

高功率激光装置熔石英紫外损伤增长研究

韩伟 冯斌 郑奎兴 朱启华 郑万国 巩马理

Laser-induced damage growth of fused silica at 351 nm on a large-aperture high-power laser facility

Han Wei Feng Bin Zheng Kui-Xing Zhu Qi-Hua Zheng Wan-Guo Gong Ma-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 246102 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.246102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.246102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

质子束辐照单层石墨烯的损伤效应

Damage effects of proton beam irradiation on single layer graphene

物理学报.2017, 66(2): 026103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.026103>

强脉冲电子束辐照材料表面形貌演化的模拟

Simulation on surface morphology evolution of metal targets irradiated by intense pulsed electron beam

物理学报.2015, 64(21): 216102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.216102>

基于 1/f 噪声的 NPN 晶体管辐照感生电荷的定量分离

Quantitative separation of radiation induced charges for NPN bipolar junction transistors based on 1/f noise model

物理学报.2015, 64(13): 136104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.136104>

栅控横向 PNP 双极晶体管基极电流峰值展宽效应及电荷分离研究

The base current broadening effect and charge separation method of gate-controlled lateral PNP bipolar transistors

物理学报.2014, 63(11): 116101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.116101>

氦离子低温预辐照对不锈钢中氦泡生长抑制作用的 Monte Carlo 模拟研究

Inhibition effect of low-temperature pre-irradiation of helium ions on the growth of helium bubble in stainless steel: a Monte Carlo simulation

物理学报.2014, 63(10): 106102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.106102>

大功率激光装置熔石英紫外损伤增长研究*

韩伟¹⁾²⁾ 冯斌²⁾ 郑奎兴²⁾ 朱启华²⁾ 郑万国²⁾ 巩马理^{1)†}

1)(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

2)(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2016年7月26日收到; 2016年9月12日收到修改稿)

基于大口径大功率激光装置开展了熔石英紫外损伤增长的实验研究. 研究表明: 在5 ns平顶脉冲的紫外激光辐照下, 熔石英后表面损伤点尺寸随激光发次主要服从指数增长规律, 且损伤增长速率随激光通量的增加而上升; 但是, 在相同的激光通量下损伤增长速率并非一个恒定值, 而是存在一定的分布范围, 说明除激光通量外还存在其他的影响因素. 进一步的统计分析表明, 在相同的激光通量下, 小尺寸损伤点的平均增长速率高于大尺寸损伤点, 表明损伤增长速率不仅与激光通量有关, 还与损伤点尺寸有关. 由于损伤增长主要源于损伤坑轴向和纵向裂纹在力学作用下发生扩展, 因此小尺寸损伤点增长速率高于大尺寸损伤点增长速率说明小尺寸损伤点更易将激光能量耦合为弹性应变能. 研究结果对熔石英使用寿命的精确预测和损伤机理的深入认识具有重要意义.

关键词: 激光损伤, 损伤增长, 熔石英, 表面

PACS: 61.80.-x, 42.70.Ce, 42.55.f

DOI: 10.7498/aps.65.246102

1 引言

光学元件的激光损伤是制约大功率激光装置稳定运行的关键瓶颈^[1], 这是因为激光损伤一方面引起系统损耗上升, 降低装置的输出能力, 另一方面缩短元件使用寿命, 影响装置的稳定运行. 其中, 熔石英元件的紫外损伤问题尤为致命, 因为熔石英紫外损伤增长阈值约为4 J/cm², 一旦发生初始损伤^[2-4], 在后续激光辐照下(激光通量超过熔石英损伤增长阈值), 直径约数十微米的初始损伤点将迅速扩大至毫米量级^[5-12], 导致元件无法使用.

国内外开展了大量工作以期解决熔石英的紫外损伤问题. 研究表明, 熔石英紫外损伤分为初始损伤^[2-4]和损伤增长^[5-12](即损伤点在后续发次的激光辐照下发生尺寸增长). 由于熔石英初始损伤阈值远低于熔石英的本征损伤阈值, 目前普遍认为熔石英初始损伤主要源于各种外部缺陷, 如元件

加工和使用过程中产生的微裂纹、杂质和污染物等^[13-15]. 近年来, 随着熔石英加工工艺的持续改进和先进处理技术的引入使得熔石英抗初始损伤的性能大幅提高^[16,17].

