

# 基于激光微推进技术的靶特性研究

叶继飞<sup>1</sup> 洪延姬<sup>2</sup> 王广宇<sup>1</sup> 王殿恺<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 装备指挥技术学院研究生院, 北京 101416)  
(<sup>2</sup> 装备指挥技术学院基础部, 北京 101416)

**摘要** 介绍了激光微推进技术的靶特性研究情况,探讨了激光微推进技术中的靶特性对力学性能的影响。从靶材结构和靶材掺杂两个方面的特性进行了研究。结果表明,在约束条件下,冲量耦合系数存在一个最优值,烧蚀靶厚度越小,最优冲量耦合系数越大,对应的激光注入能量越小,比冲也越高;掺杂能够增强靶材对激光能量的吸收,使得单位质量产生推力的效率提高,同时也会增强其他能量耗散机制,使得冲量耦合系数降低。

**关键词** 激光技术;激光微推进;靶特性;比冲;冲量耦合系数

**中图分类号** TN249; V439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100521

## Effects of Target Character on Propulsion Performance in Laser Micro Propulsion

Ye Jifei<sup>1</sup> Hong Yanji<sup>2</sup> Wang Guangyu<sup>1</sup> Wang Diankai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Company of Postgraduate Management, Academy of Equipment Command and Technology,  
Beijing 101416, China

<sup>2</sup> Department of Basic Theories, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China

**Abstract** The target characteristic research of micro-laser plasma thruster ( $\mu$ LPT) is introduced, and propulsion performance of different target structures and doped concentrations is discussed. Results indicate that there can be an optimum impulse coupling coefficient for the confined target. The thinner the target is, the bigger the optimum impulse coupling coefficient is, the lower the laser energy is, and the higher the specific impulse is. The absorption of laser energy can be intensified by the doped carbon, ablation efficiency can be enhanced, and there might be still other energy dissipation enhanced, and that can result in the decrease of impulse coupling coefficient.

**Key words** laser technique; laser micro propulsion; target character; specific impulse; impulse coupling coefficient

**OCIS codes** 140.3325; 140.2020; 160.5470

## 1 引 言

激光微烧蚀是激光与靶在微米尺度上发生能量耦合形成烧蚀的过程,这一过程中形成靶物质的喷射,产生作用于靶的力,该现象在激光推进领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。激光微推进的概念由 Phipps 等于 20 世纪末提出<sup>[2]</sup>,他们采用瓦级半导体激光器聚焦于聚合物靶材表面,形成激光微烧蚀,利用产生的推力进行推进。

## 2 靶特性研究进展

2003 年, Phipps 小组<sup>[3]</sup>制作完成第一代毫秒级激光等离子体微推力器,提供推力范围 0.1~10 mN,冲量耦合系数为 500  $\mu$ N/W,比冲为 200 s,重量为 500 g,该款型微推力器为美国军方设计,主要是为小卫星的姿轨控服务。推力器的工作原理及实物图如图 1 和图 2 所示。

激光微推进技术经过十多年的发展,涉及到的

收稿日期: 2011-01-20; 收到修改稿日期: 2011-03-10

作者简介: 叶继飞(1981—),男,博士研究生,主要从事激光微推进技术方面的研究。E-mail: yj1981@163.com

导师简介: 洪延姬(1963—),女,博士生导师,主要从事爆轰物理和先进推进技术等方面的研究。

E-mail: hongyanji@vip.sina.com

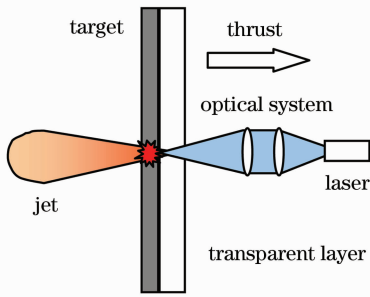


图 1 有透明层约束的激光微推进工作模式  
Fig.1 Sketch of work mode of laser micro propulsion with transmission mode

