

文章编号: 0258-7025(2007)03-0417-05

用于测量激光烧蚀下靶材获得冲量的方法

杨雁南^{1,2}, 朱金荣^{1,3}, 杨 波¹, 沈中华¹, 陆 建¹, 倪晓武¹

¹ 南京航空航天大学理学院, 江苏 南京 210016

(² 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094; ³ 扬州大学物理科学与技术学院, 江苏 扬州 225002)

摘要 强激光与固体靶物质相互作用产生的等离子体膨胀对靶有强烈的反冲作用, 这就是激光等离子体推进的基本思想。固体靶获得冲量大小的测量在研究冲量传递效率过程中有重要作用。采用一种悬摆法和光电测速法相结合的测量方法对激光等离子体膨胀时靶摆动的周期、角速度进行了实验测量, 结合测试装置的几何结构和流体力学理论得到了有空气阻力影响下靶的摆动方程, 并将实验测量的靶摆动周期与由摆动方程计算的结果进行了比较, 两者之间的相对误差小于 0.5%, 即这一摆动方程能较精确地描述靶的摆动过程, 采用此摆动方程和实验测量的靶摆动角速度求得了靶的冲量。理论和实验研究结果表明该测试方法具有结构简单、操作方便、测量精确度高等特点。

关键词 激光技术; 激光与物质相互作用; 激光等离子体; 冲量耦合; 阻尼摆

中图分类号 O 437; TN 247 **文献标识码** A

Method of Impulse Measurement for Laser-Ablated Target

YANG Yan-nan^{1,2}, ZHU Jin-rong^{1,3}, YANG Bo¹,

SHEN Zhong-hua¹, LU Jian¹, NI Xiao-wu¹

¹ College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

² Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

³ College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225002, China

Abstract The interaction of laser with solid target material can produce plasma called laser-induced plasma. The counteracting force is generated by the expending of laser-induced plasma. That is the foundation of laser propulsion. The measurement of impulse acting on the targets is very important for the impulse imparting from laser beam to target. A new method is presented by combining pendulum with light-electric tachometer, which is adopted in the experiment for measuring the impulse coupling between laser induced plasma and aluminum target. Considering the structure of measurement equipment and the theory of fluid mechanics, the kinetic equation of the pendulum including air damping term is founded, and target impulse is obtained by using the kinetic equation and the measured pendulum angular velocity. The comparison between experimental results and theoretical results testifies that the difference of the period of the pendulum between experimental measurement and kinetic equation is less than 0.5%. The experimental operation is simple and the experimental accuracy is high.

Key words laser technique; interaction between laser and material; laser-induced plasma; impulse coupling; damped pendulum

收稿日期: 2006-06-19; 收到修改稿日期: 2006-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(60578015, 60208004), 博士点基金(20050288025)和教育部分部优秀青年教师奖励计划资助项目。

作者简介: 杨雁南(1963—), 女, 山东聊城人, 博士研究生, 主要从事非线性光学及激光与物质相互作用方面的研究。
E-mail: yangyn@nuaa.edu.cn

导师简介: 倪晓武(1955—), 男, 江苏人, 博士生导师, 目前主要从事激光与物质相互作用机制与测试技术方面的研究。
E-mail: nxw@mail.njust.edu.cn (通信联系人)

1 引 言

强激光与固体靶相互作用时,激光对靶材的烧蚀作用可使靶表面的物质熔融乃至气化,气化的靶物质及靶表面附近的环境气体进一步吸收激光能量被电离形成等离子体区,该高温高压等离子体膨胀时形成激光支持的燃烧波(Laser supported combustion wave, LSCW)或激光支持的爆轰波(Laser supported detonation wave, LSDW)对靶有冲量作用^[1~4],因而这种激光等离子体可作为一种新型的推进动力源。测量不同情况下靶材获得冲量的大小,有助于研究等离子体膨胀对靶冲量传递的效率,亦对采用激光等离子体作为推进动力源的相关技术具有参考价值。

