

文章编号: 1001-4322(2007)09-1547-04

熔石英亚表面划痕激光诱导损伤阈值实验研究^{*}

田东斌^{1,2}, 祖小涛¹, 袁晓东², 徐世珍¹, 郭袁俊¹,
蒋晓东², 李绪平¹, 吕海兵², 郑万国²

(1. 电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 用原子力显微镜和光学显微镜观测酸蚀后熔石英亚表面划痕, 并根据形貌特征将其分为 Boussinesq-point-force crack (BPFC)、Hertzian-conical scratch (HCS) 和 Plastic indent (PI) 三类, 测试了各类划痕的损伤阈值, 讨论了激光损伤机制。结果表明锐度较大的 BPFC 损伤阈值不超过 2.0 J/cm^2 ; 深度小于 $1 \mu\text{m}$ 的 HCS 阈值可达 2.6 J/cm^2 ; 形变较大的 PI 阈值至 2.8 J/cm^2 , 形变较小的 PI 的激光损伤阈值与无缺陷材料相当。BPFC 和深度超过 $1 \mu\text{m}$ 的 HCS 是导致熔石英损伤阈值低的主要因素。

关键词: YAG 激光; 熔石英; 亚表面缺陷; 损伤阈值

中图分类号: TN012

文献标识码: A

大功率激光系统中光学材料的损伤包括本征损伤和缺陷损伤^[1-3], 缺陷损伤主要为表面或亚表面划痕、凹坑、杂质以及结构微缺陷造成的热破坏和场破坏^[2-4]。划痕是诱导光学材料破坏的主要因素之一, 是在研磨、抛光等加工过程中形成的, 形态各异, 主要分布在熔石英的表面和亚表面。划痕诱导损伤主要是划痕对电场的调制引起的场增强、划痕中残留的微粒和表面断裂过程中形成的非桥氧键中心 (NBO HCS) 和缺氧中心 (ODC) 形成吸收中心造成的热破坏和材料亚表面机械强度的弱化^[5]。

光学器件在紫外波段抗激光辐照损伤的能力是提高高功率激光器高通量输出的“瓶颈”, 导致损伤阈值偏低的主要因素是表面和亚表面缺陷。表面、亚表面缺陷的激光损伤是研究了 30 多年的热点问题之一。N. Bloembergen 首先用静电场理论模拟微裂纹附近的场增强^[4], F. Y. Génin 等用 TEMPEST CODE 模拟一定尺寸的划痕周围的光强分布, 指出影响光强分布的主要因素是划痕的形状、几何尺寸、方位角、激光的入射角和波长^[3]。H. Bercegol 等讨论了 10 mN 和 30 mN 载荷产生的划痕在基频和三倍频时的损伤情况^[6]。P. E. Miller 等讨论了划痕粗糙度和尺寸的关系, 并用图形图像处理方法对熔石英表面划痕的长度、宽度、深度和面密度给出定量关系^[7]。A. V. Hamza 和 M. D. Feit 等将划痕诱导激光损伤归结为场破坏、热破坏和表面机械性能的弱化^[8-9]。王毅、柴立群等采用时阈有限差分法 (FD TD) 进行数值模拟, 从理论上得出划痕的几何结构和损伤阈值之间的对应关系^[3, 10-11]。熔石英亚表面划痕形貌对激光诱导损伤的影响的实验研究比较少, 特别是对磁流变抛光^[12]后熔石英后表面残留亚微米级划痕的实验研究目前国内外都未见报道。

本文通过扫描原子显微镜和光学显微镜观测表面划痕形貌和结构特征, 对熔石英表面的划痕根据其产生的应力场进行简单分类。针对不同形貌特征的划痕, 用波长 351 nm (3)、脉宽 6.8 ns 、重复频率 1 Hz 和焦斑面积 3 mm^2 的 SA GA-YAG 固体激光器近高斯光束辐照熔石英表面, 测试表面缺陷的激光损伤几率随通量的分布。

1 实验

1.1 表面酸蚀

实验用肖特公司提供的尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的熔石英基片。光学元件在制造过程中 (如切割、抛光等) 难以避免地会引入许多形状复杂、尺寸不一的划痕。实验前先用 1% 的氢氟酸将基片表面浸泡 10 min, 对熔石英表面进行酸蚀, 以研究亚表面缺陷。

