

激光烧蚀碳掺杂液态工质推力性能实验研究

叶继飞^{1,2}, 洪延姬¹, 李南雷¹

¹装备学院激光推进及其应用国家重点实验室 北京 101416;

²中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所超超声速冲压发动机技术重点实验室, 四川 绵阳 621000

摘要 分别以碳掺杂的乙醇、甘油、单推-3和聚叠氮缩水甘油醚(GAP)为典型的液态工质,在不同能量激光注入的情况下,研究了烧蚀产物及其诱发的工质溅射,获得了推力变化规律。结果表明,溅射初期的高速喷射过程是推力形成的主要阶段。随后的溅射过程使质量流量增大,但对冲量耦合的贡献较小,进而使得整体推进性能下降。

关键词 激光技术; 激光微推进; 溅射; 冲量耦合; 比冲

中图分类号 TN248.1; V439.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0202001

Experimental Study on Thrust Performance of Carbon Doped Liquid Working Substance Processed by Laser Ablation

Ye Jifei^{1,2}, Hong Yanji¹, Li Nanlei¹

¹State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Equipment Academy, Beijing 101416, China;

²Science and Technology on Scramjet Laboratory, Hypervelocity Aerodynamics Institute of CARDC, Mianyang, Sichuan 621000, China

Abstract By taking glycerol, ethanol, DT-3 and glycidyl azide polymer (GAP) all with carbon doped as typical liquid working substances, and under different incident laser energies, the ablation product and the splash of working substance induced by this ablation product are investigated, and the thrust evolution law is obtained. The results indicate that, the high speed splash process at the beginning of splash is the main stage of thrust formation. The subsequent splash process makes the mass flow rate increase, but makes less contribution to impulse coupling, which inversely degrades the overall thrust performance.

Key words laser technique; laser micro-propulsion; splash; impulse coupling; specific impulse

OCIS codes 140.3440; 140.6810; 140.3450

1 引言

激光烧蚀推进技术是利用激光与物质相互作用的烧蚀机理进行工作的,激光烧蚀液态工质的推进工作方式是激光微推进领域内最新的研究热点之一。以碳或红外染料作为掺杂介质,以含能的高分子聚合物作为液态工质,能够获得具有较好的激光烧蚀推进性能的掺杂液体含能高分子聚合物^[1],而该聚合物的激光烧蚀推进性能的实验研究鲜有报道。冲量耦合系数、比冲和烧蚀效率等推进性能参数是激光烧蚀推进技术主要关注的性能指标^[2]。冲量是表征整个喷射过程中所有不同物态粒子为获得动能所需的作用力随时间的累积;冲量耦合系数是注入能量转化为冲量能力的评价指标参数,数值上等于冲量与注入激光能量的比值;比冲是反映烧蚀过程中工质提供冲量能力的大小,获得相同冲量所需要的工质质量越小,则比冲越高,其数值上等于冲量与烧蚀质量的比值。冲量耦合系数和比冲依赖于冲量的测量,而冲量的测量是一种积分量的测量,无法获得时间分辨的物理信息。为了更深入地研究激光烧蚀液态工质物理过程诱发的力学效应,有必要

收稿日期: 2016-07-21; **收到修改稿日期:** 2016-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(11372357, 11602304)、超超声速冲压发动机技术重点实验室绵阳分部开放课题(STSKFKT2014003)

