



·激光的热和力学效应·

# 激光烧蚀等离子体射流与固体靶相互作用实验研究

张 黎, 付 博, 黄元杰, 赵 宇, 李生福, 吴冀川, 张永强, 谭福利

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 利用激光烧蚀等离子体射流可以获得数 km/s 甚至上千 km/s 的射流速度, 远超目前绝大多数设备所能提供的模拟速度, 并且覆盖了极大的温度与密度范围, 作为加载手段具有广阔的应用前景。通过实验方法, 探索和发展激光烧蚀等离子体射流这一新型实验模拟手段, 利用高功率激光烧蚀产生高温高压等离子体射流, 实现超高速气体动力学实验室模拟的新途径。以此作为加载条件, 研究超高速物体与气体相互作用的气体动力学特性。通过建立激光烧蚀等离子体射流与固体靶相互作用实验方法, 可进一步研究等离子体射流的产生、发展以及高速物体气体动力学, 为下一步开展天体物理、小行星形貌、超高速陨石与行星大气相互作用机制等相关研究奠定基础。

**关键词:** 激光烧蚀; 超高速等离子体射流; 射流与固体靶相互作用; 气体动力学

中图分类号: O532.25; O521.3

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210257

## Experimental investigation of plasma jet and solid target interaction based on laser-ablation launching approach

Zhang Li, Fu Bo, Huang Yuanjie, Zhao Yu, Li Shengfu, Wu Jichuan, Zhang Yongqiang, Tan Fuli

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-113, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Laser-ablation plasma has been regarded as a novel approach for providing high velocity loading in experiment. Axial jet velocity of km/s even higher than 5 km/s could be achieved by employing laser-driven plasma method. On the other side, a wide range of jet temperature and plasma density could also be obtained during the loading process. This paper presents an experimental method to investigate the super high-velocity impact of solid target with gas. A high energy laser-ablation plasma device was established in this work, and plasma with jet velocity above 10 km/s was generated during the experiment. The aerodynamic characteristics of the high-velocity object's interaction with gas were studied in the experiment. The results of prove that, this work, the method has great potential for applications in the research of many fields including astrophysics, asteroid morphology, and the interaction of aerolith with atmosphere.

**Key words:** laser-ablation; hypervelocity plasma jet; jet and solid target interaction; gas dynamics

经典的超高速气体动力学模拟主要采用各种高超声速风洞、激波管、真空膨胀风洞、爆轰风洞等, 主要利用化学能或初始预热加压的方式产生高温高压气体破膜后驱动在被驱动段气体<sup>[1-4]</sup>, 从而形成强激波。在接近百 km/s 的冲击波条件下, 由于激波前后的压缩比接近极限值, 对于速度大于百 km 甚至几百 km 的冲击波模拟, 目前各类风洞、激波管、爆轰驱动甚至电磁驱动都显得能力有限。高功率激光装置的快速发展, 给整个物理学带来了极大的冲击和崭新的机遇<sup>[5]</sup>。激光能量释放速率很容易达到  $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> 以上, 脉冲压缩技术可以将峰值功率提高到  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>, 远远超过了爆轰释能速率, 因此利用激光能量沉积的方式可以获得极高的驱动气体焓值。自从 NOVA 激光建成以来, 高功率激光与靶相互作用产生的百 km/s 超高速等离子体射流在实验中被大量观察到, 并与天体物理中常见的幼星体射流、超新星爆发等现象相关联, 近年逐步形成了实验室天体物理研究的重点和热点<sup>[6]</sup>。如果能够建立一套能够开展超高速气体动力学模拟的激光等离子体射流产生技术, 利用超高速等离子体射

\* 收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2121-12-07  
基金项目: 国家自然科学基金项目(11772310)  
联系方式: 张 黎, 4037087@qq.com。  
通信作者: 谭福利, tanfuli2008@163.com。

流与固体靶相互作用,模拟固体物质在超高速气流中表面流场的气体动力学特性,可进一步拓展对超高速流体力学问题的认知,有望帮助我们理解恒星射流对行星的作用机制、小行星形貌、超高速陨石与行星大气相互作用机制<sup>[7-9]</sup>。

在实验室内模拟我们关心的真实流动状态存在诸多困难,两者的长度、时间与密度等尺度存在明显的差别,若要实现模拟所需的准一维的流场,还要给出合适的激光光斑、靶丸尺寸等条件才能满足要求。因此要求将实验室条件变换到需要模拟自然现象的物理尺度,从而建立合适的大尺度超高速流动模型,通过相似性分析及标度变换<sup>[10]</sup>将实验室条件和真实自然现象两种物理状态联系起来。本文尝试对该技术进行初步的验证、探索,采用激光烧蚀靶优化设计、激光参数精密调节、超高时空分辨诊断等方法,建立起可靠的实验室超高速气流模拟及诊断技术,获取高速气流与固体靶的相互作用物理图像,为下一步真实流动状态的实验室模拟打下良好基础。

## 1 激光烧蚀及诊断技术

高峰值功率激光在与固态物质相互作用时,电子首先吸收光子能量,并在随后的 ps 时间尺度后转换为物质内能,这种能量沉积速度可以远远大于热辐射和膨胀做功速度,因此可以形成极高的温度、密度的物质(温密物质)。激光瞬态沉积形成的高能量密度物质在向真空卸载膨胀过程中实现的粒子速度可以覆盖几十~几百 km/s 的速度范围,利用激光束匀滑技术,可以实现 mm 级的平面烧蚀,形成准一维射流,有望在较长飞行时间后形成数 cm 尺度的较均匀流动。激光烧蚀等离子体射流与固体靶作用方案如图 1,靶架由靶杆悬挂在调整架上,靶架与水平成 35°角,激光产生的射流垂直靶面喷出,与小球相撞,产生相互作用。探测光通过小球,与等离子体发生作用后再进入测量系统。小球靶通过其固定的支杆可以前后移动,调整到适当的位置。

等离子体烧蚀靶采用铜靶,表面抛光面型精度起伏小于 1  $\mu\text{m}$ ,小球靶为球形金属铝靶丸,表面抛光,用细针支撑。小球靶制备采用气动式金属微滴按需喷射的方法<sup>[11]</sup>,该喷射技术利用气体压力代替内部致动器把液体从喷嘴挤出,气体不受金属溶液温度的影响,因此可以用于高熔点材料熔滴的喷射。利用均匀金属液滴喷射微制造技术制备了数十  $\mu\text{m}$ ~数百  $\mu\text{m}$  量级的金属微球,图 2 是金属小球的显微照片,金属小球显微照片中心红色内圈、四周为黑色的现象为显微镜光照反射不均匀所致。

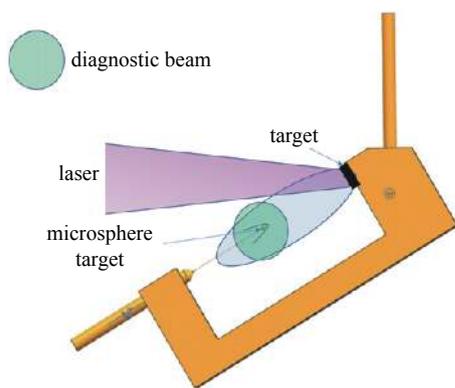


Fig. 1 Laser-ablation plasma jet-solid target interaction scheme

图 1 激光烧蚀等离子体射流与固体靶作用方案

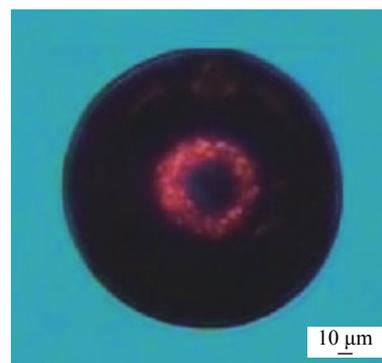


Fig. 2 Micrograph of spherule

图 2 金属小球显微照片

加载光源为 ns 激光器(波长 1064 nm,脉宽 10 ns,最大单脉冲能量 5.0 J),可提供直径 5 mm,到靶功率密度约  $10^9 \text{ W/cm}^2$  的加载能力。实验过程中涉及的流体动力学过程非常迅速,我们实验诊断的目标速度可能在几十到百 km/s,因此动态模糊可能是最为关键的问题。另一方面,由于等离子体本身温度极高,自身就是一个脉冲光源,在可见光波段的亮度非常高,会对成像系统产生干扰,因此探测光源必须在其波段具备远高于等离子体自发光的亮度,一般至少高一个量级,这样记录终端可以通过滤光片和衰减来实现合适的曝光和清晰的成像。本文使用 ps 激光器(波长 532 nm,脉宽 30 ps,最大单脉冲能量 50 mJ)作为瞬态照明光源,动态模糊可以控制在  $\mu\text{m}$  量级,亮度能够满足实验需求。

实验诊断采用离轴数字全息方法(图 3),离轴数字全息图再现光场中的位相项对光程的细微变化极其敏感,本文中基于这一优势来反映流场中的密度变化。离轴数字全息光学系统利用同一相干光源经过分束镜形成两束光,其中穿过目标的光为物光,未穿过目标的光为参考光,物光和参考光经过几乎相同的光程在记录元件处进行干涉。在进行全息图数字再现时,首先在空间频域滤波将物像、孪生像和零级项相互分离,再通过衍射计算对目标

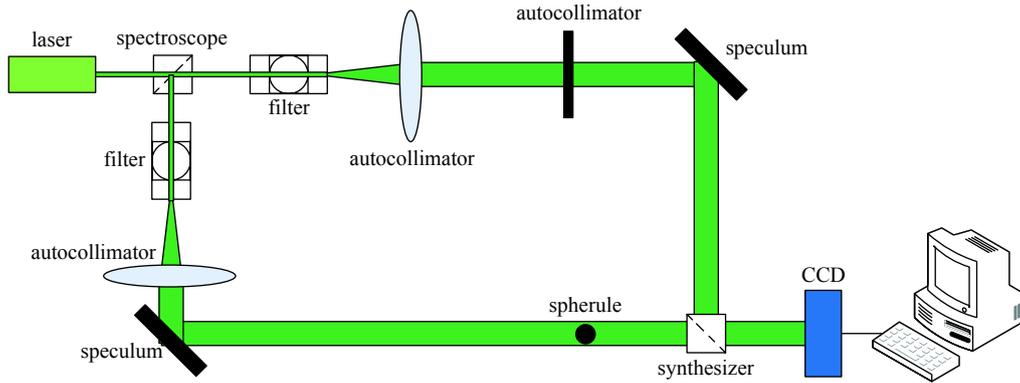


Fig. 3 Schematic diagram of polarization digital holography

图3 离轴数字全息系统

所在位置进行重聚焦以消除离焦对结果的干扰,最后采用二维位相提取及解包裹等算法完成位相提取。

相关研究表明,激光能量空间分布均匀的光束更利于均匀射流的产生,其原因是当激光能量剖面存在强区时,辐照光斑内烧蚀极度不均匀,导致射流分布梯度较大。为了保证加载激光的光束质量,采用衍射光学元件对激光进行空间域匀滑,图4给出了输入光束和目标光束的光强分布。

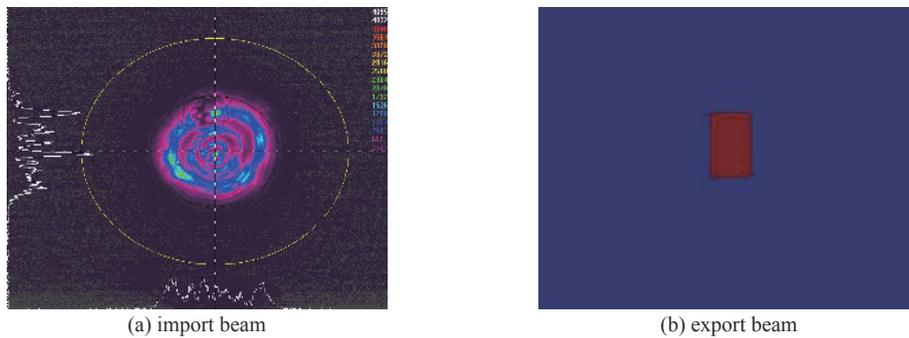


Fig. 4 Diffractive optical optimization

图4 衍射光学优化

## 2 结果及讨论

首先开展了大气条件下激光烧蚀实验,激光烧蚀等离子体先与大气作用形成激波,激波高速推进,进而与固体靶作用。图5为某时刻的静态、动态图像以及通过静、动态图像结合处理获取的强度差和相位差分布。图5(a)中红色为烧蚀靶和球形靶区,其余不均匀斑块为背景噪声。通过比较可以看到,处理后的图像对流场有较高的分辨率。图6给出了不同时刻激光烧蚀射流和激波的发展以及激波与固体靶相互作用图像。激波速度可以根据激波阵面的移动距离除以移动时间进行简单的计算,根据测量,激波初始速度(200 ns)约为2 km/s,由于空气的阻滞效应,激波的强度和速度逐渐减弱。

为了获取更高的射流速度,开展了真空条件( $10^{-3}$  Pa)下的激光烧蚀实验,图7给出了不同时刻激光烧蚀射流的发展以及等离子体射流与固体靶相互作用图像,真空条件下对密度分布分辨率要求较高,因此给出相位图。图中可以看到,能量在一定穿透深度内沉积,产生烧蚀等离子体并沿靶面法向高速运动。真空条件下等离子体射流无约束发展,在大气条件实验中与空气作用产生的激波完全消失。射流速度可以根据射流前锋的移动距离除以移动时间进行简单的计算,根据测定,真空条件下获得的等离子体射流速度达到27 km/s,大大高于大气条件实验的射流推进速度。等离子体射流与固体靶相互作用在球形靶迎风面形成激波界面,激波界面在球形靶迎风面发生反弹,在靶两侧形成新的结构,并且可能伴随有不稳定性流动。

气体动力学参数可以通过分析弓形激波的脱体距离来获取(图8),球状物体的弓形激波几何参数与马赫数关系如式(1)<sup>[12]</sup>

$$\frac{\Delta}{R} = 0.76 \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} + \frac{0.23}{(Ma - 1)^{1.43}} \quad (1)$$

