

文章编号: 1001-1455(2002)03-0285-04

气压对脉冲激光冲量耦合系数的影响

徐建波^{1,2}, 林俊德², 刘 晋², 林 鹏²

(1. 国防科学技术大学应用物理系, 湖南 长沙 410073;

2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 用高灵敏冲击摆测量了 LY12 铝和 K9 光学玻璃受激光照射时的冲量耦合系数与气体压力的关系。实验结果表明, 对于 LY12 铝合金, 在气体压力为 0.03Pa 和 97kPa 两种情况下冲量耦合系数相差近 8 倍; 而对 K9 玻璃, 在气体压力为 0.05Pa 和 97kPa 两种情况下, 冲量耦合系数相差 50 倍以上, 表明了 LSD 波的强弱与气体压力相关并对冲量耦合系数产生重要影响。

关键词: 脉冲激光; 气压; 冲量耦合系数; 铝合金; K9 玻璃

* 中图分类号: O383 文献标识码: A

1 引 言

脉冲激光辐照材料表面产生的冲量大小, 既取决于入射激光的参数、被照靶材表面性态, 也取决于大气环境。在真空中, 冲量的产生主要是由激光能量的沉积造成靶面的快速熔化或汽化, 液化汽化物质向外飞溅时在靶表面附近形成蒸发波, 并传给靶表面一冲量。而在非真空环境下, 当激光脉冲与表面发生作用时, 如果激光功率密度足够高, 将形成由激光能量支持的爆轰波 (Laser-Supported Detonation, LSD)。所以向靶上传递的冲量是蒸发波和 LSD 波共同作用的结果。从 20 世纪 80 年代开始, C. R. Phipps 等^[1-2]在理论和实验方面, 对脉冲激光在真空中与物质相互作用的冲量耦合关系和形成的冲击波传播规律都进行了深入的研究, 并得出了有价值的定标关系。在 LSD 波研究方面, A. N. Pirri^[3]在理论上分析了 LSD 波冲量的传递过程; 刘成海等^[4]提出了 LSD 波的激光脉冲前沿点火机理并给出了 LSD 波的点火阈值; 袁钢等^[5]也提出了一种等离子体点燃的经验判据。LSD 波的强弱一般认为与气体压力有关。气压高时, LSD 波强; 反之, LSD 波弱。LSD 波的强弱又严重影响冲量耦合系数。本文的工作就是通过实验研究气压对冲量耦合系数的影响。

2 实验与结果

实验是在 XeCl 单脉冲准分子激光器上进行的。激光器的输出能量为 3.2~7.2J, 激光脉宽 (FWHM) 平均为 33ns (图 1 给出了一个典型激光脉冲波形, 其中的纵坐标是相对输出强度 $E\eta$), 激光波长 0.308 μ m。靶上的功率密度为 $10^8 \sim 10^9$ W/cm²。使用的靶样品材料分别是 LY12 铝合金和 K9 光学玻璃, 实验中靶室压力范围是 0.03Pa~97kPa。入射光和反射光分别用两个光电管探测。

图 2、图 3 给出的是 LY12 铝和 K9 玻璃在气体压力分别为 0.03Pa、0.05Pa、5kPa、97kPa 时激光在靶样品上反射光波形。图中的凹陷表明在靶前形成的等离子体薄层屏蔽了一部分入射激光。凹陷的深浅表示等离子体吸收能力的强弱, 可以把凹陷的起始点

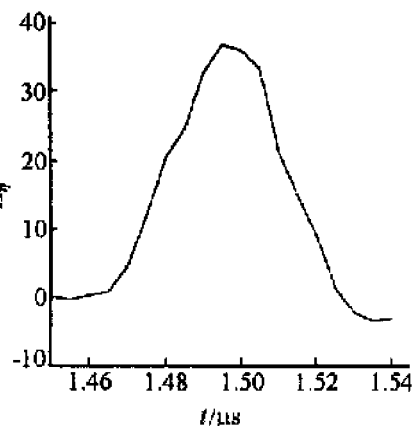


图 1 典型的激光脉冲波形

Fig. 1 Output profile of a laser pulse

* 收稿日期: 2001-06-15; 修回日期: 2001-07-12

作者简介: 徐建波 (1962—), 男, 博士研究生, 副研究员。

确定为等离子体点火形成时间。由于等离子体吸收激光的主要机制是逆韧致吸收,逆韧致吸收系数与自由电子密度、离子密度成正比,凹陷反映了离子密度、温度的变化,体现了等离子体层形成、变密、膨胀、变稀薄的变化过程,所以凹陷是靶前流体力学过程,也体现了 LSD 波作用的过程。从图 2,图 3 上可以分别看出(为了便于清楚比较,图 3 将三个波形沿横轴进行了分离,后两个波形所处位置已没有时间意义),随着气压的降低,两种靶材的等离子体吸收都在变弱,说明等离子体越来越稀薄。对比铝靶和 K9 玻璃靶的吸收峰可以看出,在相同气压条件下,铝靶前形成的等离子体吸收比 K9 靶前的等离子体吸收强。在高真空情况下,K9 玻璃前几乎不出现等离子体吸收。

