

# 机器人气囊抛光 SiC 光学元件加工特性研究

黄智<sup>1</sup>, 周涛<sup>1</sup>, 吴湘<sup>1,2</sup>, 刘海涛<sup>2</sup>, 万勇健<sup>2</sup>, 郑晓<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学机械与电气工程学院, 611731, 成都; 2. 中国科学院光电技术研究所, 610209, 成都)

**摘要:** 针对碳化硅光学元件已有的化学机械抛光、磁流变抛光、电化学抛光和催化剂辅助抛光等方式存在材料去除率低、成本高等问题,提出机器人气囊抛光方法,并对气囊抛光特性、抛光头机械结构进行了研究。首先基于 Preston 理论和赫兹接触理论以及速度分析建立了材料理论去除模型,并对去除函数进行了仿真,再此基础上设计了气囊抛光磨头装置。然后对非球面碳化硅元件开展了单点和多点抛光,实验验证了去除函数的精确性和稳定性。最后通过粗抛和精抛进行加工应用验证,实验结果表明,所提出方法能够有效实现碳化硅光学元件抛光,并且去除函数精度高稳定性强,通过 3 个周期的粗抛、4 个周期的精抛,面形收敛率分别为 69.4%、51.9%,且收敛速度快、加工精度高。

**关键词:** 气囊抛光;碳化硅;去除函数;抛光头

**中图分类号:** TH161 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202012003 **文章编号:** 0253-987X(2020)12-0022-08



OSID 码

## SiC Optical Element Processing Properties Under Robot Bonnet Polishing

HUANG Zhi<sup>1</sup>, ZHOU Tao<sup>1</sup>, WU Xiang<sup>1,2</sup>, LIU Haitao<sup>2</sup>, WAN Yongjian<sup>2</sup>, ZHENG Xiao<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

**Abstract:** Aiming at the low material removal rate and high cost in the existing magnetorheological polishing, electrochemical polishing and catalysts-assisted polishing methods for silicon carbide optical elements, a robot bonnet polishing method is proposed, and the polishing characteristics and mechanical structure of polishing head are investigated. The theoretical material removal model is established following Preston theory, Hertz contact theory and velocity analysis, the removal function is simulated, and the bonnet polishing grinding head device is designed. Then single-point and multi-point polishing experiments are carried out to verify the accuracy and stability of the removal function. The processing applications are examined by rough and fine finishing. The experimental results show that the proposed method can effectively achieve silicon carbide optical element polishing, and the removal function has high precision and stability. Via 3 cycles of rough polishing and 4 cycles of fine polishing, the convergence rate of surface profile achieves 69.4% and 51.9% respectively.

**Keywords:** bonnet polishing; silicon carbide; removal function; polishing head

碳化硅(SiC)因其具有众多优异的物理化学特性被广泛应用于光学元件中<sup>[1]</sup>。但由于 SiC 自身的

收稿日期: 2020-06-28。作者简介: 黄智(1977—),男,副教授。基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0500400); 四川省科技计划资助项目(2020YFG0407)。  
网络出版时间: 2020-09-04 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200903.1725.006.html>

材料属性相比其他光学材料具有更大的硬度,以及作为非球面反射镜时,通常非球面度较高,加工和制造比较困难,因此 SiC 材料的加工工艺研究是目前亟待解决问题<sup>[2-3]</sup>。

潘继生等采用集群磁流变抛光方法对 SiC 基片平面抛光 30 min,使表面粗糙度减小 87%<sup>[4-5]</sup>。黄智等针对工业机器人进行大口径光学元件的抛光过程中机器人自身定位误差会导致抛光压力产生波动的问题,提出了一种机器人恒压球形公自转磨头抛光方法,对其结构、工作原理、机器人定位特性以及抛光压力输出特性开展了研究,并用于 SiC 抛光实验中<sup>[6]</sup>。牟志超等针对 CCOS 小工具抛光陡度较高的 SiC 非球面镜时面形存在误差收敛慢的问题,采用新型的球形磨头抛光技术,具有抛光快速高效、去除函数稳定、束径较小且形状趋于高斯分布等优点<sup>[7]</sup>。何艳等采用机械研磨与光催化辅助化学机械抛光,改善现有碳化硅抛光方法存在的效率低、有污染、损伤大等问题<sup>[8]</sup>。Tam 等提出了两阶段的制造工艺<sup>[9]</sup>,先用固定固体颗粒状磨料的平板,快速去除表面误差和初始平滑,然后用毛毡和金刚石磨具进行细微表面抛光。Dong 采用了基于固定磨料金刚石微球的光学加工技术,获得了硅碳圆磨料抛光中具有高去除率和稳定性的去除函数<sup>[10]</sup>。

