

超快激光抛光硬脆光学材料工艺数值模拟研究

吕可鑫, 韩雪松*

天津大学机械工程学院, 天津 300072

摘要 为了分析抛光过程中工艺参数对超快激光抛光硬脆光学材料表面的影响, 基于超快激光与硬脆电介质材料的相互作用机理, 根据超快激光抛光电介质材料的去除函数解析模型, 建立与离焦量和入射角两个加工参数有关的单脉冲材料去除模型。利用软件并根据电介质材料多脉冲烧蚀阈值的变化规律, 建立超快激光抛光硬脆光学材料的抛光计算模型, 利用该模型计算超快激光在不同入射角与前进步长下对材料表面的抛光结果。此计算模型可以直观地解释超快激光抛光光学材料的抛光结果, 并为选择合适的激光抛光工艺参数方法提供新的理论指导。

关键词 超快光学; 超快激光; 激光抛光; 数值研究; 光学材料

中图分类号 O786

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0532001

Research on Numerical Simulation of Ultrafast Laser Polishing Brittle Optical Materials

Lü Kexin, Han Xuesong*

School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract In order to analyze the influence of process parameters on the surface polishing results of ultrafast laser polishing hard and brittle optical materials during the polishing process, based on the interaction mechanism of ultrafast laser and hard and brittle dielectric materials, according to the analytical model of the removal function of ultrafast laser polishing dielectric materials, a single-pulse material removal model related to the two processing parameters of defocus and incident angle is established. Using the software and according to the change law of the multi-pulse ablation threshold of dielectric materials, a computational model of ultrafast-laser polishing of hard and brittle optical materials is established, and the results of ultrafast-laser polishing of the material surface under different incident angles and advance lengths are calculated by using the model. This calculation model can directly explain the results of ultrafast laser polishing optical materials, and provide new theoretical guidance for the selection of appropriate laser polishing process parameters and methods.

Key words ultrafast optics; ultrafast laser; laser polishing; numerical investigation; optical material

OCIS codes 320.7090; 260.7120; 240.5450

1 引言

石英玻璃、磷酸二氢钾(KDP)晶体和蓝宝石晶体等光学材料具有良好的光学特性, 被广泛应用于航空与航天工业、国防工业和微电子工业等领域。

由于光学系统的可靠性对光学元件的表面质量提出了极高的要求, 并且对光学元件的需求量也进一步扩大, 因此各个国家均开展了有关光学材料的表面精密加工的研究工作。

近年来, 超快激光(脉宽小于 10 ps 的脉冲激光)

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-07-20; 录用日期: 2020-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(U1830120)

*E-mail: hanxuesongphd@126.com

是一种加工硬脆光学材料的理想工具,其具有超高的瞬时功率和超短的作用时间,去除材料的机制为“冷去除”机制。因此超快激光抛光技术无加工应力,对剩余材料影响小,热作用影响区域小,避免了传统抛光工艺过程中产生表面及亚表面缺陷,具有较高的加工精度等优点,目前被逐步应用在光学材料的精密加工制造过程中^[1]。美国的 Smith 等^[2]利用了波长为 1030 nm 且脉宽为 300 fs 的超快激光,对自由曲面光学器件进行了抛光实验,材料经过超快激光抛光后,表面轮廓的算术平均偏差下降到 14 nm。美国罗切斯特理工学院的 Taylor 等^[3],利用了波长为 1030 nm 且脉宽为 400 fs 的激光来抛光碳化硅材料,通过优化抛光参数可以解决由激光频率过高而导致材料表面的热氧化问题。西安工业大学的李晓岗^[4]采用了表面牺牲涂层抛光的方法并使用飞秒激光来抛光石英晶体,获得了表面粗糙度为 36 nm 的超光滑表面。

