

文章编号: 1001-4322(2006)02-0197-04

悬摆法测量气体推进剂激光推进冲量耦合系数*

李修乾^{1,2}, 洪延姬², 何国强¹, 王 军²

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

摘 要: 给出了悬摆法测量激光推进冲量耦合系数的原理, 分别以空气、氩气、氮气和氦气为推进剂, 用悬摆法测量了抛物形推力器在能量不同的单脉冲 TEA CO₂ 激光辐照下的冲量耦合系数。实验结果表明, 氩气的冲量耦合系数最高, 氦气的冲量耦合系数最低, 在实验测试的激光能量范围内, 4 种推进剂气体的激光推进冲量耦合系数基本上都随着激光能量的增加而线性增大, 冲量耦合系数的相对误差为 5.4% ~ 6.4%。实验结果与国外相关实验结论一致。

关键词: 激光推进; 冲量耦合系数; 相对误差; 悬摆

中图分类号: O439 TN249

文献标识码: A

激光推进技术是一种利用全新的推进机理将高能激光束的能量转化为飞行器动能的航天推进新技术, 比冲和冲量耦合系数是衡量其推进性能的两个重要参数。

国内外研究人员对激光推进冲量耦合系数进行了较为深入的实验研究工作。Myrabo 等人^[1-2]用自己设计的塞式推力器, 实验测试了激光推进冲量耦合系数; Noebolsion 和 Pirri^[3]用重复脉冲激光推进发动机对大气吸气模式的激光推进冲量耦合系数进行了实验研究; 德国的 Bohn 等人^[4-6]用铃形推力器进行了激光推进冲量耦合系数实验测试; 日本国家航天实验室、Tohoku 大学等单位^[7-8]以氩、氦、氙等惰性气体和水为推进剂就管中加速器和 OTV (Orbital Transfer Vehicle) 发动机的激光推进冲量耦合系数进行了实验测试研究; 俄罗斯光电装置与系统测试研究所的 Ageichik 等人^[9]对大气吸气模式的航天激光推进发动机的激光推进冲量耦合系数进行了实验测试研究; 文献 [10] 提出了一种水平激光推进冲量耦合系数的测量方法; 文献 [11] 就水平和垂直激光推进冲量耦合系数进行了实验测试研究。本文以抛物形推力器为研究对象, 用悬摆法测量了激光脉冲能量不同、所用推进剂气体不同时的冲量耦合系数, 并对实验结果进行了分析讨论。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 能量计用于检测输出激光能量的大小, 高速 CCD 相机通过真空舱的观测窗口记录推力器的位移; TEA CO₂ 激光器输出的单脉冲能量范围为 5 ~ 20 J, 重复频率为 10 Hz, 输出激光光斑为 40 mm × 40 mm。实验所用平顶抛物形推力器的口径为 $\phi 44$ mm, 质量为 4.962 g。将推力器用一根质量极轻的细线悬起来做成一个摆, 摆长为 37.5 cm, 实验过程中摆置于真空舱中。

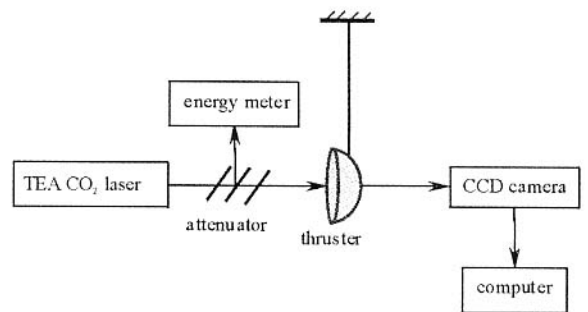


Fig. 1 Schematic of experiment setup

图 1 实验装置示意图

2 悬摆法冲量测试原理

实验用悬摆法测量推力器在单脉冲激光作用下获得的冲量。TEA CO₂ 激光脉冲通过真空舱的 GaAs 窗辐照到环聚焦推力器上, 焦点附近的气体在激光脉冲作用下被击穿, 形成等离子体, 等离子体迅速膨胀形成激光支持的爆轰波, 爆轰波与推力器壁耦合产生推力, 在推力作用过程中推力器获得冲量, 在该冲量作用下, 推力器获得一定的速度, 偏离平衡位置。通过测量摆线偏离平衡位置的夹角, 就可以测量出推力器的冲量大小。

设推力器的质量为 m , 摆长为 L , 若推力器获得的速度为 v , 竖直位置上的变化为 h , 摆线偏离平衡位置的夹角为 α (如图 2 所示), 可得

* 收稿日期 2005-09-22; 修订日期 2005-12-27

基金项目 国家安全重大基础研究项目

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。

$$h = l(1 - \cos\theta) \quad (1)$$

由机械能守恒定律可得

$$v = \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)} \quad (2)$$

因此推力器所获得的冲量为

$$I = mv = m \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)} \quad (3)$$

