脉冲CO₂激光高精度烧蚀熔石英玻璃

贺婷^{1,2}, 曹珍^{1,2*}, 魏朝阳^{1,2*}, 邵建达^{1,2}

1. 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;

2. 中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

*联系人, 曹珍, E-mail: caozhen@siom.ac.cn; 魏朝阳, E-mail: siomwei@siom.ac.cn

收稿日期: 2019-05-31; 接受日期: 2019-09-05; 网络出版日期: 2019-10-15

国家自然科学基金(编号: U1831221)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2016YFB1102704)和中国科学院青年创新促进会资助项目

摘要 激光抛光是一种能获得超光滑表面新颖的光学元件加工方法, 但抛光后表面存在残余波纹和面形畸变. 激光高精度烧蚀可用于对元件表面残余波纹和面形进行修正, 是一种极具潜力的修形技术. 本文开展了激光高精度烧蚀熔石英玻璃的实验, 验证了脉冲CO₂激光通过控制重叠率可以实现高精度的局部区域均匀烧蚀, 并可通过控制激光功率密度获得不同纳米量级的烧蚀深度. 但实验发现激光局部区域烧蚀过程存在热累积和过烧蚀的现象. 为此建立三维数值模型模拟脉冲CO₂激光扫描熔石英表面的过程, 对不同重叠率及不同脉冲重复频率作用下熔石英表面温度分布及演变进行分析. 数值计算结果表明, 重叠率过高将导致熔石英过烧蚀; 在合适的重叠率下, 高脉冲重复频率会导致明显的热累积.

关键词 激光高精度烧蚀, 热传导, 熔石英

PACS: 81.65.Ps, 44.10.+i, 42.70.Ce

1 引言

熔石英玻璃具有良好的光学、热学、力学性能, 被广泛应用于高功率激光系统及先进光电器件中^[1-3]. 在高功率激光系统中, 熔石英玻璃是窗口、聚焦透镜、衍射光栅等核心元件的首选材料. 传统的光学元件加工方法易引起熔石英表面形成划痕和裂纹等缺陷, 诱导熔石英元件形成激光损伤, 从而限制高功率激光系统发展^[4]. 在先进光电子器件中, 如激光陀螺仪反射镜, 要求熔石英玻璃基底表面为超光滑表面^[5]. 目前超光滑表面抛光技术有浮点抛光^[6]、大气等离子体抛

光^[7]、微流体射流抛光^[3]等, 但现阶段抛光表面仍存在微缺陷、结构奇异点、局部不均匀等有待解决的问题. 激光抛光为非接触式抛光, 不会对样品施加任何压力; 无需抛光辅助原料, 不会引入杂质缺陷, 安全无污染; 抛光精度高; 抛光效率高, 耗时短; 灵活性高, 易于自动化控制, 适用于平面、球面、非球面、自由曲面等各种面形光学元件等优点. 激光抛光有望成为突破现有熔石英光学元件加工瓶颈的关键技术手段.

Temple等人^[8]首先采用非聚焦CO₂激光抛光熔石英玻璃, 将表面粗糙度从rms=0.33 nm改善至0.27 nm (测量区域为500 μm×400 μm), 其研究表明激光抛光提

引用格式: 贺婷, 曹珍, 魏朝阳, 等. 脉冲CO₂激光高精度烧蚀熔石英玻璃. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 034211

He T, Cao Z, Wei C Y, et al. High precision laser ablation of fused silica using pulsed CO₂ laser (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 034211, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0205

高了熔石英元件在1064 nm的损伤阈值. 随后许多研究针对CO₂激光抛光熔石英玻璃展开了工艺优化和设备改进^[9,10], 德国夫琅禾费激光技术研究所, 将CO₂激光抛光用于抛光球面、非球面光学元件, 将粗糙度从 $Ra=100$ nm减小至0.4 nm(测量区域为50 $\mu\text{m}\times 70$ μm), 小于传统抛光方法所获表面粗糙度^[11]. 此外, 激光抛光也被用于抛光熔石英光纤端面^[12]、微透镜阵列^[13]、亚纳米沟槽^[14]、微流通道等传统方法难以进行抛光的微结构元件. 本课题组开展的激光抛光熔石英玻璃研究, 获得了粗糙度为0.156 nm超光滑熔石英表面(采用原子力显微镜检测, 检测区域1 $\mu\text{m}\times 1$ μm)^[15]. 但目前激光抛光的熔石英玻璃仅满足照明需求, 因为激光抛光后存在残余波纹度及面形畸变. 为了实现基于激光的高质量光学加工工艺, 还需要利用激光高精度烧蚀来进行修形.