与超快激光抛光实验相比,通过建立数学模型来分析抛光过程的研究还处于起步阶段^[5]。武汉大学的戴玉堂等^[6]将激光光斑扫描的单行深度假设为固定值,并建立了超短脉冲激光抛光硬脆材料的抛光模型,解释了抛光表面周期性沟壑的形成,归纳了扫描速度和激光频率的抛光工艺参数对抛光底面粗糙度的影响。华中科技大学的余本海^[7]根据超短激光与电介质材料的作用机理提出了烧蚀深度计算模型,然而由于超快激光与光学材料的作用过程复杂,抛光工艺参数繁多且相互耦合,现阶段对于建立数学模型来分析超短激光与光学材料的抛光过程仍未取得很好的进展,而抛光工艺参数是通过大量的工艺实验来找到相对理想的参数。

针对以上问题,本文根据超快激光烧蚀光学材

料的动力学过程推导出的解析模型,建立与离焦量和入射角两个工艺参数有关的单脉冲激光烧蚀数学模型。根据材料的孵化效应提出计算材料表面抛光结果的方法,利用该所提模型和方法计算不同工艺参数对抛光表面的影响,并结合有关皮秒激光抛光 KDP 晶体的实验,给出各个激光抛光参数影响抛光结果的合理解释。该计算模型为今后进一步优化超快激光抛光光学材料的抛光工艺参数提供理论依据。

2 抛光去除函数与计算模型

2.1 基于脉冲能量分布的抛光去除函数

基于超快激光与透明电介质材料相互作用的动力学过程,利用

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} = \eta(E) \rho_c(D, t) \left[1 - \frac{\rho_c(D, t)}{\rho_a(D, t)} \right] + w_{PI}(E) \left[1 - \frac{\rho_c(D, t)}{\rho_a(D, t)} \right] \quad (1)$$

来描述激光脉冲能量在材料中的非线性沉积过程,以及材料价带电子的电离过程。式中: E 为电场强度; D 为烧蚀深度; t 为时间; $\rho_a(D, t)$ 为材料的价带电子密度; $\rho_c(D, t)$ 为材料导带电子密度; $w_{PI}(E)$ 为材料多光子的电离系数; $\eta(E)$ 为雪崩电离系数^[8],利用 Thormber 模型可表示为

$$\eta(E) = v_s \frac{E}{\Delta} \exp \left[- \frac{E_i}{E(1 + E/E_p) + E_{KT}} \right], \quad (2)$$

式中: v_s 为电子饱和漂移速率; E_i 为载流子克服电离辐射需要的电场强度; E_p 为载流子克服声子散射需要的电场强度; E_{KT} 为载流子克服热散射效应需要的电场强度; Δ 为材料禁带宽度。

使用 Keldysh 的简化模型来简化 $w_{PI}(E)$ ^[9],表达式为

$$W_{PI}(E) = \frac{2}{9\pi} \omega \left(\frac{m\omega}{h} \right)^{3/2} \varphi \left[\left(2n - 2 \frac{\Delta}{h\omega} \right)^{3/2} \right] \exp \left(2n \left| 1 - \frac{e^2 E}{4m\omega^2 U} \right| \right) \left(\frac{e^2 E}{16m\omega^2 U} \right)^n, \quad (3)$$

式中: m 为有效电子质量; φ 为道森积分函数; e 为单位电子电量; $U = \Delta \frac{-E_{th}^2}{4m\omega^2}$, E_{th} 为激光达到烧蚀能量密度阈值的电场强度; n 为单个电子电离所需吸收光子个数; h 为普朗克常数; ω 为激光的角频率。

设激光脉冲的强度在时域中可描述为

$I(D, t) = I_0 I_1(D) I_1(t)$, 其中 I_0 为初始的激光冲强度, $I_1(D)$ 为随深度变化的激光脉冲强度, $I_1(t)$ 为随时间变化的激光脉冲强度。将激光脉冲简化为矩形脉冲, 即 $I_1(t) = 1$ 。根据能量守恒、电子数量守恒与载流子和光子间的一维比例关系可以得到^[10]

$$\frac{1}{N\hbar\omega} \frac{\partial I(D, t)}{\partial D} = - \frac{\partial \rho_c(D, t)}{\partial t}, \quad (4)$$

式中： \hbar 为约化普朗克常数； $N = \frac{\langle \epsilon \rangle + \Delta}{\hbar \omega}$ ，其中 $\langle \epsilon \rangle$ 为材料内部的电子平均动能^[11]。