作者简介: 叶继飞(1981—),男,博士,副研究员,主要从事先进推进技术方面的研究工作。E-mail: yj1981@163.com

在空间和时间尺度上进行分辨,研究流场和推力随时间的变化规律^[3]。

在激光烧蚀液态工质过程的时间分辨研究领域,Uchida等^[4]以二乙醚、乙二醇等低级醇为液态工质,采用压电传感器测量力的加载过程,研究工质特性对推进性能的影响,获得了波长为10.6 μm、脉宽为微秒量级的二氧化碳激光烧蚀常见液体醇推力随时间的演化过程;Sinko等^[5]采用压电传感器测量力学性能,研究激光烧蚀乙烷、乙醇、丙醇和水的推力形成机制,获得了大量的冲量耦合性能参数数据,对常见化合物液态工质进行了较好总结;Fardel等^[6]采用光学流场显示的方法,以液态聚叠氮缩水甘油醚(GAP)等高分子聚合物为掺杂液态工质,研究了激光烧蚀液态工质诱发的溅射现象,对高分子含能聚合物液态掺杂工质进行了烧蚀产物喷射过程的特性研究,但没有与力的加载过程相关联,其力学效应的深入研究有待继续。

本文主要以GAP、凝胶推进剂(单推-3)、甘油和乙醇等典型的类别液态工质为烧蚀对象,采用阴影光学显示方法获得了不同入射激光能量情况下的烧蚀产物及其诱发的工质溅射随时间的变化过程。利用压电传感器记录力的变化过程,获得了时间分辨下的激光烧蚀碳掺杂液态工质的物理过程及其力学效应。

2 实验装置与典型结果

实验装置主要有激光能量加载装置、推力测量装置和溅射观测装置,如图1所示。激光能量加载装置采用YAG激光器,输出激光波长为1064 nm,以单脉冲方式工作,脉宽为10 ns,最大单脉冲能量为350 mJ,激光束通过聚焦镜进行聚焦,聚焦光斑直径约为1 mm。采用内壁直径为15 mm、深度为10 mm的敞口工质承载池装载液态工质,对于宽度为1 mm左右的激光烧蚀区,容器参数对实验的影响可忽略,三种液态工质均未稀释,GAP、单推-3、甘油的粘度分别为14,16,1 Pa·s,掺入的辅助激光吸收颗粒为纳米碳粉,质量分数为1%。推力测量装置使用美国PCB公司的201B03型传感器,固有频率为90 kHz,测试范围为0.045~2224 N,传感器固定在液体工质承载件上。溅射观测装置主要由彩色相机、闪光灯、整形透镜和成像透镜组成,彩色相机曝光时间为1 μs,最大分辨率为1280 pixel×800 pixel,闪光灯曝光时间为22 ns,与彩色相机同步工作。

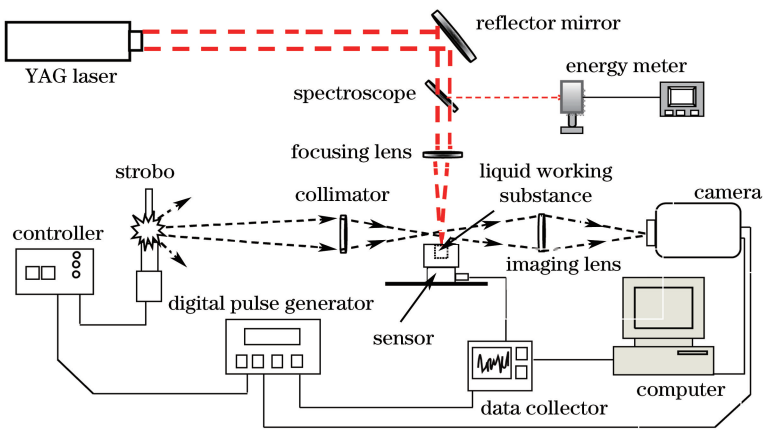


图1 实验系统装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system device

实验过程中,激光经过反射镜和分光镜,16%的激光能量用于能量监测,其余能量由聚焦镜聚焦在液体工质表面上。激光与液体工质相互作用,形成等离子体,及发生工质气化、溅射等诸多现象,还发生一系列烧蚀产物的迁移现象,对工质承载件形成推力耦合。PCB压电传感器能够记录一次完整的烧蚀推力加载过程。因为溅射过程演化较快,总时间在十微秒量级,相机无法进行连续拍摄,一次实验只能获得一张图像,该图像记录的是某一时刻开始22 ns时间内的流场信息,所以整个烧蚀过程的流场记录由多次拍摄拼接而成。实验中需预先测量闪光仪的固有延迟,使闪光发生在相机曝光时间之内。

