

文章编号 1004-924X(2009)04-0771-07

# 固着磨料加工碳化硅反射镜的实验

王 旭<sup>1,2</sup>, 张学军<sup>1</sup>, 徐领娣<sup>1,2</sup>, 裴 舒<sup>3</sup>, 刘建卓<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造  
技术重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**考虑固着磨料加工工艺其固着磨料与工件相对运动关系固定,有利于精确加工,提出了采用该工艺加工碳化硅反射镜的方法,利用大颗粒金刚石磨料快速加工出了较好的镜面质量。在工艺实验中,分别测得了W7, W5, W3.5, W1.5固着磨料丸片在特定转速和压力下对碳化硅材料的去除特性。对多组去除量曲线的分析表明,此工艺不仅有着较高的去除率,而且稳定性良好。对表面粗糙度测量的结果表明,使用W7丸片即可获得粗糙度为42.758 nm rms的镜面。减小所用丸片的粒度,工件表面粗糙度随之减小,使用W1.5丸片抛光后,最终获得了粗糙度为1.591 nm rms的光滑镜面。实验结果表明,固着磨料加工碳化硅反射镜工艺在粗研、精研、粗抛等加工阶段内可以取代传统的散粒磨料加工工艺。

**关键词:**碳化硅反射镜; 固着磨料; 丸片; 去除率; 表面粗糙度

**中图分类号:** TQ171.65; TN304.05 **文献标识码:** A

## Experiment of grinding SiC mirror with fixed abrasive

WANG Xu<sup>1,2</sup>, ZHANG Xue-jun<sup>1</sup>, XU Ling-di<sup>1,2</sup>, PEI Shu<sup>3</sup>, LIU Jian-zhuo<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** A new technique called fixed abrasive surfacing technique is presented for manufacturing SiC reflecting mirrors, and a mirror with good quality is obtained by grinding with bigger diamond abrasives at a high speed and the fixed motion between abrasives and workpieces. The material removal characteristics on the SiC are measured at certain rotation speed and pressure by W7, W5, W3.5, W1.5 pellets, and the removal characteristic curves obtained by above experiments show that this method can offer a higher removal rate and stability for the mirror manufacturing. In addition, a surface roughness experiment is undertaken, and the results indicate that a surface roughness of 42.758 nm rms can be obtained by W7 pellets. The experiment also indicates that the surface roughness is decrease with changing pellets in a smaller diamond diameter. At

收稿日期:2008-04-10; 修订日期:2008-06-06.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新基金资助项目

the end of the experiment, a smooth surface in a roughness of 1.591 nm rms is gotten after using W1.5 pellets. These results conmonstrate that the proposed technique for manufacturing SiC reflecting mirrors with fixed abrasives is able to replace the traditional manufacturing technology with slurry abrasives completely in certain finishing phases.

**Key words:** SiC mirror; fixed abrasive; pellet; cutting rate; surface roughness

## 1 引言

碳化硅作为光学反射镜材料的研究始于 20 世纪 80 年代,经过了 20 多年的研发,碳化硅材料以其物理性能优异、工艺性能良好而发展成为一种具有广阔应用前景的新型光学材料。与其他光学材料相比,SiC 有比刚度大,单位应力引起的结构变形小,可以降低反射镜的厚度且提高轻量化程度;热传导性能好等优势<sup>[1-2]</sup>。当环境温度变化时 SiC 材料内部容易达到温度平衡,不会引起较大的内应力,因此对环境适应能力强、寿命长,热变形系数小,抗热冲击性极佳,镜体在较宽的温度范围内具有良好的热稳定性;材料无毒,对加工人员无危害。

碳化硅材料因制备工艺不同可以分为:热压烧结碳化硅、多相烧结碳化硅、反应烧结碳化硅、化学沉积碳化硅和浸渍碳化硅等若干种。其中由于反应烧结碳化硅可以制备形状复杂、轻量化程度高的大口径镜坯,所以多被应用于空间反射镜镜坯制造。

