文章编号：1000-5773(2012)04-0369-06

纳秒激光冲击加载的全过程诊断*

李　俊，李加波，周显明，王　翔，翁继东，李剑峰

（中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳　621900）

摘要：与传统的冲击加载方式相比，激光驱动试样具有微尺寸（直径小于1 mm，厚度约10 μm）、超短作用过程（纳秒量级）等特点，但其速度变化历史的实时诊断颇为困难，因此发展适用于激光驱动的高时空分辨率的实时测试技术是十分重要和有价值的。采用桌面式脉冲Nd:YAG激光器作为加载平台，发展了激光加载下的小焦点多普勒光纤探针测量系统（焦斑直径约200 μm，时间分辨力约50 ps），成功实现了从激光脉冲驱动微尺寸飞片飞行直至撞击*Z*-切石英试样的全过程实时诊断。实验结果显示，将6 μm厚Al箔飞片驱动至2.48 km/s时，撞击*Z*-切石英试样的粒子速度为1.27 km/s，与Hugoniot理论计算结果相符，表明该测试技术是可靠、有效的；多层薄膜靶结构设计（基底/烧蚀层/硅油/Al箔）可提升激光与靶物质的能量耦合效率，使飞片保持更好的宏观完整性。为开展超短脉冲激光加载下材料动态特性研究提供了一种有效的技术途径。

关键词：激光驱动冲击波；多普勒位移干涉仪；速度演化历史

中图分类号：O521.3　　**文献标识码**：A

1　引　言

材料在极端高温高压条件下的动态特性研究一直是冲击波物理和地球行星科学领域中的重要内容之一[1]。近年来，强激光技术以及高能量密度物理研究的发展，使利用超高功率超快激光脉冲驱动靶试样至高能量密度物理状态并进行材料微观结构变化的直接诊断成为可能[2-8]，可以从原子层面上回答有关材料宏观动态行为的机理问题，为冲击波物理研究提供一种全新的研究手段，是冲击波物理诊断技术发展的必然趋势之一。

与传统的动高压加载方式相比，采用桌面式Nd:YAG脉冲激光器进行冲击加载，不仅操作简便、实验重复性好，而且时间周期短、经费低，是开展基础性冲击波物理实验研究的一种新的技术途径。但是它也带来了一系列新的技术问题：由于所需激光辐照功率密度高达$10^8\sim10^{12}$ W/cm^2，激光束通常被聚焦至几十到几百微米的极小空间范围，且待测试样厚度仅有几微米，冲击波在样品中的渡越时间为纳秒量级，如何实现这一超短作用过程的实时诊断是一个难题，它不仅要获取微尺寸飞片的速度历史，更为重要的是要观测冲击试样的状态演化过程。只有实现了激光冲击加载的全过程诊断，才能使其成为开展材料动态特性研究的实用技术。

对于激光冲击加载下材料的动态响应特性研究，目前主要采用线成像式和点成像式速度干涉仪系统（Velocity Interferometer System for Any Reflector，VISAR）。在美国的OMEGA和TRIDENT、法国的LULI等大型激光系统中[9-13]，利用线成像式VISAR获取冲击波阵面的平面特性，而点成像式

* **收稿日期**：2010-11-21；**修回日期**：2011-04-11

基金项目：中国工程物理研究院双百人才基金（ZX01111）；冲击波物理与爆轰物理实验室基金（9140C670402120C6706）

作者简介：李　俊（1982－），男，助理研究员，主要从事高压材料动态特性研究. E-mail：lijun102@caep.ac.cn

通讯作者：周显明（1963－），男，研究员，硕士生导师，主要从事冲击波物理研究. E-mail：xianming_zhou@tom.com

VISAR 则用于观测试样的运动速度变化;国内的谷卓伟等人[14]采用 VISAR 测试技术对激光驱动飞片的速度历史进行了初步研究。但是,上述速度干涉测试方法在时间分辨能力上受限于探测器的时间分辨力和标准具光学延迟线的时间差,对于速度变化平缓的运动过程,目前的 VISAR 可以满足测量要求,而对于高速情况,特别是激光加载下的超短、超快加速阶段,则会出现严重的"条纹丢失"现象,从而无法准确测量运动速度。另一类利用石英晶体压电效应的测速方法[15]则是根据飞片经某一飞行空腔的走时和空腔距离得到其运动平均速度,但它却无法观测激光驱动飞片的速度演化历史。可见,上述两种测试方法对于认识和掌握激光驱动冲击波的演变过程、开展激光加载下材料精密 Hugoniot 测量,都是远远不够的。

