

大口径轻质 SiC 反射镜的研究与应用

赵汝成^{1,2*}, 包建勋^{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. 光学系统先进制造技术 中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:介绍了大口径轻质碳化硅反射镜镜坯的基本结构、性能测试指标、国内应用及发展前景;阐述了碳化硅凝胶注模成型(Gel-casting)、反应烧结 SiC(RB-SiC)与压力成型、常压烧结 SiC(SSiC)两种国内主要制备大口径轻质碳化硅反射镜的方法;并对两种方法制备得到的 $\phi 1.45$ m 碳化硅镜坯的性能、测试数据及光学加工后的光学特性进行分析和对比,提出存在的问题,以供商榷,进而促进国内大口径轻质碳化硅反射镜的研究和发展。

关键词:碳化硅;大口径碳化硅反射镜;制造工艺

中图分类号:TH743 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20140704.0552

Investigation and application of large scale lightweight SiC mirror

ZHAO Ru-cheng^{1,2*}, BAO Jian-xun^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Key Lab of Optics System Advanced Manufacturing Technology,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

** Corresponding author, E-mail: zhaoruchengciomp@126.com*

Abstract: The structures, performances and applications of large scale lightweight SiC mirror blank were introduced. Two fabricating process dominating in our country, namely gel-casting forming followed by reaction sintering(RB-SiC) and Sintered Silicon Carbide(SSiC) via pressure molding and pressureless sintering, were elaborated which were adopted to produce $\phi 1.45$ m lightweight SiC mirrors. By comparing the performances, testing results and optical properties SiC mirrors fabricated via two different processes mentioned above, we analyse the problems existing in the fabricating process to further improve the development of large scale lightweight SiC mirror.

Key words: SiC; large scale SiC mirror; fabricating processing

1 引言

随着空间科学研究的迅猛发展,涉及深空探测、天文光学及对地观测等领域的研究已成为发达国家的一个主要研究目标。同步卫星、探测卫星、大型望远镜等一系列空间光学遥感器的问世,为人类探索宇宙提供了科学依据。由于光学系统是空间光学传感器最重要组成部分,光学系统的口径越大,其遥感探测器的分辨率就越高。为此,大口径的光学反射镜材料一直是空间光学传感器的主要核心技术之一。20世纪80年代,新型 SiC 陶瓷作为光学反射镜材料引起了世界空间科学工作者的重视。美国、俄罗斯、德国、法国等空间遥感技术先进国家开始对应用于空间遥感光学系统的 SiC 陶瓷反射镜制造的探索,90年代成功制备出 SiC 陶瓷反射镜,该类反射镜在空间光学遥感技术领域得到了实际应用。2006年法国的 Herschel 公司为欧洲空间局(ESA)研制 $\phi 35\text{ m}$ 的碳化硅反射镜,用于 $\lambda = 57 \sim 670\ \mu\text{m}$ 波段,质量 $< 300\text{ kg}$,极大地促进了 SiC 反射镜在空间光学系统中的应用^[1-4]。

SiC 材料具有较高的比刚度、导热系数及热稳定性,因此,相对于其它反射镜材料,在镜体的轻量化及减小热变形方面,具有明显的优势;致密的 SiC 材料具有较小的热膨胀系数,在较大温差条件下,抗热震性极佳;在较大的温度范围内使用,镜面面形变化较小,使用寿命较长,加之 SiC 材料具有较好的光学加工特性及优异光学性能,各航天大国均将其列为空间光学遥感器的优质反射镜材料之一^[5]。我国 SiC 材料在反射镜的应用研究方面滞后于国外航天科学技术发达的国家。经过 10 余年的不懈努力,国内现已形成了以中国科学院长春光学精密机械与物理研究所及中国科学院上海硅酸盐研究所为代表的两种大口径轻质 SiC 反射镜的制备方法体系。前者采用凝胶注模成型(Gel-casting)结合反应烧结制备 SiC 反射镜;后者采用压力成型结合常压烧结 SiC(SSiC)的方法制备反射镜,二者现均已完成口径超过 1.45 m 量级轻质碳化硅反射镜镜坯的研制。