2.1 溅射现象

在激光烧蚀推进领域,目前普遍认同液体工质可以产生较大的推力,具有较高的冲量耦合系数。然而,实验中发现激光烧蚀液体工质时,会产生烧蚀产物并伴有大量液体喷射,Phipps等^[7]将这种现象称为溅射,

这种现象会引起质量流量的增加,导致大量的低速的质量迁移,耗散能量。图 2 所示为激光烧蚀碳掺杂乙醇时观测到的溅射现象。由图可以看到,激光击穿工质形成等离子体,等离子体急速膨胀压缩环境气体形成球形激波;烧蚀产物沿着垂直于液面方向高速喷射,初期烧蚀喷射的液滴呈雾状,喷射方向性较好,较为集中,10 μs 后烧蚀产物的高速喷射引起周围未参与烧蚀的工质发生牵连喷射,液面崩溃,液滴向周围散射,伴随着大量的低速的质量迁移。

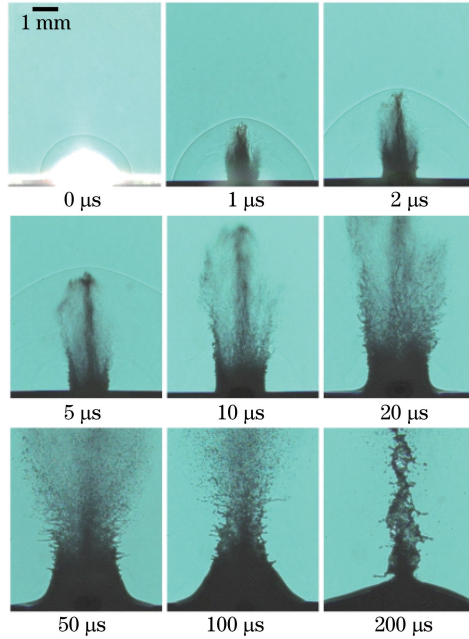


图 2 激光烧蚀碳掺杂乙醇发生的溅射现象

Fig. 2 Splash phenomena in laser ablation of carbon doped ethanol

2.2 推力性能

以典型的碳掺杂甘油为液体工质进行激光烧蚀推力性能测量,激光注入能量密度为 10.5 J/cm^2 ,测量得到的推力曲线如图 3 所示,其中推力测量曲线时间零点为激光注入时刻(后文同)。无特殊说明,后文提及的液态工质均为碳掺杂工质。

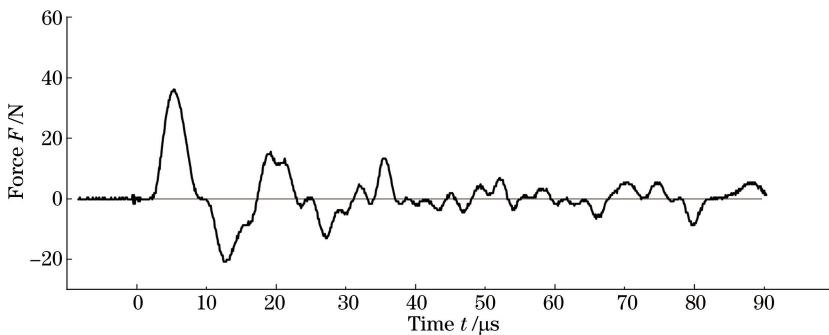


图 3 激光烧蚀碳掺杂甘油的推力曲线

Fig. 3 Thrust curve in laser ablation of carbon doped glycerol

由图 3 可以看出,整个推力可持续几十微秒;在激光持续注入结束后,速度较高的等离子体和气化产物很快形成并快速膨胀,进而迅速发生冲量耦合,几微秒内形成了第一个推力峰;随后,推力曲线下降并开始无规则振荡,振荡逐渐减弱,在后段的几十微秒内平均推力较低,冲量耦合的效率明显降低。