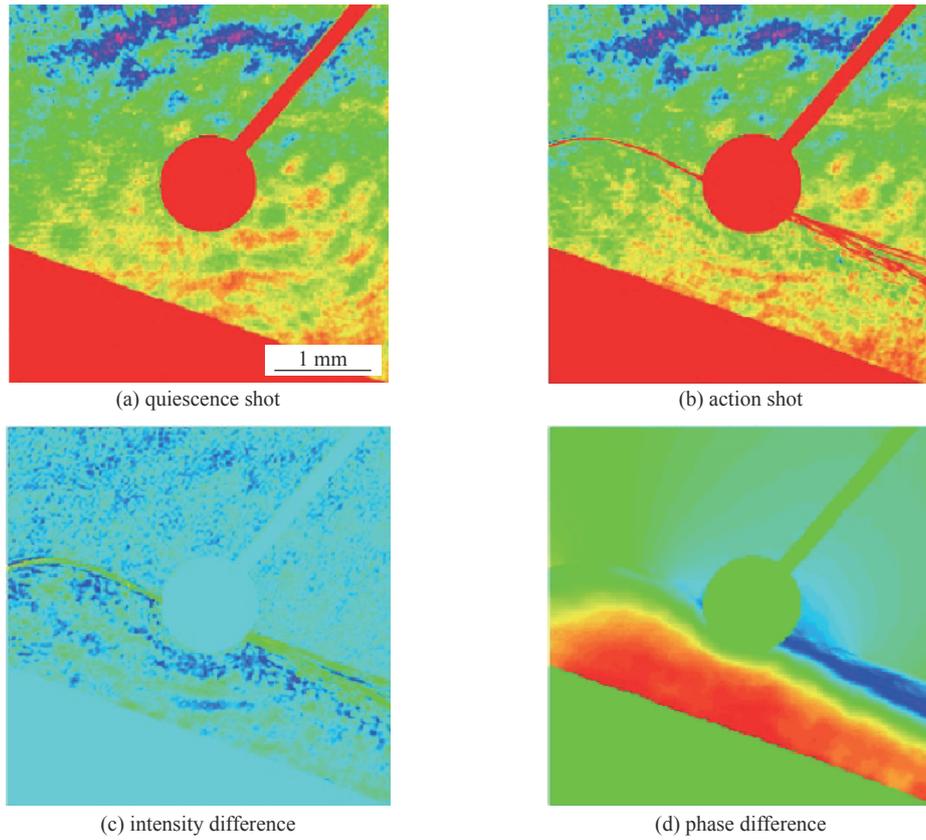


Fig. 5 Holography of intensity and phase  
图 5 全息图重建的强度及位相分布

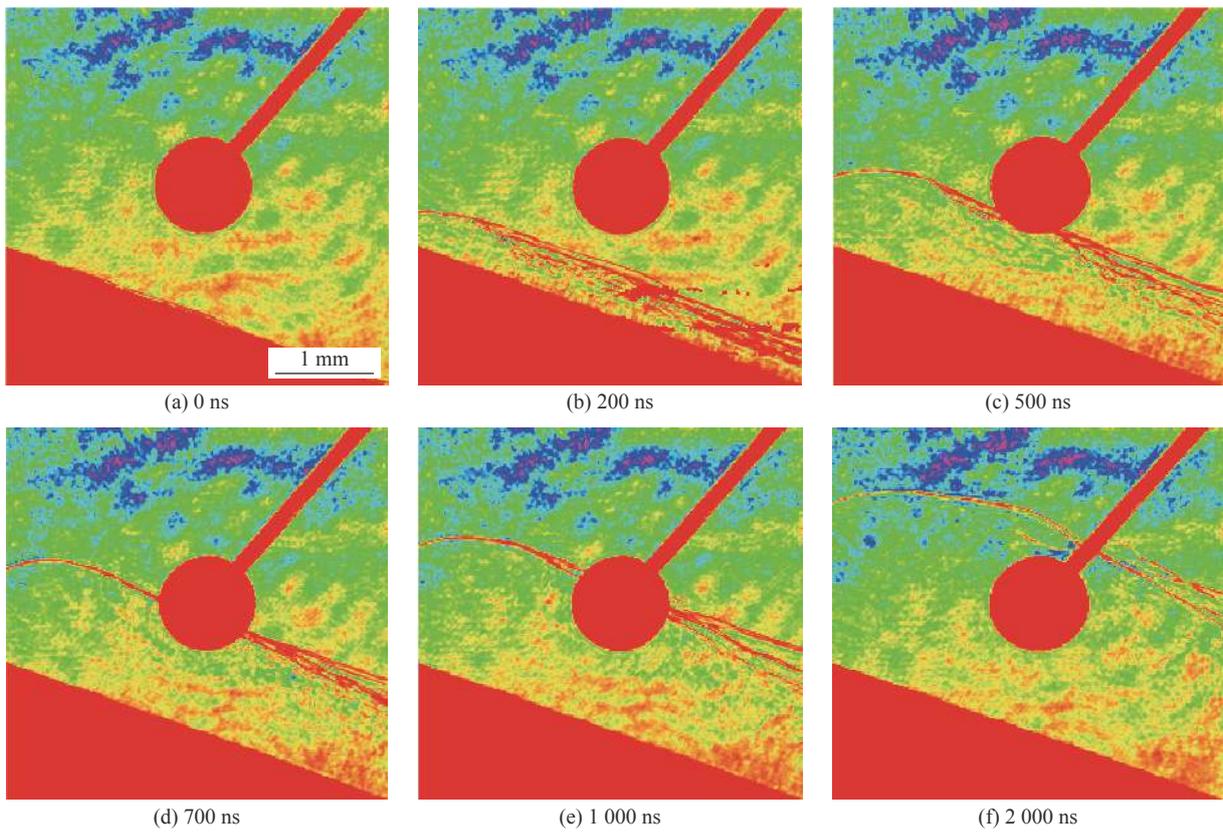


Fig. 6 Holograms at different time in air  
图 6 空气中不同时刻下全息图像

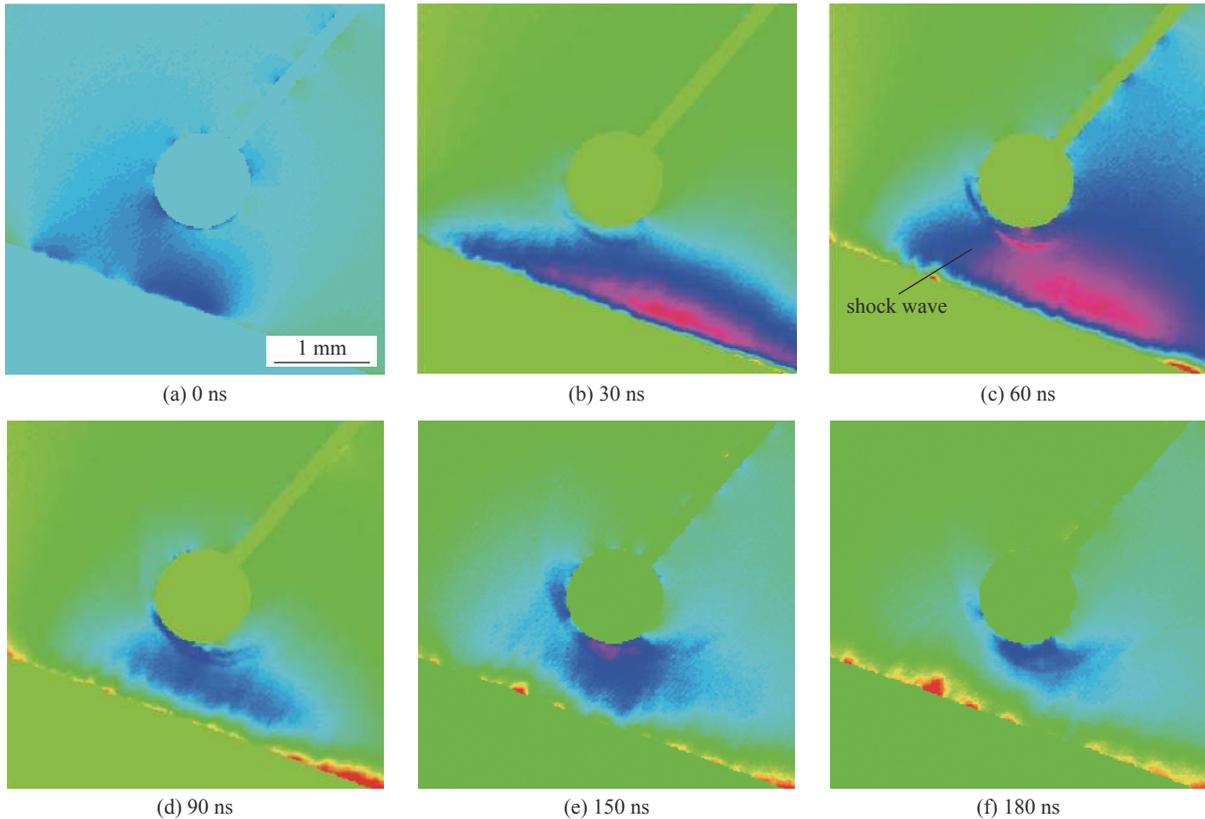


Fig. 7 Holograms at different time in vacuum

图 7 真空中不同时刻下全息图像

其中:  $\Delta$  为激波脱体距离,  $R$  为球体半径,  $\gamma$  为比热比(高温等离子体条件下通常取 1.12),  $Ma$  为马赫数。

根据计算, 等离子体射流绕固体靶流场马赫数约为 2.7。据此推测高温等离子体射流当地声速极高, 导致速度高达数十 km/s 的等离子体射流仅为数  $Ma$ , 这与天体物理研究中高达数百~数千 km/s 的超高速等离子体射流温度达到 keV 的情况类似<sup>[13]</sup>。

### 3 结 论

本文基于高功率激光装置建立了等离子体射流烧蚀平台用于超高速气体动力学模拟, 利用超高速等离子体射流与固体靶相互作用, 搭建了高时空分辨率离轴数字全息诊断系统, 试图在实验室中模拟天体物理、小行星形貌、超高速陨石与行星大气相互作用等自然现象。结果表明, 利用小型激光装置即可获得数十 km/s 的等离子体射流, 可作为超高速气体动力学实验模拟的理想加载源。实验获取了不同加载状态和时刻下等离子体射流以及射流与固体靶相互作用的清晰物理图像, 对于密度场有较高的分辨率, 能够准确描述流场中固体靶迎风面激波和背风面稀疏等物理特征, 证明本文发展方法可较好地开展超高速气体动力学研究, 具有一定的发展潜力。目前小型激光加载平台下获取的等离子体射流速度和直径都较为有限, 下一步研究计划进一步改进加载装置、优化激光加载参数, 利用大型激光加载平台, 获取更高速度和更大空间尺度等离子体射流, 结合相似性分析及标度变换方法, 系统开展超高速等离子体射流与固体靶相互作用研究。

