

抑制损伤发展的 CO₂ 激光修复技术及机理研究

胡国行^{1,2} 赵元安¹ 李大伟¹

(¹ 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)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 熔石英表面激光损伤发展问题一直制约着激光器的运行通量。采用 CO₂ 激光在线熔融修复损伤点, 修复后形成一个光滑的高斯坑, 去除了损伤点中的裂纹, 平滑了凹凸不平的表面, 并且在紫外脉冲激光作用下, 修复斑再次产生损伤的阈值高于熔石英元件的损伤生长阈值。因此 CO₂ 熔融修复技术能有效地抑制损伤发展。通过分析 CO₂ 激光作用下熔石英表面的温度分布, 讨论修复坑的形成过程, 确定激光参数对修复效果的影响, 为寻找最佳修复参数提供理论基础。同时利用原子力显微镜(AFM)、轮廓仪细致分析损伤点和修复斑的微细结构, 采用有限差分域方法计算损伤点和修复斑周围的光强分布, 探索消除裂纹和平滑表面对抑制损伤生长的作用。

关键词 激光光学; 修复; 损伤发展; 温度分布; 光强分布

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0814001

Technology and Mechanism of CO₂ Laser Treatment for Mitigating Surface Damage Growth

Hu Guohang^{1,2} Zhao Yuan'an¹ Li Dawei¹

(¹ Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Growth of laser induced damage on the surface of fused silica plays a major role in determining optics lifetime in high power laser systems. CO₂ laser is used to mitigate the damaged spot. It locally melts and evaporates the fused silica surface, producing smooth, Gaussian shaped pit, eliminating the cracks and rough, uneven on surface. Moreover, the damage threshold of mitigation spot is much higher than the damage growth threshold of fused silica. So CO₂ laser mitigation treatment can successfully inhibit the growth of laser-induced surface damage on fused silica. The temperature distribution on the surface of fused silica induced by a CO₂ Gaussian beam has been discussed to analyze the formative process of Gaussian shaped pits and determine the best mitigation parameter. Atomic force microscopy (AFM) and profiler are applied to observe the micro-structure of damage and mitigation spots. Finite-difference time-domain (FDTD) method is applied to calculate the light intensity distribution around the mitigation and damage spots. They provide useful information to understand the mitigation mechanisms.

Key words laser optics; mitigation; damage growth; temperature distribution; light intensity distribution

OCIS codes 140.3330; 160.3380; 140.3460

1 引言

熔石英材料具有良好的光学、热学和力学性能是强激光光学元件的首选材料, 主要用于制造聚焦透

镜、窗口元件、取样光栅和防溅射屏等, 必须能够承受高功率紫外激光的辐照^[1]。但是在 355 nm, 6 ns 多脉冲激光辐照下, 国内采用传统抛光加工的小口径熔石

收稿日期: 2011-04-07; 收到修改稿日期: 2011-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(60878045)资助课题。

作者简介: 胡国行(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事 KDP/DKDP 晶体和熔石英玻璃激光损伤等方面的研究。

E-mail: huguohang@siom.ac.cn

导师简介: 赵元安(1976—), 男, 副研究员, 主要从事激光损伤方面的研究。E-mail: yazhao@mail.siom.ac.cn

(通信联系人)

英元件的损伤生长阈值约只有 22 J/cm^2 ^[2], 损伤点一旦开始生长将不得不更换元件。大口径熔石英元件的损伤发展阈值则更低, 这限制了激光器的运行通量^[3]。

为了抑制损伤点在后续激光作用下生长, 美国利弗莫尔实验室(LLNL)和法国兆焦实验室(LMJ)分别使用酸法刻蚀、机械磨削、飞秒激光修复和 CO_2 激光熔融修复等技术修复损伤点抑制损伤发展, 结果表明, CO_2 激光熔融修复的效果最好, 经修复后 90% 的损伤点不会发展^[4~6]。

