

文章编号: 1001-3806(2007)02-0134-03

# 强激光诱导冲击波的实验研究

刘丽, 王声波\*, 吴鸿兴, 郭大浩, 廖培育  
(中国科学技术大学 强激光研究所, 合肥 230026)

**摘要:** 为了提高利用激光冲击波改进材料性能的技术, 采用响应快、测量范围大的绝缘膜组合式高聚物压电传感器和示波器对激光诱发的冲击波进行了研究。通过测量无约束层和有约束层时的压电波形, 得出相应的激光冲击波波形并进行比较。结果表明, 有约束层时激光冲击波的脉宽是激光脉冲宽度的 3 倍左右, 峰值压力较无约束层时明显提高。激光冲击波在不锈钢材料中的平均传播速度为  $5.72 \times 10^3 \text{ m/s}$  与声波纵波的传播速度一致。

**关键词:** 激光技术; 激光冲击波; 压电传感器; 传播速度

中图分类号: TN249 文献标识码: A

## Experimental study of high-power laser induced shock waves

LIU Li WANG Sheng-bo WUH ong-xing GUO Da-hao LIAO Peiyu

(Institute of High Power Laser Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** To improve the technology of modifying material properties by using laser induced shock waves, the properties of laser shock waves were studied. The piezoelectric waves were measured using a polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric gauge of a short rise time and a wide linear response range, together with an oscilloscope. Depending on the piezoelectric waves, laser-induced shock waves were measured. The laser induced shock waves in the confinement geometry were analyzed and compared to that in the direct ablation regime. In the confined condition, the FWHM of laser induced shock wave was three times that of laser and the peak pressure was much higher than that in the direct ablation regime. The average propagation velocity of the laser induced shock wave in stainless steel was  $5.72 \times 10^3 \text{ m/s}$ .

**Key words** laser technique; laser induced shock wave; piezoelectricity gauge; propagation velocity

## 引言

高功率、短脉冲的激光照射到材料的表面上, 材料表面迅速吸收激光的能量发生爆炸性气化, 并几乎同时形成高温、高压、背离材料向外喷射的稠密等离子体, 从而诱发一个高压冲击波或应力波<sup>[1]</sup>。激光冲击波作用到材料上, 可以对材料表面进行改性, 从而改进材料的机械性能。如疲劳寿命、硬度、耐磨损等<sup>[2~5]</sup>, 并且还可以改善材料的机械化学效应: 如提高材料的抗腐蚀性<sup>[6]</sup>。目前, 关于激光诱导冲击波和激光冲击强化技术的理论和相关的工程应用研究正在进行。国内外学者通过理论模型和数值模拟对激光诱导冲击波的压力进行了研究<sup>[7~9]</sup>, 但是由于激光冲击波历时短, 压力高, 测量上有一定的难度。国内学者曾通过光学诊断技术间接估算过激光冲击波压力<sup>[10]</sup>。近年来, 绝缘膜组合式高聚物 (polyvinylidene fluoride, PVDF) 压

电传感器因其测量范围大 (0~20GPa)、响应快 (纳秒量级) 等特点受到了国内外的广泛关注<sup>[11]</sup>。作者利用本单位自行研制的 PVDF 压电传感器清晰的呈现了在直接烧蚀模式和约束模式两种情况下激光冲击波随时间的变化曲线及其在不锈钢中的传播特性。

## 1 实验设计

实验是在自行研制的钕玻璃激光冲击强化装置上进行的。激光单次脉冲能量为 0.34J, 光斑直径为 2mm, 脉冲宽度为 30ns, 激光功率密度为每平方厘米吉瓦量级。如图 1 所示, 激光束自左边入射, 鞍后的应力波通过 PVDF 压电传感器变为电信号接入示波器。