实验过程中用高速 CCD 相机捕获悬摆的整个偏转过程,用 Photo-shop 可以方便地将夹角 θ 读出,进而求出推力器获得的冲量大小。

辐照激光能量 E 可以由能量计直接测出,由冲量耦合系数 C_m 的定义得

$$C_m = \frac{I}{E} = \frac{m \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)}}{E} \quad (4)$$

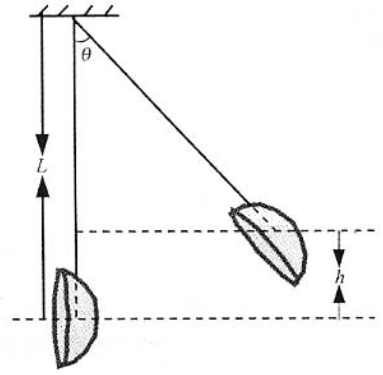


Fig. 2 Sketch map of pendulum system

图 2 悬摆法冲量测试示意图

3 实验结果与讨论

3.1 实验结果

在 0.1 MPa 的工作条件下,分别以空气、氩气、氮气和氦气为推进剂气体,在不同能量的单脉冲 TEA CO₂ 激光作用下测量了环聚焦推力器的激光推进冲量耦合系数,其变化情况如图 3 所示。每个实验条件下均进行了 3 至 5 次实验,实验重复性良好,图中数据为几次测量的平均值。由图 3 可以看出,在实验测试的激光能量范围内,这 4 种推进剂气体的冲量耦合系数基本上随激光脉冲能量的增加而线性增大,氩气为推进剂时冲量耦合系数最高,最大值为 $39.7 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$;以氦气为推进剂时冲量耦合系数最低,其最大值仅为 $13.0 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$;空气和氮气为推进剂其冲量耦合系数的最大值分别为 $23.5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$ 和 $20.6 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$ 。

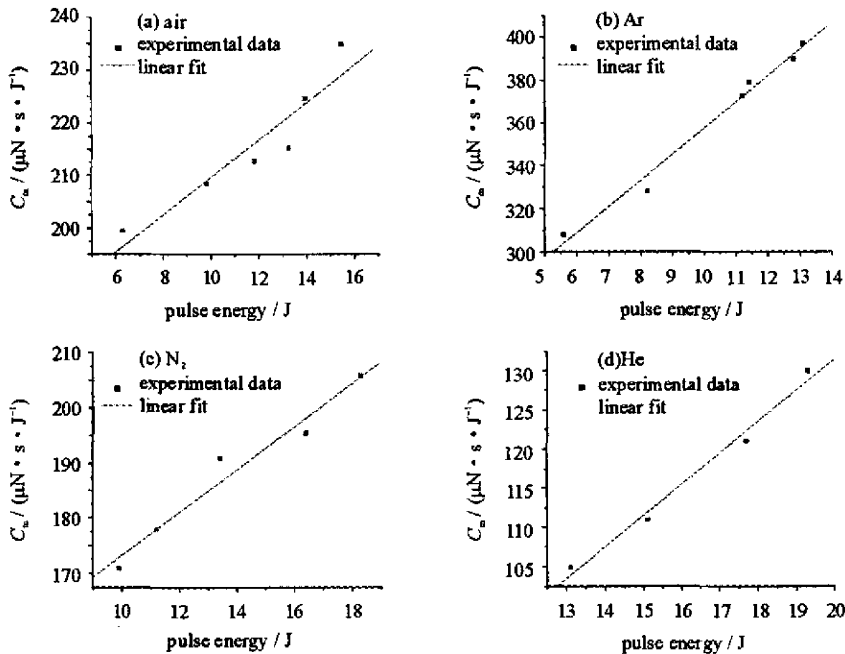


Fig. 3 Impulse coupling coefficient vs laser pulse energy

图 3 冲量耦合系数随激光脉冲能量的变化

3.2 实验结果的初步分析

3.2.1 以不同气体为推进剂时的冲量耦合系数

推进剂气体不同时,激光推进冲量耦合系数值相差很大,这主要与推进剂气体的击穿阈值有关。推进剂击穿阈值越大,在相同的辐照激光能量(激光功率密度大于击穿阈值)作用下,激光能量转化为爆轰波能量的转化效率越低,推力器所获得的冲量越小,冲量耦合系数越小。在相同的实验条件下,实验所用的 4 种气体中,氦气的击穿阈值最高,氩气最低^[12]。因此,本实验测试结果为氩气的冲量耦合系数最大,氦气最小。

