



DOI: 10.12086/oe.2020.200088

大尺寸拼接式碳化硅反射镜的研制及环境模拟试验

刘岩*, 张辉, 刘雷敏, 杨晓, 黄健, 刘学建, 陈忠明, 黄政仁

中国科学院上海硅酸盐研究所结构陶瓷与复合材料工程中心, 上海 200050

摘要: 随着空间技术的快速发展, 对大尺寸空间反射镜部件的需求愈发强烈。本文从材料和制备技术角度分析了大尺寸碳化硅反射镜的发展趋势, 并以 $\Phi 1.0\text{ m}$ 口径常压烧结碳化硅拼接式技术验证镜研制过程为例, 对拼接式反射镜的分块镜设计制备、连接、光学加工等过程进行了探讨。此外, 结合实际的工程化应用需求, 对 1.0 m 口径碳化硅拼接式技术验证镜进行了包括热真空、振动和抗辐照等在内的环境模拟试验。试验结果表明: 通过合理的制备技术, $\Phi 1.0\text{ m}$ 口径的碳化硅拼接式技术验证镜光学加工后面形 RMS 达到了 0.038λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), 经历热真空和振动的环境模拟考核后, 其面形 RMS 分别为 0.037λ 和 0.036λ ; 此外, 拼接式反射镜经过 ^{60}Co γ 射线辐照测试后, 反射率指标基本保持不变, 显示了良好的工程应用前景。

关键词: 大尺寸碳化硅反射镜; 拼接; 面形; 环境模拟试验

中图分类号: TH74; TQ174

文献标志码: A

引用格式: 刘岩, 张辉, 刘雷敏, 等. 大尺寸拼接式碳化硅反射镜的研制及环境模拟试验[J]. 光电工程, 2020, 47(8): 200088

Preparation and environmental simulation tests of large-size silicon carbide brazed reflection mirrors

Liu Yan*, Zhang Hui, Liu Leimin, Yang Xiao, Huang Jian, Liu Xuejian, Chen Zhongming, Huang Zhengren

Structural Ceramic and Composite Engineering Center, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Abstract: With the space technologies progress rapidly, demand of large-size mirrors is intensively growing. In this paper, the developing trend of large-size space mirrors was discussed from the angles of material and fabrication technology. Taking 1.0 m aperture technical validation brazed mirror as an example, the design and fabrication of segments, joining and optic machining were analyzed. In addition, the 1.0 m aperture technical validation brazed mirror was performed environmental tests including thermal-vacuum test, vibration test and anti-radiation test in order to evaluate its engineering applicability. The experimental results show that the surface figure of the 1.0 m aperture technical validation brazed mirror changed from 0.038λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) to 0.037λ and 0.036λ after thermo-vacuum test and vibration test. Additionally, reflectivity of the brazed mirror basically kept stable after ^{60}Co γ -ray radiation test, indicating a brilliant application prospect.

Keywords: large-size silicon carbide space mirror; joining; surface figure; environmental simulation tests

Citation: Liu Y, Zhang H, Liu L M, et al. Preparation and environmental simulation tests of large-size silicon carbide brazed reflection mirrors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 200088

收稿日期: 2020-01-09; 收到修改稿日期: 2020-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51972320)

作者简介: 刘岩(1975-), 男, 博士, 研究员, 主要从事碳化硅陶瓷先进连接技术的研究。E-mail: stony2000@mail.sic.ac.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

1 引言

空间遥感系统可以广泛应用于深空探测以及军事侦查、森林防火、国土资源普查、天气预报等地观测领域,具有效率高、实时的特点,因此受到世界各国的广泛重视。反射镜作为空间遥感系统的核心部件之一,需要在空间环境下具备良好的面形稳定性,其核心技术涉及到材料体系的选择、反射镜的设计制备、光学加工等多领域。近年来,随着遥感技术的快速发展,空间遥感系统的分辨率指标逐渐由米级进入亚米级、甚至更低的分米级,反射镜随之呈现出如下变化趋势:1) 主镜口径变大,随着分辨率需求的提升,反射镜光学设计的口径已经跨越到 4 m 量级;2) 材料体系由微晶玻璃、低膨胀玻璃向具有更高比刚度和热学性能的碳化硅材料发展,以迎合大尺寸反射镜带来的高减重需求;3) 反射镜的制造技术正逐渐由单体成型技术向可以制造更大尺寸部件的拼接成型技术发展。因此,大尺寸的碳化硅反射镜正成为各国大力发展的空间核心光学部件。