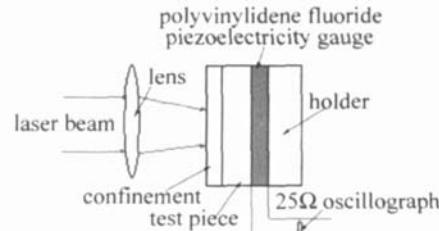


Fig 1 The device structure view of laser shock processing experiment

采用 PVDF 压电膜传感器并利用示波器记录激光

作者简介: 刘丽 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光冲击波和激光冲击强化方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: sbwang@ustc.edu.cn

收稿日期: 2006-01-16 收到修改稿日期: 2006-03-24

冲击波的压电波形和压力波形来对激光冲击波的特性进行测量。压电信号  $V(t)$  与压力  $p(t)$  在  $p \in [0.3 \times 10^8 \text{ Pa}]$  的范围内满足以下的关系<sup>[12]</sup>:

$$p(t) = \frac{K}{A} \int_0^t V(t) dt \quad (1)$$

式中,  $K$  为动态标定系数, 用 Hopkinson 压杆方法得到  $K = (6.6 \pm 0.3) \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{cm}^2 \cdot \mu\text{C}^{-1}$ ,  $A$  为 PVDF 的激活面积, 其直径为 6mm,  $R$  是与 PVDF 并联的  $25\Omega$  的电阻。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 有约束层和无约束层时的激光冲击波

激光冲击波的峰值压力和持续时间是影响激光冲击强化处理效果的两个重要参数。作者在直接烧蚀(无约束层)和约束模式下对它们进行测量和比较。

在没有约束层和有约束层下记录的数据和得出的结果如图 2 图 3 所示。其中约束层使用的是尺寸为  $\varnothing 20\text{mm} \times 6\text{mm}$  的普通玻璃片。

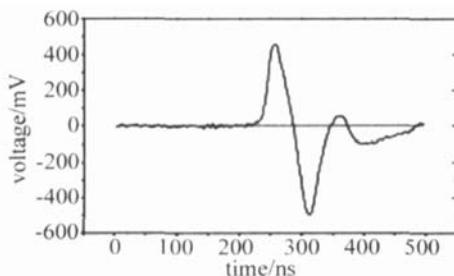


Fig. 2 Voltage time evolution of the induced shock wave without confinement

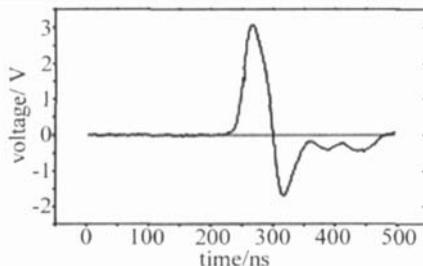


Fig. 3 Voltage time evolution of the induced shock wave with confinement

图 2 为无约束层时的压电波形, 图 3 为有约束层时的压电波形。根据(1)式, 对压电波形分别积分, 可得到压力波波形, 并可以方便地比较它们的相对大小。

图 4 为无约束层时激光冲击波随时间的变化关系, 图 5 为有约束层时激光冲击波随时间的变化关系。将图中得到的冲击波相对压力的大小和  $K, A, R$  的值分别代入(1)式, 就可以得到冲击波的实际压力。这样就实现了利用 PVDF 对激光冲击波的多点实时直接测量。由以上图中可以看出, 在有约束层存在的情况下, 压力波的峰值较无约束层时的情况下大大提高。经计算得出, 前者是后者的 8 倍左右。并且在有约束层时压力波的脉宽也被展宽, 如图 5 所示展宽为激光

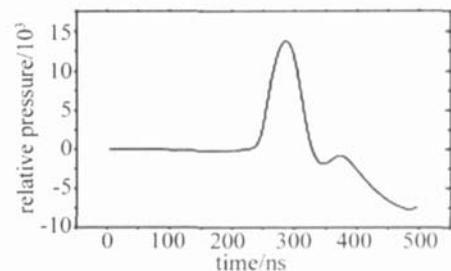


Fig. 4 Pressure time evolution of the induced shock wave without confinement

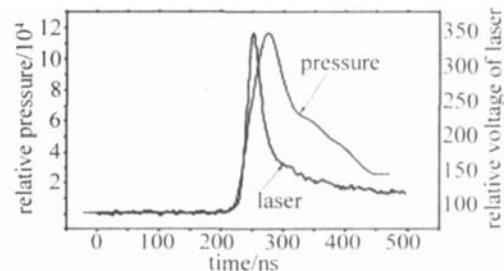


Fig. 5 Pressure time evolution of the induced shock wave with confinement and the laser signal

