

神光 III 原型装置激光驱动高速飞片实验研究进展

税敏 储根柏 席涛 赵永强 范伟 何卫华 单连强 朱斌 辛建婷 谷渝秋

Experimental progress of laser-driven flyers at the SG-III prototype laser facility

Shui Min Chu Gen-Bai Xi Tao Zhao Yong-Qiang Fan Wei He Wei-Hua Shan Lian-Qiang Zhu Bin Xin Jian-Ting Gu Yu-Qiu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 064703 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.064703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.064703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

爆轰波对碰驱动平面锡飞层的动力学及动载行为特征研究

Loading characteristics and dynamic behaviors of the plane tin flying layer driven by detonation collision

物理学报.2016, 65(2): 024701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024701>

一种径向基函数虚拟网格法数值模拟复杂边界流动

Numerical simulation of complex immersed boundary flow by a radial basis function ghost cell method

物理学报.2017, 66(4): 044704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044704>

双等离子体团相互作用的磁流体力学模拟

Simulations for two colliding plasma bubbles embedded into an external magnetic field

物理学报.2017, 66(7): 075202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.075202>

神光 III 原型装置激光驱动高速飞片实验研究进展

Experimental progress of laser-driven flyers at the SG-III prototype laser facility

物理学报.2017, 66(6): 064703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.064703>

冲击波作用下 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ 铁电陶瓷去极化后电阻率动态特性

Dynamic resistivity of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ depolarized ferroelectric under shock wave compression

物理学报.2017, 66(4): 047201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.047201>

神光III原型装置激光驱动高速飞片实验研究进展*

税敏[†] 储根柏 席涛 赵永强 范伟 何卫华 单连强 朱斌
辛建婷[‡] 谷渝秋

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

(2016年10月8日收到; 2016年11月4日收到修改稿)

激光驱动飞片技术具有产生的飞片速度高、成本低、装置简单等传统动高压加载技术无法取代的优点. 随着激光技术的发展, 利用高功率激光脉冲发射高速飞片受到越来越多的关注. 本文介绍了在神光III原型装置上开展的激光驱动高速飞片实验研究. 利用纳秒短脉冲和纳秒整形长脉冲, 设计并开展了几种不同方式加速飞片的实验研究, 成功获得了 $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的固态铝飞片和 $50 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 超高速度的复合金属飞片, 而且飞片具有良好的平面性和完整性. 对实验的物理设计、技术途径和数据结果进行了比较全面的分析, 为进一步开展激光驱动高速飞片相关实验研究提供了思路, 同时也证明了神光III原型装置在激光驱动高速飞片实验研究方面有着巨大的潜力.

关键词: 冲击波, 激光驱动飞片, 动高压物理, 等离子体

PACS: 47.40.Nm, 47.80.Cb, 47.85.Dh, 52.38.Mf

DOI: 10.7498/aps.66.064703

1 引言

激光驱动飞片通常有两种实验装置^[1]: 一种是激光照射在透明窗口材料和飞片靶的界面位置, 利用激光烧蚀产生的高温高压推动飞片飞行; 另一种是激光直接烧蚀飞片前表面(无约束), 在飞片靶内产生冲击波, 驱动烧蚀后的剩余靶片飞行成为高速飞片. 由于透明窗口材料损伤阈值较低 ($< 10^{11} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$), 在本文所涉及的激光强度 (10^{12} — $10^{14} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$) 范围内, 强激光照射会将窗口材料离化成等离子体, 从而阻挡后续激光通过窗口, 因此只能采用第二种方式获得更高的飞片速度.

激光驱动飞片加载技术是一种重要的动高压加载技术, 与激光直接加载相比, 飞片加载没有附带的X射线和超热电子预热, 可以在样品内产生干净的平面冲击波. 激光驱动飞片加载可以在实验室产生数百 GPa 甚至 TPa 量级的冲击压力^[2], 利用

这项技术可开展冲击波物理实验, 与传统的飞片驱动方式, 如轻气炮^[3,4]、爆轰驱动^[5,6]以及电磁驱动^[7]等相比, 激光驱动飞片加速动力因素较小, 设备可以更紧凑, 实验的破坏性比较低, 没有附带损害, 可以有效降低实验成本, 也可获得更高的飞片速度. 此外, 激光驱动飞片加载的加速过程更短, 可以同时开展飞片的加速和撞击过程测量; 实验的时间间隔短, 可重复性高; 更重要的是可以开展小样品、有毒、放射性和昂贵材料的相关实验研究. 正因如此, 激光驱动飞片技术在很多方面都具有重要的应用: 超高压条件下材料的物态方程(EOS)研究, 尤其是EOS的绝对测量^[8]、高应变率条件下材料动态响应的实验研究^[9]、航空领域空间飞行器防护研究^[10]、炸药快速起爆技术研究^[11].

本文对近两年在神光III原型装置上开展的激光驱动高速飞片实验研究做了比较详细的介绍, 对实验原理、实验靶型、技术途径和实验结果进行了比较全面和细致的分析.

* 国家自然科学基金(批准号: 11504349)和中国工程物理研究院重点实验室基金(批准号: 9140C680305140C68289)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: shuimin123@163.com

[‡] 通信作者. E-mail: jane_xjt@126.com

2 激光驱动高速飞片实验研究

神光 III 原型装置可提供四束 3 ns 方波脉冲, 波长 351 nm, 单束激光能量可达 800 J; 另外还具有 10 ns 任意波形脉冲整形能力, 单束能量小于 500 J. 对于激光驱动飞片, 除了高的激光功率密度, 激光强度空间分布的均匀性也至关重要. 如果空间分布不均匀, 则飞片各部分受力就不均匀, 从而产生横向应力差, 造成飞片的破碎解体^[12]. 原型装置具有两种尺寸(直径 2 mm 和 0.5 mm)的连续相位板(CPP), 可以对激光光束进行空间上的匀滑, 产生空间强度均匀分布的激光, 使原型装置具备了飞片发射的必要条件.

