

文章编号: 1001-4322(2009)05-0641-04

单脉冲能量对吸气式激光推进冲量耦合系数的影响*

文 明, 叶继飞, 洪延姬, 豆建辉

(装备指挥技术学院 基础部, 北京 101416)

摘 要: 利用透镜聚焦, 抛物面喷管约束, 结合复摆和光指针测量系统研究了单脉冲能量对吸气式激光推进冲量耦合系数的影响, 实验中通过调节激光器工作电压和硅片衰减实现了脉冲能量 5~70 J 范围的有效拓展; 进一步采用纳秒分幅高速相机拍摄了 24 J 能量下的流场纹影照片。结果表明: 在 4~9 J 低能量和 32~70 J 较高能量区间, 冲量耦合系数均较稳定; 9~32 J 能量下冲量耦合系数呈线性增长趋势, 变化范围 $(6.5 \sim 21.0) \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1}$; 纹影照片显示流场演化经历了激光支持爆轰波、爆燃波和激波 3 个阶段, 耦合系数的变化规律源于不同单脉冲能量对应不同的能量沉积效率。

关键词: 激光推进; 脉冲能量; 冲量耦合系数; 复摆; 光指针

中图分类号: O439; TN249 **文献标志码:** A

吸气式激光推进中, 单脉冲能量对冲量耦合系数的影响一直是被普遍关注的问题^[1-2], 对于探索提高激光推进能量转化效率的途径和实现飞行任务中的推力控制有实际指导意义。受激光器水平限制, 各国实验采用的能量范围差异较大, 变化规律亦不同。Y. S. Chen 等人在实验和数值模拟中发现, 当激光脉冲能量超过 200 J 后, 冲量耦合系数基本保持不变^[3]; 国内研究范围低于 100 J, 在 13~80 J 脉冲能量对冲量耦合系数影响的实验规律解释中, 认为存在爆轰波(LSDW)饱和区、爆轰波增益区和爆燃波(LSCW)饱和区, 其中能量的调节是通过改造激光器和串联电源模块实现的^[4]。目前没有关于相同实验条件和较宽范围内单脉冲能量影响的研究报道, 激光脉冲波形、聚焦方式、约束构形选择以及测量方法的精度, 都会直接影响实验结果。本文在不进行激光器硬件改造的情况下, 利用抛光硅片衰减将激光器能量范围由 50~70 J 拓展至 5~70 J。在复摆法的基础上, 结合光指针方法, 实现不同大小最大摆角的高精度测量, 研究不同脉冲能量对吸气式激光推进冲量耦合系数的影响。

1 测量系统结构设计

1.1 激光器

实验中采用的高功率脉冲 CO₂ 激光器由华中科技大学研制, 工作电压为 32~40 kV, 波长为 10.6 μm, 重复频率为 25 Hz, 不同电压下稳定输出单脉冲能量为 50~70 J, 近场光斑呈矩形均匀分布, 尺寸 53 mm × 48 mm, 原始光斑如图 1 所示。

1.2 喷管

为充分接收激光束光斑, 设计了一种开口直径 80 mm 的旋转抛物面实验件, 如图 2 所示。材料为铝合金, 壁厚约 0.5 mm, 质量约 20.3 g, 内表面母线方程 $y^2 = 20x$ 。内表面经过抛光处理, 光洁度良好。为保证低能量情况下能够顺利击穿空气, 采用透射率更高的透镜聚焦, 抛物面仅作为约束流场的喷管。

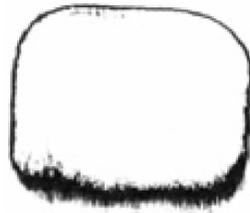


Fig. 1 Original facula
图 1 原始光斑



Fig. 2 Photo of φ80 mm nozzle
图 2 口径 80 mm 的喷管实物照片

1.3 复摆

复摆主要由喷管、摆杆和增量式旋转编码器组成。3 根 φ10 mm 等直径标准摆杆支持系统转动惯量 J 的自标定。不计空气阻力, 当喷管受到瞬间冲击作用后, 复摆发生惯性偏转。编码器将角位移转换为脉冲信号输出, 通过示波器采集和计算机处理获得最大摆角 θ_m 。若单脉冲激光能量为 E , 则冲量耦合系数为

