

激光脉宽和功率密度对烧蚀性能影响研究

王思博, 蒋陆昀, 洪延姬, 杜邦登, 邢宝玉, 张腾飞, 高贺岩

(航天工程大学 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 微纳卫星的飞速发展对微推力器的性能提出了更高的要求。激光推进微推力器因其比冲高、推力控制精确、能耗低等特点, 为微纳卫星提供了一种性能优异的微推力器选择方案。文中在透射式烧蚀模式下, 研究了半导体激光器的激光功率密度和脉宽对激光烧蚀性能的影响。结果表明, 在工质厚度为 200 μm 的工况下, 随着激光功率密度的增加, 单脉冲冲量和比冲都逐渐增大, 而冲量耦合系数和烧蚀效率都存在一个最优值。随着激光脉宽的增加, 单脉冲冲量逐渐增加, 比冲呈现出先增大后减小的趋势, 在 250 μs 时, 比冲达到最大值, 约为 221.8 s; 冲量耦合系数和烧蚀效率都随着脉宽的增大而减小; 脉宽超过一定的临界值时, 会对激光烧蚀工质的靶坑产生不良影响, 使得激光能量和工质严重浪费。激光参数的优化对于激光推进微推力器的工程化应用提供了参考。

关键词: 激光推进; 比冲; 冲量耦合系数; 功率密度; 脉宽

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210422

Research on the influence of laser pulse width and power density on ablation performance

Wang Sibao, Jiang Luyun, Hong Yanji, Du Bangdeng, Xing Baoyu, Zhang Tengfei, Gao Heyan

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: With the rapid development of micro-nano satellites, the performance of micro-thrusters is required to be higher. Because of its high specific impulse, precise thrust control and low energy consumption, the laser-propelled micro-thruster provides an excellent micro-thruster choice scheme for micro-nano satellite. In this paper, the influence of power density and pulse width of semiconductor laser on the performance of laser propulsion was studied in transmission ablation mode. The results show that when the thickness of the working medium layer is 200 μm , with the increase of the laser power density, the single pulse impulse and specific impulse gradually increase. And there is an optimal power density value to the impulse coupling coefficient and ablation efficiency. As the pulse width of the laser increases, the impulse of the single pulse gradually increases, and the specific impulse first increases and then decreases. At 250 μs , the specific impulse reaches its maximum value, which is about 221.8 s. The impulse coupling coefficient and ablation efficiency decrease with the increase of pulse width. When the pulse width exceeds a certain critical value, it will have a bad effect on the target pit of the laser ablation working medium, resulting in a serious waste of laser energy and working medium. The optimizing of laser parameters provides a reference for the engineering application of laser propelled micro-thruster.

Key words: laser propulsion; specific impulse; impulse coupling coefficient; power density; pulse width

收稿日期: 2021-06-22; 修订日期: 2021-09-22

作者简介: 王思博, 男, 博士生, 主要从事激光推进以及激光与物质相互作用机理方面的研究。

导师简介: 洪延姬, 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。

0 引言

21 世纪以来,随着人类利用和探索宇宙空间的范围和深度拓展,常规化学能推进的局限性逐步显现出来。人们不断地提出了探测空间的航空宇航推进新技术的方案与途径,并开展了不懈的探索性研究^[1]。微小卫星由于其体积小、成本低、机动性好等特点,在卫星通信、导航等领域具有广泛的应用。在组网、编队等复杂任务中对微小卫星的推进系统提出了严格的要求,用于姿态调整和轨道保持所需的推力更小,精度更高;同时,还要满足微小卫星上体积小,质量轻、功耗低的特点。以激光推进为原理的激光烧蚀微推力器可以很好地满足上述推进系统的要求,其逐渐进入了国内外研究人员的视野。

