

文章编号: 0258-7025(2006)11-1472-05

脉冲波形对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 为了研究 TEA CO₂ 激光输出的脉冲波形对激光推进中冲量耦合系数的影响, 通过激光技术手段, 改变激光混合气体比例及压强, 控制激光器脉冲输出波形, 将激光的脉冲宽度压缩近 50%。在此基础上进行的激光推进冲量耦合系数的实验测量和数值计算结果表明, 对于大气呼吸模式 TEA CO₂ 激光推进而言, 在不影响工质击穿功率密度的情况下, 减小脉冲前段起击穿工质作用的尖峰部分占整个脉冲能量的比例, 有利于获得高的冲量耦合系数。脉冲宽度大于二维运动的特征时间时, 获得的冲量耦合系数也高于脉冲宽度偏小时所获得的冲量耦合系数。

关键词 激光技术; 激光推进; 脉冲波形; 冲量耦合系数

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A

Effect of Pulse Waveform on Momentum Coupling Coefficient

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 To study the effect of transversely excited atmospheric (TEA) CO₂ laser pulse waveform on the momentum coupling coefficient, the waveform of laser pulse was changed, and the pulse duration was compressed about to 50% by controlling the pressure of the gas and proportion of components in gas mixture. According to that, some experiments and numerical calculation were done. Achieved results indicate that increasing the coupling coefficient is very favorable for decreasing the proportion of energy between the forepart and the whole pulse in TEA CO₂ laser propulsion. Also, the coupling coefficient can be effectively raised while pulse duration is bigger than characteristic time of two-dimensional movement.

Key words laser technique; laser propulsion; pulse waveform; momentum coupling coefficient

1 引言

在种类繁多的激光推进中, 采用大能量、高峰值功率的重复频率脉冲 CO₂ 激光器, 已经将飞行器模型推至 71 m 的高空^[1], 有着良好的应用前景。国内也成功地进行了大气呼吸模式脉冲激光推进自由飞行的演示实验^[2]。一系列的研究表明, 对于大气呼吸模式脉冲激光推进, 在脉冲激光作用期间, 激光光束经抛物面型飞行器聚焦后的功率密度一旦超过工质的击穿阈值, 将击穿工质并产生等离子体。等离

子体通过逆韧致吸收激光能量, 迅速膨胀生成激光支持爆轰波(LSDW), 激光支持爆轰波继续吸收剩余激光能量而膨胀, 在飞行器上产生推力, 推进飞行器运动。在此期间激光支持爆轰波的强度不会减弱, 以超音速迎着激光方向传播。但随着该激光脉冲的结束, 在下一个脉冲到来之前, 激光支持爆轰波在传播的过程中无后续能量吸收, 在波后的扰动下, 其强度随着时间的推移, 衰减成为冲击波传播。由此可见, 在脉冲激光推进的过程中, 激光脉冲的时间分布特性, 决定了激光功率密度随时间的变化关系,

收稿日期: 2006-04-13; 收到修改稿日期: 2006-05-15

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, 主要从事光电子激光技术及其应用方面的研究。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, 目前主要从事激光技术与应用方面的研究。E-mail: rongqingtan@vip.sina.com

直接影响激光击穿工质的时刻, 及其对后续能量的吸收、转化效率。激光脉冲的宽度则影响激光支持爆轰波的发展, 传播速度及其对飞行器的推力。

研究激光脉冲波形对冲量耦合系数的影响, 可以在相同的激光脉冲能量下, 通过改善脉冲波形, 提高推力, 从而达到提高推进效率的目的, 并为选取恰当的激光推进脉冲波形参数提供参考依据。但就目前激光推进领域的研究来看, 人们更多关注的是激光器的脉冲输出能量^[3,4], 这是由于大多数激光器特别是脉冲气体激光器, 一经定型, 除脉冲能量、脉冲重复频率^[5]之外的各项激光脉冲参数就基本被固定而很难改变。

本文采用一套 TEA CO₂ 激光器实验系统, 将激光脉冲能量控制在 60 J 左右 (能量变化范围小于 10%), 在不改变激光谐振腔结构和放电增益区面积的前提下, 通过激光技术手段调整激光脉冲输出波形的时间分布特性和宽度, 就激光脉冲波形对激光推进冲量耦合系数的影响进行了实验研究, 并与数值分析的结果进行了比对。

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 TEA CO₂ 激光器实验系统, 谐振腔采用两节串接的气体放电单元组成平凹稳定腔结构, 腔长为 3 m, 耦合输出镜的反射率为 65%, 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, 分布均匀, 如图 1 所示。通过调整充电电压, 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脉冲输出能量。通过充排气系统, 调整激光混合气体的比例和气体压强可以控制脉冲波形的宽度, 调整脉冲前段尖峰和脉冲拖尾所占能量的比例关系, 实现改变波形的目的。

