文章编号：1001-1455(2014)02-0129-08

8 km/s 激光驱动飞片发射技术实验研究*

牛锦超[1]，龚自正[1]，曹 燕[1]，代 福[2]，杨继运[1]，李 宇[1]
(1. 北京卫星环境工程研究所，北京 100094；
2. 五邑大学应用物理与材料学院，广东 江门 529020)

摘要：实验研究了激光驱动飞片技术中激光能量剖面和飞片靶金属膜层的力学特性对飞片的速度和完整性的影响，认为激光能量剖面整体呈“平顶型”的光束是发射高质量飞片的基础，同时飞片靶的膜基附着力、金属膜层的强度和韧性三者之间应保持良好的匹配才能得到完整的飞片。制备了基底/Cr/Al 复合结构飞片靶，利用波长 1 064 nm、脉宽 15 ns 的激光，将直径 1 mm、厚度 3 μm 的铝飞片稳定驱动至 8 km/s。

关键词：爆炸力学；金属膜层的力学特性；激光能量剖面；激光驱动飞片；飞片的速度和完整性
中图分类号：O383；TN249 **国标学科代码**：1303530 **文献标志码**：A

激光驱动飞片技术是 20 世纪 80 年代末迅速发展起来的一种新型动高压加载技术。其原理[1]是在透明约束基底(基底通常选用高阻抗透明材料，如石英玻璃等)上粘贴或沉积一层金属薄膜制成飞片靶，一束高强度脉冲激光透过基底材料入射到薄膜表面，迎辐照面的部分薄膜材料被烧蚀，瞬间气化或电离，在薄膜内表面产生高温高压等离子体。由于受到基底材料的约束，等离子体产生的高压冲击波作用到未烧蚀的固体薄膜上，将薄膜剪切下来形成速度高达几千米每秒的高速飞片，如图 1 所示。激光驱动飞片技术经过二十多年的发展，已经被成功应用于材料物态方程研究、高应变率下材料动态响应特性研究、炸药引爆技术研究以及空间碎片模拟[2-5]等领域。

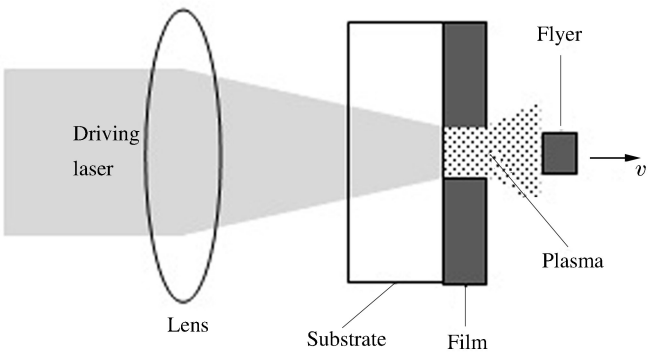


图 1 激光驱动飞片原理示意图

Fig. 1 Schematic of laser-driven flyer plates

在激光驱动飞片技术中，最关键的技术指标有 2 个：(1)飞片的发射速度，其实质是飞片靶的激光能量耦合效率；(2)飞片的平面性和完整性。影响这些指标的因素众多，如激光光束质量、激光能量、激光脉宽、飞片靶结构、飞片靶制备工艺以及金属膜层的力学特性等，因此，从理论上研究这一问题很困难。

激光驱动飞片技术实验探索中，引进约束基底[6]和薄膜沉积工艺[7]以后，激光能量的转换效率获得了极大的提升，使得利用较低能量的激光发射高速飞片成为可能。近年来，复合结构飞片靶的广泛应用促进了激光驱动飞片技术的长足进步[8-12]。K. Okada 等[10]用磁控溅射方法制备了结构为 Al(2 μm)/聚酰亚胺(90 μm)/Ta(8 μm)的飞片靶，利用波长 351 nm、脉宽 2.5 ns、最大输出能量 3 kJ 的激光驱动了直径 600 μm、厚 8 μm 的 Ta 飞片，获得了速度高达 23.6 km/s 且具有良好完整性的飞片。王春彦等[13]、谷卓伟等[14-15]、张文兵等[16]、曹燕[17]先后从 20 世纪 90 年代中期开始也开展了高强度脉冲激光驱动飞片技术及应用研究，但飞片(厚 5.5 μm、直径 0.5～0.8 mm 的铝膜)的最高速度仅为 6.6 km/s。

* **收稿日期**：2012-08-28；**修回日期**：2013-03-27
基金项目：国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB731600)；
国家国防科工局空间碎片专项(kjsp06209，kjsp06210，K0201410)
作者简介：牛锦超(1983—)，男，博士研究生。

本文中,在前人研究的基础上,实验研究激光光束特性和飞片靶力学特性对飞片速度和完整性的影响,给出在飞片靶中添加 Cr 附加层、实现稳定发射 8 km/s 高速飞片的实验结果。

