

基于激光近场和图像分割技术的复合波长诱导熔石英损伤实验研究

郭亚晶¹ 唐顺兴^{1*} 季来林² 惠宏超¹ 王宇煜¹ 朱宝强¹ 林尊琪¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

(² 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 在复合波长(波长分别为 1053、527、351 nm)情况下,利用激光近场对熔石英样品进行损伤实验。设计了一种基于激光近场辐照的损伤阈值定义方法,并利用带有灰度抑制的分水岭标记算法对损伤图像进行损伤区域提取,通过对比损伤图像与相应光束近场能量分布,计算出损伤区域与非损伤区域临界处的光能量密度,即为熔石英样品的损伤阈值。实验结果表明,复合波长激光诱导熔石英损伤是 3 种波长激光共同作用的结果,但 351 nm 激光对损伤起主要作用,初始损伤阈值为 8.22 J/cm²;在复合波长激光多次辐照样品的情况下,熔石英样品后表面的损伤成指数形式增长,损伤增长系数为 0.59。

关键词 激光光学;激光诱导损伤;激光近场;分水岭标记算法;复合波长

中图分类号 TN204 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0114001

Experimental Study of Multiple Wavelength Laser-Induced Damage in SiO₂ Based on Near Field and Image Segmentation

Guo Yajing¹ Tang Shunxing¹ Ji Lailin² Hui Hongchao¹ Wang Yuyu¹

Zhu Baoqiang¹ Lin Zunqi¹

¹ Joint Laboratory for High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² Shanghai Institute of Laser Plasmas, Chinese Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract Damage experiments are conducted by irradiating fused silica with the multiple wavelength laser near field. The multiple wavelength laser consists of 1053, 527, 351 nm laser. It designs a definition of damage threshold based on laser near-field irradiation and extracts damage areas from damage images by the marker-based watershed algorithm with gray control. The initial damage threshold is defined as the fluence of critical site between damage region and no damage region, which is calculated by comparing the damage image with the multiple wavelength laser near field. The research shows that the damage of fused silica is induced by the three wavelength lasers. The 351 nm laser plays a leading role. The initial damage threshold is 8.22 J/cm². With multiple irradiation of fused silica in multiple wavelength laser, the damage growth of exit surface is exponential, and the coefficient of damage growth is 0.59.

Key words laser optics; laser induced damage; laser near field; marker-based watershed algorithm; multiple wavelength

OCIS codes 140.3330; 100.3008; 160.4670

收稿日期: 2012-07-03; 收到修改稿日期: 2012-08-20

作者简介: 郭亚晶(1984—),女,博士研究生,主要从事高功率激光系统中光束传输等方面的研究。

E-mail: guoyajing860501@163.com

导师简介: 林尊琪(1942—),男,中国科学院院士,研究员,主要从事高功率激光技术和激光等离子体等方面的研究。

E-mail: zqlin@mail.shcnc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: leo@siom.ac.cn

1 引言

随着激光系统功率的不断提高及光束口径的增大,激光诱导损伤(LID)越来越受到重视。激光诱导元件损伤是一个复杂、受多种因素影响的过程,其中影响该过程的因素有激光参数、材料性质和实验条件等^[1]。激光诱导元件损伤不仅降低元件寿命,而且由于损伤导致的对入射光的阻挡和散射,使光束波前产生畸变,进一步使光学系统下游光强产生一定的调制,从而降低了焦斑质量并可能损坏下游光学元件。熔石英作为高功率激光系统的重要元件,其损伤阈值、损伤增长及损伤修复已被大量研究^[2,3]。在高功率激光终端光学系统(FOA)中,倍频晶体的谐波转换效率不可能达到100%,而且由于谐波转换后三种波长到达靶点前谐波分离不完全,使351 nm激光(3ω)与剩余1053 nm激光(1ω)、527 nm激光(2ω)同时辐射到光学元件上,所以研究多波长激光诱导损伤就变得非常必要。

激光诱导损伤机制主要有多光子吸收、热吸收、电场调制和光压等作用,产生这些作用的主要原因包括非线性自聚焦、点缺陷、划痕、裂缝和杂质污染等^[4]。评价元件抗激光损伤能力的主要参数有初始损伤阈值、损伤增长阈值和损伤增长系数。目前,国内外对熔石英元件的激光损伤研究有很多^[5,6],他们主要采用激光聚焦光斑对熔石英样品进行损伤实验,其技术难点在于光斑口径的测量。利用激光远场定义损伤阈值的方法主要有两种^[7]:1)对不同能量级下的损伤概率进行统计,拟合计算得到零损伤概率时的能量密度值即为损伤阈值^[8];2)将造成损伤的最小能量密度与未造成损伤的最大能量密度的平均值定义为损伤阈值。