2 大口径轻质 SiC 反射镜的结构

大型空间光学遥感器的光学系统多为反射式结构,增大主反射镜口径是空间光学系统提高分辨率的主要途径之一。随着主反射镜尺寸的增加,镜坯自重也越来越大,而镜体支撑结构的质量也随之增大,导致发射载荷变急剧增加,发射成本也越来越高。因而,除了采用比刚度高的新型材料,(如 SiC),实现镜坯轻量化也是必要的,轻量化的前提则是保证镜体具有足够的刚度。

主流轻量化形式为在镜坯背部加工出各种几何形状的轻量化空腔,如图 1 所示。从而保证整体质轻且高刚度。1.5 m 量级的 SiC 反射镜,不做轻量化处理,按照径厚比不大于 10:1 计算^[7],质量将超过 700 kg。经过轻量化加工的无压烧结 SiC 和反应烧结 SiC 镜坯,质量均能降低至 200 kg 以内,轻量化率超过 70%。此外,从具体的轻量化结构,还可分为全开放和半开放式结构。半开放式三明治结构整体刚度更优^[6-14]。

轻量化结构带来诸多优点的同时,也导致镜坯形状的复杂化,尤其是结构刚度更高的半开放式结构。对于高硬耐磨的 SiC 陶瓷反射镜,加工难度和成本非常高,因而这是制备大口径反射镜要解决核心问题之一^[15]。

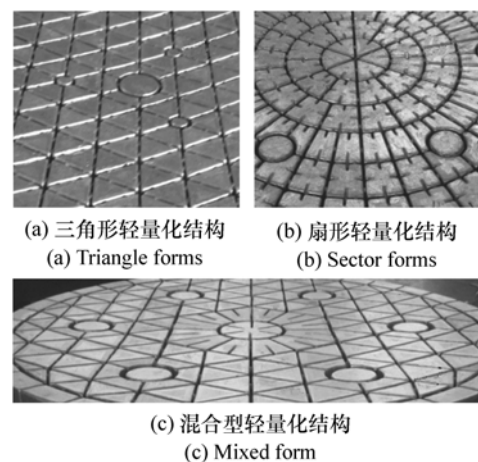


图 1 SiC 反射镜坯轻量化结构模具

Fig. 1 Moulds for light-weight structure of SiC mirrors blanks prepared by gel-casting forming

3 大口径 SiC 反射镜镜坯的研制

针对上述 SiC 反射镜在空间光学应用所面临

的技术问题,目前较为成熟并且已经得到实用的大口径 SiC 反射镜制备工艺路线有凝胶注模成型结合反应烧结及压力成型结合无压烧结工艺,两种工艺路线均有各自的优缺点,如图 2 所示。

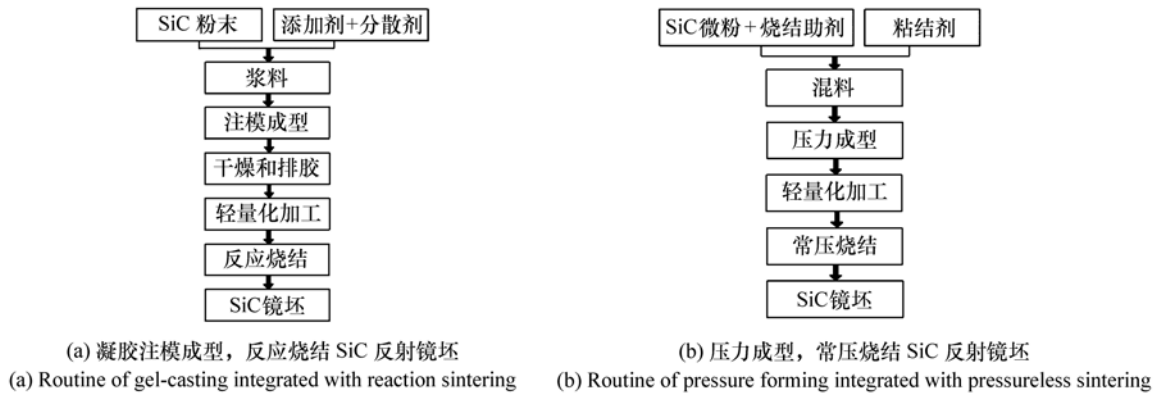


图 2 凝胶注模、反应烧结碳化硅反射镜与压力成型无压烧结碳化硅反射镜制备工艺流程

Fig. 2 Gel-casting combined with reaction sintering vs. pressure forming combined with pressureless sintering for SiC mirror blanks

