

激光等离子体推进技术研究进展

郑志远,高华,樊振军,邢杰,董爱国,吴秀文,张自力

中国地质大学(北京)数理学院,北京 100083

摘要 激光等离子体推进技术因具有耦合系数高、冲量动态范围大,以及易实现数字化控制等诸多优势成为目前最具应用前景的推进技术之一。对目前国内该领域的研究进展做了简单介绍,重点对各种靶材的烧蚀特性及其优缺点进行了分析和对比。此外,还总结了等离子体推进中耦合系数和比冲的测量方法。

关键词 激光等离子体;推进;靶材;测量方法

中图分类号 O539

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.h1.018

Developments of Laser Plasma Propulsion Technology

ZHENG Zhiyuan, GAO Hua, FANG Zhenjun, XING Jie, DONG Aiguo, WU Xiuwen, ZHANG Zili

School of Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract The laser plasma propulsion is a most prospective propulsion technology due to its unique advantages such as the high specific impulse, the large range of momentum thrust and the easily realized digital control. A review of the laser source, the theoretical model and the target material is made in this paper, including the progress of the laser plasma propulsion. For the laser source, the nanosecond and the microsecond laser pulses should be used together for their complementation nature. A two-dimensional model should be urgently developed, especially in a confined laser plasma propulsion. For the target material, the liquid as one of optimum target materials attracts much attention due to its higher coupling coefficient. To solve the problem of the low specific impulse due to the splashing behavior, the target properties, in particular, the viscosity are analyzed and a comparison is made among the target materials. A new energy-containing liquid material is discussed. Moreover, the parameter measurements of the coupling coefficient and the specific impulse are discussed. A new double probe beam device is introduced to measure the target momentum. Its measurement results are independent of the probe beam diameter and the target thickness.

Keywords laser plasma; propulsion; target material; measurement method

0 引言

近地轨道卫星向微小卫星及卫星星座的发展已成为未来卫星发展的主要趋势。由于微小卫星的体积小重量轻,转动惯量小,在姿态控制和轨道保持时对星载微推力器的功耗、比冲、体积和重量等方面都有严格的要求和限制。2003年,美国 Phipps 小组研制了一款 ms 量级脉宽激光等离子体推进器,并拟将该推进器应用在美国空军 TechSat21 型卫星的姿态调整和轨道控制上。该推进器采用激光等离子体推进技术中的烧蚀模式,它是将激光作为能量源,在 μs 尺度范围内烧蚀靶材产生高速喷射的等离子体,利用等离子体的反作用力作为动力源的一种推进技术。该技术具有单脉冲产生的冲量小,可达 $\text{nN}\cdot\text{s}$ 量级,冲力范围从 μN — N 的大调节范围,

及污染小、推力器结构简单、重量轻和易实现数字化控制等显著优势,成为目前最具有应用前景的推进技术之一^[1-6]。

早在 1972 年, Kzntrowitz 就提出了利用地基激光器将空间飞行器送入近地轨道的设想,从而开创了激光推进研究的新领域。与传统的化学燃料推进相比,激光等离子体推进技术在安全性、发射效率、发射费用、有效载荷比等方面都具有其他技术无法比拟的优势。作为一种新型航天推进技术,美国、俄罗斯、日本和德国等发达国家都对这项研究表现出浓厚的兴趣。特别是美国在 20 世纪“星球大战”计划和太空武器计划的推动下,基于对空基动能武器系统需要低成本发射技术的需求,激光推进技术研究获得了大幅度进展。1993 年,美国 Phipps 研究小组首次提出利用星载激光器进行激光烧

收稿日期:2012-05-15;修回日期:2012-08-23

基金项目:国家自然科学基金项目(10905049);中央高校科研业务费项目(2010ZY52,2011YXL059)

