

连续 CO₂ 激光对熔石英表面的增强处理研究*

龚 辉 王明利 程 雷 夏晋军 李成富

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 研究了连续 CO₂ 激光预辐照对熔石英表面增强的影响,通过 CO₂ 激光对熔石英表面均匀加热,用原子力显微镜和偏光显微镜观察了熔石英表面微观结构变化,发现熔石英表面形成压应力层,表面微裂纹和凹凸度减少。并用调 Q 1.06 μm 激光对熔石英表面损伤,其损伤阈值提高了 1.53 倍。

关键词 激光预辐照,激光损伤,激光表面增强

1 引 言

抗激光加固技术的研究在高功率激光系统的发展中具有重要作用。为了提高光学材料抗激光损伤能力,目前有多种技术,首先是进一步改进生产和制备工艺,提高光学元件本身内在质量;二是采用新型抗激光损伤能力强的复合材料;三是设计新的光学系统,使强激光不能直接照射到薄弱光学元件。然而,光学材料在制备和加工过程中必然会产生许多缺陷,所以采用有效的后处理方法来加固导引光学系统元件是非常重要的。

最近几年,一种新的光学材料后期增强处理方法:激光预辐照,又称之为激光“退火”,迅速发展起来^[1-6],它是利用低于材料破坏阈值下的激光能量(功率)辐照材料,使其抗激光损伤阈值增加。一般有二种机制,一种认为激光起到清除表面污物(大气中水或杂质)的作用^[1-3],另一种机制认为激光加热材料,使材料晶化^[4]或者表面抛光^[6],减小粗糙度。

熔石英透过光谱性能好、物理化学性能稳定,是良好的中红外光学材料。本文讨论了利用 CO₂ 激光增强熔石英表面抗激光损伤能力,分析了材料改性机制。由于 CO₂ 激光加热熔石英表面,冷却后形成一层压应力层,从而减少表面微裂纹和降低表面凹凸程度,达到改良表面特征,提高抗激光强度的目的。

2 实 验

2.1 样品准备

我们选用了新沪玻璃厂生产的熔石英,它是以四氯化硅为原材料,在氢氧焰中直接水解并熔融而成,其透光范围为 0.18~ 3.5 μm,是良好的中红外窗口材料,可用作窗口材料和整流罩

* 大连理工大学三束改性国家实验室资助。

材料。实验所用样品均从一块大的熔石英材料中切下,尺寸为 $15 \times 15 \times 15$ (mm),并进行精细抛光和退火。

2.2 CO₂ 激光处理

样品 S₂₋₄ 利用连续 CO₂ 激光远场辐照,功率密度为 240 W/cm^2 ,垂直入射,样品上激光光斑均匀分布。三块样品辐照时间分别为 2, 5, 10 s。样品表面没有观察到宏观破坏,但是表面形成一层压应力层。图 1 显示了样品预辐照前后的应力变化图, (a), (b), (c) 分别为未辐照样品、辐照后正面图(激光辐照方向)和侧面图(垂直激光辐照方向)。所得照片均是利用偏光显微镜拍摄。CO₂ 激光辐照后应力形成过程可用图 2 描述:激光加热样品表面,表面温度升高,表面扩张凸起(如图 2(a))。如果温度未达到软化温度,冷却后不能形成应力层,表面恢复原来形状;但是当表面温度升高至材料软化温度,则样品表面软化扩展,如图 2(b)所示。冷却后样品表面凹陷,形成压应力层,如图 2(c)所示。值得注意的是,当 CO₂ 激光照射时间过长或功率密度过高时,熔石英表面会发生宏观熔融破坏,如图 3 所示。在利用 CO₂ 激光进行预辐照时,必须控制好总辐照能量,这与材料热性质有关。另外,所有样品都进行了光谱测试,样品的透射光谱未发生变化。

