

论文

光纤激光干涉测量激光冲击强化自由表面速度

宋宏伟^{①*}, 吴先前^①, 王健^②, 黄晨光^{①*}, 魏延鹏^①, 王曦^①

① 中国科学院力学研究所, 水动力学与海洋工程重点实验室, 北京 100190;

② 北京交通大学, 光信息科学与技术研究所, 北京 100044

*联系人, 宋宏伟, E-mail: songhw@imech.ac.cn; 黄晨光, E-mail: huangcg@imech.ac.cn

收稿日期: 2012-3-27; 接受日期: 2012-05-14; 网络出版日期: 2012-07-17

中国科学院装备研制项目(编号: YZ200930)和国家自然科学基金(批准号: 10972228, 91016025, 11002150)资助项目

摘要 光纤激光干涉(PDV)是最近几年发展起来的一种新型测速技术, 在某些领域已逐渐取代任意反射面测速(VISAR), 但在低速且短瞬时快速变化的质点速度测量方法和数据处理技术还不成熟. 本文针对激光冲击强化过程中靶材自由表面速度这一具有典型短瞬时、速度剧烈波动、速率变化大等特征的非平稳信号进行 PDV 测量, 比较了短时傅里叶变换和连续小波变换的处理结果. 研究表明, PDV 对弹塑性金属材料的激光冲击强化自由表面速度能够进行准确测量, 获得了符合理论分析的测量结果, 特别是捕捉到了弹性前驱波; 连续小波变换处理效果显著优于短时傅里叶变换.

关键词 激光干涉, 激光冲击强化, 冲击波, 质点速度, 时频变换

PACS: 06.30.Gv, 07.05.Fb, 45.50.-j

doi: 10.1360/132012-341

激光冲击强化(Laser Shock Peening, LSP)是近些年来迅速发展起来的一种新型金属表面处理技术. 其基本原理是, 在短脉冲、高功率密度激光作用下, 靶材表面涂覆的吸收层迅速气化、电离, 产生高温高压的等离子体并快速膨胀, 受透明介质的约束作用形成向靶材内部传播的高强度冲击波, 驱动靶材以很高的应变率发生塑性变形, 并在表面形成残余压应力和稳定密集的位错结构, 从而显著提升材料的表面硬度、疲劳寿命等机械性能^[1-4]. 最近, 人们的兴趣已扩展到对各种新材料的激光冲击效应与强化效果的研究中去, 如镍钛合金^[5]、超级合金^[6]、金属玻璃、甚至非金属的单晶硅^[7-9]等.

LSP 的靶材自由表面速度测量对于研究激光诱导的压力特征、冲击波传播和衰减规律以及材料在超高应变率下的动态本构关系、变形与破坏行为具有重要意义. 当短脉冲高能激光器的功率密度达到 10 GW/cm^2 , 其诱导的等离子体压力峰值接近 10 GPa , 靶材的应变率超过 10^7 s^{-1} . 在 LSP 研究中, 通常激光脉宽为几个纳秒, 压力持续作用时间为十几个纳秒, 弹性前驱波到达毫米量级厚度的靶材背表面所需的时间约为一两百个纳秒, 在十几个纳秒内自由表面速度就由几米每秒上升至数百米每秒. 可见, 对 LSP 靶材自由表面速度进行准确测量是一项具有很高挑战性的工作, 对测试设备的灵敏度、时间分辨率和频

引用格式: 宋宏伟, 吴先前, 王健, 等. 光纤激光干涉测量激光冲击强化自由表面速度. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 861-868
Song H W, Wu X Q, Wang J, et al. Measurement of free surface velocity in laser shock peening with photonic Doppler velocimetry (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 861-868, doi: 10.1360/132012-341

率响应范围都提出了非常高的要求. Berthe 等人^[10]曾经尝试采用 VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) 进行测量,但未能观察到数值计算能够模拟出的弹性前驱波. Tollier 等人^[11,12]用 VISAR 观测激光驱动中层裂过程,同样未能获得弹性前驱波. 对于低速且速率剧烈变化的速度历程, VISAR 往往难以准确地捕获. 最近, Arrigoni 等人^[13]采用 Fabry-Perot 干涉仪初步观测到了 LSP 背表面弹性前驱波. Fabry-Perot 干涉仪具有足够的时间分辨率,但价格过于昂贵. 随着现代光纤通讯技术的发展,以及 10 GHz 级高带宽光电探测器和示波器的成熟, Strand 等人^[14]于 2006 年发展了一种光纤激光干涉测速仪 (Photonic Doppler Velocimetry, PDV), 具有体积小、结构紧凑、环境适应性强、易于使用和维护等优点. 特别是在传统 VISAR 的测试盲区—几米每秒乃至毫米每秒的低速测量中, PDV 的表现也能令人满意. 近几年来,该技术得到迅速发展,美国的 Sandia 国家实验室、Lawrence Livermore 国家实验室、Los Alamos 国家实验室分别研制了此类装置^[14-20], 我国的中国工程物理研究院^[21-23], 中国科学院力学研究所^[3,24]等单位也分别研制出相应的激光干涉测速装置.

