

# 水烧蚀激光推进性能初步分析\*

崔村燕<sup>1,2</sup>, 洪延姬<sup>2</sup>, 文 明<sup>2</sup>, 何国强<sup>1</sup>

(1 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072 2 装备指挥技术学院, 北京 101416)

**摘 要:** 利用所建流场信息与推力信号同步采集的实验系统, 开展了水烧蚀激光推进性能实验研究。研究发现, 实验中随机出现两种特征差别明显的现象, 即水烧蚀和水诱导的空气击穿。对两种现象获得的气蚀空穴发展、推力特征、冲量耦合系数、比冲和能量利用率进行了分析。结果表明, 与水诱导空气击穿相比, 水烧蚀获得的气蚀空穴发展较快、推力幅值、冲量耦合系数和能量利用率都高约 10 倍, 比冲比较接近。研究结果对于水烧蚀激光推进的发展有重要意义。

**关键词:** 激光推进; 烧蚀; 击穿; 推进性能

中图分类号: O439 TN249

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2010) 02-0240-04

## Primary analysis for performance of laser propulsion with water propellant

CUI Cun-yan<sup>1,2</sup>, HONG Yan-ji<sup>2</sup>, WEN Ming<sup>2</sup>, HE Guo-qiang<sup>1</sup>

(1 Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

2 Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

**Abstract** Experimental study on performance of laser-generated ablation propulsion is carried out with a set of system with which information of both flux-field and thrust loading can be gathered at the same time. Two phenomena with obvious different characters are observed, which are water ablation and laser-induced air-breakdown with water as an induction. Developing speed is faster with water ablation than that with air-breakdown. Amplitude of thrust curve, impulse coupling coefficient and rate of energy conversion are about 10 times higher gained by water ablation compared with those obtained by air-breakdown. But special impulse of both phenomena is close to the same value. The results are valuable for development of laser-induced ablation propulsion with water propellant.

**Key words** Laser propulsion; Ablation; Breakdown; Propulsion performance

## 1 引 言

气体工质激光推进研究中, 为使激光能量尽可能沉积, 需要使激光功率密度达到击穿阈值, 以形成等离子体, 利用等离子体对激光的强烈吸收沉积激光能量<sup>[1-3]</sup>。这种方法虽然可以使激光能量的沉积率大大提高, 但同时产生强光, 不能用于推进做功, 降低了能量的利用率, 这也是气体工质激光推进冲量耦合系数受限的原因之一。

水对 CO<sub>2</sub> 激光具有强烈的吸收作用 (吸收深度

约为 10 μm), 可以在不击穿的情况下, 充分吸收激光能量, 并将其转化为推进动能, 因而获得较高的冲量耦合系数<sup>[4]</sup>。本文针对 CO<sub>2</sub> 激光与水相互作用的实验中出现的一些现象, 进行了初步分析。

## 2 实验设计

实验中, 为同时获得流场信息和推力信息, 设计了可以实现高速相机与推力同步测试的实验系统, 包括 HSFC PRO 超高速相机、DG535 延迟脉冲发生器、闪光灯、PCB 压电式力传感器等。有关实验方法的细

\* 收稿日期: 2009-06-04 修订日期: 2009-09-26。

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328); 国家自然科学基金项目 (10672184)。

作者简介: 崔村燕 (1977—), 女, 博士生, 讲师, 研究领域为先进推进技术。Email: ccy6655@126.com

节, 参见文献 [5]。

为保证拍摄所得流场在水中的演化不受容器形状的影响, 在 Pakhomov 小组<sup>[6]</sup>设计的圆形石英容器基础上进行了改进, 设计如图 1 所示的方形容器。

