

文章编号: 0258-7025(2009)05-1282-05

# 熔石英表面缺陷的 CO<sub>2</sub> 激光局部修复技术

黄进 赵松楠 王海军 吕海兵 叶琳 蒋晓东 袁晓东 郑万国

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 熔石英材料因加工产生的表面缺陷是造成其在实际应用过程中抗激光损伤能力下降的主要原因。利用 CO<sub>2</sub> 激光对石英表面特征缺陷进行定点局部高温熔融修复的技术研究, 结果发现这种熔融修复可明显减小熔石英表面缺陷尺度并改善缺陷内结构质量。通过对修复后的表面缺陷进行损伤阈值考核发现, 熔石英表面 200 nm 深度左右的划痕在修复后损伤阈值提升 1 倍左右, 横向尺度 10~100 μm 内的表面初始坑状损伤点的损伤扩展阈值和相同辐照通量下的抗辐照次数也获得明显提高, 从而证实了利用 CO<sub>2</sub> 激光局部定点修复以提高熔石英负载能力、延长使用寿命的可行性。

**关键词** 激光技术; 缺陷修复; CO<sub>2</sub> 激光辐照; 熔石英; 损伤阈值

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1282

## Local CO<sub>2</sub> Laser Treatment for Repair Surface Defect in Fused Silica

Huang Jin Zhao Songnan Wang Haijun Lü Haibing

Ye Lin Jiang Xiaodong Yuan Xiaodong Zheng Wanguo

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

**Abstract** Surface defect induced by machining in fused silica is the main causation weakening anti-laser-damage ability in actual application. The technology using local high temperature CO<sub>2</sub> laser treatment repairing surface characteristic defect in fused silica is developed. It is presented that scale of surface defect is decreased and microcosmic interior structure quality of defect is improved after CO<sub>2</sub> laser repairing. Through measuring the damage-threshold of repaired defect, is discovered that damage threshold of scrape-line with depth 200 nm is increases about 100 percent, and the damage growth threshold and anti laser radiation times of initial damage pit with diameter 10-100 μm is increased obviously too. It proves that the method using CO<sub>2</sub> laser treatment repairing surface defect in fused silica can improve anti-damage ability and the life extending is doable.

**Key words** laser technique; repairing of defect; radiation with CO<sub>2</sub> laser; fused silica; damage-thresholds

## 1 引言

熔石英材料因具有吸收小、化学性质稳定、抗损伤能力强的优点而被广泛应用于高功率固体激光装置的三倍频组件中。因此, 其对紫外脉冲激光的负载能力对装置的稳定运行显得尤为重要。熔石英材料在加工过程中会不可避免地在表面、亚表面留下划痕、坑洞等加工缺陷, 这类缺陷会在实际使用过程中成为紫外脉冲激光能量的超强吸收点, 从而严重降低了熔石英元件的紫外脉冲激光负载能力<sup>[1]</sup>。利用 CO<sub>2</sub> 激光对熔石英表面特征缺陷点进行定点局

部修复可有效提高缺陷部位的负载能力, 该处理工艺已被应用于美国 LLNL, 对提高石英元件负载能力、延长其发生初始损伤后的使用寿命起到了积极的作用<sup>[2,3]</sup>。

本文利用 CO<sub>2</sub> 激光对石英基片表面进行参数渐变的熔融修复辐照, 判断出对元件局部面型和热应力影响最小的有效修复激光参数。以此为条件对熔石英表面的原生划痕和初始损伤点进行了局部修复研究。通过光学显微镜及轮廓仪进行形貌观测, 发现缺陷在修复后内结构分布明显趋于平滑, 损伤

收稿日期: 2008-01-30; 收到修改稿日期: 2008-09-23

基金项目: 国防预研课题(426020606)资助课题。

作者简介: 黄进(1980—), 男, 助理研究员, 主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: huangj-88@tom.com

阈值测试也进一步证实了定点局部修复对提高缺陷抗损伤能力的有效性。

## 2 实验研究

### 2.1 CO<sub>2</sub> 激光单点修复原理

熔石英表面缺陷主要包括划痕、坑洞两大类,其诱导损伤的机理主要包括两方面:缺陷内的杂质以及内结构的粗糙表面使得缺陷对激光光强的吸收大大增强;内结构陡峭的细微尖峰起伏结构对入射激光产生多次反射、折射以及干涉叠加,对激光光强形成高频调制,从而容易引发损伤<sup>[4]</sup>。当 CO<sub>2</sub> 激光作用于缺陷部位时,高功率的红外激光辐射绝大多数被熔石英吸收,瞬间的熔融、蒸发作用将结构内的尖峰结构去除,缺陷内物质的微流动将裂缝填埋,使缺陷内结构变得平滑。这一转变将使缺陷对光强的吸收减弱,并大大减少缺陷对激光的高频调制效应,最终提高了缺陷部位的抗损伤能力。图 1 为熔融过程中的匀滑效应。

