

# 碳化硅光学表面抛光机理研究

范 镛<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 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)  
(<sup>2</sup> 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** 碳化硅光学反射镜已经在国民生活各个领域得到广泛应用,但是其抛光机理尚不明确。对碳化硅光学表面抛光机理进行了研究。介绍了陶瓷材料的磨削机理——压痕断裂模型。应用压痕断裂模型分析了理想状态下的碳化硅抛光过程,并研究了实际抛光过程中碳化硅光学表面的抛光机理。

**关键词** 光学制造;抛光机理;碳化硅;压痕断裂模型

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.022202

## Study on the Polishing Mechanism of Silicon Carbide Optical Surface

Fan Di<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** The polishing mechanism of silicon carbide optical surface still remains untouched. This paper studies the polishing mechanism of silicon carbide optical surface; it also introduces the grinding mechanism of ceramic material——indentation fracture model. The model of silicon carbide polishing in ideal condition is analyzed and the mechanism of silicon carbide polishing in real state is studied.

**Key words** optical manufacturing; polishing mechanism; silicon carbide; indentation fracture model

**OCIS codes** 220.5450; 220.4610; 160.2750; 160.4670

## 1 引言

随着空间应用技术和激光技术的迅猛发展,各种应用对光学系统提出了更高的要求,对系统本身反射镜和光学元件的要求也越来越高。为了保证反射镜和光学元件在工作条件下和加工、检测过程中结构的稳定性,并考虑到空间光学系统对反射镜轻量化的要求和激光系统光学元件工作状况下的稳定性,对反射镜材料提出了一系列物理指标,包括低密度、高弹性模量、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。传统材料已经不能满足这些要求。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、高的比刚度和高度的尺寸稳定性等一系列优秀的物理性质,成为一种特别具有应用前景的反射镜材料<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。但是,碳化硅光学表面抛光机理方面的研究还是空白。

光学表面抛光受多种因素影响,定量控制比较困难。多年来光工技术人员一直在摸索材料去除量与各种影响因素之间的关系,但到目前为止,对光学玻璃表面抛光比较成功的描述仍是 Cumbo 等<sup>[3]</sup>提出的机理:抛光是一个机械-化学过程,在抛光过程中,一方面存在机械去除,其材料去除符合 Preston 假设;另一方面,抛光过程中还存在三种反应:1)玻璃材料在抛光液中的水合和溶解;2)抛光产生的玻璃细屑在玻璃表面的再

收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-08-30; 网络出版日期: 2011-10-21

作者简介: 范 镛(1976—),男,副研究员,主要从事先进光学制造技术、光学检测技术和光学加工机理等方面的研究。

E-mail: fandi\_2000@hotmail.com

沉积;3)玻璃材料与抛光磨料之间的表面电荷交换。由于化学过程的存在,使实际测得的玻璃材料 Preston 常数比纯机械过程的理论值,即玻璃材料弹性模量的倒数小 2 个数量级<sup>[1]</sup>。可见,化学过程对玻璃材料抛光影响是很大的。

碳化硅材料与光学玻璃不同,其组分的化学活性比玻璃材料差很多,无论是  $\alpha$ -SiC 还是  $\beta$ -SiC,都不会发生水合和溶解反应,更不会发生细屑的再沉积反应<sup>[1,3,4]</sup>。因此,在碳化硅抛光过程中,化学反应几乎不起作用。

本文认为,碳化硅材料抛光过程可以看作是一种机械去除过程,理想的碳化硅材料的抛光过程可以近似地用陶瓷材料的磨削机理——压痕断裂模型来解释。

## 2 压痕断裂模型

压痕断裂模型是把陶瓷磨削中的磨粒与工件的相互作用看作小规模的压痕现象。该模型把单一的磨粒近似地看作是维氏四面体压头,如图 1 所示。磨粒正下方是塑性变形区,从塑性区开始形成两个主要的裂纹系统:中央/径向裂纹和横向裂纹。中央/径向裂纹通常导致材料强度降低,而横向裂纹引起材料的去除。一般认为:产生中央/径向裂纹的条件是法向载荷  $P_L$  大于产生中央/径向裂纹的临界载荷  $P_L^*$ <sup>[4,7,8]</sup>:

$$P_L^* = 54.5[a/(\eta^2\gamma^4)](K_C^4/H^3), \quad (1)$$

式中  $K_C$  为断裂韧性, $H$  为硬度, $a, \eta, \gamma$  是常数(对维氏压头而言  $a \approx \pi/2, \eta \approx 1, \gamma \approx 0.2$ )。

