

文章编号 1004-924X(2009)05-0951-07

# 固着磨料抛光碳化硅反射镜的去除函数

王 旭<sup>1,2</sup>, 张 峰<sup>1</sup>, 张学军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 进一步研究了采用固着磨料数控加工碳化硅反射镜的工艺, 基于平转动加工方式的去除函数理论推导出了多丸片抛光盘的去除函数模型。根据趋近因子、曲线距离等结果对抛光盘运动偏心距及丸片间距等参数进行优化, 由优化后的参数指导实验。理论模型与实验结果对比显示, 理论最大去除率与实验数据的偏差为  $0.0073 \mu\text{m}/\text{min}$ , 偏差比例为  $5.58\%$ ; 理论去除函数曲线与实验曲线的距离偏差  $D_{\text{rms}}$  为  $0.0849 \mu\text{m}$ , 偏差比例为  $7.01\%$ 。在分析部分, 引入填充因子来间接评价去除函数形状。实验结果很好地验证了理论模型的准确性。该模型对固着磨料磨具抛光的工艺过程具有很好的预测性, 在加工碳化硅反射镜领域极大地弥补了使用散粒磨料工艺加工所带来的不足, 使加工效率得以明显提升。

**关键词:** 固着磨料; 丸片; 碳化硅; 去除函数

**中图分类号:** TQ171.684 **文献标识码:** A

## Removal function of computer controlled polishing SiC mirror with fixed abrasive

WANG Xu<sup>1,2</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>, ZHANG Xue-jun<sup>1</sup>

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

**Abstract:** A new computer controlled polishing technology called the fixed abrasive machining technology is described in this paper, and a removal function model for multi-pellet polishing pads is established based on the removal function theory of plane motion. The parameters of the model, motion deflection distance of the polishing pad and the distance between pellets and pellets are optimized by a approaching factor and a curve rms distance to use in experiments. The comparison of the theoretical model and the experimental results show that the error between the theoretical maximum removal rate and the experiment data is  $0.0073 \mu\text{m}/\text{min}$ , and its deflection ratio is  $5.58\%$ . The rms distance warp between the theoretical removal function curve and the experimental curve is  $0.0849 \mu\text{m}$  and its deflection ratio is  $7.01\%$ . The veracity of the theoretical model is verified by experimental results, which can predict the feasibility of the fixed abrasive polishing technology and can lay a foreground for the SiC mirror precision fabrication field.

**Key words:** fixed abrasive; pellet; SiC; removal function

收稿日期: 2008-09-01; 修订日期: 2008-09-17.

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基金资助项目

## 1 引言

传统的碳化硅反射镜加工方法多采用散粒磨料研磨及抛光工艺。其加工精度虽然较高,但稳定性较差,去除率不能保持在一固定范围内,容易受到外界环境因素影响。加工精度不稳定这一现象对数控加工碳化硅反射镜的影响尤为明显,容易导致加工控制文件虚拟加工的结果与实际加工结果偏差较大,给碳化硅反射镜的确定性加工带来了不利因素。

在 20 世纪 70 年代发展起来的固着磨料加工工艺被公认为能够解决传统散粒磨料加工工艺中所存在的大部分缺欠。经过 30 多年的发展,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。使用此种工艺提高了加工精度、加工质量、加工效率,降低了加工成本,更为重要的是其具有较高的精度稳定性。基于固着磨料工艺良好的精度稳定性,本文从数学模型角度预测了工艺的去函数结果并与实验结果相对比来验证理论模型的正确性,从而为使用固着磨料数控加工碳化硅反射镜奠定扎实的理论基础。

## 2 理论模型的建立

在碳化硅反射镜的实际加工过程中,磨头多采用平转动运动方式。因此,本文主要针对平转动运动方式来研究多丸片磨头加工碳化硅的去函数。平转动方式下去函数的确定包括峰值的确定及基本形状的确定,因此,这里把峰值的确定与形状的确定分成两部分分别建模。