然而对熔石英紫外损伤增长的认识仍然不足, 解决措施也相当欠缺. 早期研究发现熔石英前表面损伤点尺寸随激光发次呈线性增长, 后表面损伤点尺寸随激光发次呈指数增长, 且损伤增长速率主要由激光通量和波长决定^[5-12]. 随着实验精密性的提升, 研究人员逐渐发现在相同的激光条件下, 损伤增长行为呈现出多样性^[18-21], 说明熔石英紫外损伤增长是个复杂的多因素过程. 研究人员还发现, 利用小口径激光器获得的实验结果与大口径激光装置上熔石英损伤增长数据并不完全一致^[22,23]. 研究人员愈来愈倾向于直接利用大口径激光装置开展熔石英紫外损伤增长研究, 以便掌握熔石英紫外损伤产生和发展规律, 建立熔石英使用寿命的预测模型以指导大功率激光装置的运行和维护^[24,25].

* 国家自然科学基金(批准号: 61505187)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

本文利用大口径高通量激光系统开展熔石英紫外损伤增长的实验研究, 首先介绍了实验条件和方
法, 然后对实验结果进行了分析和讨论.

2 实验条件与方法

我们利用大口径高通量激光系统开展熔石英紫外损伤实验, 该系统为四程放大构型的钕玻璃激光系统, 激光波长为 1053 nm, 光谱带宽为 30 GHz, 光束口径为 36 cm × 36 cm, 脉冲形状为 5 ns 平顶脉冲, 系统最大输出能量达 18 kJ.

实验光路如图 1 所示, 采用大口径磷酸二氢钾 (KDP) 晶体和氧化磷酸二氢钾 (DKDP) 晶体组成频率转换单元, 将激光系统输出的红外光转换成波长为 351 nm 的紫外光, 紫外光随后辐照至距离 DKDP 晶体 35 cm 的实验样品——熔石英透镜上. 透镜中心厚度为 36 mm, 口径为 43 cm × 43 cm, 焦距为 8.4 m, 其前表面为非球面, 后表面为平面. 透镜材料为 Heraeus Suprasil 312 型熔石英, 在采用低缺陷制造技术完成加工后, 透镜的前后表面均镀上针对紫外光的减反射化学膜.

位于透镜下游的取样反射镜前表面未镀膜, 它将 4% 的紫外光反射至精密测量组件中进行紫外光能量、光束质量和时间波形的测量, 取样反射镜后的吸收玻璃吸收剩余激光. 实验光路位于洁净大气环境下, 环境温度为 23 °C.

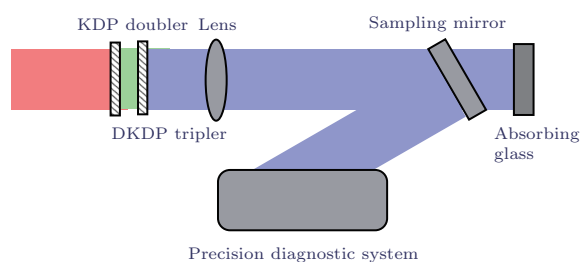


图 1 损伤增长实验光路示意图

Fig. 1. Schematic of the experimental bench used for damage growth tests.

实验利用精密测量系统测量每一发次的三倍频激光能量、时间波形和透镜后表面的光束近场分布. 三倍频光束近场对比度为 0.16, 意味着光束近场局部通量分布在光束平均通量附近约 2—3 J/cm² 的范围内, 因此实验中我们用光束平均通量代表每个损伤点承受的局部通量.

实验中每一次激光发射后将大口径高通量激光系统配置的损伤在线检测系统移入光路, 观察并

记录熔石英透镜的表面状况. 损伤在线检测系统由侧照明系统和成像系统构成, 分辨率为 50 μm. 侧照明系统通过光纤将激光二极管光源从光学元件侧边注入, 实现对光学元件内全反射照明. 当光学元件表面存在损伤时, 光线会从损伤处散射出来. 由望远系统和科学级电荷耦合器组成的成像系统沿垂直于光学元件表面的方向对元件成像, 从损伤处逸出的光线被成像系统采集, 在成像系统的暗背景上呈现为一处亮斑. 通过离线标定亮斑大小与损伤点实际尺寸的对应关系, 从而可以利用损伤在线检测系统获得损伤点的实际尺寸. 进一步地, 通过比较每一发后元件的表面状态, 可以掌握光学元件损伤产生和发展的演变过程.