1 实验设计

实验设备布局如图 2 所示,激光器为 Nd:YAG 调 Q 脉冲激光器,工作波长为 1 064 nm,脉冲宽度为 15 ns,单脉冲最大输出能量为 2 J,初始光斑直径约为 13 mm。第 1 个分光镜获得的光束采样由激光能量计收集,以测量光束能量。第 2 个分光镜获得的光束采样由光电接受器 1 收集,用于测量光束的时间谱,由示波器记录,并确定飞片的发射时间。光束经一焦距为 400 mm 的透镜聚焦为直径约为 1 mm 的光斑,照射在飞片靶的金属膜层上,驱动出高速运动的金属飞片。飞片飞行一段时间后撞击在验证靶上,通过分析验证靶的撞击形貌,确认飞片的完整性。

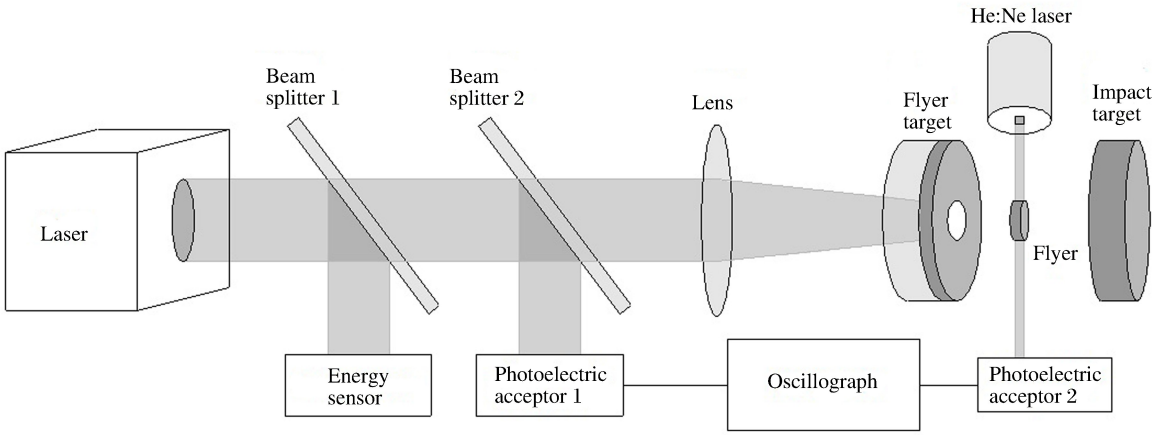


图 2 激光驱动飞片实验布局示意图

Fig. 2 System diagram of laser-driven flyer experiments

He:Ne 激光器(波长 670 nm)发射的片激光设置于飞片的飞行路径上,与飞行方向垂直。片激光的宽度(飞片飞行方向,也是飞片的厚度方向)约 30 μm,片激光的高度(飞片直径方向)约 1 mm,片激光的能通量由光电接受器 2 监测。当飞片经过片激光时,进入光电接受器 2 的光通量下降,在示波器上形成一个下降沿,如图 3 所示。因此,可获得飞片到达片激光的时间。片激光与飞片靶之间的距离事先设定,通过测量飞片的发射时刻和飞片到达片激光的时刻,可计算获得飞片的平均速度。

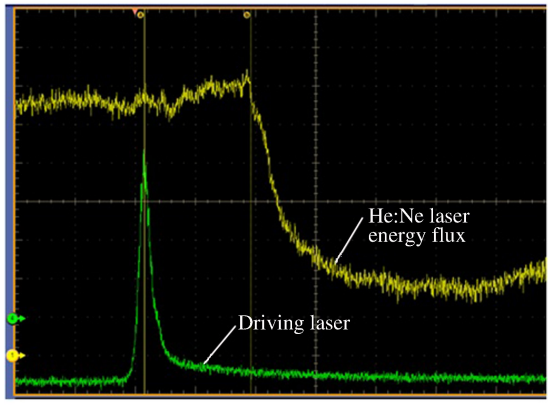


图 3 典型的示波器记录图像

Fig. 3 Typical oscillograph picture

2 激光光束特性对飞片完整性的影响

产生飞片是激光驱动飞片技术的前提,但并不是任何激光作用在飞片靶上均能发射出飞片。图 4 是在激光能量空间均匀分布和存在强区 2 种状态下进行的飞片驱动实验,其中左图为激光光束的能量剖面,右图为验证靶的飞片撞击形貌。图 4 显示,当激光能量空间分布均匀("平顶型"或近"平顶型")时,飞片撞击靶板形成一个形状规则、边缘清晰的中心撞击坑,其直径与辐照光斑相当,说明飞片具有良好的完整性。相反,激光光束空间分布为高斯型或存在强区时,飞片撞击靶板产生许多小坑,小坑分布