1.2 划痕的检测

用 Nikon E600 K 光学显微镜观测熔石英表面划痕的形貌, 用扫描原子力显微镜 SEI100 测量不同形貌划

* 收稿日期: 2007-04-03; 修订日期: 2007-06-12

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 教育部新世纪优秀人才支持计划资助课题 (NCET-04-0899)

作者简介: 田东斌 (1977 -), 男, 硕士研究生, 主要从事光学元件表面的激光损伤研究。

联系地址: 祖小涛, 电子科技大学应用物理系, xtzu@uestc.edu.cn。

痕的宽度和深度分布特征。

1.3 损伤阈值的测试

用 SAGA-YAG 激光器 (波长 351 nm, 脉宽 = 6.8 ns, 光斑面积 3 mm², 近场近高斯型分布, 重复频率 1 Hz), 划痕置于激光的出射面, 以 $n=1$ 的方式测试损伤阈值, 激光能量逐渐增加至发生损伤为止, 每类划痕测试了大小不同的 10 个点, 然后计算随通量增大时的损伤几率。最后按经验公式^[1] 估算为 1 ns 脉宽时熔石英的损伤阈值。

2 实验结果与讨论

2.1 划痕的形貌特征和形成机理

熔石英表面划痕的几何形貌如图 1 和图 2 所示。在切割、研磨、抛光和清洗等过程中, 不可避免地在表面和亚表面层产生缺陷、裂缝及残余应力。裂缝的产生主要来自于加工过程中外加的载荷, 根据载荷产生的应力场即 Boussinesq elastic field 和 Hertzian elastic field 的特点和研磨头形状的不同, 将划痕分为 Boussinesq point-force crack (BPFC), Hertzian-conical scratch (HCS) 和 plastic indent (PI) 三类如图 1 所示。图 2 为各类划痕对应的原子力显微形貌。实验测试的 BPFC 的宽度是 1.36 ~ 2.77 μm , 深度 270 ~ 892 nm; HCS 的宽度和深度范围分别为 0.17 ~ 0.76 μm 和 50 ~ 99 nm; PI 的分别为 0.12 ~ 1.18 μm 和 26 ~ 66 nm。BPFC 是加工过程中压头受到不连续载荷的作用, 在表面和亚表面层中形成凹陷连成的大小不一的线状划痕, 压点呈间断分布, 这类划痕形态复杂, 对电场的作用也比较复杂; HCS 主要由球形压头研磨表面产生的圆锥形状划痕, 在表面的分布密度较大, 有的划痕周围出现碎裂而呈齿状, 这类划痕对不同方向入射光的响应也不同, 深度超过 1 μm 的 HCS 对电场的调制非常强, 阈值与 BPFC 的相当, 甚至更低; PI 是作用于熔石英表面的压头所受外加载荷较小, 在熔石英表面形成的塑性凹槽而没有脆性破裂, 表面机械性能弱化, 增强了对光的吸收。

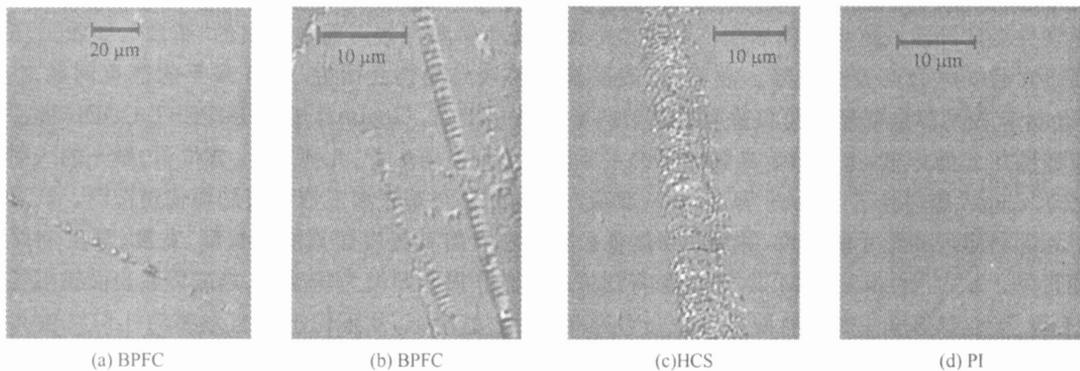


Fig. 1 Morphology of cracks in fused-silica sub-surface

图 1 熔石英亚表面划痕形貌特征的显微照片

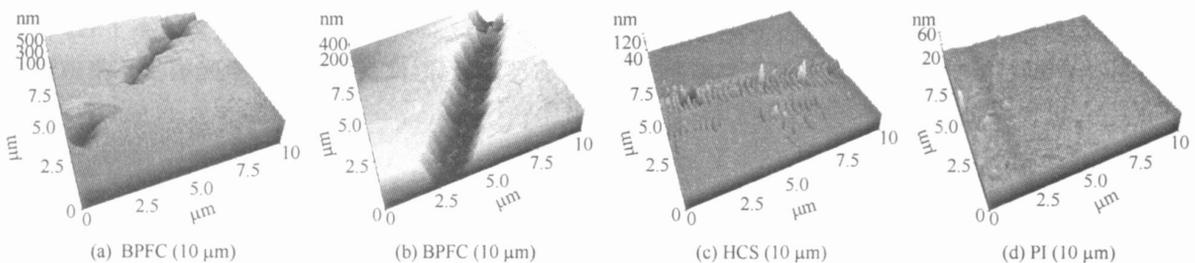


Fig. 2 AFM morphology of different cracks in fused-silica sub-surface (corresponding to parts of cracks in Fig. 1)

图 2 熔石英亚表面不同形貌特征的划痕的原子力显微图 (对应于图 1 划痕上的一小段)

2.2 激光损伤阈值

不同形貌特征划痕的激光辐照损伤几率随通量的变化关系如图 3 所示。激光辐照同一类型的划痕, 当通量逐渐增加时材料的损伤几率不断增大, 实验中绝大部分的损伤点沿划痕分布, 如图 4 所示。表面存在划痕时, 熔石英的损伤阈值远低于无缺陷表面损伤阈值 (3.3 J/cm²)。不同类型的划痕对损伤阈值的影响不同, BPFC 主要是场破坏和热破坏共同作用, 部分损伤点分布在划痕的两侧, 由于裂缝调制光场使局部电场增强而超过材料的电离能, 场增强主要是前表面裂缝对激光的衍射和裂缝边界菲涅耳反射和散射光的干涉引起的场

增强,而场增强区无论材料或是杂质都容易电离形成离子区,大量的激光能量会被吸收,局部温度急剧升高而产生光声、光热效应,以及电子崩电离等现象破坏材料的结构^[2,13];划痕中较深的位置首先发生损伤,其中的缺陷和微粒对光的吸收最强,划痕的锐度较大,小通量(小于 2.0 J/cm^2)情况下陷阱发生热破坏,出现熔融和溅射现象,损伤沿划痕扩散。深度小于 $1 \mu\text{m}$ 的 HCS 主要是热破坏,其典型过程为材料破裂过程中形成的吸收中心和划痕中包裹的杂质微粒吸收激光能量,产生熔融炸裂甚至电子崩电离破坏^[3],对激光损伤的影响也比较大,通量没有超过 2.6 J/cm^2 ,如果 HCS 较深(大于 $1 \mu\text{m}$)且含有其他杂质,其影响要大于表面划痕的分布密度。形变较大的 PI 的最大通量可达 2.8 J/cm^2 ,形变较小时与无缺陷表面的相当,PI 中几乎不含有其它杂质,但表面形变降低了表面的机械性能,形变越大,损伤阈值越低。划痕碎裂时形成很多裂缝的尖端,当裂缝吸收能量超过它的平衡能量时,裂缝端的应力场作用使损伤扩展,当温度升到足够高(熔点或沸点),热应力超过材料的断裂强度时,材料出现熔融或炸裂,表面熔融物常伴随蒸发溅射,产生的热冲击波和材料溅射对基体的反向冲击波导致进一步的破坏^[14]。

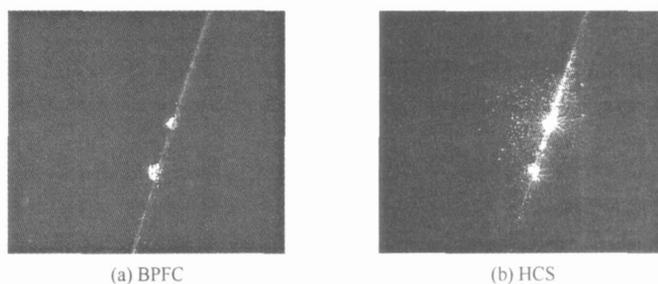


Fig. 4 Microscopic morphology of different cracks real-time monitored in dark-field

图 4 暗场实时监测的不同形貌划痕的损伤显微图像

将 BPFC 置于激光入射表面,用同样通量的激光垂直辐照划痕,未见损伤,当通量增加到 2.35 J/cm^2 时熔石英后表面发生熔融炸裂,如图 5 所示,而前表面划痕未观察到明显变化。根据划痕诱导损伤机制,可以认为前表面划痕对光的调制引起后表面的破坏,光场对处于其中的划痕的直接破坏影响较小。表面划痕的形态各异,分布也比较复杂,对光场的调制差异较大。通常各种形貌的几条划痕连在一起,相互交叉形成网格状分布在熔石英表面,对光场的调制效果明显强于单划痕的影响。F. Y. Génin 等人用 TEMPEST 软件模拟计算熔石英表面平面划痕和 HCS 痕电场分布,在全内反射情况下,HCS 表面相干光强度可达原来的 27 倍^[3]。此时场致损伤的效果明显,损伤点也分布在划痕网格的中间。

3 结 论

本文研究了熔石英表面不同形貌的单一划痕对激光辐照损伤阈值的影响,BPFC 对激光损伤的影响最大,其损伤主要是由于划痕中残留的吸收微粒和表面破裂过程中结构变化形成的吸收中心造成的热破坏和裂缝调制光场使局部电场增强而形成的场破坏,损伤阈值不超过 2.0 J/cm^2 ;深度小于 $1 \mu\text{m}$ 的 HCS 损伤阈值可达 2.6 J/cm^2 ,热破坏是导致材料损伤的主要原因,划痕深度对损伤阈值的影响较大;形变较大的 PI 沉积激光能量,最大通量可达 2.8 J/cm^2 ,形变较小的 PI 的激光损伤阈值与无缺陷表面的相当。因此,工程应用中应尽量避免 BPFC 和深度超过 $1 \mu\text{m}$ 的 HCS。

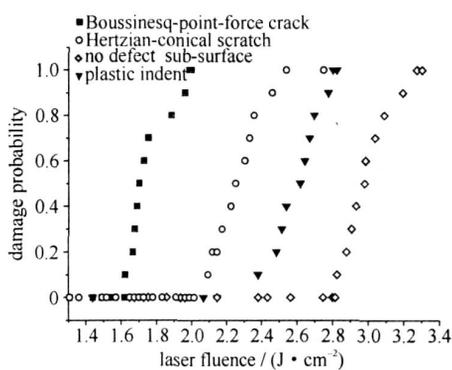


Fig. 3 Damage probabilities of different cracks change with the fluence of laser

图 3 不同形貌划痕的损伤几率随通量的变化

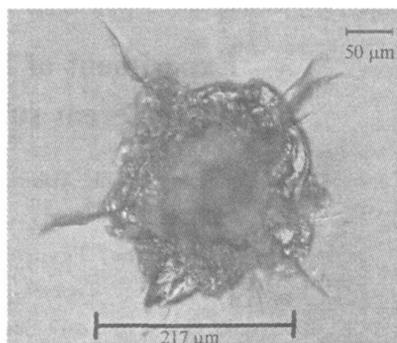


Fig. 5 Laser irradiating at the input sub-surface, the initiation of damage at the output sub-surface

图 5 激光辐照熔石英前表面划痕,后表面出现熔融碎裂现象

参考文献:

- [1] 陈飞, 孟绍贤. 光学材料破坏机理[J]. 物理学进展, 1998, **18**:187-206. (Chen F, Meng S X. Damage mechanisms of optical material. *Physics Progress*, 1998, **18**:187-206)
- [2] 孙承纬, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. (Sun C W, Lu Q S, Fan Z X, et al. Laser irradiation effect. Beijing: National Defense Industry Press, 2002)
- [3] Génin F Y, Salleo A, Pistor T V. Role of light intensification by cracks in optical breakdown on sub-surfaces[J]. *J Opt Soc Am A*, 2001, **18**:2607-2616.
- [4] Bloembergen N. Role of crack pores, and absorbing inclusions on laser induced damage threshold at sub-surfaces of transparent dielectrics [J]. *Appl Opt*, 1973, **12**:661-664.
- [5] Stevens Kalceff M A, Wong J. Distribution of defects induced in fused silica by ultraviolet laser pulses before and after treatment with a CO₂ laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **97**: 113519.
- [6] Bercegol H, Courchinoux R, Josse M, et al. Observation of laser induced damage in fused silica initiated by scratches[C]// Proc of SPIE, 2004, **5467**:78-85.
- [7] Miller P E, Suratwala T I, Wong L L, et al. The distribution of subsurface damage in fused silica[C]// Proc of SPIE. 2005, **5991**:1-25.
- [8] Hamza A V, Siekhaus W J, Rubenchik A M, et al. Engineered defects for investigation of laser-induced damage of fused silica at 355 nm [C]// Proc of SPIE, 2002, **4679**:96-107.
- [9] Feit M D, Rubenchik A M. Influence of sub-surface cracks on laser induced sub-surface damage[R]. UCRL-CONF-155394, 2003.
- [10] 王毅, 许乔, 柴立群, 等. 熔石英表面划痕附近电磁场分布模拟分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(1):67-70. (Wang Y, XU Q, Cai L Q, et al. Simulation and analysis of electromagnetic field distributing around fused silica scratch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(1):67-70)
- [11] 柴立群, 葛德彪, 许乔, 等. 光学元件表面微结构的局域场分布特性研究[J]. 光学技术, 2005, **31**(1):24-26. (Cai L Q, Ge D B, Xu Q, et al. Study of distribution of electromagnetic field around micro-structure of optical element surface. *Optical Technology*, 2005, **31**(1):24-26)
- [12] Menapace J A, Dixit S N, Genin F Y, et al. Magnetorheological finishing for imprinting continuous phase plate structure into optical sub-surface[R]. UCRL-CONF-153850, 2003.
- [13] Merkle L D, Kitriotis D. Temperature dependence of laser-induced bulk damage in SiO₂ and borosilicate glass[J]. *Phys Rev B*, 1988, **38**: 1473-1482.
- [14] 王毅. 亚表面缺陷诱导损伤的机理和实验技术研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2005. (Wang Y. Mechanism of subsurface defect induce damage and study of experience and technology. Mianyang: CAEP, 2005)

Experiment of laser induced damage threshold for different sub-surface cracks on fused silica

TIAN Dong-bin^{1,2}, ZU Xiao-tao¹, YUAN Xiao-dong², XU Shi-zhen¹, GUO Yuan-jun¹,
JIANG Xiao-dong², LI Xu-ping¹, LÜ Hai-bing², ZHENG Wan-guo²

(1. Institute of Physics and Electronics, University of Electronic Science and

Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: The micro sub-surface cracks of fused silica are observed by AFM and optical microscope. Due to the morphology characters, the cracks are sorted into three types: Boussinesq-point-force crack (BPFC), Hertzian-conical scratch (HCS) and plastic indent (PI). The laser induced damage thresholds of the cracks are measured. The damage mechanism is also discussed. The results show that the damage threshold of sharp tip BPFC is less than 2.0 J/cm², that of HCS get to 2.6 J/cm², and that of PI with large shape change is 2.8 J/cm². The laser induced damage threshold of PI with small change is parallel with that of perfect surface. It is obvious that BPFC and HCS with depth more than 1 μm are the main factors to decrease the laser induced damage threshold of fused silica.

Key words: YAG laser; Fused silica; Sub-surface cracks; Damage threshold