3.1 凝胶注模成型结合反应烧结工艺

凝胶注模成型 (Gel-casting) 技术是由美国橡树岭国家实验室的 M. A. Jenny 和 O. O. Omatete 教授等人发明的继注浆成型、注射成型之后的又一种新型的近净尺寸成型技术^[16]。其原理是通过高分子单体和交联剂的聚合形成空间三维网状分子链,原位固定浆料中悬浮的 SiC 颗粒,并按照模具形状固化成相应的 SiC 坯体^[17-21]。此 SiC 坯体经脱水干燥后,便可以得到具有一定强度的 SiC 素坯。

反应烧结 SiC (RB-SiC) 在 20 世纪 50 年代由 Popper 教授提出,并得到广泛的研究^[22]。其原理是:高温下具有反应活性的金属 Si 液体,在真空环境中由毛细管力的作用渗入含有无定型炭的多孔 SiC 陶瓷坯中,一部分熔融 Si 与其中无定型炭反应生成 SiC,并在熔 Si 前沿释放相当的热量,促进剩余熔融 Si 则填充坯体中的空洞,达到完全致密化。本文采用“凝胶注模成型 + 反应烧结”的方法制备大口径轻质 SiC 反射镜。主要解决的技术难点包括:高固相含量低黏度浆料的制备、浆料凝胶注模成型、大尺寸 SiC 陶瓷素坯的干燥技术、素坯加工以及反应烧结技术。其中,提高浆料

SiC 固相含量,素坯固化干燥后收缩降低,有利于近净尺寸成形,同时可以提高最终材料中硬质相 SiC 的含量,从而获得较高的弹性模量。大尺寸 SiC 陶瓷素坯的干燥和加工结果直接影响最终镜坯所包含的缺陷尺寸和数量,反应烧结工艺则最终决定产品的致密性和残余应力。

3.2 压力成型、常压烧结 SiC (SSiC)

首先是将 $0.5 \mu\text{m}$ 的 SiC 微粉与一定量的烧结助剂(碳化硼 B_4C + 纳米炭黑 C)^[23-24] 混合均匀,加入适量的酚醛树脂作为镜坯成型的粘接剂,进行喷雾造粒,使 SiC 微粉的外表面均匀包裹上一层烧结助剂及粘接剂。放入具有一定镜坯外形尺寸的不锈钢模具内,应用大型压力设备压力成型;上、下加力 $1.4\text{T} \sim 2.0\text{T}/\text{cm}^2$ 。然后按图纸设计要求对镜坯进行机械加工,完成整块镜坯的外形尺寸及轻量化结构加工。最后把镜坯放入真空高温炉内进行常压烧结,得到轻质碳化硅反射镜镜坯,其主要工艺流程见图 2(b)。常压烧结 SiC (SSiC) 法也是在真空状态下进行高温烧结,经高温烧结后,镜坯的收缩率在 $12\% \sim 16\%$ 之间,这种工艺适合于结构相对简单的轻质 SiC 反射镜镜体的制备。中科院上海硅酸盐研究所就是应用这

一方法进行大口径 SiC 反射镜的研制^[23],并将其生产的镜坯率先在国内的航空航天工程上获得应用。

3.3 SiC 镜坯性能测试

大口径 SiC 反射镜镜坯的质量是一个关键问题,目前尚无国家质量标准可依。制造者一般都是参照精细陶瓷的国家检验标准对产品进行力学

及热学检验,获取有效的检验数据,为设计者提供科学依据。然后由设计者负责组织技术人员对产品进行一系列相关的环境及工程条件实验,以此检验镜坯的最终质量,获得镜坯的可靠性和安全性保障。由反应烧结和常压烧结制备 SiC 镜坯材料,主要性能测试结果见表 1。