为了研究熔石英紫外损伤增长行为, 实验共进行了 56 次激光发射, 每一发次的激光能量和激光通量如图 2 所示. 实验分为三个阶段. 第一阶段共 30 发次, 激光通量从 0.1 J/cm² 逐步提高至 5.2 J/cm². 激光通量的逐步提升一是为了引爆透镜表面缺陷产生初始损伤点, 二是由于 5 ns 平顶脉冲产生的初始损伤点直径约为 20 μm [26], 小于损伤在线检测系统的分辨极限, 因此在第一阶段后期将激光通量提升至 4 J/cm² 以上, 诱导初始损伤点发生损伤增长使损伤点尺寸扩大至 50 μm 以上, 以利于损伤在线检测系统观察. 实验第二阶段共 21 发, 激光通量固定在 6 J/cm², 研究固定激光通量下熔石英的损伤增长过程. 实验第三阶段共 5 发, 激光通量进一步从 6.5 J/cm² 提升至 8.1 J/cm², 此阶段的实验目的是研究不同激光通量下熔石英的损伤增长行为.

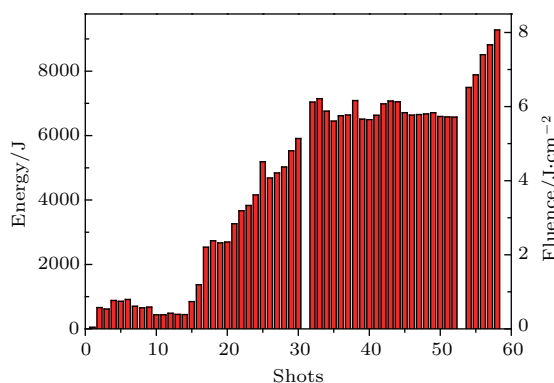


图 2 实验中三倍频激光能量和通量分布

Fig. 2. Energy and fluence of the 3ω beam during the experiment.

3 实验结果与讨论

实验结束后, 透镜表面状况如图 3 所示, 透镜后表面出现 44 个直径大于 100 μm 的损伤点, 其中 13 个损伤点直径大于 300 μm (图 3 中空心圆所示), 最大损伤点直径为 2.88 mm. 另外从图 3 可以看出, 大尺寸损伤点主要分布在透镜中央区域, 而该透镜为楔形透镜, 中心厚度 36 mm, 厚边一侧的厚度为 51 mm (对应图 3 中下侧), 因此损伤点空间分布与透镜厚薄分布并不一致, 说明透镜后表面损伤与透镜厚度引起的非线性效应无关.

利用显微镜 (浩视 8700) 对这 13 个大尺寸损伤点进行高分辨率观察, 如图 4 所示, 损伤点呈现为熔融炸裂型的损伤坑, 损伤坑分为中心熔融区和四周裂纹区, 熔融区说明损伤坑中心区域处于高温熔化状态, 裂纹区则说明损伤区域存在局部应力. 熔石英损伤形貌说明损伤主要是热力作用的结果. 另外, 从图 4 可以看出, 除四号损伤点外, 其余损伤点均呈现为规则的圆形, 因此下面我们用直径来代表损伤点尺寸.

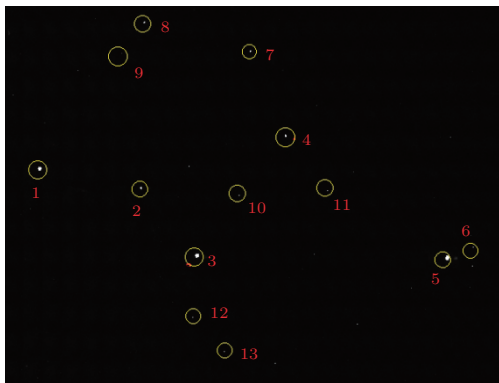


图 3 实验后熔石英透镜的表面状况, 透镜后表面透光区域内出现 44 个直径大于 100 μm 的损伤点, 图中空心圆表示 13 个直径大于 300 μm 的损伤点

Fig. 3. Photograph of the fused silica lens with the damage sites mapping system at the end of the experiment, showing 44 damage sites which have a diameter larger than 100 μm . The open circles represent the 13 sites larger than 300 μm .

