

激光诱导熔石英粒子喷溅动力学特征自动获取

李仰亮¹, 沈超^{2*}, 邵立¹, 张玉钧^{1*}

(1. 国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽合肥 230037;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽合肥 230031)

摘要: 粒子喷溅是熔石英后表面激光损伤过程的重要现象, 其实验观测及动力学参数获取一直存在困难。为实现后表面损伤粒子喷溅动力学特征获取, 搭建了时间分辨双帧阴影成像系统, 并开发了基于分层 Voronoi 图和弹性势能模型的粒子识别与匹配算法。结合图像配准和去噪步骤, 该方法能够克服双帧阴影成像技术固有的背景噪声严重和原点失配的缺点, 在 6 μs 及之后的延迟图像中能够实现 100% 正确检测与匹配。与人工处理对比, 该方法能以像素精度同时获取粒子的尺寸、速度大小及飞行方向, 且数据处理时间缩短了约 20 倍。

关键词: 熔石英; 后表面损伤; 粒子喷溅; 动力学特征; 自动获取

中图分类号: TN24; TP39 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0305003

Automatic acquisition of dynamic characteristics of fused silicon particle ejection induced by laser

Li Yangliang¹, Shen Chao^{2*}, Shao Li¹, Zhang Yujun^{1*}

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;

2. Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Particle ejection is an important phenomenon in laser damage process of fused silicon exit surface, and it has been difficult to obtain the experimental observation and dynamic parameters. A time-resolved two-frame shadowgraphy system was built to acquire the dynamic characteristics of exit surface particle ejection. A particle recognition and matching algorithm based on layered Voronoi diagram and elastic potential model was developed. Combining the steps of image registration and denoising, this method can overcome the inherent shortcomings of serious background noise and mismatch of origin in two-frame shadowgraphy technology, and can achieve 100% correct detection and matching in the image of 6 μs delayed and later. Compared with manual processing, this method can simultaneously obtain the size, velocity and flight direction of particles with pixel accuracy, and the data processing time is reduced by about 20 times.

Key words: fused silicon; exit surface damage; particle ejection; dynamics characteristics; automatic acquisition

收稿日期: 2019-04-29; 修订日期: 2019-06-08

作者简介: 李仰亮 (1995—), 男, 硕士生, 主要从事光学及图像处理方面的研究。Email: liliangeei@163.com

通讯作者: 沈超 (1989—), 男, 博士后, 主要从事激光光谱方面的研究。Email: cshen@aiofm.ac.cn

张玉钧 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电子技术与应用和光学信息处理等方面研究。
Email: yjzhang@aiofm.ac.cn

0 引言

熔石英是最常用的光学元件之一,其激光损伤问题一直备受关注。主要基于两个方面的原因^[1-2]:一是有助于明确损伤机理,找出危险的损伤前驱体,提升元件抗损伤阈值^[3-4];另一方面,由于损伤事件具有丰富的实验现象和物理过程,也有助于加深对高功率激光与光学元件相互作用过程的理解^[5]。

由于场增强作用^[6]的影响,熔石英的激光损伤现象主要发生在后表面。在空气端,后表面损伤产物^[7-8]主要包括瞬态高温高压等离子体的形成及材料粒子的喷溅两方面。粒子喷溅现象具有丰富的物理内涵,且获取粒子的动力学特征对理解损伤事件中激光能量的沉积、耦合及分配过程极为重要,因此开展相关研究十分必要。然而,粒子喷溅的理论建模困难,同时,喷溅粒子速度快、尺寸小且持续时间长等特点对实验观测造成了很大的困难。美国利弗摩尔实验室的光学小组开发了一种时间分辨成像装置^[9-10],能够获取不同时刻下飞行粒子的瞬态图像。通过对比不同时刻粒子的位置,即可获得速度等参数。其结果表明^[11],熔石英后表面粒子喷溅约从激光作用后 30 ns 开始,一直持续到激光结束后数十微秒。粒子速度和尺寸则分别在数米每秒到数千米每秒和几微米到几百微米之间。对熔石英^[12]、KDP^[12]、CaF₂^[13]和 NaCl^[14]等多种材料^[15]进行的粒子喷溅观测结果表明,光学材料的粒子喷溅与材料本身的物化性质密切相关,具有一定的特异性。进一步开展相关研究需要进行大量实验,而传统的人工计算粒子参数效率偏低,同时依靠人为识别粒子的尺寸和位置效率低下且极易产生误差,因此亟需发展可原位观测和自动获取损伤粒子动力学特征的实验及数据处理方法。

文中将时间分辨成像技术与图像处理算法相结合,提出了一种在线自动获取粒子喷溅动力学特征的方法。采用基于电延时的双帧阴影成像系统^[16]获取粒子在两个不同时刻的飞行图像,实时对图像进行特征提取、粒子识别及匹配等处理,获得喷溅粒子在不同时刻的尺寸及位置参数,从而获取速度及飞行方向等动力学特征。该方法相比于人工识别配对与计算,不但数据更准确可靠(精度可达像素级),同时也大大缩短了数据处理时间,为激光损伤过程中的粒子喷溅