然而,采用 PDV 对 LSP 自由表面速度这类具有显著非平稳特征的信号进行表征,对测量方法和数据处理都提出了较高要求. 特别是弹性波与塑性波到达背表面时,在短时间内(几个纳秒)速度迅速变化(从 10^0 到 10^2-10^3 m/s),形成上升前沿;而通常认为 PDV 的时间分辨率为 1-10 ns 量级,仅靠仪器本身很难获得满意的结果,必须通过有效的数据处理方法来提高信号的分辨率,以获取上升前沿速度变化历程的细节.

本文利用我们自行研制的 PDV 测量系统,以及开发的基于短时傅里叶(STFT)和连续小波变换(CWT)数据处理程序,能够较好地对 LSP 自由表面速度进行测量和数据处理. 实验还获得了与理论相符的弹性前驱波,而传统 VISAR 的测量结果中往往难以观察到这一现象^[10].

1 实验系统

1.1 激光冲击强化实验装置

如图 1 所示,激光冲击强化实验装置主要由短脉冲高功率激光器、光路系统、冲击环境箱、同步脉冲

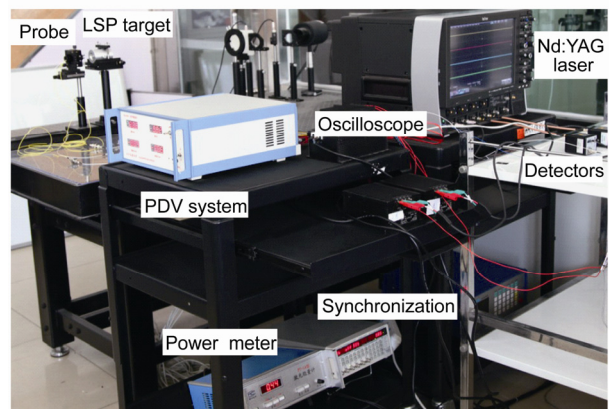


图 1 (网络版彩图)激光冲击强化实验系统
Figure 1 (Color online) Experimental system for laser shock peening.

仪、高速示波器、能量计、激光干涉测速系统 PDV、压电薄膜传感器 PVDF 等装置构成. 实验采用美国光谱物理 Quanta-Ray 调 Q 激光器,单脉冲能量 2.5 J,脉宽 7-9 ns,波长 1064 nm.

图 2 为 LSP 自由表面速度测量实验原理图. 短脉冲激光经聚焦透镜汇聚到厚度为 1.0 mm 的 2024 铝合金靶材上,光斑直径约为 2 mm. 在强激光作用面依次紧密覆有 0.1 mm 的铝膜吸收层和 4.0 mm 厚的 BK7 玻璃约束层,共同装卡在冲击环境箱内. PDV 探头垂直置于靶体背表面并指向冲击中心位置,进行自由表面速度的测量. 高功率密度短脉冲激光辐照在靶材上,产生等离子体并形成冲击波向靶材内部传播,到达靶材背表面时,引起质点运动. 冲击波在靶材两个表面来回多次反射,其强度不断衰减,形成自由表面质点速度历程. 实验测量通过激光脉宽上升沿实现同步触发.

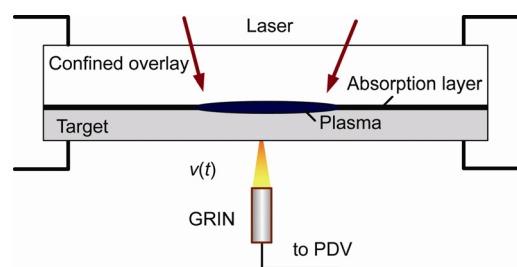


图 2 (网络版彩图)激光冲击强化实验中的表面速度测量示意图
Figure 2 (Color online) Schematic of velocity measurement in laser shock peening.

