

碳化硅光学表面数控抛光工艺参数的优化与选择

范 镛^{1,2}

(¹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中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 随着空间应用技术和激光技术的迅猛发展,对光学系统提出了更高的要求;碳化硅材料以其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;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。对碳化硅光学表面的抛光机理进行简要讨论;对实验方法、步骤和条件进行了介绍;定性地对碳化硅材料的抛光过程进行了讨论;通过大量的工艺实验和理论分析了对抛光盘转速、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光学表面抛光效果的影响进行了讨论,并对工艺参数进行了优化和选择。

关键词 光学制造;碳化硅;抛光;工艺参数;工艺试验;优化

中图分类号 TG659 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s103006

Key Factors Selection on SiC Mirror CCOS Polishing

Fan Di^{1,2}

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

Abstract As aerospace technology and laser technology develop rapidly, higher demand for optical system is brought forward. With a number of excellent physical properties, SiC becomes a very promising material for speculums. The mechanism of polishing on SiC mirror is studied. And the key factors affecting the SiC CCOS (computer controlled optic surface) polishing, such as tools, abrasives, load, speed and slurry pH are studied, chosen and Optimized.

Key words optical fabrication; SiC; polish; factors; Process test; Optimization

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 220.1250; 160.4670

1 引 言

随着激光技术和空间光学技术的迅猛发展,对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质量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: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。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^[1~6]。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。如何选择抛光参数成为关键问题,本文针对这一问题进行了研究和探讨,并优化了工艺参数。

2 理 论

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地嵌入抛光盘,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

收稿日期: 2012-03-21; 收到修改稿日期: 2012-05-23

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

E-mail: fandi_2000@hotmail.com

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; 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^[7,8]。

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, 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, 会造成对表面粗糙度的破坏。这种效率下降和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 $V_{R_m} > V_L$, 所以非嵌入颗粒形成磨屑的体积 V_{R_m} 是主要因素。这个结论将在实验中有效地解释了不同参数条件下去除效率和粗糙度的变化。

3 实 验

影响抛光的因素有很多, 为了找到碳化硅材料抛光的规律和最佳的抛光参数, 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。

为了测定反应烧结碳化硅反射镜抛光的去除量、去除效率和抛光后的表面质量, 以证明其抛光过程的材料去除机理, 利用 FSGJ-II 非球面数控加工中心和 Zygo 数字干涉仪进行了一系列的工艺实验, 定义为“抛光去除量实验”, 实验步骤如下^[9~13]:

1) 在室温 (298 ± 0.5) K 条件下, 将口径为 150 mm 的反应烧结碳化硅平面样品[面形精度峰值 (PV) 小于 0.25λ]固定于 FSGJ-II 非球面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, 磨头压力 L 设为 28.8 N, 使用粒度为 $0 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 的金刚石微粉, 抛光液的 pH 值约为 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(如没有特殊说明, 下面的抛光条件均与此相同);

2) 将样品擦拭干净, 使用 Zygo PZT 数字干涉仪进行干涉检验, 并在样品表面上选取直径为 60 mm, 面形精度 PV 值小于 0.1λ 的圆形区域, 测量该区域母线, 得到母线 1, 如图 1 中曲线 1 所示。

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

4) 抛光结束后, 将样品擦拭干净, 使用 Zygo PZT 数字干涉仪进行干涉检验, 得到母线 2 如图 1 中曲线 2 所示, 将母线 1、2 矢高值相减得到去除量 Δh ;

5) 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。

改变步骤 1)~5) 中的工艺参数, 就可以得到不同工艺参数下的去除量和表面质量。

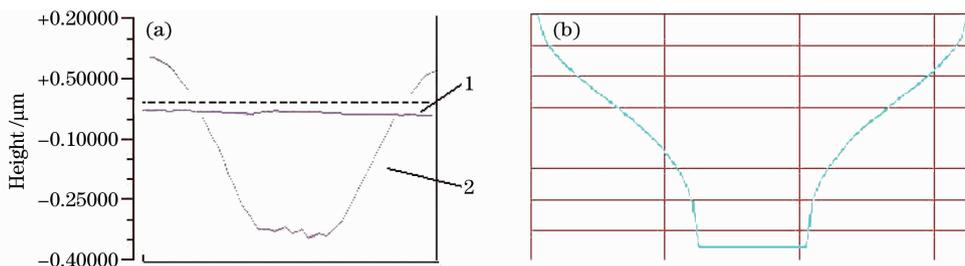


图 1 抛光去除量实验实际去除量(a)与理论去除量(b)曲线示意图

Fig. 1 Polishing material removal testing curve (a) and theoretic removal function curve (b)

4 分 析

4.1 磨头转数

抛光去除量随磨头转数变化实验: 重复“抛光去

除量实验”, 将步骤 3 中的磨头转数分别设置为 2000 r、3000 r、4000 r、5000 r、6000 r 和 7000 r, 得到去除量随转数变化的曲线, 如图 2 所示。可以看到

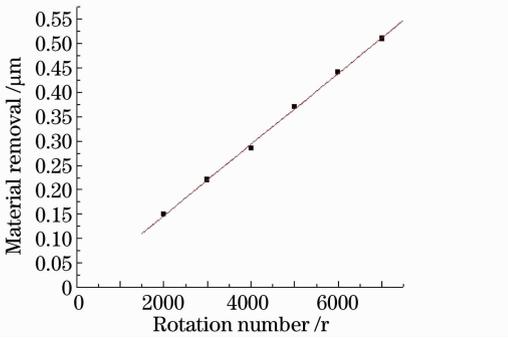


图2 抛光去除量随磨头转数的变化

Fig. 2 Relationship between polishing material removal and rotation number

抛光去除量随着磨头转数的增加成正比增长。这时,去除量 Δh 除以转数 Δr ($\frac{\Delta h}{\Delta r}$) 就是去除效率。这一点也是可以对碳化硅反射镜进行精确数控加工的基础。

4.2 磨料粒度

使用粒度为 W0.5、W1.0、W1.5、W2.5 和 W7.0 的人造金刚石微粉,其他参数与“抛光去除量实验”相同,对碳化硅样品进行抛光。看到抛光去除效率随磨料粒度的变化和表面粗糙度随磨料粒度的变化不明显,只是 W7.0 的粗糙度比其他的大 1 倍多,而去除效率高 4~5 倍,如图 3 所示。当磨料粒度在 W0.5~W2.5 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} 的变化很小,所以表面粗糙度变化不大;而且由于磨料粒度变化不大, V_L 和 V_{R_m} 的变化很小,磨头上嵌入颗粒的数量、 E_2 和 E_3 也很相近,所以去除效率的变化也不大。在 W7.0 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,磨料棱角的

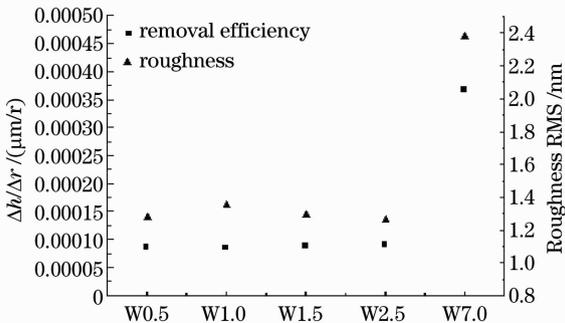


图3 磨料粒度对去除效率和表面粗糙度的影响

Fig. 3 Effect of abrasive granularity upon the material removal efficiency and surface roughness

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要比小颗粒时少很多,使得单个颗粒所受的载荷 P 大幅度增加,导致了粗糙度的变大;磨屑体积 V_L 的大幅度增加使去除单位体积材料所形成磨屑的数量减少,所形成的断裂面的数量和面积也大幅减少,需要的能量也相应减少,同时由于非嵌入颗粒的减少,使得能量浪费减少,在磨头作用的总能量不变、浪费能量和需要的能量变小的情况下,去除效率明显变大。

4.3 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“抛光去除量实验”的参数对碳化硅样品进行抛光。如图 4 所示,抛光盘硬度的变大使抛光去除量下降、表面粗糙度变坏。这是由于抛光盘硬度变大,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,导致了抛光去除量的下降和表面粗糙度的变坏。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的形式存在,此时, R_m 约等于磨料粒度 $0.5 \mu\text{m}$ 。注意到由于聚胺脂材料和 W0.5 人造金刚石微粉所形成的样片表面粗糙度 [10.6 nm 均方根 (RMS)] 比 4.2 小节中 55# 沥青抛光胶和 W7.0 人造金刚石微粉所形成的样片表面粗糙度 (2.38 nm RMS) 高 4 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,这也证明了前面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_L 的推论。

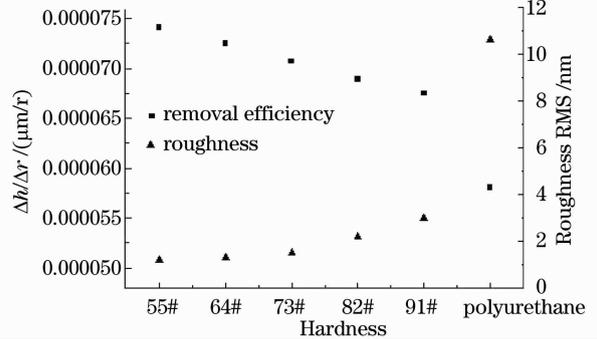


图4 碳化硅抛光材料去除量和表面粗糙度随抛光盘材料的变化

Fig. 4 Effect of tool material upon the material removal efficiency and surface roughness