激光烧蚀微推力器是利用激光烧蚀工质产生的靶蒸气或等离子体喷射现象来获得反作用冲量和推力。根据激光参数和工质种类的不同,冲量最小可控制在 $10^{-4} \sim 10^{-9}$ Ns 量级,推力最小可达 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ N 量级^[2-3]。在以往的研究中,国外的 Phipps^[4-7], Myrabo^[8], Bohn^[9] 等人,国内的蔡建^[10]、郑志远^[11]、叶继飞^[12] 等人对激光与物质相互作用的机理等方面进行了大量的研究,得到了一些富有成效的结论。但是过去研究的多是 YAG 激光器、CO₂ 激光器等大功率激光器与物质的相互作用,此类激光器体积大、功耗大,无法实现微纳卫星上在轨应用。因此文中设计了一种小型化的半导体激光器,研究了激光参数对比冲、冲量耦合系数以及效率等参数的影响。

激光微推力器的工作模式主要有反射式和透射式两种,如图 1 所示。反射工作模式是指激光器发出的激光经过透镜聚焦后直接照射在工质表面,表面产生喷射气流,工质受到的推力方向与烧蚀气体喷射方向相反,此模式的优点是结构简单,而且耦合系数和

比冲较高,但由于喷射流与激光器在同一侧,因此会对激光器等光学器件表面造成严重污染,从而降低工作性能;透射式对工质进行了改进,使用双层靶结构,使激光束首先经过透射率较高的透明层之后辐照在工质上,避免了激光器的污染问题,更加符合实际的工程需求,因此文中的研究在透射式工质模式下开展。

1 测量方法和实验设备

1.1 推进参数介绍

激光推进的基本原理是将激光能量转化为飞行器的动能,冲量耦合系数 C_m 就是衡量这一性能的重要参数,定义为在激光作用下产生的冲量 ΔJ 与入射激光能量 E 的比值,或者为产生的推力 F 与入射激光功率 P 的比值为:

$$C_m = \frac{\Delta J}{E} = \frac{F}{P} \quad (1)$$

在烧蚀模式中引入比烧蚀能 Q 的概念,定义为烧蚀单位质量的工质所消耗的激光能量为:

$$Q = \frac{E}{\Delta m} \quad (2)$$

式中: Δm 为烧蚀质量。根据动量守恒原理,喷射过程中的工质和烧蚀产物满足下面关系:

$$\Delta m v_E = m \Delta v \quad (3)$$

式中: v_E 为喷射速度; $m \Delta v$ 为工质在激光烧蚀喷射过程中产生的动量。

C_m 和 Q 是实验中容易测量的参数,因此可以由如下关系得到喷射速度 v_E 为:

$$v_E = C_m Q \quad (4)$$

表述激光推进性能的另一个重要参数是比冲 I_{sp} ,同化学火箭一样,比冲定义为单位质量工质产生的冲量,为:

$$I_{sp} = \frac{\Delta J}{\Delta m g} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度。由公式 (1)~(5) 可得到比冲同喷射速度的关系为:

$$I_{sp} = \frac{v_E}{g} \quad (6)$$

无量纲参数烧蚀效率 η_{AB} 定义为激光脉冲能量转化为喷射动能的效率,为:

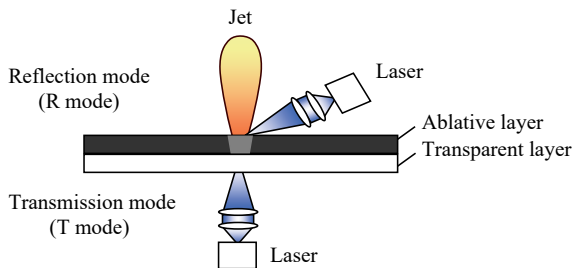


图 1 激光推进的透射和反射工作模式

Fig.1 Transmission and reflection modes of laser propulsion

$$\eta_{AB} = \frac{W_E}{E} = \frac{\Delta m v_E^2}{2E} \quad (7)$$

烧蚀效率 η_{AB} 、冲量耦合系数 C_m 和比冲 I_{sp} 的关系为:

$$2\eta_{AB} = C_m v_E = C_m I_{sp} g \quad (8)$$

在推进的实际应用中, 希望冲量耦合系数和比冲都具有高数值, 但由公式 (8) 可知, 两者乘积具有上限; 而且在一定的烧蚀效率 η_{AB} 下, 冲量耦合系数和比冲是一对相互制约的参数, 高比冲势必会导致较低的冲量耦合系数, 因此要根据不同的任务来选择适当的激光参数和工质。

