

激光等离子体微推进技术的研究进展

叶继飞¹, 洪延姬², 王广宇¹, 李南雷¹

(1. 装备指挥技术学院 研究生院 北京 101416; 2. 装备指挥技术学院 基础部 北京 101416)

摘要: 为了加快激光等离子体微推进技术(μ LPP)在航天领域的应用,介绍了该项技术近10年的发展状况。讨论了激光等离子体微推进技术发展过程中衍生出的各种工作模式,并简要分析了不同工作模式的优缺点。着重介绍了靶特性对激光微推进性能的影响,包括靶材的选择、靶的结构、靶材掺杂,以及靶物相特性等。针对该项技术的最终发展目标是研制微小卫星姿轨控的激光等离子体微推力器(μ LPT),介绍并分析了美国 Phipps 小组开展的激光微推力器的研制工作。最后,指出了激光等离子体微推进技术目前存在的一些问题,并展望了它的发展前景。

关键词: 激光等离子体微推进;工作模式;靶特性

中图分类号: TN249; V448.2 **文献标识码:** A

Research progress in micro-laser plasma propulsion

YE Ji-fei¹, HONG Yan-ji¹, WANG Guang-yu², LI Nan-lei²

(1. *Company of Postgraduate Management, Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China;*

2. *Department of Basic Theories, Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)*

Abstract: To achieve the applications of micro-Laser Plasma Propulsion(μ LPP) to aerospace fields, the development of the μ LPP technologies during 10 years was introduced. The different working modes for the μ LPP were discussed and their advantages and disadvantages were analyzed briefly. The effects of laser micro ablation of a target on μ LPP properties were also introduced, which involves the state of target, structure of target, doped target, and the liquid target. For the purpose of the micro satellite orbit and posture control, the micro-Laser Plasma Thrusters(μ LPTs) developed by Phipps group in America were analyzed. Finally, the shortcomings in the research were pointed out and the further development of μ LPP technology was given.

Key words: micro-laser plasma propulsion; work mode; target character

1 引言

自激光推进概念诞生以来,激光推进技术从概念到实现,从理论到应用,从模型到产品,不断地经历着一次次新的变革。伴随着激光推进技术的不断发展,激光推进的应用领域也不断扩展:从最初的发射入轨的设想,延伸到空间领域的清除碎片,卫星轨道转移、姿态控制,以及近空间的推进任务等等^[1]。其中,激光等离子体微推进技术作为微小卫星姿轨控的应用技术,倍受业内人士关注。在激光技术蓬勃发展的今天,激光器的功率水平、激光远距离传输等仍存在技术瓶颈,这使得激光等离子体微推进技术在当前阶段成为众多激光推进应用技术中比较现实的应用之一^[2]。美国 Photonic Associates (PA) 的 Phipps 小组研制了一款激光等离子体微推力器 (micro-Laser Plasma Thruster, μ LPT), 该推力器采用瓦级半导体、ms 量级脉宽烧蚀固体工质靶带,用于美国空军 TechSat21 型卫星的姿轨控任务^[3]。激光等离子体微推进技术首次应用于实践^[4]使美国人在激光微推进技术领域走在世界前列。而 Phipps 等人的成果也证明了激光等离子体微推进技术的研究潜力及其应用的可行性。

2 工作模式

激光等离子体微推进技术属于激光推进技术中的烧蚀模式^[5],是利用激光与物质在百微米尺度上的相互作用烧蚀机理进行工作。在激光烧蚀靶材整个过程中,主要的物理过程有靶材的受热升温、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。激光等离子体微推进技术的显著特点是:单脉冲烧蚀产生微小喷射形成的冲量小,即冲量比特小,最小冲量比特 (MIB) 可以达到 $nN \cdot s$ 量级。另外,激光等离子体微推进技术相比其他微推进技术而言,还具有比冲高、冲量调节范围大、污染小、推力器结构简单、重量轻等特点^[6]。

