

飞秒激光等离子体光斑图像增强及亮度分析

王福斌^{1,2*}, 刘洋¹, 潘兴辰¹, 王宜文¹

¹华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山 063210;

²卡尔加里大学机械及制造工程系, 阿尔伯塔 卡尔加里 T2N 1N4

摘要 飞秒激光加工单晶硅材料过程中会伴随产生等离子体,通过 CCD 相机采集等离子体的光辐射信号得到等离子体光斑图像。针对光斑图像边缘与背景区域对比度不明显、信噪比低的特点,对光斑图像进行增强处理,并进一步对光斑图像亮度特征进行分析。首先,对原始光斑图像进行滤波,采用主成分分析方法将其增强,对得到的第一主成分图像进行伪彩色处理,以便于分析其能量分布,并依据其能量分布信息将光斑的核心区域分割出来。其次,分别计算原始光斑图像的质心、长轴以及核心烧蚀区的质心与长短轴,分析图像的几何特征,据此判断激光烧蚀加工的方向。再次,采用 Niblack 分割方法分割原始图像的灰度图,基于分割后的二值图像掩模亮度信息,得到光斑图像的亮度特征。最后,分析光斑亮度特征与激光烧蚀加工方向、激光功率的关系。亮度特征与加工方向的相关系数小于 0.09,与激光功率的相关系数大于 0.5。结果表明:光斑图像的亮度特征不受加工方向的影响,光斑亮度特征具有较强的稳定性,可用于激光烧蚀功率的识别。

关键词 超快光学; 飞秒激光; 等离子体光斑; 图像增强; 光斑亮度; 加工方向

中图分类号 TN249; TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0202001

Image Enhancement and Luminance Analysis of Femtosecond Laser Induced Plasma Spot

Wang Fubin^{1,2*}, Liu Yang¹, Pan Xingchen¹, Wang Yiwen¹

¹School of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;

²Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta T2N 1N4, Canada

Abstract The plasma is produced during the monocrystalline silicon material is ablated by femtosecond laser, whose spot image can obtained by the collection of the radiation signals of plasma with CCD camera. Considering the characteristics that the contrast between the edge and background areas of plasma spot is not obvious and the signal to noise ratio is low, the spot image is enhanced and the brightness characteristics of this spot image are further analyzed. Firstly, the original spot images are filtered and then enhanced by the principal component analysis method. The obtained first principal component image is pseudo-color processed in order to analyze its energy distribution, and the core region of the spot is segmented according to its energy distribution information. Secondly, the centroid and long axis of the original image as well as the centroid, long and short axes of the core ablation zone are calculated, and the geometrical features of the image are analyzed. Based on these, the laser ablation direction is determined. Thirdly, the Niblack segmentation method is used to divide the gray image of the original image, and the luminance characteristics of the spot image are obtained based on the luminance information of the segmented binary image mask. Finally, the relationship of brightness characteristics of spot with laser ablation processing direction and laser power is analyzed. The correlation coefficient between brightness characteristics and processing direction is less than 0.09, and the correlation coefficient between brightness characteristics and laser power is more than 0.5. The results show that the luminance characteristics of spot image are not affected by the processing direction and the spot light intensity is stable, which can be used for the identification of laser ablation power.

收稿日期: 2018-09-19; 修回日期: 2018-10-11; 录用日期: 2018-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(71601039)

* E-mail: wfb2313@126.com

Key words ultrafast optics; femtosecond laser; plasma spot; image enhancement; spot brightness; processing direction

OCIS codes 320.2250; 320.7120; 100.0118; 100.2980; 100.2960

1 引 言

飞秒激光微结构加工的长度和宽度可以通过控制精密加工平台来保证其精度,但烧蚀深度的实时控制存在诸多困难。与普通激光加工材料的机制不同,飞秒激光束聚焦在材料表面与物体作用时没有熔化过程。物体原子中的电子吸收激光光子能量后,光子能量就会转化为电子等微小颗粒的动能,颗粒直接从物体表面分离,温度达到 2000 K 时就会形成等离子体^[1]。等离子体逸出过程中会产生大量的信息,包括声信号、电信号、热信号以及光信号等,其中的光信号被广泛应用于激光加工检测。Chen 等^[2]提出了一种利用飞秒激光触发等离子体衍射光来精确控制微通道烧蚀深度的综合微加工方案,通过分析等离子体亮度的变化趋势来估算铣削深度。Chen 等^[3]认为光斑亮度不能单独作为估算激光烧蚀深度的直接指标,并证明了烧蚀深度主要取决于激光能量密度、步距和进给速率。研究人员不但致力于光强与烧蚀深度的研究,还综合考虑了光斑图像几何特征的影响。Ho 等^[4]提出了一种激光钻孔深度在线估计方法,将图像特征应用到激光诱导等离子体区域检测,将区域大小转换为像素值,得到了像素与孔深的关系。吕威兴等^[5]在普通激光焊接过程中采集到了光致等离子体的图像,并提取该图像的面积、高度和摆角等特征参量,证明了该方法可以准确提取有效的光致等离子体特征信息。

