文章编号：1000-5773(2008)01-0103-05

激光驱动带窗口宏观飞片特性实验研究*

谷卓伟，张兴卫，孙承纬

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

摘要：利用激光驱动带窗口宏观高速飞片技术可以实现对材料的一维加载，特别适合开展材料的高压状态方程及高应变率下材料的动态力学特性研究。利用小型脉冲 YAG 激光器进行了驱动飞片技术研究。开展了飞片结构对飞片力学参数影响的实验，结果表明：复合靶飞片的能量耦合效率比单膜结构飞片具有较大的提高，平均速度提高约 15%～30%。同时，飞片的平面性和完整性也有明显的改善。实验中测量了飞片的启动弛豫时间，结果显示：飞片的启动弛豫时间为 5～10 ns。利用多通道光纤阵列开展了飞片的平面性测量。实验结果表明，在约∅1.0 mm 的范围内，飞片的时间分散性为 20～30 ns。利用高灵敏度激光干涉技术，对飞片速度历史进行了测量，结果表明，飞片在前 20 ns 就加速到最终速度的 90%以上。

关键词：冲击动力学；激光驱动；实验技术

中图分类号：O521.3 **文献标识码**：A

1 引 言

激光驱动宏观飞片技术是目前新型的动高压加载实验技术之一，在冲击动力学、高压物理、武器物理等领域具有广阔的应用前景[1-3]。激光驱动与惯性约束聚变(ICF)中的相关概念有很大的区别，激光透过窗口材料照射在靶上，飞片尺度一般为毫米级，飞片厚度为 $10\sim10^2$ μm 量级，可以视为平面一维加载；加载激光脉宽一般为 $10\sim10^2$ ns 量级，靶面功率密度为 0.1～10 GW/cm^2，整个驱动过程受等离子体运动的宏观流体动力学规律控制。由上述特征可以看出，激光驱动飞片技术更适合于材料的冲击动力学响应特性研究。

2 实 验

2.1 飞片结构对其力学特性的影响

在实验中，首先研究了飞片结构对其力学状态的影响。本工作考虑两种结构：一种称为单膜结构，如图 1 所示，飞片的一部分作为烧蚀层，余下部分作为飞片；另一种为复合结构，见图 2。

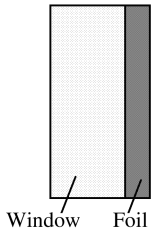


图 1 单膜靶结构

Fig. 1 The single foil configuration

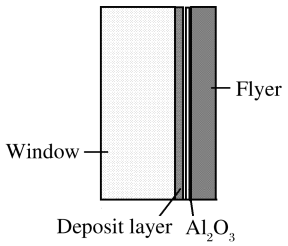


图 2 复合靶结构

Fig. 2 The complex target configuration

* **收稿日期**：2007-03-20；**修回日期**：2007-06-26

基金项目：中国工程物理研究院基金(20030101)

作者简介：谷卓伟(1969—)，男，博士，副研究员，主要从事脉冲激光的力学效应研究. E-mail：guzhw@yahoo.com.cn

实验中，采用铝作为飞片材料，厚度为10 μm，飞片尺寸约∅0.8 mm，两种结构飞片的速度测量结果见图 3。实验表明：复合靶结构飞片的速度明显高于单膜结构靶飞片，速度提高约 15%～30%。

图 4、图 5 是同样条件下两种结构飞片在黄铜靶上的冲击成坑，可以清楚地看出：复合结构靶飞片的成坑形状更规则、深度更均匀。显然，复合结构靶飞片的平面性和完整性均优于单膜结构靶。

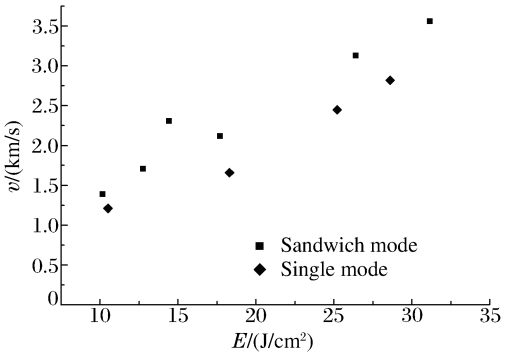


图 3 两种靶结构下飞片的速度与能量密度的关系

Fig. 3 The relationship between velocity and energy density for different flyer configurations