1.2 实验系统和测量方法

实验系统示意图和实验场景图如图 2 所示。整个实验系统由半导体激光器、真空舱、扭摆横梁、位移传感器、电磁阻尼器、信号接收器、位移台控制器和电磁阻尼控制器等部分组成。真空舱的真空度能够达到 10^{-5} Pa 量级。

设扭摆系统的转动惯量为 J , 空气阻尼系数为 c , 枢轴的刚度系数为 k , 扭摆扭转角为 θ , 扭转角速度为

$\dot{\theta}$, 角加速度为 $\ddot{\theta}$, 外力作用力臂长为 d , t 时刻的外力大小为 $f(t)$; T_0 为外力作用时间, 由动量矩定理, 扭摆系统的运动方程表示为:

$$\begin{cases} J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = f(t)d & 0 < t < T_0 \\ J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = 0 & t > T_0 \end{cases} \quad (9)$$

外力作用时间 ($0 < t < T_0$) 内, 上述运动方程可改写为:

$$\ddot{\theta} + 2\xi\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2\theta = f(t)d/J \quad 0 < t < T_0 \quad (10)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{J}} \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{kJ}}$$

式中: ξ 为阻尼比; ω_n 为固有振动频率。

利用拉普拉斯变换, 令 $\Theta(s) = L[\theta(t)]$, 当初始扭转角和初始角速度都为零时, 单位脉冲力 $f(t) = \delta(t)$ 作用下, 有:

$$\Theta(s) = (d/J) \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} = (d/J) \frac{1}{(s + \xi\omega_n)^2 + \omega_d^2}$$

式中: $\omega_d = \sqrt{1 - \xi^2}\omega_n$ 为振动频率。

进行拉普拉斯反变换时, 得到单位脉冲力的扭转角响应为:

$$h(t) = L^{-1}[\Theta(s)] = (d/J) \frac{1}{\omega_d} e^{-\xi\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (11)$$

冲量为 I 的脉冲力 $f(\tau) = I\delta(\tau)$ 作用下, 扭转角为:

$$\theta(t) = \frac{Id}{J\omega_d} e^{-\xi\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (12)$$

由公式 (13) 可以看出, 扭摆的扭转角是时间的函数, 要根据时间 t 以及对应的扭转角 $\theta(t)$ 计算出冲量 I , 需已知式中的未知常量 d 、 ω_d 、 J 和 ξ 。一般而言, 由上式计算冲量的方法有两种, 一种是利用可输出已知冲量的标定装置得到扭转角极值点与冲量的关系, 另一种通过标定公式 (13) 中的四个未知参数得到扭转角与冲量关系。

第一种方法对冲量测量的精度要求较低, 认为阻尼接近零, 对扭摆振动的影响非常小, 式中的指数项近似为 1。取冲量作用后扭摆的最大摆角数据, 近似扭转角极值与冲量为线性关系为:

$$\theta_{\max} \approx \frac{Id}{J\omega_d}$$

实验采用的激光器为自行研制的半导体激光器, 具有体积较小、功率密度高等特点, 脉宽可实现 50~

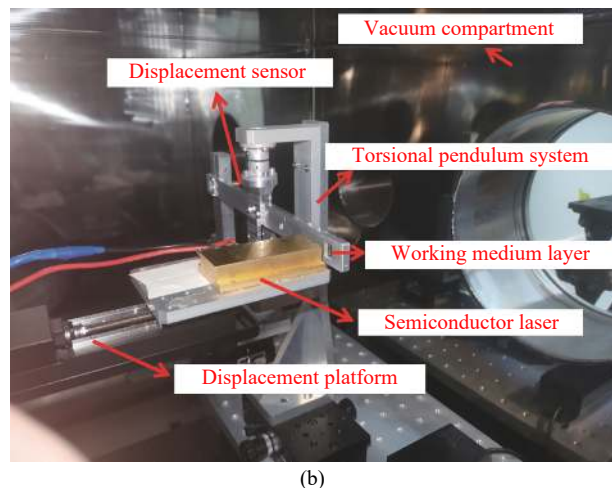
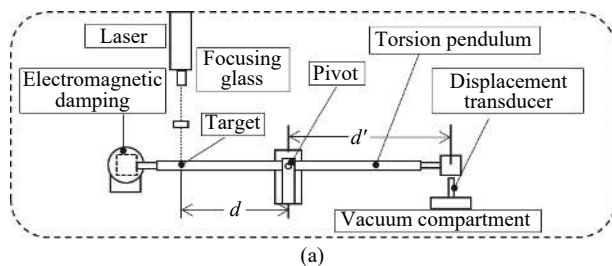


图 2 实验系统。(a) 示意图; (b) 实验场景图

Fig.2 Experimental system. (a) Schematic diagram; (b) Experimental scene graph

1500 μs 可调, 可以通过改变输入激光器的电流大小来改变激光器的功率密度, 功率密度最高可达 10⁶ W/cm² 量级, 实物如图 3 所示。采用扫描电子显微镜 (SEM) 来观察激光烧蚀工质的情况, 采用微量天平来测量烧蚀工质的质量, 质量测量时, 为测量精准, 采用多次烧蚀求平均值的方法。

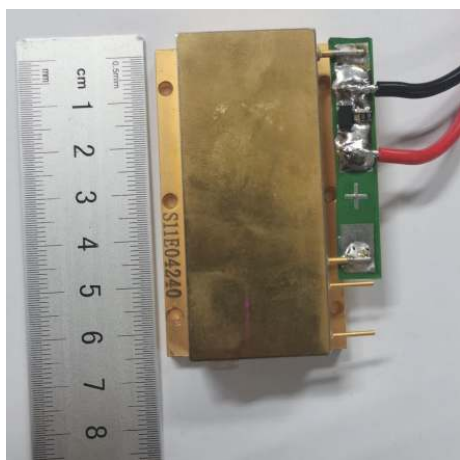


图 3 半导体激光器

Fig.3 Semiconductor laser

2 结果与讨论

2.1 激光功率密度对烧蚀性能影响

激光烧蚀推进中, 工质的选择有多种, 其中聚叠氮缩水甘油酯 (GAP) 因其自身含有高能基团, 更多的化学能参与到烧蚀过程中, 具有烧蚀产物分解彻底、喷射速度高的优点, 正在被国内外的团队广泛研究。经前期研究发现, 在 GAP 中加入强氧化剂高氯酸铵 (AP) 能够有效提高推进性能。笔者课题组经过前期的研究, 发现工质层厚度为 200 μm 的工质是工况较好的一个厚度, 因此文中在透射模式下, 以 87%GAP+10%AP+3%C (纳米碳粉) 为烧蚀工质材料 (后文统称工质), 工质总厚度为 250 μm, 其中透明基底层 PET (Polyethylene terephthalate 聚对苯二甲酸乙二醇酯) 厚度为 50 μm, 工质层厚度为 200 μm。

在 400 μs 的脉宽下, 通过改变半导体激光器的功率密度来研究激光功率密度对单脉冲冲量 P 和比冲 I_{sp} 的影响, 结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 随着功率密度的增加, 单脉冲冲量逐渐增加。激光的功率密度从 1.4×10^6 W/cm² 增