### 2.1 去除函数峰值理论模型

假设丸片中的磨料浓度百分比为  $\xi$ , 金刚石磨粒直径为  $D$ , 则丸片表面单位面积内微粒个数为:

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

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:

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

其中,  $a_{\max}$  为金刚石磨粒露出树脂层的最大高度。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:

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

另外结合 Yongwu Zhao, L Chang 的文章中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和力学平衡原理进行简单推导便可以得到丸片内金刚石颗粒压入碳化硅工件内的深度方程:

$$\delta_w^3 + \left(\frac{9H_w^2 \pi^2 D}{8E_p^2} - 3a\right) \delta_w^2 + 3a^2 \delta_w - a^3 = 0, \quad (5)$$

其中,  $\delta_w$  为金刚石磨粒压入碳化硅工件的深度;  $E_p$  为金刚石微粒与树脂结合剂的等效杨氏模量,  $H_w$  为碳化硅工件的硬度;  $a$  为磨粒露出结合剂的高度。

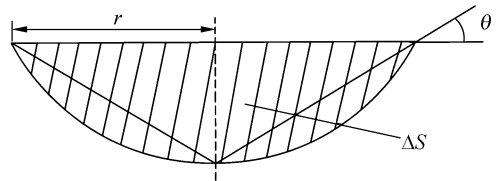


图 1 单个磨料与工件接触处的放大示意图

Fig. 1 Sketch of contact area between single abrasive and workpiece

由于抛光盘采用平转动方式, 可认为抛光盘上各点的运动速度相同, 则首先考虑单个微粒的加工情况。对单个微粒而言, 微观接触情况如图 1 所示, 在时间  $t$  内的材料去除量为:

$$\Delta G = K \cdot \Delta S \cdot v \cdot t, \quad (6)$$

其中,  $K$  为常量,  $t$  为抛光时间,  $\Delta S$  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。

抛光盘的材料去除率根据定义可表示为:

$$\Delta Z = \frac{\Delta G N_a}{A_n t} = \frac{K \cdot \Delta S \cdot v \cdot N_a}{A_n}, \quad (7)$$

其中,  $N_a$  为在面积  $A_i$  内露出树脂结合剂高度大于  $\frac{D}{2}$  的磨料数, 表示为  $N_a = A_i m_1$ ,  $A_i$  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。

综合式(4)、(5)、(6)、(7)可以获得去除函数峰值的去除率最终表达式:

$$\Delta Z = \frac{12\xi^{\frac{2}{3}}}{\pi^2 D^2} v A_i^* \delta_w^2 \left(1 - \frac{x}{a_{\max}}\right), \quad (8)$$

其中,  $A_i^* = A_i/A_n$  为实际接触面积比。

## 2.2 去除函数形状理论模型

### 2.1.1 单一丸片平转动模型

描述光学表面成型比较成功的模型是 Preston 方程<sup>[2]</sup>:

$$\Delta Z(x, y) = K \cdot P(x, y) \cdot v(x, y), \quad (9)$$

其中,  $\Delta Z(x, y)$  为磨头与工件接触区域中点  $(x, y)$  单位时间内的材料去除量;  $K$  表示比例系数, 与加工过程有关, 如温度, 磨头材料等;  $P(x, y)$  表示  $(x, y)$  点的瞬时相对压强;  $v(x, y)$  表示  $(x, y)$  点的瞬时相对速度;

结合式(9)和王权陡<sup>[3]</sup>等人的工作, 获得了如下抛光盘工作函数:

$$f(x, y) = \frac{1}{T(x, y)} KP(x, y) \int_{T(x, y)} v(x, y) dt, \quad (10)$$

其中,  $T(x, y)$  表示点  $(x, y)$  在一个抛光周期中的抛光总时间。

平转动示意图如图 2 所示, 其中抛光盘半径为  $r$ , 偏心距为  $e$ , 抛光盘在一个作用周期内所覆盖的工作表面的区域为以  $(r+e)$  为半径、以  $O$  点为中心的区域。工件任意一点  $A$  与  $y$  轴夹角为  $\alpha$ , 系统为回转对称。

