红外与激光工程
INFRARED AND LASER ENGINEERING
EI, SCOPUS, CSCD等收录期刊

基于图像的激光微尺度烧蚀质量估算方法

郭威　常浩　杜邦登　于程浩

Estimation method of laser micro-scale ablation quality based on image

Guo Wei, Chang Hao, Du Bangdeng, Yu Chenghao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20210297

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于激光微烧蚀冲量测量噪声误差的蒙特卡洛分析方法

Monte Carlo analytical method of impulse measuring noise error for laser micro-ablation

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1102002-1102002(7)　https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1102002

一种应用于激光微烧蚀的光学聚焦系统简化设计方法

Simplified optical focusing design method applied to laser micro ablation

红外与激光工程. 2018, 47(9): 906007-0906007(7)　https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0906007

Nd:YAG纳秒脉冲激光水下烧蚀锗靶研究

Study on Nd:YAG ns pulsed laser ablation of Ge target in water

红外与激光工程. 2020, 49(8): 20190498-1-20190498-6　https://doi.org/10.3788/IRLA20190498

纳秒激光烧蚀金属推进性能的实验研究

Experiment investigation of propulsion performance of metals ablated by nanosecond laser

红外与激光工程. 2020, 49(S2): 20200086-20200086　https://doi.org/10.3788/IRLA20200086

超短脉冲激光烧蚀冲量耦合测量方法

Methods of extreme short pulse laser ablation impulse coupling measurement

红外与激光工程. 2017, 46(3): 329002-0329002(7)　https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0329002

飞秒激光多脉冲烧蚀金属铁的数值模拟

Numerical simulation of femtosecond laser multi-pulse ablation of metal iron

红外与激光工程. 2019, 48(7): 706002-0706002(5)　https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0706002

基于图像的激光微尺度烧蚀质量估算方法

郭 威，常 浩*，杜邦登，于程浩

(航天工程大学 宇航科学与技术系 激光推进及其应用国家重点实验室，北京 101416)

摘 要：激光微尺度烧蚀下的烧蚀质量是激光微推进系统中评估比冲等性能参数的重要物理量，文中在利用扫描电镜得到的烧蚀坑图像的基础上，基于灰度表面重构形貌方法，建立了微尺度烧蚀坑形貌三维模型重构算法；针对图像噪声影响，对图像进行分段平滑，有效地解决了量化误差和灰度模糊对重构形貌的影响，实现了烧蚀坑体积估算。结果表明：所提出的方法能够快速有效地重构激光微尺度烧蚀下烧蚀坑形貌的三维形状，进而计算其烧蚀质量。

关键词：激光微推进； 激光微烧蚀； 烧蚀质量； SEM 图像； SFS 方法

中图分类号：TN249 **文献标志码：**A **DOI：**10.3788/IRLA20210297

Estimation method of laser micro-scale ablation quality based on image

Guo Wei，Chang Hao*，Du Bangdeng，Yu Chenghao

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: The ablation quality under laser micro-scale ablation is an important physical quantity for evaluating performance parameters such as specific impulse in the laser micro-propulsion system. Based on the ablation pit image obtained by the scanning electron microscope, a micro-scale ablation pit shape three-dimensional model reconstruction algorithm was established based on the gray-scale surface reconstruction method; In view of the effect of image noise, the image was segmented and smoothed, which effectively solved the effect of quantization error and grayscale blur on the reconstructed shape, and realizeing the ablation pit volume estimation. The results show that the proposed method can quickly and effectively reconstruct the three-dimensional shape of ablation pits under laser micro-scale ablation, and then calculate the ablation quality.

Key words: laser micro-propulsion; laser micro-ablation; ablation quality; SEM image; SFS method

收稿日期:2021-05-07； **修订日期:**2021-07-26

基金项目:国家自然科学基金 (11502301)

作者简介:郭威，男，硕士生，主要从事激光烧蚀推进方面的研究。

通讯作者:常浩，男，助理研究员，博士，主要从事激光航天应用技术方面的研究。

0 引 言

近年来，随着微/纳卫星 (1~100 kg) 的空间应用，其动力需求同样日益增长。具有质量轻 (百克量级)、冲量调节范围大 (nNs~mNs) 等优点的激光烧蚀微推进系统[1]，逐渐成为备受关注的空间微推进方式之一。激光微推进主要是通过激光烧蚀工质产生喷射产物，由烧蚀产物的喷射形成反喷冲量，从而实现卫星的姿态调整、轨道机动等目标[2−5]。

激光烧蚀微推进系统一般采用脉冲激光对工质进行烧蚀，从而获得瞬态冲量，其特征是微尺度烧蚀。对于单脉冲烧蚀而言，扭摆法或单摆法是进行冲量测量的常用方法[6−11]。对于微尺度下的单脉冲激光烧蚀而言，由于烧蚀质量远小于微克量级，在单脉冲烧蚀质量测量方面仍存在较大挑战。目前而言，常用的烧蚀质量测量方法包括平均质量法[6]、体积法[6]以及扭摆法[7−9,11]。其中，平均质量法需要进行多次独立烧蚀才能使用仪器进行测量，在实验中可操作性差，且受烧蚀工质平整度、掺杂均匀度等随机因素的影响，测量误差较大[6]；而扭摆法由于实验过程繁琐，在应用方面同样存在困难[12]。因此，操作相对简单、方法较为可靠的体积法成为了相对较优的质量测量方法。

传统体积法中，需要基于烧蚀坑上下表面图像对烧蚀坑体积形状进行理想化假设，从而计算烧蚀坑体积，最终进行质量的估算。由于烧蚀坑上下表面形状通常可近似为圆形，在模拟中通常采用理想圆台模型进行体积计算。然而，由于烧蚀工质难以均匀掺杂，一般会导致局部区域对激光的吸收较大，而其他区域相对烧蚀较少，使得真实烧蚀坑形状与规则几何体存在差异[13]。尽管存在可以修正单脉冲烧蚀质量的体积修正法[6]，在一定程度上提高了烧蚀质量的计算精度。然而在激光烧蚀不同工质时，由于烧蚀情况存在差异，体积修正法仍然无法快速准确地得到某个特定烧蚀坑的烧蚀质量。