动力学特征分析提供了重要实验工具。

1 实验装置与算法思路

1.1 实验装置

实验采用的是基于偏振分光原理的双帧阴影成像系统。阴影成像的原理是利用激光光源作为照明光源,采用背照方式,将喷溅粒子瞬时图像冻结在相机芯片上,形成明暗分布的图样。该系统采用两台独立的 Nd:YAG 激光器作为照明光源,通过在光路中插入偏振片使得两束探测光的偏振态相互正交,并利用偏振分光棱镜将两束光合束后进行照明。探测光通过物镜后被物镜后的偏振分光棱镜再次分开并分别成像在不同的相机上,从而实现一次损伤拍摄两次图像。探测光之间及探测光与泵浦光之间的延迟均采用数字延时发生器 DG535 调控,并使用光电二极管和高速示波器记录准确延迟。

具体实验光路参考参考文献 [16],其中泵浦光参数为 1 064 nm、半高宽为 7.6 ns,探测光波长均为 532 nm,脉宽分别为 6 ns 和 8 ns。成像镜头为 2x 长距离显微物镜,CCD 相机像素尺寸为 4.5 μm×4.5 μm。两束探测光间利用 DG535 插入 300 ns 延迟,每一泵浦脉冲后进行一次拍摄,得到两帧时间间隔 300 ns 的实验图像。图 1 所示为 5 000 ns 延时泵浦脉冲后获取的两帧

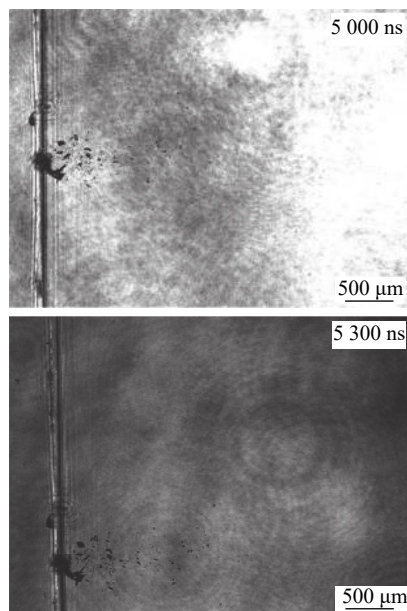


图 1 双帧阴影成像系统获取的典型实验图像

Fig.1 Typical experimental images obtained by the two-frame shadowgraphy system

实验图像,可以看出,双帧阴影成像的图像具有以下特点:(1)由于机械误差的存在,两帧图像原点有偏移;(2)由于激光光强的非均匀分布特性和强相干性,图像中布满由衍射花纹和激光散斑引起的强度噪声,易干扰粒子的识别。

1.2 算法思路

阻碍实现动力学特征参数自动获取的困难主要包括:(1)图像中布满由衍射和激光散斑造成的图像噪声;(2)探测光脉冲有一定的持续时间,高速运动喷溅粒子沿其路径被拉长形成运动伪影;(3)粒子在三维空间的旋转运动会造成二维成像面上粒子形状的变化。

为了自动获取喷溅粒子动力学特征参数,需要进行粒子的识别和匹配,既要识别出实验图像中的喷溅粒子还要确定两幅图像中粒子的对应关系。另外,由于成像系统中相机机械校准误差造成的原点失配问题,计算粒子位移需要对实验图像进行图像配准处理,即将两幅实验图像由不同坐标系变换到同一坐标系。尺度不变特征变换(SIFT)^[17]图像配准算法具有旋转不变性、尺度不变性、亮度变化不变性等特点,且对噪声有较好的稳定性。鉴于实验图像中由衍射花纹和激光散斑造成的噪声会干扰粒子识别,需要进行图像去噪处理改善图像质量。三维块匹配滤波(BM3D)^[18]去噪算法在峰值信噪比、边缘保护和细节恢复等方面的表现优异。因此,采用SIFT算法和BM3D算法对实验图像进行预处理。

粒子识别使用图像分割技术将喷溅粒子从实验图像中分割出来。实验图像中像素灰度分布复杂,导致喷溅粒子边界不清晰,且喷溅粒子没有明确的区域,模糊C均值聚类(FCM)^[19]适用于图像中存在不确定性和模糊性的图像分割,因此,FCM是粒子识别的首选技术。粒子匹配借鉴流体力学中的粒子跟踪测速(PTV)方法。基于弹簧模型的PTV^[20]以粒子簇为粒子匹配的基本单位,适用于存在旋转和剪切运动的流体,但是当粒子簇中出现或者消失粒子时,惩罚力大小的选择将严重影响粒子追踪效果。基于Voronoi图的PTV^[21]需要设置询问半径参数,询问半径参数的选取会影响算法结果。文中通过粒子分层实现基于Voronoi图粒子匹配方法的无参数化,然后结合基于分层Voronoi图和基于弹性势能模型的粒子匹配方