区域明显大于辐照光斑，说明飞片在撞击靶板前已破碎。上述结果说明，激光能量空间分布均匀的光束更利于发射完整的飞片。这与前人的研究结论[2,17-21]一致。

飞片在驱动过程中破碎是因为激光烧蚀不均匀在飞片中引起的加速度分布梯度和应力分布梯度。当激光能量剖面存在强区时，辐照光斑内飞片的烧蚀极度不均匀，形成巨大的加速度分布梯度和应力分布梯度，导致辐照区内的固态金属膜层没有同时飞出，兼或飞出后被很大的应力差撕碎。当激光能量剖面呈“平顶型”时，激光辐照形成平面冲击波，辐照区内的加速度分布梯度和应力分布梯度较小，飞片整体飞出并在较长时间内保持良好的完整性和平面性。

数值模拟的结果[22]显示，当激光能量剖面整体呈“平顶型”分布时，飞片的完整性和平面性对能量剖面的细节不敏感。这是因为，激光烧蚀产生的等离子体是飞片加速的主要动力源，飞片的特性更依赖于等离子体的动力学特性，而激光能量剖面中局部的微小缺陷不会引起等离子体状态的明显变化。因此，在实验中采用能量剖面整体呈“平顶型”的激光即可获得完整性和平面性均良好的飞片。

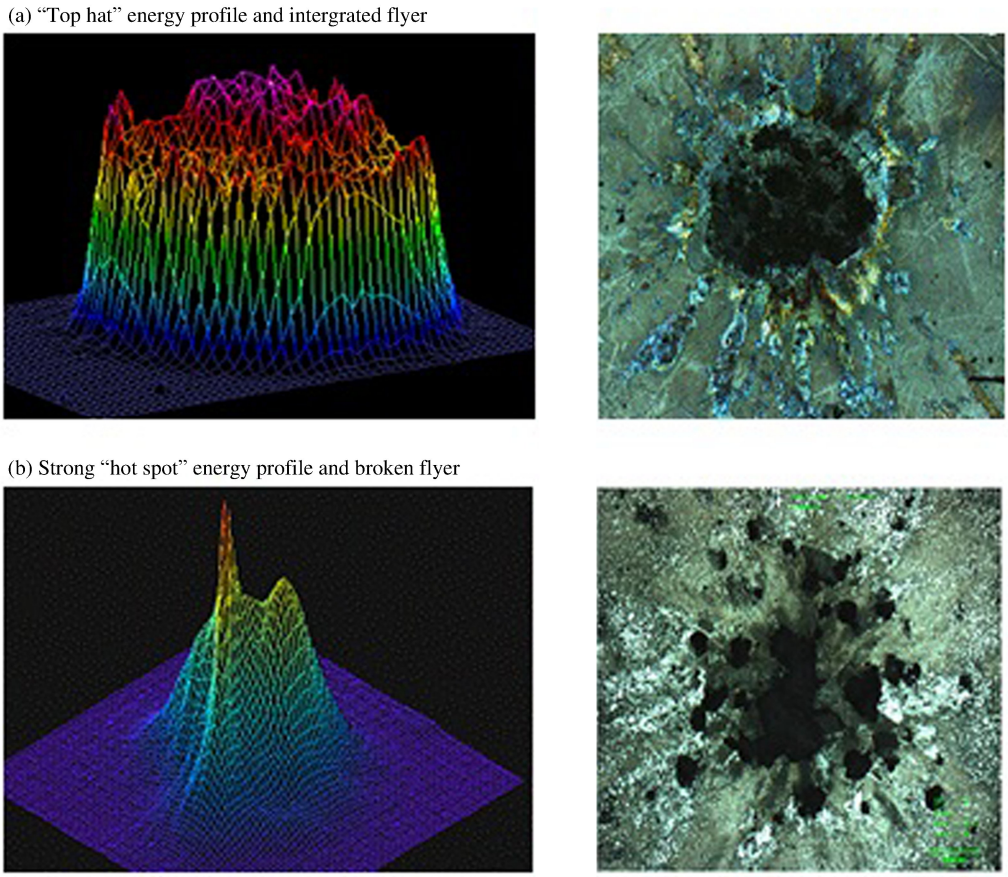


图 4　2 种不同的激光能量剖面及对应条件下的飞片完整性

Fig. 4　Two kinds of laser energy profiles as well as corresponding flyer integrity

3　飞片靶金属膜层力学特性对飞片速度的影响

3.1　膜基附着力的影响

由于玻璃基底材料和金属薄膜的物理化学性质差异较大，导致金属膜层与基底之间的附着性较差，为飞片靶制备带来困难。参考前人的经验，本文在实验中设计了基底/Cr/Al 复合结构的飞片靶，即在玻璃基底和金属铝膜层之间加入金属 Cr 附加层，以提高铝膜层（飞片膜层）与基底之间的膜基附着力 F。同时制备了结构为基底/Al 的单膜飞片靶和结构为基底/Cr/Al 的复合结构飞片靶，2 种飞片靶的膜基附着力分析的划痕测试结果（图 5）显示，含 Cr 层复合飞片靶的膜基附着力远高于不含 Cr 层的飞