2.2 飞片平面性测量

平面度是检验激光驱动飞片技术实用性的一个关键指标，为此我们开展了飞片平面性的实验测量。由于目前飞片尺寸仅∅1.0 mm～∅1.5 mm，因而利用光纤探针阵列进行飞片的平面性测量。

实验中，采用快响应光纤探针测试系统[4]，该系统由光纤探针、光纤、快响应光电转换器、电缆和示波器组成。系统响应时间 $t \leqslant 1$ ns。图 6 是利用光纤探针测试飞片的实验布局图。探头尺寸为∅1.4 mm，其中均匀布置 12 根探针。图 7 是 04-12-15-1 号实验的探针波形。为避免空气对飞片的影响，实验是在真空中完成的。

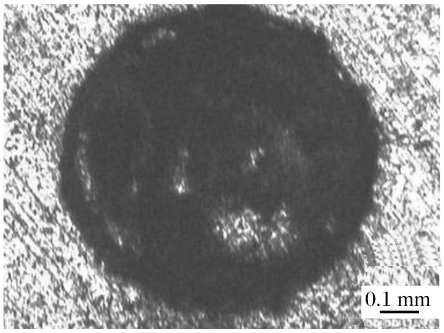


图 4 复合靶飞片在黄铜靶上的成坑

Fig. 4 The pit impacted by complex structure flyer on brass sample

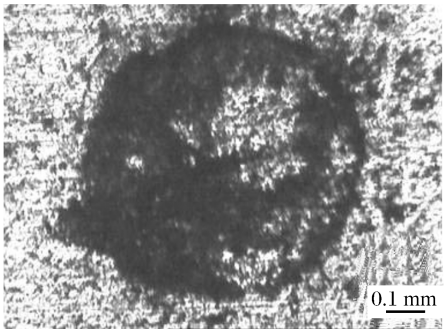


图 5 单膜飞片在黄铜靶上的成坑

Fig. 5 The pit impacted by single structure flyer on brass sample

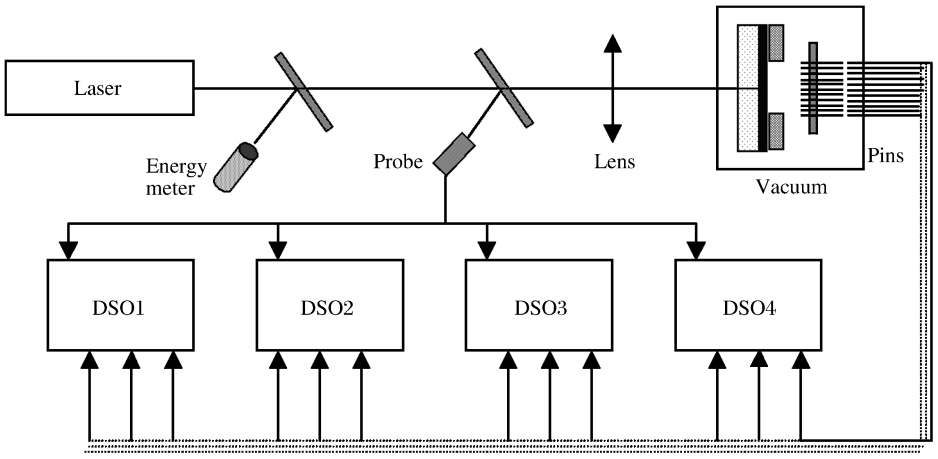


图 6 飞片平面性测试实验布局

Fig. 6 The experimental setup of flyer planarity measurement

表 1 是一发典型的实验数据,实验中真空度为 6.2 Pa,激光能量 491 mJ,飞行距离 0.205 mm。第 11 号探针数据明显异常,被去掉,分析发现在这组数据中每根探针与平均值的最大偏差为 36.2 ns,如果再去掉第 2 号探针,则最大偏差为 26 ns。对其它实验结果的分析基本类似,基本上每组数据都有 1～2 根探针的信号相差甚远,对比安装图可以看出,这些探针基本都位于边缘位置,这说明飞片的边缘形变比较大,如果剔除这些信号,在约∅1.0 mm 的范围内,飞片的时间分散性约为 20～30 ns 左右。

