

微克量级激光微烧蚀质量测量方法^{*}

叶继飞, 洪延姬, 王广宇, 史宏略

(装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘 要: 激光微推进性能研究离不开比冲的测量, 烧蚀质量测量的好坏一定程度上决定了比冲的测量精度。提出了一种激光微烧蚀质量测量方法——体积修正法, 介绍了此方法的构建思路和原理, 与平均质量法和体积估算法进行了比较分析, 建立了激光微烧蚀质量测量装置, 以透射式激光烧蚀黑纸靶为例, 对实验结果进行了分析。研究表明: 此方法能够有效测量微克、十微克量级的激光微烧蚀质量, 测量精度较高, 为激光微烧蚀质量的性能研究提供了一种简便、快捷的测量手段。

关键词: 激光微推进; 平均质量; 体积估算; 修正方法

中图分类号: TN249 V439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2010) 03-0372-05

Measurement method for microgram amounts laser ablation mass

YE Ji-fei, HONG Yan-ji, WANG Guang-yu, SHI Hong-lue

(Inst. of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract The measurement of specific impulse is very important for the evaluation of propulsion performance in laser micro propulsion. The measurement precision of specific impulse is determined by the measurement precision of ablation mass to some extent. A measurement method for laser micro ablation mass is proposed, named by volume modified method. The basic principle of the method is introduced. It is compared with the average mass method and volume estimation method. The measurement equipment is established. Take the black ink paper as an example, the analysis of the experiment results is presented. The results from the present study show that the method is valid for the measurement of microgram amounts laser ablation mass. It may serve as a convenient tool for the performance research of laser micro ablation mass.

Key words Laser micro propulsion; Average mass; Volume estimation; Modified method

1 引 言

激光微推进是以激光为动力, 烧蚀工作介质产生冲量, 形成推力, 实现对空间飞行器的姿态和轨道控制的推进技术^[1]。比冲是表征激光微推进性能的关键参数, 它由冲量和烧蚀质量计算得到。激光微烧蚀质量的测量对于研究激光微推进性能至关重要。

单脉冲激光微烧蚀靶材的烧蚀质量范围通常在微克到十微克量级, 目前, 对于这一量级微小质量的测量, 存在如下几个方面的问题:

(1) 微小质量直接测量手段不成熟, 测量范围尚不能覆盖微克量级的质量称量需求。市场上现有的微量天平最高精度能达到 1 微克, 对于微克量级的小

质量来讲, 精度不够, 并且仪器使用条件苛刻, 且成本较高。

(2) 对于单脉冲烧蚀质量逐发测量会降低实验效率, 不便于操作。特别是在真空条件下, 逐发测量需要破坏真空条件, 不利于实验连续进行, 测量过程实施不现实。

(3) 采用平均质量法测量, 受随机因素影响, 测量误差较大。激光微烧蚀过程有其特殊的性质, 由于随机因素导致同样条件下烧蚀效果差异较大, 传统的烧蚀多次, 取平均值的方法, 不能准确反应某次单脉冲烧蚀质量的大小。

(4) 采用体积估算法测量也有一定局限性。美国 Phipps Claude R 等人^[2]对激光微烧蚀工质所形成

* 收稿日期: 2009-06-02 修订日期: 2010-04-02

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328)。

作者简介: 叶继飞 (1981-), 男, 博士生, 研究领域为激光推进技术。Email: yjfl981@163.com

的靶坑形状进行模拟,对于反射式激光微烧蚀情况,认为烧蚀靶坑形状可以用圆台模拟,烧蚀坑顶部为圆台较大的上表面,烧蚀坑底部为圆台较小的下表面。Reilly Michael P 等人^[3]对于透射式激光微烧蚀情况,采用扫描电子显微镜观察烧蚀靶坑,认为烧蚀靶坑形状可以用圆柱形模拟。由于真实靶坑与规则几何体形状差别较大,使得这种利用体积模拟估算质量的方法精度也比较低,单脉冲激光微烧蚀质量测量误差最大可达 50%^[4]。

本文提出了一种体积修正法,基于体积形状的模拟,结合直接测量,对随机因素进行修正,建立了一种对单脉冲激光微烧蚀质量测量精度较高,且容易操作的微克量级质量测量方法,以满足激光微推进性能研究的需求。

