

激光诱导熔石英表面损伤修复中的气泡形成和控制研究

张丽娟 张传超 陈静 白阳 蒋一岚 蒋晓龙 王海军 栾晓雨 袁晓东 廖威

Formation and control of bubbles during the mitigation of laser-induced damage on fused silica surface

Zhang Li-Juan Zhang Chuan-Chao Chen Jing Bai Yang Jiang Yi-Lan Jiang Xiao-Long Wang Hai-Jun Luan Xiao-Yu Yuan Xiao-Dong Liao Wei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 016103 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171839

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171839>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[石英晶振的储能特性](#)

Characteristics of quartz crystal energy storage

物理学报.2016, 65(10): 104205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104205>

[掺 Yb 硅酸盐玻璃的热漂白性能研究](#)

Performance of Yb-doped silicate glass with thermal bleaching

物理学报.2016, 65(4): 044208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044208>

[退火对熔石英表面损伤修复点损伤增长的影响](#)

Effect of thermal annealing on damage growth of mitigated site on fused silica

物理学报.2016, 65(4): 044209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044209>

[0.18 \$\mu\text{m}\$ 部分耗尽绝缘体上硅互补金属氧化物半导体电路单粒子瞬态特性研究](#)

Single event transients in a 0.18 μm partially-depleted silicon-on-insulator complementary metal oxide semiconductor circuit

物理学报.2015, 64(13): 136102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.136102>

[1064 nm 激光对中性密度滤光片的损伤机理研究](#)

Investigation of 1064-nm laser damage mechanism of neutral density filter

物理学报.2012, 61(7): 076102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.076102>

激光诱导熔石英表面损伤修复中的 气泡形成和控制研究*

张丽娟 张传超 陈静 白阳 蒋一岚 蒋晓龙
王海军 栾晓雨 袁晓东 廖威†

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2017年8月14日收到; 2017年9月30日收到修改稿)

基于熔石英材料在 CO₂ 激光作用下的温度分布和结构参数变化的计算结果, 对熔石英损伤修复中的气泡形成和控制进行了研究. 针对损伤尺寸介于 150—250 μm 之间的损伤点, 提出了一种能够有效控制气泡形成的长时间低温预热修复方法. 基于低温下熔石英材料结构弛豫时间常数较长的特点, 该方法在不引起熔石英材料结构发生显著变化的同时, 能够解吸附表面和裂纹处所附着的气体和杂质, 可有效降低裂纹闭合过程中气泡形成的概率. 实验结果表明, 长时间低温预热修复方法的成功修复概率可达到 98%.

关键词: 熔石英, CO₂ 激光修复, 气泡, 激光损伤

PACS: 61.80.Ba, 42.70.Ce, 47.55.db, 61.80.-x

DOI: 10.7498/aps.67.20171839

1 引言

熔石英光学元件是惯性约束聚变激光装置中的重要组成部分, 如中国的神光 III 激光装置、美国国家点火装置 (NIF)、法国的兆焦耳激光装置 (LMJ). 紫外激光诱导熔石英损伤问题是影响大装置运行的关键, 是限制大激光装置输出能力进一步提高的瓶颈. 虽然在三倍频激光 (351 nm, 3 ns) 作用下, 熔石英材料的理论本征损伤阈值 > 100 J/cm², 而实际应用中由于熔石英在处理过程中不可避免地会引入划痕、裂纹、表面污染物等各类缺陷^[1,2], 在 5—15 J/cm² 激光通量下, 熔石英元件即出现紫外激光损伤^[3], 损伤一旦发生, 损伤尺寸在后续的激光辐照中呈指数形式增长^[4].

