

文章编号 1004-924X(2015)08-2185-07

超轻量化 SiC 反射镜的制备及性能

董斌超*, 张 舸

(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:采用真空辅助凝胶注模和反应烧结法制备了面密度分别为 9.35 和 11.7 kg/m², 直径分别为 200 和 500 mm 的两块超轻量化 SiC 反射镜, 检测了反射镜的主要性能。结果显示: 由于在真空环境下浇注, 坯体没有宏观缺陷。材料中细小 SiC 颗粒的存在使材料具有相对较高的抗弯强度(335 MPa)和断裂韧性(4.5 MPa·m^{1/2})。此外, 反射镜材料金相组织中未出现明显的 SiC 颗粒定向排列, 具有较好的各向同性度; 不同方向热膨胀系数差异小于 3%, 模量差异为 1.3%。镜坯经过光学加工后面形误差(RMS 值)为 0.043λ(λ=632.8 nm), 表面粗糙度(R_a 值)优于 5 nm。实验表明, 真空辅助凝胶注模成型结合反应烧结工艺制备的超轻量化 SiC 反射镜各方面性能良好, 适用于制备空间相机用反射镜。

关键词:光学制造; SiC; 超轻量化反射镜; 真空辅助凝胶注模; 反应烧结

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2185

Fabrication and properties of ultra-lightweight SiC mirror

DONG Bin-chao*, ZHANG Ge

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zbcyg@163.com

Abstract: Vacuum pressure assisted gel-casting and reaction sintering were applied to fabrication of $\Phi 200$ and $\Phi 500$ mm ultra-lightweight SiC mirrors with the area densities of 9.17 kg/m² and 10.8 kg/m² respectively. The main properties of the SiC mirrors were tested. The results show that the green bodies of the SiC mirrors have no macroscopic defects due to its pouring in a vacuum environment. The mirror materials have high flexural strength (335 MPa) and fracture toughness (4.5 MPa·m^{1/2}) because of the fine SiC particles. The metallographic structures of the mirror materials do not show the directional alignment of SiC particles, which means the mirror materials possess a high isotropy ratio, in which the relative deviation of Coefficient of Thermal Expansion(CTE) is less than 3%, and the relative deviation of modulus reaches 1.3%. After polishing, the surface profile accuracy (RMS) of the mirror is 0.043λ (λ=632.8 nm), and the toughness is better than 5 nm. These results demonstrate that the ultra-lightweight SiC mirrors fabricated by vacuum-assisted gel-casting and reaction sintering have excellent performance, and are suitable for fabrication of the mirrors of space cameras.

Key words: optical fabrication; silicon carbide; ultra-lightweight mirror; vacuum pressure assisted gel-casting; reaction sintering

收稿日期: 2015-04-02; 修订日期: 2015-05-19.

基金项目: 超轻 RBSiC 反射镜制备技术研究(No. Y2CXISS126)

1 引言

随着空间光学遥感系统分辨率的不断提高,光学系统的口径越来越大,其质量也随之增加,从而导致整个光学遥感系统的质量、复杂程度以及发射成本大幅度上升。折返式或全反式光学系统的主要部件——主反射镜决定了光学系统的质量,因此主反射镜的超轻量化技术变得非常重要和有意义^[1]。

SiC 具有优异的力学性能、良好的热学和光学加工性能,是一种很有优势的空间反射镜材料^[2-4],目前超轻量化 SiC 反射镜已成为国内外研究和关注的热点。美国 Xinetics、SSG、POCO 和德国 IABG 等单位已采用不同的工艺制备出几百毫米到米级的超轻量化 SiC 反射镜,面密度均小于 25 kg/m^2 ,IABG 所制备的 SiC 反射镜面密度甚至达到了 8 kg/m^2 ^[5-6]。Herschel 的 $\Phi 3.5 \text{ m}$ 主镜的面密度仅为 21.8 kg/m^2 ,次镜的面密度也低至 28.2 kg/m^2 ,整个望远镜的质量只有 300 kg ^[7-8]。中国科学院光电技术研究所超轻量化 SiC 镜坯制备方面也进行了相关研究,目前已设计并制备了口径为 510 mm ,面密度为