2 测量原理

对于单脉冲激光微烧蚀微小质量的测量,可选用的方法有:平均质量法、体积估算法,以及本文给出的体积修正法。

2.1 平均质量法

传统的微小质量的测量常采用平均质量法,即测量多次取平均值做某次真值的方法。假定第 i 次烧蚀质量为 m_i , 打靶烧蚀 N 次,总烧蚀质量可以根据测量靶烧蚀前后的质量差 M 得到。因此,某次单脉冲激光微烧蚀质量为

$$m_i = \frac{M}{N} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

该方法测量要求,单脉冲烧蚀现象重复性要好, N 次打靶为相互独立的重复实验。激光微烧蚀过程中,激光微烧蚀质量的大小受很多随机因素影响,如烧蚀介质表面平整度、内部杂质均匀度、激光光斑形状,以及激光功率漂移等。每次单脉冲烧蚀重复性较差,因此,认为 N 次打靶为重复实验,测量结果会有一定的偏差。

2.2 体积估算法

体积估算法是根据体积形状的模拟,进行质量的估算。假定烧蚀靶坑可以用圆台来模拟^[1],圆台体积公式为

$$V = \frac{\pi}{3} h (R^2 + r^2 + Rr) \quad (2)$$

式中 R , r , h 分别表示圆台上表面圆的半径、圆台下表面圆的半径,以及圆台的高。对应实际靶坑的坑口半径、坑底半径,以及烧蚀坑深度。工质靶材料密度为

ρ 烧蚀质量估算模型为

$$m = \rho V = \frac{\pi}{3} \rho h (R^2 + r^2 + Rr) \quad (3)$$

假设圆台的上底面的面积为 S_a , 下底面的面积为 S_b , 可以利用体积估算的方法,得到烧蚀坑质量为

$$m = \frac{1}{3} \rho h (S_a + S_b + \sqrt{S_a S_b}) \quad (4)$$

式中烧蚀坑深度 h 可以直接测量,靶坑坑口面积 S_a , 以及坑底面积 S_b , 可以通过观察系统拍摄靶坑照片,进行图片处理获得。

文献[4]中研究结果表明,靶坑体积估算的方法误差很大,主要原因是由于实际烧蚀坑形状与规则几何体相差较大导致的。靶材中掺杂不均匀,会使得局部地方对激光的吸收较大,烧蚀严重些,而其它区域相对烧蚀较少,这就使得烧蚀靶坑并不规则,尤其是坑底部和侧壁面^[5],如图 1 所示。

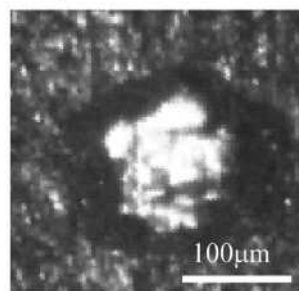


Fig. 1 Photo of laser micro ablation pit

图 1 中,较亮部分为靶坑底部(靶固定件反射光),颜色较深的环状黑边为靶坑的侧壁,侧壁外轮廓即为坑口边界。

2.3 体积修正法

对同一块靶材进行 N 次同样条件下的相互独立的烧蚀实验,为保证测量精度,令 $N \geq 200$ 。利用高精度分析天平称量烧蚀靶质量(精度 10 μg)。假定烧蚀前的质量为 M_0 , 烧蚀后的质量为 M_1 , 因此,因激光烧蚀而损失的质量 M 为

$$M = M_0 - M_1 \quad (5)$$

根据体积估算法, N 个烧蚀坑的烧蚀质量可估算为

$$\sum_{i=1}^N m_i = \frac{1}{3} \rho h \sum_{i=1}^N (S_{ai} + S_{bi} + \sqrt{S_{ai} \cdot S_{bi}}) \quad (6)$$

式中 i 为烧蚀坑的编号。

如前所述,由于众多随机因素影响,烧蚀坑的实际质量与体积估算质量有一定差别,会产生

$$M \neq \sum_{i=1}^N m_i \quad (7)$$

引进修正系数 K , 即

$$M = K \cdot \sum_{i=1}^N m_i \quad (8)$$

也即

$$M_0 - M_1 = K \cdot \frac{1}{3} \rho \sum_{i=1}^N (S_{ai} + S_{bi} + \sqrt{S_{ai} \cdot S_{bi}}) \quad (9)$$

于是有

$$K = \frac{M_0 - M_1}{\frac{1}{3} \rho \sum_{i=1}^N (S_{ai} + S_{bi} + \sqrt{S_{ai} \cdot S_{bi}})} \quad (10)$$

按照每个单脉冲烧蚀坑的权重分配, 第 j 个烧蚀坑对应的修正系数 k_j 为

$$k_j = K \cdot \frac{(S_{aj} + S_{bj} + \sqrt{S_{aj} \cdot S_{bj}})}{\sum_{i=1}^N (S_{ai} + S_{bi} + \sqrt{S_{ai} \cdot S_{bi}})} \quad (11)$$