1.2 光纤激光干涉测速原理与系统

图3为PDV测量系统原理图. 初始频率为 f_0 的通讯激光经光纤环行器2端口, 一部分被聚焦透镜端面反射经3端口入射到探测器, 频率仍为 f_0 , 形成参考光; 另一部分经聚焦透镜入射到运动靶面, 其反射光被聚焦透镜收集, 也经过3端口入射到探测器, 因多普勒频移效应而具有频率 $f_b(t)$, 形成信号光. 参考光和信号光产生差拍信号, 被探测器探测和示波器记录, 其瞬时光强为

$$I(t) = I_0(t) + I_b(t) + 2\sqrt{I_0(t)I_b(t)} \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u(t) dt + \varphi_0 \right], \quad (1)$$

其中, $I_0(t)$ 和 $I_b(t)$ 分别为参考光和信号光光强幅值, $u(t)$ 为靶体瞬时速度, λ 为激光波长, φ_0 为初始相位差. 式(1)中, 由靶体运动引起的相位变化 $\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u(t) dt$ 除以 2π 并取整数部分即得到观测到的条纹数:

$$N = \text{int} \left[\frac{2}{\lambda} \int_0^t u(t) dt \right], \quad (2)$$

其随时间的变化率即为靶体的运动速度:

$$u(t) = \frac{\lambda}{2} \frac{dN}{dt} = \frac{\lambda}{2} [f_b(t) - f_0], \quad (3)$$

$$\Delta f_b(t) = f_b(t) - f_0 = \frac{1}{\Delta T(t)}, \quad (4)$$

$\Delta f_b(t)$ 为拍频, 由瞬时干涉条纹的疏密决定, 可取相邻两个波峰或波谷时间间隔的倒数. 由(1)-(4)式可见, 采用PDV测量, 速度历程隐藏在干涉信号的频域内, 而与光强变化无关, 因此系统的抗干扰能力较强. 主要的系统误差来源于激光器波长的不稳定性 and 基频噪声^[18,19].

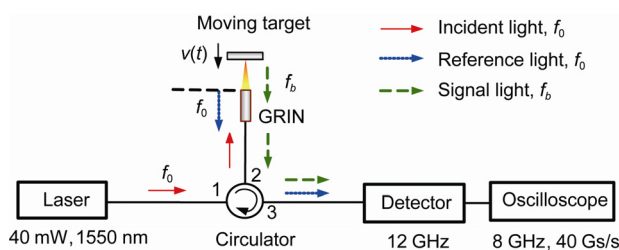


图3 (网络版彩图)PDV测量系统原理图
Figure 3 (Color online) Configuration of PDV system.

我们研制的PDV系统, 采用美国JDSU公司CQF938/400型窄线宽通讯激光器, 输出光的波长为1553.29 nm, 线宽为209.6 kHz, 最大输出功率100 mW. 探测器采用New Focus公司1544-A型InGaAs PIN产品, 带宽为12 GHz; 示波器采用Lecoy公司WaveMaster 808Zi型产品, 带宽为8 GHz, 最大写入速度40 Gs/s.

2 光纤激光干涉测速数据处理方法

2.1 短时傅里叶变换与连续小波变换

傅里叶变换是信号处理尤其是时频分析中最常用的工具, 目前对PDV干涉信号的数据处理方法以短时傅里叶变换为主. 最近, 有学者提出非线性回归法^[25]以及连续小波变换^[23]等方法对非平稳信号进行处理. 本节针对LSP自由表面速度干涉信号的数据处理, 详细比较了短时傅里叶变换与连续小波变换的效果, 并就小波基的选择和脊线的提取进行了探讨.

短时傅里叶变换的基本思想是通过选取一个固定宽度的滑动窗口, 将非平稳信号逐段截取为近似平稳的信号, 然后分别对截得的信号进行傅里叶变换, 得到每段中的频谱. 其基本定义为

$$STFT(\tau, f) = \int f(t)g(t-\tau)e^{-i2\pi ft} dt, \quad (5)$$

$f(t)$ 表示信号, $g(t-\tau)$ 表示中心在 τ 处的窗函数. 在处理时, 取窗口函数为Hamming窗, 窗函数受到Heisenberg不确定准则的限制^[26], 其时间分辨率 Δt 和频率分辨率 Δf 满足

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq 1, \quad (6)$$

可见, 短时傅里叶变换窗函数的时间与频率分辨率不能同时达到最优. 当信号变化剧烈时, 时间周期相对变小, 时间窗口应该取窄一些; 当信号变化平稳时, 时间周期相对较大, 时间窗口应该变宽一些. 但短时傅里叶变换使用固定窗口宽度, 是一种全局的变换, 无法准确表述信号的时频局部性质.