Neslen 等研究了温度、抛光液 pH 值、施加压力和抛光速率对材料去除率的影响,采用硅凝胶抛光浆和聚氨酯/聚酯纤维抛光垫对碳化硅圆片进行抛光<sup>[11]</sup>。Nitt 等采用高去除率的碳化硅(SiC)化学机械抛光(CMP)料浆来缩短抛光时间,了解氧化剂在 SiC 抛光机理中的作用,对氧化剂进行优化,提高反应活性,提高 SiC 的去除率<sup>[12]</sup>。Nguye 等研究了碳化硅在固定磨料抛光和松散磨料水射流冲击条件下的磨损机理,通过抛光,可获得亚微米表面光洁度<sup>[13]</sup>。Sako 等采用扫描电镜和透射电镜,研究了化学机械抛光过程中引入的 4H-SiC 晶圆片的表面形貌和亚表面缺陷结构,详细分析了 CMP 过程中高密度晶格缺陷组成的局部损伤<sup>[14]</sup>。Kubota 等用铁磨粒和过氧化氢溶液对碳化硅衬底表面进行抛光,分析了 SiC 化学抛光机理<sup>[15]</sup>。Lagudu 等采用硅料浆抛光 SiC 研究发现,二氧化硅分散体的离子强度在提高材料去除率方面起着重要作用,同时也提供了非常好的抛光后表面光滑性<sup>[16]</sup>。

综上所述, SiC 光学元件抛光研究已经取得了较大的进展,目前主要采用磁流变抛光、化学机械抛光等方式,但是磁流变抛光去除效率低<sup>[17]</sup>,化学机

械抛光多采用小工具,效率低下且性价比不高。因此,需要开发一种新型高效率的抛光方法,对 SiC 进行高效低成本抛光。气囊抛光技术作为一种有前景的抛光方法,被越来越广泛地应用于光学制造领域,该方法加工效率高且抛光后的光学元件面形精度高<sup>[18]</sup>。

本文提出基于工业机器人气囊抛光方式,实现了对 SiC 光学元件抛光的加工方法,建立了材料去除模型,完成了气囊抛光磨头的机械结构设计,然后通过去除函数的稳定性实验,验证机器人气囊抛光工艺对 SiC 光学元件的有效性,最后还开展了 SiC 加工应用实验。

## 1 SiC 气囊抛光特性分析及工具设计

### 1.1 去除函数模型

Preston 方程被广泛应用于光学元件抛光加工的材料去除预测模型中<sup>[19]</sup>。材料去除模型可表示为

$$\Delta h(x, y) = KP(x, y)V(x, y) \quad (1)$$

式中: $\Delta h(x, y)$ 为抛光区域抛光点 $(x, y)$ 处单位时间内的材料去除深度; $P(x, y)$ 为施加在抛光区域的抛光压力; $V(x, y)$ 为抛光头与工件的相对抛光速度; $K$ 为受抛光工件材料、气囊材料性质、抛光液以及环境温度等因素影响的 Preston 系数。求得在单位时间  $T$  内的材料去除量即材料去除函数,表示为

$$R(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta h(x, y) dt = \frac{K}{T} \int_0^T P(x, y)V(x, y) dt = \frac{K}{2\pi} \int_{-\theta}^{\theta} P(x, y)V(x, y) d\theta \quad (2)$$

式中: $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 。

抛光头和工件接触模型简化如图 1 所示,满足赫兹接触理论,两曲面接触区域为椭圆<sup>[20]</sup>, $a$  与  $b$  分别代表椭圆的长、短半轴, $R_1$ 、 $R'_1$  和  $R_2$ 、 $R'_2$  分别为两接触曲面的主曲面最大和最小半径。对抛光过程

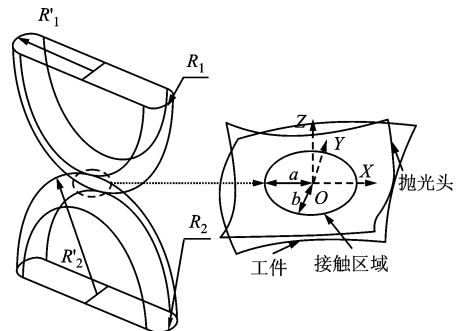


图 1 气囊和工件接触模型

的法向压力分布进行分析,接触应力模型可表示为

$$P(x, y) = \frac{3F}{2\pi ab} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} \quad (3)$$

$$a = \sqrt{\frac{3L(e)F}{\pi k^2 \sum \rho} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)} \quad (4)$$

$$b = \sqrt{\frac{3L(e)kF}{\pi \sum \rho} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)} \quad (5)$$

$$k = b/a \quad (6)$$

$$h' = 3kFK(e) \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) / b \quad (7)$$

$$e = \sqrt{1 - k^2} \quad (8)$$

$$K(e) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \theta}} \quad (9)$$

$$L(e) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - e^2 \sin^2(\alpha)} d\alpha \quad (10)$$

$$\sum \rho = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \quad (11)$$

式中:  $E_1$ 、 $E_2$  以及  $\nu_1$ 、 $\nu_2$  分别为抛光头与工件的弹性模量和泊松比,本文抛光头的材料为橡胶,工件为碳化硅,其弹性模量和泊松比分别为  $E_1 = 0.0078$  GPa,  $\nu_1 = 0.47$ ,  $E_2 = 450$  GPa,  $\nu_2 = 0.142$ ;  $h'$  为下压量;  $e$  为椭圆偏心;  $K(e)$  为第一类椭圆积分;  $L(e)$  为第二类完全椭圆积分;  $\sum \rho$  为抛光头和工件的主曲率之和。