基于原型装置的激光条件, 我们发展了三种激光驱动飞片技术, 如图 1 所示. 整形激光和短脉冲激光直接烧蚀, 产生压缩波或者冲击波加速飞片, 属于直接驱动方式. 激光烧蚀气库膜产生低密度等离子体射流碰撞加速飞片, 属于间接驱动方式. 下面分别对这三种飞片实验进行介绍.

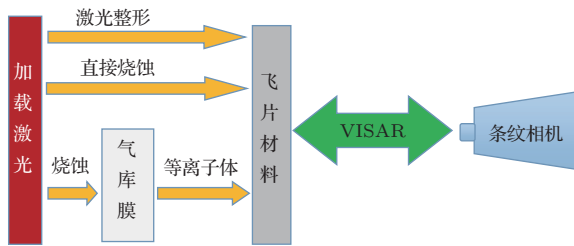


图 1 (网刊彩色) 激光驱动飞片的三种方式

Fig. 1. (color online) Schematic view of the means of laser-driven flyers.

2.1 整形斜波脉冲加速飞片实验研究

整形激光驱动飞片的原理如图 2 所示, 整形激光脉冲烧蚀飞片材料前表面, 在飞片内部产生一系列的压缩波, 压缩波在飞片内部来回反射加速飞片飞行. 线成像速度干涉仪(VISAR)^[13]的探针光(波长 532 nm)穿过透明窗口照射到飞片自由面, 实现对飞片加速和撞击的全过程测量.

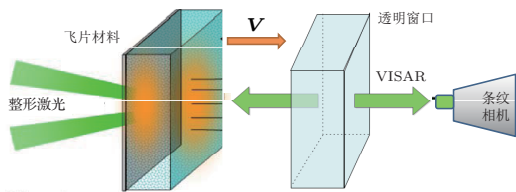


图 2 (网刊彩色) 整形激光脉冲直接驱动飞片示意图

Fig. 2. (color online) Schematic view of laser-driven flyer by temporally ramped pulse.

基于凝聚态物质等熵理论和原型激光的烧蚀压定标率^[14], 针对 50 μm 厚度(L)的铝(Al)飞片, 进行了激光波形设计. 激光强度基本按照指数形式变化, 如方程(1)所示:

$$I_L = 4.16[A/(2Z)]^{-1/2} \lambda_L \rho_0^{3/2} c_0^3 \gamma^{-3/2} \times 10^{-3} [(1 - t/t_0)^{-2\gamma/(\gamma+1)} - 1]^{3/2}, \quad (1)$$

式中 I_L 的单位是 $\text{TW} \cdot \text{cm}^{-2}$, A 表示原子质量数, Z 为原子序数, λ_L 为激光波长, 激光脉宽 t 为 7 ns, 冲击波形成时间 t_0 为 9 ns, 铝常压声速 c_0 为 $5.328 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 密度 ρ_0 为 $2.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 等熵方程系数 γ 取 3.505. 对于该波形设计, 样品厚度 L 满足 $L \geq c_0 t_0$, 因此, 理想状态下, 在 t_0 时间内, 激光直接烧蚀在飞片内部产生的一系列的压缩波并不能相互追赶叠加而形成冲击波, 从而以准等熵的方式加速飞片缓慢飞行, 这样可以降低飞片内部的熵增以及温升, 使飞片保持固体状态, 这对状态方程的绝对测量具有重要意义^[15]. 飞片靶结构如图 3 所示, 飞片靶由 CH 烧蚀层(1.8 μm)、 SiO_2 (0.4 μm)隔热层和 Al 飞片层组成. 烧蚀层可以适当提高激光吸收效率, 而隔热层的目的是为了降低激光烧蚀热传导对飞片的加热^[1], 当然, 这在激光强度很高的情况下可能效果并不明显.

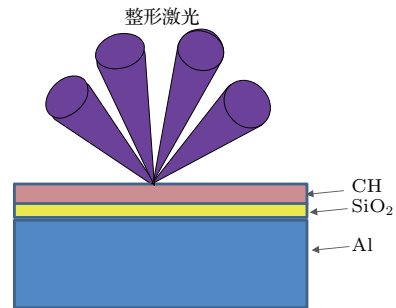


图 3 (网刊彩色) 整形激光驱动飞片靶结构示意图

Fig. 3. (color online) Schematic view of the flyer target driven by temporally ramped pulse.

实验中激光器实际输出的激光波形如图 4 中黑色曲线所示, 波形宽度约 10 ns, 包括上升沿和下降沿, 上升沿总体上与设计的波形符合较好, 但在峰值段还是有一定偏差. 激光总能量 1220 J, 焦斑直径 2 mm, 峰值功率密度 $1.9 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, VISAR 探针光脉冲宽度 14 ns, 时间上落后主激光 6 ns. 实验结果如图 5 所示, 可以看到 VISAR 条纹光滑连续, 而且有多次弯曲, 说明飞片被多次加速, 这与图 5(b) 中飞片速度曲线一致. 由于实验条件的限制和靶设计的原因, 目前还没有开展飞片碰

撞实验, 因此无法通过样品内的冲击波形态来反推飞片的平面性, 而只能利用线VISAR测量飞片自由面速度剖面, 通过线VISAR条纹移动的时间分散性来考察飞片启动和飞行过程中的一维平面性. 从图5可以看出, 飞片启动时刻时间分散性小于0.04 ns, 远小于飞片启动时间(约9.7 ns, 比值0.4%), 二次加速和三次加速时刻的时间分散性分别约为0.04 ns和0.06 ns, 表明不仅飞片启动时刻平面性好, 而且飞行中姿态保持也较好, 表明CPP束匀滑确实有效地实现了激光光束的均匀化.

