

文章编号: 0258-7025(2006)12-1684-04

# 脉冲能量对激光推进中冲量耦合系数的影响

郑义军, 谭荣清, 柯常军, 石海霞, 张阔海, 王东蕾, 刘世明, 吴 谨, 万重怡

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘要** 实验通过采用最大输出脉冲能量为 100 J 的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 研究了从 13~80 J 的激光脉冲能量对大气呼吸模式激光推进冲量耦合系数的影响。结果表明当脉冲能量在 80~24 J 变化时, 冲量耦合系数没有明显变化, 当脉冲能量下降至 22 J 以下时, 冲量耦合系数下降 52%。对这一特性进行了初步的理论分析, 并通过改变实验环境气体压强, 对这一理论进行了验证。

**关键词** 激光技术; 激光推进; 激光脉冲能量; 冲量耦合系数

**中图分类号** TN 249 **文献标识码** A

## Effects of Laser Pulse Energy on Coupling Coefficient of Laser Propulsion

ZHENG Yi-jun, TAN Rong-qing, KE Chang-jun, SHI Hai-xia,  
ZHANG Kuo-hai, WANG Dong-lei, LIU Shi-ming, WU Jin, WAN Chong-yi

(*Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

**Abstract** A 100 J TEA CO<sub>2</sub> laser was employed to study the effects of variety of pulse energy from 13 J to 80 J on the momentum coefficient for air-breathing mode. The results indicated that the momentum coupling coefficient ( $C_m$ ) had no obvious change when the pulse energy decreased from 80 J to 24 J. While the energy was under 22 J, the  $C_m$  declined 52%. A preliminary analysis of theory was given, and an experiment of changing the air pressure in the vacuum chamber was carried to verify that.

**Key words** laser technique; laser propulsion; laser pulse energy; momentum coupling coefficient

## 1 引言

激光推进概念的提出与高功率激光器的发展紧密相连。A. Kantrowitz 和 H. Katsurayama 等<sup>[1,2]</sup>先后对推进飞行器入轨所需的激光器功率进行了估算。理想情况下, 将 1kg 质量的飞行器送入近地轨道的功率约为 2~3 MW。随着高功率大能量脉冲激光技术的成熟<sup>[3]</sup>, 将小质量飞行器通过激光束能推向近地轨道的梦想将成为可能。

作为激光推进的主要参数, 冲量耦合系数是衡量激光推进性能优劣的重要指标。研究激光脉冲能量对大气呼吸模式激光推进冲量耦合系数的影响, 可以为提高激光推进的效率, 以及选取适当的激光

脉冲能量参数提供依据。目前在国内外的研究中, 大多采用 CO<sub>2</sub> 激光作为推进源, 其单脉冲激光能量范围从 10 J~1 kJ 不等<sup>[4~6]</sup>。尽管研究过程中发现获得的冲量耦合系数不尽相同, 但由于采用不同类型的激光器和飞行器模型, 激光脉冲波形的时间分布特性及飞行器聚焦特性的不同, 使得无法区分激光脉冲能量对冲量耦合系数的影响。本文采用两套激光器单元串接的方式, 单脉冲最大输出能量为 100J。通过调整充电电压和控制放电单元, 在不改变激光脉冲波形时间分布特性和放电增益截面的前提下, 研究了激光脉冲能量的变化(13~80 J)对大气呼吸模式激光推进冲量耦合系数的影响。

**收稿日期:** 2006-05-09; **收到修改稿日期:** 2006-05-29

**基金项目:** 中国科学院知识创新工程(D5067-07)资助项目。

**作者简介:** 郑义军(1975—), 男, 安徽人, 中国科学院电子学研究所博士研究生, 从事光电子激光技术及其应用的研究。  
E-mail: zyj0120@sina.com

**导师简介:** 谭荣清(1966—), 男, 辽宁人, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 主要从事气体激光技术与应用方面的研究。E-mail: rongqingtan@vip.sina.com