碳化硅光学元件的传统加工方法主要为散粒磨料加工,它是使用由水和抛光粉及适量的添加剂组成的抛光液进行加工<sup>[3-4]</sup>。此工艺的缺点主要为:

- (1) 抛光盘转速不高,导致加工效率较低。
- (2) 磨料在抛光盘上为随机分布,导致去除函数不稳定,降低了加工精度的稳定性。
- (3) 在各研磨加工工序间要对工件进行严格的清洗,费时费力,另外也容易造成加工环境污染。

碳化硅因其高硬度、复杂的晶相结构,若使用传统方法加工出精度较高的反射镜需要很高的成本和大量的时间。为了克服上述缺点,经过工艺改进,于上个世纪末出现了固着磨料加工工艺。它是磨料与特殊的树脂相结合而制成,其加工工

艺能够很好克服散粒磨料工艺带来的问题<sup>[5]</sup>。

固着磨料加工工艺的主要优点为:

- (1) 不存在磨料飞溅问题,因此研磨、抛光速度快,效率高;
- (2) 磨料在丸片中分布稳定,去除函数稳定性高,有利于精确加工;
- (3) 磨料利用率高,从而降低加工成本;
- (4) 冷却液、润滑剂均为去离子水,对加工环境污染小。

本文给出了固着磨料加工反应烧结碳化硅反射镜的实验过程,详细解释了工艺实验所获得的结果,从多方面证明了使用固着磨料加工碳化硅反射镜的可行性,也为进一步的研究奠定了实验基础。

## 2 理论基础

碳化硅材料加工的理论基础主要为 Preston 方程,

$$\frac{dz(x,y,t)}{dt} = K \cdot P(x,y,t) \cdot V(x,y,t), \quad (1)$$

其中, $K$  为常量系数, $t$  表示时间, $P$  为在瞬时  $t$  磨盘所受压强, $v$  为在瞬时  $t$  磨盘运动速度。

本文的实验并不是直接基于 Preston 方程,而是基于其方程的积分形式。

Preston 方程积分得:

$$\Delta z(x,y) = \int \frac{dz}{dt} dt = K \cdot \int_0^t P(x,y,t) \cdot V(x,y,t) \cdot dt. \quad (2)$$

由于在本文的实验过程中压力与速度是与时间无关的量,故式(2)可写成:

$$\Delta z(x,y) = K \cdot P(x,y) \cdot v(x,y) \cdot \int_0^t dt = K \cdot P(x,y) \cdot v(x,y) \cdot t, \quad (3)$$

最终表示为:

$$\Delta z(x,y) = K'(x,y) \cdot t, \quad (4)$$

其中  $K'(x, y) = K \cdot P(x, y) \cdot V(x, y)$ .

### 3 加工实例

在整个实验过程中,依次使用了4种丸片,它们的规格分别为  $\phi 10 \times 4, W7, R_{\infty}$ ;  $\phi 10 \times 5, W5, R_{\infty}$ ;  $\phi 10 \times 5, W3.5, R_{\infty}$ ;  $\phi 10 \times 5, W1.5, R_{\infty}$ ,即直径为10 mm,厚度为5 mm,表面面形为平面,磨料粒度分别为  $7 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 、 $3.5 \mu\text{m}$ 、 $1.5 \mu\text{m}$ 。它们被粘接到直径为4 cm的圆型铸铁盘上,之后再固定到由伺服电机带动的磨头上以特定的转速和偏心距旋转。碳化硅工件材料为本所自行研制的反应烧结碳化硅,它被固定在一个三轴联动的平台上。冷却液为去离子水。

加工设备为我所自行研制的非球面数控加工中心 FSGJ-1<sup>[6-7]</sup>,磨头为平转动运动方式,其最大转速为200 r/min,最大压强为0.5 MPa,最大偏心距1 cm。

实验加工装置示意图如图1所示:

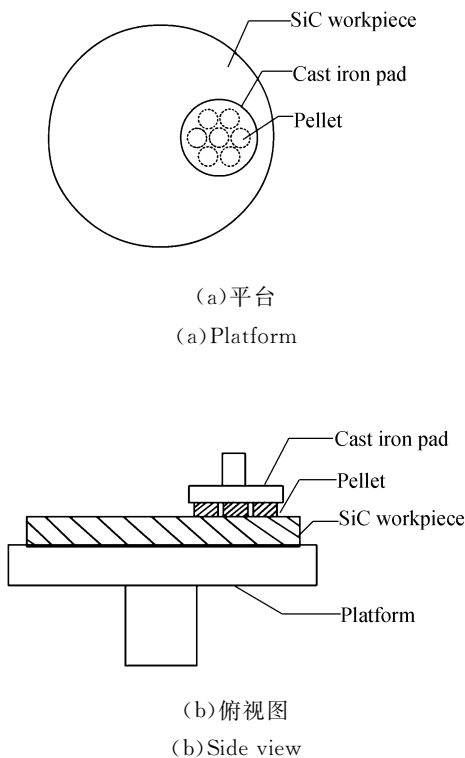


图1 实验示意图

Fig. 1 Sketch of experiment

由于在加工初始阶段,反射镜面形误差较大,所以首先使用W7的丸片对碳化硅反射镜进行全口径精细研磨,主轴转速设定为80 r/min,偏心距设定为1 cm,压强恒定,在获得较好面形的同时去除掉上道加工阶段留下的表面破坏层。使用干涉仪记录初始面形,并把其作为参考面。之后在工件中心区域进行定点精研。每个加工周期为60 min,重复5次精研周期,并在每个周期结束后使用干涉仪测量并记录所得面形。把参考面计算在内,共获得6组面形数据。在这6组面形数据中抽取具有相同位置的母线数据来做对比,形成去除量曲线。由此数据计算便可获得W7丸片的去除率。最后,使用AFM在工件中心区域测量其表面粗糙度,获得工件表面质量的直观反映。在整个精研期间,不对丸片做任何修整。

随工件面形不断收敛,表面粗糙度减小,分别更换W5,W3.5,W1.5丸片,重复上述过程,依次可获得与丸片规格对应的去除量曲线及工件表面粗糙度。

## 4 结果分析及讨论

### 4.1 材料去除特性

根据实验方法中所述步骤处理数据后获得各规格丸片的去除量曲线。结果如图2所示。

为方便比较,将图2中各规格丸片平均去除率数据总结于表1:

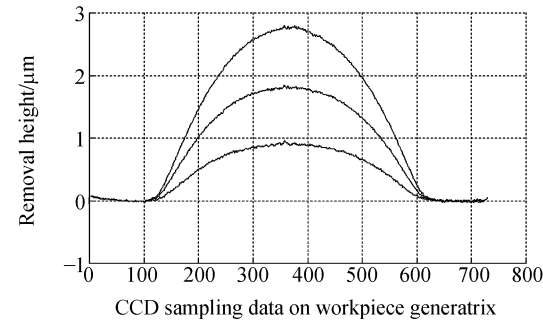
表1 各规格丸片加工结果对比

Tab. 1 Comparison of removing results and different pellets

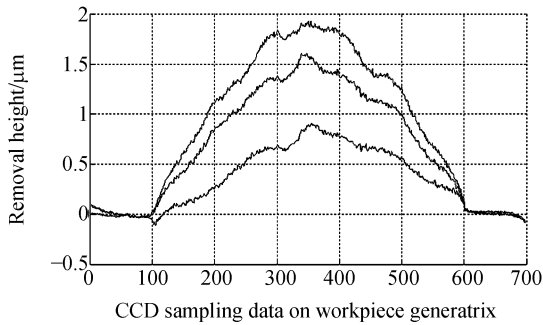
从参考面开始的 加工时间(min)	60	120	180
W7丸片最大去除率( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	0.016	0.015 4	0.015 6
W5丸片最大去除率( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	0.014 0	0.013 4	0.011 0
W3.5丸片最大去除率( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	0.010 4	0.009 1	0.008 0
W1.5丸片最大去除率( $\text{nm}/\text{min}$ )	0.319 2	0.383 3	0.405 6