国内外针对延长光学元件使用寿命开展了大量的研究工作, 其中一种简单有效的方式是基于 CO₂ 激光局域辐照的非蒸发损伤修复方法^[5-9]. 利用 CO₂ 激光加热熔融的方式来消除损伤点的内

部缺陷、裂纹等导致损伤快速增长的因素, 从而抑制损伤增长. 然而这种方法在修复过程中会产生较大的残余应力、气泡和烧蚀等问题, 控制和解决这些问题是保证修复工艺最终被接受的关键^[10-12]. Guss 等^[13]报道了气泡数量随损伤点横向尺寸的增加而增加, 这表明损伤点尺寸越大, 越难以控制修复工艺, 并且大量气泡和非球形不规则形状的气泡形式是不可接受的修复效果, 这两种气泡形式将导致熔石英光学元件在三倍频激光通量下的损伤阈值大大降低. Brusasco 等^[5]研究发现在 CO₂ 激光束流直径为 5 mm, 激光功率为 17 W 时辐照尺寸为 200 μm 的损伤点, 可在修复点中观察到残留气泡, 气泡形状规则, 此类修复点在后续 351 nm 激光 (激光通量为 8 J/cm², 脉宽 10 ns) 辐照下可承受 1000 发次而不增长. 蒋勇等^[14]也对熔石英损伤修复点上的气泡特征和气泡控制方法展开了研究, 提出修复点损伤阈值会随气泡数量增加而呈指数递减, 并且提出了为避免气泡出现而采用的三段式修复方法. 这些研究工作对气泡形成机理侧重于定性

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11404301, 61505185) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liaowei@caep.cn

分析, 目前尚缺少气泡形成的完备物理图像, 因此在气泡控制上缺少合适的理论指导.

本文从提高熔石英损伤点修复完好率及气泡控制角度出发, 利用远红外 CO₂ 激光预热并修复尺寸介于 150—250 μm 的损伤点, 讨论了两种不同预热形式的损伤点修复方式对气泡的控制. 通过 CO₂ 激光作用下的熔石英表面温度分布的理论计算结果初步设计了两组不同的修复方案, 基于两种修复方案的实验研究和 CO₂ 激光作用下熔石英材料物性参数的理论计算, 对 CO₂ 激光修复过程中气泡产生和控制机制进行了半定量分析. 研究结果为熔石英损伤点 CO₂ 激光修复工艺的激光参数选择及气泡控制提供有意义的参考.

2 实验过程和方法

熔石英样品为 Corning 7980 远紫外光学玻璃, 尺寸为 40 mm × 40 mm × 5 mm. 样品采用质量分数为 1% 的氢氟酸 (HF) 缓冲腐蚀液 (缓冲剂为 15% 质量分数的固体氟化铵 (NH₄F)) 刻蚀样品 5 min, 以去除表面污染物, 接着利用去离子水和酒精对其进行清洗和脱水处理. 实验中利用 Nd:YAG 激光器在熔石英样品上人为制造横向尺寸在 150—250 μm 之间、深度 60 μm 以内的损伤点. Nd:YAG 激光器的工作波长为 355 nm, 脉宽为 6.3 ns, 激光

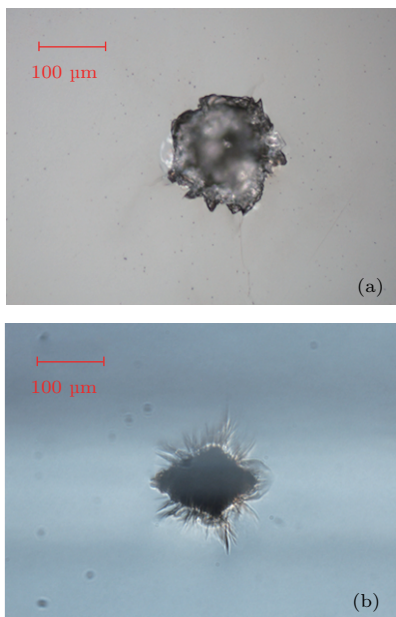


图 1 典型紫外激光损伤点显微镜图 (a) 损伤点正视图; (b) 损伤点侧视图

Fig. 1. Typical micrographs of (a) top view and (b) side view of laser damage site.

至样品出光面的 1/e² 光斑面积为 0.8 mm², 采取先利用高通量激光辐照产生小尺寸的初始损伤后, 再利用低能量的激光辐照进行损伤增长的方式产生所需尺寸的损伤点. 图 1 所示为典型的利用损伤增长方式人为制造损伤点的显微镜形貌图.

