



## 激光等离子体射流驱动亚毫米直径铝飞片及姿态诊断

税敏 席涛 闫永宏 于明海 储根柏 朱斌 何卫华 赵永强 王少义 范伟 卢峰 杨雷 辛建婷 周维民

## Laser-plasma jet driven sub-millimeter diameter aluminum flyer and its gesture diagnosis

Shui Min Xi Tao Yan Yong-Hong Yu Ming-Hai Chu Gen-Bai Zhu Bin He Wei-Hua Zhao Yong-Qiang Wang Shao-Yi Fan Wei Lu Feng Yang Lei Xin Jian-Ting Zhou Wei-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 095201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212136

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212136>

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

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 纵磁作用下真空电弧单阴极斑点等离子体射流三维混合模拟

Three-dimensional hybrid simulation of single cathode spot vacuum arc plasma jet under axial magnetic field

物理学报. 2021, 70(5): 055201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201701>

#### 大气压氩气刷形等离子体羽的特性研究

Discharge characteristics of argon brush plasma plume operated at atmospheric pressure

物理学报. 2021, 70(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202091>

#### 大气压脉冲放电等离子体射流特性及机理研究

Discharge characteristics and mechanism of plasma plume generated by atmospheric pulsed discharge

物理学报. 2021, 70(9): 095202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202246>

#### 基于神光III原型装置开展的激光直接驱动准等熵压缩研究进展

Progress of laser-driven quasi-isentropic compression study performed on SHENGUANG III prototype laser facility

物理学报. 2018, 67(4): 045202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172159>

#### 基于气体放电等离子体射流源的模拟离子引出实验平台物理特性

Physical characteristics of ion extraction simulation system based on gas discharge plasma jet

物理学报. 2018, 67(18): 182801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180919>

#### 飞秒激光引导高压放电下的SF<sub>6</sub>等离子体时间分辨光谱特性

Time-resolved spectral characteristics of SF<sub>6</sub> plasma under femtosecond laser-guided high-voltage discharge

物理学报. 2020, 69(18): 185201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200636>

# 激光等离子体射流驱动亚毫米直径 铝飞片及姿态诊断\*

税敏<sup>†</sup> 席涛 闫永宏 于明海 储根柏 朱斌 何卫华 赵永强  
王少义 范伟 卢峰 杨雷 辛建婷 周维民

(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)

(2021 年 11 月 19 日收到; 2022 年 1 月 15 日收到修改稿)

强激光烧蚀低密度有机材料形成等离子体射流碰撞, 可以对材料进行准等熵加载, 比激光冲击加载应变率低, 相同压强下可以获得更高的压缩度和更低的温升, 在状态方程、飞片加速等方面有很强的应用前景. 在星光 III 置上首次开展了等离子体射流驱动小尺寸铝飞片及姿态诊断联合实验. 通过调控有机材料厚度和真空间隙长度, 获得了厚度 20  $\mu\text{m}$ 、直径约 400  $\mu\text{m}$  的铝飞片, 飞片加速时间长达 200 ns. 基于 ps 拍瓦激光的高能 X 光背光照相结果显示铝飞片在飞行约 400  $\mu\text{m}$  距离后仍然保持了很好的飞行姿态和完整性.

**关键词:** 激光驱动飞片, 等离子体射流, 准等熵加载, 高能 X 光背光照相

**PACS:** 52.38.Mf, 52.70.La, 41.50.+h, 52.40.Hf

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212136

## 1 引言

利用激光烧蚀有机材料 (以下简称气库膜) 形成等离子体射流可以对材料产生准等熵加载<sup>[1]</sup>, 在高压下固体材料高应变率动态响应特性<sup>[2]</sup>、相变<sup>[3,4]</sup>、状态方程<sup>[5]</sup>及小尺寸飞片产生<sup>[6]</sup>等方面都有广阔的应用前景. 2012 年, Fratanduono 等<sup>[6]</sup>在劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 利用激光烧蚀聚酰亚胺薄膜产生等离子体将 20  $\mu\text{m}$  厚度、直径约 1 mm 的铝飞片缓慢加速到 5 km/s 的速度. 任意反射面速度干涉仪 (VISAR) 测得的干涉条纹光滑连续, 一维平面性良好, 流体模拟显示飞片碰撞前温升仅不到 50  $^{\circ}\text{C}$ , 表明该方法 (驱动的飞片) 在状态方程 (EOS) 的绝对测量方面具有很强的应用潜力. 2017 年, Shu 等<sup>[7]</sup>利用这种激光准等熵加载方法开展了铝的状态方程绝对测量. 通过调节激光能

量, 他们将 25  $\mu\text{m}$  厚度、直径约 1 mm 的铝飞片加速到 4—12 km/s 的速度, 通过与铝台阶样品撞击, 同时获得了铝飞片撞击时刻的速度和样品中的冲击波速度, 从而实现对铝材料的 EOS 绝对测量. 该实验获得了 50—200 GPa 压力区间的铝冲击雨贡纽数据, 与不同加载方法获得的实验结果具有很好的一致性, 间接证明了这种激光准等熵驱动方式产生的飞片具有比较好的飞行姿态和较低的温升. 同年, 本研究组<sup>[8]</sup>也发表了在原型装置上开展的激光驱动飞片研究的实验结果, 将 20—30  $\mu\text{m}$  厚度的铝飞片和钽飞片加速到 3—11 km/s 的速度. 从上述研究可以看出, 利用激光等离子体射流碰撞可以驱动平面性好、温升较低的飞片, 这一点相比传统的激光驱动带窗口约束的飞片具有明显的优势<sup>[9–13]</sup>. 然而, 目前对于飞片平面性和完整性的表征, 主要依赖线 VISAR 测量<sup>[7,8]</sup>和验证板<sup>[13,14]</sup>的

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0206001) 和等离子体物理重点实验室基金 (批准号: 6142A04200105) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [shuimin123@163.com](mailto:shuimin123@163.com)

结果, 对飞片的飞行姿态和表观形貌 (平面性和完整性) 都缺乏直接的观测结果, 而这很大程度上决定了激光驱动飞片能否在 EOS 甚至更多的研究领域 (如激光驱动飞片起爆<sup>[10]</sup>) 得到广泛和深入的应用. 近两年, 基于皮秒拍瓦激光的高分辨 X 射线背光照相技术<sup>[15]</sup> 由于具有高亮度、高时空分辨的特点, 在惯性约束聚变内爆过程和冲击加载材料微喷过程研究<sup>[16–19]</sup> 方面已经获得了重要应用. 借助这种高时空分辨的透视成像技术, 有望实时捕捉到小尺寸飞片的飞行姿态和表观形貌, 为激光驱动飞片应用研究奠定更坚实的基础. 本文基于星光 III 装置, 开展激光等离子体射流驱动飞片和姿态诊断实验, 优化激光参数和靶参数, 解决 X 光照相的干扰问题, 获得清晰的飞片姿态图像, 并对结果进行细致的分析.

## 2 实 验

### 2.1 激光参数和靶参数

实验使用星光 III 装置三倍频纳秒束激光进行加载, 能量小于 60 J, 脉冲波形为 2 ns 方波. 使用 1 mm 直径的连续相位板 (CPP) 对 ns 激光进行空间匀滑, 提高加载光束的空间均匀性, 提高飞片的平面性和完整性. 放置 1 mm CPP 后, 远场光学焦斑分布如图 1 和图 2 所示, 平顶区尺寸约 0.7 mm × 0.7 mm. 皮秒激光用于产生照相用的 X 光源, 能量小于 50 J, 脉宽约为 8 ps, 经抛物面镜聚焦到焦斑小于 30  $\mu\text{m}$  (能量集中度大于 50%). 实验中, 铝飞片初始厚度 20  $\mu\text{m}$ , 气库膜 (CH) 厚度 150  $\mu\text{m}$ , 真空间隙长度 (气库膜与飞片之间的距离) 400  $\mu\text{m}$ , 如图 3 所示.

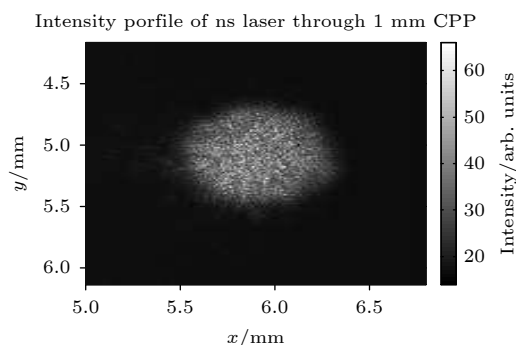


图 1 经过 1 mm CPP 后的远场光学焦斑空间分布  
Fig. 1. On-target focal spot of nanosecond beam after 1 mm CPP.

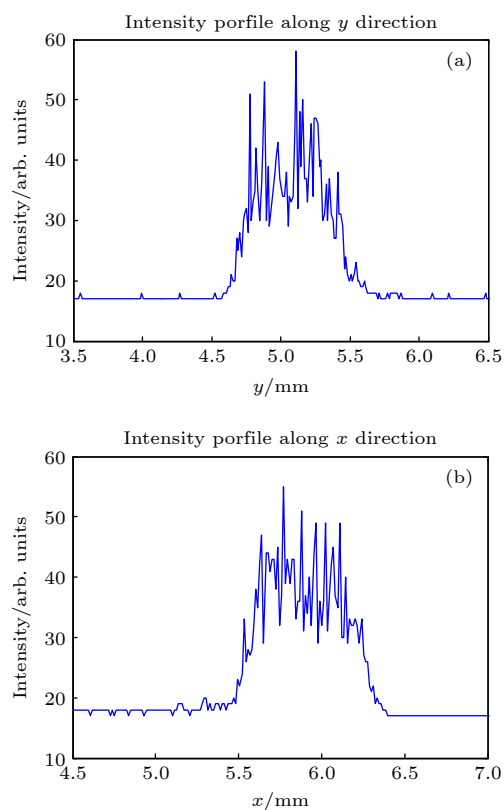


图 2 远场光学焦斑的一维强度空间分布 (a) 沿着  $y$  轴; (b) 沿着  $x$  轴

Fig. 2. One-dimensional on-target focal spot of nanosecond beam after 1 mm CPP: (a) Along  $y$  axis; (b) along  $x$  axis.

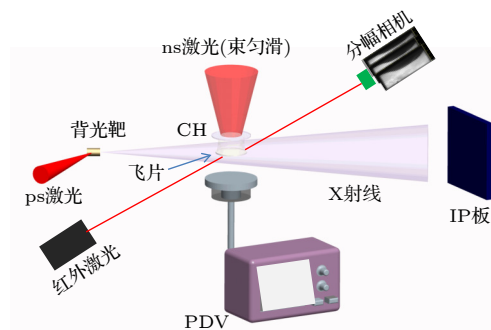


图 3 等离子体射流驱动飞片及姿态诊断原理示意图

Fig. 3. Schematic view of plasma-driven flyer and gesture investigation.

### 2.2 原理和诊断设计

实验设计原理示意图如图 3 所示, ns 激光经过束匀滑后烧蚀气库膜 (CH 掺 Br) 材料, 产生的冲击波卸载使 CHBr 材料熔化并形成等离子体, 等离子体通过真空间隙持续喷射到飞片上, 通过动能转换, 推动飞片缓慢飞行. 与激光冲击加载方式相比, 这种方式可以减小飞片的温升, 降低熔化和破碎的风险, 飞片更容易保持好的姿态. 利用 ps 束激



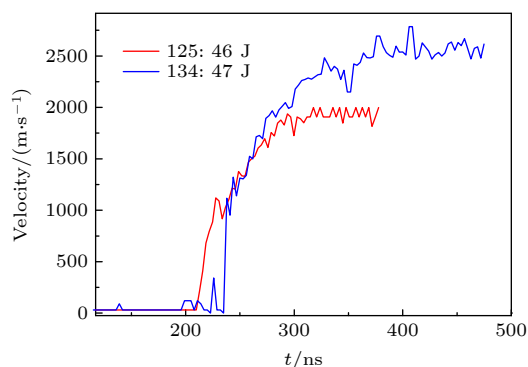


图 6 PDV 测量的不同激光能量对应的铝飞片自由面速度曲线

Fig. 6. Aluminum flyer velocity obtained by PDV measurements at different ns laser energy.

典型的铝飞片侧向飞行姿态图像分别如图 8 和图 9 所示. 从图 8 可以看到, 相比初始自由面位置 (竖直方向), 飞片整体发生了比较明显的倾斜 (约  $40^\circ$ ). 仔细观察发现, 初始靶面存在一定的倾斜 (沿顺时针方向旋转约  $10^\circ$ ), 自由面下部出现了一个由冲击波作用导致的微层裂鼓包结构<sup>[19]</sup>, 说

明激光加载中心位置偏离了中心约束孔. 根据鼓包形状, 可以确定加载激光整体下移了约 0.5 mm. 加上靶面有一定倾斜, 飞片下半部分受到了更强的等离子体冲击, 飞片飞出后逐渐沿顺时针方向旋转, 最终造成了较大的倾斜. 为便于分析, 将飞片旋转至竖直方向, 如图 8(b) 所示, 根据每个像素代表的实际尺寸, 可以确定飞片厚度约 20  $\mu\text{m}$ , 直径约 440  $\mu\text{m}$ . 飞片飞行过程中, 由于侧向稀疏导致飞片边缘滞后, 飞片呈典型锅底状, 但飞片并没有断裂破碎, 表明等离子体射流碰撞没有在飞片内部形成强冲击波, 大部分能量都转化成了飞片的动能, 飞片的温升较小, 没有熔化汽化, 仍保持了很好的完整性. 根据照相延时和飞行距离, 估算得到飞片平均速度约为 2.2 km/s. 另一发典型实验结果如图 9 所示, 飞片姿态较好, 没有发生明显的倾斜. 飞片厚度 20  $\mu\text{m}$ , 飞行距离 540  $\mu\text{m}$ , 平均速度约 2.2 km/s. 同样, 由于边侧稀疏, 飞片整体呈锅底状, 横向尺寸约 500  $\mu\text{m}$ . 此外, 可以清晰地看到作用在飞片后方的较低密度的 CH 等离子体射流.

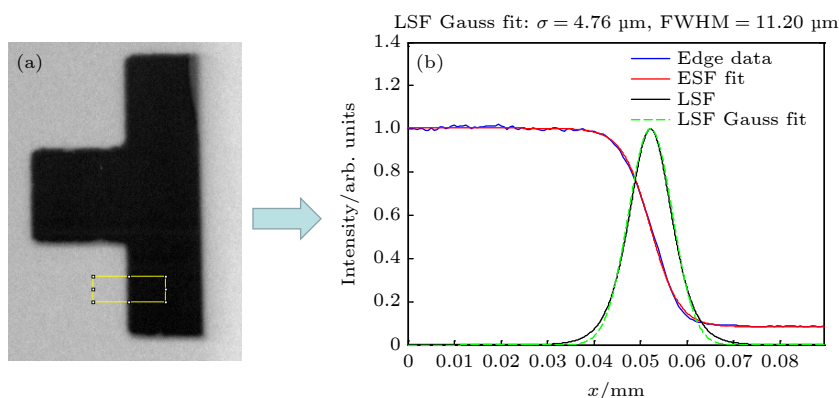


图 7 背光照相的静态空间分辨 (a) Cu 客体背光图像; (b) 空间分辨拟合结果

Fig. 7. Static spatial resolution: (a) Radiography of copper slab; (b) spatial resolution determined by edge spread function.

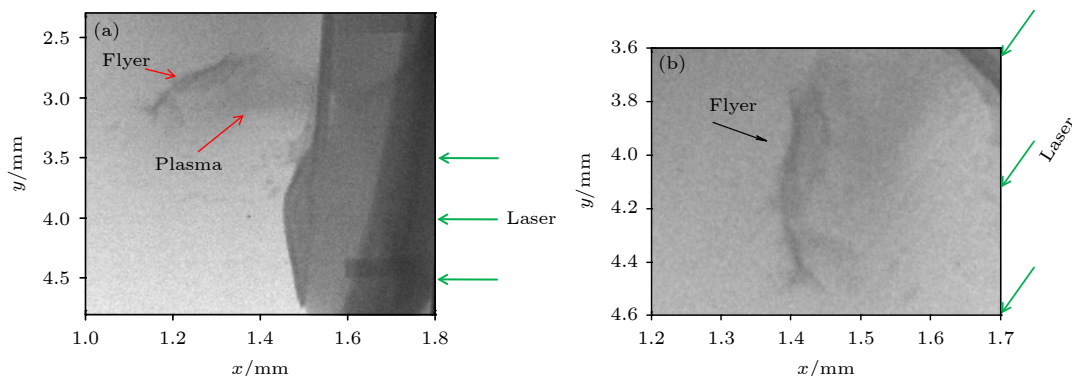


图 8 等离子体射流驱动铝飞片的 X 光图像 (其中照相延时 346 ns) (a) 原始图像; (b) 飞片旋转放大后的图像

Fig. 8. Radiography of aluminum flyer driven by laser plasma, where time delay is 346 ns: (a) Raw image; (b) magnified flyer image after rotation.

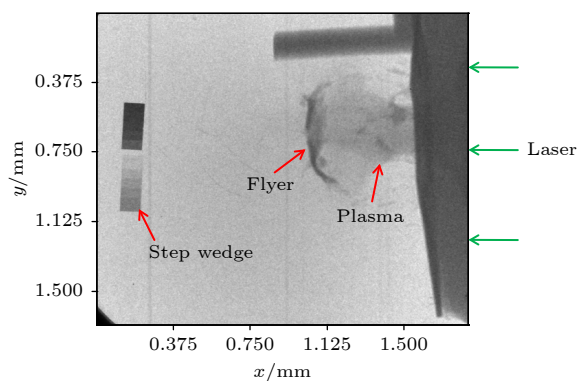


图9 等离子体射流驱动的铝飞片 X 光图像, 其中照相延时 350 ns

Fig. 9. Radiography of aluminum flyer driven by laser plasma, where time delay is 350 ns.

### 3.4 阴影成像

利用可见光阴影成像测量了飞片和等离子体演化的轮廓图像, 典型结果如图 10 所示, 由于可见光没有密度分辨能力, 无法区分飞片和等离子体, 但比较平坦的阴影头部一定程度上反映了飞片具有较好的平面性. 由于等离子体射流的膨胀和扩散, 随着照相延时的增加, 头部轮廓位移逐渐增大,

阴影面积也不断增加. 根据阴影照相结果 (尤其第一幅) 可以判断飞片启动时刻和加速过程, 为 X 光照相延时设置提供参考.

## 4 结 论

在星光 III 装置上开展了激光等离子体射流碰撞驱动小尺寸金属飞片及飞行姿态联合诊断实验, 获得了典型的铝飞片 X 光透视图像、阴影图像和速度曲线. 通过调控 CH 烧蚀层厚度和真空间隙长度, 实现了将等离子体碰撞转换成幅值连续变化的应力波加载, 从而缓慢加速飞片飞行. 实验获得了 20  $\mu\text{m}$  厚度的铝飞片, 直径约 0.5 mm, 由于边侧稀疏, 飞片呈典型锅底状, 飞片加速时间长达 200 ns, 平均速度 2.2 km/s. 等离子体加载的应变率  $10^5\text{--}10^6\text{ s}^{-1}$ , 比通常的激光准等熵加载应变率下降了近 2 个量级, 大大地降低了飞片飞行过程中的温升, 使飞片可以更长时间维持完整形态. 后续, 将开展更多发次实验, 研究飞片飞行姿态的演化过程.

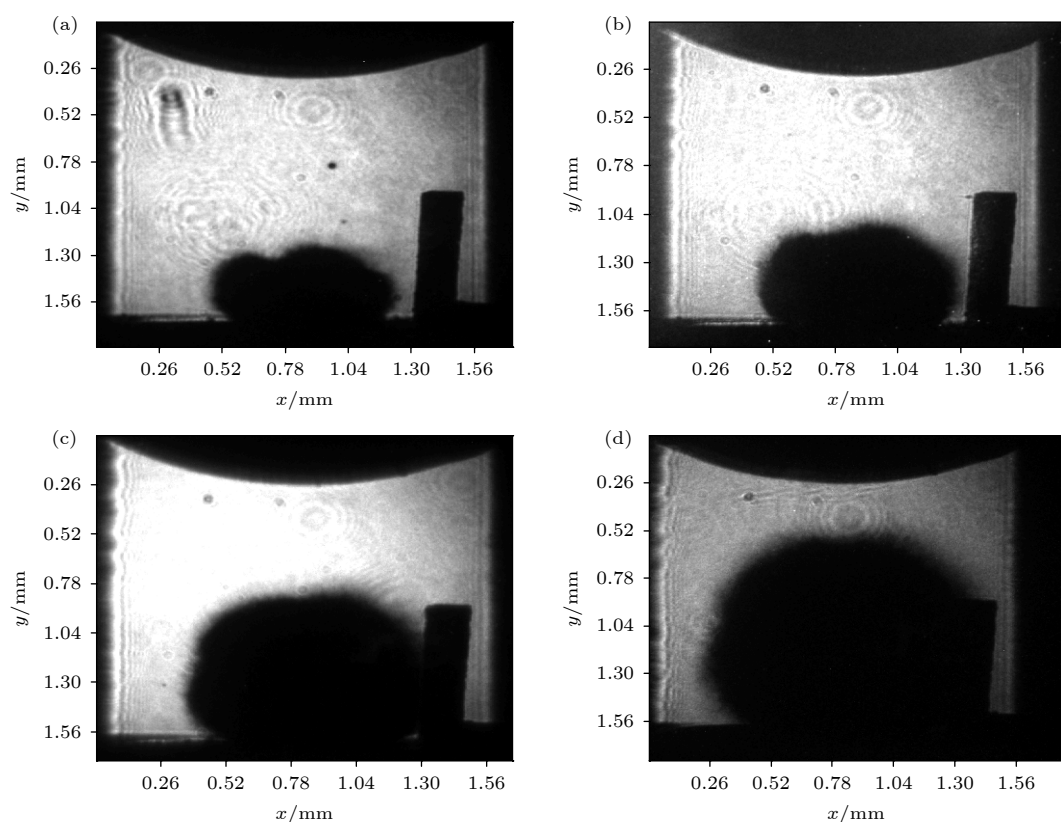


图 10 典型的等离子体射流驱动铝飞片阴影图像, 其中相对 ns 激光延时分别为 (a) 120 ns, (b) 180 ns, (c) 240 ns, (d) 300 ns

Fig. 10. Typical shadowgraphs of aluminum flyer driven by laser plasma, where the time delay referring to ns laser is (a) 120 ns, (b) 180 ns, (c) 240 ns, (d) 300 ns.

## 参考文献

- [1] 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
- [2] O'Keefe J D, Ahrens T J 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 17011
- [3] Smith R F, Eggert J H, Saculla M D, Jankowski A F, Bastea M, Hicks D G, Collins G W 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 065701
- [4] Smith R F, Eggert J H, Swift D C, Wang J, Duffy T S, Braun D G, Rudd R E, Reisman D B, Davis J P, Knudson M D, Collins G W 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 223507
- [5] Eggert J H, Bastea M, Braun D, Fujino D, Rygg R, Smith R, Hawreliak J, Hicks D G, Collins G 2010 *Laser-induced Ramp Compression of Tantalum and Iron to Over 300 GPa: EOS and X-ray Diffraction* (Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory) LLNL-CONF-425256
- [6] Fratanduono D E, Smith R F, Boehly T R, Eggert J H, Braun D G, Collins G W 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 073504
- [7] Shu H, Huang X, Ye J, Jia G, Wu J, Fu S 2017 *Laser Part. Beams* **35** 145
- [8] Shui M, Chu G B, Xi T, Zhao Y Q, Fan W, He W H, Shan L Q, Zhu B, Xin J T, Gu Y Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 064703 (in Chinese) [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 2017 *物理学报* **66** 064703]
- [9] Watson S, Field J E 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 3859
- [10] Gu Z W, Sun C W, Zhao J H, Zhang N 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 344
- [11] Cogan S, Shirman E, Haas Y 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 113508
- [12] Paisley D L, Luo S N, Greenfield S R, Koskelo A C 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 023902
- [13] Curtis A D, Banishev A A, Shaw W L, Dlott D D 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 043908
- [14] Gu Z W, Zhang X W, Sun C W 2008 *Chin. J. High Pressure Phys.* **22** 103 (in Chinese) [谷卓伟, 张兴卫, 孙承纬 2008 *高压物理学报* **22** 103]
- [15] Zhou W M, Yu M H, Zhang T K, Tian C, Shan L Q, Wu Y C, Zhang F, Bi B, Chu G B, Shui M, Xin J T, Cao L F, Gu Y Q, Zhu S P, Jing F, Zhang B H 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 0500010 (in Chinese) [周维民, 于明海, 张天奎, 田超, 单连强, 吴玉迟, 张锋, 毕碧, 储根柏, 税敏, 辛建婷, 曹磊峰, 谷渝秋, 朱少平, 景峰, 张保汉 2020 *中国激光* **47** 0500010]
- [16] Chu G B, Xi T, Yu M H, Fan W, Zhao Y Q, Shui M, He W H, Zhang T K, Zhang B, Wu Y C, Zhou W M, Cao L F, Xin J T, Gu Y Q 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 115106
- [17] Xin J T, He A M, Liu W B, Chu G B, Yu M H, Fan W, Wu Y C, Xi T, Shui M, Zhao Y Q, Wang P, Gu Y Q, He W H 2019 *J. Micromech. Microeng.* **29** 095011
- [18] Chu G B, Yu M H, Shui M, Fan W, Xi Tao, Jing L F, Zhao Y Q, Wu Y C, Xin J T, Zhou W M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 026201 (in Chinese) [储根柏, 于明海, 税敏, 范伟, 席涛, 景龙飞, 赵永强, 吴玉迟, 辛建婷, 周维民 2020 *物理学报* **69** 026201]
- [19] Shui M, Yu M H, Chu G B, Xi T, Fan W, Zhao Y Q, Xin J T, He W H, Gu Y Q 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 076201 (in Chinese) [税敏, 于明海, 储根柏, 席涛, 范伟, 赵永强, 辛建婷, 何卫华, 谷渝秋 2019 *物理学报* **68** 076201]
- [20] Xi T, Chu G B, Zhu B, Shui M, Zhao Y Q, Fan W, Gu Y Q, Xin J T, He W H 2019 *AIP adv.* **9** 075220
- [21] 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]