连续小波变换具有时频窗口可调的性质, 在低频时使用较宽的窗口, 在高频时使用较窄的窗口, 因而在时域和频域上都有较好的分辨率, 能更好地分析非平稳信号的时频特性. 定义小波变换^[26]

$$W_\psi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (7)$$

其中, $a \in \mathbf{R}$ 且 $a \neq 0$, a 为尺度因子, 表示与频率相关的伸缩, b 为时间平移因子. 引入窗口函数或小波基

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

正的 Morlet 小波或者修正的高斯小波, 其时频窗口满足

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq 1/4\pi, \quad (8)$$

通过与(6)式对比可见, 小波变换除了具有可变的窗口外, 其时频分辨率也高于短时傅里叶变换.

2.2 小波基选择和脊线提取

我们采用以下的方法选取小波基: 首先通过短时傅里叶变换估算信号速度峰值的范围, 再进一步计算小波基的中心频率及带宽, 然后根据短时傅里叶变换的时频图, 选择最优的小波基.

对差频干涉信号进行小波变换后, 通过小波脊线提取获得靶材自由表面速度. 由于信号功率的不稳定, 会出现信号微弱和噪声引起的断点. 为此首先找到时频谱的模极大值, 作为可靠的小波脊线的时间起点和差频频率起点, 再根据加速度的变化范围, 设置一个差频频率的搜寻范围, 求出局部极大值, 找到所考虑时间范围内各时刻的差频频率, 从而实现小波脊线的提取.

考虑到原始信号经过预处理后, 不但滤除了低频噪声还滤除了初始阶段的低速信号, 因此用上述方法不能很好的提取初始阶段的速度. 为了解决这一问题, 在实际处理中, 我们分别对预处理后的干涉信号和原始干涉信号进行小波变换, 得到它们各自的小波系数, 再把对应的小波系数相乘, 最后用局部模极大值法进行小波脊线的提取.

2.3 算例比较

图 4 为分别采用上述两种数据处理方法, 对 LSP 自由表面速度信号处理结果的比较. 可以看到, 连续小波变换比短时傅里叶变换具有更高的时间分辨率和速度分辨率, 本算例中时间分辨率为与采样频率一致的 0.2 ns. 同时, 小波变换能够更准确地反映如下一节所述的冲击波传播物理过程, 可清晰地分辨出弹性前驱波, 塑性加载波, 弹性卸载波等行为. 对于此类在不同阶段速度变化速率显著不同的信号, 短时傅里叶变换处理结果并不理想, 特别是没有很好地解析弹性前驱波行为.

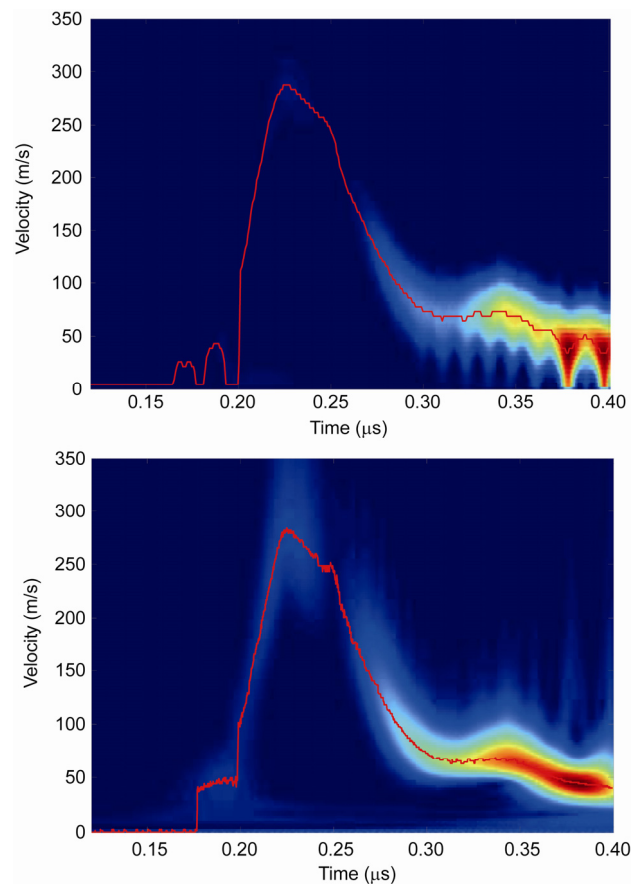


图 4 (网络版彩图)短时傅立叶变换和小波变换数据处理结果比较

(a) 短时傅里叶变换; (b) 小波变换

Figure 4 (Color online) Comparison of data processing methods for LSP free surface velocity. (a) STFT; (b) CWT.