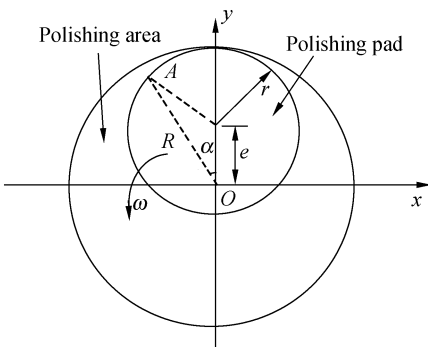


图 2 平转动原理示意图

Fig. 2 Principle map of planet motion

根据平转动加工方式抛光盘的运动特点, 得到工件上某一点  $A$  与抛光盘的相对作用角度的表达式<sup>[3]</sup>:

$$2\alpha = \begin{cases} 2\arccos\left(\frac{R^2 + e^2 - r^2}{2R \cdot e}\right) & r - e < R \leq r + e \\ 2\pi & 0 \leq R \leq r - e \end{cases}, \quad (11)$$

工件上任意一点相对抛光盘的运动速度为一恒量, 等于角速度乘以偏心距, 同时  $dt = d\alpha/\omega$ , 因此根据式(10)得到抛光盘的工作函数原型<sup>[3]</sup>:

$$f(R) = \begin{cases} 2eKP\arccos\left(\frac{R^2 + e^2 - r^2}{2R \cdot e}\right) & r - e < R \leq r + e \\ 2\pi eKP & 0 \leq R \leq r - e \end{cases}, \quad (12)$$

其中,  $R = \sqrt{(x-m)^2 + (y-n)^2}$ , 为  $m, n$  丸片运动形成的圆形轨迹的圆心坐标。

### 2.1.2 多丸片平转动模型

在固着磨料工艺中, 磨头由多个丸片组成, 其总的工作函数应为多个单一丸片平转动的线性叠加。

因此, 由式(12)得到的单一丸片工作函数在多丸片磨头的加工坐标中表示为:

$$f(R_i, m_i, n_i) = \begin{cases} 2eKP\arccos\left(\frac{R_i^2 + e^2 - r^2}{2R_i \cdot e}\right) & r - e < R_i \leq r + e \\ 2\pi eKP & 0 \leq R_i \leq r - e \end{cases}, \quad (13)$$

其中,  $R_i = \sqrt{(x-m_i)^2 + (y-n_i)^2}$ ,  $m_i, n_i$  为第  $i$  个丸片平转动形成的圆形轨迹的圆心坐标。对于不同的丸片位置分布, 每个丸片平转动所形成的轨迹圆心坐标需要分别确定。

由式(8)可得, 在时间  $t$  内, 去除函数峰值的材料去除量为:

$$\Delta = \Delta Z \cdot t, \quad (14)$$

由式(13)可知, 工作函数的最大值为:

$$|f(R_i, m_i, n_i)|_{\max} = 2\pi eKP, \quad (15)$$

根据材料去除量不变原理, 由式(14)、(15)得:

$$\Delta Z \cdot t = 2\pi eKP, \quad (16)$$

把式(16)代入到式(13)内整理得:

$$f(R_i, m_i, n_i, t) = \begin{cases} \frac{\Delta Z \cdot t}{\pi} \arccos\left(\frac{R_i^2 + e^2 - r^2}{2R_i \cdot e}\right) & r - e < R_i \leq r + e \\ \Delta Z \cdot t & 0 \leq R_i \leq r - e \end{cases}, \quad (17)$$

