

# 水射流抛光去除函数对面形误差修正的影响

吕亮 马平 朱衡 黄金勇 王刚

成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041

**摘要** 研究了水射流抛光条件下的去除函数特征,根据去除函数的一维轮廓特征采用分段解析函数拟合方法建立了去除函数的解析表达式。根据解析表达式采用 Matlab 数值模拟方法对不同参数条件下的去除函数进行了一维叠加去除模拟,引入波纹度均方根值  $W_{rms}$  指标,对均匀去除与线性去除条件下不同参数对去除函数一维误差修正的影响进行了讨论。通过两轮水射流抛光实验,使  $\Phi 50$  mm 熔石英玻璃面形峰谷值  $\lambda_{pv}$  由  $0.148\lambda$  收敛至  $0.062\lambda$ , 90%与 75%口径范围分别收敛至  $0.048\lambda$  与  $0.032\lambda$ 。面形均方根值  $\lambda_{rms}$  由  $18.86$  nm 收敛至  $4.87$  nm, 90%与 75%口径范围内分别收敛至  $3.67$  nm 与  $3.15$  nm。

**关键词** 光学制造; 水射流抛光; 去除函数; 熔石英

中图分类号 TN205 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0416003

## Effect of Material Removal Function on Surface Shape Error Correction in Fluid Jet Polishing

Lü Liang Ma Ping Zhu Heng Huang Jinyong Wang Gang

Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China

**Abstract** Material removal function characteristics in fluid jet polishing are discussed. According to the one-dimensional profile characteristics of the material removal function, the analytical formulas of the removal function are established. Based on the formulas, the Matlab numerical simulation is utilized to simulate the one-dimensional material removal process under the partial overlap condition and different parameters. The root mean square of the waviness  $W_{rms}$  is introduced to discuss the effect of different parameters on one-dimensional error correction under the constant removal process and the linear removal process. The optimized parameters are adopted in the subsequent fluid jet polishing experiments. The polishing results on  $\Phi 50$  mm fused silica glass show that the peak-valley value of surface shape  $\lambda_{pv}$  decreases from  $0.148\lambda$  to  $0.062\lambda$  after two rounds of experiments. Especially,  $\lambda_{pv}$  decreases to  $0.048\lambda$  for 90% aperture, and to  $0.032\lambda$  for 75% aperture. The root mean square of surface shape  $\lambda_{rms}$  decreases from  $18.86$  nm to  $4.87$  nm, especially to  $3.67$  nm for 90% aperture, and  $3.15$  nm for 75% aperture.

**Key words** optical fabrication; fluid jet polishing; material removal function; fused silica

**OCIS codes** 220.4610; 220.5450; 350.3850

## 1 引言

空间遥感、通讯、电子行业的迅猛发展以及以大型激光装置为代表的一批大科学装置的兴建催生了对超光滑表面、非球面及自由曲面光学元件的需求热潮,也给传统光学加工、特别是古典抛光技术带来了不小的挑战。为了适应新需求、新变化,一批以计算机控制为基础的确定性抛光(CCOS)方法应运而生,包括数控小工具抛光<sup>[1-2]</sup>、应力盘抛光<sup>[3]</sup>、气囊抛光<sup>[4-5]</sup>、磁流变抛光<sup>[6-8]</sup>、水射流抛光(FJP)<sup>[9-11]</sup>等。

水射流抛光技术是2000年起新兴的一种确定性抛光方法。该方法通过在水溶液中掺混磨料颗粒形成射流冲击工件表面产生的冲击作用和壁面流动产生的剪切力作用来实现材料的去除,属于非接触式抛光,加工工具呈液体状,抛光方式为完全柔性,不存在抛光盘磨损问题。水射流的稳定性和重复性使工艺过程

收稿日期: 2015-11-17; 收到修改稿日期: 2015-12-20

作者简介: 吕亮(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事光学元件冷加工方面的研究。E-mail: lliang701@163.com

具有较高的确定性和加工精度,加工效率低于小工具抛光和磁流变抛光,加工过程中抛光液循环流动利用,加工成本低。国内苏州大学最早开展水射流抛光研究工作,Fang等<sup>[12-13]</sup>针对水射流抛光的边缘去除特性、去除函数以及抛光液对不同玻璃材料的抛光质量进行了全面分析。中国科学院光电技术研究所施春燕等<sup>[9-10]</sup>针对水射流角度、抛光误差分析及材料去除稳定性进行了详细研究。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所马占龙等<sup>[11]</sup>针对材料去除机理及影响因素进行了深入研究。围绕增加水射流去除函数的稳定性,美国QED公司Kordonski等<sup>[14]</sup>提出磁射流抛光技术(MJP),通过增加磁场硬化水射流液柱,减少水射流液柱扰动,提高抛光质量。国防科学技术大学Li等<sup>[15-16]</sup>于2010年报道了其磁射流抛光技术研究结果,并针对去除函数优化和材料抛光去除机理报道了多项研究成果。哈尔滨工业大学Song等<sup>[17-18]</sup>采用硅溶胶作为抛光液,对超光滑表面的水射流抛光及原子尺度去除机理进行了详细研究,国防科学技术大学Peng等<sup>[16]</sup>采用建模仿真结合工艺实验,研究了抛光颗粒尺寸对抛光质量的影响,采用硅溶胶抛光液也成功得到了粗糙度低于1 nm的超光滑抛光结果。

