

文章编号: 0258-7025(2002)05-0407-04

小型脉冲激光器驱动高速飞片的实验研究

谷卓伟, 孙承纬

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900)

提要 利用小型脉冲 YAG 激光器在能量 100~300 mJ 范围内成功驱动了 5.5 μm 厚度, 直径 0.5~0.8 mm 铝飞片, 最高速度达到 6.6 km/s。详细介绍了激光驱动飞片的过程、实验方法和测试系统等, 并对实验回收的样品进行了分析, 结果显示飞片具有较好的平面性、完整性和重复性。利用 Gurney 理论和 Lawrence 模型对激光驱动飞片的过程进行了解析分析, 理论结果与实验值吻合得较好。

关键词 脉冲激光, 高速驱动, 飞片

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

Experimental Research on Hypervelocity Flyer Driven by Mini Size Laser

GU Zhuo-wei, SUN Cheng-wei

(Southwest Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900)

Abstract The aluminum flyers with 5.5 μm thickness and 0.5~0.8 mm diameter have been driven successfully by mini size YAG laser in the energy range of 100~300 mJ. The average velocities of flyer were up to 6.6 km/s, and the relationship between flyer velocities and energy density has been obtained in experiments. The analysis to the recovery samples showed that the flyers have good figure during the process of flying. The whole process can be simulate by using Gurney theory and Lawrence model and the academic results are in good accord with the experimental results.

Key words pulse laser, hypervelocity driven, flyer

1 引言

利用小型脉冲激光器驱动高速金属飞片是近年来迅速发展起来的一种动高压加载技术^[1~5]。它是利用较高功率脉冲激光辐照金属膜, 烧蚀一部分膜层, 利用烧蚀蒸气的高压驱动剩余的膜层以高速飞行。这一技术的物理基础就是强激光辐照引起靶物质的气化和烧蚀。例如, 利用脉宽约 10 ns, 脉冲能量约 10^{-1} J 量级的固体激光器可以将厚度微米量级, 直径毫米量级的金属飞片在几十纳秒时间内驱动到 5 km/s 以上的高速^[1]。

目前, 在工程力学界, 人们利用包括爆轰加载, 轻气炮加载等多种动高压加载技术对应变率在 10^6 以下的动高压问题进行了大量的实验研究, 获得了许多规律性的认识。但是, 对于 10^6 以上的超高应变率问题, 目前常用的动高压加载方式就无能为力了。

而利用小型激光器驱动飞片技术就可以在材料中获得 10^6 以上的超高应变率, 同时, 这项技术具有成本低、装置简单的特点, 因此, 对开展高应变率材料动态力学性能的研究方面具有重要的应用价值。

另外, 这项技术在航天领域也具有广阔的应用前景。目前, 空间站成为人类探索宇宙的主要工具, 但由于空间站是长期处于太空这种特殊环境, 太空中的原子态氧、紫外辐射、电子轰击及空间微粒等的高速撞击等各种因素都将对空间站造成不同程度的影响。为了充分了解太空微粒对空间站外壳的撞击影响, 应当建设实验室的高速粒子发射装置, 用于模拟空间高速粒子。R. Roybal^[6]在对太空粒子及各种高速粒子发射技术进行仔细研究后发现, 小型脉冲激光器驱动飞片技术是实验室模拟空间高速粒子的最佳方式。

收稿日期: 2001-02-26; 收到修改稿日期: 2001-05-09

作者简介: 谷卓伟(1969—), 男, 中国工程物理研究院流体物理研究所助理研究员, 博士, 主要从事冲击波物理及激光的力学效应研究。E-mail: guzhuowei@163.net

2 实验系统及分析

2.1 实验过程

图 1 是实验的布置图。实验中采用小型脉冲 YAG 激光器,尺寸为 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 80\text{ cm}$,波长 $1.06\text{ }\mu\text{m}$,脉宽 $9\sim 10\text{ ns}$,光斑空间分布为准高斯分布。采用能量计监测激光脉冲的能量,利用光电探测器监测脉冲宽度并输入到示波器作为触发信号。光束经一焦距为 200 mm 的会聚透镜聚焦到飞片上。飞片材料为商用铝膜,将铝膜用硅油紧紧粘贴在透

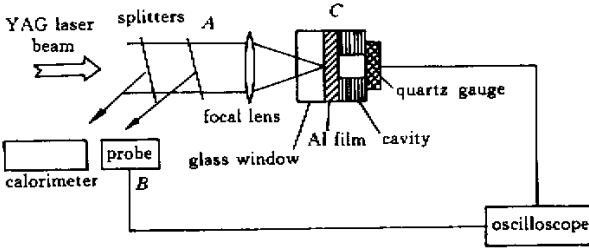


图 1 激光驱动飞片的实验布置图

Fig. 1 Setup of laser driven flyer experiments

2.2 测试系统

在速度测量中是利用石英计的压电效应工作的,压电效应的响应时间约为 0.5 ns ^[7],石英计的电容为 4 pF ,外接 $50\text{ }\Omega$ 负载,回路的响应时间约为 0.2 ns ,因此工作系统的总响应时间 $< 1\text{ ns}$,完全可以满足实验的要求。

在实验系统的设计中,脉冲信号与石英计信号的传输长度要严格一致,这样两信号在传输线路上的时间可以抵消,因此消除了信号的传播时间对测量速度的影响。另外由于激光发射时伴随强放电过程,这将对石英计信号造成强干扰,严重影响石英计信号的质量,因此必须对石英计进行严格的屏蔽。

在实验测量中,飞行腔长采用螺旋测微器测量,精度 0.01 mm ,利用数字示波器记录信号时间,采样率 1 GHz 。

$$\frac{\Delta v}{v} = \left[\frac{|\partial v/\partial l|}{v} \right] \cdot \Delta l + \left[\frac{|\partial v/\partial t|}{v} \right] \cdot \Delta t = \frac{\Delta l}{l} + \Delta t/t \quad (2)$$

3 实验结果

实验成功驱动了厚度为 $5.5\text{ }\mu\text{m}$,直径约 $0.5\sim 0.8\text{ mm}$ 铝飞片,最高速度达到 6.6 km/s 。图 2 是典型的实验原始信号,图中下方是光脉冲信号,上面是石英计信号。图 3 是实验测得的 $5.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚度飞

片窗口上,窗口材料采用 K9 玻璃,当激光束聚焦到铝膜上,激光烧蚀一部分膜层并推动余下部分即飞片飞行一段距离后撞击到石英晶体上。当飞片撞击到石英晶体表面时将产生一个压电信号,利用测得的飞片飞行时间和距离,就可以得到飞片的平均飞行速度 v

$$v = l/(t_1 - t_0) \quad (1)$$

其中, l 为飞行腔长; t_0 为出光时刻; t_1 为石英计信号前沿。这里忽略可能产生的空气冲击波的影响。

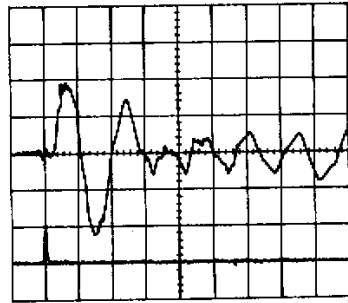


图 2 实验记录的原始信号

Fig. 2 Primary signals of experiment

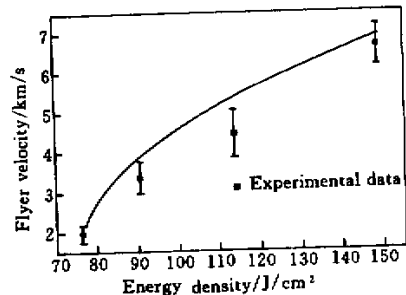


图 3 实验和理论得到的飞片速度与能量密度的关系

Fig. 3 Theoretical and experimental results of flyer velocity vs energy density

片的速度与能量密度的关系,图中曲线是利用

Lawrence 模型的计算结果。表 1 是实验得到的测量数据及实验参数。

表 1 实验参数及数据

Table 1 Flyer parameters and experimental data

Experiment No.	Energy /mJ	FWHM /ns	Diameter /mm	Thickness / μm	Velocity /km/s	$\Delta v/v$ /%
1	149.5	11.5	0.5~0.8	5.5	2.0	10.9
2	177.2	9.5	0.5~0.8	5.5	3.4	11.7
3	222.2	9.0	0.5~0.8	5.5	4.4	13.8
4	291	9.0	0.5~0.8	5.5	6.6	7.8

3.1 回收样品的分析

图 4 是飞片冲击后回收的石英晶体的照片。照片上是两发重复实验的冲击成坑,飞片直径约 0.8 mm,速度约 5 km/s。图 5 是飞片冲击后回收的 $\phi 10$ mm 有机玻璃样品的照片。从照片上可以看出,飞片撞击成坑非常均匀,边缘很光滑,说明飞片具有很好的平面性和完整性。图 4 中两发实验的冲击成坑大小和深度基本一致,说明飞片具有较好的重复性。



图 4 经两发重复实验后回收的石英晶体

Fig. 4 Recovery quartz crystal impacted by flyer

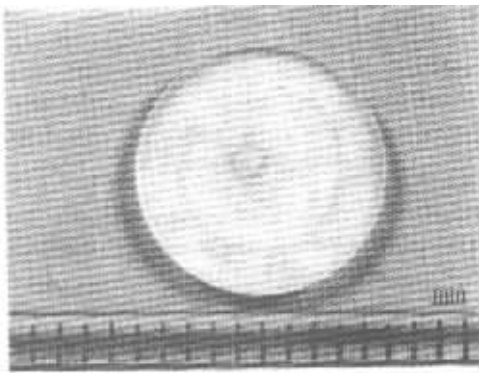


图 5 经飞片冲击后的有机玻璃样品

Fig. 5 Recovery PMMA sample impacted by flyer

3.2 理论分析

利用爆炸力学中的 Gurney 理论^[8]及 Lawrence

模型^[9]可以对这一过程进行解析分析。这里假定飞片的动量与激光和靶相互作用的具体过程无关,而主要依赖于过程中的动量守恒。由于飞片的直径远大于厚度,这里只考虑一维效应。在一维情况下

$$\rho x_d E = (\rho/2)(x_0 - x_d)v_0^2 + (\rho/2) \int_0^{x_d} (v_0 \cdot x/x_d)^2 dx \quad (3)$$

其中, E 为 Gurney 能量; ρ 为密度; x_d 为激光烧蚀厚度; x_0 为初始厚度; v_0 为飞片的速度。

假设在气化产物中粒子速度分布是线性的

$$v(x) = (v_0/x_d)x, \quad 0 \leq x \leq x_d$$

解方程(3)得到

$$v_0 = \left(\frac{3E}{3x_0/2x_d - 1} \right)^{1/2} \quad (4)$$

因此,只要求出 Gurney 能量 E 和烧蚀厚度 x_d 就可以得到飞片速度 v_0 。设激光沉积能量是指数分布的

$$\epsilon(x) = \mu_{\text{eff}} F_0 (1-r) e^{-\mu_{\text{eff}} \rho x} \quad (5)$$

这里 F_0 为入射激光通量, r 为有效能量损失(包括反射和辐射损失), μ_{eff} 为有效吸收系数。

设材料的气化能为 ϵ_d , 由 $\epsilon(x_d) = \epsilon_d$ 得到

$$x_d = \frac{1}{\mu_{\text{eff}} \rho} \ln \frac{\mu_{\text{eff}} F_0 (1-r)}{\epsilon_d} \quad (6)$$

设在靶面处超过气化能的能量部分为 E_{tot} , 则有

$$E_{\text{tot}} = \int_0^{x_d} [\epsilon(x) - \epsilon_d] dx$$

由(5),(6)式

$$E_{\text{tot}} = \frac{F_0(1-r)}{\rho} - \frac{\epsilon_d}{\mu_{\text{eff}} \rho} \left[1 + \ln \frac{\mu_{\text{eff}} F_0 (1-r)}{\epsilon_d} \right] \quad (7)$$

Gurney 能量

$$E = E_{\text{tot}}/x_d \quad (8)$$

有效吸收系数^[9]

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu_a}{1 + k \mu_a \rho (\alpha \tau)^{1/2}} \quad (9)$$

这里, μ_a 为吸收系数; α 为热扩散系数; τ 为激光脉

宽; k 为调节系数。

利用上面诸方程可以得到飞片的最终速度。

同时,还可以得到飞片的能量耦合系数 f

$$\text{当 } x_0 \gg x_a \quad f \approx \frac{\rho \cdot x_0 \cdot v_0^2}{2F_0} \quad (10)$$

表2是计算中用到的铝材料的相关参数。利用上述理论模型,我们最终得到了飞片的速度,见图3。从图中可以看出,理论曲线与实验结果符合得较好,说明这个理论模型是成功的。图6是计算得到的烧蚀深度与能量密度的关系。从图中可以看出,在低能量密度条件下,材料的烧蚀深度增加是比较快的,

但随着能量密度的增加,烧蚀深度的增加逐渐减小。这是因为随着激光能量的增加,大部分激光能量被靶前的烧蚀蒸气吸收用于升高温度并产生电离,这时到达靶面的激光能量将大大减少,因此阻止了材料的进一步烧蚀。图7是能量耦合系数与能量密度的关系。从图中可以看出,实验值与理论结果存在一定的差异,这主要是由于光斑尺寸及飞片大小的测量误差造成的。由于实验条件的限制,无法精确测量飞片的直径和厚度,同时,光斑尺寸与飞片尺寸是否一致,这些都可能是造成上面差异的原因。

表2 计算中用到的铝材料的相关参数^[7]

Table 2 Correlative parameters of aluminum^[7]

Density /g/cm ³	Decomposition energy/kJ/g	Thermal diffusivity/cm ² /s	Absorption coefficient/cm ² /g	Adjust coefficient	Effective energy loss
2.7	12.0	0.8	4.4×10^5	0.253	0.6

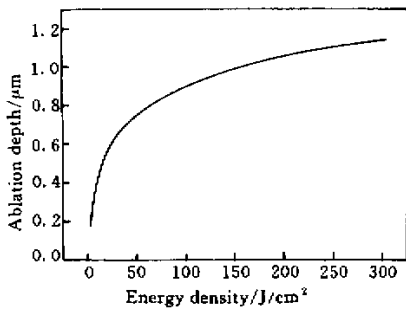


图6 计算得到的烧蚀深度

Fig. 6 Theoretical results of ablation depth

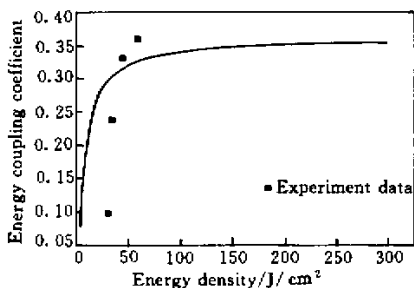


图7 计算和实验得到的能量耦合系数

Fig. 7 Theoretical and experimental result of energy coupling coefficients

参 考 文 献

- 1 D. L. Paisley, N. I. Montoya, D. B. Stahl. Interferometry, streak photography, and stereo photography of laser-driven miniature flying plates [R]. DE91-007493
- 2 A. V. Farnsworth, R. J. Lawrence. Analytical and computational modeling of small laser-driven flyer plates [R]. DE92-004207
- 3 S. A. Sheffield, J. W. Rogers, J. N. Castaneda. Velocity measurements of laser driven flyers backed by high impedance windows [R]. SAND-85-1235C
- 4 W. M. Trott, K. D. Meeks. High-power Nd:glass laser transmission through optical fibers and its use in acceleration of thin foil targets [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**(7):3297~3301
- 5 Sun Chengwei. Calculation of impacting and detonating explosives by laser-driven-flyers [J]. *High Power Laser and Particle Beams (强激光与粒子束)*, 1997, **9**(3):471~476 (in Chinese)
- 6 R. Roybal, J. Shively, C. Stein *et al.*. Laboratory simulation of hypervelocity debris [R]. NASA report, N19970019986
- 7 Minao Kamegai. Two-phase equation of state and free-energy model for dynamic phase change in materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(4):1618~1624
- 8 J. E. Kennedy. Gurney Energy of Explosives: Estimation of the Velocity and Impulse Imparted to Driven Metal [R]. Report No. SC-RR-70-790. Sandia Lab, Albuquerque, NM. 1970
- 9 R. J. Lawrence, W. M. Trott. Theoretical analysis of a pulsed-laser-driven hypervelocity flyer launcher [J]. *Int. J. Impact Engng.*, 1993, **14**:439~449

致谢 作者在测试方法上曾得到了袁万宗研究员、刘仓理研究员的指导,参加实验的还有张可星、罗利军、李晓兰、李建明、廉敬阳等同志,这里向他们表示深深的谢意。