

# 碳化硅反射镜表面粗糙度的优化

范 镛

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 空间光学技术的迅猛发展对空间光学系统提出了更高的要求;碳化硅材料以其优秀的物理性质,成为广泛应用的反射镜材料;碳化硅反射镜的光学加工研究也在国内外广泛开展。简要讨论了碳化硅反射镜的抛光机理;介绍了碳化硅材料抛光的实验方法;定性分析了碳化硅材料的抛光过程;通过大量的工艺实验和理论分析,讨论磨料粒度、抛光盘材料、抛光盘压力、抛光盘转速、抛光液酸碱度等工艺参数对碳化硅反射镜表面粗糙度的影响,并对各个参数加以优化,得到了优良的实验结果。

**关键词** 光学制造;碳化硅;抛光;表面粗糙度;优化

**中图分类号** TN248.1    **文献标志码** A    **doi:** 10.3788/LOP51.092206

## Optimization of SiC Mirror Surface Roughness

Fan Di

*Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** As the aerospace technology develops rapidly, more requirements on the aerospace optic system are needed. With excellent physical properties, SiC becomes a very promising material for speculums. The mechanism of polishing on SiC mirror surface is studied, the experimental method of SiC polishing is introduced, and the polishing process is analyzed quantitatively. The key factors affecting the surface quality of SiC mirror, such as tools, abrasives, load, rotational speed and slurry pH are studied, chosen and optimized by plenty of experiments and theoretical analysis, and better results are obtained.

**Key words** optical fabrication; SiC; polishing; surface roughness; optimization

**OCIS code** 220.4610; 220.5450; 240.5450

## 1 引 言

随着空间光学技术的迅猛发展,对空间光学系统提出了更高的要求,对反射镜和光学元件的要求也越来越高。为了保证反射镜在工作状态下和加工过程中的结构稳定,并考虑到空间光学系统对反射镜质量的要求,反射镜材料应符合下列物理指标要求:高弹性模量、低密度、低热膨胀系数、无热应力、高热导率、热性能与机械性能的各向同性。碳化硅材料以其较高的弹性模量,适中的密度,较小的热膨胀系数,较高的导热系数,耐热冲击性,高比刚度和高尺寸稳定性等一系列优秀的物理性质,成为应用广泛的反射镜材料<sup>[1-6]</sup>。碳化硅反射镜光学表面的光学加工研究也在国内外广泛开展,其表面粗糙度的优化成为关键问题。

## 2 抛光机理

理想状态下的碳化硅抛光过程也可以看作是压痕断裂过程。如图1所示,在理想状态下,每个抛光磨料颗粒,包括粒径最小的颗粒在内,都在抛光盘压力的作用下均匀地嵌入抛光盘,仅露出很小的棱角,这样每个颗粒都可以近似看作一个维氏四面体压头。当法向载荷  $P_L$  小于产生中央/径向裂纹的临界载荷  $P_L^*$  时,材料去除表现为塑性去除,不产生中央/径向裂纹;当法向载荷  $P_L$  大于产生中央/径向裂纹的临界载荷  $P_L^*$  而法向载荷  $P_L$  和切向载荷  $P_t$  的合载荷  $P$  小于产生横向裂纹的临界载荷  $P^*$  时,材料去除仍表现为塑性去除,但是有中央/径向裂纹产生;当合载荷  $P$  大于产生横向裂纹的临界载荷  $P^*$  时,材料去除表现为脆性去除,并伴随有中央/径向

