

文章编号: 0258-7025(2005)07-0889-05

大气模式激光推进耦合系数的实验研究

郑义军¹, 龚平², 谭荣清¹, 唐志平², 柯常军¹, 蔡建², 万重怡¹, 胡晓军²,
于延宁¹, 刘世明¹, 吴谨¹, 郑光¹, 周锦文¹, 吕岩¹

(¹中国科学院电子学研究所, 北京 100080; ²中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽合肥 230027)

摘要 为了研究大气压强对激光推进耦合系数的影响, 设计了一座真空仓, 利用真空泵系统控制仓内气压从 4.6×10^3 Pa 到 101.3×10^3 Pa 之间变化。采用单脉冲能量为 20 J 的 TEA CO₂ 激光器, 对挂有光船模型的冲击摆进行大气模式激光推进耦合系数的测定。实验发现随着真空仓内气压的上升, 冲量耦合系数逐渐增大, 当气压值达到 34.6×10^3 Pa 左右时, 冲量耦合系数达到最大, 随后伴同气压值的增加冲量耦合系数逐步下降。当入射激光单脉冲能量为 10 J 时, 冲量耦合系数的峰值处的气压值略有降低。从激光等离子体冲击波的角度对这一现象进行了初步的分析和解释, 预测了能量对冲量耦合系数的峰值影响。

关键词 激光技术; 激光推进; TEA CO₂ 激光器; 大气模式; 冲量耦合系数

中图分类号 TN249 文献标识码 A

Experimental Study of Coupling Coefficients for Air-Breathing Mode Laser Propulsion

ZHENG Yi-jun¹, Gong Ping², TAN Rong-qing¹, TANG Zhi-ping², KE Chang-jun¹,
Cai Jian², WAN Chong-yi¹, HU Xiao-jun², YU Yan-ning¹, LIU Shi-ming¹,
WU Jin¹, ZHENG Guang¹, ZHOU Jin-wen¹, LÜ Yan¹

¹ Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

² Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China

Abstract In order to study the effect of the air pressure on the coupling coefficients for laser propulsion, a vacuum chamber was designed in which the air pressure can be changed from 4.6×10^3 Pa to 101.3×10^3 Pa. The pendulum with light-craft model was propelled by TEA CO₂ laser. It was found in the experiment that when the laser pulse energy was 20 J, the coupling coefficients increased gradually with the increase of air pressure, reached the summit at the air pressure of 34.6 kPa, then began to decrease. When the laser pulse energy was reduced to the 10 J, the air pressure value at which the coupling coefficients reached the summit fell. According to the theory of shockwave and laser plasma, the paper gives a preliminary analysis to this phenomenon and predicted the effect of the laser pulse energy on the peak value of coupling coefficients.

Key words laser technique; laser propulsion; TEA CO₂ laser; air-breathing mode; momentum coupling coefficients

1 引言

激光推进作为一种新型的推进模式, 有着良好的应用前景, 受到各个国家的重视。传统化学火箭发动机的最高比冲仅为 $4000 \sim 5000$ N·s/kg, 而采用激光推进, 比冲可达到 2×10^4 N·s/kg。1972

年, 美国学者 A. Kantrowitz^[1] 提出高功率激光可能用于产生在火箭发射过程中的推力, 将小卫星或飞行器送入近地轨道。1999 年和 2000 年 Leik N. Myrabo^[2] 利用脉冲能量为 1 kJ, 重复频率为 10 Hz, 脉宽为 30 μs 的 TEA CO₂ 激光器, 成功地将

收稿日期: 2004-07-02; 收到修改稿日期: 2004-12-21

基金项目: 中国科学院电子学研究所知识创新工程(D5067-7)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, 主要从事激光光电子及其应用方面的研究。E-mail: zyj0120@sina.com