气囊抛光头与工件曲面接触时,抛光接触区域的速度分布受到抛光头的变形以及工件表面曲率变化的影响变得复杂,同样需要对其速度分布进行分析。机器人气囊抛光加工平面示意图如图2所示。对点  $G(x, y)$  建立如图3所示的接触几何模型并对抛光区域的速度分布进行分析。如图3a所示,抛光区  $G(x, y)$  点速度为

$$v_w = \omega \sqrt{y^2 + (x \cos \alpha + (R_1 - h') \sin \alpha)^2} \quad (12)$$

在抛光加工过程中,只有抛光切向速度影响加工材料去除效果<sup>[21]</sup>。抛光区域  $G(x, y)$  点的速度  $v_w$  可分解为法向速度  $v_n$  和切向速度  $v_t$ ,则切向速度为

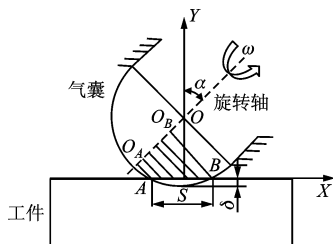
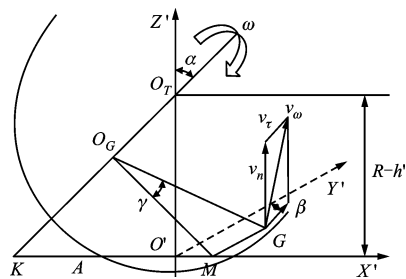
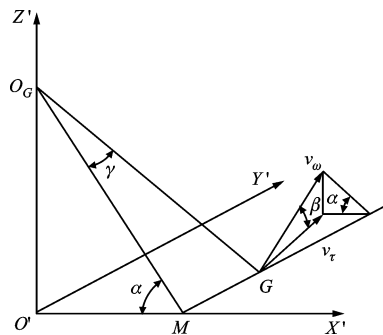


图2 平面工件的抛光加工平面示意图



(a) 速度分布几何模型



(b) 切向速度几何模型

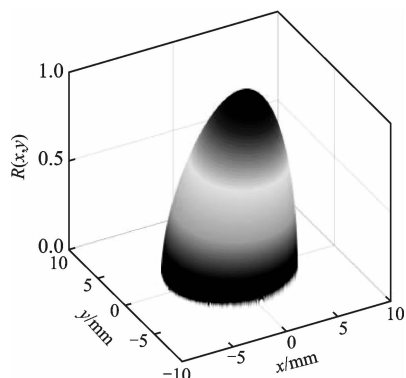
图3 加工接触几何模型

$$v_t = \omega \sqrt{(x \cos \alpha + (R_1 - h') \sin \alpha)^2 + y^2 \cos^2 \alpha} \quad (13)$$

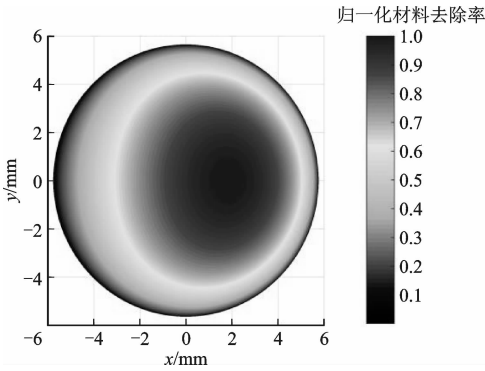
将式(3)(10)代入式(2),得到去除模型表达式为

$$R(x, y) = K\omega \sqrt{\frac{9L^2(e)F^2}{\pi^2 k (\sum \rho)^2} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^2} \cdot \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \left( \left( 1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right) \{ [x \cos \alpha + (R_1 - h') \sin \alpha]^2 + y^2 \cos^2 \alpha \} \right)^{1/2} d\theta \quad (14)$$

对去除函数进行归一化处理并进行仿真,如图4所示。去除函数大体呈高斯分布,且面形平滑收敛度好,在  $Y-Y$  截面上呈对称分布,而最大抛光去除的位置沿  $X$  轴线正向有轻微偏移的现象,并且逐渐靠近抛光区域的边缘,工件材料的去除量逐渐减小。这是因存在抛光头固定倾斜角以及抛光区域速