我们选择这 13 个大尺寸损伤点研究熔石英损伤增长情况. 损伤在线检测系统显示这 13 个损伤点在第一阶段末期可见, 在第二阶段和第三阶段出现快速增长. 众所周知, 在固定的激光通量下熔石

英后表面损伤点尺寸随激光发次呈指数增长, 即

$$d_N = d_0 e^{\alpha N}, \quad (1)$$

其中, d_0 和 d_N 分别为初始损伤点直径和承受 N 发激光辐照后的损伤点直径; N 表示在某一固定激光通量下总的激光发次; α 为损伤增长速率, 与激光通量有关. 我们从每一发次后损伤在线检测系统获得的透镜损伤图片中提取出 13 个损伤点的尺寸数据, 绘制损伤点尺寸随激光发次的增长曲线, 如图 5 所示. 需要指出的是, 图 5 中从第 14 发开始, 激光通量从 6 J/cm^2 提升至 8 J/cm^2 , 故图 5(b) 中第 14 发后损伤增长速率变大, 损伤点尺寸增长曲线变陡.

从图 5 可以看出: 部分损伤点服从指数增长规律, 如图 5(a) 所示; 部分损伤点呈现出线性增长规律, 如图 5(b) 所示. 如果将图 5(a) 中大尺寸损伤点整个增长趋势进行分段拟合, 可以发现这些损伤点尺寸较小时的增长趋势也可以用线性增长进行拟合, 例如图 5(a) 中圆点所代表的损伤点其直径从 145 μm (第 1 发) 增长至 664 μm (第 10 发) 这一过程也可用线性增长拟合. 图 5 说明熔石英损伤增长行为不仅与激光通量有关, 而且与损伤点尺寸有关.

图 5 说明损伤点尺寸影响熔石英的损伤增长行为, 而损伤点尺寸在损伤增长过程中不断变大, 因此我们采用单发次损伤增长速率来描述损伤增长, 即

$$d_N = d_{N-1} e^{\alpha}, \quad (2)$$

其中, d_{N-1} 和 d_N 分别为第 N 发激光辐照前后的损伤点直径, α 为单发次损伤增长速率. 由 (2) 式得

$$\alpha = \ln(d_N/d_{N-1}). \quad (3)$$

根据 (3) 式, 不同激光通量下熔石英单发次损伤增长速率分布如图 6 所示. 图 6 按照损伤点直径将损伤点分为 100—500 μm 和 500—2000 μm 两个尺寸区间, 图中分别用方形实心点和圆形实心点表示. 从图 6 可以看出, 在相同的激光通量下, 单发次损伤增长速率并不是一个绝对值, 而是分布在一定范围之内. 在激光通量为 5.75 J/cm^2 下, 单发次损伤增长速率的最大值和最小值可相差 5 倍. 这一差别远超损伤增长速率的测量误差 (损伤在线检测系统对损伤点尺寸的检测误差约 5%). 图 6 说明除激

