

文章编号: 1001-4322(2006)03-0353-04

水滴烧蚀激光推进性能测试*

李修乾^{1,2}, 洪延姬², 王 军², 陈景鹏², 何国强¹

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

摘 要: 以脉冲式 TEA CO₂ 激光器为光源将雾化水滴用作推进剂进行了激光推进实验研究。由力传感器测量得出的推力随时间的变化关系曲线得出了冲量耦合系数的大小。实验发现水工质激光推进冲量耦合系数的大小与雾化水滴的尺寸、速度等性能参数及其分布密切相关, 水滴尺寸和速度越小, 速度分布范围越集中, 冲量耦合系数越大。

关键词: 激光推进; 水滴; 冲量耦合系数; 雾化

中图分类号: O439; TN249 **文献标识码:** A

激光推进技术以其自身的诸多优点引起了国内外研究人员的高度重视, 研究人员在大气吸气模式激光推进领域已经做了大量卓有成效的研究工作^[1-2]。随着研究工作的逐步深入, 以液体和固体为推进剂进行的激光推进研究工作也逐步展开。液体推进剂以其自身固有的特点吸引了越来越多研究人员的注意, 国外特别是日本的研究人员用水工质进行的激光推进实验研究结果十分鼓舞人心^[3-5]。

虽然国内在激光推进领域也已经做了大量有意义的研究工作^[6-9], 但是, 以液体工质为推进剂进行的激光推进研究工作目前还未见报道。而且从目前国外报道的研究结果来看^[3-5, 10], 国外在这一领域的研究还仅仅局限于将简单的水击穿效应应用于激光推进, 没有对液体推进剂所必须的工质注入系统进行研究。本文利用实验室专门研制的工质注入系统, 以医用蒸馏水为推进剂, 用脉冲式 TEA CO₂ 激光进行了抛物形喷管单脉冲激光推进实验。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示, TEA CO₂ 激光器输出的单脉冲宽度为 1 μ s 左右, 最大能量为 100 J, 激光光斑直径为 ϕ 50 mm。实验所用铝质抛物形喷管的口径为 ϕ 70 mm, 在喷管的顶部开有一个 ϕ 12 mm 的圆孔, 工质注入系统通过该圆孔将雾化后的液滴实时喷注到激光聚焦区域。通过一种特殊方式将抛物形喷管和工质注入系统紧密连接起来。力传感器测量得到的推力随时间的变化关系曲线可以通过示波器实时显示。为了保证实验数据的可信度, 实验过程中专门利用冲量测量精度很高的冲击摆测试系统, 对由力传感器间接测量得出的冲量进行了标定。

实验过程中利用了抛物形喷管自身的聚焦性能。如图 1 所示, 沿喷管轴线方向入射的激光脉冲在光滑壁面的聚焦作用下将焦点(聚焦光斑尺寸较大为 mm² 量级)附近的雾化液滴(雾化液滴的索太尔直径 D_{32} 为 10^{-5} m

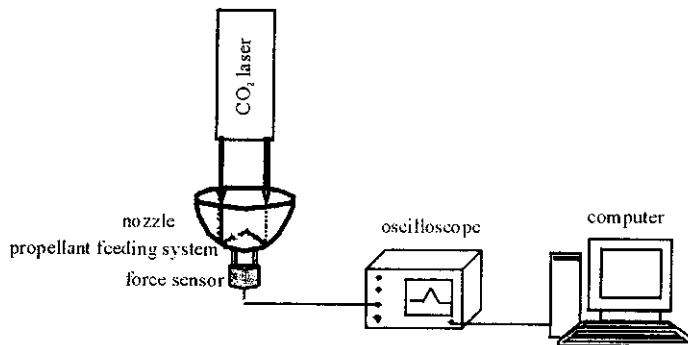


Fig. 1 Schematic of experiment setup

图 1 实验装置示意图

* 收稿日期: 2005-10-24; 修订日期: 2006-01-20

基金项目: 国家安全重大基础项目资助课题

作者简介: 李修乾(1977—), 男, 讲师, 博士研究生, 从事激光推进技术研究; xiuqianli@sohu.com。

量级)击穿形成等离子体,等离子体继续吸收激光能量形成迅速膨胀的爆轰波,爆轰波沿着与入射光束相反的方向喷出喷管,从而形成推力。

2 实验结果

实验中,激光脉冲能量为 60 J,选用最安全的医用蒸馏水进行了实验。每组实验都进行了 3~5 次,实验数据重复性良好。实验过程中重点研究了激光聚焦区域内雾化液滴平均尺寸(索太尔平均直径 D_{32})和液滴平均运动速度不同时,冲量耦合系数的变化情况。实验测试结果的平均值如图 2 和图 3 所示。