10.8 kg/m^2 的镜坯,但该镜坯的光学表面加工结果还未见报道^[9]。

为尽可能降低 SiC 反射镜的面密度,超轻量化反射镜镜面和加强筋的设计厚度均很小($1\sim 3 \text{ mm}$)^[5-9],而且对镜坯尺寸的精度要求很高,对缺陷也非常敏感;因此超轻量化反射镜的成型不仅要有非常高的尺寸精度,成型的试样还要无裂纹和气孔等缺陷,以确保超轻量化反射镜的性能和可靠性达到空间使用的要求。

凝胶注模成型法是一种比较成熟的近净尺寸成型工艺,适于制备大尺寸、复杂形状的试样,可以通过控制坯体收缩率对高尺寸精度的试样成型。目前,采用凝胶注模法已经制备出 $\Phi 1.45 \text{ m}$ 的高性能轻质 SiC 反射镜镜坯^[10]。为更加精确地控制镜坯尺寸和减少缺陷,本文采用改进的凝胶注模工艺制备了超轻量化 SiC 反射镜,并检测了其性能。

2 超轻量化 SiC 反射镜制备

2.1 超轻量化反射镜的主要参数

本文制备了 $\Phi 200 \text{ mm}$ 和 $\Phi 500 \text{ mm}$ 二块超轻量化 SiC 球面反射镜,其主要参数如表 1 所示。

表 1 超轻量化 SiC 反射镜的主要参数

Tab.1 Main parameters of ultra-lightweight SiC mirrors

直径/mm	形状	球面半径/mm	镜面厚度/mm	加强筋厚度/mm	质量/kg	面密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	
1#	200	单拱形	1 500	2.5	2	0.288	9.17
2#	500	单拱形	1 500	2.5	2.5	2.12	10.8

2.2 镜坯制备

本文借鉴真空压力辅助注浆成型工艺^[11]对常规凝胶注模工艺进行了改进,采用真空辅助凝胶注模工艺制备超轻量化反射镜镜坯,即模具处于真空腔内,浆料在真空腔内外气压差的作用下注入模具,浆料在模具中固化形成反射镜素坯(如图 1 所示)。

超轻量化反射镜的制备工艺如图 2 所示。将 3 种不同粒径的 SiC 粉加入到溶解有单体、交联剂和分散剂的预混液中并球磨混合,得到均匀性和流动性好的高固相含量的 SiC 浆料,浆料经真空除气后加入催化剂和引发剂并搅拌均匀。然后在真空腔内外气压差的作用下,浆料被注入到真

