

## 大气等离子体变去除函数加工方法研究

彭冰<sup>1,2</sup>, 顿爱欢<sup>1</sup>, 吴伦哲<sup>1</sup>, 王哲<sup>1,2</sup>, 徐学科<sup>1\*</sup><sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所精密光学制造与检测中心, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

**摘要** 传统的接触式加工不可避免地会在光学元件上产生亚表层损伤,而大气等离子体抛光(APPP)具有非接触、可定量去除、加工过程不受材料性能影响等优点,在光学加工领域有着巨大的应用潜力。但在实际加工过程中,光学元件加工后的收敛效果并不明显,经验证明去除量随驻留时间的变化呈非线性而导致了加工误差。针对这一问题,首先优化了加工参数;之后研究了加工原理以及加工残余物对后续加工的影响,分析了加工存在非线性效应的原因;提出了一种基于变去除函数的驻留时间算法,并进行了实验验证。结果显示,对尺寸为 120 mm×65 mm×10 mm 的熔石英光学元件进行变去除函数加工实验,面形峰谷值(PV)的平均收敛率由加工前的 21.41% 提升至加工后的 60.52%,面形均方根值(RMS)的平均收敛率由加工前的 24.13% 提升至加工后的 74.79%,实现了熔石英元件的高精度快速加工,验证了变去除函数加工的有效性。

**关键词** 材料; 大气等离子体抛光; 去除函数; 超精密加工; 熔石英

**中图分类号** O439

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.2403002

## 1 引言

强光元件是指具有高精度且能承受高功率光辐照的光学元件,但传统的接触式加工方法不可避免地会在元件表面产生亚表面缺陷等损伤前驱体,导致光学元件的抗激光损伤阈值降低<sup>[1-2]</sup>。为了从根源上去除亚表面损伤,国内外研究者致力于研究非接触式的加工方法。大气等离子体抛光(APPP)是一种非接触式加工技术<sup>[3]</sup>,利用施加在电极之间的射频电压激发反应气体,产生活性氟离子和氧原子,从而实现工件表面刻蚀。这一技术基于化学反应,生成挥发性气体产物,实现原子量级的去除<sup>[4]</sup>。其优点在于无需真空设备,去除效率高,加工成本低。因此,APPP 在光学制造领域具有巨大的应用潜力。但在实际加工过程中,化学反应是一个复杂的过程,加工中存在去除量随时间呈非线性变化的现象,导致实际加工效果并不理想。

国内外很多机构都致力于将等离子体加工应用于光学加工领域,并采用一些方法来降低等离

子体加工过程中的非线性效应对实际加工的影响。日本研究者提出了基于电容耦合的等离子体化学蒸发加工(Plasma Chemical Vaporization Machining, PCVM)方法<sup>[5]</sup>。对于去除量随时间呈非线性变化这一问题, Takino 等<sup>[6-7]</sup>首次提出了逐层扫描的驻留时间解算方法,按固定速度下得到的去除量将面型误差划分为多个薄层进行加工,同时通过增大加工距离或降低射频功率等方法避免加工无需去除的部分,降低了不同加工速度下的温度影响。德国研究者提出了基于电容耦合的等离子体射流加工(Plasma Jet Machining, PJM)方法<sup>[8]</sup>,这一方法在熔石英光学元件上的加工效率最低为 0.002 mm<sup>2</sup>/min, 最高为 44 mm<sup>2</sup>/min。针对 PJM 的非线性效应, Meister 等<sup>[9-10]</sup>对 PJM 热量进行了分析仿真,改进了传统的驻留时间解算方法,将热量对加工效率的影响规律代入到新的求解方法中。在基于电感耦合的反应原子等离子体技术(Reactive Atom Plasma Technology, RAPT)<sup>[11-12]</sup>中,电感耦合比电容耦合功率更大,因此该技术受温度的影响较大,对于加工中存在的

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-05-03; 录用日期: 2021-05-17

通信作者: \*xuxk@siom.ac.cn

非线性效应, Castelli 等<sup>[13]</sup>对驻留时间解算方法进行了修正, 并重新规划了加工路径, 通过增加迭代次数, 减少每次迭代的驻留时间, 减小了变化过大的驻留时间对去除效率的影响。

综上所述, 虽然国内外学者对等离子体加工的非线性效应以及补偿方法都进行了研究, 但关于 APPP 非线性效应的成因及补偿算法的研究还不完善。本文通过研究 APPP 原理和加工过程中的沉积物, 分析了非线性效应的成因, 并提出了一种变去除函数优化策略, 将原本单一的定去除函数变为随着相对驻留时间变化的变去除函数。首先介绍了 APPP 加工原理及流程; 之后分析了光学元件表面温度场与去除量之间的非线性关系, 并开展了加工残余物对后续加工影响的实验研究; 最后编写变去除函数算法, 优化加工参数, 实验验证了变去除函数优化方案的可行性, 从而确保了实际加工的高效收敛率。

## 2 APPP 非线性效应的原理分析

### 2.1 大气等离子体加工原理及过程

APPP 加工技术是一种基于化学反应的非接触加工方法。其加工装置系统如图 1<sup>[14]</sup>所示, 主要由五大子系统组成: 等离子体发生装置、冷却系统、运动控制系统、气体供应及尾气处理系统、射频电源。射频电源在 13.56 MHz 或者 27.12 MHz 的工作频率下进行电容耦合放电, 电子被射频电场加速, 形成等离子体氛围, 并与充入反应腔的气体分子或原子不断发生随机碰撞, 激发出高密度高活性的反应粒子基团。APPP 使用的气体有两类: 一种是由惰性气体(He)组成的激发气体, 用来营造稳定的等离子体氛围; 另一种是反应气体, 主要由氧气(O<sub>2</sub>)、四氟化碳(CF<sub>4</sub>)组成。反应气体通过等离子体炬, 发生介质阻挡放电, 气体被击穿, 产生活性氟离子或原子基团, 这些活性粒子与硅基材料发生化学反应, 实现原子量级的去除。去除过程可表示为