通过对各规格丸片的去除量曲线及表1的分析可得:

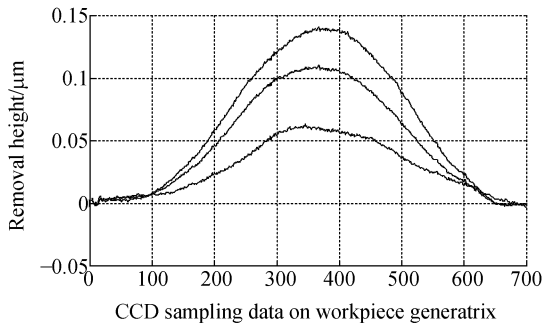
(1) 每组去除量曲线分布均匀,表明固着磨料加工工艺的材料去除稳定。对表 1 的各组数据分析表明,各组丸片最大去除率的标准差分别为 0.000 2,0.0013 8,0.001 0,0.033 6,其与各组最大去除率平均值的比值分别为 1.59%,10.12%,10.70%,9.95%。除 W7 丸片偏差比较小外,其他丸片的比值均非常接近,说明各组丸片的最大去除率上下浮动比值接近;结果也证明了固着



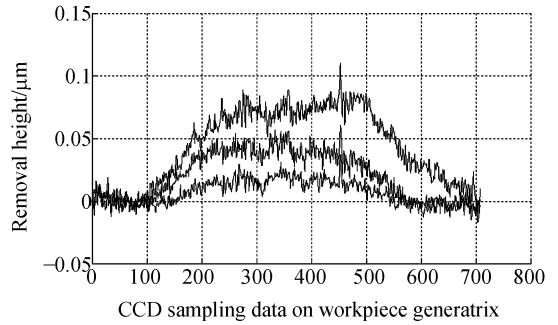
(a) W7 丸片  
(a) W7 pellet



(b) W5 丸片  
(b) W5 pellet



(c) W3.5 丸片  
(c) W3.5 pellet



(d) W1.5 丸片  
(d) W1.5 pellet

图 2 各规格丸片的去除量曲线

Fig. 2 Curves of removal amounts with W7 pellet

磨料加工工艺的去除稳定性。由此,可以认为固着磨料加工工艺的去除率受外界干扰影响较小,尤其与传统加工工艺相比较,去除率更容易维持在一定数值区间内,非常有利于精确加工。

(2) 从图 2(d) 可看出,其高频成分较多。主要是由于 W1.5 丸片最大去除率较小,在每次的检测过程中,装调误差对其影响非常大,所以才出现了大量的高频成分。对(d)组曲线进行低频拟合,结果如图 3:

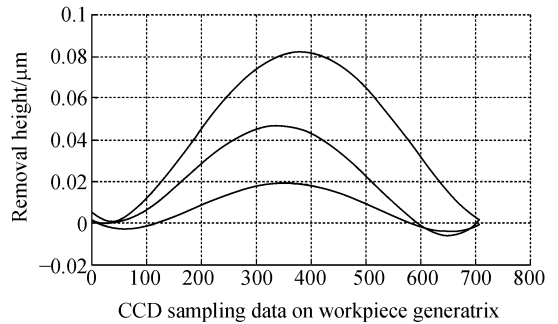


图 3 W1.5 丸片去除量曲线的低频拟合

Fig. 3 Low frequency fits of W1.5 pellet removal curves

#### 4.2 表面粗糙度

在工件中心加工区域使用 DI 公司的 Dimension™ 3 100 的原子力显微镜进行一系列测量,其取样长度均为 10 μm,采样点数为 256,结果如图 4 所示:

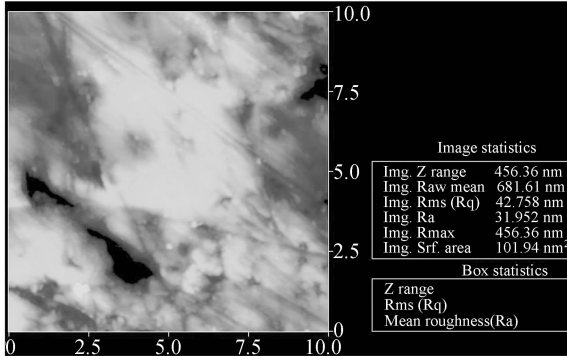
在整体加工过程中,表面粗糙度的变化趋势如图 5:

如图 5 所示,W7 丸片加工完成后获得的粗糙度为 42.758 nm,使用 W5 丸片加工后迅速降

低到 17.219 nm,之后 W3.5,W1.5 丸片的使用使得表面粗糙度都很快下降,直到最后的 1.591 nm。

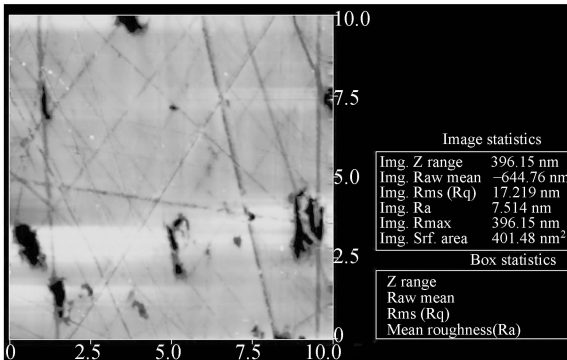
对图 4、5 的分析表明:

(1)对传统工艺而言,若要获得粗糙度均方根 <2 nm 的表面需要使用 W0.5 的金刚石微粉,而固着磨料工艺使用 W1.5 的丸片即可获得 1.591 nm rms 的表面。表明利用固着磨料工艺可以使用较粗的磨料来获得较好的工件表面质量。



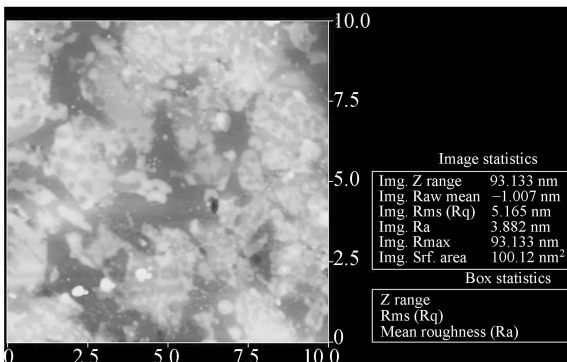
(a) W7 丸片加工结果:RMS=42.758 nm

(a) W7 fabrication result:RMS=42.758 nm



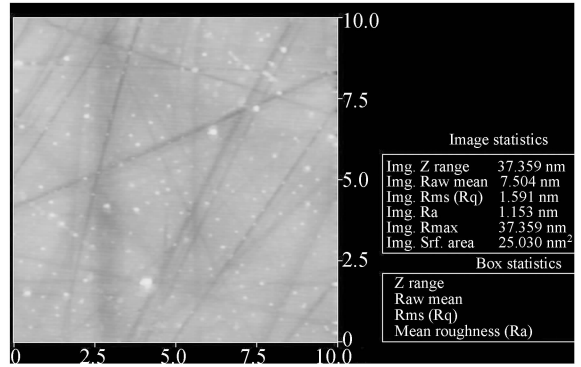
(b) W5 丸片加工结果:RMS=17.219 nm

(b) W5 fabrication result:RMS=17.219 nm



(c) W3.5 丸片加工结果:RMS=5.265 nm

(c) W3.5 fabrication result: RMS=5.265 nm



(d) W1.5 丸片加工结果:RMS=1.591 nm

(d) W1.5 fabrication result: RMS=1.591 nm

图 4 AFM 测量结果对比

Fig. 4 Comparison of AFM testing results

(2)随磨料粒度的增加,所获得的工件表面粗糙度呈 e 指数趋势增长。

(3)在整个实验过程当中,发现丸片表面与工件的吻合度对粗糙度有一定影响,因此在加工开始前需对丸片表面面形进行必要修整。

(4)从图 4(b)、(d)中可以看到工件表面有明显的划痕,经分析主要是由两点原因造成的:(1)由于丸片内含有相对较多的大于标准规格直径的金刚石磨料,加工过程中在工件表面极易造成划痕。所以在丸片制作过程中应对使用的金刚石磨料有