飞秒激光烧蚀结果受激光脉冲能量、材料特性、进给速率、光学条件和散焦距离等诸多参数的影响,大多研究人员采用控制变量法,从温度模型或分子动力学等角度分析单一参数影响下的烧蚀结果^[6],对从等离子体发光现象判断加工结果这一直接分析方法的研究还不够深入。观察飞秒激光烧蚀现象,从物理思维的角度考虑,可知,激光能量越大,等离子体光斑面积越大,亮度越高^[7],然而实际加工过程中光斑形状的变化往往更吸引人们的注意,但不同形状光斑的亮度、大小很难精准地观测出来。通过 CCD 相机采集光斑图像,经过图像处理后可获得亮度特征^[8]。然而,采集到的光斑图像包含很多无效信息,会影响光斑分割效果,比如:光斑尾部等离子体消散残留会对光斑几何形状的判断产生影响,光

斑光晕会对亮度特征提取产生干扰等。因此,从光斑图像中获取有效的信息是十分必要的。

由于采集到的等离子体光斑图像目标弱小,对比度低,导致分辨目标区域比较困难,针对这一特点,首先对原图像进行增强处理,然后依据能量分布对光斑图像进行精准分割,保证光斑的有效性。提取分割前后光斑的几何特征,用于加工方向的判断。用 Niblack 分割图像掩模光斑的亮度分量,得到有效亮度特征区域,并分析其与加工方向的关系。在应用光斑图像特征进行飞秒激光烧蚀加工的闭环深度反馈控制系统中,主要考虑光斑图像核心区的像素面积等几何特征,依据光斑图像形状特征进行加工方向的在线实时辅助判别,对最终完全实现基于图像的飞秒激光烧蚀加工微尺度结构的几何深度控制具有重要意义。本文通过分析相关性,在一定程度上量化光斑亮度与功率之间的关系,发现光斑亮度可以作为分析光斑功率的图像特征,可以用于实现飞秒激光烧蚀功率的分类及烧蚀工艺参数的优化。

2 光斑图像增强

2.1 飞秒激光烧蚀实验

为了把飞秒激光变成微米或纳米级的实用加工工具,将可调飞秒激光系统、光学系统、CCD 照相机、高精度数控多轴加工平台等集成为飞秒激光微加工中心。其技术参数如下:激光功率范围为 0~1000 mW,激光光斑直径为 16 nm,同步频率为 1000 Hz,定位精度为 10 nm,聚焦目镜视场范围为 250 μm ×250 μm 。激光束聚焦物镜放大倍数通常选 5 或 10 倍。图 1(a)所示为加工中心的加工平台部分。实验中烧蚀的样品为 P 型掺杂(硼)单晶硅片,规格为 10 mm×10 mm,厚度为(650±10) μm 。实验发现,激光能量、进给速度、激光焦距、材料特性和环境条件等因素都会对等离子体光斑图像的形状及亮度造成影响。在匀速加工的条件下,采用不同功率的激光烧蚀 P 型掺杂(硼)单晶硅,激光焦点在材料表面,实验在空气中进行。图 1(b)为带状烧蚀痕迹,图 1(c)为实验过程中采集的等离子体光斑图像。

2.2 彩色空间混合滤波

HSL(Hue Saturation Lightness)彩色空间模

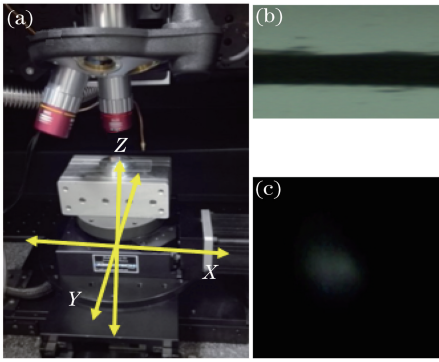


图1 飞秒激光加工平台及烧蚀的光斑图像。(a)加工平台；
(b)带状烧蚀痕迹；(c)等离子体光斑图像

Fig. 1 Femtosecond laser processing platform and ablated spot image. (a) Processing platform; (b) strip ablation trace; (c) plasma spot image

型是由色调(颜色的波长)、饱和度(颜色的深浅)和

亮度三个相互独立的彩色信息分量描述的模式^[9],该模型能更好地描述彩色,有效降低彩色信息强度分量的不利影响。将原 RGB 图像转换到 HSL 彩色空间,采用中值滤波和圆形均值滤波混合滤波^[10]方法对 S 分量和 L 分量进行处理,并采用正弦函数法处理 H 分量^[11],最后再将 HSL 空间转换到 RGB 空间。

2.3 光斑图像的 PCA 主分量提取

采用主成分分析(PCA)法来增强光斑目标,增大对比度。PCA 法处理 RGB 图像得到的第一主分量保留了 3 个通道最好的特征,比直接灰度化得到的图像对比度更大,保留了更多的有效信息。直方图均衡化方法对黑色背景部分过度增强,导致光斑区域与背景区域的区别仍不明显,不适合用于光斑图像的增强。图 2 所示为采用 PCA 法和其他方法得到的光斑目标增强效果对比。

