

纳秒激光烧蚀液态工质冲量耦合特性研究

叶继飞, 洪延姬, 李南雷

(装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 激光微推进技术是利用激光与物质相互作用产生的力学效应实现推进的一种新的激光动力的电推进技术。液态工质是激光微推进工质选择的最新热点, 其与激光相互作用所形成的冲量耦合特性决定了液态工质激光微推进性能的好坏。利用激光干涉差动测量微小冲量的扭摆装置, 以聚叠氮缩水甘油醚(GAP)、单组元凝胶推进剂(单推-3)和甘油为工质, 测量注入不同激光能量条件下, 所形成的冲量和冲量耦合系数大小, 进而针对冲量耦合性能较好的 GAP 工质, 测量了比冲和烧蚀效率。结果表明: 液态 GAP 冲量耦合特性较好, 冲量耦合系数一般在 $500 \mu\text{N/W}$ 以上, 最高可达 $1493.0 \mu\text{N/W}$, 但是, 比冲和烧蚀效率较低, 比冲最高仅为 140 s , 烧蚀效率为 37.6% 。

关键词: 激光微推进; 比冲; 冲量耦合系数; 烧蚀效率

中图分类号: TN248.1; V439.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0102-05

Impulse coupling performance of liquid propellant with ns laser micro ablation

Ye Jifei, Hong Yanji, Li Nanlei

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

Abstract: Laser micro-propulsion is a new laser-powered electric propulsion technology, which uses the mechanical effect generated by laser-matter interaction. Liquid as propellant is the latest points of interest. Impulse coupling characteristics of interaction between liquid and laser decided the merits of propulsive performance. Torsion pendulum device was used to measure the micro-impulse. Monopropellant gel propellant, GAP and glycerol were used as propellant. Impulse and impulse coupling coefficient were measured under different laser energy. GAP obtained higher impulse coupling coefficient and was further studied. The results show that impulse coupling characteristics of GAP are better. Impulse coupling coefficient is generally greater than $500 \mu\text{N/W}$, maximum is $1493.0 \mu\text{N/W}$. However, specific impulse and ablation efficiency are relatively low. Maximum specific impulse is 140 s ; maximum ablation efficiency is 37.6% .

Key words: laser micro propulsion; specific impulse; impulse coupling coefficient; ablation efficiency

收稿日期: 2014-05-11; 修订日期: 2014-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(11102234)

作者简介: 叶继飞(1981-), 男, 博士, 主要从事先进推进技术、复杂流场光学测量方面的研究工作。Email: yjf1981@163.com

0 引言

激光微推进技术是激光推进技术的重要分支,其推进机理是利用激光与物质相互作用产生的冲量耦合效应实现推进的。激光微推进性能主要由激光烧蚀工质的冲量耦合特性决定,激光烧蚀冲量耦合特性一直是激光推进领域讨论的焦点^[1]。

液态工质是激光微推进工质选材的最新研究热点。继固体靶带工质毫秒脉宽激光等离子体微推力器问世以来,激光微推进领域内逐渐将焦点转移到纳秒脉宽激光烧蚀液态工质的推力器的研究上来。Shigeaki Uchida 等人以二乙醚(Diethyl ether)、乙二醇(ethylene glycol)等低级醇为工质,研究工质粘性对推进性能的影响^[2];Romain Fardel 等人针对激光烧蚀液态工质的飞溅现象进行了研究,发现工质的飞溅会极大降低烧蚀效率^[3]。Phipps 等人提出了最新的液态工质激光等离子体为推力器的概念设计,认为纳秒脉宽激光烧蚀液态工质是激光微推力器未来的发展方向^[4]。

文中主要关注最热门的高分子聚合物靶材的激光烧蚀冲量耦合特性,以液态聚叠氮缩水甘油醚(GAP)、凝胶推进剂(单推-3)和甘油等高分子聚合物为烧蚀工质,研究不同激光能量密度注入条件下,形成的冲量、冲量耦合系数和比冲等冲量耦合性能的变化规律,以期为新世代液态工质激光微推力器的设计提供指导和参考。

1 测量原理和方法

评价冲量耦合特性的三个重要性能参数是冲量、冲量耦合系数和比冲。冲量是一个积分量,表征整个喷射过程所有不同物态粒子获得动能的反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,数值上等于冲量与注入激光能量的比值;比冲反映的是在烧蚀过程中工质提供冲量能力的大小,获得同样冲量所需要的工质质量越小,比冲越高,数值上等于冲量与烧蚀质量的比值。