利用“反积分”方法^[16], 可以获得飞片内部的压力分布, 如图6所示, 可以清楚地看到压缩波在飞片内部的传播和压缩波在自由面的多次反射. 自由面反射的稀疏波和加载面传入的压缩波相互作用, 使飞片内部的波系变得很复杂. 9.6 ns左右, 飞片内部形成了冲击波, 这和我们的波形设计基本一致($t_0 = 9$ ns), 不足1 ns的偏差主要是因为实际波形和设计波形在高功率密度部分有比较明显的偏离; 另外, 由于烧蚀层和隔热层的厚度远小于飞片厚度, 因此在波形设计时并没有将其考虑在内, 但

实际上肯定会对结果有一些影响. 强冲击波(峰值压力达到100 GPa, 接近铝冲击熔化压强120 GPa)在自由面的反射造成了自由面的稀疏破碎, 导致自由面的反射率急剧下降, VISAR条纹消失. 实验结果表明, 对于厚度比较大的飞片, 如果要获得更高的飞片速度, 则需要在波形设计中增大 t_0 , 保证在VISAR探测时间内飞片内部不形成冲击波, 确保飞片一直被弱压缩波作用而处于固体状态.

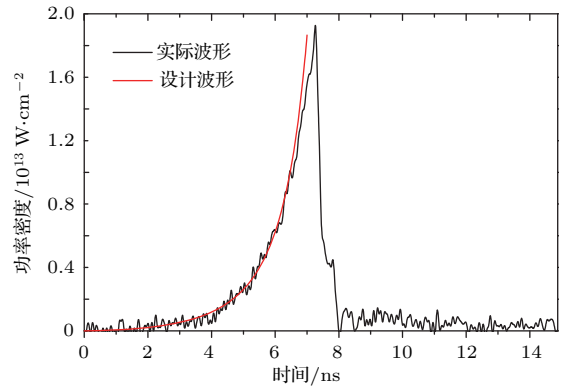


图4 (网刊彩色) 整形激光脉冲波形图

Fig. 4. (color online) Profile of temporally ramped pulse.

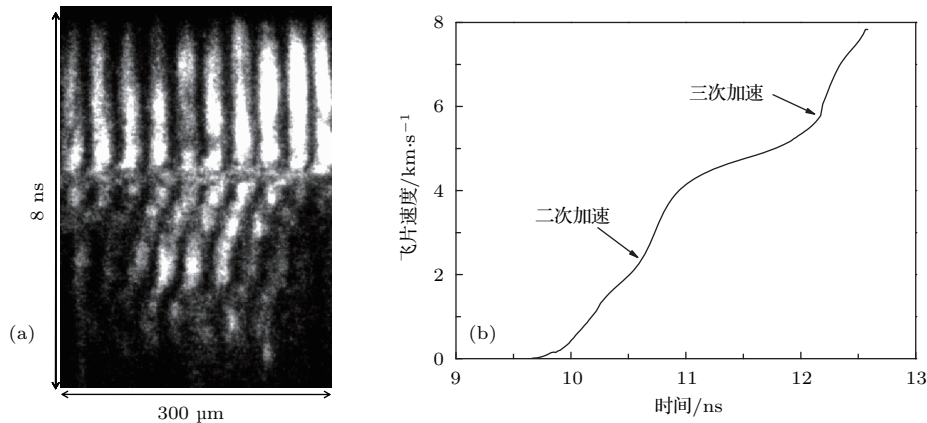


图5 整形激光驱动飞片实验结果 (a) VISAR原始图像; (b) 飞片速度曲线

Fig. 5. Experimental results of laser-driven flyer by temporally ramped pulse: (a) Raw VISAR image; (b) flyer velocity curve.

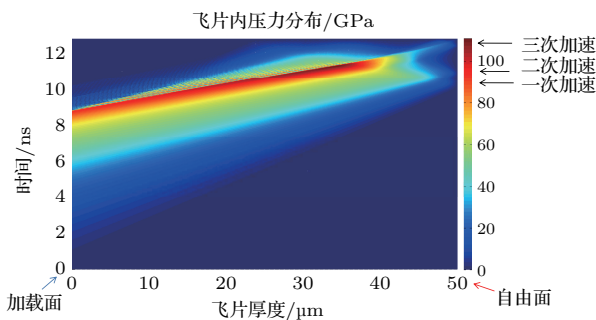


图6 (网刊彩色) 飞片内压力分布

Fig. 6. (color online) Stress distribution within the flyer.

总体而言, 凝聚态物质等熵线理论是可靠的, 经过合理的设计和优化, 利用整形激光脉冲可以实现高速固态飞片发射. 但这种方式的缺点是对波形控制能力要求较高, 在今后的实验中可以考虑先利用黑腔将整形脉冲转化为X射线, 再用X射线烧蚀驱动飞片, 利用黑腔的匀滑能力适当降低对波形的要求.

2.2 等离子体射流碰撞加速飞片实验研究

等离子体射流碰撞加速飞片的原理如图7所

示,短脉冲激光烧蚀气库膜并在其内部形成强冲击波,当冲击波到达气库膜后表面时,气库膜被离化成低密度等离子体并向下游一定距离的飞片样品处卸载,等离子体与样品不断碰撞并将自身动能转化为飞片的动能,推动飞片在第二段真空间隙中飞行[17,18].利用VISAR穿过透明窗口可以实现对飞片自由面速度的连续测量.如果飞片飞行距离足够长,将与透明窗口发生碰撞并在窗口内产生冲击波,因此,该设计可以同时开展飞片发射和飞片撞击透明材料实验研究.

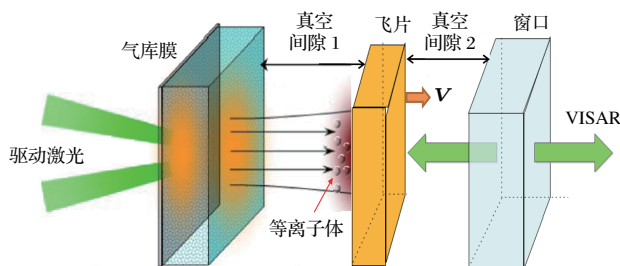


图7 (网刊彩色) 等离子体射流碰撞加速飞片原理示意图
Fig. 7. (color online) Schematic view of flyer launching by plasma impact.