在激光对靶烧蚀作用下产生的冲量测量方法中,文献[5]介绍的方法实施时传感器的接入不仅要影响原材料中的结构,还要对测试系统进行标定以及克服高频测量中存在的因素。文献[6]介绍的方法需要精确测量水平或竖直运动物体与轨道的摩擦系数,竖直运动时还要对靶上升的高度进行精确测量。文献[7,8]介绍的方法较为简单,其测试精度取决于水平方向运动距离的测试。利用摆动测量较小的冲量^[9~19]是实验中最常用的一种方法,与其他方法相比,此方法结构简单,对小冲量的测量精度相对较高。文献[9~16]采用测量靶摆动的最大幅值的方法时,由于靶摆在到达最大摆动的位置后不能静止,而是又向下回摆,造成靶摆幅值的测量装置较为复杂,且易出现误差;采用测量靶初始速度的方法时,由于靶摆动装置并非刚性结构,摆线随靶以共同速度运动需要响应时间,摆线与靶摆的加速过程不同步,同时,由于烧蚀现象形成的等离子体对靶冲力作用的非均匀性,靶自身也会产生一定程度的抖动,均可造成靶摆初始速度测量的不准确,进而影响靶冲量测量的精确度。

针对烧蚀现象形成的等离子体对靶冲量传递的动态过程,本文提出了一种采用光电法测量靶摆后期运动速度的测量方法,采用流体力学理论,得到了考虑空气阻力影响下靶的摆动方程,并根据实验获得的角速度,得到了不同激光功率密度情况下等离子体对靶的冲量。

2 实验装置及测量原理

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。Nd:YAG 激光器输出

波长为 $1.06\ \mu\text{m}$,脉宽为 $15\ \text{ns}$ 的激光束经过焦距为 $10.5\ \text{cm}$ 的聚焦透镜 4 聚焦在铝靶 17 上。摆线 18 和 19 相对铝靶 17 而言质量可忽略。放置在激光器与聚焦透镜 4 之间的分光镜 2 取出少部分激光经 PIN 光电管 5 转换作为数字示波器 8 的触发信号;分光镜 3 反射 5% 的激光到能量计 7 用于实时检测每个激光脉冲的能量。He-Ne 激光器 16 发出的激光经衰减片 15 和聚焦透镜 14,狭缝 12 后聚焦在细丝 13 上,细丝可将 He-Ne 激光束完全挡住,使光电接收管 10 不能接收到激光信号。当 Q 开关 Nd:YAG 激光器发出的激光脉冲作用于铝靶时,等离子体膨胀产生的反冲力将铝靶推离平衡位置,光电接收管便可接受到激光信号,当靶摆再次回到平衡位置时,由于细丝 13 会瞬时遮挡住激光束,光电接收管接收到的 He-Ne 激光光强将发生变化。图 2 所示为脉冲信号的变化。