因此, 对于某特定工质靶材材料和靶材厚度, 唯一的圆台上下表面积对应唯一的修正系数 k , 由此可以建立起, 对于该特定靶材的, 不同烧蚀靶坑面积对应的修正系数 k 的数值表, 进一步可以建立起映射函数 $f(S_a, S_b \rightarrow k)$, 此处简称为 $k(S_a, S_b)$ 。该修正系数可用于修正单次烧蚀质量的体积估算。

在已知烧蚀靶坑面积 S_a 和 S_b 后, 单脉冲烧蚀质量表示为

$$m = \frac{1}{3} \rho (S_a + S_b + \sqrt{S_a \cdot S_b}) \cdot k(S_a, S_b) \quad (12)$$

实验室采用的高精度微量天平是梅特勒托利多 XS105DU 分析天平, 其测量精度为 $10 \mu\text{g}$ 因此, M_0 和 M_1 的测量误差都为 $10 \mu\text{g}$ 故 M 的测量误差为 $20 \mu\text{g}$ 。把 $20 \mu\text{g}$ 的误差平均分配到每个烧蚀坑的烧蚀质量上面, 要求每个烧蚀坑的烧蚀质量的测量误差小于 $0.1 \mu\text{g}$ 时, N 的次数要求大于 200。实验中测得的单脉冲烧蚀质量不小于 $2 \mu\text{g}$ 因此, 单脉冲烧蚀质量的测量精度优于 95%。

3 测量装置

图 2 是体积修正法微烧蚀质量测量装置俯视简图, 实物图如图 3 所示。激光聚焦于靶材表面, 光斑观察系统放大镜的焦点也在激光聚焦点上, CCD 上呈清晰的靶面图像。激光器与光斑观察系统相对位置不变。

激光器选用海特 LDM-808-005W-X5 半导体激光器, 可以连续输出和脉冲输出两种方式工作, 采用 600 mA 小电流连续输出时, 可进行聚焦位置调整, 此

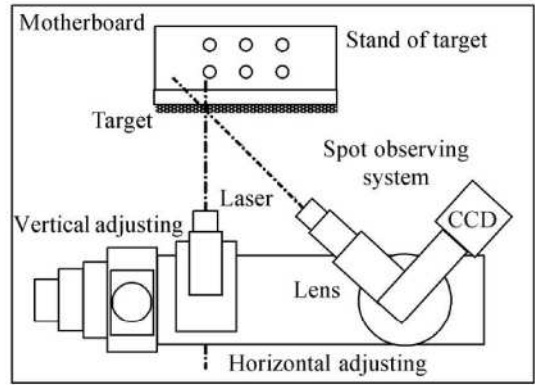


Fig. 2 Sketch of measurement system for laser micro ablation mass

时输出功率不足以引起靶材烧蚀; 采用 5 000 mA 电流脉冲输出, 激光功率可达 5 W, 功率密度在 10^5 W/cm^2 量级, 靶材烧蚀, 形成烧蚀坑。光斑观察系统选用大恒 OPTEM 70XL 镜头和 DH-HV3102DC-T CCD 相机, 在激光对焦靶面时, 观察系统可以起到观察聚焦情况的作用。为了实现多次的单脉冲打靶烧蚀, 通过电移台实现激光器与观察系统的两维调节, 水平调节机构选用 Zolix TSA30-C 电移台, 垂直调节机构选用 Zolix TSA150 电移台。

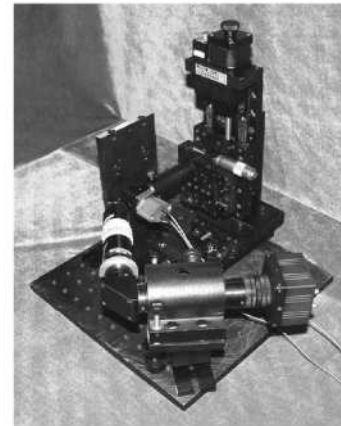


Fig. 3 Photo of measurement system for laser micro ablation mass

4 测量结果与分析

以透射式激光烧蚀黑纸实验为例, 说明微烧蚀质量测量方法的应用。选取靶材黑纸密度为 $0.885 \pm 0.001 \text{ g/cm}^3$, 厚 $300 \pm 10 \mu\text{m}$, 选择玻璃做透明层, 环氧树脂做粘合剂, 将黑纸与玻璃粘合在一起, 环氧树脂厚 $30 \pm 5 \mu\text{m}$ 。对某特定输入激光脉宽, 测量初始靶质量, 连续进行 200 次单脉冲烧蚀后, 测量打靶后的靶质量, 并将每次打靶后的烧蚀坑照片采下, 处理得到烧蚀坑口面积, 体积估算模型取圆

