

# 熔石英表面激光平滑中扫描速度对粗糙度的影响规律

刘朋朋<sup>1,2</sup>, 刘卫国<sup>1</sup>, 李亚国<sup>2</sup>, 周顺<sup>1</sup>

(1.西安工业大学 光电工程系, 西安 710021;

2.中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** **目的** 研究激光平滑光学元件的工艺, 探索使用 CW (连续) CO<sub>2</sub> 激光器对熔石英光学元件表面进行平滑处理时, 当激光束功率、束斑尺寸一定的情况下, 不同的扫描速度对平滑后熔石英元件表面粗糙度的影响规律。**方法** 用仿真结合实验的方式进行了研究。使用有限元仿真模型对激光功率为 25 W, 作用斑点为短轴 2 mm、长轴 3 mm 的椭圆斑的激光加工模型进行了仿真, 得到了不同扫描速度下激光束作用于熔石英表面的温度场及对应的稳定温度。通过定点照射实验验证了温度仿真结果的准确性, 并进行了扫描速度为 0.04、0.1、0.2、0.35、0.5 mm/s 的单因素实验, 使用原子力显微镜检测平滑实验前后的熔石英表面粗糙度, 得到了粗糙度与激光扫描速度之间的关系。**结果** 激光功率为 25 W 时, 5 种扫描速度对应的稳定温度都分布在熔石英材料的熔点以上。5 种扫描速度下平滑后的熔石英表面粗糙度都明显降低, 在扫描速度为 0.1 mm/s 的情况下, 取得了将熔石英表面粗糙度由初始的 62.55 nm 降低至 6.17 nm 的平滑效果。**结论** 激光平滑过程中, 当激光功率、激光斑尺寸一定时, 存在一个最佳的扫描速度, 可以使加工表面的粗糙度降低至光学表面的要求。

**关键词:** 激光平滑; 熔石英; 有限元分析; 扫描速度; 温度场; 表面粗糙度

**中图分类号:** V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0316-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.042

## Influence Law of Scanning Velocity on Roughness in Laser Smoothing of Fused Silica Surface

LIU Peng-peng<sup>1,2</sup>, LIU Wei-guo<sup>1</sup>, LI Ya-guo<sup>2</sup>, ZHOU Shun<sup>1</sup>

(1.Department of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2.Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the technology of smoothening the fused silica optical elements and explore the influence of different scanning velocities on the surface roughness of smoothed fused silica optical elements when CW CO<sub>2</sub> laser is used

收稿日期: 2019-02-28; 修订日期: 2019-04-27

Received: 2019-02-28; Revised: 2019-04-27

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51505444); 中国工程物理研究院超精密加工重点实验室基金 (ZZ15004); 中国工程物理研究院激光聚变研究中心青年人才基金 (LFRC-PD012); 国防科技卓越青年基金 (2017-JCJQ-ZQ-024)

**Fund:** The National Natural Science Foundation of China (51505444), Foundation of Key Laboratory for Ultra-Precision Manufacturing Technology of CAEP (ZZ15004), Foundation for Youth Talents of LFRC, CAEP (LFRC-PD012) and Outstanding Youth Talents Project (2017-JCJQ-ZQ-024)

**作者简介:** 刘朋朋 (1991—), 男, 硕士生, 研究方向为激光表面处理。

**Biography:** LIU Peng-peng (1991—), Male, Master, Research focus: laser surface processing.

**通讯作者:** 刘卫国 (1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为光电技术、电子材料。邮箱: wgliu@163.com

**Corresponding author:** LIU Wei-guo (1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: photoelectric technology, electronic materials. E-mail: wgliu@163.com

to smoothen the fused silica optical elements under the fixed laser power and beam size. The study was carried out by simulation and experiment. A finite element model was used to simulate the laser processing model with a laser power of 25 W and an elliptical spot with a minor axis of 2 mm and a major axis of 3 mm. The temperature field and corresponding stable temperature of laser beam acting on the surface of fused silica under different scanning speeds were obtained. The accuracy of temperature simulation model was verified by fixed-point irradiation experiment, and single factor experiments with scanning speeds of 0.04 mm/s, 0.1 mm/s, 0.2 mm/s, 0.35 mm/s and 0.5 mm/s were carried out. Atomic force microscope was used to detect the surface roughness of fused silica before and after the smoothing experiment, and the relationship between roughness and laser scanning speed was obtained. When the laser power was 25 W, the stable temperature corresponding to the five scanning speeds was all distributed above the melting point. The surface roughness of the fused silica after smoothing at five scanning speed was significantly reduced, and the smoothing effect of reducing the initial surface roughness of the fused silica from 62.55 nm to 6.17 nm was obtained at a scanning speed of 0.1 mm/s. When the laser power and laser spot size are constant, there is an optimum scanning speed to reduce the roughness of the machined surface to the optical surface.