## 2 基本原理

水射流抛光作为一种确定性抛光方法,其射流斑尺寸小于被抛光工件尺寸,在水射流斑覆盖范围内,材料的去除遵照Preston方程<sup>[19]</sup>,即

$$\frac{dV}{dt} = KP V, \quad (1)$$

式中 $K$ 为比例常数, $P$ 为表面某一点的抛光压力, $V$ 为该点在该时刻的相对抛光速度。

被抛光工件表面面形去除量 $e(x,y)$ 表示为去除函数 $r(x,y)$ 与驻留时间 $\tau(x,y)$ 的卷积<sup>[20]</sup>,即

$$e(x,y) = \iint_{\text{zone}} r(x-\xi, y-\eta) \tau(\xi, \eta) d\xi d\eta = r(x,y) \otimes \tau(x,y). \quad (2)$$

去除函数 $r(x,y)$ 为定点驻留二维去除轮廓值,可以通过抛光盘定点驻留去除实验得到,对于子孔径抛光(抛光盘尺寸小于被抛光工件尺寸)方法而言,去除函数包含了其大部分去除特征。大量研究表明,当去除函数具有高斯形分布时,通过与驻留时间卷积运算得到的去除量具有较小的面形残差,即能够得较高精度的表面面形。

对于水射流抛光技术来说,由于其射流斑的流体力学特性,其去除函数中心去除低于边缘,去除函数形状截面呈现中间凹陷的M形<sup>[9,21]</sup>。这是由于水射流冲击工件表面时受到壁面阻挡而发生转折,在射流区域外围,流体顺着流线由轴向速度变为沿壁面的切向速度流出,而中心区域流体受壁面阻挡使轴向速度变得极小,相对去除表面静止,形成压力滞止区。根据Preston方程,材料去除率与抛光颗粒和抛光表面的相对速度有关,由于射流斑中心与外围的流体速度差异,对于水射流抛光方法而言,其去除函数极易形成中间去除小于边缘去除的M形去除函数形状。

M形去除函数形状在理论上不利于面形精度的修正,围绕得到更接近高斯形状的去除函数,研究人员进行了大量研究工作<sup>[9,21-22]</sup>。如通过调整水射流与工件表面夹角,可以使去除函数中心去除量高于边缘,解决去除函数中间凹陷的问题,但此时去除函数的旋转对称性被破坏,为之后的去除体积计算与驻留时间分配带来了新的难题。在倾斜基础上增加旋转可以有效恢复被破坏的旋转对称性,得到十分接近理想高斯形的去除函数,但是这增加了水射流机构的复杂度,并且提高了对射流斑聚焦平面的定位精度要求。

虽然M形去除函数难以达到高斯形去除函数的面形修正精度,但是由于水射流抛光方法去除函数尺寸较小( $\Phi < 10$  mm),去除量低(小于 $0.1 \lambda \text{ min}^{-1}$ ),有利于抑制抛光过程中由于去除函数尺寸效应而产生的去除迭代误差,在一定精度范围内,M形去除函数仍可以实现较好的面形修正结果。针对水射流抛光M形去除函数的典型形状特征进行研究,通过建模与数值模拟分析不同参数对M形函数面形修正精度的影响。

## 3 分析与讨论

### 3.1 水射流抛光去除函数的解析函数拟合

水射流抛光去除函数通常为绕旋转轴对称的三维分布形貌,如图1(a)所示,为了简化分析,截取其过旋转对称轴的母线二维轮廓曲线进行分析,如图1(b)所示。

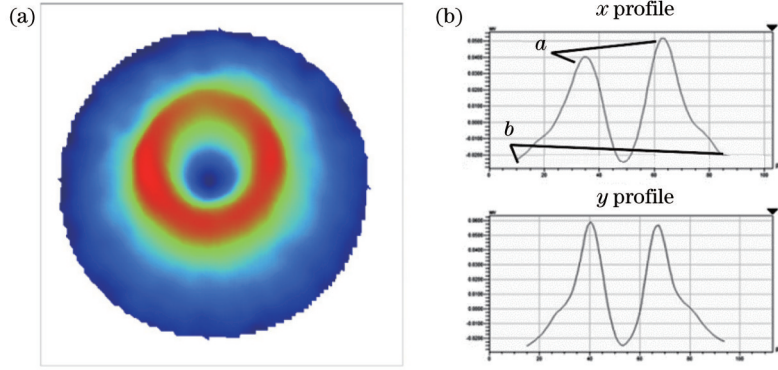


图1 水射流抛光去除函数特征。(a) 三维轮廓; (b) 二维轮廓

Fig.1 Material removal profiles in fluid jet polishing. (a) Three-dimensional profile; (b) two-dimensional profiles