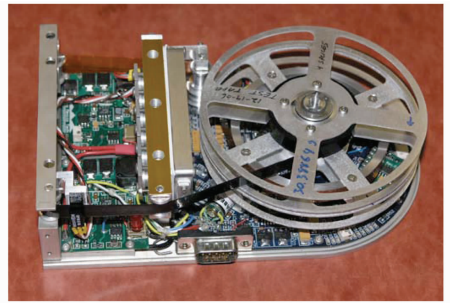


图 2 毫秒级激光等离子体微推力器实物图  
Fig.2 Photograph of ms-micro-laser plasma thruster ( $\mu$ LPT)

研究方向主要有激光功率聚焦技术、靶材烧蚀特性研究和系统集成小型化等多个方面。其中靶材烧蚀特性的研究至关重要。靶材烧蚀特性,即所谓的“靶特性”,主要关注的是激光与靶材的力学耦合特性,激光微烧蚀靶材所形成的力学性能对整个推力器的性能起决定作用。

靶特性主要研究方向有激光微烧蚀材料的选择、靶结构和靶掺杂特性设计等。在早期的研究中,

主要关注靶材料的选择方面,经过大量的筛选实验,取得了以高分子聚合物为烧蚀工质的设计经验。在关注靶材料选择的同时,发现不同靶的结构不同,吸收激光能量的能力不同,所带来的力学性能差异很大。特别关注以固体聚合物制成的有约束特性的复合层靶带和掺杂含能聚合物的激光微烧蚀特性。典型直接烧蚀与约束烧蚀冲量耦合系数实验数据如图 3 所示。

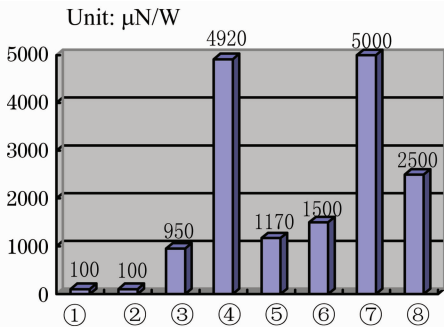


图 3 典型直接烧蚀与约束烧蚀冲量耦合系数

Fig.3 Impulse coupling coefficients of typical direct and confined ablation

从①~③典型的直接烧蚀数据情况来看,含能材料较惰性材料冲量耦合系数要高;④~⑧为约束烧蚀情况,冲量耦合系数都比直接烧蚀惰性材料至少高出 1 个量级;⑦和⑧是水约束烧蚀铝靶的实验结果,冲量耦合系数都比较高,可见水是一种特殊的约束材料;④与⑥是以玻璃作为约束层材料,含能靶材比惰性靶材的冲量耦合系数要高很多;⑤是特殊的层靶设计情况,在保证比冲较高(540 s)的同时,冲量耦合系数也比较高(1170  $\mu\text{N/W}$ ),这是一种烧蚀效率较高的理想靶材。

由此可见,影响激光微推进性能的因素很多,如结构形状、约束层厚度和掺杂特性等。本文以典型双层复合层靶为对象,研究不同烧蚀靶厚度和掺杂浓度对激光微推进性能的影响,为激光微推力器固态靶带的设计提供研究思路和设计参考。

- ① Phipps 1988, nonenergetic material, direct ablation<sup>[4]</sup>;
- ② Uchida 2002, epoxy, direct ablation<sup>[5]</sup>;
- ③ Phipps 1990, celloidin, direct ablation<sup>[6]</sup>;
- ④ Phipps 2000, energetic material/glass, confined ablation<sup>[7]</sup>;
- ⑤ Phipps 2004, GAP/kapton, confined ablation<sup>[8]</sup>;
- ⑥ Uchida 2002, epoxy/glass, confined ablation<sup>[5]</sup>;
- ⑦ Takashi 2003, Al/water film, confined ablation<sup>[9]</sup>;
- ⑧ Zheng 2006, Al/water layer, confined ablation<sup>[10]</sup>

