长脉冲 KrF 激光驱动高速飞片实验研究

田宝贤,梁 晶,王 钊,李业军,汤秀章

(中国原子能科学研究院核技术应用研究所,北京 102413)

摘要:利用侧向阴影成像技术开展了激光驱动高速金属飞片实验研究,并介绍了飞片实验系统与条纹相 机时空标定结果。实验在辐照激光波长 248 nm、脉宽 28 ns、能量 100 J、功率密度 1.8×10¹² W/cm²的条 件下加速带有 50 μm 烧蚀层的 5 μm 铝飞片至 10 km/s 左右。讨论了不同条件下加速过程的区别,分析 了冲击波对飞片加速过程的影响,并从铝、钽飞片实验对比中发现激光烧蚀不同材料的能量转化效率是 不同的。

Experiment Study of Long Pulse Laser-Driven Flyer to High Velocity

TIAN Bao-xian, LIANG Jing, WANG Zhao, LI Ye-jun, TANG Xiu-zhang (China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-7, Beijing 102413, China)

Abstract: The technology of side-on shadowgraph was developed to study the velocity of metal flyer driven by laser. The system of flyer experiment, the calibration of time and space axis of streak camera were introduced in the paper. With the laser of 248 nm wavelength, 28 ns pulse duration at laser energy of 100 J and laser intensity of 1.8×10^{12} W/cm², the 5 µm aluminum flyer with 50 µm ablation layer was accelerated to 10 km/s. The difference of accelerated process in different conditions was discussed and the effect of shock wave in flyer accelerated process was also analyzed in the paper. Through the comparison of Al and Ta experiment results, it is revealed that the energy conversion efficiency of laser material interaction is different for different materials. Key words: side-on shadowgraph; streak camera; ablation layer; shock wave; energy conversion efficiency

随着激光技术的飞速发展,激光称为实验 室内产生超高压强的主要手段之一。激光驱动 飞片技术作为一种新型动高压加载技术,利用 空腔加速充分吸收激光的能量实现增压增速, 并在飞片与目标靶中产生强冲击波,在高压状态方程、材料力学、ICF、靶物理与等离子体物理及空间碎片等多个领域有着广泛的应用^[1-3]。 本工作基于"天光一号"百焦耳级长脉冲

基金项目:国家 863 计划资助项目

收稿日期:2012-05-30;修回日期:2012-08-20

作者简介:田宝贤(1984—),男,山东章丘人,助理研究员,硕士,等离子体物理专业

KrF激光辐照系统辐照驱动铝、钽等金属材料 开展激光驱动高速飞片实验,利用侧向阴影照 相技术^[4-5]对飞片的飞行轨迹进行探测诊断,探 讨分析不同加速过程下的飞片速度变化。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示,包括"天光一号"辐 照激光系统、侧向阴影诊断系统及内调焦望远 镜定位系统 3 部分,并配有时间延时触发系统。

辐照激光为"天光一号"六路聚焦系统的 248 nm 紫外 KrF 激光,其脉宽 28 ns,时间波形 为具有一定平顶的类高斯波形,能量空间分布平 顶焦斑 500 μm,到达靶室能量可达 100 J 以上, 功率密度 10¹² W/cm²。紫外激光相比于长波长 激光,具有吸收系数高、波长短、带宽大、光束均 匀性好等特点,通过 EFISI 光束平滑可获得辐照 不均匀因子 2%以内的均匀辐照,从而在较低的 功率密度下获得更高的稳定飞行的飞片速度。

侧向阴影诊断系统主要包括探测激光源、 光电快门、普克尔盒、柱面镜、光阑、成像透镜、 滤波片、衰减片、条纹相机及多个反射镜等元件,光路搭建主要包括到达靶前的探测光路搭 建与经过靶后的成像系统搭建。探测光路系统 中,探测光源为半导体泵浦的固体激光器 Verdi,可连续输出波长为 532 nm 的单纵模激 光,最大输出功率达到6W。光电快门配合普 克尔盒可将连续的探测光截成百 μs 的激光脉 冲,有效消除了条纹相机回扫对诊断造成的干 扰。柱面镜将圆斑型探测光在靶位聚焦成1条 细线,大幅提高了探测光功率的利用效率。探测 光经过靶后,通过成像透镜或透镜组成像到条纹 相机探测面,从而记录了一段时空范围内靶飞行 过程的有效信息。在成像系统中,双光阑定位了 探测靶的主光路系统,是侧向阴影成像光学系统 中调节精度要求最高的部分。实验中激光与靶 及靶室前窗聚焦透镜会产生较强的杂散光,对诊 断探测构成了很强的干扰,因此在条纹相机前采 用了滤波片、衰减片、条纹相机镜筒与圆筒遮罩 组合的结构,有效去除了杂散光的影响,大大提 高了信噪比,配合柱面镜在探测光4W功率密 度下可获得非常清晰的飞片飞行轨迹图像。