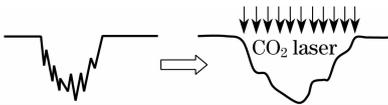


图 1 CO<sub>2</sub> 熔融过程中的匀滑效应

Fig. 1 Smoothness phenomena in CO<sub>2</sub> laser melting

### 2.2 CO<sub>2</sub> 激光单点修复光路排布

缺陷熔融修复要求 CO<sub>2</sub> 激光到达缺陷部位时具备一定的功率密度。实验中利用焦距为 100 mm 的硒化锌透镜将光斑聚焦到 φ1 mm,作用到样品表面。样品表面的缺陷通过放大倍率 150 倍的显微成

像装置进行在线观测。通过准直激光来进行主激光修复定位,并利用平移精度为 5 μm 的电动平移台将待处理缺陷平移至激光定位点。具体装置排布示意图如图 2 所示。

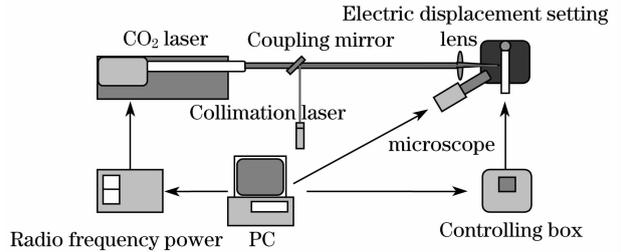


图 2 CO<sub>2</sub> 激光局部定点修复装置排布图  
Fig. 2 Experimental arrangement for CO<sub>2</sub> laser localized pointing repairing

### 2.3 激光修复参数的确定

CO<sub>2</sub> 激光器为射频激励型准连续激光输出,通过控制激光器输出频率及脉冲个数来调节激光作用时间的长短,利用占空比的变化来调节激光作用功率。理论上,激光作用时间和作用功率决定了沉积到石英表面缺陷部位的激光能量,这两个参数直接决定了局部定点修复的效果;若激光能量沉积过多,会对处理部位的元件表面面型产生较大影响并导致更大的热应力。因此,修复过程中必须精确控制激光输出参数,在满足修复效果的前提下尽可能地减少高温对元件造成的负面影响。为判断激光作用时间、作用功率对元件表面形貌的影响,按照以下方式对元件表面进行阵列式熔融辐照,可分别判断出随着激光参数的变化而导致的熔融形貌变化,具体结果见图 3。

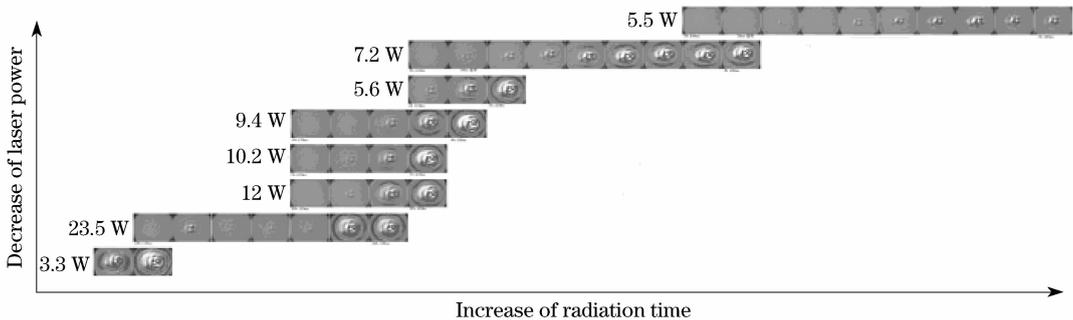


图 3 随作用时间和功率的变化造成的石英表面熔融形貌的改变

Fig. 3 Varying of surface shape with radiation time and power

随着作用时间或作用功率的增加,元件表面熔融坑深度逐渐加深,范围逐渐扩大。该阵列中熔融光斑的变化趋势符合以下规律:从左至右,从上至下,熔融程度由轻度向中度过渡,最终形成烧蚀形貌。坑状熔融面型的形成源于两种机制:熔融和蒸