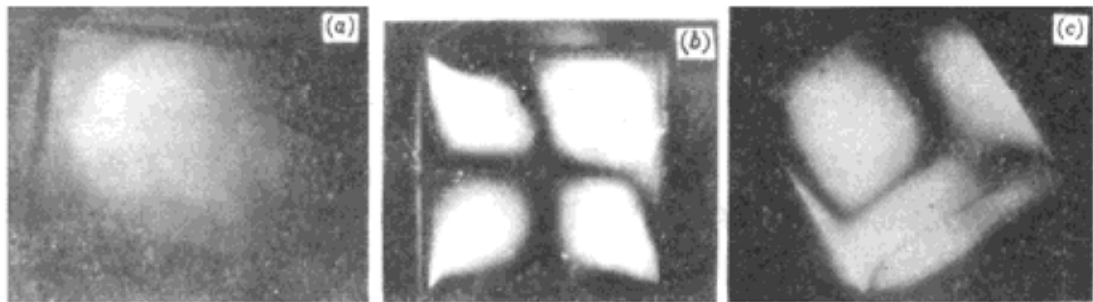


图 1 熔石英表面预辐照前后应力图

(a) 未辐照; (b) 辐照后正面(激光辐照方向); (c) 辐照后侧面(垂直激光辐照方向)

Fig. 1 Residual strain present before and after CW CO₂ laser pre-irradiation

(a) original; (b) CW CO₂ laser pre-irradiation (face); (c) CW CO₂ laser pre-irradiation (side)

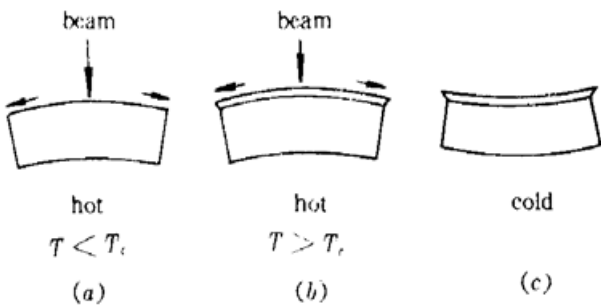


图 2 熔石英表面应力形成示意图

Fig. 2 A schematic representation of the mechanism for producing strain in a CW CO₂ laser-processed sample (T_c —a critical flow temperature)

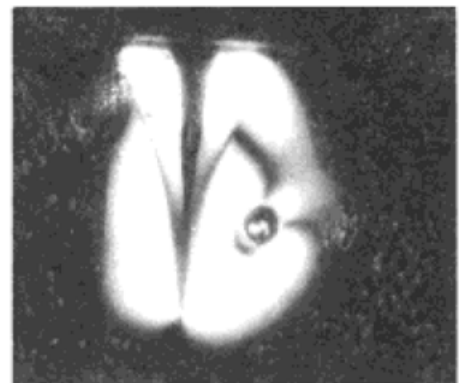


图 3 熔石英表面熔融破坏形貌

Fig. 3 CO₂ laser induced damage of fused silica

2.3 激光损伤阈值测试

我们利用调 Q -Nd·YAG 激光, 脉宽为 10 ns, 单横模, 进行损伤试验。激光通过透镜聚焦在样品表面, 光斑为 55 μm(利用刀口扫描法测量)。损伤观察利用光学显微镜。这里激光损伤采用 1-on-1 方式, 损伤阈值定义为损伤几率为 50% 处。测试结果如表 1 所示, 经过 CO₂ 激光预辐照后, 样品表面抗激光损伤阈值提高, 最大的是未处理石英表面损伤阈值的 1.53 倍, 熔石英表面损伤阈值的增加与 CO₂ 激光辐照沉积能量有关, 如图 4 所示, 表面沉积能量增加, 激光表面损伤阈值单调增加。