表 1　实验号 04-12-16-2 数据

Table 1　The data of experiment No. 04-12-16-2

Pins	t/(ns)	Pins	t/(ns)	Pins	t/(ns)	Pins	t/(ns)
CH1	77.5	CH4	80.0	CH7	72.2	CH10	105.6
CH2	119.9	CH5	—	CH8	89.0	CH11	244.0
CH3	67.9	CH6	67.7	CH9	54.6	CH12	102.4

2.3　飞片启动弛豫时间的测量

在激光驱动飞片的过程中,从激光辐照开始到飞片开始运动这一时间段称为飞片的启动弛豫时间。这一物理量对于激光烧蚀过程的理论描述具有重要意义,通常人们忽略这一时间,认为它是一个小量。本工作利用美国 Thorlabs 公司的 DET210 型光电管(响应时间小于 1 ns)和有源光纤探针系统(带宽约 3 GHz)[5]对飞片的启动弛豫时间进行了测量。图 8 是飞片启动弛豫时间测量实验框图。测量结果表明,飞片的启动弛豫时间为 5.0～10.0 ns。这一实验结果与国外的相关研究是一致的,具体测试结果见表 2。

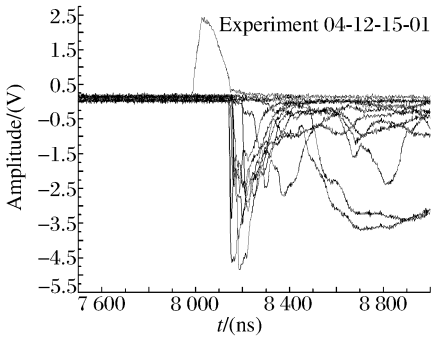


图 7　04-12-15-01 号实验探针波形

Fig. 7　The pins' waveforms of No. 04-12-15-01 experiments

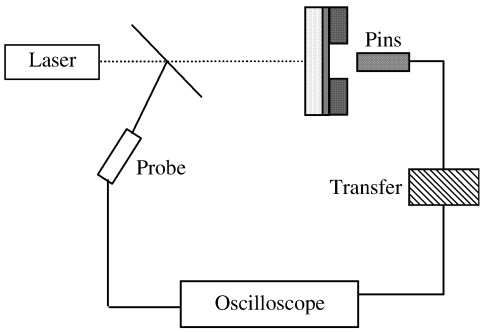


图 8　飞片启动弛豫时间测量实验框图

Fig. 8　The experimental setup of flyer startup relaxation time measurements

表 2　飞片启动弛豫时间实验结果

Table 2　The experimental results of flyer startup relaxation time

Exp. No.	Energy/(mJ)	Thickness/(μm)	Size/(mm)	Startup relaxation time/(ns)
04-12-26-1	170.0	10.0	0.8	8.6
04-12-26-2	130.0	10.0	0.8	5.5
04-12-26-3	177.5	20.0	0.8	8.0
04-12-26-4	377.5	20.0	0.8	9.6
04-12-26-5	777.5	20.0	0.8	7.0

2.4 激光驱动飞片的速度历史测量

激光驱动飞片的速度历史是这项技术中最重要的指标之一，之前我们利用传统 VISAR 技术开展了相关测试，但由于飞片的加速过程太快，很难得到完整的飞片速度历史。本工作利用新型全光纤速度干涉仪系统[5]进行飞片的速度测量。该系统带宽约 3 GHz，位移分辨率可达 70 nm。图 9、图 10 分别为纪录的原始信号及处理结果。从飞片的速度历史看，飞片在前 20 ns 就加速到最终速度的 90%以上。