作者简介:郑志远,副教授,研究方向为强激光与物质作用,电子信箱:zhzyzheng@cugb.edu.cn

蚀推进的设想,期望用于卫星从近地轨道向同步轨道的轨道转移。1998年,Phippis小组开展了激光推进器应用基础研究,主要是系统研究半导体激光器烧蚀聚合物的推进性能。2002年,Phippis小组成功研制了第一台基于二极管激光器的推力器样机。2003年,麻省理工林肯实验室的Gonzales小组首次提出了ns脉宽的激光推力器,并进行了性能测试。2007年,Phippis小组提出了一种激光推进发动机的概念,设计推力为1N量级,主要用于卫星的主推进。德国的Bohn小组研究了激光推进用于近地轨道发射的可行性。日本的Yabe小组在2002年成功进行了纸飞机模型的推进实验研究,而Uchida小组开展了激光烧蚀液体的相关研究。日本Tohoku大学与韩国首尔大学合作进行了激光推进的管中加速器研究。俄罗斯在20世纪90年代提出了ISTC-929计划,重点研究强激光与大气的相互作用机理。2000年又提出了ISTC-1801计划,重点是对激光爆轰发动机进行理论和实验研究,发展高效率的激光推力器。2005年,俄罗斯以高分子材料甲醛树脂为烧蚀靶材,对飞行器模型进行了短距离飞行实验。

这些国家基于系统的基础理论和实验研究,提出了切实可行的长远规划,特别是美国,对激光推进技术高度重视,按照它们的发展规划,在2020年左右激光推进技术将走向实用化。此外,国际上连续召开了5届关于能量束推进的会议,核心主题便是探讨激光束推进的研究进展和未来发展趋势。正是由于国际上对这一技术的高度重视,激光等离子体推进技术得到了迅猛发展。

国内在该领域的研究起步较晚。从2004年起,中国正式立项(国家973项目和国家自然科学基金项目)支持激光推进的研究,使中国的激光推进研究进入了新阶段。中国科学院物理研究所张杰小组在约束烧蚀方面做了大量工作,将动量耦合系数提高了两个数量级。装备指挥学院的洪延姬小组在理论和实验方面做了大量创新性工作。中国科技大学的唐志平小组、中国科学院电子研究所的谭荣清小组、哈尔滨工业大学的王骥小组、南开大学的朱晓农小组、华中科技大学的程祖海小组等国内科研院所在这方面都做了大量探索性和尝试性工作。特别是从2005年以来,以装备指挥学院为代表的科研单位使中国在这一领域的研究迅速发展起来。

1 等离子体推进技术研究进展

1.1 理论方面

由于激光参数和靶材的多样性,激光与靶材相互作用的激光烧蚀过程非常复杂。为了描述和研究这些过程,发展了一些理论模型。在这一方面国外发展较早。1980年,Ageev等^[7]利用含热传导效应的一维流体模型,模拟了脉冲激光推进过程,提出了推进中的耦合系数与推进器几何参数的关系。1990年,Fabbro等^[8]研究了激光诱导等离子体在约束条件下与靶的耦合特性,建立了相应的一维模型,并对烧蚀压峰值进行了估算。1988年,Phippis等^[9]根据激光吸收深度远小于热扩散深度的情况,建立了面吸收模型。对于金属及许多C-

H靶而言,面吸收模型得到的耦合系数和比冲与实验接近,当吸收深度增大到 μs 量级时,理论和实验结果偏差较大。1990年,Phippis小组又根据激光吸收深度远大于热扩散深度的情况提出了体吸收模型。对两种模型分析后发现,激光功率密度较低时,体吸收靶材的冲量耦合系数较高,随着激光功率密度的提高,体吸收与面吸收模型给出的冲量耦合系数越来越接近,直至无法分辨。而国内的理论研究刚刚起步,研究以一维的简化模拟为主^[10]。二维模拟方面,童慧峰等^[11-12]对激光烧蚀平面靶产生的等离子体流场模拟发现,当激光光斑大小一定时,靶材横向尺寸约为光斑尺寸的3倍时获得的冲量最大;而约束喷管约束了等离子体的自由膨胀,并延缓了靶面等离子体压力的衰减。韩斌等^[13-14]对激光烧蚀水产生的冲击波的演化等进行了研究。总起来说,国内外针对激光等离子体推进方面的理论研究较少。一方面原因是国际上激光推进的整体研究处于初级阶段,存在许多尚未解决的原理性和技术性的问题;另一方面,靶材在不同条件下通过不同的吸收机制吸收激光能量,这一过程很短,且发生在高速运动的流场中,因此靶材的能量吸收伴随着复杂的动态过程,同时外界的激光波长、强度、持续时间、聚焦尺寸等都会对它产生影响。这些因素都限制了理论研究的进一步发展,因此关于描述等离子体流场的理论工作急需发展。