根据式(17), 最终多丸片磨头在工作了  $t$  时刻的工作函数表示为:

$$F = \sum_{i=1}^n f(R_i, m_i, n_i, t), \quad (18)$$

由式(18)可模拟得到在一定加工参数下的多丸片平转动去除函数。

### 3 实验研究

#### 3.1 理论数值模拟实验

为获得较好的去除函数形状,本文采用 7 个丸片<sup>[4]</sup>组合,其位置分布示意图如图 3 所示。

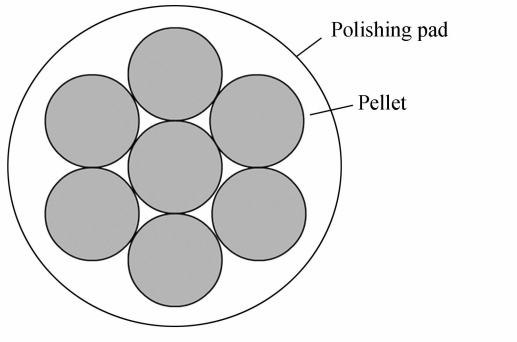


图 3 丸片位置图

Fig. 3 Distribution of pellets

模拟使用的丸片内金刚石颗粒为  $5\ \mu\text{m}$ ,直径为  $10\ \text{mm}$ ,厚度为  $5\ \text{mm}$ ,丸片表面为平面。外围丸片与中心丸片的圆心间距为  $d$  (单位为  $\text{mm}$ ),抛光盘运动偏心距为  $e$  (单位为  $\text{mm}$ )。为评价去除函数的形状,本文引入趋近因子以及曲线 rms 距离等概念。

趋近因子  $F_{1/4}$ <sup>[5]</sup> 定义为距抛光区域中心点  $1/4$  范围内的抛光量  $W_{1/4}$  与总去除量  $W$  的比值。表达式为:

$$F_{1/4} = \frac{W_{1/4}}{W}, \quad (19)$$

根据上述定义及式(18),趋近因子与丸片间圆心距离  $d$ ,抛光盘运动偏心距  $e$  等变量的数值关系如表 1 所示。

表 1 趋近因子  $F_{1/4}$  与  $t, e$  变量的数值关系

Tab. 3 Numerical relationship between  $F_{1/4}$  and  $d, e$

$d \backslash e$	11	10	9	8	7
10	0.138 8	0.147 7	0.149 2	0.146 8	0.133 1
12	0.137 4	0.136 9	0.121 9	0.113 5	0.108 7
14	0.114 5	0.105 7	0.100 2	0.090 6	0.080 6

曲线 rms 距离定义为文中所模拟的去除函

数与符合特定条件的高斯函数间的均方根值。本文中高斯函数所符合的特定条件是其顶点与模拟去除函数相等并且高斯函数在其  $3\sigma$  处对应着模拟去除函数值为 0 的边界。

曲线 rms 距离表达式为:

$$D_{\text{rms}} = \|f - N\| = \sqrt{(f - N)^T (f - N)}, \quad (20)$$

其中,  $f$  为模拟的去除函数,  $N$  为高斯函数。

根据曲线 rms 距离的定义及式(18),曲线 rms 距离与丸片间圆心距离  $d$ ,抛光盘运动偏心距  $e$  等变量的数值关系如表 2 所示。

表 2 曲线 rms 距离与  $t, e$  变量的数值关系

Tab. 2 Numerical relationship between curve rms distance and  $d, e$

$d \backslash e$	11	10	9	8	7
10	0.338 9	0.310 3	0.292 5	0.319 8	0.366 2
12	0.346 1	0.329 2	0.371 0	0.477 6	0.858 8
14	0.371 9	0.478 5	0.922 0	0.835 7	0.746 8

表 1 内数据越大表明其形状越接近高斯函数,而表 2 内数据越小则表明其形状越接近高斯函数。因此,由以上数据可以判断当  $e=9\ \text{mm}$ ,  $d=10\ \text{mm}$  时的去除函数形状最优。

#### 3.2 加工实验条件描述

根据模拟的结果来看,当丸片的偏心距为  $9\ \text{mm}$ ,丸片圆心间距为  $10\ \text{mm}$  时,所获得去除函数形状最接近高斯函数,可以获得相对满意的结果。那么,在真实加工过程中以此为加工参数,进行实验验证。

