

两种激光烧蚀微推力器工作模式的讨论

叶继飞, 李南雷, 常浩

(装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 激光烧蚀微推力器技术是激光推进技术最有可能率先实现工程应用的技术研究方向。作为一种新型的空间推进领域电推进推力器技术, 以其系统集成度较高、电功耗较低、冲量元精准等优势特性, 在推进性能和系统集成等方面形成鲜明的特色, 对于多种空间推进任务具备潜在的应用价值。以激光烧蚀微推力器发展历程为背景, 总结提炼当前推力器技术发展趋势, 提出了激光烧蚀微推力器目前最具研究价值的两种工作模式, 分别对高低比冲两种不同工作模式进行了性能分析和比对, 对激光烧蚀微推力器应用前景进行了展望, 最后给出了进一步研究的建议。

关键词: 激光推进; 推力器; 冲量耦合; 激光烧蚀微推力器

中图分类号: V439-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2017)05-0007-07

Discussion on two kinds of working modes of laser ablation micro-thruster

YE Jifei, LI Nanlei, CHANG Hao

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: The laser ablation micro-thruster technology is one of the most promising technologies to realize the engineering application of laser propulsion technology. As a new kind of electric propulsion thruster technology in the field of space propulsion, it has high degree of system integration, low power consumption, precision impulse element and other characteristics, forms a vivid feature in the aspects of propulsion performance and system integration, and possesses a potential application value for a variety of space missions. In this paper, the development trend of laser ablation micro-thruster technology is summarized by taking development history of laser ablation micro-thruster as the background, two working modes of the laser ablation micro-thruster, which have highest research value at present, are put forward, and the performances of the two working modes with high specific impulse and low specific impulse are analyzed respectively. Application prospect of the laser ablation micro-thruster is prospected. Finally, some suggestions for further research are given.

Keywords: laser propulsion; thruster; impulse coupling; laser ablation micro-thruster

收稿日期: 2016-11-07; 修回日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金 (11602304)

作者简介: 叶继飞 (1981—), 男, 博士, 副研究员, 研究领域为激光推进技术

0 引言

经过近 50 年的发展,激光推进技术做为一种新概念航空宇航推进技术,在理论论证、实验演示和数值模拟等方面都取得了令人瞩目的进展。随着激光器技术的发展和激光推进技术研究的不断深入,激光推进技术在实际工程领域内的应用逐渐展现在世人面前。2003 年,美国 Photonic Associates (PA) 的 Phipps 小组经过 5 年多的探索和试验,研制了一款用于美国空军 Tech-Sat21 型试验卫星搭载的姿轨控激光烧蚀微推力器。激光推进技术首次应用于实践^[1]。

在激光推进技术的整个发展过程中,激光烧蚀微推力器技术一直是重要的探索方向。尤其在激光技术当前的技术状态下,激光器的功率水平、激光远距离传输等技术瓶颈使应用于空间推进的激光烧蚀微推力器推进技术成为当前历史阶段众多激光推进应用技术中最接近现实的应用方向。美国 Phipps 小组所研制的就是一款毫秒量级脉宽激光烧蚀含能聚合物材料微推力器 (micro-Laser Plasma Thruster, LPT)。2009 年,日本尝试在一款温室气体观测微小卫星上搭载激光烧蚀微推力器,尽管试验没有获得测试结果,但为激光烧蚀微推力器的应用做出了重要的探索^[2]。

激光烧蚀微推力器技术发展到今天,领域内专家和学者对该技术进行了多角度的探讨和研究,总结了如透射式和反射式、靶带式 and 磁盘式、连续式和脉冲式等多种模式的推力器工作机制^[3],而其中很多问题已经有了比较明确的结论^[4],结合能够用于空间平台激光器性能水平来看,当前最值得关注的是由高峰值功率纳秒脉宽激光烧蚀形成的较高比冲和较小推力模式,以及由较低峰值功率毫秒脉宽激光烧蚀形成的较低比冲和较大推力模式,这两种模式是与推力器推进性能最相关的工作模式分类方法,也是与具体应用的航天任务类型对应最明确的应用模式区分方式,因此,对于这两种工作模式的探讨和深入研究显得十分必要。

1 激光烧蚀微推力器发展历程及趋势

激光烧蚀推进技术属于激光推进技术中“烧

蚀模式”的一种,是利用激光与物质相互作用机理进行工作的,以激光烧蚀为特征的。在激光烧蚀工质整个过程中,主要的物理过程有工质的受热升温、熔融气化、激光强度足够强时产生等离子体,以及高温气体或等离子体高速喷射产生推力等阶段。用于空间推进的激光烧蚀微推力器技术与其他激光烧蚀推进方式相比,最本质的区别在于:整个物理过程发生在微小尺度上,也即所谓的“微烧蚀”过程。这里所谓“微”是指:激光聚焦光斑尺寸小 ($10\ \mu\text{m}$ 量级)、工质厚度薄 ($10\ \mu\text{m}$ 量级)、单脉冲烧蚀质量小 (μg 量级)、单脉冲冲量小 (最小冲量元可以达到 $\text{nN}\cdot\text{s}$ 量级)。因此,应用于空间推进的激光烧蚀微推力器在推进性能方面最显著的特点是:单脉冲烧蚀产生微小喷射形成的冲量小,即冲量元小,最小冲量元 (MIB) 可以达到 $\text{nN}\cdot\text{s}$ 量级。具体来讲,空间推进用的激光烧蚀微推力器,需要利用体积和重量较小的激光器做为能量源,将激光整形聚焦于工质表面,通过激光与物质的相互作用,形成微小的烧蚀产物喷射,实现冲量耦合,产生推力。

典型的激光烧蚀微推力器包括三部分:工质供给功能模块、激光器功能模块和控制模块。集成了工质存储、供给开关、出口量反馈、激光聚焦调节机构、激光器及其控制器、通信与控制板卡、供电与信号接口等器件,如图 1 所示。激光器发出的激光经由透镜聚焦,以设定工作频率重复出光烧蚀工质。工质储存接收控制指令提供工质,激光与工质相互作用形成喷射产生推力。出口量反馈的功能是:当工质量足够时,送控制信号给控制板卡,由控制板卡转换信号发送供给开关关闭的命令;当工质量不够时,供给开关处于打开状态,工质持续供给,循环往复形成工质的持续供给,与激光相互作用形成连续推力。

在激光烧蚀微推力器技术领域内,美国人走在了世界前列。其中,最为突出的贡献当数 Phipps 小组,其研究历时最久,成果也最具代表性,比较系统的验证了激光烧蚀微推力器技术的研究潜力及其应用的可行性。国际上与 Phipps 小组合作的还有瑞士的 Lippert 小组^[5]、美国的 Sin-

ko 等人^[6], 以及德国航空宇航中心 (DLR)^[7]。特别地, 根据最近举行的业内权威国际束能会议情况来看, 德国航空宇航中心非常重视激光烧蚀微推力器技术的研究, 成立了专门的激光烧蚀推进研究中心, 激光烧蚀微推力器技术越来越受到国际同行的重视。

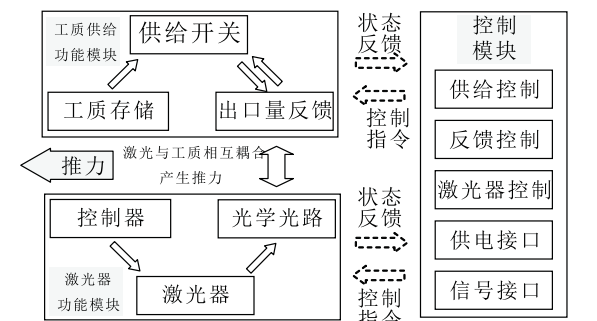


图 1 激光烧蚀微推力器原理结构图

Fig. 1 Principle structure diagram of laser ablation micro-thruster

激光烧蚀微推力器的想法最先由美国人 Claude Phipps 于 20 世纪末提出, 并在美国 Techsat-21 计划支持下开展了激光烧蚀微推力器的研制工作。直至今日, Phipps 小组的激光等离子体微推力器 (micro-Laser Plasma Thruster, μ LPT) 的研究工作从未间断过, 分别经历了预样机、桌面系统、原理样机、毫米脉宽激光等离子体微推力器 (ms μ LPT)、纳秒脉宽激光等离子体微推力器 (ns μ LPT), 以及最近一直探讨的新型激光动力发动机的概念。从推进性能的数据来看, 如表 1 所示, Phipps 小组提出的激光烧蚀微推力器性能有两种主要的工作模式: 低比冲大推力模式和高比冲小推力模式。2006 年以前所研究的主要是采用半导体单管激光器作为能量源, 以毫秒脉宽瓦量级功率激光注入, 获得的比冲通常较低, 一般不高于 200 s, 冲量耦合系数较大, 典型的在百微牛每瓦量级, 最高可达 2 000 μ N/W 以上, 即所谓的低比冲大推力模式。2006 年以后提出的是一种以纳秒脉宽峰值功率万瓦量级以上脉冲激光为能量源, 获得的比冲较高, 通常在 1 000 s 以上, 冲量耦合系数较低, 通常在十微牛每瓦量级, 一般不超过 100 μ N/W, 即所谓的高比冲小推力模式。这样两种工作模式的推力器性能, 有

较大差异, 工程应用完全不同。对于典型的空间推进平台而言, 最大电功耗以 1 000 W 计算, 复合激光器的能量转换效率及能够获得的推力水平大推力模式可达 1 N 以上, 小推力模式推力最大 10 mN。冲量元范围通常为 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}$ (低比冲大推力模式) 或 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{s}$ (高比冲小推力模式)。因此, 激光烧蚀微推力器是一种能够至少提供 $\mu\text{N} \cdot \text{s}$ 量级冲量元, 高比冲模式下比冲可达 1 000 s 以上, 大推力模式下平均推力最大可达 1 N 以上的电推力器。

表 1 美国 Phipps 小组提出的两种不同模式的激光烧蚀微推力器性能^[8]

Tab. 1 Parameters of laser ablation micro-thrusters with two different modes proposed by US Phipps group^[8]

性能参数	指标数值	
峰值功率/W	670	1 M
平均功率/W	1.2 k	1.8 k
激光脉宽	1 ms	10 ns
脉冲频率/Hz	100	10 k
I_{sp}/s	116	3 660
冲量耦合系数 $C_m/(\mu\text{N}/\text{W})$	2 200	19
推力/ μN	6.48E6 (3 kW) 5.7E4 (3 kW)	

2 典型的两种工作模式

2.1 低比冲大推力模式

低比冲大推力模式通常以固体复合材料或聚合物工质为推进剂, 毫秒脉宽激光器为能量源, 采用透射式的工作方式, 即激光烧蚀工质所形成的喷射与入射激光在工质靶带的两侧^[9]。可用于空间平台的毫秒脉宽的小型激光器, 目前最为成熟的考虑是半导体激光器。半导体激光器体积小、重量轻、电光转换效率高、环境适应能力强, 是一种适合于激光烧蚀微推力器需求的激光能量源。半导体激光器出光可以是自由光或光纤耦合输出, 自由光半导体激光器的光束质量较差, 通常需要光学系统进行整形聚焦, 才能形成较高的功率密度。光纤耦合输出半导体激光器可

以根据光纤输出的数值孔径设计聚焦系统,而且对于瓦量级的能量输出而言,光纤的本身特性不会限制激光器能量的传输和废热的耗散。典型的激光烧蚀微推力器中以脉冲方式工作的半导体激光器性能参数如表 2 所示。

表 2 半导体激光器性能参数

Tab. 2 Performance parameters of semiconductor laser

性能参数	参数值
脉宽/ms	2
脉冲能量/mJ	10
工作频率/Hz	< 100
峰值功率/W	5 (最大 10)
平均出光功率/W	< 1

所谓的脉冲方式工作是以连续输出的激光,通过斩宽方式实现的,典型的脉宽在毫秒量级,脉宽内的峰值光功率与连续输出时一致,总的平均出光功率通过工作频率和脉宽来调节。对于脉宽来讲,直接影响激光注入能量的大小,也就决定了冲量耦合的效率,根据文献和现有研究情况来看,存在一个特定的脉宽对应着冲量耦合的最优值^[10],所需要设计的工况要综合考虑脉宽所对应的冲量耦合性能及所注入的能量大小,而一般设计工况都对应在最优冲量耦合条件附近,激光输出的脉宽一般情况下是最优耦合对应的脉宽值。所以,半导体激光烧蚀微推力器的工作方式是通过改变工作频率和激光输出功率大小来实现推力调节的。目前,单管小型半导体激光器出光功率一般在 5 ~ 10 W (典型的取 5 W 做估算),对应冲量耦合最优的脉宽一般为 2 ms,单脉冲能量 10 mJ,以冲量耦合系数 1000 $\mu\text{N}/\text{W}$ 计算,工作频率最高 100 Hz (占空比 0.2),平均出光功率最高为 1 W,平均推力最大可达 1 mN。如果采用更大功率的激光器,平均光功率需要达到 1 000 W,推力水平才能进入牛量级。半导体激光器工作时,没有最低频率限制,理论上,平均推力没有下限。在这种低比冲大推力模式下,毫秒脉宽激光烧蚀微推力器的性能估计参数如表 3 所示。

典型设计状态下,半导体激光器出光功率选在 5 W 时,设计聚焦光斑面积在 500 μm^2 以下,功率能够达到 $10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ 以上,可以保证足够的功率密度以实现高效的烧蚀;出光功率提高到 10 W 时,可以考虑聚光光斑面积为 1 000 μm^2 ,这也是一般情况下聚焦光斑面积设计的参考依据。

表 3 毫秒脉宽半导体激光烧蚀微推力器性能估计

Tab. 3 Performance estimation of ms-semiconductor laser ablation micro-thruster

性能参数	典型值	极限值
单脉冲能量	10 mJ	10 J
工作频率/Hz	< 100	< 100
平均光功率/W	1	1 000
估计冲量耦合系数/($\mu\text{N}/\text{W}$)	< 1 000	< 1 000
单脉冲冲量/($\text{N} \cdot \text{s}$)	< 10^{-5}	< 10^{-2}
平均推力	< 1 mN	< 1 N

2.2 高比冲小推力模式

高比冲小推力模式通常以金属或含能工质为推进剂,纳秒脉宽激光器为能量源,采用反射式的工作方式,即激光烧蚀工质所形成的喷射与入射激光在工质靶面的同侧^[9]。适合于空间推进平台的纳秒脉宽激光器的选型,目前有三种方案:微片激光器、光纤激光器和 YAG 激光器,如表 4 所示。

表 4 纳秒脉宽激光器性能参数

Tab. 4 Performance parameters of ns-laser

性能参数	微片激光器	光纤激光器	小型 YAG 激光器
脉宽/ns	2.5	3	3
脉冲能量	10 μJ	< 100 μJ	80 mJ
工作频率/Hz	1 ~ 10 k	25 ~ 250 k	30
峰值功率/W	> 10 k	> 17 k	> 10^8
平均出光功率/W	< 0.1	2.5	2.4
工作电压/V	5	5	24
功耗/W	6 (1 Hz) 15 (10 kHz)	25	260

对于微片激光器而言, 单脉冲能量较小, 整体激光器电功耗较小, 适合微小空间平台低功耗情况应用。单脉冲激光能量不变, 通过改变工作频率, 可以调节出光功率。这种情况下, 冲量耦合特性不变, 是一种冲量元一定, 改变工作频率调节推力的工作方式。单脉冲能量 10 μJ , 以冲量耦合系数 100 $\mu\text{N/W}$ 计算, 工作频率最高 10 kHz 情况下, 平均光功率最高可达 0.1 W, 平均推力最大可达 10 μN ; 当工作频率下限 1 Hz 情况下, 平均光功率最小为 10 μW , 对应的最小平均推力为 1 nN。

对于光纤激光器而言, 单脉冲能量相对较大, 整体电功耗可控, 适合有一定推力要求的小型空间平台推进系统应用。总的出光功率不变, 改变工作频率, 单脉冲能量随之调节。这种情况

下, 冲量耦合特性会随着脉冲能量的变化而改变, 是一种光功率一定, 改变工作频率, 调整冲量耦合特性来改变推力的工作方式。总的出光功率 2.5 W, 此时冲量耦合系数以 10 ~ 100 $\mu\text{N/W}$ 估计, 推力能够获得 25 ~ 250 μN 的调节范围。

对于 YAG 激光器而言, 单脉冲能量最大, 整体电功耗较高, 适合高比冲的电推进空间推进系统应用。单脉冲脉冲能量不变, 重复频率不变, 此时可通过调节激光聚焦程度, 来实现脉冲冲量大小的调整, 也即实现推力水平的变换。总的出光功率与光纤激光器接近, 冲量耦合系数以 10 ~ 100 $\mu\text{N/W}$ 估计, 可获得 24 ~ 240 μN 的推力调节范围, 而单脉冲冲量则可达到 $10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s}$ 量级。

纳秒脉宽激光烧蚀微推力器的性能估计参数如表 5 所示。

表 5 纳秒脉宽激光烧蚀微推力器性能估计

Tab. 5 Performance estimation of ns-laser ablation micro-thruster

性能参数	微片激光器		光纤激光器		YAG 激光器	极限值
单脉冲能量/ μJ	10		10	100	80 000	
工作频率/Hz	1	10 k	250 k	25 k	30	
出光功率/W	10 μ	0.1	2.5		2.4	
估计冲量耦合系数/($\mu\text{N/W}$)	100		100		100	1 000
单脉冲冲量/($\text{N} \cdot \text{s}$)	10^{-9}		10^{-9}	10^{-8}	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-4}$
平均推力/ μN	0.001	10	250		240	2 400

特殊情况下, 对于 YAG 激光器而言, 采用液态聚合物类的含能工质比冲能够保持在 500 s 左右, 冲量耦合系数则可提升至接近 1 000 $\mu\text{N/W}$, 此时烧蚀效率达到 250% (据文献报道, 此类极端情况下烧蚀效率可达 360%^[11]), 其推力水平可达 2.4 mN。而另外两种激光器推力水平提升空间不大。

3 应用前景

两种不同的工作模式可应用的空间任务不尽相同。对于低比冲大推力模式, 推力可以达到数百毫牛至数牛, 比冲可达 200 s 以上, 适合于 GEO 卫星、探测器等的慢速轨道转移和机动; 高

比冲小推力模式, 比冲可以达到 2 000 s 以上, 推力可进入毫牛量级, 适合于 GEO 卫星、探测器等的轨道、姿态及位置保持等空间推进任务。通常情况下, 比冲与推力成反比。对于给定的飞行任务, 通过调节推力, 可以改变比冲。在低比冲大推力模式下可以提高航天器飞行加速度, 使其短时间飞行状态变化; 而高比冲小推力模式, 可适用于推进剂消耗量有限的场合。可以通过比冲和推力的优化, 来适应航天器飞行任务。

总结起来, 激光烧蚀微推力器适用的空间推进任务有如下几个方面:

1) 大推力模式下, 推力调节范围大, 能够以脉冲方式工作, 推力控制精度高, 能有效提高

航天器的控制精度, 增强航天器的机动能力, 与重复频率调整相互配合, 可以实现最优的轨道控制策略, 使得完成相同的空间任务所需的推进剂质量最少。

2) 高比冲模式下, 脉冲冲量元小, 冲量控制精度较高, 推力水平能稳定控制, 可持续提供高精度脉冲冲量, 以较低的电功耗, 消耗较低的推进剂质量, 完成轨道维持、位置保持、低轨道卫星大气阻力补偿和各种扰动补偿等航天任务。

3) 提供亚微牛秒级精准脉冲冲量的应用场所。脉冲冲量可实现 2 个量级的大动态范围调整, 重复频率可做最高到 kHz 量级的大幅度调整, 能够为重力场测量卫星及微小卫星星座和编队飞行提供精确冲量控制。

另外, 激光烧蚀微推力器还具有推进剂无毒、性能稳定、适应性强、结构简单、死重较低、功能丰富, 以及成本低廉等显著特点。激光推力器预期能够胜任的空间任务列表如表 6 所示。

表 6 激光烧蚀微推力器预期能够应用的航天任务

Tab. 6 Space missions of expectantly applying laser ablation thruster

航天任务类型	推进任务类型	激光烧蚀微推力器应用优势
大型 LEO/MEO 编队通信任务	动量轮卸载	大推力模式
	轨道保持	推力大范围可调
LEO 光学/红外遥感任务	动量轮卸载	高推力密度
	轨道保持	最优轨道控制
LEO 对地侦查	姿态控制	高比冲模式
	阻力补偿控制	最小冲量元小
	连续可调微推力	推力精准可调可控
GEO 卫星	轨道转移	长时间工作
	姿态控制	更省的燃料消耗
	位置保持	
微小卫星编队组网	姿态控制	精准脉冲冲量
	轨道保持	高集成度
	轨道转移	高稳定度
		更高的控制精度

4 结束语

通过回顾和总结激光烧蚀微推力器研究历程, 提出两种激光烧蚀微推力器工作模式, 并对其性能进行估计和对比, 并结合可能应用的航天任务分析可知: 对于低比冲大推力模式, 应尽可能提高激光器性能, 实现更高集成度, 更低的电功耗, 尽可能提高平均出光功率, 向所估计的极限状态 1 000 W 电功率出牛量级推力努力; 对于高比冲小推力模式, 应尽可能改善工质推进剂性能, 进而改进推进性能, 尽可能提高冲量耦合

系数, 向所估计的极限状态 1 000 $\mu\text{N}/\text{W}$ 的冲量耦合系数努力, 使其高比冲模式下推力水平能够进入毫牛量级。针对目前的实际水平, 在微小卫星等低功耗小型化的应用场合中是非常可能实现应用的。此时, 激光烧蚀微推力器需要提供至少 200 s 以上的比冲, 最小冲量元需达 0.1 $\mu\text{N} \cdot \text{s}$ 以下, 如果需要推力水平尽可能高的情况, 则要能够提供的推力在百微牛量级。

具有高低比冲不同的两种工作模式的激光烧蚀微推力器, 其特点综合了双模式推进技术、电推进技术和束能新概念推进技术多种技术优势,

并且仅需要最高百瓦量级以下的空间平台电能,即能获得一个量级的比冲变化和跨三个量级的推力动态范围,既具有传统化学、冷气推力器的大推力特点,又具有电推进系统高比冲的特点,同时能够提供最小可低于 $0.1\ \mu\text{N}\cdot\text{s}$ 的高精度脉冲冲量,可以应用于大推力、短时间获得速度增量的航天器变轨相关任务,也可以用于高比冲、长时间以较小消耗进行航天器巡航飞行阶段的维持和保持任务,并且还能够提供微小的精准脉冲冲量,满足大型空间平台高精度、高稳定性的控制需求。

参考文献:

- [1] CLAUDE R P. Description of the photonic associates“LPT” thruster [R]. [S. l.]: Photonic Associates, 2003.
- [2] NAKANO M, ISHIKAWA T, WAKABAYASHI R. Laser propulsion technology on “KKS-1” microsatellite [J]. Review of laser engineering, 2011, 39(1): 34-40.
- [3] CLAUDE R P. Laser ablation and its applications [M]. [S. l.]: Springer-Verlag, 2007.
- [4] 洪延姬,王广宇,窦志国. 激光烧蚀微推力器研究进展 [J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1555-1565.
- [5] CLAUDE R P, JAMES R L, THOMAS L, et al. Micro-propulsion using a laser ablation jet [J]. Journal of propulsion and power, 2004, 20(6): 1000-1011.
- [6] CLAUDE R P, BIRKAN M, BOHN W, et al. Review: laser-ablation propulsion [J]. Journal of propulsion and power, 2010, 26(4): 609-637.
- [7] STEFAN S, SINKO J E, KARG S, et al. Review on Japanese-German-U. S. cooperation on laser-ablation propulsion [C]// Proceedings of Seventh International Symposium on Beamed Energy Propulsion. [S. l.]: [s. n.], 2011: 47-61.
- [8] CLAUDE R P, JAMES R L. Liquid-fueled, laser-powered, N-class thrust space engine with variable specific impulse [C]// Proceedings of Fifth International Symposium on Beamed Energy Propulsion. [S. l.]: [s. n.], 2008: 222-231.
- [9] CLAUDE R P, JAMES R L. Advantages of a ns-pulse micro-laser plasma thruster [C]// Proceedings of First International Symposium on Beamed Energy Propulsion, 2003: 230-239.
- [10] CLAUDE R P, LUKE J R, LIPPERT T, et al. Micro-propulsion using a laser ablation jet [J]. Journal of propulsion and power, 2004, 20(6): 1000-1011.
- [11] LIPPERTT, DAVID C, HAUER M, et al. Novel applications for laser ablation of photopolymers [J]. Applied surface science, 2002(186): 14-23.

(编辑:陈红霞)