当法向载荷  $P_L$  大于临界载荷  $P_L^*$  时,法向载荷  $P_L$  与中央/径向裂纹大小  $C$  的关系为<sup>[6,7]</sup>

$$P_L/C^{3/2} = K_C[\xi(\cot \psi)^{2/3}(E/H)^{1/2}], \quad (2)$$

式中  $2\psi$  是压头相对棱边间的夹角, $\psi$  是常数。

产生横向裂纹的条件是法向载荷  $P_L$  和切向载荷  $P_r$  的合载荷  $P$  大于产生横向裂纹的临界载荷  $P^*$ ,

$$P^* = \xi(K_C^4/H^3)f(E/H), \quad (3)$$

式中  $\xi$  是无量纲常数, $f(E/H)$  是衰减函数,文中  $\xi f(E/H) \approx 2 \times 10^5$ 。

当合载荷  $P$  大于产生横向裂纹的临界载荷  $P^*$  时,横向裂纹大小  $C_r$  为

$$C_r = [\xi_r(\cot \psi)^{5/6} A^{-1/2} (K_C H)^{-1} E^{3/4}]^{1/2} P^{5/8}, \quad (4)$$

式中  $\xi_r$  和  $A$  是常数。

将  $P_L^*$  与单磨粒平均载荷相比较,可以预测磨削过程是横向断裂过程还是塑性切除过程。如图 1 所示,横向裂纹产生于靠近塑性区底部的区域,并在与工件表面几乎平行的面上横向扩展;横向裂纹向自由表面的偏移导致材料的断裂去除(形成切屑)。假设在法向载荷  $P_L$  的作用下,单磨粒的磨屑体积  $V_L$  与横向裂纹大小和接触长度  $L$  成比例,则  $V_L$  为<sup>[7~10]</sup>

$$V_L = a[P^{5/8}/(K_C^{1/2} H^{1/8})](E/H)^{3/8} L, \quad (5)$$

## 3 理想状态下碳化硅材料的抛光过程

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。在理想状态下,每个抛光磨料颗粒,包括粒径最小的都在抛光盘压力的作用下均匀的嵌入抛光盘,仅露出很小的棱角,这样每个颗粒就可以近似看作是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  $P_r$  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/径向裂纹产生;根据(1),(3)式,碳化硅的  $P_L^*$  和  $P^*$  分别约为 0.40 Pa 和 3.70 Pa,硅的则更小,而抛光状态下,法向

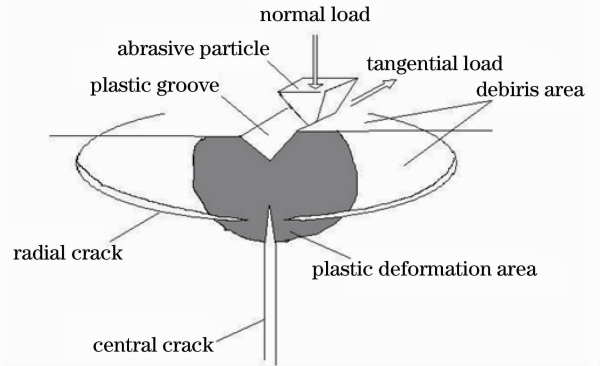


图 1 压痕断裂模型示意图

Fig. 1 Radial/lateral crack model

载荷一般为  $1 \times 10^2 \sim 4 \times 10^4$  Pa, 远大于 3.70 Pa, 因此, 我们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。此时, 决定表面粗糙度的因素是磨屑体积  $V_L$  和材料中杂质硅颗粒形成的缺陷体积; 决定材料去除效率的因素是磨头每转过程中参与抛光的总能量  $E$  和去除单位体积材料时形成断裂面所需要的能量  $E_2$ 。