1.2 激光器方面

烧蚀过程首先与激光器本身的参数(脉宽、波长、强度等)有关。目前多数小组采用半导体激光器作为烧蚀源,由于半导体激光器的功率低,需要用 μs — ms 间的脉冲宽度实现能量的沉积,这就要求靶材必须是低导热率的非金属材料,如高分子聚合物。产生的比冲为几百s,冲量耦合系数为几十甚至几百 dyne/W 。而纳秒激光的峰值功率较高,可以使用任何材料作为靶材,比冲可达到3000s以上,最小推力达到 μN 量级,烧蚀效率接近100%。这样的优势使得纳秒激光推力器极具竞争力,但纳秒激光推力器面临着靶材供给、激光器微型化等问题。两种激光脉宽工作模式下,烧蚀推进性能完全不同,但可以形成互补关系,分别满足不同的任务需求。也正因如此,Phippis小组在新一代微推进的设计中,结合了两种模式的优势,提出了可变比冲、可变推力的新型激光等离子体微推力器的概念。

1.3 靶材方面

对于激光与各种靶材间的烧蚀机理,各国都进行了大量研究。目前靶材主要集中在聚合物靶材、液体靶材和含能靶材几个方面。在Pakhomov等^[15]发现相对原子质量越小比冲越高的规律后(图1),高分子聚合物靶材因成分中只有C、H等元素,相对原子质量较小而成为研究热点。Schall等^[16]认为,聚甲醛树脂的烧蚀产物气化程度较高,冲量耦合系数大,是聚合物靶材中的首选。Phippis小组^[17]认为,高分子材料聚氯乙烯(PVC)是最佳的惰性材料。蔡建等^[18]采用瓦级半导体激光器进行了靶材筛选实验,结果表明,有机玻璃(PMMA)的冲量耦合系数小,单比冲较高,可作为微小卫星姿态控制靶材选料。

目前聚合物靶材主要集中在高分子的甲醛树脂、聚酰亚胺、聚氯乙烯等材料^[19-21]。一方面是因为这类材料的导热系数小,能充分适合半导体激光器长脉宽的需要;另一方面是这一类材料做成薄膜后非常适于储存。但普通的高分子聚合物靶材在烧蚀过程中存在灵敏度差、碳化严重、烧蚀产物再凝结等问题,而且激光烧蚀产生的耦合系数较低。针对这些问题,合成分解产物气化彻底,没有再沉积现象,以及激光烧蚀可控分子链断裂的高分子聚合物成为下一步的研究重点。

Yabe 等^[22]于 2002 年首先研究了水膜作为烧蚀材料的激光推进,冲量耦合系数达到了 350dyn/W,由此掀起了研究液体靶材的高潮(图 2)。目前对于日常生活中的水、墨水、乙二醇、乙醇、蓖麻油、汽油等液体材料进行了大量研究。在这些材料中,水由于价格低廉、存储方便,尤其是没有环境污染而受到特别关注。张杰等^[23-24]对水进行了大量的推进研究,通过设计约束型靶结构,将冲量耦合系数提高到了 250dyn/W,相对于直接烧蚀提高了近两个数量级。中国科技大学的唐志平小组^[25]研究了不同衬底上水膜的冲量耦合系数,将冲量耦合系数提高到了 390dyn/W。此外,洪延姬小组利用高能量的 CO₂ 激光器对水进行了烧蚀获得了 180dyn/W 的冲量耦合系数^[26]。Lippert 小组对不同浓度的液体聚合物进行了研究,表明 70% 的 GAP 的液体靶材烧蚀性能与固体 GAP 相似,最佳比冲可达 680s^[27]。Uchida^[28]对二乙醚、水、乙二醇、蓖麻油几种液体靶材进行研究发现,比冲和耦合系数与工质的黏性密切相

