

不同辅助启动材料对激光推进器冲量的影响^{*}

胡春波, 何国强, 程 翔, 李宇飞, 周战锋

(西北工业大学 航天学院固体火箭发动机燃烧、热结构与内流场国防科技重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为了获得不同辅助材料对激光推进器工作性能的影响, 利用高速运动分析仪测量冲击摆的最大摆角, 根据摆角确定激光推进器的冲量, 测量了不同辅助启动材料下激光推进器冲量。在压强为 0.1 MPa 时, POM 辅助下激光推进器冲量为 4.6 mN·s, 是未辅助时的 2.496 倍。试验结果表明: 大部分辅助启动能够明显地增强等离子体的能量吸收率, 高分子材料 POM 的辅助启动效果最佳; 随着环境压强的下降, 辅助启动的作用更加重要。

关键词: 激光推进器; 启动; 比冲; 性能

中图分类号: TN249 V439 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2007) 05-0475-04

Influence of different aid initiation materials on laser thruster impulse

HU Chun-bo HE Guo-qiang CHENG Xiang LI Yu-fei ZHOU Zhan-feng

(Coll. of Astronautics National Key Lab. of Combustion, Flow and Thermo-Structure
Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract In order to investigate the influence of different aid initiation materials on laser thruster, the maximum swing angle was measured by using the swing track screened with Hi-spec camera. Based on the swing angle, impulse of laser thruster was obtained using different aid initiation materials. When ambient pressure is 0.1 MPa, the impulse of laser thruster with the aid of POM is 4.6 mN·s and this is 2.496 times of that without aid initiation. The result shows that most of the aid initiation materials can increase the plasma. If the aid initiation material is POM, the laser thruster impulse is the largest. The aid initiation becomes more and more important as the ambient pressure decreases.

Key words Laser thruster; Starting; Specific impulse; Performance

1 引 言

根据地面实验研究可知, 当吸气式激光推进器飞行高度超过 20 km 时, 由于空气压强较低, 激光推进器性能迅速下降, 此时有可能出现激光推进器不能正常工作现象, 这时要考虑用辅助方法来提高激光推进器的性能。

SchallW olfgang O 研究了辅助启动对激光推进器性能的影响^[1], 所采用的辅助启动材料是直径 2 mm, 长 20 mm 的金属棒; Jun Lin^[2]等采用 TEA CO₂ 激光器进行了空气的低压环境下不同材料的等离子体冲击波速度测量, 研究了辅助启动材料对于等离子体冲击波强度的影响^[2]; PirriA N 等采用重复脉冲激光进行了不同能量下空气的冲量耦合系数实验研

究^[3], 研究了能量变化对于空气击穿阈值的影响; Kazuhisa Fujita^[4]等人对丙三醇为推进工质下激光推进器性能进行了实验研究^[4]; 李修乾, 洪延姬等进行了不同能量的各种气体冲量耦合系数测量研究^[5]; 邹彪等设计出了一种声学测量装置实验装备^[6], 实验加入金属靶材料, 测量并比较了加入各种材料后的激光等离子体能量。

虽然人们在激光推进方面作了不少研究工作, 但有关激光推进器辅助启动方法研究仍很欠缺。激光推进器辅助启动方法有多种, 包括电子源、双脉冲激光、气态工质、液态工质、固态材料等。本文以点聚焦激光推进器为研究对象, 用悬摆法, 研究 Cu, Al, POM, PP, PA66, PTFE 和 PA12 等不同材料作用下的激光推进器冲量变化情况, 并对辅助启动效果进行分

* 收稿日期: 2007-04-25 修订日期: 2007-06-15。

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328)。

作者简介: 胡春波 (1966—), 男, 博士, 教授, 研究领域为航天器推进技术。

析研究。

2 实验装置及测量方法

本文试验系统由激光器、真空舱、激光推进器、高速运动分析仪、冲击摆测量系统构成。试验采用 TEA CO_2 激光器, 脉宽为 200 ns, 波长为 10.64 μm , 单脉冲能量在 80 J 左右波动, 输出光斑近似为椭圆, 短轴长为 50 mm, 长轴长度为 60 mm。实验使用点聚焦抛物线型激光推进器, 如图 1 所示。辅助启动材料包括金属 (Cu, Al) 与高分子材料 (PP, POM 等), 如图 2 所示。