目前,国内外在大口径空间反射镜研制方面都投入了大量的资源,一些项目已经进入工程应用阶段。欧空局的 Herschel 太空红外望远镜采用了 3.5 m 口径,由 12 块分块镜拼接成型的碳化硅主镜,主镜全重只有约 300 kg,面密度为 25 kg/m²,Herschel 太空望远镜工作在远红外波段,于 2009 年发射升空,是目前已见报道中实现空间应用的最大口径碳化硅光学部件^[1-2]。此外,美国 NASA、欧空局和加拿大空间局合作研制,用于替代 Hubble 太空望远镜的下一代空间望远镜 JWST(James Webb Space Telescope)采用空间展开式结构,主镜展开后尺寸达到了 6.5 m,由 18 块对角线长度达到 1.32 m 的金属镀膜组成,全镜重约 360 kg,面密度 35 kg/m²,该项目由于研制难度太大,原定于 2014 年的发射计划推迟到了 2021 年^[3-4]。由日本主导研制的 SPICA(the SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics)项目的主镜尺寸同样达到了 3.5 m 量级,该项目计划采用短纤维增强碳化硅材料作为反射镜的材料,已经研制出了 800 mm 的样件^[5],未来的大尺寸主镜的制造方式还没有文献报道。国内大尺寸空间反射镜的发展也非常迅速,以中国科学院上海硅酸盐所(简称上硅所)^[6]、中国科学院长春光学与精密机械物理研究所(简称长光所)^[7]、中国科学院光电技术研究所(简称成都光电所)^[8]等研究机构推出了采用不同技术路线制备的大尺寸空间反射镜系统,其中上硅所采

用常压烧结碳化硅分块镜钎焊技术路线来研制大尺寸碳化硅反射镜;长光所采用反应烧结技术路线研制大尺寸碳化硅反射镜;而成都光电所采用 ULE 玻璃焊接技术路线。长光所已经报道了世界上单体尺寸最大的 4.03 m 口径碳化硅反射镜完成制备和光学检测^[9],显示了我国在大口径反射镜研制领域开始领跑世界。

中国科学院上海硅酸盐研究所多年来致力于碳化硅空间反射镜的研制工作,研制产品包含了单体反射镜和拼接式反射镜,本文从空间反射镜材料优选,制备工艺、空间反射镜的工程化应用测试等角度对拼接式大尺寸碳化硅反射镜的研制进行探讨,希望为大尺寸碳化硅空间反射镜的最终工程应用奠定基础。

2 大尺寸碳化硅空间反射镜的制备技术

2.1 大尺寸空间反射镜对材料的需求

空间反射镜系统长期工作在太空,需要面对真空、宇宙射线辐照、极冷极热等服役环境;另外,反射镜系统还要经历发射振动、地面存储温度波动等情况。在上述情况下光学系统的面形指标需要保持稳定,同时还有考虑到载荷重量问题,因此空间反射镜系统对材料的选择极为苛刻。对于大尺寸的空间反射镜系统,其制备材料应满足以下条件:1) 良好的比刚度(E/ρ),高的弹性模量 E 和低的密度 ρ 意味着在最小的重量条件下获得最佳的抗变形能力,对于追求极端减重率和空间稳定性的大口径空间反射镜而言,这是一个非常重要的性能;2) 优异的热学性能(λ/α),高的热导率 λ 和低的热膨胀系数 α 意味着空间反射镜可以最大限度地抵抗热变形对镜面稳定性的影响;3) 优良的可加工性能,良好的加工性能可以保证反射镜在经历机械和光学加工后,其减重率和面形精度可以满足空间使用要求。对于工作在可见光波段的反射镜系统,多相材料制备的镜面必须采用单相材料进行改性和再加工,才能够达到理想的面形要求;4) 均匀一致的材料性能,由于大尺寸空间反射镜镜面口径一般超过 2 m 以上,因此对材料的各向同性要求较高,特别是密度、热膨胀系数等关键指标的一致性更为重要,否则可能导致制备或者光学加工过程出现缺陷;5) 拼接材料要能够满足空间环境的服役要求,对于采用拼接结构的大口径反射镜系统,其拼接材料需要考虑空间服役环境的要求,特别是辐照性能的要求。

