

强激光驱动高压冲击波特特性研究*

洪 昕¹ 王声波¹ 郭大浩¹ 吴鸿兴¹ 虞吉林²

(中国科学技术大学¹强激光技术研究所,²力学和机械工程系 合肥 230026)

提要 利用响应快、测压范围宽的新型绝缘膜组合式高聚物压电传感器(PVDF 压电传感器)以及 PIN 硅光二极管和 PHILIPS PM 3320A 型示波器,实现了对激光引发的冲击波压力的实时测量。得到了激光冲击波在铝靶中的平均传播速度为 6.38×10^3 m/s,与通常的声波纵波在铝中的传播速度(6400 m/s)很相近。激光引发的冲击波峰值压力在铝中的衰减规律是指数型的。

关键词 激光冲击波, PVDF 压电传感器, 传播速度, 衰减系数

1 引 言

高功率激光脉冲照射在材料表面上,使材料表面层发生爆炸性气化,从而产生一个高压冲击波(激光冲击波)。利用强激光产生的这种超高压已应用于惯性约束聚变(Inertial Confined Fusion)和激光冲击强化处理(Laser Shock Processing)等多种基础研究和工程应用领域^[1,2]。激光冲击波特性的研究对建立这些过程的分析模型、实现量化计算是极其重要的。但由于激光冲击波幅值高(GPa~ TPa 量级)、脉宽窄(100 ns 量级),限制了对冲击波压力的实时测量,激光冲击波的传播和衰减特性至今很少有人研究过。本文利用 PVDF 新型压电传感器研究了激光冲击波的传播速度和衰减规律。实验结果对进一步了解激光冲击波的特性,深入研究强激光与物质相互作用具有重要意义。

2 实验设计

实验在中国科技大学强激光技术研究所的钨玻璃激光冲击强化装置上进行。在本实验中单次发射能量约为 8 J,工作波长为 $1.06 \mu\text{m}$,脉宽约为 40 ns,光斑直径为 6 mm,激光功率密度为 0.70×10^9 W/cm²。实验中采用中国科技大学力学和机械工程系研制的 PVDF 压电传感器^[3]及 PHILIPS PM 3320A 型数字示波器记录激光冲击波电压波形和压力波形。示波器的外触发信号为激光脉冲信号。靶系统(未按比例)如图 1 所示。实验靶

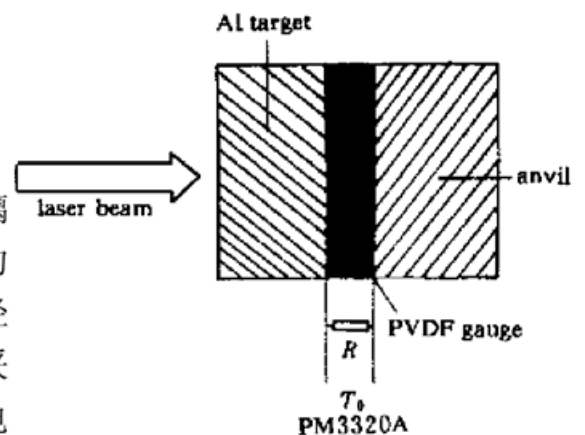


图 1 靶体组装图
Fig. 1 Target assembly

* 国家高技术 863-410 基金资助项目。

板材料选用厚度分别为 0.77 mm, 1.25 mm, 1.91 mm 的普通铝材料。靶材受激光冲击区直径为 6 mm。在 PVDF 压电传感器的背面固定了一块有机玻璃垫块, 使它同 PVDF 压电膜声阻抗基本匹配以减少激光冲击波的反射。

3 实验结果及分析

3.1 激光冲击波的压力

PVDF 压电传感器因其测量范围大(0~ 20 GPa)、响应快(纳秒量级)、动态定标简单方便, 是超高压测量的理想传感器^[4]。根据文献[4], PVDF 测得的压电信号 $V(t)$ 与 PVDF 薄膜表面的冲击波压力 $P(t)$ 之间在几个 GPa 以下的压力范围内满足关系

$$P(t) = \frac{K}{A} \int \frac{V(t)}{R} dt \quad (1)$$

其中 K 为动态定标系数, 经 Hopkinson 压杆定标, 其值为 $6.6 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{cm}^2/\mu\text{C}$, A 为 PVDF 薄膜的激活面积, R 为与 PVDF 并联的电阻。于是便可以通过记录到的电压波形得到在 PVDF 薄膜表面的激光冲击波压力波形。图 2 为激光冲击 1.91 mm 铝靶在 PVDF 上产生的电压波形和压力波形。其中电压波形和压力波形中第二、三个脉冲因激光冲击波在铝靶中多次反

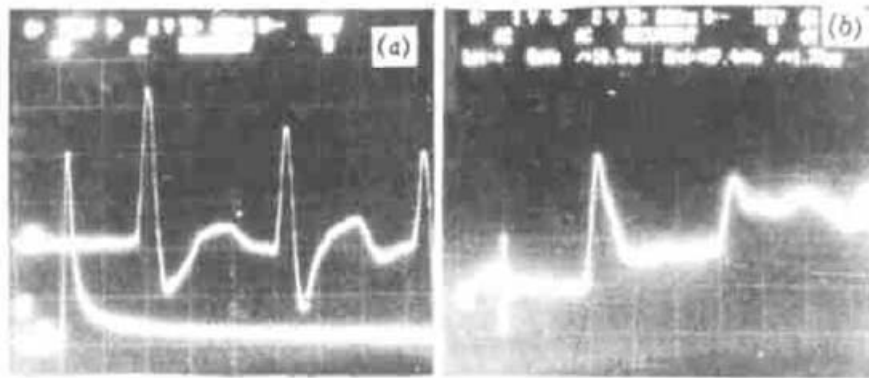


图 2 激光冲击 1.91 mm 铝靶产生的电压波形 (a) 和压力波形 (b) (激光能量和脉宽: 8.4 J, 42 ns)