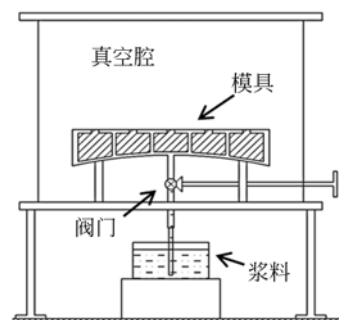


图 1 真空辅助凝胶注模装置

Fig.1 Device of vacuum pressure assisted gel-casting

空腔内的模具中,浆料固化 2 h 后脱模,再经过液体干燥剂干燥后得到反射镜素坯。素坯在真空下

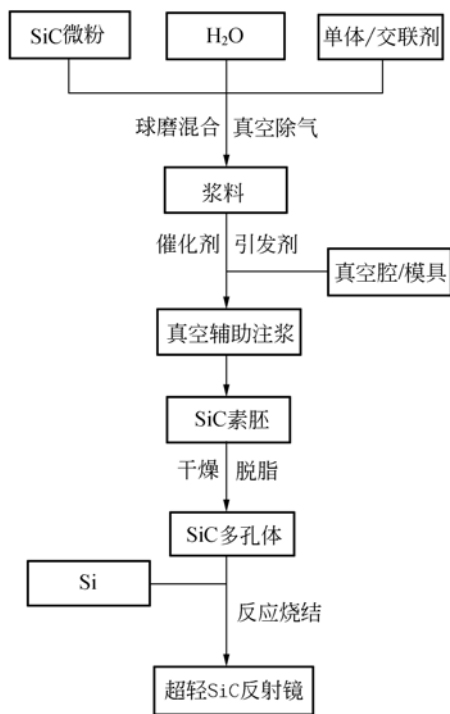


图 2 超轻量化 SiC 反射镜的制备流程图

Fig. 2 Manufacture process of ultra-lightweight SiC mirror

脱脂烧结后,得到反射镜预制体。将预制体和适量的 Si 一起放入真空烧结炉中升温至 Si 熔点以上,熔融态的 Si 渗入到预制体的孔隙中,和脱脂烧结时生成的热解 C 反应,在原 SiC 表面生成新的 β -SiC^[12],其余的孔隙被熔融 Si 填充,最终得到致密无缺陷的超轻量化 SiC 反射镜镜坯。图 3 为采用此工艺制备的 $\Phi 200$ mm 和 $\Phi 500$ mm 超轻量化 SiC 反射镜镜坯,去除镜体表面 1.5 mm 加工余量后,其面密度分别为 9.35 kg/m² 和 11.7 kg/m²。



图 3 $\Phi 200$ mm 和 $\Phi 500$ mm 超轻量化 SiC 反射镜镜坯
Fig. 3 $\Phi 200$ mm 和 $\Phi 500$ mm ultra-lightweight SiC mirrors

和常规凝胶注模工艺相比,真空辅助凝胶注模工艺的特点在于注模成型在真空环境下完成,

其优点如下:

(1)真空环境下气体极少,可以保证浆料完全填充模具,避免模具凹面处填充不完全以及所导致的浆料氧阻聚现象,消除镜坯表面缺陷。

(2)真空腔内气压非常低,在浆料进入模具后,浆料中残余的气泡迅速膨胀并且破裂,气泡进一步被消除,保证固化后的坯体没有内部缺陷,从而保证反应烧结后得到的镜坯没有内部缺陷。

3 超轻量化 SiC 反射镜的性能

3.1 镜坯微观组织

镜坯反应烧结后的金相组织如图 4 所示,可以看出材料组织由两相组成,其中黑色部分为 SiC,白色部分为 Si。本文所制备的反应烧结 SiC 镜坯中使用了 SiC 颗粒级配,制备镜坯所用的浆料中 SiC 含量较高,并且干燥过程中坯体收缩导致 SiC 所占的体积比更高,因此镜坯金相组织中 SiC 的比例远高于 Si。

由于 SiC 颗粒在浆料中分散均匀,而且浆料真空除气后在真空环境下注入模具,使固化后的坯体内没有气泡,因此脱脂后的坯体内不会出现较大尺寸的孔隙,烧结后镜坯材料的金相组织(图 4)中也未出现大尺寸的游离 Si 区域。镜坯组织中大 SiC 颗粒作为骨架均匀地分散在整个材料中,细小的 SiC 颗粒均匀地分布在大颗粒之间,并将其间的游离 Si 分割成特别细小的单元。

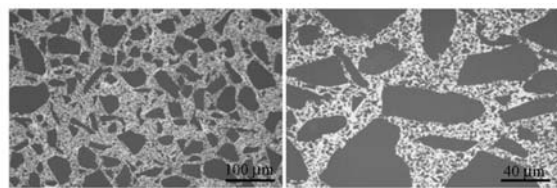


图 4 超轻量化 SiC 反射镜材料的金相组织
Fig. 4 Microstructure of ultra-lightweight SiC mirror

3.2 超轻量化反射镜镜坯的基本性能

表 2 中列出了本文制备的超轻量化反射镜的反应烧结 SiC (Reaction Bonded SiC, RB-SiC)、HB-Cesic@^[13-14] 以及 SPICA 反射镜所用 C/SiC^[15] 的主要性能。由日本三菱电气和德国 ECM 公司开发的 HB-Cesic 以及三菱电气为 SPICA 研制的 C/SiC 均是由短切碳纤维增强的 RB-SiC 复合材料,短切碳纤维弥散分布在材料