片靶，即 Cr 附加层能极大地提高飞片靶的膜基附着力。相同激光参数下这 2 种飞片靶分别获得的飞片速度 v 如图 6 所示，显然，增加 Cr 层后飞片速度在总体上提高了近一倍。这说明，飞片靶的膜基附着力也是影响飞片速度的一个重要因素，而且在一定范围内随附着力的增大，飞片速度也将增大。这是因为附着力增大后，等离子体受到的约束作用增强，吸收了更多的激光能量 E 而具有更高的内能和压力，使得飞片获得了更多的动能，表现为飞片速度增大。

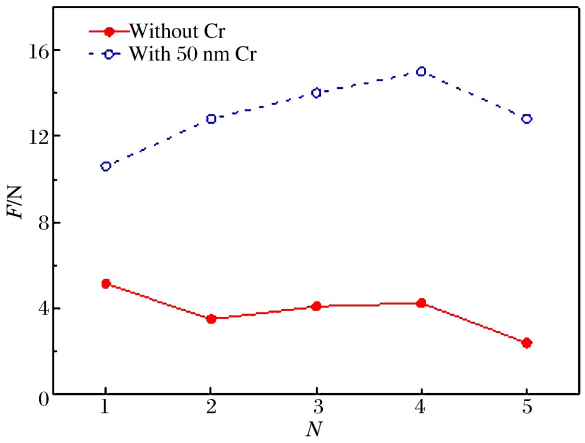


图 5 不同飞片靶划痕测试结果

Fig. 5 Adhesion test results of different flyer targets

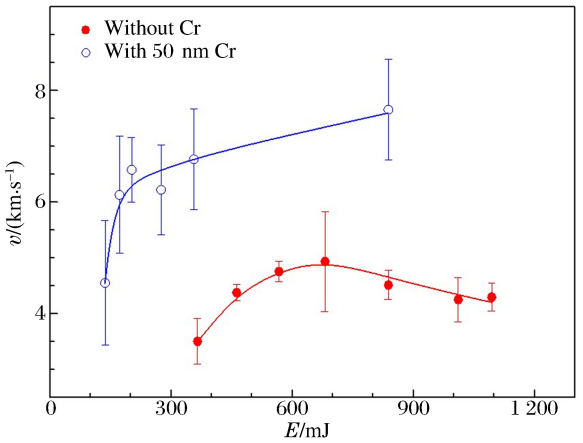


图 6 不同飞片靶飞片发射速度

Fig. 6 Flyer velocity of different flyer targets

3.2 飞片膜层的强度和韧性的影响

飞片靶金属膜层的强度不仅是飞片完整性的重要影响因素，还是激光能量耦合效率的重要影响因素。因此，本文中采用不同的工艺在玻璃基底上制备了多种结构的飞片靶，包括用离子束溅射方法制备的结构为基底/Al 的铝单膜飞片靶，Al 膜层厚 3 μm；用场辅助热扩散法将 13 μm 厚的商用铝箔直接粘贴在基底上制得的铝箔飞片靶；用离子束溅射法制备的结构为基底/Cr/Al 的铝/铬复合结构飞片靶，Al 膜层分别厚 3、5、9 和 10 μm；以及采用电子束蒸发法制备的结构为基底/Cr/Al 的铝/铬复合结构飞片靶，Al 膜层分别厚 3、5、9 和 10 μm。其中，铝/铬复合结构飞片靶中 Cr 附加层的厚度均为 50 nm。

利用上述飞片靶进行了飞片驱动实验，发射飞片后的飞片靶形貌如图 7 所示。在本文研究范围内，铝单膜飞片靶驱动位置边缘处的金属膜层呈现清晰的剪切形貌，没有拉伸、撕裂或鼓包等现象，并能够清晰看到等离子体溅射留下的痕迹，如图 7(a)所示。铝箔飞片靶则全部存在拉伸现象，如图 7(b)所示，最大拉伸长度超过 600 μm；激光能量增加后拉伸程度降低，而当激光能量较低不足以发射飞片时，则形成锥形鼓包，与图 7(e)中的鼓包现象[23]类似。对于铝/铬复合结构飞片靶，则观测到 2 种不同的形貌，一种是清晰的剪切形貌，如图 7(c)所示；另一种是有轻微拉伸效应(拉伸长度小于 100 μm)且大面积不规则鼓包的形貌，如图 7(d)所示，黑色为鼓包区。