**KEY WORDS:** laser smoothing; fused silica; finite element analysis; scanning velocity; temperature field; surface roughness

目前, 先进的功能性光电器件 (如激光陀螺仪<sup>[1]</sup>)、激光聚变系统等迫切需要超光滑光学表面的光学元件, 光学表面的制备工序包括研磨、抛光及其他光学处理过程, 其中最重要的是超精密抛光技术<sup>[2]</sup>。传统的超光滑抛光技术, 如浮法抛光、等离子体抛光<sup>[3]</sup>等, 极大地提高了超光滑表面的精度。但是, 传统精抛工艺加工的表面仍存在划痕、微缺陷, 且加工效率低、难度大。激光加工作为一种非接触式加工方式, 已经在金属、陶瓷等材料的表面处理<sup>[4-6]</sup>和表面裂纹控制<sup>[7]</sup>上有了广泛应用, 将激光作为抛光手段的研究也有了一定的发展<sup>[8]</sup>。激光抛光作为一种潜在的光学元件平滑手段, 逐渐引起了国内外的关注。熔石英对于波长 5 μm 以上的红外光具有较高的吸收系数 ( ~10<sup>3</sup> cm<sup>-1</sup> ), 使红外光在熔石英中的穿透深度小于 10 μm。同时, 熔石英具有较低的热膨胀系数 ( ~5.5×10<sup>-7</sup> K<sup>-1</sup> )<sup>[9]</sup>, 这些特性使得利用二氧化碳激光器进行熔石英表面处理成为了一种理想的加工方式。早在 1980 年, Paul A. Temple 等人<sup>[10-11]</sup>用二氧化碳激光器处理熔石英表面, 提升了熔石英的激光损伤阈值。德国学者 Jörg Hildebrand 等人<sup>[9]</sup>报道了二氧化碳激光抛光熔石英过程中, 激光束进给速度对熔石英温度和残余应力的影响, 结果表明在不去除材料的情况下显著降低熔石英表面粗糙度是可行的。韩国学者 Seungman Jung 等人<sup>[12]</sup>用激光对 200 μm 宽的石英基微通道表面进行了扫描, 取得了将粗糙度由 172.8 nm 抛光至 67.5 nm 的抛光效果。这些研究工作将激光器功率、激光束半径、激光束与物质的相互作用时间总结为影响激光平滑效果的工艺参数, 但是没有对扫描速度与相互作用时间的关系以及扫描速度对熔石英表面平滑效果的影响进行详细分析。

本文通过有限元仿真模型计算了 25 W 激光功率下, 不同扫描速度的激光束扫描后的熔石英表面温度分布情况, 得出了激光束扫描速度变化对熔石英表面温度场的影响规律, 以及各扫描速度下的稳定温度区

间。而后, 通过实验验证了温度模型的准确性, 并使用不同的扫描速度进行了扫描平滑实验。

1 扫描速度与相互作用时间的关系

根据文献总结, 激光功率、光束半径、相互作用时间是三个影响激光加工效果的工艺参数, 本文研究了扫描速度对于激光平滑效果的影响。扫描速度与相互作用时间的关系为<sup>[13]</sup>:

$$t_{\text{int}} = \frac{d_{\text{beam}}}{v_{\text{scanning}}}$$

(1)

式中:  $d_{\text{beam}}$  表示激光束沿扫描方向的光斑宽度,  $v_{\text{scanning}}$  表示激光斑的扫描速度。两者作用示意图如图 1 所示。各扫描速度下的相互作用时间如表 1 所示。

表 1 激光扫描速度与相互作用时间的关系

Tab.1 Relation between laser scanning velocity and interaction time

Scanning velocity / (mm·s <sup>-1</sup> )	0.04	0.1	0.2	0.35	0.5
Interaction time/s	50	20	10	5.7	4

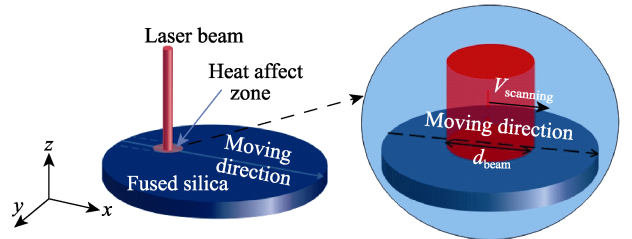


图 1 激光束作用示意图  
Fig.1 Schematic diagram of laser beam action

2 数值仿真

2.1 热传导模型

利用有限元分析软件建立熔石英温度场的数值

仿真模型,通过计算结果可以得到激光作用过程中熔石英样片的温度随光束扫描速度改变的变化规律。通过分析温度仿真结果可以得到对应各扫描速度下的稳定温度区间,为实验参数设定提供指导。熔石英模型尺寸为  $\phi 50\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。