(a) 归一化去除函数模型



(b)去除函数平面分布  
图 4 材料去除函数仿真

度场的分布特性所决定。

1.2 气囊抛光工具的结构设计

设计的气囊抛光工具如图 5 所示,主要由空心轴、编码器、前后轴承、锁紧螺母、外壳、直驱电机、前/后防护壳、液压胀紧套以及球冠型橡胶抛光头所组成。其中,抛光头由球冠型弹性橡胶制成,外表面沾附了一层可吸附抛光磨粒的聚氨酯材料。为了安装在机器人末端,气囊抛光工具主轴的外壳上预留了具有安装定位作用的螺钉孔,锁紧螺母将直驱电机的转子与空心轴相连,球冠型橡胶气囊抛光头的外部附有聚氨酯材料,球冠型橡胶气囊抛光头可根据实际加工需要采用实心或空心两种结构。抛光工具的传力架、抛光主轴、抱紧连接板以及导轨的质量由气缸输出的压力所平衡。采用音圈电机输出的抛光力实现抛光压力的精确控制,产生的力通过传力架最终传递到抛光主轴末端即球冠型橡胶抛光头与工件的接触区域。

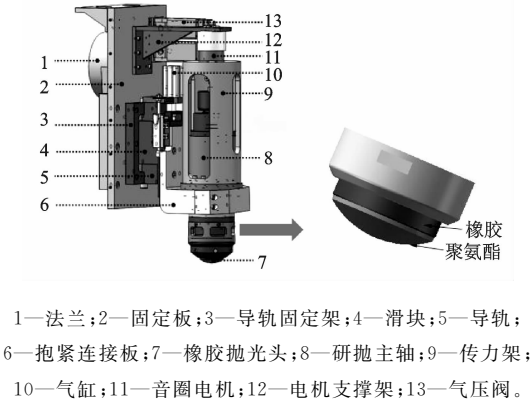


图 5 机器人气囊抛光头机械结构

在实际工程应用当中,因为抛光主轴角速度的存在,装置的低阶固有频率容易被激发,因此本文对抛光工具进行了 6 阶模态分析,模态云图如图 6 所示。

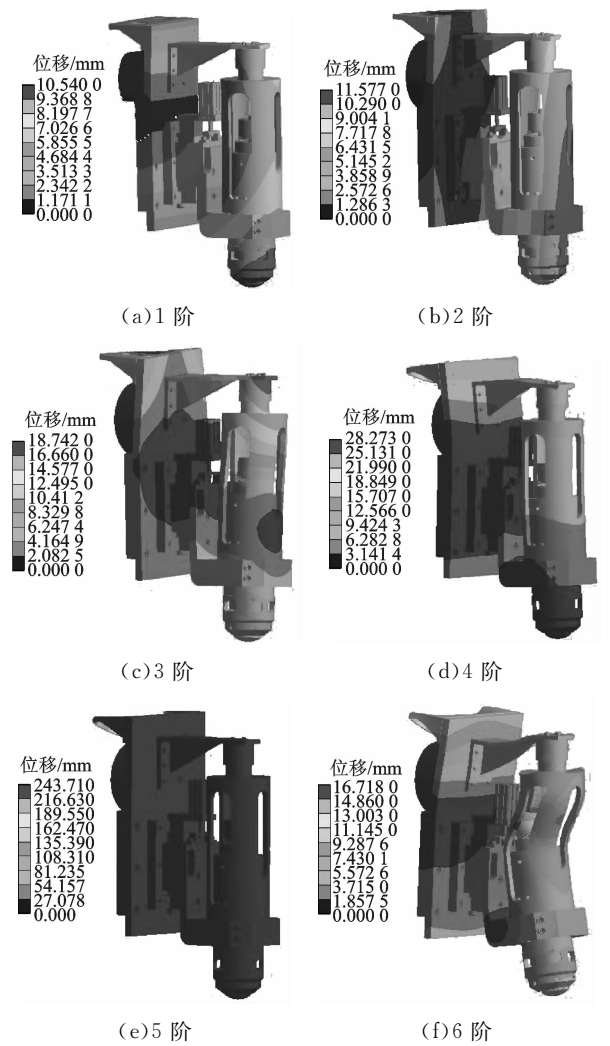


图 6 抛光头模态云图

根据仿真计算结果可知,机器人气囊抛光工具低阶固有频率较高,如表 1 所示。1 阶固有频率为 137.37 Hz,机器人抛光的加工转速一般为 800~1 500 r/min,因此抛光工具具有较好的动态性能。

表 1 抛光工具低阶固有频率

| 阶次  | <i>f</i> /Hz |
|-----|--------------|
| 1 阶 | 137.37       |
| 2 阶 | 215.29       |
| 3 阶 | 402.83       |
| 4 阶 | 409.07       |
| 5 阶 | 512.52       |
| 6 阶 | 685.58       |

2 SiC 抛光加工特性实验

搭建的实验平台如图 7 所示。气囊抛光头通过法兰连接到 StaubliTX200 工业机器人末端,能进行不同口径和形面的光学零件抛光加工。

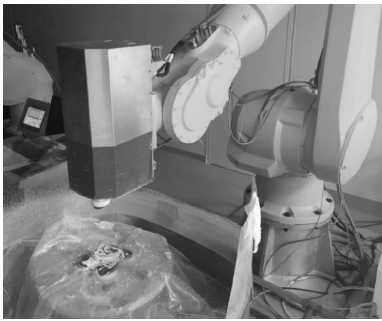


图 7 机器人气囊抛光实验平台

2.1 去除函数精确性及稳定性实验

抛光的 SiC 光学元件如图 8 所示,口径为 237 mm×294 mm,顶点曲率为 776.3 mm。对其进行定点抛光实验,然后进行多点抛光实验,实验参数如表 2 所示。