综合分析图 7 所展现的各种鼓包、拉伸现象，可知金属膜层的强度和韧性都是影响飞片特性的重要因素。如果金属膜的强度较低且韧性较差，则飞片内的应力分布梯度和加速度分布梯度极易造成飞片破碎，无法形成完整的飞片；而且金属膜层的强度和韧性较低时，等离子体受到的约束作用较弱，难以对飞片产生较大的冲量作用，从而不能获得高速飞片。如果金属膜层的强度和韧性很高，则飞片在形成过程中需要消耗更多的激光能量，不利于发射高速飞片，但较高的强度和韧性能够保证飞片的完整性；图 7(b)中强烈的拉伸效应由铝箔过高的韧性导致，这种影响会降低飞片的平面性，但利于保持飞片的完整性。因此，当膜层强度和韧性适中时，既能保持飞片的完整性和平面性，又能对等离子体形成较好的约束作用，获得较高的飞片速度。图 7(d)中的鼓包现象还反映飞片靶的膜基附着力较弱，而且分布不均匀。如果附着力较弱而强度较高，金属膜在拉伸应力作用下就会剥离基底而形成鼓包现象，大面积的鼓包会加速等离子体的压力卸载，影响等离子体的动力学特性，对飞片产生不利影响。

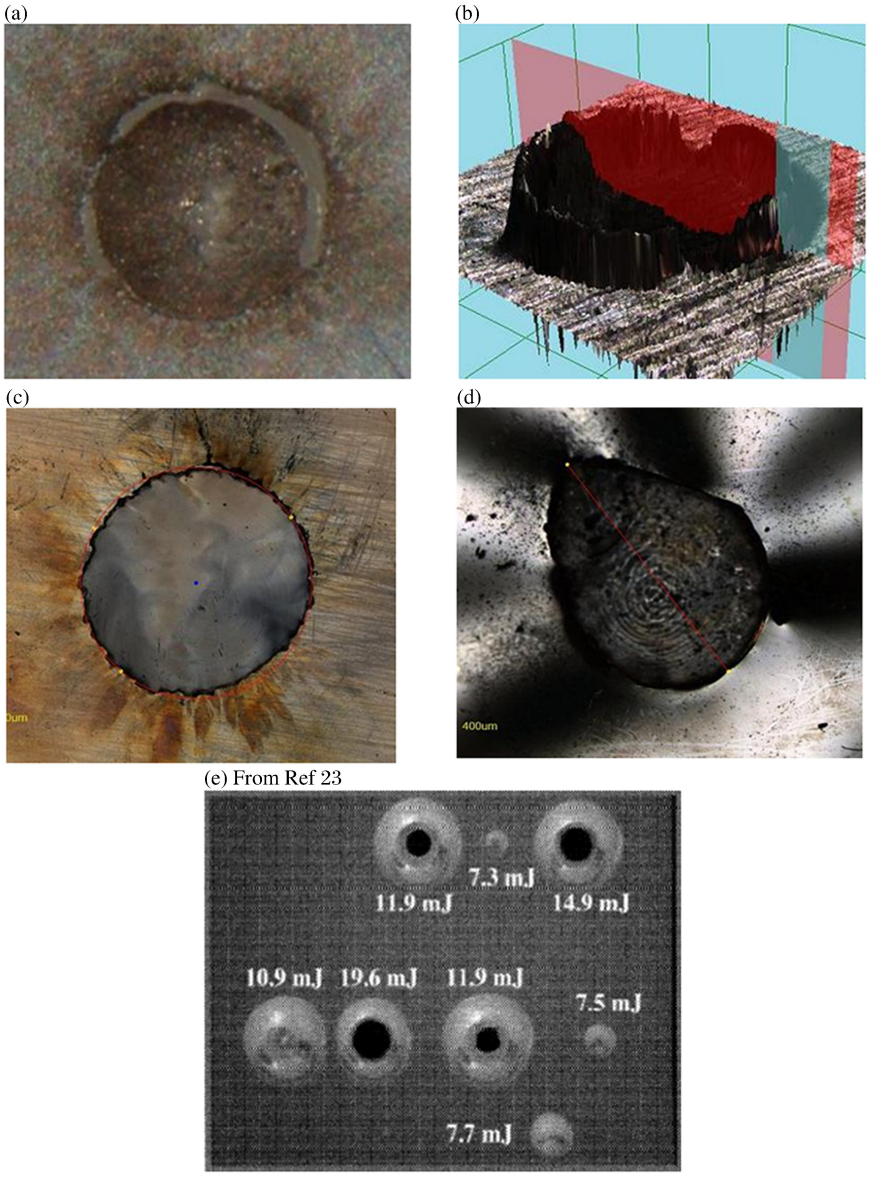


图 7　发射飞片后的飞片靶形貌

Fig. 7　Morphologies of flyer targets after launching

为了进一步分析飞片靶力学特性对激光能量耦合效率的影响，图 8 给出了不同结构飞片靶的激光能量耦合效率 β 随激光能量密度 P 的变化曲线，飞片靶均采用离子束溅射法制备，其中除 1＃号飞片靶外，其余均含有 Cr 附加层。