## 2.2 温度场仿真模型的边界条件设置

激光与熔石英相互作用的过程,包括能量吸收、热传导、热对流、热辐射等。对仿真模型进行假设:

(1) 材料各属性是各向同性且均匀的;(2) 样片表面洁净,无其他杂质。模型热传导方程为<sup>[14]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + Q(x, y, z, t) \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为熔石英密度,  $c$  为热容,  $k$  为热传导

系数,  $Q(x, y, z, t)$  为热源。  $\rho = 2210\text{ kg/m}^3$ ,  $c$ 、 $k$  值随温度变化,其值见表 2—3<sup>[9]</sup>。初始条件为  $t=0$ 、 $\theta(t)=\theta_0$ , 其中,  $\theta_0$  为熔石英初始温度,取环境温度  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。激光束照射处的表面(样片上表面)有:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} + h(T_h - T_0) + B\varepsilon(T_h^4 - T_0^4) = \alpha I(x, y, z, t) \quad (3)$$

在样片其他表面有:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_h - T_n) \quad (4)$$

式中:  $h$  为材料与空气的换热系数,  $\varepsilon$  为表面热辐射系数,  $\theta_h$  为光束照射点内的表面温度,  $\alpha$  为熔石英对激光的吸收系数,  $I(x, y, z, t)$  表示光能密度,  $\theta_n$  为表面激光束外其他位置的表面温度,  $B$  为玻尔兹曼常数,参数取值见表 4<sup>[14]</sup>。

表 2 熔石英热容插值表

Tab.2 Interpolation of fused silica heat capacity

$\theta/^\circ\text{C}$	20	100	300	500	700	1000	1200	1300	1500	1700	2000	2500	3000
$c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	730	800	1000	1100	1200	1250	1300	1400	1480	1500	1520	1600	1700

表 3 熔石英热传导系数插值表

Tab.3 Interpolation of fused silica heat conduction coefficient

$\theta/^\circ\text{C}$	20	500	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2500	3000
$k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.4	2	2.1	2.2	2.5	3	4.9	5	6	8	13.5	21

表 4 参数取值

Tab.4 Parameter value

$h/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$\varepsilon$	$\alpha$	$B/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$
10	0.9	0.91	$1.380\ 650\ 5 \times 10^{-23}$

激光功率密度表示为:

$$I(x, y, z, t) = \frac{P_{\text{laser}}}{\pi r^2} \exp \left( -\frac{(x - v \times t)^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right) \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{laser}}$  为激光功率,  $a$ 、 $b$  为椭圆激光斑的短半轴、长半轴长度,  $v$  为扫描速度。

将激光功率设置为  $25\text{ W}$ , 激光束短半轴为  $1\text{ mm}$ , 长半轴为  $1.5\text{ mm}$ , 扫描速度分别设置为  $0.04$ 、 $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.35$ 、 $0.5\text{ mm/s}$ , 计算熔石英温度分布。在激光扫描轨迹上每间隔  $10\text{ mm}$  选取一个采样点(图 2a 中 1#—6#), 当激光束移到采样点处时, 选取温度数据进行处理, 可以得到图 2b—f 所示温度结果。