要有效对表面的残余波纹及面形进行修正, 激光修形必须满足以下条件: 能进行均匀地选择性烧蚀去除; 烧蚀的纵向分辨率(烧蚀深度) <5 nm; 横向分辨率(烧蚀直径) <100 μm ; 并且不会破坏初始激光抛光的粗糙度. Herdrich和Weingarten等人^[16-18]先后研究了连续CO₂激光、超短脉冲激光和脉冲CO₂激光用于激光烧蚀抛光的可行性. 结果表明连续CO₂激光高精度烧蚀, 纵向分辨率能满足修形要求, 但其烧蚀的横向分辨率 >200 μm , 不能满足修形要求. 超短脉冲高精度烧蚀, 横向烧蚀直径约为18 μm , 但纵向烧蚀深度约为135 nm远高于纵向分辨 <5 nm的要求. 脉冲CO₂激光高精度烧蚀横向和纵向分辨均能满足要求. 为能实现激光修形, Weingarten等人^[19,20]开展了不同脉宽局部均匀烧蚀实验, 获得激光高精度局部区域纳米量级烧蚀深度与激光脉宽的关系, 并基于脉宽与烧蚀深度的关系生成修形程序, 分别在机械抛光和激光抛光的熔石英玻璃表面进行局部选择性烧蚀实验. 机械抛光熔石英玻璃在12 mm $\times$ 12 mm区域表面波纹基本消除, 激光抛光表面残余波纹通过选择烧蚀也基本得到修正, 但烧蚀后表面的粗糙度增大至修形前两倍.

目前激光高精度烧蚀技术仍未能在全口径熔石英玻璃元件实现波纹及面形修正的应用, 烧蚀过程中会出现的不均匀烧蚀和过烧蚀等现象会影响最终修形效果. 因此, 本文开展了激光高精度烧蚀实验来验证脉冲CO₂激光进行激光修形的可行性, 并针对局部区域高精度烧蚀存在的热效应问题, 建立三维热传导数值模

型对脉冲激光扫描熔石英玻璃时表面温度场的分布和演变进行分析.

2 实验装置和理论模型

2.1 实验装置

激光高精度烧蚀实验平台如图1(左), 光源为脉冲CO₂激光器输出激光束依次经过扩束镜、扫描振镜和平场透镜聚焦在样品表面. CO₂激光波长为10.6 μm , 最大平均输出功率为10 W, 脉宽可调范围为1–40 μs , 脉冲重复频率可调范围为1.25–25 kHz. CO₂激光通过焦距为100 mm的ZnSe平场透镜聚焦后光斑直径约为100 μm , 激光的空间分布为高斯型分布. 激光高精度烧蚀的扫描方式如图1(右), 采用同向激光作用扫描, 空跳返回的方式.

实验中采用的样品为平面熔石英玻璃, 尺寸为 $\Phi 30\times 3$ mm³. 熔石英表面初始粗糙度约为0.5 nm (采用白光干涉仪测量, 测量区域为1.09 mm $\times$ 1.09 mm). 激光高精度烧蚀实验前熔石英玻璃样品采用超声清洗方法进行清洗, 避免表面存在污垢.

表面形貌及粗糙度采用ZYGO公司的白光干涉仪进行检测(SER4237A-1). 局部区域烧蚀采用1倍物镜, 测量区域为10.88 mm $\times$ 10.88 mm, 粗糙度采用10倍物镜测量, 测量区域为1.09 mm $\times$ 1.09 mm.

2.2 理论模型

激光高精度烧蚀理论分析模型是基于有限元方法建立的数值三维模型. 模型示意图及边界条件如图2所示. 激光高精度烧蚀光斑较小, 热影响区域小, 为节省计算量和计算时间, 模型中缩小了熔石英元件的尺寸,

图1 (网络版彩图)激光高精度烧蚀实验平台及扫描方法示意图^[21]

Figure 1 (Color online) Schematic of high precision laser ablation experimental platform and scanning method [21].

图 2 (网络版彩图)模型示意图及边界条件

Figure 2 (Color online) Schematic of model and boundary conditions.