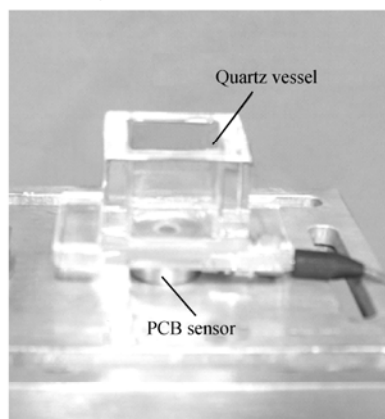


Fig 1 Quartz vessel and force sensor

与圆形容器相比, 方形容器的加工比较困难, 如果采用五面焊接的方法, 由于容器本身较小, 焊缝处的变形将影响拍摄效果; 如果采用五面胶粘的方法, 水烧蚀过程中产生的强烈冲击力, 将使石英容器破裂。为此, 我们采用国外进口的, 具有高度均匀性的石英材料, 利用冷加工的方法进行一体加工, 并对各个面进行精确抛光, 使各个面厚度均匀, 且保证相对两面的平行度, 从而得到强度高、透明度好, 不变形的实验装置。

实验所用能量源为  $\text{CO}_2$  激光, 单脉冲能量约为 32 J, 峰值功率为 30 MW, 水面所受辐照面积约为  $78.5 \text{ mm}^2$ , 因而峰值功率密度约为  $3.8 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 。

### 3 实验现象分析

在实验的过程中观察到两类差别较大的现象 (如图 2 所示), 一类是发生强烈的响声和白光, 溅射

到透镜上的水滴细小均匀, 石英容器内的水量基本没有发生变化, 称其为水诱导的空气击穿: 另一类是声音较低沉, 没有白光出现, 溅射到透镜上的水滴粗大, 石英容器内的水量有明显减少, 即为水烧蚀。下面从气蚀空穴的发展、推力特征、冲量耦合系数与比冲等方面对这两类现象进行分析。

#### 3.1 气蚀空穴的发展

实验中获得的气蚀空穴体积随时间的发展如图 3 所示。图中, W 表示水烧蚀获得的气蚀空穴体积, A 表示水诱导空气击穿所获得的气蚀空穴, 如图 3 中 007A 表示第 7 组实验为水诱导的空气击穿现象, 009W 表示第 9 组实验为水烧蚀现象。水烧蚀产生的空穴是由于蒸汽对液面的回推作用产生的, 此时空穴壁面受蒸汽压力、表面张力和重力的作用。随着烧蚀的进行, 蒸汽压力急剧上升, 使空穴体积迅速增大, 随后, 由于体积增大, 导致空穴内压力逐渐下降, 在重力和表面张力的作用下, 空穴增长变缓, 直到作用在空穴壁面上的三力基本平衡, 空穴体积不再发生明显变化。从图 3 可以看出, 水烧蚀产生的气蚀空穴体积在  $100 \mu\text{s}$  之前增长较快,  $100 \mu\text{s}$  之后, 气蚀空穴的体积增长缓慢。水诱导空气击穿时, 气蚀空穴最初是由高温高压的等离子体对液面的压力作用产生的, 由于等离子体迎着激光向空气中的发展较快, 向水面方向的作用比较弱, 因而在前  $100 \mu\text{s}$  左右, 空穴的体积增长较慢。随后, 由于等离子体的发展, 使水面上方压力下降, 而盘桓在液面上方的高温气体对液面持续加热产生蒸汽, 使空穴的增长速度加快。