针对上述方法的不足，在传统体积法的基础上，文中通过扫描电镜 (SEM) 得到深度为百微米量级的烧蚀坑侧面图像，结合烧蚀坑上下表面图像，使用明暗恢复形状 (Shape From Shading, SFS) 方法[14−15]，将图像灰度梯度作为约束条件[16]，对烧蚀坑进行表面形貌重建，得到三维烧蚀坑形貌和体积，从而进行单脉冲激光烧蚀质量的计算。

1 激光微尺度烧蚀图像

在激光烧蚀微推进系统中，通常采用如图 1 所示的透射式烧蚀模式[17]，以减少对光学系统的污染。

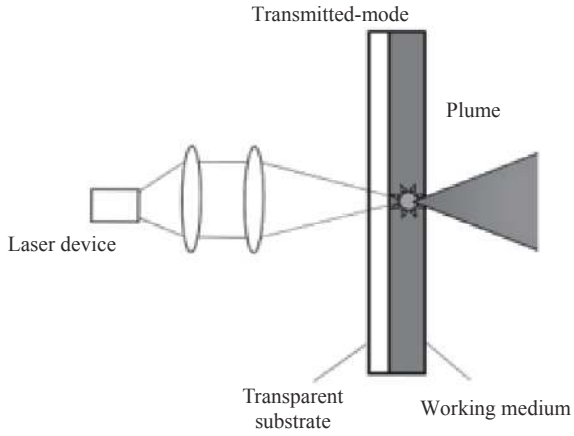
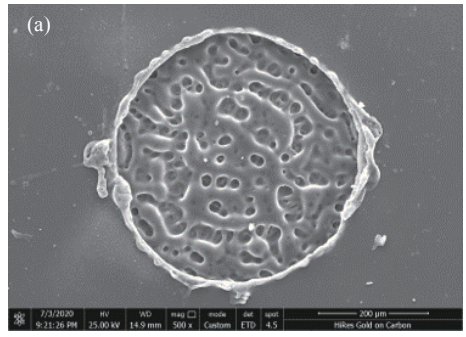


图 1 烧蚀模式 (透射式)

Fig.1 Ablation mode (Transmitted-mode)

在工作系统中，透射式烧蚀的靶带通常由两部分组成，分别是透明层和工质层[18]。其中，透明层一般为 PI、PTFE 等透明材料，在透射激光的同时，一定程度上保护了光学系统；而工质层一般为 GAP 等含能固体材料，用以吸收激光能量，形成喷射羽流，进而产生冲量。

在该工作模式下，当激光能量密度足够高时，靶带工质部分出现形状不规则的烧蚀坑。将远离透明基底侧视为烧蚀坑上表面，靠近基底侧视为下表面，典型上下表面烧蚀坑图像通常如图 2(a) 所示。沿与工质层垂直的方向剖切靶带时，可得到如图 2(b) 所示的烧蚀坑侧面图像。在得到所需图像后，可以进行烧蚀坑表面形貌的重建，并估算其烧蚀体积与质量。



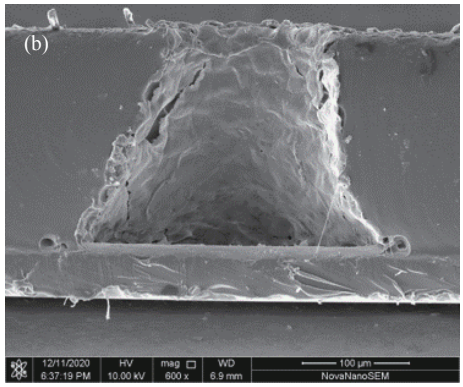


图 2 烧蚀坑图像。(a) 上下表面; (b) 侧面

Fig.2 Ablation pit image. (a) Upper and lower surfaces; (b) Side surfaces

2 微尺度激光烧蚀体积估算方法

2.1 SFS 方法简介与体积重构

从明暗变化恢复形状,是通过物体的一幅或多幅 2D 灰度图像获得该物体 3D 表面形状信息的方法。其原理是利用成像表面每一点亮度值的变化,解析出物体表面的矢量信息,转化为物体表面的深度信息[19]。

对实际图像而言,表面上任意点的亮度受到众多因素影响,如:现实光源、物体表面材料性质和形状,以及相机的位置和参数等。假设物体表面满足朗伯体余弦定律,其表面反射模型如图 3 所示,物体表面点的图像亮度只取决于该点光源入射角的余弦,即 O' 点的亮度仅由 O 点光源入射角的余弦 θ_i 决定[16]。

为了进行表面形貌的重建,需要对拍摄图像中的灰度信息进行转化。基于 Alhulayil 等人的研究[20],此时表面反射模型可变换为:

$$E(x,y)=R(p(x,y),q(x,y))=I_0\rho\frac{p_0p+q_0q+1}{\sqrt{p_0^2+q_0^2+1}\sqrt{p^2+q^2+1}} \tag{1}$$

式中:$E(x,y)$ 为图像亮度;$R(p,q)$ 为反射函数;I_0 为入射光源强度;ρ 为物体表面反射率;p、q 为表面高度沿 x、y 方向的变化率;p_0、q_0 由入射光源方向决定。如公式 (1) 所示,此时物体表面存在 p、q 两个未知量,而图像灰度信息仅能提供一个约束。一般情况下,由该模型所确定的 SFS 问题是病态的,无法求出唯一解[21]。以上模型尚无法满足烧蚀坑表面形貌重建的重构要求。因此,需要添加约束条件对重建模型进行约束。

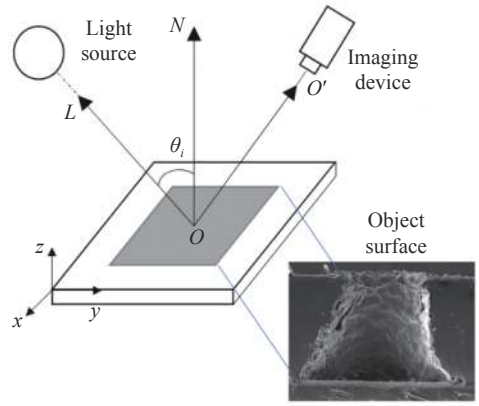


图 3 SFS 表面反射模型

Fig.3 Surface reflection model of SFS

为了进行烧蚀坑表面形貌的重建,需要物体表面的信息对图像灰度进行分析。为了构建物体目标表面与图像灰度表面之间的联系,采用了基于灰度梯度约束的思路进行烧蚀坑的表面形貌重建[16],其原理如图 4 所示。