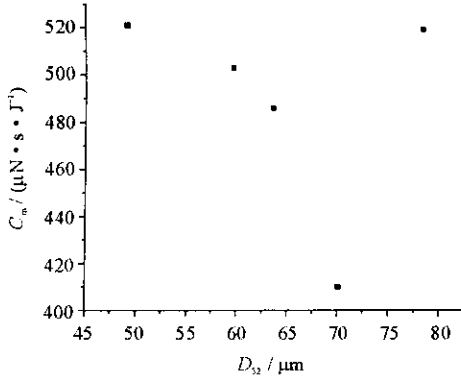


Fig. 2 Coupling coefficient vs droplet diameter

图 2 冲量耦合系数随液滴平均尺寸的变化

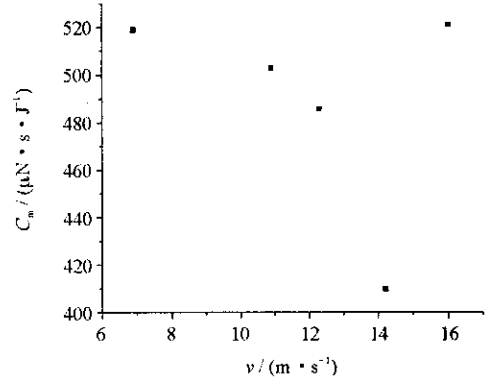


Fig. 3 Coupling coefficient vs droplet velocity

图 3 冲量耦合系数随液滴平均运动速度的变化

另外,在实验过程中发现,实验所用工质质量的准确测量还是一个难题,因此给比冲的测试带来了困难。这个问题在工质注入系统的性能进一步得到完善后就可以得到解决。

3 分析与讨论

3.1 实验结果初步分析

从图 2 和图 3 中可以明显地看出一个很有意思的变化趋势:冲量耦合系数基本上是随着雾化液滴的平均尺寸以及平均运动速度的增大而减小,但是在两幅图中都出现了一个很“不”符合“规律”的测量点。

在实验测试范围内,液滴平均尺寸最小时,平均运动速度最大;液滴平均尺寸最大时,平均运动速度恰恰最小(这是由工质注入系统的设计参数所决定的,在实验中无法人为调节);两种作用因素互相影响,导致两种情况下的实验测量值差别不大,也就出现了图 2 和图 3 中很“不”符合“规律”的测量点。这说明,冲量耦合系数受液滴的平均尺寸和平均运动速度的影响是相互关联的。

图 4(a)和(b)对比给出了雾化液滴平均运动速度分别为 16.0, 6.9 m/s 时,在激光聚集区域内的速度分布图。从图中可以看出,平均运动速度最小时的速度分布范围明显集中,而平均速度最大时的速度分布范围明显发散。