表 1 $\phi 1.45 \text{ m} \times 0.155 \text{ m}$ 碳化硅反射镜镜坯主要性能测试

Tab. 1 Performances of SiC materials via gel-casting and reaction sintering or pressure forming and pressureless sintering

种类	质量/Kg	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	抗弯强度 σ/MPa	断裂韧性 $K_{\text{IC}}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	热膨胀系数 $\alpha(10^{-6}/\text{K})$
RB-SiC	145	≥ 3.0	≥ 330	≥ 350	≥ 4.1	2.5
SSiC	153	3.11	≥ 370	≥ 400	≥ 4.0	2.2 ~ 2.4

3.4 讨论

凝胶注模成型结合反应烧结是实现复杂结构近净尺寸成形较适宜的工艺。镜坯成形过程收缩不超过 1.3%。结合真空冷冻干燥技术^[25],甚至可以达到坯体零收缩;结合传统的消失模技术,这种工艺方法容易制备刚性较好的半封闭夹层结构镜坯,见图 3(a)所示。

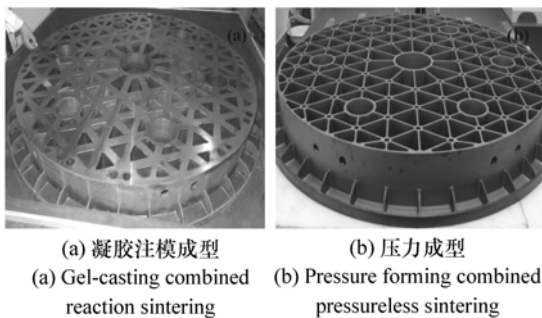


图 3 $\phi 1.45 \text{ m}$ 量级碳化硅反射镜镜坯背部

Fig. 3 Structures of $\phi 1.45 \text{ m}$ SiC mirror blank

因为高分子凝胶原位固定浆料中的 SiC 陶瓷颗粒,所以凝胶注模成形得到的素坯内部均匀。高分子凝胶固化后,素坯抗弯强度达到 30 MPa 以上,在加工、装夹和吊装过程中不易损伤,成品率高。

反应烧结可以在相对低的温度下进行,一般 1 800 $^{\circ}\text{C}$ 内就可以烧制得到完全致密的 SiC 陶瓷,这一温度,远低于常压烧结致密重结晶 SiC 陶瓷

所需温度($> 2\ 000\ ^{\circ}\text{C}$),没有 SiC 晶粒长大,烧结收缩变形极小,降低后续加工的难度和工时。同时对加热设备要求也较低,并且容易实现一体式复杂结构和镜坯的大尺寸化。原则上, SiC 陶瓷反射镜坯尺寸只受限于烧结炉膛的尺寸。

压力成型与常压烧结 SiC 反射镜对设备要求较凝胶注模成型结合反应烧结工艺高。在素坯加工成形方面,只能实现镜坯整体的全开放式轻量化结构,见图 3(b)所示。高温烧结过程中,伴随着液相传质,境界移动以及液相烧结助剂中 SiC 颗粒在毛细管力作用下进行重排,镜坯收缩超过 12%,因此在压力成型及轻量化加工时要留有足够大的加工余量。

压力成型结合常压烧结技术的优点也比较明显。首先机械混料可以达到完全的均匀化,保证最终 SiC 制品的均匀性;其次,常压烧结 SiC 境界残余的烧结助剂是 B_4C ,反应析出的 SiC 或 Y_2O_3 , Al_2O_3 等高弹性模量的硬质相,因此常压烧结 SiC 弹性模量和抗弯强度较高,接近热压烧结 SiC。另一方面这些物相构成的组织结构在显微尺度下硬度均匀性佳,因此抛光性能较优。

对于 SiC 微粉制备的镜坯,不论采用哪一种制备工艺,光学加工精度如何,其承载光学反射薄膜的表面质量仍然不能满足高质量的大型光学成像系统的精度要求,必须要对镜坯的表面进行改性处理^[26]。一般选用与 SiC 材料膨胀系数相同