#### 3.2 推力曲线特征

用 PCB 压电式力传感器同时获得推力曲线如图 4 所示, 左边的纵轴为表示推力, 右边的纵轴表示 DG535 给采集卡的触发信号。

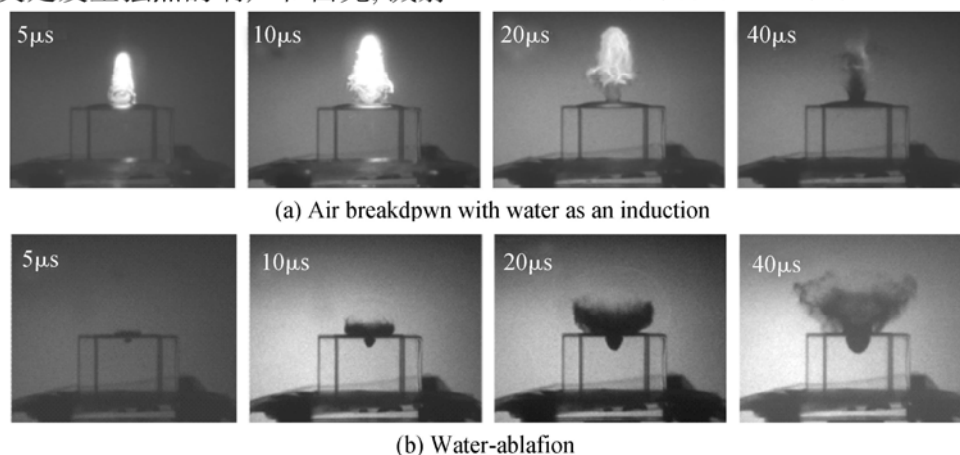


Fig 2 Comparison of two different phenomena occurred in the experiment

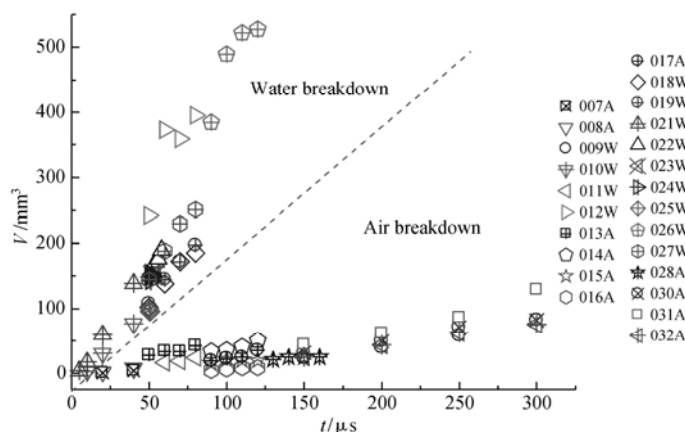


Fig 3 Cavity grows over time in the two phenamons

可以看出,两种现象推力的起始时间基本一致,但是推力幅值和脉宽相差较大,水烧蚀时,产生的推力幅值可达几百 N,幅值约为  $100 \mu s$ ,而水诱导空气击穿时,推力幅值只有几十 N,脉宽约为  $80 \mu s$ 。两类推力曲线上均叠加振荡,经分析发现,叠加在水烧蚀推力曲线上的振荡周期约为  $7.25 \mu s$ ,叠加在水诱导空气击穿推力曲线上的振荡约  $4.9 \mu s$ 。产生这种叠加振荡的原因尚不清楚。

从推力曲线可以推断,两种现象所获冲量耦合系数必然有较大差别,如下节所述。

### 3.3 冲量耦合系数

两种现象所获冲量耦合系数如图 5 所示。水烧蚀状态下,所获冲量耦合系数较高,最高可达  $1800 \text{ N MW}$ ,而水诱导空气击穿下获得的冲量耦合系数最