目前常用的反射镜制备材料主要有微晶玻璃

Zerodur、ULE 玻璃、金属铍(Be)、反应烧结碳化硅(reaction-bonding silicon carbide, RB-SiC)、常压烧结碳化硅(sintered silicon carbide, SSiC)、 C_f/SiC 复合材料等, 各种材料的常用性能指标如表 1 所示。以德国肖特公司 Zerodur 微晶玻璃和美国康宁公司的 ULE 玻璃为代表的空间光学玻璃材料由于其比刚度远远小于碳化硅材料和金属铍, 因此在追求超高减重率要求的大口径空间反射镜的候选材料中不占优势, 但是通过改变传统的减重工艺, 以及配合主动光学技术可以对其材料性能的劣势予以弥补。碳化硅陶瓷和金属铍作为空间光学材料, 其比刚度 E/ρ 和热学稳定性 λ/α 要明显强于玻璃材料, 因此通过加工技术可以实现更高的减重率, Herschel 系统和 JWST 系统主镜的面密度分别达到了 25 kg/m^2 和 35 kg/m^2 , 证明了其良好的应用潜力, 从目前国内外开展的大口径空间系统反射镜的研制计划中可以发现, 这两种材料仍然是主流候选材料, 但铍镜的加工需要特别的防护技术, 只有美国 JWST 项目中见到了相关报道, 更多的空间计划中仍然以碳化硅材料为主。因此, 可以预见在未来几年中, 碳化硅材料依旧是超大口径空间反射镜的主选材料。

目前可以用于大口径空间反射镜系统的碳化硅材料主要包括常压烧结碳化硅(SSiC)、反应结合碳化硅(RB-SiC)和短碳纤维增强的碳化硅(C_f/SiC), 三种采用不同制备工艺的碳化硅材料都可以应用在大尺寸碳化硅空间反射镜的研制中。三种材料各有优缺点, 其中常压烧结碳化硅材料采用亚微米级的原料, 烧结后的镜面为晶粒尺寸非常细小的单相碳化硅材料, 非常适合于光学加工, 光学加工的极限表面粗糙度可以到达 1 nm 左右, 但常压烧结碳化硅致密化过程中收缩率高, 必须采用精确的烧结控制技术来实现其尺寸一致

性; 反应烧结碳化硅采用高温渗硅工艺, 致密化过程几乎无收缩, 尺寸精度控制相对容易, 但反应烧结碳化硅镜面为双相材料(SiC 和残余 Si), 两种材料硬度差异较大, 无法直接加工出满足可见光波段使用要求的表面粗糙度指标, 必须采用单相材料进行表面改性, 然后再加工, 同时其镜体的缺陷性容易被渗硅掩盖, 导致后面加工过程中暴露出来, 该问题必须通过严格的工艺控制才能解决; 而纤维增强的碳化硅材料比较容易实现坯体成型, 但其镜面处存在纤维束, 无法进行光学加工, 必须采用适当的光学层进行改性, 覆盖住纤维层, 然后才能进行光学加工。中科院上海硅酸盐所长期致力于常压烧结碳化硅反射镜材料的研制, 制备的碳化硅材料的性能如表 1 所示。常压烧结碳化硅材料的比刚度和热学性能都非常优异, 通过严格的工艺技术控制, 可以保证材料指标的均匀一致性, 非常适合于大尺寸碳化硅空间反射镜的制造。

2.2 拼接成型大尺寸碳化硅空间反射镜的制备

随着反射镜口径的增加, 其单体尺寸已经达到或超过成型和烧结设备的极限尺寸, 因此采用拼接工艺制备大尺寸碳化硅反射镜是一条可行的技术路线。反应烧结碳化硅和常压烧结碳化硅都可以采用拼接技术路线进行大尺寸碳化硅反射镜的研制, 对于反应烧结碳化硅而言, 其拼接阶段是在渗硅前的素坯阶段, 其焊接面的加工精度要求相对较低, 拼接后的多块素坯在高温渗硅过程中一步实现了焊缝连接和镜体的致密化, 其焊缝的微观结构接近母材成分, 因此焊接应力理论上较小, 典型的如长光所的制备技术路线^[13]。而上硅所采用的拼接技术路线则是在碳化硅已经实现致密化以后, 通过钎焊技术实现大尺寸化, 焊接过程对