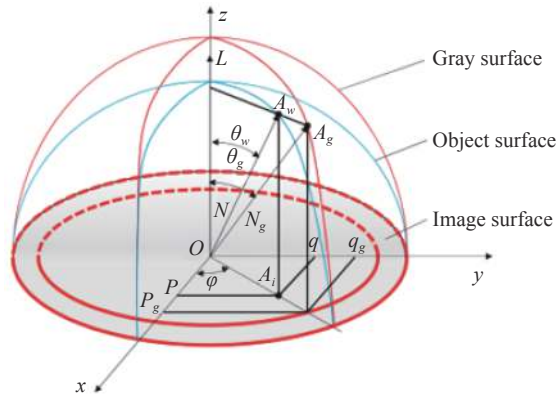


图 4 灰度梯度约束重建原理

Fig.4 Principle of gray gradient constraint reconstruction

假设光源为垂直入射,此时光源的向量为 $L(0,0,1)$,以镜头中心为原点坐标。坐标系的 z 轴与成像系统的光轴重合,并且 x 轴和 y 轴平行于成像平面。在成像过程中,将物体表面投影到图像平面时,将表面高度转化为灰度值。

此时,A_i 为图像平面上的任意点;A_g 是法向量为 $N_g(-p_g, -q_g, 1)$ 且倾斜角度为 θ_g 时,其在灰度平面上的对应点;而 A_w 是法向量为 $N(-p, -q, 1)$ 且倾斜角度为 θ_w 时,其在目标表面上的对应点。φ 为以上点所对应的偏角。

为了约束灰度表面方向与目标表面方向梯度的

关系，由解析几何理论可知[16]，A_g 与 A_w 在图像平面上对应的偏角均为φ。因此，目标表面和灰度表面间的梯度关系可表示为：

$$\frac{q}{p}=\frac{q_g}{p_g}=\tan\varphi \tag{2}$$

此时物体表面梯度定义为：

$$\begin{cases} p=kp_g \\ q=kq_g \end{cases} \tag{3}$$

式中：k 为梯度比例系数。将其作为表面形貌重建问题的约束条件，此时灰度梯度 (p_g,q_g) 可由图像$E(x,y)$的灰度给出：

$$\begin{cases} p_g=E(x,y)_x \\ q_g=E(x,y)_y \end{cases} \tag{4}$$

其中，$E(x,y)_x$ 和$E(x,y)_y$ 分别表示沿 x、y 方向的图像灰度梯度。因此物体表面梯度可写为:

$$\begin{cases} p=k\cdot E(x,y)_x \\ q=k\cdot E(x,y)_y \end{cases} \tag{5}$$

此时任意位置的图像灰度梯度可由相邻两点的灰度值的差值进行计算：

$$\begin{cases} E(x,y)_x=(E(x+1,y)-E(x-1,y))/2 \\ E(x,y)_y=(E(x,y+1)-E(x,y-1))/2 \end{cases} \tag{6}$$

由入射光源的向量$L(0,0,1)$可知，向量 p_0、q_0 均为 0，将公式 (5) 代入公式 (1) 时，可得：

$$E(x,y)=\frac{I_0\rho}{\sqrt{1+k^2\left[E(x,y)_x^2+E(x,y)_y^2\right]}} \tag{7}$$

此时梯度比例系数为：

$$k(x,y)=\pm\left(\frac{(I_0\rho)^2-E(x,y)^2}{E(x,y)^2\left(E(x,y)_x^2+E(x,y)_y^2\right)}\right)^{1/2} \tag{8}$$

将公式 (8) 代入公式 (5) 后，物体表面梯度可表示为：

$$\begin{cases} p=\pm\left(\dfrac{(I_0\rho)^2-E(x,y)^2}{E(x,y)^2\left(E(x,y)_x^2+E(x,y)_y^2\right)}\right)^{1/2}\cdot E(x,y)_x \\ q=\pm\left(\dfrac{(I_0\rho)^2-E(x,y)^2}{E(x,y)^2\left(E(x,y)_x^2+E(x,y)_y^2\right)}\right)^{1/2}\cdot E(x,y)_y \end{cases} \tag{9}$$

其中，正负号仅能影响重建形状的凸凹，对相对高度的具体数值计算无影响。此时可通过公式 (9) 得到物体表面任意位置的表面梯度 p、q，从而进行物体表面梯度信息和物体表面高度信息的转化。

假设 z_0 为图像中初始点(x_0,y_0)的高度，物体表面任意点相对高度的计算公式可表示为：

$$z(x,y)=z_0+\int_{(x_0,y_0)}^{(x,y)}p\mathrm{d}x+q\mathrm{d}y \tag{10}$$

此时通过公式 (10) 可进行物体表面高度的计算。

2.2 关键参数确定及图像噪声平滑处理

根据上述重构原理，重构表面形貌时首先要确定参数 I_0 和参数 ρ。而在 SEM 的真空测量环境中，两参数的具体数值无法直接得到。因此，文中基于朗伯体表面的反射特性对计算过程进行简化：从任意角度观察到的物体表面上同一点的亮度相同，即物体表面各点的反射光强与光源入射角的余弦成正比[16, 20−21]。此时公式 (1) 可转化为：

$$E(x,y)=I_0\rho\cos\theta_i \tag{11}$$

式中：θ_i为入射光与表面法向量间的夹角；$I_0\rho$ 为入射光源强度和物体表面反射率相乘后得到的比例常数。在入射光源强度一定的情况下，由于工质侧面任意位置处表面反射率相等，此时二者相乘后得到的常数参数为恒定值。

为了进行烧蚀坑表面形貌的重建，文中给出了一种参数计算方法。

(1) 参数 $I_0\rho$ 的计算

在 SFS 重建模型的应用中[16, 20−21]，入射光源强度 I_0 和物体表面反射率 ρ 可分别由仪器直接测量和查找反射率表的方式得到，不涉及参数 $I_0\rho$ 的求解问题。而在该研究中，对百微米级尺度烧蚀坑的侧面图像进行拍摄时，使用了扫描电子显微镜 (SEM) 进行拍摄。由于 SEM 需要在真空环境中进行图像拍摄，此时入射光源强度 I_0 无法直接测量；而对于研究过程中使用的 GAP 含能工质，其物体表面反射率 ρ 同样无法直接得到。因此，参数 $I_0\rho$ 的求解成为了 SFS 方法应用时所关注的问题。