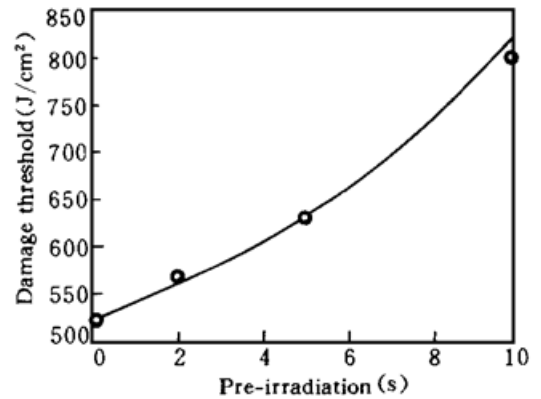


图 4 激光预辐照材料表面沉积能量与材料损伤阈值的关系

Fig. 4 Dependence of damage thresholds of fused silica surface on CW CO₂ laser pre-irradiation time

表 1 CO₂ 激光预辐照石英玻璃的表面损伤阈值结果

Table 1 The surface damage thresholds of fused silica pre-irradiated by CO₂ laser

fused silica	laser	power density (W/cm ²)	time (s)	damage threshold (J/cm ²)
S ₁	-	-	-	523
S ₂	CO ₂	240	2	569
S ₃	CO ₂	240	5	632
S ₄	CO ₂	240	10	802

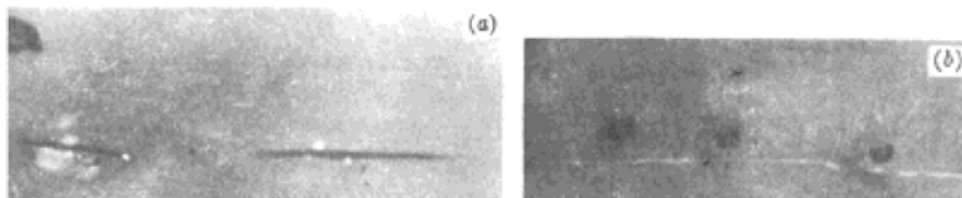


图 5 1.06 μm 激光对熔石英表面损伤形貌图。(a) 裂纹; (b) 环形坑

Fig. 5 Reflected optical micrographs showing surface damage morphologies. (a) cracks; (b) craters

2.4 损伤形貌分析

样品的表面激光损伤形貌利用反射光学显微镜观察, 发现有二种损伤形式: 一种是裂纹, 一种是环形坑, 如同火山口一般, 如图 5 所示。

熔石英表面加工过程中, 表面总要形成凹凸粗糙不平的结构, 并且有微裂纹从表面深入体内^[7], 现在从观察到的激光损伤形貌可以推断, 裂纹损伤是熔石英表面微裂纹在受到激光照射后扩展形成, 而环形坑损伤是表面凹凸粗糙造成激光强度局部增强(如同透镜聚焦), 形成局部高温, 从而发生喷射, 形成环形火山口样损伤。为了进一步验证环形坑形成机制, 我们利用原子力显微镜拍摄了形貌, 如图 6 所示。可以看

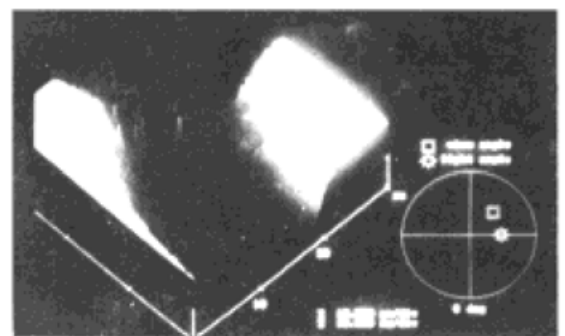


图 6 原子力显微镜拍摄的环形坑损伤形貌

Fig. 6 AFM microscopy showing damage morphology of a crater

到环形坑是局部凹凸不平喷射形成。样品表面裂纹和凹凸不平是造成激光损伤的主要原因。

2.5 熔石英表面形貌分析

利用原子力显微镜探测了样品表面在激光预辐照前后的变化。发现裂纹和表面凹凸粗糙明显减少,图7显示了这种变化,这进一步证实了我们的推断,对于熔石英表面激光损伤,微裂纹和表面凹凸是引起损伤的根本原因。