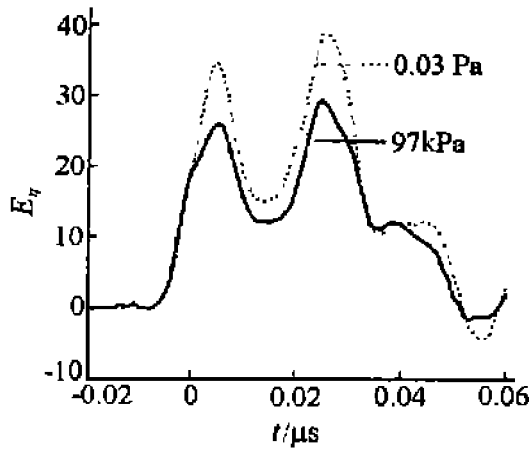


图 2 LY12 铝合金的激光反射波形

Fig.2 Reflected laser profiles by aluminum targets

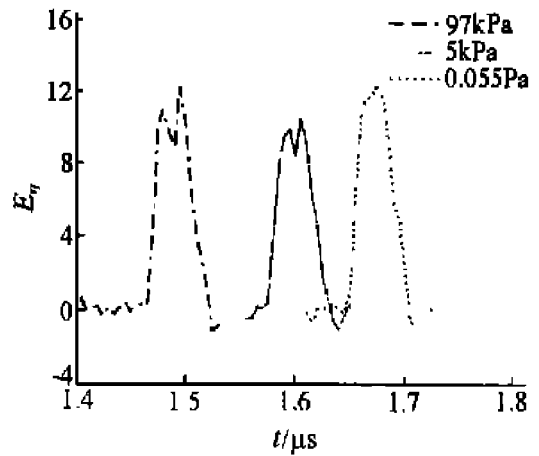


图 3 K9 玻璃的激光反射波形

Fig.3 Reflected laser profiles by K9 glass targets

冲量测量使用的是一个由小转动惯量的旋转编码器测量转角的摆式冲量计,其摆角测量精度为 0.5° 。图 4 是记录的冲量摆输出的反映角速度变化的时间间隔图形(为了便于图示,只截取了对应的前 1/2 周期摆动),图 5 是根据冲量摆输出的时间间隔信号转换的摆的角速度变化曲线(衰减的振荡曲线表示摆绕平衡位置往复减幅运动,图中的角速度不归零是数据记录和数据处理方法造成的,但是不影响最大角速度的判读)。计算冲量时选取起始最大值为所需的角速度。冲量与冲量摆的最大角速度的关系为

$$I = J \omega R$$

式中: I 是冲量, K 是摆的转动惯量, ω 是角速度, R 是激光作用中心到摆轴的距离。

得到冲量之后,算出单位激光能量的冲量即为冲量耦合系数。表 1 列出了 LY12 铝合金和 K9 玻璃在不同气压下的冲量耦合系数。

图 6 是根据实验测得的数据拟合的冲量耦合系数随气体压力变化曲线。从图上可以看到,在气体压力较低时,LY12 铝合金和 K9 玻璃的冲量耦合系数并没有显著差异;但随着气压的升高,两者之间的冲量耦合系数差异增大。式(1)、(2)分别是拟合的 LY12 铝合金和 K9 玻璃冲量耦合系数与气压关系表达式。

LY12 铝合金

$$C_I = 3.8 \times 10^{-4} - 3.6 \times 10^{-4} / [1 + (p/283785.64)^{0.95}] \tag{1}$$

K9 玻璃

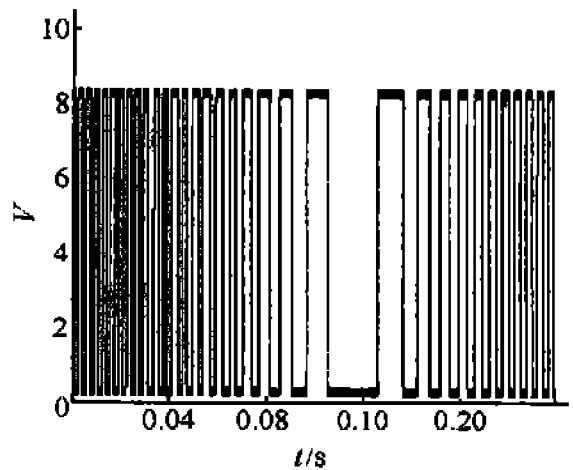


图 4 摆输出的时间间隔图形(部分)