具体来讲,激光等离子体微推进技术利用半

导体激光器或其他结构紧凑、重量轻的激光器作为能量源,将激光整形聚焦于工质靶表面,通过微烧蚀过程,形成靶物质喷射,实现冲量耦合,产生推力。根据激光器与工质靶的性能与状态的不同,总结目前相关研究和报道,可以将激光微推进的工作模式从如下 5 个角度进行区分^[7]。

(1) 激光器工作模式不同:连续式和脉冲式

激光器通常有两种工作模式:连续模式和脉冲模式。2002 年, Phipps 小组报道采用连续输出的半导体激光器烧蚀固体工质靶^[8],喷射物质持续稳定,烧蚀喷射羽流与运动的横向速度叠加,形成稳定的喷射角度。脉冲式是实验室条件下静态实验的主要工作模式,微推力器采用脉冲式工作模式最接近实验室条件下的测量结果,另外,脉冲方式工作使得激光能量利用率高,能够形成更好的推进性能参数,脉冲之间的空时间有利于激光器的散热^[9]。

(2) 激光脉冲长短不同:ms 长脉宽和 ns 短脉宽

根据脉冲的长短来区分工作模式是因为在不同脉宽的激光烧蚀情况下,烧蚀推进性能截然不同。ns 短脉宽激光烧蚀材料的比冲通常比较高,可达几千秒甚至上万秒,ms 长脉宽激光烧蚀材料的比冲一般仅为几百秒^[10]。相应地,ms 长脉宽激光烧蚀材料的冲量耦合系数可达几十甚至上百 dyn/W ,而 ns 短脉宽激光烧蚀材料的冲量耦合系数通常在 $1.0 \times 10^{-4} \text{ N/W}$ 以下^[11]。

(3) 固体靶结构不同:透射式和反射式

这是一种在激光烧蚀固体靶带情况下典型的分类方式,是以工质靶结构不同进行区分的。图 1 为反射式工作模式,物质的喷射与激光组件在靶同侧,激光直接烧蚀靶材产生喷射;在透射式工作模式情况下,物质的喷射与激光组件在靶异侧,激光穿过一层透明基底烧蚀工质层,使工质层在透明基底的约束下产生喷射。反射式工作模式的主要缺点是污染问题,烧蚀产物向激光组件一侧喷射,可能在光学器件上形成沉积,污染光学镜头,使推力器推进性能,乃至寿命受到影响。透射式工作模式有透明基底的保护,光学镜头不易受污染,但是,基底材料是不参与烧蚀的死质量,推

进性能的可扩展空间受到一定限制。因此,在应用过程中,需要考虑任务中的具体需求,权衡模式的利弊,选择合理的工作方式。

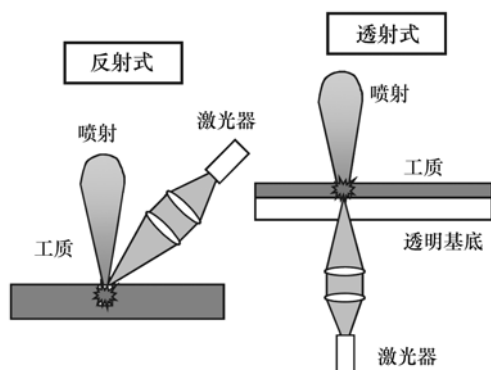


图1 反射式与透射式工作模式示意图

Fig. 1 Sketches of reflection and transmission modes

(4) 工质物相不同:液体工质和固体工质

按照工质物相的状态可以区分为固体工质和液体工质工作模式,而对于气体用作微烧蚀推进工质的情况,尚无相关报道。两种物相工作模式的主要区别在于供靶方式的不同。

固体工质易于加工,可制作成线状靶和面状靶。供靶方式又可区分为靶带缠绕式、线状缠绕式,以及靶片磁盘式。如图2所示,Phippis小组ms- μ LPT产品采用是固体靶带缠绕式工作模式。液体工质的工作模式较为简单,常用的就是挤压方式,将一定流量的液体工质压出并完全烧蚀掉,再进行下一次供靶^[10]。