模型的几何形状为半径为0.8 mm, 高为0.3 mm的圆柱, 并将元件表面激光作用区域(半径0.4 mm, 高0.05 mm)单独构建出, 在此区域细化网格进行分析。

该模型的控制方程基于热传导方程

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (-K(T) \nabla T) + Q, \quad (1)$$

其中 ρ 为熔石英玻璃的密度, $C_p(T)$ 为随温度变化的比热容, $K(T)$ 为随温度变化的导热系数, Q 为外加热源。

模型中, 上表面的边界条件包括激光光源、空气自然对流和热辐射, 光源为移动的高斯分布激光束, 表达式为

$$Q = \frac{2\beta P}{\pi r_0^2} \exp\left(-\left(\frac{(x - v_{\text{scan}} \cdot t)^2}{r_0^2} + \frac{y^2}{r_0^2}\right)\right) \cdot t_p, \quad (2)$$

其中 β 为熔石英对CO₂激光光源的吸收率0.8, r_0 为激光的光斑半径, 光斑大小设置为25 μm . P 为激光的功率, v_{scan} 为扫描的速度, t 为时间. t_p 为激光脉宽40 μs , 激光脉冲通过矩形函数加载, 即在脉冲作用时间内激光热源为 Q , 脉冲停止作用到下一脉冲作用之前热源为零。

空气自然对流边界条件和热辐射边界条件分别为表达式

$$\nabla \cdot (-K(T) \nabla T) = h(T - T_a), \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (-K(T) \nabla T) = \varepsilon k_B (T^4 - T_a^4), \quad (4)$$

其中, h 为空气自然对流系数, T_a 为环境初始温度, 为辐射系数, k_B 为玻尔兹曼常数。

侧面为空气自然对流边界条件, 下表面为热绝缘

$$\nabla \cdot (-K(T) \nabla T) = 0. \quad (5)$$

模型中材料的参数取自参考文献[21], 其中导热

系数 $K(T)$, 比热容 $C_p(T)$ 是随温度变化的参数。

网格划分对激光作用区域做极细化划分, 划分后包括165618个域单元, 30190个边界单元及653个边单元。

3 结果和讨论

3.1 激光高精度烧蚀实验

首先通过控制激光脉冲重复频率及扫描速度开展了单脉冲点烧蚀的实验。激光的脉冲重复频率设置为1.25 kHz, 扫描速度设置为150 mm/s, 确保激光脉冲烧蚀石英玻璃样品, 不会出现烧蚀点重叠的现象。图3为单脉冲烧蚀结果, 激光功率密度为20.96 kW/cm²时, 烧蚀深度为 $d=(2.7 \pm 0.3)$ nm, 烧蚀直径约50 μm , 可见, 脉冲CO₂激光烧蚀结果满足激光烧蚀抛光纵向和横向的分辨要求。

图4为不同重叠率局部区域高精度烧蚀的结果对比, 重叠率 O_x 计算公式为

$$O_x = 1 - \frac{V_{\text{scan}}}{f_{\text{rep}} d_m}, \quad (6)$$

其中, f_{rep} 为激光脉冲重复频率, d_m 为激光光斑直径。如图4(a)所示, 重叠率小, 可明显看到单个的烧蚀点, 无法实现局部区域均匀的高精度烧蚀。随着重叠率的增大, 可实现纳米量级的局部均匀烧蚀, 如图4(b)所示。当重叠率过大, 烧蚀深度达百纳米量级, 出现过烧蚀

图 3 (网络版彩图)单脉冲烧蚀白光干涉仪检测结果

Figure 3 (Color online) White light interferometer results of single pulse ablation.

图 4 (网络版彩图)不同重叠率下的局部区域烧蚀白光轮廓仪图, 重叠率. (a) 25%; (b) 50%; (c) 70%, 激光功率 $P=2.2$ W, 重复频率 $f_{\text{rep}}=1.25$ kHz [21]

Figure 4 (Color online) Profiler images of ablated areas with varied overlap rates. (a) 25%; (b) 50%; (c) 70%, with $P=2.2$ W, $f_{\text{rep}}=1.25$ kHz [21].

现象, 严重破坏表面粗糙度, 烧蚀的材料在表面形成一层不均匀分布的熔凝层. 实验中, 在重叠率小于60%不会严重破坏初始粗糙度, 重叠率继续增大, 粗糙度会迅速增大.