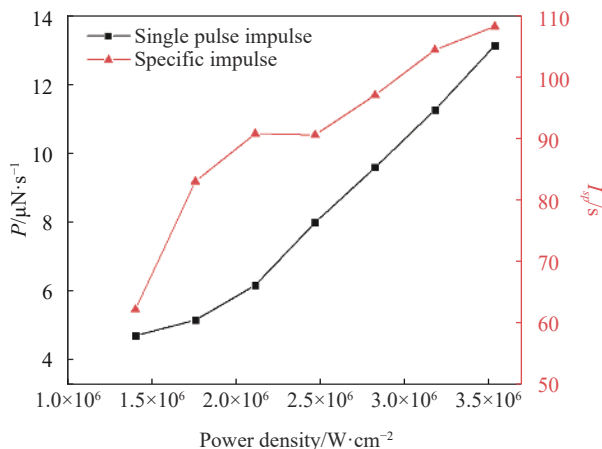


图 4 单脉冲冲量 P 和比冲 I_{sp} 随功率密度变化结果

Fig.4 Single pulse impulse P and specific impulse change I_{sp} with power density

大到 3.58×10^6 W/cm² 之后, 单脉冲冲量从 4.52 μNs 增大到了 13.09 μNs, 提高了接近三倍。随着功率密度的增大, 比冲也逐渐增大, 激光的功率密度从 1.4×10^6 W/cm² 增大到 3.58×10^6 W/cm² 之后, 比冲从 62.5 s 增大到了 108.13 s, 提高约 73%。单脉冲冲量的大小跟工质的离化程度有很大的关系, 通常情况下, 激光的功率密度越高, 被离化的工质也越多, 喷射羽流的膨胀速度越快, 单脉冲冲量越高。半导体激光器的功率密度在 10⁶ W/cm² 量级, 这个量级下, 工质不会被全部离化, 有很大一部分被气化。蒸汽状态的羽流相比于离子态的羽流, 效率非常低。因此, 提高激光的功率密度能够有效地提高离化率, 从而提高单脉冲冲量, 进而提高比冲。

冲量耦合系数 C_m 和烧蚀效率 η 随激光功率密度的变化曲线如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 随着激光功率密度的增加, 冲量耦合系数和烧蚀效率整体趋势都是逐渐增大。但是二者在功率密度为 3.21×10^6 W/cm² 时, 冲量耦合系数达到了 218.3 μN/W, 烧蚀效率达到了 11.2%。由于激光器的极限电流限制, 更高功率密度的激光参数没能继续测试。根据冲量耦合系数的定义公式 (1) 可以看出, 单面冲量的大小对冲量耦合系数有很大的影响。因此, 随着激光功率密度的增大, 冲量耦合系数有整体增大的趋势。但是功率密度的增大同时也会导致电功耗的增大, 二者的增大速度的变化决定了极值的存在。

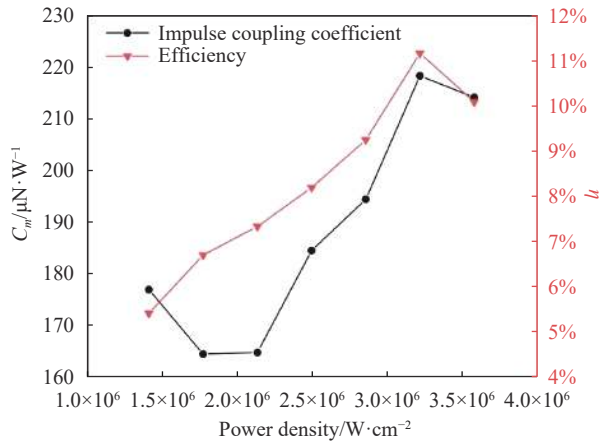


图 5 冲量耦合系数 C_m 和烧蚀效率 η 随激光功率密度的变化结果
Fig.5 Result of impulse coupling coefficient C_m and ablation efficiency η change with laser power density

2.2 激光脉宽对烧蚀性能影响

在功率密度为 $3.58 \times 10^6 W/cm^2$ 时, 通过改变半导体激光器的脉宽来研究激光脉宽对单脉冲冲量 P 和比冲 I_{sp} 的影响, 结果如图 6 所示。