考虑到二维轮廓曲线对称性,将坐标轴  $y$  轴设置为与对称轴重合,并以去除函数轮廓最低点作为零点,记此时解析拟合函数为  $f(x)$ 。通过观察函数特征,可以总结出解析拟合函数的性质如下:

- 1) 去除函数关于  $y$  轴对称,即  $f(x)=f(-x)$ ;
- 2) 去除函数是光滑的,即对定义域内任意  $x$  值,  $f'(x)$  存在;
- 3) 去除函数的极值点分别位于去除函数边缘和中心以及去除量最大处,如图 1(b)所示,即有  $f'(a)=f'(-a)=f'(b)=f'(-b)=f'(0)=0$ 。

根据以上要求,理论上  $f'(x)$  函数满足图 1(b)所示的过零点曲线均可表示为去除函数。考虑到函数表达式的简化要求,选择分段线性函数与分段三角函数来表示去除函数的导函数曲线,从而通过积分得到去除函数的拟合曲线。由于去除函数关于  $y$  轴对称,以下分析过程只涉及  $x>0$  时的函数表达式。

若去除函数为分段线性函数,其导函数表达式可以写为

$$\begin{cases} f_1'(x) = k_1 x, & x \in (0, c) \\ f_2'(x) = k_2(x - a), & x \in (c, d) \\ f_3'(x) = k_3(x - b), & x \in (d, b) \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $0 < c < a < d < b$ , 边界条件为  $f_1(c) = f_2(c)$ ,  $f_2(d) = f_3(d)$ ,  $f(b) = 0$ 。

由(3)式以及边界条件,积分得到去除函数的二次曲线拟合关系式为

$$\begin{cases} f_1(x) = \frac{1}{2}k_1 x^2 + \frac{k_2 k_3 (a+b)^2}{2(k_2 - k_3)} - \frac{k_2 k_1 a^2}{2(k_2 - k_1)}, & x \in \left(0, \frac{k_2 a}{k_2 - k_1}\right) \\ f_2(x) = \frac{1}{2}k_2 (x - a)^2 + \frac{k_2 k_3 (a+b)^2}{2(k_2 - k_3)}, & x \in \left(\frac{k_2 a}{k_2 - k_1}, \frac{k_2 a - k_3 b}{k_2 - k_3}\right) \\ f_3(x) = \frac{1}{2}k_3 (x - b)^2, & x \in \left(\frac{k_2 a - k_3 b}{k_2 - k_3}, b\right) \end{cases}. \quad (4)$$

若去除函数为分段三角函数,其导函数表达式可以写为

$$\begin{cases} f_1'(x) = A_1 \sin\left(\frac{x}{a}\pi\right), & x \in (0, a) \\ f_2'(x) = A_2 \sin\left(\frac{x - 2a + b}{b - a}\pi\right), & x \in (a, b) \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $0 < a < b$ , 边界条件为  $f_1(a) = f_2(a)$ ,  $f(b) = 0$ 。

积分得到去除函数的三角函数曲线拟合函数表达式为

$$\begin{cases} f_1(x) = -\frac{a}{\pi} A_1 \cos\left(\frac{x}{a}\pi\right) + \frac{2(b-a)}{\pi} A_2 - \frac{a}{\pi} A_1, & x \in (0, a) \\ f_2(x) = -\frac{(b-a)}{\pi} A_2 \cos\left(\frac{x - 2a + b}{b - a}\pi\right) + \frac{(b-a)}{\pi} A_2, & x \in (a, b) \end{cases}. \quad (6)$$

比较(4)式与(6)式可以看出,采用二次曲线描述去除函数形状,至少需要用3段不同参数的抛物线进行分段拟合,涉及到5项控制变量。而采用三角函数进行去除函数形状拟合,最少只需2段不同参数的三角函数

曲线,涉及到的控制变量只有4项。图2为原始去除函数形状和采用三角函数拟合得到的拟合曲线形状。从图中可以看出两者形状十分接近,因此采用三角函数曲线拟合可以满足实际需求。在之后的讨论分析中,选用(6)式所示的三角函数拟合曲线进行分析。

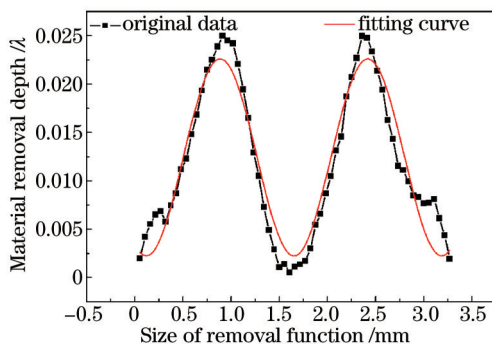


图2 去除函数轮廓与三角函数拟合结果( $\lambda=632.8$  nm)

Fig.2 Material removal function profile and its triangle fitting curve ( $\lambda=632.8$  nm)