CO₂ 激光修复光路原理如图 2 所示. 利用工作波长为 10.6 μm 的 CO₂ 准连续激光器修复损伤点. 激光器输出最大功率为 100 W, 出口光斑呈高斯分布. 输出的激光通过 ZnSe 镜的透射和反射后, 通过调节 ZnSe 聚焦透镜和样品之间的距离, 使到达样品表面的 CO₂ 激光束斑直径为 3 mm (利用刀口法测试激光束斑直径), 最终利用 3 mm CO₂ 激光束斑聚焦到熔石英表面损伤点进行修复.

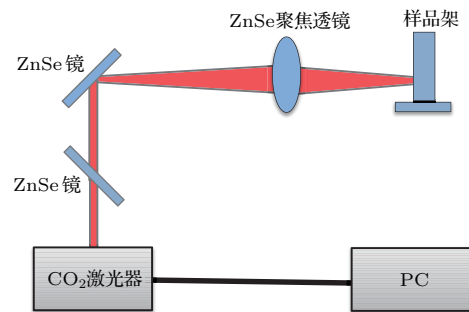


图 2 CO₂ 激光非蒸发式单点修复光路原理图

Fig. 2. Schematic diagram of the non-evaporation CO₂ laser mitigation setup.

3 修复方案的设计和分析

根据前期研究工作^[11], 针对 150—250 μm 尺寸的损伤点, 得到最优化的激光频率为 15 kHz 和光斑尺寸为 Φ3 mm. 因此本文的修复方案中均采用 Φ3 mm 光斑修复和 15 kHz 的激光频率. 熔石英材料在 CO₂ 激光高斯光斑作用稳态 (steady state) 条件下沿深度 z 方向温度分布的解析解为^[15,16]

$$T_z(P, a, z) = \frac{(1-R)P}{2ak\sqrt{\pi}}(1 - \text{Erf}(z/a)) \times \exp(-(z/a)^2) + T_0, \quad (1)$$

其中 P 为激光功率, a 为激光光斑半径, k 为导热系数, R 为反射系数, T_0 为环境温度. 一般情况下, 取 $1 - R = 0.85$, $k = 0.02 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 环境温度为 300 K. 近似条件下, 激光辐照功率 P_0 和表面峰值温度 T_p 之间的关系为

$$T_p = \frac{(1-R)P_0}{2ak\sqrt{\pi}} + T_0. \quad (2)$$

熔石英材料表面峰值温度随激光功率的变化如图 3 所示, 其转变温度 T_g (1315 K), 熔融温度 T_m (2300 K), 烧蚀温度 T_a (3180 K) [17,18] 分别对应的激光功率值为 12.7, 25, 36 W.

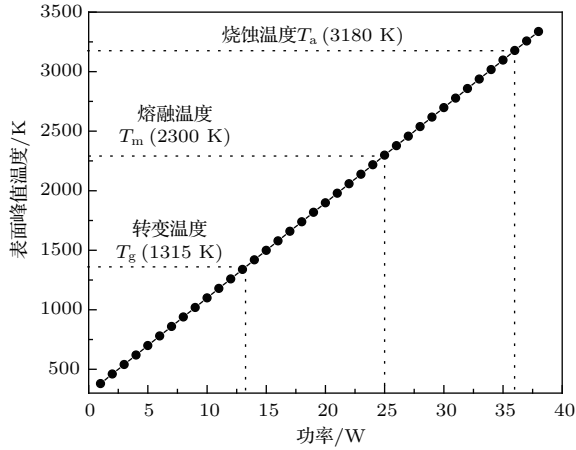


图 3 不同功率下表面峰值温度的变化
Fig. 3. Peak surface temperature distributions vs CO₂ laser power.