本文将采用 CO_2 激光熔融修复损伤点, 探索抑制损伤生长的效果。借助原子力显微镜(AFM)、轮廓仪等微观手段分析损伤点以及修复斑的微细结构, 探索抑制损伤生长的机理。通过分析 CO_2 激光作用下熔石英表面的温度分布, 讨论修复坑的形成过程, 并确定激光参数对修复效果的影响, 寻找达到最佳效果的激光参数。

2 实 验

CO_2 激光熔融修复平台如图 1 所示, 损伤测试光束由 Nd:YAG 激光器通过倍频和混频晶体输出脉宽为 6 ns, 波长为 355 nm 的激光。测试光束通过

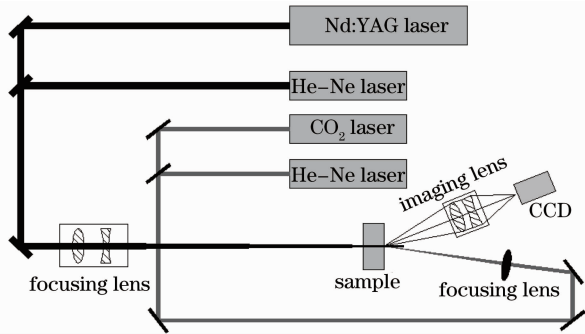


图 1 CO_2 激光修复平台

Fig. 1 Schematic of experimental bench used for CO_2 laser mitigation

焦距为 5 m 的透镜组聚焦在样品上, 它通过样品前、后表面和体内的光斑面积是相同的。修复光束由 CO_2 激光器输出波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的连续激光, 修复光束通过焦距为 50 mm 的 ZeSn 透镜聚焦在样品后表面。测试光束和修复光束分别通过 He-Ne 激光准直, 准直光束也用于修复定位, 使得修复光束与损伤测试光束在样品后表面完全重合。损伤产生、发展以及修复过程通过一套在线成像系统来实现在线监测。

3 实验结果

首先采用测试光束辐照在熔石英元件的后表面, 形成坑状损伤点。根据破斑的损伤严重程度, 设定修复参数; 然后采用 CO_2 激光作用于损伤点, 局部修复形成一个光滑的高斯斑; 使用测试光束测试修复斑再次产生损伤的情况。如此重复修复 30 个损伤点, 测试修复斑在 355 nm 激光作用下再次产生损伤的几率。结果表明修复斑的抗损伤能力大于熔石英元件本身的抗激光损伤能力, 如图 2 所示, 修复后能有效地抑制损伤发展。

