

CO₂激光光栅式扫描修复熔石英表面缺陷的实验研究与数值模拟*

蒋勇^{1)†} 贺少勃²⁾ 袁晓东²⁾ 王海军²⁾ 廖威²⁾ 吕海兵²⁾ 刘春明³⁾
向霞³⁾ 邱荣¹⁾ 杨永佳¹⁾ 郑万国²⁾ 祖小涛³⁾

1)(西南科技大学-中国工程物理研究院激光聚变研究中心极端条件物质特性联合实验室, 绵阳 621010)

2)(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

3)(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2013年10月19日收到; 2013年11月25日收到修改稿)

基于熔石英材料对波长为10.6 μm的CO₂激光具有强吸收作用这一特点, 提出采用CO₂激光光栅式多次扫描修复熔石英光学元件表面密集分布的划痕和抛光点等缺陷的方法. 实验结果表明, 在合理的扫描参数下, 元件表面的划痕和抛光点等缺陷可被充分地消除. 损伤阈值测试结果表明, 表面划痕和抛光点等缺陷被完全消除的元件的损伤阈值可恢复到或超过基底的损伤阈值. 同时结合有限元软件Ansys的模拟结果分析了CO₂激光扫描修复及消除元件表面划痕和抛光点等缺陷的过程. 本文为消除元件表面划痕和抛光点等缺陷提供了非常有意义的参考.

关键词: 熔石英, CO₂激光, 光栅扫描, 数值模拟

PACS: 81.40.Wx, 42.70.Ce, 78.20.Bh, 61.80.Ba

DOI: 10.7498/aps.63.068105

1 引言

熔石英是高功率固体激光装置中的重要光学元件之一. 然而因元件表面/亚表面的各类抛光缺陷, 包括各类划痕(横向划痕、径向划痕、赫兹锥形划痕和“拖尾”划痕)和抛光点等极易在激光辐照下导致损伤及损伤增长, 严重影响了元件的使用寿命^[1,2]. 如何提升其抗激光损伤能力, 延长其使用寿命是目前的一个研究热点. 迄今为止, 国内外科工作者提出了诸如化学刻蚀^[3,4]、等离子体刻蚀^[5]、微火焰抛光(micro-flametorch)^[5]和CO₂激光处理^[6-8]等方式来抑制损伤增长. 其中局域CO₂激光单点修复被认为是最具有前景的一种抑制损伤增长的方法^[7,9,10]. 但是对于如何消除熔石英元件表面较密集的划痕和抛光点却鲜有研究.

CO₂激光除对元件表面单个损伤点进行局域处理, 提升熔石英元件的抗激光损伤能力之外, 还用来对元件进行表面抛光处理^[11,12]. Temple等^[13]最早进行此方面的研究, 他们采用CO₂激光单道(single-pass)和多道(multi-pass)辐照熔石英元件表面, 经小光斑($\phi = 33 \mu\text{m}$)和大光斑($\phi = 1 \text{mm}$)激光损伤考核表明, 经CO₂激光处理后的元件的损伤阈值可以达到元件的体损伤阈值的水平. Brusasco等^[11]研究采用波长为10.6 μm的CO₂激光扫描元件以减少元件初始损伤的数量, 实验表明, 经CO₂激光扫描的抛光质量非常好和非常差的元件之后, 其损伤阈值都可以达到相同的水平. Mendez等^[14]采用CO₂激光扫描处理熔石英元件表面的微小损伤点, 实验表明大多数损伤点都可以被熔融, 然而并不是所有的微损伤都被消除.

* 西南科技大学博士基金(批准号: 13zx7120)和国家自然科学基金-中国工程物理研究院联合基金(批准号: 10976025, 11076008)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: y_jiang@swust.edu.cn

基于上述提及的采用CO₂激光抛光熔石英元件表面可提升其抗激光损伤能力的机制,局域或全口径扫描元件表面可能是消除元件表面上各类划痕和抛光点的一种非常有用的方法.基于这样的考虑,本文研究采用CO₂激光光栅式扫描法处理消除元件表面的各类划痕和抛光点等缺陷.在得到实验结果的基础上,采用有限元方法数值模拟分析光栅式扫描方式消除缺陷的过程及扫描修复参数的合理性和相应的温度分布规律,以便充分验证实验的可行性.最后通过损伤阈值方式来考核扫描效果.

