

透射式水工质的高耦合效率激光推进模式^{*}

张 翼¹, 鲁 欣¹, 郑志远^{1,2}, 刘 峰¹, 朱鹏飞¹, 李汉明^{1,3},
李玉同¹, 李英俊^{1,3}, 张 杰¹

(1. 中国科学院 物理研究所, 北京 100080 2. 中国地质大学 材料科学与工程学院, 北京 100083
3. 中国矿业大学, 北京 100083)

摘 要: 为了提高激光推进的耦合效率, 防止光学器件污染, 提出了透射式液体工质的激光推进模式。在这种推进模式中, Nd:YAG 固体激光器中产生的 450 mJ 7 ns 激光穿过透明的玻璃基底后, 与燃烧室中的液体推进剂相互作用, 产生的等离子体在玻璃基底、燃烧室和液体推进剂的约束下膨胀, 产生很高效率的动量转换, 使靶获得初速度。纯水和黑墨水分别被用作推进剂, 通过比较实验结果发现, 在这种模式中墨水比水更适合做推进剂。通过改变燃烧室的长度和孔径, 得到的耦合系数的最大值为 17 858.3 N/MW。

关键词: 激光推进; 液体推进剂; 耦合系数

中图分类号: V439 TN249 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2007) 05-0534-04

High coupling coefficient laser propulsion mode

ZHANG Yi¹, LU Xin¹, ZHENG Zhiyuan^{1,2}, LU Feng¹, ZHU Peng-fei¹,
LI Han-ming^{1,3}, LI Yu-tong¹, LI Ying-jun^{1,3}, ZHANG Jie¹

(1. Inst. of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

2. School of Materials Science and Technology, China Univ. of Geosciences, Beijing 100083, China

3. China Univ. of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract A high coupling coefficient laser propulsion mode—transmitted liquid-confined laser propulsion is proposed. In this mode, 450 mJ 7 ns laser pulses transmit through a glass substrate and then are focused into the liquid propellant. The plasma generated by laser ablation is confined by the liquid propellant, burning room and glass substrate, and produce high efficient momentum transfer. Both water and ink are tested as propellants. By comparing with water, ink is chosen as a better propellant. The influences of diameter and length of the burning room for holding liquid on the coupling coefficient are studied. The maximum coupling coefficient got in the experiment is up to 17 858.3 N/MW.

Key words Laser propulsion; Liquid propellant; Coupling coefficient

1 引 言

早在 1972 年, Kantrowitz 便提出了用激光烧蚀产生的等离子体代替化学燃料推进空间飞行器的设想^[1]。这种推进模式和传统的化学燃料推进不同的是: 一方面其能源设备(激光器)放置在地面, 飞行器上不需要携带任何推进设备, 所以大大地减轻了飞行器的重量; 另一方面, 由于激光烧蚀产生的等离子体

的温度远远高于化学燃料燃烧所能达到的温度, 所以其产生的比冲也远远高于传统的化学燃料火箭。最近的一些研究表明, 激光推进也可以在其它的一些领域中得到应用, 例如人体内、核反应堆中的微型机器人, 海上的轮船^[2,3]等等。激光推进在地面、水面的应用环境下, 可以非常方便的获得推进剂, 所以这个时候提高冲量耦合系数(靶所获得的动量和激光能量的比)就比提高比冲(靶所获得的动量和所消耗的

* 收稿日期: 2007-04-25 修订日期: 2007-06-12

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328)。

作者简介: 张 翼 (1982—), 男, 博士, 研究领域为强场物理。Email: canell155@aphy.iphy.ac.cn

推进剂的重量比)更具有实用价值。

在激光等离子体推进中,除了通过改善聚焦质量来提高耦合系数外,还可以通过许多其它技术来提高耦合系数^[4-9]。Phipps等人发现,可以通过降低激光的功率和缩短激光脉冲的方法来提高耦合系数^[4];Yabe等人通过在靶的表面加一层很薄的水膜,也得到了很高的耦合系数^[5];在以前的实验中,我们通过反射式水约束烧蚀将耦合系数提高了一至两个数量级^[9]。但是,在上述两种利用水工质的方式中,由于水喷射的方向与激光传输的方向相反,靶后的光学镜片经常受到喷出水的污染而损坏。为了探索解决上述问题的方法,研究了透射模式下的水工质激光推进,这是第一次将液体推进剂用在透射式模式中。和一般的固体推进剂相比,液体推进剂更新起来更加方便,其流量也更容易控制,并且由于其击穿后喷出的质量大于固体推进剂,所以其产生的推力效果也好于固体推进剂。为了提高对激光的吸收效率,尝试了使用黑墨水作为推进剂。在这种模式下,得到的耦合系数最高高达 17.858 N/kW。