### 3.2 拟合函数参数对面形修正精度的影响

为了方便分析去除函数特征,将(6)式改写为

$$\begin{cases} f_1(x) = A \left[ 2 - \alpha - \alpha \cos\left(\frac{2x}{\beta T} \pi\right) \right], & x \in (0, a) \\ f_2(x) = A \left[ 1 - \cos\left(\frac{2x - 2a + T}{T} \pi\right) \right], & x \in (a, b) \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $T = 2 \times (b - a)$ , 为拟合函数  $f_2(x)$  的周期,  $\beta = a/(b - a)$  为拟合函数  $f_1(x)$  与拟合函数  $f_2(x)$  的周期比,  $\beta > 0$ ,  $A = A_2$ ,  $\alpha = A_1/A_2$ , 记  $\alpha$  为扭曲系数,  $-1 < \alpha < 1$ 。当  $0 < \alpha < 1$  时,拟合曲线即为 M 形去除函数,当  $\alpha = 0$  时,拟合函数曲线退化为平顶去除函数,当  $-1 < \alpha < 0$  时,拟合函数变为中心最大去除函数。

由(7)式可知,采用三角函数拟合方法得到的拟合公式包括  $A$ ,  $T$ ,  $\alpha$  与  $\beta$  4 项参数。参数  $A$  与  $T$  反映了去除函数的尺寸特征,去除函数的最大去除深度为  $2A$ ,去除函数的直径尺寸大小为  $(1 + \beta)T$ 。因此参数  $A$  与  $T$  数值越小,其对应去除函数材料去除率越低,去除斑尺寸越小,越容易得到高精度的面形修正结果。参数  $\alpha$  与  $\beta$  反映了去除函数的形状特征,将去除函数尺寸进行归一化处理,去除函数之间的形状差异主要通过参数  $\alpha$  与  $\beta$  取值的不同予以区别。作为一种子孔径抛光方法,间距对于去除形貌残差也具有重要影响,由于去除函数覆盖区域小于被修正面形,因此,去除函数会通过一定比例的搭接实现对被修正面形的全区域覆盖,定义搭接频率  $f$  为去除函数尺寸与两搭接函数对应点间距的比值,以此来描述去除函数的搭接率,从搭接频率的定义可以看出,  $f$  值越大,相邻去除函数重叠范围越多,去除函数之间间隔越密。因此,讨论拟合函数参数对面形修正精度的影响时,重点讨论参数  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $f$  的影响,采用 Matlab 软件进行模拟仿真。

#### 1) 参数 $\alpha$ 对去除函数形状的影响

图3为参数  $\alpha$  分别为 1、0.4、0、-0.4 和 -1 时的去除函数形状,此时,  $\beta$  取值为 1。可以看出,随着  $\alpha$  值由正向负逐渐变化,去除函数中心去除量逐渐增大,到  $\alpha = -1$  时,去除函数中心达到最大去除量,此时去除函数与高斯形状函数最为接近,主要区别在于去除函数腰部有明显的平台特征,而高斯形函数无此特征。

#### 2) 参数 $\beta$ 对去除函数形状的影响

图4为参数  $\beta$  分别为 0.33、0.5、1、2 和 3 时的去除函数形状,此时,  $\alpha$  取值为 0.4。可以看出,随着  $\beta$  值由小到大逐渐变化,去除函数去除量最大点[图1(b)所示  $a$  点]沿  $x$  轴方向逐渐向外扩展,去除函数的边缘越来越陡峭。

#### 3) 面形修正的一维模拟

为了定量表征去除面形误差,可以引入波纹度均方根值  $W_{rms}$  进行表征。对于设定的去除函数  $f(x)$  与实际去除函数  $g(x)$ ,其波纹度均方根  $W_{rms}$  表示为



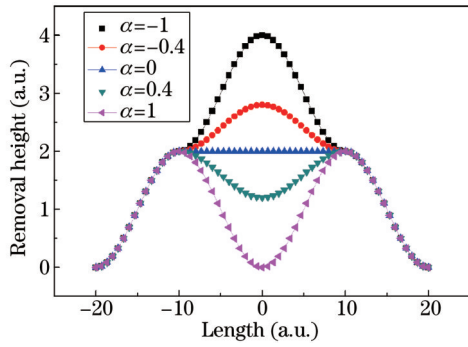


图3 参数  $\alpha$  对去除函数形状特征的影响

Fig.3 Variation in material removal function shape with the parameter  $\alpha$

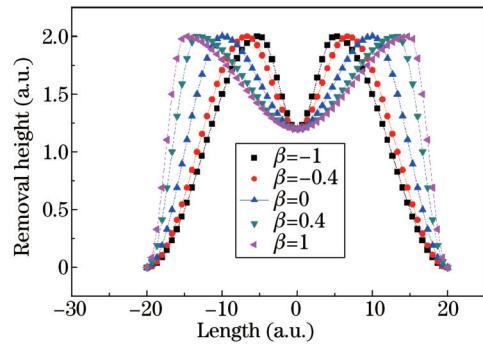


图4 参数  $\beta$  对去除函数形状特征的影响

Fig.4 Variation in material removal function shape with the parameter  $\beta$

$$W_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [g(x_i) - k \times f(x_i) - b]^2}{n}}, \quad (8)$$

$$\text{式中 } k = \frac{n \times \sum_{i=1}^n f(x_i)g(x_i) - \sum_{i=1}^n f(x_i) \times \sum_{i=1}^n g(x_i)}{n \times \sum_{i=1}^n f^2(x_i) - \sum_{i=1}^n f(x_i) \times \sum_{i=1}^n f(x_i)}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n g(x_i) \times \sum_{i=1}^n f^2(x_i) - \sum_{i=1}^n f(x_i)g(x_i) \times \sum_{i=1}^n f(x_i)}{n \times \sum_{i=1}^n f^2(x_i) - \sum_{i=1}^n f(x_i) \times \sum_{i=1}^n f(x_i)}.$$