在单脉冲激光烧蚀情况下，假设的烧蚀坑形状和真实烧蚀坑形状通常如图 5 所示。其中，图 5(a) 为假设情况下的烧蚀坑形状，Z_0、Z_1 为烧蚀坑侧面图像上已知相对高度和距离的两点，S_1、S_2 分别为烧蚀坑上下表面轮廓，其理想烧蚀形状如图 5(b) 所示；而在实

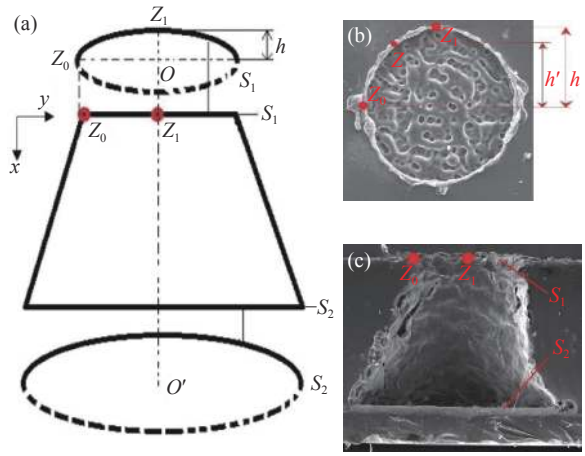


图 5 烧蚀坑形状。(a) 假设烧蚀坑形状；(b) 真实烧蚀坑上下表面；(c) 真实烧蚀坑侧面

Fig.5 Ablation pit shape. (a)Assuming the shape of the ablation pit;(b) Upper and lower surfaces of real ablation pits; (c) The side of the real ablation pit

际烧蚀中，烧蚀坑侧面通常如图 5(c) 所示，由于各种随机因素的影响，常为不规则形状。

根据图 5(b) 中 SEM 得到的烧蚀坑图像，可以得到烧蚀坑上下表面的具体大小和尺寸，在上下表面的同一方向上，任意两点 Z_0、Z_1 的相对高度 h 均可通过图像测量得到。

因此，由公式 (10) 可知，两点间相对高度为：

$$z_1 = z_0 + \int_{y_0}^{y_1} q\mathrm{d}y \tag{12}$$

在实际情况中，需要通过物体表面梯度值和初始点的假定高度对某点的相对高度进行计算。将公式 (9) 代入公式 (11) 中，可化为：

$$z_1 = z_0 + \int_{y_0}^{y_1} \pm\left\{\frac{(I_0\rho)^2 - E(x,y)^2}{E(x,y)^2\left[E(x,y)_x^2 + E(x,y)_y^2\right]}\right\}^{\frac{1}{2}} E(x,y)_y\mathrm{d}y \tag{13}$$

其中，对于同一幅图像，未知量参数 $I_0\rho$ 可视为常数，其余参数均可由图像信息得到。公式 (14) 中对参数 $I_0\rho$ 的求解过程过于繁杂，且难以进行计算。因此，文中通过采用了迭代的思想对参数进行计算，此时函数 $h(I_0\rho)$如公式 (14) 所示。

计算中，在设置参数的初始值后，不断进行迭代，当$h(I_0\rho)$的值小于 0.001 时，认为得到参数 $I_0\rho$ 的数值。此时可通过参数 $I_0\rho$ 进行烧蚀坑表面形貌的重建。

$$h(I_0\rho) = (z_1 - z_0) - \int_{y_0}^{y_1} \pm\left\{\frac{(I_0\rho)^2 - E(x,y)^2}{E(x,y)^2\left[E(x,y)_x^2 + E(x,y)_y^2\right]}\right\}^{\frac{1}{2}} E(x,y)_y\mathrm{d}y \tag{14}$$

(2) 噪声的平滑处理

在烧蚀坑表面形貌重建过程中，灰度值图像通常是由 SEM 得到的烧蚀坑侧面图像对连续变化的灰度值进行采样和量化获得的[22]。图像中会出现不均匀的灰度噪声，导致灰度值图像中烧蚀坑内部区域存在随机误差。由于在图像水平方向上，以烧蚀坑边缘两侧为边界时，发现曲线灰度值存在明显的差异。采用分段拟合的方式，通过边缘检测得到边缘点，对这些点进行曲线拟合后得到烧蚀坑两侧的边界轮廓曲线，此时将拟合后得到的曲线作为烧蚀坑图像分段的依据，通过三次多项式拟合函数对各段灰度值进行曲线拟合，从而对各分段烧蚀坑灰度值进行了有效地平滑。

如图 5(b) 所示，由于在图像水平方向上的灰度值存在明显的差异，在进行灰度图像分段，拟合灰度值曲线时可能会出现跳跃间断点。为保证重建曲线的平滑和重建表面形貌的准确，同时尽可能减小重建边界处的不稳定性，需要结合分段点两侧灰度值对分段点进行赋值，从而对分段点进行约束。此时，通过约束分段点可得到平滑后图像灰度值曲线，进而对灰度值图像进行表面形貌重建。

2.3 基于图像的体积估算步骤

基于以上分析，烧蚀质量计算的算法原理如图 6 所示。该算法主要包括 5 个步骤：原始图像的放缩、灰度值图像的平滑和降噪、约束条件下表面梯度值的计算、物体表面相对高度计算以及烧蚀坑体积和总烧蚀质量的估算。

(1) 读取原始图像数据。结合真实尺寸与像素数量的关系，对图像进行放缩，使图像中任意两点间的真实距离和像素间距为 1∶1；

(2) 得到放缩后图像的灰度值图像$E_0(x,y)$后，为了平滑降噪，通过提取边缘轮廓曲线作为各方向上的分段依据，进行分段曲线拟合。考虑到分段点处可能存在跳跃间断点，需要结合分段点两侧灰度值对分段点进行赋值，以此对分段点处灰度值进行约束，最终