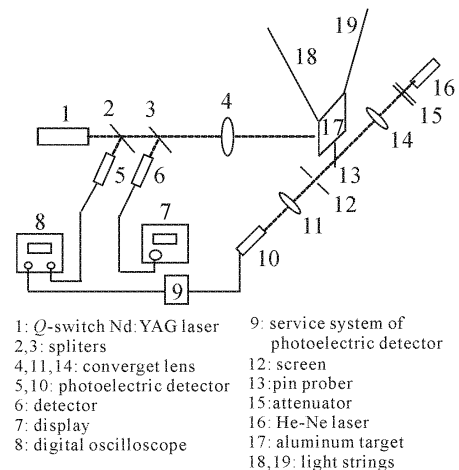


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup

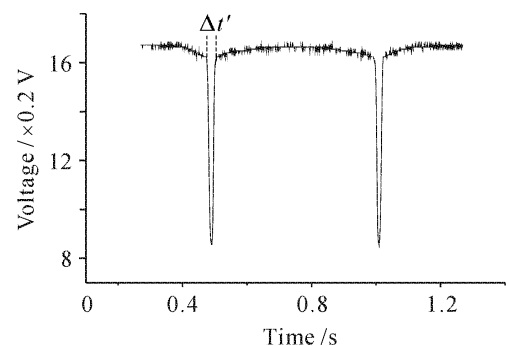


图 2 细丝遮挡 He-Ne 激光束时示波器显示的光强变化信号

Fig. 2 Changing of He-Ne laser intensity on oscilloscope fended by pin probe

2.2 测量原理

当激光未作用于靶材时,靶摆静止且处于平衡

位置, He-Ne 激光束与摆靶的细丝相交, 光信号不能进入到光电管。当激光作用于靶材, 气化的靶物质及靶表面附近的空气被电离形成等离子体, 靶摆在等离子体膨胀产生的反冲力作用下开始加速运动。实验中脉冲激光作用时间为 10^{-8} s 量级 (15 ns), 而根据文献[1,2], 烧蚀现象形成的等离子体的存在时间可达 $25 \mu\text{s}$, 因而靶摆开始离开平衡位置的过程为一加速过程, 且由于反冲力随时间的变化率很大, 靶获得的速度变化复杂, 悬线的摆动不能与靶摆同步, 且初始时 He-Ne 激光束光斑在细丝上的位置稍有不同就可对测量细丝遮挡激光束的时间影响很大, 这些因素使得靶摆上细丝初始角速度不能用记录其遮挡 He-Ne 激光束时间的方法来准确测量。为了较准确地测量受等离子体膨胀反冲作用下靶摆获得的冲量, 采用测量靶摆(包括细丝)第二次和第三次经过 He-Ne 激光束的时间间隔和第二次经过 He-Ne 激光束时角速度的方法, 反推求得靶摆受等离子体作用后所获得的初始速度, 进而求得靶摆的冲量。虽然靶线的质量相对靶摆可忽略, 靶的限度相对于线的长度可忽略, 即靶摆可看作单摆, 但是靶摆运动时不可避免地受到空气阻力的影响, 因而是一种阻尼单摆, 通过测量靶摆连续两次通过平衡位置的时间间隔和靶摆第二次通过平衡位置的角速度, 再借助于从理论上建立的该实验条件下靶摆的运动方程, 便可以修正空气阻尼的影响, 较为精确地得到靶摆受等离子体作用后所获得的初始速度, 从而得到靶摆获得的冲量。

实验所用 He-Ne 激光束的光束直径为 0.13 mm, 靶为 $12.1 \text{ mm} \times 12.4 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的长方体铝片, 而细丝为直径 0.46 mm 的圆柱体, 摆线的长度为 255 mm, 质量忽略不计, 铝靶和细丝的总质量为 0.2055 g。靶在空气中摆动时, 空气阻力对它的作用属于绕流问题, 阻力的大小与靶的形状、线度、运动速度等因素有关, 采用低速情况下平板的小雷诺数绕流方法求解靶的动力学方程^[20]

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{v} = 0 \\ \nabla p = \mu \Delta \mathbf{v} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 μ 为空气的黏性系数; \mathbf{v} 为绕流速度; p 为流体压强。

与小雷诺数圆球绕流问题相比, 平板绕流问题只是边界条件有所不同, 仿照圆球绕流的解法求得靶摆所受空气阻力 f 与其速度 v 的关系为

$$f = k \cdot v, \quad (2)$$

式中 k 由靶摆的几何尺寸和空气的黏性系数计算得

到: $k = 3.752928 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ 。

将铝摆看作是一个在空气中运动的阻尼摆, 设时间 $t = 0$ 时处于平衡位置, 受到等离子体给予的冲量后开始摆动, 则由经典力学理论, 描述其运动的动力学方程为

$$-(mg \sin\theta + kv)l = ml^2 \frac{d^2\theta}{dt^2}, \quad (3)$$

$$v = l \frac{d\theta}{dt}, \quad (4)$$

式中 m 为铝摆质量, l 为摆线的长度。当 θ 角较小 ($\theta < 5^\circ$) 时, 近似有 $\sin\theta \approx \theta$, 而本实验满足此条件。因而运动方程可写为

$$ml^2 \frac{d^2\theta}{dt^2} + kl^2 \frac{d\theta}{dt} + mgl\theta = 0, \quad (5)$$

令 $\frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta}$, $\frac{d^2\theta}{dt^2} = \ddot{\theta}$; $\beta = k/(2m)$, $\omega_0^2 = g/l$, β 为靶摆的阻尼系数, ω_0 为固有圆频率。则(5)式可改写为

$$\ddot{\theta} + 2\beta\dot{\theta} + \omega_0^2\theta = 0, \quad (6)$$

又因为 $\omega_0^2 > \beta^2$ 为弱阻尼情况, 故(6)式的解析解为

$$\theta(t) = Ae^{-\beta t} \cos(\omega_r t + \varphi_0), \quad (7)$$

式中 $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$; A 为无阻尼时的摆动幅角; φ_0 为单摆的初相位。

利用初始条件, 当 $t = 0$ 时, $\theta = 0$, 即 $A \cos\varphi_0 = 0$, $\varphi_0 = \pi/2$, 可得

$$\theta(t) = Ae^{-\beta t} \sin(\omega_r t), \quad (8)$$

(8)式给出了根据实验条件得到的靶摆动方程, 其摆角随时间的变化规律如图 3 所示。

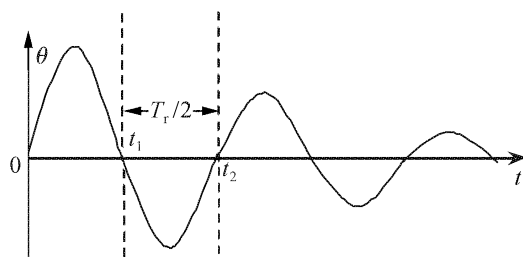


图 3 靶摆的运动规律示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the target swings

对(8)式求导数, 可得摆动角速度随时间的变化关系

$$\dot{\theta} = A[-e^{-\beta t} \cos(\omega_r t)\omega_r - \beta \cdot e^{-\beta t} \sin(\omega_r t)], \quad (9)$$

由此可得

$$\dot{\theta}|_{t=0} = A\omega_r, \quad (10)$$

(10)式给出了靶摆受等离子体冲量作用而获得的初始角速度, 亦即只要求出 A 即可得到 $\dot{\theta}|_{t=0}$, 从而得到靶摆获得的冲量。

由于 t_1 时刻靶摆再次回到平衡位置时对应 $\omega_r t_1$

$= \pi$, 将此代入(9)式, 即可得

$$A = \frac{\dot{\theta}(t_1) e^{\pi\beta/\omega_r}}{\omega_r}, \quad (11)$$

式中的角速度 $\dot{\theta}(t_1)$ 可由如下方法得到: 根据细丝的直径 D , He-Ne 激光束光腰的直径 D_L , 摆线的长度 l 和图 2 中光强被遮挡的时间间隔 $\Delta t'$, 得

$$\dot{\theta}|_{t=t_1} = \frac{D + D_L}{l\Delta t'}, \quad (12)$$

将(11)式代入(10)式, 可求出 $\dot{\theta}|_{t=0}$ 。再利用

$$I_0 = ml\dot{\theta}|_{t=0}, \quad (13)$$

即可得到靶摆获得的冲量。

3 结果与结论

在实验研究中, 分别测量了不同激光功率密度

情况下靶摆(细丝)第二次和第三次遮挡 He-Ne 激光束时获得的信号, 见图 2, 并在同一种激光功率密度作用下测量了 10 个脉冲数据并取平均, 由此求得了靶摆第二次、第三次通过平衡位置的时间间隔 Δt 和靶摆第二次遮挡 He-Ne 激光束的时间间隔 $\Delta t'$, 利用 $T_r = 2\Delta t$ 求出 T_r , 进而利用(12)式可以得到靶摆第二次回到平衡位置的角速度 $\dot{\theta}(t_1)$ 。将实验测量的 T_r 与由靶摆动方程计算的理论结果进行比较, 具体数据见表 1。由此可见, 摆动周期的实验测量结果与由靶摆动方程计算的理论结果基本吻合。这说明考虑装置实际结构和空气阻力影响建立的靶摆动方程能够较精确地描述等离子体作用下靶的运动情况。

表 1 靶摆动周期实验测量结果与理论计算结果比较

Table 1 Comparison between experimental and theoretic results of the swinging period

Power density of laser / (W/cm ²)	3.65 × 10 ⁹	2.99 × 10 ⁹	1.41 × 10 ⁹	
Experimental result	t_1 / s	0.495	0.498	0.497
	t_2 / s	1.000	1.004	1.005
	$T_r = 2(t_2 - t_1)$ / s	1.010	1.012	1.016
	t_1 / s	0.49131	0.49270	0.48830
Theoretic result	t_2 / s	0.49870	0.50331	0.50570
	$\Delta t' = t'_2 - t'_1$ / s	0.00739	0.01061	0.01740
	$\dot{\theta} _{t=t_1}$	0.313	0.218	0.133
	$T_r = 2\pi/\omega_r$ / s	1.014	1.014	1.014
	Relative error of T_r / %	0.40	0.20	0.40

将本文给出的实验装置用于激光等离子体动量耦合系数的实验测试(测试的详细过程将在另文中报道), 其测试结果如图 4 所示。这一结果与 M. Bass 等^[15] 和 Cai Xijie 等^[21] 所报道的结果基本一

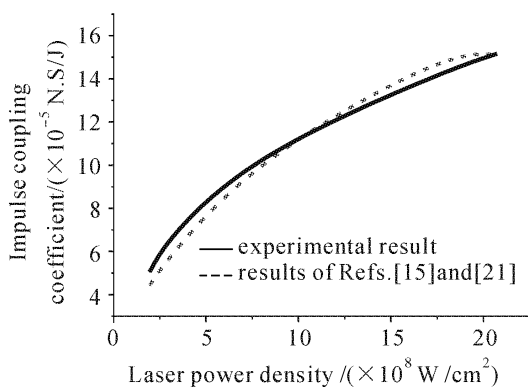


图 4 不同激光功率密度时的冲量耦合系数与
前人结果的比较

Fig. 4 Comparison of the measurement results with
Refs. [15] and [21]

致。

综上所述, 本文提出的考虑了空气阻力影响的悬摆法和光电测速法相结合的测量方法既具有测试原理易于理解、结构简单、操作方便的优点, 同时测量精度相对较高, 是一种能对激光烧蚀下靶材获得的冲量进行较精确测量的方法。

参 考 文 献

- 1 Sun Chengwei. Radiance Effect of Laser [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 79~143
孙承纬. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 79~143
- 2 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. The Physics of Interaction between Laser and Material [M]. Beijing: China Machine Press, 1996. 98~168
陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 98~168
- 3 Zheng Yijun, Gong Ping, Tan Rongqing *et al.*. Experimental study of coupling coefficients for air-breathing mode laser propulsion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 889~893
郑义军, 龚平, 谭荣清等. 大气模式激光推进耦合系数的实

- 验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(7):889~893
- 4 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
- 5 A. V. Pakhomov, M. S. Thompson, D. A. Gregory *et al.*. Specific impulse study of ablative laser propulsion [C]. 37th AIAA /ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2001. 3663~3672
- 6 Leik N. Myrabo, Donald G. Messitt, Franklin B. Mead, Jr.. Ground and flight tests of a laser propelled vehicle [C]. AIAA 98-1001, Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 36th, 1998. 1~10
- 7 T. Yabe, C. Phipps, K. Aoki *et al.*. Laser-driven vehicles-from inner-space to outer-space [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **77**:243~249
- 8 T. Yabe, C. Phipps, M. Yamaguchi *et al.*. Microairplane propelled by laser driven exotic target [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(23):4318~4320
- 9 J. F. Ready. Development of plume of material vaporized by giant-pulse laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1963, **3**(1):11~13
- 10 L. R. Hettche, J. T. Schriempf, R. L. Stegman *et al.*. Impulse reaction resulting from the in-air irradiation of aluminum by a pulsed CO₂ laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(9):4079~4085
- 11 S. Marcus, J. E. Lower. Impulsive loading of targets by HF laser pulses [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(5):2293~2294
- 12 J. A. Woodroffe, J. Hsia, A. Ballantyne. Thermal and impulse coupling to an aluminum surface by a pulsed KrF laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**(1):14~15
- 13 C. Duzy, J. A. Woodroffe, J. C. Hsia *et al.*. Interaction of a pulsed XeF laser with an aluminum surface [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**(6):542~544
- 14 D. I. Rosen, J. Mitteldorf, G. Kothandaraman *et al.*. Coupling of pulsed 0.35- μm laser radiation to aluminum alloys [J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**(4):3190~3200
- 15 M. Bass, M. A. Nassar, R. T. Swimm *et al.*. Impulse coupling to aluminum resulting from Nd:glass laser irradiation induced material removal [J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, **61**(3):1137~1144
- 16 Zheng Zhiyuan, Zhang Jie, Hao Zuoqiang *et al.*. Effect of target configuration on the laser plasma momentum-coupling coefficient [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1):326~329
郑志远, 张杰, 郝作强 等. 靶结构对激光等离子体动量耦合系数的影响[J]. *物理学报*, 2006, **55**(1):326~329
- 17 C. R. Phipps, J. R. Luke, G. G. McDuff *et al.*. Laser-driven micro-rocket [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **77**:193~201
- 18 C. R. Phipps, J. R. Luke, G. G. McDuff. Laser plasma thruster [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **77**:343~348
- 19 C. Phipps, J. Luke, D. Funk *et al.*. Laser impulse coupling at 130 fs [J]. *Applied Surface Science*, 2006, **252**:4838~4844
- 20 Liang Zhiquan. Fluid Mechanics [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2002. 147~148
梁智权. 流体力学[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2002. 147~148
- 21 Cai Xijie, Wang Haiyu, Mao Jiaohua *et al.*. Impulse coupling to Al-target by 1.06 μm and 0.53 μm laser [C]. *SPIE*, 1992, **1928**:100~102