选择修复参数时, 修复功率对应的表面峰值温度应高于熔融温度而低于烧蚀温度, 以避免熔石英表面出现烧蚀. 选择修复预热参数时, 为尽可能排除气泡, 选择转变温度附近功率, 并进行长时间的激光单次或多次辐照. 基于考虑不同预热形式对气泡的影响, 结合文献调研, 并通过大量实验迭代, 最终设计优化出两组不同的修复方案. 其中短时间多次高温预热修复方法(方案 I)采用逐渐提高功率、多次短时间预热的形式, 如图 4 (a) 所示; 而长时间低温预热修复方法(方案 II)采用低功率长时间预热的修复方式, 如图 4 (b) 所示, 两种预热方案的功率 (P) 参数和辐照时间 (t) 见表 1.

表 1 不同预热方案的 CO₂ 激光辐照参数
Table 1. CO₂ laser mitigation parameters for different preheating profile.

| 修复方案 | P_1/W | t_1/s | P_2/W | t_2/s | P_3/W | t_3/s | t_0/s |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 方案 I | 16.1 | 4 | 21.8 | 4 | 25.3 | 4 | 1 |
| 方案 II | 13 | 60 | 25.3 | 4 | 无 | 无 | 无 |

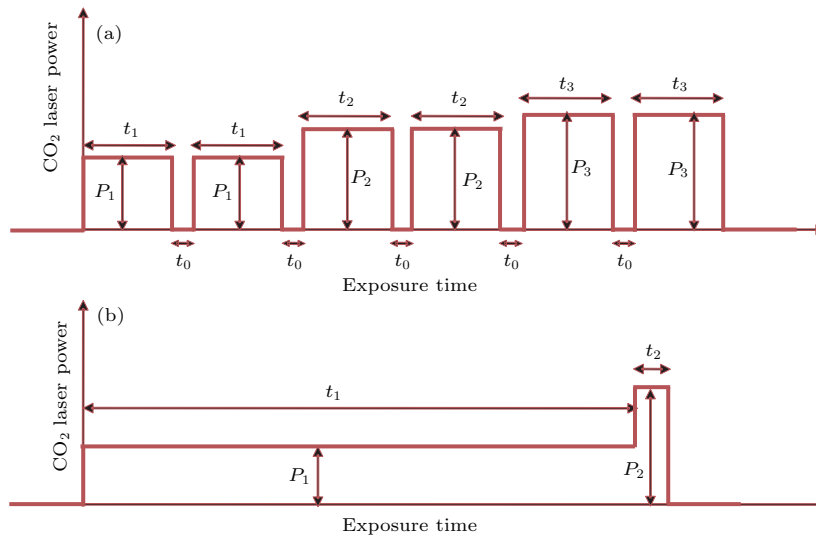


图 4 不同预热形式修复方案趋势图 (a) 方案 I, 短时间多次高温预热修复方法; (b) 方案 II, 长时间低温预热修复方法
Fig. 4. Sketch of mitigation protocol with different CO₂ laser preheating profile: (a) Method I, short-time, multi-shot, high temperature CO₂ laser preheating; (b) method II, long-time, single-shot, low temperature CO₂ laser preheating.

4 结果与讨论

4.1 修复结果与气泡控制比较

利用得到的两种不同预热形式的修复参数, 对熔石英样品上人为制造的尺寸介于 150—250 μm 的损伤点(图 5 (a)) 进行修复, 修复的结果和气泡的

统计如表 2 所列.

由表 2 中统计数据可见, 采用方案 II 进行损伤点修复, 其无气泡出现修复概率为 91%, 是方案 I 成功修复概率的 3.8 倍之多. 此外, 采用方案 II 可有效控制出现两个以上气泡的概率, 实现气泡可控性. 采用 Nikon ECLIPSE LV100 光学显微镜观察

方案I修复的损伤点的气泡情况和修复完好情况, 修复点存在大量如图5(c)所示的一串气泡形式, 这些气泡数目较多, 且气泡较深. 根据文献[13]的报道, 修复点出现的两种气泡形式是不可接受的: 一是气泡数目较多, 二是气泡形状不规则, 因此方案I的预热修复方式无法有效控制气泡的产生. 由表2统计可知, 方案II出现气泡的概率仅为9%, 且其中7%的气泡形式为1—2个气泡数目(如图5(b)所示), 此种气泡形式为修复中可接受类型, 此方案的长时间低温预热能够有效抑制修复中的气泡产生. 定义损伤点修复后熔石英表面不高于2个气泡为修复成功, 由表2所列方案II的修复成功率为

98%, 相比方案I增加了45%. 图5(d)所示为方案II修复完好的修复点光学显微镜图片, 此类修复点中避免了烧蚀和气泡的出现, 为理想的修复效果.