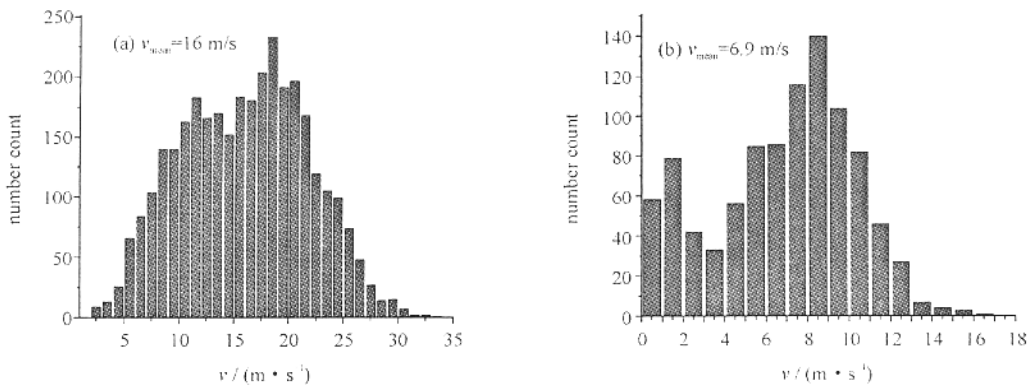


Fig. 4 Distribution of droplet velocity

图 4 雾化液滴速度分布

通过对实验结果的分析,可以看出,水工质激光推进冲量耦合系数的大小与雾化液滴的平均尺寸、平均运动速度及其分布关系密切。液滴尺寸越小,面积质量比越大;假定入射激光光强分布基本均匀(聚焦光斑面积

为 mm^2 量级,远大于液滴表面积),在入射角相同的情况下,表面积相同液滴成分相同的液滴所吸收的激光能量相同;液滴面积质量比越大,越容易被激光烧蚀汽化,从而越容易被激光击穿形成等离子体产生较大推力,使得冲量和冲量耦合系数都比较大。

入射激光将液滴击穿形成推力的过程几乎是在瞬间完成的,液滴运动速度越小,分布越集中,进入激光聚焦区域的液滴数目也就越多,被击穿的几率越大,产生的推力和冲量也就越大,从而使得耦合系数较大。

3.2 与国外研究结果的对比分析

图 5 就本文的研究结果与国外的典型研究结果进行了对比,从图中可以明显看出同样是水工质激光推进冲量耦合系数测试,研究结果差别很大。原因在于以下几点:

第一、研究问题的方法不同。美国^[10]和日本^[5]在实验中所用的水工质并没有经过雾化,他们的研究也不涉及液体工质注入系统的问题;美国进行的实验只是在喷管中注入少量的水溶液,用 TEA CO_2 激光烧蚀水溶液产生推力;日本用 YAG 激光轰击很薄的水层产生推力。

第二、所用激光光源不同。日本的研究工作中一直用波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的 YAG 激光进行实验;美国和我们所进行实验研究工作是用波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 TEA CO_2 激光进行实验。激光与工质相互作用过程是一个非常复杂的过程,这一过程与激光参数密切相关。文献[11]的研究结果表明水工质的激光击穿阈值与辐照激光波长、光斑大小、脉冲宽度等诸多因素有关。研究工作所用激光光源的参数差别较大,是导致研究结果不同的一个重要因素。

第三、聚焦方式不同。日本和美国的研究工作均采用透镜聚焦的外聚焦方式,我们的实验中利用了抛物形喷管的自聚焦特性。对于波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 TEA CO_2 激光而言,水的吸收长度仅为 $7.92 \mu\text{m}$ ^[4],虽然实验中所用雾化液滴的尺寸较小,仅几十 μm ,但是与其吸收长度比较而言这个尺寸还是很大的,所以有很大一部分激光能量在未聚焦之前(能量密度低于击穿阈值,不能将水击穿)就被水吸收掉了,从而影响了能量转化效率,导致冲量耦合系数没有预想的那么大。但是水对波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的 YAG 激光的吸收长度要大得多,为 3.63mm ^[4]。日本的研究工作一直利用 YAG 激光击穿薄水层产生推力,由于水对于这一波长的激光吸收长度较长,可能有部分金属靶材吸收部分激光能量被烧蚀掉了。

第四、所用喷管构型不同。大气吸气模式激光推进实验研究表明,冲量耦合系数的大小与喷管构型有密切关系。美国所用的喷管为锥形喷管;日本一直关注的是平面金属靶;我们研究的是抛物形喷管。这也是导致实验研究结果不同的一个因素。

4 小 结

本文首次将雾化后的液滴用作推进剂开展了激光推进研究,实验发现冲量耦合系数的大小与雾化液滴的尺寸、速度等雾化性能参数及其分布有关;在本文所述实验条件下,液滴平均速度相差不大时,液滴尺寸越小,冲量耦合系数越大;液滴尺寸相差不大时,运动速度越小,速度分布越集中,冲量耦合系数越大。