发。在烧蚀过程发生前,熔融占据主导地位,在瞬态高温过程中材料的黏度迅速减小,使得物质朝曲率半径更小的地方流动填充,再加上因黏度减小产生的表面张力,两种方式的综合作用使缺陷变得平滑。此时物质的蒸发作用占据次要位置,蒸发导致物质

产生气化而损失,在激光的瞬间作用下形成坑状的面型。

由蒸发作用造成的物质损失厚度  $d$  可表示为<sup>[5]</sup>

$$d = \int v dt,$$

其中

$$v = \frac{a_e I}{L + \rho c \Delta T}$$

式中  $v$  为物质的蒸发率,  $t$  为脉冲作用时间,  $a_e$  为光吸收率,  $I$  为作用光强。由此可见,随着作用时间的加长以及作用功率的提高,物质的蒸发厚度会相应增加,从而影响面型,因此修复过程中应尽可能减少蒸发效应的影响。

蒸发和熔融两种现象的共同作用造就了光滑的熔融坑形貌。作用温度超过一定值(2700 °C)<sup>[6]</sup>,蒸发取代熔融作用成为主导因素。由于气化物质的大量增加,短脉冲作用后元件表面迅速冷却,使得蒸发物质部分在表面冷凝,最终形成烧蚀形貌。典型的形貌分布如图 4 所示。

在烧蚀区石英还将发生如下化学反应:



即熔石英在超高温下可分解为一氧化硅粉末并释放出氧原子。由此可见,烧蚀形貌会对元件面型产生严重破坏,冷凝和分解物质也会对表面造成污染,故在修复过程中应严格将温度控制在 2700 °C 以下;中度修复对局部面型也有一定程度的破坏,适用于对深度为 50~500 nm 的缺陷进行修复;对于 50 nm 以

下的缺陷,采用轻度修复既可保护面型、减少应力,也可获得较好的修复效果。

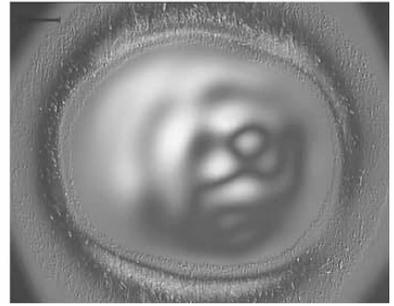


图 4 石英表面烧蚀形貌

Fig. 4 Ablation on surface of fused silica

### 3 实验结果

#### 3.1 划痕修复结果

为验证单点修复对于较深划痕的修复效果,利用金刚石玻璃刀在石英基片表面划出 40 mm 长,深度约 200 nm 的划痕。按照分段间隔修复的方法来对比修复部分与未修复部分的抗损伤能力差异。分段修复后的划痕用脉宽 6.3 ns,光斑大小为 3 mm<sup>2</sup> 的 355 nm 激光以 1.8 J/cm<sup>2</sup> 的起始能量密度从左至右依次辐照,每个区域辐照 50 次,然后增加能量辐照第二遍,当辐照能量增加至 3 J/cm<sup>2</sup> 后,划痕的损伤情况如图 5。