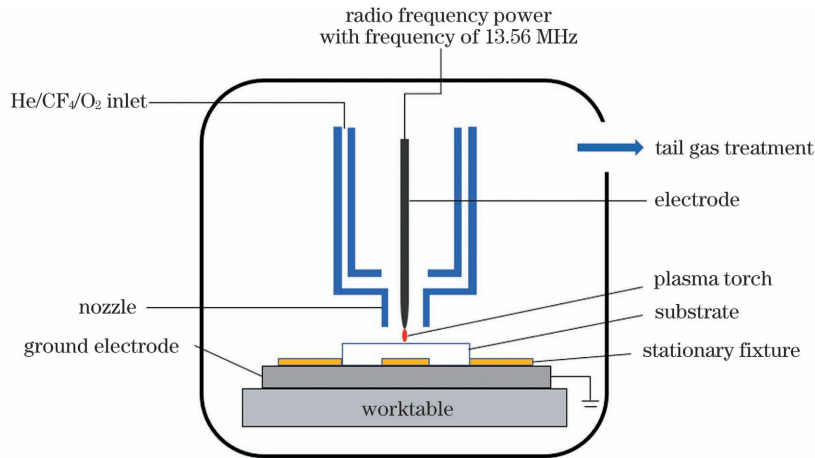
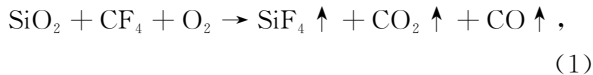


图 1 APPP 系统实验装置

Fig. 1 Experimental setup of APPP system



式中: SiO<sub>2</sub> 为工件主要的化学成分; O<sub>2</sub> 和 CF<sub>4</sub> 为反应气体; 生成气体 SiF<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 为挥发性气体。

APPP 的加工去除量等于去除函数与驻留时间函数的卷积, 加工流程如图 2 所示, 包括原始面形误差测量、生成去除量分布  $E$ 、确定其高斯去除函数、根据去除量分布选择合适的去除函数  $R$ 、计算驻留时间  $T$  并为机床生成相应的数控代码及最后执行 APPP 工艺实现光学加工。

根据计算机控制光学表面成型技术(CCOS)理论, 加工过程中的材料去除量  $E(x, y)$  为去除函数

$R(x, y)$  和驻留时间  $T(x, y)$  之间的二维卷积:

$$E(x, y) = R(x, y) \otimes T(x, y), \quad (2)$$

式中:  $(x, y)$  为加工点位置。而  $R(x, y)$  在大气等离子体加工过程中, 近似于旋转对称的高斯函数, 因此可表达为

$$R(x, y) = A \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2C_1}}, \quad (3)$$

式中:  $A$  为幅值系数;  $C_1$  为方差系数。

去除函数由加工去除轮廓拟合得到, 如图 3 所示, 其形状、大小一般以高斯型去除函数的最大深度即最大去除速率(Most Removal Rate, MRR)和最大去除深度一半的宽度即半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)表示。

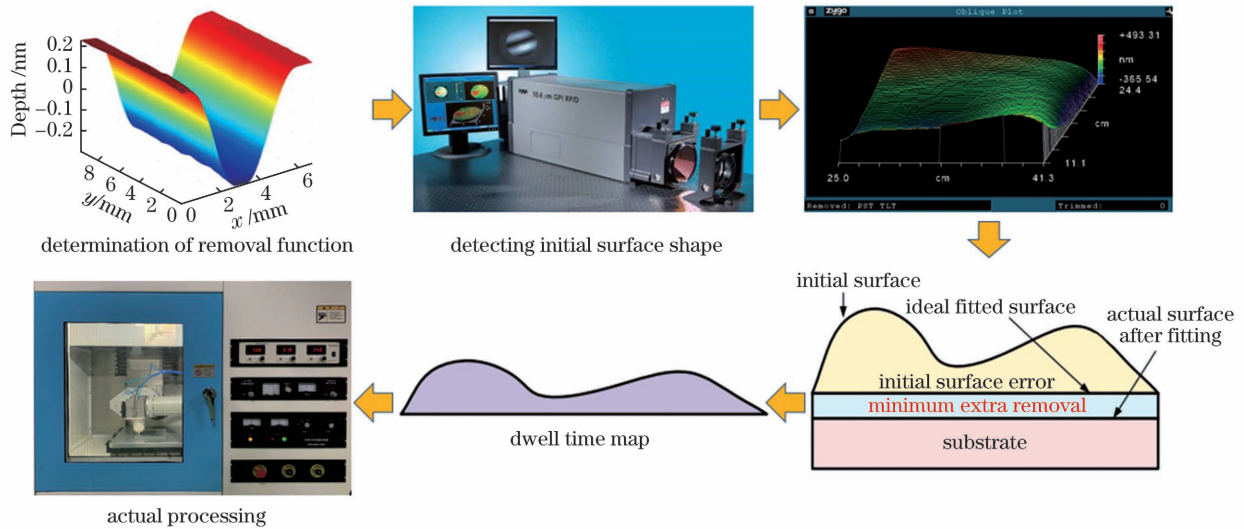


图 2 大气等离子体抛光流程

Fig. 2 APPP process

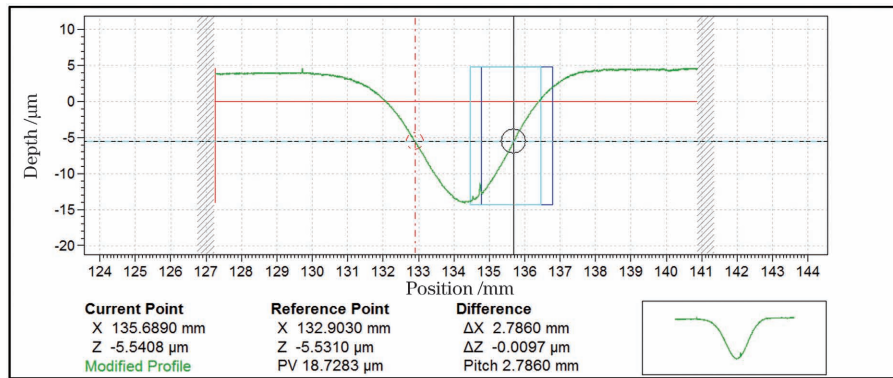


图 3 APPP 去除函数

Fig. 3 APPP removal function

## 2.2 大气等离子体加工非线性效应的确定

在理想情况下,元件表面元素与被激发的活性粒子发生反应产生气体逸出,且可以通过控制加工驻留时间来实现定量去除。但在实际的加工过程中,等离子体反应过程涉及多个复杂的物理和化学过程,不可避免地出现各种加工误差。为了探究造成这种加工误差的原因,设计了如图 4 所示实验,按