近年来,随着光电测试技术的发展和高时间分辨记录系统的应用,多普勒光纤探针测量系统(Doppler Pins System,DPS)逐渐成为新型冲击波物理实验测量技术之一。目前,DPS 具有的时间分辨能力小于 50 ps,测速范围高达 9 km/s,测量精度优于 1%,这一诊断能力使其能够满足纳秒激光脉冲加载的冲击波物理实验测量需求。因此,利用 DPS 发展纳秒激光加载的高时空分辨率波剖面测试技术,实现从激光驱动飞片飞行至撞击试样后运动速度剖面的全过程测量,进而认识和理解激光驱动冲击波特性,开展高应变率加载下材料动态特性研究是十分重要和有价值的。

本研究利用桌面式 Nd:YAG 脉冲激光器和小焦点 DPS 技术,发展了适用于纳秒激光加载下的高时空分辨的运动波剖面测试技术和实验装置,实现激光脉冲驱动微尺寸飞片飞行直至撞击 Z-切石英试样的全过程波剖面测量,通过比较实测 Z-切石英的冲击压缩数据与冲击 Hugoniot 关系,考核该技术的可靠性和有效性。

2 实验原理与技术

图 1 为激光驱动飞片和测试系统原理示意图。选用桌面式 Nd:YAG 固体脉冲激光器作为加载光源,工作波长为 532 nm,脉冲半高宽为 3～4 ns,单脉冲最大能量为 0.8 J。激光脉冲经透镜聚焦后烧蚀镀在石英基底上的金属膜层,形成热膨胀等离子体,推动 Al 箔飞片高速飞行,并与试样进行平面撞击,飞片速度通过激光输出能量和焦斑大小进行调节。烧蚀膜层由 C 膜、Al 膜及 Al_2O_3 膜组成,3 层膜的厚度均为 0.5 μm,其中:C 膜用于吸收激光能量并形成高温高压等离子体,以加速飞片;Al 膜和 Al_2O_3 膜则作为飞片保护层,以阻隔等离子体的热传导和渗漏。采用 ∅1 mm×6 μm 的 Al 箔(纯度为 99.97 %)作为飞片材料,其密度和均匀性比镀膜飞片更高,Al 箔飞片与基底之间采用硅油进行粘接。被测试样选用透明石英单晶(∅30 mm×1 mm,晶向〈001〉),试样与飞片之间预留厚度为 0.35 mm 的飞行空腔。

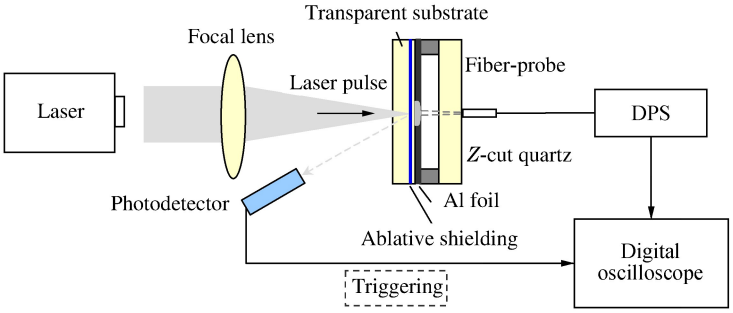


图 1 激光冲击实验装置及测试系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup and diagnostic system for laser-driven flyer impact experiments

纳秒激光冲击加载的速度历史是本实验的重要测量数据。由于飞片直径仅为 1 mm,且整个加速过程仅为纳秒量级,由此给测量带来了困难:一方面,需要确保测试系统具有亚纳秒甚至皮秒的时间分辨

能力以及微米量级的空间分辨能力;另一方面,还需确保在整个飞行过程中驱动的微尺寸飞片的平面性和完整性。因此,在本实验中,飞片速度历史及 Z-切石英试样的波剖面诊断采用 DPS 测试技术(时间分辨力为 50 ps,空间分辨力为 200 μm)。当脉冲激光驱动 Al 飞片运动时,透过透明石英试样,利用诊断激光束的反射光幅度和频域变化,可直接得到飞片运动的起始时刻和速度演化过程;飞片撞击石英试样时,可观测"Al/石英"界面的速度剖面,进而计算样品的粒子速度,对应的冲击波速度则根据阻抗匹配法由飞片的实测撞靶速度和已知的 Hugoniot 关系计算得出。实验信号波形由高速数字示波器记录,其触发信号由光电探头提供。此外,为了实现激光加载的全过程测量,每次实验前,采用小孔光阑检测方法来确保加载光束与诊断光束的空间同轴性,即在加载和诊断光路上放置多个等高光阑,通过五维调节支架对传输方向进行微调,使之同时穿越全部小孔,以保证两束激光的空间同轴性。