将边界条件设在 $D = 0$ 且 $I_1(D) = 1$ 处，则

$$D(F) = \frac{1}{n\hbar\omega(\rho_{a0} - 2\rho_{c0})} \int_{F_{th}}^F \left\{ 2 + \frac{2W_F + H_F\rho_{a0}}{(W_F + H_F\rho_{c0}) \left\{ \exp\left[(2W_F/\rho_{a0} + H_F)\tau \right] - 1 \right\}} \right\} dF, \quad (5)$$

式中： F 为入射激光能量密度； F_{th} 为材料的烧蚀阈值； ρ_{a0} 为材料内部初始价带电子密度； ρ_{c0} 为材料的初始导带电子密度； $W_F = \left(F/F_{th} \right)^n W_{PI}(F_{th})$ ； $H_F = \left(F/F_{th} \right)^{0.5} \eta(F_{th})$ ； $W_{PI}(F_{th})$ 和 $\eta(F_{th})$ 分别为激光能量密度达到材料烧蚀阈值的光致电离系数与碰撞电离系数； τ 为激光脉宽。 $W_{PI}(F_{th})$ 可由(3)式计算得到， $\eta(F_{th})$ 可由(2)式计算得到。激光达到烧蚀能量密度阈值的电场强度 E_{th} 与激光能量密度之间的关系为^[12]

$$E_{th} = \sqrt{\frac{2c\mu_0 F}{\tau n_0}}, \quad (6)$$

式中： c 为真空光速； μ_0 为真空磁导率； n_0 为材料折射率。

引入能量分布为高斯分布的脉冲激光，由激光脉冲能量密度的时空分布可推导出激光能量密度的径向分布，表达式为

$$F(x, y, z) = \frac{F_V}{\pi\omega^2(z)} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2(z)} \right], \quad (7)$$

式中： F_V 为激光峰值能量； $\omega(z)$ 为在光线传播方向上的光斑半径， $\omega(z) = \omega_0 \left[1 + (z/z_R)^2 \right]$ ，其中 ω_0 为激光束腰半径， z_R 为激光的瑞利长度。

分析(7)式可知， F_V 由设定的激光器参数决定，而激光能量的密度分布取决于平面内的光斑半径及光斑与激光能量密度中心的距离。为了建立解析计算模型，对离焦量和入射角两个激光抛光的加工参数进行定义，在材料表面建立直角坐标系，如图1所示。直线 l 在 Yoz 平面内且其方向与激光传播方向相同，在垂直于这条直线上的各个平面内，直线与平面的交点即为激光能量密度中心。坐标系的原点为直线 l 与 XoY 平面的交点，同时在激光聚焦的平面上建立激光的焦平面，焦平面垂直于激光的传播方向，激光传播方向上的激光能量密度峰值最高且激光的光斑半径最小，此时将激光的光斑半径作为激光的束腰半径。在坐标系中， X 轴为激光抛光方向，

$\rho_c(0, t) = \rho_{cr}$ ，其中 ρ_{cr} 为材料的临界导带电子密度，求解(1)式和(4)式并对(4)式作积分，可得到单个超快激光脉冲烧蚀深度的解析模型^[7]，表达式为

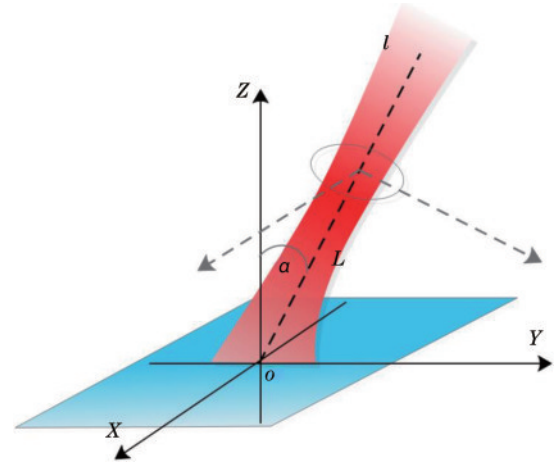


图1 离焦量及入射角的定义示意图

Fig. 1 Illustration of defocusing distance and incident angle

Y 轴与激光能量峰值线共面。在此基础上定义激光抛光过程的入射角 α 为激光能量峰值线与 Z 轴的夹角，离焦量 L 为坐标原点与焦平面的距离。

根据激光抛光参数的定义并结合高斯基模激光的空间光学原理^[13]，激光作用在材料表面的能量密度分布可描述为

$$F(x, y, z, \alpha, L) = \frac{F_V}{s(a, L)} \exp\left[-\frac{2d^2(x, y, z, \alpha)}{\omega^2(y, z, \alpha, L)} \right], \quad (8)$$