图5为不同搭接频率  $f$  下一维去除面形的搭接结果,此时参数  $\alpha = 0.4$ ,  $\beta = 1$ ,其  $W_{\text{rms}}$  值分别为4.99[图5(a)]、0.73[图5(b)]、0.10[图5(c)]、0[图5(d)]和0[图5(e)]。可以看到,随着搭接频率  $f$  增大,一维模拟结果的  $W_{\text{rms}}$  值呈下降趋势,当  $f$  增加到6以上时,可以忽略波纹度的影响。

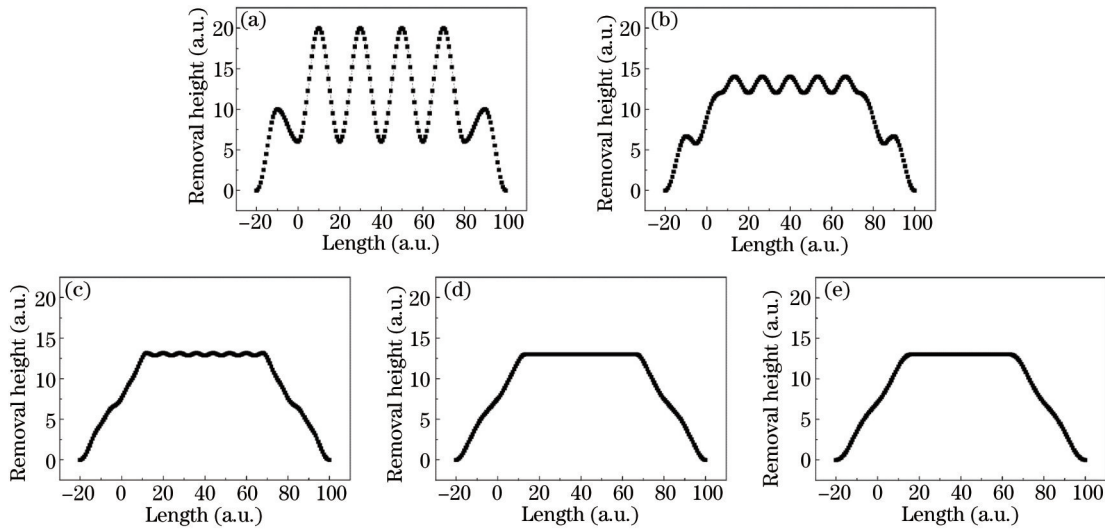


图5 不同搭接频率下一维表面面形修正结果。(a)  $f=2$ ; (b)  $f=3$ ; (c)  $f=5$ ; (d)  $f=6$ ; (e)  $f=10$

Fig.5 One-dimensional surface error correction profiles under different overlap ratios. (a)  $f=2$ ; (b)  $f=3$ ; (c)  $f=5$ ; (d)  $f=6$ ; (e)  $f=10$

图6为均匀去除条件[ $f(x) = C$ ],不同参数  $\alpha$ 、 $\beta$  值下一维去除函数的波纹度均方根值  $W_{\text{rms}}$ 。可以看出,当参数  $\beta < 1$  时,不同  $\alpha$  值对应的  $W_{\text{rms}}$  值差别较大,当参数  $\beta > 1$  时,不同  $\alpha$  值对应的  $W_{\text{rms}}$  值趋于一致。参数  $\beta$  值在1附近时,  $W_{\text{rms}}$  值较低,并且随参数  $\alpha$  取值变化不大,因此,控制参数  $\beta$  值处于1附近时,能够减小参数  $\alpha$  对  $W_{\text{rms}}$  值的影响,有利于得到精度较高的面形修正结果。

图7为线性去除条件[ $f(x) = C_x$ ],不同参数  $\alpha$ 、 $\beta$  值下一维去除函数的波纹度均方根值  $W_{\text{rms}}$ 。由图7可看出,与均匀去除条件类似,参数  $\beta < 1$  时,不同  $\alpha$  值对应的波纹度  $W_{\text{rms}}$  值差别较大,当参数  $\beta > 1$  时,不同  $\alpha$  值对应的  $W_{\text{rms}}$  值趋于一致。参数  $\beta$  值在1附近时,  $W_{\text{rms}}$  值较低。同时,相比均匀去除,线性去除条件下得到的  $W_{\text{rms}}$  值普遍偏大,反映出去除过程的非线性效应。