## 2 实验

激光器采用中国科学院电子学研究所研制的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 谐振腔采用两节串接的气体放电单元组成的平凹稳定腔结构, 腔长 3.0 m, 耦合输出镜的反射率为 50%, 激光输出波长为 10.6 μm, 最大单脉冲输出能量可达 100 J, 近场光斑轮廓为面积 50 mm×50 mm 的正方形, 能量分布均匀。激光脉冲 10% 极大值处的全宽度约为 3 μs, 半极大值处全宽度小于 200 ns, 如图 1 所示。通过调整充电电压和控制放电单元的个数, 可以在不影响放电截面的前提下, 在 10~100 J 的大动态范围内调整激光器的脉冲输出能量。

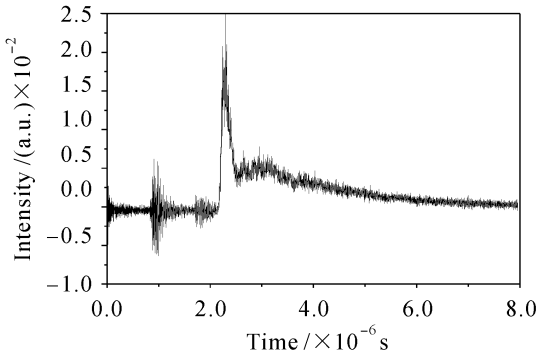


图 1 激光脉冲波形

Fig. 1 Laser pulse waveform

飞行器为铝合金材料, 用数控机床加工成抛物面型飞行器模型, 焦距为 5 mm, 质量为 8 g, 口径为 50 mm, 其内表面经过光学处理, 反射率可达 80% 以上。

为测定冲量耦合系数, 设计了图 2 所示的实验装置。将飞行器模型固定在冲击摆的底端, 摆的顶端悬挂在真空舱顶部。将激光照射到抛物面型飞行器的内表面, 空气在焦点处被光学击穿, 产生等离子体, 等离子体经过逆韧致吸收过程迅速膨胀形成激光支持燃烧波或爆轰波, 推动冲击摆运动, 其摆动张角通过嵌在摆底端的反射镜, 反射 He-Ne 指示光到远处的刻度尺上的位置折算。真空舱内的气压由真

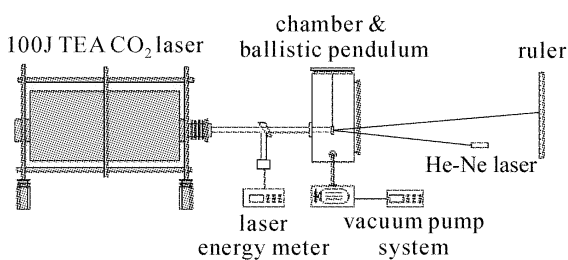


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

空泵控制, 气压值通过数字真空计 DL-4 读出, 其精度为 100 Pa。

冲量耦合系数  $C_m$  可表示为

$$C_m = \frac{1}{E} \frac{1}{L} \sqrt{2mgL_c I} \sqrt{1 - \cos\theta_m}, \quad (1)$$

其中  $E$  为激光的单脉冲输出能量,  $L$  为冲击摆的摆长,  $m$  为冲击摆的质量,  $g$  为重力加速度,  $L_c$  为冲击摆重心距摆悬挂点的距离,  $I$  为冲击摆的转动惯量,  $\theta_m$  为冲击摆的最大摆角。其大小可表示为

$$\theta_m = \frac{1}{2} \frac{y}{d}, \quad (2)$$

其中  $d$  为冲击摆距离刻度尺的距离,  $y$  为反射光斑在刻度尺上上升的高度。

## 3 实验结果

实验首先在大气环境中进行, 真空舱内气压为 100 kPa。在 13~80 J 间改变激光器输出能量, 分别测定了 13 J, 16 J, 22 J, 24 J, 28 J, 29 J, 44 J, 63 J 和 80 J 激光脉冲能量条件下的冲量耦合系数, 实验结果如图 3 所示。然后密闭真空舱口, 利用真空泵, 将