法,克服了基于弹簧模型的粒子匹配方法无法选取合理惩罚力的缺陷。

综合上述分析,文中设计的动力学特征自动获取算法由以下四个部分组成:(1)预处理;(2)粒子识别;(3)粒子匹配;(3)粒子动力学特征的确定,其具体流程如图2所示。

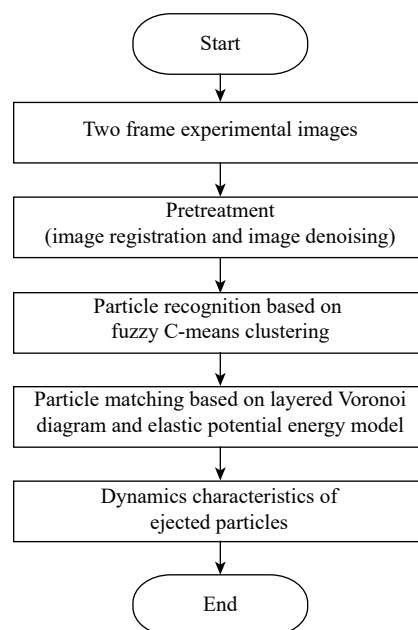


图2 激光诱导熔石英后表面喷溅粒子动力学特征自动获取算法流程图

Fig.2 Flow chart of automatic acquisition algorithm for dynamic characteristics of laser-induced fused silicon exit surface particle ejection

2 粒子动力学特征自动获取算法

实验图像预处理的具体步骤是:(1)使用SIFT算法获取图像变换参数;(2)利用图像变换参数和刚体变换模型(旋转和平移变换)截取实验图像中粒子喷溅目标区域;(3)使用BM3D算法对粒子喷溅目标区域图像进行去噪处理。

2.1 粒子识别

粒子识别采用基于FCM的图像分割方法实现,FCM通过迭代方法最小化目标函数来实现图像分割。FCM算法中的目标函数和约束条件分别为:

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m \|x_j - c_i\|^2 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ij} = 1, \mu_{ij} \in [0, 1] \quad (2)$$

计算得到迭代关系式为:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|x_j - c_i\|}{\|x_j - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (3)$$

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}^m} \quad (4)$$

式中: J 为目标函数; c 为聚类的分类数目; n 为数据集中数据个数; μ_{ij} 为样本 j 属于类 i 的隶属度; x_j 为数据集 j 的位置; c_i 为类 i 的中心位置; m 为样本的轻重程度。

粒子识别结果如图 3 所示, 图 3(a) 和 (b) 分别为去噪处理后和去噪处理前的粒子识别结果, 对比图中蓝色矩形框标记区域的粒子识别结果, 发现两个区域实际存在的粒子数分别为 3 个和 2 个, 但是去噪处理前图像中误识别的粒子数却达到 13 个和 18 个, 说明去噪处理能够有效抑制图像噪声对粒子识别的影响。识别出喷溅粒子后, 通过累加粒子像素数目和一阶矩原理计算粒子面积和形心。

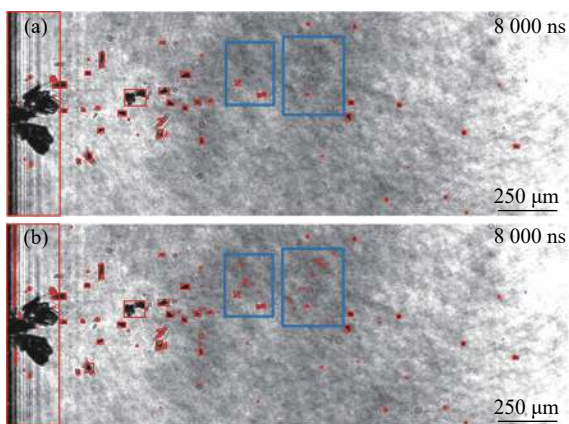


图 3 粒子识别结果。(a) 图像去噪处理后的粒子识别结果; (b) 图像去噪处理前的粒子识别结果

Fig.3 Particle recognition results. (a) Results of particle recognition after image denoising; (b) Particle recognition results without image denoising

2.2 粒子匹配

基于 Voronoi 图的粒子匹配准确率和稳定性好,

但是由于其苛刻的成功匹配条件, 造成成功匹配的粒子数目较少, 为更加充分利用粒子间的相对位置关系, 文中提出一个两步的粒子匹配方法, 第一步是基于分层 Voronoi 图的粒子匹配, 其结果准确, 但是成功匹配的粒子数目较少; 第二步是基于弹性势能模型的粒子匹配, 可以在第一步的基础上实现更多粒子的匹配。