表 2 去除函数精确性及稳定性的实验参数

| 实验参数                        | 单点和多点抛光 |
|-----------------------------|---------|
| 抛光力/N                       | 10      |
| 抛光时间/s                      | 3       |
| 抛光转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 800     |
| 工具倾角/(°)                    | 20      |
| 气囊半径/mm                     | 40      |
| 抛光液种类                       | 金刚石抛光溶液 |
| 抛光液粉末粒径/μm                  | 2       |
| 抛光液固液质量比                    | 1:5     |

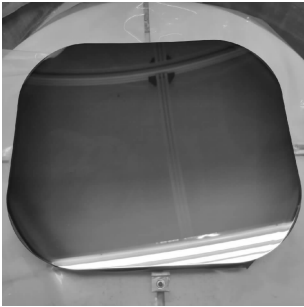
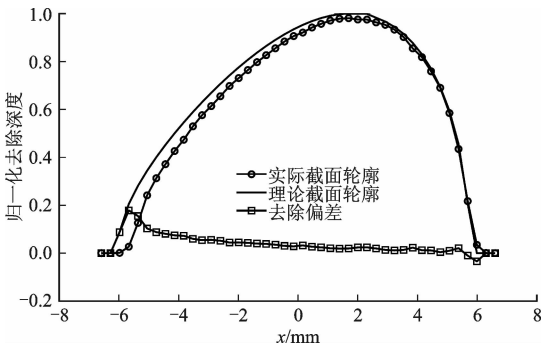


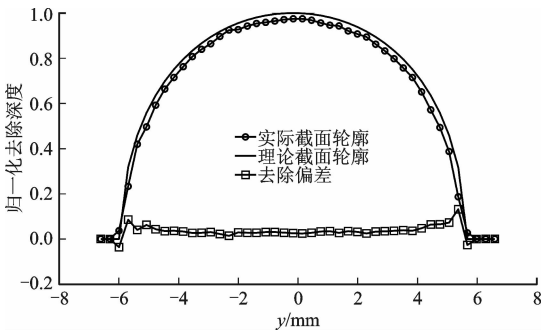
图 8 抛光的 SiC 光学元件

定点抛光后工件面形波峰值与谷值之差  $d_{PV} = 837.2\text{ nm}$ 、面形数据的均方根  $\delta_{RMS} = 301.4\text{ nm}$ 。提取定点抛光的碳化硅试件材料 X 向和 Y 向的去除数据和理论模型数据进行对比,如图 9 所示。材料去除函数的实验值与理论值之间的偏差较小,且吻合性较高,证明了所建立去除函数理论模型的有效性。

6 组单点抛光实验结果如图 10 所示。在相同加工条件下,6 个抛光点之间的材料峰值去除量以及体积去除率的差异较小,峰值去除量误差和体积

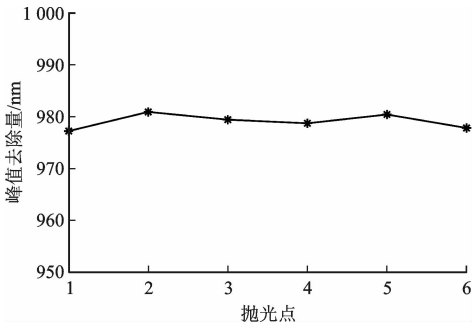


(a) X-X 方向材料去除情况

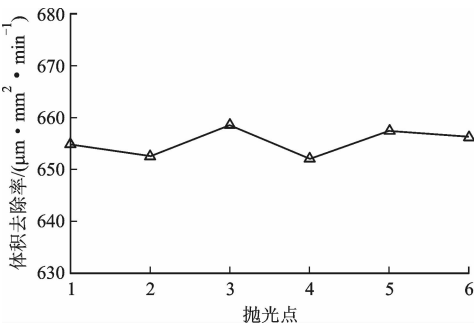


(b) Y-Y 方向材料去除情况

图 9 去除函数理论值与实验值对比



(a) 多点峰值去除量比较



(b) 体积去除率比较

图 10 多点抛光实验结果

去除率误差分别为 0.87%、0.37%，材料去除量的波动极小,说明采用机器人气囊抛光方法的去除函数具有良好的稳定性。去除误差可能是由抛光头磨

损、抛光力误差、面形检测误差以及抛光液磨粒分布不均等原因造成的。

2.2 机器人气囊抛光工具的加工应用验证

对图 8 中的试件进行 7 个周期的应用抛光实验。为了提升抛光效率,前 3 个抛光周期为粗抛,剩下 4 个周期进行精抛,这两种抛光工艺参数如表 3 所示。实验采用光栅型抛光轨迹,采用结构光进行检测加工后的面形数据。