3 实验结果与讨论

利用桌面式 Nd:YAG 固体脉冲激光器,建立了激光驱动飞片速度演化历史及样品实时波剖面测试技术,系统包括:纳秒脉冲激光器、激光作用靶室、高真空抽气系统、能量计、光束品质分析仪、DPS 测试系统等。图 2 为 DPS 记录的典型输出波形(靶室的真空度为 0.78 Pa,激光能量约为 690 mJ,飞行空腔距离为 0.35 mm,Al 箔飞片厚度为 6 μm)。初始光信号幅度的跳跃是由于脉冲激光驱动 Al 箔飞片运动时引起的测试光强变化,由此可判读出飞片运动的起始时刻;随后的条纹信号在一段时间内(约 150 ns)保持较高的幅度和良好的信噪比,确保了激光冲击加载全过程测量的完整性和测试精度。

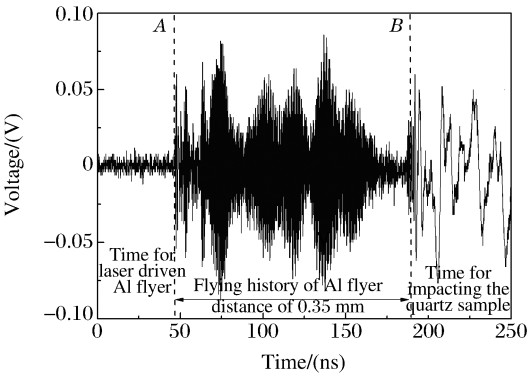
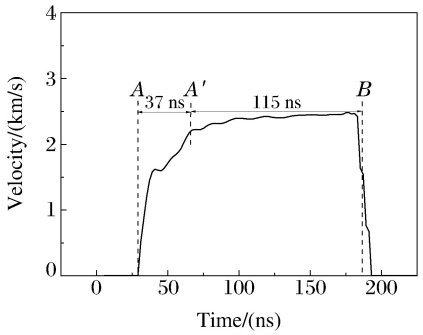


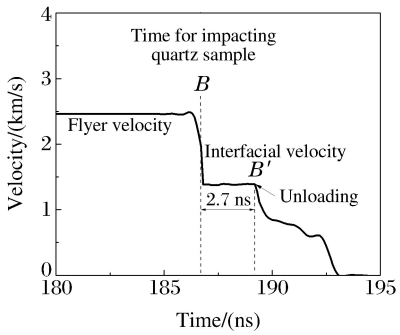
图 2 DPS 记录的典型输出波形

Fig. 2 Typical output signal of the DPS

利用实验波形,根据 DPS 数据处理程序,得到从激光驱动飞片飞行至撞击试样后的速度剖面,如图 3 所示。图 3(a)为实测飞片速度历史,其中 A 点对应 Al 箔飞片运动的起始时刻,B 点对应 Al 飞片与 Z-切石英试样的撞击时刻,AB 段即为飞行空腔内飞片速度的变化过程。在 AB 段中:AA' 为飞片运动的加速阶段,即在前 37 ns 内飞片加速到最终速度的 90%以上;随后 $A'B$(约 115 ns)为飞行稳定阶段,最终击靶速度为 2.48 km/s。利用空腔距离和飞行走时计算得到的飞片平均速度为 2.30 km/s。由此可见,利用 DPS 诊断技术不但可以得到激光驱动飞片运动变化的全过程,同时还可准确得到最终击