内调焦望远镜可对靶进行精确定位,前向 内调焦望远镜定位靶心与辐照光主光轴重合, 侧向内调焦望远镜定位靶前表面与辐照光均匀 度最好的像位面重合,且可用于精确定位侧向 阴影诊断系统中的双光阑。实验中采用的内调



图 1 激光驱动高速飞片实验布置示意图 Fig. 1 Schematic diagram of laser-driven flyer experiment setup

焦望远镜的同轴性精度在 2 m 内为 0.1 mm, 相应的偏离角约为 1',定位精度较高。

实验中时间延时与同步是实验信号诊断的 关键,在实验前需通过探测与计算调节各系统 的触发延时,触发系统可采用光触发或电触发。 实验早期采用机械快门只能选择光触发,后期 由于引入的光电快门控制系统可输出定延时的 电信号,也可进行电触发。触发信号输入到 DG535 触发延时系统,分别触发"天光一号"控 制装置、普克尔盒、条纹相机及电脑采集卡,调 节各系统延时确保光信号到达条纹相机时条纹 相机开始扫描。

2 实验结果

2.1 条纹相机时空标定

实验主要诊断工具条纹相机为深圳大学光 电子学研究所生产,属早期的可见光波段条纹 相机。飞片速度计算与条纹相机的时空分辨参 数密切相关,因此在实验前需对条纹相机时空 进行标定。其中,时间标定采用标准具法^[6],空 间标定与侧向阴影成像系统搭建密切相关,不 同的放大倍数,空间标定结果也不相同。实验 中空间标定忽略了近轴光学成像等各种误差影 响,采用三维精密平移台移动靶的位置,记录相 应的静态图像,选取阴影中心空间坐标作为研 究对象,拟合初始位置前后一定距离内靶移动 与阴影中心空间像素位置移动的关系。图 2 所 示为侧向阴影飞片实验静态图像,静态图像可 较为清晰的看到中间飞片的阴影,而两侧亮光 为诊断光束的透射光,图2中可看到阴影较为 清晰的边缘。



图 2 侧向阴影飞片实验静态图像 Fig. 2 Sample side-on shadow streak camera image of static state

飞片实验主要采用条纹相机第7档100 ns 档进行探测,因此实验前对该档的时空参数进 行了标定。图3所示为100 ns档的时间标定1 次拟合结果,通过调节延时多次标定实现了条纹 相机全量程范围的时间精细标定。结果显示当 前条纹相机的扫描线性非常好,1次拟合结果 R² 达到0.999,其拟合扫描速度为123.05 ps/pixel, 拟合扫速偏差为0.13 ps/pixel。



for 100 ns sweep grade (streak camera)

图 4 为条纹相机 100 ns 档空间标定 1 次拟 合结果,其纵坐标为操控平移台移动相对位置读 数,而横坐标则是飞片侧向阴影静态图像中阴影 中心(图 2)的空间轴向坐标变化,拟合时选取了 3 个不同时间轴向坐标位置的数据,结合平移台 移动参数 2 μ m/unit,其空间标定结果为:540 处 3.44 μ m/pixel,760 处 3.29 μ m/pixel,1 016 处 3.42 μ m/pixel,视合线性度均达到 0.999。这说 明该条纹相机的同一时间的纵向空间分布线性度 是较好的,但不同时间纵向空间标定的结果不一 致,纵向空间会因横向时间的变化发生变化,这可



能与条纹相机自身以及标定过程中图像读数误差 等原因综合造成的。飞片实验图像横向时间坐标 主要位于 700~1 000 像素之间,本工作选用后两 者数据平均值 3.35 μm/pixel 作为空间标定结果。

2.2 铝飞片的速度测量

为获得尽可能高的速度,实验采用的靶为 5 μm 铝飞片,飞片前是 50 μm 的 Kapton 膜作 为烧蚀层^[7],并在多种能量条件下开展了激光 辐照驱动飞片实验。

图 5 为 51 J 能量辐照下铝飞片飞行轨迹的 侧向阴影成像,图 6 为 51 J 能量下铝飞片轨迹一 次拟合图像,计算选取了图 5 中间 2/3 区域的边 缘点进行拟合,并进行了相应的坐标变换,拟合 结果显示飞片轨迹近似线性,其轨迹斜率为 0.205,结合条纹相机时空标定参数,此条件下飞 片的飞行速度为 5.58 km/s。飞片在60 ns时间 段内近似匀速运动,未观测到明显的加速过程。 在 51 J 能量下,激光与烧蚀层作用形成冲击 波^[1-3,8],当冲击波到达飞片背表面后,粒子速度 跳变为自由面速度,飞片速度迅速上升,以至于 条纹相机 100 ns 档无法诊断其初始阶段的快速 加速过程,此后飞片以近似匀速状态飞行。