或相近的硅进行。镜坯经过光学加工、表面改性及镀膜工艺技术处理,均能获得良好的光学特性^[27],经 WYKO 粗糙度仪及 ZYGO 干涉仪检测得知两种方法制备的镜坯表面粗糙度 $R_a < 3 \text{ nm}$,面型精度 $\text{RMS} < \lambda/50$,反射率均大于 96%,符合空间光学系统的设计需要,见图 4。

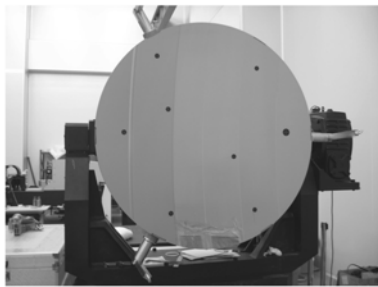


图 4 检测中的 1.45 m 量级反应烧结 SiC 反射镜

Fig. 4 1.45 meter scale RB-SiC mirror in test

4 SiC 反射镜应用趋势

研究开发性能更加优越的大口径轻质碳化硅反射镜是制备高性能、高精度空间光学遥感器的基础。随着空间科学技术的发展,在近地轨道 300~500 km 内的空间飞行器,国内将会有很大的需求;中远程飞行轨道的空间光学遥感器也正在国家的计划范畴之列,十年内预计将发射 50 余颗卫星。为此 $\phi 0.5 \text{ m} \sim 2.0 \text{ m}$ 的大尺寸 SiC 反射镜仍将成为空间光学系统主要的设计目标,加之大型地面观察设备也在快速崛起,其光学系统的直径要比空间的光学系统要大得多。

30 多年来,国外航天科技大国在大口径 SiC 反射镜的制备技术与应用上已经取得了令人瞩目的成绩,但是材料的制备工艺鲜见报导。已公开的最成功的案例是欧洲太空局 ESA 于 2009 年发射的 Herschel 空间天文台^[2-3],其搭载 3.5 m SiC 主反射镜。因镜坯整体制备难度极高,且考虑到望远镜使用光波波长较长,对镜面面形精度要求低于可见光,故采用六等分扇型分块钎焊拼接而成。每个 SiC 分块坯体采用常压烧结的工艺制备。

尽管国内 SiC 反射镜材料的研究滞后,但对大口径反射镜的要求正在日益剧增,镜体的口径

越来越大,而质量控制却愈加苛刻,相较于传统反射镜材料, SiC 材质的优势愈加明显。因此,完善 SiC 反射镜制备工艺,提高其服役性能,对空间光学的发展具有重要意义。

在 SiC 反射镜技术的推广过程中,前文所述两种制备技术面临一些相同和不同的技术问题。首先相同的问题是生产成本,两种制备方法成品率还有进一步提升的空间,尤其是超过 1.5 m 口径的大尺寸反射镜的研制。其次,由于常压烧结工艺中烧结助剂的加入,反应烧结过量 Si 的剩余,都或多或少降低 SiC 反射镜的比刚度和微观均匀性,因此对光学性能不利。降低这些杂质的含量是重要的技术难点之一。第三, SiC 材料的强韧化是拓宽应用前景的最关键因素。

这两种方法所面临的技术难点也有所不同:大尺寸常压烧结 SiC 反射镜机械性能略高,如弹性模量和抗弯强度,但是制备和加工成本明显高于反应烧结 SiC 反射镜,并且在制备大尺寸复杂结构反射镜时适用性不及后者。而反应烧结 SiC 在提高机械强度和弹性模量以及微观均匀性等方面更为紧迫。

随着镜坯直径的不断增大,镜坯的研制将会出现许多新的技术难题;无论是那一种工艺方法都不可能一成不变地继续使用,仍然需要不断地探索研究新的方法和工艺,比如:(1)采用拼接方式完成大口径 SiC 反射镜的整体面积一体化;(2)减小镜面的厚度、改变支撑方式,从而减轻整块镜坯的质量,满足设计的需求;(3)研制超薄 SiC 反射镜镜坯等一些技术问题。中科院长春光学精密机械与物理研究所 SiC 课题组在采用拼接方式研制大口径 SiC 反射镜上,已经取得了一定的经验,成功研制了 $\phi 2.0 \text{ m}$ SiC 反射镜镜坯(拼接成型),目前正在研究制备更大尺寸的 SiC 反射镜镜坯。

5 结束语

应用凝胶注模成型(Gel-casting)、反应烧结 SiC(RB-SiC)与压力成型、常压烧结 SiC(SSiC)工艺制备大口径轻质 SiC 反射镜的方法,在国内取得了成功,并且已经制备完成了多块大口径轻质

SiC 反射镜镜坯。性能测试数据表明:镜坯的刚度、断裂韧性、热膨胀系数及光学反射率均达到了设计要求,也通过了一系列的环境与工程条件试验,在国内的航天工程项目上得到运用。这两种方法将是引领国内大口径轻质 SiC 反射镜制备与发展的主要科学技术力量。

参考文献:

- [1] 韩昌元. 空间光学的发展与波前传感技术[J]. 中国光学与应用光学,2008,1(1):13-24.
HAN CH Y. Progress in space optics and wave front sensing technique[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*,2008,1(1):13-24. (in Chinese)
- [2] TOBIN E, MAGIDA M B, KISHNER S J, et al. Design, fabrication, and test of a meter-class reaction bonded SiC mirror blank[J]. *SPIE*,1995,12:2543.
- [3] EALEY M A, WEAVER G Q. Developmental history and trends for reaction-bonded silicon carbide mirrors[J]. *SPIE*,66:2857.
- [4] ZHANG Y M, ZHANG J H, HAN J C, et al. Large-scale fabrication of lightweight Si/SiC ceramic composite optical mirror[J]. *Materials Letters*,2004,58(7-8):1204-1208.
- [5] 张玉娣,张长瑞,周新贵,等. SiC 基陶瓷卫星反射镜研究进展[J]. 材料导报,2002,16(9):37-39.
ZHANG Y D, ZHANG CH R, ZHOU X G, et al. Development of SiC matrix ceramic satellite mirror[J]. *Materials Review*,2002,16(9):37-39. (in Chinese)
- [6] 张剑寒,张宇民,韩杰才,等. 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, HAN J C, et al. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(2):179-184. (in Chinese)
- [7] PAQUIN R A. Materials for mirror systems: an overview[J]. *SPIE*,1995,2:2543.
- [8] BARNES J W P. Hexagonal vs triangular core lightweight mirror structure[J]. *Appl. Opt.*,1972,11:2748-2753.
- [9] RICHARD R M, MAALVICK A J. Elastic deformation of lightweight mirrors[J]. *Appl. Opt.*,1973,12:1220-1225.
- [10] SHENG C F. Lightweight mirror structure best coreshapes; reversal of historical belief[J]. *Appl. Opt.*,1988,27(2):354-359.
- [11] 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):48-53.
ZHANG G, ZHAO W X. Analysis on structural parameters of light-weighted mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(1):48-53. (in Chinese)
- [12] 郭喜庆,王悦勇. 大口径反射镜几种轻量化孔结构形式的分析[J]. 光学精密工程,2000,8(6):.
GUO X Q, WANG Y Y. Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy-caliber mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*,2000,8(6):. (in Chinese)
- [13] 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.
ZHANG X J, LI ZH L, ZHANG ZH Y. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2007,36(5):577-582. (in Chinese)
- [14] 韩媛媛,张宇民,韩杰才,等. 碳化硅反射镜轻量化结构优化设计[J]. 光电工程,2006,33(8):123-126.
HAN Y Y, ZHANG Y M, HAN J C, et al. Optimum design of lightweight silicon carbide mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2006,33(8):123-126. (in Chinese)
- [15] 王克军,董吉洪,李威,等. 反射镜组件的柔性支撑结构设计[J]. 光学精密工程,2012,20(增刊):337-343.
WANG K J, DONG J H, LI W, et al. Design of flexure support structure of mirror subassembly[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(Supp.):337-343. (in Chinese)
- [16] JANNEY M A, OMATETE O O. Method for molding ceramic powders using a water-based gel casting:US,5028362[P]. 1991.
- [17] 赵汝成. 大尺寸轻型碳化硅反射镜的凝胶注模成型[J]. 光机电信息,2010,27(11):52-55.
ZHAO R CH. Gel-casting technology of large scale SiC mirror blank[J]. *OME Information*,2010,27(11):52-55. (in