* 收稿日期: 2008-10-07; 修订日期: 2009-02-13

基金项目: 国家 973 项目; 国家自然科学基金项目(10672184)

作者简介: 文 明(1978—), 男, 湖北武汉人, 博士, 研究方向为先进推进技术; wujiewm@163.com。

$$C_m = \frac{1}{E} \frac{J}{L} \frac{2\pi}{T_0} \sqrt{2(1 - \cos\theta_m)} \quad (1)$$

式中: L 为脉冲激光所产生推力对编码器转轴的力臂。示波器时间测量精度和编码器角度测量精度分别为 10^{-4} s和 0.045° 。力臂 L 与标准摆杆的选择相关,摆杆越长力臂 L 越大,则相同冲量加载情况下摆动幅度越小^[5]。

1.4 光指针

为了减小相对误差,在复摆的最大摆角小于 2° 时,选择光指针方法测量 θ_m ,如图3所示。反射片 S 竖直粘贴在编码器小阻尼转轴的外端,并随转轴做定轴转动。半导体激光器作为光源 A ,固定于多自由度调节台上。调节系统光路,使入射光线 AO 和反射光线 OB 位于同一竖直平面内,且反射点 O 位于转轴上。当复摆发生摆动后,反射片转动到 S' 位置,反射光线发生偏转, OB' 为最大摆角位置对应的反射光线。冲击摆最大摆角 θ_m 满足

$$\tan(2\theta_m + \theta_0) = \frac{h_1 - h_2 + h}{l} \quad (2)$$

式中: $\theta_0 = \arctan[(h_1 - h_2)/l]$ 。高速相机拍摄坐标纸上反射光点的位置,根据位置偏移计算最大摆角。

1.5 实验装置

根据冲量耦合系数测量原理,冲击摆的系统参数 T_0 , J 和 L 的标定在冲击加载前完成。实验装置如图4所示,按预计的能量调节方案设定工作电压,CO₂激光器稳定输出单脉冲激光,经过硅片组合衰减,进入分束镜。保持焦点与喷管顶部10 mm距离不变,小部分反射光束由能量计实时监测数值,主光束由直径63.5 mm,焦距245 mm的ZnSe透镜聚焦,φ80 mm喷管约束,与复摆冲量耦合实现冲击加载。按不同硅片组合的衰减率和不同电压对应的能量搭配获得非等步长的20个能量采样点,基本覆盖5~70 J范围。冲击摆摆动过程中,当 $\theta_m > 2^\circ$ 时,通过处理编码器输出的脉冲信号测量最大摆角;当 $\theta_m < 2^\circ$ 时,为了减小相对误差,由高速相机记录光指针的偏移测量 θ_m ,每组进行5次重复实验。