关。Fardel 等^[27]认为,液体靶材在烧蚀过程中的溅射行为提高了冲量耦合系数,但会极大地降低比冲。对于液体靶材而言,供靶结构相对简单,能降低推进器本身的质量;同时相对于固体靶材能够产生较高的冲量耦合系数,提供的推进性能参数调节范围大。但液体靶材在烧蚀过程中存在严重的溅射现象,导致比冲较低。特别是对于液态水,目前报道的比冲数据仅有几十秒,根本无法进行实用化。为了提高液体水的推进比冲,Sinko 等^[29]在实验中采用非常小的容器体积来限制水的量,但因实验中没有供给系统,只能进行单发次实验,不能进行连续推进。洪延姬小组采用雾化水滴控制水的供给量,比冲也仅有 100s,这个结果距离实际应用还有很大的差距。Fardel 等^[27]通过液体的黏度控制液体的溅射行为,认为合理黏度的液体适合作为推进靶材(图 3)。郑志远等^[30]以水为烧蚀靶材,对黏度系数与耦合系数的关系进行研究发现,比冲与其黏度系数呈现近线性变化关系(图 4)。因此,黏性与推进性能参数之间的关系及相关的烧蚀机制是液体靶材目前急需解决的问题。

含能靶材是近几年提出的一种新型靶材,处于起步探索研究阶段。含能靶材利用激光烧蚀后本身释放的化学能来进一步提高推进性能。Lippert 等^[31]设计了一种含能材料(EP),与聚氯乙烯 PVC 相比,烧蚀后高速喷射的气化成分较多,而 PVC 烧蚀后喷射出固体物较多。Nakano 等^[32]对 B/KNO₃ 进行了研究,与 PVC 相比,推力提高了 420 倍,耦合系数提高了近