式中： $s(\alpha, L)$ 为材料表面处激光的光斑面积； $d(x, y, z, \alpha)$ 为材料表面各坐标点与激光能量峰值中心的等效距离， $d(x, y, z, \alpha) = \sqrt{x^2 + (y \cdot \cos \alpha - z)^2} \div \sqrt{(\tan^2 \alpha + 1)/\tan^2 \alpha}$ ； $\omega(y, z, \alpha, L)$ 为材料表面在各个坐标点处对应的激光光束半径， $\omega(y, z, \alpha, L) = \omega_0 \left\{ 1 + \left[l_p^2(y, z, \alpha, L)/z_R^2 \right] \right\}$ ，其中 l_p 为坐标点距激光聚焦平面的距离， $l_p(y, z, \alpha, L) = |y + (z/\tan \alpha - 2L \cdot \sin \alpha)| \div \sqrt{(\tan^2 \alpha + 1)/\tan^2 \alpha}$ 。

将(6)式代入(1)式，可得到不同激光抛光参数的烧蚀模型，烧蚀深度的方向为激光能量在材料中的沉积方向，表达式为

$$D(x, y, z, \alpha, L) = \frac{1}{Nh\omega(\rho_{a0} - 2\rho_{c0})} \int_{F_{th}}^{F(x, y, z, \alpha, L)} \left\{ 2 + \frac{2W_F + H_F\rho_{a0}}{(W_F + H_F\rho_{c0}) \left\{ \exp\left[\left(2W_F/\rho_{a0} + H_F\right)\tau\right] - 1 \right\}} \right\} dF. \quad (9)$$

2.2 多个超快激光脉冲计算模型

根据有关实验得到的结论可知,当电介质材料接收多个超短脉冲时,随着材料表面接收激光脉冲个数的增加,材料的烧蚀阈值会显著降低,相关研究人员通过实验总结出烧蚀阈值随着脉冲个数变化的计算公式,根据实际情况将公式修正为

$F_{th}(N) = F_{th}(50) + [F_{th}(1) - F_{th}(50)]N^{S-1}$, (10)
 式中: N 为脉冲个数; $F_{th}(1)$ 为材料接受单个激光脉冲的烧蚀阈值,即初始烧蚀阈值; $F_{th}(50)$ 为 $N = 50$ 的材料烧蚀阈值; S 为与材料有关的积累系数。

根据(9)式和(10)式,建立材料表面抛光结果计算模型。建立过程:将材料表面离散成多个计算点,每个计算点均有空间坐标;在模型计算过程中

记录各个计算点的烧蚀次数,用以计算该点处的材料烧蚀阈值;在计算过程中当表面材料去除后,材料表面不再是理想表面,计算下一个激光脉冲烧蚀结果前,需要根据计算点的空间坐标信息重新计算光斑的能量分布,根据新的能量密度和烧蚀阈值计算烧蚀深度。为了与文献[14]的实验结果进行对比,设置单个激光脉冲能量为 $10 \mu\text{J}$,激光脉宽为 500 fs ,波长为 355 nm ,聚焦处的光斑半径为 $10 \mu\text{m}$ 。氟化钙材料的物理参数的具体取值见文献[15-16]。利用软件绘制材料表面的三维抛光结果,如图2所示,图2(a)为激光脉冲扫描前进步长为 $8 \mu\text{m}$ 的抛光计算结果,图2(b)为扫描前进步长为 $4 \mu\text{m}$ 的计算结果。