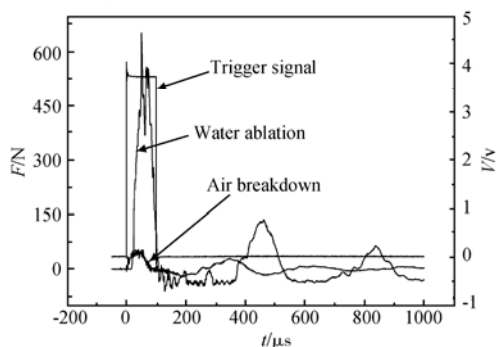


Fig 4 Thrust curves for the two phenamons

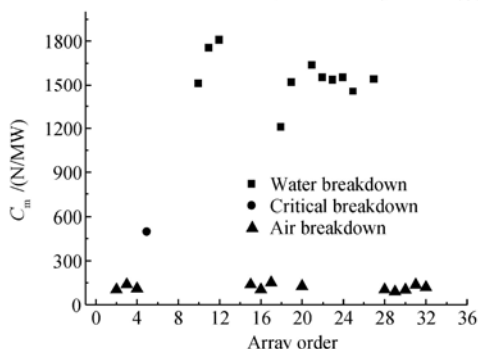


Fig 5 Impulse coupling coefficient for the two phenamons

高只有  $140 \text{ N MW}$ 。

### 3.4 比冲和能量利用率的计算

至此,我们不妨做一些假设:

- (1) 水烧蚀时,工质只有水,没有空气参与;
- (2) 推力结束时,气泡的体积即为被烧蚀水的体积;

(3) 推力结束之后,因射流而损失的水对于总冲没有贡献,且可以回收再用作工质。

在上述三个假设成立的基础上,就可以根据公式

(1) 获得水击穿时的比冲,如图 6 所示。

$$I_{sp} = \frac{I}{mg} \quad (1)$$

计算时, $I$ 为推力脉冲结束时获得的冲量值, $m$ 与时间对应的气泡体积计算获得, $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。由图 6 可以看出,无论是水烧蚀,还是水诱导的空气击穿,当推力脉冲结束时 ( $80 \sim 100 \mu s$ ),比冲都趋向于同一个定值 (约  $10 \text{ s}$ )。

能量利用率为

$$\eta = \frac{g}{2} C_m I_{sp} \quad (2)$$

式中  $\eta$  为激光能量利用率,  $I_{sp}$  为比冲。则水烧蚀 (平均冲量耦合系数约为  $1550 \text{ N MW}$ ) 和水诱导空气击穿现象 (平均冲量耦合系数约为  $150 \text{ N MW}$ ) 发生时,激光能量利用效率分别为  $77.5\%$  和  $7.5\%$ 。可见,水诱导空气击穿时,激光的能量大部分被等离子体吸收用于压缩空气做功。

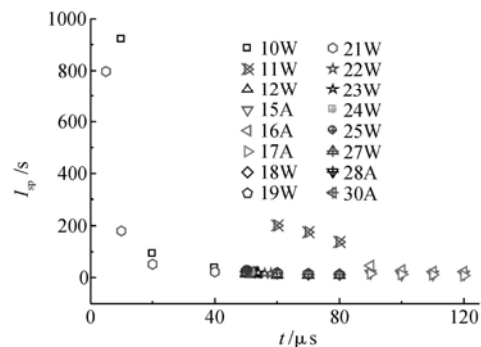


Fig 6 Specific impulse vs time

## 4 结 论

水烧蚀激光推进性能实验研究过程中,发现了两种特征差别较大的现象,即水烧蚀和水诱导的空气击穿,通过对气蚀空穴体积发展、推力特征分析,冲量耦合系数、比冲和能量利用效率等参数的计算,得出以下结论:

(1) 水烧蚀产生的气蚀空穴发展较快,水诱导空气击穿获得的空穴发展较慢。

(2) 与水诱导的空气击穿相比,水烧蚀获得的推力幅值、冲量耦合系数和能量利用率都要高出 10 倍,但是两者的比冲基本相同,仅能达到  $10 \text{ s}$  左右。

(下转第 256 页)

互之间耦合制约,推进性能变化复杂,有必要进行相似律研究。针对圆锥形喷管在单脉冲和一维点聚焦球对称条件下的激波流场,建立了基本模型,提炼了耦合多种影响因素的无量纲因子  $R$ , 得到并分析了脉冲激光推进的能量相似律。