Fig.4 Signals of the impulse pendulum

$$C_I = 2.72 \times 10^{-6} p^{0.264} \tag{2}$$

式中： C_I 是冲量耦合系数， $N \cdot s/J$ ， p 是气体压力，Pa。

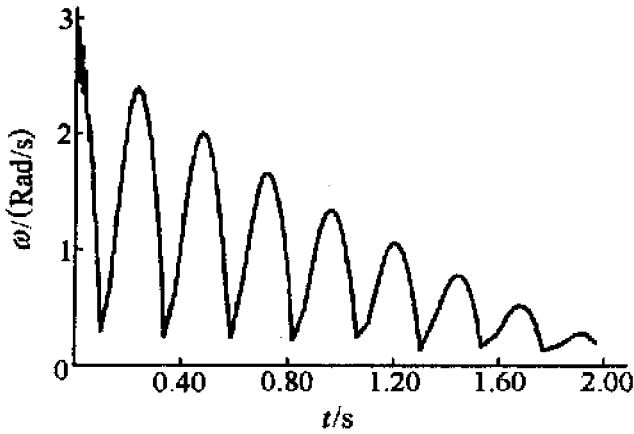


图 5 典型的角速度变化曲线
Fig.5 Angular velocity of the pendulum

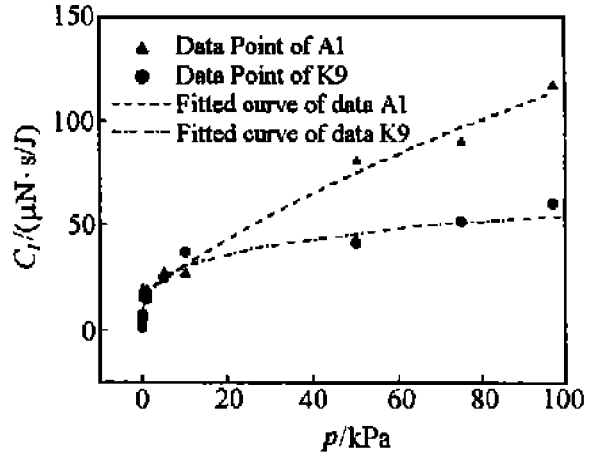


图 6 冲量耦合系数与气压的关系
Fig.6 Coupling coefficients of impulse vs air pressure

表 1 不同气压下的冲量测量数据

Table 1 Data of impulse measurements

Al 靶					K9 玻璃				
p/Pa	E/J	ω (Rad/s)	$I/(10^{-4}N \cdot s)$	$C_I/(10^{-5}N \cdot s/J)$	p/Pa	E/J	ω (Rad/s)	$I/(10^{-4}N \cdot s)$	$C_I/(10^{-5}N \cdot s/J)$
0.03	4.30	0.646	0.655	1.52	0.05	3.59	0.042	0.044	0.12
4.4	4.30	0.654	0.663	1.54	4.0	3.28	0.150	0.158	0.48
100	3.69	0.689	0.698	1.89	100	3.59	0.260	0.273	0.76
1000	4.61	0.842	0.853	1.85	1000	3.59	0.507	0.533	1.48
5000	4.20	1.124	1.139	2.71	5000	4.10	0.962	1.011	2.47
10000	4.10	1.086	1.101	2.68	10000	3.59	1.259	1.324	3.69
50000	3.59	2.876	2.915	8.12	50000	5.12	2.029	2.134	4.17
75000	3.07	2.727	2.764	9.00	75000	4.10	2.045	2.151	5.25
97000	2.56	2.945	2.985	11.66	97000	4.61	2.671	2.809	6.09

3 结果分析与结论

在 LSD 波点燃之前，靶所获得的冲量由蒸发波决定。蒸发波是由靶表面吸收脉冲激光的能量使材料发生快速液化和汽化而产生的。因靶表面的吸收形成的蒸发波的压力、温度、汽化原子的运动速度以及波向靶材中的传播速度等气动力参数可以通过解气体动力学方程求得。所以蒸发波的冲量耦合系数可以直接由定义写出

$$C_v = \int_{\tau_v}^{\tau_p} (p + \frac{dm}{dt}v) dt / \int_0^{\tau_p} I_0 dt \tag{3}$$