表2 150—250 μm 的损伤点修复结果统计

Table 2. Statistical results of mitigation with damage sites lateral size in the range of 150–250 μm .

| 修复方案 | 损伤点总数 (图5(a)) | 1—2个气泡修复点总数 (图5(b)) | 2个以上气泡修复点总数 (图5(c)) | 无气泡修复完好总数 (图5(d)) | 修复成功率/% |
|------|------------------|------------------------|------------------------|----------------------|---------|
| I | 34 | 10 | 16 | 8 | 53 |
| II | 54 | 4 | 1 | 49 | 98 |

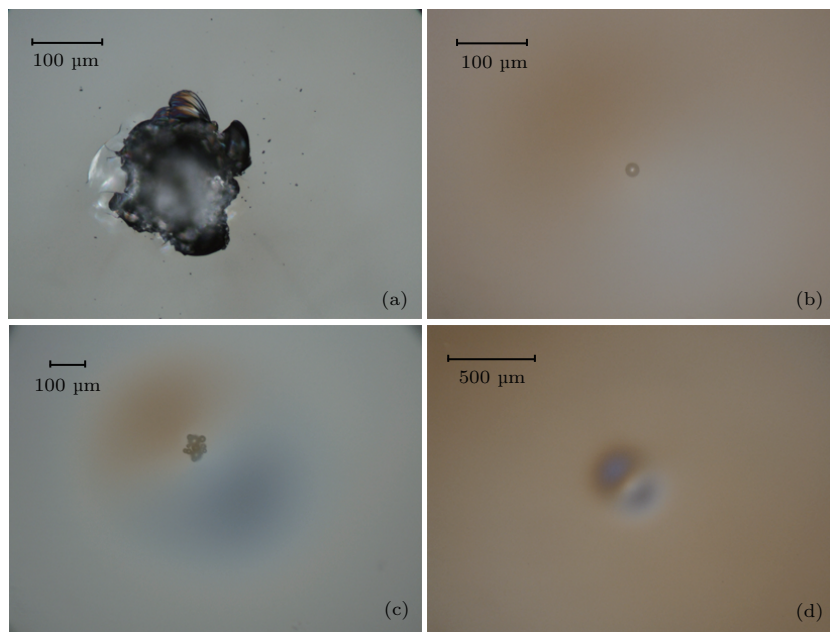


图5 修复点光学显微镜图片 (a) 原始损伤点; (b) 1个气泡形式修复点; (c) 多个气泡形式修复点; (d) 无气泡形式修复点
Fig. 5. Micrographs of (a) original damage site, (b) mitigation site including one bubble, (c) mitigation site including some bubbles, (d) mitigation site without bubble.

4.2 激光单点修复中气泡形成机理分析

CO_2 激光非蒸发式单点修复熔石英表面损伤后, 修复点中容易产生气泡. 由图5(a)可以看出, 损伤点周围存在很多微爆裂形成的破碎材料及大量微裂纹, 这些破碎材料颗粒和微裂纹容易附着气体, 其间的空隙容纳空气, 在 CO_2 激光局域辐照加热损伤点时, 如果辐照功率和辐照时间选择不当, 将会导致裂纹闭合之前, 裂纹中的杂质和空气未被完全消除, 导致裂纹包裹空气或者杂质而形成气泡. 蒋勇等[14]认为气泡形成和损伤点形态存在一

定的关系, 损伤坑越深、裂纹越多的损伤点出现气泡的概率越大, 气泡的形成和 CO_2 激光局域辐照温度的分布以及随之带来的局域微结构的性能变化密切相关.