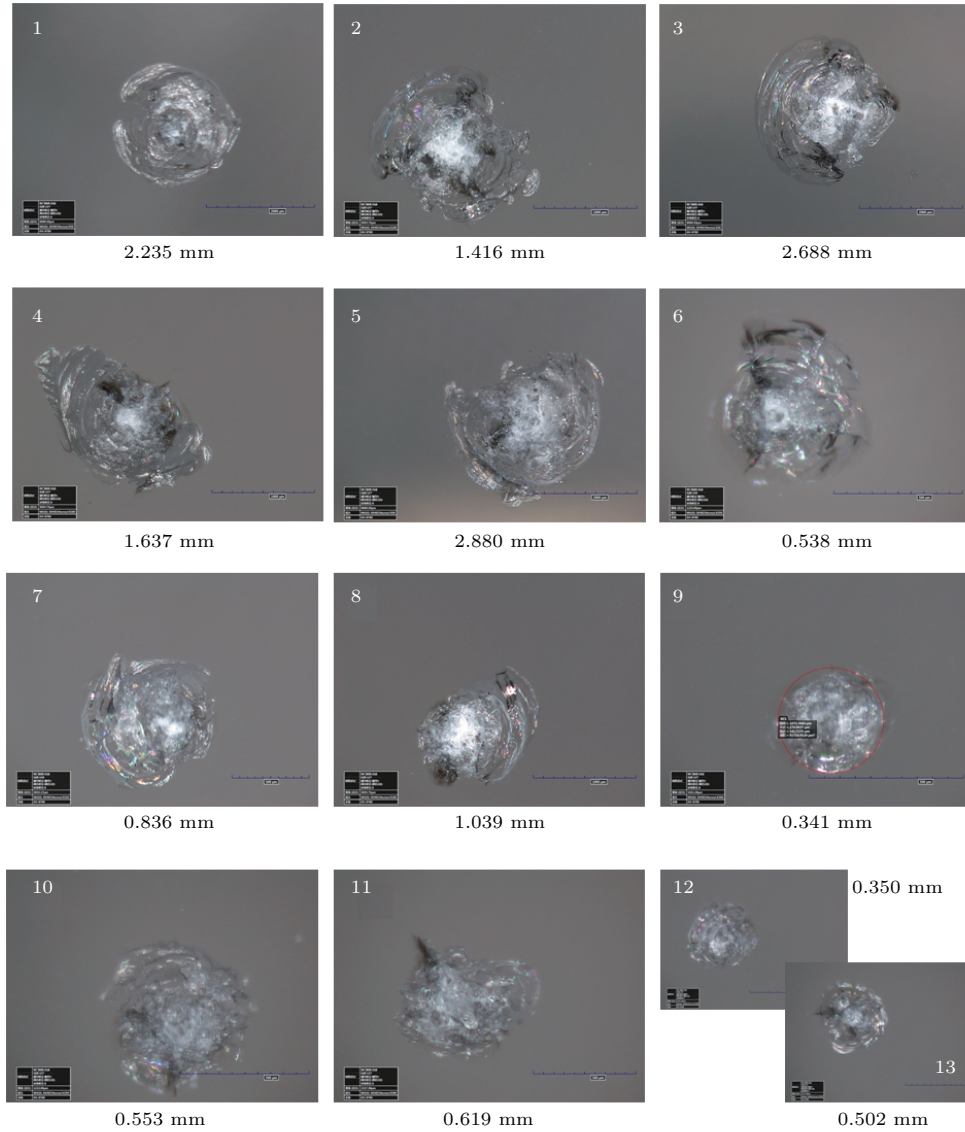


图4 (网刊彩色) 直径大于 $300\ \mu\text{m}$ 损伤点的显微图像

Fig. 4. (color online) Microscopy of the 13 damage sites which have a diameter larger than $300\ \mu\text{m}$.

光通量外, 损伤点尺寸对损伤增长速率存在较大影响, 同时也说明单发次损伤增长速率更适合于描述熔石英损伤增长.

为了获得损伤点尺寸对损伤增长速率的影响趋势, 我们将图6中相同尺寸区间的损伤点增长速率求平均, 图7表示两种尺寸损伤点统计平均后的损伤增长速率随激光通量的变化曲线, 图中方形实心点和圆形实心点分别表示直径为 $100\text{--}500\ \mu\text{m}$ 和 $500\text{--}2000\ \mu\text{m}$ 的损伤点. 从图7可以看出, 损伤增长速率随激光通量的增加而上升. 更重要的是, 在相同的激光通量下, 小尺寸损伤点的损伤增长速率高于大尺寸损伤点的损伤增长率. 图7直观地说

明损伤增长速率不仅与激光通量有关, 还与损伤点尺寸有关. 因此在描述熔石英损伤增长时, 不宜采用恒定的损伤增长速率, 而应该采用随损伤点尺寸变化而变化的损伤增长速率. 这一结果对建立熔石英使用寿命模型具有重要意义. 需要说明的是, 图7定性反映了损伤增长速率与损伤点尺寸的关系, 主要是因为大口径激光装置输出能量受限, 激光通量的分布范围较窄 ($6\text{--}8.3\ \text{J}/\text{cm}^2$), 下一步我们将利用小口径激光系统获得更多的实验数据, 以便统计归纳出损伤增长速率随损伤点尺寸的变化规律.