美国 NASA 的研究结果表明^[13] 相同激光脉冲辐照不同工质产生的冲量随工质原子量的增大而增大,这与本文实验结果也是一致的。

3.2.2 与其它研究结果的对比分析

从目前国内外所报道的实验数据来看,大气吸气模式激光推进冲量耦合系数的分布范围为 $14.3 \times 10^{-5} \sim 33.3 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}^{[1-10]}$ 。国外曾经报道过以氩气为推进剂进行的激光推进冲量耦合系数测试结果,其最大值大于 $30 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}^{[7-8]}$,与本文结果基本一致。图4对大气吸气模式激光推进冲量耦合系数的不同实验测试结果进行了对比。从图4中可以看出,本实验所获得的冲量耦合系数偏低。主要原因有以下两点:

(1)激光能量不是很高时,冲量耦合系数基本上随着激光能量的增加而线性变大。国外激光技术发展较快,脉冲激光器输出功率较高(10 kW左右),文献[11]中所用TEA CO₂激光器的功率为3 kW,而我们所用脉冲激光器仅为200 W左右。

(2)冲量耦合系数与推力器构型密切相关。文献[1][5]和[11]中所用推力器构型与本文所用推力器有很大不同,文献[10]所用推力器的具体参数与本文所用推力器也不尽相同。

4 误差分析

影响冲量耦合系数测量结果的因素是冲量 I 和激光能量 E 。下面分别对冲量 I 和冲量耦合系数 C_m 的测量值进行误差分析。

4.1 绝对误差

对(3)式全微分并取绝对值得出冲量 I 的绝对误差为

$$|dI| = |\sqrt{2gL(1-\cos\theta)}| |dm| + |m\sqrt{g(1-\cos\theta)/2L}| |dL| + |m\sqrt{gL/2(1-\cos\theta)}\sin\theta| |d\theta| \quad (5)$$

同样地,冲量耦合系数 C_m 的绝对误差为

$$|dC_m| = \left| \frac{\sqrt{2gL(1-\cos\theta)}}{E} \right| |dm| + \left| \frac{m\sqrt{g(1-\cos\theta)/2L}}{E} \right| |dL| + \left| \frac{m\sqrt{gL/2(1-\cos\theta)}\sin\theta}{E} \right| |d\theta| + \left| -\frac{m\sqrt{2gL(1-\cos\theta)}}{E^2} \right| |dE| \quad (6)$$

4.2 相对误差

根据误差理论,由(3)式和(5)式得出冲量 I 的相对误差为

$$\left| \frac{dI}{I} \right| = \left| \frac{dm}{m} \right| + \frac{1}{2} \left| \frac{dL}{L} \right| + \left| \frac{\theta\sin\theta}{2(1-\cos\theta)} \right| \left| \frac{d\theta}{\theta} \right| \quad (7)$$

由(4)式和(6)式得出冲量耦合系数的相对误差表达式为

$$\left| \frac{dC_m}{C_m} \right| = \left| \frac{dm}{m} \right| + \frac{1}{2} \left| \frac{dL}{L} \right| + \left| \frac{\theta\sin\theta}{2(1-\cos\theta)} \right| \left| \frac{d\theta}{\theta} \right| + \left| \frac{dE}{E} \right| \quad (8)$$

实验中,各个直接测量值及其测量误差如表1所示,表1中 θ 为各种推进剂气体在最大辐照激光能量作用下推力器的摆角。从表1可以看出,冲量 I 测量值的相对误差较小为2.0%~3.8%,冲量耦合系数 C_m 测量值的相对误差较大为5.4%~6.4%。

从(7)式和(8)式可以看出,影响冲量 I 相对误差的主要因素是摆角 θ 的测量误差,而影响 C_m 相对误差的主要因素是摆角 θ 和能量 E 的测量误差。摆角 θ 越大,其测量误差对实验结果的影响越小;同样的,辐照激光能量 E 越大,其测量误差对实验测试结果的影响越小。氩气的击穿阈值较低,辐照激光能量(激光功率密度大于击穿阈值)比较小的时候,推力器随摆线的摆动就比较明显,摆角 θ 就比较大;氦气的击穿阈值较高,即使在辐照激光能量比较高的情况下,摆角 θ 还是比较小。因此,影响冲量耦合系数 C_m 相对误差的两个主要误差源相互耦合,导致了4种不同推进剂气体冲量耦合系数 C_m 测量值的相对误差差别不大。