目前,复合波长激光诱导损伤主要由美国国家点火装置(NIF)进行研究,他们针对大口径激光系统开发了损伤点密度(PPD)来确定元件的初始损伤阈值,并且利用损伤尺寸的增长来衡量元件的抗激光损伤能力^[9]。研究表明,对于 1ω 、 2ω 和 3ω 同时辐照的多波长激光诱导损伤中, 3ω 激光起主要作用,但少量的 1ω 和 2ω 激光的存在会加剧损伤,具体的损伤行为与各波长激光间的时间延迟和通量比相关^[10-12]。而实际限制元件寿命的因素主要是激光诱导的损伤增长,且后表面损伤更为严重^[13,14],熔石英在复合波长作用下的表面增长行为与单波长情况下类似,在恒定通量密度下,熔石英后表面损伤尺寸随着激光辐射发次成指数增长,损伤增长与激光通量密度近似呈线性关系;前表面损伤尺寸则与

发次几乎呈线性关系,并且有较高的损伤增长阈值和较低的损伤增长长度^[12,13]。

本实验设计一种结合图像分割技术的基于激光近场的损伤阈值定义方法,通过KDP晶体进行谐波转换得到包含三种波长(分别为351、527、1053 nm)的复合激光,利用该复合波长激光近场对熔石英样品进行损伤实验。采用带有灰度抑制的分水岭标记图像分割方法对损伤图像进行处理,对比分割后损伤图像和激光近场分布,计算得到熔石英样品的损伤阈值和损伤增长系数,分析并评价熔石英样品的抗激光损伤能力,讨论引起损伤的原因,对光学元件损伤在线测量和系统负载能力的提升有一定的指导意义。

2 损伤阈值的定义

2.1 零损伤概率方法

该方法是对不同能量级的损伤概率进行统计,将损伤概率与能量进行拟合,最后计算出损伤概率为零时的能量密度即为初始损伤阈值。根据国际ISO11254标准,零损伤概率阈值测试方法主要有:1-on-1, R-on-1, S-on-1^[15-17,7]。

1) 1-on-1方法^[15,7]:在同一激光能量 E 下,对样品元件上 N 个点进行辐照,每个点只辐照一次,发生损伤的点数为 n ,发生损伤的概率为 $p=n/N$ 。改变激光能量,按照上述方法进行不同能量下发生损伤概率的统计。最后,对损伤概率与能量进行线性或曲线拟合,得到损伤阈值,这种方法是目前国际上采用的标准的损伤阈值测试方法,能够得到较准确的损伤阈值,但是不能给出损伤阈值的分布。

2) R-on-1方法^[16,7]:用递增的能量辐照样品的同一点直至损伤发生,要求初始能量远小于光学元件的损伤阈值。记录造成损伤的脉冲能量密度 F_i 为该点的损伤阈值,用同样的方法对样品上 m 个点进行测试,定义元件的损伤阈值 F_{th} 为 m 个测试点 F_i 值的平均值,即

$$F_{th} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m F_i. \quad (1)$$

此方法测得的损伤阈值并不是零概率损伤阈值,但是根据所测各个点的损伤阈值分布,可以反映样品损伤阈值的均匀性。对于R-on-1辐照方法而言,每一发次的辐照对于后一发次起到了预处理的作用,因此该方法测得的损伤阈值不是绝对损伤阈值。

3) S-on-1方法^[17,7]:S-on-1的测试方法与1-

on-1 测试方法基本相同,该方法更注重多个脉冲辐照下的损伤,即在同一能量下以相同时间间隔对样品上同一个点进行多次辐照,直到产生损伤为止。由于多脉冲激光对元件表面的热累积效应,S-on-1 方法测得的损伤阈值偏低,但能够真实地反映元件在正常工作下的损伤阈值和工作寿命。