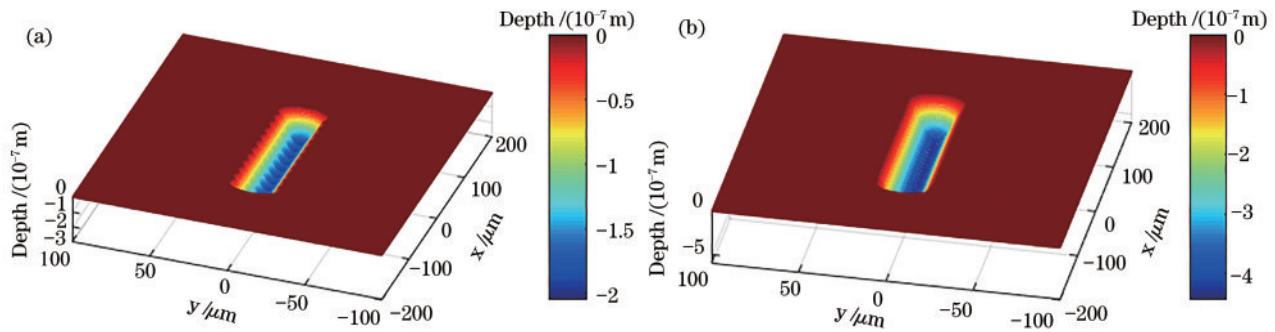


图2 不同前进步长下激光脉冲的扫描结果。(a) $8 \mu\text{m}$; (b) $4 \mu\text{m}$
 Fig. 2 Scanning results of laser pulses under different advance lengths. (a) $8 \mu\text{m}$; (b) $4 \mu\text{m}$

从图2可以看到,当激光重复频率一定时,激光的扫描速度越快,则激光脉冲间的前进步长越长;当扫描速度过快时,激光的单行扫描则会出现扫描边缘不整齐,且扫描底面出现明显的高低差;当激光扫描速度降低时,激光脉冲间的前进步长缩短后,激光的单行扫描边缘则趋于整齐,底面趋于平坦,且抛光深度随之增加。此外,由于材料表面的孵化效应,扫描宽度随着前进步长的缩短而增加。计算模拟结果中的材料抛光边缘与文献[14]的实验结果一致。通过分析材料表面各点数据,可以计算抛光底面的峰谷值(PV)与激光单行扫描的宽度,当扫描步长为 $8 \mu\text{m}$ 时,PV值为 28.6 nm ,扫描宽度为 $13 \mu\text{m}$,当扫描步长为 $4 \mu\text{m}$ 时,PV值为 15.9 nm ,扫描宽度为 $15 \mu\text{m}$ 。

利用计算模型可以进一步计算超短激光抛光整个区域的结果。根据激光沿直线扫描的计算结

果,选择抛光效果较好的 $4 \mu\text{m}$ 前进步长,扫描间距设为 $5 \mu\text{m}$,激光抛光表面的模拟结果如图3所示。从图3可以看到,材料抛光底面较为光滑,但是存在周期性的表面沟壑,此结果与文献[6]一致。利用表面材料的空间坐标计算PV值为 25.1 nm 。

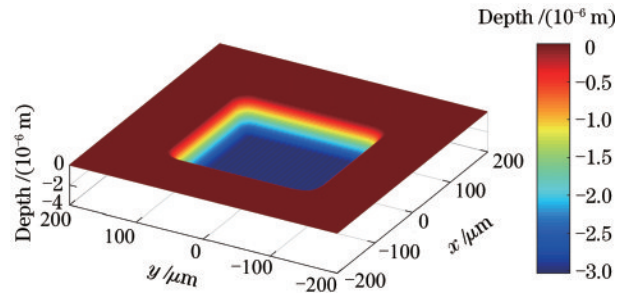


图3 激光抛光表面的模拟结果
 Fig. 3 Simulation results of laser polished surface

3 抛光工艺参数对抛光结果的影响分析

3.1 离焦量对抛光结果的影响

在超快激光抛光过程的实验研究中,离焦量是影响抛光面表面粗糙度的一个关键工艺参数。在实际的加工工艺过程中,光斑焦点位置由整个加工系统的光路系统来确定,在抛光过程中不调整激光的聚焦位置。为了保证抛光表面质量,在加工前确定合适的离焦量是有必要的。