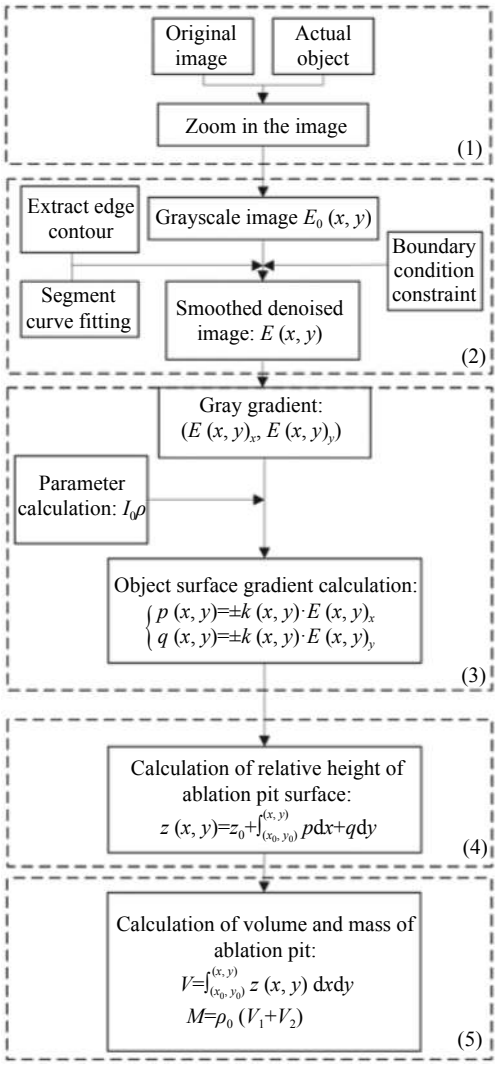


图 6 重建算法原理

Fig.6 Principle of reconstruction algorithm

得到处理后灰度值图像$E(x,y)$;

(3) 基于处理后的灰度值图像$E(x,y)$, 由公式 (6) 可得到相应的灰度梯度(E_x,E_y)。此时可通过公式 (9) 计算图像中每点灰度值$E(x,y)$对应的物体表面梯度p、q, 式中参数 $I_0\rho$ 可通过图 5(b)、(c) 中已知相对位置和高度的两点, 通过迭代的思想, 采用公式 (14) 进行计算。

(4) 将已知具体位置和高度的点(x_0,y_0)设置为初始点, 其初始高度为 z_0。因此, 物体表面上任意一点的相对高度可采用公式 (10) 进行计算, 此时可得到重建后烧蚀坑任意位置处深度及烧蚀坑的表面形貌。

(5) 根据相对高度进行烧蚀坑体积的估算。对剖开的两侧烧蚀坑分别利用算法进行体积的估算, 并进行求和。此时单脉冲烧蚀质量计算公式为:

$$M=\rho_0(V_1+V_2) \tag{15}$$

式中: M 为单脉冲烧蚀质量; ρ_0 为烧蚀工质密度; V_1 和 V_2 分别为两侧重建烧蚀坑体积。

3 模型验证与实例分析

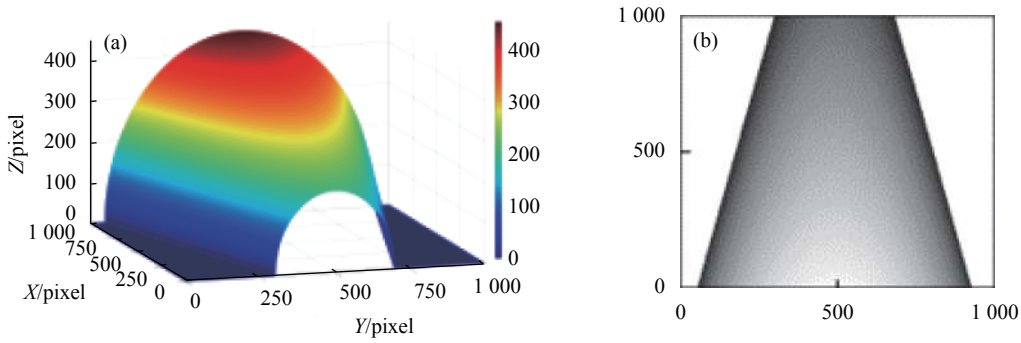
为了对重建算法的有效性和准确性进行验证, 研究中对合成图像和烧蚀坑图像进行了实验。

3.1 模型验证

基于算法研究中的基准图像[23-24], 以及激光烧蚀的模拟烧蚀坑形状[6], 实验中采用了半圆台的图像, 由曲面合成的图像如图 7(a) 所示, 上表面直径为 400 pixel, 下表面直径为 900 pixel, 高度为 1 000 pixel。此时假设合成图像符合朗伯体反射模型, 其中光源矢量方向为 (0,0,1)。

图 7(b) 为原始曲面的合成图像, 其重建表面见图 7(c), 图 7(d) 显示了原始曲面和重构曲面间的误差。可看出重构曲面与原始曲面相似, 最大误差值为 137 pixel。重建误差主要发生在圆台边界附近, 其他部分误差可忽略不计。这是由于边界处灰度梯度变化的不连续性, 使得边界附近梯度变化剧烈, 最终导致了重建灰度值的异常, 使得重建结果出现误差。

为了评价重建算法的性能, 利用平均绝对误差



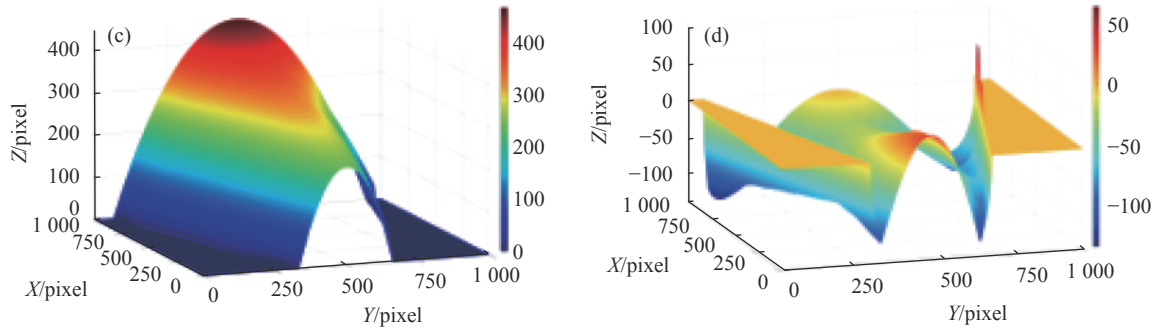


图 7 半圆台曲面的仿真结果。(a) 半圆台曲面；(b) 合成图像；(c) 重建曲面；(d) 重建误差

Fig.7 Simulation results of semi-circular surface. (a) Semicircle surface; (b) Composite image; (c) Reconstruction surface; (d) Reconstruction error