飞行器发射到 39 m 的高度和 71 m 的高度。日本学者利用水作为推进剂进行了一系列激光推进实验^[3], Akihiro Sasoh 教授^[4]领导的研究小组还进行了管中激光推进实验。德国学者对等离子体的膨胀进行了分析并模拟不同高度下的大气压对耦合系数进行了测量^[5]。国内从 20 世纪 90 年代开始激光推进的研究, 哈尔滨工业大学在激光打靶产生等离子体方面进行了研究, 2001 年中国科技大学唐志平教授的研究小组应用烧蚀模式实现了 5.87 g 铝弹丸的单脉冲激光垂直推进演示, 飞行高度为 1.48 m^[6]。2003 年 3 月, 中国科学院电子学研究所与中国科技大学联合进行了 TEA CO₂ 脉冲激光器推进抛物面型飞行器的实验^[7,8], 实现了大气模式下的激光推进, 垂直飞行高度超过了 1 m, 实验测得的冲量耦合系数 C_m 达到 $27.7 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$ 。2004 年 2 月, 中国科学院电子学研究所与中国科技大学再次联合进行了一系列关于采用大气模式激光推进的研究^[9,10], 本文报道了此次利用冲击摆对冲量耦合系数进行的实验研究, 并对有关现象进行了讨论。

2 实 验

2.1 激光器

激光器采用中国科学院电子学研究所研制的高功率 TEA CO₂ 激光器^[11], 谐振腔采用平凹腔结构, 腔长 3.6 m, 耦合输出镜的反射率为 50%, 波长 10.6 μm, 最大单脉冲输出能量可达 30 J, 近场光斑轮廓为长方形面积 45 mm×25 mm, 分布十分均匀, 如图 1 所示。激光脉冲的 10% 极大值处的全宽度约为 3 μs, 主峰的半峰全宽(FWHM)小于 200 ns, 实验中采用 φ40 mm 的光阑, 以保证激光光斑完全照射在光船模型内反射面中。在实验中, 采用单个激光脉冲作为推进实验, 以便于定量分析。

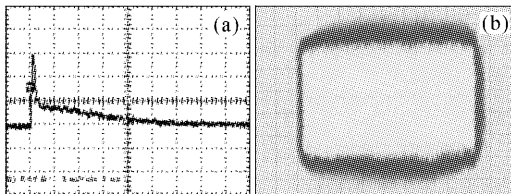


图 1 脉冲激光的波形(a)与激光光斑型廓(b)
Fig.1 Waveform of the laser pulse (a) and profile of the laser beam (b)

2.2 光船模型

光船模型采用中国科学技术大学设计加工的抛

物面型聚焦罩, 抛物面焦距为 5 mm, 质量为 3.8 g, 口径为 50 mm, 其内表面经过光学处理, 反射率可达 90% 以上。

2.3 真空仓及冲击摆

为研究在不同气压下的空气模式的光船模型冲量耦合系数的特性, 实验中采用了一个 250 mm×350 mm×500 mm 的真空室, 采用晶体材料 GaAs 作为激光入射窗口, 表面镀 10.6 μm 增透膜, 观察窗采用厚 20 mm 的有机玻璃, 真空仓内气压可从 $4.6 \times 10^3 \text{ Pa}$ 至 $101.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ 之间作连续变化。

冲击摆的结构如图 2 所示, 摆的长度 l 为 220 mm, 摆的下方连接有机玻璃环用于固定光船模型。系统的质心距摆杆顶端的长度 l_c 为 186 mm, 系统的转动惯量 I 为 $11.1 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 质量 m 为 28.8 g。

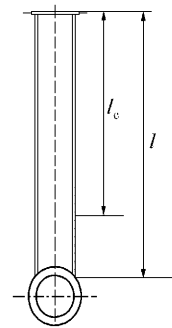


图 2 冲击摆示意图
Fig.2 Sketch of the pendulum

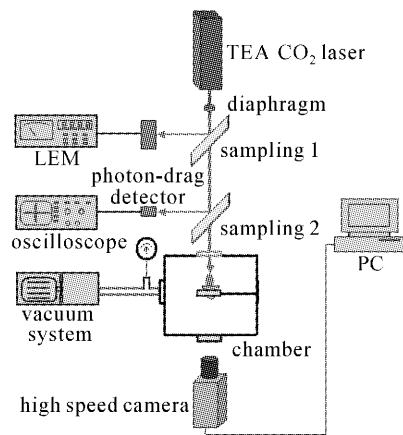


图 3 实验装置图
Fig.3 Experimental setup

2.4 实验装置

如图 3 所示, 波长为 10.6 μm 激光由 TEA CO₂ 激光器发射后通过一个 φ40 mm 的光阑, 经取样板 1 和 2 取样后分别通过激光能量计(LEM)测得激光