收稿日期: 2013-10-20; 收到修改稿日期: 2013-11-08; 网络出版日期: 2014-07-21

作者简介: 范 镛(1976—),男,博士,研究员,主要从事先进光学制造技术方面的研究。

E-mail: fandi\_2000@hotmail.com

裂纹产生;认为理想的碳化硅材料抛光的材料去除表现为伴随有中央/径向裂纹产生的脆性去除。

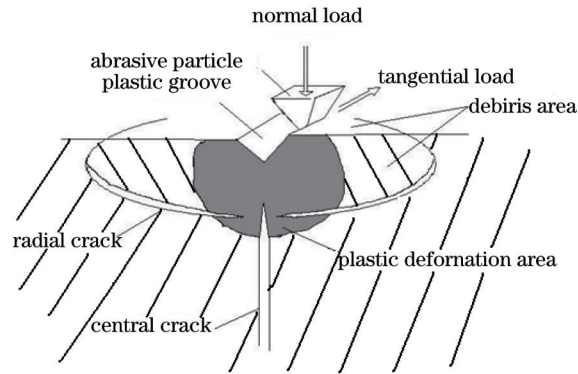


图1 压痕断裂模型示意图

Fig.1 Radial/lateral crack mode

实际抛光过程中,磨料颗粒不可能全部嵌入抛光盘,而是存在一个阈值 $R_m$ ,粒径大于 $R_m$ 的颗粒嵌入抛光盘,小于 $R_m$ 的颗粒在抛光盘和工件之间翻滚, $R_m$ 与磨头材料、压力等因素有关。因此,在实际状态下,抛光是嵌入颗粒的磨削去除与非嵌入磨粒翻滚去除联合作用的过程。由于非嵌入颗粒将大部分能量用于磨料颗粒间的相互作用和翻滚,且非嵌入颗粒的几何尺寸远大于嵌入颗粒棱角的几何尺寸,所以非嵌入颗粒会形成体积很大的磨屑,破坏表面质量。这种表面粗糙度的破坏随着非嵌入颗粒数量的增加和几何尺寸的变大而愈加明显。决定表面粗糙度的因素有两个:嵌入颗粒形成磨屑的体积 $V_L$ 和粒径为 $R_m$ 的非嵌入颗粒形成磨屑的体积 $V_{R_m}$ ,由于 $V_{R_m} > V_L$ ,所以 $V_{R_m}$ 是主要因素。这也能够有效地解释实验中不同参数条件下粗糙度的变化<sup>[1]</sup>。

### 3 抛光参数工艺实验

影响抛光工艺的因素有很多,为了找到碳化硅材料抛光的规律和最佳抛光参数以实现碳化硅材料高效率、高质量的抛光,结合FSGJ-II非球面数控加工中心进行了大量的工艺实验。

为了测定碳化硅反射镜抛光后的表面质量,以证明其抛光过程的材料去除机理,利用数控光学加工中心和Wyco粗糙度仪进行了一系列的工艺实验,定义为实验1,步骤如下<sup>[7-13]</sup>:

1) 在室温( $298 \pm 0.5$ ) K条件下,将口径为150 mm的反应烧结碳化硅平面样品(面形精度PV值小于 $0.25 \lambda$ )固定于数控加工中心转台上,样品几何中心垂直投影于转台轴心,选取直径为40 mm的平面55#沥青磨头,设定摆距为10 mm,磨头压强为23 kPa,使用粒度为W0.5  $\mu\text{m}$ 的金刚石微粉,抛光液为pH $\approx$ 4的蒸馏水,磨头转速为200 r/min,对样品进行30 min的均匀抛光,以便使样品形成新鲜均匀的抛光表面并保持样品的面形,同时使磨头与样品之间的接触充分(如无特殊说明,本文下述抛光条件均与此相同);

2) 沿用步骤1)的工艺参数,对步骤1)中选取的圆形区域的几何中心点进行定点抛光,磨头转数 $\Delta r$ 为5000 r;

3) 抛光结束后,将样品擦拭干净,使用WYKO粗糙度仪对样品的抛光面进行检测,以得到样品的表面质量数据。

改变步骤1)~3)中的工艺参数,就可以得到不同工艺参数下的表面粗糙度。

## 4 抛光参数影响分析

### 4.1 磨料粒度

使用粒度为W0.2、W0.5、W1、W1.5、W2.5、W7  $\mu\text{m}$ 的人造金刚石微粉,其他参数与“实验1”相同,对碳化硅样品进行抛光。可以看到表面粗糙度随磨料粒度的变化不明显,只是粒度为W7  $\mu\text{m}$ 时的粗糙度比其他粒度大两倍多,粒度为W0.2  $\mu\text{m}$ 时的粗糙度比其他粒度略大(表1)。当磨料粒度为W0.5~W2.5  $\mu\text{m}$ 时,粒径小于 $R_m$ 的磨料颗粒数量变化不大,嵌入颗粒在抛光盘表面露出的棱角的几何尺寸变化很小,非嵌入颗粒的数量和尺寸也相似,使得 $V_L$ 和 $V_{R_m}$ 变化很小,所以表面粗糙度变化不大。在粒度为W7  $\mu\text{m}$ 的磨料中没有粒径小于 $R_m$ 的颗粒,所以非嵌入颗粒几乎不存在,抛光条件接近理想条件;这时,磨粒棱角的几何尺寸增加非

常明显,接触长度 $L$ 增加,而且磨料粒度的大幅度增大使磨头上嵌入颗粒的数量比小颗粒时少很多,使得单个颗粒所受的载荷 $P$ 大幅度增加,导致了粗糙度的增大。当磨料粒度为W0.2  $\mu\text{m}$ 时,粒径小于 $R_m$ 的磨料颗粒数量远大于其他粒度磨料,非嵌入颗粒的数量大大增加使得粗糙度变差,而非嵌入颗粒的尺寸相应较小使得粗糙度变差的幅度不显著。