图 5 51 J 能量下铝飞片实验结果 Fig. 5 Experimental result of Al flyer experiment with energy of 51 J

冲击波到达飞片背表面后反射形成稀疏波 向飞片前表面传输,飞片内压力降低为0Pa, 飞片速度趋于稳定。当烧蚀层厚度与激光功率 密度相匹配时,冲击波随着激光时间波形的发 展而产生、追逐叠加、不断增长,在到达飞片背 表面前趋于稳定,尔后在背表面反射形成稀疏 波,该稀疏波传输到烧蚀临界面时激光时间波 形已进入下降沿甚至结束,飞片1次快速加速



后即趋于匀速飞行,这一过程在图 5 中得到了 验证。当烧蚀层厚度与激光功率密度不相匹配 时,主要体现在烧蚀层厚度相对于激光能量要 薄,此时一方面在冲击波追逐增长的过程中,冲 击波尚未稳定,主冲击波尚未追上初始冲击波 时,初始冲击波已到达飞片背表面,引起飞片提 前运动,并产生反向稀疏波,飞片呈不断加速过 程:另一方面主冲击波反射的反向稀疏波传输 到烧蚀临界面时,激光时间波形仍处于峰值功 率附近,此时在烧蚀临界面会形成接近烧蚀压 的2次冲击波,再次加速。这样飞片就呈现出 加速、匀速、加速的台阶式加速过程。图 7 为 100J能量下飞片速度的模拟结果,采用1维 Hyades 程序对"天光一号"类高斯激光脉冲 100 J条件下飞片各层飞行速度进行模拟,飞片 呈明显的台阶式加速过程,且各层速度演化未发 生分离,说明飞片在飞行过程中未发生解体。其 中第1次加速时间约为7.3 ns,接着是4.7 ns的 近似匀速过程,而后再次经历7 ns 的加速进入 4.7 ns 的近似匀速过程,之后再次进入加速阶



with energy of 100 J

段,且两次加速过程的加速度变化不大。

图 8 为 100 J 能量辐照下铝飞片飞行轨迹 的侧向阴影成像,由于条纹相机扫描时间是由右 至左,因此对图像进行了翻转并界定了飞行轨迹 轮廓,图中轨迹所对应的时间段约为30 ns,与辐 照激光的时间脉宽相当。与 51 J 实验结果相 比,靶结构参数并未发生改变,但辐照激光能量 提升了1倍,飞行轨迹不再是近似直线,出现了 明显的加速过程。飞片飞行轨迹是飞片速度对 时间的积分,图像取点是离散不连续的数据样 本,利用差分获得微分数据时会产生较大的误 差,所以需直接对轨迹轮廓进行拟合而后求微分 获得速度曲线。美国海军实验室在 CH 飞片加 速实验中认为质量烧蚀减少与激光瞬态功率密 度变化(随时间波形)等非线性效应导致飞片加 速度是变加速的,故采用了4次拟合数据处理方 法,并报告获得了1000 km/s 的目前世界最高 的激光驱动飞片速度^[9]。其分析并未考虑冲击 波作用过程,且其激光脉宽为3 ns,飞行诊断时 间为1 ns,与本实验28 ns长脉冲激光作用机理 存在差别。图7中飞片台阶式加速过程的速度 对时间积分可获得不同阶次分段连续的轨迹曲 线,但实验过程中实验条件与模拟条件存在着一 定的差别,且轮廓取点的精度、分段运动边界不 确定性均会对数据拟合产生很大的影响。



图 9 所示为 100 J 能量下铝飞片飞行轨迹 拟合处理与速度、加速度曲线。拟合处理中时 间零点选取飞片启动时刻,对比 3 种不同加速 过程,拟合近似飞片速度的结果:1)飞片飞行 轨迹 30 ns 时间段后期,激光早已进入下降沿 甚至结束,可认为飞片后期运动趋于匀速运动, 对飞行轨迹后期数据进行 1 次线性拟合;2)忽 略冲击波成长的非线性与稀疏波稀疏近匀速过 程,认为飞片在近似稳定的烧蚀压作用下做匀 加速运动,对飞片轨迹进行 2 次拟合;3)采用 海军实验室处理方法,认为飞片加速度是变加 速的,对飞片轨迹进行 4 次拟合。从图 9 可看 出,对于后期匀速运动情况,从 24.6 ns 开始进 行拟合,其 1 次线性拟合的速度为 9.87 km/s; 对于匀加速运动,其飞行轨迹为2次曲线,飞片