寻找最优化的修复参数, 控制修复过程中的气泡产生, 避免烧蚀和残余应力是保证修复效果的重要因素. 由以上数据结果可以发现, 选择合适的预热功率和预热时间, 有效降低了两个以上多数量气泡形成的概率. 这与熔石英的结构弛豫和裂纹的愈合时间关系紧密, 熔石英的弛豫结构常数 τ 正比于石英玻璃的黏滞系数 η [19], 如(3)式所示:

$$\tau = 10^{-10.5}\eta. \quad (3)$$

而石英玻璃的黏滞系数与温度 T 的关系为 [20]

$$\eta = 3.8 \times 10^{-13} \exp(85638.7/T) \quad (4)$$

$$1300 \text{ K} < T < 1700 \text{ K},$$

$$\eta = 5.8 \times 10^{-7} \exp(61991.8/T) \quad (5)$$

$$1700 \text{ K} < T < 2800 \text{ K},$$

其中, 弛豫时间常数 τ 的单位为秒 (s), 黏滞系数 η 的单位为泊 (poise). 而对于横向宽度为 w 的裂纹, 裂纹愈合时间常数可近似为 [15]

$$\tau_c = \eta w / (\pi \sigma), \quad (6)$$

其中, τ_c 为裂纹愈合时间常数, σ 为表面张力, 熔石英表面张力随温度的变化不大, 因此取值约为 300 dyne/cm. 根据 (3)—(6) 式, 将修复方案中不同功率的熔石英材料的表面峰值温度、黏滞系数、弛豫时间常数和裂纹愈合时间列于表 3.

表 3 不同功率下熔石英材料的物性参数
Table 3. Performance parameters of fused silica with different CO₂ laser power irradiation.

| 激光功率 P/W | 表面峰值温度 T/K | 黏滞系数 η/poise | 弛豫时间常数 τ/s | 1 μm 裂纹愈合时间 τ_c/s |
|---------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| 13 | 1339 | 2.26×10^{15} | 7.16×10^4 | 2.4×10^8 |
| 16.1 | 1587 | 1.04×10^{11} | 3.30 | 1×10^4 |
| 21.8 | 2042 | 8.82×10^6 | 2.79×10^{-4} | 0.9 |
| 25.3 | 2322 | 2.28×10^5 | 7.20×10^{-6} | 0.02 |

由表 3 中熔石英材料物性参数可得, 方案 II 在 13 W 功率下进行长时间低温预热, 其表面峰值温度仅为 1339 K, 远低于表面熔融温度 (2300 K), 在这个温度下熔石英有很大的黏滞系数和很长的弛豫时间常数 (7.16×10^4 s), 在 60 s 的预热工艺时间内, 熔石英材料的结构不会发生变化, 其表面裂纹也不会发生闭合. 因此, 在长时间低温预热下, 裂纹处吸附的杂质将会通过加热而逃逸, 与此同时, 根据理想气体状态方程, 由于结构不变化的前提下, 假设压强体积不变, 裂纹内的空气由于受热膨胀, 将大量减少裂纹内部的气体量, 这是避免裂纹闭合时由于包裹空气或者杂质而形成气泡的根本原因. 预热之后通过 25.3 W 功率高温快速修复, 由表 2 中数据可以看到, 1 μm 宽度裂纹愈合时间仅为 0.02 s. 方案 II 的高功率修复时间 (4 s) 可满足裂纹

的快速消除, 在该温度下熔石英材料发生熔融, 极短的弛豫时间常数表明熔石英材料结构迅速发生了变化并在短时间内达到平衡状态, 有利于修复效果的保证.

方案 I 中在逐渐增加功率预热的两个台阶中, 温度相对较高, 弛豫时间常数较小. 尤其是在预热的第二个阶段, 熔石英虽然未达到熔融状态, 但其结构已经发生显著的变化, 在此时极有可能存在部分杂质被束缚. 同时由于预热时间过短, 裂纹处的空气并不能及时排出, 致使在高功率修复过程中裂纹闭合时由于包裹空气和杂质而形成气泡.