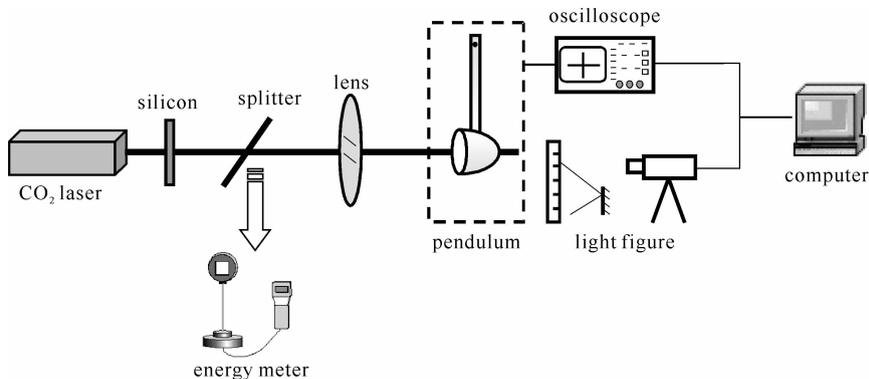


Fig. 4 Schematic of experimental setup

图4 实验装置图

2 能量调节的实现

实验使用激光器在工作电压下输出单脉冲能量为50~70 J。为了研究脉冲能量对耦合系数的影响,需要拓宽能量变化范围,分段覆盖5~70 J,主要采用2种调节方法:(1)调节工作电压,改变激光器的输入能量,从而实现不同能量的脉冲输出;(2)组合使用硅片。硅片的材料为单晶硅,表面经过抛光处理,激光通过时产生干涉现象,从而实现能量衰减。衰减后的光斑与图1原始光斑有较大区别,图5是热敏纸采样硅片衰减后的光斑。



Fig. 5 Facula after attenuation

图5 硅片衰减后光斑

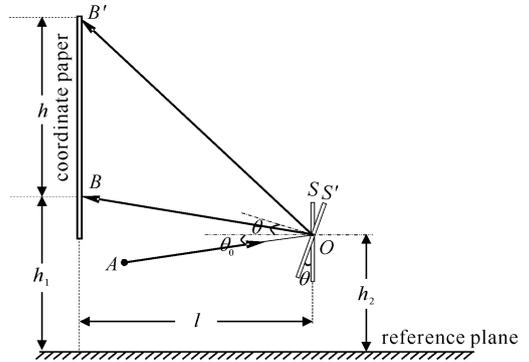


Fig. 3 Schematic of light figure measurement system

图3 光指针测量系统示意图

对 3 个不同厚度硅片采用不同的组合方式,获得了不同的衰减系数,如表 1 所示。

表 1 硅片不同组合方式下的衰减系数

Table 1 Attenuation factor for various silicon combinations

silicon combination	I	II	III	I, II	I, III	II, III	I, II, III
attenuation factor	0.46	0.40	0.45	0.24	0.26	0.22	0.14

3 实验结果与讨论

3.1 实验结果

为了获得较大的摆动幅度,复摆采用 200 mm 摆杆,系统参数标定结果为:转动惯量 $J=0.002462\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,力臂 $L=0.2441\text{ m}$,固有周期 $T_0=0.9007\text{ s}$ [6]。

按最大摆角的分界点,当能量 $E < 20\text{ J}$ 时,最大摆角 θ_m 用高速相机记录光指针偏移测量,当 $E \geq 20\text{ J}$ 时用编码器输出的脉冲信号测量。由式(1)计算得到:在 4~9 J 低能量区间,冲量耦合系数值较低,且基本保持在 $6.5 \times 10^{-5}\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$ 左右;9~32 J 能量区间冲量耦合系数呈线性增长趋势,变化范围 $(6.5 \sim 21.0) \times 10^{-5}\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$;32~70 J 较高能量区间耦合系数较高,变化缓慢且基本稳定在 $(21 \sim 22) \times 10^{-5}\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$,如图 6 所示,实线为实验数据点的分段拟合曲线。

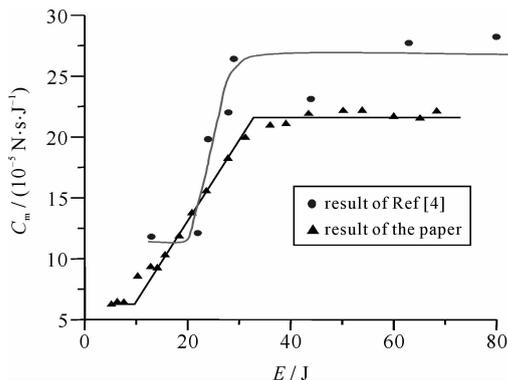


Fig. 6 Impulse coupling coefficient vs single pulse energy
图 6 冲量耦合系数与单脉冲能量的关系

3.2 分析讨论

文献[4]将单脉冲能量特性定义为 LSCW 增益区, LSDW 饱和区和 LSDW 增益区,认为低能量至高能量发生爆燃波向爆轰波的转换。我们采用透镜聚焦无约束,用纹影系统拍摄了激光支持吸收波的形成演化过程,成像设备为 4 分幅数字式高速相机,最短曝光时间 3 ns。图 7 为不同时刻的纹影照片,入射激光的单脉冲能量为 24 J。