# Laser-plasma jet driven sub-millimeter diameter aluminum flyer and its gesture diagnosis\*

Shui Min<sup>†</sup> Xi Tao Yan Yong-Hong Yu Ming-Hai Chu Gen-Bai  
 Zhu Bin He Wei-Hua Zhao Yong-Qiang Wang Shao-Yi Fan Wei  
 Lu Feng Yang Lei Xin Jian-Ting Zhou Wei-Min

(*Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center,*

*China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

( Received 19 November 2021; revised manuscript received 15 January 2022 )

## Abstract

Laser-driven flyer has been studied for decades as it promises to possess many applications such as in measuring the equation of state (EOS) under ultrahigh pressure, investigating the material dynamic properties under high strain rate, simulating the high-speed impact for aircraft protection, and igniting explosives. However, the planarity and integrity of flyers are determined by indirect velocity Interferometer system for any reflector (VISAR) or witness slab results due to its high speed and small dimension. For further and wide applications, it is very important to obtain direct experimental proof of the flyer gesture and configuration. Thus, the acceleration and gesture investigation of aluminum flyer driven by laser plasma are studied on Xingguang-III laser facility. The X-ray radiography is achieved by a picosecond laser irradiating the copper wire target. The shadowgraph of flyer and plasma are realized by the incidence of a bunch of infrared laser through the flyer flight path. In addition, photon Doppler velocimetry is employed to measure the flyer velocity simultaneously. The radiography, shadowgraph and velocity of typical small aluminum flyer are obtained. By optimizing the thickness of both CH ablation layer and vacuum gap, the flyer is slowly accelerated via consecutive stress wave produced by plasma colliding. The aluminum flyer has a thickness of 20  $\mu\text{m}$  and diameter of about 500  $\mu\text{m}$ . The whole flyer remains the integrated shape after a great angle of rotation due to uneven plasma loading. The flight distance is about 400  $\mu\text{m}$ , giving an average velocity of 2.2 km/s. The planarity of the flyer is good except a little bend on the two sides due to side rarefaction of plasma. The study verifies that the laser plasma collision can generate a sub-millimeter-diameter metal flyer with integrated shape and a velocity of several kilo-meters per second, showing that it possesses the promising applications in measuring the EOS and igniting explosive.

**Keywords:** laser-driven flyer, plasma jet, quasi-isentropic loading, high-energy X-ray backlight radiography

**PACS:** 52.38.Mf, 52.70.La, 41.50.+h, 52.40.Hf

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212136

\* Project supported by the the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFA0206001) and the Foundation of Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, China (Grant No. 6142A04200105).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [shuimin123@163.com](mailto:shuimin123@163.com)