表1 磨料粒度对表面粗糙度的影响

Table 1 Effect of abrasive granularity upon the surface roughness

Abrasive granularity / $\mu\text{m}$	W0.2	W0.5	W1	W1.5	W2.5	W7
Roughness $R_a$ /nm	1.32	1.07	1.11	1.08	1.13	2.64

#### 4.2 磨盘材料的影响

使用硬度由小到大的6种抛光盘材料——55#、64#、73#、82#、91#沥青抛光胶和聚胺脂抛光片,采用“实验1”的工艺参数对碳化硅样品进行抛光。如表2所示,抛光盘硬度的变大使抛光去除量下降、表面粗糙度变大;这是由于抛光盘硬度的变大使磨料颗粒嵌入抛光盘的难度增加, $R_m$ 变大,使非嵌入颗粒的数量增加、尺寸变大,导致了表面粗糙度的增加。聚胺脂材料的被嵌入能力很差,几乎所有磨粒都以非嵌入颗粒形式存在,此时, $R_m \approx 0.5 \mu\text{m}$ ,即磨料粒度。由于聚胺脂材料和W0.5  $\mu\text{m}$ 人造金刚石微粉所形成的样片表面粗糙度( $R_a=8.23 \text{ nm}$ ,比4.1节中55#沥青抛光胶和W7  $\mu\text{m}$ 人造金刚石微粉所形成的样片表面粗糙度( $R_a=2.64 \text{ nm}$ )高三倍多,说明 $R_m$ 为0.5  $\mu\text{m}$ 左右的非嵌入颗粒所形成的磨屑在体积上远大于粒径为7  $\mu\text{m}$ 的嵌入颗粒形成的磨屑,这也证明了非嵌入颗粒形成磨屑的体积 $V_{R_m}$ 大于嵌入颗粒形成磨屑的体积 $V_i$ 的推论。

表2 表面粗糙度随抛光盘材料的变化

Table 2 Effect of tool material upon the surface roughness

Tool material	55#	64#	73#	82#	91#	Polyurethane
Roughness $R_a$ /nm	1.07	1.18	1.41	2.05	3.07	8.23

#### 4.3 抛光液酸碱度

由于化学作用的存在,抛光液的酸碱度对 $\text{SiO}_2$ 光学玻璃的抛光表面质量影响是很大的<sup>[2]</sup>。使用稀NaOH溶液调节抛光液pH值分别为4、7、10时,碳化硅材料表面粗糙度没有明显的变化,说明在碳化硅抛光过程中,化学反应几乎不起作用。

#### 4.4 磨头转速

改变磨头转速分别为100、125、150、200、300 r/min,对碳化硅样品进行抛光,当转速在200 r/min以下时,粗糙度比较稳定,但是当转速为250 r/min时,粗糙度开始增大,当转速为300 r/min,粗糙度急剧增加(表3)。分析认为产生这种现象的原因是:当转速增加时,嵌入颗粒所受的切向载荷也随之增大,当切向载荷增大到一定程度时,会使嵌入磨粒从磨头上崩落,导致了非嵌入颗粒数量的大量增加,使得粗糙度变差。

表3 磨头转速对表面粗糙度的影响

Table 3 Effect of tool rotational speed upon the surface roughness

Tool rotational speed /(r/min)	100	125	150	200	250	300
Roughness $R_a$ /nm	1.07	1.08	1.10	1.07	1.32	2.43

#### 4.5 磨头压力

将磨头压力分别设置为4.6、9.2、13.8、23.0、27.6、32.0 kPa,对样片进行抛光,得到抛光粗糙度随磨头压强的变化(表4)。可以看到随着压力的增加,粗糙度只是稍有改善。随着磨头压力的增加,使更小粒度的非嵌入颗粒嵌入抛光盘, $R_m$ 变小;非嵌入颗粒数量和粒度的减少使 $V_{R_m}$ 变小,因此,磨头压强的增加有利于粗糙度的改善<sup>[14-16]</sup>。

表4 碳化硅材料表面粗糙度随抛光盘压力的变化

Table 4 Effect of pressure load upon the surface roughness

Pressure load /kPa	4.6	9.2	13.8	23.0	27.6	32.0
Roughness $R_a$ /nm	1.42	1.35	1.20	1.07	0.93	0.87

#### 4.6 环境温度

理论上,环境温度的升高会使沥青抛光盘软化,磨料颗粒更易于嵌入抛光盘,使得粗糙度得到改善;而温度的降低会使抛光效果变差。在实际抛光过程中,只有温度超过 329 K 时,最易软化的 55# 抛光沥青才会软化,而数控加工中心的工作温度为 275~278 K,在这种条件下,温度影响可以忽略。