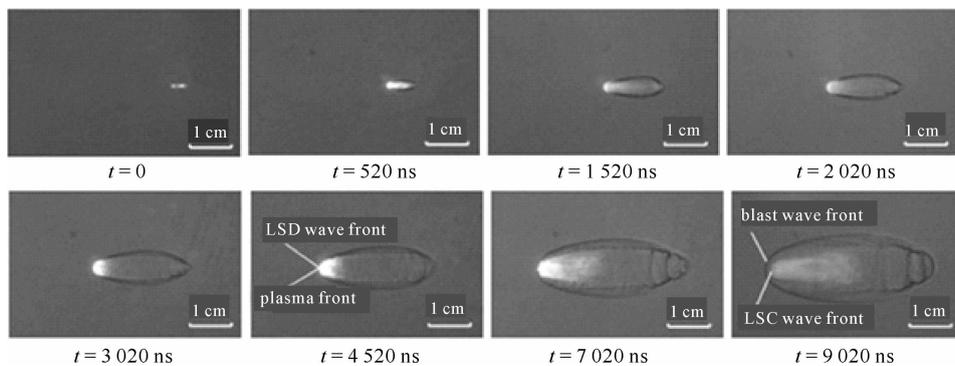


Fig. 7 Schlieren photographs of the LSD wave at the energy of 24 J

图 7 24 J 能量下爆轰波形成演化的纹影照片

调整高速相机的延时,捕捉等离子体初始点火时刻,作为激光支持吸收波形成的零时刻,如图 7 所示。入射激光脉冲宽度 $10\text{ }\mu\text{s}$,等离子体逆着激光入射方向膨胀,逐渐扩大。根据静态标尺计算初始等离子体阵面膨胀即爆轰波速度,达到 13 km/s 。能量吸收发生在亮度高的等离子体区,至 $7\text{ }\mu\text{s}$ 时激波开始与等离子体阵面分离,由激光支持的爆轰波转化为爆燃波,此时激波速度为 2.3 km/s ,9~10 μs 激波后 LSC 波速约为 200 m/s ,LSC 演化直至脉冲结束,之后完全退化为激波演化流场。这说明在 24 J 单脉冲能量下,透镜聚焦击穿空气的纹影流场经历了激光支持爆轰波的形成演化、爆燃波演化和激波演化 3 个阶段,对于冲量耦合系数的内在影响还有待进一步揭示。

当脉冲能量在 5~70 J 变化时,对冲量耦合的贡献不仅取决于初始等离子体形状和温度,还取决于高温等离子体区的辐射损失,导致了不同的能量沉积效率。虽然能量增大时,初始等离子体区尺寸逐渐增大,有效持续时间增长,这些均有利于获得更高的冲量,但与此同时,更高温度等离子体会导致辐射损失增大,并受限于单

脉冲能量的增大幅度。这些因素共同导致冲量耦合系数的低能量和高能量双稳定区间,以及线性过渡区间。遗憾的是,由于激光能量沉积是一个复杂的物理过程,难以准确描述,目前基于简化理论模型和数值计算点火模型相关研究都无法预测与实验结果吻合的冲量耦合系数的变化规律^[7]。

单脉冲能量对冲量耦合系数的影响规律对吸气式激光推力器聚焦系统设计和工作稳定性研究有很好的参考价值。对于一定参数的脉冲能量,通过聚焦系统设计实现某种最佳聚焦方式,如多点聚焦或面聚焦,则在相同喷管约束下获得最佳冲量,提高推力器推进效率。另外在一定能量区间内保持耦合系数不变,能够获得稳定的推力特性,这是作为激光动力系统的基本条件。