由上述指标的表征含义可知,最重要的测量参量是冲量,而能量和烧蚀质量的测量可以采用能量计和微量天平直接测量。基于扭摆构建了一套激光干涉差动测量扭摆转角的微冲量测量装置。采用迈

克尔逊干涉激光光路差动测量扭摆横梁的转动角度,将扭摆转角的变化转化为干涉条纹的位移^[5]。假如测得干涉条纹的数目为 ΔN ,则扭摆横梁的转角 θ 为:

$$\theta = \Delta N \frac{\lambda}{2a} \quad (1)$$

其中, a 为两个角锥棱镜间的距离。冲量 I 与扭摆受到作用力后,所形成的最大摆动角度 θ_{\max} 有关,具体关系如下:

$$I = \frac{2J\omega_n}{D} \exp\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) \theta_{\max} \quad (2)$$

式中: J 为扭摆的转动惯量; D 为扭摆受力点与扭摆转轴间的距离; ω_n 为扭摆无阻尼固有振动频率; ζ 为阻尼比。参数 J 、 ω_n 和 ζ 通过标定获得, D 可以直接测量得到。所设计的扭摆冲量测量范围为 $10^{-8} \sim 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{s}$, 不确定度为 2.6%。

2 实验装置与条件

(1) 入射激光条件

激光能量源为 YAG 激光器,波长 1 064 nm,脉宽 8 ns,最大单脉冲能量为 350 mJ,出光口光束直径约 8 mm,激光器由脉冲氙灯泵浦,通过控制调 Q 开关来准确控制时序。激光输出能量的调节可以通过控制放电电压的大小来调整,也可以通过调节出光口的偏振片方向进行调节。工作时采用单脉冲模式,一次输出一个脉冲,光路分出一小部分(16%)进行能量监测,剩余大部分经过光学透镜进行聚焦来形成较高的烧蚀功率密度,聚焦后光斑直径约为 1 mm,入射激光功率密度可达 $10^8 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 量级。

(2) 所选择的烧蚀工质

采用了 3 种不同组分和配比的液体样品作为烧蚀工质,所选择的工质中主要考虑了 1 种领域内公认的烧蚀推进性能优异的含能高分子聚合物聚叠氮缩水甘油醚(GAP)^[6],1 种成熟的火箭发动机凝胶推进剂单推-3(DT-3)^[7],1 种常见的粘性较大的低级醇丙三醇(甘油, Glycerin)。其中,含能工质的烧蚀推进性能可以类比,甘油作为一种常见醇类液态化合物作为性能参考和对比。3 种样品对于 YAG 激光器 1 064 nm 波长的激光吸收都不是很好,大部分激光透射过去,吸收较少,这样使得烧蚀产生的冲量很不稳定,随机性比较大,不利于重复实验。因此,为了增

强液态工质对激光的吸收,采用了碳粉掺杂的方法,在工质样品中掺入一定量的碳粉,实现对激光较为稳定的吸收,根据经验来看,掺入 70%左右的碳粉较为合适。另外,需要说明的是,由于 GAP 和单推-3 的粘性较大,不利于掺杂,因此,分别采用了乙酸乙酯和低级醇作为溶剂将工质稀释后进行掺杂。

3 结果与分析

(1) 不同工质的冲量

通过扭摆测量激光烧蚀 3 种液体工质的烧蚀冲量,得到入射激光能量密度与烧蚀获得冲量的数据如图 1 所示。

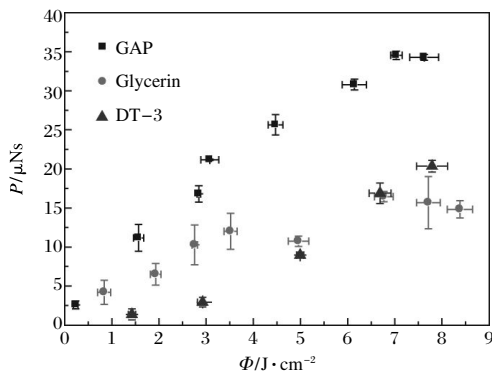


图 1 不同激光能量密度对应的冲量大小

Fig. 1 Impulse vs laser energy density

冲量是获得稳定而优异的激光烧蚀推进性能的基础,就所获得的数据,有如下几个方面认识。

1) 冲量的变化趋势

整体来看,随着激光能量密度的增加,冲量呈上升趋势,能量越大产生的冲量越大。GAP 材料随着能量注入的增加,冲量增加的趋势最快;DT-3 材料冲量增加的趋势也较为明显,基本上与 GAP 增加的趋势相同;甘油获得冲量的增加趋势相对较缓慢,特别是当能量较大时,冲量增加趋势趋于平缓,此时冲量随着能量的增加变化不明显。