首先，图 8 说明激光能量的耦合效率随激光能量密度的变化而变化，而且存在一个极大值。起先，随着激光能量密度的升高，激光能量耦合效率逐渐升高，在激光能量密度达到一定值时，激光能量耦合效率达到极大值；然后，随着激光能量密度的升高，激光能量耦合效率开始下降；越过极大值后，即使激光能量继续升高，能够转化为飞片动能的部分也很有限。这一耦合效率极大值与飞片靶的结构、飞片的物理特性以及激光参数等诸多因素相关。

其次，从图 8 可清晰看出，飞片靶中添加 Cr 附加层后，激光能量的耦合效率大幅提高。这是因为 Cr 附加层在提高飞片靶膜基附着力的同时，也使 Al 膜层具有更好的致密性，增强了膜层强度，使等离子体受到较强的约束作用而积累更多的内能，对飞片造成更多的冲量作用，提高了激光能量的耦合效率。因此，金属膜层的强度直接影响激光能量的耦合效率，Cr 附加层可有效提升飞片靶膜层的强度。

因此,在飞片靶的设计和制备过程中,飞片靶的膜基附着力、金属膜层的强度和韧性三者之间需要保持一定的匹配关系,且膜基附着力要分布均匀。

4 8 km/s 高速飞片的实验结果

高质量的飞片不仅应具有良好的完整性和平面性,还应具有较高的速度。从前文的分析可知,能量剖面呈“平顶型”的激光是发射高质量飞片的基础,含有 Cr 附加层的铬/铝复合结构飞片靶则具有较高的激光能量耦合效率,具有发射高速飞片的潜力。因此,本文中利用多种铬/铝复合结构飞片靶进行了高速飞片驱动实验,结果如图 9 所示,其中厚 10 μm 的铬/铝飞片靶是采用电子束蒸发法制备的,其余飞片靶是采用离子束溅射法制备的,Cr 层厚度均为 50 nm。图 9 中还给出了用离子束溅射法制备的不含 Cr 层的 3 μm 铝单膜飞片靶的实验结果。

从图 9 可以看出,飞片靶中增加 Cr 附加层后,飞片速度获得了显著的提升,证明增大飞片靶的膜基附着力和金属膜层的强度能够提升飞片的发射速度。飞片速度随激光能量的增加首先近似线性迅速增大,然后增速变缓,甚至发生速度降低的情形,这与图 8 中激光能量耦合效率的变化一致。图 9 中 10 μm飞片的速度明显高于 9 μm 飞片,这反映飞片靶的力学特性是飞片速度的重要影响因素。

在上述研究的基础上,采用离子束溅射法在石英玻璃基底上制备了结构为基底/Cr/Al 的飞片靶,其中 Cr 层厚 80 nm,Al 膜层厚 3 μm。将直径为 1 mm、厚度为 3 μm 的铝飞片稳定加速至 8 km/s,实验结果如图 10~11 所示。