图 9 100 J 能量下铝飞片轨迹、速度、加速度拟合曲线

Fig. 9 Curves of track, velocity and acceleration velocity of Al flyer in different accelerate processes with energy of 100 J

初始速度为 4.77 km/s,加速度为 0.23 km/s², 速度线性增加;对于变加速的加速运动,其初始 速度为 1.00 km/s,加速度呈逐渐减小的趋势。 变加速运动中,其加速度在 22 ns 附近逐渐降 低为 0 km/s²,此时激光已进入下降沿甚至尾 脉冲阶段,已无力支撑加速度的再次增大,且接 近该时刻的 21.3 ns 时匀加速运动与变加速运 动的 速度曲线相交,此刻对应的速度为 9.71 km/s,与 1 次线性拟合的速度相当,因 此,可认为此后飞片进入近似匀速运动阶段,后 续的高次拟合失效。

2.3 钽飞片速度测量

钽作为重金属材料,其密度接近铝的 6 倍, 实验中针对 4 和 2 μm 两种飞片进行了加速实验 (该靶迎光面同样附有 50 μm 烧蚀层),图 10 为 钽飞片飞行轨迹侧向阴影成像实验结果,图 10a 为 104 J 激光辐照 4 μm 钽飞片的飞行轨迹,其平 均速度为 4.9 km/s,图 10b 为 72 J 激光辐照 2 μm 钽飞片的飞行轨迹,其平均速度为 7.6 km/s。

相同条件的百焦耳激光辐照下,可近似认 为飞片平面尺寸近似,5 μm 铝飞片可达 10 km/s的飞行速度,而4 μm 的钽飞片可达 5 km/s的飞行速度,因为密度的原因,钽飞片 的动量相当于铝飞片的 2.4 倍,这说明激光与 不同材料相互作用,其能量转化为飞片动量的 转化效率与材料是有关的。



图 10 钽飞片实验结果 Fig. 10 Experimental result of Ta flyer

3 结论

为研究材料的高压状态方程与空间碎片模 拟,利用侧向阴影成像技术开展了激光驱动高速 飞片实验研究,并成功探测到清晰的铝、钽飞片飞 行轨迹。实验表明:在不同的激光、靶参数条件下, 飞片的加速机制与加速过程并不相同,飞片的飞行 轨迹也会因此发生变化。在激光与靶参数相匹配 的条件下,飞片在1次快速加速下即趋于匀速飞行,而不匹配的条件下,飞片会出现多次非线性加速过程。此外,在铝、钽飞片实验结果对比中发现激光与不同材料作用其能量转化效率是不相同的。

参考文献:

- [1] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [2] VEESER L R, SOLEM J C. Studies of laserdriven shock waves in aluminum[J]. Phys Rev Lett, 1978, 40(21): 1 391-1 394.
- [3] TRAINOR B J, SHANER J W, AUERBACH J M, et al. Ultra high-pressure laser-driven shock wave experiments in aluminum [J]. Phys Rev Lett, 1979, 42(17): 1 154-1 157.
- [4] 高爽,汤秀章,王钊,等.利用侧向阴影照相技术 探测靶的飞行速度[J].强激光与粒子束,2008, 20(4):625-628.
 GAO Shuang, TANG Xiuzhang, WANG Zhao, et al. Detection of flyer velocity by side-on shadowgraph system in equation of state experiment [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(4): 625-628(in Chinese).
- [5] ZVORYKIN V D, LEBO I G. Laser and target experiments on KrF GARPUN laser installation at FIAN[J]. Laser and Particle Beams, 1999, 17 (1): 69-88.
- [6] 彭晓世,刘永刚,张惠鸽,等.光学条纹相机扫描 速度实验标定[J].核电子学与探测技术,2008, 28(4):841-844.

PENG Xiaoshi, LIU Yonggang, ZHANG Huige, et al. Experiment calibration of sweep speed for optic streak camera[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, 28(4): 841-844(in Chinese).

- [7] 梁晶,单玉生,汤秀章,等. 烧蚀层厚度对飞片稳定性的影响[J]. 原子能科学技术,2007,41(2):153-157.
 LIANG Jing, SHAN Yusheng, TANG Xiuzhang, et al. Effect of stability of flyers by altering thickness of ablators[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(2): 153-157(in Chinese).
- [8] BATES J W. Instability of isolated planar shock waves[J]. Phys Fluids, 2007, 19(9): 094102.
- [9] KARASIK M, WEAVER J L, AGLITSKIY Y, et al. Acceleration to high velocities and heating by impact using Nike KrF laser[J]. Phys Plasmas, 2010, 17(5), 056317.