对于某种特定冲量耦合特性而言,更多能量的注入必定使得冲量更大,只是在不同的能量注入情况下,获得冲量的效率不同,从变化趋势上来看,在能量较低时,冲量增加较快,冲量耦合效率最高,当能量较高时,冲量增加放缓,冲量耦合效率降低。

2) 冲量的大小

整个实验数据中,获得的最大冲量为 $34.5 \mu\text{N}\cdot\text{s}$

(GAP),最小冲量为 $1.4 \mu\text{N}\cdot\text{s}$ (DT-3)。冲量的大小决定了所能提供的推进性能的水平,从实验数据上来看,冲量大小在 $10^{-6} \text{N}\cdot\text{s}$ 到 $10^{-5} \text{N}\cdot\text{s}$ 量级,因此,激光微推进的冲量元较小,相应的同样功率条件下,推力水平较低,适合小型空间平台的姿轨控和高精度微小冲量精确控制的空间任务。

整体来看,同样能量注入下,GAP 能够获得更大的冲量。一种原因是由于激光注入能量转化为动能,另外含能材料分子键断裂所释放的化学能也起到一定的作用,因此,同样的激光能量注入时,含能材料较惰性材料更容易获得较大的冲量。对于甘油和 DT-3,能量较小时甘油冲量占上峰,随着能量的增加 DT-3 逐渐超过甘油,分析原因是由于 DT-3 自身含能裂解释放的阈值较高,在能量较小时自身化学能释放不完全,随着能量的增加化学能释放起到更大的作用,由此也可判断,GAP 较 DT-3 更为活跃,化学能释放阈值较低。

3) 冲量的重复性

冲量的重复性决定了推进性能是否稳定,也是一种材料能否胜任航天任务工质选材的关键。从数据来看,GAP 和 DT-3 所获得的冲量重复性较好,GAP 获得的最大绝对误差为 $1.7 \mu\text{N}\cdot\text{s}$,最大相对误差 19.6%;DT-3 获得的最大绝对误差为 $1.3 \mu\text{N}\cdot\text{s}$,最大相对误差为 51%;而甘油的实验数据直观即可发现,误差较 GAP 和 DT-3 都要大得多。

材料对激光的吸收的稳定性决定了冲量的重复性,冲量重复性不好,说明材料对激光的吸收不稳定,容易受到随机因素的影响,特别是在烧蚀过程中形成的“飞溅”效应,跟液体的粘性有很大关系^[3],因此,粘性较小的甘油是不适合作为推进剂使用的。另外,由于激光器自身出光的不确定性导致冲量的结果引入一定的误差。

(2) 不同工质的冲量耦合系数

根据上述冲量数据,结合监测能量来还原参与冲量耦合的激光能量大小,计算冲量耦合系数,得到入射激光能量密度与冲量耦合系数的数据如图 2 所示。冲量耦合系数表征了入射激光能量所能诱发产生冲量的能力,其很大程度上决定与工质的特性,因此,考评冲量耦合特性最重要的是研究冲量耦合系数的变化规律。

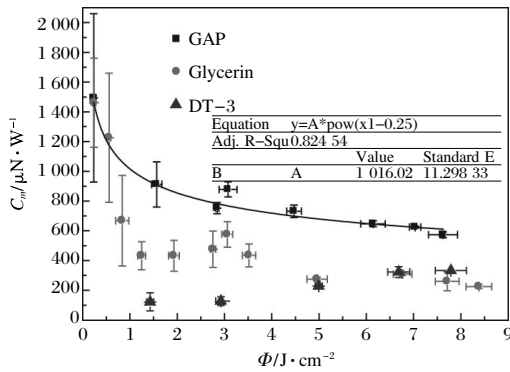


图 2 不同激光能量密度对应的冲量耦合系数

Fig.2 Impulse coupling coefficient vs laser energy density

根据 Phipps 定标律,在完全电离面吸收情况下,冲量耦合系数 C_m 与入射激光参数间关系如下^[8]:

$$C_m = 5.83 \Psi^{9/16} A^{-1/8} (I \lambda \sqrt{\tau})^{-1/4} \quad (3)$$

式中: Ψ 为比例系数; A 为原子量; I 为激光强度,单位为 W/cm^2 ; λ 为激光波长,单位为 cm ; τ 为激光辐照时间(激光脉宽),单位为 s 。对于文中的给定材料与激光条件可知,冲量耦合系数与入射激光能量密度 Φ 的关系如下:

$$C_m = B \cdot \Phi^{-1/4} \quad (4)$$

其中, B 对某特定材料与激光而言为一确定常数。将 GAP 数据点用公式(4)进行拟合,得到常数 B 为 1016.02。分别就三种材料冲量耦合系数实验结果分析如下:

1) GAP 冲量耦合系数实验结果分析

GAP 材料冲量耦合系数整体随激光能量注入的增加呈下降趋势,且变化趋势较平稳,重复性较好。冲量耦合系数最大值可达 $1493.0 \mu N/W$,此时对应的误差也最大,相对误差达到 37.9%,最小值 $573.4 \mu N/W$,此时对应的相对误差仅为 3.5%。在激光注入能量较小时,冲量耦合系数的测量误差较大,这是由于激光能量小时对应的冲量较小,冲量测量的误差相对较大,同时较小的激光能量作为分母,将误差放大更多,因此,在激光能量较小时,获得的推进性能不易评估,所以理想的工况下,希望激光注入能量较大,由数据可知,能量密度大于 $4 J/cm^2$ 时,冲量耦合系数在 $500 \sim 800 \mu N/W$ 之间,相对误差小于 5%。

从冲量耦合系数的整体数据数值来看,大部分数值在 $500 \sim 1000 \mu N/W$ 之间,整体下降趋势比较平缓,随着注入激光能量的进一步增加,冲量耦合系数

下降不多,基本能够保证在 $100 \mu N/W$ 量级。对于此种性能的工质而言,冲量耦合系数在 $100 \sim 1000 \mu N/W$ 之间推进性能稳定,那么,对于 $1 W$ 的连续激光能量注入,即可获得 $100 \sim 1000 \mu N$ 的平均推力,这样的推力水平是比较适合微小卫星姿轨控需求的。

2) 甘油冲量耦合系数实验结果分析

甘油的冲量耦合系数的变化整体来看随着激光注入能量的增加呈下降趋势,但是由于其烧蚀过程引起的“飞溅”现象比较明显,导致随机因素影响比较大,无论从冲量还是冲量耦合系数来看,数据的不确定度都比较大。甘油所获得冲量耦合系数较 GAP 而言要低,最小能够达到 $225.1 \mu N/W$,最大与 GAP 最大值相当,冲量耦合特性整体较 GAP 要低,分析原因是一方面是由于材料本身的特性,另外一方面主要是因为材料不含能,主要靠激光能量来转换成冲量,形成的冲量耦合系数相对含能材料 GAP 略低。

3) DT-3 冲量耦合系数实验结果分析

DT-3 的情况比较特殊,作为一种含能工质,其在激光注入能量较小时,并没有获得较好的推进性能,而当注入能量较大时,其冲量耦合系数略有提升。分析原因是,DT-3 材料获得的冲量较小,对激光的吸收较差,更多的激光没有形成有效的吸收,能量转化效率较低,材料不易受外来能量激发,或者说自身化学能释放所需的激发能量阈值较高,在较低的能量注入的情况下,没有形成较大的冲量,在能量注入较大时,所形成的冲量较惰性材料略高。与 GAP 相比,不适宜与激光进行能量耦合形成冲量,不适合作为推进剂工质。

(3) GAP 工质的推进性能

以上分析和评估初步确定 GAP 作为推进剂工质的基本性能是合适的。下面结合液态 GAP 工质的冲量和冲量耦合系数的变化规律以及各种因素的影响,综合分析上述结果来选取 GAP 工质的工况条件,在选定的工况条件下测量 GAP 工质的比冲和烧蚀效率,全面分析 GAP 工质推进性能。由于单次烧蚀质量较小,采用多次烧蚀测量总质量取平均的方法来间接得到单次烧蚀质量,并计算比冲。由于激光器输出的激光能量存在一定的不确定性,因此,只选择了 4 个典型能量下进行测量,测量结果比冲值如