表 1 大尺寸空间反射镜材料性能

Table 1 Properties of material to fabricate large-size space mirrors

材料性能	Zerodur	ULE	Be	SSiC* ^{@siccas}	RB-SiC ^[10]	C_f/SiC ^[11]
密度 $\rho/(\text{g/cm}^3)$	2.52	2.2	1.84	3.11	3.03	2.65
弹性模量 E/GPa	92.9	67	303	404	360	249
比刚度 E/ρ	36.9	30.5	164.7	129.9	118.8	94
热导率 $\lambda/(\text{W/m}\cdot\text{K})$	1.64	1.3	216	172	130	120
热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6}/\text{K})$	0.05	0.03	11.5	2.34	2.5	2.1
热学稳定性 λ/α	32.8	43.3	18.8	73.5	52	57.1
泊松比	0.24	0.17	0.12	0.17	0.18	
各相异性			<5%	<5%		

*中国科学院上海硅酸盐研究所研制的常压烧结碳化硅

焊接面的加工精度要求较高, 异种焊接材料在焊接界面的应力可以通过焊接结构设计和去应力技术予以解决, 典型技术路线如图 1 所示, 主要包括分块镜的设计制备、分块镜的精密加工、分块镜的精密组合和连接以及拼接镜的光学加工和检测等。

2.2.1 拼接式碳化硅反射镜中分块镜的设计制备和精密加工

分块镜的设计要在满足大尺寸碳化硅反射镜整体结构的基础上, 对其结构形式进行适合连接工艺的专门设计, 重点关注焊接界面的可加工性、连接强度、组合方式等因素。一般圆形结构的大尺寸碳化硅空间反射镜的分块镜常采用扇形的分块子镜结构, 如欧空局的 Herschel 太空望远镜的主镜就是采用的 12 片扇形分块镜的结构。中国科学院上海硅酸盐研究所研制的 1.0 m 口径碳化硅拼接技术验证镜同样采用了扇形分块镜的结构设计, 考虑到离轴光学系统的设计需求, 此技术验证镜采用了 6 块扇形分块镜与一块圆形分块镜组合的设计结构, 镜面为无通光口的球面结构, 是拼接式碳化硅反射镜中研制难度较大的一种类型, 对于各分块镜的加工精度和组合精度要求较高。非对称结构分块镜的制备需要精密控制其烧结变形以保持尺寸一致性, 通过严格的致密化尺寸控制技术, 6 块分块镜的内径、外径、高度等尺寸精度可以控制在 $\pm 2.5\%$ 以内, 分块镜尺寸一致性的精确控制可以保障后继拼接精度的稳定性。为完成各分块镜高精度组合和连接, 需要对各分块镜的焊接面和基准进行高精度的加工,

分块镜的精密加工需要设备、刀具、人员的密切配合, 通过严格检测分块镜部件才能应用于大尺寸碳化硅空间反射镜的组合和连接中。1.0 m 碳化硅拼接技术验证镜的扇形分块镜经过加工后的照片如图 2 所示。

2.2.2 拼接成型碳化硅反射镜的连接制备和光学加工

碳化硅陶瓷的连接技术是大尺寸碳化硅空间反射镜制备的关键技术, 大尺寸碳化硅反射镜对连接材料体系的要求主要体现在以下几点: 1) 连接材料体系能够对陶瓷润湿或者扩散, 进而形成可靠的、高强度的化学连接; 2) 连接界面的应力状态要可控, 通过合理的焊料体系优选、连接结构的设计或者去应力处理技术, 保证焊接界面的应力状态不对光学加工后的面形稳定性造成影响; 3) 连接材料体系的形态应具有工程适用性, 可以通过涂覆、铺展等手段布置在连接界面; 4) 连接温度不宜过高, 过高的连接温度会对碳化硅材料性能产生影响。连接性能除了常规的试验检测方式, 最重要的是需要通过拼接反射镜光学加工后的面形指标和后续的环境模拟试验予以验证。完成连接制备的 1.0 m 口径碳化硅拼接技术验证镜镜坯如图 3 所示, 焊缝部位连接材料填充饱满, 整体结构完整无缺陷。我们对 1.0 m 口径的碳化硅拼接技术验证镜进行光学加工, 与整体式碳化硅反射镜类似, 拼接式碳化硅反射镜的刚度完全满足面形加工要求, 焊缝部位的存在没有影响到光学加工后的面形, 经过光学加工后的反射镜面形 RMS 达到了 0.038λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$, 后面相同), 光学加工后的拼接技术验证镜照片及检测结果如图 4 所示。