表 3 应用验证的两种抛光工艺实验参数

| 实验参数                        | 粗抛     | 精抛     |
|-----------------------------|--------|--------|
| 抛光压力/N                      | 12     | 10     |
| 工具倾角/(°)                    | 20     | 20     |
| 气囊转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 1 200  | 800    |
| 抛光液种类                       | 金刚石抛光液 | 氧化铈抛光液 |
| 抛光液粉末粒径/μm                  | 2      | 2      |
| 抛光液固液质量比                    | 1:5    | 1:5    |
| 光栅型抛光轨迹间距/mm                | 0.4    | 0.3    |

加工前的理论面形如图 11 所示,粗抛后的面形结果如图 12 所示。非球面碳化硅元件的初试面形  $d_{PV}=3\,102.5\text{ nm}$ ,  $\delta_{RMS}=422.9\text{ nm}$ ,通过 3 个抛光周期的加工,加工面形精度收敛到  $d_{PV}=1\,187.3\text{ nm}$ ,  $\delta_{RMS}=129.5\text{ nm}$ ,其抛光效率较高,碳化硅元件的面形残差能够得到较快的收敛。粗抛后的非球面碳化硅元件的面形精度达到  $d_{PV}=1\,187.3\text{ nm}$ ,  $\delta_{RMS}=129.5\text{ nm}$ ,收敛率为 69.4%,具有良好的收敛效果。

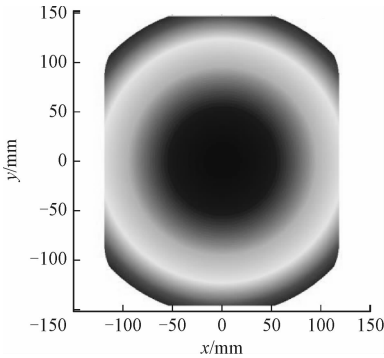


图 11 非球面碳化硅元件抛光前面形

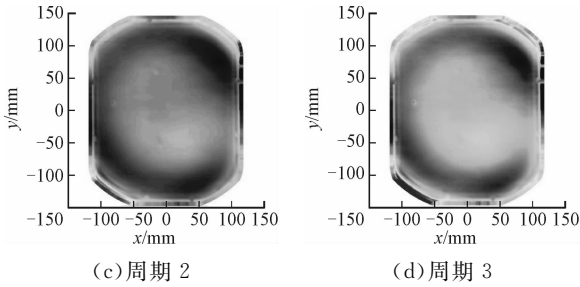
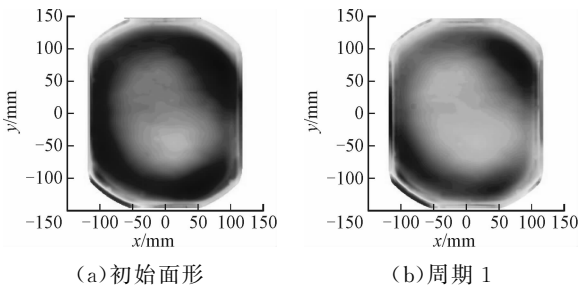


图 12 粗抛碳化硅后面形

图 13 为精抛的面形收敛过程。通过 4 个周期的精抛,非球面碳化硅工件的面形由  $d_{PV}=1\,187.3\text{ nm}$ ,  $\delta_{RMS}=129.5\text{ nm}$  逐步收敛到  $d_{PV}=570.1\text{ nm}$ ,  $\delta_{RMS}=62.3\text{ nm}$ ,精抛收敛效率为 51.9%。

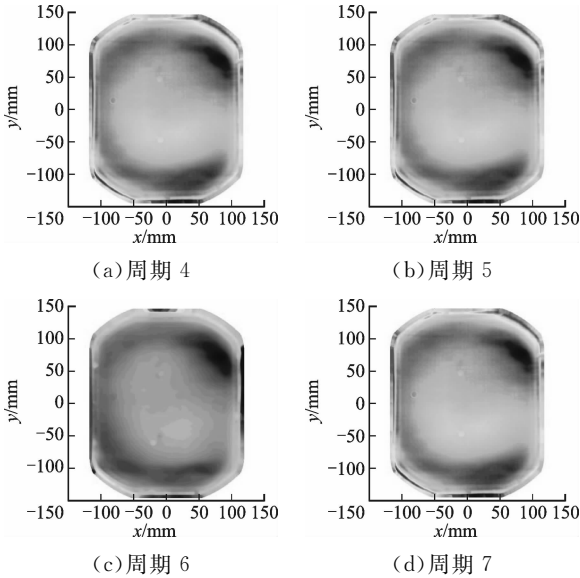


图 13 碳化硅精抛加工面形精度

整个抛光过程碳化硅元件的面形收敛过程如图 14 所示,在前 3 个粗抛周期阶段,抛光效率较高,工件面形的  $d_{PV}$  和  $\delta_{RMS}$  能得到快速收敛。在后 4 个精抛周期过程中,抛光效率降低,工件面形的收敛速度逐步变缓,碳化硅元件的面形均方根最终逐步收敛到 62.3 nm,验证了所设计的机器人气囊抛光工具具备高效高精度加工光学元件的抛光能力。