由于研究工作比较复杂,几乎没有可借鉴的研究成果,本文只是对水工质激光推进尝试进行了初步实验测试,在实验条件得到进一步改善后还要进行进一步较为深入系统的研究。

致 谢:作者特别感谢国防科技大学陆启生教授与作者进行的有益讨论。本实验是在装备指挥技术学院激光推进实验室完成的,感谢崔村燕同志在实验方案方面所提出的宝贵建议,感谢文明、杨建、王俊花、李冲等同志在实验工作中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Myrabo L N, Messitt D G, Mead F B. Ground and flight tests of a laser propelled vehicle[R]. AIAA Paper 98-1001,1998.
- [2] Bohn W L. Laser lightcraft performance[C]//Proc of SPIE. 2000, **3885**: 48-53.
- [3] Yabe T. Prospect of solar-energy-pumped-laser-driven vehicles powered by water[C]//Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion. America, 2005: 567-578.

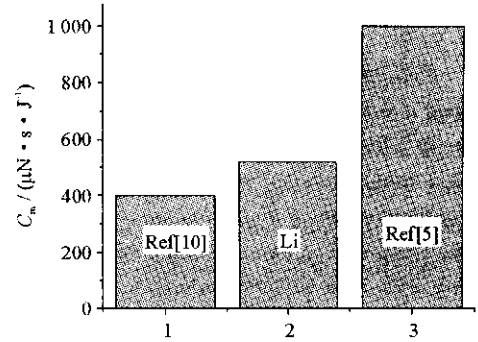


Fig. 5 Comparison of different authors' study results
图 5 不同作者的研究结果比较

- [4] Ohkubo T, Yabe T, Miyazaki, et al. Laser propulsion using metal-free water cannon target[C]//Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion. America, 2005; 394-405.
- [5] Yabe T, Nakagawa R, Yamaguchi M, et al. Simulation and experiments on laser propulsion by water cannon target[C]//First International Symposium on Beamed Energy Propulsion. America, 2003; 185-193.
- [6] 金星, 洪延姬, 崔村燕, 等. 激光推进冲量耦合系数的测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(7):861-864. (Jin X, Hong Y J, Cui C Y, et al. Measure method of impulse coupling-coefficient of laser propulsion. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(7):861-864)
- [7] 李修乾, 洪延姬, 何国强, 等. 激光推进器概念设计研究现状及发展趋势[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(3):363-368. (Li X Q, Hong Y J, He G Q, et al. Status and development trend of concept studies on laser propulsion thruster. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **17**(3): 363-368)
- [8] 唐志平, 龚平, 胡晓军, 等. 大气吸气模式激光推进实验研究[J]. 航空学报, 2005, **26**(1):13-17. (Tang Z P, Gong P, Hu, X J, et al. Experimental investigation on air-breathing mode of laser propulsion. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, **26**(1):13-17)
- [9] 董慧峰, 唐志平, 胡晓军, 等. 烧蚀模式激光推进实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(11):1380-1384. (Tong H F, Tang Z P, Hu X J, et al. Experimental study of ablation mode laser propulsion. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(11):1380-1384)
- [10] Sterling E, Pakhomov A V, Larson C W, et al. Absorption-enhanced liquid ablatants for propulsion with TEA CO₂ laser[C]//Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion. America, 2005; 474-481.
- [11] Kennedy P K, Hammer D X, Rockwell B A. Laser induced breakdown in aqueous media[J]. *Prog Quant Electr*, 1997, **21**(3): 155-248.

Performance measurements of laser propulsion with water spray droplets

LI Xiu-qian^{1,2}, HONG Yan-ji², WANG Jun², CHEN Jing-peng², HE Guo-qiang¹

(1. College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

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

Abstract: A TEA CO₂ laser was employed to ablate spray droplets for laser propulsion. The momentum coupling coefficient was derived from the force sensor data. Experimental results indicate that the coupling coefficient is largely dependent on droplet Sauter mean diameter(SMD), velocity and their joint distribution and that as SMD and velocity decrease with a narrower range of speed distribution, the momentum coupling coefficient increases.

Key words: Laser propulsion; Water droplets; Momentum coupling coefficient; Atomization