2.2 50% 损伤概率方法

该方法定义初始损伤阈值为能够产生损伤的最小能量密度与未能产生损伤的最大能量密度的平均值,对应 50% 损伤概率,表达式为

$$F_{th} = [F_{\min ND} + F_{\max D}]/2, \quad (2)$$

$$S = [F_{\max D} - F_{\min ND}]/F_{th}. \quad (3)$$

式中 F_{th} 为初始损伤阈值, S 为阈值的扩展范围,即激光辐照下损伤和未损伤共存的能量分布范围大小,反映了样品的均匀性, S 越大均匀性越差^[18]。

2.3 激光近场方法

2.1 和 2.2 小节中所述方法均在激光聚焦点处进行损伤阈值测试,这些方法要求对大量样品点进行大量次数的激光辐照,数据量大,耗时长。同时,利用光束远场进行损伤阈值测量实验的另一个

难点在于焦斑尺寸的测量,它的准确性直接影响着光束通量密度的值^[19]。

本文设计一种基于激光近场辐照的损伤阈值定义方法,即利用激光近场辐照熔石英样品,对采集到的损伤图像进行损伤区域提取,对比损伤图像与相应激光近场能量分布,得到损伤区域与非损伤区域临界点处的局部通量密度即为损伤阈值。该方法简单、快速,而且由于近场相对较大的光束口径,可以减小损伤阈值的口径效应^[4,18],降低损伤阈值的随机性,能够准确的评价大口径光学元件的抗激光损伤性能。

激光近场定义损伤阈值方法是基于图像处理技术,将损伤图像中的损伤区域进行分割提取,损伤区域与非损伤区域临界处对应着损伤开始,通过将该临界点映射到相应近场分布图像中,得到近场分布中该点的能量密度即为损伤阈值,映射过程如图 1 所示,图 1 中 D 代表损伤区域, ND 代表非损伤区域,损伤区域临界点 1、2、3、4 映射到近场中对应能量密度 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 ,理论上这些能量密度就是样品的损伤阈值。

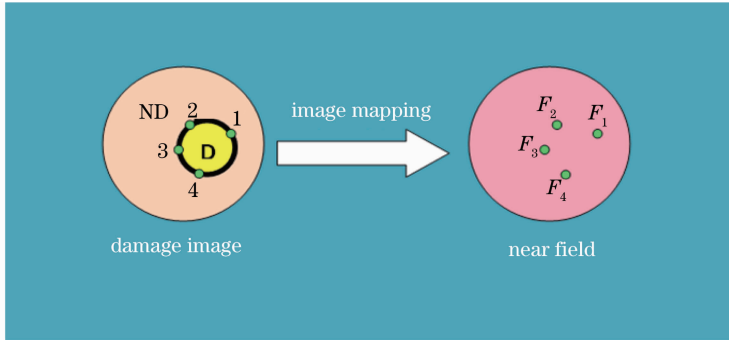


图 1 损伤图像与光束近场映射

Fig. 1 Mapping between damage image and near field of beam

2.4 带有灰度抑制的分水岭标记分割算法

20 世纪 90 年代初, Vincent^[20] 提出了基于浸没技术的分水岭检测算法,分水岭算法的基本思想是借助地形的概念,将图像灰度值比拟为该点的海拔高度,将每一个局部极小值及其影响区域比拟为集水盆,则集水盆的边界形成分水岭^[21]。分水岭算法的本质是一种由局部极小值开始的区域增长算法,由于噪声及暗纹理的存在,使图像中出现很多的伪极小值,这些作为独立区域的伪极小值进行分水岭算法后,会产生对图像的过分割问题^[22]。

为了减少噪声影响和降低图像过分割问题,将灰度抑制与基于标记的分水岭算法相结合,对损伤图像进行图像分割处理。基于标记的分水岭图像分

割算法是直接原始梯度图像上应用分水岭,噪声的存在会导致过分割现象的产生。利用灰度抑制减少滤波去噪后的剩余噪声,减少了图像中的伪极小值点。具体处理流程如图 2 所示。

与传统的分水岭算法图像分割相比,本处理方法在噪声抑制后又进行了灰度抑制,这样可以进一步去除噪声抑制不能去除的噪声,这些噪声主要来源于杂散光及光路误差、景深和像差的存在、镜面反射等。

图像处理效果如图 3 所示,从图中可以看出,采用先灰度抑制后分水岭标记分割方法处理图像,可以得到较好的处理效果;而未进行灰度抑制的图像分割由于剩余噪声的存在导致伪极小值的出现,造成了图像过分割现象。

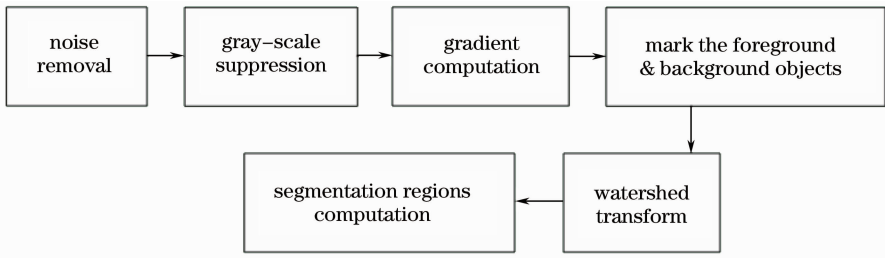


图 2 损伤图像处理流程图

Fig. 2 Flow chart of image processing for damage

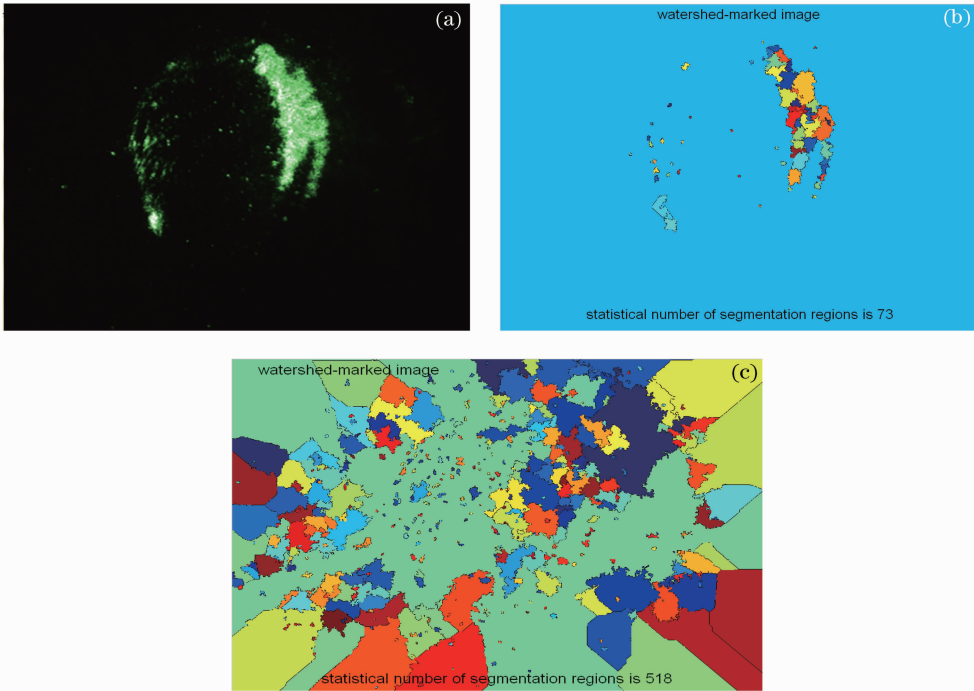


图 3 图像分割效果。(a)原始损伤图像;(b)带有灰度抑制;(c)未进行灰度抑制

Fig. 3 Effect of image segmentation. (a) Original damage image; (b) with gray control; (c) without gray control