(a) Typical velocity history in laser shock experiment



(b) *In-situ* velocity profile of Z-cut quartz sample

图 3 激光驱动飞片飞行至撞击试样后的速度剖面

Fig. 3 Velocity profile for laser-driven Al foil flyer and shocked quartz sample

靶速度,很好地提升了激光冲击加载的测试精度。图 3(b)为飞片撞击石英试样后的界面速度剖面。可见:当飞片撞击 Z-切石英试样时(即 B 点),速度剖面由飞片运动速度 2.48 km/s 变为"Al/石英"界面运动速度 1.38 km/s,对应稳定平台的持续时间约为 2.7 ns;B'点之后,速度逐渐降为零。利用石英单晶的速度折射率修正因子 $\Delta n=0.090\,65$[16],由实测界面速度,得到试样的粒子速度为 1.27 km/s,与材料冲击 Hugoniot 关系的理论计算值是一致的(见表 1,其中:ρ_0 为密度,c_0 为声速,λ 为材料的 Hugoniot 系数,w 为飞片速度,u_p为粒子速度,D 为冲击波速度,p_H 为冲击压力);此外,由于 Al 箔飞片的初始厚度仅为 6 μm(烧蚀热波作用后实际厚度将略微减薄),根据波系相互作用关系(见图 4,其中 S 代表冲击波,R 代表稀疏波),得到飞片后界面稀疏波追赶上样品冲击波的时间差为 3.3 ns,与实测平台的持续时间基本符合。上述结果表明,新建立的激光冲击加载小焦点 DPS 测试技术是可靠、有效的。

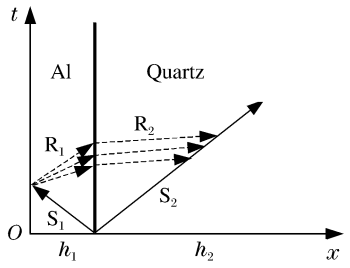


图 4 冲击波与稀疏波相互作用示意图

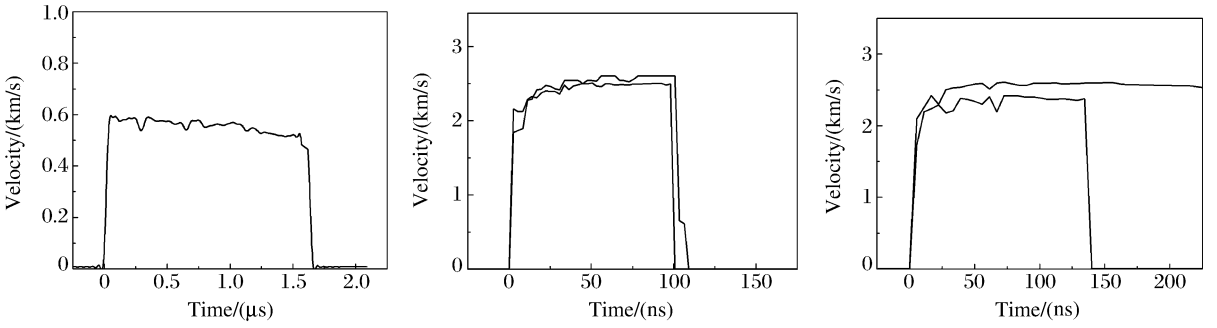
Fig. 4 Schematic of the interaction between shock wave and rarefaction wave

表 1 材料 Hugoniot 参数和理论计算结果

Table 1 Hugoniot parameters and theoretical results of flyer and sample in laser-driven shock wave experiments

Material	ρ_0/(g/cm^3)	c_0/(km/s)	λ	w	u_p/(km/s)	D/(km/s)	p_H/(GPa)
Aluminum flyer	2.78	5.35	1.35	2.48	1.21	6.95	23.4
Quartz sample	2.65	5.57	1.08		1.27	6.94	23.4

提高激光能量耦合效率以获取更高的飞片运动速度是激光加载实验技术发展急需解决的重要问题之一,为此本研究采用上述运动速度实时诊断技术,进一步开展了飞片结构设计对于能量耦合效率的影响研究。本工作设计了 3 种飞片结构:第 1 种是利用透明石英基底直接夹压 Al 箔飞片;第 2 种是采用硅油作为粘接剂和等离子吸能层,涂覆于基底和 Al 箔飞片之间;第 3 种则是在基底上镀 C/Al/Al_2O_3 烧蚀层,再用硅油粘接 Al 箔飞片。图 5 给出了 3 种带窗飞片结构的运动速度历史。从图 5 可以看出:当脉冲激光(单脉冲能量为 680 mJ,光斑直径约为 0.8 mm)经过透明基底直接烧蚀 Al 箔时,由于箔层与基底之间易形成空隙,激光能量的耦合效率较低,实现的飞片运动速度为 600 m/s;而相同加载条件下,在硅油/Al 箔和烧蚀膜/硅油/Al 箔中,实现的最高飞片运动速度基本相同,达 2.6 km/s,与直接烧蚀 Al 箔相比,驱动速度均有大幅度提升,表明这两种飞片结构对于提高激光能量耦合效率十分显著。