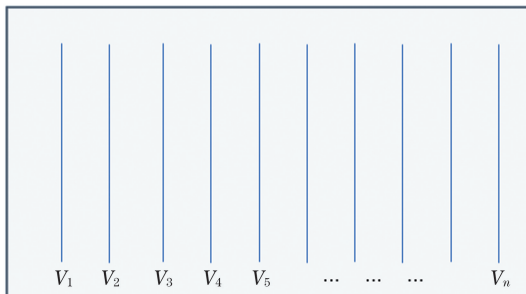


图 4 多组去除函数实验示意图

Fig. 4 Experimental diagram of several group of removal functions

照不同速度( $V_1, V_2, \dots, V_n$ )对光学元件表面进行了多组去除函数实验研究。分别提取去除函数并计算其单位时间的材料去除量,单位时间的材料去除量随加工速度的变化如图 5 所示。由图 5 可知,加工过程中单位时间的材料去除量随加工速度呈非线性变化。

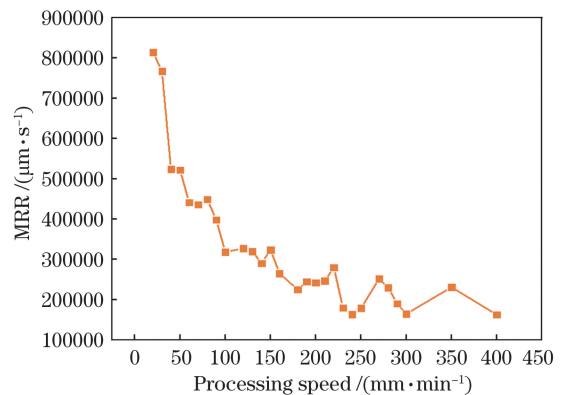


图 5 单位时间去除量随加工速率的变化

Fig. 5 MRR versus processing speed

### 2.3 大气等离子体加工非线性效应的原理分析

经过分析,造成这种非线性效应的原因可能有以下几个方面。首先大气等离子体炬具有一定的温度,加工元件表面温度随驻留时间的增加而增加,在化学反应过程中有 Arrhenius 公式<sup>[15-16]</sup>:

$$k = A_e e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (4)$$

式中: $k$  为速率常数; $A_e$  为指前因子(也称频率因子); $E_a$  为表观活化能; $R$  为摩尔气体常量; $T$  为热力学温度。化学反应会随着温度的升高而变得更剧烈。传统 APPP 加工是在固定速度下进行去除函数实验来获得最优加工参数下的实际去除量,并根据线性关系计算出其他速度下的材料去除量,之后将干涉仪测量得到的光学元件的原始面形与理论面形相减获得理论去除量,最后通过理论去除量与去除函数的反卷积计算得到速度分布。但在实际加工过程中,由于等离子体炬相当于一个热源,如图 6 所示,加工时表面温度会随驻留时间的变化而变化,因此实际反应速率增大,加工过程中的实际加工去除量与理论去除量存在误差,加工收敛率不高。

其次,由于光学元件含有各种杂质,因此反应不充分。在等离子体加工过程中,根据刻蚀-聚合竞争机制,刻蚀反应与聚合反应同时存在,并且聚合物还会被气相中的活性基团刻蚀,这三个反应同时存在并保持一个动态平衡。电离出的氟碳自由基同时发生刻蚀和聚合反应,形成的沉积物一般为氟碳化合物,而氟碳原子数比( $F'/C'$ )会影响表面化合物的

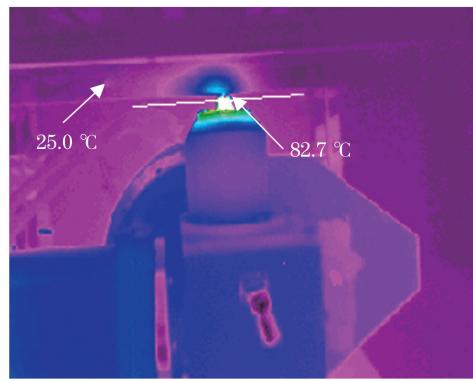


图 6 加工时元件表面温度的实测图

Fig. 6 Real map of element surface temperature during processing

结构。当  $F'/C'$  处在  $(0, 2)$  区间时,会产生高度交联的网状大分子结构,聚合物薄膜会沉积在元件表面和侧壁上,此时沉积占主导刻蚀为辅,不利于刻蚀的进行。当  $F'/C'$  处在  $(2, 3)$  区间时,沉积物主要为直链低交联大分子化合物,这些化合物附着在垂直向上的侧壁处,导致底部刻蚀而侧壁沉积,刻蚀出现各向异性。当  $F'/C'$  大于 3 时,刻蚀反应占主导,沉积反应不明显,故刻蚀呈现各向同性。工件表面的沉积会严重影响工件的表面质量,也会导致加工不确定。

为了探究沉积物对加工的影响,设计了以下实验。根据经验得知,残余物的沉积量随驻留时间的增加而增加,先对试样进行了残余物沉积实验,通过控制整个面的驻留时间,研究了残余物的变化情况,如图 7(a)所示。

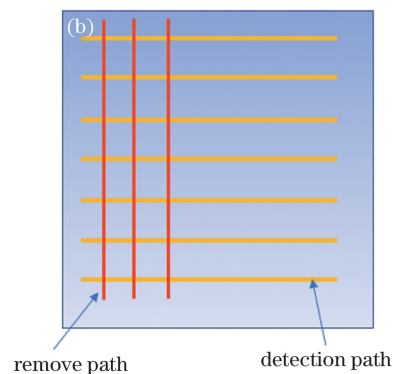
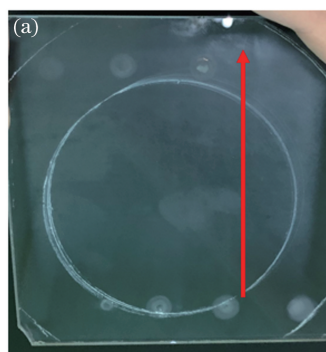


图 7 沉积物对后续加工影响的实验示意图。(a)元件表面的渐变沉积物;(b)去除函数实验的路径

Fig. 7 Experimental diagrams of influence of sediment on subsequent processing. (a) Gradually increasing sediment on element surface; (b) experimental path of removal function