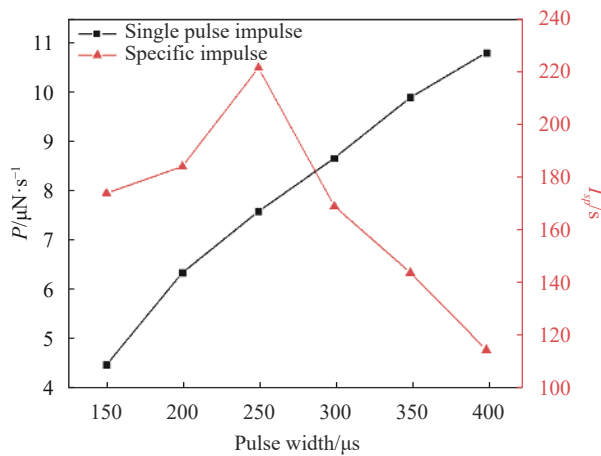


图 6 单脉冲冲量 P 和比冲 I_{sp} 随激光脉宽变化结果
Fig.6 Result of the variation of single pulse impulse P and specific impulse I_{sp} with laser pulse width

工质的厚度为 $200 \mu m$, 工质厚度较厚, 脉宽较小时, 热量沉积不足, 短时间内工质无法完全被离化或气化, 靠近上层的工质由于受到底层的高压冲击, 上层工质被击碎成许多小颗粒状进行喷射, 使得喷射速度降低, 造成了工质极大的浪费, 比冲减小。烧蚀靶坑如图 7 所示, 低速喷射出去烧蚀不完全的颗粒物, 少量沉积在了工质上, 如图中的红色标记处所示。随着脉宽的增大, 热量沉积足够多, 烧蚀区域内的工质

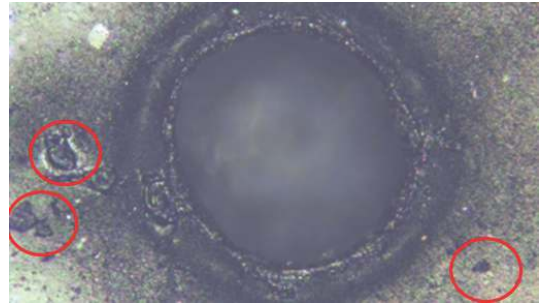


图 7 烧蚀不完全的颗粒物

Fig.7 Particulate matter with incomplete ablation

反应越来越完全, 离化量增大, 因此, 比冲呈现出上升趋势。但是, 当激光脉宽超过临界值之后, 脉宽的增大将对比冲产生负面的影响。这主要是由于沉积的热量已经足够让光斑区域内的工质完全反应并喷射, 脉宽继续增加, 大部分激光能量无法沉积到工质上, 而是透过了基底材料。由于激光光斑呈高斯分布, 因此随着时间的积累, 低功率密度的激光光斑边缘依旧会对工质进行烧蚀和损耗, 此时的反应更多的是汽化甚至是融化, $400 \mu s$ 下激光烧蚀靶坑的剖视图如图 8 所示。这样产生的结果是消耗了更多的燃料, 但是并没有得到预期的高速羽流喷射。脉宽的优化是一个随着工质厚度变化的过程, 不同的工质厚度有一个最佳的脉宽值, 工质越厚, 临界脉宽值越大。

从图 6 可以看出, 随着激光脉宽的增大, 单脉冲冲量逐渐增大, 脉宽从 $150 \mu s$ 增大到 $400 \mu s$ 过程中, 单脉冲冲量从 $4.5 \mu Ns$ 增大到 $10.8 \mu Ns$ 。这主要是由于随着脉宽的增大, 激光与工质作用时间增长, 烧蚀的区域明显增大, 烧蚀掉更多的工质, 因此单脉冲冲量逐渐增大。但是就比冲而言, 存在一个先增大后减