实验使用的丸片规格为  $W5, \phi 10 \times 5, R\infty$ ,在长春光机所自行研制的 FSGJ-1 加工中心上进行,主轴最高转速为  $200\ \text{r/min}$ ,加工压强从  $0.1 \sim 0.5\ \text{MPa}$  均匀可调。使用的碳化硅工件为长春光机所自行烧制的反应烧结碳化硅,工件直径为  $80\ \text{mm}$ 。

首先,使用 Zygo 干涉仪测量加工前碳化硅反射镜的面形,将其作为参考面形,并做好位置定标。在 FSGJ-1 加工中心上对工件进行定点加工,转速设定为  $200\ \text{r/min}$ ,加工时间为  $360\ \text{s}$ ,压强设定为  $0.1\ \text{MPa}$ 。加工结束后再次利用干涉仪测量所得面形,利用干涉仪的 Sys Err File 功能

直接获得两次面形的变化分布图。由此,我们直接得到以上加工条件下的丸片去除函数。

### 3.3 实验结果分析

此部分主要分析实验与理论模拟的对比结果。

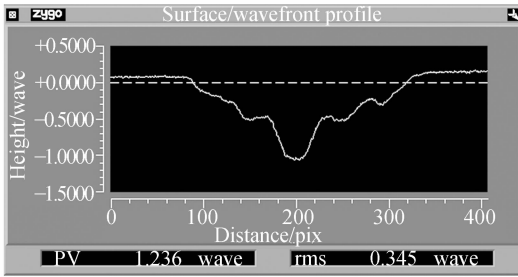
#### 3.3.1 峰值对比

使用 7 个丸片,丸片体积浓度为 10%。把实验条件参数代入到式(5)中,则获得理论去除率  $\rho_{theory} = 0.1309 \mu\text{m}/\text{min}$ 。通过相同参数的实验获得的去除率为:

$$\rho_{experiment} = 0.1236 \mu\text{m}/\text{min}, \text{ 其偏差比为 } n = \frac{\rho_{theory} - \rho_{experiment}}{\rho_{theory}} = 5.58\% .$$

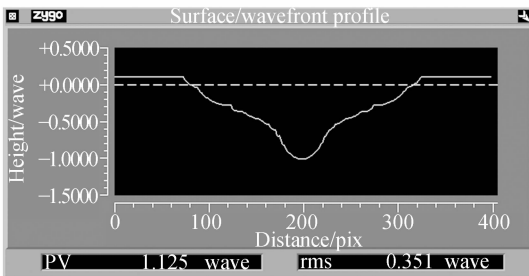
#### 3.3.2 去除曲线形状对比

把理论模拟数据与实际测量数据分别导入 Zygo 干涉仪的测量软件 MetroPro 内,分别截取 Surface/Wavefront Profile 和 Surface/Wavefront Map 图像以做对比。结果如图 4,5 所示。



(a) 实际去除函数

(a) Experimental removal function

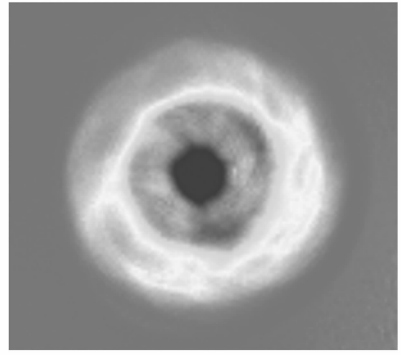


(b) 理论去除函数

(b) Theoretical removal function

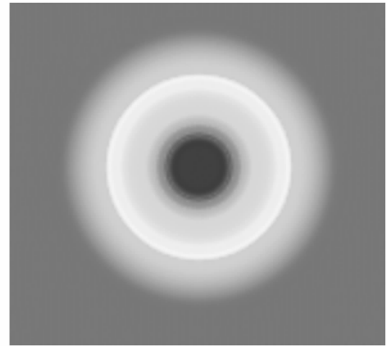
图 4 实际去除函数与理论去除函数的 Surface/Wavefront profile 比较