## 5 结 论

在磨料粒度一定时,抛光状态越接近理想状态,抛光的效果越好。基于这些,结合数控加工中心的实际情况对抛光工艺参数进行了选择:抛光盘一般采用 55# 沥青抛光盘,磨料为 W0.5  $\mu\text{m}$  人造金刚石微粉,抛光液为普通蒸馏水,磨头压力设为加工中心可提供的最大压强为 32.0 kPa,磨头转速设为 200 r/min,环境温度为 298 K;之所以不选用 W1.5  $\mu\text{m}$  和 W2.5  $\mu\text{m}$  的磨料,是因为这两种粒度的人造金刚石微粉中允许存在个别粒径在 5~7  $\mu\text{m}$  的粗大颗粒,这些粗大颗粒会在碳化硅抛光面上留下明显的划痕,影响表面质量。在此工艺条件下得到了  $R_a$  值为 0.87 nm 的碳化硅反射镜表面粗糙度加工结果。

### 参 考 文 献

- 1 Fan Di. The Study on CCOS of Large-Diameter SiC Mirrors[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004.  
范 镛. 大口径碳化硅质反射镜数控光学加工的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
- 2 M J Cumbo, D Fairhurst, S D Jacobs, *et al.*. Slurry particle size evolution during the polishing of optical glass[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(19): 3743-3755.
- 3 Gao Jinsong, Shen Zhenfeng, Wang Xiaoyi, *et al.*. Research on surface modification of space used SiC mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 2624-2629.  
高劲松, 申振峰, 王笑夷, 等. 空间反射镜基底材料碳化硅表面改性研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(9): 2624-2629.
- 4 Dai Jinhui, Ge Zhaoming. Introduction to Inorganic Non-Metallic Materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999.  
戴金辉, 葛兆明. 无机非金属材料概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.
- 5 Zhang Feng, Deng Weijie. Magnetic-medium assistant polishing of silicon modification layer on silicon carbide surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1116001.  
张 峰, 邓伟杰. 碳化硅表面硅改性层的磁介质辅助抛光[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1116001.
- 6 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2022-2026.  
王孝坤, 郑立功, 张学军, 等. 子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2022-2026.
- 7 S Malkin, T W Hwang. Grinding mechanisms for ceramics[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1996, 45(2): 569-580.
- 8 H H Xu, S Jahanmir. Material removal and damage formation mechanisms in grinding silicon nitride[J]. *J Mater Res*, 1996, 11(7): 1717-1724.
- 9 Deng Zhaohui, Zhang Bi, Sun Zongyu, *et al.*. Material removal mechanism of ceramics grinding[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2002, 2(128): 47-51.  
邓朝晖, 张 璧, 孙宗禹, 等. 陶瓷磨削的材料去除机理[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2002, 2(128): 47-51.
- 10 Liu Zixu. Mechanism of ceramic grinding[J]. *Ceramics & Grinding*, 1998, (1): 36-42.  
刘子旭. 陶瓷磨削机理[J]. *陶瓷与磨削*, 1998, (1): 36-42.
- 11 Fan Di, Zhang Zhongyu, Niu Haiyan, *et al.*. Optical surfacing on RB-SiC spherical mirror[J]. *Optical Technique*, 2004, 30(1): 6-8.  
范 镛, 张忠玉, 牛海燕, 等. 反应烧结碳化硅球面反射镜的光学加工[J]. *光学技术*, 2004, 30(1): 6-8.
- 12 Fan Di, Zhang Xuejun, Zhang Zhongyu, *et al.*. Optical surfacing on RB-SiC flat mirror[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(6): 667-668.  
范 镛, 张学军, 张忠玉, 等. 反应烧结碳化硅平面反射镜的光学加工[J]. *光学技术*, 2003, 29(6): 667-668.
- 13 Fan Di, Zhang Zhongyu, Niu Haiyan, *et al.*. Optical surfacing on SiC mirror[J]. *Journal of Chinese Ceramic Society*, 2003, 31(11): 1096-1100.

- 范 镒, 张忠玉, 牛海燕, 等. 碳化硅光学镜面加工[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(11): 1096-1100.
- 14 Feng Yan, Di Fan, Binzhi Zhang, *et al.*. Manufacturing and testing of a cubic SiC surface[J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(6): 534-536.
- 15 M A Ealey, J A Wellman. Polishability of CERAFORM silicon carbide[C]. SPIE, 1996, 2857: 78-85.