开展了等离子体射流碰撞加速铝飞片和钽飞片实验,分别如图8和图9所示,其中铝飞片的结果已在文献[19]中进行了描述.实验采用原型装置上的4束激光,脉冲波形为3 ns方波,激光束经过直径2 mm的CPP后聚焦到气库膜上,气库膜厚度150—200 μm,是一种由CH塑料掺杂3%溴原子组成的薄膜.线VISAR探测时间14 ns,速度测量范围2—15 km/s.不同发次的参数统计分别如表1[19]和表2所列.根据分析比较发现,在我们的测量时间内(约10 ns),飞片平面性变化很小,因此,为了简洁,我们在表1和表2中只列出了初始时间分散性,也就是飞片启动时刻的平面性.从图8和图9可见,飞片速度随着时间的增加缓慢上升,表明等离子体射流碰撞在飞片内部产生了压缩波,以准等熵的方式加速飞片飞行.这与整形激光脉冲加速飞片类似,只是两者产生压缩波的方式不同.通过改变激光能量、飞片厚度、气库膜厚度等参数条件,可以改变飞片的加速度和速度等参数,实现对飞片飞行路径和姿态的控制,从而改变飞片加载的应变率.可以看到,在其他参数不变的情况下,随着激光能量的增加,飞片速度上升沿越短,加速度越高.另外,可以看到飞片速度曲线中存在平台区域,如图8中004发和图9中130发结果所示.类似2.1节中的分析,我们获得了图9中130发钽飞片内部的压力等高线图,如图10所示.可以看到,由于

飞片比较薄,压缩波在自由面反射产生一束稀疏波,该稀疏波到达飞片前表面(加载面)又被反射成压缩波,该压缩波到达自由面对飞片进行了二次加速.

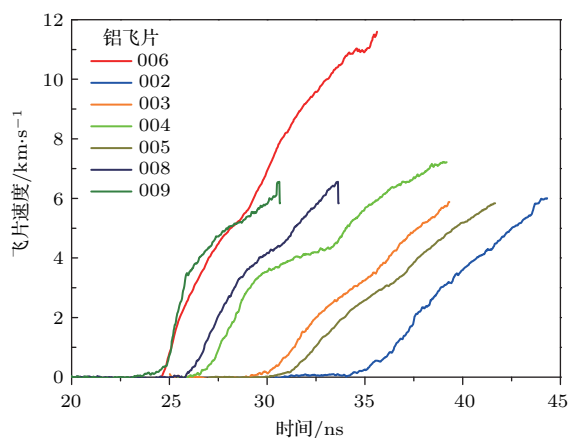


图8 (网刊彩色) 等离子体射流碰撞加速铝飞片不同发次实验结果

Fig. 8. (color online) Experimental results of aluminum flyers launching by plasma impact.

表1 等离子体射流碰撞加速铝飞片参数统计
Table 1. Parameters of aluminum flyers launching by plasma impact.

发次号	能量/J	飞片厚度 /μm	飞片速度 /km·s ⁻¹	直径800 μm内 初始时间分散性/ns
008	1603	26	6.5	0.6
004	1769	26	7.2	0.3
006	2288	26	11.5	0.4
005	1734	35	5.8	0.5
003	1946	35	5.9	0.3
002	1960	35	6.0	0.5
009	2142	35	6.2	0.3

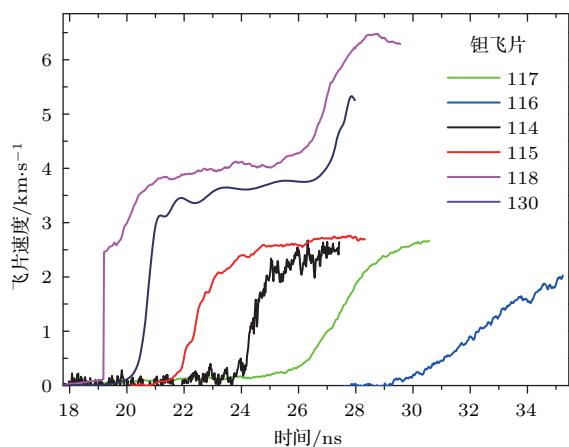


图9 (网刊彩色) 等离子体射流碰撞加速钽飞片实验结果
Fig. 9. (color online) Experimental results of tantalum flyers launching by plasma impact.

表2 等离子体射流碰撞加速钽飞片参数统计

Table 2. Parameters of tantalum flyers launching by plasma impact.

发次号	能量/J	飞片厚度/ μm	飞片速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	直径 400 μm 内 初始时间分散性/ns
114	1424	20	2.6	0.3
115	1598	20	2.7	0.9
116	1064	20	2.0	0.8
117	1925	20	2.7	1.3
118	2697	20	6.5	0.7
130	2645	20	5.3	0.9

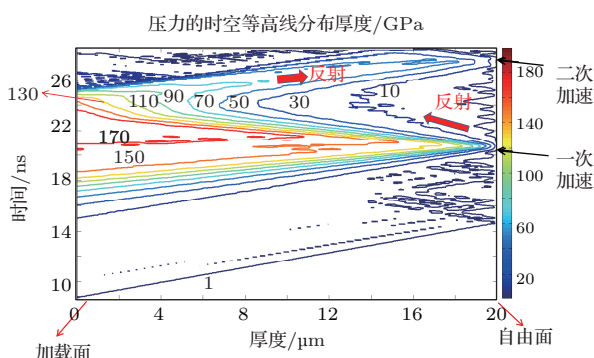


图10 (网刊彩色) 钽飞片内压力等高线图, 图中数字表示等高线对应的压力(单位 GPa)

Fig. 10. (color online) Contour lines within the tantalum flyer. The numbers in the figure denote the corresponding pressure (GPa).