中,起到补强增韧的作用,以提高其力学性能。本文所制备的 RB-SiC 反射镜虽未采用纤维进行补强增韧,但其性能也能达到甚至超过上述两种反射镜材料,满足空间反射镜材料的要求。

表 2 镜坯主要材料的性能

Tab. 2 Major material properties of mirror

	RB-SiC HB-Cesic® C/SiC(SIPCA)		
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.95	2.97	2.8
抗弯强度 σ/MPa	335	320	200
弹性模量 E/GPa	305	350	320
断裂韧性 $K_{\text{IC}}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	4.5	3.6	3.9
热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	2.34	2.3	2.2

在没有碳纤维补强增韧的情况下,本文制备的超轻量化反射镜的抗弯强度和断裂韧性明显高于另外两种反射镜,其原因有两方面:一方面高的 SiC 含量使镜坯材料中的游离 Si 比较少。游离 Si 相的强度比 SiC 低,其解理断裂性能也低,脆性大;因此在外加载荷作用下,反应烧结 SiC 中的游离 Si 相首先断裂,裂纹扩展到 SiC 颗粒并且在应力集中足够大时会再发生 SiC 的解理断裂,从而导致材料最终断裂^[16]。因此减少游离 Si 的含量有助于提高材料的强度和韧性。

另一方面材料组织中没有出现大尺寸的 Si,而出现了很多细小的 SiC 颗粒以及被细小 SiC 颗粒分割出的细小 Si 单元(见图 4)。材料的强度和组织之间的关系符合 Hall-Petch 关系^[17]:

$$P = P_0 + kd^{-1/2}, \quad (1)$$

其中: P 和 d 分别为强度和材料组织中颗粒(或单元)的尺寸, P_0 和 k 为独立于颗粒(或单元)的常量。根据式(1)可知,材料强度随着组织中颗粒(或单元)尺寸的减小而增大。本文制备的 RB-SiC 组织中含有大量的细小 SiC 颗粒和被细小 SiC 颗粒分割形成的细小 Si 单元,因此其强度比较高^[18];而另两种材料虽然有碳纤维补强,但 Si 单元尺寸过大,达到几十微米,可以看作是材料中的一种缺陷,因此其强度较低^[15,19]。

图 5 为镜坯材料的断口金相组织,可以看出材料的断裂方式既有穿晶断裂,也有沿晶断裂。穿晶断裂主要发生在大 SiC 颗粒上,即颗粒扩展到大颗粒处无法偏转直接穿过大颗粒,裂纹比较平直(a 区域)。裂纹穿过大颗粒后扩展到细小

SiC 颗粒和 Si 单元区域则出现较多沿晶断裂现象,裂纹较为曲折(b 区域)。

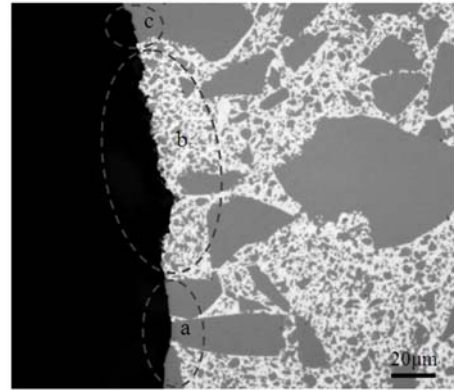


图 5 镜坯材料断口金相组织照片

Fig. 5 Microstructure of mirror material fracture

反射镜材料中细小的 SiC 颗粒和 Si 单元所占的比例高于大 SiC 颗粒,所以细小颗粒区域的曲折裂纹比例较高;而且裂纹穿过某些大颗粒时,由于应力场比较复杂,也会出现裂纹偏转曲折的现象(c 区域)。这两方面都增加了裂纹扩展的路径和需要的能量,提高了裂纹扩展的阻力,从而导致材料在没有纤维增韧的情况下仍具有比较高的断裂韧性。