图5为重叠率为60%时, 不同激光功率密度下局部均匀烧蚀结果. 烧蚀深度随功率密度的减小而减小, 在功率密度为 12 kW/cm^2 时可获得深度仅4 nm的均匀局部区域的高精度烧蚀. 该结果进一步表明脉冲 CO_2 激光适用于减小激光抛光后熔石英玻璃表面的残余波纹度及面形修正.

采用脉冲 CO_2 激光进行高精度激光烧蚀, 脉冲宽度在几十微秒量级, 虽然每个脉冲之间材料存在较长冷却的时间, 但一些局部区域高精度烧蚀结果中显示, 存在烧蚀不均匀及过烧蚀的现象, 如图4(b)和(c)所示. 激光功率密度越高, 不均匀烧蚀越明显. 不均匀烧蚀造成激光高精度烧蚀区域中间的烧蚀深度高于周围区域. 过烧蚀则会严重恶化表面粗糙度.

3.2 模型分析

本文利用有限元方法建立三维温度分析模型, 针

图 5 (网络版彩图)局部区域均匀烧蚀深度随功率密度变化的白光轮廓仪图. (a) 15.00 kW/cm^2 ; (b) 15.63 kW/cm^2 ; (c) 18.722 kW/cm^2 , 重叠率 $O_x=60\%$, 重复频率 $f_{\text{rep}}=1.25$ kHz [21]

Figure 5 (Color online) Profiler images of ablated areas with laser energy intensity. (a) 15.00 kW/cm^2 ; (b) 15.63 kW/cm^2 ; (c) 18.722 kW/cm^2 , with overlap rate $O_x=60\%$, $f_{\text{rep}}=1.25$ kHz [21].

对不同重叠率及重频对材料温度的影响进行分析. 模型中, 不同重叠率和重频扫描速度的设定如表1. 分别模拟计算不同激光脉冲参数结束作用时刻表面径向的温度分布(如图6(a)白线), 以及表面不同坐标位置(0, 0, 0), (0.2, 0, 0)及(0.4, 0, 0)在激光扫描过程温度的演化(如图6(b)).

图7为不同重叠率样品表面径向温度分布. 从图中可以看出, 对于1 kHz的激光重频, 同一重叠率下, 材料

表 1 不同重叠率和重频模型参数设定

Table 1 Model parameters of various overlap rates and repetition rates

模拟组	重叠率 (%)	重频 (kHz)	扫描速度 (mm/s)
1	20	1	40
2	40	1	30
3	60	1	20
4	80	1	10
5	60	2.5	50
6	60	5	100
7	60	10	200

图 6 (网络版彩图)模型表面径向(a)及表面不同坐标位置(b)示意图

Figure 6 (Color online) Schematic of model surface radial (a) and different coordinate positions of the surface (b).

图 7 (网络版彩图)不同重叠率激光扫描不同脉冲结束时刻表面温度径向分布. (a) 重叠率20%; (b) 重叠率40%; (c) 重叠率60%; (d) 重叠率80%, 脉冲重复频率为 $f_{\text{rep}}=1$ kHz

Figure 7 (Color online) Surface temperature radial distributions of different laser pulse at laser stop irradiating moments under different overlap rate. (a) 20%; (b) 40%; (c) 60%; (d) 80%, with laser frequency $f_{\text{rep}}=1$ kHz.

脉冲先作用区域和后作用区域表面能达到的最高温度基本保持稳定. 重叠率变化, 材料表面不同重叠率条件下达到的最高温度保持稳定, 可见重叠率的改变不会引起明显热累积现象的出现.

图8为表面不同坐标位置温度随时间的演变图, 可以看出, 在下一激光脉冲开始辐照样品表面, 前一激光脉冲引起的材料升温基本已经得到恢复. 虽仍未完全恢复到室温, 存在较小的热累积, 但从图7中可以看出, 后一脉冲达到的最高温度与前一脉冲达到最高温度相同, 所以基本不影响后一脉冲材料达到的最高温度. 图中较为明显的区别在于, 在重叠率小于60%时, 对于相同位置, 只有一个作用脉冲温度达到烧蚀温度(2500°C), 但随着重叠率的增加, 重叠率为80%时, 如图8(d), 可以明显看到, 对某一位置, 如坐标位置点(0.2 mm, 0, 0), 会有三个脉冲作用材料最高温度到达烧蚀温度, 即除了会被相对应的激光脉冲烧蚀, 激光脉冲作用在前后相邻位置时也会使(0.2 mm, 0, 0)位置点出现温度高于气化温度的结果. 因此, 重叠率过高会使同一位置出现

多次激光烧蚀的现象, 从而造成过烧蚀.