(MAE) 和均方根误差 (RMSE) 对原始曲面和重建曲面进行了比较，结果如表 1 所示。

表 1 中，重建表面与原始曲面间的 MAE 为 30 pixel、最大 RMSE 仅为 45 pixel。结果表明，重构后的曲面与原始曲面具有较好的一致性，重建算法具有良好的重建效果和较高的实验精度。

表 1 MAE 和 RMSE 的比较结果

Tab.1 Comparison results of MAE and RMSE

Composograph	MAE/pixel	RMSE/pixel
Circular truncated cone	30	45

3.2 实例分析

在实验中通过 SEM 收集，以工作电流 15 A，脉宽 400 μs 状态下的半导体激光器，烧蚀基底为 50 μm 厚的 PI 材料，工质为 200 μm 厚，密度为 1 600 kg/m^3 的掺杂 3% 纳米碳粉 GAP 工质时，尺寸为 1 024×943 pixel 的一侧单脉冲烧蚀坑侧面图像。

由于物体表面真实尺寸和图像尺寸间存在差异，为了解决重建物体表面形貌时的尺寸问题，在对图像使用重建算法前进行放缩，使两者尺寸大小为 1∶1。此时处理后的典型侧面烧蚀坑图像如图 8(a) 所示，通过公式 (14) 迭代计算得到的中间参数 $I_0\rho$ 值为 155。

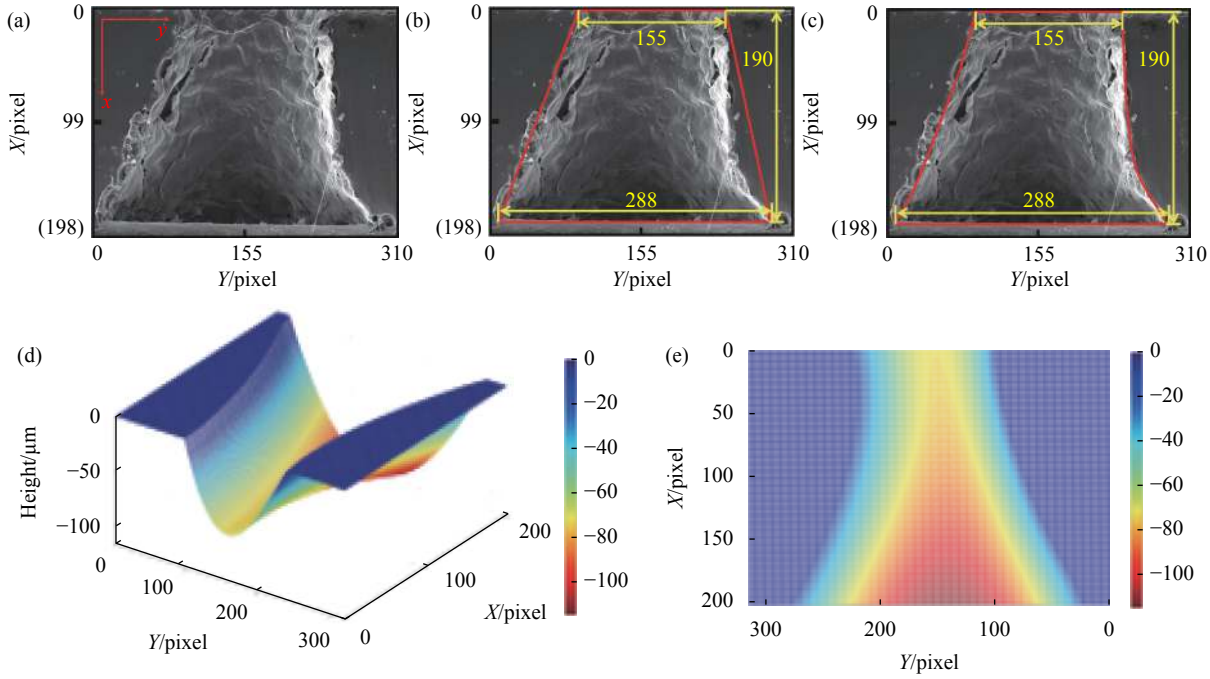


图 8 烧蚀坑图像。(a) 侧面图；(b) 传统体积法；(c) 重建体积法；(d) 重建图；(e) 重建俯视图

Fig.8 Image of ablation pit. (a) A profile view; (b) Traditional volume method; (c) Reconstruction volume method; (d) Reconstruction plan; (e) Reconstruction of the top view

当激光与工质相互作用时，靠近透明基底侧区域较早开始吸收激光能量，形成烧蚀区。由于 GAP 工质掺杂了纳米碳粉，碳粉在工质内形成团聚区域，在吸收激光能量形成局部高温后，导致其周围的聚合物被迅速气化和离化[25]。随着冲击波的形成以及激光烧蚀推进过程的进行，烧蚀区压力得到释放，区域温度逐渐降低，烧蚀坑内部及其周围的工质以凹凸不平的状态凝结。此时，在侧面图像中可以发现明显的不规则区域。在获取图像信息时，这些区域会导致信息存在一定程度的误差。为了削弱不规则区域对重建造成的影响，保证重建形貌与烧蚀坑轮廓吻合，在进行烧蚀坑表面形貌重建时，需要对图像进行平滑处理。