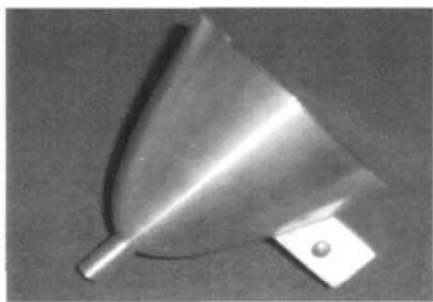


Fig 1 Experimental model

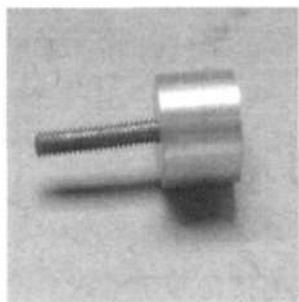


Fig. 2 Aid initiation material

试验中, 利用编码器和示波器进行复摆系统固有参数的标定, 采用高速运动分析仪测量方法完成脉冲激光瞬态作用冲击加载时最大摆角的测量。E6B2-2000型编码器的极限计量精度为 0.045°, 示波器采样频率为 200 MHz, HiSpec EM 1012/2 高速运动分析仪, 最高摄像速度为 1.2×10^4 帧/秒, 回播速度分别为 1, 2, 3, 5, 8, 25, 50 帧/秒, 利用它拍摄单次激光脉冲下复摆的运动情况, 通过采集到的图片来获得冲击摆的最大摆角值。具体的测试方法参见文献 [5]。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果与分析

实验中真空舱内环境气体压强在 $10^3 \sim 10^5$ Pa 范围内变化。在相同能量的单脉冲 TEA CO_2 激光作用

下, 测量了带有辅助启动材料的激光推进器冲击摆摆角的变化情况。在每种实验工况下均进行了 2 次实验, 实验重复性良好。图 3 是 1 个大气压下不同辅助启动材料对激光推进器最大摆角的影响, 图 4 是 1 个大气压下不同辅助启动材料对激光推进器冲量的影响。在本文的实验条件下, POM 辅助下激光推进器冲量是未辅助时的 2.496 倍, Al 辅助下激光推进器冲量是未辅助时的 1.144 倍, PA12 辅助下激光推进器冲量是未辅助时的 1.603 倍, Cu 辅助下激光推进器冲量是未辅助时的 1.026 倍, PA66 辅助下激光推进器冲量是未辅助时的 0.633 倍。

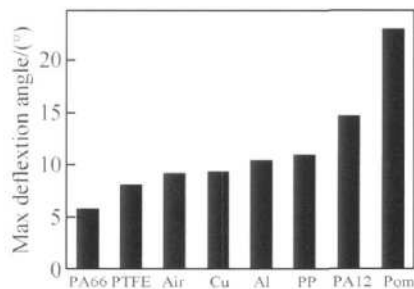


Fig 3 Maximum deflection angle variety with different aid initiate material in 0.1 MPa

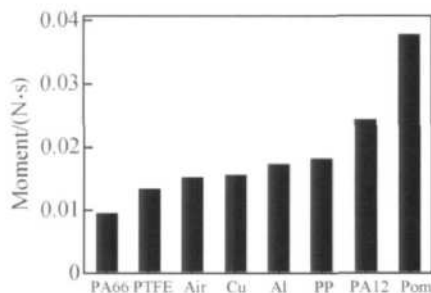


Fig 4 Impulse of laser thruster variety with different aid initiate material in 0.1 MPa

从图中可以看出, 辅助启动效果最好的金属与高分子材料分别是 Al 和 POM, 两者相比较, POM 效果是所有材料中最好的。原因是在能量密度大于击穿阈值的前提下, POM 对于二氧化碳激光器的激光波长具有最大的吸收系数, 相同的激光能量作用下, 由于各种辅助材料对于激光能量的吸收效果不同, 激光能量转化为爆轰波的能量转化效率也不同, 激光推进器所获得的冲量随之不同, 因此不同辅助启动材料下激光推进冲量耦合系数的大小差别很大。

高分子材料 PA66 和 PTFE 不仅对激光推进器性能没有起到有效的辅助启动作用, 并且对激光推进器性能还造成了影响, 主要原因是辅助启动材料除了对激光击穿工质产生爆轰波有影响外, 实验中辅助启动