柱形。

4 1 三种测量方法比较分析

采用三种测量方法进行对比,分析各个方法的优劣。选取激光脉宽为 200 ms 时,用三种方法计算得到的单脉冲烧蚀质量与各个烧蚀坑对应关系如图 4 所示。

从图 4 中实验数据可以看出:

(1)平均质量法忽略了各个烧蚀坑之间的差异,认为每个烧蚀质量都一致,显然,这种质量评估方法不尽合理,但是,平均质量法给出的结果是真实烧蚀质量的一种较为客观的参考。

(2)体积估算法计算的结果表明,各个烧蚀坑之间是有差异的,最大偏差可达几十微克,这也说明了,这种烧蚀坑间的差异是不能忽略的,然而,体积估算法得到的烧蚀坑质量均值低于平均质量法给出的结果,这显然是不合理的,这种估算方法虽然能够反应烧蚀坑个体间的差异,但是,与真实的烧蚀质量存在偏差,需要修正。

(3)对于体积修正法测量结果而言,一方面,数据都在平均质量法给出的结果附近,其均值等于平均质量法均值。另一方面,表现出各个烧蚀坑之间的差异,同体积估算法反应的情况一致。

综合看来,本文给出的体积修正法对于某个单脉冲烧蚀质量的测量更加准确、客观。

4 2 不同脉宽下的激光微烧蚀质量测量

下面给出体积修正法在不同脉宽激光入射条件下,烧蚀质量测量过程中的各参数列表,如表 1 所示。

表中选取的烧蚀坑对应的单脉冲烧蚀质量、修正系数与脉宽关系如下图 5 所示。

Table 1 Measurement data with different laser pulse

Laser pulse / ms	Mass difference ΔM / g	Typical ablation pit area / cm^2	Modified coefficient k
100	0.00792	2.7561×10^{-4}	5.191
150	0.01245	4.2342×10^{-4}	5.690
200	0.01660	5.8621×10^{-4}	5.235
250	0.02267	7.3893×10^{-4}	5.757
300	0.02741	8.8459×10^{-4}	5.746
350	0.02820	8.9108×10^{-4}	6.084
400	0.02906	1.14126×10^{-3}	4.783
450	0.02930	1.23527×10^{-3}	4.450
500	0.03006	1.44281×10^{-3}	3.914

从实验结果的数据可以得出如下几个认识:

(1)单脉冲烧蚀质量随注入激光能量的增加呈增加趋势。激光脉宽在 100 ms 以上时,烧蚀质量在十微克量级,脉宽 500 ms 烧蚀质量最大可达 151.4 μg 。

(2)注入能量达到一定阈值时,单脉冲烧蚀质量增加趋势减缓。图中曲线变化趋势可以看出,烧蚀质量在脉宽 350 ms 以前,上升较快;当脉宽大于 350 ms 时,烧蚀质量增加趋势变化缓慢。分析原因认为是由于激光脉宽加长时,烧蚀效率降低的原因。激光脉宽较长时,激光前一部分将靶材烧穿后,剩余能量会使靶坑周围的材料加热、熔融,并一部分气化,这部分烧蚀效率较低,靶材烧蚀率下降。

(3)修正系数一定程度上能够反应烧蚀情况的好坏。脉宽较短,烧蚀质量变化迅速时,修正系数保持在 5~6 左右变化;当脉宽较长(大于 350 ms)时,烧蚀质量变化缓慢,修正系数显著下降。修正系数一定程度上能反应烧蚀质量的变化规律。