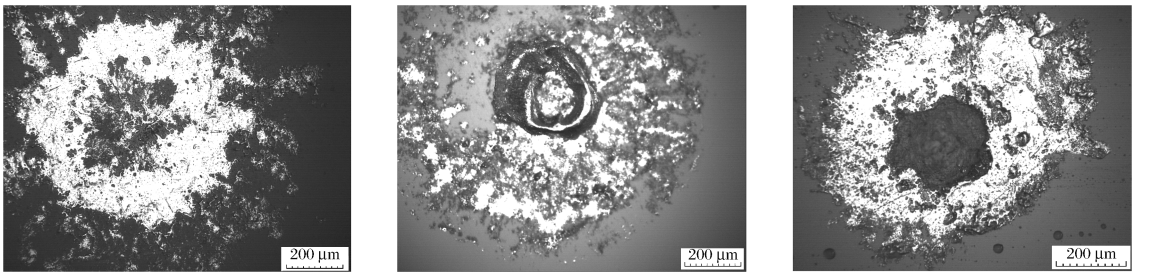
(a) Substrate/Al foil (b) Substrate/silicone oil/Al foil (c) Substrate/deposit layer/silicone oil/Al foil

图 5 不同带窗飞片结构设计的速度波剖面比较

Fig. 5 Comparison of velocity profiles of laser-driven flyers with different flyer designs

对于激光冲击加载而言,保持飞片在飞行过程中的平面性和完整性是检验装置结构设计实用性的一个关键指标。图 6 为相同条件下 3 种不同结构飞片在石英试样中的回收实物照片,其中飞片中心较深的成坑区域是由于激光光斑呈空间高斯分布所致。对于直接烧蚀 Al 箔情况,飞片呈现出明显的熔化迹象,表明激光烧蚀形成的高温等离子体可能已破坏了 Al 箔的完整性,没有明显的中心成坑区域;对于硅油/Al 箔,飞片则表现出空间分布和中心成坑的不均匀性,说明飞片可能受到硅油高温等离子体影响;相比而言,烧蚀膜/硅油/Al 箔的结构设计对于高温等离子体有较好的屏蔽作用,飞片的形貌更规则,中心成坑更均匀,说明在∅0.3 mm 范围内冲击波阵面仍具有较好的平面性。

综上所述,烧蚀膜/硅油/Al 箔的结构设计不仅对提高激光能量耦合效率有明显作用,同时在保持飞片完整性和平面性方面更具优势,是进行此类实验的一种更理想的飞片,对开展激光加载下材料动态特性研究具有一定的参考价值。



(a) Substrate/Al foil　(b) Substrate/silicone oil/Al foil　(c) Substrate/deposit layer/silicone oil/Al foil

图 6　不同带窗飞片结构设计的飞片形貌

Fig. 6　Morphologies of shocked flyers with different laser-driven flyer designs

4　结　论

利用桌面式 Nd:YAG 固体脉冲激光器,开展了激光加载下飞片速度演化及实时波剖面测试技术研究,得到了以下结论和认识:

(1) 发展了纳秒激光加载下的小焦点 DPS 诊断技术,成功实现了从激光脉冲驱动微尺寸飞片运动至撞击试样后速度剖面的全过程实时诊断;

(2) 测量了将 6 μm 厚 Al 箔飞片驱动至 2.48 km/s 时,飞片撞击 *Z*-切石英试样的粒子速度,实验结果与冲击 Hugoniot 理论计算结果相符,追赶稀疏波的到达时刻也与理论计算结果基本符合,证实了该技术具有可靠性,为以后开展激光加载下材料动态特性研究提供了一种有效的测试技术;

(3) 利用小焦点 DPS 诊断技术,对 3 种不同飞片结构的激光能量耦合效率和飞片完整性进行研究,实验结果表明,采用烧蚀膜/硅油/Al 箔的飞片结构,不仅可以实现更高的能量耦合,并且飞片的宏观完整性更好,为激光加载实验的靶结构设计提供了技术参考。

References:

[1] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1999: 5. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 第 2 版. 北京:科学出版社, 1999: 5.

[2] Kalantar D H, Belak J F, Collins G W, et al. Direct observation of the α-ε transition in shock-compressed iron via nanosecond X-ray diffraction [J]. Phys Rev Lett, 2005, 95(7): 075502.