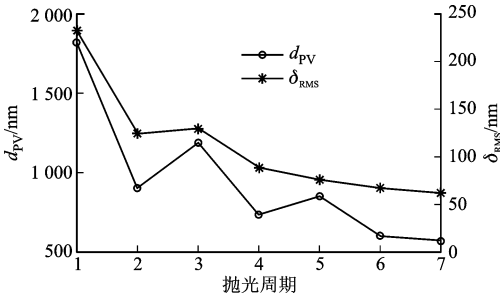


图 14 SiC 抛光加工收敛过程

本文提出的方法和其他方法的区别如表 4 所示。在磁流变抛光当中,对 50.8 mm(2 英寸)的单晶 SiC 进行 30 min 的抛光之后,表面粗糙度从 72.89 nm 收敛到 1.9 nm,收敛精度高。但是,与本文相比其加工对象的尺寸和面形特征存在较大差异,本文加工对象的尺寸更大,非球面形与平面相比更为复杂,造成气囊抛光加工精度比该方法相比有差异,但效率却大为提高。对于 CMP 抛光方法,对 10 mm×10 mm 尺寸进行 30 min 抛光后,表面粗糙度从 252.5 nm 减少到 58.1 nm。该方法抛光精度与本文提出的方法相差不大,但抛光工件的尺寸远小于本文提出的方法,抛光效率低,应用到大口徑光学元件上存在困难。从材料去除率(MRR)上来说,本文提出的方法优于其他两种方法,因此在满足抛光精度要求下,气囊抛光方法具有更高的抛光效率,且具有较高性价比。

表 4 气囊抛光和其他抛光方法比较

| 比较数据源                             | 磁流变抛光 <sup>[4]</sup> | CMP <sup>[22]</sup> | 气囊抛光   |
|-----------------------------------|----------------------|---------------------|--------|
| 工件材料                              | SiC                  | SiC                 | SiC    |
| 面形特征                              | 平面                   | 平面                  | 非球面    |
| 设备载体                              | 机床                   | 机床                  | 机器人    |
| 初始精度/nm                           | 72.89                | 252.5               | 422.9  |
| 最终精度/nm                           | 1.9                  | 58.1                | 62.3   |
| 抛光面积/mm <sup>2</sup>              | 2 025                | 100                 | 69 678 |
| 抛光时间/min                          | 30                   | 30                  | 700    |
| 材料去除率/<br>(μm·min <sup>-1</sup> ) | 0.03                 | 5.87                | 12.72  |

3 结 论

(1)本文针对已有 SiC 抛光加工方法中的不足,采用机器人气囊抛光方法来实现加工,构建了材料去除函数理论模型,包括抛光区域压力场分布以及速度场分布,并设计了可以加载到机器人末端的抛光头,去除函数大致呈高斯分布且具有良好的面形收敛度。单点和多点的 SiC 抛光实验结果表明,去除函数精度高稳定性强,工件加工面型收敛能力强。

(2)对非球面 SiC 进行抛光验证实验。首先进行粗抛再精抛,粗抛时,面形收敛速度快,材料去除率高;精抛时,面形的收敛速度降低,收敛效果逐渐提高。经过 7 个周期的粗、精抛加工,面形收敛率分别为 69.4%、51.9%,获得  $d_{PV} = 570.1\text{ nm}$ ,  $\delta_{RMS} = 62.3\text{ nm}$  的面形精度,面形收敛速度较快,验证了采用机器人气囊抛光能够有效地抛光 SiC 光学元件,

且得到的面形收敛精度高、抛光效率高。

参考文献:

[1] EALEY M A, WEAVER G Q. Developmental history and trends for reaction-bonded silicon carbide mirrors [J]. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 1996, 2857(1): 66-74.

[2] LU Jing, HU Guangqiu, GUO Hua, et al. Processing single crystal SiC with semi-consolidated polishing film [J]. Materials Science Forum, 2016, 874: 401-406.

[3] LUO Q F, LU J, XU X P. A comparative study on the material removal mechanisms of 6H-SiC polished by semi-fixed and fixed diamond abrasive tools [J]. Wear, 2016, 350/351: 99-106.

[4] 潘继生, 阎秋生, 徐西鹏, 等. 单晶 SiC 基片的集群磁流变平面抛光加工 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(18): 2495-2499.

PAN Jisheng, YAN Qiusheng, XU Xipeng, et al. Cluster magnetorheological effect plane polishing on SiC single crystal slice [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(18): 2495-2499.

[5] 潘继生, 阎秋生, 路家斌, 等. 集君磁流变平面抛光加工技术 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 205-212.

PAN Jisheng, YAN Qiusheng, LU Jiabin, et al. Cluster magnetorheological effect plane polishing technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 205-212.

[6] WU Xiang, HUANG Zhi, WAN Yongjian, et al. A novel force-controlled spherical polishing tool combined with self-rotation and co-rotation motion [J]. IEEE Access, 2020, 8: 108191-108200.

[7] 牟志超, 郑子文, 舒勇, 等. 基于球形磨头抛光技术的 SiC 抛物面镜抛光 [J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(5): 1-4.