沉积物由上到下呈现从多到少的渐变效果,目的是先在元件表面营造出加工时可能出现的残余物沉积现象。之后再在不同速度下按图 7(b)所示纵向路径依次提取去除函数,以进一步判断残余物对

后续加工的影响。使用轮廓仪对元件表面进行多次检测,检测路径如图 7(b)横线所示。轮廓仪测量结果如图 8 所示,其中 1~13 是轮廓仪检测的次序,对应的沉积物由多到少。可以看到,沉积物多的地方

对应的曲线明显不平滑,这是由于残余物导致元件表面粗糙度变差。而由四组不同速度下的去除函数测量结果可知,不同残余物下后续 MRR 的变化范围在 5% 以内,说明残余物不是产生上述加工非线性现象的主要原因。

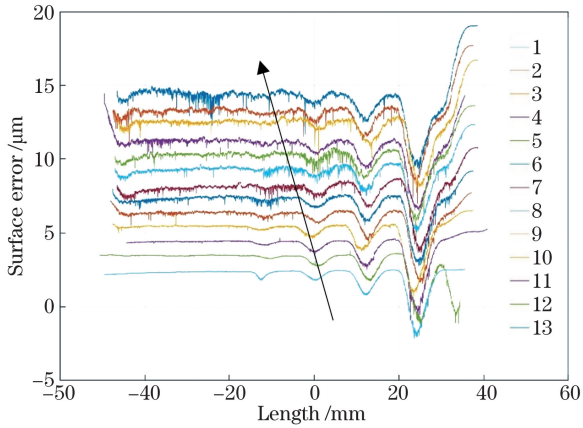


图 8 沉积物对后续加工影响实验的结果图

Fig. 8 Experimental results for influence of sediment on subsequent processing

### 3 变去除函数模型的建立及驻留时间

目前,在大气等离子体加工研究中,一般采用脉

冲迭代法来计算驻留时间。即将去除函数看作为去除脉冲函数,也可以理解为材料的体积去除强度,设去除脉冲去除量为  $S$ ,有

$$S = \iint_{\Omega} R(\sqrt{x^2 + y^2}) dx dy, \quad (5)$$

式中:  $R(\sqrt{x^2 + y^2})$  为加工范围内某点的材料去除率;  $\Omega$  为去除函数的加工范围,即等离子体炬的作用区域。

将  $S$  作为初次驻留时间的矫正因子,驻留时间的初始值为

$$T_0(x, y) = E(x, y) / S. \quad (6)$$

由于数学计算本身具有局限性且时间不能为负值,因此计算出来的值与理想面形不可避免地会出现一定的残余误差  $H_1$ , 表示为

$$H_1(x, y) = E(x, y) - R(x, y) \otimes T_1(x, y), \quad (7)$$

式中:  $T_1(x, y)$  为初次迭代得到的驻留时间。

第一次迭代取理论面形误差的初始时间分布:

$$T_1(x, y) = T_0(x, y) = E(x, y) / S. \quad (8)$$

对第一次迭代求取的  $H_1$  进行下一步计算,第二次迭代为

$$\begin{cases} T_2(x, y) = [E(x, y) + H_1(x, y)] / S = T_0(x, y) + T_1(x, y) \\ H_2(x, y) = E(x, y) - R(x, y) \otimes T_2(x, y) \end{cases}, \quad (9)$$

式中:  $T_2(x, y)$  为第二次迭代得到的驻留时间。

第  $k$  次迭代后,有

$$\begin{cases} T_{k+1}(x, y) = T_k(x, y) + H_k(x, y) / S \\ H_{k+1}(x, y) = E(x, y) - R(x, y) \otimes T_k(x, y) \end{cases} \quad (10)$$

当残余误差  $H_{k+1}(x, y)$  满足要求时即可停止迭代,加工过程中由于时间具有非负性,将负值置为零即可。这一过程中采用的去除函数为定去除函数。对于定去除函数,存在三个缺陷:

1) 对于表面起伏较大的区域,需要更多的时间进行修形;

2) 对于不同频段误差,需要增加迭代次数,并改变去除函数,实现不同频段的误差响应,但收敛时间增加;

3) 由于大气等离子体炬相当于一个热源,而加工去除量随驻留时间的变化呈现非线性,因此采用定去除函数计算出的结果会导致加工收敛率偏低。

为了减少上述缺陷带来的影响,引入变去除函数以提高实际加工过程中的收敛率。即将原定去除函数变为与时间相关的函数。

一般收敛过程的空间去除量  $\Delta z(x, y)$  为

$$\Delta z(x, y) = R(x, y) \otimes T(x, y). \quad (11)$$

设变去除函数(Unconstant Influence Function)为  $R_{\text{UIF}}(x, y)$ , 当定去除函数中引入时间影响参数  $\tau(x, y)$  时,有

$$R_{\text{UIF}}(x, y) = R(x, y) \otimes \tau(x, y). \quad (12)$$

$\tau(x, y)$  通过实验来提取,具体方法如下。以 10~400 mm/min 的速度,以  $\Delta V = 10$  mm/min 的速度间隔在元件表面进行多组去除函数实验;对提取的 40 组去除函数进行系数  $A$  和  $C$  的提取,并分别对  $A$  和  $C$  进行拟合,结果如图 9 所示。此时去除函数  $R(x, y)$  中幅值系数  $A$ 、方差系数  $C$  都变为与驻留时间相关的函数,且函数形式与阿伦尼乌斯公式相似。拟合后  $A$  是相对驻留时间  $t$  的函数:

$$y_A(t) = 0.3171 \times e^{-0.9502/t}, \quad (13)$$

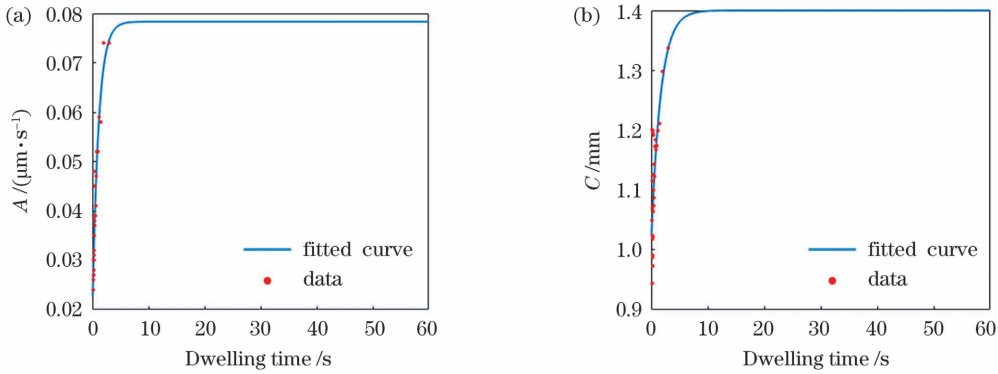


图 9 变去除函数系数的拟合图。(a)A;(b)C

Fig. 9 Fitting curve of variable removal function. (a) A; (b) C

拟合后  $C$  随驻留时间变化的函数为

$$y_c(t) = 0.6618 \times e^{-0.8994/t}, \quad (14)$$

此时生成变去除函数为

$$R_{\text{UIF}}(x, y, t) = y_A(t) \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2y_c(t)}}. \quad (15)$$