采用原子力显微镜测试损伤点修复前和修复后的微细结构, 结果如图 3 所示。损伤点原本凹凸不

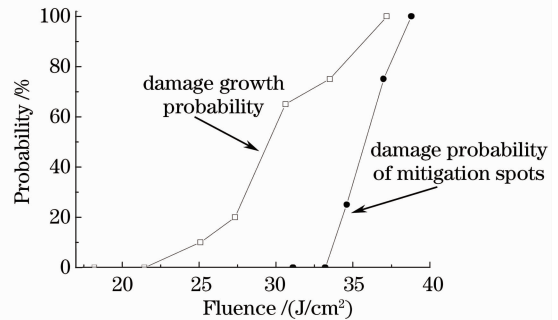


图 2 修复斑再次产生损伤的几率和损伤生长几率

Fig. 2 Damage growth probability and damage probability of mitigation spots

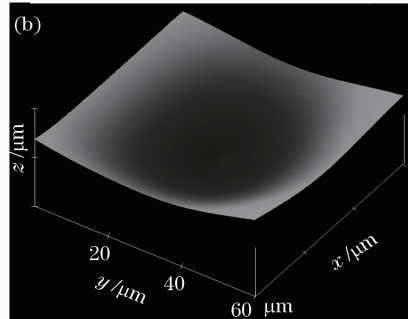
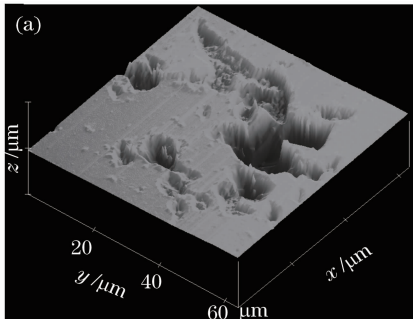
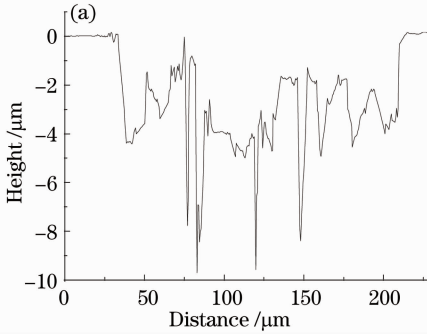


图 3 损伤点(a)修复前和(b)修复后的原子力显微镜测试图

Fig. 3 (a) Damaged spot and (b) mitigated spot examined by AFM

平,起起伏伏的表面经 CO₂ 激光修复后形成一个光滑的高斯坑。采用轮廓仪测试其二维结构,结果如图 4 所示,损伤点存在很多的裂纹,而修复斑非常光滑,不存在裂纹。从图 4 中可以看出,修复斑的直径



大于损伤点的横向尺寸,但是修复斑的纵向深度小于损伤点的裂纹深度。由此可见修复斑深度并不需要大于裂纹深度,深度大于修复斑纵向尺寸的裂纹也可以被去除。

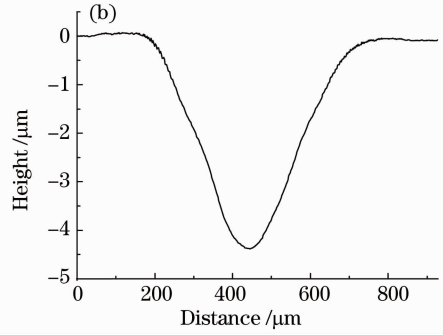


图 4 损伤点(a)修复前和(b)修复后的轮廓仪测试图

Fig. 4 (a) Damaged spot and (b) mitigated spot examined by profiler

4 分析与讨论

CO₂ 激光修复损伤点的过程如下:在 CO₂ 激光光束辐照下,熔石英材料吸收激光能量,在局部形成很高的温度,达到了熔石英材料的软化点,于是局部材料被融化,损伤点坑坑洼洼的表面被抹平,形成一个光滑表面,损伤点内的裂纹也随着材料融化而被去除。同时由于温度较高时部分材料也会升华形成气体离开表面,温度越高,材料蒸发越快,所以在高斯光束作用下就形成了高斯型光滑的修复斑。从修复过程可以看出,计算 CO₂ 激光作用下熔石英表面的温度分布对于深入探讨修复机理、分析激光参数对修复效果的影响至关重要。

在 CO₂ 高斯型激光光束辐照下,假设材料的热物参数不随温度变化,那么熔石英表面的温度分布为^[7,8]

$$T(r, z, t) = \frac{AIa^2}{\kappa} \sqrt{\frac{D}{\pi}} \int_0^t \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{a^2}\right)}{\sqrt{\tau}(4D\tau + a^2)} \times \exp\left(-\frac{r^2}{4D\tau + a^2}\right) d\tau, \quad (1)$$

式中 A 为吸收率, I 为光斑的峰值强度, κ 为热导率, D 为热扩散系数, a 为高斯光束半径, r 为距离光束中心位置的横向尺寸, z 为距离熔石英表面的纵向尺寸。由(1)式可得光斑中心处温升为

$$T = \frac{AIa}{\kappa \sqrt{\pi}} \arctan \sqrt{\frac{4Dt}{a^2}}, \quad (2)$$

光斑中心温度最高可以达到

$$T_{\max} = \frac{AIa \sqrt{\pi}}{2\kappa}. \quad (3)$$

对于熔石英元件而言, A, κ, D 分别为 0.85, 1.38 W/mK, 0.0075 cm²/s, 那么 $T_{\max} = 1.28Ia$ 。由此可见,中心处所能达到的最高温度取决于激光能量和高斯光束的半径,并不取决于激光作用时间。所以如果激光能量不够高,那么即使激光作用时间很长,中心温度也可能达不到熔石英材料的软化温度,此时就不能起到修复效果。

由(1)式可以得出熔石英表面径向温升分布为

$$T(r) = \frac{AIa^2}{\kappa} \sqrt{\frac{D}{\pi}} \int_0^t \frac{\exp\left(-\frac{r^2}{4D\tau + a^2}\right)}{\sqrt{\tau}(4D\tau + a^2)} d\tau. \quad (4)$$

假设 $a=1$ mm, $t=1$ s, 峰值功率为 20 W 的 CO₂ 激光辐照下,熔石英表面的温度分布如图 5 所示。此时距光束中心 610 μm 圆周内的温度都大于熔石英材料的软化温度,这个区域内的材料都将被融化。图 6(a)给出了光斑中心温度随着激光作用时间的变化($a=1$ mm, $P=20$ W),可以看出随着激光作用

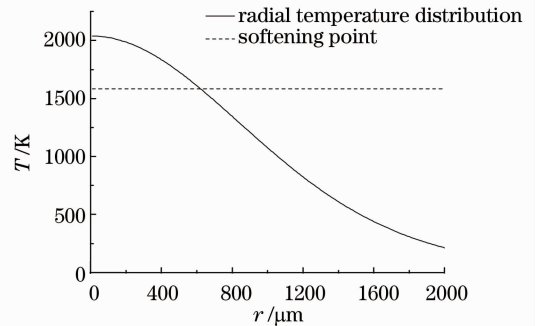
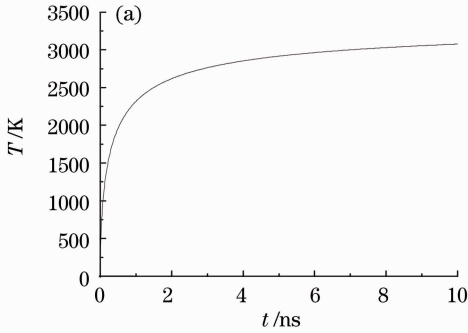


图 5 熔石英表面的径向温度分布

Fig. 5 Radical temperature distribution at the surface of fused silica

时间的增大,光斑中心温度逐步增大最后趋于稳定。图 6(b)给出了光斑中心温度随着激光功率的变化 ($a=1\text{ mm}, t=1\text{ s}$),可以看出中心温度随着激光能



量线性增大。修复过程中可以通过控制激光功率、光斑尺寸和激光作用时间来控制温度和软化区域的范围。

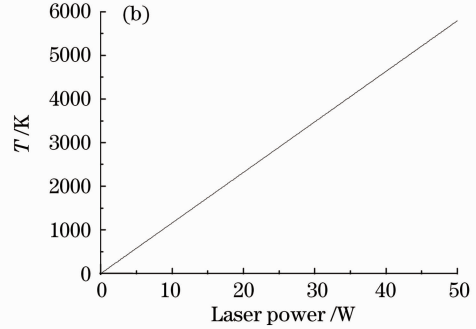


图 6 光斑中心温度与(a)激光作用时间和(b)激光功率的关系图

Fig. 6 Relation of temperature at the center of CO₂ laser spot with (a) mitigation time and (b) laser power

由(1)式可以得出光束中心处熔石英元件轴向温升分布为

$$T(z) = \frac{A I a^2}{\kappa} \sqrt{\frac{D}{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4D\tau}\right)}{\sqrt{\tau(4D\tau + a^2)}} d\tau. \quad (5)$$

假设 $a=1\text{ mm}, t=1\text{ s}$, 峰值功率为 20 W 的 CO₂ 激光辐照下,熔石英轴向温度分布如图 7 所示。此时距元件表面 238 μm 内的温度都大于熔石英材料的软化温度,这个区域内的材料都将被熔化。实验中发现深度大于修复斑纵向尺寸的裂纹也在修复过程中被去除,这是由于在轴向上也有熔石英材料被熔化,裂纹在熔化的过程中被融合、填平。由(5)式可以看出,通过调节激光功率、辐照时间、光斑尺寸可以调节轴向软化区域范围,从而修复不同深度的裂纹。

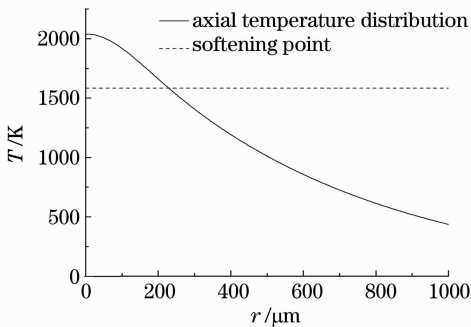


图 7 熔石英表面的轴向温度分布

Fig. 7 Axial temperature distribution at the surface of fused silica

由于 CO₂ 激光与光学表面相互作用过程中会有热应力产生,如果 CO₂ 激光大面积辐照熔石英元

件表面会在熔石英表面产生一定的热应力。由于热应力的存在会降低元件激光损伤阈值,容易产生表面裂痕,所以 CO₂ 激光修复损伤点的过程中应尽量减小修复面积,实现局部修复。由(4),(5)式可以看出修复过程中可以通过调节激光功率、辐照时间、光斑尺寸调节径向和轴向的软化区域范围,尽量缩小修复范围,达到最佳修复效果。

CO₂ 激光修复损伤点能有效地抑制激光损伤点发展,这是由几方面的因素决定的:1)熔融修复能去除裂纹,增强材料的韧性;2)损伤点表面凹凸不平,而修复斑的表面光滑,这两种形状的电场增强效应不同。

采用有限差分域方法计算损伤点和修复斑周围的光强分布^[9,10]。为了简化模型,假设损伤点和修复斑如图 8 所示,损伤点的径向尺寸为 90 μm ,纵向深度为 5 μm ,修复斑的深度为 5 μm ,径向尺寸为 90 μm 。入射光是具有高斯分布的激光束,振幅为 1.0 V/m,波长为 1064 nm,脉宽为 3 ns,熔石英折射率为 1.5,光垂直于样品表面入射,模拟区域周围采用完全匹配吸收(PML)边界。图 9 为损伤点和修复斑附近的电场分布,从图中可以看出损伤点周围的电场增强效应明显,而修复斑周围的电场分布比较均匀,高斯型修复斑内的峰值电场强度为 0.6 V/m,而损伤点的峰值电场强度为 1.35 V/m;损伤点周围的峰值光强是修复斑周围峰值光强的 5.1 倍。由此可见修复斑周围的光强分布远小于损伤点,因此修复斑具有更强的抗激光损伤能力。

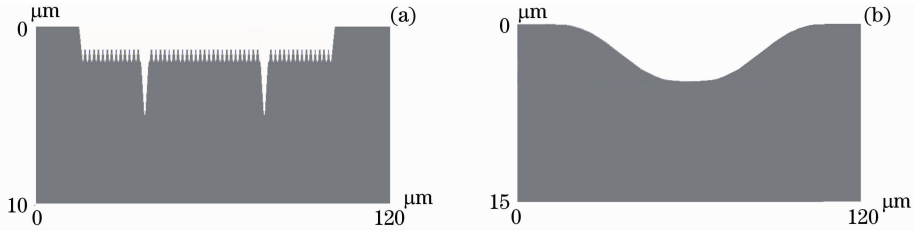


图 8 (a)损伤点和(b)修复斑的二维模型示意图

Fig. 8 2D models for (a) damaged spot and (b) mitigated spot

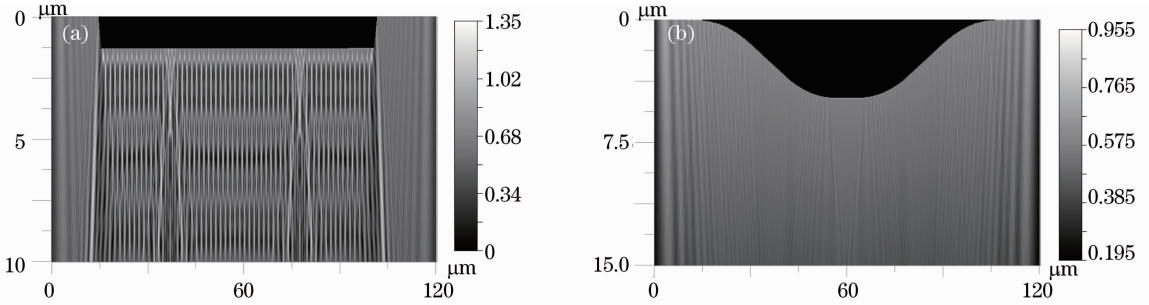


图 9 (a)损伤点和(b)修复斑附近电场分布示意图

Fig. 9 Electric-field distributions of (a) damaged spot and (b) mitigated spot

5 结 论

采用 CO₂ 激光在线修复损伤点,修复后形成一个光滑的高斯坑,消除了损伤点中的裂纹和凹凸不平的表面,并且在紫外脉冲激光作用下,修复斑再次产生损伤的阈值高于熔石英元件的损伤生长阈值。因此 CO₂ 熔融修复技术能有效地抑制损伤发展。通过分析 CO₂ 激光作用下熔石英表面的温度分布,确定激光功率、辐照时间和光斑尺寸等激光参数对修复效果的影响。通过计算损伤点和修复斑周围光强分布,得出了修复斑周围的光强分布远小于损伤点的结果,因此修复斑具有更强的抗激光损伤能力。

参 考 文 献

- 1 Huang Jin, Zhao Songnan, Wang Haijun *et al.*. Local CO₂ laser treatment for repair surface defect in fused silica [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1282~1285
黄进, 赵松楠, 王海军. 熔石英表面缺陷的 CO₂ 激光局部修复技术 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1282~1285
- 2 G. H. Hu, Y. A. Zhao, D. W. Li *et al.*. Studies of laser damage morphology reveal subsurface feature in fused silica Surf [J]. *Interface Anal.*, 2010, **42**(9): 1465~1468
- 3 M. A. Norton, L. W. Hrubesh, Z. L. Wu *et al.*. Growth of laser initiated damage in fused silica at 351 nm [C]. *SPIE*, 2010, **4347**: 468~473

- 4 L. W. Hrubesh, M. A. Norton, W. A. Molandera *et al.*. Methods for mitigation surface damage growth on NIF final optics Proc [C]. *SPIE*, 2002, **4679**: 23~33
- 5 E. Mendez, K. M. Nowak, H. J. Baker *et al.*. Localized CO₂ laser damage repair of fused silica optics [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(21): 5358~5367
- 6 A. During, P. Bouchut, J. Coutard *et al.*. Mitigation of laser damage on fused silica surfaces with a variable profile CO₂ laser beam Proc [C]. *SPIE*, 2007, **6403**: 640323
- 7 M. D. Feit, A. M. Rubenchik. Mechanisms of CO₂ laser mitigation of laser damage growth in fused silica [C]. *SPIE*, 2003, **4932**: 92~102
- 8 Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu *et al.*. Laser Radiation Effect [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 32~39
孙承伟, 陆启生, 范正修等. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 32~39
- 9 Fang Yun, Zhang Jian, Wu Liying. Optical property simulation of liquid crystal based on finite-difference time-domain method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 562~566
方运, 张健, 吴丽莹. 基于时域有限差分法的液晶光学特性模拟 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 562~566
- 10 Yang Xichen, Li Li, Zhang Ye. Numerical simulation of temperature field of coaxial power flow in laser cladding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3114~3120
杨洗陈, 栗丽, 张烨. 激光熔覆中同轴粉末流温度场的数值模拟 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3114~3120