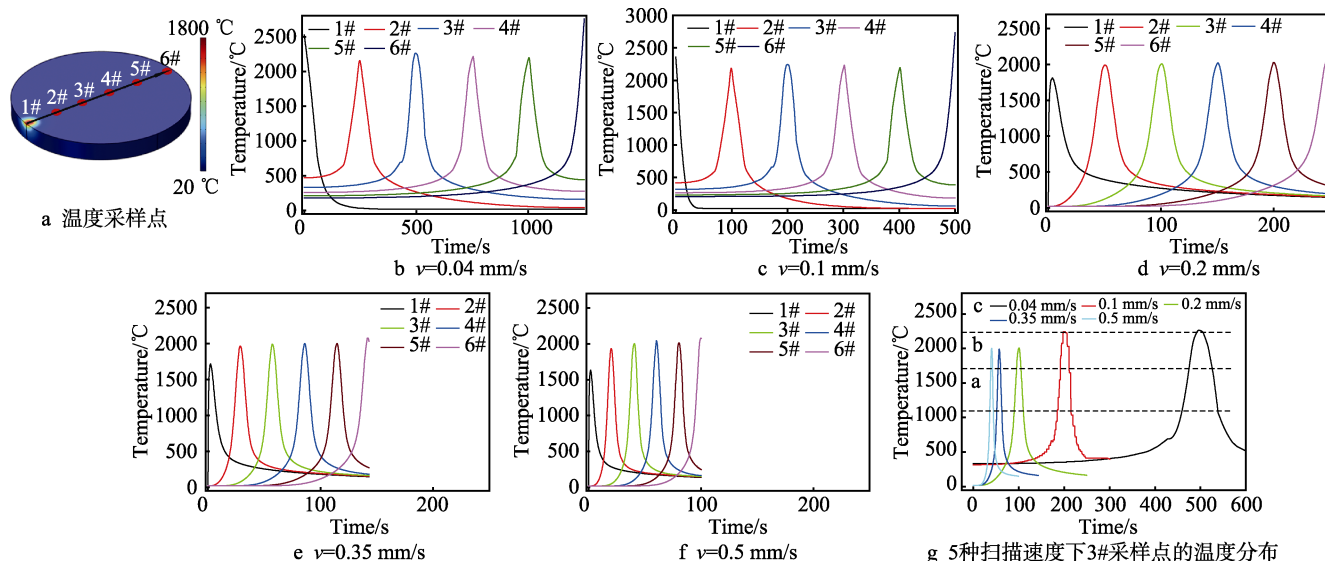


图 2 各扫描速度对应的温度场

Fig.2 Temperature field corresponding to each scanning velocity: (a) temperature sampling point, (g) temperature distribution of 3# sampling points at 5 different scanning velocities

## 2.3 仿真结果分析

从不同扫描速度对应的温度分布曲线发现, 0.2、0.35、0.5 mm/s 扫描速度下, 扫描过程中的稳定温度基本相同, 趋于稳定值~2000 °C; 0.1 mm/s 扫描速度下, 扫描过程中的温度趋于稳定值~2200 °C; 0.04 mm/s 扫描速度下, 温度趋于稳定值~2250 °C。根据熔石英的软化温度 (~1200 °C)、熔点温度 (~1700 °C)、气化温度 (~2230 °C), 将温度分布曲线划分为 3 个区域, 即: 处于软化温度以上、熔点温度以下的区域 (a); 熔点温度以上、气化温度以下的区域 (b); 处于气化温度以上的区域 (c)。结果发现, 0.1、0.2、0.35、0.5 mm/s 扫描速度下的稳定温度都处于 b 区域, 激光扫描轨迹上的熔石英充分熔融; 扫描速度为 0.04 mm/s 时, 稳定温度位于 b、c 区域之间, 熔石英充分熔融且伴随气化现象发生。相同的激光功率及光斑尺寸情况下, 扫描速度越慢, 激光作用位置处的温度处于熔融温度以上的时间越长, 越有利于液化熔石英充分流动。

## 3 实验及结果分析

### 3.1 实验设置及温度验证

为了研究激光扫描速度对熔石英表面平滑效果的影响, 进行一组激光功率为 25 W, 扫描速度为 0.04、0.1、0.2、0.35、0.5 mm/s 的熔石英元件平滑实验。实验使用 CW (连续) CO<sub>2</sub> 激光器 (10.6 μm)、x-y 两轴载物平台、金刚石砂轮研磨得到的 φ50 mm×5 mm 熔石英样片。图 3 为实验装置示意图, 用 FLIR 相机对 25 W 激光功率下的定点照射过程进行温度测量, 实测温度与仿真结果的对照如图 4 所示。

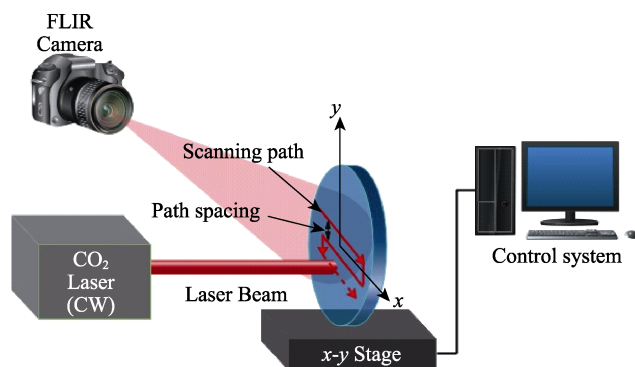


图 3 激光平滑熔石英装置示意图  
Fig.3 Schematic diagram of laser smoothing device for fused silica