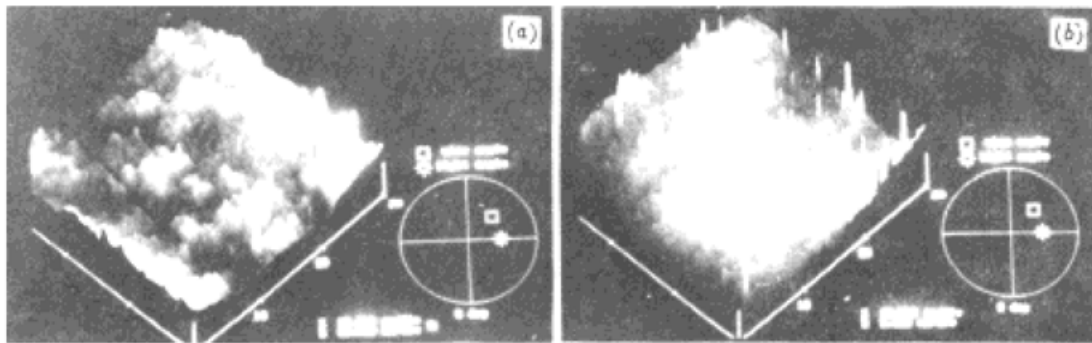


图7 原子力显微镜拍摄的熔石英表面激光预辐照前后形貌图。(a) 辐照前;(b) 辐照后

Fig.7 AFM topographic image of fused silica surface. (a) S1 sample (no-irradiation); (b) S4 sample (after irradiation)

参 考 文 献

- 1 J. O. Porteus, W. N. Faith, J. W. Arenberg. Laser desorption analysis of H₂O and other contaminants from optical surfaces. *Nat. Bur. Stand. (U.S.) Spec. Publ.*, 1981, **638**: 273~ 279
- 2 J. E. Swain, W. H. Lowdermilk, D. Milam. Raising the surface damage threshold of neutral solution processed BK-7 by pulse laser irradiation. *Nat. Bur. Stand. (U.S.) Spec. Publ.*, 1982, **669**: 292~ 304
- 3 M. E. Frink, J. W. Arenberg, E. A. Hildum. Temporary laser damage threshold enhancement by laser conditioning of anti-reflection coated glass. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**: 415~ 422
- 4 A. F. Stewart, A. H. Guenther. The properties of laser annealed dielectric films. *Nat. Inst. Stand. Tech. (U.S.) Spec. Publ.*, 1988, **775**: 259~ 263
- 5 J. E. Swain, S. E. Stokowski, D. Milam *et al.*. The effect of baking and pulsed laser irradiation on the damage threshold of potassium dihydrogen phosphate crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**: 12~ 18
- 6 P. A. Temple, W. H. Lowdermilk, D. Milam. Carbon dioxide laser polishing of fused silica surfaces for increased laser-damage resistance at 1064 nm. *Appl. Opt.*, 1982, **21**: 3249~ 3257
- 7 P. Paul Hed, David F. Edwards. Optical glass fabrication technology. 2: Relationship between surface roughness and subsurface damage. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(21): 4677

CW CO₂ Laser Strengthening of Fused Silica Surfaces

Gong Hui Wang Mingli Cheng Lei Xia Jingjun Li Chengfu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract This paper investigates the effect of laser pre-irradiation on strengthening of fused silica surfaces. Fused silica surfaces heated evenly with CW CO₂ laser radiation under go in changes including residual compress stress occurred, peak-to-valley and microcracks decreased, which are observed by polarized microscopy and atom force microscopy. Damage thresholds of fused silica surfaces measured with a Q-switched Nd:YAG laser increase by a factor of 1.53 after pre-irradiation.

Key words laser pre-irradiation, laser induced damage