脉冲能量和光子牵引探头 (photon drag detector) 及示波器测取激光脉冲的输出波形。激光束的主要能量穿透 GaAs 晶体窗口在抛物面型光船模型的内表面反射聚焦后将空气击穿形成爆轰波, 推动悬挂在密闭仓内的冲击摆, 冲击摆摆动的过程由 SPEEDCAM PRO_LT 型高速 CCD 相机动态记录并存储到计算机中作进一步处理, 实验中的拍摄频率为 1000 Hz。密闭仓内的气压由真空泵控制, 仓内气压通过北京大学 DL-1 DIGITAL GAUGE CONTROL 数字真空计直接读出, 精度可达 0.1 Pa。实验中从 4.6×10^3 Pa 到 101.3×10^3 Pa, 选取了 10 个不同压强点模拟不同高度的大气层进行了激光推进的实验。

3 实验结果及讨论

3.1 冲量耦合系数的计算

在不考虑空气阻力和系统摩擦力的情况下, 由能量守恒定律可知

$$\frac{1}{2} I \omega^2 = mgl_c (1 - \cos \theta_m), \quad (1)$$

其中 ω 为摆受冲击后的初始角速度, θ_m 为冲击摆摆动的最大角度。由激光脉冲产生的冲量可以表示为

$$P = I\omega/l, \quad (2)$$

根据耦合系数 C_m 的定义有

$$C_m = \frac{1}{El} \sqrt{2mgl_c I} \sqrt{1 - \cos \theta_m}, \quad (3)$$

其中, E 为入射能量。

3.2 冲量耦合系数的测定

实验中, 每个气压点重复两次实验, 数据取两次平均值。从统计的结果来看, 实验的重复性较好, 两次实验值基本重合。图 4 所示为入射激光脉冲能量为 19.8 J 时, 实验测得的冲击摆的最大摆角与气压的关系。图 5 给出了根据最大摆角计算得出的光船