3 实验结果分析

3.1 行波分析

尽管可以近似为一维应变平面波, 激光冲击强化过程中冲击波的传播过程仍然十分复杂. 如图 5 所示, 对于弹塑性材料, 将会形成弹性前驱波(1)和塑性加载波(2)的双波结构. 由于本文的激光脉宽仅为几个纳秒, 产生的冲击波压力持续时间很短, 同时靶材足够厚, 在弹塑性波还未传播到靶材的背表面时就已卸载, 因此还会形成卸载波(3). 如果进一步考虑光斑边界处的侧向卸载和剪切波, 则冲击波的传播过程变得更加复杂.

弹性前驱波首先到达背表面, 其幅值对应着

Hugoniot 弹性极限 HEL. 由 Rankin-Hugoniot 关系, 弹性段的冲击压力 p 与质点速度 u 有如下关系

$$p = \rho_0 C_e u, \quad (9)$$

其中 ρ_0 , C_e 分别为靶体材料的初始密度和一维应变弹性波速. 塑性波到达背表面时, 自由表面速度达到最大. 当冲击压力超过 HEL 时

$$p = \rho_0 (C_0 + Su)u + \frac{2}{3} Y_0, \quad (10)$$

C_0 为材料在压力为零条件下的声速, S 为材料的经验系数, Y_0 为样品材料的屈服应力. 质点速度 u 与自由表面速度 u_{surf} 有

$$u = u_{surf} / 2, \quad (11)$$

因此, 对自由表面速度准确的测量, 能够获得材料的 HEL 值和冲击波压力幅值等参数.

3.2 实测速度历程

图 6 是典型试验结果, 其中脉冲激光半峰宽为 7.3 ns, 光斑区域空间分布近似为均匀分布. 通过激光脉宽上升前沿触发示波器记录干涉信号. 由 PDV 的测量原理公式(3)可知, 质点瞬时速度与拍频 $\Delta f_b(t)$ 成正比, 因此干涉信号的疏密反应不同的质点速度, 干涉条纹越密, 速度越快. 经小波变换获得的速度历程可以看出, 由于应力波在靶材的两个表面来回多次反射, 自由表面速度出现周期性的峰值. 由图 5 可知, 相邻两个波峰之间的时间间隔为塑性波在靶材内往返一次的传播时间. 由于弹塑性波及其卸载波在靶材内部传播过程中的相互作用机制, 以及热能、缺陷等其他能量耗散机制, 自由表面速度波峰幅值逐渐降低, 同时波形在时间上被逐渐拉宽.

实验测得的自由表面速度历程与图 5 的行波分析中的规律基本一致. 在 180 ns 时刻, PDV 测得的信号清晰地表明弹性前驱波到达靶材的背表面, 引起的自由表面速度约为 53.4 m/s. 在 224 ns 时刻, 自由表面速度到达第一个峰值 284.0 m/s, 表明塑性波第一次到达靶材的背表面; 在 554 ns 时刻, 质点速度到达第二个峰值 138.3 m/s, 表明塑性波再次到达靶材

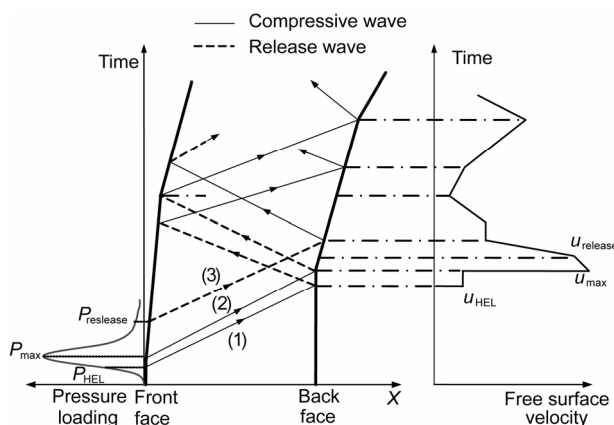


图 5 冲击波传播过程与自由表面速度分析

Figure 5 Shock wave propagation and surface velocity in the LSP process of an elastic-plastic material.