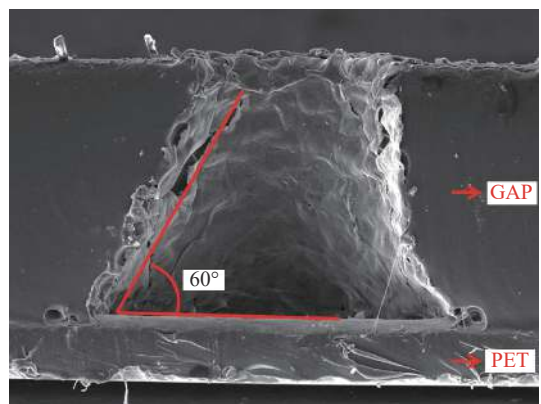


图 8 $400 \mu s$ 脉宽下激光烧蚀靶坑的剖视图

Fig.8 Cross-sectional view of laser ablation target pit with $400 \mu s$ width

小的过程, 在 250 μs 左右时候达到最大值 221.8 s。

激光脉宽对冲量耦合系数和烧蚀效率影响如图 9 所示。

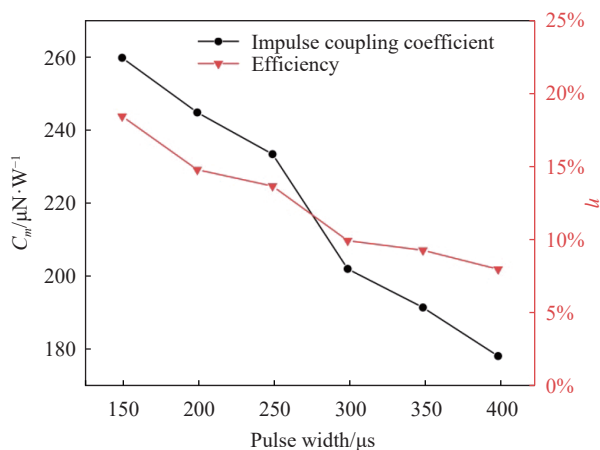


图 9 冲量耦合系数 C_m 和烧蚀效率 η 随激光脉宽变化结果

Fig.9 Result of impulse coupling coefficient C_m and ablation efficiency η varying with laser pulse width

从图 9 中可以看出, 随着脉宽的增加, 冲量耦合系数和烧蚀效率都在逐渐降低。这主要是由于激光器功率相同时, 脉宽增大后, 消耗的能量增加。但是激光单脉冲烧蚀产生的冲量增长速度和消耗能量不成正比, 消耗的电能增长速度大于冲量增大的速度; 另一个原因根据能量守恒定律, 羽流喷射的动量应该等于沉积激光能量与 GAP 释放的化学能的总和。因此, 工质离化或气化喷射离开工质层之后的能量, 即脉宽超过最大比冲的临界值后, 大部分激光透过靶带, 并未沉积到工质上, 造成了能量的极大浪费, 因此冲量耦合系数和烧蚀效率都会随着脉宽增大逐渐降低。

综合激光参数对比冲、冲量耦合系数以及效率的影响, 可以发现, 激光参数对整个推进性能有较大的影响。激光参数对比冲、冲量耦合系数以及效率的影响并非都是线性关系, 几个参数之间是相互制约的关系, 在应用中就需要综合实际的需求来进行衡量和选择。就目前激光器工作能力和工质厚度为 200 μm 的情况而言, 功率密度为 $3.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 脉宽为 250 μs 时, 为综合性能最优工况。