3 实验方法

本实验装置主要由谐波转换、样品损伤探测和

光束质量(主要是能量和近场)测量三部分组成,如图 4 所示。波长为 1053 nm 的椭圆形基频光从神光

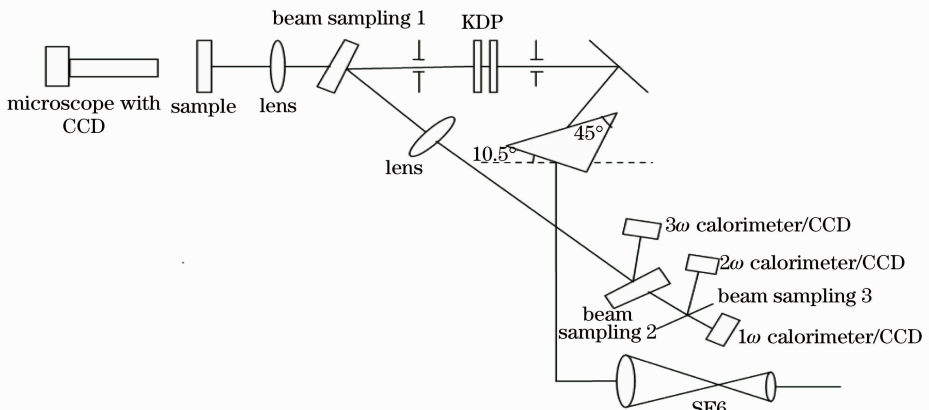


图 4 实验原理图

Fig. 4 Schematic diagram of experiment

II 装置的空间滤波器(SF6)输出,经过 II 型 KDP 倍频晶体和 II 型 KDP 三倍频晶体进行谐波转换,由于转换效率在 30%左右,出射 3ω 光中有剩余 1ω 、 2ω 光存在,即得到含有三种波长的复合波长激光束。分光楔板 $1(R=4\%)$ 前表面取样用来测量复合波长激光束中各波长分量的能量及近场,而光楔透射的激光用来对熔石英样品进行损伤,损伤图像由带有 CCD 的电子显微镜进行采集,本文所提到的损伤均为样品后表面的损伤。

实验样品为清洗过的康宁 7980 熔石英玻璃。由 SF6 输出的基频光口径为 $28\text{ mm}\times 32\text{ mm}$,脉冲宽度为 1 ns ,复合波长的激光通过透镜($f=1\text{ m}$)正入射到熔石英样品上,通过改变样品前表面的离焦量来控制入射到样品上的光斑大小,进而控制辐射到样品上的激光能量密度。

4 实验结果及讨论

评价元件抗激光损伤能力的主要参数有初始损伤阈值、损伤增长阈值和损伤增长系数。选择损伤面积作为考虑损伤增长的参数,通过比较每一次激光

辐射前后的样品损伤面积来表征损伤增长情况。

4.1 初始损伤阈值

将损伤图像和相应的复合波长近场图像进行对比,计算出近场图像上相应于损伤区域边界处的局部能量密度,该能量密度即为初始损伤阈值。由于是三种波长同时照射样品,所以该处的能量密度是指 1ω 、 2ω 、 3ω 能量密度的叠加。选取的损伤临界点与三波长能量密度叠加情况如图 5、6 所示,其中图 6(a)~(e)是关于光斑中心(即损伤图像中心)镜像对称的。

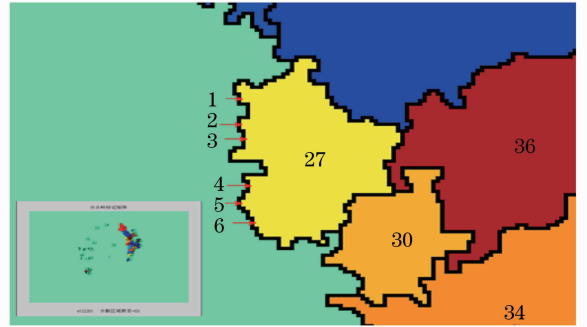


图 5 损伤临界点的选取

Fig. 5 Selection of critical damage point

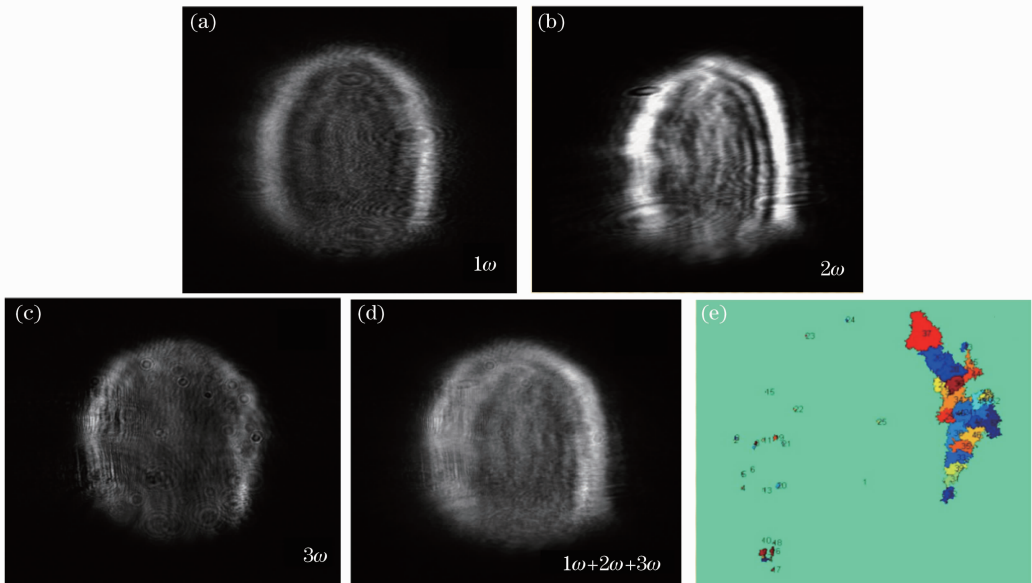


图 6 光束近场及损伤情况。(a) 1ω 近场;(b) 2ω 近场;(c) 3ω 近场;(d) 复合波长激光总能量密度分布;(e) 损伤图像

Fig. 6 Near field of beam and damage. (a) 1ω near field; (b) 2ω near field; (c) 3ω near field; (d) total fluence of multiple wavelength laser; (e) damage image