图 1 大尺寸碳化硅拼接式反射镜的制备技术路线

Fig. 1 Technical roadmap of large-size brazed mirrors



图 2 经过机械加工的扇形碳化硅分块镜。(a) 镜面; (b) 背面

Fig. 2 Fan-shaped segments for the brazed mirror after machining. (a) Mirror surface; (b) Mirror back



图3 1.0 m口径碳化硅拼接技术验证镜照片。(a) 镜面; (b) 背面

Fig. 3 1.0 m aperture SiC technical validation brazed mirror. (a) Mirror surface; (b) Mirror back

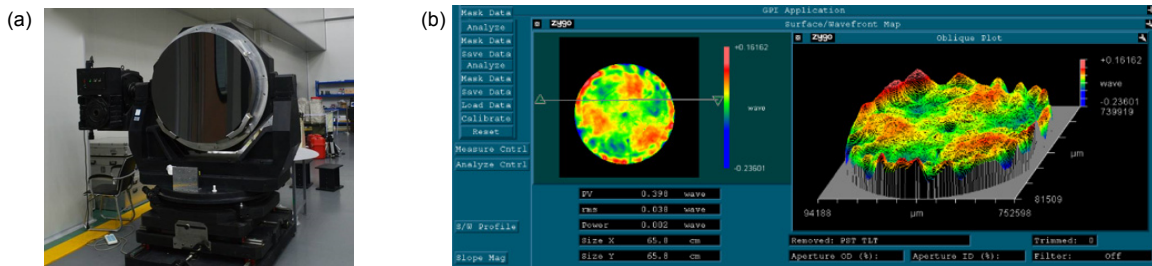


图4 1.0 m口径碳化硅拼接技术验证镜光学加工后照片及检测结果。(a) 光学加工后照片; (b) 面形

Fig. 4 Photo of 1.0 m aperture brazed mirror after optical machining and surface figure. (a) Photo; (b) Surface figure

3 拼接成型碳化硅反射镜的环境模拟试验

基于空间服役条件的环境模拟试验是拼接成型碳化硅反射镜走向工程应用的必要条件,在前期 1.0 m 口径拼接技术验证镜的基础上,我们开展了包括热真空、振动、辐照在内的多种环境模拟测试,检验拼接式碳化硅反射镜的工程应用可靠性。

3.1 热真空模拟试验

空间反射镜的服役环境为真空条件,并且需要面对冷热交替的情况,因此通过地面的热真空测试可以模拟其空间的实际应用环境,检验反射镜面形的稳定性。将 1.0 m 口径碳化硅拼接技术验证镜置于真空罐体内,并且进行温度的交替变化,完成试验后,镜子在与原始测试条件相同的温度和湿度条件下进行面形测试,考核试验前后的面形变化情况,表 2 给出了热真空的测试条件。通过对比可以发现经历热真空试验

后,拼接技术验证镜的面形 RMS 为 0.037λ ,与原始面形 RMS 0.038λ 相比较,变化非常微小,如图 5 所示。试验结果证明 1.0 m 口径的碳化硅拼接技术验证镜的连接材料和镜体材料和热学匹配性良好,经历真空和温度变化条件后,面形基本保持不变,为后继更大尺寸碳化硅拼接镜的研制提供了可靠的试验支撑。