之后使用上述变去除函数模型来计算加工驻留时间,基于 Preston 假设进行适当拓展,有

$$\Delta Z(x, y, t') = K \cdot P(x, y, t') \cdot V(x, y, t'), \quad (16)$$

式中: $\Delta Z$  是某时刻  $t'$  下  $(x, y)$  处的材料去除量; $P$  是磨头在工件表面  $(x, y)$  处的压强分布; $V$  是磨头与工件的相对速度; $K$  是比例系数。对于非接触式大气等离子体加工,需要对 Preston 方程中各参数的意义进行合理拓展: $\Delta Z$  仍是与坐标和时间相关的材料去除率; $P$  是反应区域的空间大小,即 APPP 针电极激发出来的火焰大小; $V$  是 APPP 炬在工件移动时的相对速度; $K$  是比例系数。

设  $(x, y)$  处的驻留时间为  $T_0(x, y) = 0$ , 迭代系数为  $I$ , 残余误差  $H_1(x, y)$  为

$$H_1(x, y) = E(x, y) - R_{\text{UIF}}(x, y, t) \otimes T_0(x, y). \quad (17)$$

驻留时间表示为

$$T_{k+1} = [H_k - R_{\text{UIF}}(x, y, t) \otimes T_k] / I + T_k. \quad (18)$$

而加工残余误差  $H_{k+1}$  为

$$H_{k+1}(x, y) = E(x, y) - R_{\text{UIF}}(x, y, t) \otimes T_k. \quad (19)$$

若  $T_k$  小于等于 0, 将  $T_k$  置零。当迭代至残余误差  $H_{k+1}$  小于预设值时,得出的相对驻留时间为变去除函数下的驻留时间,求其倒数即得到加工速度。

## 4 实验结果

### 4.1 最优工艺参数的选择

为了使加工过程中等离子体能持续稳定放电而不出现熄灭等现象,进行了单一变量实验来确定最优工艺参数。其中,He 是等离子体产生的核心气体,在高速电子的碰撞下,其为反应气体营造了等离子体氛围,并产生了紫红色火焰。过低的 He 浓度无法使反应气体完全电离,过多的 He 则可能降低活性粒子浓度。 $\text{CF}_4$  在反应中提供活性 F 粒子基团,过低的  $\text{CF}_4$  浓度会导致刻蚀粒子的数量有限,过高的  $\text{CF}_4$  浓度会降低活性粒子浓度,导致等离子体不稳定。 $\text{O}_2$  可以增加大气等离子体的刻蚀速率,减少沉积物产生的反应气体。过低的  $\text{O}_2$  浓度可能会影响活性粒子的激发效果并增大沉积量,而过高的  $\text{O}_2$  浓度会使等离子体炬变窄变尖,稳定性降低。选用尺寸为  $120 \text{ mm} \times 65 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的平面熔石英元件进行实验,具体的单一变量实验参数设置如表 1 所示,分别进行四组实验。对于尺寸为  $120 \text{ mm} \times 65 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的熔石英元件,变量对 MRR(实线)和 FWHM(虚线)的影响如图 10 所示,可以看出,当 He 的流量为  $2.5 \text{ L/min}$ 、 $\text{CF}_4$  的流量为  $70 \text{ mL/min}$ 、 $\text{O}_2$  的流量为  $50 \text{ mL/min}$  和功率为  $170 \text{ W}$  时,能获得持续稳定的最优去除函数。同时,随着加工的进行,要持续关注功率变化,及时调整功率,使功率保持在  $170 \text{ W}$ ,否则会出现台阶效应。

### 4.2 加工实验

选用上述最优工艺参数对尺寸为  $120 \text{ mm} \times 65 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的熔石英元件进行实际加工,对比传统定去除函数和变去除函数的加工结果,其中 PV 为面形峰谷值,RMS 为面形均方根值。

表 1 实验参数设置

Table 1 Specifications of experimental parameters

Experiment No.	Flow rate of He / (L·min <sup>-1</sup> )	Flow rate of CF <sub>4</sub> / (mL·min <sup>-1</sup> )	Flow rate of O <sub>2</sub> / (mL·min <sup>-1</sup> )	Power / W
1	2/2.5/3/3.5/4	70	50	170
2	2.5	50/60/70/80/90	50	170
3	2.5	70	30/40/50/60/70	170
4	2.5	70	50	120/140/160/170/180/200