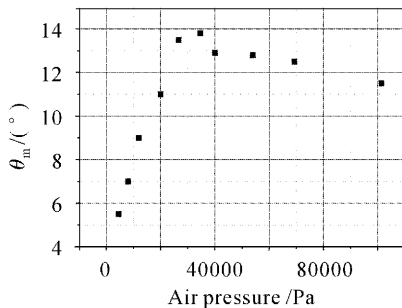


图 4 冲击摆的最大摆角与气压的关系

Fig. 4 Maximal swinging angle of pendulum versus air pressure

模型冲量耦合系数的值及其与气压的关系。

图 6 给出了光船模型冲量耦合系数的值及其与不同气压对应的海拔高度关系的拟合曲线。图 7 给出了光船模型在激光入射能量分别为 10J 和 20J

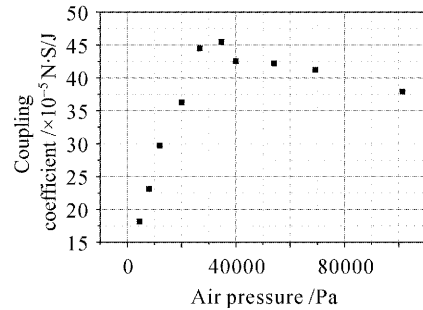


图 5 冲量耦合系数与气压的关系

Fig. 5 Coupling coefficient versus air pressure

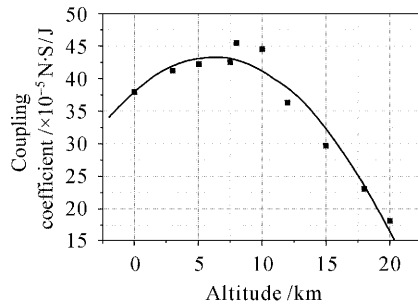


图 6 冲量耦合系数与海拔高度的关系

Fig. 6 Coupling coefficient versus altitude

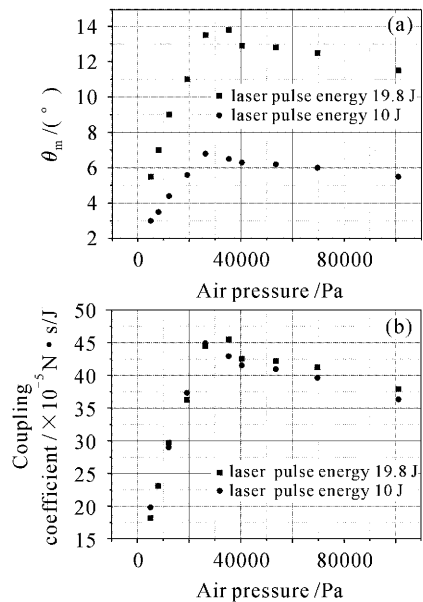


图 7 不同激光脉冲能量下冲击摆最大摆角 (a) 及耦合系数 (b) 与气压的关系

Fig. 7 Maximal swinging angle of pendulum (a) and coupling coefficient (b) versus air pressure with the different laser pulse energy

时,冲击摆的最大摆角和由此计算得出的冲量耦合系数与气压的关系图。

3.3 结果及讨论

从图 5 可以看出,气压从 4.6×10^3 Pa 至 34.6×10^3 Pa 之间光船模型的冲量耦合系数迅速增大,在气压为 34.6×10^3 Pa 左右时,光船模型的冲量耦合系数达到最大值 45.48×10^{-5} N·s/J,0 到 34.6×10^3 Pa 间的上升斜率为 15.8×10^{-2} N·s/J·Pa,随后光船模型的冲量耦合系数缓慢下降,在 101.3×10^3 Pa 时为 37.93×10^{-5} N·s/J,下降了 16.6%。

德国 Willy L. Bohn 等^[5,12]采用单脉冲约 200 J 的 TEA CO₂ 激光脉冲进行实验,在 0 到 26.7×10^3 Pa 气压变化范围内,上升斜率为 11.7×10^{-2} N·s/J·Pa,而在 26.7×10^3 Pa 到 101.3×10^3 Pa 之间冲量耦合系数基本保持一个定值。经过对文献[5]的数据分析,发现了一个原文未提及的现象,即在 Bohn 等的实验中所采用的激光单脉冲能量为 128 J 时,在 101.3×10^3 Pa 左右的耦合系数略低于在 80×10^3 Pa 左右的值。这一点似乎说明,在 Bohn 等的实验中,至少对于激光脉冲能量为 128 J 的情况,冲量耦合系数也在 0 Pa 到 101.3×10^3 Pa 气压之间,存在一个极大值,只不过这一差异较小,约为 12%左右。

文献[13]中进行的在不同气压下激光直接聚焦照射固体靶(铝)表面的激光推进也有类似的结论。据文献[13]报道,在 0.53 Pa, 33.3×10^3 Pa, 53.3×10^3 Pa, 101.3×10^3 Pa 气压下 TEA CO₂ 激光聚焦照射固体靶的冲量耦合系数分别为 1.7×10^{-5} N·s/J, 3.8×10^{-5} N·s/J, 3.6×10^{-5} N·s/J 和 3.1×10^{-5} N·s/J,在气压为 33.3×10^3 Pa 时,耦合系数最大。这一现象对于光船模型的设计和推进模式有着积极的参考价值。