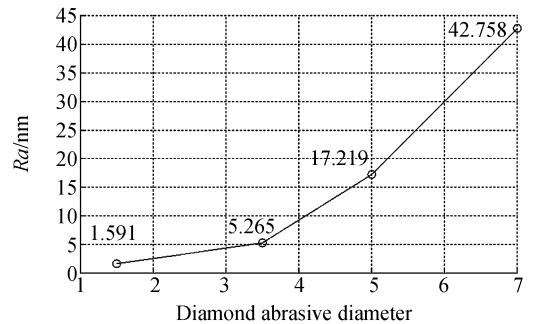


图 5 各加工工序中表面粗糙度的对比

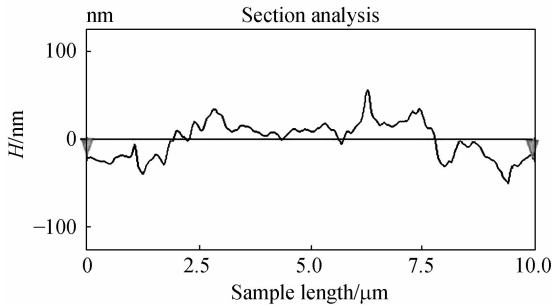
Fig. 5 Surface roughness comparison in each working procedure

着更为严格的筛选措施。(2)划痕的出现也有可能由于没有完全清洗掉上道工序所残留下的废料,因此在各道工序间的清洗工作应做到细致认真。

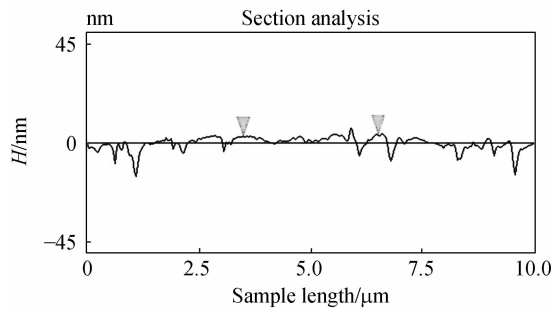
(5)为获得更为直观的对比,针对图 4 通过

Nanoscope III 5.12r2 软件中的 section 选项提取出局部表面轮廓曲线,其取样长度为  $10\ \mu\text{m}$ ,结果如图 6:

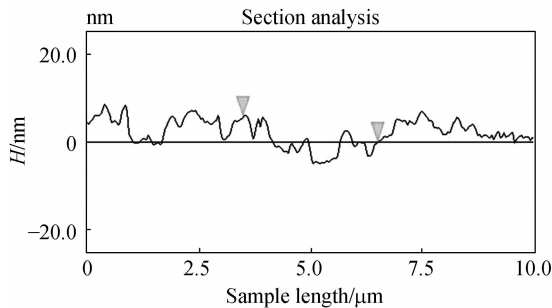
图 6 可清晰地了解到工件表面轮廓曲线的变化趋势,即随着所使用的磨料粒度减小,工件表面质量明显提高。



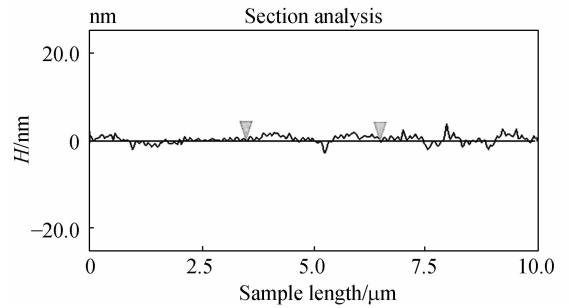
(a) W7 丸片  
(a) W7 pellet



(b) W5 丸片  
(b) W5 pellet



(c) W3.5 丸片  
(c) W3.5 pellet



(d) W1.5 丸片  
(d) W1.5 pellet

图 6 使用不同型号丸片获得的工件表面的轮廓变化曲线  
Fig. 6 Profile changing curves by using different type pellets