划痕未修复部分全部发生损伤,而修复部分均未发生损伤。继续增加辐照能量后测量出划痕各部分的损伤阈值如图 6。

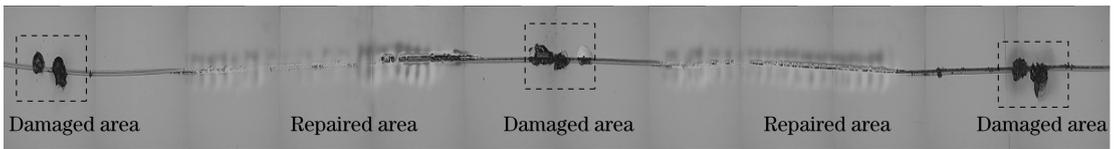


图 5 以 3 J/cm<sup>2</sup> 的能量依次辐照后划痕的损伤状况

Fig. 5 Damage of scrape-line after radiation by energy of 3 J/cm<sup>2</sup>

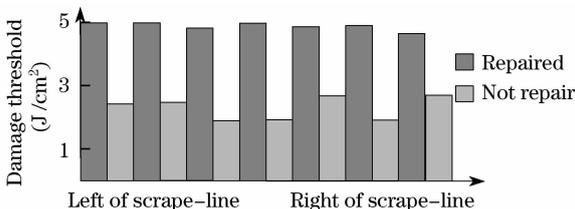


图 6 人划划痕分段修复后从左至右各段的损伤阈值

Fig. 6 Damage-threshold of scrape-line from left to right after repairing

由图 6 可知,划痕未修复部分平均损伤阈值为 2.2 J/cm<sup>2</sup>,修复后的区域提高到 5.0 J/cm<sup>2</sup>,划痕在

修复后其抗损伤能力整整提高了 1 倍多。这充分证实了定点局部修复对提高表面缺陷损伤阈值的有效性。

用原子力显微镜观察划痕的微观表面形貌(图 7),未修复部分表面  $R_{pv}$  (表面峰谷起伏偏差)和  $R_q$  (表面粗糙度均方根)值分别约为 300 nm 和 40 nm。修复后相应数值变化为 30 nm 和 6 nm,充分反映出修复后的划痕内结构变得更加光滑且起伏坡度更缓。这种结构的变化使得划痕对激光的高频调制变为低频调制,并减少了对光强的吸收,从而使得修复后划痕的抗损伤能力得到增强。

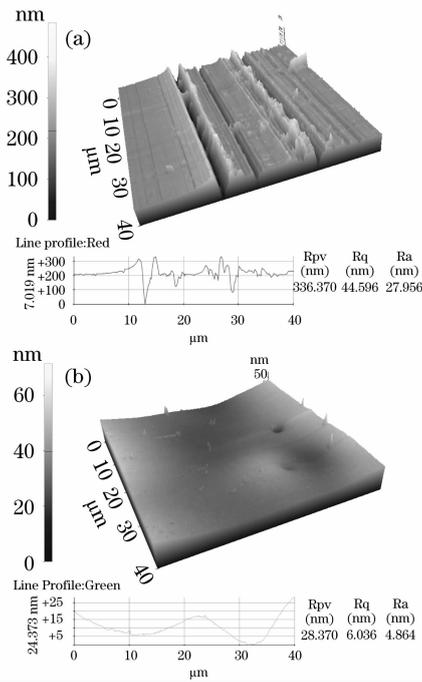


图 7 划痕未修复部分(a)与修复部分(b)典型的微观形貌(轮廓线垂直于划痕)  
Fig. 7 Microcosmic shape of not repairing (a) and repairing (b) part at scrape-line

### 3.2 初始坑状损伤点修复结果

坑状缺陷部分源于石英基片表面的原生缺陷，

表 1 局部定点修复后初始损伤点损伤扩展阈值(IDT)对比

Table 1 Compare of initial damage-thresholds after localized treatment

Landscape orientation scale of defect	Not repair		Repaired		Increase of IDT / %
	IDT / (J / cm <sup>2</sup> )	Times of radiation at damaging	IDT / (J / cm <sup>2</sup> )	Times of radiation at damaging	
Small (20 μm)	2.3	15	4.9	22	>100
Middle(50 μm)	2.3	11	3.0	10	>30
Large(100 μm)	2.3	2	2.3	12	0

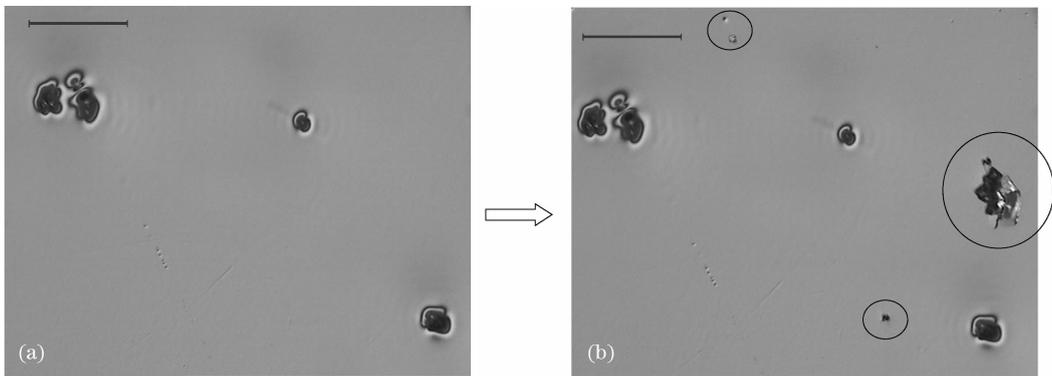


图 8 修复后小尺度缺陷点的损伤扩展情况。(a)小尺寸缺陷点修复后,(b)以 5 J/cm<sup>2</sup> 辐照 4.2 次后

Fig. 8 Evolution of small scale defect after repairing (a) and after radiated 4.2 times by energy of 5 J/cm<sup>2</sup> (b)