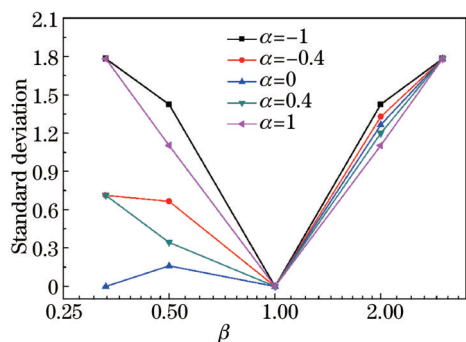


图6 均匀去除条件下不同参数值对面形波纹理  $W_{rms}$  的影响  
Fig.6 Variation in  $W_{rms}$  value with different parameters in the constant removal mode

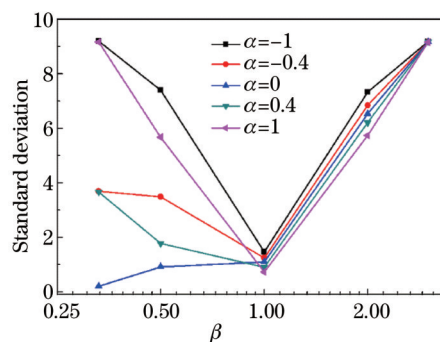


图7 线性去除条件下不同参数值对面形波纹理  $W_{rms}$  的影响  
Fig.7 Variation in  $W_{rms}$  value with different parameters in the linear removal mode

### 4 实验结果

针对理论模拟结果,选取有代表性的M形去除函数进行了面形修正实验,根据图2所示M形去除函数形貌以及得到的拟合参数  $A = 0.025\lambda$ ,  $T = 1.6 \text{ mm}$  ( $a = 0.724 \text{ mm}$ ,  $b = 1.474 \text{ mm}$ ),  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0.965$ ,选取搭接频率  $f = 10$ 。由上述分析可知,参数  $A$  取值较小,参数  $\beta$  取值接近1,均有利于减小面形修正误差,可得到较高精度的修正结果。

图8为拟合参数分别为  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0.965$ ,  $f = 10$  时的一维去除面形搭接拟合结果,图8(a)为均匀去除条件下的拟合结果,图8(b)为线性去除条件下的拟合结果,可以看到在中间区域(横坐标值为20~40区域)能够实现良好的均匀去除与线性去除结果,根据(8)式计算得到的  $W_{rms}$  值分别为0.00041与0.093,代入  $A = 0.025\lambda$ ,得到  $W_{rms}$  值分别为0.26 nm与1.47 nm,考虑到线性去除模式更能反映实际面形修正过程,因此1.47 nm可以看作是去除参数条件下的一维面形修正理论最小值。

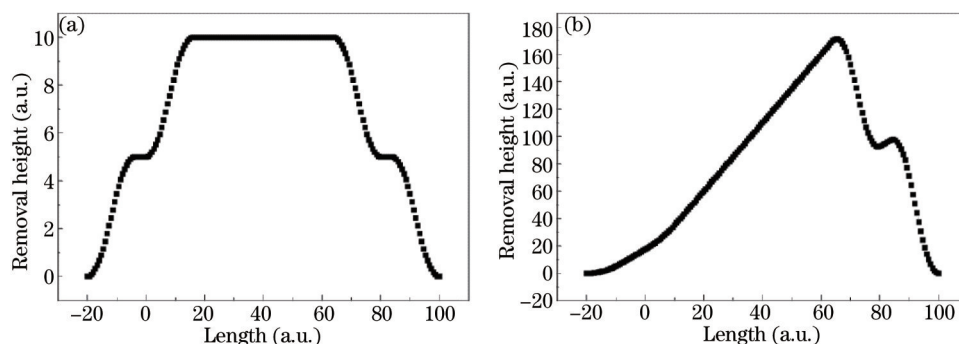


图8 表面面形一维修正拟合结果。(a) 均匀去除过程; (b) 线性去除过程

Fig.8 One-dimensional surface error correction profiles. (a) Constant removal process; (b) linear removal process

选用  $\Phi 50 \text{ mm}$  熔石英元件,采用伪随机路径进行路径规划。修正前和修正后的面形值如图9所示。其面形峰谷(PV)值  $\lambda_{pv}$  由修正前的  $0.148\lambda$  降至修正后的  $0.062\lambda$ ,在90%面形范围内,面形  $\lambda_{pv}$  值收敛至  $0.048\lambda$ ,在75%面形范围内,面形  $\lambda_{pv}$  值收敛至  $0.032\lambda$ 。其面形均方根值  $\lambda_{rms}$  由修正前的  $18.86 \text{ nm}$  降至修正后的  $4.87 \text{ nm}$ ,在90%面形范围内,面形  $\lambda_{rms}$  值收敛至  $3.67 \text{ nm}$ ,在75%面形范围内,面形  $\lambda_{rms}$  值收敛至  $3.15 \text{ nm}$ 。面形的高精度收敛得以实现。