2 实验过程和方法

熔石英样品为Corning7980远紫外光学玻璃,尺寸为60 mm × 40 mm × 5 mm.样品采用一定浓度的HF溶液进行刻蚀处理,以充分消除样品表面的抛光重沉积层和暴露表面缺陷.为更好地进行实验分析,实验中选用表面缺陷较多的样品.同时将样品分为三个区域,分别标注为区域A, B和C,其中区域A和B为CO₂激光辐照区域,区域C为对比区,不进行任何处理.

利用波长为10.6 μm,峰值功率为100 W的CO₂激光对样品进行如图1所示的扫描处理.其中激光器的出口光斑尺寸为3.8 mm ± 0.2 mm,光斑为空间高斯分布,光束发散角为3 mrad.根据发散角原理,采用刀口法确定所需用的光斑尺寸.因扫描结果取决于CO₂激光的功率、光斑尺寸、重叠率、扫描模式和扫描速度等参数,考虑到影响温度值的参数较多,故首先考虑扫描速度变化这一情况.同时,因实验中采用的是空间高斯分布的CO₂激光光斑,这必然在光斑的峰值位置处有一极值温度,即光斑中心辐照的材料表面区域的温度可能已经达到熔融温度,而光斑边缘处的温度值却仍然较低.实验结果表明,当扫描时两个扫描路径间光斑的重叠率达到85%时,可很好地避免扫描过程中温度不均的情况.同时为进一步提升扫描效率,光斑的尺寸越大,扫描的效率更高.结合实验中所采用的激光器的峰值功率为100 W,实验中CO₂激光光斑直径为7 mm.研究表明,对扫描对象的预热过程可有效地降低残余应力值^[15].因此扫描时首先采用较小的功率(20 W)辐照熔石英元件,然后每次以20 W的功率逐渐增加至80 W,并在此功率下多次作用元件表面,直至在线观察到元件表面的缺陷被消除.同时为避免扫描过程中热传

导作用对邻近局域的影响,实验中在扫描完一个局域后,使样品在空气环境中冷却至常温后,再对另一个区域进行扫描辐照处理.

为测试修复效果,实验中采用波长为355 nm,脉宽为6.3 ns的Nd:YAG激光器测试基底、缺陷和修复处理的缺陷的损伤阈值.采用Spiricon光斑分析仪测得辐照至元件后表面的光斑面积为0.23 mm² (1/e²),形貌为空间高斯分布.损伤阈值测试方式为R/1.实验前采用原子力显微镜测量各类划痕的特征,同时采用暗场成像和光学显微镜原位观察元件处理前后表面缺陷的变化规律.

3 实验结果

图2为一具有代表性的样品在经HF溶液刻蚀后的暗场图.可以看出,样品表面存在大量独立或相互交错的各种尺寸的划痕和抛光点,划痕长度已经达到厘米级.图3为图2中方框处各类典型划痕的光学显微图,图3(a)—(c)分别为径向划痕、赫兹锥形划痕和横向划痕.原子力显微镜测量得到各类划痕的深度和宽度表明,横向划痕的深度和宽度值最大,其横向尺寸已经超过15 μm,但深度没有超过2 μm.

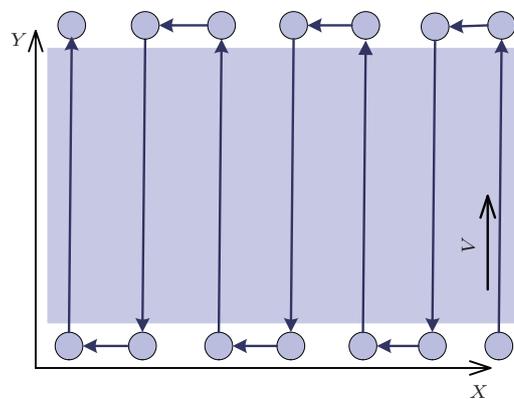


图1 扫描模式示意图

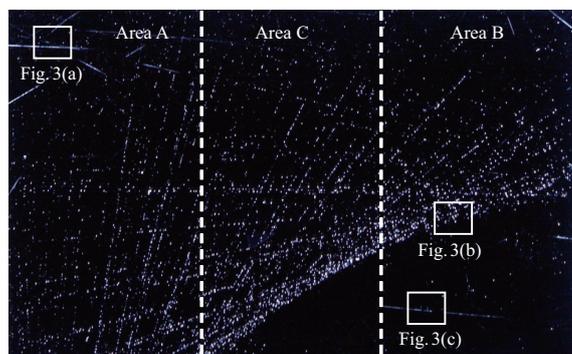


图2 刻蚀样品的暗场图

经 CO₂ 激光处理后样品的暗场如图 4 所示. 图中左边部分 (区域 A) 和右边部分 (区域 B) 的扫描速度分别为 18 cm/min 和 24 cm/min. 每个区域的总扫描次数为七次, 其中以 80 W 的功率扫描四次. 从图中可以清楚地看出, 区域 A 中无明显的亮点, 这表明该区域中所有的划痕和抛光点都已经被消除. 相比之下, 区域 B 中仍可以看到一些明显的亮点, 这说明部分划痕和抛光点并未被完全去除. 图 4 中矩形方框的光学显微图分别如图 5 (a) 和 (b) 所示, 这是对图 2 (b) 和 (c) 中划痕处理后的原位拍摄图像. 可以清楚看到, 大量小尺寸的赫兹锥形划痕已经被完全消除. 但是, 部分尺寸稍大的且深度较深的划痕未被完全消除. 从图中可以看出, 这些未被修复完的划痕仅仅是表面处的划痕被熔融, 并将划痕包裹.

复, 暗场中的亮点都是由未完全修复的赫兹锥形划痕所引起的. 导致这样的现象可以归因于赫兹划痕形貌特点, 其裂纹总是与表面形成一定的角度, 这个角度的范围通常为 21.5° 到 45°^[16,17]. 由于角度的原因, 导致 CO₂ 激光辐照过程中未能很好地将激光能量沉积到裂纹底部.

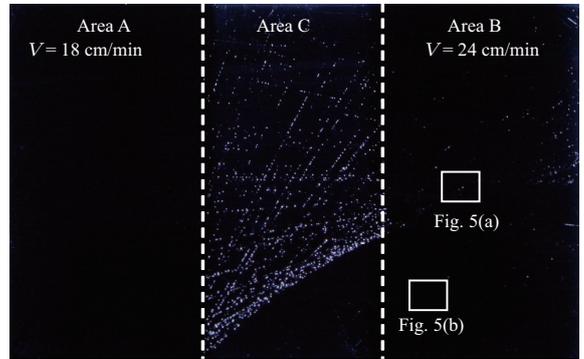


图 4 经 CO₂ 激光扫描处理后样品的暗场图

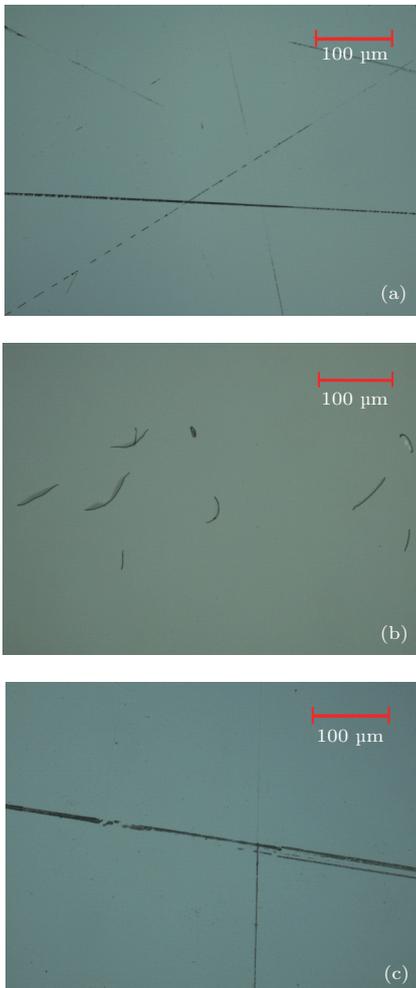


图 3 图 2 方框中相应缺陷的光学显微图 (a) 径向划痕; (b) 赫兹锥形划痕; (c) 横向划痕

再次观察图 4 中的赫兹锥形划痕和横向划痕可观察到一个有趣的现象. 横向划痕已完全被修

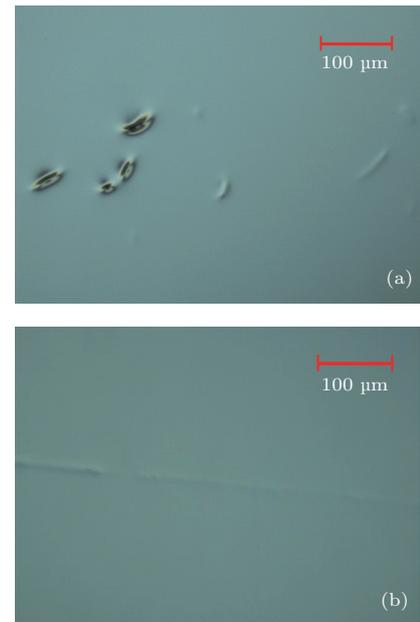


图 5 图 4 方框中相应修复后缺陷的光学显微图 (a) 赫兹锥形划痕; (b) 横向划痕

4 修复过程的理论分析

为进一步了解 CO₂ 激光扫描修复元件表面划痕和抛光的原理及规律, 采用有限元软件 Ansys, 基于有限元理论模拟 CO₂ 激光辐照元件表面时的温度分布规律. 同时为更好地分析实验结果, 研究中建立三维热传导模型进行模拟计算.

4.1 热传导方程

CO₂ 激光扫描熔石英光学元件属于移动热源问题的三维热传导过程. 为数值求解这个问题, 假设 CO₂ 激光速度 V 沿元件的 y 方向运动, 如图 1 所示. 热能主要通过传导过程进行传递, 热传导方程可以表示为^[18,19]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right]$$

$$Q = \begin{cases} \alpha \frac{(1-R)P}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{2(x^2 + (y-Vt)^2)}{r_0^2}\right) & (0 \leq r \leq r_0, t \geq 0) \\ 0 & (r_0 < r \leq l_a, t \geq 0) \end{cases}, \quad (2)$$

其中 r_0 为 $1/e^2$ 光斑半径, P 为激光功率, R 为表面反射率, 对于熔石英而言, R 约为 0.85; α 为吸收系数.

4.2 模型及网格划分

整个模型的尺寸为 40 mm × 20 mm × 5 mm, 即实验样品尺寸的三分之一. 为提高模拟精度, 采用具有 20 节点的 solid90 单元, 同时采用 surf152 为作用表面对流的加载对象. 因熔石英材料对 CO₂ 激光能量的吸收深度较小, 为保证辐照区域的模拟精度, 对模型采用非均匀网格划分方式. 即 CO₂ 激光辐照区域的网格尺寸较非辐照区域的网格尺寸更小. 如图 6 所示. 第一次网格划分时的单元尺寸都相同, 然后对激光辐照区域再进行进一步的细化, 这既保证了模拟精度, 又节省了计算机资源, 减少了模拟时间.

4.3 材料物性参数及假设

熔石英材料的热物性参数直接影响了模拟得到的温度值, 同时适当的假设条件可以保证模拟的效率. 因此在模拟过程中做了如下假设:

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = Q, \quad (1)$$

其中 ρ 为密度, C 为比热容, $K(T)$ 为熔石英材料的热传导系数.

熔石英材料对 CO₂ 激光的高吸收率, 即在表面几个微米之内就将能量完全吸收^[19], 因此 CO₂ 激光可以视为一个表面热源. 与此同时, 因元件表面对激光具有一定的反射作用, 表面热源则可以表示为

- 1) 熔石英材料视为均匀且各向同性的;
- 2) 忽略材料的相变、潜热及蒸发过程;
- 3) 初始温度为常温, 即 25 °C;
- 4) 考虑对流传导作用, 其在 25 °C 的系数为 10 W·m⁻²·°C⁻¹;

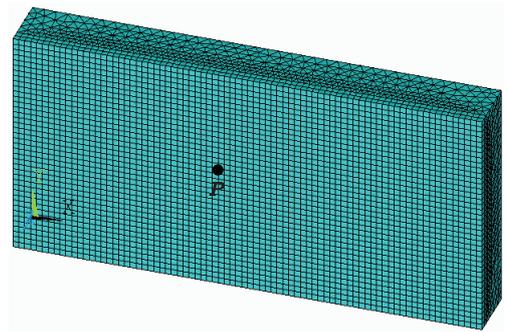


图6 网格模型示意图

- 5) 熔石英材料的热传导率和比热容等各项物性参数都是温度的函数, 材料的密度为常数. 模拟中材料的密度为 2200 kg/cm³, 而热传导率 $K(T)$ 随温度的变化规律如 (3) 式所示, 比热容 $C(T)$ 随温度的变化规律如 (4) 式所示^[18].

$$K(T) = \begin{cases} 0.9786 + 1.12 \times 10^{-3} T & 300 \text{ K} \leq T \leq 1100 \text{ K} \\ 2.0504 + 1.177 \times 10^{-4} T & 1100 \text{ K} \leq T \leq 2100 \text{ K} \end{cases}, \quad (3)$$

$$C(T) = \begin{cases} 35.936 + 3.3668 - 0.0041T^2 + 2.5803 \times 10^{-6}T^3 \\ -8.0867 \times 10^{-10} T^4 + 9.9048 \times 10^{-14} T^5 & 273 \text{ K} \leq T \leq 1973 \text{ K} \\ 1273 & 1973 \text{ K} < T < 3180 \text{ K} \\ 1273 + \frac{L}{\Delta T} & 3180 \text{ K} \leq T \leq 3185 \text{ K} \\ 1273 & 3185 \text{ K} < T \end{cases} \quad (4)$$

5 模拟结果

模拟参数完全依据实验所得的参数,即作用的CO₂激光光斑尺寸为7 mm,激光功率从20 W开始,然后每次以20 W的功率递增至80 W,然后在此功率下多次辐照元件,直至观察到元件表面有充分的熔融情况为止.图7为最后一次功率为80 W的CO₂激光扫描元件时,激光光斑经过图6所示P点位置时的三维温度分布图.可以看出,光斑中心是温度最高的位置,而非扫描区域温度则迅速下降.图8给出了实验中两个扫描速度分别作用于熔石英表面时,P点处温度随时间的变化规律.在每次扫描过程中,P点处的最高温度值标注于图中的相应位置.

从图7和图8可以看出,当激光光斑经过P点时,此处的温度就急剧地上升;当激光光斑离开P点时,温度又迅速下降.由于相邻两个扫描路径存在光斑重叠,当激光光斑的边缘再次经过此处时,温度又再次升高,但上升的幅度小于光斑中心经过该处时的温度值,因此最终就导致了每一次完整扫描后P点处的温度呈锯齿状分布.且从图8中可以看出,P点处温度在随时间的变化过程中,整体温度都在随辐照功率的增加而增加.换言之,P点处的温度随辐照次数的增加而增加,这意味着扫描使得元件整体温度提升.

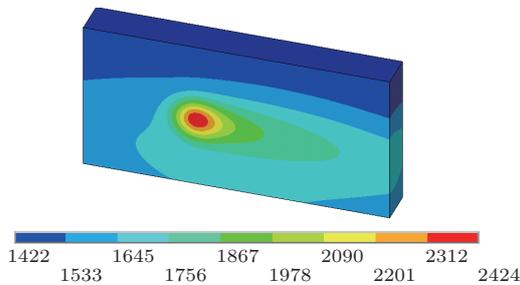


图7 3D温度分布图

熔石英材料的软化点、熔化点和气化点温度分别为1858 K, 2300 K和3180 K^[9,18]. Bouchut等^[20]的研究表明,当温度达到软化点附近时,CO₂激光与熔石英材料相互作用的现象变化就明显.当元件表面达到1900 K时,熔石英材料的黏度急剧下降,同时辐照周围的气压快速上升^[18].结合如图8(a)所示模拟结果,对于区域A当扫描速度为18 cm/min的模拟结果而言,当第一个功率为80 W的CO₂激光作用到P点时,此时的最高温度为2028 K,温度就已经达到软化点.当第二个功率

为80 W的CO₂激光辐照元件表面时,表面的最高温度已经达到了2246 K,这已经非常接近材料的熔点,这意味着表面材料开始软化.在后续的第三次和第四次过程中,多次最高温度达到或超过2300 K,此时熔石英的黏度已经变小,也就意味着缺陷和抛光点被多次熔融,以致最终被修复.

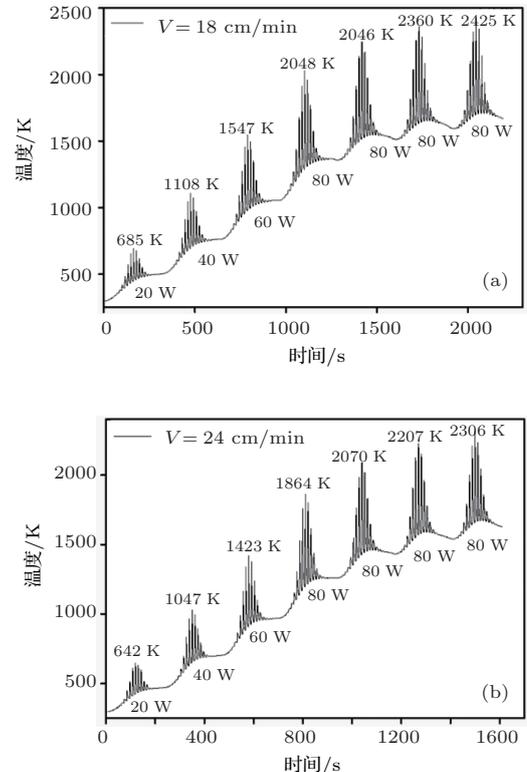


图8 不同扫描速度时温度随时间的变化规律
(a) 18 cm/min; (b) 24 cm/min

如图8(b)所示,在第一次80 W功率的CO₂激光扫描时,元件表面的温度虽也达到了软化点,但此时的温度比区域A中第一次80 W作用时得到的温度低.同时由于扫描速度过快的原因,在多次80 W的功率的辐照过程中,表面温度达到或超过2300 K的次数不够.这意味着一些较大尺寸缺陷和划痕并没有被充分地熔化和修复.如果再一次使用功率为80 W的CO₂激光作用于这些未被完全修复的划痕时,可被完全修复,但扫描次数过多会导致更大的应力 and 更糟糕的面形,甚至导致元件的不可用.这说明当其他参数一致时,扫描速度对元件表面温升的重要性.

P点处温度随深度的变化规律如图9所示.图9(a)和(b)的扫描速度分布为18 cm/min和24 cm/min.可以看出,无论多大功率的CO₂激光作用于元件表面时,在小于2 mm深度范围内的温度下降非常迅速,而在大于2 mm深度的温度分

布变得非常缓和, 此时的温度可视为元件的基底温度. 与此同时, 由图 9 可以看出, 随着辐照功率的增加, 其导致基底温升的幅度就变得越小. 当元件表面温度达到熔融点时, 基底的温度已经达到或者超过了 1500 K, 这也是选择多次扫描处理最重要的目的之一. 整个元件达到一定的温度值, 不但可以修复缺陷和划痕, 而且可以有效地减小元件热辐照后的残余应力值.

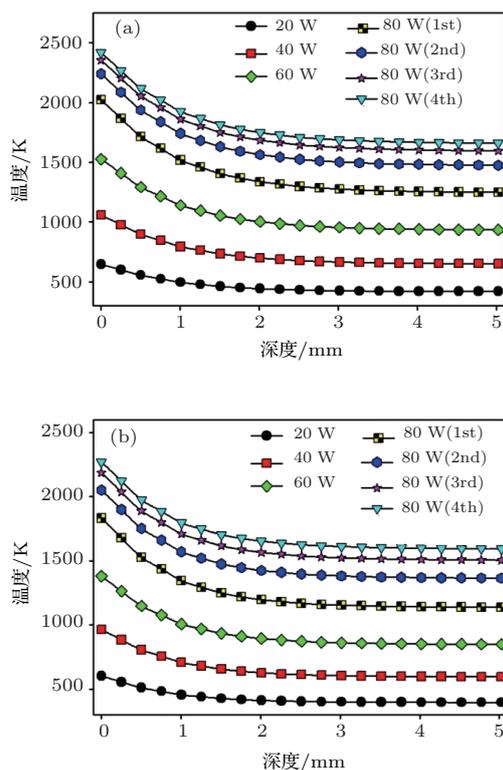


图9 温度和深度的关系扫描速度分别为 (a) 18 cm/min 和 (b) 24 cm/min

6 损伤考核

为验证修复效果, 分别测试区域 A, B 和 C 的激光诱导损伤阈值 (LIDT). 对于未做任何处理的区域 C, 无缺陷的基底、径向划痕、横向划痕和赫兹锥形划痕的 LIDT 分别为 9.5, 6.3, 5.5 和 4.6 J/cm², 可以看出径向划痕的损伤阈值高于其他两种划痕的损伤阈值, 但都低于基底的损伤阈值. 对于区域 A, 因划痕和抛光点完全被修复, 该区域的 LIDT 都达到或超过 9.8 J/cm², 可以认为被完全修复的划痕的 LIDT 至少比划痕的损伤阈值高 3 J/cm². 对于区域 B, 划痕和抛光点完全被修复的区域的 LIDT 都达到或超过了 9.4 J/cm². 对于未被完全修复的点的划痕, 仍然是最容易导致损伤的位置, 如图 10 所示. 但即使如此, 其 LIDT 也达到

6.9 J/cm², 远高于未做任何处理的赫兹锥形划痕. 可以看出, 虽然一些划痕未被完全修复, 但其抗激光损伤能力也得到有效提升. 同时, 实验结果也表明, 该扫描过程对于元件表面任何类型的缺陷的去除效果都相同. 因此, 对于表面质量较差或者局域有较多划痕的区域, 都可以采用此方法来提升其抗激光损伤能力.

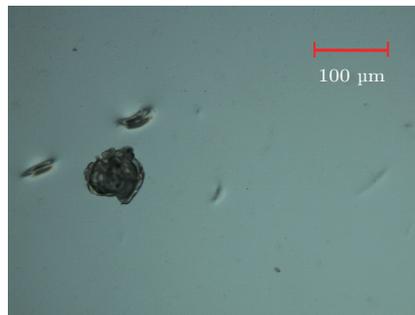


图 10 修复后再次损伤的光学显微图

7 结 论

本文研究了采用 CO₂ 激光光栅式扫描方法消除熔石英光学表面划痕和抛光点等缺陷, 并采用有限元方法模拟扫描过程中温度分布规律, 从理论上分析了修复 CO₂ 激光对缺陷的修复过程. 实验结果表明, 通过多次扫描, 在其他参数不变的情况下, 扫描速度是影响扫描效果的重要因素. 同时实验表明, 通过 CO₂ 激光光栅式扫描, 可以有效地消除元件表面的缺陷和抛光点, 处理后元件的损伤阈值可以达到或超过无缺陷基底的损伤阈值, 有效地提升了元件的抗激光损伤能力, 达到延长元件使用寿命的目的. 这是一种解决元件表面密集划痕和抛光点的新方法. 但是, 由于修复参数包括激光功率、光斑尺寸、扫描速度等多个参数, 而本文仅研究了扫描速度对元件表面缺陷和抛光点的去除效果, 其他因素也是影响修复效果的重要因素, 因而需要进一步的研究.

参考文献

[1] Bercegol H, Grua P 2008 *Proc. of SPIE* **7132** 71321B
 [2] Liu H J, Zhou X D, Huang J, Wang F R, Jiang X D, Huang J, Wu W D, Zheng W G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 065202 (in Chinese)[刘红婕, 周信达, 黄进, 王凤蕊, 蒋晓东, 黄竞, 吴卫东, 郑万国 2011 物理学报 **60** 065202]
 [3] Bouchut P, Garrec P, Pelle C 2003 *Proc. of SPIE* **4932** 103

- [4] Wang F R, Huang J, Liu H J, Zhou X D, Jiang X D, Wu W D, Zheng W G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5122 (in Chinese)[王凤蕊, 黄进, 刘红婕, 周信达, 蒋晓东, 吴卫东, 郑万国 2010 物理学报 **59** 5122]
- [5] Hrubesh L W, Norton M A, Molander W A, Donohue E E, Maricle S M, Penetrante B M, Brusasco R M, Grundler W, Butler J A, Carr J W, Hill R M, Summers L J, Feit M D, Rubenchik A, Key M H, Wegner P J, Burnham A K, Hackel L A, Kozlowski M R 2002 *Proc. of SPIE* **4679** 23
- [6] Brusasco R M, Penetrante B M, Butler J A, Hrubesh L W 2001 *Proc. of SPIE* **4679** 40
- [7] Guss G, Bass I, Draggoo V, Hackel R, Payne S, Lancaster M, Mak P 2007 *Proc. of SPIE* **6403** 64030M
- [8] Jiang Y, Xiang X, Liu C M, Luo C S, Wang H J, Yuan X D, He S B, Ren W, Lü H Bi, Zheng W G, Zu X T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 064219
- [9] Mendez E, Nowak K M, Baker H J, Villarreal F J, Hall D R 2006 *Appl. Opt.* **45** 5358
- [10] Bouchut P, Delrive L, Decruppe D, Garrec P 2004 *Proc. of SPIE* **5252** 122
- [11] Brusasco R M, Penetrante B M, Butler J A, Maricle S M, Peterson J E 2002 *Proc. of SPIE* **4697** 34
- [12] Nowak K M, Baker H J, Hall D R 2006 *Appl. Opt.* **45** 162
- [13] Temple P A, Lowdermilk W H, Milam D 1982 *Appl. Opt.* **21** 3249
- [14] Mendez E, Baker H J, Nowak K M, Villarreal F, Hall D R 2005 *Proc. of SPIE* **5647** 165
- [15] Xiao Y M, Bass M 1983 *Appl. Opt.* **22** 2933
- [16] Wong L, Suratwala T, Feit M D, Miller P E, Steele R 2009 *J. Non-Cryst. Sol.* **355** 797
- [17] Genin F Y, Salleo A, Pistor T V, Chase L L 2001 *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 2607
- [18] Zhao J, Sullivan J, Zayac J, Bennett T D 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 5475
- [19] Yang S T, Matthews M J, Elhadj S, Cooke D, Guss G M, Draggoo V G, Wegner P L J 2010 *Appl. Opt.* **49** 2606
- [20] Bouchut P, Decruppe D, Delrive L 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 3221

Experimental investigation and numerical simulation of defect elimination by CO₂ laser raster scanning on fused silica*

Jiang Yong^{1)†} He Shao-Bo²⁾ Yuan Xiao-Dong²⁾ Wang Hai-Jun²⁾ Liao Wei²⁾
Lü Hai-Bing²⁾ Liu Chun-Ming³⁾ Xiang Xia³⁾ Qiu Rong¹⁾
Yang Yong-Jia¹⁾ Zheng Wan-Guo²⁾ Zu Xiao-Tao³⁾

1) (*Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology and Research Center of Laser Fusion, Mianyang 621010, China*)

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

3) (*School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

(Received 19 October 2013; revised manuscript received 25 November 2013)

Abstract

Based on the fact that fused silica material can strongly absorb 10.6 μm CO₂ laser, a method of using CO₂ laser multi-time raster scanning to repair the densely distributed scratches and polishing pits is investigated. The experimental results indicate that the scratches and polishing pits can be fully eliminated under the appropriate parameters. The damage threshold testing results also indicate that the damage threshold for fully eliminating scratches and polishing pits can reach or exceed the damage threshold of substrate. Meanwhile, Combining the simulation results obtained by finite element software-Ansys, the processes of the scratches and polishing pits eliminated by CO₂ laser are analyzed. The present work is of significance for the study on how to eliminate the scratches and polishing pits on the surface of component.

Keywords: fused silica, CO₂ laser, raster scanning, numerical simulation

PACS: 81.40.Wx, 42.70.Ce, 78.20.Bh, 61.80.Ba

DOI: [10.7498/aps.63.068105](https://doi.org/10.7498/aps.63.068105)

* Project supported by Ph. D. Research Fund of Southwest University of Science and Technology (Grant No. 13zx7120) and the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China and the China Academy of Engineering Physics (Grant Nos. 10976025, 11076008).

† Corresponding author. E-mail: y_jiang@swust.edu.cn