材料结构也对激光在推进器中聚焦效果产生了消极影响。激光推进器辅助启动系统中利用固态材料时,要注意辅助系统结构对激光聚焦系统的影响。

从以上研究中发现 Al 和 POM 对激光推进器辅助启动效果最好,下面针对这两种辅助启动材料,研究不同环境压强下,辅助启动对激光推进器性能的影响。图 5、6 分别是 Al、POM 为辅助启动材料下激光推进器最大摆角和冲量随压强的变化。图中实点是实验测量所获得的数据点。

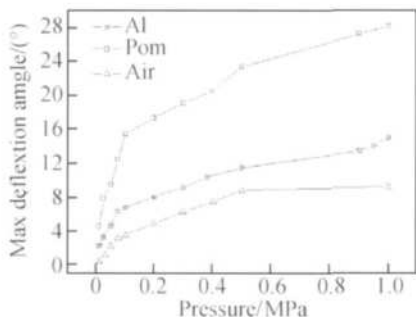


Fig 5 Maximum deflection angle variety with ambient pressure

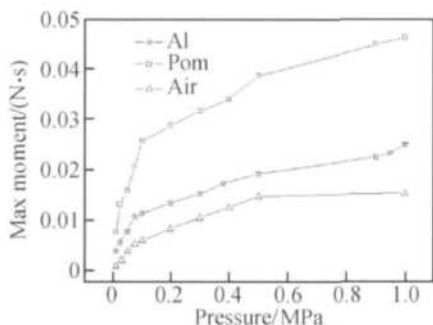


Fig 6 Impulse of laser thruster variety with ambient pressure

从图 5、6 中可以看出,不同的环境压强下,辅助启动材料为 POM 的时激光推进器获得的冲量要高于辅助材料 Al 以及没有辅助启动的冲量。在压强为 0.1 MPa 时, POM 辅助下激光推进器冲量最大,数值约为 46 mN·s;金属中, Al 辅助下激光推进器的冲量最大,数值约为 25 mN·s。

随着环境压强的减小,在 Al、POM 等材料辅助启动作用下激光推进器获得的冲量都减小。比较来看,

Al 减小幅度低于 POM,但是相比较而言,由于辅助启动材料的存在,冲击摆摆角的减小远小于没有辅助启动材料的存在,这表明不同环境压强下辅助启动的效果是存在的,而且影响很大。

3.2 误差分析

根据误差理论,激光推进器冲量的相对误差表达式为

$$\left| \frac{dI}{I} \right| = \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{dm}{\sqrt{m}} \right| + \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{dJ}{\sqrt{J}} \right| + \left| \frac{\theta \cdot \sin \theta}{2(1 - \cos \theta)} \right| \cdot \left| \frac{d\theta}{\theta} \right| + \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{dL}{L^{\frac{3}{2}}} \right|$$

式中 I 为激光推进器冲量, m 为摆动系统总质量, J 为摆动系统转动惯量, θ 为最大摆角, L 为摆杆长度。

根据实验测量认为摆杆长度误差为 1 mm 左右,激光推进器质量误差为 0.1 g。由于条件限制,这里忽略不同真空度情况下的激光推进器气体阻力。各个直接测量值及其测量误差的大小如表 1 所示,表 1 中摆角 θ 为在相同激光能量和 1 个大气压强下的最大摆角,从表 1 可以看出, Al 为辅助启动材料下激光推进器的冲量误差为 4.18%, 相对较大;而 Pom 为辅助启动材料下激光推进器的冲量误差为 2.36%, 相对较小。

从计算过程中发现:转动惯量的误差极小,大约为 0.3%;能量的误差为 1.4%;摆角的测量误差占激光推进器冲量测量误差的 90% 以上。可以认为,影响激光推进器冲量测量相对误差的主要因素是摆角的测量误差,摆角越大,其测量误差对实验结果的影响越小。

4 结 论

(1) 对比所有的辅助材料,辅助材料为 POM 的时候激光推进器获得的冲量最大,辅助材料为 Al 的时候,激光推进器获得冲量大于 Cu 的冲量。

(2) 在加入辅助材料 Al、POM 后,激光推进器获得的冲量都是随着环境的压力的下降而下降,并且两相比较,辅助材料为 POM 时随压强下降的趋势越来越快,不同环境压强下辅助启动的加入明显改善了激光推进器的性能。