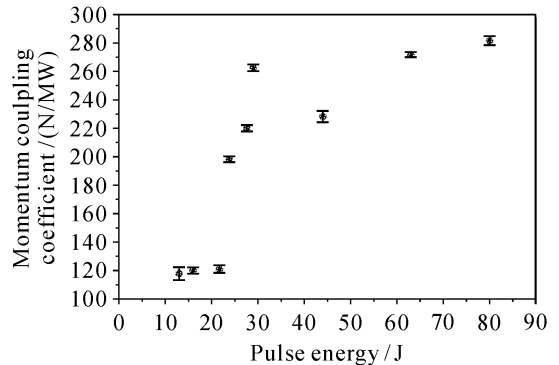


图 3 脉冲能量与冲量耦合系数的关系

Fig. 3 Pulse energy versus coupling coefficient

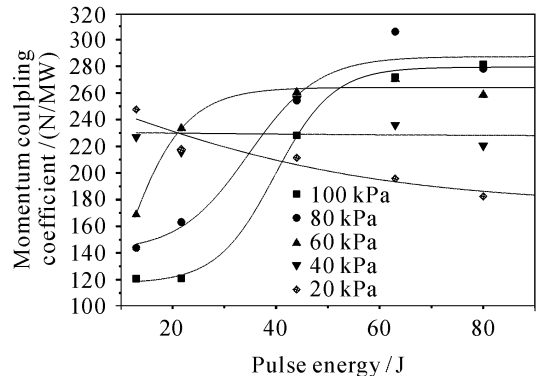


图 4 不同气压条件下脉冲能量与冲量耦合系数的关系

Fig. 4 Pulse energy versus coupling coefficient at different air pressures

舱内气压分别抽至 80 kPa, 60 kPa, 40 kPa 和 20 kPa。测定了 13 J, 22 J, 44 J, 63 J 和 80 J 等 5 个能量点下的冲量耦合系数。图 4 给出了各能量点下的冲量耦合系数值, 以及不同气压条件下的拟合曲线。

## 4 结果分析

### 4.1 理论分析

产生爆轰波的阈值为<sup>[7]</sup>

$$YP = P^{2/3} p_0^{0.2} \lambda^{0.36} \geq (3 \sim 5) \times 10^5, \quad (3)$$

式中  $P, \lambda, p_0$  的单位分别为  $W/cm^2, \mu m$  和  $133.3 Pa$ , 由(3)式可知, 影响激光支持燃烧波转化为激光支持爆轰波阈值的因素主要包括激光功率密度  $P$ , 激光波长  $\lambda$  和环境气体压强  $p_0$ 。

参考文献[8]对激光支持燃烧波和爆轰波作用在飞行器上所产生的冲量耦合系数给予了解析描述

$$C_m = 0.838851 C_1^{1/2} C_2^{3/2} \rho_0^{1/2} E^{-1/2} R_0^{3/2} C, \quad (4a)$$

考虑到爆轰波的衰减, 经适当修正可得到

$$C_m = 0.838851 C_1^{1/2} C_2^{3/2} \rho_0^{1/2} E^{-1/2} R_0^{-3/2} R_c^3 C, \quad (4b)$$

式中  $R_c$  为激光脉冲结束时爆轰波扩散的半径,  $\rho_0$  为周围环境气体的密度,  $E$  为入射激光脉冲能量,  $R_0$  为飞行器抛物面焦点距离顶端的距离,

$$C = \int_0^{\theta_0} 2 \sin(\theta + \alpha) \sin \alpha \sin \theta d\theta.$$

其中

$$\tan \alpha = \begin{cases} \frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta} - 1} & \theta < \frac{\pi}{2} \\ -\frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta} + 1} & \theta > \frac{\pi}{2} \end{cases},$$

$\theta_0$  为飞行器的出口边沿相对于抛物面焦点的半张角。对于激光支持燃烧波, 经过计算得出

$$C_1 = \frac{(\gamma - 1)(\gamma - 1)^{2/5} (k - 1)^{2/5}}{(\gamma + 1) 2^{1/5} (k + \omega)^{2/5} (\gamma - 1 - 2\omega)^{2/5} (2\pi)^{2/5} \sin^{4/5}(\theta_1/2) (\gamma + 1)^{1/5}},$$

$$C_2 = \frac{(5/6)^{3/5} [2/(\gamma + 1)]^{6/5} (\gamma - 1)^{1/5} (k - 1)^{1/5} (\gamma + 1)^{2/5}}{(k + \omega)^{1/5} (\gamma - 1 - 2\omega)^{1/5} (2\pi)^{1/5} \sin^{2/5}(\theta_1/2)}, \quad (5)$$