3 不同控制因素对推力性能的影响

3.1 相同能量激光注入不同工质的推力曲线

在激光注入能量密度为 10.5 J/cm^2 条件下,得到三种液体的推力曲线,如图 4 所示。

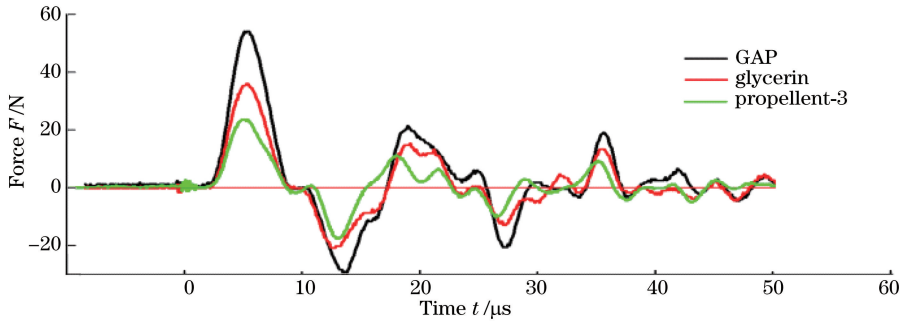


图 4 相同能量下不同液体的烧蚀推力曲线

Fig. 4 Thrust curves in laser ablation under different liquid working substances but with same energy

由图 4 可以看出,对于不同工质,其推力曲线变化具有一定的相似性。推力曲线第一个峰值出现的规律较为相似,均在 $5.5 \mu\text{s}$ 左右;在 $10 \mu\text{s}$ 左右推力减小到 0, $10 \mu\text{s}$ 以后推力曲线都表现出先强后弱的无规则振荡。由图 5 还可以看到,在相同激光注入能量密度条件下,烧蚀 GAP、甘油、单推-3 得到的推力峰值分别为 56.1, 35.6, 23.9 N。冲量耦合较好的工质,其推力曲线的第一个推力峰值较大,后期推力振荡较大^[8]。因此,推力曲线的第一个峰值的大小,一定程度上能够表征冲量耦合性能的优劣。

3.2 不同能量激光注入同种工质的推力曲线

在不同激光能量密度下,对甘油进行烧蚀,在注入激光能量分别为 $10.5, 7.63, 2.71 \text{ J/cm}^2$ 条件下测量的推力曲线如图 5 所示,其中 Φ 为激光能量密度。从图中可以看到,随着激光注入能量的增加,测得的第一个推力峰值增大,后段的推力曲线振荡也更剧烈,表明激光与液体工质作用变得更强烈。因此,更高的注入激光能量能够形成更大的推力峰值。