通过计算损伤临界点 1~6 位置处对应的复合波长激光束的局部能量密度,然后取平均值为该熔石英样品的初始损伤阈值,计算结果如表 1 所示。从表 1 中可知,该熔石英样品的初始损伤阈值为 8.22 J/cm^2 。

4.2 损伤增长

利用复合波长激光束对样品进行多次照射来研究激光诱导损伤增长情况,损伤情况随着照射发次增长情况如图 7 所示。对损伤图像进行处理后发现损伤面积 A 与发次 N 之间近似呈指数关系,损伤尺寸在毫米量级。

表 1 初始损伤阈值计算结果

Table 1 Calculated results of initiation damage threshold

Critical points	1	2	3	4	5	6
Local fluence / (J/cm ²)	5.32	5.8	6.95	8.42	9.86	12.96
Initial damage threshold / (J/cm ²)				8.22		
Standard deviation / (J/cm ²)				2.87		
Type A uncertainty				0.35		

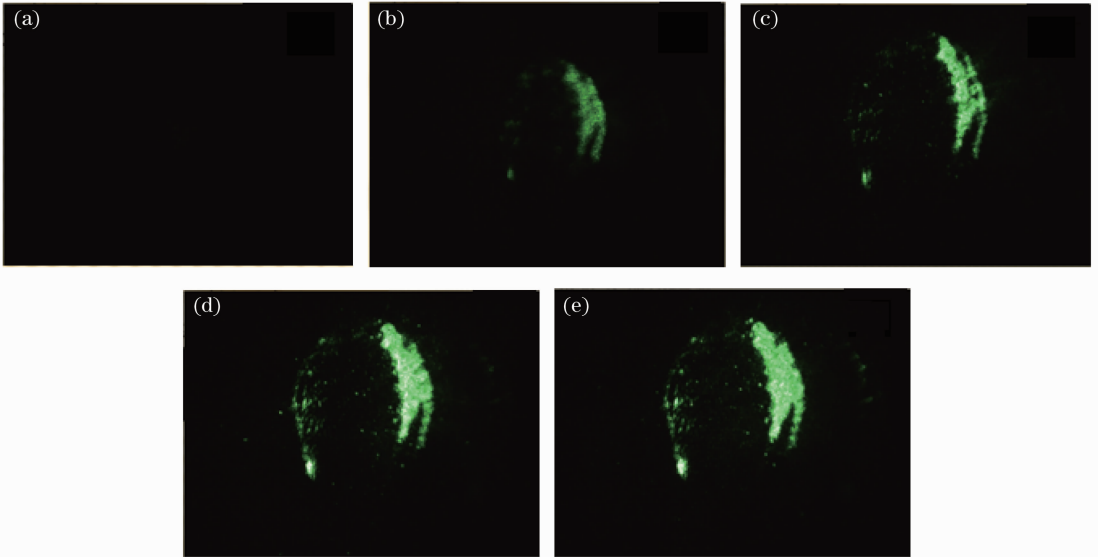


图 7 损伤随发次增长情况。(a) $N=10$; (b) $N=11$; (c) $N=12$; (d) $N=13$; (e) $N=14$

Fig. 7 Damage growth with shot number. (a) $N=10$; (b) $N=11$; (c) $N=12$; (d) $N=13$; (e) $N=14$

将发次 N 与损伤面积 A 按指数关系拟合, 即

$$A = A_0 \exp(\alpha N), \quad (4)$$

式中 α 为损伤增长系数, 计算得到熔石英样品的损伤增长系数 $\alpha=0.59$, 如图 8 所示, 其中图 8(b) 为劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 研究发现的熔石

英损伤增长情况^[23]。SSE 和 RMSE 分别是标准差和均方差, R^2 是拟合曲线决定系数, 表征了曲线的拟合度, adjusted R^2 是自由调整 R^2 后得到的决定系数。比较图 8(a) 和 (b) 可知, 两者有相同的指数增长趋势, 且本实验的熔石英样品的损伤增长比

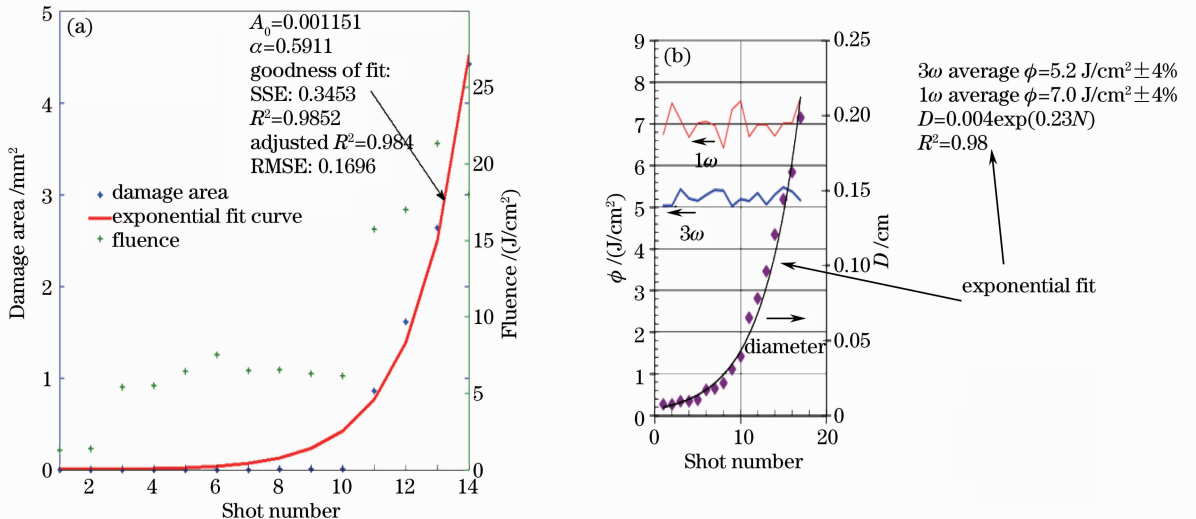


图 8 熔石英样品损伤增长情况。(a) 本实验结果; (b) LLNL 结果

Fig. 8 Damage growth of fused silica sample. (a) Our experimental results; (b) LLNL results

LLNL 的损伤增长速度快。

对于损伤增长阈值,可以通过下式计算得到:

$$\alpha = a\varphi - \alpha_0, \quad (5)$$

式中 φ 为通量密度, α 为同一通量密度 φ 情况下的损伤增长系数。当 $\alpha = 0$ 时, $\varphi_{th} = \alpha_0/a$ 即为损伤增长阈值。由于该实验中近场光斑分布均匀性较差,且发次间的平均通量密度波动也比较大,所以该熔石英样品的损伤增长阈值还有待后续实验来验证。

5 结 论

设计了一种基于图像分割处理技术的激光近场辐照熔石英样品测试损伤阈值的方法,并利用 1ω 、 2ω 、 3ω 复合波长激光近场对熔石英样品的损伤阈值和损伤增长情况进行实验研究,得到初始损伤阈值和损伤增长系数分别为 $\varphi = 8.22 \text{ J/cm}^2$ 和 $\alpha = 0.59$ 。激光近场定义损伤阈值测试方法简单、快速,且近场光斑口径相对较大,可以有效减小损伤阈值的口径效应。同时,带有灰度抑制的分水岭标记分割算法可以有效去除噪声及抑制图像过分割,保证了初始损伤阈值和损伤增长计算的准确性。

参 考 文 献

- 1 H. Bercegol, A. Boscheron, J. Michel Di-Nicol *et al.*. Laser damage phenomena relevant to the design and operation of an ICF laser driver [J]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2008, **112**(3): 032013
- 2 Hu Guohang, Zhao Yuan'an, Li Dawei. Technology and mechanism of CO₂ laser treatment for mitigating surface damage growth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0814001
胡国行, 赵元安, 李大伟. 抑制损伤发展的 CO₂ 激光修复技术及机理研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0814001
- 3 Yang Minhong, Zhao Yuan'an, Yi Kui *et al.*. HF etching combined with polishing layer by layer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0303007
杨明红, 赵元安, 易葵等. HF 蚀刻+逐层抛光法表征熔石英表面损伤层深度[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0303007
- 4 Huang Wanqing. Investigation of Laser-Induced Damage on Large-Aperture Fused Silica Optical Components [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2009. 7~33
黄晚晴. 大口径熔石英元件表面激光损伤特性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009. 7~33
- 5 Wang Libin, Ma Weixin, Ji Lailin *et al.*. Influence of metal particles on damage threshold of fused silica at 3ω [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0502004
王立斌, 马伟新, 季来林等. 三倍频激光下金属颗粒对熔石英元件损伤阈值的影响[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0502004
- 6 Liu Hongjie, Zhou Xinda, Huang Jin *et al.*. Ultraviolet-damage mechanism of fused-quartz optics in high-power laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 10~14
刘红婕, 周信达, 黄进等. 大口径熔石英元件紫外损伤机制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 10~14
- 7 Duan Lihua. Study on Laser Induced Damage of Optical Thin Film Coatings and Damage Testing Using Scattering Light Techniques[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. 19~33

- 段利华. 光学薄膜激光损伤及散射检测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005. 19~23
- 8 Li Dawei, Zhao Yuan'an, He Hongbo *et al.*. Exponential fitting of laser damage threshold and analysis of testing errors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 273~275
李大伟, 赵元安, 贺红波等. 光学元件激光损伤阈值的指数拟合法以及测试误差分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 273~275
- 9 P. DeMange, C. W. Carr, H. B. Radousky *et al.*. System for evaluation of laser-induced damage performance of optical materials for large aperture lasers [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(10): 3298~3301
- 10 P. DeMange, R. A. Negres, H. B. Radousky *et al.*. Nonlinear behavior of laser-induced damage in KDP and DKDP under multi-wavelength irradiation [C]. *SPIE*, 2005, **5710**: 114~119
- 11 C. W. Carr, H. B. Radousky, S. G. Demos. Wavelength dependence of laser-induced damage: determining the damage initiation mechanisms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(12): 127402
- 12 L. Lampaignere, S. Reyne, M. Loiseau *et al.*. Effects of wavelengths combination on initiation and growth of laser-induced surface damage in SiO₂[C]. *SPIE*, 2007, **6720**: 67200F
- 13 M. A. Norton, L. W. Hrubesh, Z. Wu *et al.*. Growth of laser initiated damage in fused silica at 351 nm [C]. *SPIE*, 2001, **4347**: 468~473
- 14 A. M. Rubenchik, M. D. Feit. Initiation, growth and mitigation of UV laser induced damage in fused silica [C]. *SPIE*, 2002, **4679**: 79~95
- 15 Electrotechnical Sector Committee. Laser and laser-related equipment-determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces part 1: 1-on-1 test ISO 11254-1:2000 [S]. 2000
- 16 Sun Chengwei. Laser Irradiation Effect [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 326~334
孙承伟. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 326~334
- 17 Electrotechnical Sector Committee. Laser and Laser-Related Equipment-Determination of Laser-Induced Damage Threshold of Optical Surfaces Part 2: S-on-1 test ISO 11254-2:2000 [S]. 2000
- 18 Ni Yaru, Lu Chunhua, Xu Zhongzi. Study on laser induced damage and the enhancing methods for optical materials[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(5): 18~20
倪亚茹, 陆春华, 许仲梓. 光学材料的激光损伤及其增强研究[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(5): 18~20
- 19 He Changtao. Image Processing Technologies in Laser Damage Threshold Testing [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007. 26~35
何长涛. 激光损伤阈值测试中的图像处理技术[D]. 成都: 四川大学, 2007. 26~35
- 20 L. Vincent, P. Soille. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(6): 583~598
- 21 Xu Yiyi, Liu Zhiqi, Liu Qi. Image segmentation based on watershed algorithm [J]. *Computer Simulation*, 2011, **28**(9): 272~274
徐奕奕, 刘智琦, 刘琦. 基于改进的分水岭算法图像分割方法的研究[J]. *计算机仿真*, 2011, **28**(9): 272~274
- 22 Gao Li, Yang Shuyuan, Li Haiqiang. New unsupervised image segmentation via marker-based watershed [J]. *J. Image and Graphics*, 2007, **12**(6): 1025~1032
高丽, 杨树元, 李海强. 一种基于标记的分水岭图像分割新算法[J]. *中国图象图形学报*, 2007, **12**(6): 1025~1032
- 23 M. A. Norton, E. E. Donohue, M. D. Feit *et al.*. Growth of laser damage in SiO₂ under multiple wavelength irradiation [C]. *SPIE*, 2005, **5991**: 599108