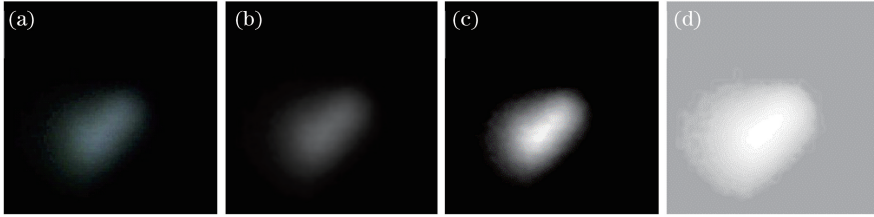


图2 增强效果对比。(a)原图;(b)灰度图;(c) PCA 增强图;(d)直方图均衡化
Fig. 2 Enhancement effect comparison. (a) Original image; (b) grayscale image; (c) PCA enhancement image; (d) histogram equalization

对比增强结果可知,直方图均衡化在增强整体图像的同时放大了等离子体拖尾消散区域。很明显,影响等离子体消散的因素极为复杂,不应将消散区划分到有效特征区域内。相比而言,PCA 增强方法对等离子体消散区滤除的效果更优。

2.4 光斑图像伪彩色处理

人眼对灰度图像的辨识能力较差^[12],无法直接从图像中清楚地看出等离子体光斑能量的分布情况,不利于核心烧蚀区的精准分割。伪彩色变换是一种图像增强方法,通过将单通道图像各个灰度值按一定关系映射到 RGB 彩色空间,就可以得到视觉效果更好、细节区分更明显的彩色图像。强度分层法或灰度分割法将原图像看作是三维模型, z 值为当前坐标像素值。假设有 N 个平行于 $x-y$ 平面的切割面将 z 值切割为 $N+1$ 段,即得到 $N+1$ 个灰度级区域,给不同灰度级区域分配不同的颜色即可得到分层伪彩色。该方法原理简单,运行速度快,但视觉效果较差。

等离子体光斑图像灰度值与其自身能量分布密切相关,灰度值大小由中心向四周逐步递减。针对

这一特点选用灰度级-彩色变换法对图像第一主成分进行伪彩色处理,得到的伪彩色图像的色彩是连续变化的,色调更宽。

彩虹编码伪彩色和热金属编码伪彩色是两种较为常用的灰度级-彩色变换方法^[13],其原理是各像素点灰度值经过某种函数关系映射到彩色空间,其中的热金属编码方法更适合用于分析等离子体光斑能量分布。传统的热金属编码伪彩色图像方法包含的颜色数较少,以蓝色、绿色、黄色为主,黄色表示高温物体,各部分颜色之间为线性过渡,且自适应性较差。本研究参考热金属编码将第一主成分光斑图像伪彩色种类拓展为黑、蓝、青、绿、黄、红、白七种色彩。黑色为图像中灰度值最小的区间,白色为图像中灰度值最大的区间。该方法得到的伪彩色图像色彩鲜明,易于分辨,且有一定的自适应性。

图 3 所示为光斑图像伪彩色处理效果图。由图 3 可知:单一滤波方法得到的图像伪彩色特征不明显,质量较差;混合滤波既可保证有效滤除噪声,又可避免中值滤波窗口过度锐化,是一种有效的滤波方式。

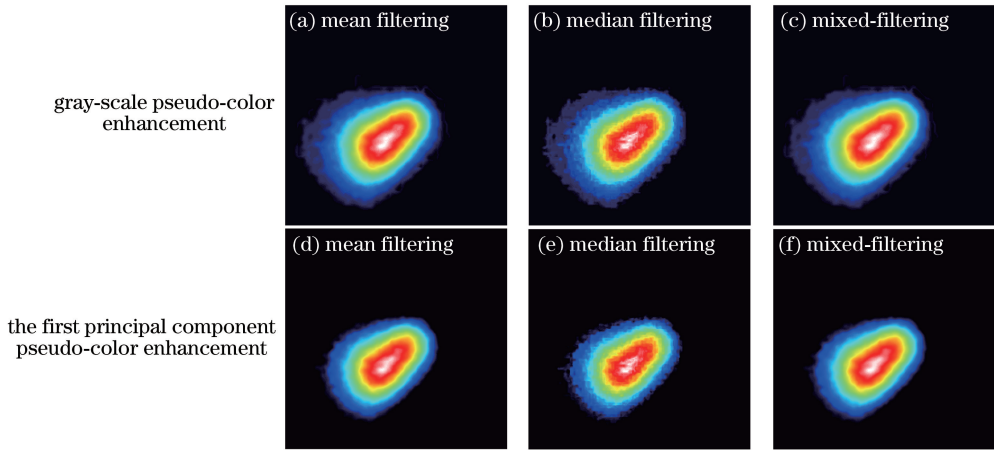


图 3 不同滤波方法得到的灰度图伪彩色增强效果

Fig. 3 Grayscale pseudo-color enhancement effects obtained by different filtering methods