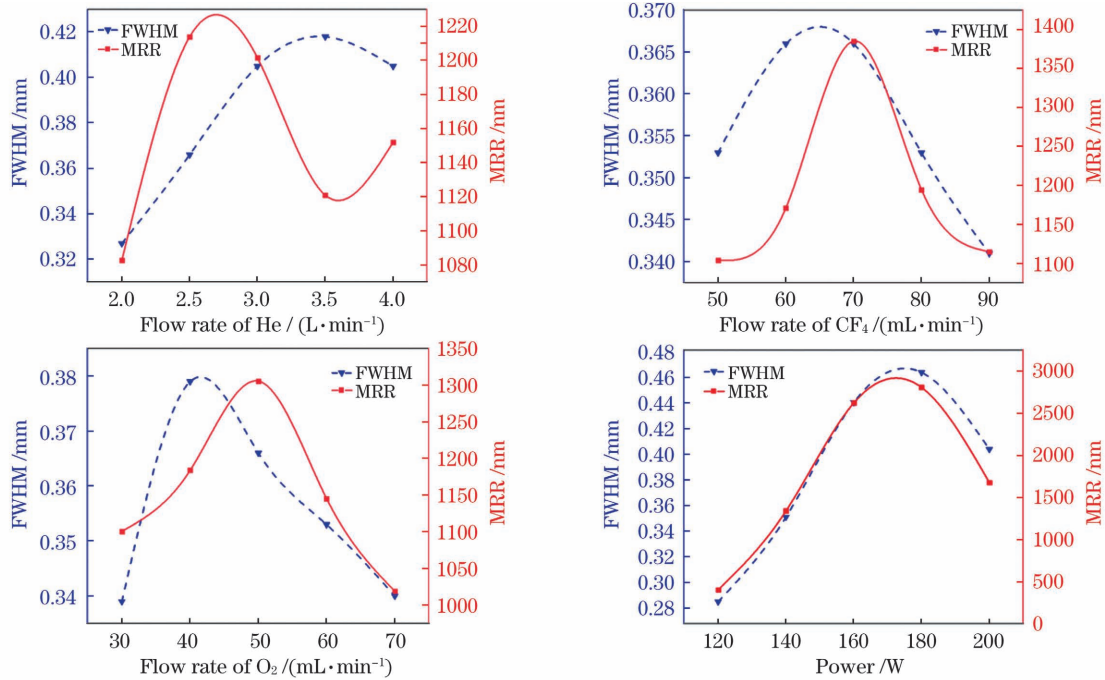


图 10 实验变量对去除函数的影响。(a)He 的流量;(b)CF<sub>4</sub> 的流量;(c)O<sub>2</sub> 的流量;(d)功率

Fig. 10 Influences of experimental variables on removal function. (a) Flow rate of He; (b) flow rate of CF<sub>4</sub>; (c) flow rate of O<sub>2</sub>; (d) power

4.2.1 定去除函数加工结果

采用直径为 1 mm 的电极加工熔石英,拾刀量为 2 mm,采用 50 mm/min 进给速率下的定去除函数,如图 11 所示,加工 45 min 后 PV 由加工前的

155.815 nm 变为加工后的 122.367 nm,RMS 从加工前的 26.038 nm 变为加工后的 19.764 nm,即 PV 的收敛率为 21.41%,RMS 的收敛率为 24.13%,并未达到很好的加工效果。

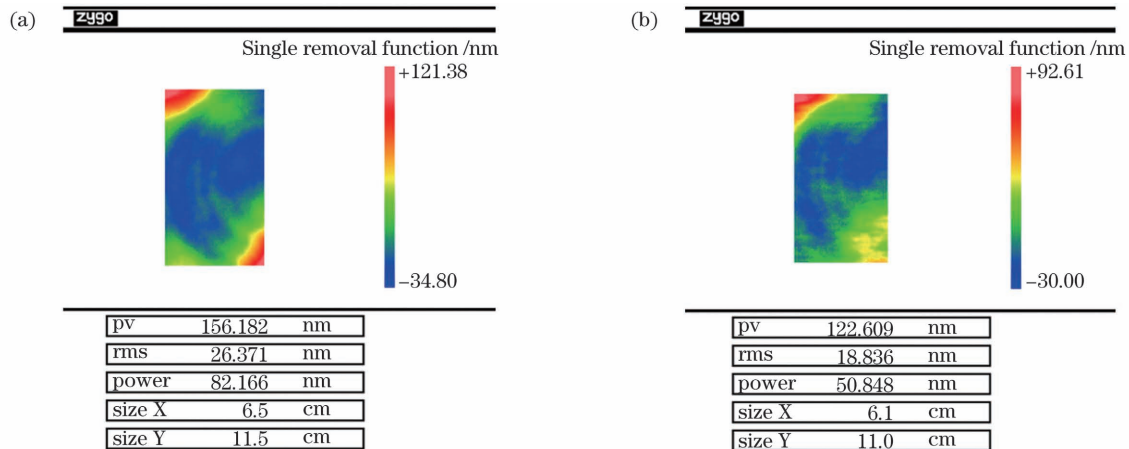


图 11 定去除函数加工前后对比图

Fig. 11 Comparison of single removal function before and after processing

### 4.2.2 变去除函数加工结果

采用变去除函数计算驻留时间并进行加工实验。采用直径为 1 mm 的电极加工熔石英, 抬刀量为 2 mm, 进行了三组实验, 结果如图 12 所示。1# 工件加工了 50 min, PV 由加工前的 178.072 nm 变为加工后的 57.259 nm, RMS 从加工前的 36.759 nm 变为加工后的 10.038 nm, 即 PV 的收敛率为 65.60%, RMS 的收敛率为 76.71%; 2# 工件加工了 45 min, PV 由加工前的 220.171 nm 变为加工后的 110.790 nm, RMS 从加工前的 39.665 nm 变为加工后的 12.967 nm, 即 PV 的收

敛率为 51.50%, RMS 的收敛率为 68.09%; 3# 工件加工了 120 min, PV 由加工前的 1183.738 nm 变为加工后的 314.015 nm, RMS 从加工前的 265.733 nm 变为加工后的 54.238 nm, 即 PV 的收敛率为 73.47%, RMS 的收敛率为 79.58%。最终 PV 的平均收敛率为 63.52%, RMS 的平均收敛率为 74.79%, 这一结果明显优于定去除函数下的加工效果, 且最优加工结果达到  $\frac{1}{10}\lambda$  ( $\lambda$  为 632.8 nm), 很好地实现了光学元件的精加工, 验证了上述变去除函数模型的有效性和实用性。