脉冲宽度的 3 倍左右。这使作用于材料的冲量  $G(T) = \int_0^T p(t) dt$  大大提高, 使冲击强化效果明显提高。约束层的作用限制了等离子体的膨胀, 一方面使激光和等离子体可以充分作用, 另一方面又延缓了等离子体密度和温度的衰减, 因此得到了峰值较大、持续时间较长的压力。作者还对不同约束层进行了研究, 发现约束层材料的声阻抗对激光冲击波的压力峰值大小有影响<sup>[13]</sup>。

### 2.2 激光冲击波在不锈钢材料中的传播

图 6 是在 PVDF 后面垫了一层绝缘膜的情况下, 对厚度为 1.83mm 的不锈钢进行测量而得到的结果。有约束层的存在, 无涂层。横轴表示时间, 其中每大格代表 250ns, 每小格为 50ns。

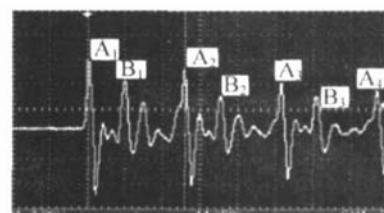


Fig. 6 Voltage time evolution of the induced shock wave with a piece of insulating film

图 7 是在 PVDF 后面垫了两层绝缘膜的情况下,

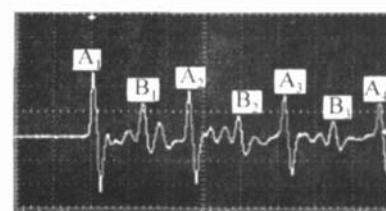


Fig. 7 Voltage time evolution of the induced shock wave with two pieces of insulating film

对厚度为 1.83mm 的不锈钢进行测量而得到的结果。其余条件同图 6。

由图中可以看出,压电波信号的波形可以分为两组 A 和 B。在这两幅图中, A 系列的两个相邻压电脉冲峰值的时间间隔为 640ns, B 系列的两个相邻压电脉冲峰值的时间间隔也为 640ns, 而对于 B<sub>1</sub> 峰值和 A<sub>1</sub> 峰值的时间间隔而言, 图 6 中的时间间隔要比图 7 中的时间间隔短, 并且图 7 中 B<sub>1</sub> 相对 A<sub>1</sub> 的幅值衰减要比图 6 中衰减得厉害。这是因为作者在两次实验中在 PVDF 的后面所垫的绝缘膜的厚度不同。当冲击波透过 PVDF 向后传播的时候, 经过绝缘膜在绝缘膜和垫具的界面进行反射, 反射回来的波透过 PVDF 传入试片并让 PVDF 感知信号。在图 7 中, 由于绝缘膜的厚度较大, 冲击波在其中传播的时间相对就长, 所以 PVDF 感知第 1 次信号与感知经过绝缘膜和垫具界面反射回来的信号的时间间隔就较长, 衰减也就较大。这就说明 A 系列是冲击波在试片中来回反射传播的信号。而 B 系列是冲击波透过 PVDF 在绝缘膜与垫具界面反射回来的波在试片中来回反射传播的信号。由图可知, A 系列和 B 系列反映的都为冲击波在材料中来回传播的信号, 而冲击波在材料中来回传播 1 次所用的时间在 A、B 中都显示出为 640ns。由此, 冲击波在材料中来回传播 1 次所走的路程为  $s = 1.83 \times 2\text{mm}$ , 所经历的时间为  $t = 640\text{ns}$ , 故冲击波在不锈钢中的平均传播速度为:  $v = s/t = 5.72 \times 10^3 \text{m/s}$  这和应力波中纵波在不锈钢中的传播速度相一致<sup>[14]</sup>。