由光束质量检测仪的测量结果得到出射激光束是一个短轴 2 mm、长轴 3 mm 的椭圆斑。相邻扫描路径的间距决定了激光能量的堆叠方式, 在使用激光

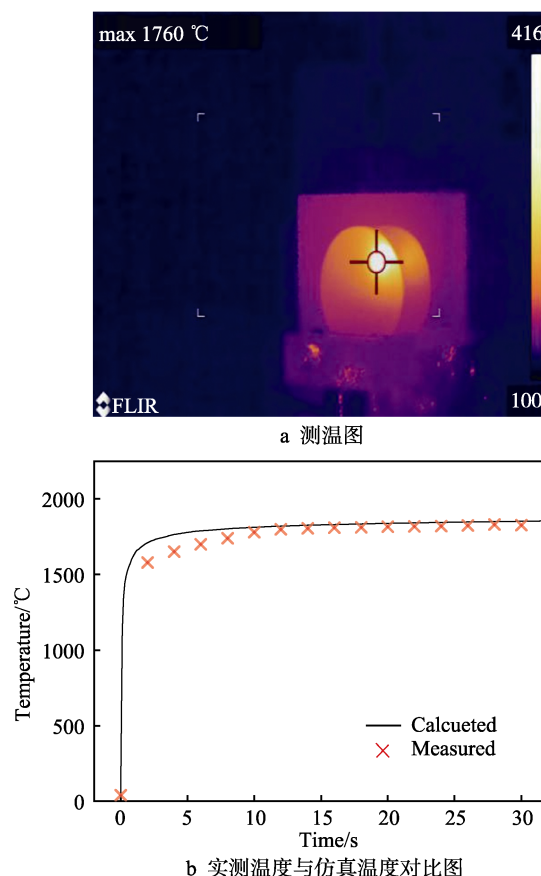


图 4 测温结果与仿真结果对照

Fig.4 Temperature measurement results and simulation results: (a) temperature map, (b) measured temperature and simulated temperature comparison chart

扫描的过程中, 期望熔石英表面受到均匀的激光照射。将激光振幅减小为最大值  $1/e$  时的光束半径定义为束腰半径, 束腰处的重叠量与束腰总宽的比值作为相邻路径间的重叠率 (式 6)。S. Gloor 等人<sup>[15]</sup>的结论认为激光扫描时, 扫描行间距越小, 激光平滑后的表面质量越好。计算得到不同激光扫描路径重叠率下的激光能量叠加结果, 如图 5 所示<sup>[16]</sup>, 可知沉积入玻璃表面的能量与入射激光能量成正比。

图 5 中虚线表示高斯光束叠加后的能量分布, 根据高斯光束叠加结果可以得出, 光束重叠率在 60% 以下时, 扫描间距越小 (光束重叠率越高), 辐照于熔石英表面的激光能量越均匀; 而重叠率为 80% 时, 叠加激光能量的均匀性变差。图 6 为扫描路径和光束重叠量示意图。按照此种扫描方式, 使用 0.04、0.1、0.2、0.35、0.5 mm/s 的速度, 对熔石英元件表面 10 mm×10 mm 区域进行扫描。