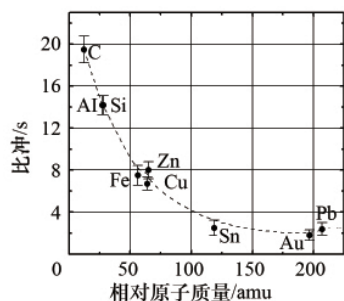


图 1 推进比冲与材料相对原子质量的关系

Fig. 1 Specific impulse vs. the atomic mass of target material

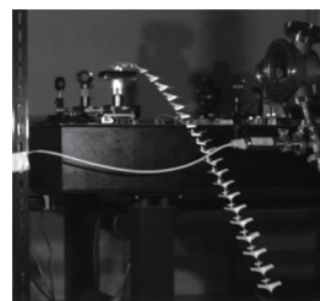


图 2 日本的激光推进飞机模型的实验

Fig. 2 Model plane propelled by laser beam performed in Japan

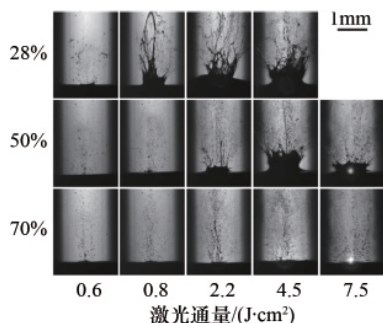


图 3 不同浓度的 GAP 在不同激光通量下的阴影

Fig. 3 Sequence of pictures for GAP for different solutions

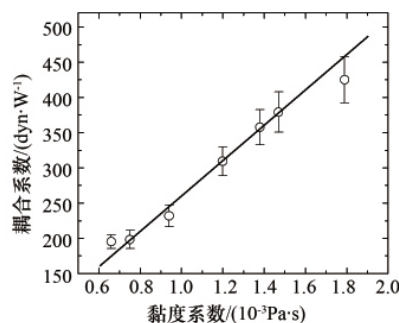


图 4 激光烧蚀水时产生的耦合系数与水的黏度系数的关系

Fig. 4 Coupling coefficient vs. the viscosity in laser ablation water propellant

560 倍。含能靶材的分解阈值一般较低,有利于通过激光能量来实现对推力大小的控制;但含能靶材的比冲较低,因此如何提高比冲是含能靶材目前所面临的重大问题。

一般来讲单元素靶材产生的比冲较高,而高分子聚合物靶材的耦合系数高。因此人们就想到了结合二者优点的掺杂复合靶,即在高分子材料中掺入小尺寸的颗粒来改变烧蚀性能。Bohn 小组的 Schall 等对几种复合材料如 POM、环氧树脂和聚丁二烯进行了不同程度的金属掺杂^[3]。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作用所致。程建中等^[4]在分析 Bohn 小组实验的基础上,采用 PVC 作为衬底材料,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的效果进行对比。结果表明,纳米 Fe 的掺杂在激光功率密度为 $5\text{MW}/\text{cm}^2$,浓度为 50%时,比冲出现最大值,比纯 PVC 高近 4 倍。Phipps 小组^[5]则在靶材中掺杂纳米碳或红外染色剂以增加对激光的吸收。结果表明,纳米碳尽管会产生微米级的大粒子团,但烧蚀效果较红外染色剂好。对于靶材的掺杂研究,目前主要集中在增加对激光的吸收方面,掺杂对烧蚀性能的影响方面的研究较少,有待于开展更加深入的研究。

2 测量方法

在激光等离子体推进中,主要的参数是冲量耦合系数和比冲。耦合系数的定义为单位激光能量产生的靶动量,而比冲的定义为消耗单位质量的靶材所产生的靶动量。这两个参数的获取主要有以下几种方式^[3]。(1) 力传感器。实验表明,当烧蚀推进使用脉宽 0.1ns 的激光脉冲时,烧蚀过程产生的冲力的持续时间为 $1\mu\text{s}$;即使脉宽仅为 0.1ps ,冲力的持续时间仍可达到 μs 量级。由于目前的快速力传感器的上升时间可达 $0.1\mu\text{s}$,因此可以使用力传感器直接测量烧蚀过程中产生的动量,进而得到烧蚀过程的冲量耦合系数。而烧蚀掉的靶材的质量一般通过另外的方法测量,如原子力显微镜,这样就可以计算比冲。(2) 飞行时间能量分析仪。飞行时间能量分析仪只能测量烧蚀喷射物种的离子组分,即只能测量喷射物中的离子速度和粒子数密度分布,无法测量中性粒子或颗粒的速度和数密度分布,因此用飞行时间能量分析仪测定的离子喷射速度来计算比冲,得到的比冲数值通常会明显大于用力传感方法得到的比冲数值。(3) ICCD 荧光法。首先用 ICCD 记录一系列不同延迟时间下的烧蚀喷射物的荧光图像,然后根据图像中喷射物的荧光强度提取不同延迟时间下喷射物的前端轮廓,由此计算喷射物的速度和分布,从而得到比冲。由于激光脉冲烧蚀的喷射物可能由高温电离的气态物质、高温的液滴以及固体颗粒等多种成分组成,因此,用荧光强度得到的是喷射物的平均速度。该方法存在一定的缺陷。(4) 简谐振动装置。用来测量推进过程中的动量的简谐振动装置包括冲击摆、扭秤及悬臂弹簧片等。当激光轰击固定

在简谐振动装置上的靶材后,在等离子体喷射反作用力的作用下,简谐振动装置发生振动,采用电学的方法得到激光产生的动量,从而得到耦合系数和比冲。冲击摆测量方法因其结构简单、操作方便、测量精度较高而被很多研究小组使用。例如李修乾等通过测量悬摆摆动的角度并结合 CCD 获取速度及动量。杨雁南等^[6]通过测量单摆摆动的周期获得靶动量。Zheng 等^[7]利用靶的宽度和一束平行靶面的探测光直接获得靶的速度,并结合靶质量获得靶的动量。在 Choi 等^[8]提出双束探测的基础之上,郑志远等对该方法进行了详细研究,两束相互垂直的 He-Ne 激光经过一个半透半反镜后变成相互平行的两束光,这两束光作为探测光并平行的穿过靶面。其中的一束 He-Ne 光直接进入光电管,另一束 He-Ne 激光经一个全反镜后进入另一个光电管。两个光电管输出的信号同时输入示波器。这样,示波器上采集的两个信号间的时间宽度便是靶摆过两束 He-Ne 探测光的时间(图 5)。然后由两束探测光之间的距离即可获得靶摆动速度,通过靶的质量便可以计算出靶的动量。该方法除了测量简单,操作方便外,测量结果不受靶宽度和探测光光斑尺寸的影响。

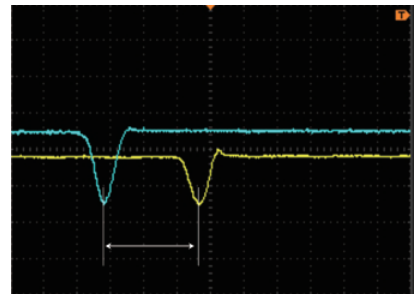


图 5 示波器中采集到的典型双束探测光测量波形
 Fig. 5 Typical signal recorded by oscilloscope by using two probe beams

3 结论

激光等离子体推进技术因其自身的技术特点,是目前最具应用前景和竞争力的推进技术之一。其概念在 20 世纪 60 年代一经提出,就得到世界范围内相关研究人员的重视。美国、德国、日本、俄罗斯等发达国家相继开展研究工作,并取得了阶段性成果。实验中采用的激光器从最初的二氧化碳激光器发展到现在超短的飞秒激光器;靶材从最初的常见金属靶研究到现在的高分子聚合物、含能靶。

参考文献 (References)

- [1] 郑志远, 鲁欣, 张杰. 激光等离子体推进技术的研究进展 [J]. 物理, 2003, 32(8): 533-538.
 Zheng Zhiyuan, Lu Xin, Zhang Jie. *Physics*, 2003, 32(8): 533-538.
- [2] 洪延姬, 王光宇, 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 Yanji, Wang Guanyu, Dou Zhiguo. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(9): 1555-1565.
- [3] 张楠, 徐智君, 朱晓农, 等. 激光推进技术 [J]. 红外与激光工程, 2011,