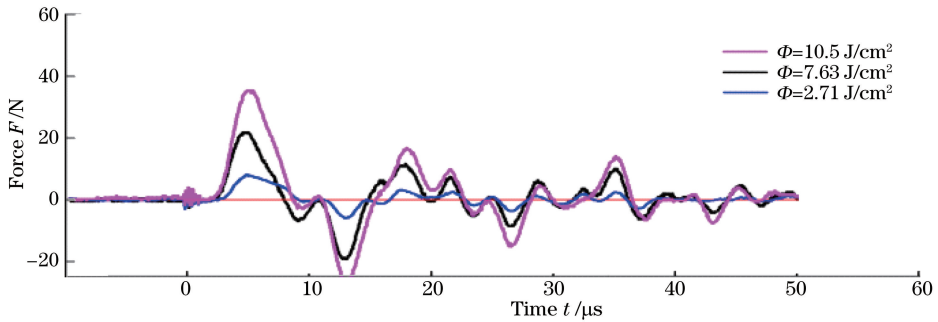


图 5 不同能量密度激光注入下甘油的推力曲线

Fig. 5 Thrust curves of glycerol under different incident laser energy densities

本实验中所有条件下的第一个推力峰值均出现在 $5.5 \mu\text{s}$ 附近,而 Sinko 等^[9]报道的烧蚀液体中的推力峰值出现在 $45 \mu\text{s}$ 附近,这是因为 Sinko 使用的 CO_2 激光脉宽为 300 ns ,峰值后振荡持续时间长达几百微秒,而本实验中的激光脉宽为 10 ns ,形成的等离子体与气化产物喷射过程的持续时间略短。说明第一个推力峰值与早期的高速喷射产物有较大关系。第一个峰值后的推力曲线振荡与各种控制因素的关系不大,均呈无规则振荡,且振荡幅度基本一致。这可能是烧蚀液体过程中空穴的形成、崩溃以及液体喷射造成的,并且与压电传感器自身的电荷振荡、电荷恢复也有一定关系。Uchida 等^[3-4,10]利用压电传感器进行激光烧蚀实验时均出现此种现象。

4 溅射过程与推力性能的对比分析

由于水和乙醇黏度较小,溅射较为剧烈,且烧蚀诱发的烧蚀产物分布不均匀,因此选取甘油作为研究对象。溅射过程流场图像^[11]与推力性能曲线的对比如图 6 所示。图中横轴上具体时刻对应的流场演化瞬间图像由标示线连接给出,曲线为纵轴推力加载过程曲线。

从推力曲线上来看,第一个推力峰值出现在激光脉冲到达工质表面 $5.5 \mu\text{s}$ 时刻, $12.5 \mu\text{s}$ 时刻下降为零,

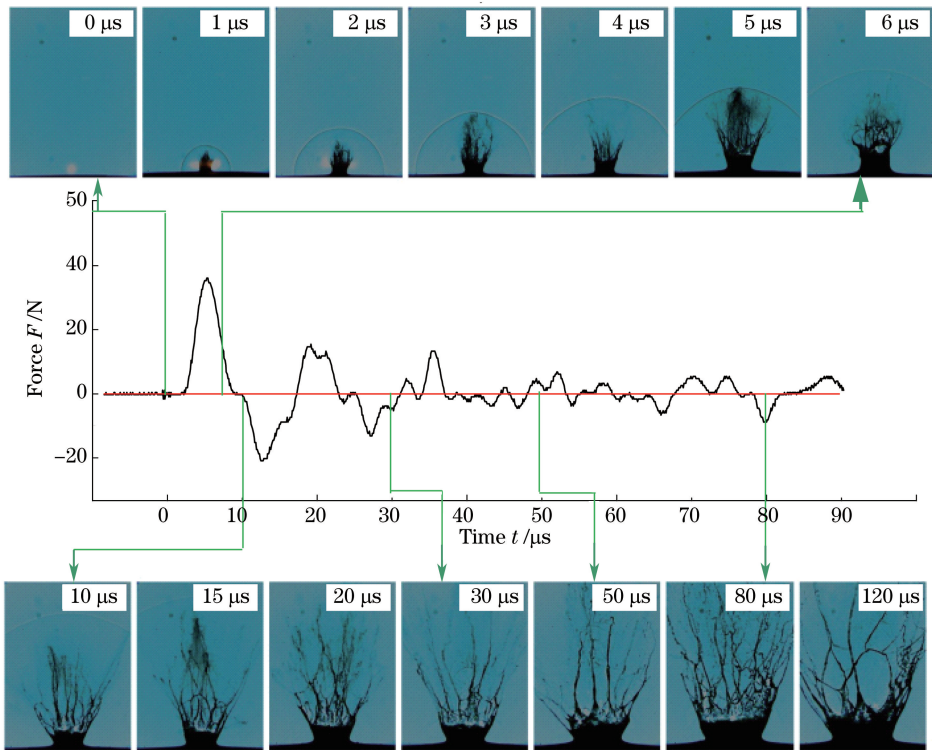


图 6 激光烧蚀甘油的溅射过程与推力曲线的对照图

Fig. 6 Contrast between splash process and thrust curve in laser ablation of glycerol