$\theta_1$  为激光入射光斑轮廓线相对于抛物面焦点的半张角,  $\gamma$  为空气的绝热系数,  $k$  为空气等离子体的绝热系数,  $\omega = (u_c - u_s)/u_s$ , 在此处其取值远远小于 1,  $u_c$  为燃烧波的波速,  $u_s$  为波前粒子速度。对于激光支持爆轰波用同样的计算方法得到

$$C_1 = \frac{(k - 1)^{2/3}}{(5/3)^{4/5} (k^2 - 1)^{-4/15} 2\pi^{2/5} \sin^{4/5}(\theta_1/2) (k + 1)^{1/3}},$$

$$C_2 = \frac{(k^2 - 1)^{1/5} (5/3)^{3/5}}{2\pi^{1/5} \sin^{2/5}(\theta_1/2)}, \quad (6)$$

取  $\gamma = 1.4, k = 1.2$ , 将激光束及飞行器参数代入(4), (5) 和(6) 式, 经计算,  $C = 1.9614, \rho_0^{1/2} = 1.14 \text{ kg}^{1/2}/\text{m}^{3/2}$ 。

对于激光支持燃烧波:  $C_1^{1/2} = 0.132, C_2^{3/2} = 0.504$

$$C_m = 0.838851 \times 0.132 \times 0.504 \times 1.14 \times 1.9614 \times R_0^{-3/2} R_c^3 E^{-1/2} = 0.136 R_0^{-3/2} R_c^3 E^{-1/2}, \quad (7)$$

对于激光支持爆轰波:  $C_1^{1/2} = 0.3325, C_2^{3/2} = 0.7455$

$$C_m = 0.838851 \times 0.3325 \times 0.7455 \times 1.14 \times 1.9614 \times R_0^{-3/2} R_c^3 E^{-1/2} = 0.465 R_0^{-3/2} R_c^3 E^{-1/2}. \quad (8)$$

### 4.2 结果讨论

对于大气呼吸模式激光推进, 根据能量转化效率, 我们将激光脉冲能量定义为增益与饱和两个区域。在增益区, 工作物质将激光能量转化为飞行器动能的效率基本维持不变; 在饱和区, 工作物质吸收能量及转化效率逐步下降。

按激光支持吸收波方式的不同, 增益区又可分为燃烧波增益区和爆轰波增益区。当激光脉冲能量偏低时, 产生的是亚音速的激光支持燃烧波, 如图 3 所示的 13~22 J 区域。当激光脉冲能量大于爆轰波产生的阈值条件时, 则产生超音速爆轰波。比较

(7), (8) 两式可知对于同一抛物面构型的飞行器, 在能量相当时, 若激光推进过程中产生的是爆轰波, 冲量耦合系数将比产生燃烧波的情况下提高约 70%。实验中, 当激光脉冲能量为 22 J 时, 冲量耦合系数为 121 N/MW, 而在 24 J 时, 测得的冲量耦合系数为 198 N/MW, 这与理论值基本相符。

在燃烧波和爆轰波增益区, 飞行器获得的动量随激光脉冲能量的增加而同比增加, 因而冲量耦合系数分别相对稳定。如图 3 所示 13~22 J, 29~80 J 两个能量段, 就分别属于这两个增益区, 其间 22~29 J, 处在燃烧波向爆轰波过渡区, 其冲量耦合系

数的值介于两者之间。Willy L. Bohn 等<sup>[5]</sup>在类似实验中的实验结果也表明在 128~288 J 能量段, 冲量耦合系数也均处在 250 N/MW 左右一个较为稳定的范围内。

可以预见当能量继续增大, 由于空气作为工作物质对激光能量的吸收及转化能力趋于饱和, 将进入饱和区, 工作物质对能量的吸收及转化效率逐步下降, 冲量耦合系数呈下降趋势。这与 (4b) 式所呈现的趋势一致。而对于处于增益区的激光脉冲能量而言, 我们根据实验结果引入增益系数概念, 对 (4b) 式加以修正得:

激光支持燃烧波

$$C_m = 0.2653C_1^{1/2}C_2^{3/2}\rho_0^{1/2}R_0^{-3/2}R_c^3C,$$

激光支持爆轰波

$$C_m = 0.1876C_1^{1/2}C_2^{3/2}\rho_0^{1/2}R_0^{-3/2}R_c^3C. \quad (9)$$

图 5 给出了实验结果与修正后的理论计算值的拟合曲线, 二者在数值大小和曲线分布规律上基本一致。

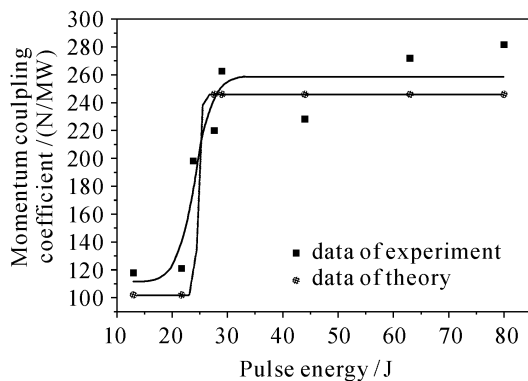


图 5 实验与理论计算结果

Fig. 5 Data of experiment and theory

由 (3) 式可知, 激光支持爆轰波产生的阈值随着环境气体密度的降低而降低。这是因为空气密度降低后, 即使激光脉冲能量较低, 但单个气体分子仍获得较高辐照能量, 形成爆轰波, 飞行器因此获得较大的动量。如图 4 所示, 在气压从 100 kPa 下降到 60 kPa 时, 进入爆轰波增益区的拐点向低能量方向移动。由此可以推断随着空气密度的进一步降低,

## 5 结 论

在采用 TEA CO<sub>2</sub> 激光器进行大气呼吸模式的激光推进中, 冲量耦合系数与激光脉冲能量有着密切的关系。处在不同能量区域内的冲量耦合系数也明显不同, 我们将这几个区域分别定义为: 燃烧波增益区、爆轰波增益区和爆轰波饱和区。本实验中, 在环境气压为 100 kPa 时, 当脉冲能量在 80~28 J 变化时, 冲量耦合系数没有明显变化, 当脉冲能量下降至 22 J 和 13 J 时, 冲量耦合系数下降 52%。

环境空气的压强对上面所定义三个能量区域有明显的影晌。随着空气密度的下降, 三个能量区域的分布向低能量方向偏移。

实验是在保持激光脉冲波形和放电增益截面不变的前提下进行的。保持放电增益截面不变和激光脉冲能量稳定, 研究激光脉冲波形的变化对飞行器冲量耦合系数的影响, 将是下一步研究的重点。

## 参 考 文 献

- 1 A. Kantowitz. Propulsion to orbit by ground-based lasers [J]. *Astronautics and Aeronautics*, 1972, **10**(5):74~76
- 2 H. Katsurayama, M. Ushio, K. Komurasakif *et al.*. Analytical Study on Flight Performance of a RP Laser Launcher [C]. A. V. Pakhomov, L. N. Myrabo ed., Proceedings of the Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Troy, New York, USA, Published in AIP Conference Series, 2005. 117~127
- 3 Joung R. Cook. Atmospheric Propagation of High Energy Lasers and Applications [C]. A. V. Pakhomov, L. N. Myrabo ed., Proceedings of the Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Troy, New York, USA, Published in AIP Conference Series, 2005. 58~72
- 4 Zheng Yijun, Tan Rongqing, Zhang Kuohai *et al.*. Experiment of laser-propulsion free-flight [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 171~174  
郑义军, 谭荣清, 张阔海 等. 激光推进自由飞行实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):171~174
- 5 Willy L. Bohn, Wolfgang O. Schall. Laser Propulsion Activities in Germany [C]. Andrew V. Pakhomov ed., Proceedings of the First International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Huntsville, Alabama, USA, Published in AIP Conference Series, 2003. 79~91
- 6 Koichi Mori, Akihiro Sasoh, Leik N. Myrabo. Experimental Investigation of Airbreathing Laser Propulsion Engines; CO<sub>2</sub> TEA vs. EDL [C]. A. V. Pakhomov, L. N. Myrabo ed., Proceedings of the Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Troy, New York, USA, Published in AIP Conference Series, 2005. 155~165