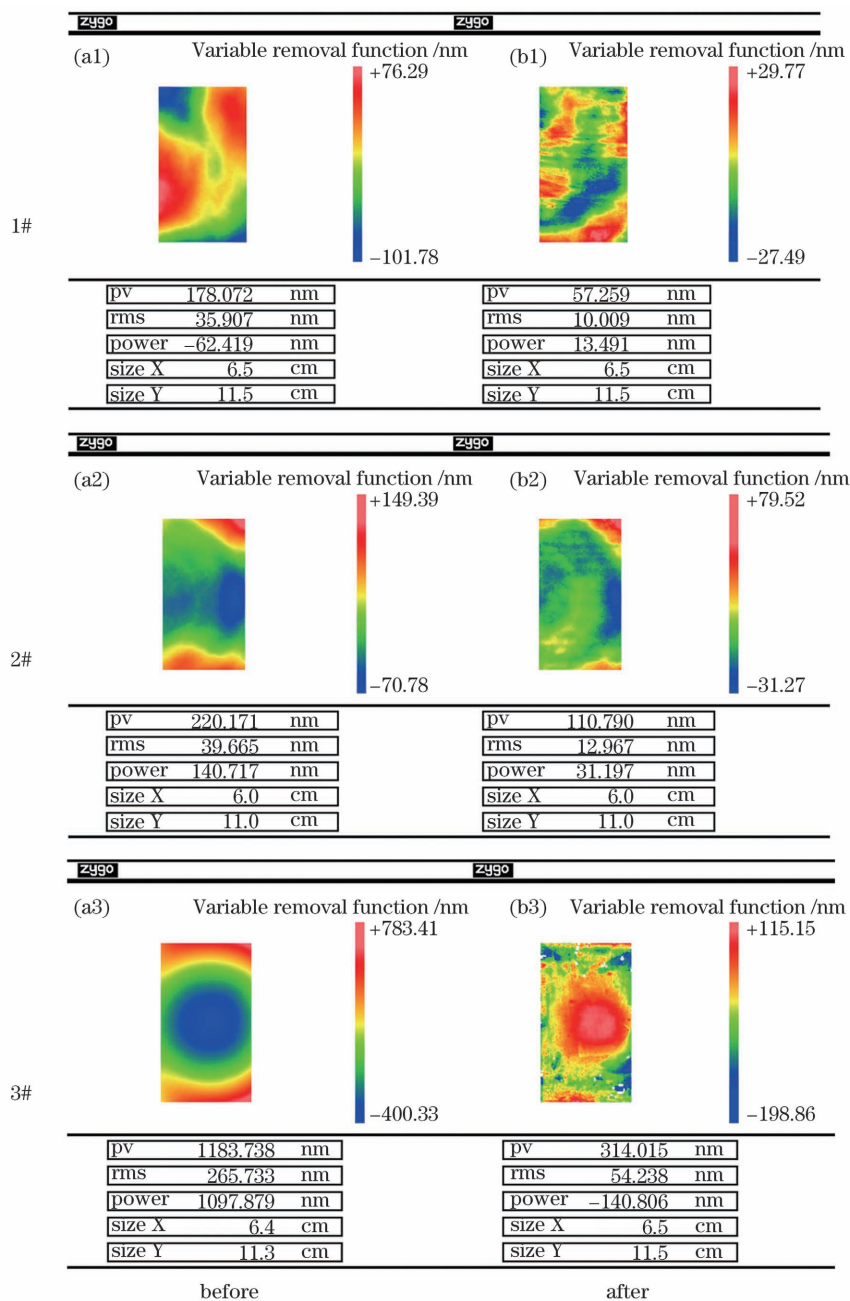


图 12 变去除函数加工前后对比图

Fig. 12 Comparison of variable removal function before and after processing



### 4.3 波前功率谱密度分析

为了能更全面地评价光学元件的表面质量,对加工前后的元件进行了波前功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)分析,结果如图 13 所示,其中  $f$  为空间频率。可以看出,发现加工后光学元件的中低频误差较低,高频误差变化不明显。

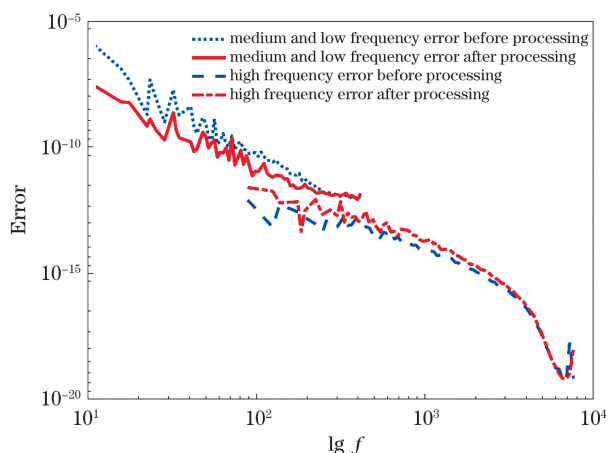


图 13 加工前后 PSD 结果

Fig. 13 PSD results before and after processing

## 5 结 论

针对 APPP 实际加工收敛率不高的问题展开了研究。实验研究发现,这是由去除函数随驻留时间呈非线性变化导致的。分析了温度和去除过程中沉积的残余物与加工非线性的关系,提出了一种将定去除函数变为与驻留时间相关的变去除函数的加工方法。最后将变去除函数引入到实际加工中,通过对照组实验发现, PV 的收敛率从加工前的 21.41% 变为加工后的 63.52%, RMS 的收敛率由加工前的 24.13% 变为加工后的 74.79%, 元件的中低频误差降低。证明了变去除函数模型的有效性,实现了光学元件的超精密加工。

### 参 考 文 献

- [1] Campbell J H, Hawley-Fedder R A, Stolz C J, et al. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5341: 84-101.
- [2] Baisden P A, Atherton L J, Hawley R A, et al. Large optics for the national ignition facility [J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 295-351.
- [3] Zhang J F, Wang B, Dong S. Application of atmospheric pressure plasma polishing method in machining of silicon ultra-smooth surface[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(11): 1749-1755.
- [4] Liao C D, Xie X H, Shi B L. Experimental study on ability of induction coupling of atmosphere plasmato removal quartz[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2014, 50(3): 1-4.
- [5] Mori Y, Yamamura K, Yamauchi K, et al. Plasma CVM (chemical vaporization machining): an ultra precision machining technique using high-pressure reactive plasma [J]. Nanotechnology, 1993, 4(4): 225-229.
- [6] Takino H, Shibata N, Itoh H, et al. Fabrication of optics by use of plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode[J]. Applied Optics, 2002, 41(19): 3971-3977.
- [7] Takino H, Shibata N, Itoh H, et al. Fabrication of small complex-shaped optics by plasma chemical vaporization machining with a microelectrode [J]. Applied Optics, 2006, 45(23): 5897-5902.
- [8] Arnold T, Böhm G, Fechner R, et al. Ultra-precision surface finishing by ion beam and plasma jet techniques: status and outlook [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 616(2/3): 147-156.
- [9] Meister J, Böhm G, Eichentopf I M, et al. Simulation of the substrate temperature field for plasma assisted chemical etching [J]. Plasma Processes and Polymers, 2009, 6(S1): S209-S213.
- [10] Paetzelt H, Arnold T, Böhm G, et al. Surface patterning by local plasma jet sacrificial oxidation of silicon[J]. Plasma Processes and Polymers, 2013, 10(5): 416-421.
- [11] Fanara C, Shore P, Nicholls J R, et al. A new reactive atom plasma technology (RAPT) for precision machining: the etching of ULE © surfaces [J]. Advanced Engineering Materials, 2006, 8(10): 933-939.
- [12] Yu N, Jourdain R, Gourma M, et al. Analysis of De-Laval nozzle designs employed for plasma figuring of surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1/2/3/4): 735-745.
- [13] Castelli M, Jourdain R, Morantz P, et al. Rapid optical surface figuring using reactive atom plasma [J]. Precision Engineering, 2012, 36(3): 467-476.