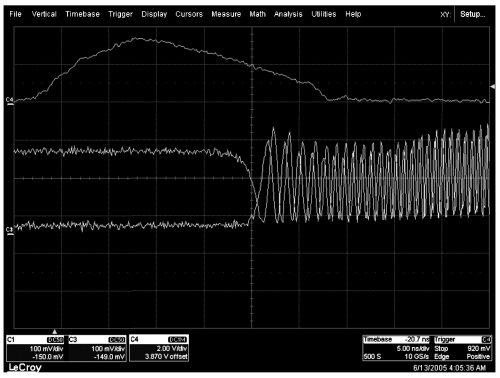


图 9 05-06-13-2 实验的干涉信号

Fig. 9 The interference signal of No. 05-06-13-2 experiment

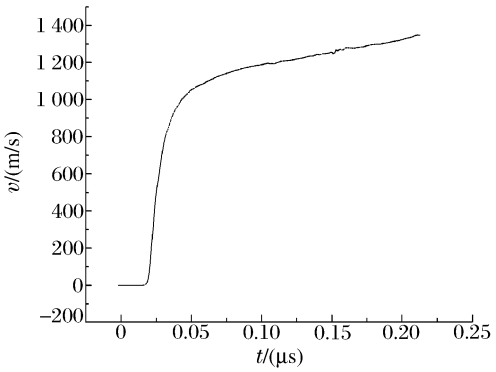


图 10 05-06-13-2 实验飞片速度历史

Fig. 10 The flyer's velocity history of No. 05-06-13-2 experiment

3 结 论

对激光驱动带窗口飞片的实验技术进行了系统的研究，获得了一些有价值的实验结果和认识。包括：

(1) 复合结构飞片无论是在飞片速度还是在平面性方面均优于单膜飞片。

(2) 在本实验条件下，在约∅1.0 mm 的范围内飞片的时间分散性约为 20～30 ns。分析表明，造成飞片平面性较差的主要原因可能是由激光空间分布不均匀及探针安装工艺造成的。

(3) 实验结果表明，激光驱动飞片的启动弛豫时间为 5.0～10.0 ns。

(4) 在激光驱动飞片的过程中，飞片在前 20 ns 就加速到最终速度的 90%以上，这对测试系统的响应灵敏度提出了很高的要求。

本工作得到了王翔副研究员，翁继东、王荣波课题组等的大力帮助，在此一并致谢。

References:

[1] Watson S, Gifford M J, Field J E. The Initiation of Fine Grain Pentaerythritol Tetranitrate by Laser-Driven Flyer Plates [J]. J Appl Phys, 2000, 88(1): 65.

[2] Sun C W, Zhuang S M, Wang C Y. The Calculation of Laser Driven Flyer Impacting and Initiating Explosive [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1997, 9(3): 471. (in Chinese)
孙承纬，庄仕明，王春彦. 激光驱动飞片冲击引爆炸药的计算 [J]. 强激光与粒子束，1997，9(3)：471.

[3] Gu Z W, Sun C W. The Experimental Research on Laser Driven High Velocity Flyer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(5): 407-411. (in Chinese)
谷卓伟，孙承纬. 小型脉冲激光器驱动高速飞片的实验研究 [J]. 中国激光，2002，29(5)：407-411.

[4] Wang R B, Wu T L, Wang G C. Research on Fast Response Fiber Pins under Shocking [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 375-379. (in Chinese)
王荣波，吴廷烈，王贵朝. 冲击作用下快响应光纤探针研究 [J]. 爆炸与冲击，2003，23(4)：375-379.

[5] Wong J D,Tan H,Hu S L,et al. A New Kind of All Fiber Velocity Interference Instrument [J]. High Power Laser and Particle Beams,2005,17(4):533-536. (in Chinese)
翁继东,谭　华,胡绍楼,等. 一种新型全光纤速度干涉仪 [J]. 强激光与粒子束,2005,17(4):533-536.

Experimental Research on the Characters of Laser-Driven Macro-Flyers

GU Zhuo-Wei,ZHANG Xing-Wei,SUN Cheng-Wei

(*Institute of Fluid Physics*,*CAEP*,*Mianyang* 621900,*China*)

Abstract: One-dimensional shock loading on the material can be realized using the technique of laser-driven macro-flyer plate and is of applications to the research of high pressure equation of state(EOS) and dynamics under high strain rate. A table-sized pulse Nd:YAG laser was used to drive macro-flyer in this work. The influence of flyer configuration on its flying parameters was experimentally researched. The experiments show that the energy coupling efficiency of flyer plates in complex configuration is improved,relative to the single foil configuration which the average velocity of flyer plates is enhanced by 15%～30%,furthermore,the integrity and planarity of flyer plates in complex configurations are better than those from single foil configurations. The startup relaxation time of flyer is measured to be within 5～10 ns. The planarity of flyer was measured and the results show that time difference of flyer in the range of 1.0 mm is within 20～30 ns. The flyer velocity history was measured and the results show that the flyer has been accelerated to 90% of its terminal velocity in 20 ns.

Key words: shock dynamics; laser-driven; experimental technique