如图 8(b) 所示，传统体积估算方法中，通常在已知烧蚀坑上下表面形状的情况下，采用圆柱或圆台形状对烧蚀坑形貌进行模拟[6]。然而从图像中可以发现，真实烧蚀坑形状与模拟形状之间存在差异。即真实烧蚀坑通常为不规则形状，其体积小于模拟形状体积，且对应烧蚀质量小于模拟烧蚀质量。由于计算模型与真实情况存在差异，会导致计算的推进性能参数与真实值存在偏差。为此，文中采用了如图 8(c) 所示的边缘轮廓作为烧蚀坑边界，通过表面形貌重建算法对不规则烧蚀坑进行体积的重构，从而进行烧蚀质量的计算。采用传统体积法与表面形貌重建方法计算的体积和质量如表 2 所示，后者计算的数值小于前者，且更接近真实烧蚀坑的数值。相较于计算模型无法准确反映烧蚀坑形状的传统体积方法，表面形貌重建方法计算的烧蚀坑质量更为接近真实结果。

表 2 重建烧蚀坑参数

Tab.2 Reconstructed ablation pit parameters

Ablation pit parameters	Volume/μm^3	Quality/μg
Ideal frustum of a cone	7.54×10^6	12.07
Reconstruction of ablation pits	4.45×10^6	7.12

由于成像过程中不可避免地受到二次反射、噪声或杂散辐射的干扰，使得成像结果在某些细节上存在差异。此时经算法重构后，不同方向上的物体表面形貌分别如图 8(d)、(e) 所示。从重建烧蚀坑的大致形貌可发现，用该方法重建的烧蚀坑已基本满足烧蚀坑形状重建的需求。

为了对重建方法的可重复性进行检测，采用如图 9(a) 所示的另一幅烧蚀坑图像进行烧蚀坑表面重建。图 9 为工作电流 25 A，脉宽 400 μs 状态下的半导体激光器，通过烧蚀同一靶带的不同位置得到的，

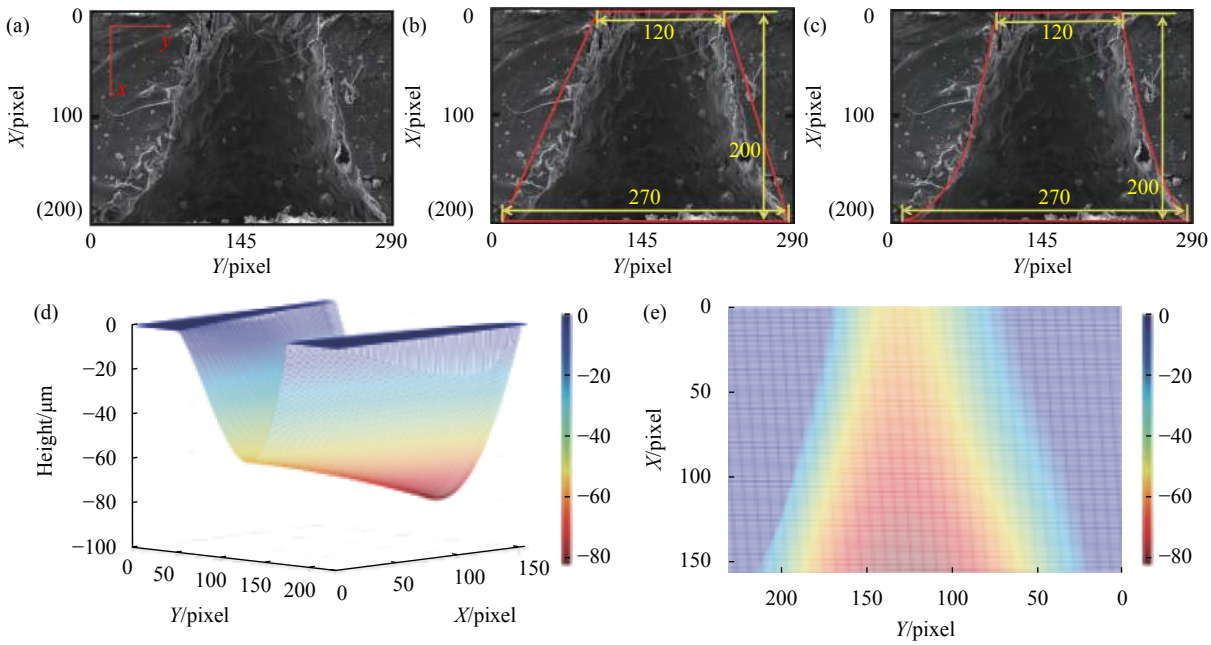


图 9 对照烧蚀坑图像。(a) 侧面图；(b) 传统体积法；(c) 重建体积法；(d) 重建图；(e) 重建俯视图

Fig.9 Contrast ablation pit image. (a) A profile view; (b) Traditional volume method; (c) Reconstruction volume method; (d) Reconstruction plan; (e) Reconstruction of the top view

其重建结果如图 9(d)、(e) 所示，通过公式 (14) 迭代计算得到的中间参数 $I_0\rho$ 值为 100，其对照烧蚀坑体积和质量如表 3 所示。

表 3 对照烧蚀坑参数

Tab.3 Contrast ablation pit parameters

Ablation pit parameters	Volume/μm^3	Quality/μg
Ideal frustum of a cone	6.27×10^6	10.03
Reconstruction of ablation pits	5.34×10^6	8.544

如图 8(d) 和图 9(d) 所示，此时利用 SFS 方法重建的烧蚀坑与图 8(a) 和图 9(a) 所示的原始烧蚀坑相比，前后形状基本吻合，得到了较为理想的表面形貌恢复效果。而如表 2 和表 3 所示，尽管脉冲激光烧蚀工质时，烧蚀坑形状存在差异，但通过重建算法的两次单脉冲激光烧蚀坑进行计算，可以发现两次得到的烧蚀坑体积与质量，均与假设其为理想圆台形状时的计算结果处于同一数量级，且小于圆台形状的计算数值。当以相同条件重复烧蚀 100 次时，总烧蚀质量可达到 mg 量级，与罗乐乐等人的研究结果相符[26]。因此，在对重建烧蚀坑的体积与质量进行计算时，可以得到较为合理精确的计算结果。此时可以通过该方法重建后的烧蚀坑图像，进行百微米级烧蚀体积和质量的估算。

4 结 论

(1) 为了得到微尺度的单脉冲烧蚀质量，文中在体积法的基础上，基于 SFS 算法的基本原理，参考了基于灰度梯度约束的重建思想，提出了一种基于烧蚀坑表面形貌重建的方法来恢复烧蚀坑形状，间接实现烧蚀体积和质量的估算；