5 结 论

基于熔石英 CO₂ 激光非蒸发式修复光路, 对激光束斑直径为 3 mm CO₂ 激光非蒸发式修复参数进行优化, 得到两种不同预热形式的修复参数方案. 利用两种预热的修复方案对损伤尺寸介于 150—250 μm 之间的损伤点进行修复, 结合深度方向温度分布和结构参数的分析, 对气泡形成机理和控制气泡形成概率进行了研究. 实验结果表明, 基于低温下熔石英材料结构弛豫时间常数较长的特点, 长时间低温预热修复方法可以在不引起熔石英材料结构发生显著变化的同时, 能够极大程度地解吸附表面和裂纹处所附着的气体和杂质, 最终有效降低裂纹闭合过程中气泡形成的概率, 成功提升修复概率至 98%.

参考文献

- [1] Salleo A, Genin F Y, Yoshiyama J, Stolz C J, Kozlowski M R 1998 *Proc. SPIE* **3224** 341
- [2] Raze G, Morchain J M, Loiseau M, Lamaignere L, Josse M A, Bercegol H 2003 *Proc. SPIE* **4932** 127
- [3] Suratwala T I, Miller P E, Bude J D, Steele W A, Shen N, Monticelli M V, Feit M D, Laurence T A, Norton M A, Carr C W, Wong L L 2011 *J. Am. Ceram. Soc.* **94** 416
- [4] Norton M A, Hrubesh L W, Wu Z, Donohue E E, Feit M D, Kozlowski M R, Milam D, Neeb K P, Molander W A, Rubenchik A M, Sell W D, Wegner P 2001 *Proc. SPIE* **4347** 468
- [5] Brusasco R M, Penetrante B M, Butler J A, Hrubesh L W 2002 *Proc. SPIE* **4679** 40
- [6] Mendez E, Nowak K M, Baker H J, Villarreal F J, Hall D R 2006 *Appl. Opt.* **45** 5358

- [7] Liu C M, Yang L, Yan Z H, Jiang Y, Wang H J, Liao W, Xiang X, He S B, Lü H B, Yuan X D, Zheng W G, Zu X T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094701 (in Chinese) [刘春明, 杨亮, 晏中华, 蒋勇, 王海军, 廖威, 向霞, 贺少勃, 吕海兵, 袁晓东, 郑万国, 祖小涛 2013 物理学报 **62** 094701]
- [8] Bouchut P, Delrive L, Decruppe D, Garrec P 2004 *Proc. SPIE* **5252** 122
- [9] Adams J J, Bolourchi M, Bude J D, Guss G M, Matthews M J, Nostrand M C 2010 *Proc. SPIE* **7842** 784223
- [10] Liu H J, Huang J, Wang F R, Zhou X D, Jiang X D, Wu W D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1308 (in Chinese) [刘红婕, 黄进, 王凤蕊, 周信达, 蒋晓东, 吴卫东 2010 物理学报 **59** 1308]
- [11] Zhang C C, Liao W, Zhang L J, Ye Y Y, Chen J, Wang H J, Luan X Y, Yuan X D 2014 *Adv. Cond. Matter Phys.* **2014** 638045
- [12] Jiang Y, Zhou Q, Qiu R, Gao X, Wang H L, Yao C Z, Wang J B, Zhao X, Liu C M, Xiang X, Zu X T, Yuan X D, Miao X X 2016 *Chin. Phys. B* **25** 108104
- [13] Guss G, Bass I, Draggoo V, Hackel R, Payne S, Lancaster M, Mak P 2006 *Proc. SPIE* **6403** 64030M
- [14] Jiang Y, Qiu R, Yang Y J, Liao W, Wang H J, Yuan X D, Liu C M, Xiang X, Zu X T 2014 *J. Optoelectronics Laser* **25** 1326 (in Chinese) [蒋勇, 邱荣, 杨永佳, 廖威, 王海军, 袁晓东, 刘春明, 向霞, 祖小涛 2014 光电子激光 **25** 1326]
- [15] Yang S T, Matthews M J, Elhadj S, Cooke D, Guss G M, Draggoo V G, Wegner P J 2010 *Appl. Opt.* **49** 2606
- [16] Feit M D, Rubenchik A M 2002 *Proc. SPIE* **4932** 91
- [17] Mendez E, Nowak K M, Baker H J, Villarreal F J, Hall D R 2006 *Appl. Opt.* **45** 5358
- [18] Jiang Y, He S B, Yuan X D, Wang H J, Liao W, Lü H B, Liu C M, Xiang X, Qiu R, Yang Y J, Zheng W G, Zu X T 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 068105 (in Chinese) [蒋勇, 贺少勃, 袁晓东, 王海军, 廖威, 吕海兵, 刘春明, 向霞, 邱荣, 杨永佳, 郑万国, 祖小涛 2014 物理学报 **63** 068105]
- [19] Zhao J, Sullivan J, Zayac J, Bennett T D 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 5475
- [20] Doremus R H 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 7619