$$O = \frac{l}{L} \quad (6)$$

式中:  $O$  为重叠率;  $l$  为重叠量;  $L$  为激光束沿椭圆斑长轴方向的束腰半径。



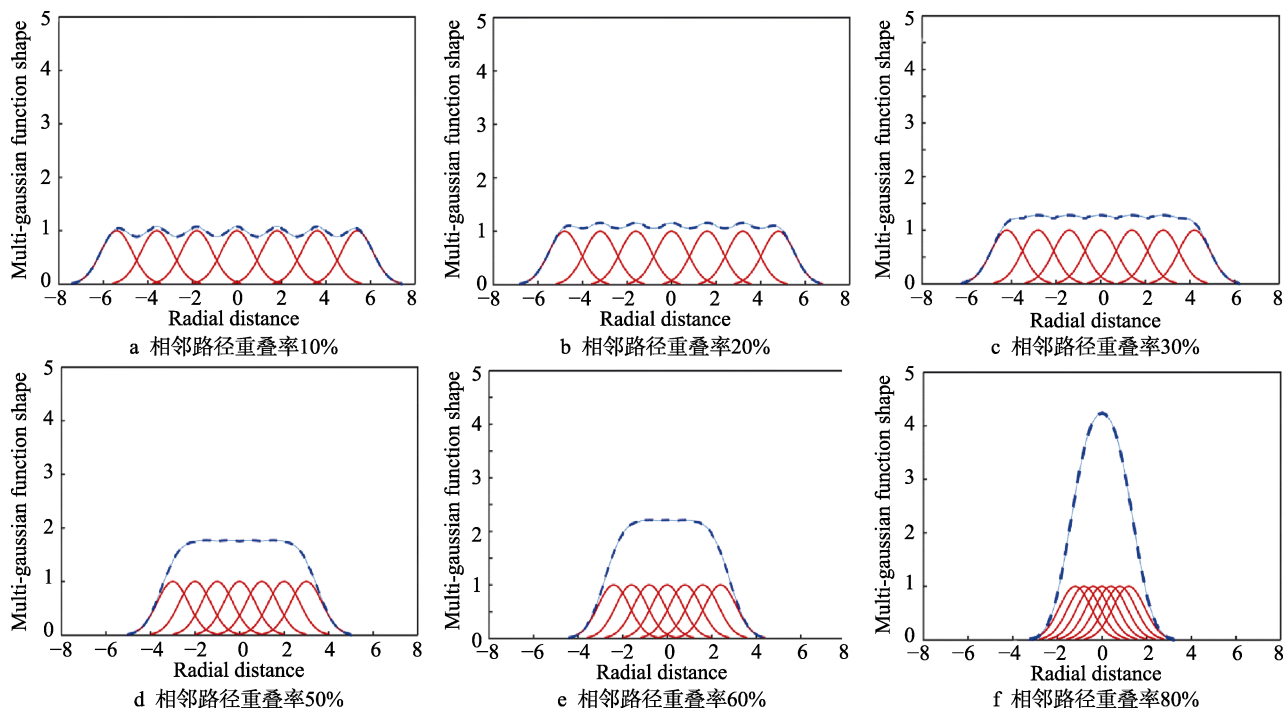


图5 高斯光束叠加计算结果

Fig.5 Gaussian beam superposition result: Overlap rate of 10% (a), 20% (b), 30% (c), 50% (d), 60% (e), 80% (f) for adjacent path

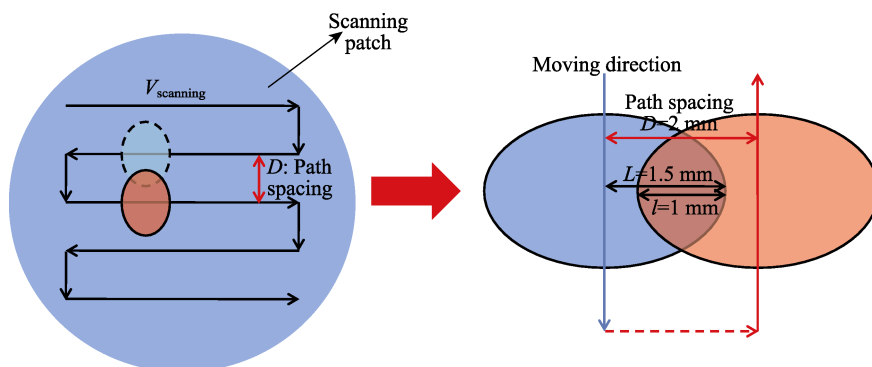


图6 扫描路径和光束重叠量示意图

Fig.6 Schematic diagram of scanning path and laser beam overlap

### 3.2 实验结果分析

激光平滑前后熔石英元件的光学显微镜及轮廓仪检测结果如图7所示。图7a、c、e、g、i、k为显微镜检测结果,可以看出,激光平滑处理使熔石英表面由初始研磨表面变成光学表面。当扫描速度为0.5 mm/s时,激光束与熔石英表面相互作用的时间短(4 s),熔石英表面不能完全平滑;扫描速度为0.35 mm/s时,激光束与熔石英表面相互作用的时间变长(5.7 s),熔石英表面熔融更加充分,表面除较高(低)的峰谷位置外,其他部位均变平滑;扫描速度为0.2 mm/s时,激光束与熔石英表面相互作用的时间进一步变长(10 s),熔石英表面激光束作用的位置完全熔融,特征峰谷基本消除,表面变为光学表面;扫描速度为0.1 mm/s时,激光束与熔石英表面相互作用的时间约为20 s,熔石英表面的物质流动更充

分,表面变平滑;扫描速度为0.04 mm/s时,激光束与熔石英表面相互作用的时间约50 s,表面温度过高会产生气化现象,导致粗糙度变大。图7b、d、f、h、j、l是对应于光学显微镜检测结果的轮廓仪检测结果,由测出的粗糙度可以得到图8所示的速度-粗糙度关系图。

由图8可知,扫描速度为0.04 mm/s时,熔石英表面粗糙度由初始62.55 nm降低至9.46 nm;扫描速度为0.1 mm/s时,粗糙度降低至6.17 nm;扫描速度为0.2 mm/s时,粗糙度降低至6.24 nm;扫描速度为0.35 mm/s时,粗糙度降低至17.97 nm;扫描速度为0.5 mm/s时,粗糙度降低至27.43 nm。其中,扫描速度为0.1 mm/s时得到最佳平滑效果。扫描速度为0.04 mm/s时,由于相互作用的时间过长,导致部分位置的温度升高到气化点以上,从而发生气化现象,导致粗糙度升高。