的背表面. 考虑激光诱导的等离子体冲击波压力峰值约在 10 ns 时刻, 根据靶材厚度及弹塑性波达到背表面时间, 可估算弹性波速约为 6.11×10^3 m/s, 塑性波速约为 5.14×10^3 m/s. 对于 2024 铝合金, 根据表 1 的性能参数^[10,27], 可得弹性波速 $C_e = 6.20 \times 10^3$ m/s, 塑性波速 $D = 5.52 \times 10^3$ m/s. 可见, 测量值与理论值吻合较好. 在弹性变形阶段, 当冲击波压力为 HEL 时, 自由表面速度 u_{surf}^{HEL} 为

$$u_{surf}^{HEL} = \frac{2HEL}{\rho_0 C_e}. \quad (12)$$

由此可得材料的弹性前驱波扰动形成的自由表面速度理论值 $u_{surf}^{HEL} = 60.8$ m/s. 测量值 53.4 m/s 略低于此值, 一方面是由于试验条件并非理想的一维应变状态, 另一方面可能是由于吸收层的缓冲效应. 依据测量结果, 根据(10)式可计算传播到背表面处的冲击波压力强度为 2.35 GPa.

4 结论

(1) 对于具有短瞬时且剧烈波动特征的 LSP 自由表面速度, PDV 能够实现有效测量, 并且捕获了传统的 VISAR 难以测量的弹性前驱波, 表明其对于低

表 1 2024 铝合金材料的动态性能参数^[10,27]

Table 1 Dynamic behavior of 2024 aluminum alloy [10,27]

ρ_0 (kg/m ³)	E (GPa)	μ	C_e (m/s)	C_0 (m/s)	S	Y_0 (MPa)	HEL (MPa)
2.77×10^3	72	0.33	6.2×10^3	5.33×10^3	1.34	265	522