2 实验布局

整个实验装置图如图 1 所示,图中与激光相互作用的燃烧室由中间带通孔的铝块和玻璃基底组成,玻璃基底和铝块之间涂上真空油脂连接到一起(防止液体流出),并用一个架子将其固定。铝块上的通孔用来盛放液体,通过改变孔的孔径和长度,便可以控制液体的截面大小和体积。在实验中,激光穿过透明的玻璃基底后聚焦在液体中,产生等离子体,液体在等离子体推力的作用下,沿激光传播的方向喷出,而靶被等离子体推向与激光传输方向相反方向。由于透明玻璃基底的阻隔,喷出的液体不会溅射到光学器件上,这样便可以避免光学器件被污染。

靶的动量可以用单摆来测量。当脉宽 7 ns 波长为 532 nm 的激光脉冲被垂直聚焦在燃烧室表面,一束 He-Ne 光紧贴燃烧室的玻璃基底表面,平行地穿过,照射在光电二极管中,光电二极管和示波器连接在一起。燃烧室摆动时阻挡 He-Ne 光的时间可以被示波器记录下来,而这段时间对应的路程恰好是燃烧室的宽度,这样摆动的速度便可以计算出来,进而可以推算出耦合系数和比冲。

3 实验结果和讨论

耦合系数随着聚焦位置 d (玻璃前表面和聚焦

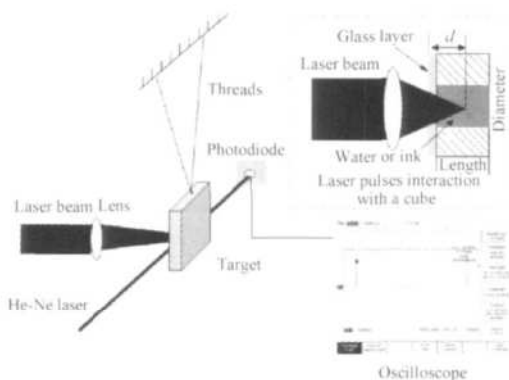


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

点之间的距离,见图 1)的变化如图 2 所示。所用燃烧室长度为 5 mm,孔径 4 mm,前表面玻璃基底的厚度为 1 mm。脉宽 7 ns 能量 450 mJ 的激光脉冲通过焦距为 125 mm 的透镜聚焦后在水中产生等离子体推动靶运动。从图中可以看出,耦合系数先随 d 的增大而增大,在 $d = 3$ mm 处,即激光聚焦点在燃烧室的中心时,耦合系数达到最大,约为 952 N/MW,随后便随 d 的增大而不断的减小。当聚焦点在燃烧室外时,耦合系数几乎降到 0。

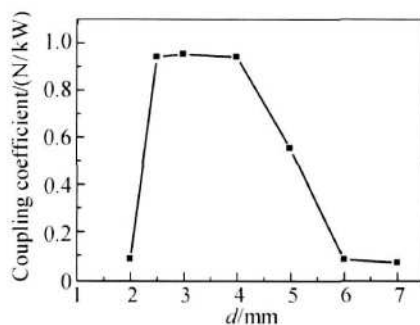


Fig. 2 Relation between the coupling coefficient and distance in water mode

当 $d < 3$ mm 时,一方面激光的聚焦点靠近玻璃的时候,击穿产生的等离子体会在液体工质内部产生复杂的湍动,引起很大的能量损失,所以产生的耦合系数比较小^[10];另一方面,聚焦点越靠近玻璃,激光在玻璃中的强度越大,穿过玻璃时损失的能量越多,所以耦合系数也越小。正是由于以上两个原因,在 $d < 3$ mm 时,耦合系数随着 d 的减小而不断减小。

当 $d > 3$ mm 时,即激光的聚焦点不断的远离玻璃而靠近出口,这时耦合系数随着 d 的增大而减小。这是因为当焦点不断远离玻璃而靠近出口的时候,焦点和玻璃中间的一部分水在激光击穿后仍然滞留在燃烧室内没有喷出,焦点越靠近出口,燃烧室内滞留的水越多,根据“炮弹模型”^[11],喷出物体的质量越