## 5 结 论

本文针对传统的散粒磨料工艺加工碳化硅反射镜过程中存在的工作函数不稳定、效率低、成本高、对周围加工环境污染严重等一系列问题,提出了采用较为新颖的固着磨料加工工艺来加工碳化硅光学反射镜。在实验验证过程中,固着磨料工艺克服了传统工艺中由于磨料随机分布于工件之上造成的工作函数不稳定的问题,提供了高效且稳定的去除函数。另外,在同等磨料粒度条件下,固着磨料工艺获得的碳化硅反射镜表面粗糙度值远低于采用传统散粒磨料工艺所获得的结果,使用 W1.5 粒度的丸片即可获得粗糙度为  $1.591\ \text{nm rms}$  的良好光学表面。因此,使用固着磨料可以采用相对较大的磨料粒度获得较好的表面质量,同时降低了加工成本。从本文最终的结果来看,与传统加工工艺相比,固着磨料工艺用于加工碳化硅光学反射镜具有去除函数稳定,加工效率高,成本低,环境污染小等一系列的优势,因此在粗研、精研、粗抛等加工阶段完全可以取代传统加工工艺。

## 参考文献:

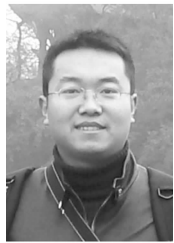
- [1] EALEY M A, WEAVER G Q. Developmental history and trends for reaction bonded silicon carbide mirrors[J]. *SPIE*, 1996, 2857: 66-72.

- [2] 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 mir-

- ror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):179-184. (in Chinese)
- [3] 薛栋林,张忠玉,张学军. 一种中小口径非球面元件数控抛光技术[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2): 198-204.  
XUE D L, ZHANG ZH Y, ZHANG X J. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):198-204. (in Chinese)
- [4] 张忠玉,张学军,牛海燕. 中小口径非球面元件加工技术的探讨[J]. *光学技术*, 2001, 27(6):42-43.  
ZHANG ZH Y, ZHANG X J, NIU H Y. Discussion on the fabrication technology of middle and small size aspheric optics element [J]. *Optical Technology*, 2001, 27(6):42-43. (in Chinese)
- [5] TAM H Y, CHENG H B, WANG Y W. Removal rate and surface roughness in the lapping and polishing of RB-SiC optical components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192: 276-280.
- [6] 张学军,张云峰,余景池,等. FSGJ-1 非球面自动加工及在线检测系统[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(2): 70-76.  
ZHANG X J, ZHANG Y F, YU J CH, et al.. FS-GJ-1 system of asphere automaking and on-line testing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(2): 70-76. (in Chinese)
- [7] 郑立功,张学军,张峰. 矩形离轴非球面反射镜的数控加工[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1):113-117.  
ZHENG L G, ZHANG X J, ZHANG F. NC surfacing of two off-axis aspheric mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):113-117. (in Chinese)

#### 作者简介:



王旭(1982—),男,辽宁沈阳人,2005年于大连理工大学获学士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事光学精密加工与检测方面的研究。E-mail: wangxu-308@163.com



徐领娣(1980—)女,河北保定人,2004年于长春理工大学获得学士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士,主要从事先进光学制造技术方面的研究。xuldi@126.com



刘建卓(1983—),男,吉林乾安人,现为长春光机所在读博士,主要研究方向为计算机图像处理。E-mail: ljz0220@163.com



裴舒(1952—)男,辽宁沈阳人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室高级工程师,主要从事技术支持。

#### 导师简介:



张学军(1968—),男,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,中科院百人计划获得者,主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn