

文章编号 1004-924X(2009)03-0513-06

固着磨料加工碳化硅反射镜的微观理论模型

王 旭, 张学军

(1. 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;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 基于固着磨料加工碳化硅反射镜的微观作用原理, 从理论上定量分析了金刚石磨料压入碳化硅工件的深度对材料去除率、光学元件表面粗糙度的影响, 分别获得了材料去除率数学模型及粗糙度的仿真计算结果。实验与理论模型的对比结果表明: 去除率实验值与理论值走势相同并稳定在同一数量级内; 粗糙度实验所使用的 W1.5, W3.5, W5 等九片获得的粗糙度理论值与实验偏差分别为 5.97%, 3.19%, 3.59%, 由此验证了理论分析的正确性。

关键词: 碳化硅反射镜; 固着磨料; 九片; 去除率; 粗糙度

中图分类号: TN304.05; TH703 **文献标识码:** A

Micro theoretical model for grinding SiC mirror with fixed abrasive

WANG Xu, ZHANG Xue-jun

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing
Technology Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics
and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*)

Abstract: Based on micro-interaction principle of fabricating SiC material with fixed abrasive, this paper quantitatively discussed the influence of depth of diamond abrasive formed in SiC workpiece on the material removal rate and surface roughness of optical component. The mathematical model of material removal rate and the simulation results of surface roughness were obtained, respectively. By comparison of experimental results with theory in material removal rate and surface roughness, the trend of theoretical and experimental results are basically the same and the values of results are maintained in the same quantitative level; The difference of roughness of pellets W1.5, W3.5, W5 in experiment and theory are 5.97%, 3.19%, 3.59%, respectively, which can validate the correctness of theory analysis.

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

收稿日期: 2008-06-04; 修订日期: 2008-07-10.

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工程资助项目

1 引言

新一代的空间对地光学信息收集系统,不仅要求其具有高的地面像元分辨力,还要有大的覆盖宽度,这使得光学系统不断地向大口径、离轴化、高度轻量化的方向发展,以满足我国国防空间技术的发展对光学系统的高质量、高分辨力和宽覆盖的技术需要。这种发展趋势对光学遥感相机的核心关键元件—优质轻型光学反射镜的材料亦提出了极高的要求。

碳化硅材料具有较高的弹性模量,适中的密度,较小的热膨胀系数,较高的导热系数和耐热冲击性,因此具有比刚度高、尺寸稳定性好等一系列优良的物理特性,是一种具有广阔应用前景的反射镜材料^[1]。但是,由于碳化硅材料具有高硬度、高弹性模量等性质,使碳化硅反射镜的光学加工难度很大,尤其是应用传统散粒磨料工艺会遇到加工精度不稳定、效率较低而成本较高等一系列亟待解决的问题。

20 世纪 70 年代固着磨料工艺的出现解决了传统散粒磨料慢速加工中所存在的大部分缺欠,经过近几十年的发展,固着磨料工艺无论是从制作工艺还是从使用性能上都有了质的提高。因此,利用固着磨料工艺加工出优质轻型的碳化硅反射镜成为可能。由于固着磨料的确定性加工特点便于从数学模型角度精确描述加工过程,具有良好的预测性,为采用数控光学加工技术进行大口径碳化硅反射镜的加工奠定了理论基础。本文正是基于上述理由首次采用固着磨料树脂丸片加工反应烧结碳化硅反射镜,从理论分析和实验分析两方面着手,验证了固着磨料工艺加工反应烧结碳化硅反射镜的可行性。

2 理论分析

通常,固着磨料制作工艺是用金刚石磨料与特殊的树脂结合剂相结合制成丸片的形式。在加工过程中,多个丸片固定在磨盘上的形式易于加工。由于金刚石磨料在丸片内部的位置相对固定,并且磨料浓度等参数在加工过程中维持恒定,有利于建模。

2.1 丸片单位表面磨料数目的计算

假设丸片中的磨料浓度为 ξ (百分比),金刚石磨粒直径为 D ,则丸片表面单位面积内微粒个数为:

$$m = \frac{4\xi^{\frac{2}{3}}}{\pi D^2}, \quad (1)$$

假设磨粒露出结合剂的高度为 a ,其服从均匀分布。另假设当 $a > \frac{D}{2}$ 时,磨粒脱落。则 a 的分布密度为:

$$f(a) = \begin{cases} \frac{1}{a_{\max}} & (0 < a < a_{\max} < \frac{D}{2}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}, \quad (2)$$

由式(2)求得单位面积内露出结合剂高度 $< x$ 的磨料分布概率为:

$$P\{a < x\} = \int_0^x \frac{1}{a_{\max}} da = \frac{x}{a_{\max}}, \quad (3)$$

则利用式(1)、(3)得到单位面积内露出结合剂高度 $> x$ 的磨料数为:

$$m_1 = \frac{4\xi^{\frac{2}{3}}}{\pi D^2} \left(1 - \frac{x}{a_{\max}}\right). \quad (4)$$

2.2 磨料压入深度的计算

根据 Yongwu Zhao, L. Chang^[2] 关于工件与磨料之间为塑性接触,而磨盘与磨料之间为弹性接触的模型,可以通过计算得出丸片中金刚石微粒与碳化硅工件接触为塑性接触,而金刚石微粒与树脂结合剂的接触则为弹性接触。那么根据弹性力学理论可得出丸片中金刚石微粒与碳化硅工件的接触力的表达式,即:

$$F_{fw} = H_w \pi D \delta_w, \quad (5)$$

而金刚石微粒与树脂结合剂的接触力表示为:

$$F_{fp} = \frac{4}{3} E_{fp} \left(\frac{D}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \delta_p^{\frac{3}{2}}, \quad (6)$$

其中, E_{fp} 为金刚石微粒与树脂结合剂的综合杨氏模量, H_w 为碳化硅工件的硬度, δ_p, δ_w 分别为金刚石颗粒受力后嵌入树脂结合剂和碳化硅工件的深度。

微观接触模型如图 1 所示, δ_p, δ_w 满足 $\delta_p + \delta_w = a$, 其中 a 为金刚石微粒露出丸片的高度。最后利用力学平衡原理 $F_{fp} = F_{fw}$, 得:

$$\frac{4}{3} E_{fp} \left(\frac{D}{2}\right)^{\frac{1}{2}} (a - \delta_w)^{\frac{3}{2}} = H_w \pi D \delta_w, \quad (7)$$

经整理式(7)最终得出:

$$\delta_w^3 + \left(\frac{9H_w^2 \pi^2 D}{8E_{fp}^2} - 3a\right) \delta_w^2 + 3a^2 \delta_w - a^3 = 0. \quad (8)$$

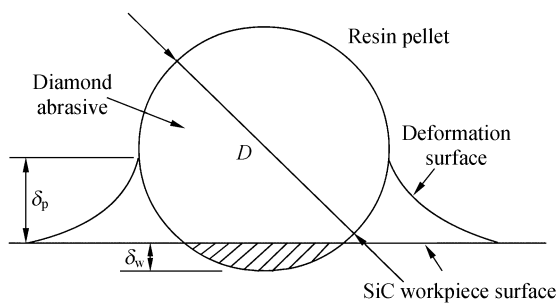


图1 金刚石磨料与碳化硅工件的微观接触模型

Fig. 1 Model of microinteraction between diamond fixed abrasive and workpiece

通过方程(8)解得在达到力学平衡时单个金刚石磨料压入碳化硅工件的深度值 δ_w 。

2.3 材料去除率的理论计算

材料去除率可以定义为单位时间内在工件表面上材料的平均去除厚度。图2为单个金刚石磨料与碳化硅工件接触处的放大图。

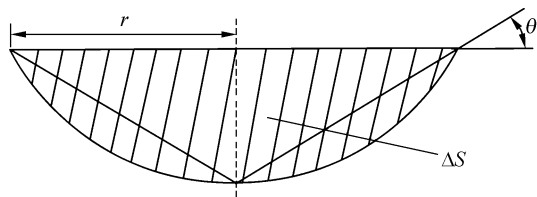


图2 单个磨料与工件接触处的放大示意图

Fig. 2 Sketch of contact area between single abrasive and workpiece

对单个微粒而言,在 t 时间内的材料去除量为:

$$\Delta G = K \cdot \Delta S \cdot v \cdot t, \quad (9)$$

其中, K 为常量, t 为抛光时间, ΔS 为单个微粒划过工件表面形成的凹槽的横截面积, v 为单个微粒的运动速度。

则材料去除率根据定义表示为:

$$\rho = \frac{\Delta G N_a}{A_n t} = \frac{K \cdot \Delta S \cdot v \cdot N_a}{A_n}, \quad (10)$$

其中, N_a 为在面积 A_t 内露出树脂结合剂高度大于的磨料数,表示为 $N_a = A_t m_1$, A_t 为在丸片内磨料与工件接触的真实面积, A_n 为抛光盘宏观接触面积。

式(9)中的常量 K 由 Rabinowicz^[3] 的理论推导得:

$$K = \frac{3}{\pi} \tan \theta \approx \frac{3}{\pi} \frac{\delta_w}{r} \approx \frac{3}{\pi} \frac{\delta_w}{\sqrt{D \delta_w}} = \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{\delta_w}{D}}, \quad (11)$$

横截面 ΔS 根据图2中各参量的关系的表达式为:

$$\Delta S = \frac{1}{2} \delta_w (2r), \quad (12)$$

其中,

$$r = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - \delta_w\right)^2} = \sqrt{\delta_w D - \delta_w^2}, \quad (13)$$

由于 $\delta_w \ll D$, 则式(12)简化为:

$$\Delta S \approx \delta_w \sqrt{\delta_w D}, \quad (14)$$

把式(4)、(14)代入到式(10),并根据式(8)计算的结果,式(10)的材料去除率公式最终表示为:

$$\rho = \frac{12 \xi^{\frac{2}{3}}}{\pi^2 D^2} V A_t^* \delta_w^2 \left(1 - \frac{x}{a_{\max}}\right), \quad (15)$$

其中, $A_t^* = A_t / A_n$ 。

2.4 表面粗糙度的仿真计算

把金刚石、碳化硅的杨氏模量、硬度等参数值代入到式(8),解得磨料的压入深度为 δ_w , 根据 δ_w 来模拟计算表面粗糙度值。由于真实模拟金刚石磨料加工碳化硅工件所形成的表面十分复杂,所以假设最终表面由磨料静止时压入工件所形成。那么令静止时的磨料压入工件形成的凹坑均匀随机分布于单位面积内的平面区域,以此来模拟丸片加工形成的表面,其中假设凹坑的形状为倒放的球冠,其高度为 δ_w 。若一个计算点的位置同时有多个凹坑覆盖,则选取绝对值较大的高度计算。凹坑数量由丸片表面单位面积内实际参与加工的磨料数目决定。经过分析,计算区域内随机分布的深度表示为 $z(x_i, y_j)$, 利用公式:

$$Ra = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z(x_i, y_j), \quad (16)$$

则可计算出工件表面粗糙度。

3 实验过程及数据分析

3.1 实验过程

测量口径为 80 mm 的反应烧结碳化硅反射镜的初始面形,保存测量结果并选取、标定一固定母线作为参考母线。之后在单轴抛光机上用 W7 丸片对反射镜上某一固定区域进行定点抛光,加工时间为 60 min^[4-9]。抛光结束后,重新测定反射镜表面面形,根据标定提取出相同位置的母线

数据,把结果与之前的母线数据做差,以此获得实际去除量。更换不同型号的丸片后,再重复上述步骤,分别测定不同丸片加工条件下的实际去除量。在每次更换丸片前,测量上道丸片加工的工件表面粗糙度。

3.2 结果及数据分析

3.2.1 去除率实验结果

按照上述去除率的实验过程,最终获得了去除率的实验值。通过与理论值的比较,获得如图 3 所示的实验结果。图中菱形标识所在曲线为理论值(上方),星形标识所在曲线为实验值(下方),虚线为实验值的三次多项式拟合曲线。

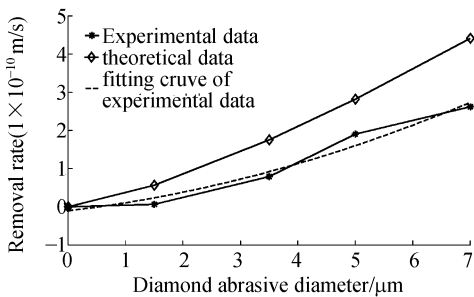


图 3 不同规格的丸片去除率曲线

Fig. 3 Removal amount curves of different type pellets

通过理论与实验综合分析可得出:

(1)随着磨料粒度的增加,其对应的去除率呈现非线性增长趋势。理论值与实验值的大体趋势相同。

(2)在加工过程中实际检测的接触面积随机性较大,并且由于实际丸片表面微观形状复杂,很难完全用理论模拟,只能在一定程度上逼近。在理论曲线中,磨料压入深度为最大压入深度,而在实际情况中,会有大量磨料并未达到最大压入深度,所以实际测量的去除量要比理论模拟值稍小。

(3)从理论模拟的结果看,虽然实际值与理论值有差异,但都控制在同一数量级内。偏差的出现不仅是因为有压入深度的影响,其他对去除率有影响的实际因素也较多。在理论模型中只考虑了丸片所受压力、速度、磨料浓度等主要因素,其他不可预知因素也会造成实际值与理论值偏差的出现。

(4)在模型中,去除率与磨料压入深度的平方成正比,也就是说去除率与磨料所受压力的平方

成正比,这与 Preston 方程中去除率与压力成正比并不一致。经分析认为这主要是散粒磨料加工过程中金刚石磨粒的滚动运动状态与固着磨料丸片内金刚石磨粒的平动运动状态不同所造成的,这种差异的出现还需大量充分的实验数据进行更为详细的验证分析。

(5)通过式(8)的数值计算可以了解: A_i^* , $\frac{\delta_w}{D}$ 均为常数,则丸片内的磨料浓度和抛光盘转动速度对材料去除率的影响较大。

3.2.2 表面粗糙度实验结果

在表面粗糙度的测量实验中,使用仪器为 DI 公司的 DimensionTM 3100 原子力显微镜,其取样长度为 $10 \mu\text{m}$,采样点数为 256,获得如图 4 的结果。

通过式(8)的压入深度模型与式(16)的粗糙度数学模型的结合计算获得了理论值,与实验值比对获得如图 5 所示的结果。图中菱形标示所在曲线为实际值(下方),星形标示所在曲线为理论值(上方)。

经分析得出:

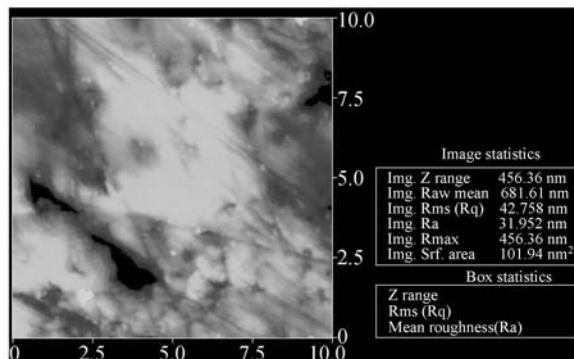
(1)根据理论值与实验值的对比,可以看出粗糙度曲线大体走势:随磨料粒度的增加,所获得的工件表面粗糙度呈 e 指数趋势增长。

(2)从图中可以看出实验值均比理论值偏大,其偏差比分别为 5.97%, 3.19%, 3.59%, 37.37%。这主要是因为丸片内存在着一定数量粒度较大的磨料,会使实际工件的表面粗糙度偏大,而在模拟过程中则认为磨料粒度的均匀性很好。

(3)在上述实验值均比理论值偏大的前提下,W7 丸片的情况更为明显,其偏差比达到了 37.37%。经分析是由于在 W7 丸片内存在着更多的粒度 $> 7 \mu\text{m}$ 的金刚石颗粒,其对碳化硅工件材料的去除属于脆性去除即存在材料崩裂现象,这样就会形成许多比理论预测值更深的凹坑,对表面粗糙度造成了严重的影响。

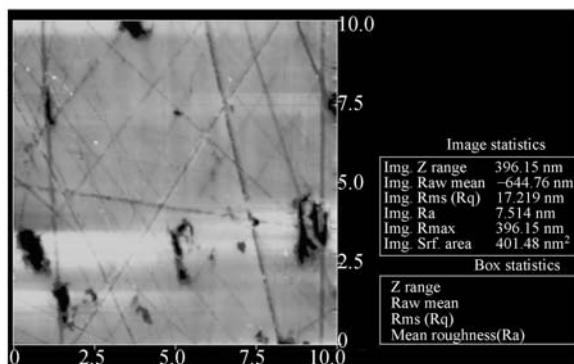
(4)从图 4(b)、(d)可以看到工件表面有明显的划痕,分析表明其主要原因是:(1)由于 W5, W1.5 丸片内含有相对较多的大于标准规格直径的金刚石磨料,加工过程中在工件表面极易造成

划痕,所以在丸片制作过程中应对使用的金刚石磨料有更为严格的筛选措施。(2)划痕的出现也有可能是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。