Fig. 4 Surface/Wavefront profile comparison of experimental and theoretical removal functions



(a) 实际去除函数

(a) Experimental removal function



(b) 理论去除函数

(b) Theoretical removal function

图 5 实际去除函数与理论去除函数的 Surface/Wavefront Map 比较

Fig. 5 Surface/Wavefront map comparison of experimental and theoretical removal functions

为更加直观,现把模拟去除曲线与实测去除曲线放入同一坐标系内进行比较,结果如图 6 所示。

针对上图,通过计算获得两曲线均方根距离为  $D_{rms} = 0.0849 \mu\text{m}$ ,其与最大理论去除率的比值为  $n = \frac{D_{rms}}{|f_{min}|} = 7.01\%$ 。

虽然二者有些许差别,但整体来看吻合度还是较高的。这也直接验证了去除函数形状理论模型与峰值理论模型的准确性。

对所获结果进行简单的分析:

(1)实际去除率略小于理论去除率。这主要是由于固着磨料树脂丸片的实际自锐能力并不是十分理想,造成磨损的金刚石颗粒不能及时脱落,

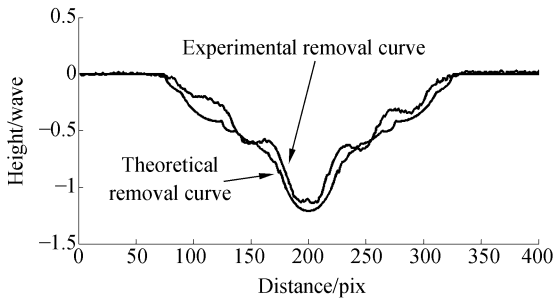
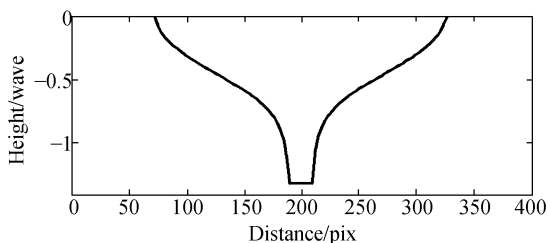


图 6 理论去除函数与实际去除函数的母线比较

Fig. 6 Generatrix comparison of theoretical and experimental removal functions

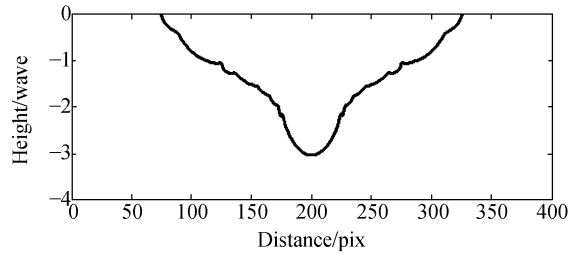
以致加工效率降低。另外,由于在同一加工压力参数条件下,最大去除率理论中,磨料压入深度均假设达到理论压入深度。而在实际情况中,会有大量磨料并未达到理论压入深度,所以两个原因最终导致实际测量的最大去除率要比理论模拟值稍小。因此在丸片制作过程中应相应降低丸片内树脂的结合力,并且尽量做到丸片内的金刚石颗粒的均匀。

(2)在去除函数中出现“台阶”现象。为了解此现象,引入填充因子 $\mu$ ,其定义为磨头上丸片与工件的总接触面积即有效加工面积与最外围丸片的包络圆面积之比,即 $\mu = \frac{S_{\text{contact}}}{S_{\text{envelope}}}$ 。传统加工方法中使用的沥青盘大多制作成圆形,可认为其填充因子为 $\mu = 100\%$ 。文中所使用的 7 个丸片总面积为 $S_{\text{contact}} = 5.495 \text{ cm}^2$ ,其包络圆直径为 3 cm,则 $S_{\text{envelope}} = 7.065 \text{ cm}^2$ ,因此文中所使用磨头的填充因子为 $\mu = 77.78\%$ ,4 个丸片组合的磨头填充因子为 $\mu = 68.65\%$ 。各填充因子所对应的模拟去除函数如图 7 所示。