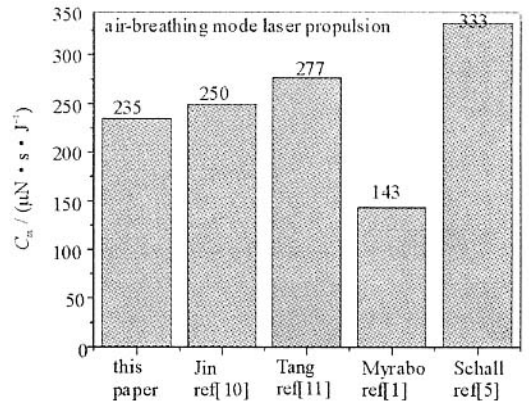


Fig. 4 Comparison of impulse coupling coefficients obtained in different experiments

图4 不同实验的冲量耦合系数

表 1 实验测量误差

Table 1 Experimental measurement errors

gas	m/g	dm/g	L/cm	dL/cm	$\theta/(^\circ)$	$d\theta/(^\circ)$	E/J	dE/J	dI/I	dC_m/C_m
Ar					31.4		13.1		2.0	5.8
air	4.962	0.01	37.5	0.1	21.7	0.5	15.4	0.5	2.8	6.0
N ₂					22.6		18.3		2.7	5.4
He					15.0		19.3		3.8	6.4

5 结 论

利用悬摆法对空气、氩气、氮气和氦气推进剂气体的激光推进冲量耦合系数进行了实验测试。结果表明：在实验测试的激光能量范围内 4 种推进剂气体的激光推进冲量耦合系数基本上都随着激光能量的增大而线性增大；不同种类推进剂气体的激光推进冲量耦合系数差别较大，但其相对误差差别不大。冲量耦合系数的相对误差较大主要是受实验条件的限制，这一点可以在实验条件改善后得到解决。

致 谢：本实验是在装备指挥技术学院激光推进实验室完成的，感谢实验室全体同志的关心和支持。

参考文献：

- [1] Myrabo L N, Messitt D G, Mead Jr F B. Ground and flight tests of a laser propelled vehicle[R]. AIAA 98-1001. 1998.
- [2] Mead Jr F B, Myrabo L N, Messitt D G. Flight and ground tests of a laser-boostered vehicle[R]. AIAA 98-3735. 1998.
- [3] Nebolsine P E, Pirri A N. Laser propulsion: the early years[C]//AIP Conference Proceedings. America. 2003, **664**: 11-21.
- [4] Bohn W L. Laser lightcraft performance[C]//Proc of SPIE. 2000, **3885**: 48-53.
- [5] Schall W O, Bohn W L, Eckel H A, et al. Lightcraft experiments in Germany[C]//Proc of SPIE. 2000, **4065**: 472-481.
- [6] Bohn W L, Schall W O. Laser propulsion activities in Germany[C]//AIP Conference Proceedings. America, 2003, **664**: 79-91.
- [7] Niino M. Activities of laser propulsion in Japan[C]//AIP Conference Proceedings. America, 2003, **664**: 71-78.
- [8] Kim S, Torikai H, Urabe N, et al. In-tube laser propulsion configuration[C]//AIP Conference Proceedings. America, 2003, **664**: 454-460.
- [9] Ageichik A A, Egorov M S, Rezunkov Y A, et al. Experimental study on thrust characteristics of airspace laser propulsion engine[C]//AIP Conference Proceedings. Japan, 2004, **702**: 49-60.
- [10] 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)
- [11] Tang Z P, Gong P, Hu X J, et al. Experimental investigation on air-breathing mode of laser propulsion[C]//AIP conference proceedings. Japan, 2004, **702**: 23-30.
- [12] Murai K, Tsukamoto M. Characteristics of laser induced gas breakdown[C]//Proc of SPIE. 2003, **4831**: 123-126.
- [13] 鲁欣, 张杰, 李英骏. 激光等离子体推进在火箭推进技术领域的应用前景[J]. 物理, 2002, **31**(12): 796-799. (Lu X, Zhang J, Li Y J. Prospective application of laser plasma propulsion in rocket technology. *Physics*, 2002, **31**(12): 796-799)

Measurement of impulse coupling coefficients of laser gas propulsion with a pendulum system

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

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

2. Department of Basic Theories, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract : The principle to measure the impulse coupling coefficients of laser propulsion with a pendulum system was provided. The impulse coupling coefficients of a parabol laser propulsion thruster were measured with a pendulum system using air, He, N₂ or Ar as propellant respectively. The experimental results indicated that the coupling coefficient of the laser propulsion was the highest when the propellant was Ar and it was the lowest when the propellant was He. The relative error of the impulse coupling coefficient was 5.4% ~ 6.4%.

Key words : Laser propulsion ; Impulse coupling coefficient ; Relative error ; Pendulum