当重叠率为60%, 模拟计算对比不同激光脉冲重复频率时表面的温度分布和演变. 如图9所示, 重频为1 kHz时, 表面径向温度在不同脉冲作用下, 能达到最高温度基本保持温度. 但随着激光重复频率的增大, 激光后作用区域能达到的最高温度高于激光开始作用区域能达到的最高温度, 且激光重复频率越大, 该现象越为明显, 表面达到最高温度逐渐上升, 表现出了明显的热累积现象. 由图10中不同坐标位置温度随时间演变的结果可以看到, 重频为1 kHz时, 在下一脉冲作用前, 材料基本已经冷却, 后续脉冲作用熔石英, 表面温度基本保持不变, 无明显热累积现象. 但随着激光重复频率的增大, 前一脉冲引起材料温度升高还未完全冷却, 后一脉冲已经开始作用, 出现后一脉冲所达到最高温度高于前一脉冲的最高温度的现象, 并且激光重频频率越大, 热累积导致表面温度到达的最高温度越大. 可见, 在激光高精度烧蚀中, 激光重复频率过大是造成热累积的主要原因.

图 8 (网络版彩图)不同重叠率表面不同位置温度随时间变化. (a) 重叠率20%; (b) 重叠率40%; (c) 重叠率60%; (d) 重叠率80%, 脉冲重复频率为 $f_{\text{rep}}=1$ kHz

Figure 8 (Color online) Temperature evolution over time of three different surface spots under different overlap rate. (a) 20%; (b) 40%; (c) 60%; (d) 80%, with laser frequency $f_{\text{rep}}=1$ kHz.

图 9 (网络版彩图)不同重复频率激光扫描不同脉冲结束时刻表面温度径向分布. (a) 1 kHz; (b) 2.5 kHz; (c) 5 kHz; (d) 10 kHz, 重叠率为60%

Figure 9 (Color online) Surface temperature radial distributions of different laser pulse at laser stop irradiating moments under different frequency. (a) 1 kHz; (b) 2.5 kHz; (c) 5 kHz; (d) 10 kHz, with overlap rate 60%.

图 10 (网络版彩图)不同重复频率表面不同位置温度随时间变化. (a) 1 kHz; (b) 2.5 kHz; (c) 5 kHz; (d) 10 kHz, 重叠率为60%
Figure 10 (Color online) Temperature evolution over time of three different surface spots under different frequency. (a) 1 kHz; (b) 2.5 kHz; (c) 5 kHz; (d) 10 kHz, with overlap rate 60%.

4 结论

激光抛光能获得粗糙度很小的超光滑表面, 但抛光后表面仍存在残余波纹和面形畸变. 为了实现基于激光的高质量光学加工工艺, 还需要利用激光高精度烧蚀来进行修形. 本文开展了单脉冲及局部区域高精度激光烧蚀熔石英实验, 通过控制烧蚀重叠率和激光功率密度, 实现了不同纳米量级的局部区域均匀烧蚀,

验证了脉冲 CO_2 激光用于激光修形的可行性. 针对局部区域高精度烧蚀受热效应影响出现的不均匀烧蚀和过烧蚀问题, 建立了脉冲激光扫描的三维热传导数值模型来分析激光烧蚀重叠率和脉冲重复频率对熔石英玻璃表面的温度分布的影响. 模型计算结果表明高重叠率是将导致过烧蚀. 合适的重叠率下, 高脉冲重复频率将引起热累积.

参考文献

- Calendron A L, Meier J, Hemmer M, et al. Laser system design for table-top X-ray light source. *High Pow Laser Sci Eng*, 2018, 6: e12
- Bradford P, Woolsey N C, Scott G G, et al. EMP control and characterization on high-power laser systems. *High Pow Laser Sci Eng*, 2018, 6: e21
- Ma Z, Peng L, Wang J. Ultra-smooth polishing of high-precision optical surface. *Optik*, 2013, 124: 6586–6589
- Hrubesh L W, Norton M A, Molander W A, et al. Methods for mitigating surface damage growth in NIF final optics. *Proc SPIE*, 2002, 4679: 23–34
- Kuznetsov A G, Molchanov A V, Chirkin M V, et al. Precise laser gyroscope for autonomous inertial navigation. *Quantum Electron*, 2015, 45: 78–88
- Bennett J M, Shaffer J J, Shibano Y, et al. Float polishing of optical materials. *Appl Opt*, 1987, 26: 696–703
- Zhang J, Wang B, Dong S. Application of atmospheric pressure plasma polishing method in machining of silicon ultra-smooth surfaces. *Front*