从表1和表2结果可以看出, 铝飞片初始时刻(飞片启动)时间分散性较小(与启动时刻的比值约2%), 而钽飞片启动时刻时间分散性较大(与启动时刻的比值约5%), 表明铝飞片的平面性更好. 主要原因是钽飞片实验的气库膜制作工艺问题, 由于气库膜本身平面性不好, 激光烧蚀产生的等离子体射流在空间上分布不均匀, 因此等离子体碰撞在飞片内部产生的压缩波就不均匀, 从而导致钽飞片的平面性不好. 虽然钽飞片的峰值速度比铝飞片低, 但钽的密度是铝的6倍, 因此钽飞片具有更高的动能.

文献[20]成功开展了等离子体加速铝飞片及碰撞LiF窗口的实验研究, 其VISAR探测时间达到了50 ns. 而我们的VISAR系统探测时间只有14 ns, 由于等离子体飞行和飞片加速都需要一定的时间, 因此要同时开展飞片加速和飞片撞击窗口的实验难度很大, 两段真空间隙都必须设计得很小, 既限制了飞片速度的提高, 也对制靶精度提出了更高的要求.

从上面的实验分析来看, 通过合理的靶设计, 等离子体射流碰撞可以以准等熵的方式加速飞片,

从而大大降低飞片的残余温度[20], 减小状态方程测量的误差. 此外, 与激光直接烧蚀加速飞片相比, 等离子体射流驱动的方式对激光波形要求低, 而且可以大大降低激光打靶产生的X射线和超热电子对飞片的预热. 但是, 激光烧蚀气库膜这种方式也存在比较严重的问题, 那就是如何进一步提高飞片的速度而不在飞片内部形成冲击波. 对于单层气库膜, 这很难做到, 理论上可以设计多层密度梯度气库膜[21], 并提高激光脉冲宽度和能量来提高飞片速度, 但这对激光器和制靶工艺的要求就会变得非常高. 相比而言, 整形激光脉冲直接驱动更容易获得高的飞片速度[22].

2.3 短脉冲激光烧蚀加速超高速飞片实验研究

短脉冲激光烧蚀加速高速飞片的实验原理如图11所示, 利用原型装置的3 ns方波脉冲, 直接烧蚀金属飞片的前表面, 在金属飞片内部形成冲击波, 当冲击波到达飞片自由面时, 驱动未烧蚀部分飞片飞出. 飞片飞行一段时间后, 与透明窗口碰撞并减速. 诊断方式通常有两种: 一种是利用VISAR穿过透明窗口同时测量飞片自由面速度和飞片撞击后窗口内的冲击波速度[23,24], 也可以通过飞片撞击台阶窗口的时间差获得飞片的速度[25]; 另一种是用辐射高温计(SOP)接收飞片自由面的冲击波卸载发光和飞片撞击(台阶)窗口的可见光信号[26-28], 利用飞行时间获得飞片的平均速度和一维平面性.

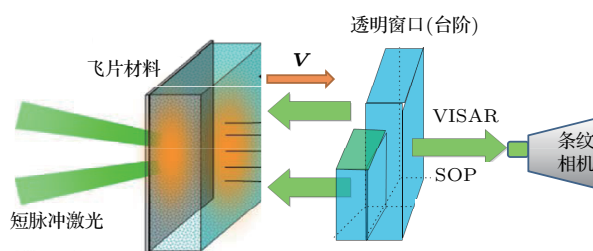


图11 (网刊彩色) 短脉冲激光直接烧蚀驱动高速飞片示意图

Fig. 11. (color online) Schematic view of flyer launching by direct short laser ablation.

由于原型装置上VISAR和SOP系统不能同时使用, 因此我们先后开展了利用VISAR或SOP进行诊断的短脉冲烧蚀加速飞片实验. 利用VISAR进行诊断的实验结果如图12所示, 文献[24]对此进行了比较详细的讨论, 这里只做简单说明. 实验采用上四束激光加载, 总能量2698 J, 功率密度

$2.7 \times 10^{13} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. 图 12 中 VISAR 条纹的强弱变化和弯曲移动, 反映了飞片的启动、飞行和碰撞全过程. 飞片启动时刻平面性很好(时间分散性仅 0.06 ns), 经过 4.7 ns 后, 飞片撞击石英窗口并减速, 飞片撞击在石英窗口中产生了冲击波, 由于冲击波压力足够高, 使波阵面处发生了相变, 导致波阵面处反射率升高, 从而可以反射 VISAR 探针光并实现冲击波速度的测量. 波阵面启动时刻的时间分散性为 0.08 ns(与启动时刻的比值约 0.9%), 表明飞片撞击产生的冲击波平面性好, 间接表明撞击时刻飞片的平面性较好、飞片飞行过程中姿态保持较好. 石英窗口中的冲击波速度曲线如图 13 所示, 可以比较明显地看到冲击波加速、追赶和减速三个过程, 而这并不能用通常的单层固定密度的飞片撞击来解释. 由于我们的飞片厚度达到 $50 \mu\text{m}$, 结合该冲击波速度曲线特征, 我们认为飞片可能已经发生了分层或层裂, 不再是一个固定密度的完整飞片. 这也表明, 短脉冲驱动飞片厚度存在阈值, 激光功率密度和飞片厚度需要匹配, 否则飞片可能发生层裂或者解体, 破坏飞片的完整性, 影响实验结果分析和判断.

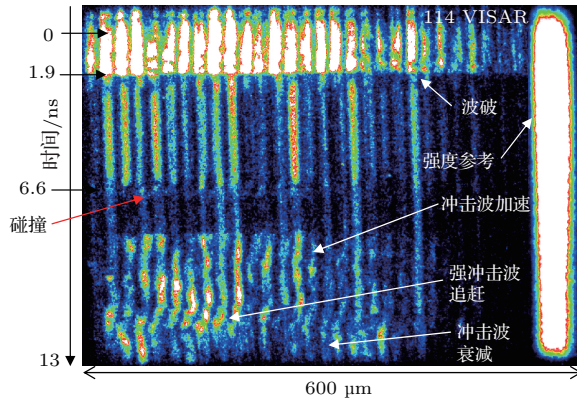


图 12 (网刊彩色) 短脉冲激光直接烧蚀驱动高速铝飞片示意图

Fig. 12. (color online) Schematic view of aluminum flyer launching by direct short laser ablation.