[3] Swift D C. X-ray diffraction from shock-loaded polycrystals [J]. Rev Sci Instrum, 2008, 79(1): 013906.

[4] Kishimura H, Yazaki A, Kawano H, et al. Picosecond structural dynamics in photoexcited Si probed by time-resolved X-ray diffraction [J]. J Chem Phys, 2002, 117(22): 10239-10243.

[5] Yaakobi B, Boehly T R, Meyerhofer D D, et al. EXAFS measurement of iron bcc-to-hcp phase transformation in nanosecond-laser shocks [J]. Phys Rev Lett, 2005, 95(7): 075501.

[6] Kritcher A L, Neumayer P, Castor J, et al. Ultrafast X-ray Thomson scattering of shock-compressed matter [J]. Science, 2008, 322: 69-71.
[7] de Rességuier T, Signor L, Dragon A, et al. Spallation in laser shock-loaded tin below and just above melting on release [J]. J Appl Phys, 2007, 102(7): 073535.
[8] Kalantar D H, Bringa E, Caturla M, et al. Multiple film plane diagnostic for shocked lattice measurements [J]. Rev Sci Instrum, 2003, 74: 023902.
[9] Kalantar D H, Belak J, Bringa E, et al. High-pressure, high-strain-rate lattice response of shocked materials [J]. Phys Plasmas, 2003, 10(5): 1569-1576.
[10] Swift D C, Niemczura J G, Paisley D L, et al. Laser-launched flyer plates for shock physics experiments [J]. Rev Sci Instrum, 2005, 76(9): 093907.
[11] Paisley D L, Luo S N, Greenfield S R, et al. Laser-launched flyer plate and confined laser ablation for shock wave loading: Validation and applications [J]. Rev Sci Instrum, 2008, 79(2): 023902.
[12] Colvin J D, Reed B W, Jankowski A F, et al. Microstructure morphology of shock-induced melt and rapid resolidification in bismuth [J]. J Appl Phys, 2007, 101(8): 084906.
[13] Bolme C A, McGrance S D, Moore D S, et al. Single shot measurements of laser driven shock waves using ultrafast dynamic ellipsometry [J]. J Appl Phys, 2007, 102(3): 033513.
[14] Gu Z W, Zhang X W, Sun C W, et al. Experimental research on the characters of laser-driven macro-flyers [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 22(1): 103-107. (in Chinese)
谷卓伟, 张兴卫, 孙承纬, 等. 激光驱动带窗口宏观飞片特性实验研究 [J]. 高压物理学报, 2008, 22(1): 103-107.
[15] de Rességuier T, Couturier S, Boustie M. Characterization of laser-driven shocks of high intensity using piezoelectric polymers [J]. J Appl Phys, 1996, 80(7): 3656-3661.
[16] Li X M, Yu Y Y, Li Y H, et al. Elastic properties and refractive index of shocked Z-cut quartz [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4): 2691-2696. (in Chinese)
李雪梅, 俞宇颖, 李英华, 等. 冲击压缩下 Z-切石英的弹性响应特性和折射率 [J]. 物理学报, 2010, 59(4): 2691-2696.

An Integrated Velocity Profile Measurement from Nanosecond Pulse Laser-Driven Mini-Flyer to Shocked Sample

LI Jun, LI Jia-Bo, ZHOU Xian-Ming, WANG Xiang, WENG Ji-Dong, LI Jian-Feng

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: It is very important to develop a high time and space resolved velocity diagnostic technique for laser-driven shock wave experiments. However, it is still a difficult problem because of the limited size of laser-launched mini-flyer and ultra-short loading time in shocked sample. Thus, a micro focus Doppler pins system with time resolution of 50 ps and spatial resolution of 200 mm has been developed in our nanosecond laser-driven shock wave experiments, to perform an integrated velocity profile measurement from laser driven mini-flyer to impacted sample. The measured particle velocity of Z-cut quartz sample is 1.27 km/s while the impact velocity of 6 μm-thick Al foil flyer is 2.48 km/s, which is in agreement with the calculated Hugoniot results. This validates our technique. Using our technique, the experimental results for three different types of mini-flyers show that the "substrate/deposit layer/silicone oil/Al foil flyer" structure has higher laser energy coupling efficiency and better integrity. This is valuable for designing a laser-driven shock wave experimental assembly. These results indicate that our technique is a viable approach for studying dynamics of laser-driven shock wave in materials.

Key words: laser-driven shock wave; Doppler displacement interferometer; velocity profile