本研究采用混合滤波处理得到新的 RGB 图, 经由 PCA 提取第一主成分, 并将该主成分图像转化为伪彩色图像, 如图 3(f) 所示。与图 3(c) 相比, 该方法获得的图像在保证光斑基本信息不变的基础上, 剔除了等离子体拖尾消散区域, 保证了完整光斑的有效性, 减小了等离子体消散等复杂因素给实验分析带来的误差。依据图 3(f) 将光斑图大致分为 4 个区域, 以黄色为边界, 白色、红色和黄色构成核心烧蚀区, 绿色主要为光斑过渡区, 光晕和拖尾分辨不明显(青色和蓝色标注)。

3 光斑图像特征分析

3.1 激光烧蚀加工方向诊断

采用阈值门限分割方法得到核心烧蚀区, 选取第一主成分最大灰度的 1/2 为阈值门限。用分割后的二值图像对伪彩色图像掩模, 可以获得完整的核心烧蚀区伪彩色图像, 如图 4 所示。由图 4(b) 可以看出, 分割后的区域包括白色、红色和部分黄色区域, 符合核心烧蚀区的划定规则。

传统激光光斑大多都接近圆形。李生民等^[14]理论推导了入射环形光斑偏移量与光斑中心坐标、

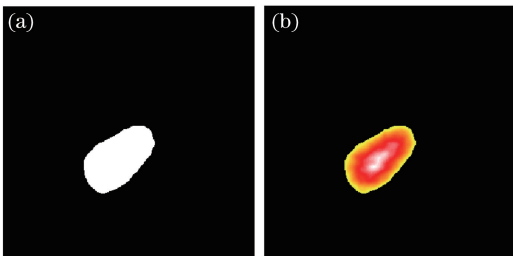


图 4 核心烧蚀区分割。(a) 分割结果; (b) 掩模

Fig. 4 Core ablation zone segmentation.

(a) Segmentation result; (b) mask

探测器死区宽度和环形光斑内外圆半径之间关系的数学模型^[14]。等离子体光斑几何形状受加工方向、进给速率的影响, 其图像一般为不规则的形状。当烧蚀进行时, 设置恒定的进给速率, 加工方向的变化是光斑形状差异的主要原因, 应当选择适当的几何特征进行研究。研究发现, 加工过程中去除拖尾消散区后的光斑形状接近水滴形, 提取核心烧蚀区的长轴、短轴、质心和完整光斑区域的长轴、质心, 依据相应的逻辑关系就可以判定当前的加工方向。

飞秒激光聚焦在表面烧蚀材料形成微坑, 微坑底部已经超出激光的有效烧蚀焦距。激光离焦后能量急剧减小, 不能进行有效烧蚀, 简单的往复加工没有实际意义。因此, 实际的烧蚀过程不是往复烧蚀, 只存在单方向烧蚀和转向烧蚀两种情况。转向烧蚀时, 当前等离子体区域与上一时刻等离子体区域侧面的重叠部分较大, 可能会影响光斑亮度特征的提取结果, 因而需要区分两种烧蚀状态。不同加工方向光斑的伪彩色图如图 5 所示。

单方向烧蚀过程中原光斑长轴方向与核心烧蚀区长轴方向大体相同, 通过计算长轴斜率将其量化。两者的斜率大小相差不大, 可以认为该阶段的加工过程始终沿着单一方向进行。在烧蚀转向过程中, 由图 5(c) 可见, 原图长轴可以体现前一时刻的烧蚀方向, 核心烧蚀区长轴可以体现当前时刻的烧蚀方向, 两者长轴斜率符号不同, 不能采用前一种方法判断加工方向。研究发现, 核心烧蚀区接近水滴形, 长短轴交点指向长轴中点的方向即为加工方向。本研究判断加工方向的流程如图 6 所示, 其中: k_1 为完整光斑区域的长轴斜率; k_2 为核心烧蚀区域的长轴斜率; d_1 为完整光斑区域的质心位置; d_2 为核心烧蚀

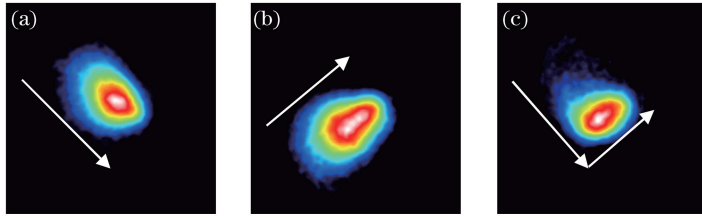


图 5 不同加工方向的等离子体光斑伪彩色图。(a)向下;(b)向上;(c)转向

Fig. 5 Pseudo-color maps of plasma spot along different processing directions. (a) Downward; (b) upward; (c) steering

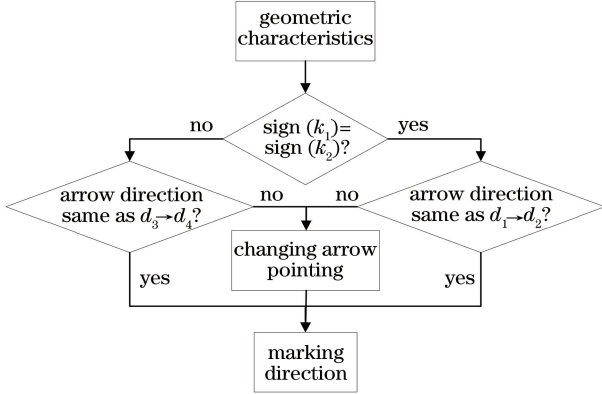


图 6 判断加工方向流程图

Fig. 6 Flow chart for judging machining direction

区域的质心位置; d_3 为核心烧蚀区长短轴的交点; d_4 为核心烧蚀区长轴中点。按照此方法标注加工方向实例如图 7 所示。图 7 中的红线表示长轴,蓝线表示短轴,蓝色箭头表示当前运动方向,蓝色“*”表示 d_1 ,红色“*”表示 d_2 ,黑色“+”表示 d_3 ,绿色“+”表示 d_4 。