3.2 振动模拟试验

空间反射镜系统需要面对运输以及火箭发射时产生的振动条件,其光学面形应该保持不变,与整体式碳化硅反射镜比较,拼接式碳化硅反射镜存在连接层结构,因此其力学性能(连接强度和刚度)的考核必须通过拼接式反射镜的振动测试进行。在完成 1.0 m 口径拼接技术验证镜的热真空试验后,我们进行了包括正弦振动和随机振动在内的振动试验考核,考核拼接技术验证镜在振动前后的面形 RMS 的变化情况,面形测试的温度和湿度条件恒定,振动后的镜子要在恒温恒湿条件下静置 24 h 后再进行面形测试。图 6 给出了

表 2 1.0 m 口径碳化硅拼接技术验证镜的热真空试验条件

Table 2 Testing condition of thermal-vacuum experiment for 1.0 m aperture brazed mirror

	真空度/Pa	温度范围/(°C)	升温速率/(°C/min)	保温时间/h	循环次数
设定值	10^{-3}	15-25	2	3	5

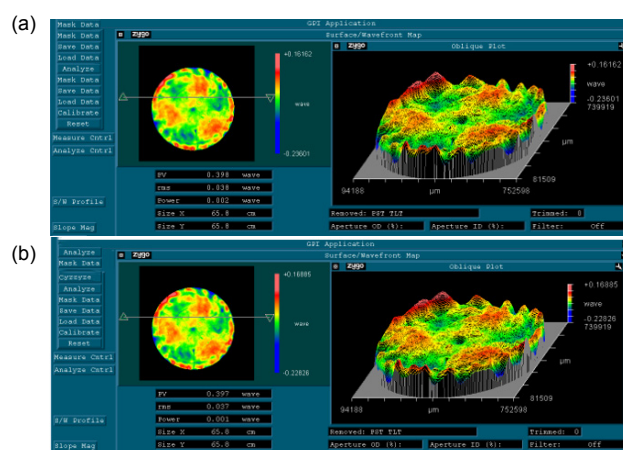


图 5 1.0 m 口径碳化硅拼接技术验证镜热真空试验后面形变化。(a) 测试前; (b) 测试后
Fig. 5 The change of surface figure after thermal-vacuum test for the 1.0 m aperture brazed mirror. (a) Before test; (b) After test

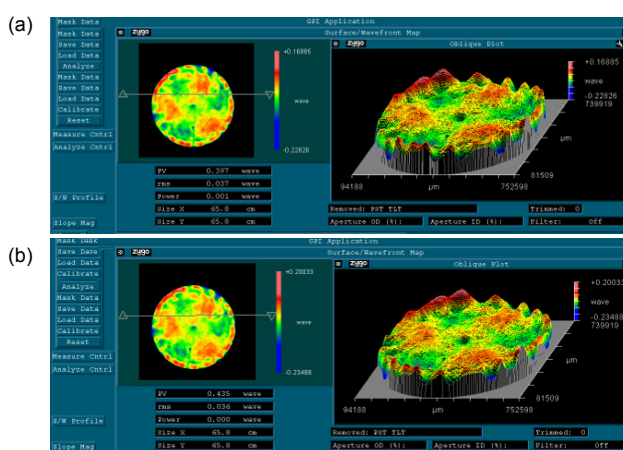


图 6 1.0 m 口径碳化硅拼接技术验证镜振动试验后面形变化。(a) 振动试验前; (b) 振动试验后
Fig. 6 The change of surface figure after vibration test for the 1.0 m aperture brazed mirror. (a) Before test; (b) After test

1.0 m 口径拼接技术验证镜振动前后的面形测试结果, 其中振动前(热真空测试后)面形 RMS 为 0.037λ , 振动后面形 RMS 测试结果为 0.036λ , 变化范围非常小, 振动测试的结果可以对拼接反射镜的刚度、拼接强度等指标进行评价, 从实际测试结果可以看出, 1.0 m 口径拼接技术验证镜的拼接强度和整体刚度指标可以满足工程应用的需求, 对更大尺寸拼接式碳化硅反射镜的工程应用提供借鉴作用。

3.3 抗辐照性能模拟试验

空间反射镜长时间工作在太空高辐照的环境中, 太空中各种高能射线对反射镜表面高反膜的反射率性能具有一定的影响, 单体碳化硅材料的抗辐照性能已经通过考核, 但拼接式反射镜中连接材料和镜体之间存在过度的焊缝区域, 因此其耐辐照性能应该通过模拟考核予以验证。考核试验在 ^{60}Co γ 射线源下完成,