- 40(6): 1025–1037.
Zhang Nan, Xu Zhijun, Zhu Xiaonong, *et al.* *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1025–1037.
- [4] 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): 751–761.
Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(6): 751–761.
- [5] 叶继飞, 洪延姬, 王广宇, 等. 激光等离子体微推进技术的研究进展[J]. 中国光学, 2011, 4(4): 319–326.
Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu, *et al.* *Chinese Optics*, 2011, 4(4): 319–326.
- [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 Yi, Zheng Zhiyuan, Lu Xin, *et al.* *Science and Technology Review*, 2007, 25(19): 70–74.
- [7] Ageev V P, Barchukov A I, Bunkin F V, *et al.* Laser air-breathing jet engine [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1977, 7(12): 1430–1437.
- [8] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.* Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775–784.
- [9] Phipps C R, Turner T P, Harrison R F, *et al.* Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 64(3): 1083–1086.
- [10] 杨雁南, 杨波, 朱金荣, 等. 真空环境下激光与固体靶冲量耦合的机理分析和数值模拟[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5945–5951.
Yang Yannan, Yang Bo, Zhu Jinrong, *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(10): 5945–5951.
- [11] 童慧峰, 唐志平, 张凌. 激光支持等离子体流场的二维动态数值模拟 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(12): 1996–2000.
Tong Huifeng, Tang Zhiping, Zhang Ling. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(12): 1996–2000.
- [12] 童慧峰, 唐志平. 靶结构对烧蚀模式激光推进效应影响的数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2011, 25(3): 227–233.
Tong Huifeng, Tang Zhiping. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(3): 227–233.
- [13] Han B, Lu J, Shen Z H, *et al.* Investigation of the wedge-shaped propelled surface for laser propulsion in water environment [J]. *Optics and Laser Technology*, 2011, 43: 604–608.
- [14] Han B, Shen Z H, Lu J, *et al.* Numerical study of water-confinement geometries for laser propulsion [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48: 950–957.
- [15] Pakhomov A V, Thompson M S, Jr W S, *et al.* Ablation laser propulsion: Specific impulse and thrust derived from force measurements [J]. *AIAA Journal*, 2002, 40(11): 2305–2311.
- [16] Schall W O, Eckel H A, Mayerhofer W, *et al.* Comparative lightcraft impulse measurements[C]//High-power laser Ablation IV, Proceedings of SPIE. Washington D C: SPIE, 2002: 4760.
- [17] Phipps C R, Lippert J R. Micropropulsion using a laser ablation jet[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(6): 1000–1011.
- [18] 蔡建, 胡晓军, 唐志平. 烧蚀模式激光推进的实验研究 [J]. 推进技术, 2008, 29(3): 371–376.
Cai Jian, Hu Xiaojun, Tang Zhiping. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(3): 371–376.
- [19] Sinko J E, Phipps C R. Modeling CO₂ laser ablation impulse of polymers in vapor and plasma regimes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95: 131105–131107.
- [20] Zhang Y, Lu X, Zhou M L, *et al.* Laser propulsion with a high specific impulse using a thin film propellant[J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(8): 87901–87904.
- [21] Urech U, Lippert T, Phipps C R, *et al.* Polymer ablation: From fundamentals of polymer design to laser plasma thruster [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253: 6409–6415.
- [22] Yabe T, Phipps C, Yamaguchi M, *et al.* microairplane propelled by laser driven exotic target [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(23): 4318–4320.
- [23] Zheng Z Y, Zhang J, Lu X, *et al.* Characteristic investigation of ablative laser propulsion driven by nanosecond laser pulses [J]. *Applied Physics A*, 2006, 83: 329–332.
- [24] Zhang Y, Lu X, Zheng Z Y, *et al.* Transmitted laser propulsion in confined geometry using liquid propellant [J]. *Applied Physics A*, 2008, 91: 357–360.
- [25] 王彬, 唐志平, 蔡建, 等. 激光水推进的机理研究及参数优化[J]. 推进技术, 2007, 28(5): 586–589.
Wang Bin, Tang Zhiping, Cai Jian, *et al.* *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(5): 586–589.
- [26] 李修乾, 洪延姬, 何国强. 液体工质激光推进性能研究评述 [J]. 推进技术, 2010, 31(1): 105–110.
Li Xiuqian, Hong Yanji, He Guoqiang. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(1): 105–110.
- [27] Fardel R, Urech U, Lippert T, *et al.* Laser ablation of energetic polymer solutions: effect of viscosity and fulence on the splashing behavior [J]. *Applied Physics A*, 2009, 94: 657–665.
- [28] Uchida S. Efficient laser ablation, Project AOARD 044033 [R]. Tokyo: Institute of Technology, Integrating Research Institute, 2006.
- [29] Sinko J, Pakhomov A V. Laser propulsion with liquid propellants Part I: An overview [C]//Proc of Fifth International Symposium on Beamed Energy Propulsion. New York: AIP, 2008: 195–208.
- [30] Zheng Z Y, Fan Z J, Wang S W, *et al.* effect of viscosity of liquid propellant on laser plasma propulsion [J]. *Chinese Physics Letter*, 2012, 29(9): 95202–95205.
- [31] Lippert T, Hauer M, Phipps C R, *et al.* Fundamentals and applications of polymers designed for laser ablation [J]. *Applied Physics A*, 2003, 77: 259–264.
- [32] Nakano M, Koizumi H, Inoue T, *et al.* Experimental investigation of chemically-augmented, diode laser thruster for microspacecraft, AIAA–2004–3799[R]. Washington DC: AIAA, 2004.
- [33] Phipps C R. Laser ablation and its application [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [34] 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 Jianzhong, Cai Jian, Hu Yun, *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(7): 1190–1194.
- [35] Lippert T, David C, Hauer M, *et al.* Tailor-made polymers for laser ablation[J]. *Review of Laser Engineering*, 2001, 29(11): 734–738.
- [36] 杨雁南, 朱金荣, 杨波, 等. 用于测量激光烧蚀下靶材获得冲量的方法[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 417–421.
Yang Yannan, Zhu Jinrong, Yang Bo, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(3): 417–421.
- [37] Zheng Z Y, Zhang Y, Zhou W G, *et al.* High coupling coefficient generation in water confined laser plasma propulsion[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(2): 501–503.
- [38] Choi S, Han T H, Gojani A B, *et al.* Thrust enhancement via gel-type liquid confinement of laser ablation of solid metal propellant[J]. *Applied Physics A*, 2010, 98: 147–151.

(责任编辑 安莹, 吴晓丽)