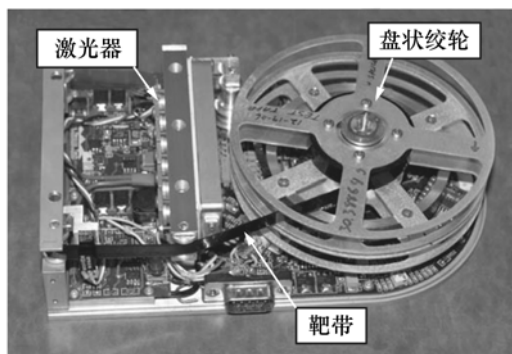


图2 ms- μ LPT产品内部实物图

Fig. 2 Photo of ms- μ LPT

(5) 工质是否含能:点火模式和烧蚀模式

点火模式所采用的工质是含能的,激光烧蚀含能工质,通过化学反应释放工质能量产生喷射形成推力。烧蚀模式是指激光烧蚀惰性材料,靠沉积的激光能量烧蚀工质产生推力。点火模式与烧蚀模式的最主要的区别是指推力的产生是否主要依靠工质被激光烧蚀产生的化学能。从推进性能来看,点火模式能有效提高推力,进一步提高冲量耦合系数,但比冲较低。烧蚀模式具有较小的冲量比特和较高的比冲。两种模式各有特点,互为补充。

3 靶特性对推进性能的影响

激光等离子体微推进技术的发展是以新的工作模式所产生的新的烧蚀推进性能为推动力的。激光器工作方式与工质特性的配合,产生新的烧蚀推进性能是激光等离子体微推进技术研究的热点^[12]。由于激光器性能的发展相对较为迟缓,一段时间以来,实验室条件下,研究激光与工质相互作用机理,主要的技术增长点集中在对工质靶的选择与设计上。通过改变工质靶特性来改变烧蚀推进性能是机理研究方面的主要革新手段。

激光微烧蚀的工质靶推进性能除了与激光器本身的参数(脉宽、波长和强度等)有关外,还与靶材的物性,如结构、分子量、离化阈值、热导系数等有关。目前,主要研究热点有以下4个方面:靶材选择、靶材结构、靶材掺杂,以及靶的物相。

(1) 靶材的选择

时至今日,国内外众多专家学者对大量靶材进行了激光烧蚀实验,包括各种常见的金属(铝、铜、铅、镁等)和一些复合材料,以及特殊设计的含能材料。这些相关的理论与实验结果都可以作为激光微烧蚀推力器设计的参考。

Pakhomov等人针对各种单元素金属和非金属靶材进行激光烧蚀测定^[13],发现对不同烧蚀材料,比冲随工质原子量的增加而减小,冲量耦合系数则相反。Phippis小组对若干金属靶材进行了烧蚀性能对比实验,发现金是烧蚀推进性能最佳的选择^[14]。针对一些复合材料开展了一系列工质

靶材的烧蚀推进性能研究,发现聚氯乙烯(PVC)材料是较好的工质靶材^[15]。德国Bohn小组测试了不同单脉冲能量下,激光烧蚀聚甲醛树脂(POM)冲量耦合系数随空气压力的变化^[16],认为聚甲醛树脂是固体推进剂中的首选。日本Nakano等人采用1 W的980 nm二极管激光器烧蚀含能靶材B/KNO₃,发现含能材料比PVC推力提高了420倍,冲量耦合系数提高近560倍^[17]。瑞士Lippert小组选取了PVC、缩水甘油酯(GAP)和聚硝酸乙烯(PVN)3种聚合物材料进行激光微烧蚀实验,发现无论是掺C还是红外染色剂(增强激光吸收),GAP烧蚀推进性能都要优于PVN和PVC。中国科技大学唐志平、蔡建等人采用瓦级半导体激光器,对聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、双基药靶和赛璐珞靶3种聚合物材料进行了烧蚀性能测试^[18],通过综合分析比对,认为PMMA和双基药的推进效果较好,PMMA的冲量耦合系数较小,但是比冲最高,可作为卫星姿态控制激光微推力器的靶材选料;双基药耦合系数较高,可作为轨道控制微推力器靶材选料。