大气模式的激光推进是以聚焦后的光束,在瞬时击穿空气而产生爆轰波来推动光船模型的,空气作为推进物质,其获得冲量的大小取决于空气的密度 ρ_0 和冲击波的速度 D 。在空气密度较低的情况下,密度的大小决定了冲量的大小,空气越稀薄,产生的冲量越小,图 5 中,在 34.6×10^3 Pa 前的迅速上升段就符合这一现象。随着空气密度增加到一定程度,激光等离子体产生的冲击波速度在影响光船模型获得冲量的因素中占主导地位,而冲击波的速度取决于入射的激光能量 E 和气体的初始密度 ρ_0 ,其表达式为^[14]

$$D = \frac{dR}{dt} = \frac{2}{5} \frac{R}{t} = \xi_0 \frac{2}{5} \left(\frac{E}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{-3/5}, \quad (4)$$

$$C_m \sim \frac{D}{E} = \xi_0 \frac{2}{5} \left(\frac{1}{\rho_0} \right)^{1/5} \left(\frac{1}{E} \right)^{4/5} t^{-3/5}, \quad (5)$$

其中 R 为波阵面传播的距离, ξ_0 为波阵面对应于独立变数的确定值, t 为波阵面传播的时间。由(4)式可以看出,在入射能量一定的情况下,冲击波波阵面的传播速度与 $\rho_0^{1/5}$ 成反比,即当空气的初始密度增加到一定程度时,随着冲击波传播速度的下降,光船模型的速度也随之下降。冲量耦合系数在达到一个峰值后开始下降。

此外,对于大气模式下的激光推进,空气阻力 f 可表述为

$$f = -kv, \quad (6)$$

其中 k 为与光船模型形状和空气密度相关的常数, v 为光船模型运动的速度。(6)式表明随着气体压强的增加,空气对光船模型的阻力也增大,这也是导致冲量耦合系数达到一个峰值后转而下降的原因。

由(5)式可见,相对于小能量激光入射,若入射激光能量较大,在该入射能量条件下一定程度上弱化了由于空气密度的增加造成的冲击波速度减小的趋势,即冲量耦合系数的峰值向气压更高的方向移动,甚至峰值消失,在高气压区形成一个平顶区。

由图 7 所示的过程可以看出入射能量从 20 J 变化为 10 J 时,耦合系数与气压的关系规律基本保持不变,但耦合系数的峰值略向低气压方向移动。Bohn 等在进行类似的实验研究中采用的单脉冲激光能量大部分为 200J 以上,比本实验所采用的激光能量高出 10 倍以上,所以没有峰值现象的产生。但当采用 128 J 的激光能量入射时,在 101.3×10^3 Pa 左右的耦合系数较 80×10^3 Pa 的值略有下降。这符合理论的预见,即激光入射能量越高,冲量耦合系数的峰值将向高气压的方向移动。

对于有空气存在环境中的固体靶的激光推进而言,激光推进的耦合系数由真空烧蚀推进和空气爆轰推进两部分组成,据 A. V. Pakhomov 和谭荣清等^[15]所作的研究表明,随着空气压强的增大,空气爆轰推进所占比重逐渐增大,真空烧蚀推进所占比重逐渐减小,到 133.3 Pa 附近两者大致相当,在 1.33×10^3 Pa 以上基本是以空气爆轰推进为主,所采用的激光能量在 6.8~15.2 J 间与本实验属于同一量级,因而以上对大气模式在 34.6×10^3 Pa 左右有最大值的解释在此处也应该是成立的。

由图 6 可以看出从地面到海拔 11 km 的高度

所获得的耦合系数都是较高的,而且在 7 km 至 8 km 处存在一个最佳冲量耦合系数区,可见在实验所采用的激光能量范围内,至少在这个高度采用大气模式进行激光推进是比较适合的。这个结果可以减少飞行器所必须携带的燃料重量,从而提高飞行器的有效载荷,同时还可以以此为基础进一步研究采用大气模式时理想的发射高度,以及采用激光推进时,大气与烧蚀模式交替的切换点。

4 结 论

从实验研究所采用的 10 J 到 20 J 的激光能量范围内,可以得出如下结论:

1) 在 0 至 26.7×10^3 Pa 之间,冲量耦合系数有一个迅速上升区。

2) 在 34.6×10^3 Pa 左右,冲量耦合系数达到最大值 45.48×10^{-5} N · s/J,略大于相关文献的报道^[12],随着激光入射能量的增大,冲量耦合系数的峰值向气压高的方向移动。

为进一步验证对耦合系数峰值的分析,在下一步的研究中,将大范围地改变激光的入射能量观察峰值点是否随激光能量的增大向高压方向漂移,此外还将研究不同气压下的空气阻力对冲击摆动能的影响。

参 考 文 献

- 1 A. Kantrowitz. Propulsion to orbit by ground-based lasers [J]. *Astronautics and Aeronautics*, 1972, **10**(5): 74~76
- 2 Leik N. Myrabo. Brief history of the lightcraft technology demonstrator (LTD) project [C]. Andrew V. Pakhomov ed., Proceedings of the First International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Huntsville, Alabama, USA, published in AIP Conference Series, 2003. 49~60
- 3 Masayuki Niino. Activities of laser propulsion in Japan [C]. Andrew V. Pakhomov ed., Proceedings of the first International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Huntsville, Alabama, USA, published in AIP Conference Series, 2003. 71~78
- 4 Naohide Urabe, Sukyum Kim, Akihiro Sasoh *et al.*. Vertical launch performance of laser-driven in-tube accelerator [C]. Andrew V. Pakhomov ed., Proceedings of the First International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Huntsville, Alabama, USA, Published in AIP Conference Series, 2003. 105~111
- 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 Guo Dahao, Wu Hongxing, Wang Shenbo *et al.*. Preliminary study on propelling the light craft with laser [J]. *Laser & Optronics Progress*, 2001, (9): 30~31
郭大浩,吴鸿兴,王声波等. 用激光推进轻型飞行器的初步实验探索 [J]. *激光与光电子学进展*, 2001, (9): 30~31
- 7 Zhi-ping Tang, Ping Gong, Xiaojun Hu *et al.*. Experimental investigation on air-breathing mode of laser propulsion [C]. K. Komurasaki ed., Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion Sendai, Japan, Published in AIP Conference Series, 2004. 23~30
- 8 Ke Changjun, Wan Chongyi. Laser propelled vehicle [J]. *Laser & Optronics Progress*, 2003, **40**(8):18~21
柯常军,万重怡. 激光推进飞行器技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(8):18~21
- 9 Ding Gong, Rongqing Tan, Zhiping Tang *et al.*. Experimental investigation of the effects of laser parameters on laser propulsion [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(9):538~540
- 10 Jing Li, Huifeng Tong, Jian Cai *et al.*. Muti-use laser impulse pendulum and laser propulsion parameters measurement [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(11):650~653
- 11 Chongyi Wan, Shiming Liu, Rongqing Tan *et al.*. Power scaling of printed-circuit-board preionized TEA CO₂ laser up to 3.6 kW [J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, **36**: 647~649
- 12 W. O. Schall, W. L. Bohn, H. A. Eckel *et al.*. Lightcraft experiments in Germany [C]. *SPIE*, 2000, **4605**: 472~481
- 13 Rongqing Tan, Jun Li, Jeremy Hughes *et al.*. Experimental study of coupling coefficients for propulsion on TEA CO₂ laser [C]. Proceedings of the Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Sendai, Japan, Published in AIP Conference Series, 2004. 122~128
- 14 Ya. B. Zel'dovich, Yu. P. Raizer. Shockwave and Hydrodynamics at High Temperature. Physics [M]. Beijing: Science Press, 1980. 94~98
Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. 激波和高温流体动力学现象物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1980. 94~98
- 15 Andrew V. Pakhomov, Jun Lin, Jeremy Hughes *et al.*. Coupling coefficients and mass removal rates for propulsion on TEA CO₂ laser with ballistic pendulum [C]. *SPIE*, 2004, **5448**: 1017~1027