#### 参考文献:

- [1] 姜宗林, 俞鸿儒. 高超声速激波风洞研究进展[J]. 力学进展, 2009, 39(6): 766-776. (Jiang Zonglin, Yu Hongru. Progress of the research on hypersonic shock tunnels[J]. *Advances in Mechanics*, 2009, 39(6): 766-776)
- [2] Lu F K, Marren D E. Advanced hypersonic test facilities[M]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2002: 198.

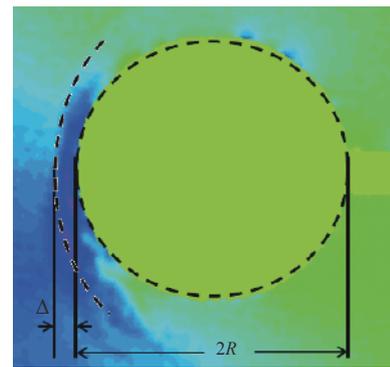


Fig. 8 A typical image of high-speed flow around a sphere

图 8 球体高速绕流典型图像

- [3] Itoh K, Ueda S, Komuro T, et al. Improvement of a free piston driver for a high-enthalpy shock tunnel[J]. *Shock Waves*, 1998, 8(4): 215-233.
- [4] Habermann M, Olivier H, Grong H. Operation of a high performance detonation driver in upstream propagation mode for a hypersonic shock tunnel[C]//Proceedings of the 22nd International Symposium on Shock Waves. 1999: 447-452.
- [5] 张杰, 赵刚. 实验室天体物理学简介[J]. *物理*, 2000, 29(7): 393-396. (Zhang Jie, Zhao Gang. Introduction to laboratory astrophysics[J]. *Physics*, 2000, 29(7): 393-396)
- [6] 孙伟, 仲佳勇. 在兆焦耳级激光设备上的实验室天体物理研究进展[J]. *天文学进展*, 2020, 38(3): 243-254. (Sun Wei, Zhong Jiayong. Recent advances in laboratory astrophysics on Mega-joule class laser facility[J]. *Progress in Astronomy*, 2020, 38(3): 243-254)
- [7] Miura H, Nakamoto T. Shock-wave heating model for chondrule formation: hydrodynamic simulation of molten droplets exposed to gas flows[J]. *Icarus*, 2007, 188(1): 246-265.
- [8] Yasuda S, Miura H, Nakamoto T. Compound chondrule formation in the shock-wave heating model: three-dimensional hydrodynamics simulation of the disruption of a partially-molten dust particle[J]. *Icarus*, 2009, 204(1): 303-315.
- [9] Desch S J, Morris M A, Connolly H C Jr, et al. The importance of experiments: constraints on chondrule formation models[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2012, 47(7): 1139-1156.
- [10] 夏江帆, 张杰. 实验室天体物理学中的标度变换[J]. *物理*, 2001, 9(9): 545-548. (Xia Jiangfan, Zhang Jie. Scaling Law in Laboratory Astrophysics. *Physics*[J]. *Physics*, 2001, 9(9): 545-548)
- [11] 黄菲, 杨方, 罗俊, 等. 均匀金属液滴喷射微制造技术的研究现状[J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(1): 38-43. (Huang Fei, Yang Fang, Luo Jun, et al. Research status of uniform metal droplet spray for micro-manufacturing[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(1): 38-43)
- [12] Pashchina A S, Karmatsky R E, Klimov A I. The creation of hypersonic flows by a powerful impulse capillary discharge[J]. *Technical Physics Letters*, 2017, 43(11): 1033-1036.
- [13] Huntington C M, Manuel M J E, Ross J S, et al. Magnetic field production via the Weibel instability in interpenetrating plasma flows[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 041410.