2.2.1 基于分层 Voronoi 图的粒子匹配

成像系统中探测光捕获的两帧图像分别称为 I_1 和 I_2 。假设 I_1 和 I_2 中粒子数目分别为 N_1 和 N_2 , I_1 和 I_2 中粒子集合分别表示为 A^x 和 A^y 。粒子分层是指根据粒子面积按照由大到小顺序将 A^x 和 A^y 粒子集合分成 $B_1^x, B_2^x, \dots, B_{n-1}^x, B_n^x$ 和 $B_1^y, B_2^y, \dots, B_{n-1}^y, B_n^y$ 等若干个子集, 子集间满足 $B_{i-1} \subset B_i$ 。分层匹配就是将对应子集进行粒子匹配, 前面子集正确匹配的粒子继续参与后面子集的特征描述但不参与粒子匹配, 剩余粒子不仅需要参与后面子集的特征描述还要参与粒子匹配。基于分层 Voronoi 图的粒子匹配需要依次从 B_1^x 和 B_1^y 子集到 B_n^x 和 B_n^y 子集进行 n 次操作。

(1) 粒子筛选: 筛选 B_i^x 和 $B_i^y (i \in \{1, 2, \dots, n-1, n\})$ 中粒子, 其中属于 $\{s_k\}$ 的粒子参与特征描述但不参与粒子匹配, 其余粒子同时参与特征描述和粒子匹配。

(2) 粒子特征描述: Voronoi 图由一组连接两相邻点直线的垂直平分线构成的连续多边形组成。通过 Voronoi 图方法划分粒子喷溅目标区域图像, 使图像中每个喷溅粒子都存在一个对应的区域, 该区域称为 Voronoi 单元。

以 8 000 ns 延时粒子集为例, 粒子集中粒子转化为对应特征曲线的过程如图 4 所示。具体来说, 将原始图像 (图 4(a)) 转化为 Voronoi 图 (图 4(b)), Voronoi 图中每个喷溅粒子及其单元分别用一个蓝点和一个封闭多边形表示。选择 Voronoi 图中一个单元作例, 将所选 Voronoi 单元分解成一组位于直角坐标系中的紧凑拼接的三角形 (I, II, ..., V), 坐标系中心 (x_0, y_0) 与单元内原始粒子的形心位置一致, 如图 4(c) 所示。对于标记为 I 的三角形, 其极径 r 作为极角 α 函数的计算公式为:

$$r(\alpha) = \frac{h}{\left| \sin(\alpha + \theta_1 - \alpha_1) + 1 - \text{logical}(\theta_1 - 90^\circ) \right|} \quad (5)$$

$$\text{logical}(x) = \begin{cases} 1 & (x \neq 0) \\ 0 & (x = 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$h = \frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{cases} A = y_2 - y_1 \\ B = x_1 - x_2 \\ C = x_2y_1 - x_1y_2 \end{cases} \quad (7)$$

对该 Voronoi 单元剩余的三角形 (II, III, ..., V) 进行相同操作, 该 Voronoi 单元对应的喷溅粒子转化为特征曲线 $r(\alpha)$, 如图 4(d) 所示。

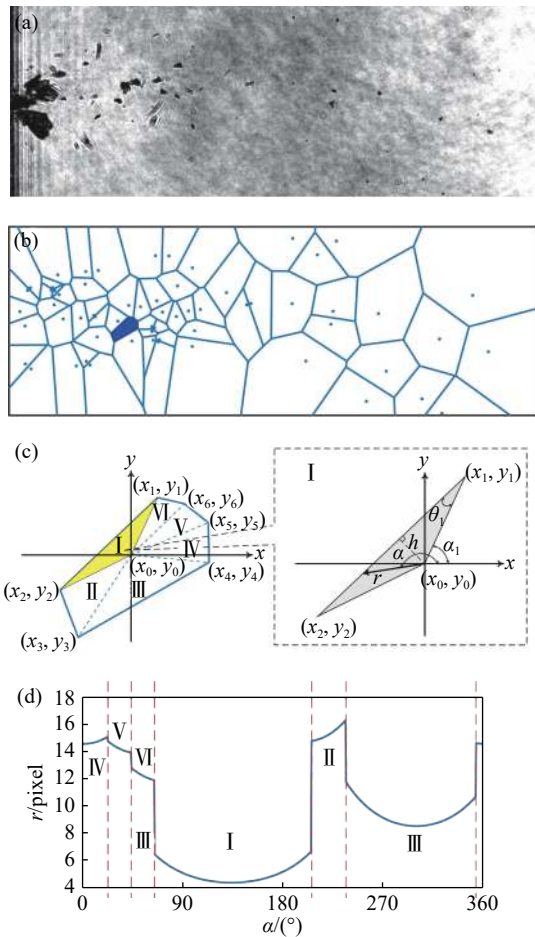


图 4 Voronoi 单元的特征曲线

Fig.4 Characteristic curve of a Voronoi cell

特征描述指利用 B_i^x 和 B_i^y 子集生成 Voronoi 图, 并计算子集中粒子的特征曲线 $r(\alpha)$, 利用特征曲线进行粒子匹配。

(3) 粒子匹配与检验: 确定候选粒子时设置筛选条件, 即两个待匹配粒子的面积差应该小于两个粒子中面积较小粒子的面积。利用筛选条件确定 B_i^x 中随机粒子 x_i 的粒子候选集 $\{y_{ij}\}$ 。

特征曲线间的相似系数定义为:

$$C_r = \frac{\text{cov}(r_1, r_2)}{\sqrt{\text{cov}(r_1) \text{cov}(r_2)}} \quad (8)$$

式中: ‘cov’代表两个向量的协方差; r_1 和 r_2 分别代表两个粒子对应的特征曲线。依次计算粒子 x_i 与候选粒子集 $\{y_{ij}\}$ 中粒子特征曲线间的相似系数, 选取相似系数最大的候选粒子 y_i 作为 x_i 的匹配粒子。设置相似系数阈值过滤错误匹配, 判定相似系数 $C_r \geq 0.6$ 时粒子匹配有效。

B_i^x 子集中的所有粒子重复上述匹配过程, 得到粒子匹配的初步结果。利用粒子间相对位置关系检验粒子匹配的初步结果, 其中正确匹配的粒子存入 $\{s_k\}$, 并将 $\{s_k\}$ 返回粒子筛选环节。接着对 B_{i+1}^x 和 B_{i+1}^y 执行上述操作, 直至完成对 B_n^x 和 B_n^y 的操作, 每对子集正确匹配的粒子相继存入 $\{s_k\}$, 最终正确匹配的粒子全部存储在 $\{s_k\}$ 中, 粒子匹配的第一步完成, 结果如图 5 所示。

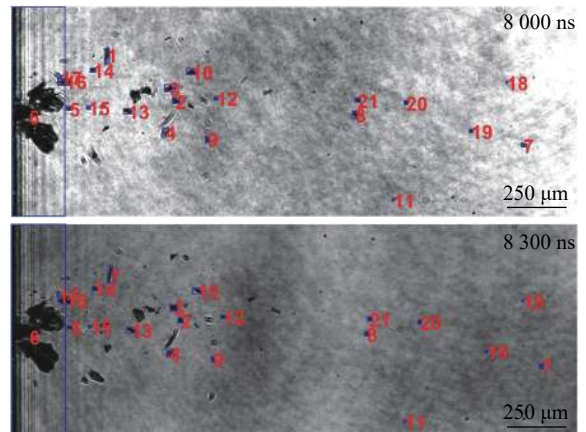


图 5 基于分层 Voronoi 图的粒子匹配结果, 标记相同数字的粒子代表同一粒子在 8 000 ns 和 8 300 ns 延时的不同位置

Fig.5 Particle matching results based on the layered Voronoi diagram, where the particles labeled with the same number are the same particles at 8 000 ns and 8 300 ns delays, respectively

2.2.2 基于弹性势能模型的粒子匹配

(1) 粒子筛选: 筛选 A^x 和 A^y 粒子集中粒子, 属于 $\{s_k\}$ 的粒子参与特征描述但不参与粒子匹配, 剩余粒子 R^x 和 R^y 同时参与特征描述和粒子匹配。

(2) 粒子特征描述: PTV 启发式 1 假设粒子的帧间位移是有限的^[21], 故四倍放大第一步中得到的粒子位移的最大值作为约束半径, 同时加以面积筛选条件对粒子进行筛选, 确定 R^x 中的随机粒子 x_i 的候选粒子集 $\{y_{ij}\}$ 。

基于弹簧模型^[20]的粒子匹配以粒子簇为基本单位, 假设簇内粒子由不可见的弹性弹簧连接。基于弹性势能模型的粒子匹配方法选取正确匹配粒子集

$\{s_k\}$ 中距离待匹配粒子 P 最近的五个粒子作为参考粒子, 计算待匹配粒子 P 与参考粒子间位置变化产生的弹性势能, 公式为:

$$U = \frac{1}{2}k\Delta x^2 \quad (9)$$

$$k = a\frac{1}{s} \quad (10)$$

式中: k 为弹性系数; Δx 为形变量; a 为常数; s 为弹簧长度。

R^x 和 R^y 的特征描述便是确定 R^x 中粒子在 I_1 和 I_2 中的参考粒子, 计算 R^x 中粒子候选粒子的弹性势能。

(3) 粒子匹配与检验: 粒子匹配就是比较候选粒子集 $\{y_{ij}\}$ 中粒子的弹性势能, 选取弹性势能最小的候选粒子 $y_i (y_i \in R^y)$ 作为 $x_i (x_i \in R^x)$ 的匹配粒子。 R^x 集合中的所有粒子重复上述匹配过程, 得到粒子匹配的初步结果。利用粒子间相对位置关系检验粒子匹配的初步结果, 其中正确匹配的粒子存入 $\{s_k\}$, 粒子匹配的最终结果如图 6 所示。