第一个峰值所形成的冲量大小为 $1.01 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{s}$, $12.5 \mu\text{s}$ 以后振荡过程形成的冲量大小为 $5.48 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}$ 。

由图 6 可以看到,激光到达液体靶面,前 $2 \mu\text{s}$ 内有较微弱的闪光(高温等离子体电磁辐射),并伴有冲击波;溅射射流的顶端呈雾状,其速度接近冲击波速度。 $5 \mu\text{s}$ 后大量未参与烧蚀的工质随雾状射流喷出,速度较高;射流中部为细丝状,射流底部为大量牵连液体。 $12 \mu\text{s}$ 以后,射流顶端的雾状液滴消失,喷射以细丝状为主,且速度较低。对比推力曲线,此时正向的推力曲线下降至零值附近。选取 $12 \mu\text{s}$ 作为分界点,对 $12 \mu\text{s}$ 前、后的推力分别进行积分,可得到两部分的冲量。采用图像处理的方法,得到不同时刻喷射状态对应的喷射物体的质量。喷射物的质量分数是指某一时刻当前喷射物的质量占整个喷射过程的喷射物总质量的百分比。对比喷射物的质量分数和冲量贡献大小,结果如图 7 所示。

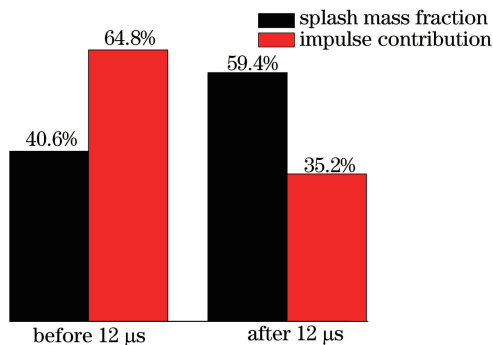


图 7 第一峰值结束前后喷射产物质量分数和冲量贡献大小对照

Fig. 7 Contrast between ablation mass fraction and impulse contribution before and after the first thrust peak end

由图 7 可知, $12 \mu\text{s}$ 前的喷射物体的质量分数为 40.6% ,冲量贡献占总冲量的 64.8% ; $12 \mu\text{s}$ 后喷射物体的质量分数为 59.4% ,冲量贡献仅为 35.2% 。液体大量溅射造成的工质损失占烧蚀质量迁移总量的 90% 以上,其余不到 10% 的迁移量主要是液体击穿、蒸发气化和分解等造成的^[4]。通过图像处理获得的只是可见的溅射物体的质量分数,考虑所有烧蚀产物的质量分数和冲量贡献,其结果应为 $12 \mu\text{s}$ 之前 46.5% 烧蚀质量的冲量贡献达到 64.8% ,随后 53.5% 的烧蚀质量的冲量贡献为 35.2% 。另外,从喷射液滴速度分析,前一阶

段是高速喷射的雾状液滴,其速度和冲击波速度相当,1 μs 以内可达 1000 m/s 以上;后续大量液体的喷射十分缓慢,持续时间达 1 ms,速度小于 10 m/s,由此可见溅射过程形成的冲量非常小。

当激光到达液体表面后,激光能量沉积带来的热效应使液体发生热膨胀,随着能量的进一步沉积,液体发生气化,产生内部气化压,开始形成推力耦合;当激光能量达到液态工质的击穿阈值后,液体被击穿产生等离子体,等离子体迅速吸收剩余激光能量以极高的速度向外膨胀,对液面施加压力,进一步形成力学效应。分析表明,对于激光烧蚀液体工质产生的冲量,贡献较大的是等离子体的膨胀和工质气化,二者对冲量的贡献比例与液体对激光的吸收相关。烧蚀液体的溅射后期对冲量贡献非常小,后期损失了大部分液态工质,大量低速度的质量迁移形成了较低的比冲,严重影响了烧蚀效率。另外,从应用角度来看,溅射对光学器件会造成严重污染,降低推进性能,影响推力器的集成。因此,在以液体为工质的激光烧蚀推进设计中,最为关键的环节就是避免或抑制第一推力峰值以后的溅射行为。