3.3 超轻量化反射镜的各向同性度

在模具中流动时,浆料会受到模具的剪切作用,其中细长颗粒在剪切力的作用下会倾向于沿浆料流动方向定向排列;且剪切力越大,颗粒长径比越大,颗粒越容易定向排列^[20]。在浆料注入模具的过程中,浆料处于层流状态(雷诺系数 $Re \ll 2000$),不会扰乱 SiC 颗粒的定向排列,所以浆料固化时颗粒的定向排列会保持在坯体中。这种情况下反应烧结后的材料在浆料流动方向上的性能会有所提高,但也会导致材料的性能在浆料流动方向和垂直方向上的差异,即材料的各向同性度会降低。

反射镜材料要具有较高的各向同性度,否则温度或外力的扰动会降低其面形精度,影响光学系统的性能。为定量评价制备的超轻量化 SiC 反射镜材料的各向同性度,测试了反射镜镜面和加强筋部位平行于浆料流动方向和垂直于浆料流动方向上镜坯材料的模量和热膨胀系数(200~400 K),其结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,镜面不同方向上的热膨胀系数差异不大于 3%,模量

差异更小,仅为 1.3%;加强筋两个方向上热膨胀系数的差异也仅有 1.3%,由此大体可以认为镜坯材料为各向同性。因此在镜坯受到外力或者温度扰动时,其镜面和加强筋在不同方向的尺寸变化差异极小,有利于反射镜保持较高的面形精度。

表 3 镜坯材料不同方向的性能

Tab. 3 Properties of mirror in different directions

	镜面//	镜面⊥	加强筋//	加强筋⊥
热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6} \cdot K^{-1})$	2.37	2.30	2.36	2.33
弹性模量/GPa	307	303	—	—

注:“//”、“⊥”分别代表平行和垂直浆料流动方向

由于制备超轻量化反射镜所用的 SiC 微粉中细长颗粒的长径比较小,而且浆料在注入模具时速度较小($<5 \text{ cm/s}$),模具对浆料的剪切作用较弱,因此细长颗粒沿浆料流动方向排列的趋势较小,从而导致材料组织中细长颗粒并没有明显地定向排列(见图 4)。但所用的 SiC 粉体中以等轴状颗粒为主,细长颗粒较少,出现少量细长颗粒的轻微定向排列也不会引起材料明显的各向异性,因此镜坯具有比较好的各向同性度。

3.4 镜坯的光学加工性能

反应烧结过程中, SiC 颗粒之间的孔隙完全被 Si 填充,得到的反射镜镜坯完全致密,有较好的光学加工性能。图 6 为经过光学加工后的 $\Phi 200 \text{ mm}$ 超轻量化反射镜。



图 6 $\Phi 200 \text{ mm}$ 超轻量化 SiC 反射镜的光学加工镜面
Fig. 6 Surface of $\Phi 200 \text{ mm}$ ultra-lightweight SiC mirror after grinding

图 7 和图 8 分别是用 Zygo 干涉仪和 Zygo 粗糙度仪对光学加工后的 $\Phi 200 \text{ mm}$ 超轻量化 SiC 反射镜进行面形和表面粗糙度检测的结果。可以看出,抛光后超轻量化反射镜的面形精度(RMS 值)为 $0.043\lambda(\lambda = 632.8 \text{ nm})$,小于 $\lambda/20$;镜面粗糙度(R_a 值)为 4.65 nm ,测量区域为 $1.41 \text{ mm} \times$