- [14] Zhang J F, Wang B, Dong S. Application of atmospheric pressure plasma polishing method in machining of silicon ultra-smooth surfaces [J]. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering*, 2008, 3(4): 480-487.
- [15] Zhdanov V P. Arrhenius parameters for rate processes on solid surfaces [J]. *Surface Science Reports*, 1991, 12(5): 185-242.
- [16] Tang W J, Liu Y W, Zhang H, et al. New approximate formula for Arrhenius temperature integral [J]. *Thermochimica Acta*, 2003, 408(1/2): 39-43.

## Variable Removal Function in Atmospheric Pressure Plasma Polishing

Peng Bing<sup>1,2</sup>, Dun Aihuan<sup>1</sup>, Wu Lunzhe<sup>1</sup>, Wang Zhe<sup>1</sup>, Xu Xueke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Precision Optical Manufacturing and Testing Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

<sup>2</sup>*College of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

### Abstract

**Objective** Fused silica glass has been widely used in high power laser systems and advanced optoelectronic devices, because of its good optical, thermal, and mechanical properties. The traditional optical fabrication methods are easy to cause scratches, cracks, and defects on the surface of fused silica, making the fused silica optical elements become the bottleneck restricting the development of high power laser systems, optical systems, and advanced optoelectronic devices. It is difficult to process small and complex faceted fused silica optical elements due to its high cost and time consumption. Atmospheric pressure plasma polishing (APPP), as an alternative non-contact processing method, has the advantages of non-destruction, high precision, high efficiency, low cost, and improved flexibility. The essence of APPP is a chemical reaction to generate volatile gas and achieve non-destructive removal. At present, it has been shown that it has the potential to solve the problem of processing fused quartz optical elements. However, in the actual processing process, the processing results always present the phenomenon of low convergence rate due to the different removal amount in unit time caused by the different dwell time at each processing point in the process. In this study, a variable removal function is proposed to solve the problem of nonlinear removals. The specific method is to change the single removal function in the traditional APPP process into a variable removal function that varies with the relative residence time. We hope that the nonlinear effect can be eliminated by using the variable removal function, and the actual convergence rate and machining accuracy are improved.

**Methods** In this paper, a 120 mm × 65 mm × 10 mm fused silica optical element is used as the research object. Firstly, the processing parameters such as flow rate and power are optimized to obtain a stable processing removal function. Second, several groups of removal functions are obtained on the fused silica element at different speeds, which confirms the existence of a nonlinear effect. The relationship between the nonlinear effect and the Arrhenius formula is verified by the temperature field distribution of the element surface measured by the thermal imager and the simulation analysis. Third, it is necessary to explore whether the nonlinear changes of processing residue and removal amount with speed are related or not. In the optical element surface deposition layer, the residue increases from left to right, and a removal function experiment in this deposited layer is performed. Finally, the amount of removal under different residual thicknesses is extracted by a profilometer. The correlation between the residuals and the nonlinear effect is determined according to the experimental results. After that, the coefficients of several groups of removal functions at different speeds are extracted and fitted, and the variable removal function is written based on the fitting function. The variable removal function is used for the actual processing, and the processing effect is compared with that by the original single removal function to verify whether the processing effect is improved or not.

**Results and Discussions** Firstly, the processing parameters are optimized, and each gas flow rate is balanced to make the material removal amount reach a stable state. At this time, the optimal parameters are the He flow rate of 2.5 L/min, the CF<sub>4</sub> flow rate of 70 mL/min, the O<sub>2</sub> flow rate of 50 mL/min, and the power of 170 W (Fig. 10).

The experimental results confirm that the removal amount presents a nonlinear trend with time at each feeding speed (Fig. 5). After extracting and fitting the coefficients of each removal function, it is found that both the fitting function and the Arrhenius function are inverted exponential functions, and it is confirmed that the removal function is positively proportional to the Arrhenius function (Fig. 9). The influence of residues during processing on subsequent removals is compared with the removal amount under each deposition amount extracted by a profilometer. It is found that there is little difference between the removal amounts, which proves that the influence of sediment on the nonlinear effect of removal amounts is not obvious (Fig. 8). The fitting variable removal function is used for actual processing and compared with the traditional single removal function processing experiment. Compared with the processing speed distribution before processing, it is found that the speed distribution of the variable removal function is more average and clustered. After actual processing, the PV convergence rate increases from 21.4% to 65.6%, the RMS convergence rate increases from 24.1% to 72.7%, and the final processing result reaches  $\frac{1}{10}\lambda$ , which perfectly completes the ultra-smooth processing of optical components (Fig. 12).

**Conclusions** In this study, it is found that the convergence rate of fused silica processed by atmospheric pressure plasma polishing is not high due to the nonlinear effect of removal functions with different dwell times. The reasons for the nonlinear effect are analyzed, and it is verified by experiments that there is little relationship between the residue and the nonlinear effect in the processing. A new machining method is proposed to change the traditional single removal function into a variable removal function. The processing algorithm of the variable removal function is applied to the actual processing. The control experiment discloses that the PV convergence rate changes from 21.4% to 65.6%, and the RMS convergence rate changes from 24.1% to 76.7%. The PV value of the final surface shape of an optical element reaches  $\frac{1}{10}\lambda$ , indicating the realization of ultra-precision machining of optical elements.

**Key words** materials; atmospheric pressure plasma polishing; removal function; ultra-precision machining; fused silica

**OCIS codes** 160.3380;160.6030; 240.5450