由于样品尺寸的限制, 因此本次考核我们采用与 1.0 m 口径拼接技术验证镜相同连接工艺制备了 $\Phi 100$ mm 的拼接镜样品, 并且进行了光学加工和镀膜, 如图 7 所示, 采用此拼接镜样品进行抗辐照测试, 具体的试验条件如表 3 所示。从图 8 辐照前后反射率的变化可



图 7 用于抗辐照性能测试的 $\Phi 100$ mm 拼接式碳化硅反射镜镀膜后照片
Fig. 7 Photo of $\Phi 100$ mm brazed mirror after coating for anti-irradiation performance test

表 3 $\Phi 100$ mm 碳化硅拼接镜的抗辐照空试验条件

Table 3 Testing condition of anti-radiation experiment for $\Phi 100$ mm brazed mirror

样品尺寸	样品测试前反射率	辐照源	辐照剂量	辐照时间	环境温度
$\Phi 100$ mm	$R > 98\%$ (0.38 μm ~0.76 μm)	^{60}Co γ 射线	37 krad 和 60 krad (Si)	6 天	(20 \pm 3) $^{\circ}\text{C}$

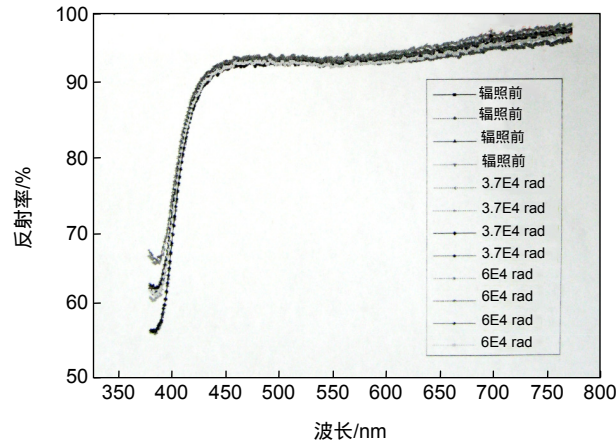


图 8 镀膜处理的 $\Phi 100$ mm 拼接式碳化硅反射镜辐照前后反射率变化

Fig. 8 The change of reflectance for the $\Phi 100$ mm brazed mirror after anti-radiation test

以发现，在辐照环境下焊缝的存在并没有对反射镜的反射率形成影响，其反射率在辐照前后基本保持不变。

4 结 论

随着深空探测和对地观测分辨率需求的提升，大尺寸空间反射镜的需求也将越来越大，以碳化硅材料和拼接为特征的制备技术是一条重要且可行的技术途径。通过 1.0 m 口径碳化硅拼接式技术验证镜的设计、制备和光学加工，验证了常压烧结碳化硅通过分块镜连接技术制备高减重、高刚度大尺寸空间光学系统的可行性；通过热真空、振动、抗辐照等环境模拟测试进一步验证了其工程适用性，为未来更大尺寸的碳化硅空间反射镜系统的研制与工程应用奠定了技术基础。

参考文献

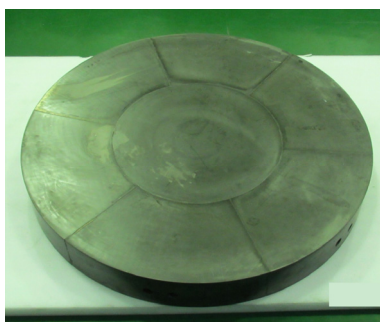
- [1] Pilbratt G L. Herschel space observatory mission overview[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **4850**: 586–597.
- [2] Deny P, Bougoin M. Silicon carbide components for optics: Present and near future capabilities[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5868**: 58680G.
- [3] Gardner J D. The James webb space telescope: extending the science[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8842**: 884228.
- [4] Greenhouse M A. The JWST Science Instrument payload: mission context and status[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9143**: 914307.
- [5] Kaneda H, Naitoh M, Nakagawa T, et al. Manufacturing and optical testing of 800 mm lightweight all C/SiC optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8837**: 88370I.
- [6] Liu Y, Ma Z, Chen J, et al. Environmental simulation evaluation of SSiC brazed optical mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9280**: 928009.
- [7] Zhang B Z, Wang X, Wang X K, et al. Fabrication and testing of a 600mm diameter brazing SiC mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7281**: 72810O.
- [8] Qi Y F, Fang J Z, Yang L, et al. Investigated and development of lightweight mirror[J]. *Optical Technique*, 1998(3): 49–52.
齐亚范, 方敬忠, 杨力, 等. 轻型反射镜研究与发展[J]. *光学技术*, 1998(3): 49–52.
- [9] 陈欢欢. 4 米碳化硅反射镜诞生记[J]. *发明与创新*, 2018(9): 16–17.
- [10] Tsuno C, Irikado H, Ono K, et al. NTSiC (New technology SiC): the progress of recent two years[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **10567**: 1056716.
- [11] Boy J, Krödel M. CESiC light-weight SiC composite for optics and structure[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5868**: 586807.
- [12] Zhang G, Zhao R C, Zhao W X, et al. Manufacture of $\Phi 1.2\text{m}$ reaction bonded silicon carbide mirror blank CFID[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7654**: 76541B.