### 3 实验装置

实验中所采用的激光能源和靶材分别是半导体激光器和掺碳的 PVC 聚合物。半导体激光器输出波长 940 nm,最大工作电流 5 A,最大输出功率 2 W。激光器集成聚焦透镜,焦点位置距离出光口 1.5 cm,聚焦光斑直径 100  $\mu\text{m}$ 。PVC 聚合物掺碳浓度可选,颗粒平均粒径 1  $\mu\text{m}$  以下,碳颗粒之间距离在 10  $\mu\text{m}$  左右。图 4 为半导体激光器的实物照片与掺碳 PVC 烧蚀后的靶坑。

在激光烧蚀 PVC 靶材过程中,产生的蒸气或等离子体与靶的耦合特性是激光微推进性能研究的主要问题。用两个关键参数衡量微推进性能:冲量耦合系数和比冲。对于冲量耦合系数和比冲而言,冲量、能量和烧蚀质量的测量是最基本的。



图4 半导体激光器实物与打靶的烧蚀坑照片

Fig. 4 Photograph of diode laser and ablation target

实验过程中,采用扭摆干涉仪测量微冲量,其基本原理是将微冲量转化为扭摆的转动动量,再根据扭摆转动角度的变化规律求得微冲量<sup>[1]</sup>。实验装置如图5所示,激光烧蚀固定在扭摆上的靶材,产生微冲量,并引起扭摆的转动。利用迈克耳孙干涉原理,将扭摆转角的变化转化为激光干涉条纹的位移。干涉光经过渥拉斯顿棱镜分成光强相同、相位相差 $\pi/2$ 的两束光,再由数据采集系统捕捉,测得干涉条纹的移动数目,就可测得横梁的转角。系统测量微冲量精度优于3%。

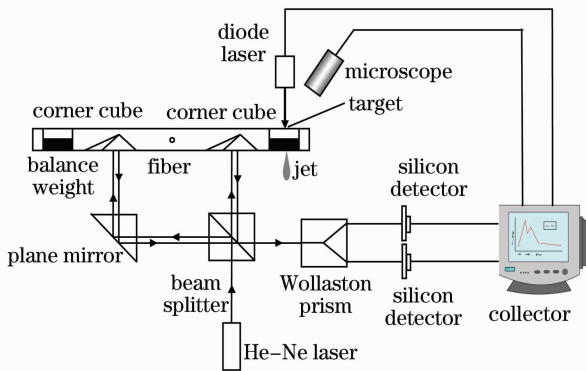


图5 扭摆干涉仪微冲量测量系统装置示意图

Fig. 5 Sketch of experimental setup of torsional pendulum

烧蚀质量的测量采用多次烧蚀称量总烧蚀质量取平均计算单次烧蚀的质量,称量设备采用梅特勒-托利多XS分析天平,测量精度为 $10\ \mu\text{g}$ ,单次烧蚀质量测量的相对误差小于3.5%。能量的测量采用合适量程的能量计。比冲的测量误差小于5%,冲量耦合系数测量误差小于2.6%。测量过程中,将半导体激光器的工作电流设为最大5 A,通过调节脉宽(毫秒量级)改变入射激光能量的大小。靶材制备为透明层和烧蚀层的双层复合结构,透明层选用 $100\ \mu\text{m}$ 厚的玻璃,烧蚀层选择用100, 200和 $300\ \mu\text{m}$ 厚的PVC薄膜,透明层和烧蚀层之间用聚丙烯酸酯粘合剂粘贴在一起,粘合剂厚度约 $20\ \mu\text{m}$ ,靶材大小为 $18\ \text{mm}\times 18\ \text{mm}$ ,重量约 $0.5\ \text{g}$ 。

## 4 靶特性对推进性能的影响

选取 $100\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 两种厚度的PVC靶材,图6给出了冲量耦合系数的测量结果。两种厚度下的冲量耦合系数最大分别为 $148\ \mu\text{N}/\text{W}$ 和 $102\ \mu\text{N}/\text{W}$ 。数据表明,冲量耦合系数随着能量的增加迅速达到峰值,然后下降,图中 $100\ \mu\text{m}$ 的实验结果没有上升段,分析原因是因为其上升段很短,激光能量很小,产生的冲量值太小,超出了测量系统的分辨率。当激光能量刚好足够烧穿靶材时产生冲量,随着能量的增加,烧穿的面积迅速扩大,烧蚀质量增加,冲量值增加,冲量耦合系数提高;当能量进一步增大,烧蚀坑面积增大变慢,脉宽的延长导致热扩散严重,冲量耦合系数下降;能量持续增加,激光能量直接穿过靶坑,冲量不再增加,冲量耦合系数呈指数下降。可见,激光能量的耦合存在一个最优的峰值,当注入激光能量超过该阈值后,能量耦合效率降低,不能进一步转化为有效的冲量。

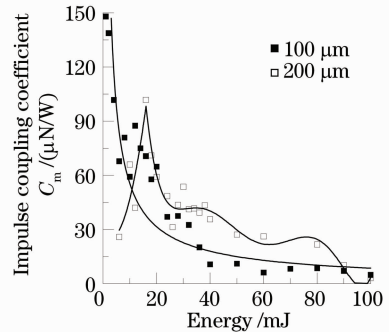


图6 两种厚度靶材的冲量耦合系数测量结果对比

Fig. 6 Impulse coupling coefficient versus energy with different target thicknesses

图7为两种厚度靶材的比冲对比图。从图中可以看出,比冲最高只有 $66\ \text{s}$ , $100\ \mu\text{m}$ 厚度的结果明显高于 $200\ \mu\text{m}$ 厚度的结果。两种厚度下比冲随着激光能量的增加而减小,其主要原因是激光能量增加导致脉宽变长,能量的热扩散加强,造成烧蚀坑周边汽化和液化的质量增加,而这些靶材质量的损失并没有形成冲量,因此造成比冲的下降,脉宽越长比冲越小。与前面提到的同类靶物质的直接烧蚀情况相比,约束条件下获得的比冲要小一些。

掺碳质量分数分别选取1%和2%时,冲量耦合系数的测量结果如图8所示。由图可知,掺碳质量分数较高的PVC具有较低的冲量耦合系数,这一点值得注意,随着掺杂浓度的提高,能量吸收的强度有所增加,但激光能量转化为喷射物质的动能的效率则有所降低,这说明掺杂碳一方面增强了靶材对能量

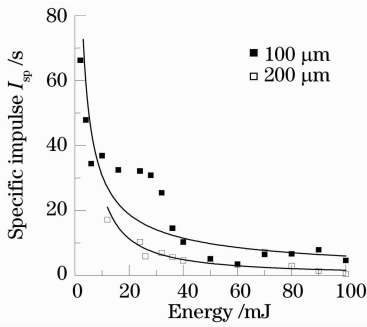


图 7 两种厚度靶材的比冲测量结果对比  
Fig. 7 Specific impulse versus energy with different target thicknesses

的吸收,另一方面也使得一些其他的能量耗散机制有所增强。另外,冲量耦合系数随脉宽的提高近似指数下降,由  $140 \mu\text{N/W}$  左右降到不高于  $5 \mu\text{N/W}$ ,说明在约束打靶的条件下,若要获得较高的冲量耦合系数,须将注入能量设置在较低范围,选择激光脉宽较小,以刚好烧穿靶材为宜,此时对应的能量阈值是最优的能量耦合情况。碳的掺杂浓度应较低,使得激光能量刚好被靶材吸收,而不会透射引起激光能量的浪费。

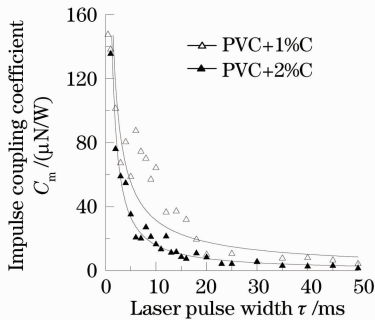


图 8 两种掺杂浓度靶材冲量耦合系数结果对比  
Fig. 8 Impulse coupling coefficient versus laser pulse width with different target doped concentrations

比冲的测量结果如图 9 所示。由图可知,掺碳质量分数较高的 PVC 具有较高的比冲,但比冲随脉宽的提高急剧下降,脉宽增加到 50 ms 时,比冲由 70 s 降低到了几乎为零,其原因是在实验中随着脉宽的增加,由热传导引起的靶材的横向烧蚀变得明显,引起了更多的质量损失,导致比冲的急剧下降。这一方面说明,掺碳浓度高的靶材,对激光能量吸收较强,烧蚀质量利用的效率相对较高,另一方面也说明若要获得高比冲,则应提高掺杂组分,并将脉宽限制在较低范围。

由不同厚度和不同浓度 PVC 靶材的激光烧蚀情况可知,随着激光注入能量的增加,冲量耦合系数和比冲整体上呈下降趋势;冲量耦合系数最高在

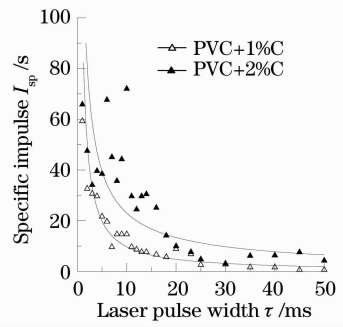


图 9 两种掺杂浓度靶材比冲结果对比  
Fig. 9 Specific impulse versus laser pulse width with different target doped concentrations

$150 \mu\text{N/W}$ ,比冲在几十秒量级;冲量耦合系数存在一个最优阈值,在最优阈值条件下,能量耦合效率最高;厚度较小时,最优冲量耦合系数较大,对应的能量耦合最优阈值较小,此时比冲也较高;掺碳一方面能够增强靶材对能量的吸收,使得单位质量产生推力的效率提高,另一方面会增强其他能量耗散机制,使得冲量耦合系数降低。

## 5 结 论

在激光微推进领域,典型的双层复合结构靶材选择和设计过程中,改变烧蚀层的厚度和掺杂浓度可以显著改变微推进性能。在最优冲量耦合系数情况下,厚度越小推进性能越优;掺杂需要综合考虑冲量耦合系数和比冲的需求,具体参数的选择与设计要参考具体微推进任务而定。

## 参 考 文 献

- 1 C. R. Phipps, M. Birkan, W. Bohn *et al.*. Review: laser-ablation propulsion[J]. *J. Propulsion and Power*, 2010, **26**(4): 609~637
- 2 J. R. Luke, C. R. Phipps. Laser plasma thruster continuous thrust experiment[C]. *SPIE*, 2002, **4760**: 843~851
- 3 C. R. Phipps. Description of the Photonic Associates "LPT" Thruster [OL]. <http://photonicassociates.com/LPT.pdf>, 2003
- 4 C. R. Phipps, T. P. Turner, R. F. Harrison *et al.*. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO<sub>2</sub> single-pulse lasers[J]. *Appl. Phys.*, 1988, **64**(3): 1083~1096
- 5 Shigeaki Uchida, Kazuhisa Hashimoto, Kazuhisa Fujita *et al.*. Comparison of Surface and Internal Laser Irradiation of Solid Propellant for Propulsion[R]. AIAA, 2002, 2002-2155
- 6 C. R. Phipps, R. F. Harrison, T. Shimada *et al.*. Enhanced vacuum laser-impulse coupling by volume absorption at infrared wavelengths[J]. *Laser and Particle Beam*, 1990, **8**(1-2): 281~298
- 7 C. R. Phipps, B. S. Daniel, R. Robert *et al.*. Very high coupling coefficients at low laser fluence with a structured target [C]. *SPIE*, 2000, **4065**: 931~938
- 8 C. R. Phipps, J. Luke, T. Lippert. Laser ablation of organic coatings as a basis for micropropulsion[J]. *Thin Solid Films*, 2004, **453-454**: 573~583
- 9 Y. Takashi, R. P. Claude, Y. Masashi *et al.*. Microairplane propelled by laser driven exotic target[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(23): 4318~4320
- 10 Zheng Zhiyuan, Zhang Jie, Hao Huiying *et al.*. Coupling coefficient enhanced by prepulse in laser plasma propulsion[J]. *Optoelectronics Letters*, 2006, **2**(6): 477~479