该流程思路如下:

1) 提取完整光斑区域的长轴和质心 d_1 ,如图 7 (a1)、(b1)、(c1)所示;提取核心烧蚀区的长轴、短轴以及质心 d_2 ,如图 7(a2)、(b2)所示;以此作为图像的几何特征,计算核心烧蚀区长短轴交点 d_3 及核心烧蚀区长轴中点 d_4 ,如图 7(c2)所示。

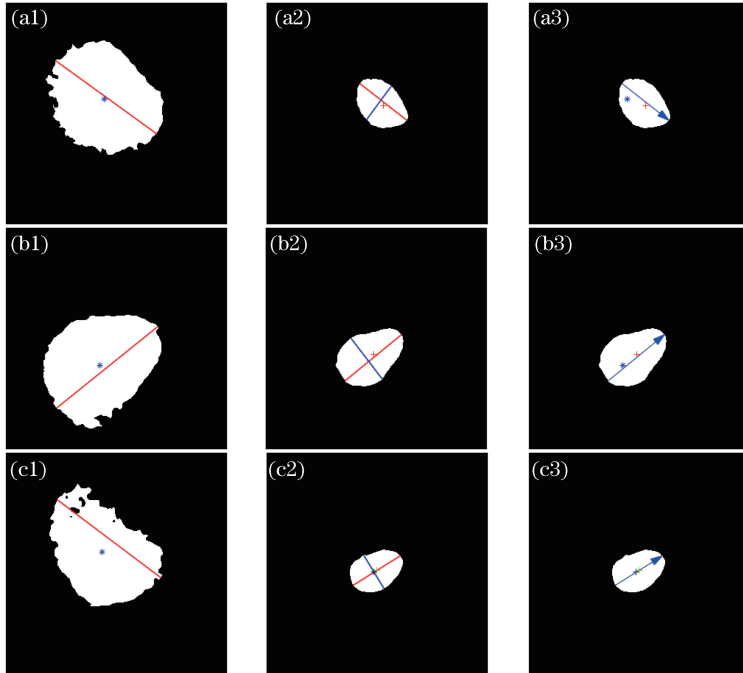


图 7 加工方向判断流程实例。(a)向下加工判断步骤;(b)向上加工判断步骤;(c)转向加工判断步骤

Fig. 7 Examples of flow chart for judging machining direction. (a) Steps for judging downward processing; (b) steps for judging upward processing; (c) steps for judging steering processing

2) 计算完整光斑区域的长轴斜率 k_1 及核心烧蚀区的长轴斜率 k_2 ,判断 k_1 、 k_2 的符号。如果符号相同,表明当前为单向加工状态;如符号不相同,表明当前的加工方向发生了转向。

3) 单向状态下 $d_1 \rightarrow d_2$ 为加工方向,如图 7 (a3)、(b3)所示;转向状态下 $d_3 \rightarrow d_4$ 为加工方向,如图 7(c3)所示。如若箭头标注方向与加工方向不同,则改变指向。

4) 标出当前加工方向,并将加工方向大体分为三类,编号 1、2、3 分别对应“↘”“↗”“↙↗”三种运动方式。

图 7(a)、(b)描述了不同方向的单向加工过程中光斑移动方向的判断方法, $d_1 \rightarrow d_2$ 为当前加工方向趋势,用长轴加箭头的蓝线标出方向。图 7(c)为转向加工过程中光斑移动方向的判断方法,加工方向与 $d_3 \rightarrow d_4$ 方向相同。通过该方法得出的移动方向与实际控制加工方向相同。选取 100 张功率为 50 mW 的光斑图片作为样本 A,对样本 A 的每张图片移动形式进行标注,构成 100×1 维的加工方向特征向量。

3.2 亮度特征提取

PCA 主分量上的灰度值大小没有物理意义,并不代表光斑图像的亮度特征。亮度特征的提取不同于几何特征的提取,亮度分量的灰度值代表着相应的物理意义,不能对其进行增强处理。提取 HSL 彩色空间 L 分量作为光斑亮度矩阵,单个像素点的灰度值为该点的亮度,其表达式为

$$L = \frac{1}{2}[\max(r, g, b) + \min(r, g, b)], \quad (1)$$

式中: L 为亮度矩阵; r, g, b 分别为原图三个彩色通道的分量矩阵。认为光斑亮度特征有效区域包括除拖尾外的其他区域,即剔除光斑拖尾时保留光晕和拖尾过渡区。考虑到光斑核心烧蚀区易分割,光斑拖尾较难识别的特点,借助局部阈值分割算法将部