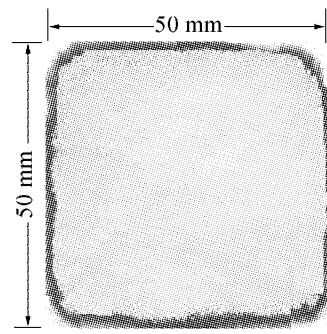


图 1 激光光斑

Fig. 1 Burn pattern of beam cross

2.2 飞行器

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。

2.3 实验装置

为测定冲量耦合系数, 设计了图 2 所示的实验装置。整个装置由四部分组成: 1) 气体充排放系统。用以控制激光器腔体内激光混合气的气压及气体成分的比例。2) 激光器系统。用以产生并发射激光。3) 激光脉冲能量及波形测量系统。用以测量激光脉冲输出能量及记录脉冲波形。4) 激光推进冲量耦合系数测量系统。将飞行器模型固定在冲击摆的底端, 摆的顶端则悬挂在舱顶部, 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, 其摆角通过嵌在摆底端的反射镜反射氦氖激光到远处刻度尺上的位置移动折算。

冲量耦合系数 C_m 可表示为

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

式中 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,

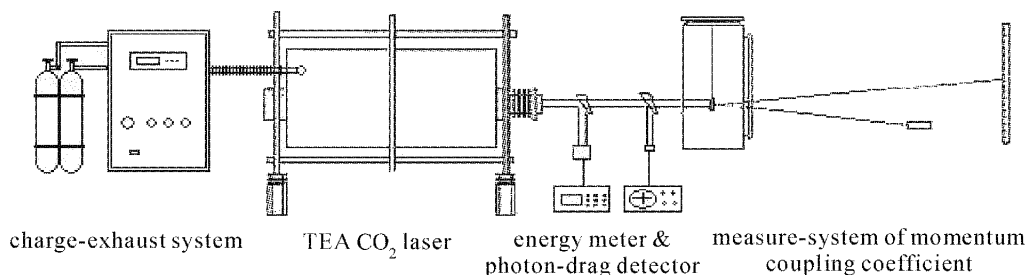


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

θ_m 为冲击摆的最大摆角,其大小为

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

式中 d 为冲击摆距离刻度尺的距离, y 为反射光斑在刻度尺上的上升高度。

3 实验结果

实验选取三组脉冲波形作为研究参量,其具体参数如表 1 所示。

表 1 脉冲参数

Table 1 Parameters of pulses

Serial number	Proportion of mix gas(CO ₂ :N ₂ :He)	Pressure of gas /kPa	Pulse energy /J	Pulse duration /ns	Maximal power density /(W·cm ⁻²)	Mean power density /(W·cm ⁻²)
1	1:1:4	45	63	5000	1.8×10 ⁹	4.5×10 ⁸
2	2:1:4	52.5	55	3400	3.7×10 ⁹	9.3×10 ⁸
3	3:1:4	60	60	2640	5.5×10 ⁹	7.8×10 ⁸

通过调整激光混合气体各组分的比例和气体压强,从脉冲波形 1 到脉冲波形 3,激光脉冲宽度从 5000 ns 被压缩到了 2640 ns,压缩了近 50%,平均功率密度和最大峰值功率密度也相应提高了 60% 和 200%。脉冲前段尖峰能量占总能量的比例从 26%

上升到 36%,即脉冲能量更加集中于整个脉冲的前段。图 3 给出了通过光子牵引探测器实际测出的激光脉冲波形。其脉冲前部的振荡信号为控制电路和高压开关导通时产生的干扰。脉冲波形基本由两段组成,前段有一个几十到几百纳秒的尖峰,之后跟随一个几微秒的脉冲拖尾。

对应于每组脉冲波形,实验测量了 3 个冲量耦合系数值 (C_{m1}, C_{m2}, C_{m3})。表 2 中列出了 3 组波形条件下,具体冲量耦合系数的测量值,以及它们的平均值。

表 2 冲量耦合系数(单位: N·MW⁻¹)

Table 2 Momentum coupling coefficients (unit: N·MW⁻¹)

Serial number of waveform	C_{m1}	C_{m2}	C_{m3}	\bar{C}_m
1	279	270	270	273
2	233	223	230	229
3	208	206	203	205