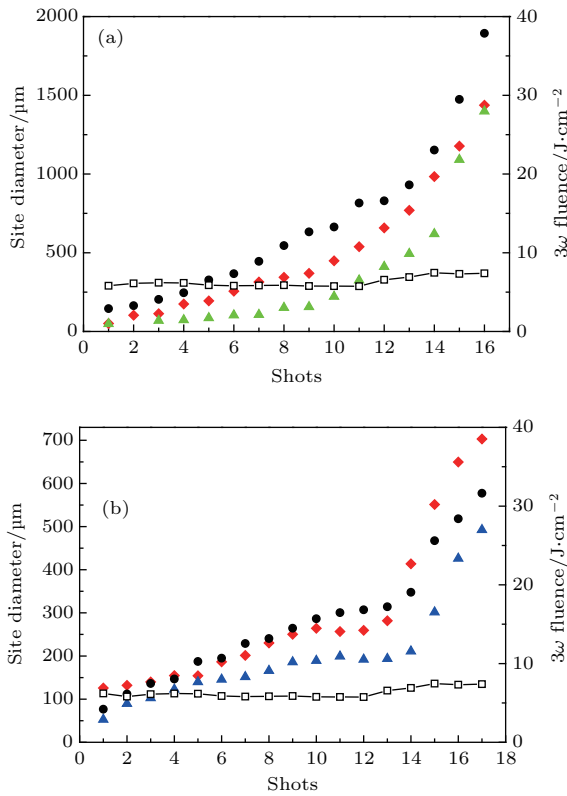


图5 (网刊彩色) 损伤点直径随激光光次的变化 (a) 指数增长; (b) 线性增长; 图中同时给出每一次激光的平均通量(空心方形所示), 图(a)和图(b)中圆形、菱形和三角形分别代表不同的损伤点

Fig. 5. (color online) Multi-shot growth of damage site diameter (left y -axis) vs. shot number under laser irradiation at 351 nm: (a) Exponential growth; (b) linear growth. The average beam fluences (right y -axis) on every shot are also shown. The circles, diamonds and triangles in the figure represent different damage sites.

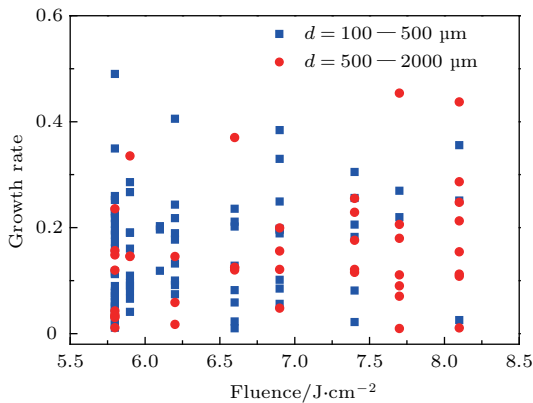


图6 (网刊彩色) 不同激光通量下熔石英后表面损伤点的单发次损伤增长, 图中实心方形和实心圆形分别代表直径为100—500 μm和500—2000 μm的损伤点

Fig. 6. (color online) Measured single-shot growth rates as a function of laser fluence for exit surface damage sites following exposure to 351 nm, 5 ns FIT laser pulses. Sites are binned by their pre-exposure diameter with $d = 100-500 \mu\text{m}$ (square points), and $500-2000 \mu\text{m}$ (circle points), respectively.

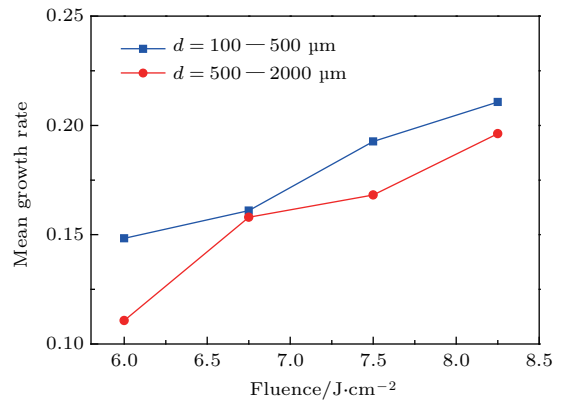


图7 不同尺寸损伤点损伤增长速率与激光通量的关系曲线
Fig. 7. Growth rate as functions of laser fluence and site size.