分有效的光斑拖尾过渡区保留下来,增强光斑的亮度特征。Niblack 局部分割算法是依据局部像素点的均值和标准差来决定中心阈值局部特征的二值化算法^[15],结合全局最大灰度值调整每个区域的分割阈值,可以得到较好的分割效果。Niblack 局部阈值 $T(x, y)$ 的求取公式为:

$$T(x, y) = m(x, y) + k \cdot \sigma(x, y), \quad (2)$$

式中: $m(x, y)$ 和 $\sigma(x, y)$ 分别表示中心点 (x, y) 在邻域 $r \times r$ 内所有像素点的均值和标准差; k 为修正系数,用来限定同一类像素的偏移范围。进一步计算如下:

$$m(x, y) = \frac{1}{r^2} \sum_{i=x-r/2}^{x+r/2} \sum_{j=y-r/2}^{y+r/2} f(i, j), \quad (3)$$

$$\sigma(x, y) = \sqrt{\frac{1}{r^2} \sum_{i=x-r/2}^{x+r/2} \sum_{j=y-r/2}^{y+r/2} [f(i, j) - m(x, y)]^2}. \quad (4)$$

灰度值 $f(x, y)$ 的取值遵循如下条件:

$$\begin{cases} f(x, y) = 0, & f(x, y) \leq T(x, y) \\ f(x, y) = 1, & f(x, y) > T(x, y) \end{cases}. \quad (5)$$

Niblack 算法动态确定各区域的阈值,可以较好地处理亮度不均的图像^[16]。若窗口中心像素点的灰度值小于当前窗口的阈值,则将当前点赋值为 0;否则,赋值为 1。分割后获得特定光斑目标区域的二值图像,用该图像对伪彩色图和亮度分量进行掩模处理,结果如图 8 所示。

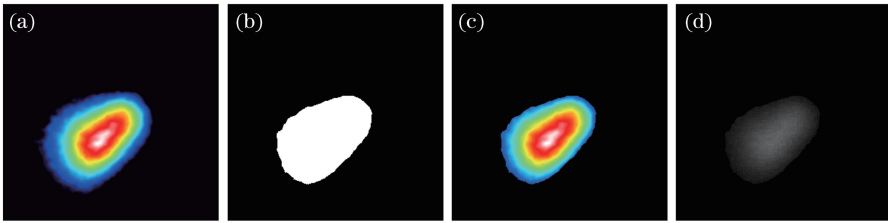


图 8 基于 Niblack 分割掩模的亮度特征。(a)伪彩色;(b)分割;(c)分割效果;(d)掩模

Fig. 8 Luminance characteristics based on Niblack segmentation mask. (a) Pseudo color; (b) segmentation; (c) segmentation effect; (d) mask

从图 8(c)可以看出,分割后的图像剔除了无效的光斑拖尾,实现了对特定光斑目标区域的提取。图 8(d)为有效亮度区域,不同于传统的基于全图的亮度特征提取,该方法得到的亮度特征中的无效亮度信息较少,得到的数据更准确。对样本 A 的 100 张图片进行 Niblack 分割,提取亮度总值和亮度均值,构成两个 100×1 维亮度特征向量。

4 亮度的影响因素

为了直观地展示光斑亮度受不同因素影响的程

度,计算了光斑总亮度与均亮度两种亮度特征分别与加工方向、激光功率之间的相关系数。一般认为,相关系数绝对值小于 0.09 为无相关性,大于 0.5 为强相关。首先绘出样本 A 的亮度总值、亮度均值以及方向编号,如图 9 所示。

图 9(a)为有效亮度区的总亮度曲线,由亮度分量每个像素点的灰度值之和求得;图 9(b)为有效亮度区的平均亮度,描述光斑的整体亮度特征;图 9(c)为每个样本对应加工方向的编号,并规定编号 1、2、3 分别表示“↘”“↗”“↙↗”三种加工方向。