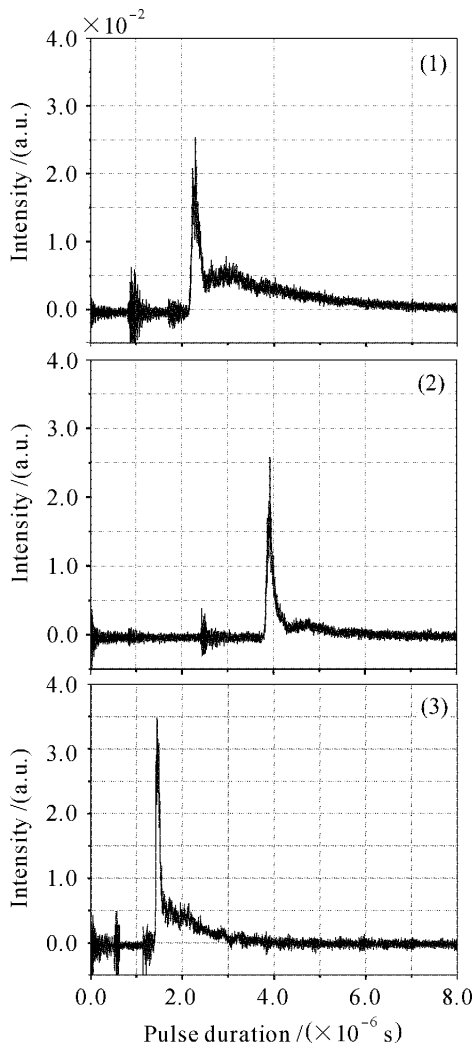


图 3 激光脉冲波形

Fig. 3 Waveforms of laser pulses

4 数值计算结果

根据实际测得的激光脉冲波形,拟合了激光功率密度随时间变化的数值曲线,如图 4(a)所示。以此为基础,确定在不同激光脉冲波形的空气击穿时刻。近似条件下,可知激光支持爆轰波在飞行器上所产生的压强为

$$p = \left(\frac{\gamma_b + 1}{2\gamma_b} \right)^{\frac{2\gamma_b}{\gamma_b - 1}} \frac{[2(\gamma_b^2 - 1)]^{2/3}}{\gamma_b + 1} \rho^{1/3} P_0^{2/3}, \quad (3)$$

式中 γ_b 为空气等离子体的绝热系数, ρ 为工质的密度, P_0 为激光的功率密度。随着激光脉冲功率密度的不断降低乃至停止,稀疏波将衰减激光支持爆轰波的强度,并引起飞行器上的压力发生弛豫。根据激光支持爆轰波在不同时段内所呈现出的衰减规

律,给出了作用在飞行器上的压力随时间变化的数值曲线,如图 4(b)所示。

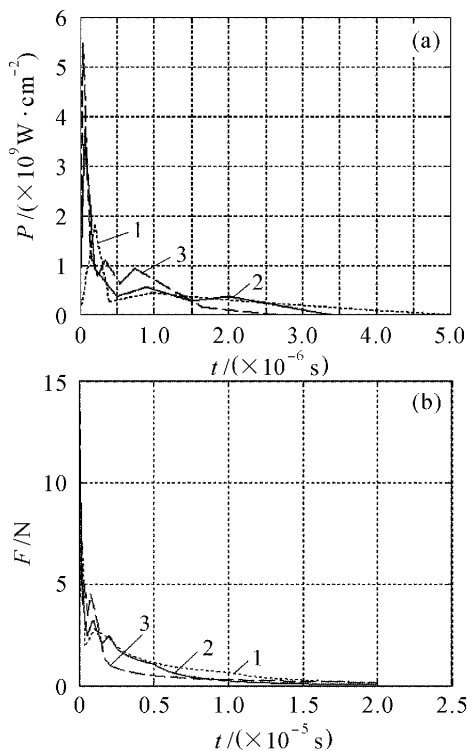


图 4 功率密度(a)和推力(b)与时间的关系

Fig. 4 Power density (a) and thrust (b) versus time

将飞行器内表面产生的压力对时间积分,即可得飞行器在一个激光脉冲的作用下所获得的动量。数值计算冲量耦合系数的结果如表 3 所示。

表 3 冲量耦合系数的数值计算结果

Table 3 Coupling coefficients of numerical calculation

Serial number of waveform	1	2	3
$C_m / (\text{N} \cdot \text{MW}^{-1})$	320	280	250

5 分析与讨论

由实验和数值计算结果可知,在激光脉冲能量相当的情况下,脉冲波形的时间分布特性以及脉冲宽度对冲量耦合系数有较为明显的影响。

对于 TEA CO₂ 激光器,其输出脉冲的时间分布特征在于整个脉冲由前段峰值功率很高的尖峰和功率较低的拖尾组成,二者占总能量的比重以及宽度,随激光混合气体各成分的比例和压强的差异而不同。在实验所选取的三个脉冲中,脉冲 3 较脉冲 1 而言,脉冲宽度减少了近 50%,其前段尖峰部分能量占总能量的比重由 26% 上升到 36%,峰值功率随着脉冲宽度的降低,提高了 200%。实验测算的飞行器获得的冲量耦合系数从 273 N·MW⁻¹ 下降到