进一步地, 从图7可以看出, 随着损伤点尺寸的增大, 损伤增长速率反而下降, 这一结果可能与熔石英损伤增长机理有关. 熔石英炸裂型损伤坑分为中心熔化区和四周裂纹区, 中心熔化区存在大量的吸收性缺陷, 激光辐照时吸收激光能量, 产生自由电子并最终形成高温高压的等离子体. 等离子体压力超过熔石英的断裂强度后将导致损伤坑轴向和纵向裂纹出现扩展, 使得损伤坑沿裂纹方向被逐渐“打开”, 从而造成损伤增长. 不难理解, 损伤坑中心熔化区主要是吸收激光能量, 形成等离子体, 而损伤坑四周裂纹区则影响损伤增长, 增长速率取决于中心熔化区将激光能量转换为裂纹区承受的等离子体压力(或材料局部承受的弹性应变能). 因此, 小尺寸损伤点的增长速率高于大尺寸损伤点, 说明小尺寸损伤点更易将激光能量耦合为弹性应变能, 这可能是因为小尺寸损伤点中心熔化区形成的等离子体与四周裂纹区的作用距离更短, 作用力的衰减更小.

4 结 论

本文利用大口径高通量激光系统实验研究了熔石英紫外损伤增长行为. 研究表明, 在5 ns平顶脉冲辐照下熔石英后表面损伤点主要服从指数增长规律, 且损伤增长速率随激光通量的增加而上升. 但是在相同的激光通量下, 损伤增长速率不是一个恒定值, 而是存在一定的分布范围. 通过对大量数据的统计分析, 发现熔石英损伤增长速率不仅与激光通量有关, 还与损伤点尺寸有关, 且在相同的激光通量下小尺寸损伤点的增长速率高于大尺寸损伤点的增长速率. 由于损伤增长主要源于损

伤坑周围的裂纹在力学作用下发生横向扩展, 因此小尺寸损伤点的损伤增长速率高于大尺寸损伤点, 说明小尺寸损伤点更易将激光能量耦合为弹性应变能. 研究结果对熔石英使用寿命的精确预测和损伤机理的深入理解均具有重要意义.

参考文献

- [1] Bercegol H, Boscheron A, Di-Nicola J M, Journot E, Lamaignère L, Néauport J, Razé G 2008 *J. Phys. Conf. Ser.* **112** 032013
- [2] Chambonneau M, Grua P, Rullier J L, Natoli J Y, Lamaignère L 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 103101
- [3] Bertussi B, Cormont P, Palmier S, Legros P, Rullier J L 2009 *Opt. Express* **17** 11469
- [4] Wong J, Ferreira J L, Lindsey E F, Haupt D L, Hutcheon I D, Kinney J H 2006 *J. Non-cryst. Solids* **352** 255
- [5] 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
- [6] Razé G, Morchain J M, Loiseau M, Lamaignère L, Josse M A, Bercegol H 2003 *Proc. SPIE* **4932** 127
- [7] Norton M A, Donohue E E, Hollingsworth W G, McElroy J N, Hackel R P 2004 *Proc. SPIE* **5273** 236
- [8] Norton M A, Donohue E E, Feit M D, Hackel R P, Hollingsworth W G, Rubenchik A M, Spaeth M L 2005 *Proc. SPIE* **5991** 599108
- [9] Norton M A, Donohue E E, Feit M D, Hackel R P, Hollingsworth W G, Rubenchik A M, Spaeth M L 2007 *Proc. SPIE* **6403** 64030L
- [10] Norton M A, Carr A V, Carr C W, Donohue E E, Feit M D, Hollingsworth W G, Liao Z, Negres R A, Rubenchik A M, Wegner P 2008 *Proc. SPIE* **7132** 71321H
- [11] Negres R A, Norton M A, Cross D A, Carr C W 2010 *Opt. Express* **18** 19966
- [12] Lamaignère L, Reyné S, Loiseau M, Poncetta J C, Bercegol H 2007 *Proc. SPIE* **6720** 67200F
- [13] Raman R N, Demos S G, Shen N, Feigenbaum E, Negres R A, Elhadj S, Rubenchik A M, Matthews M J 2016 *Opt. Express* **24** 2634
- [14] Laurence T A, Bude J D, Shen N, Feldman T, Miller P E, Steele W A, Suratwala T I 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 151114
- [15] Demos S G, Negres R A, Raman R N, Shen N, Rubenchik A M, Matthews M J 2016 *Opt. Express* **24** 7792
- [16] 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
- [17] Ye X, Huang J, Liu H J, Geng F, Sun L X, Jiang X D, Wu W D, Qiao L, Zu X T, Zheng W G 2016 *Sci. Rep.* **6** 31111
- [18] Negres R A, Abdulla G M, Cross D A, Liao Z M, Carr C W 2012 *Opt. Express* **20** 13030
- [19] Negres R A, Liao Z M, Abdulla G M, Cross D A, Norton M A, Carr C W 2011 *Appl. Opt.* **50** D12
- [20] Lamaignère L, Dupuy G, Bourgeade A, Benoist A, Roques A, Courchinoux R 2014 *Appl. Phys. B* **114** 517
- [21] Negres R A, Cross D A, Liao Z M, Matthews M J, Carr C W 2014 *Opt. Express* **22** 3824
- [22] Lamaignère L, Dupuy G, Donval T, Grua P, Bercegol H 2011 *Appl. Opt.* **50** 441
- [23] Han W, Huang W W, Wang F, Li K Y, Feng B, Li F Q, Jing F, Zheng W G 2010 *Chin. Phys. B* **19** 106105
- [24] Liao Z M, Abdulla G M, Negres R A, Cross D A, Carr C W 2012 *Opt. Express* **20** 15569
- [25] Liao Z M, Raymond B, Gaylord J, Fallejo R, Bude J, Wegner P 2014 *Opt. Express* **22** 28845
- [26] Carr C W, Matthews M J, Bude J D, Spaeth M L 2007 *Proc. SPIE* **6403** 64030K