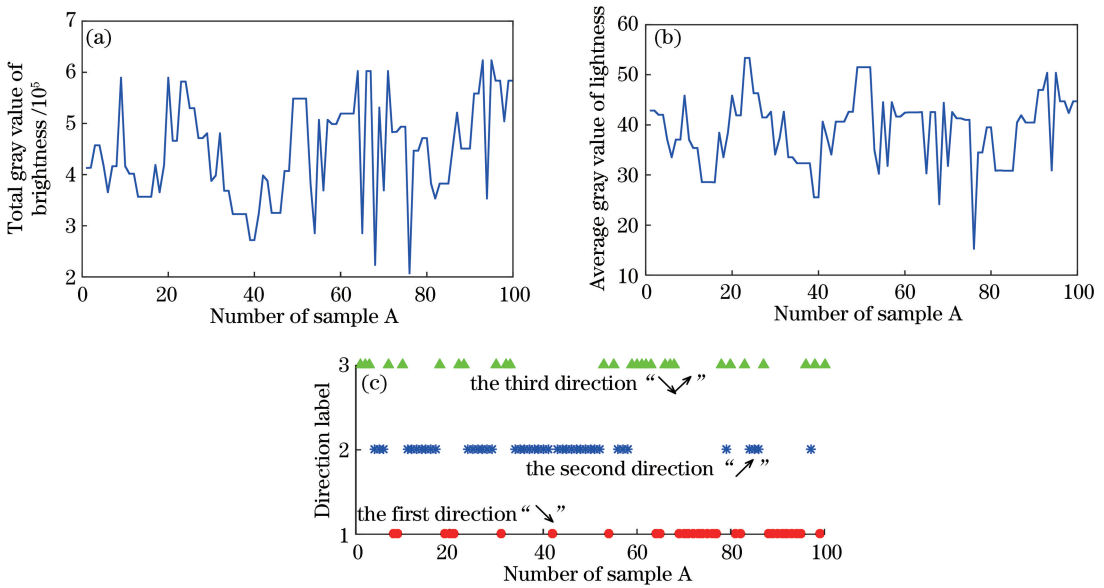


图 9 样本 A 的亮度特征曲线和方向标号。(a)总亮度;(b)平均亮度;(c)方向标签
Fig. 9 Brightness characteristic and direction label of sample A. (a) Total brightness;
(b) average brightness; (c) direction label

分别从总亮度和均亮度两个方面分析亮度特征与加工方向的相关性,计算相关系数。总亮度与加工方向的相关系数绝对值为 0.01301,平均亮度与加工方向的相关系数绝对值为 0.04625。亮度特征与加工方向的相关系数绝对值低于 0.09,表明两者无相关性,即加工方向不影响光斑的亮度特征。

样本 B 包含激光功率为 50 mW 的图片 33 张,每张图片编号均为 1;功率为 20 mW 的图片 33 张,每张图片编号均为 2;功率为 10 mW 的图片 33 张,

每张图片编号均为 3。共选取 99 张光斑图片,其编号构成 99×1 维激光功率编号向量。提取样本 B 的总亮度和均亮度两个亮度特征构成 2 个 99×1 维的亮度特征向量。绘出 3 个向量的图像,如图 10 所示。

图 10(a)为样本 B 中不同功率光斑的总亮度曲线;图 10(b)为平均亮度曲线;图 10(c)表示样本中各个光斑对应的激光功率。分析亮度特征与激光功率的相关性,计算相关系数。总亮度与激光功率的

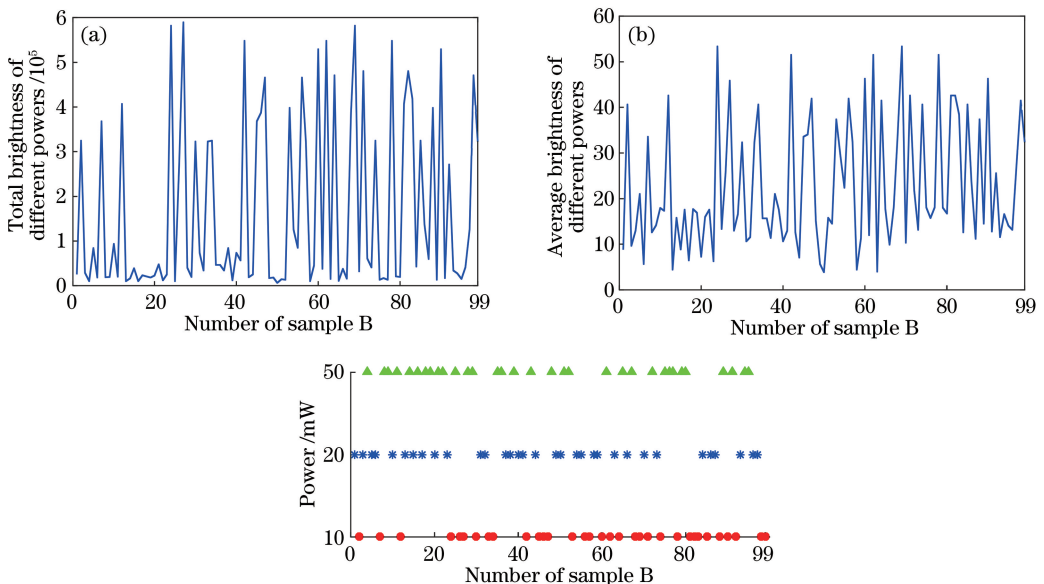


图 10 样本 B 的亮度特征曲线和激光功率标号。(a)总亮度;(b)平均亮度;(c)功率
Fig. 10 Brightness characteristic and laser power label of sample B. (a) Total brightness; (b) average brightness; (c) power

相关系数的绝对值为 0.85179, 平均亮度与激光功率的相关系数的绝对值为 0.72238。亮度特征与激光功率的相关系数的绝对值远大于 0.5, 有较强的相关性, 表明激光功率是影响光斑亮度的主要因素。其中, 光斑总亮度与激光功率的相关性最强, 该亮度特征可以作为判断光斑功率的依据。