利用建立的计算模型来计算不同离焦量下激光沿直线扫描的单行扫描线宽,以及多行抛光表面 PV 值。为了确定不同离焦量对抛光结果的影响,当计算多行扫描结果时,选择相同的激光光斑有效搭叠率,激光光斑有效搭叠率模型如图 4 所示。其中 L_T 为单个脉冲辐照下的材料烧蚀阈值,激光光斑的有效搭叠率为 $(L_E/L_T) \times 100\%$,在计算工艺参数对抛光底面粗糙度的影响过程中,保证每次计算相邻

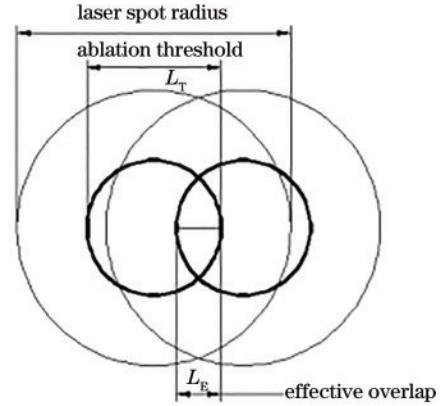


图 4 激光光斑有效搭叠率模型
Fig. 4 Laser spot effective lap rate model

单行抛光行间的间距均为 50% 的光斑有效搭叠率。

由于在实际的激光抛光工艺过程中,激光的波长由激光器中的增益介质来决定,单个激光脉冲的能量在实际加工过程中是通过调节激光器的输出参数来调节的,在加工过程中通常设为定值。选用所设置的激光参数,计算离焦量对抛光结果的影响如图 5 所示。

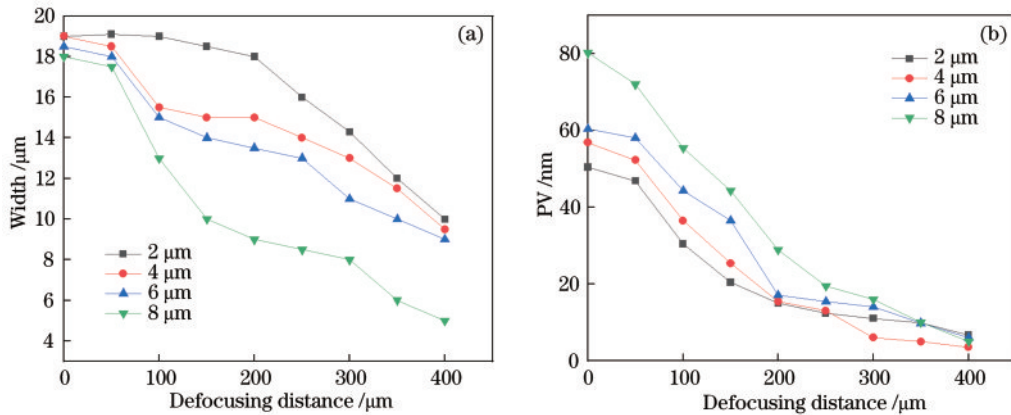


图 5 离焦量对抛光结果的影响。(a)离焦量对单行抛光线宽的影响;(b)离焦量对抛光底面 PV 值的影响
Fig. 5 Influence of defocusing distance on polishing results. (a) Influence of defocusing distance on linewidth of single line of polishing; (b) influence of defocusing distance on PV value of polished bottom

通过(8)式可知离焦量对于激光能量密度的影响是非线性的,且离焦量越大,激光分布在材料表面的能量密度越低。从图 5(a)可以看到,离焦量越大,激光单行扫描线宽越窄,且在扫描步长越长的情况下,离焦量对抛光线宽的影响越明显;当扫描步长为 $8 \mu\text{m}$ 且离焦量为 $400 \mu\text{m}$ 时,抛光线宽为 $4.2 \mu\text{m}$,小于前进步长,说明激光脉冲在材料表面没有进行有效的叠加,影响抛光效率。从图 5(b)可以看到,当脉冲前进步长小于 $6 \mu\text{m}$ 时,表面 PV 值变化趋势接近 S 形,在 S 曲线前半段 ($0 \sim 100 \mu\text{m}$),由于离焦量较小,单个激光脉冲烧蚀深度大,这对