对水射流抛光前后熔石英元件的功率谱密度(PSD)进行研究,结果如图10所示。比较加工前后的PSD曲线可以看出,在低频段(小于  $0.15 \text{ mm}^{-1}$ ),加工后的PSD指标低于加工前,而在中高频区域( $0.15 \sim 0.25 \text{ mm}^{-1}$ 与  $1.5 \sim 2.5 \text{ mm}^{-1}$ ),加工后的PSD指标均高于加工前。这反映了水射流抛光对于低频段具有较好的修正能力,而由于去除过程的子孔径抛光特征以及去除函数带来的复杂频率成分,导致中高频区域PSD指标恶化。

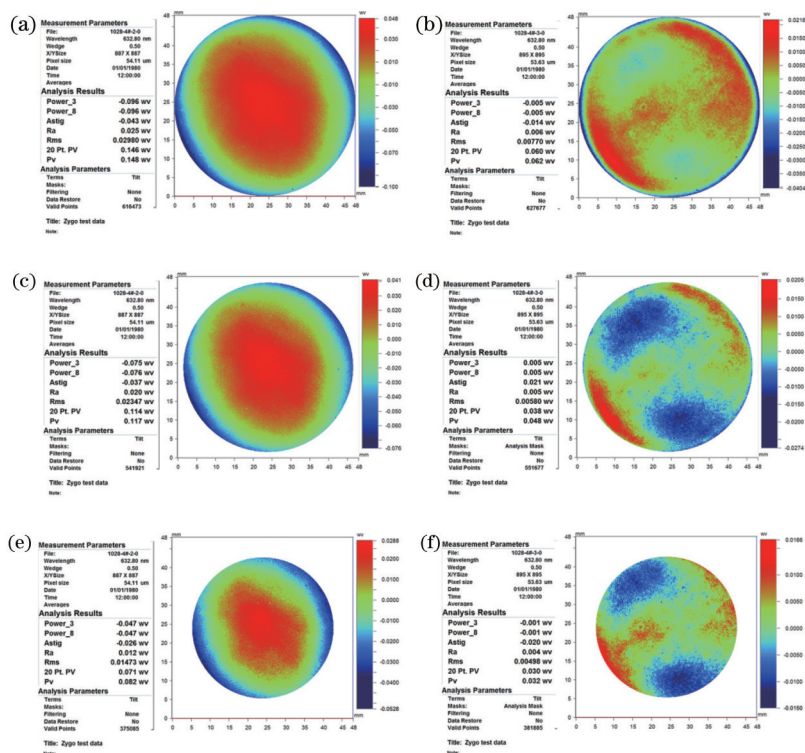


图9 水射流抛光面形修正实验结果。(a) 原始96%口径; (b) 抛光后96%口径; (c) 原始90%口径; (d) 抛光后90%口径; (e) 原始75%口径; (f) 抛光后75%口径

Fig.9 Surface correction results in fluid jet polishing. (a) 96% aperture before polishing; (b) 96% aperture after polishing; (c) 90% aperture before polishing; (d) 90% aperture after polishing; (e) 75% aperture before polishing; (f) 75% aperture after polishing

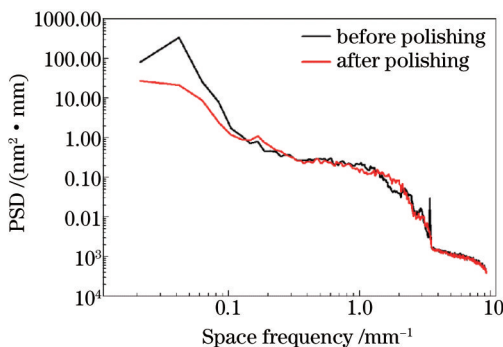


图10 水射流抛光前后熔石英元件的PSD曲线

Fig.10 PSD curves of fused silica element before and after fluid jet polishing

## 5 结论

根据水射流抛光去除函数特征,采用分段三角函数建模得到了含有  $A$ 、 $T$ 、 $\alpha$  与  $\beta$  4项参数去除函数的拟合表达关系式,其中参数  $A$  与  $T$  定义了去除函数的尺寸特征,参数  $\alpha$  与  $\beta$  定义了去除函数的形状特征。采用 Matlab 程序对不同参数取值条件下的去除函数进行一维去除模拟。结果显示,随着搭接频率  $f$  增大,一维模拟结果的  $W_{rms}$  值由 4.99 降至约为 0; 均匀去除条件与线性去除条件下的一维模拟结果均表明,除  $\alpha$  参数为 0 的情况之外,其余  $\alpha$  参数对应的一维模拟结果  $W_{rms}$  值均随着参数  $\beta$  值的增加先增大、后减小。当参数  $\beta$  取值为 1 时,在均匀去除条件下有最小  $W_{rms}$  值,约为 0,在线性去除条件下,  $W_{rms}$  值为 0.91~1.47,均为固定  $\alpha$  参数值时的极小值。根据理论模拟结果,对水射流抛光实验中采用的去除函数进行了理论分析,证明其去除函数特征适用于高精度面形修正实验。通过两轮水射流抛光实验,使  $\Phi 50$  mm 熔石英玻璃面形  $\lambda_{pv}$  值由 0.148 $\lambda$  收敛至 0.062 $\lambda$ , 90% 与 75% 口径范围分别收敛至 0.048 $\lambda$  与 0.032 $\lambda$ 。面形  $\lambda_{rms}$  由 18.86 nm 收敛至 4.87 nm, 90% 与 75% 口径范围