文中采用的小型化、高亮度半导体激光器为工程化的应用奠定了良好的基础。文章得出的最优的激

光参数是基于工质厚度为 200 μm 的条件下得出的。就最优功率密度而言, 无论工质厚度是多少, 功率密度越高, 比冲越高, 力学性能越好。功率密度的增大可能影响的是电功耗的多少, 但是就目前的电功耗而言, 目前半导体激光器的电功耗极低, 以 50 Hz 左右的频率工作时, 功率仅 2 W 左右, 卫星上很小的太阳能电池完全能够满足需求。因此在工程化应用中, 可以适当牺牲冲量耦合系数和效率性能参数, 优先保证比冲参数, 确保总冲最大化, 激光器的功率密度要尽量高。就脉宽而言, 文章得出的最优脉宽 250 μs 是基于 200 μm 厚度工质得出的, 不同厚度的工质对应的最优脉宽必然不同。理论上工质靶带越厚, 最优脉宽应该越大, 但是其在优化过程中必然存在一个非线性变化的最优值, 这个结论具有一定的普适性。在之后的工作中, 将对最优的工质层厚度做出进一步优化, 并且寻找出最优工质层厚度。

3 结 论

文中在透射式烧蚀模式下, 设计了一种小型化、低功耗、高亮度的半导体激光器, 研究了激光功率密度和脉宽对单面冲量、比冲、冲量耦合系数以及效率的影响规律, 得到了在工质层厚度 200 μm 情况下综合性能最优的工况, 为激光推进微推力器的工程化应用提供了参考。

(1) 随着功率密度的增加, 单脉冲冲量逐渐增加, 比冲也逐渐增大。激光的功率密度从 $1.4 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 增大到 $3.58 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 之后, 比冲从 62.5 s 增大到了 108.13 s, 提高约 73%。

(2) 随着激光脉宽的增大, 单脉冲冲量逐渐增大, 脉宽从 150 μs 增大到 400 μs 过程中, 单脉冲冲量从 4.5 μNs 增大到 10.8 μNs 。就对比冲的影响而言, 不同厚度的工质有不同的最优脉宽值。比冲随着脉宽有一个先增大后减小的过程, 在 250 μs 时, 比冲达到最大值, 约为 221.8 s。

(3) 脉宽过大时, 对工质带的烧蚀靶坑具有不良的影响, 使得烧蚀能量浪费严重, 工质发生融化, 而非汽化或者离化。

参考文献:

[1] Liu H J. New concept propulsion technology and its application

- prospects [J]. *Rocket Propulsion*, 2004, 30(4): 36-40. (in Chinese)
- [2] Phipps C R, Luke J R, Helgeson W. Laser space propulsion overview [C]//Proceedings of SPIE, 2007, 6606: 660602.
- [3] Phipps C R, James R L. Micropropulsion using laser ablation [J]. *Appl Phys A*, 2004, 79: 1385-1389.
- [4] Phipps R, Luke J R, Lippert T, et al. Micropropulsion using a laser ablation jet [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(6): 1000-1011.
- [5] Phipps C R, Luke J R. Micro laser plasma thrusters for small satellites[C]//Proceedings of SPIE, 2000, 4065: 801-809.
- [6] Phipps C R, Luke J R, McDuff G, et al. Laser ablation powered mini-thruster[C]//Proceeding of SPIE, High-Power Laser Ablation IV, 2002, 4760: 833-842.
- [7] Phipps C R, Luke J, Helgeson W D, et al. Giant momentum coupling coefficients from nanoscale laser initiated exothermic compounds[C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2005-3607, 2005.
- [8] Myrabo L N. Brief history of the light craft technology demonstrator (LTD) project [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2003, 664(1): 49-60.
- [9] Schall W O, Eckel H, Tegel J, et al. Characterization of the absorption wave produced by CO₂ laser ablation of a solid propellant, EOARD Grant Award No. FA8655-04-1-3067[R]. Stuttgart, Germany: DLR- German Aerospace Center, 2005.
- [10] Cai J. Research on the principle and application of laser micropropulsion[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [11] Zheng Z Y, Zhang J, Hao Z Q, et al. Effects of target configuration on the laser plasma momentum-coupling coefficient [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(1): 326-330. (in Chinese)
- [12] Ye J F, Hong Y J, Li N L. Research on impulse coupling characteristics of liquid working fluid in nanosecond laser ablation [J]. *Infrared And Laser Engineering*, 2015, 44(1): 102-106. (in Chinese)