Preparation and environmental simulation tests of large-size silicon carbide brazed reflection mirrors

Liu Yan*, Zhang Hui, Liu Leimin, Yang Xiao, Huang Jian,

Liu Xuejian, Chen Zhongming, Huang Zhengren

Structural Ceramic and Composite Engineering Center, Shanghai Institute of Ceramics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China



1.0 m aperture SiC brazed mirror

Overview: In recent years, deep space exploration space telescope and high resolution remote sensing systems are experiencing rapid development. As key part of space optic system, large-size reflecting mirrors is intensively needed. With the progress of large-size space mirrors, material and fabrication technology are facing more serious challenges. As candidate optic materials to fabricate large-size mirrors, it should have higher specific stiffness (E/ρ), better thermal properties (λ/α), high lightweight and excellent isotropy. Among all the optic materials, such as Zeroduo glass ceramics, ULE glass, beryllium and silicon carbide, silicon carbide is especially suitable for the preparation of large-size space mirrors with its excellent properties, which has been chosen in some space programs by several countries. So, from the angle of material, silicon carbide is becoming the main-stream optic material to fabricate large-size space mirrors. However, restrained by preparation progress and equipment size, it is difficult to fabricate large-size monolithic space mirrors. So, brazing segments to assemble is a good technical path to solve the difficulty, which has realized engineering application in Herschel space telescope. Shanghai Institute of Ceramics have been involving the study of Sintered silicon carbide material space mirrors and joining technology of silicon carbide for a long time, and in this paper taking a 1.0 m aperture silicon carbide brazed technical validation mirror as example, the fabrication progress of brazed mirror was analyzed. Meanwhile, in order to evaluate engineering applicability of the brazed mirror, several environmental simulation tests, including thermal-vacuum test, vibration test and anti-radiation tests were performed. The 1.0 m aperture brazed mirror was designed as the structure of 6 fan-shape segments and 1 circular segment, which can be used for the off-axis optical system. Using the proper brazing material and optimized joining structure, the 1.0 m aperture brazed mirror was successfully fabricated. Then, the 1.0 m aperture brazed mirror was carried out optical machining, and the surface figure RMS was 0.038λ ($\lambda=632.8$ nm), indicating stiffness of the brazed mirror is satisfied with requirements of optic machining. The 1.0 m aperture brazed mirror was first performed thermal-vacuum test with the condition of 10^{-3} Pa vacuum and 15~25 centigrade Celsius temperature cycle, and the surface figure was 0.037λ after the thermal-vacuum test. Then, the 1.0 m aperture brazed mirror was performed vibration test, and surface figure was 0.036λ after the vibration test. Finally, the brazed mirror of 100 mm aperture was carried out anti-radiation test in order to evaluate the effect of high energy rays on the reflectivity of the brazed mirror, and the experiment showed that the reflectivity of the brazed mirror after coating kept basically constant after ^{60}Co γ ray radiation. The environmental simulation tests indicated that the brazed mirrors have better engineering applicability.

Citation: Liu Y, Zhang H, Liu L M, *et al.* Preparation and environmental simulation tests of large-size silicon carbide brazed reflection mirrors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 200088

Supported by National Natural Science Foundation of China (51972320)

* E-mail: stony2000@mail.sic.ac.cn