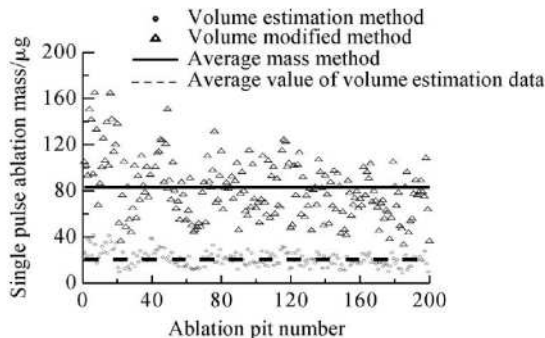


Fig. 4 Single pulse ablation mass vs ablation pit

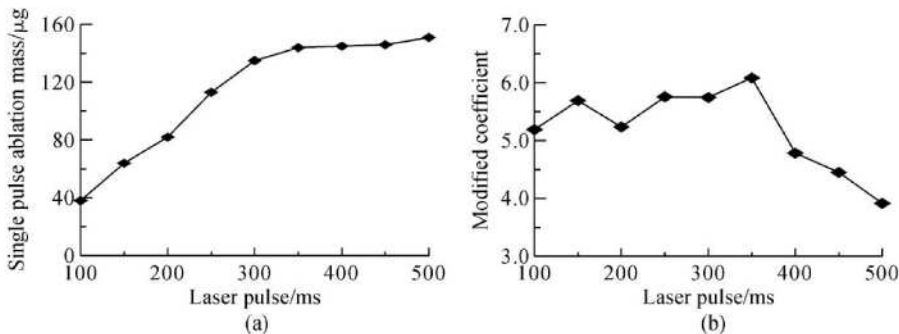


Fig. 5 Single pulse ablation mass vs laser pulse and modified coefficient

5 结 论

本文介绍了一种微克量级激光微烧蚀质量测量方法。经过对比分析,实验测试,得到如下几个结论:

(1)方法能够实现微克量级、十微克量级微小单脉冲烧蚀质量的测量。

(2)与其它方法相比,体积修正法测量更为准确、客观,精度更高。利用直接测量法的较高精度的特点,通过弥补体积估算法的估算偏差,提高了激光微烧蚀单脉冲质量的测量精度,测量精度优于 95%,合理选择构建修正系数时靶材的烧蚀次数可以实现更高精度的测量。

(3)方法操作简便,测量效率较高。一次完成修正系数的映射数据库,可以直接根据靶坑形状,迅速、较为准确的得到单脉冲烧蚀质量。

所提供的方法一定程度上能够满足激光微烧蚀质量的测量,为激光微推进技术的烧蚀质量性能研究

工作提供了一种可供参考的测量方法。

参考文献:

- [1] 王广宇,洪延姬,叶继飞. 激光微推进研究进展[C]. 北京:中国宇航学会 2007年固体火箭推进第24届年会论文集, 2007: 367~372
- [2] Claude R P, James R L, Thomas L, et al. Micropropulsion using a laser ablation jet[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(6): 1000~1011
- [3] Michael P R, George H M. Plume expansion and ionization in a micro laser plasma thruster[R]. *AAAS* 2005-4072
- [4] Claude R P. Micro laser plasma thrusters for small satellites[R]. *STTR* 2002-F49620-00-C-0005
- [5] David A G, Robert P B. Micropropulsion using a Nd:YAG microchip laser[J]. *High-Power Laser Ablation* (Ed) *SPIE*, 2002, 4760: 752~765

(编辑: 张荣莉)

(上接第 334 页)



Fig. 13 Test set-up

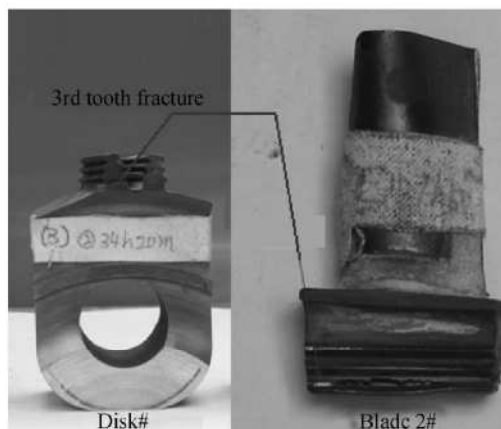


Fig. 14 Macro morphologies of test 3#



Fig. 15 Macro morphologies of disc 3#

(3)后续应开展多子样寿命试验以确定涡轮构件带置信度水平的可靠性寿命。同时温度、频率对寿命的影响有待于通过试验进一步研究。

参考文献:

- [1] 侯贵仓,王荣桥,阎晓军,等. 轮盘榫齿高低周复合疲劳寿命试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(2): 167~170
- [2] Wang R Q, Nie J X. A new experimental method to study combined fatigue of actual turbine disk mortise teeth at el-

evated temperature[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1997, 119: 969~972

- [3] 赵福星,杨兴宇. 发动机构件低循环疲劳模拟试验件设计方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2003, 16(2).
- [4] 王 亮. 涡轮构件有限元强度寿命分析和实验研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2005
- [5] 王荣桥. 弹用涡扇发动机高压涡轮构件寿命试验研究报告[D]. 北京:北京航空航天大学, 2005

(编辑: 姚懿巧)