图 3 所示, 最低为 2.5 J/cm^2 烧蚀时的 72 s , 最高是 8.0 J/cm^2 烧蚀时的 140 s 。

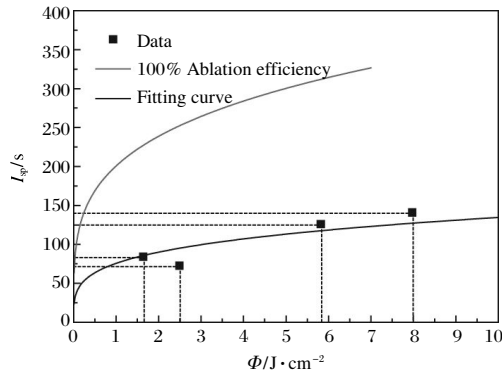


图 3 GAP 液体工质的比冲测量值

Fig.3 GAP specific impulse vs laser energy density

由冲量耦合系数 C_m 、比冲 I_{sp} 和烧蚀效率 η_{AB} 之间的关系可知^[9]:

$$C_m I_{sp} = \frac{2\eta_{AB}}{g_0} \approx 0.204\eta_{AB} (g_0 \text{ 取 } 9.8) \quad (5)$$

结合公式(4)可知,文中 GAP 材料的比冲为:

$$I_{sp} = C \cdot \Phi^{1/4} \quad (6)$$

其中, $C = 2.04 \times 10^5 \eta_{AB} / B$ 。由公式(6)根据所测量的比冲数据拟合得到曲线如图 3 中所示, 拟合曲线系数 C 为 75.7 , 由此核算烧蚀效率为 37.6% 。而假定烧蚀效率为 100% 情况下, 获得的比冲随激光注入能量变化曲线如图中上方曲线。可见, 实际获得的液态 GAP 的烧蚀效率是比较低的, 也即激光能量转化为工质的动能的效率较低, 尽管 GAP 材料自身含能也有贡献, 但大部分激光能量和自身含能还是被液态工质的溅射过程耗散掉了, 能量用于大分子团簇的液态工质整体加速, 这样的加速效果效率较低, 因此, 液体与固体 GAP 工质烧蚀推进性能完全不同, 根据文献报道, 固体 GAP 的烧蚀效率最高可达 360% ^[10]。液态工质烧蚀过程中的溅射过程对烧蚀推进性能影响非常大, 值得关注和研究。

4 结论

以纳秒脉宽 YAG 激光器作为能量注入源, 以激光干涉差动测量扭摆装置测量激光烧蚀产生的微小冲量, 针对 GAP、DT-3 和甘油三种不同属性的工质, 进行了激光烧蚀冲量耦合特性研究。结果表明, 液态 GAP 获得的冲量耦合特性最佳, 变化规律平

稳, 测量数据重复性较好, 推进性能能够覆盖所需的航天任务, 最适宜作为激光微推进工质选材。液态 GAP 工质激光微烧蚀冲量最高可达 $34.5 \mu\text{N} \cdot \text{s}$, 冲量耦合系数最高可达 $1493.0 \mu\text{N/W}$, 而比冲最高仅为 140 s , 烧蚀效率较低, 为 37.6% 。

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. (in Chinese)
- [2] Shigeaki U, Masafumi B. Characterization of liquid propellant for improved LOTV mission[C]//Beamed Energy Propulsion: First International Symposium on Beamed Energy Propulsion, 2003: 214–222.
- [3] Fardel R, Urech L, Lippert T, et al. Laser ablation of energetic polymer solutions: effect of viscosity and fluence on the splashing behavior [J]. *Appl Phys A*, 2009, 94: 657–665.
- [4] Phipps C R, James R L. Liquid-fueled, laser-powered, N-class thrust space engine with variable specific impulse[C]//Beamed Energy Propulsion, Fifth International Symposium, 2008: 222–231.
- [5] Ye Jifei, Hong Yanji. Laser interference differential measurement of micro impulse based on the torsion balance [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34 (6): 990–994. (in Chinese)
- [6] Lippert T, Hauer M, Phipps C R, et al. Fundamentals and applications of polymers designed for laser ablation [J]. *Appl Phys A*, 2003, 77: 259–264.
- [7] Zhao Yan, Xie Hongtao, Yuan Wei, et al. Research on preparation and properties of gel propellant DT-3 [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2010, 8 (2): 49–51. (in Chinese)
- [8] Phipps C R, Birkan M, Bohn W, et al. Review: laser-ablation propulsion [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(4): 609–637.
- [9] Phipps C R, Luke J R, Lippert T, et al. Micropropulsion using a laser ablation jet [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(6): 1000–1011.
- [10] Lippert T, David C, Hauer M, et al. Novel applications for laser ablation of photopolymers[J]. *Applied Surface Science*, 2002, 186: 14–23.