Laser-induced damage growth of fused silica at 351 nm on a large-aperture high-power laser facility*

Han Wei¹⁾²⁾ Feng Bin²⁾ Zheng Kui-Xing²⁾ Zhu Qi-Hua²⁾
Zheng Wan-Guo²⁾ Gong Ma-Li^{1)†}

1) (*Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

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

(Received 26 July 2016; revised manuscript received 12 September 2016)

Abstract

Laser-induced damage of fused silica optics at 351 nm is a key factor limiting the output energy of high-power laser facility, especially the damage growth process. A comprehensive understanding of its damage growth behavior is of critical importance for high-power laser facility. Thus we study the laser-induced damage growth on the exit surface of fused silica under the subsequent illumination of 5 ns square pulses at 351 nm on a large-aperture high-power laser facility. Experiment is conducted with a 36 cm thick UV grade fused silica focus lens in clean atmosphere and at room temperature. 56 laser shots of 3ω fluence in a range from 0.1 J/cm² to 8.1 J/cm² are fired during the experiment. And the damage initiation process and growth process are monitored and recorded with an online optics damage inspection instrument which has an optical resolution of about 50 μm .

Experimental results demonstrate that the sizes of exit-surface damage sites exponentially or linearly grow with laser shots and the damage growth rate increases with laser fluence. However, it is found that even under the same laser conditions the damage grow rate is not a fixed value, which means that besides the laser fluence other parameters also influence the damage grow process. In order to highlight some tendencies, we consider the single-shot damage growth rate and calculate the average of inside fluence bins. Statistical analysis shows that smaller sites tend to grow with larger growth rates than larger sites under the irradiation of the same laser fluence. This result indicates that damage growth rate is influenced by both laser fluence and damage site size. It suggests that the damage growth rule needs to be incorporated into a size-dependent growth effect.

The result that higher growth rates are obtained for small damage sites may be related to the damage growth mechanism of fused silica. Damage crater of fused silica consists of a central core and numerous surrounding cracks. The defects in the central core absorb laser energy and yield plasma, then the plasma pressure will open the cracks on the periphery of the crater and lead to lateral and axial expansion of cracks which can be identified as damage growth. The fact that smaller sites grow faster than larger sites implies that smaller sites more efficiently couple laser energy into fracture energy. Our results have important implications for both the prediction of fused silica optics lifetime and the fundamental understanding of laser damage mechanism.

Keywords: laser-induced damage, damage growth, fused silica, surface

PACS: 61.80.-x, 42.70.Ce, 42.55.f

DOI: 10.7498/aps.65.246102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61505187).

† Corresponding author. E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn