

文章编号 1004-924X(2010)06-1387-09

# 应用标记控制分水岭分割算法 研究激光诱导玻璃体损伤形貌

韩敬华<sup>1</sup>,何长涛<sup>2</sup>,张秋慧<sup>1</sup>,李彬厚<sup>1</sup>,  
冯国英<sup>1</sup>,杨李茗<sup>3</sup>,谢旭东<sup>3</sup>,朱启华<sup>3</sup>

1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064;
2. 电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 610054;
3. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**为了定量客观地分析玻璃的体损伤形貌,运用基于改进的分水岭分割算法对其微观图像进行了分析处理,得到了损伤的范围和分类,同时结合激光等离子体冲击波与玻璃的相互作用机理对各个处理后图像的物理含义及其应用进行了分析。研究表明,图像的梯度图可以反映图像中裂纹的形状及其分布;滤波后的图像灰度可以反映损伤程度;目标区域的标记图可以标记损伤的区域;最终分割图像可以全面反映以上所有信息。根据图像分析结果可以定量计算出各个区域所占总面积的比例,即等离子通道区、熔蚀区、折射率变化区各约占总面积的15%,55%和30%。这说明激光能量先沉积到很小范围的等离子通道区,高温高压等离子体向外扩展形成大范围熔蚀区,随着距离的增大,冲击波压强迅速减小,形成折射率变化区。

**关键词:**激光诱导损伤;分水岭算法;标记控制;激光等离子体冲击波

**中图分类号:**TP391.4;TN241 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101806.1387

## Morphological analysis of laser induced glass bulk damage by marker controlling watershed algorithm

HAN Jing-hua<sup>1</sup>, HE Chang-tao<sup>2</sup>, ZHANG Qiu-hui<sup>1</sup>, LI Bin-hou<sup>1</sup>,  
FENG Guo-ying<sup>1</sup>, YANG Li-ming<sup>3</sup>, XIE Xu-dong<sup>3</sup>, ZHU Qi-hua<sup>3</sup>

1. College of Electronics & Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;
2. College of Electronic and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610051, China;
3. Laser Fusion Research Center, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The laser induced glass bulk damage morphology has been analyzed quantitatively, and the size and classification of the damage are obtained by using the image processing technology based on the improved watershed segmentation algorithm. The physical meaning and application of each processed image are analyzed in detail based on the interaction mechanism between the laser-induced plas-

**收稿日期:**2009-07-09; **修订日期:**2009-09-30.

**基金项目:**国家自然科学基金重大项目(No. 60890203);国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金资助课题(No. 10676023);四川大学青年教师科研启动基金(No. 2009SCU11008)

ma shock waves and the glass. The results show that the gradient picture can reflect the shape and distribution of a crack, the shade of the image gray aftering filter can reflect the degree of the damage, the marker picture of object region can reflect the region of the damage, and the final segmentation result owns all the characteristics above and can fully reflect all information mentioned above. Furthermore, each area is analyzed of the light of the final segmentation images. The analysis results show that the ratios of the filamentary of plasma channel, the fusion range and the region of varying refractive index to the entire analyzed area are about 15%, 55% and 30%, respectively. The result implies that laser energy is deposited into the small range of filamentary of plasma channel firstly; Following that, the plasma expands outward because of the high temperature and extreme pressure to form a large fusion range; With the increase of the distance from the centerline, the pressure of the laser plasma shock wave will reduce rapidly and the region of varying refractive index is formed.

**Key words:** laser induced damage; watershed algorithm; marker control; laser plasma shock wave

## 1 引言

长期以来,光学元件的损伤问题一直是限制激光器能量输出的主要因素之一<sup>[1-2]</sup>。一般研究激光诱导损伤的方法是先对介质破坏的特性进行观察和归纳,然后结合激光与物质的作用机理进行理论分析,得出损伤的破坏机制<sup>[3-4]</sup>,在此基础上采用相应的措施来对光学元件的加工过程进行严格的控制,达到提高损伤阈值的目的<sup>[5-6]</sup>。

就整个研究思路来看,对光学元件损伤的特点进行精确的观测和分类是对损伤机理进行分析的根本依据<sup>[7-8]</sup>。但是,大量文献表明,目前对激光损伤形貌的研究基本上都停留在人眼直接观察和分析损伤的微观图像基础之上,这样就不可避免地引入了一些人为主观因素的影响,为后续的理论分析带来了较大的误差和不便<sup>[9-10]</sup>。尤其是对在同一损伤点含有多种损伤类型的损伤形貌,用肉眼更是很难判断<sup>[8-9]</sup>,为了更为精确客观地分析图像细节,通常采用图像处理的方法进行分析<sup>[11]</sup>。本文尝试采用基于标记控制分水岭算法的数字图像处理技术对玻璃激光体损伤的复杂形貌进行了较为细致的分割,对各种损伤类型进行了图像标定。

## 2 损伤图像的分割方法

### 2.1 基于标记控制的分水岭算法的原理

分水岭算法是 Vincent 和 Soille 于 1991 年

根据水面浸没地形提出的一种图像分割方式,这种方法具有性能优良、运算简单、能够较好提取运动对象轮廓进而准确得到运动物体边缘的优点<sup>[12]</sup>。但是由于会受到图像量化误差和区域内纹理细节的影响,会形成多个分水岭,往往造成图像的过分割,分水岭算法一般都是基于梯度图像的。本文采用 Sobel 算子分别检测了损伤图像在水平和垂直方向的梯度图像  $I_x$  和  $I_y$ , 则图像的梯度可以表示为:

$$\nabla I = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \quad (1)$$

为了得到较好的分割结果,采用了改进的基于标记控制的分水岭算法:即在分水岭算法之前,通过数学形态学的重构运算对图像进行滤波处理,然后对损伤图像中目标和背景进行标记,再通过强制最小值技术对梯度图像进行重构,最后对重构的梯度图像进行分水岭变换。本文分割算法的流程如图 1 所示。

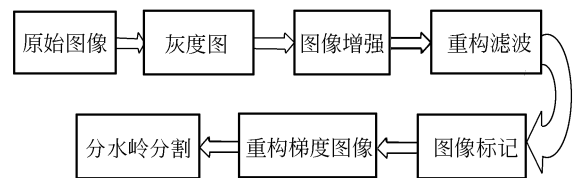


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow

### 2.2 形态学重构滤波器<sup>[13]</sup>

本文采用开闭运算重构相结合的形态学滤波方法对图像进行处理<sup>[14]</sup>,其重构滤波器的结构如图 2 所示。

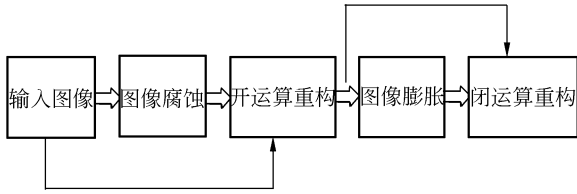


图 2 重构滤波器结构

Fig. 2 Reconstructing the structure of filter

2.2.1 图像腐蚀

用  $f$  表示灰度级为  $n$  的损伤图像,当使用结构元素  $b$  对图像  $f$  进行形态学腐蚀时,可定义为:

$$f_e = (f \ominus b)(x, y) = \min\{f(x+x', y+y') - b(x', y') \mid (x', y') \in D_b\}, \quad (2)$$

式中:  $D_b$  表示二值矩阵,用于定义邻域中相应位置像素的最小值运算,用于去除小的对象。

2.2.2 开运算重构

使用形态学开运算对腐蚀后的标记图像进行重构,原图像则作为掩模,可定义为:

$$\epsilon_1^{(1)}(f_e) = (f_e \oplus b) \vee f, \quad (3)$$

式中:  $\vee$  表示逐点比较取最大值,则对于灰度级为  $n$  的图像  $f$ ,进行  $n$  次迭代运算:

$$\epsilon_1^{(n)}(f_e) = \epsilon_1^{(1)} \epsilon_1^{(1)} \dots \epsilon_1^{(1)}(f_e), \quad (4)$$

则  $f_e$  对  $f$  的灰度级开运算重构的结果为:

$$f_{0\_rec} = \bigwedge_{n \geq 1} \epsilon_1^{(n)}(f_e), \quad (5)$$

式中:  $\bigwedge$  表示逐点比较取最小值。

2.2.3 图像膨胀

在以上处理的基础上再对开运算重构的结果进行形态学膨胀,定义为:

$$f_d = (f \oplus b)(x, y) = \max\{f_e(x-x', y-y') + b(x', y') \mid (x', y') \in D_b\}, \quad (6)$$

2.2.4 闭运算重构

将形态学膨胀运算后的图像  $f_d$  求补,以作为标记图像;再将开运算重构后的图像  $f_{0\_rec}$  求补,作为掩模图像,使用  $f_d$  对  $f_{0\_rec}$  进行闭运算重构处理,方法与开运算重构相同,运算结果记为  $f_{0\_rec}$ 。

2.3 图像标记<sup>[15]</sup>

取灰度图像中  $f_{c\_rec}$  的局部区域最大值进行标记,然后将灰度图转化为二值图像,此二值图像就是目标的标记图像,记为  $f_{gm}$ ;采用阈值分割方法对  $f_{c\_rec}$  继续进行分割,将分割结果作为背景标记图像,记为  $f_{bw}$ 。

2.4 基于标记控制的分水岭算法<sup>[16]</sup>

将背景标记图进行欧式距离变换<sup>[17]</sup>,背景标

记图像是一个与原图像大小相同的二维数组,可以表示为  $A_{M \times N} = [a_{ij}]$ ,其中  $a_{ij} = 0$  的像素对应背景,  $a_{ij} = 1$  的像素对应目标。设  $B = \{(x, y) \mid a_{xy} = 0\}$  为背景点集合,则距离变换是对  $A$  中的像素点  $(i, j)$  求:

$$d_{ij} = \min\{D[(i, j), (x, y)], (x, y) \in B\}, \quad (7)$$

式中:  $D[(i, j), (x, y)] = \sqrt{(i-x)^2 + (j-y)^2}$ ,得到欧式空间的变换图像  $D_{M \times N}$ 。

利用数学形态学极小值标定技术,把目标标记图像  $f_{gm}$  和距离变换后的图像的  $d$  作为梯度图像的局部最小值,代替原来的局部最小值,这样经过修改的梯度图像可以表示为:

$$\nabla I_G' = IMM\text{MIN}(\nabla I_G, f_{gm} | d), \quad (8)$$

其中:  $IMM\text{MIN}(\cdot)$  表示形态学极小值标定操作,最后将  $\nabla I_G'$  进行分水岭变换,最终计算得到理想的分割结果。

3 损伤图像的分割结果

3.1 玻璃体损伤形貌的采集

采用图 3 的实验装置,把激光脉冲聚焦到 K9 玻璃内部,使其产生损伤点,再使用 KEYENCE 公司的 VHX-600 显微镜对损伤点进行观察和记录。

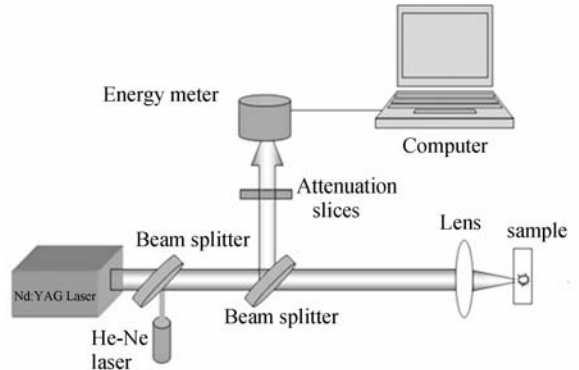
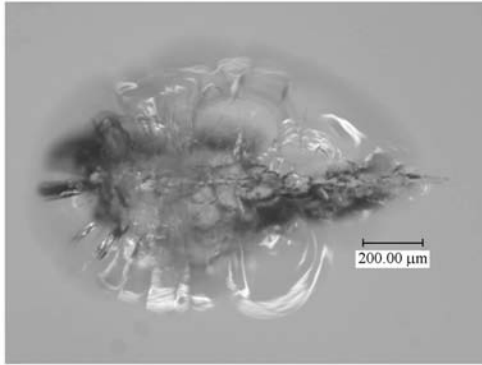


图 3 实验装置

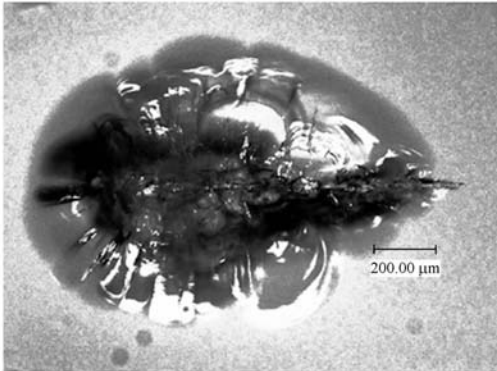
Fig. 3 Experimental setup

在实验装置中,用 He-Ne 激光准直整个光路,用凸透镜对激光光束进行聚焦。入射激光脉冲经分光镜(透射与反射的能量比为 8 : 2)反射后再经过衰减片后到达能量计。实验中的激光器为镭宝公司的 SGR-10 固体脉冲激光器,波长为 1 064 nm,脉宽为 18 ns,输出的激光脉冲为高斯脉冲,输出能量的稳定度约为  $\leq 3\%$ 。能量计是 Ophir 公司的 PE25 能量计,其能量测量范围为

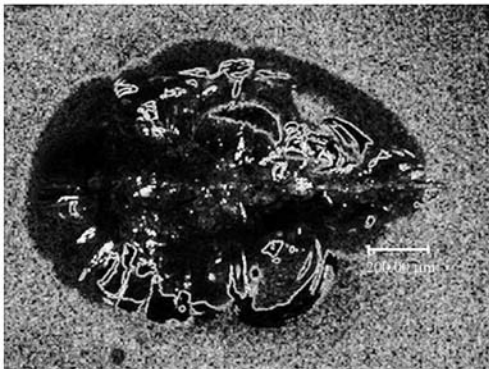
200  $\mu\text{J}$ ~10 J, 测量精度可以达到 $\pm 3\%$ , 测量信号可以实时输入计算机。所用的 K9 玻璃样品的尺寸为 17 mm $\times$ 7 mm $\times$ 80 mm, 表面粗糙度 $<1$  nm。经过 CCD 测量得其聚焦半径大约为 14.2  $\mu\text{m}$ 。在以上条件下, 发生损伤概率为 50% 时, 激光脉冲能量为 31 mJ。典型的损伤形貌如图 4(a) 所示, 激光脉冲能量为 49 mJ, 激光入射方向是从右向左。



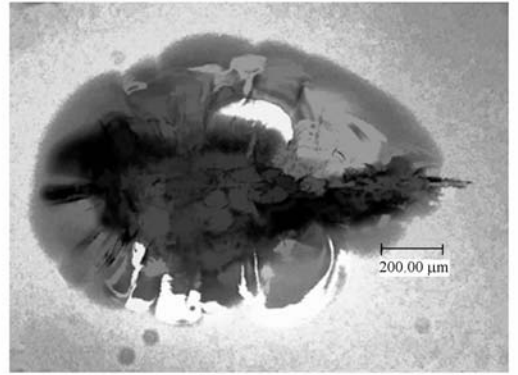
(a) 原始损伤图像  
(a) Original damage image



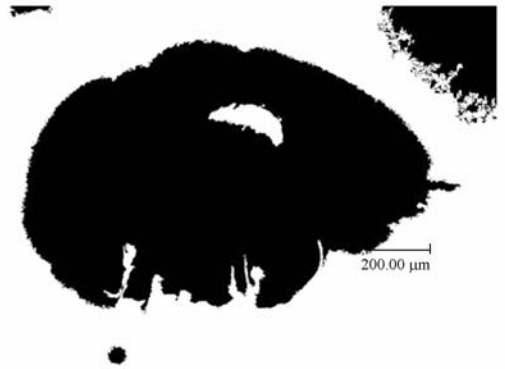
(b) 增强后的灰度图  
(b) Gray image after enhancing



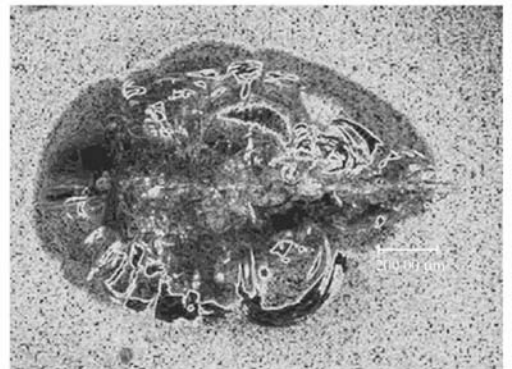
(c) 梯度图像  
(c) Gradient image



(d) 滤波后图像  
(d) Image after filtering



(e) 目标区域标记图  
(e) Marker image of object region



(f) 分割结果  
(f) Segmentation result

图 4 原始损伤图像及图像处理

Fig. 4 Original damage image and image processing

### 3.2 损伤图像分割结果

基于标记控制的分水岭算法对所采集的损伤图像的分割, 其具体步骤如下:

(1) 将原始损伤彩色图像转化为灰度图, 并

对其进行直方图增强。

(2) 采用  $3 \times 3$  的单元模板对增强后图像进行腐蚀, 然后对腐蚀图像进行灰度级开运算重构, 再使用相同的模板对重构图像进行膨胀, 并对膨胀后的图像进行闭运算重构, 提取重构图像的局部最大值标记为目标图像。

(3) 使用单阈值分割方法对上述重构图像进行分割, 将结果标记为背景图像, 并对标记后的背景图像进行欧式距离变换。

(4) 计算原灰度图像梯度, 运用形态学极小值标定技术将目标图像和背景图像强制标定为梯度图像的局部最小值, 以完成对梯度图像的修正。

(5) 使用分水岭变换算法对修正的梯度图像进行分割。

根据以上的分割算法理论, 对图 4(a) 进行图像分割, 按照分割流程得到的实验结果如图 4(b)~4(f) 所示:

由上面的分割结果可见, 经过处理后的损伤形貌的微观照片显示出不同的性质。如图 4(b) 所示, 增强后的灰度图中图像的层次感增强, 能够清晰地看出对玻璃的破坏程度由中心向四周逐渐减弱, 中间等离子体形成的丝状通道和裂纹较为明显; 图 4(c) 是梯度图, 可以明确地显示出裂纹的形状和分布, 以及损伤整体轮廓; 图 4(d) 显示的是滤波后的图像, 这个图的特点是可以清晰识别出损伤的严重程度和分布范围, 在中间位置的黑色区域表示玻璃的熔蚀区域, 外测较浅的区域则是折射率变化区域; 图 4(e) 是目标区域的标记图, 这个图可以清晰地显示损伤的区域和范围; 图 4(f) 则是最终的分割结果, 其中轴向的白色线条代表等离子通道、等离子通道两侧白色线条则代表裂纹的分布, 靠近轴的灰度较深的区域是代表烧蚀区, 在靠近边缘的浅灰色区域是则是折射率变化区域, 损伤区域与外部分界线非常明显, 可以精确标记损伤的范围。

## 4 损伤图像分割结果的物理分析

当强激光聚焦到块状玻璃里面时, 由于非线

性电离产生激光等离子体, 基于逆韧致吸收作用吸收大部分后续激光脉冲的能量而具有高温高压特性。高温高压激光等离子体向外膨胀, 形成高温高压冲击波, 对临近的高脆性玻璃产生破坏。因此, 玻璃的破坏特性由激光等离子体的空间分布特征和玻璃在高压下的变化特性共同决定, 下面分别进行详细的分析。

### 4.1 激光脉冲能量的空间沉积特征

根据能量守恒原理, 激光等离子体冲击波的强弱程度决定于沉积到激光等离子体内激光脉冲能量的多少, 因此要描述激光等离子冲击波的空间分布, 就必须定量计算激光能量在激光等离子体中的空间沉积规律。

根据图像分析结果可以定量计算出各个区域所占总面积的比例, 即等离子通道区、熔蚀区、折射率变化区各占总面积的 15%, 55% 和 30%。这说明激光能量先沉积到很小范围的等离子通道区。根据高斯脉冲传输的时空特性可以知道, 激光脉冲在聚焦处最先达到介质的损伤阈值, 所以首先在焦点处被击穿<sup>[18]</sup>。击穿产生的激光等离子体的掩蔽效应会对后续激光脉冲进行强烈的吸收, 由此也使得后续脉冲能量很少通过等离子而沉积<sup>[19]</sup>。随着时间的推移, 激光脉冲不断传输, 而在焦点后方的位置也不断达到介质的损伤阈值, 这样就会发现击穿的位置顺序是逆着激光传输的方向<sup>[20]</sup>, 这种激光等离子体的传播方式就是所谓的激光支持的爆轰波(LSDW)<sup>[21]</sup>。高斯光束聚焦后激光能量的沉积规律为<sup>[22]</sup>:

$$K = -A \cdot P_{\max} \left[ \beta \left( 1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2 \right) \right]^{-1} \cdot \frac{\tau_p}{\sqrt{4 \ln 2}} \left\{ \ln \left[ \beta \left( 1 + \frac{z^2}{z_R^2} \right) \right]^{-1} \right\}^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{z(z_R - z)^2}{(z_R^2 + z^2)^2}, \quad (9)$$

式中:  $A$  为激光等离子体的吸收系数,  $P_{\max}$  为激光脉冲的峰值功率,  $z_R$  是瑞利距离,  $\beta$  是激光脉冲峰值功率与损伤阈值之比,  $z$  是产生损伤的位置,  $\tau_p$  是脉冲宽度, 这里所有参数单位均为国际单位制。取  $A=0.7594$ , 根据实验参量可以模拟出距离焦点不同位置  $z$  处, 单位距离的激光能量沉积量。

由图 5 可见, 激光脉冲能量在空间的沉积量是从焦点处开始, 逆着激光传输的方向分布, 呈纺锤形。

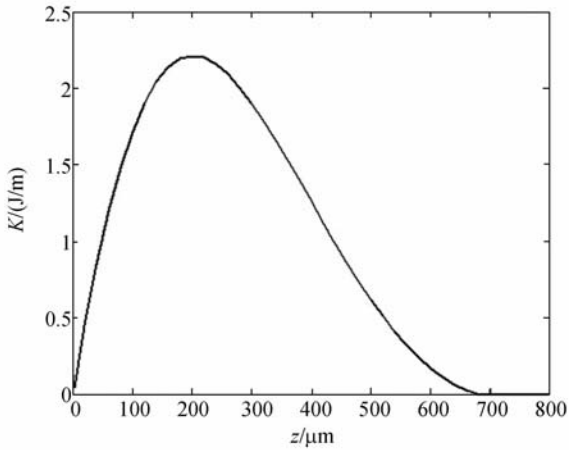


图 5 激光脉冲沉积能量的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of deposited laser pulse energy

#### 4.2 激光等离子体冲击波作用下玻璃的损伤特征

高脆性玻璃自身带有大量的内部裂纹、缺陷等,在高压作用下这些裂纹会蔓延增长和增多,形成随冲击波之后传播的破坏波<sup>[23]</sup>。裂纹的增长速度与外部压强关系密切<sup>[24]</sup>;当外界压强低于介质的最高弹性应力(HEL)时,其随压强的增大而增大;当外界压强高于 HEL 时(K9 玻璃的一般在 8.4~9.16 GPa),其扩散速度随压强变化不大,玻璃将发生完全断裂<sup>[25]</sup>;在大于 10 GPa 的高强度压强作用下,固体玻璃还会发生结构的相变和熔化<sup>[26]</sup>。

为了等量研究损伤形貌的成因,本文对激光等离子体的冲击波空间特性进行了模拟。由于空间高斯的激光脉冲的激光能量主要集中在聚焦范围内,这使得大部分激光能量沉积到一个细长的区域,也使得这个小范围内的玻璃介质发生充分电离,所以会在损伤形貌图像上有一个细长的等离子体通道<sup>[22]</sup>,而等离子体向外膨胀主要是向垂直于该通道的方向,因此可以假设冲击波的冲击方向是垂直于轴向,这样就可以进一步推导出任意一点  $z$  的压强表达式<sup>[26]</sup>:

$$p_z(r) = \frac{K(z)}{\pi r^2} \quad (10)$$

激光能量在轴向的空间沉积特点决定了对应点压强的分布特点,在激光能量沉积的同时,高温高压等离子体向外膨胀,形成所谓的冲击波。这种冲击波的压力与距离等离子体通道的距离的平方成

反比,所以下降很快,基于实验条件可以模拟激光等离子体向外膨胀,形成冲击波(shock wave)的空间分布图,如图 6,其中彩色条纹单位为 GPa。

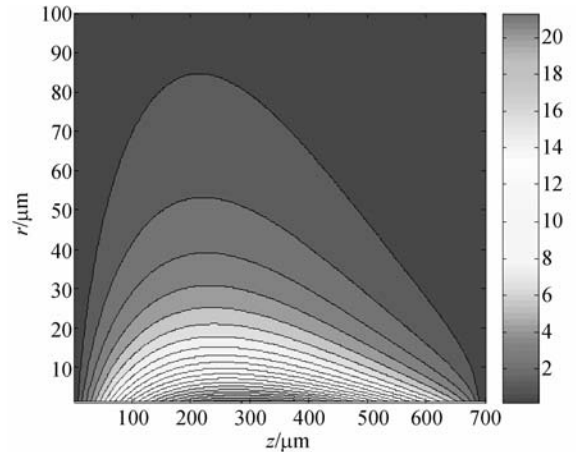


图 6 激光等离子体冲击波的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of laser plasma shock wave

由图 6 可见,激光等离子体冲击波是沿激光脉冲聚焦处的轴线呈对称分布,其强度也是随着垂直于轴线的方向迅速下降,因此造成的破坏程度也由中心向外迅速减小,这可以由图 4(b)看出。同时在高压冲击波作用下,玻璃的裂纹向外扩展和延伸,形成大量垂直于轴线的裂纹,其分布特征可以图 4(c)表示。在靠近轴线的位置,压强大于玻璃的 HEL 范围,介质会完全断裂,加上高温等离子体的烧蚀作用,形成了黑色熔蚀区。在裂纹的末端,由于裂纹的尖端产生的压力场会使得玻璃原子之间化学键断裂和原子位错,引起介质折射率发生变化,对应于色彩较浅的外部区域。由于玻璃介质分子间作用力很小(大约为 0.1 GPa),所以形成的外部区域很大<sup>[25]</sup>。烧蚀区和折射率变化区的分布图及整体损伤范围图可以分别由图 4(d)和图 4(c)清晰地表示。整个损伤图像的破坏程度、裂纹分布、损伤区域划分和损伤范围都可以由图 4(f)整体判断出来,所以是一个能全面反映损伤信息的图像。

由以上分析可见,利用图像处理的方式可以自动清晰地分析损伤的形貌特点,包括裂纹的分布、损伤整体范围、损伤的类型等,这有助于对激光损伤机理的准确研究和定量分析,是一种方便有效的研究方法。

## 5 结 论

研究激光诱导损伤的方法中,对损伤形貌的观察主要基于对其显微照片的肉眼分析,这不可避免带有主观误差。本文针对这种弊端,尝试采用标记控制分水岭分割算法的图像处理方法对玻璃体损伤的形貌类型进行标定和分析。根据处理结果可以用梯度图像的白色线条来表征激光等离

子体通道和裂纹,用滤波后图像灰度不同的区域来表征烧蚀区和折射率变化区,用目标区域标记图来标定整个损伤区域,即分割后的图像可以全面表征以上损伤类型,因此是一种效果最全面的图像处理方式。最后,根据激光等离子冲击波的对膨胀作用下玻璃的损伤特点,对激光诱导损伤形貌的各种损伤类型的形成进行了分析。

致谢:感谢与李大义教授、陈建国教授、窦汝海博士的有益讨论。

## 参考文献:

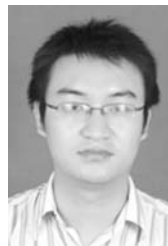
- [1] NICOLAAS B. Laser-induced electric breakdown in solids[J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1974, 10: 375-386.
- [2] CARR W, RADOUSKY H, RUBENCHIK A, et al.. Localized dynamics during laser-induced damage in optical materials[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 27: 087401.
- [3] MA G B, TAN W H, WANG ZH SH. Calculation of threshold dependence of laser induced damage upon pulse duration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(1): 22-27.
- [4] 吴东江, 曹先锁, 王强国, 等. 光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1721-1726.  
WU D J, CAO X S, WANG Q G, et al.. Damage detection and analysis of machined KDP crystal sub-surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1721-1726. (in Chinese)
- [5] YOSHIYAMA J, GENIN F Y. Study of the effects of polishing, etching, cleaving and water leaching on the UV laser damage of fused silica[J]. *SPIE*, 1997, 2744: 220-225.
- [6] 王卓, 吴宇列, 戴一帆, 等. 光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 16-21.  
WANG ZH, WU Y L, DAI Y F, et al.. Rapid detection of subsurface damage of optical materials in lapping process and its influence regularity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 16-21. (in Chinese)
- [7] JEAN-YVES N, LAURENT G, AKHOUAYRI, et al.. Laser-induced damage of materials in bulk, thin-film, and liquid forms[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(16): 3156-3166.
- [8] STUART B C, FEIT M D, HERMAN S, et al.. Nanosecond- to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics[J]. *Physical Review B*, 1996, 53: 1749-1761.
- [9] 张秋慧, 冯国英, 韩敬华, 等. 多脉冲激光对 K9 玻璃的表面损伤实验研究贾俊[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(1): 62-66.  
ZHANG Q H, FENG G Y, HAN J H, et al.. Investigation of laser induced damage on K9 glass surface using multi-pulse laser[J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2008, 20(1): 62-66. (in Chinese)
- [10] 郭少锋, 陆启生, 邓少永, 等. ns 激光对 K9 玻璃的破坏实验[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(7): 817-820.  
GUO SH F, LU Q SH, DENG SH Y, et al.. Experimental study ns pulsed laser induced damage in K9 glass[J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2004, 16(7): 817-820. (in Chinese)
- [11] 何长涛, 马孜, 陈建国, 等. 基于小波变换的薄膜激光损伤识别[J]. *激光技术*, 2007, 31(2): 131-136.  
HE CH T, MA Z, CHEN J G, et al.. Recognition of film laser damage based on wavelet transform[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 131-136. (in Chinese)
- [12] VINCENT L, SOILLE P. Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(6): 583-598.
- [13] 王勤, 查宇飞, 毕笃彦. 基于多分辨率分析和分水岭的图像分割方法[J]. *光电工程*, 2007, 34(6): 72-761.  
WANG X, ZHA Y F, BI D Y. Image segmentation based on multi-resolution analysis and watershed algorithm[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(6): 72-761. (in Chinese)

- [14] SERRA J, VINCENT L. An overview of morphological filtering [J]. *Circuits System Signal Process*, 1992, 11(1):47-108.
- [15] 刘珂, 李丽娟. 一种图像标记和目标特征统计算法[J]. *航空兵器*, 2009(4):38-41  
LIU K, LI L J. Algorithm with image label and statistical feature of target [J]. *Aero Weaponry*, 2009(4):38-41. (in Chinese)
- [16] 关新平, 黄娜, 唐英千. 一种基于标记阈值的水岭分割新算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(4):972-975.  
GUAN X P, HUANG N, TANG Y G. New watershed segmentation algorithm via marker threshold [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(4):972-975. (in Chinese)
- [17] BREU H, GIL J, KIRPATRICK D, *et al.*. Linear time euclidean distance transform algorithms [J]. *IEEE Trans. PAMI*, 17(5), 1995, 17(5):529-533.
- [18] DOCCHIO F, REGONDI P, CAPON M R C, *et al.*. Plasmas induced in liquids by nanosecond Nd:YAG laser pulses 1: Analysis of the plasma starting times [J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27:3661-3668.
- [19] DOCCHIO F, REGONDI P, CAPON M R C, *et al.*. Plasmas induced in liquids by nanosecond Nd:YAG laser pulses 2: Plasma luminescence and shielding [J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27:3669-3674.
- [20] CHING-HUA F, JON P. Modeling optical breakdown in dielectrics during ultrafast laser processing [J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(18):3124-3131.
- [21] 陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学 [M]. 北京:机械工业出版社, 1996:101-136.  
LU J, NI X W, HE A ZH. *The Physics of the Interaction for Laser and Materials* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1996:101-136. (in Chinese)
- [22] 韩敬华, 冯国英, 杨李茗, 等. 纳秒激光在 K9 玻璃中聚焦的损伤形貌研究 [J]. *物理学报*, 2008, 57(9):5558-5564.  
HAN J H, FENG G Y, YANG L M, *et al.*. Study on laser induced damage morphology of K9 glass with focusing nanosecond pulse [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(9):5558-5564. (in Chinese)
- [23] BOURNE N K, ROSENBERG Z, FIELD J. High-speed photography of compressive failure waves in glasses [J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, 78:3736-3789.
- [24] KANEL G, RASORENOV S V, FORTOV V E. *Shock-wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter* [M]. New York, Secaucus NJ: Springer-Verlag, 2004.
- [25] RASORENOV S, KANEL G, FORTOV V, *et al.*. The fracture of glass under high-pressure impulsive loading [J]. *High Pressure Research*, 1991, 6:225-232.
- [26] GAMALY E, JUODKAZIS S, NISHIMURA K, *et al.*. Laser-matter interaction in the bulk of a transparent solid: Confined microexplosion and void formation [J]. *Physical Review B*, 2006, 73:214101.

#### 作者简介:



韩敬华(1976—),男,山东滨州人,博士,讲师,2006年、2009年于四川大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光与物质相互作用的研究。E-mail: hjh\_scu@163.com



何长涛(1981—),男,河南信阳人,博士研究生,2004年于洛阳师范大学获得学士学位,2007年于四川大学获得硕士学位,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: hctmz@sina.com



张秋慧(1982—),女,河南平顶山人,博士研究生,2003年于河南师范大学获得学士学位,主要从事高功率激光损伤的研究。E-mail: newyear1234@163.com



谢旭东(1976—),男,四川遂宁人,助理研究员,2005年于天津大学获得硕士学位,主要从事强激光参数精密化诊断的研究。



李彬厚(1986—),男,山东德州人,硕士研究生,2008年于四川大学获得学士学位,主要研究方向为光与物质相互作用。E-mail: saintli86@163.com



朱启华(1969—),男,四川广安人,研究员,博士研究生,主要从事超短脉冲技术的相关研究。



杨李茗(1967—),男,浙江杭州人,博士,研究员,博士生导师,2000年于浙江大学获得博士学位,主要从事精密光学制造的相关研究。



通信作者:

冯国英(1969—),女,四川成都人,教授,博士生导师,1990年于浙江大学获得学士学位,1998年于四川大学获得博士学位,现为四川大学电子信息学院副院长,主要从事新型激光技术方面的研究。E-mail: guoying\_feng@yahoo.com.cn

## ●下期预告

# 石英玻璃化学机械磨削加工技术

仇中军<sup>1</sup>,周立波<sup>2</sup>,房丰洲<sup>1</sup>,椎名刚志<sup>2</sup>,江田弘<sup>2</sup>

(1.天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津300072;

2.日本茨城大学工学部,茨城日立316-8511)

石英玻璃基板的加工质量直接影响着光掩模设备的性能。为了实现石英玻璃基板的高效、高质量加工,本文进行了石英玻璃CMG(Chemical Mechanical Grinding)加工技术的初步研究。通过在磨削过程中主动增强磨粒与工件、结合剂与工件、磨削液与工件等的化学反应,并使化学反应与机械去除作用形成动态平衡,从而能够消除因材料脆性去除而造成的表面损伤等,实现大口径玻璃工件的高表面质量、高形状精度的加工。针对石英玻璃CMG加工的特点,开发了CMG专用砂轮及磨削液,并利用正交实验法进行了石英玻璃CMG加工工艺参数优化,分析了CMG加工过程中磨削压力、砂轮转速、磨削液流量、PH值等因素对加工表面粗糙度及加工效率的影响,并利用优化后工艺参数加工得到了Ra0.795nm的石英玻璃表面。加工后基板的光学性能和CMP加工基板相同,能够满足光掩模设备的性能需求。