Table 1 Experiment measurement errors

	$J/(g \cdot m^2)$	$dJ/(g \cdot m^2)$	$\theta/(^\circ)$	$d\theta/(^\circ)$	L/mm	dL/mm	m/g	dm/g	dI/I
Al	2.126	0.1	15	0.1	200	1	82.89	0.1	0.0418
POM			28.08				7.2	8.6	0.0236

$$E'_c > 0.7J$$

即,除了激光能量外,固体推进剂所含化学能在作用过程中也起了重要作用,超过激光能量的 63%。

(2) 含能工质的能量利用率

依据固体含能工质的热值(用 Q 表示),消耗掉的固体推进剂完全释放产生的反应能量可表示为

$$E_c = \Delta m \cdot Q$$

代入试验参数可得 E_c 为 3.32 J

与 E'_c 相比较可知,固体推进剂所含的内能的利用率至少为 20%。

3.5 与固体火箭推进方式的比较

由上述结果可知,固体推进剂在脉冲激发下,其产生的动能耦合系数可以达到 40% 以上。

为了便于比较,同样可定义固体火箭推进方式下的动能耦合系数如下

$$\eta'_B = \frac{\Delta m \cdot v_E^2}{2 \cdot E_c} = \frac{\Delta m \cdot I_{sp}^2}{2 \cdot \Delta m \cdot Q} = \frac{I_{sp}^2}{2 \cdot Q}$$

计算可得 η'_B 为 22.5%。

因此,可以看出,在激光能量作用下,固体推进剂的动能耦合转换系数可以得到大幅度提高。

4 结 论

(1) 从测试结果可知,与固体火箭推进方式相比,在脉冲激光作用下,含能工质可获得的比冲高的多,并且其冲量耦合系数可达 400 μN 以上。

(2) 固体含能工质的化学能在固体推进剂与脉

冲激光作用过程中具有重要的作用,是入射激光能量的 63%。

(3) 在激光作用下,固体含能工质的内能利用率至少为 20%。

(4) 与固体推进剂火箭推进方式相比较,在外来激光推进方式,可以有效提高固体推进剂的动能耦合系数,约是火箭推进方式的 1.8 倍。

(5) 对固体含能工质与脉冲激光作用机理研究还需深入开展,以便更明确的揭示能量转换及作用过程,研究影响能量利用率的因素和提高途径,提高其推进效率。

参考文献:

- [1] Phipps Claude R. A laser-ablation-based micro-rocket [R]. AIAA 2002-2152
- [2] Pakhomov A V. Specific impulse study of ablative laser propulsion [R]. AIAA 2001-3663
- [3] 孙承伟. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [4] 张钢锤, 叶定友, 南宝江. 固体推进剂与激光作用规律初步研究 [C]. 中国力学学会学术大会, 2005
- [5] Mary Nehls Ablative laser propulsion using multilayered material [C]. The 33rd Plasmadynamics and Lasers Conference, 2002

(编辑: 郭振伶)

(上接第 477 页)

注: 本文的实验工作是在装备指挥技术学院的激光推进实验室完成的。

参考文献:

- [1] SchallW olfgang O., EckelH ans A lbert, W alther Sebas - tian Lightcraft moment measurements under vacuum [R]. Special Report AFRLPR-ED-TR-2002~ 0044
- [2] Lin Jun, Jeremy Hughes, Pakhomov Andrew V. Experimental study on coupling coefficient for propulsion on TEA CO₂ laser [C]. Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion, American, 2004 122~ 128
- [3] Pirri A N, Nebolsine P E. Laser propulsion the early

years [C]. First International Symposium on Beamed Energy Propulsion, America, 2003 11~ 21.

- [4] Kazuhisa Fujita, Masakatsu Nakano, Shigeaki Uchida Impulse generation mechanism in glycerin propellant laser thruster [S]. Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion, American, 2004 146~ 151.
- [5] 李修乾, 洪延姬, 何国强, 等. 悬摆法测量气体推进剂激光推进冲量耦合系数 [J]. 强激光与粒子束, 2006 18 (2).
- [6] 邹彪, 陈建平, 倪晓武. 声学法测量激光等离子体能量的研究 [J]. 光电子·激光, 2000 11(5).

(编辑: 郭振伶)