MOU Zhichao, ZHENG Ziwen, SHU Yong, et al. Polishing process for a SiC paraboloid mirror based on spherical polishing technology [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2012, 48(5): 1-4.

[8] 何艳, 苑泽伟, 段振云, 等. 单晶碳化硅晶片高效超精密抛光工艺 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(1): 115-121.

HE Yan, YUAN Zewei, DUAN Zhenyun, et al. High-productively ultraprecise polishing technique of single crystal SiC wafer [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(1): 115-121.

[9] 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 Materi-

- als Processing Technology, 2007, 192/193: 276-280.
- [10] DONG Zhichao, CHENG Haobo, TAM H Y. Investigation on removal features of multidistribution fixed abrasive diamond pellets used in the polishing of SiC mirrors [J]. Applied Optics, 2012, 51(35): 8373.
- [11] NESLEN C L, MITCHEL W C, HENGHEOLD R L. Effects of process parameter variations on the removal rate in chemical mechanical polishing of 4H-SiC [J]. Journal of Electronic Materials, 2001, 30(10): 1271-1275.
- [12] NITTA H, ISOBE A, HONG T J, et al. Research on reaction method of high removal rate chemical mechanical polishing slurry for 4H-SiC substrate [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2011, 50(4): 046501.
- [13] NGUYEN T, LIU D, THONGKAEW K, et al. The wear mechanisms of reaction bonded silicon carbide under abrasive polishing and slurry jet impact conditions [J]. Wear, 2018, 410/411: 156-164.
- [14] SAKO H, MATSUHATA H, SASAKI M, et al. Micro-structural analysis of local damage introduced in subsurface regions of 4H-SiC wafers during chemo-mechanical polishing [J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(13): 135702.
- [15] KUBOTA A, YOSHIMURA M, FUKUYAMA S, et al. Planarization of C-face 4H-SiC substrate using Fe particles and hydrogen peroxide solution [J]. Precision Engineering, 2012, 36(1): 137-140.
- [16] LAGUDU U R K, ISONO S, KRISHNAN S, et al. Role of ionic strength in chemical mechanical polishing of silicon carbide using silica slurries [J]. Colloids and Surfaces: A Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 445: 119-127.
- [17] CHENG Haobo, FENG Zhijing, WANG Yingwei, et al. Magnetorheological finishing of SiC aspheric mirrors [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2005, 20(6): 917-931.
- [18] 王春锦, 郭隐彪, 王振忠, 等. 光学元件气囊抛光系统动态去除函数建模 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(17): 19-25.
- WANG Chunjin, GUO Yinbiao, WANG Zhenzhong, et al. Dynamic removal function modeling of bonnet tool polishing on optics elements [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(17): 19-25.
- [19] CHENG Kai, SHAO Yizhi, JADVA M, et al. Development of the improved Preston equation for abrasive flow machining of aerofoil structures and components [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part J Journal of Engineering Tribology, 2019, 233(9): 1397-1404.
- [20] 曲兴田, 王宏一, 樊成, 等. 等重叠率螺旋线的非球面抛光轨迹规划 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 126-131.
- QU Xingtian, WANG Hongyi, FAN Cheng, et al. Uniform-overlap-rate spiral path for aspheric polishing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6): 126-131.
- [21] RAO Zhimin, GUO Bing, ZHANG Quanli, et al. Form error compensation in soft wheel polishing by contact force optimization [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1/2/3/4): 1197-1207.
- [22] ZHANG Yi, CHEN H, LIU Dianzi, et al. High efficient polishing of sliced 4H-SiC (0001) by molten KOH etching [J]. Applied Surface Science, 2020, 525: 146532.

#### [本刊相关文献链接]

- 李道朋, 傅波, 庄文敏. 换能器阵列型超声抛光机理及声场仿真和实验研究. 2020, 54(2): 24-34. [doi:10.7652/xjtuxb202002004]
- 梅堂杰, 郭俊德, 仝哲, 等. 滑动模式对含表面修饰 MoS<sub>2</sub> 纳米片润滑油摩擦学性能的影响. 2019, 53(2): 24-31. [doi:10.7652/xjtuxb201902004]
- 张西金, 方宗德, 郭芳, 等. 混合弹流润滑修形斜齿轮齿面摩擦功率损耗. 2019, 53(1): 11-17. [doi:10.7652/xjtuxb201901002]
- 白浩, 王伊卿, 董霞, 等. Ti6Al4V 钛合金脉冲激光抛光微裂纹产生机理与尺寸特征研究. 2015, 49(12): 117-123. doi:10.7652/xjtuxb201512019]
- 曲兴田, 王宏一, 樊成, 等. 等重叠率螺旋线的非球面抛光轨迹规划. 2015, 49(6): 126-131. [doi:10.7652/xjtuxb201506020]
- 朱爱斌, 路新春, 张浩, 等. 铜化学机械抛光材料去除机理的准连续介质法研究. 2011, 45(12): 111-116. [doi:10.7652/xjtuxb201112020]

(编辑 杜秀杰)