从相关研究情况来看,工质靶选材的基本要求是:烧蚀率高、分子链含能并且断裂可控,分解强度阈值明显且较低、分解产物气化彻底、没有再沉积现象等。其中,最重要的是材料分解后释放的能量要大,即转化为推力大,这样会使能量转化效率提高很多。含能高分子聚合物为靶材的首选。目前,半导体激光器功率通常比较低,工作时需要采用足够长的脉宽实现能量沉积,同时,要求工质靶导热率低,有利于能量沉积。高分子聚合物非常适合这一需求。从烧蚀推进性能的需求角度来看,高比冲、高冲量耦合系数,也即高烧蚀效率是设计的最理想目标。

(2) 靶材结构特性

所谓“靶材结构”,具体来讲,是指参与烧蚀,即参与激光与物质相互作用的工质部分,通过预先设计好的结构,对烧蚀产生的喷射进行约束,从而影响推进性能。通常有两种约束结构:坑状约束和层状约束。其中,层状约束即通常所说的约束烧蚀情况,Pakhomov在激光推进的概念研究中建立了激光推进概念树^[19],对各种约束模式进行了详细的分析归纳。

较早研究固体约束层靶结构的是Fabbro等人。1990年,Fabbro等人研究了在约束条件下激光诱导等离子体对靶的耦合特征,与激光直接烧蚀靶材情况进行了对比分析^[20]。结果表明,约束条件下产生的烧蚀压强比直接烧蚀情况高4~10倍。日本学者Koizumi和Nakano等人将含能靶材B/KNO₃粉末事先添置在做好的靶坑内,采用点火模式产生反冲推力。实验结果表明:靶坑形状的设计会对推进性能产生影响^[17]。日本Uchida等人^[21,22]研究了一种双层玻璃结构(中间用掺碳的环氧树脂粘合)用于改善激光与靶材的冲量耦合效果,冲量耦合系数至少提高1个数量级。Phipps等人设计了一种多层靶结构^[23];以黄铜作为烧蚀层,玻璃作为透明约束层,利用YAG激光器靶材进行烧蚀,冲量耦合系数最大可达 4.92×10^{-3} N/W,比单层靶材下得到的冲量耦合系数提高了近1个数量级。

约束结构能显著提高冲量耦合系数,靶材结构的变化是最容易实现的改善推进性能的方式。层靶约束结构是靶结构设计所采取的主要形式。就目前研究情况来看,影响激光微推进性能的约束结构控制因素还有很多,如约束层厚度和物性参数等,这些因素是如何与工质靶和入射激光实施相互影响的,还有待于深入研究。

(3) 靶材掺杂特性

通常来讲,单元素工质比冲较高,高分子复合材料冲量耦合系数较高,这是多年来激光烧蚀材料性能的普遍共识。因此,人们就产生了既利用单元素工质获得高的比冲,又利用高分子材料提高激光推进的冲量耦合系数的想法,即在高分子材料中掺入小尺寸单元素颗粒来改变高分子材料的烧蚀推进性能。

德国Bohn小组的Schall等人对几种复合材料,如POM、环氧树脂和聚丁二烯进行不同程度的金属掺杂。实验采用10.6 μm TEA-CO₂脉冲激光器对不同掺杂浓度、不同脉冲能量的烧蚀推进性能进行了测量。结果表明,在真空条件下,掺杂后的复合靶材冲量耦合系数值降低,并且比冲值也比未掺杂的靶材降低了很多,Schall将这种现象归结为气化前的靶溶解和等离子体对激光的屏

蔽^[16]。中国科技大学程建中等人,在分析 Bohn 小组实验的基础上,提出采用纳米金属颗粒掺杂的想法^[24]。采用 PVC 作为基底材料,分别掺杂不同元素的纳米金属颗粒,并且与同元素微米金属颗粒掺杂的效果进行对比。实验结果表明,纳米 Fe 的掺杂在激光功率密度为 5 MW/cm^2 , 掺杂浓度为 50% 时,比冲出现最大值,比纯 PVC 高出近 4 倍。Phipps 小组研究的靶材的掺杂是增加靶材对激光吸收,影响靶材对激光吸收效率的重要手段。大多数聚合物对红外波段光吸收都很差,必须添加吸收剂,例如纳米碳或红外染色剂等。综合分析各种掺碳效果,认为纳米碳尽管会产生 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 的大粒子团,但烧蚀效果最好,掺碳性能表现为黑珍珠碳优于导电碳优于基本碳^[25]。红外染色剂掺杂在分子层面,效果优于纳米碳。

靶材的掺杂对烧蚀特性的影响作为激光与物质相互作用研究领域内的重要课题,一直存在着诸多的争议与讨论。现阶段,激光微推进领域内,考虑靶材掺杂对激光吸收作用的研究较多,尚未对烧蚀推进性能的改变展开有针对性的研究。靶材掺杂,尤其是金属属性的掺杂物对于烧蚀推进性能的影响是一个有待深入展开的研究领域。

(4) 靶材物相特性

靶材的物相相对推进性能的影响较大:工质物相不同,推进性能也不同。在早期的激光等离子体微推进技术研究中,多考虑固体靶材与激光的相互作用,凝聚态靶材的激光微烧蚀性能是目前的研究热点。特别是水工质方面,日本相关学者开展了一系列以水为推进剂组分的激光推进性能研究,如重复脉冲下的水循环供靶、“水炮”推进,以及卫星(“north-south”卫星姿态控制,20 mN 推力需求)的姿态控制等^[15]。

日本 Uchida 等人在美国空军科学研究所(AFOSR)的资助下,开展了激光烧蚀液体工质的相关研究,测量了二乙醚、水、乙二醇、蓖麻油 4 种液体工质的烧蚀推进性能^[26]。实验结果表明,粘

性与耦合性能密切相关,对于某黏性一定的液体推进剂,某强度激光刚好将其烧穿时,冲量耦合系数最大。美国 Fardel 等人针对 LPT 液体工质的烧蚀情况^[27],详细讨论了关于飞溅机制和类固体烧蚀机制的转换条件,认为液体工质黏性和激光强度是决定这一机制转换的决定因素。瑞士 Lippert 小组尝试了 4 种不同浓度的液态含能聚合物的烧蚀性能^[28]。文章指出,当前由 GAP 掺 C 的固体工质能够达到 550 s 的比冲,烧蚀效率可以达到 360% 以上,为目前发现的效率最高的固体工质材料。

液态工质是最新的研究热点,最有可能成为新一代 LPT 工质。目前,固体靶材的 μLPT 存在的主要缺陷是供靶机构复杂、质量过大,工质靶带死重大,系统比冲低。就目前的液体工质的概念设计探索研究来看,无论是供靶机构还是工质靶的利用率都将大幅度改善。但是,液体工质烧蚀机理的研究还处于起步阶段,推力器处于概念设计阶段,还有许多问题需要进一步探究。

4 激光等离子体微推力器的研制

激光等离子体微推进技术的最终目标是研制出适合微小卫星姿轨控的微推力器。其经历了从方案构想到原理样机,从桌面系统到最终产品的研制过程。关于这方面的研究,美国的 Phipps 小组走在世界的前沿。1998 年,美国 Phipps 小组开展了关于激光等离子体微推力器的研制, μLPT 经历了预样机、桌面系统、原理样机、ms- μLPT 、ns- μLPT 到最近提出的新型 μLPT 的概念设计的发展过程如表 1 所示。

预样机与桌面系统的结构是一致的,所选取的工质靶材不同,因此,在测得的推进性能上略有差异。同样,原理样机与 ms-LPT 产品的基本结构也是一致的。ns-LPT 和新型 μLPT 尚处在实验室条件下的机理研究阶段,没有相关样机的报道,值得关注的是新型 μLPT 的概念设计。

表1 美国 Phipps 小组研究 μ LPT 的历程
Fig.1 Progress of μ LPT from Phipps group in America

	μ LPT 生产年代、产品、技术参数							
	2002 年 预样机 ^[15]	2003 年 桌面系 统 ^[9]	2004 年 样机 ^[12]	2004 年 ms- μ LPT ^[3]	2005 年 近期 ns- μ LPT ^[10]	2006 年 远期 ns- μ LPT ^[10]	2008 年 新型 μ LPT ^[29]	
带燃料总质量/kg	0.85	0.75	0.54	0.54	0.8	-	80	
燃料质量/kg	-	0.001 3	0.044	0.044	-	-	69.5	
激光波长/nm	920	920	916	916	-	-	1 060	
峰值功率/W	14	15	8	-	50×10^3	230×10^3	670 1×10^6	
平均功率/W	2	2.4	4.54	-	0.1	4	1.2×10^3 1.8×10^3	
激光焦点处 光斑	$500 \mu\text{m}^2$	170 μm (直径)	1 333 $\mu\text{m} \times 1$ 40 μm	400 $\mu\text{m} \times$ 30 μm	40 μm (直径)	100 μm (直径)	-	-
脉宽/ms	2	2	1.5	1.5	5×10^{-7}	1×10^{-6}	1	10^{-5}
脉冲频率/Hz	100	80	63	-	4×10^3	17×10^3	100	10×10^3
入射光强/ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	-	6.6×10^4	-	-	4×10^9	2.9×10^9	-	-
烧蚀轨迹宽/ μm	100	100	-	-	-	-	-	-
工质寿命/h	1.8	1.8	1.32	-	5(90°)	230(45°)	3.4 (5.7 g/s)	12 066 (1.6 mg/s)
总冲/($\text{N} \cdot \text{s}$)	-	6.2	48	50	-	-	79×10^3	2.5×10^6
比冲 I_{sp}/s	400	400	250	200	3 000	10 000	116	3 660
冲量耦合系数 $C_m/(\text{N} \cdot \text{W}^{-1})$	8×10^{-5}	4.0×10^{-4}	5.5×10^{-4}	5.5×10^{-4}	4×10^{-5}	2×10^{-5}	2.2×10^{-3}	1.9×10^{-5}
推力/ μN	150	960	-	100 ~ 10 000	100	-	6.48×10^6 (3 kW)	5.7×10^4 (3 kW)
MIB/($\mu\text{N} \cdot \text{s}$)	0.6(1 ms)	1(1 ms)	-	0.1	4×10^{-5}	-	-	-
采用的激光器	4 \times JDSU 6380A 光纤耦合	4 \times JDSU 6380A/L2 光纤耦合	6 \times JDSU 6390 光纤耦合	6 \times JDSU 6390 光纤耦合	-	-	光纤激光增强	
靶材	PVC 等 惰性材料	专利材料	专利材料	掺碳 GAP	金属	金属	含能液态聚合物	

Phipps 小组在 2008 年束能会议上发表文章^[29],研究了液体高分子聚合物激光微推进性能。文章报道了 GAP 黏性液体工质(70% GAP + IR)在 $2.84 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 的激光强度,5 ns 脉宽的激光辐照下,比冲可以达到 680 s,冲量耦合系数为 $7.3 \times 10^{-5} \text{ N/W}$,烧蚀效率为 24%。提出了新型变推力、比冲可调激光等离子体微推力器的概念,发动机重 80 kg (结构质量 10.5 kg,工质 69.5 kg),可工作在 ns 和 ms 两种模式下,ms 脉宽为低比冲模式 116 s,推力可达 57 mN,ns 脉宽为高比冲模式 3660s,推力可达 6.48 N,也即比

冲可在 200 ~ 3 600 s 调整。该推力器可用于 180 kg 级小卫星姿轨控,用 3 kW 平均功率可在 16 个月内提供 17.5 km/s 的速度增量。由于比冲的调整范围大,因此可用于为不同任务选择最优的比冲工作方式。图 3 是概念设计结构图。

从 μ LPT 的发展状况来看,ms- μ LPT 是应美国空军具体任务需求而产生的,并且实现了预定的任务目标。可见,新的 μ LPT 产品需要更多的实际应用来推动,激光等离子体微推力器的发展空间有待更多的需求来牵引。

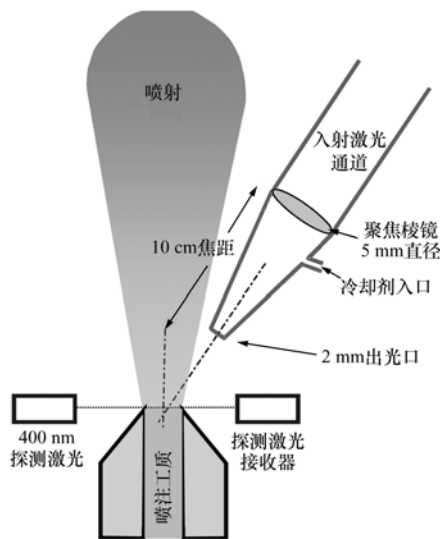


图3 Phipps小组的新一代 μ LPT概念设计图

Fig.3 Sketch of new generation μ LPT of Phipps group

5 结束语

激光等离子体微推进技术作为激光推进技术的一个分支,其工程应用的可能性已经得到了验证,该技术也越来越受到人们的高度重视。经过近10年的发展,激光等离子体微推进技术已经展现出广阔的发展空间,衍生出多种工作状态和模式,在多个方面和研究角度上产生了众多研究成果,特别是在靶特性研究和微推力器器件集成方面,相关研究较为丰富和具体。然而,目前仍然存在许多技术上的未知问题,很多研究工作有待于深入,相信伴随着越来越多的支持和关注,激光等离子体微推进技术必将会在航天器控制领域得到更广泛的应用。

参考文献:

- [1] 王广宇,洪延姬,叶继飞. 激光微推进研究进展[C]. 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.
WANG G Y, HONG Y J, YE J F. Research progress of the laser micro propulsion[C]. Chinese Society of Astronautics. The 24th Solid Rocket Propulsion Symposium, 2007:367-372. (in Chinese)
- [2] CLAUDE R P, MITAT B, WILLY B, *et al.*. Review: laser-ablation propulsion[J]. *J. Propulsion and Power*, 2010, 26(4):609-637.
- [3] CLAUDE R P. Description of the photonic associates "LPT" thruster[G]. *Photonic Associates, LLC*, 2003:1-3.
- [4] PHIPPS C, LUKE J, ELGESON W. Laser space propulsion overview[J]. *SPIE*, 2007, 6606:660602.
- [5] 唐志平. 烧蚀模式激光推进的机理和应用探索[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(10):1300-1306.
TANG ZH P. Exploration of mechanism and applications for ablation laser propulsion[J]. *J. University Sci. Technol. China*, 2007, 37(10):1300-1306. (in Chinese)
- [6] 张翼, 郑志远, 鲁欣, 等. 激光等离子体微推进技术研究进展[J]. 科技导报, 2007, 25(19):70-74.
ZHANG Y, ZHENG ZH Y, LU X, *et al.*. Development of laser plasma micro-propulsion[J]. *Science and Technology*, 2007, 25(19):70-74. (in Chinese)
- [7] 叶继飞, 洪延姬, 王广宇. 激光微推进的靶特性研究进展[J]. 推进技术, 2009, 30(6):751-756.
YE J F, HONG Y J, WANG G Y. Progress of research in laser micro ablation of target[J]. *J. Propulsion Technol.*, 2009, 30(6):751-756. (in Chinese)
- [8] JAMES R L, CLAUDE R P, GLEN G M. Laser plasma thruster continuous thrust experiment[J]. *SPIE*, 2002, 4760:843-851.
- [9] CLAUDE R P, JAMES R L, THOMAS L, *et al.*. Micropropulsion using a laser ablation jet[J]. *J. Propulsion Power*, 2004, 20(6):1000-1011.
- [10] CLAUDE R P, JAMES R L. Advantages of a ns-pulse micro-laser plasma thruster[J]. *AIP Conf. Proc.*, 2003, 664:230-239.
- [11] SOOJIN C, TAEHEE H, ARDIAN B G, *et al.*. Thrust enhancement via gel-type liquid confinement of laser ablation of solid metal propellant[J]. *Appl. Phys. A*, 2010, 98:147-151.
- [12] 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.

- HONG Y J, WANG G Y, DOU ZH G. State of art of laser ablation microthruster[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2009, 30(9):1555-1565. (in Chinese)
- [13] ANDREW V, PAKHOMOV M, SHANE T, *et al.*. Ablative laser propulsion: a study of specific impulse, thrust and efficiency[J]. *AIP Conf. Proc.*, 2003, 664:194-205.
- [14] CLAUDE R P, JAMES R L, WESLEY H, *et al.*. 3ks specific impulse with a ns-pulse laser microthruster[C]. International Electric Propulsion Conference, Princeton, NJ, Oct 30-Nov 4, 2005; 319-322.
- [15] CLAUDE R P. *Laser Ablation and Its Applications*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [16] SCHALL W O, ECHEL H-A, TEGEL J, *et al.*. Characterization of the absorption wave produced by CO₂ laser ablation of a solid propellant, FA8655-04-1-3067[R]. Stuttgart: German Aerospace Center Institute of Technical Physics, 2005.
- [17] MASAKATSU N, HIROYUKI K, TAKAYOSHI I, *et al.*. Experimental investigation of a chemically-augmented, diode laser thruster for micro spacecraft[J]. *AIAA*, 2004; 2004-3799.
- [18] 蔡建. 激光微推进的原理和应用研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2007.
CAI J. Mechanism and experiment investigation of laser micro-propulsion[D]. Hefei: *University of Science & Technology of China*, 2007. (in Chinese)
- [19] ANDREW V P, JOHN E S. A conceptual tree of laser propulsion[J]. *AIP Conf. Proc.*, 2008, 997:592-603.
- [20] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, 68:775-784.
- [21] SHIGEAKI U, KAZUHISA H, KAZUHISA F, *et al.*. Comparison of surface and internal laser irradiation of solid propellant for propulsion[J]. *AIAA*, 2002; 2002-2155.
- [22] SHIGEAKI U, KAZUHISA H, KAZUHISA F, *et al.*. Characteristics of volume expansion of laser plasma for efficient propulsion[J]. *SPIE*, 2002, 4760:810-820.
- [23] CLAUDE R P, DANIEL B S, ROBERT R, *et al.*. Very high coupling coefficients at low laser fluence with a structured target[J]. *SPIE*, 2000, 4065:931-938.
- [24] 程建中, 蔡建, 胡云, 等. 掺杂金属颗粒的高分子工质激光推进实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(7):1190-1194.
CHENG J ZH, CAI J, HU Y, *et al.*. Experimental study of laser propulsion by using polymer propellant doped with metal powder[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(7):1190-1194. (in Chinese)
- [25] LIPPER T T, DAVID C, HAUER M, *et al.*. Tailor-made polymers for laser ablation[J]. *Review of Paser Engineering*, 2001, 29(11):734-738.
- [26] SHIGEAKI U. Efficient laser ablation, AOARD 044033[R]. Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 2006.
- [27] ROMAIN F, LUKAS U, THOMAS L, *et al.*. Laser ablation of energetic polymer solutions: effect of viscosity and fluence on the splashing behavior[J]. *Appl. Phys. A*, 2008, 47:78-87.
- [28] LIPPERT T, URECH L, FARDEL R, *et al.*. Materials for laser propulsion: "liquid" polymers[J]. *SPIE*, 2008, 7005:750012.
- [29] CLAUDE R P, JAMES R L, THOMAS L, *et al.*. Liquid-fueled, laser-powered, N-class thrust space engine with variable specific impulse[J]. *AIP Conf. Proc.*, 2008; 222-231.

作者简介: 叶继飞(1981—), 男, 吉林辽源人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事激光微推进技术方面的研究。

E-mail: yjfl981@163.com