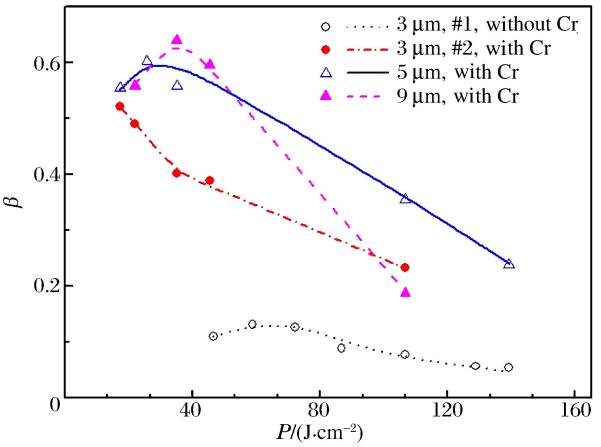


图 8 飞片靶的激光能量耦合效率随激光能量的变化

Fig. 8 Energy coupling efficiency varied with laser fluence

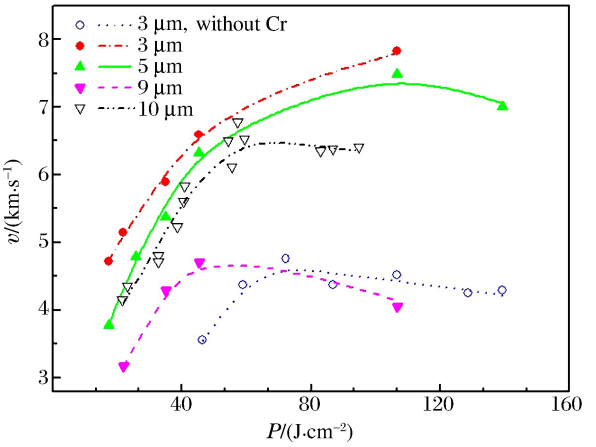


图 9 不同结构飞片靶获得的飞片速度

Fig. 9 Flyer velocities varied with laser fluence for different flyer targets

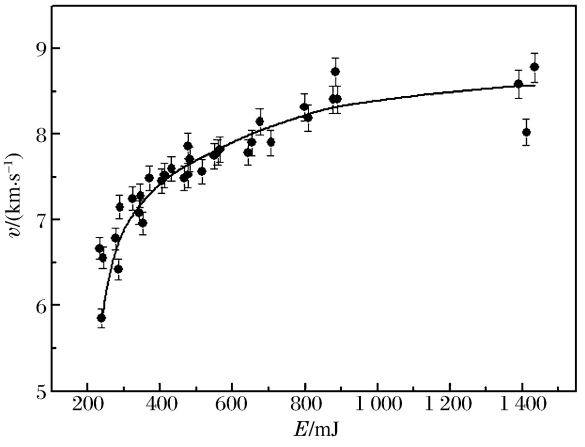


图 10 飞片速度随激光能量的变化

Fig. 10 Flyer velocity varied with laser energy

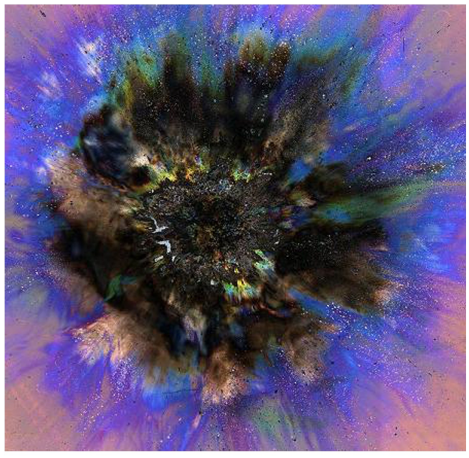


图 11 飞片撞击后验证靶的典型形貌

Fig. 11 Morphology of target after impact

图 10 显示，激光能量在 0～380 mJ 之间时，飞片速度随激光能量的增加而迅速增大，但速度具有一定的分散性；激光能量在 380～800 mJ 之间时，飞片速度随激光能量的增加而缓慢增大，飞片获得了 8 km/s的高发射速度，而且发射稳定性好；激光能量在 800 mJ 以上时，飞片速度基本保持不变，但分散性增大。从图 11 可以清晰看出，飞片撞击验证靶后，验证靶上形成了边缘清晰的撞击坑，说明飞片具有良好的完整性。上述实验结果表明，飞片靶具有良好的力学特性时，利用较低的激光能量就可实现高速飞片的稳定发射。

5　结　论

实验研究了激光驱动飞片技术中激光光束质量和飞片靶力学特性对飞片速度、完整性和平面性的影响，并与前人的研究进行了比较，获得如下认识：

(1)“平顶型”的激光能量剖面更利于产生状态均匀的等离子体，减小飞片内的加速度分布梯度和应力分布梯度，能够保证飞片的完整性；

(2)飞片靶金属膜层的强度、韧性和飞片靶膜基附着力对飞片特性存在明显影响，在飞片靶制备过程中应注意保持膜基附着力、强度和韧性三者的匹配；

(3)在基底和铝膜之间添加金属 Cr 附加层，能够显著提升飞片靶的膜基附着力，同时改善金属膜层的力学特性，利用这种复合结构靶获得了 8 km/s 的高速飞片，而且实验重复性很好。

参考文献：

[1] Lawrence R J, Trott W M. Theoretical analysis of a pulsed-laser-driven hypervelocity flyer launcher[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993,14:439-449.

[2] Trott W M, Setchell R E, Farnsworth Jr A V. Development of laser-driven flyer techniques for equation-of-state studies of microscale materials[C]// AIP Conference Proceedings. 2002,CP620:1347-1350.

[3] Robbins D L, Gehr R J, Harper R W, et al. Laser-driven miniflyer induced gold spall[C]// AIP Conference Proceedings. 2000,CP505:1199-1202.

[4] Gu Z W, Sun C W, Zhao J H, et al. Experimental and numerical research on shock initiation of pentaerythritol tetranitrate by laser driven flyer plates[J]. Journal of Applied Physics, 2004,96(1):344-347.

[5] Roybal R, Tlomak P. Hypervelocity space debris testing[C]// AIAA Defense and Space Programs Conference, 1997,3902.

[6] Sheffield S A, Fisk G A. Particle velocity measurements of laser-induced shock waves using ORVIS[R]. CONF-830874-15, 1984.