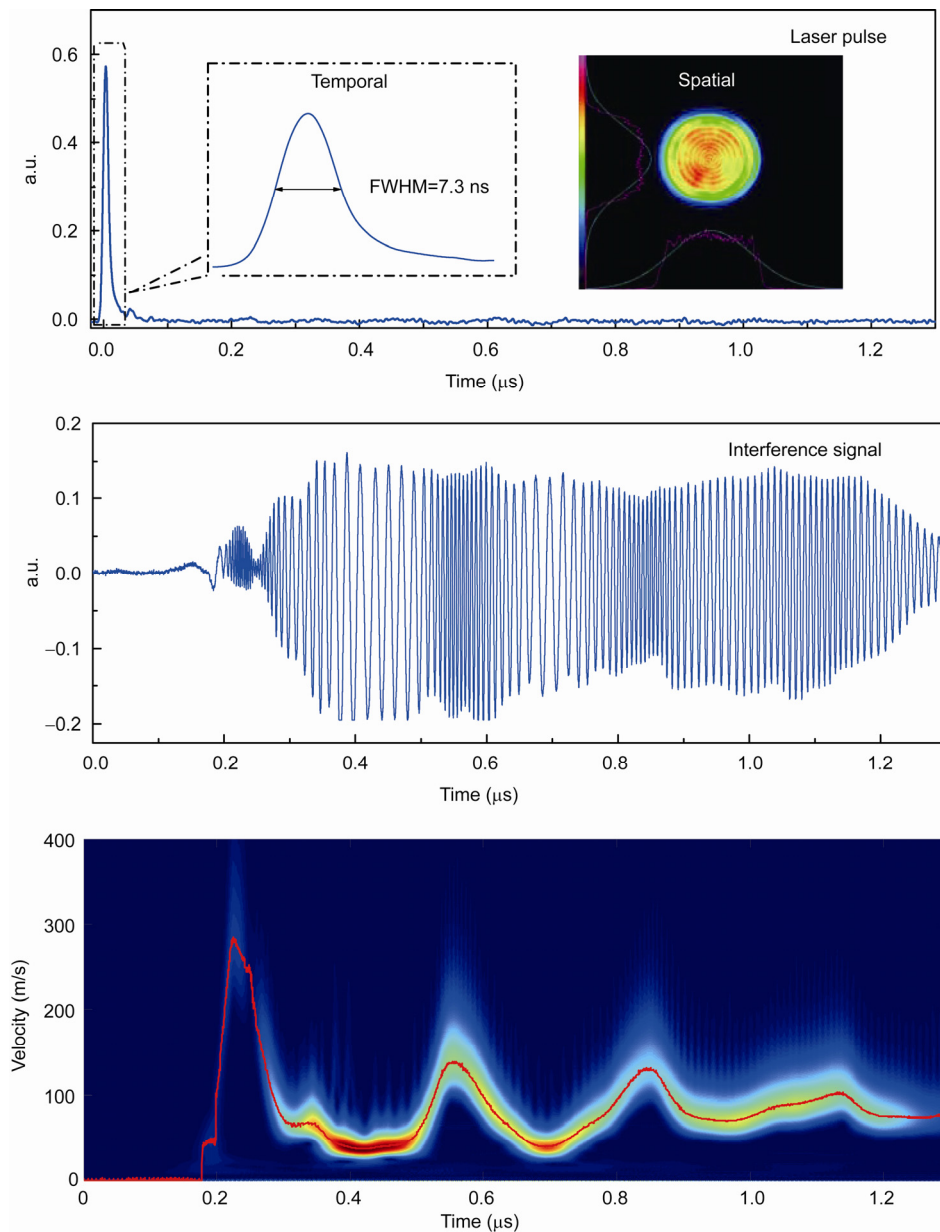


图6 (网络版彩图) PDV对LSP自由表面速度测量

(a) 激光脉宽与空间分布; (b) 干涉条纹; (c) 速度历程

Figure 6 (Color online) Measurement of free surface velocity of LSP with PDV. (a) Temporal and spatial distribution of pulsed laser; (b) fringe signal; (c) velocity history.

速且速率快速变化的速度历程具有很好的适应性;

(2) 与短时傅里叶变换相比, 连续小波变换处理PDV测得的非平稳干涉信号更为有效, 可以同时具有更高的时间分辨率与频率分辨率, 能够更准确、更细致地反映冲击波传播的物理过程。

(3) 通过PDV测量获得的激光冲击强化自由表

面速度历程, 解释了冲击波的传播过程, 并能够反推获得弹塑性波速、冲击波压力, HEL弹性极限等重要的物理量。

激光冲击强化的冲击波传播过程非常复杂。对于冲击相变材料, 在激光诱导的等离子体压力作用下, 除了本文所述的弹塑性波外, 还会有相变波结构。

如果材料出现反向屈服以及波在自由面发生反射, 材料内部冲击波的传播规律将更加复杂. 采用 PDV 对自由表面速度进行测量, 对于研究各种材料的动态力学性能提供有力的分析工具.