材料表面起到类似激光刻划的作用,所以激光扫描后表面 PV 值较大,在 S 曲线后半段 ($300 \sim 400 \mu\text{m}$),激光能量密度分散,导致激光脉冲对材料表面的烧蚀深度减小,因此前进步长对抛光结果的影响变小。在实际的抛光工艺中,过小的单脉冲烧蚀深度会导致表面材料无法被有效去除,无法消除表面的高频粗糙度误差。因此,在加工过程中应该选用位于 S 曲线中段处的离焦量。

3.2 入射角对抛光结果的影响

利用计算模型将离焦量固定在 S 曲线中段的 $150 \mu\text{m}$ 处,改变激光入射角,计算不同入射角与扫

描前进步长下激光沿直线扫描的单行抛光线宽与抛光底面 PV 值。图 6(a) 为不同入射角及扫描前进步长对抛光线宽的影响。从图 6(a) 可以看到, 当激光扫描前进步长较大时, 激光的入射角对抛光线宽的影响明显, 随着激光入射角的增大, 抛光线宽随

之减小。图 6(b) 为不同入射角及扫描前进步长对抛光底面 PV 值的影响。从图 6(b) 可以看到, 当激光扫描前进步长确定时, 随着激光入射角的增加, 抛光底面 PV 值减小, 且入射角对较长的脉冲间扫描前进步长的抛光表面影响更为明显。

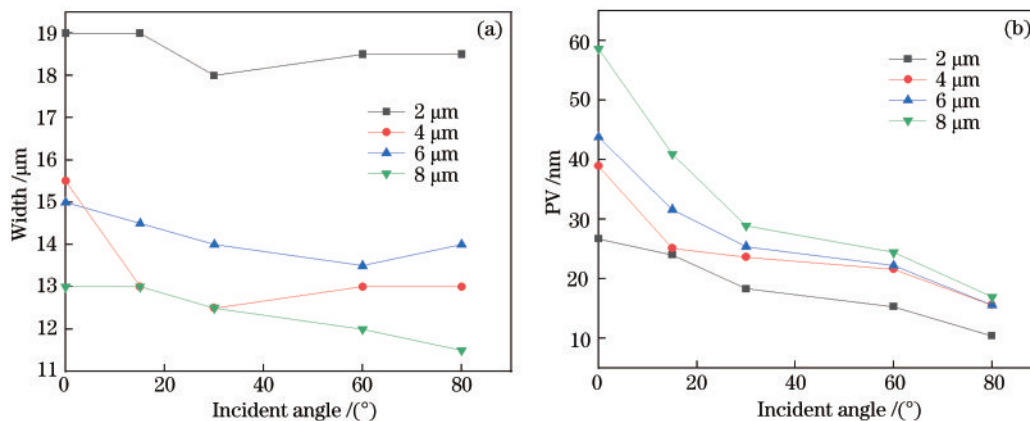


图 6 入射角对底面抛光结果影响。(a)入射角对单行抛光线宽的影响;(b)入射角对抛光底面 PV 值的影响

Fig. 6 Influence of incident angle on polishing results. (a) Influence of incident angle on linewidth of single line of polishing; (b) influence of incident angle on PV value of polished bottom

通过分析(8)式可以得到激光入射角对单个激光脉冲能量密度的影响, 当激光的入射角增大时, 激光分布在材料表面的能量密度减少, 在垂直于抛光方向的能量密度分布变窄, 并且在激光入射的倾斜方向上达到材料烧蚀阈值能量密度的激光宽度变宽。结合(9)式分析可得到, 单个激光脉冲的烧蚀深度及烧蚀宽度随着激光入射角的增大而减少且坑壁趋于平坦, 且材料烧蚀方向与坑壁方向夹角减小, 有利于改善抛光底面的加工质量。当激光脉冲的扫描前进步长缩短时, 则意味着激光脉冲的重叠率增大, 材料的孵化效应对抛光结果影响更为明显, 有利于改善材料抛光后的表面质量。然而值得注意的是, 当激光入射角度增大时, 材料的去除深度变小, 则较大的入射角可能会导致激光无法有效减小材料原始表面的粗糙度, 因此在实际的抛光工艺过程中需要结合材料表面的初始状态来进一步规划激光抛光的加工参数。