内分别收敛至 3.67 nm 与 3.15 nm。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Jian, Dai Lei, Wang Fei, *et al.*. Restraint of mid-spatial-frequency error aspheric surface by small-tool adaptive polishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0822002.  
张 健, 代 雷, 王 飞, 等. 小磨头自适应抛光抑制高精度非球面中频误差[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0822002.
- 2 Xu Haihua. Research on compensation of computer controlled polishing aspheric surface-shape error[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 102204.  
徐海华. 数控抛光非球面形误差补偿技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 102204.
- 3 Gao Bilie. The mathematical analysis for the active lap deformation on proceeding condition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(4): 525-532.  
高必烈. 对主动抛光盘在加工、测量状态下盘面的变形及提升的数学分析[J]. *光学学报*, 2005, 25(4): 525-532.
- 4 Zhang Wei, Li Hongyu, Yu Guoyu. Current situation of ultra-precision bonnet polishing key technology of optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 27-34.  
张 伟, 李洪玉, 于国瓒. 光学元件超精密气囊抛光关键技术研究现状[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 27-34.
- 5 Li Hongyu, Zhang Wei, Yu Guoyu. Removing characteristics of ultraprecise bonnet polishing on spatial optics elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 811-817.  
李洪玉, 张 伟, 于国瓒. 空间光学元件超精密气囊抛光的去除特性研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 811-817.
- 6 Dai Yifan, Shi Feng, Peng Xiaoqiang, *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by magnetorheological finishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 198-205.  
戴一帆, 石 峰, 彭小强, 等. 光学镜面磁流变确定性修形的实现[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 198-205.
- 7 Yang Zhiqiang, Guo Zhongda, Chen Zhili, *et al.*. Investigation of magnetorheological finishing method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 500-504.  
阳志强, 郭忠达, 陈智利, 等. 一种磁流变抛光方法的探讨[J]. *应用光学*, 2009, 30(3): 500-504.
- 8 Bai Yang, Zhang Feng, Li Longxiang, *et al.*. Manufacture of silicon modification layer on silicon carbide surface by magnetorheological finishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0322007.  
白 杨, 张 峰, 李龙响, 等. 碳化硅基底改性硅表面的磁流变抛光[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0322007.
- 9 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan, *et al.*. Influence analysis of impact angle on material removal profile in fluid jet polishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 513-517.  
施春燕, 袁家虎, 伍 凡, 等. 冲击角度对射流抛光中材料去除面形的影响分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 513-517.
- 10 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan, *et al.*. Research of errors analysis and material removal stability in fluid jet polishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0112012.  
施春燕, 袁家虎, 伍 凡, 等. 射流抛光误差分析与材料去除稳定性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0112012.
- 11 Ma Zhanlong, Liu Jian, Wang Junlin. Material removal mechanism and influence factor of fluid jet polishing[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(6): 1206-1211.  
马占龙, 刘 健, 王君林. 射流抛光材料去除机理及影响因素分析[J]. *应用光学*, 2011, 32(6): 1206-1211.
- 12 Fang H, Guo P J, Yu J C. Surface roughness and material removal in fluid jet polishing[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17): 4012-4019.
- 13 Guo P J, Fang H, Yu J C. Edge effect in fluid jet polishing[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(26): 6729-6735.
- 14 Kordonski W, Shorey A B, Sekeres A. New magnetically assisted finishing method: Material removal with magnetorheological fluid jet [C]. *SPIE*, 2003, 5180: 107-114.
- 15 Li Z Z, Li S Y, Dai Y F, *et al.*. Optimization and application of influence function in abrasive jet polishing[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(15): 2947-2953.
- 16 Peng W Q, Guan C L, Li S Y. Material removal mode affected by the particle size in fluid jet polishing[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(33): 7927-7933.
- 17 Song X Z, Zhang Y, Zhang F H. Study on removal mechanism of nanoparticle colloid jet machining[J]. *Advanced Materials Research*, 2008, 53-54: 363-368.
- 18 Zhang F H, Song X Z, Zhang Y, *et al.*. Figuring of an ultra-smooth surface in nanoparticle colloid jet machining[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19: 054009.
- 19 Preston F W. The theory and design of plate glass polishing machines[J]. *Journal of the Society of Glass Technology*, 1927, 11: 214.
- 20 Jones R A. Optimization of computer controlled polishing[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(1): 218-224.
- 21 Fang H, Guo P J, Yu J. Optimization of the material removal in fluid jet polishing[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(5): 625-631.
- 22 Li Z Z, Wang J M, Peng X Q, *et al.*. Removal of single point diamond-turning marks by abrasive jet polishing[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(16): 2458-2463.

栏目编辑: 张浩佳