利用 SOP 进行测量的飞片实验中, 飞片材料是在 $50 \mu\text{m}$ 厚度的聚酰亚胺 (PI) 上面蒸镀 $2-3 \mu\text{m}$ 厚的铜 (Cu) 膜或者钽 (Ta) 膜, 设计多层膜的主要目的是通过阻抗匹配提高冲击波压力从而提高飞片速度. 实验结果如图 14 所示^[19], 图 14 (a) 是飞片撞击平面氟化锂 (LiF) 窗口的实验结果, 可以清楚地看到冲击波波破和飞片撞击的发光信号, SOP 扫描时间宽度 10.3 ns . 根据两个信号的时间差, 可得飞片的平均速度为 $42 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. 而且撞击时刻发光信号在直径约 $400 \mu\text{m}$ 的区域内时间分散性

仅有 0.02 ns (与发光时刻比值约 0.3%), 表明飞片具有很好的平面性. 同时, 飞片撞击发光强度在空间上分布均匀, 强度上升沿陡峭 (0.3 ns), 说明飞片碰撞时仍具有很高的密度和良好的完整性. 此外, 我们注意到撞击信号的两侧有些弯曲, 这是由于等离子体逃逸和边侧稀疏导致的边缘滞后^[29]. 图 14 (b) 是飞片撞击 LiF 台阶窗口的实验结果, 与图 14 (a) 的结果类似, 只不过飞片先后撞击台阶窗口和基底, 飞片速度可以根据台阶高度得到, 从发光强度来看, 飞片在到达台阶窗口时仍处于加速过程中.

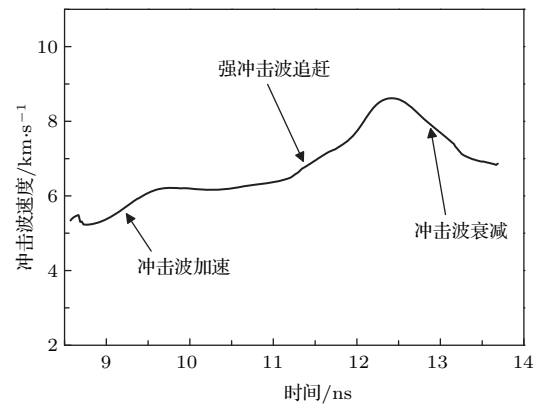


图 13 短脉冲激光直接烧蚀驱动高速飞片示意图

Fig. 13. Schematic view of flyer launching by direct short laser ablation.

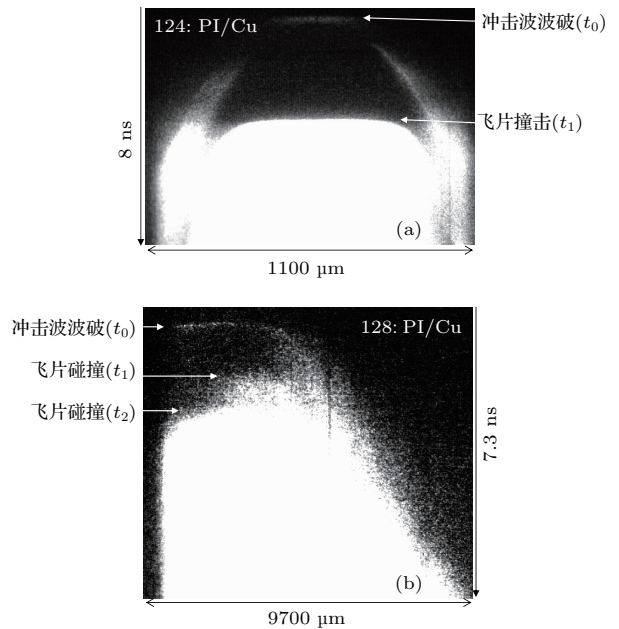


图 14 短脉冲激光直接烧蚀驱动多层 PI-Cu 飞片 SOP 实验结果 (a) 124 发, 飞片撞击平面窗口; (b) 128 发, 飞片撞击台阶窗口

Fig. 14. SOP results of multi-layered PI-Cu flyer launching by direct short laser ablation: (a) Shot 124, flyer impact on a flat glass window; (b) shot 128, flyer impact on a stepped glass window.

整个物理过程和实验结果都与流体力学计算结果符合得很好^[19],进一步证明了我们的物理设计是正确的。

除了多层Cu飞片实验,我们还开展了多层Ta飞片、单层Al飞片实验,实验结果如表3所列^[19]。可以看到,多层飞片的平面性要好于单层飞片,而且激光能量转换效率也更高。实验最高获得了 $55 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的超高飞片速度,而且飞片具有很好的平面性和完整性,为今后在原型装置上开展飞片加载相关实验奠定了良好的基础。

与VISAR诊断实验相比,利用SOP诊断的优点是测量时间可以很长,而且理论上没有测速限制,缺点是不能获得飞片飞行过程中的姿态和飞片撞击以后样品内部的信息。

表3 短脉冲烧蚀加速飞片实验结果统计

Table 3. Results of flyer launching by short-laser ablation.