$$E = E_0 = n\bar{E}_1 = VE_2 \rightarrow V = E/E_2 = E_0/E_2, \quad (6)$$

式中  $E_0$  是磨头转动一转对工件作用的总能量,  $n$  是磨头转动一转所产生的磨屑个数,  $\bar{E}_1$  是形成一个磨屑所需要的平均能量,  $V$  是抛光过程中磨头每转去除的材料体积。 $E_2$  是由磨屑断裂面的总面积决定的。

## 4 实际状态下碳化硅材料的抛光过程

实际抛光过程<sup>[11~15]</sup>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的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, 甚至是对抛光盘的去除, 造成能量浪费, 导致去除效率的下降; 而且, 由于非嵌入颗粒的几何尺寸比嵌入颗粒棱角的几何尺寸大很多, 所以非嵌入颗粒会形成体积很大的磨屑, 造成对表面的破坏。这种效率下降和表面的破坏随着非嵌入颗粒数量的增加和几何尺寸变大而愈加明显。这时, 决定材料去除效率的因素仍然是磨头每转过程中参与抛光的总能量  $E$  和去除单位体积材料时形成断裂面所需要的能量  $E_2$ 。

$$E = (E_0 - J - E_3) = n\bar{E}_1 + m\bar{E}_4 = VE_2 + m\bar{E}_4 \approx VE_2, \quad (7)$$

$$V \approx E/E_2 \approx (E_0 - E_3)/E_2, \quad (8)$$

式中  $J$  是抛光阶段的热量损失,  $E_3$  是磨头每转过程中非嵌入颗粒相互作用和翻滚造成的能量损失,  $m$  是磨头每转过程中非嵌入颗粒形成磨屑的数量,  $\bar{E}_4$  是非嵌入颗粒形成一个磨屑所需要的平均能量。一般来说  $J$  和  $m\bar{E}_4$  远小于  $E_3$  和  $VE_2$ , 可以忽略。虽然  $m\bar{E}_4$  很小, 但这部分能量所产生的大体积磨屑却足以造成对表面的破坏。

因此, 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  $V_{Rm}$ , 由于  $V_{Rm} > V_L$ , 所以非嵌入颗粒形成磨屑的体积  $V_{Rm}$  是主要因素。

## 5 结 论

随着碳化硅光学反射镜在航天、航空和测绘等各个领域的广泛应用, 碳化硅光学表面的抛光工艺需要正确的抛光机理的理论指导, 本文着重讨论了碳化硅光学表面抛光机理, 简要介绍了陶瓷材料的磨削机理——压痕断裂模型, 并应用压痕断裂模型分析了理想状态下的碳化硅抛光过程。研究了在实际抛光过程中碳化硅光学表面抛光机理。我们认为可以应用压痕断裂模型来解释理想状态下碳化硅材料的抛光过程, 并以此来指导碳化硅光学反射镜的光学加工。

## 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 颖. 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 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
- 3 M. J. Cumbo, D. Fairhurst, S. D. Jacobs *et al.*. Slurry particle size evolution during the polishing of optical glass [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(19): 3743~3755
- 4 Dai Jinhui, Ge Zhaoming (eds.). Introduction to Inorganic Non-Metallic Materials [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999
- 戴金辉, 葛兆明主编. 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 Wang Junlin. Research on Optical SiC Mirror [R]. Postdoctoral Research Report. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002  
王君林. 光学用 SiC 反射镜的研究 [R]. 博士后出站报告. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002
- 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. 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]. *Annals of CIRP*, 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): 47~51  
邓朝晖, 张 壁, 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): 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]. *J. Chinese Ceramic Society*, 2003, **31**(11): 1096~1100  
范 镛, 张忠玉, 牛海燕. 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