5 结 论

以纳秒脉宽 YAG 激光器作为能量注入源,分别对 GAP、单推-3、甘油和乙醇等典型的属于不同属性的液态工质进行了碳掺杂的激光烧蚀实验,研究了激光烧蚀诱发溅射过程及其与推力性能之间的关系。结果表明,在激光烧蚀碳掺杂液态工质过程中,溅射行为与推力特性密切相关。溅射初期的高速喷射过程是推力形成的主要阶段,后期的低速质量迁移对推力贡献不大,但会引起较大的质量消耗。推力加载过程的第一个峰值对应初期的高速溅射过程;在不同因素影响下,第一峰值过后振荡阶段的推力性能差别不大,其对应后期的低速溅射过程,该过程效率较低,在实际操作中应该抑制。以碳掺杂甘油为例,典型的实验数据为:12 μs 之前消耗 46.5% 的烧蚀质量,冲量贡献达到 64.8%;随后 53.5% 的烧蚀质量的冲量贡献为 35.2%。

参 考 文 献

- [1] Zhang Nan, Xu Zhijun, Zhu Xiaonong, *et al.* Laser propulsion technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1025-1037.
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.
- [2] Phipps C R. Laser ablation and its applications[M]. New York: Springer, 2007: 407-434.
- [3] Ye Jifei, Hong Yanji. Plume field evolution characteristics of the laser micro ablation for solid target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 47-51.
叶继飞, 洪延姬. 激光微烧蚀固体靶材羽流场演化特性[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 47-51.
- [4] Shigeaki U, Masafumi B. Characterization of liquid propellant for improved LOTV mission[C]. *Beamed Energy Propulsion: First International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2003, 664: 214-222.
- [5] Sinko J E, Pakhomov A V. Laser propulsion with liquid propellants Part I: An overview[C]. *Beamed Energy Propulsion: First International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2008, 997: 195.
- [6] Fardel R, Urech L, Lippert T, *et al.* Laser ablation of energetic polymer solutions: Effect of viscosity and fluence on the splashing behavior[J]. *Applied Physics A*, 2009, 94(3): 657-665.
- [7] Phipps C R, James R L, Helgeson W. Liquid-fueled, laser-powered, *N*-class thrust space engine with variable specific impulse[C]. *Beamed Energy Propulsion, Fifth International Symposium*, 2007, 997: 222-231.
- [8] Ye Jifei, Hong Yanji. Laser interference differential measurement of micro impulse based on torsion balance[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(6): 990-994.
叶继飞, 洪延姬. 基于扭秤的激光干涉差动测量微小冲量方法[J]. *应用光学*, 2013, 34(6): 990-994.
- [9] Sinko J, Kodgis L, Porter S, *et al.* Ablation of liquids for laser propulsion with TEA CO₂ laser[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2005.
- [10] Cui Cunyan, Hong Yanji, Wen Ming, *et al.* Analysis for mechanism of cavitation produced by CO₂ laser-generated ablation of the surface of water[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 31(1): 115-118.
崔村燕, 洪延姬, 文 明, 等. CO₂ 激光烧蚀水所形成气蚀空穴机理研究[J]. *推进技术*, 2010, 31(1): 115-118.
- [11] Ye J F, Hong Y J, Li N L. Splash generation and evolution in the laser ablation with liquid working substance[C]. *Optical Imaging, Remote Sensing, and Laser-Matter Interaction*, 2013, 9142: 914218.