小,耦合系数越小,所以当 $d > 3 \text{ mm}$ 时,这时耦合系数随着 d 的增大而减小。同时,由于纯水具有比较高的击穿阈值,当激光的焦点移至燃烧室外较远的距离时,激光的强度甚至不能引起水工质的击穿,在这种情况下,冲量耦合效率几乎降至 0。

为了提高对激光的吸收,我们尝试了采用黑墨水作为推进剂的情况。和水推进剂相比,用黑墨水作为推进剂有很多优点。首先其透过玻璃的激光能量几乎全部被墨水吸收,这样便大大提高了能量的吸收率;其次,由于墨水的击穿阈值非常低,不论如何移动焦点位置,击穿均发生在玻璃和墨水的接触面上,墨水受到的压力在横截面上分布比较均匀,这极大地减小了墨水内部的湍动。此外,由于击穿发生在接触面上,基本上所有的墨水受到等离子体的推力而喷出,这些都有利于提高耦合系数。综合以上几点因素,用墨水作为推进剂可以比用纯水做推进剂的得到更高的耦合系数。

在用黑墨水作为推进剂的情况下,同样测量了耦合系数随着焦点位置变化的关系,如图 3 所示。从图中可以看出,耦合系数随着距离 d 的增大而不断增大,这和用水作为推进剂的情况有很大的区别。前文已经提到,在采用墨水作为推进剂的时候,击穿仅仅发生在玻璃和墨水的接触面内,所以移动透镜并不会使击穿的位置发生变化,而是使击穿面积发生变化。距离 d 越大,激光在击穿面上的光斑越大,墨水在横向上受力也就越均匀。当击穿光斑小于燃烧室的孔径时,击穿所产生的等离子体会产生横向的膨胀,引起液体的湍动和能量损失。当光斑的直径和燃烧室的孔径大小一样时,等离子体的膨胀完全被约束在纵向,这时对应的耦合系数最高。

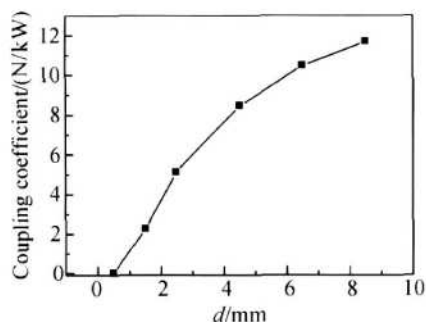


Fig. 3 Relation between the coupling coefficient and distance d in ink mode

图 4 给出了在用黑墨水作为推进剂的情况下,耦合系数随着燃烧室长度变化的关系曲线,击穿光斑保

持和燃烧室的孔径大小相同,通过改变燃烧室的长度,从而改变了推进剂的质量。根据炮弹模型,耦合系数可以从下述公式中推算出来

$$C_m = \frac{2m_1m_2}{\sqrt{(m_1+m_2)E}} \quad (1)$$

式中 m_1, m_2 分别是燃烧室的质量和墨水的质量, E 是激光转变靶动能的那部分能量。在改变燃烧室长度的时候,由于激光的聚焦情况没有改变,所以 E 基本上不变。又 $m_1 \gg m_2$, 所以基本上可以认为 m_1 不变。这样利用式 (1) 对实验数据进行拟合,便可以得到耦合系数随着推进剂质量变化的关系图。在图 4 中可以看到理论计算和实验结果符合的很好。这意味着推进剂的质量越大,耦合系数越高。在整体重量一定的情况下,当 $m_1 = m_2$ 时,耦合系数达到最高。

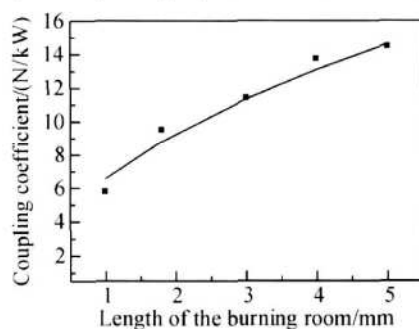


Fig. 4 Relation between the coupling coefficient and the length of the burning room

在用墨水做推进剂的情况下,耦合系数随燃烧室孔径变化的关系图如图 5 所示。击穿光斑保持和最小的燃烧室孔径大小一样。和图 4 类似,图 5 中耦合系数随着燃烧室孔径的增大而增加。当燃烧室的孔径增大时,推进剂的质量增大了,等离子体的横向膨胀也变大了,所以耦合系数的变大表明:在这种情况下,推进剂质量对耦合系数的影响要远远大于等离子体膨胀方向的影响。由此得出结论,在透射式液体约束激光推进模式中,喷出液体的质量是一个至关重要的因素。在用墨水作为推进剂的实验中,其得到的最大耦合系数为 17.858 N/kW , 比纯水推进剂的提高了一个数量级以上。