5 结 论

与传统的直方图均衡化方法相比, PCA 处理后的飞秒激光等离子体光斑图像的增强效果更优, 分辨率更高, 有利于辨识。将第一主成分图像转化为伪彩色图像可以清晰地观察到光斑的能量分布, 与直接将灰度图转化为伪彩色图相比, 光斑主体部分基本保持不变, 图像中等离子体拖尾消散部分被有效剔除。依照伪彩色图像显示的光斑能量分布, 采用阈值门限法对核心烧蚀区进行分割, 采用 Niblack 分割方法对有效亮度区域进行分割。分割结果符合光斑能量分布, 核心烧蚀区主要包括黄色以内部分, 有效亮度区包括青色以内部分。通过分析完整光斑和核心烧蚀区的几何特征可以判断出光斑的移动方向, 即当前的加工方向, 并对方向进行编号。将有效亮度区的总亮度与平均亮度分别作为光斑的亮度特征。最后分析亮度特征与加工方向、激光功率的相关性, 结果表明, 由于飞秒激光具有瞬时的高脉冲能量, 在给定烧蚀功率的条件下, 对材料的有效烧蚀区域及烧蚀深度是一定的, 即相同功率下激光脉冲有效去除的材料量相同, 材料被烧蚀时伴随产生的等离子体发光量也大致相同, 因此光斑亮度不受加工方向的影响, 而主要受激光功率的影响。其中光斑总亮度与激光功率的相关性最强, 可以作为光斑功率分类的依据。

参 考 文 献

- [1] Yu Y, Xu K H, Zhang T P, *et al.* Dynamic evolution of air plasma induced by tightly-focused femtosecond laser pulse [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0708001.
于洋, 许宽宏, 张天鹏, 等. 紧聚焦条件下飞秒激光产生空气等离子体的动态演化特性 [J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0708001.
- [2] Chen J X, Zhou X L, Lin S W, *et al.* A prediction-correction scheme for microchannel milling using femtosecond laser [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 91: 115-123.
- [3] Chen L, Zhang P, Chen J, *et al.* Theoretical and experimental analysis of the impact on ablation depth of microchannel milling using femtosecond laser [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 103: 77-82.
- [4] Ho C C, Chang Y J, Hsu J C, *et al.* Optical emission monitoring for defocusing laser percussion drilling [J]. Measurement, 2016, 80: 251-258.
- [5] Lü W X, Gao X D, Zhong X G, *et al.* Withdrawal of the features of photo induced plasma in disk type laser welding with large power [J]. Modern Welding, 2011(3): 22-24.
吕威兴, 高向东, 仲训昊, 等. 大功率盘形激光焊光致等离子体特征提取 [J]. 现代焊接, 2011(3): 22-24.
- [6] Wu H, Zhang N, He M, *et al.* Calculation of argon-aluminum interatomic potential and its application in molecular dynamics simulation of femtosecond laser ablation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0802004.
吴寒, 张楠, 何淼, 等. 氩、铝原子相互作用势的计算及其在飞秒激光烧蚀分子动力学模拟中的应用 [J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0802004.
- [7] Xie Y F, Liu H W, Hu Y X. Determining process parameters for laser derusting of ship steel plates [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403008.
解宇飞, 刘洪伟, 胡永祥. 船舶板材激光除锈工艺参数确定方法研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403008.
- [8] Xu F, Yang J, Gong S L, *et al.* Effect of heat input on weld appearance for fiber laser beam full penetration welding aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(12): 1203001.
许飞, 杨璟, 巩水利, 等. 热输入对铝合金光纤激光穿透焊缝成形的影响 [J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1203001.
- [9] Mao Z H, Deng L, He Y, *et al.* Vegetation index for visible-light true-color image using hue and lightness color channels [J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(11): 1602-1610.
毛智慧, 邓磊, 贺英, 等. 利用色调-亮度彩色分量的可见光植被指数 [J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(11): 1602-1610.
- [10] Xie Y J. The research for color sorting technology based on color linear CCD [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015: 33-51.
谢雅倩. 基于彩色线阵 CCD 的色选技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015: 33-51.
- [11] Saravanan G, Yamuna G, Nandhini S. Real time implementation of RGB to HSV/HSI/HSL and its reverse color space models [C] // 2016 International Conference on Communication and Signal Processing, 2016: 0462-0466.
- [12] Yang Y. Research on image segmentation based on

- intelligent monitoring system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 45-48.
- 杨洋. 基于智能监控系统的图像分割技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 45-48.
- [13] Zhang Z Y, Yang C, Liu H Q, *et al.* Testing system of infrared image processing algorithm based on FPGA[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(7): 829-832.
- 张智勇, 杨晨, 刘海桥, 等. 基于FPGA的红外图像处理算法的测试系统[J]. *激光与红外*, 2014, 44(7): 829-832.
- [14] Li S M, Zhang Y Q. Annular facula detection and error compensation of four-quadrant photoelectric detector in space laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106005.
- 李生民, 张圆清. 空间激光通信中四象限光电探测器环形光斑检测及误差补偿[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106005.
- [15] Vijayan G, Reshma S R, Dhanya F E, *et al.* A novel shadow removal algorithm using Niblack segmentation in satellite images [C] // 2016 International Conference on Communication Systems and Networks, 2016: 184-189.
- [16] Samorodova O A, Samorodov A V. Fast implementation of the Niblack binarization algorithm for microscope image segmentation [J]. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2016, 26(3): 548-551.