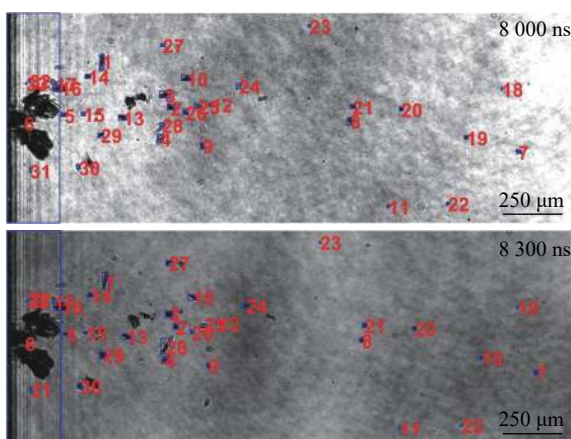


图 6 基于分层 Voronoi 图和弹性势能模型的粒子匹配结果

Fig.6 Particle matching results based on layered Voronoi diagram and elastic potential model

2.3 粒子动力学参数计算公式

实现粒子匹配后, 利用粒子的形心坐标估算粒子瞬时速度, 公式为:

$$\vec{v}_{est} = \Delta s / \Delta t = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} / \Delta t \quad (11)$$

式中: Δs 为粒子间位移; Δt 为 I_1 和 I_2 之间的时间间隔; (x_2, y_2) 和 (x_1, y_1) 分别为粒子在 I_2 和 I_1 中的形心坐标。粒子的等效直径定义为与喷溅粒子面积相等的圆的直径, 计算公式为:

$$d = \sqrt{4na^2/\pi} = \sqrt{2(n_1 + n_2)a^2/\pi} \quad (12)$$

式中: n 为粒子在图像中所占平均像素数目; a 为单个像素代表的实际尺寸; n_1 和 n_2 分别为粒子在 I_1 和 I_2 中所占像素数目。

3 结果与讨论

图 7 描述了上述算法的实际精度, 即在不同时刻下正确匹配的粒子数目与粒子匹配总数目的比值。其中, 粒子匹配的准确性通过人工识别来判断。可以看出, 1 000 ns 延时以下, 粒子匹配的准确率为 0。1 000~6 000 ns 之间准确率呈现上升趋势, 但仍存在错误。在 6 000 ns 时刻左右, 粒子匹配的正确率已经达到 100%, 并且该匹配率可稳定持续到几十微秒延时尺度。更重要的是, 该算法能够大大节省数据获取和处理的时间。具体地, 使用文中算法测量某一延迟 (如 8 000 ns 延迟) 喷溅粒子的动力学参数仅需要约 56 s, 人工测量则需要近 20 min。算法在 6 000 ns 以内的正确匹配率不高, 尤其是 1 000 ns 及更早的延迟下甚至无法正确匹配的主要原因有两点: (1) 喷溅粒子分布密集, 图像中若干喷溅粒子粘连在一起形成一个形状不规则的大粒子, 造成若干粘连粒子被识别为一个粒子, 部分喷溅粒子不能成功识别; (2) 喷溅粒子尺寸小, 成像系统分辨率不够, 可观测到的粒子数目少, 提高成像系统分辨率会使视场变小, 造成喷溅粒子溢出视场, 视场中的粒子数目减少。

利用上述算法, 初步分析了熔石英后表面喷溅粒

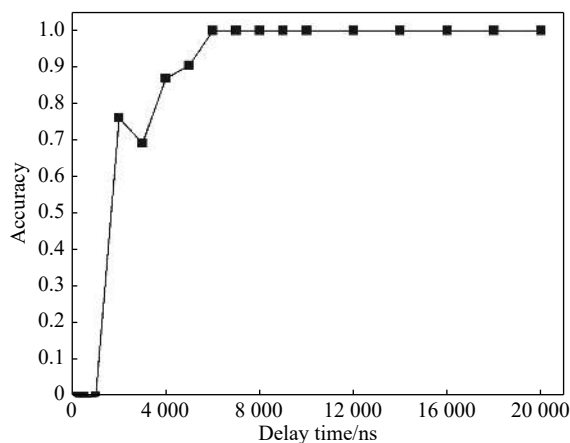


图 7 不同延时下正确匹配数目与粒子匹配总数的比值

Fig.7 Ratio of the number of correct matching to the total number of particle matching with diverse delays