205 N·MW⁻¹,这与数值计算得到的飞行器获得的冲量耦合系数的变化规律基本相符,但要比数值计算得到的结果普遍偏小 20% 左右,这主要是因为实验中,工质对激光脉冲能量实际的吸收、转化过程中存在一定的损耗。

分析激光推进的物理过程,可以知道,作为激光推进的一个重要环节是工质的光学击穿产生等离子体,只有在产生的等离子体对后续激光形成屏蔽后,激光的能量才会被工质通过逆韧致过程迅速吸收,以至产生激光支持爆轰波推动飞行器。而在此之前,工质对能量的吸收是通过分子间的热传递,无法形成超音速的冲击波。由此可知真正转化为热能进而做功产生机械能的激光能量,应该是空气击穿后作用在工质上的那部分能量。TEA CO₂ 激光的前段尖峰的峰值功率密度比平均功率密度高一个数量级,更有利于工质的快速击穿,提高激光能量转化为热能的效率,但应当尽量减少前段尖峰所占整个脉冲能量的比重。

脉冲波形的宽度也会影响冲量的耦合系数。由文献[6]可知在激光脉冲期间,激光支持爆轰波主要逆着激光方向扩张,可近似看作是一维运动。激光脉冲结束后,激光支持爆轰波则为二维运动流场。激光支持爆轰波二维运动的特征时间为 $t_{2D} = D/v_L$,其中 D 为激光束聚焦后的直径, v_L 为激光支持爆轰波的传播速度。

当 $t_p < t_{2D}$ 时,激光支持爆轰波呈平面衰减规律,在飞行器上产生的压强为

$$p_1 = p(t_p/t)^{2/3} \quad (t_p \leq t \leq t_{2D})$$

$$p_2 = p(t_p/t_{2D})^{2/3} (t_{2D}/t)^{6/5} \quad (t \geq t_{2D}) \quad (4)$$

当 $t_p \geq t_{2D}$ 时,激光支持爆轰波呈强球面爆炸波衰减,飞行器上产生的压强为

$$p_3 = p(t_{2D}/t)^{4/5} \quad (5)$$

比较(4),(5)两式可知,当脉冲宽度 $t_p > t_{2D}$ 时,激光支持爆轰波的强度衰减指数要低于 $t_p < t_{2D}$ 时激光支持爆轰波的衰减指数。即在长脉冲条件下,激光支持爆轰波强度维持的时间更长。

另一方面,也并非是非是激光脉冲持续时间越长,冲量耦合系数就越高。由激光支持爆轰波波后等离子体的传播速度 $v_p = \frac{v_D}{\gamma+1}$,可知爆炸点处等离子体到达飞行器顶点的持续时间为

$$t_s = \frac{R_0}{v_p} = \frac{R_0(\gamma+1)}{v_D} \quad (6)$$

式中 R_0 为抛物面型飞行器的焦距, γ 为等离子体的

绝热指数, v_D 为激光支持爆轰波的波速。

随着后续爆炸点处等离子体的扩展并到达飞行器的固体壁面过程结束, 即使此时还有激光脉冲维持, 但作为工质的等离子体稀疏直至耗尽, 飞行器壁面上的压力也将消失, 冲量耦合系数也将呈现下降趋势。

6 结 论

实验和数值计算的结果表明, 激光脉冲的时间分布特性和脉冲宽度对冲量耦合系数有着较为明显的影响。理论分析的结果表明, 过长的脉冲宽度会由于作为工质的等离子体稀疏耗尽, 导致激光脉冲剩余能量做无功耗散而使冲量耦合系数呈现下降趋势。增大激光脉冲宽度以验证上述理论的推测将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- 1 Leik N. Myrabo. Brief history of the lightcraft technology demonstrator (LTD) project [C]. Proceedings of the First International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Huntsville, Alabama, USA, 2003. 49~60
- 2 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
- 3 Koichi Mori, Keiko Watanabe, Akihiro Sasoh. Large impulse launch using 300-J CO₂ TEA laser [C]. Proceedings of the Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Troy, New York, USA, 2005. 385~393
- 4 Koichi Mori, Akihiro Sasoh, Leik N. Myrabo. Experimental investigation of airbreathing laser propulsion engines: CO₂ TEA vs. EDL [C]. Proceedings of the Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Troy, New York, USA, 2005. 155~165
- 5 Yijun Zheng, Rongqing Tan, Donglei Wang *et al.*. Coupling coefficient for TEA CO₂ laser propulsion with variable pulse repetition rate [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2):99~100
- 6 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi *et al.*. Physics of the Interaction of Laser and Materials [M]. Beijing: China Machine Press, 1996. 146
陆建, 倪晓武, 贺安之 等. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 146