Formation and control of bubbles during the mitigation of laser-induced damage on fused silica surface*

Zhang Li-Juan Zhang Chuan-Chao Chen Jing Bai Yang Jiang Yi-Lan Jiang Xiao-Long
Wang Hai-Jun Luan Xiao-Yu Yuan Xiao-Dong Liao Wei[†]

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

(Received 14 August 2017; revised manuscript received 30 September 2017)

Abstract

Surface damage on fused silica optics initiated by high fluence 351 nm laser is one of the major bottlenecks for the high power laser systems, such as, Shenguang III (SG-III) laser facility. Generally, the CO₂ laser, which is strongly absorbed by fused silica and thus can effectively heat fused silica above melting temperature, is used to locally mitigate the damages, called the non-evaporative mitigation method. However, subsurface bubbles may be introduced in the damage mitigation process by CO₂ laser melting. Unfortunately, the mitigated damage sites with subsurface bubbles can be easily re-initiated upon subsequent laser shots. In this article, in order to eliminate the subsurface bubbles, we systematically investigate the influences of mitigation protocols in different ways of laser irradiation preheating on the formation and control of subsurface bubbles. Based on the simulated results of the temperature distribution and structural changes under CO₂ laser irradiation, two CO₂ laser-based non-evaporative mitigation methods are proposed, which are adopted for the mitigation of surface damage sites ranging in size from 150 μm to 250 μm, and systematically investigated to assess the effect of eliminating subsurface bubbles. The process of mitigation method I is that multiple laser irradiations with short time and increasing power are initially used to preheat the damage site and then a higher power laser irradiation is adopted to mitigate the damage site. The process of mitigation method II is that a long time, low power laser irradiation is first used to preheat the damage site and then a high power laser irradiation is adopted to mitigate the damage site. The detailed morphologies of the mitigation sites and subsurface bubbles produced by the two mitigation methods are measured by optical microscope with high magnification. A large number of small subsurface bubbles are observed in mitigation method I. While, less subsurface bubbles are observed in mitigation method II. The statistical results indicate that among the thirty-four mitigated sites, only eight have no surface bubbles in method I. In contrast, among the fifty-four mitigated sites, forty-nine have no surface bubbles in mitigation method II. The experimental results suggest that the formation probability of subsurface bubbles is effectively suppressed by the mitigation method II. The mechanism of eliminating subsurface bubbles in the mitigation method II is discussed based on the structural changes of the fused silica in the mitigation process. It is found that the fused silica is not melted by the long time, low power laser irradiation, which means that a long time preheating without melting could provide enough time to effectively reject air and impurities enwrapping in cracks, and thus reducing the formation probability of subsurface bubbles in the form of the crack closing due to rapid melting. With the mitigation method II, the probability of mitigated sites without subsurface bubbles can reach 98%.

Keywords: fused silica, CO₂ laser mitigation, bubble, laser damage

PACS: 61.80.Ba, 42.70.Ce, 47.55.db, 61.80.-x

DOI: 10.7498/aps.67.20171839

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11404301, 61505185).

† Corresponding author. E-mail: liaowei@caep.cn