我们还测量了墨水浓度对耦合系数的影响,发现即使墨水浓度降到非常低(体积浓度约为 5%)的时候,耦合系数仍然没有太大的变化。

用墨水作为推进剂的时候也可以从上面的实验结果中推算出比冲,假设燃烧室中的墨水完全被激光击穿所消耗。比冲随着燃烧室长度的变化关系如图

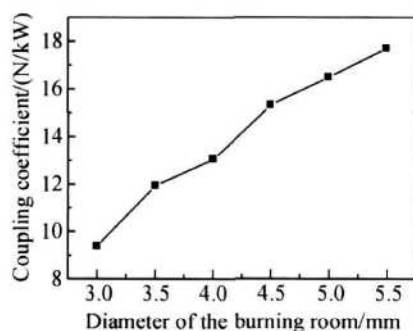


Fig. 5 Relation between the coupling coefficient and the diameter of the burning room

6所示。从图中可以看到比冲随着燃烧室的长度的增加而减少, 实验中获得的最大比冲仅仅为 $193.439 \text{ N} \cdot \text{s/kg}$ 。因此这种模式并不适合宇宙空间的应用, 但在地面应用中具有极大的优势。

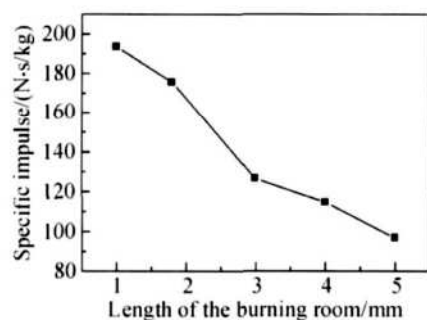


Fig. 6 Relation between the specific impulse and the length of the burning room

4 结 论

本文提出了一种新的激光推进模式, 即“透射式液体工质激光推进模式”。这是第一次将液体推进剂用在透射式模式中。通过比较用纯水和黑墨水作为推进剂得到的实验结果, 发现不透明液体工质更适合在这种模式下工作。在用墨水作为推进剂的时候, 还测量了耦合系数和燃烧室长度和孔径的关系, 发现耦合系数既随着燃烧室长度的增加而增加, 也随着燃烧室横截面积的增加而增加。利用炮弹模型可以很好的解释这一现象。在实验中, 得到的最大耦合系数为 17.858 N/kW 。

参考文献:

- [1] Kantrowitz A. Propulsion to orbit by ground-based laser [J]. *Astronaut Aeronaut*, 1972, 74(10).
- [2] Myrabo L N, Mead F B Jr. Ground and flight tests of a laser propelled vehicle [R]. *AAAS* 98-1001.
- [3] Yabe T. Prospect of solar-energy-pumped-laser-driven vehicles [C]. *Water AIP Conference Proceedings*, 2004, 766(567).
- [4] Phipps C R Jr, Tumer T P, Harrison R F. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers [J]. *J. Appl. Phys*, 1988, 1083(64).
- [5] Yabe T, Phipps C, Yamaguchi M, et al. Microairplane propelled by laser driven exotic target [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2002, 4318(80).
- [6] Zheng Z Y, Zhang J, Lu X, et al. Effects of confined laser ablation on laser plasma propulsion [J]. *Chin. Phys. Lett*, 2005, 1725(22).
- [7] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys*, 1990, 775(68).
- [8] Zheng Z Y, Zhang J, Hao Z Q, et al. Effects of target configuration on the laser plasma momentum-coupling coefficient [J]. *Acta Phys. Sin*, 2006, 326(55).
- [9] Zheng Z Y, Zhang J, Zhang Y, et al. Enhancement of coupling coefficient of laser plasma propulsion by water confinement [J]. *Appl. Phys. A*, 2006, 441(85).
- [10] Ohkubo T, Yabe T, Miyazaki S, et al. Laser propulsion using metal-free water cannon target [R]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 766(374).
- [11] Winterberg F. Recoil free implosion of large-aspect ratio thermonuclear microexplosion [J]. *Nuovo Cimento*, 1976, 216(16).

(编辑: 梅 瑛)