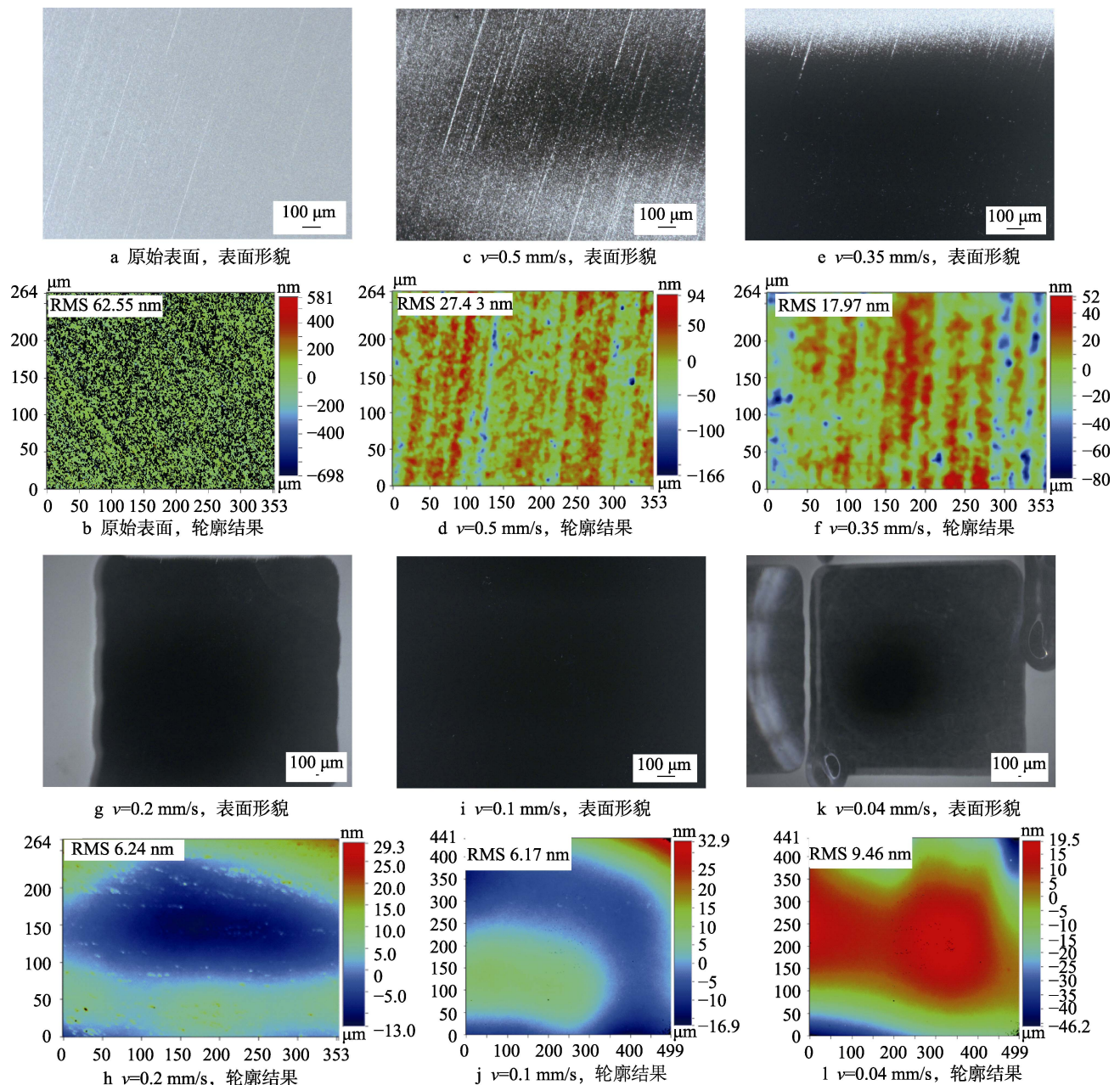


图 7 光学显微镜和轮廓仪的检测结果  
Fig.7 Test results of optical microscope and contour-graph

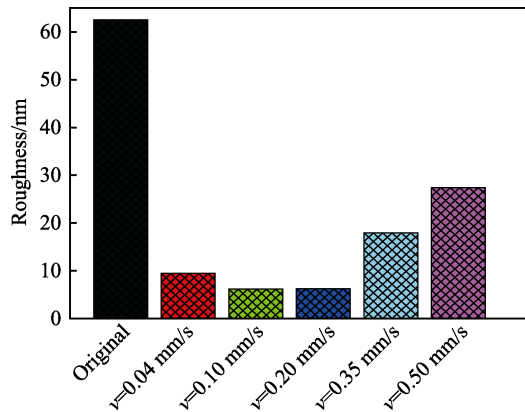


图 8 不同速度扫描后的表面粗糙度  
Fig.8 Surface roughness after scanning at different velocities

## 4 结论

- 1) 激光束采用 0.2、0.35、0.5 mm/s 速度扫描熔石英元件时, 扫描轨迹上的最高温度趋于 $\sim 2000^{\circ}\text{C}$ , 处于熔融区域; 采用 0.1、0.04 mm/s 速度扫描熔石英元件时, 扫描轨迹上的最高温度分别趋于  $2200^{\circ}\text{C}$ 、 $2270^{\circ}\text{C}$ 。
- 2) 扫描速度为 0.5 mm/s 时, 粗糙度由初始的 62.55 nm 降低至 27.43 nm, 熔石英表面仍有未完全平滑的峰谷存在; 扫描速度为 0.35 mm/s 时, 粗糙度降低至 17.97 nm; 扫描速度为 0.2 mm/s 时, 粗糙度降低至 6.24 nm; 扫描速度为 0.1 mm/s 时, 表面粗糙度

降低至 6.17 nm, 得到了最佳平滑效果; 扫描速度为 0.04 mm/s 时, 表面粗糙度降低到 9.46 nm。通过以上激光平滑实验可以明显降低熔石英表面粗糙度, 最佳平滑效果为从初始的 62.55 nm 降低到 6.17 nm, 证明了激光平滑可以显著降低熔石英光学元件的表面粗糙度。

#### 参考文献:

- [1] SANTAGATA R, BEGHI A, BELFI J, et al. Optimization of the geometrical stability in square ring laser gyroscopes [J]. *Classical & quantum gravity*, 2014, 32(5): 055013.
- [2] KUZNETSOV A G, MOLCHANOV A V, CHIRKIN M V, et al. Precise laser gyroscope for autonomous inertial navigation[J]. *Quantum electronics*, 2015, 45(1): 78-88.
- [3] ZHANG Ju-fan, WANG Bo, DONG Shen. Application of atmospheric pressure plasma polishing method in machining of silicon ultra-smooth surfaces[J]. *Optics & precision engineering*, 2007, 3(4): 480-487.
- [4] LAMIKZ A, SÁNCHEZ J A, LÓPEZ De Lacalle, et al. Surface roughness improvement using laser-polishing techniques[J]. *Materials science forum*, 2006, 526(12): 217-222.
- [5] RAMOS-GREZ J A, BOURELL D L. Reducing surface roughness of metallic freeform-fabricated parts using non-tactile finishing methods[J]. *International journal of materials & product technology*, 2003, 21(4): 297-316.
- [6] BEREZNAI M, PELSOCZI I, TOTH Z, et al. Surface modifications induced by ns and sub-ps excimer laser pulses on titanium implant material[J]. *Biomaterials*, 2003, 24(23): 4197-4203.
- [7] 任爱国, 王晓静, 丁静. 激光熔覆止裂技术研究[J]. *表面技术*, 2006, 35(2): 69-71.  
REN Ai-guo, WANG Xiao-jing, DING Jing. Research of laser-melt-repairing technology[J]. *Surface technology*, 2006, 35(2): 69-71.
- [8] 陈林, 杨永强. 激光抛光机理及应用[J]. *表面技术*, 2003, 32(5): 49-52.
- CHEN Lin, YANG Yong-qiang. Mechanism and application of laser polishing[J]. *Surface technology*, 2003, 32(5): 49-52.
- [9] HILDEBRAND J, HECHTK H, BLIEDTNER J, et al. Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces[J]. *Physics procedia*, 2012, 39(9): 277-285.
- [10] TEMPLE P A, LOWDERMIK W H, MILAM D. Carbon dioxide laser polishing of fused silica surfaces for increased laser-damage resistance at 1064 nm[J]. *Applied optics*, 1982, 21(21): 3249-3255.
- [11] KERR N C, EMMONY D C. The effect of laser annealing on laser-induced damage threshold[J]. *Optica acta international journal of optics*, 1990, 37(4): 787-802.
- [12] HILDEBRAND J, HECHT K, BLIEDTNER J. Laser beam polishing of quartz glass surfaces[J]. *Physics procedia*, 2011, 12(1): 452-461.
- [13] JUNG S, LEE P A, KIM B H. Surface polishing of quartz-based microfluidic channels using CO<sub>2</sub> laser. [J]. *Microfluidics and nano-fluidics*, 2016, 20(6): 84.
- [14] RICHMANN A, WILLENBORG E, WISSENBAACH K. Laser polishing of fused silica[C]//*Digital holography and three-dimensional imaging*. Hawaii: Optical Society of America, 2010.
- [15] 焦俊科, 王新兵, 王小华. 钠钙玻璃在 CO<sub>2</sub> 激光作用下的热应力分析[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(s1): 124-126.  
JIAO Jun-ke, WANG Xin-bing, WANG Xiao-hua. Analysis of thermal stress in soda-lime glass heated by CO<sub>2</sub>-laser[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (nature science)*, 2007, 35(s1): 124-126.
- [16] GLOOR S, LUTHY W, WEBER H P. UV laser polishing of thick diamond films for IR windows[J]. *Applied surface science*, 1999, 138-139(1): 135-139.
- [17] 韩小花, 邓磊敏, 吴宝业, 等. 皮秒激光抛光 KDP 晶体的工艺研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(2): 166-171.  
HAN Xiao-hua, DENG Lei-min, WU Bao-ye, et al. Process study on KDP crystal polished by picosecond laser [J]. *Laser technology*, 2018, 42(2): 166-171.