子动力学特征,如图 8 和 9 所示。图 8 所示为粒子尺寸与速度分布图,图 9 则为粒子的速度矢量场,其中矢量长度代表速度大小,矢量箭头代表速度方向。图 8 中可以看出,喷溅过程中存在各种尺寸(1~100 μm)和速度(400~5 m/s)的喷溅粒子,并且粒子喷溅过程持续约 40 μs。总结图 8 的结果,2 000 ns 延迟实验图像中观察到速度高达 400 m/s 且直径约 10 μm 的喷溅粒子。延迟约 10 μs 时,喷溅粒子速度降低至约 100 m/s,并且对于 10~40 μs 的延迟,粒子速度继续进一步降低至约 5 m/s,可以观察到等效直径约 100 μm 的片状喷溅粒子。值得注意的是,喷溅粒子速度与尺寸分布规律与已报道的 355 nm 诱导的粒子规律^[11]相似,尽管文中采用的是 1 064 nm 波长激光作为泵浦光。这表明粒子喷溅现象与波长关系不大。事实上,因为泵浦激光的波长只影响能量沉积的大小^[22],激光能量沉积到材料内部产生的粒子喷溅属于材料的本征响应,因

此不同波长激光导致相似的粒子喷溅规律是可以理解的。

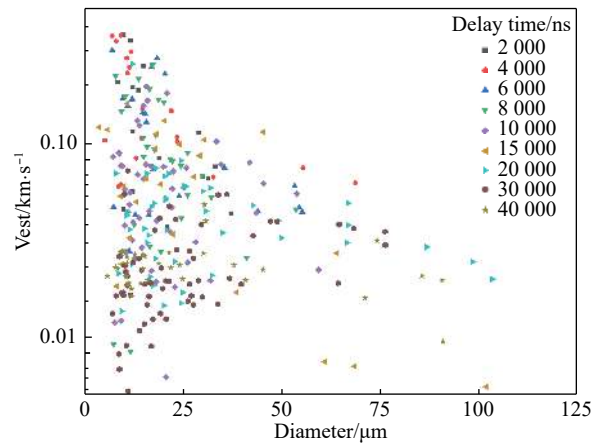


图 8 不同延迟时间的粒子瞬时速度和尺寸模拟

Fig.8 Estimation of particles instantaneous speed and size at diverse delay times

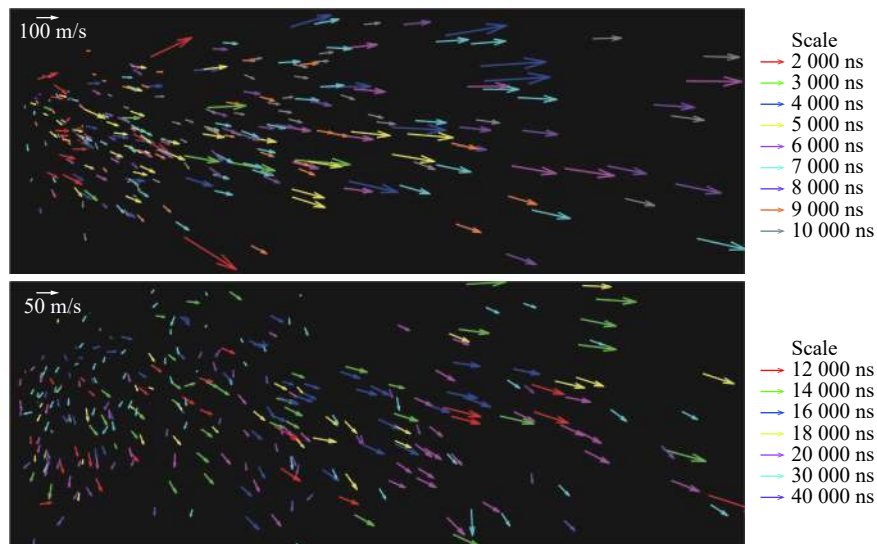


图 9 粒子喷溅现象速度矢量场,其中矢量长度代表速度大小,矢量箭头代表速度方向

Fig.9 Velocity vector field of particle ejection phenomenon, where the vector length represents the magnitude of velocity and the vector arrow represents the direction of velocity

图 9 中可以看出,熔石英喷溅粒子在 10 μs 延迟以内的速度矢量场都以损伤点为中心呈扇形发散,分布较为规律,但在更长的延迟时,靠近样品表面的粒子飞行方向变得较为杂乱,有的粒子飞行方向甚至朝向样品表面。事实上,这一规律在 355 nm 诱导的粒子喷溅现象中也曾被观察到。等离子体膨胀引起的气流回旋被认为是导致粒子飞行方向变得杂乱的原

因^[23]。这一结果也表明,通过获取粒子的瞬态速度场,损伤过程中喷溅的粒子可以作为示踪粒子来研究损伤点附近的气流运动规律。

4 结 论

提出了一种基于图像处理技术的粒子喷溅动力学特征自动获取算法。该算法能够实现光学元件损

伤过程中喷溅粒子速度和尺寸等动力学参数的自动测量,且该方法可以利用更短的时间获得更精确的数据点和更充足的数据量。其中,基于模糊 C 均值聚类的粒子识别方法能够适应实验图像不确定和模糊的特点,较好地实现喷溅粒子的识别。基于分层 Voronoi 图的粒子匹配算法采用分层匹配方法克服了询问半径参数对基于 Voronoi 图的粒子跟踪测速算法的影响,实现了算法的无参数化。弹性势能模型基于分层 Voronoi 图粒子匹配的结果克服了粒子簇中出现或者消失粒子对弹簧模型准确性的影响。提出的粒子匹配方法能够更加充分的利用喷溅粒子间的相对位置关系实现粒子匹配,在确保准确率的前提下极大的提高正确匹配粒子的数目。总体来说,文中提出的方法具有概念简洁、准确率高和无参数的特点。相比于人工测量,文中提出的算法可以将数据处理时间缩短约 20 倍。

参考文献:

- [1] Negres R A, Cross D A, Liao Z M, et al. Growth model for laser-induced damage on the exit surface of fused silica under UV, ns laser irradiation [J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 3824–3844.
- [2] Sun L, Ni R, Xia H, et al. Theoretical and experimental research on laser-induced damage of fused silica optics due to stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 1–15.
- [3] Cormont P, Combis P, Gallais L, et al. Removal of scratches on fused silica optics by using a CO₂ laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28272–28289.
- [4] Doualle T, Gallais L, Cormont P, et al. Effect of annealing on the laser induced damage of polished and CO₂ laser-processed fused silica surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(21): 213106.
- [5] Demange P, Negres R A, Raman R N, et al. Role of phase instabilities in the early response of bulk fused silica during laser-induced breakdown [J]. *Physical Review B*, 2011, 84(5): 054118.
- [6] Crisp M D, Boling N L, Dube G. Importance of Fresnel reflections in laser surface damage of transparent dielectrics [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(8): 364–366.
- [7] Demos S G, Negres R A, Raman R N, et al. Material response during nanosecond laser induced breakdown inside of the exit surface of fused silica [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(3): 444–452.
- [8] Demos S G, Raman R N, Negres R A. Time-resolved imaging of processes associated with exit-surface damage growth in fused silica following exposure to nanosecond laser pulses [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4875–4888.
- [9] Davis S J, Raman R N, Heaven M C, et al. Time-resolved imaging of material response following laser-induced breakdown in the bulk and surface of fused silica[C]// Proc SPIE, 2010, 7581: 75810D.
- [10] Raman R N. Time-resolved microscope system to image material response following localized laser energy deposition: exit surface damage in fused silica as a case example [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(1): 013602.
- [11] Raman R N, Negres R A, Demos S G. Kinetics of ejected particles during breakdown in fused silica by nanosecond laser pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(5): 051901.
- [12] Demos S G, Negres R A, Raman R, et al. Comparison of material response in fused silica and KDP following exit surface laser-induced breakdown[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2013, 8885: 88850W.
- [13] Demos S G, Negres R A, Rubenchik A. Dynamics of the plume containing nanometric-sized particles ejected into the atmospheric air following laser-induced breakdown on the exit surface of a CaF₂ optical window [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104: 031603.
- [14] Shen C, Cheng X A, Xu Z, et al. Observation of particle ejection behavior following laser-induced breakdown on the rear surface of a sodium chloride optical window [J]. *Optical Engineering*, 2016, 56(1): 011009.
- [15] Demos S G, Negres R A, Raman R N, et al. Relaxation dynamics of nanosecond laser superheated material in dielectrics [J]. *Optica*, 2015, 2(8): 765–772.
- [16] Shen Chao. Investigation of dynamics of high power nanosecond laser-induced damage of fused silica optical windows[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)
沈超. 高功率纳秒激光诱导熔石英元件损伤动力学研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [17] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91–110.
- [18] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. Image denoising by sparse

- 3-D transform-domain collaborative filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8): 2080–2095.
- [19] Bezdek J C. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms [J]. *Advanced Applications in Pattern Recognition*, 1981, 22(1171): 203–239.
- [20] Okamoto K, Hassan Y A, Schmidl W D. New tracking algorithm for particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 1995, 19(5): 342–347.
- [21] Zhang Y, Wang Y, Yang B, et al. A particle tracking velocimetry algorithm based on the Voronoi diagram [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(7): 075302.
- [22] Diaz R, Chambonneau M, Courchinoux R, et al. Influence of longitudinal mode beating on laser-induced damage in fused silica [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 674–677.
- [23] Raman R N, Elhadj S, Negres R A, et al. Characterization of ejected fused silica particles following surface breakdown with nanosecond pulses [J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27708–27724.