图 8 所示为修复后的小尺度损伤点在高能量密度激光作用下产生的 3 处损伤均未发生在经过修复

纵深尺度通常较小,但由初始损伤导致的坑状缺陷尺度大得多,通常深度可超过 1 μm,故其修复难度远远大于划痕。考核对此类缺陷修复效果的方法如下:对石英基片表面无缺陷区域等间距测量其 R : 1 损伤阈值,等到辐照区域刚好发生初始损伤则停止辐照,从而制造出初始坑状损伤点,按照这种方法依次在石英表面制造出 6 个损伤点。然后利用显微镜观察记录损伤点,根据损伤点的形态和尺度将这 6 个点分成 3 组,每组的两个损伤点尺度、形态接近,对其中一个进行修复,然后比较修复后损伤点与未修复点的损伤扩展阈值差异,测量激光为脉宽 6.3 ns,光斑大小为 3 mm<sup>2</sup> 的 355 nm 激光,测量时每个点辐照 50 次,若未损伤,则增加辐照能量,直至发生损伤。详细测量结果如表 1 所示。

从对比结果看出,不同尺度的缺陷点经过单点修复后,抗损伤能力提升的效果有明显差异。修复后的坑状损伤点阈值提升效果直接与所修复缺陷的横向尺度相关,20 μm 尺度左右的缺陷修复后的抗损伤能力提高了 1 倍;随着横向尺度的增加,阈值提升效果逐渐减小,对于 100 μm 尺度的缺陷已经不能有效提高其修复后的损伤扩展阈值,但抗辐照次数有了明显增加,这也同样反映出了修复后缺陷点的抗损伤能力得到了提高。

的损伤点上,充分证明了经过修复后初始损伤点的抗损伤能力得到了明显提高,已经不是该辐照区域

内的阈值薄弱点。

## 4 结 论

通过循序改变 CO<sub>2</sub> 激光的辐照功率和作用时间,在熔石英表面作用出修复程度渐变的熔融坑阵列,最终判断出可适应不同程度缺陷的激光修复参数。对不同类型的缺陷进行修复表明,CO<sub>2</sub> 激光对于 500 nm 深度以内的划痕具备明显的抗损伤能力提升效果,最高可达到 1 倍左右;对初始损伤点的修复也表明,横向尺度小于 50 μm 的损伤点经修复后可大大提高其损伤增长阈值,对于横向尺度 100 μm 左右的损伤点来说,也可达到明显延长其抗辐照次数的效果。利用 CO<sub>2</sub> 激光对熔石英表面特征缺陷进行局部单点修复,对于提高熔石英负载能力、延长其发生初始损伤后的使用寿命,具有积极的意义。

## 参 考 文 献

- 1 Huang Jin, Lü Haibing, Ye Lin *et al.*. Damage threshold improvement of fused silica chip by CO<sub>2</sub> laser pretreatment[J]. *China Laser*, 2007, **34**(5):723~727  
黄 进,吕海兵,叶 琳等. 利用 CO<sub>2</sub> 激光预处理提高石英基片的损伤阈值[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):723~727
- 2 R. M. Brusasco, B. M. Penetrante, J. A. Bulter *et al.*. CO<sub>2</sub> laser polishing reducing of 351 nm surface damage initiation in fused silica[C]. *Laser Induced Damage in Optical Material*, nov. 1-2, 2001
- 3 R. M Brusasco, L. W. Hrubesh *et al.*. Localized CO<sub>2</sub> laser treatment for mitigation of 3ω damage growth on fused silica[C]. *Boulder Damage Symposium on Optical Material*, oct. 1-3, 2001
- 4 Chen Fei, Meng Shaoxian. Damage mechanism of optical material [J]. *Physics Evolvment*, 1998, **18**(2):198~206  
陈 飞,孟绍贤. 光学材料破坏机理[J]. *物理学进展*, 1998, **18**(2):198~206
- 5 M. D. Feilt, M. D. Rotter. Development of a process Molder for CO<sub>2</sub> Laser Mitigation of Damage Growth in Fused Silica [C]. *Annual Symposium on Optical Material for High Power Laser*, sep. 22-24, 2003
- 6 E. Mendez, H. J. Baker, K. M. Nowak *et al.*. Highly localised CO<sub>2</sub> laser cleaning and damage repair of silica poptical surfaces[C]. *SPIE*, **5647**:165~175