参考文献

- 1 Montross C S, Wei T, Ye L, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: A review. *Int J Fatigue*, 2002, 24: 1021–1036
- 2 Peyre P, Fabbro R. Laser shock processing: A review of the physics and applications. *Opt Quantum Electron*, 1995, 27: 1213–1229
- 3 Wu X Q, Duan Z P, Song H W, et al. Shock pressure induced by glass-confined laser shock peening: Experiments, modeling and simulation. *J Appl Phys*, 2011, 110: 053112
- 4 Wu X Q, Huang C G, Song H W. Parameters analysis of residual stress induced by laser shock processing (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2010, 37: 2632–2637 [吴先前, 黄晨光, 宋宏伟. 激光冲击强化诱导的残余应力影响因素分析. *中国激光*, 2010, 37: 2632–2637]
- 5 Ye C, Suslov S, Fei X L, et al. Bimodal nanocrystallization of NiTi shape memory alloy by laser shock peening and post-deformation annealing. *Acta Mater*, 2011, 59: 7219–7227
- 6 Zhou Z, Gill A S, Qian D, et al. A finite element study of thermal relaxation of residual stress in laser shock peened IN718 superalloy. *Int J Impact Eng*, 2011, 38: 590–596
- 7 Cheng G J, Shehadeh M A. Dislocation behavior in silicon crystal induced by laser shock peening: A multiscale simulation approach. *Scripta Mater*, 2005, 53: 1013–1018
- 8 Cheng G J, Shehadeh M A. Multiscale dislocation dynamics analyses of laser shock peening in silicon single crystals. *Int J Plast*, 2006, 22: 2171–2194
- 9 Cheng G J, Cai M, Pirzada D, et al. Plastic deformation in silicon crystal induced by heat-assisted laser shock peening. *J Manuf Sci Eng-Trans ASME*, 2008, 130: 011008
- 10 Berthe L, Fabbro R, Peyre P, et al. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma. *J Appl Phys*, 1997, 82: 2826–2832
- 11 Tollier L, Fabbro R, Bartnicki E. Study of the laser-driven spallation process by the velocity interferometer system for any reflector interferometry technique. I. Laser-shock characterization. *J Appl Phys*, 1998, 83: 1224–1230
- 12 Tollier L, Fabbro R. Study of the laser-driven spallation process by the VISAR interferometry technique. II. Experiment and simulation of the spallation process. *J Appl Phys*, 1998, 83: 1231–1237
- 13 Arrigoni M, Monchalín J P, Blouin A, et al. Laser Doppler interferometer based on a solid Fabry-Perot etalon for measurement of surface velocity in shock experiments. *Measur Sci Tech*, 2009, 20: 015302
- 14 Strand O T, Goosman D R, Martinez C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77: 083108
- 15 Mercier P, Benier J, Azzolina A, et al. Photonic doppler velocimetry in shock physics experiments. *J Phys Iv*, 2006, 134: 805–812
- 16 Mercier P, Benier J, Frugier P A, et al. Nitromethane ignition observed with embedded PDV optical fibers. In: *New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter*, EPJ Web of Conferences, 2010, 10: 00016
- 17 Dolan D H, Jones S C. Push-pull analysis of photonic Doppler velocimetry measurements. *Rev Sci Instruments*, 2007, 78: 076102
- 18 Jensen B J, Holtkamp D B, Rigg P A, et al. Accuracy limits and window corrections for photon Doppler velocimetry. *J Appl Phys*, 2007, 101: 013523
- 19 Dolan D H. Accuracy and precision in photonic Doppler velocimetry. *Rev Sci Instrum*, 2010, 81: 053905
- 20 Ao T, Dolan D H. Effect of window reflections on photonic Doppler velocimetry measurements. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82: 023907
- 21 Weng J D, Tan H, Wang X, et al. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 111101
- 22 Weng J D, Wang X, Tao T J, et al. Optic-microwave mixing velocimeter for superhigh velocity measurement. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82: 123114
- 23 Liu S X, Wang D T, Li T, et al. Analysis of photonic Doppler velocimetry data based on the continuous wavelet transform. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82: 023103
- 24 Wang J, Wu C Q, Song H W, et al. Measurement of the velocities in the transient acceleration process using all-fiber photonic Doppler velocimetry. In: *21st International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2011. 7753
- 25 Li X M, Zhang L, Li Y H, et al. Non-linear regression analysis method for velocity profile processing of instantaneous displacement

interferometer (in Chinese). *Explos Shock Waves*, 2010, 30: 80–84 [李雪梅, 张林, 李英华, 等. 针对瞬态位移干涉仪的非线性回归数据分析方法. *爆炸与冲击*, 2010, 30: 80–84]

26 成礼智, 郭汉伟. *小波与离散变换理论及工程实践*. 北京: 清华大学出版社, 2005

27 Meyers M. *Dynamic Behavior of Materials*. New York: Wiley-Interscience, 1994

Measurement of free surface velocity in laser shock peening with photonic Doppler velocimetry

SONG HongWei^{1*}, WU XianQian¹, WANG Jian², HUANG ChenGuang^{1*},
WEI YanPeng¹ & WANG Xi¹

¹ *Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

² *Institute of Optical Information, Key Lab of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

As a newly developed instrument, photonic Doppler velocimetry (PDV) has become an ideal replacement in situations where VISAR diagnostics function poorly. However, there is a limitation on how well this technique works when the velocity of low magnitude is rapidly changing. In this paper, PDV is utilized to capture the free surface velocity history of laser shock peening (LSP), which is a typical signal rises in nanosecond-level short time and fluctuates significantly, and methods of short time Fourier transform and continuous wavelet transform were compared in processing the interference signal. The results show that PDV is an effective diagnostic method to study the characteristics of shock pressure induced in LSP, and the temporal particle velocity profile including the elastic precursor wave is tracked. Compared to the short time Fourier transform, the continuous wavelet transform demonstrates a better temporal resolution and better interpretation to the real physical behavior.

laser interference, laser shock peening, shock wave, particle velocity, time-frequency transform

PACS: 06.30.Gv, 07.05.Fb, 45.50.-j

doi: 10.1360/132012-341