发次号	能量/J	飞片参数 / μm	平均飞片速度 / $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	直径400 μm 内 时间分散性/ns
120	1994	Al20	50	0.20
122	2437	PI50/Ta2	45	0.07
124	2864	PI50/Cu3	42	0.02
125	2801	PI50/Cu3	42	0.08
128	1569	PI50/Cu2	47	0.04/0.12
126	2318	PI50/Cu2	50	0.07
127	2190	PI50/Cu2	55	0.04/0.06

最后,我们来讨论激光发射发片的能量转换效率。根据 $\eta = E_f/E_0$ (E_0 是驱动激光能量, E_f 是飞片动能),有 $E_f = \rho \times \pi D^2 \times H \times V^2/8$,其中, ρ 表示飞片密度,计算中暂时忽略密度的变化; D 表示飞片直径; H 代表飞片厚度; V 表示飞片速度。经过简单的计算,分别得到整形激光直接加速Al飞片转换效率1.1%,短脉冲烧蚀加速复合PI-Cu飞片转换效率1.0%,等离子体射流加速Al飞片转换效率0.6%。这说明激光直接加速飞片要比转换为等离子体碰撞的间接加速方式效率高,因为激光烧蚀气库膜产生等离子体射流的过程中必然存在一定的能量损耗。而压缩波加速的方式比冲击波加速的方式效率高,这是因为冲击波作用过程的熵增大,有更多的能量转换为飞片的内能。

3 结 论

基于神光III原型激光装置,开展了三种不同方式的激光驱动飞片实验研究。对于整形长脉冲激

光直接烧蚀加速飞片,可以根据实验需要进行波形设计,控制飞片的飞行路径和姿态,是一种获得固态飞片的有效途径。这种方式效率高,但是对激光整形能力要求较高,而且需要考虑激光直接作用对飞片的预热。采用激光烧蚀气库膜产生等离子体碰撞的方式也可以以准等熵加速固态飞片,虽然其本质也是压缩波作用,但由于避免了激光直接作用,大大降低了预热的风险,而且这种方式对激光的波形要求低。缺点是对于单一气库结构很难实现超高速飞片发射,目前仅实现 $11 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的飞片发射,而复杂结构的气库结构设计又大大增加了靶加工制作的难度。短脉冲激光直接烧蚀加速可以获得超高速度的飞片,目前已获得平均速度达 $50 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的复合铜飞片,可以直接开展飞片加载产生冲击波实验研究。但是强冲击波作用必然导致飞片内部严重的熵增和温升,如果要进行状态方程研究,必然要考虑飞片的残余温度,否则将会引入很大的误差。总体而言,采用何种方式来驱动飞片,取决于自身的实验条件和研究目的。在今后的实验研究中,对于飞片温度的测量是需要重点考虑的问题。

本文中所有实验均得到了神光III激光装置运行人员、靶制备部门及实验物理部诊断人员的大力协助,在此表示衷心的感谢!

参考文献

- [1] Wu L Z, Shen R Q, Xu J, Ye Y H, Hu Y 2010 *Acta Armamentar II* **31** 219 (in Chinese) [吴立志, 沈瑞琪, 徐姣, 叶迎华, 胡艳 2010 兵工学报 **31** 219]
- [2] Cauble R, Phillion D W, Hoover T J, Holmes N C, Kilkenny J D, Lee R W 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 2102
- [3] Jones A H, Isbell W M, Maiden C J 1966 *J. Appl. Phys.* **37** 3493
- [4] Glushak B L, Zhakov A P, Zhernokletov M V, Ternovoi V Y, Filimonov A S, Fortov V E 1989 *Sov. Phys. JETP* **69** 739
- [5] Stilp A J 1987 *Int. J. Impact Eng.* **5** 613
- [6] Chhabildas L C, Dunn J E, Reinhart W D, Miller J M 1993 *J. Impact Eng.* **14** 121
- [7] Hawke R S, Duerre D E, Huebel J G, Klapper H, Steinberg D J 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 2734
- [8] Swift D C, Niemczura J G, Paisley D L, Johnson R P, Luo S N, Tierney IV T E 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 093907
- [9] Paisley D L, Luo S N, Greenfield S R, Koskelo A C 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 023902
- [10] Gu Z W, Sun C W, Luo L J 2002 *Infrared Laser Eng.* **31** 428 (in Chinese) [谷卓伟, 孙承纬, 罗利军 2002 红外与激光工程 **31** 428]

- [11] Paisley D L, Montoya N I, Stahl D B 1990 *19th International Congress on High-Speed Photography and Photonics* Cambridge, United Kingdom, September 16–21, 1990 p760
- [12] Niu J C, Gong Z Z, Cao Y, Dai F, Yang J Y, Li Y 2014 *Explosive and Shock Waves* **34** 129 (in Chinese) [牛锦超, 龚自正, 曹燕, 代福, 杨继运, 李宇 2014 爆炸与冲击 **34** 129]
- [13] Barker L M, Hollenback R E 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 4669
- [14] Xue Q X, Wang Z B, Jiang S E, Wang F, Ye X S, Liu J R 2014 *Phys. Plasmas* **21** 072709
- [15] Jing F Q 1999 *Guide of Experimental Equation of State* p204 (in Chinese) [经福谦 1999 实验物态方程导引 (北京: 科学出版社) 第204页]
- [16] Hayes D B, Hall C A, Asay J R, Knudson M D 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 2331
- [17] Edwards J, Lorenz K T, Remington B A, Pollaine S, Colvin J, Braun D, Lasinski B F, Reisman D, McNaney J M, Greenough J A, Wallace R, Louis H, Kalantar D 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 075002
- [18] Shan L Q, Gao Y L, Xin J T, Wang F, Peng X S, Xu T, Zhou W M, Zhao Z Q, Cao L F, Wu Y C, Zhu B, Liu H J, Liu D X, Shui M, He Y L, Zhan X Y, Gu Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 135204 (in Chinese) [单连强, 高宇林, 辛建婷, 王峰, 彭晓世, 徐涛, 周维民, 赵宗清, 曹磊峰, 吴玉迟, 朱斌, 刘红杰, 刘东晓, 税敏, 何颖玲, 詹夏宇, 谷渝秋 2012 物理学报 **61** 135204]
- [19] Shui M, Chu G B, Zhu B, He W H, Xi T, Fan W, Xin J T, Gu Y Q 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 035903
- [20] Fratanduono D E, Smith R F, Boehly T R, Eggert J H, Braun D G, Collins G W 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 073504
- [21] Prisbrey S T, Park H S, Remington B A, Cavallo R, May M, Pollaine S M, Rudd R, Maddox B, Comley A, Fried L, Blobaum K, Wallace R, Wilson M, Swift D, Satcher J, Kalantar D, Perry T, Giraldez E, Farrell M, Nikroo A 2012 *Phys. Plasmas* **19** 056311
- [22] Smith R F, Eggert J H, Jeanloz R, Duffy T S, Braun D G, Patterson J R, Rudd R E, Biener J, Lazicki A E, Hamza A V, Wang J, Braun T, Benedict L X, Celliers P M, Collins G W 2014 *Nature* **511** 330
- [23] Ozaki N, Koenig M, Benuzzi-Mounaix A, Vinci T, Ravasio A, Esposito M, Lepape S, Henry E, Hüser G, Tanaka K A, Nazarov W, Nagai K, Yoshida M 2006 *J. Phys. IV France* **133** 1101
- [24] Shui M, Chu G B, Xin J T, Wu Y C, Zhu B, He W H, Gu Y Q 2015 *Chin. Phys. B* **24** 094701
- [25] Okada K, Wakabayashi K, Takenaka H, Nagao H, Kondo K, Ono T, Takamatsu K, Ozaki N, Nagai K, Nakai M, Tanaka K A, Yoshida M 2003 *Int. J. Impact Eng.* **29** 497
- [26] Kadono T, Yoshida M, Takahashi E, Matsushima I, Owadano Y, Ozaki N, Fujita K, Nakano M, Tanaka K A, Takenaka H, Kondo K 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 2943
- [27] Tanaka K A, Hara M, Ozaki N, Sasatani Y, Anisimov S I, Kondo K, Nakano M, Nishihara K, Takenaka H, Yoshida M, Mima K 2000 *Phys. Plasmas* **7** 676
- [28] Ozaki N, Sasatani Y, Kishida K, Nakano M, Miyanaga M, Nagai K, Nishihara K, Norimatsu T, Tanaka K A, Fujimoto F, Wakabayashi K, Hattori S, Tange T, Kondo K, Yoshida M, Kozu N, Ishiguchi M, Takenaka H 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 2571
- [29] Brown K E, Shaw W L, Zheng X X, Dlott D D 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 103901

Experimental progress of laser-driven flyers at the SG-III prototype laser facility*

Shui Min[†] Chu Gen-Bai Xi Tao Zhao Yong-Qiang Fan Wei He Wei-Hua
Shan Lian-Qiang Zhu Bin Xin Jian-Ting[‡] Gu Yu-Qiu

(Key Laboratory of Plasma Physics, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, China)

(Received 8 October 2016; revised manuscript received 4 November 2016)

Abstract

Laser-driven flyers have unique advantages of high flyer velocity, low cost, simple facility compared with the flyers driven by other conventional dynamic high-pressure loading techniques. With the fast development of laser technique, launching hypervelocity flyers with high-intensity laser pulse has become more and more prevalent. In this paper, we introduce the recent experiments of laser-driven flyers at the SG-III prototype laser facility.

Three ways of launching hypervelocity flyers are developed and introduced, respectively. In the first way, multi-layered aluminum flyers are gradually accelerated to a terminal velocity of 8 km/s, which is measured by optical velocimetry, without melting and vaporization. The pressure distribution within the flyer shows that the temporally ramped pulse ablation generates a compression wave, and the flyer is accelerated by this wave and its reverberation within the flyer. In the second way, a strong laser ablates the low-density reservoir foil and generates strong shock in the foil. The shock wave is strong enough, and when the shock breaks out from the free surface, the foil will unload as plasma towards the flyer with a density profile. The plasma decelerates upon colliding the flyer, and the single-layered flyer is gradually accelerated by the momentum transition. In our experiments, single-layered aluminum foil and single-layered tantalum foil are accelerated to 11.5 km/s and 6.5 km/s, respectively. According to the pressure distribution within the flyer, the flyer is also accelerated by the compression wave produced by the plasma collision, which is similar to the case of direct ablation by temporally ramped pulse. However, the way of plasma collision could better reduce X-ray and electron preheat and obtain cleaner flyers. In the last way, the flyers are launched by direct strong short-laser ablation. The multi-layered aluminum foil is accelerated to a high average velocity of 21.3 km/s by using a 3-ns quadrate laser pulse at 351 nm after spatial homogenization. A line-velocity interferometer system for any reflect (VISAR) is employed to monitor the processes of flyer launch and flight in a vacuum gap and the shock velocity associated with phase change in fused silica target after flyer impact is inferred. The reflectivity variations of the VISAR fringe pattern and the shock velocity in the fused silica suggest that the flyer owns a density gradient characteristic. Furthermore, specifically designed multi-layered flyers (polyimide/copper) are accelerated by shock impedance and reverberation techniques to a super high averaged velocity of 55 km/s, which is much faster than recently reported results. Light-emission signals of shock breakout and flyer impact on flat or stepped windows are obtained, which indicates the good planarity and integrity for the flyer. Compared with single-layer flyers, multi-layered flyers have a good planarity, and a high energy conversion efficiency from laser to flyers.

In this paper, we give a comprehensive analysis and comparison of the experimental designs, technique means and data results about laser-driven flyers. This would provide a reference for further experimental study of laser-driven flyers and also verify that the SG-III prototype laser facility is a very promising facility for studying the hypervelocity flyers launching field.

Keywords: shock wave, laser-driven flyers, dynamic high-pressure physics, plasma

PACS: 47.40.Nm, 47.80.Cb, 47.85.Dh, 52.38.Mf

DOI: 10.7498/aps.66.064703

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11504349) and the Key Laboratory Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 9140C680305140C68289).

[†] Corresponding author. E-mail: shuimin123@163.com

[‡] Corresponding author. E-mail: jane_xjt@126.com