4 结 论

采用透镜聚焦和 $\phi 80$ mm 抛物面约束,并结合常温常压下复摆和光指针测量系统得到了冲量耦合系数随单脉冲能量的变化规律,其中 5~70 J 能量宽范围调节是通过调节激光器工作电压和硅片衰减共同实现的,结果表明:冲量耦合系数存在低能量和高能量的两个稳定区间(4~9 J, $C_m = 6.5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1}$ 和 32~70 J, $C_m = (21 \sim 22) \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1}$)以及线性过渡区间,可以为吸气式激光推力器聚焦系统设计和工作稳定性研究提供依据;24 J 能量下空气击穿流场演化经历了激光支持爆轰波、激光支持爆燃波和激波 3 个阶段,冲量耦合系数由能量沉积效率决定,受等离子体区尺寸和温度及辐射损失共同影响。

参考文献:

- [1] Willy L B, Wolfgang O S. Laser propulsion activities in Germany[C]//Proc of the First International Symposium on Beamed Energy Propulsion. 2003:79-91.
- [2] Koichi M, Akihiro S, Leik N M. Experimental investigation of air-breathing laser propulsion engines: CO₂ TEA vs EDL[C]//Proc of the Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion. 2005:155-165.
- [3] Chen Yensen, Liu Jiwen, Wang Tense. Numerical modeling of laser supported propulsion with an aluminum surface breakdown model[C]//Proc of the First International Symposium on Beamed Energy Propulsion. 2002:138-148.
- [4] 郑义军, 谭荣清, 柯常军, 等. 脉冲能量对激光推进中冲量耦合系数的影响[J]. 中国激光, 2003, **33**(12):1684-1687. (Zheng Yijun, Tan Rongqing, Ke Changjun, et al. Effects of laser pulse energy on coupling coefficient of laser propulsion. *Chinese J Lasers*, 2006, **33**(12): 1684-1687)
- [5] Wen Ming, Hong Yanji, Yang Jian, et al. High-accuracy measurement of the impact pendulum method of instantaneous impulse for laser propulsion[J]. *Lasers in Engineering*, 2007, **17**(3-4):163-169.
- [6] 文明, 洪延姬, 杨健, 等. 气压对吸气式激光推进冲量耦合系数的影响[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(7):1077-1080. (Wen Ming, Hong Yanji, Yang Jian, et al. Effects of air pressure on impulse coupling coefficient in air-breathing laser propulsion. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7):1077-1080)
- [7] 曹正蕊, 洪延姬, 李倩, 等. 单脉冲能量对光船推进性能的影响[J]. 热科学与技术, 2005, **4**(2):183-188. (Cao Zhengrui, Hong Yanji, Li Qian, et al. Influence of laser pulse energy on propulsion performance of lightcraft. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2005, **4**(2):183-188)

Effects of single pulse energy on impulse coupling coefficient in air-breathing laser propulsion

Wen Ming, Ye Jifei, Hong Yanji, Dou Jianhui

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

Abstract: A lens and a paraboloid nozzle were used to focus pulsed CO₂ laser and generate impulse. Effects of single pulse energy on impulse coupling coefficient was studied with a high-accuracy compound pendulum and a light figure system. Extension range of pulse energy from 5 J to 70 J was obtained through adjusting working voltage of the laser and energy attenuation of silicon combinations in the experiment. In addition, schlieren photographs were taken by a nanosecond framed high speed camera at the pulse energy of 24 J. The results indicate that the impulse coupling coefficient kept constant when pulse energy ranged from 4 J to 9 J and from 32 J to 70 J respectively. From 9 J to 32 J, it changed between 6.5 and $21 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1}$ following a linear increment. The schlieren photographs show that the flow field fell into three phases: laser-supported detonation wave, laser-supported combustion wave and blast wave. Various energy deposition ratios at different pulse energy resulted in the trend of the impulse coupling coefficient.

Key words: laser propulsion; pulse energy; impulse coupling coefficient; compound pendulum; light figure