4 结 论

针对超短激光抛光硬脆光学材料, 提出基于离焦量及入射角两个激光抛光加工参数的单脉冲材料去除深度模型, 并结合材料的孵化效应提出材料表面抛光计算模型。基于此计算模型计算不同激光入射角下材料表面的抛光结果, 计算结果揭示了在不同扫描步长下对应不同激光入射角对抛光结

果的影响, 为确定激光抛光工艺参数改善激光抛光表面质量提供理论依据。将此模型进一步扩展应用到工程化表面并对其进行数值模拟计算, 可使优化工艺参数不再依赖于大量的工艺实验, 极大地提高选择合适工艺参数的效率。同时该模型并未考虑抛光过程中材料表面产生等离子体对激光脉冲的等离子体屏蔽效应, 为了进一步使计算模型贴合实际激光与材料的作用情况, 仍需基于此模型进一步考虑材料表面等离子屏蔽效应对激光脉冲能量的影响。

参 考 文 献

- [1] Cao X W, Zhang L, Yu Y S, et al. Application of micro-optical components fabricated with femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0102004.
曹小文, 张雷, 于永森, 等. 飞秒激光制备微光学元件及其应用[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102004.
- [2] Taylor L L, Xu J, Pomerantz M, et al. Femtosecond laser polishing of germanium towards fabrication of freeform optics [C]//CLEO: Applications and Technology 2019, San Jose, May 5-10, 2019, California United States. Washington, DC: OSA, 2019: ATu3I.2.
- [3] Taylor L L, Qiao J, Qiao J. Femtosecond laser polishing of optical materials[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9633: 96330M.

- [4] Li X G. Research on ultrafast laser polishing monocrystalline-silicon[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015: 34-39.
李晓岗. 基于超快激光的超光滑光学表面制造技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2015: 34-39.
- [5] Yuan J L, Wang Z W, Wen D H, et al. Review of the current situation of ultra-precision machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 35-48.
袁巨龙, 王志伟, 文东辉, 等. 超精密加工现状综述[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 35-48.
- [6] Xu G, Dai Y T, Xiao X. Study on mathematical modeling and experiment of ultrashort laser polishing micro-processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0603003.
徐刚, 戴玉堂, 肖翔. 超短激光抛光微加工的数学建模与实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603003.
- [7] Yu B H. Ablation and micromachining of dielectrics with a femtosecond laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
余本海. 飞秒激光对透明电介质材料的烧蚀与微加工研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [8] Thornber K K. Applications of scaling to problems in high-field electronic transport [J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(1): 279-290.
- [9] Keldysh L V. Ionization in the field of a strong electromagnetic wave [J]. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1965, 20: 1307-1314
- [10] Carr C W, Radousky H B, Rubenchik A M, et al. Localized dynamics during laser-induced damage in optical materials [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(8): 087401.
- [11] Jiang L, Tsai H L. Repeatable nanostructures in dielectrics by femtosecond laser pulse trains [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(15): 151104.
- [12] Yuan L, Zhao Y A, He H B, et al. Single-pulse and multi-pulse femtosecond laser damage of optical single films [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(4): 595-598.
袁磊, 赵元安, 贺洪波, 等. 单脉冲和多脉冲飞秒激光对单层光学薄膜的损伤[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(4): 595-598.
- [13] Renk K F. Basics of laser physics [M]. Berlin: Springer, 2011: 17-41.
- [14] Guo T Y, Zhang L M, Ren Y Y, et al. Surface characteristics of CaF₂ crystal ablated by femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126019.
郭太勇, 张立木, 任莹莹, 等. 飞秒激光烧蚀氟化钙晶体表面特性[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126019.
- [15] Schaffer C B, Brodeur A, Mazur E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses [J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(11): 1784-1794.
- [16] Bloembergen N. Laser-induced electric breakdown in solids[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1974, 10(3): 375-386.