### 3 结 论

(1) 利用 PVDF 对激光冲击波进行了实时测量, 给出了激光冲击波随时间的变化曲线。在有约束层的情况下, 激光冲击波的峰值大大提高, 本实验中是无约束层时的 8 倍左右; 脉宽也被展宽, 为激光脉冲宽度的 3 倍左右。这使得作用于材料的冲击动量大大提高, 使冲击强化的效果明显提高。

(2) 激光冲击波在不锈钢材料中传播的平均速度为  $5.72 \times 10^3 \text{m/s}$  这同应力波中纵波在不锈钢中的传

播速度一致。

### 参 考 文 献

- [1] FAIRAND B P, CLAUER A H. Laser generation of high amplitude stress waves in materials [J]. JAP, 1979, 50(3): 1497~1502.
- [2] FOURNIER J, BALLARD P, MERRIEN P et al. Mechanical effects induced by shock-waves generated by high energy laser-pulses [J]. Journal de Physique III, 1991, 1(9): 1467~1480.
- [3] PEYRE P, FABBRO R, BERTHE L et al. Laser shock processing of materials: physical processes involved and examples of applications [J]. Journal of Laser Applications, 1996, 8(3): 135~141.
- [4] ZHANG H, ZHANG Y K, YU C Y. Surface treatment of aluminum alloy by laser shock processing [J]. Surface Engineering, 1999, 15(6): 454~456.
- [5] FAN Y, WANG Sh B, WU H X et al. Experimental research of laser processing on aerial aluminum alloy [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 273~275 (in Chinese).
- [6] PEYRE P, BRAHAM C, LEDION J et al. Corrosion reactivity of laser-peened steel surfaces [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9(6): 656~662.
- [7] ZHANG W W, YAO Y L. Micro scale laser shock processing of metallic components [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 2002, 124(2): 369~378.
- [8] OCANA J L, MORALES M, MOLPECERES C et al. Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments [J]. Applied Surface Science, 2004, 238(1~4): 242~248.
- [9] MAZHUKIN V I, NOSSOV V V, SMUROV I M. Modeling of plasma dynamics at the airwater interface: application to laser shock processing [J]. JAP, 2001, 90(2): 607~618.
- [10] GU Y, NI Y L, WANG Y G et al. Experiment observation of laser driven high pressure shock waves [J]. Acta Physica Sinica, 1988, 37(10): 1690~1693 (in Chinese).
- [11] PERYE P, BERTHE L, FABBRO R et al. Experimental determination by PVDF and EMV techniques of shock amplitudes induced by 0~3ns laser pulses in a confined regime with water [J]. J Phys, 2000, D33(5): 498~503.
- [12] ROMAN J P, BAUER F, ZAGOURI D et al. Measurements of laser induced shock pressures using PVDF gauges [A]. High Pressure Science and Technology 1993 [C]. New York: American Institute of Physics, 1994: 1915~1919.
- [13] LIU Sh W, GUO D H, WANG Sh B et al. Effects of experimental parameters on LSP [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 27(10): 937~940 (in Chinese).
- [14] MA D Y, SHEN X. A acoustics handbook [M]. 2nd ed. Beijing Science Press, 2004: 173 (in Chinese).

(上接第 133 页)

- [10] LIN R, CHANG H S, BAO Z T et al. Simulation of the optical image recognition by using MATLAB [J]. Journal of Yunnan Normal University (natural science edition), 2004, 24(6): 36~39 (in Chinese).
- [11] LIU D M, SHEN J Y, WANG L J. Application of the wavelet trans-

form to pattern correlation recognition [J]. Laser Technology, 2004, 28(6): 640~642 (in Chinese).

- [12] CHEN X M, GE B Z, ZHANG Y M. Investigation on real time mask discrimination used for correlation peak recognition [J]. Optoelectronics & Laser, 1997, 8(5): 379~381 (in Chinese).