4.4 抛光液酸碱度

由于化学作用的存在,抛光液的酸碱度对 SiO_2 质光学玻璃的抛光去除效率影响是很大的,在 pH

值为 4~10 时,抛光去除效率变化一般在 30% 以上^[2]。当使用稀 NaOH 溶液调节抛光液 pH 值分别为 4、7、10 时,碳化硅材料的抛光去除效率和表面粗糙度没有明显的变化。这是由于在碳化硅抛光过程中,化学反应几乎不起作用。

4.5 磨头转速

改变磨头转速分别为 100 r/min、125 r/min、150 r/min、200 r/min、300 r/min,对碳化硅样品进行抛光,当转速在 200 r/min 以下时,去除效率和粗糙度均比较稳定,但是当转速为 300 r/min 时,去除效率和粗糙度都急剧变坏,如图 5 所示。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,导致非嵌入颗粒数量的大量增加,使得去除效率和粗糙度变坏。

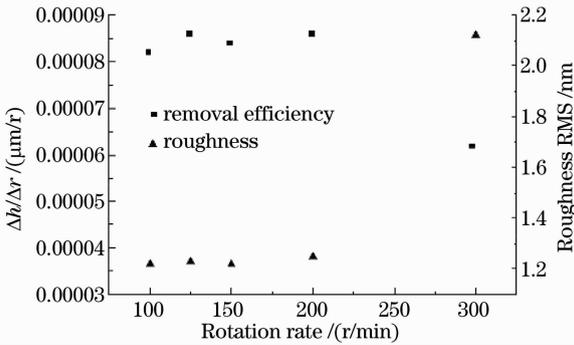


图 5 磨头转速对抛光去除效率和表面粗糙度的影响

Fig. 5 Effect of tool rotation rate upon the material removal efficiency and surface roughness

4.6 磨头压力

将磨头压力分别设置为 5.8 N、11.5 N、17.3 N、23.0 N、28.8 N、34.5 N、40.3 N,对样片进行抛光,得到抛光去除效率和粗糙度随磨头压力的变化曲线,如图 6 所示。从图中可以看出随着压力

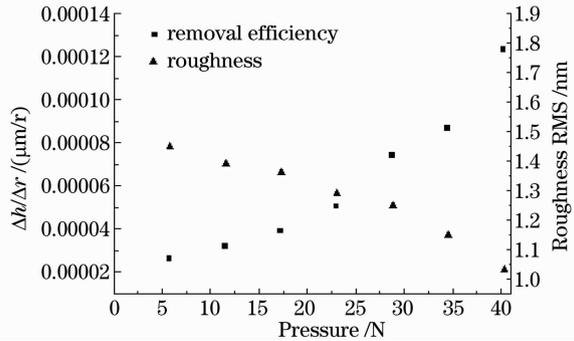


图 6 碳化硅材料抛光去除效率和表面粗糙度随抛光盘压力的变化

Fig. 6 Effect of pressure load upon the material removal efficiency and surface roughness

的增加,去除效率的增加很明显,而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,因此磨头压力的增加有利于粗糙度的改善。而压力的增加,非嵌入颗粒的减少,使得总能量增大,浪费能量减少,更多的能量被用于脆性去除,去除效率呈一种非线性地增长。

4.7 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,使得去除效率和粗糙度得到改善;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 FSGJ-II 非球面数控加工中心的工作温度为 275~278 K,在这种变化下,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。基于这一点,结合 FSGJ-II 非球面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,磨料为人工造金刚石微粉,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力为 40.3 N,磨头转速设为 200 r/min,环境温度为 298 K。不同的是在抛光的不同阶段,选择不同粒度的磨料。在抛光的初始阶段,面形精度比较差(RMS 值一般在 5λ 以上),加工余量较大,并且对表面粗糙度要求不高,这就要求抛光的材料去除量要高,因此,我们选用粒度为 W7.0 的人造金刚石微粉。当面形精度收敛到 $1/10\lambda$ 时,抛光进入了收尾阶段,对表面粗糙度和面形精度都提出了较高的要求,此时,可以选用 W1.0 或 W0.5 的人造金刚石微粉,以改善表面粗糙度,并降低去除效率,提高加工精度。在抛光的收尾阶段,之所以不选用 W1.5 和 W2.5 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 μm 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。

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. 1~25
- 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): 286~291
- 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): 286~291
- 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. Introduction to Inorganic Non-Metallic Materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999. 502~508
- 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. 502~508
- 5 Wang Junlin. Research on Optical SiC Mirror[R]. Postdoctoral Research Report, 2002, **6**: 195~196
- 王君林. 光学用 SiC 反射镜的研究[R]. 博士后出站报告, 2002, **6**: 195~196
- 6 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 170~174
- 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): 170~174
- 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, Lewis K. Ives. 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 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): 47~51
- 10 Liu Zixun. 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 镒, 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 镒, 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 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

栏目编辑: 马 沂