[Electr Electron Eng China](#), 2008, 3: 480–487

- 8 Temple P A, Lowdermilk W H, Milam D. Carbon dioxide laser polishing of fused silica surfaces for increased laser-damage resistance at 1064 nm. [Appl Opt](#), 1982, 21: 3249–3255
- 9 Hildebrand J, Hecht K, Bliedtner J, et al. Laser beam polishing of quartz glass surfaces. [Phys Procedia](#), 2011, 12: 452–461
- 10 Ostendorf A, Kulik C, Wiechell P O. Automatic control of a thermal-based polishing process for aspherical optics. *Proc SPIE*, 2004, 5252: 69–80
- 11 Heidrich S, Richmann A, Schmitz P, et al. Optics manufacturing by laser radiation. [Optics Lasers Eng](#), 2014, 59: 34–40
- 12 Heptonstall A, Barton M A, Bell A S, et al. Enhanced characteristics of fused silica fibers using laser polishing. [Class Quantum Grav](#), 2014, 31: 105006
- 13 Jung S, Lee P A, Kim B H. Surface polishing of quartz-based microfluidic channels using CO₂ laser. [Microfluid Nanofluid](#), 2016, 20: 84
- 14 Shen N, Matthews M J, Fair J E, et al. Laser smoothing of sub-micron grooves in hydroxyl-rich fused silica. [Appl Surf Sci](#), 2010, 256: 4031–4037
- 15 He T, Wei C, Jiang Z, et al. Super-smooth surface demonstration and the physical mechanism of CO₂ laser polishing of fused silica. [Opt Lett](#), 2018, 43: 5777–5780
- 16 Heidrich S, Willenborg E, Richmann A. Development of a laser based process chain for manufacturing freeform optics. [Phys Procedia](#), 2011, 12: 519–528
- 17 Heidrich S, Weingarten C, Willenborg E, et al. Polishing and form correction with laser radiation. In: *Optical Fabrication and Testing*. OSA Technical Digest (online). Optical Society of America, 2014. OTu1B.4
- 18 Weingarten C, Uluz E, Schmickler A, et al. Glass processing with pulsed CO₂ laser radiation. [Appl Opt](#), 2017, 56: 777–783
- 19 Weingarten C, Schmickler A, Willenborg E, et al. Laser polishing and laser shape correction of optical glass. [J Laser Appl](#), 2017, 29: 011702
- 20 Weingarten C, Braun K, Willenborg E. Combination of laser-based process steps for optics manufacturing. In: *Optical Fabrication and Testing*. OSA Technical Digest (online). Optical Society of America, 2017. OTu3B.6
- 21 He T, Wei C Y, Jiang Z G, et al. Numerical model and experimental demonstration of high precision ablation of pulse CO₂ laser. [Chin Opt Lett](#), 2018, 16: 041401

High precision laser ablation of fused silica using pulsed CO₂ laser

HE Ting^{1,2}, CAO Zhen^{1,2*}, WEI ChaoYang^{1,2*} & SHAO JianDa^{1,2}

¹ *Advanced Optical Manufacturing and Testing Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

² *Key Laboratory of Material for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

Laser polishing is a novel processing method which can achieve a super-smooth surface of an optical component. However, there are residual ripples and surface distortions after laser polishing. High precision laser ablation can be used to correct the residual ripple and shape of the component, making it a promising figuring method. In this paper, the experiment of high precision laser ablation of fused silica was carried out with pulsed CO₂ laser. It is verified that high-precision uniform ablation in a local region can be achieved by controlling the laser overlap rate, and different nanometer ablation depths can be obtained by controlling the laser power density. However, it has been found that there is thermal accumulation and over-ablation during the laser ablation process. A three-dimensional numerical model was established to simulate the process of pulsed CO₂ laser scanning on a fused silica surface. The surface temperature distribution and evolution of fused silica with different overlap rates and pulse repetition frequencies were analyzed. The numerical results show that the increase of the overlap rate could lead to over-ablation. With a suitable overlap rate, the high pulse repetition frequency could result in significant heat accumulation.

high precision laser ablation, heat conduction, fused silica

PACS: 81.65.Ps, 44.10.+i, 42.70.Ce

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0205](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0205)