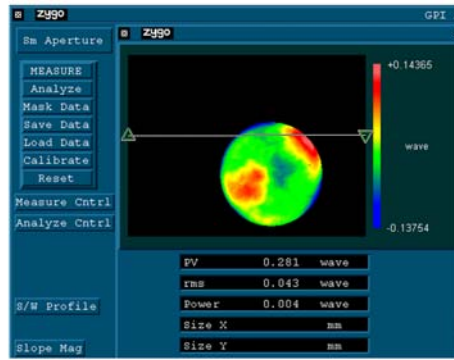


图 7 $\Phi 200 \text{ mm}$ 超轻量化 SiC 反射镜的面形检测结果
Fig. 7 Topographic measurement of $\Phi 200 \text{ mm}$ ultra-lightweight SiC mirror

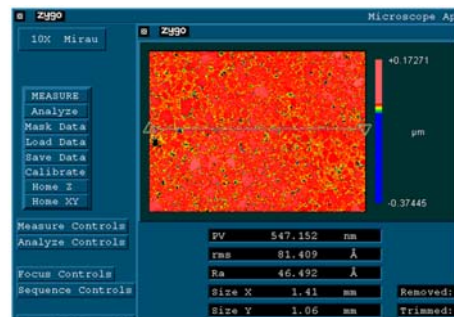


图 8 $\Phi 200 \text{ mm}$ 超轻量化 SiC 反射镜镜面的粗糙度检测结果

Fig. 8 Surface roughness of $\Phi 200 \text{ mm}$ ultra-lightweight SiC mirror

1.06 mm。由此可见,此工艺制备的超轻量化反射镜经光学加工后可以得到良好的面形精度和表面粗糙度。

4 结 论

本文采用真空辅助凝胶注模法制备了 $\Phi 200 \text{ mm}$ 和 $\Phi 500 \text{ mm}$ 致密无缺陷的超轻量化 SiC 反射镜,并检测了其性能。由于在真空环境下浇注,坯体没有宏观缺陷,而熔融 Si 填充了 SiC 颗粒之间的孔隙,因此得到了致密无缺陷超轻量化 SiC 反射镜。镜坯中细小的 SiC 颗粒将游离 Si 分割成细小单元,使材料具有较高的抗弯强度(335 MPa)和断裂韧性($4.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。镜坯中未出现细长 SiC 颗粒定向排列,材料沿浆料流动方向和垂直于浆料流动方向的性能差异很小,线膨胀系数差异小于 3%,弹性模量差异为 1.3%。