式中： p 是靶表面处的蒸汽压力， dm/dt 是材料的面质量烧蚀速率， v 是表面处的蒸汽速度， τ_p 是入射激光的宽度 (FWHM)， τ_v 是蒸发开始的时间， I_0 是激光脉冲的功率密度。

在 LSD 波点燃之后，激光对靶面产生的冲量是由蒸发波和 LSD 波共同决定的。根据 A.N.Pirri 的观点，冲量主要是由 LSD 波激发的，蒸发波对冲量的贡献退居次要的地位。实验中冲量耦合系数随气压的升高而增大，说明 LSD 波随着气压的升高而加强。利用爆轰理论可以导出 LSD 波的波速、波后气体参数与激光功率密度 I_0 有如下关系

$$D = [2(K^2 - 1)I_0/\rho_0]^{1/3} \tag{4}$$

$$p_1 = \frac{[2(K^2 - 1)]^{2/3}}{K + 1} \rho_0^{1/3} I_0^{2/3} \quad (5)$$

$$h_1 = (\rho_0 D^3 (K + 1) + 2I_0) / (2\rho_0 D) \quad (6)$$

$$\rho_1 = (K + 1) \rho_0 / K \quad (7)$$

式中: D 是 LSD 的波速, p_1 、 h_1 、 ρ_1 为波后压力、焓、密度, K 为等离子体的绝热指数。

根据波后压力 p_1 就可以计算出 LSD 波对靶的冲量, 夏日源等^[6]根据 A.N.Pirri 的模型, 考虑到 LSD 波引起的气体膨胀的二维效应, 分别得出了无限大靶和有限面积靶的冲量耦合系数表达式。因其涉及的物理量较多, 此处不引述。A.N.Pirri 在他的模型中假定: 一旦 LSD 波点燃, 则蒸发波立即熄灭。此假设以前曾被有关实验所否定。在我们本次的实验中, 通过分析记录的靶面上的反射激光波形(图 2、图 3), 也可以清楚看到 LSD 波不能吸收全部的激光能量, 反射光依然存在。所以靶面的蒸发波必然与 LSD 波共存, 只不过 LSD 波产生的冲量大于蒸发波产生的冲量。总的冲量耦合系数应该是 LSD 波的冲量耦合系数与蒸发波的冲量耦合系数之和。所以在大气环境下, LSD 波对材料传递的冲量高于由蒸发波对材料传递的冲量。尽管冲量的大小主要由 LSD 波决定, 但蒸发波对冲量的产生仍起作用。

参考文献:

- [1] Phipps C R, et al. Impulse Coupling to Targets in Vacuum by KrF, HF, and CO₂ Single-pulse Lasers[J]. J Appl Phys, 1988, 54(3): 1083-1096.
- [2] Phipps C R, et al. Enhanced Vacuum Laser-impulse Coupling by Volume Absorption at Infrared Wavelengths[J]. J Lasers and Particle Beams, 1990, 8(1): 281-298.
- [3] Pirri A N. Momentum Transfer and Plasma Formation above a Surface with a High-Power CO₂ Laser[J]. Phys Fluids, 1973, 16: 1435.
- [4] 刘成海, 等. 金属靶蒸汽中的激光维持爆轰波[A]. 激光与材料相互作用的热和力学效应会议论文集[C], 1989.
- [5] 袁钢, 周光泉. 用于等离子体及 LSD 波点燃阈值的判据[J]. 高压物理学报, 1988, 2(2), 182-191.
- [6] 夏日源, 等. 大气中激光脉冲与表面相互作用的冲量传递[A]. 激光与材料相互作用的热和力学效应会议论文集[C], 1993.

Impulse Coupling to Targets in Air by Pulse Laser

XU Jian-bo^{1,2}, LIN Jun-de², LIU Jin², LIN Peng²

(1. Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;
2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: By means of a sensitive impulse pendulum, the relationships between air pressure and impulse coefficients induced by pulse laser are studied experimentally. The results show that with the increasing of air pressure, the value of impulse coupling coefficients increase notably. For aluminum alloy, the impulse coupling coefficient under pressure of 97kPa is approximately 8 times of under 0.05Pa; and for K9 glass, the impulse coupling coefficient under pressure of 97kPa is approximately 50 times of under 0.03Pa. This Indicates that the air pressure affects the intensity of LSD and the magnitude of impulse coupling coefficient.

Key words: pulse alser; air pressure; impulse coupling coefficient; aluminum alloy; K9 optical glass