(2) 文中提出了一种新的 SFS 算法中参数的计算方法：由于通过使用 SEM 设备得到高精度烧蚀坑图像，入射光源强度 I_0 和物体表面反射率 ρ 属于未知量。因此基于朗伯体反射模型的特性，将两参数的乘积视为一定的常数项参数，由已知相对位置和高度的两个确定点，通过迭代的思想进行计算；

(3) 由于灰度图像的误差和模糊对烧蚀坑表面形貌的重建精度有很大的影响。为此，文中通过提取烧蚀坑边缘轮廓作为各方向的分段依据进行分段拟合，并通过分段点两侧的灰度值对分段点进行约束来避免不连续的间断点出现，完善了表面形貌的三维重建算法。

相较于传统烧蚀质量计算方法，文中的表面形貌重建方法以扫描电镜得到的高精度烧蚀坑图像为依据进行烧蚀坑表面形貌的重建，以及体积与质量的估算。在方法操作简单、测量效率高的基础上提高了质量计算模型的准确性，在一定程度上满足了激光微尺度烧蚀质量的计算要求，为激光微推进系统性能参数的研究提供了一个可供参考的测量方法。

参考文献：

[1] Phipps C R, Luke J R, Helgeson W, et al. Performance test results for the laser powered microthruster[C]//American Institute of Physics, 2006.

[2] Shen S, Jin X, Hao C. Cleaning space debris with a space-based laser system [J]. ***Chinese Journal of Aeronautics***, 2014, 27(4): 805-811.

[3] Phipps C R. A laser-optical system to re-enter or lower low Earth orbit space debris [J]. ***Acta Astronautica***, 2014, 93: 418-429.

[4] Phipps C R, Baker K L, Libby S B, et al. Removing orbital debris with lasers [J]. ***Advances in Space Research***, 2012, 49(9): 1283-1300.

[5] Esmiller B, Jacquelard C, Eckel H A, et al. Space debris removal by ground-based lasers: main conclusions of the European project CLEANS PACE [J]. ***Applied Optics***, 2014, 53(31): I45-I54.

[6] Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu, et al. Measurement method for microgram amounts laser ablation mass [J]. ***Journal of Propulsion Technology***, 2010, 31(3): 372-376. (in Chinese)

[7] Lilly T C, Ketsdever A, Pancotti A P, et al. Development of a specific impulse balance for capillary discharge pulsed plasma thrusters [J]. ***Journal of Pro-pulsion and Power***, 2009, 25(3): 823-826.

[8] Jin Xing, Wu Wentang, Zhou Weijing, et al. Design method of micro-impulse measuring system based on pivots for pulsed micro-thruster [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2019, 48(S1): S117005. (in Chinese)

[9] Jin Xing; Chang Hao; Ye Jifei. Methods of extreme short pulse laser ablation impulse coupling measurem ent [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(3): 0329002. (in Chinese)

[10] Chang Hao, Ye Jifei, Lin Zhengguo. Simulation analysis of response characteristics of torsion pendulum by pulse micro-

thrust [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(S2): S218001. (in Chinese)

[11] Ketsdever A D, D'Souza B C, Lee R H. Thrust stand micromass balance for the direct measurement of specific impulse [J]. ***Journal of Propulsion and Power***, 2008, 24(6): 1376-1381.

[12] Zhou Weijing, Hong Yanji, Ye Jifei, et al. Direct measurement method of specific im-pulse for pulse laser ablation micropropulsion [J]. ***Journal of Propulsion Technology***, 2017, 38(6): 1434-1440. (in Chinese)

[13] Gonzales D A, Baker R P. Micropropulsion using a Nd: YAG microchip laser[C]//SPIE, 2002, 4760: 752-765.

[14] Heise B, Stifter D. Quantitative phase reconstruction for ortho gonal scanning differential phase contrast optical coh-erence tomo graphy [J]. ***Optics Letters***, 2009, 34(9): 1306-1308.

[15] Hu J-F, Zheng W-S, Xie X, et al. Sparse transfer for facial shape- from-shading [J]. ***Pattern Recognition***, 2017, 68: 272-285.

[16] Shi W C, Zheng J M, Li Y, et al. Three-dimensional reconstruction method for machined surface topography based on gray gradient constraints [J]. ***Applied Sciences***, 2019, 9(3): 591.

[17] Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu, et al. Research progre-ss in micro-laser plasma propulsion [J]. ***Chinese Optics***, 2011, 4(4): 319-326. (in Chinese)

[18] Zhang Yi, Zhang Zhiyuan, Lu Xin, et al. Development of laser plasma micro-propulsion [J]. ***Science & Technology Review***, 2007(19): 70-74. (in Chinese)

[19] Tozza S, Falcone M. Analysis and approximation of some shape -from-shading models for non- Lam bertian su-rfaces [J]. ***Journal of Mathematical Imaging and Vision***, 2016, 55(2): 153-178.

[20] Alhulayil M, Younes A B, Turner J D. Higher order algorithm for solving La-mbert ’s problem [J]. ***The Journal of the Astronautical Sciences***, 2018, 65(4): 400-422.

[21] Wang G, Cheng J. Three-dime nsional reconstruction of hybrid surfaces using perspective shape from shading [J]. ***Optik***, 2016, 127(19): 7740-7751.

[22] Meng Q, Wang H, Xu W, et al. A coupling method incorporating digital image processing and discrete element method for modeling of geomaterials [J]. ***Engineering Computations***, 2018, 35(1): 411-431.

[23] Yang L, Zhang N, Ren Y, et al. Linear perspective shape-from-shading method with two images [J]. ***Journal of Systems Engineering and Electronics***, 2015, 26(5): 1080-1087.

[24] Bruvoll S, Reimers M. Spherical surface parameterization for perspective shape from shading [J]. ***Pattern Recognition Letters***, 2012, 33(1): 33-40.

[25] Lukas Urech, Marc Hauer, Thomas Lippert, et al. Designed polymers for laser- based microthrusters: correlation of thrust with material, plasma, and shockwave properties[C]// SPIE, 2005, 5448: 52-64.

[26] Luo Lele, Dou Zhiguo, Zhou Weijin, et al. Effects of different dopants on laser ablation propulsion performance of GAP [J]. ***Journal of Propulsion Technology***, 2018, 39(11): 2615-2623. (in Chinese)