最后经光学加工, $\Phi 200 \text{ mm}$ 超轻量化反射镜

具有良好的面形精度 (RMS 值优于 $\lambda/20$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 和表面粗糙度 ($R_a < 5 \text{ nm}$)。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 赵文兴, 张 舸, 赵汝成, 等. 轻型碳化硅质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 lightweigh mirror blank [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2609-2617. (in Chinese)
- [3] 康健, 宣斌, 谢京江. 表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 824-833.
KANG J, XUAN B, XIE J J. Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 824-833. (in Chinese)
- [4] 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.
LI J F. Fabrication and test of SiC convex aspheric mirror [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 287-292. (in Chinese)
- [5] JOSEPH R, JAY S, DAVID L, *et al.*. Recent advances in reaction bonded silicon carbide optics and optical systems [J]. *SPIE*, 2005, 5868: 586802.
- [6] JAMES B H, RON E, STAHL H P, *et al.*. Cryogenic performance of lightweight SiC and C/SiC mirrors [J]. *SPIE*, 2004, 5487: 1018-1029.
- [7] SEIN E, TOULEMONT Y, SAFA F, *et al.*. A $\Phi 3.5 \text{ m}$ SiC telescope for HERSCHEL mission [J]. *SPIE*, 2003, 4850: 606-618.
- [8] TOULEMONT Y, PASSOGEL T, PILLBRAT G, *et al.*. The 3.5 m all SiC telescope for HERSCHEL [J]. *SPIE*, 2004, 5487: 1119-1128.
- [9] 张媛媛, 敬 畏, 程云涛, 等. $\Phi 510 \text{ mm}$ 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.
ZHANG Y Y, JING W, CHENG Y T. Design and finite analysis of $\Phi 510 \text{ mm}$ SiC ultra-lightweight mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1718-1724. (in Chinese)
- [10] 赵汝成, 包建勋. 大口径轻质 SiC 反射镜的研究与应用[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 552-558.
ZHAO R CH, BAO J X. Investigation and application of large scale lightweight SiC mirror [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 552-558. (in Chinese)
- [11] SANO S, ODA K, OHSHIMA K, *et al.*. Slip casting of silicon nitride and mechanical properties of sintered body (Part 5)—vacuum-pressure-assisted slip casting of silicon nitride powder produced by imide decomposition [J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 1995, 103(5): 939-943.
- [12] 吕振林, 熊流峰, 高积强, 等. 反应烧结碳化硅的显微组织气孔率及电阻率[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4): 48-51.
LÜ ZH L, XIONG L F, GAO J Q, *et al.*. Microstructure, porosity and resistivity in reaction-bonded silicon carbide [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1999, 33(4): 48-51. (in Chinese)
- [13] HIDEHIRO K, MASATAKA N, TADASHI I, *et al.*. Cryogenic optical testing of an 800 mm lightweight C/SiC composite mirror mounted on a C/SiC optical bench [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(20): 3941-3948.
- [14] MATTHIAS R K, TSUYOSHI O, MASAMI K, *et al.*. Manufacturing and performance test of a 800-mm space optic [J]. *SPIE*, 2008, 7018: 70180A-1-9.
- [15] OZAKI T, KUME M, OSHIMA T, *et al.*. Mechanical and thermal performance of C/SiC composites for SPICA mirror [J]. *SPIE*, 2005, 5868: 58680H-1-10.
- [16] 束成群, 蒋会宾, 李晓阳, 等. 反应烧结微米级 SiC 陶瓷材料的结构与力学性能[J]. 理化检验-物理分册, 2012, 48(11): 713-716.
SHU CH Q, JIANG H B, LI X Y, *et al.*. Microstructures and mechanical properties of reaction sintered micro silicon carbide ceramics [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)*, 2012, 48(11): 713-716. (in Chinese)
- [17] JANG B K, KIM S Y, HAN I S, *et al.*. Influence of uni and bi-modal SiC composition on mechanical properties and microstructure of reaction-bonded SiC ceramics [J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2010, 118(11): 1028-1031.

- [18] SUYAMA S, KAMEDA T, ITOH Y. Development of high-strength reaction-sintered silicon carbide [J]. *Diamond and Related Materials*, 2003, 12(3-7):1201-1204.
- [19] ENYA K, YAMADA N, IMAI T, *et al.*. High-precision CTE measurement of hybrid C/SiC composite for cryogenic space telescopes [J]. *Cryogenics*, 2012, 52(1):86-89.
- [20] 曾宇平, 江东亮, 谭寿洪. 定向排布层状 SiC 晶须补强 Al₂O₃ 复相陶瓷的制备及其性能[J]. *硅酸盐学报*, 1998, 26(5):558-564.
- ZENG Y P, JIANG D L, TAN S H. Fabrication and properties of unidirectionally SiC whiskers-reinforced multilayers Al₂O₃ matrix composites [J]. *Journal of Chinese Ceramic Society*, 1998, 26(5):558-564. (in Chinese)

作者简介:



董斌超(1986—),男,陕西咸阳人,硕士,研究实习员,2009年于湖南大学获得学士学位,2012年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事轻型碳化硅反射镜制备技术的研究。E-mail:dbczyg@163.com



张 舸(1980—),男,重庆荣昌人,副研究员,2003年于长春理工大学获得学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事轻型碳化硅反射镜制备技术的研究。E-mail:zhanggeciomp@126.com

(本栏目编辑:曹 金)

(版权所有 未经许可 不得转载)