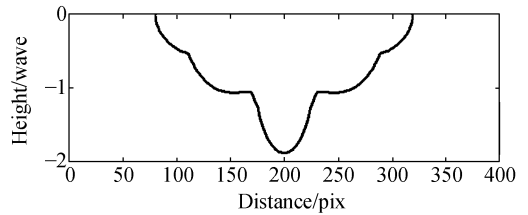
(a) 填充因子  $\mu = 100\%$

(a) Filling factor  $\mu = 100\%$



(b) 填充因子  $\mu = 77.78\%$

(b) Filling factor  $\mu = 77.78\%$



(c) 填充因子  $\mu = 68.65\%$

(c) Filling factor  $\mu = 68.65\%$

图 7 填充因子与“台阶”效应的关系

Fig. 7 Relationship between filling factor and “step” effect

通过图 7 虽然难以获得填充因子与“台阶”效应的定量关系,但可以定性了解,随着填充因子的减小,去除函数的“台阶”效应趋于明显。因此,为了改善去除函数的工作特性,则应该着重提高磨头的填充因子,即在一定的包络圆内,提高磨头上丸片的有效加工面积。

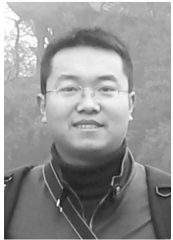
## 4 结 论

本文基于平转动的加工方式,针对多丸片抛光盘建立了去除函数形状模型,并且与去除率模型结合共同组成了完整的去除函数模型,且通过一系列的模拟和实际加工实验验证了去除函数模型的正确性。实验结果表明:理论去除率与实验结果偏差为 $0.0073 \mu\text{m}/\text{min}$ ,偏差比例为 $5.58\%$ ,而理论去除函数曲线与实验值偏差 $D_{\text{rms}} = 0.0849 \mu\text{m}$ ,其偏差比例为 $7.01\%$ 。上述结果表明,基于固着磨料丸片加工碳化硅反射镜的去除函数性质较为稳定,可预测性强,非常适合用于碳化硅反射镜的精研、粗抛等,因此丸片的使用对碳化硅反射镜的确定性加工有很好的应用价值。

## 参考文献:

- [1] ZHAO Y W, CHANG L. A micro-contact and wear model for chemical-mechanical polishing of silicon wafers[J]. *Wear*, 2002, 252: 220-226.
- [2] BROWN N J. *Optical Fabrication*[M]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1987: 6-7.
- [3] 王权陡, 余景池, 张峰, 等. 数控抛光中不同运动方式下小抛光盘抛光特性之比较[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(5): 73-79.  
WANG Q D, YU J CH, ZHANG F, *et al.*. Polishing performance comparison of small polishing pad worked in different motion model in computer controlled optical polishing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 73-79. (in Chinese)
- [4] ZHENG W M, CAO T N, ZHANG X Z. Applications of a novel general removal function model in the CCOS[J]. *SPIE*, 2000, 4231: 51-58.
- [5] 王毅, 余景池. 计算机控制光学表面抛光的磨头运动方式和参数优化研究[J]. *光学技术*, 2003, 29(3): 258-265.  
WANG Y, YU J CH. Studying and optimizing running mode and parameter of polishing tool used in computer controlled polishing of optical surface[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(3): 258-265.

## 作者简介:



王旭(1982—),男,辽宁沈阳人,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



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

## 通讯作者:



张峰(1969—),吉林人,研究员,主要从事光学加工与检测方面的工作。E-mail: zhangfy@yahoo.com.cn