[7] Paisley D L, Montoya N I, Stahl D B, et al. Interferometry and high speed photography of laser-driven flyer plates [R]. CONF-8908140-1, 1989.

[8] Tanaka K A, Motohiko H, Norimasa O, et al. Multi-layered flyer accelerated by laser induced shock waves[J]. Physics of Plasmas, 2000,7(2):676-680.

[9] Paisley D L. Laser-driven miniature flyer plates for shock initiation of secondary explosives[R]. LA-UR-89-2723, 1989.

[10] Okada K, Wakabayashi K, Takenaka H, et al. Experimental technique for launching miniature flying plates using laser pulses[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,29:497-502.

[11] Bowden M D, Knowles S L. Optimization of laser-driven flyer velocity using photonic doppler velocimetry[C]// Proceedings of SPIE, 2009,743403:1-11.

[12] Greenaway M W, Proud W G, Field J E, et al. A laser-accelerated flyer system[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,29:317-321.

[13] 王春彦，庄仕明. 激光驱动飞片实验初步研究[C]// 激光的热和力学效应会议论文集. 1994:425-428.

[14] 谷卓伟，孙承纬，刘仓理. 小型激光器驱动飞片的平均速度测量研究[J]. 强激光与粒子束，2001,13(3):309-312.
Gu Zhuo-wei, Sun Cheng-wei, Liu Cang-li. The measurement of the average velocity of flyer driven by minisize la-

ser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001,13(3):309-312.
[15] 谷卓伟,孙承纬,苏小勇.小型激光器驱动飞片冲击引爆炸药实验研究[J].爆炸与冲击,2002,22(1):88-91.
Gu Zhuo-wei, Sun Cheng-wei, Su Xiao-yong. Experimental research on impacting and detonating explosive by mini size laser-driven-flyer[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(1):88-91.
[16] 张文兵,董洪建,龚自正,等.激光驱动微小碎片超高速发射技术研究[J].装备环境工程,2007,4(1):56-61.
Zhang Wen-bing, Dong Hong-jian, Gong Zi-zheng, et al. Hypervelocity micro-debris launched by laser-driven flyer device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007,4(1):56-61.
[17] 曹燕.激光驱动飞片技术的理论和实验研究[D].北京:中国空间技术研究院,2009:35-57.
[18] Frank A M, Trott W M. Stop motion microphotography of laser driven plates[C]// Proceedings of SPIE. 1994, 2273:196-206.
[19] Trott W M, Meeks K D. High-power Nd: Glass laser transmission through optical fibers and its use in acceleration of thin foil targets[J]. Journal of Applied Physics, 1990,67(7):3297-3301.
[20] Paisley D L, Warnes R H, Kopp R A. Laser-driven flat plate impacts to 100 GPa with sub-nanosecond pulse duration and resolution for material property studies[R]. LA-UR-91-3306, 1981.
[21] Greenaway M W, Field J E. The development of a laser-driven flyer system[C]// AIP Conference Proceedings, 2004,CP706:1389-1392.
[22] Farnsworth A V, Trott W M, Setchell R E. A computational study of laser driven flyer plates[C]// AIP Conference Proceedings, 2001,CP620:1355-1358.
[23] Trott W M, Setchell R E, Farnsworth A V. Investigation of the effects of target material strength on the efficiency of acceleration of thick laser-driven flyers[C]// AIP Conference Proceedings, 2000,CP505:1203-1206.

Experimental research on laser-driven flyer plates up to 8 km/s*

Niu Jin-chao[1], Gong Zi-zheng[1], Cao Yan[1], Dai Fu[2], Yang Ji-yun[1], Li Yu[1]
(1. *Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing* 100094, *China*;
2. *School of Applied Physics and Materials, Wuyi University, Jiangmen* 529020, *Guangdong, China*)

Abstract: Aimed to the laser-driven flyer plate technique, laser-driven flyer experiments were conducted by using single pulsed laser beams at 1 064 nm, of 15 ns duration and up to 2 J energy to explore the influences of the laser energy profiles as well as the mechanical properties of the metal foils on the velocities and integrities of the flyers. The experimental results indicate that the laser beams with "top hat" energy profiles are key and important base to launch the flyers with good qualities. There exists a good matching among the adhesion of the foil to the glass substrate, the shear strength and tenacity of the foil, for obtaining a high-velocity and good-integrity flyer. By using the combined flyer target with a thin layer of chromium sandwiched between the aluminum foil and the glass substrate, the aluminum flyers with 1 mm in diameter and 3 μm in thickness were accelerated to 8 km/s, and the experimental repeatabilities were good.

Key words: mechanics of explosion; mechanical properties of metal foil; laser energy profile; laser-driven flyer plates; velocity and integrity of flyer

* Received 28 August 2012; Revised 27 March 2013
Supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2010CB731600)
Corresponding author: Gong Zi-zheng, gongzz@263.net

(责任编辑 张凌云)