. 静止轨道高分辨率光学成像卫星发展概况[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(4): 55-63.
- [18] ZHANG G, CUI C, DONG B, et al. Fabricating of $\Phi 4$ m CIOMP-SiC mirror blank[C]// Proc of SPIE. Bellingham: SPIE Press, 2019: 108370I.
- [19] EMMANUEL S, TOULEMONT F, MICHEL D, et al. A $\Phi 3.5$ m SiC telescope for Herschel mission[C]// Proc of SPIE. Bellingham: SPIE Press, 2003, 4850: 606-618.
- [20] LI L, LIU Z, XUE D, et al. Rapid fabrication of a lightweight 2 m reaction-bonded SiC aspherical mirror[J]. Results in Physics, 2018, 10: 903-912.
- [21] 宣明, 王家骥. 长春光机所航天光学遥感器研制基地建设进展[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 1-16.
- [22] 李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2485-2490.
- [23] 郭疆, 朱磊, 赵继, 等. 大口径空间反射镜大容差支撑结构设计与优化[J]. 光学精密工程, 2019, 27(5): 1138-1147.
- [24] HUANG Z, LIU G, LIU X, et al. Manufacture of large-scale lightweight SiC mirror for space[C]// Proc of SPIE. Bellingham: SPIE Press, 2012: 83351R.
- [25] LAN B, WU X, LI J, et al. Influence of axial-force errors on the deformation of the 4 m lightweight mirror and its correction[J]. Appl Optics, 2017, 56(3): 611-619.
- [26] KANEDA H, NAITOH M, IMAI T, et al. Cryogenic optical testing of an 800 mm lightweight C/SiC composite mirror mounted on a C/SiC optical bench[J]. Appl Optics, 2010, 49(20): 3941-3948.
- [27] BOUGOIN M, DENY P. The SiC technology is ready for the next generation of extremely large telescopes[C]// Proc of SPIE. Bellingham: SPIE Press, 2004, 5494: 9-18.
- [28] STEEVES J, REDDING D, WALLACE J, et al. Ac-

- tive mirrors for future space telescopes[C]// Proc of SPIE. Bellingham: SPIE Press, 2018, 10706: 1070615.
- [29] 张媛媛, 敬畏, 程云涛, 等. $\Phi 500\text{mmSiC}$ 超轻量化反射镜的设计与有限元分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8): 1718-1724.
- [30] 董斌超, 张舸. 超轻量化SiC反射镜的制备及性能[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2185-2191.
- [31] WANG H, GUO J, SHAO M, et al. Optimization design of an ultralight large-aperture space mirror[J]. Applied Optics, 2021, 60(35): 10878.
- [32] BLOEMHOF E, LAM J, FERIA V, et al, Extracting the zero-gravity surface figure of a mirror through multiple clockings in a flightlike hexapod mount[J]. Applied Optics, 2009, 48(21): 4239-4245.
- [33] JOHNSON J, PARKS R, BURGE J. Surface stresses of mixed-mode grinding materials on borosilicate glass [J]. Appl Optics, 2012, 51(18): 4151-4156.
- [34] YANG Y, ZHANG J, FU C, et al. Deposition of thick Si coating with low residual stress on SiC ceramics by fabricating multilayer with compressive/tensile stress layer-pairs[J]. Materials and Design, 2016, 107: 1-6.
- [35] GROTH B, LANGAN S, HABER R, et al. Relating residual stresses to machining and finishing in silicon carbide[J]. Ceramics International, 2016, 42: 799-807.
- [36] HU H, QI E, COLE G, et al. Research on sub-surface damage and its stress deformation in the process of large aperture and high diameter-to-thickness ratio TMT M3MP[C]// Proc of SPIE. [s.n.], 2016: 96820A.
- [37] WU H, ROBERTS S. Residual stress and subsurface damage in machined alumina and alumina/silicon carbide nanocomposite ceramics[J]. Acta Materialia, 2001, 49: 507-517.
- [38] GUO S, LIMPICHAIPANIT A, TODD R. High resolution optical microprobe investigation of surface grinding stresses in Al_2O_3 and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ nanocomposites[J]. J Eur Ceram Soc, 2011, 31: 97-109.
- [39] 董得义, 李志来, 李锐钢, 等. 胶粘剂固化对反射镜面形影响的仿真与试验[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2698-2707.
- [40] QIAO G, HU H, ZHANG X, et al. Stress-induced deformation of the coating on large lightweight freeform optics[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 4755-4769.
- [41] LUBLINER J, NELSON J. Stressed mirror polishing 1: a technique for producing nonaxisymmetric mirrors [J]. Applied Optics, 1980, 19(14): 2332-2340.
- [42] NELSON J, GABOR G, HUNT L, et al. Stressed mirror polishing.2: fabrication of an off-axis section of a paraboloid[J]. Applied Optics, 1980, 19(14): 2341-2352.
- [43] 孙天祥. 基于可控应力变形理论的非球面制造技术基础研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2009.
- [44] 李新南, 章海鹰, 崔向群, 等. 大口径离轴非球面镜预应力环抛方法研究[J]. 天文学报, 2012, 53(2): 161-170.
- [45] 姜自波, 陈哲, 刘星, 等. $\Phi 380\text{mm}$ 薄镜面预应力研磨及检测研究[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 160-167.
- [46] YI L, ZHANG X, HU H, et al. Comprehensive study of the rapid stressed mirror polishing method for off-axis aspheric SiC thin-plate mirrors[J]. Optics Express, 2020, 28(22): 32802-32818.
- [47] 伊力奇. 离轴非球面碳化硅薄板及轻量化反射镜预应力抛光方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.