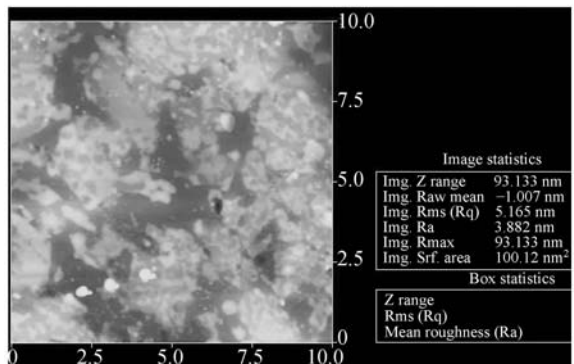
(a) W7 丸片加工结果: $Ra=31.952$ nm

(a) W7 fabrication result: $Ra=31.952$ nm



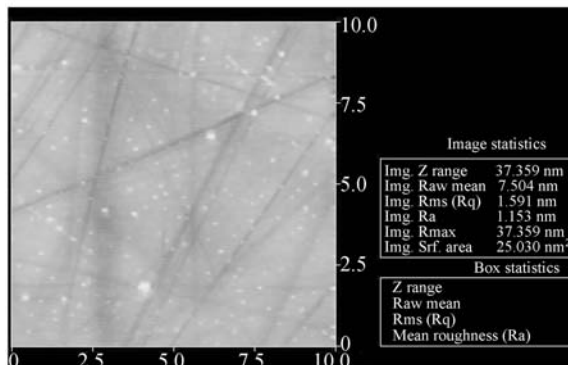
(b) W5 丸片加工结果: $Ra=7.514$ nm

(b) W5 fabrication result: $Ra=7.514$ nm



(c) W3.5 丸片加工结果: $Ra=3.882$ nm

(c) W3.5 fabrication result: $Ra=3.882$ nm



(d) W1.5 丸片加工结果: $Ra=1.151$ nm

(d) W3.5 fabrication result: $Ra=1.151$ nm

图4 AFM测量结果对比

Fig.4 Comparison of AFM testing results

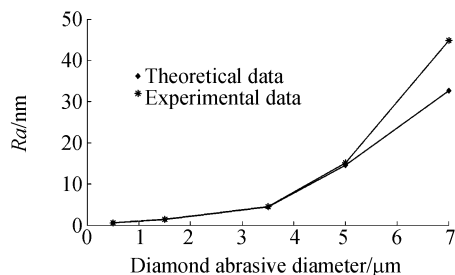


图5 不同规格丸片所获得的表面粗糙度曲线

Fig.5 Surface roughness curves of different type pellets

4 结论

本文在微观上对固着磨料加工工艺进行了详细的理论分析和数值模拟,并简单介绍了利用此工艺加工反应烧结碳化硅反射镜的加工过程。在去除率实验部分的结果显示随着磨料粒度的增大,去除率呈现非线性增加。与实验所获得的数据相对比,实际去除率与理论值虽有差异,但基本控制在同一数量级内。在表面粗糙度实验部分,使用W1.5粒度的丸片最终可获得粗糙度为 $Ra=1.151$ nm 的光滑表面。在实验值与理论值结果对比的过程中,两者的吻合度较高,获得了较为满意的结果。

由固着磨料的工艺原理决定了在加工过程中工艺去除效率的稳定性较高,并且理论模型与最

终实验结果较好的吻合度使得理论模型有了实际应用的意义。从表面粗糙度的实验结果看,固着磨料的加工工艺可以达到传统工艺的加工效果。

参考文献:

- [1] MARK A E, GERALD Q W. Developmental history and trends for reaction bonded silicon carbide mirrors[J]. *SPIE*, 1996, 2857, 66-72.
- [2] ZHAO Y W, CHANG L. A micro-contact and wear model for chemical-mechanical polishing of silicon wafers[J]. *Wear*, 2002, 252: 220-226.
- [3] RABINOWICZ E. *Friction and Wear of Materials* [M]. 2nd ed. Wiley, New York, 1995.
- [4] 薛栋林, 张忠玉, 张学军, 等. 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, *et al.*. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 198-204. (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 [C]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007: 192-193, 276-280.

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,现为中科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

由于固着磨料工艺的加工效率高、成本低,所以此工艺在加工碳化硅反射镜领域有着极为广阔的应用前景。

- [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)
- [8] 杨建东,田春林. 高速研磨技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.
YANG J D, TIAN C L. *High Speed Lapping Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [9] EDWARDS D F, HED P P. Optical glass fabrication technology. 1: Fine grinding mechanism using bound diamond abrasives [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(21): 4670-4676.



张学军(1968—),男,吉林长春人,中科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