(1)在  $0 < R < R_{\max}$  内得到的理论预测规律基本合理,部分结果与现有实验吻合很好。

(2)冲量和冲量耦合系数对于  $R$  存在极大值,对应的  $R$  位置仅与气体比热比相关。

(3)在标准状态下,无论入射激光能量是多少,吸气式激光推进圆锥形喷管的冲量耦合系数不会超过 823 N/MW。

需要指出的是,在  $R \geq R_{\max}$  内,预测冲量为负值,显然不合理,即本文建立的基本模型不能描述激光推进产生的较弱激波情况和激波演化的后期阶段。通过高精度的实验系统测量得到圆锥形喷管在单脉冲条件下的推进性能参数,以补充理论模型不能描述范围内的数据,是下一步需进行的工作。

#### 参考文献:

- [1] 崔村燕,洪延姬,王 军,等. 聚光系统构形对激光

推力器推进性能的影响[J]. 中国激光, 2006 33(6).

- [2] 唐志平,龚 平,胡晓军,等. 大气模式激光推进的实验研究[J]. 航空学报, 2005 26(1): 13~17.
- [3] Tang Zhiping Gong Ping Hu Xiaojun et al Experimental investigation on air-breathing mode of laser propulsion [C]. Sendai 2<sup>nd</sup> International Symposium on Beam ed Energy Propulsion, 2004 23~30
- [4] 朱雨建,邓 博,吕俊明,等. 关于脉冲推进喷管的数值研究[C]. 绵阳:第十一届全国激波与激波管学术会议, 2004 324~329
- [5] Gong Ping Tang Zhiping Analytical and numerical study of the air breathing model for laser propulsion[C]. Sendai 2<sup>nd</sup> International Symposium on Beam ed Energy Propulsion, 2004 31~39
- [6] 卞保民,杨 玲,陈 笑,等. 激光等离子体及点爆炸空气冲击波波前运动方程的研究[J]. 物理学报, 2002 51(4): 809~813
- [7] 谢多夫. 力学中的相似方法与量纲理论[M]. 沈 青,倪锄非,李维新译. 北京:科学出版社, 1982

(编辑:张荣莉)

(上接第 242 页)

从上述分析结果可以看出,水烧蚀激光推进中,应尽量避免发生水诱导的空气击穿现象,以使激光能量由水吸收,获得较大的冲量耦合系数。实验结果也表明,水烧蚀激光推进发展有一个瓶颈,即比冲太低。由公式(2)知,冲量耦合系数和比冲在能量利用率一定的条件下成反比关系,因而提高比冲的方法只有提高能量利用率或者降低冲量耦合系数。

#### 参考文献:

- [1] SchallW O, BohnW L, EckelH A, et al Light craft experiments in Germany[R]. SPIE Hig Power Laser Ablation, 2000 472~480
- [2] Myrabo L N, Messitt D G, Mead F B Jr Ground and flight tests of a laser propelled vehicle[R]. AIAA 98-1001
- [3] 崔村燕,洪延姬,王 军,等. 聚光系统构形对激光推

力器推进性能的影响[J]. 中国激光, 2006 33(6): 739~742

- [4] Zheng Z Y, Zhang J Zahang Y, et al Enhancement of coupling coefficient of laser plasma propulsion by water confinement [J]. Appl Phys, 2006 A 85 441~443
- [5] 金星,崔村燕,周家胜,等. 液体烧蚀激光推进推力形成机理实验方法研究[J]. 推进技术, 2009 30(5). (JIN Xing CUI Cun-yan, ZHOU Jia-sheng et al Experiment method on mechanism of thrust of laser-induced ablation propulsion with liquid propellant[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009 30(5).)
- [6] John Sinko Lisa Kodgis Simon Porter et al Ablation of liquids for laser propulsion with TEA CO<sub>2</sub> laser[C]. Hawaii Proceedings of Fifth International Symposium on Beam ed Energy Propulsion, 2007: 308~318

(编辑:梅 瑛)