- Chinese)
- [18] 张舸,赵汝成,赵文兴. 大尺寸轻型碳化硅质镜体的制造与材料性能测试[J]. 光学精密工程,2006,14(5):759-763.
ZHANG G,ZHAO R CH,ZHAO W X. Fabrication and test of large scale light weight SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(5):759-763. (in Chinese)
- [19] 赵汝成,包建勋. $\phi 1.34$ m 轻质碳化硅反射镜镜坯的制造[J]. 光学精密工程,2012,20(增刊):82-85.
ZHAO R CH,BAO J X. Preparation of $\phi 1.34$ m light-weight silicon carbide mirror blank[J]. *Opt. Precision Engineering*,2012,20(Supp.):82-85. (in Chinese)
- [20] 赵文兴,张舸,赵汝成,等. 轻型碳化硅反射镜坯体的制造工艺[J]. 光学精密工程,2011,19(11):2609-2617.
ZHAO W X,ZHANG G,ZHAO R CH,*et al.*. Fabrication of silicon carbide lightweight mirror blank[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(11):2609-2617. (in Chinese)
- [21] 张舸,赵汝成,赵文兴. 空间用反应烧结碳化硅反射镜坯体制备技术研究[J]. 空间科学学报,2011,31(3):401-405.
ZHANG G,ZHAO R CH,ZHAO W X. Study on fabrication technology of reaction bonded silicon carbide mirror blank for space[J]. *Chinese J. Space Science*,2011,31(3):401-405. (in Chinese)
- [22] POPPER P. *Special Ceramics*[M]. London:Heywood Press,1960.
- [23] 陈健,黄政仁,刘学建,等. 直接压力成型制备碳化硅陶瓷[C]. 空间科学学会空间材料专业委员会 2011 学术交流会议论文集,中国银川,2011:214-217.
CHEN J,HUANG ZH R,LIU X J,*et al.*. Preparation silicon carbide ceramics by direct press[C]. Proceeding of Academic Conference, Chinese Society of Space Research, Yinchuan, P. R. China. 2011:214-217. (in Chinese)
- [24] 刘桂玲,黄政仁,刘学建,等. 碳化硅表面改性和光学镜面加工的研究现状[J]. 无机材料学报,2007,22(5):769-774.
LIU G L,HUANG ZH R,LIU X J,*et al.*. Recent developments of surface coatings and optical fabrication of silicon carbide[J]. *J. Inorganic Materials*,2007,22(5):769-774. (in Chinese)
- [25] 黄毅华,江东亮,张景贤,等. 凝胶冷冻干燥法制备透明氧化钇陶瓷[J]. 无机材料学报,2008,23(6):1135-1140.
HUANG Y H,JIANG D L,ZHANG J X,*et al.*. Fabrication of Transparent yttria ceramics through gel-freezing dry method [J]. *J. Inorganic Materials*,2008,23(6):1135-1140.
- [26] 徐领娣,张学军,王旭. 反应烧结碳化硅反射镜表面改性技术[J]. 光电工程,2009,36(1):120-124.
XU L D,ZHANG X J,WANG X. Surface coating technique of reaction bonded SiC mirrors[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2009,36(1):120-124. (in Chinese)
- [27] 徐清兰,伍凡,吴时彬,等. 轻质碳化硅平面反射镜超光滑表面加工[J]. 光电工程,2004,31(9):22-25.
XU Q L,WU F,WU SH B,*et al.*. Supersmooth surfacing fabrication for lightweight silicon carbide plan mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2004,31(9):22-25. (in Chinese)

作者简介:



赵汝成(1957—),男,云南瑞丽人,高级工程师,1980年于昆明工学院获得学士学位,主要从事大尺寸轻型碳化硅镜坯制备方面的研究。E-mail: zhaorucheng-ciomp@126.com



包建勋(1984—),男,广西北海人,研究实习员,2007年、2009年于华中科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事铝基碳化硅复合材料制备方面的研究。E-mail: jianxun_bao@gmail.com