Fig. 2 Voltage-time (a) and pressure-time (b) evolution when the laser irradiates a 1.91 mm Al target (laser energy and width (FWHM): 8.4 J, and 42 ns)

射产生的。由于激光冲击铝靶产生的等离子体重新结合后, 其周围被加热空气的爆炸性膨胀给予铝靶的动量在实验测量中一直存在, 所以压力波形中第二、三压力脉冲的起点不为零。在计算第二、三个压力脉冲的峰压时, 减去压力脉冲的各自的起始点值, 就可得到实际的峰压值。以下实验中测得的峰压都如此处理。但这样得到的峰压只是 PVDF 膜上的峰压, 根据文献^[5]

$$\sigma_{b\max} = \frac{P_{\max}}{2} \left[1 + \frac{Z_{\text{Al}}}{Z_{\text{PVDF}}} \right] \quad (2)$$

可以得到激光冲击波在铝靶后表面的峰压 $\sigma_{b\max}$, 其中 $Z_{\text{Al}}, Z_{\text{PVDF}}$ 分别为铝和 PVDF 的声阻抗。考虑到激光冲击波的衰减(根据[5]中(6)式), 则

$$\sigma_{b\max} = \sigma_{f\max} \exp(-0.14d) \quad (3)$$

即可反推出激光冲击波在铝靶前表面的峰压 $\sigma_{f\max}$, d 为铝靶的厚度(mm)。于是

$$\sigma_{f\max} = \frac{P_{\max}}{2} \exp(0.14d) \left[1 + \frac{Z_{\text{Al}}}{Z_{\text{PVDF}}} \right] \quad (4)$$

因为 $Z_{Al} = 1.73 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$, $Z_{PVDF} = 0.25 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$, 根据[5]中的(6)式: $P_{\max} \exp(0.14d) = 0.48 \times 10^8 \text{ Pa}$, 激光冲击波在铝靶表面的峰压为 $\sigma_{r\max} = 1.9 \times 10^8 \text{ Pa}$, 即激光冲击铝靶产生的冲击波的峰压为 $1.9 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。

3.2 激光冲击波的平均传播速度

激光冲击波在靶材前后表面来回反射, 每一次冲击波传播到铝靶后表面时便在 PVDF 压电膜上产生一个电压脉冲。激光冲击 0.77 mm, 1.25 mm 和 1.91 mm 厚的铝靶诱导的电压波形分别如图 3 (a), (b) 和图 2(a) 所示。

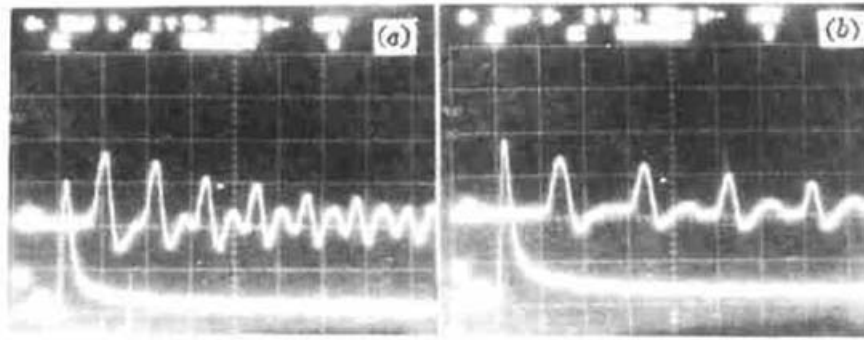


图3 激光冲击 0.77 mm (a) 和 1.25 mm (b) 铝靶产生的电压波形
(激光能量和脉宽: (a) 8.4 J, 42 ns; (b) 8.5 J, 45 ns)

Fig. 3 Voltage-time evolution when the laser irradiates 0.77 mm (a) and 1.25 mm (b) Al targets
(laser energy and width (FWHM): (a) 8.4 J, 42 ns; (b) 8.5 J, 45 ns)

测量电压波形相邻两个电压脉冲起始点之间的时间间隔, 便可得到激光冲击波相邻两次传播到后表面之间的时间间隔。因为已知铝靶厚度, 所以就可以得到激光冲击波在铝中的传播速度 $v_s = 2d/\bar{t}_s$, t_s 为相邻两个电压脉冲起始点之间的时间间隔, \bar{t}_s 为平均时间间隔。根据三种厚度的铝靶计算的速度如表 1 所示。

表 1 激光冲击波在铝中的传播速度

Table 1 Propagation velocity of the laser-induced shock wave in Al

thickness d /mm	t_s /ns			\bar{t}_s /ns	$v_s /10^3 \text{ ms}^{-1}$
0.77	241	240	242	241	6.39
1.25	392	396	398	395	6.33
1.91	594		598	596	6.41

因此, 激光冲击波在铝靶中的平均传播速度 \bar{v}_s 为 $6.38 \times 10^3 \text{ m/s}$ 。

通过对激光冲击波电压波形的实时测量, 方便简单地得到了激光冲击波在铝靶中的传播速度。这与通常的应力波(如声波、超声波、地震波、爆炸产生的冲击波)中纵波在铝中传播速度一致^[6,7]。文献[8]进一步表明了激光冲击波与基爆产生的冲击波在对材料表面改性处理机制和效果上的相似性。

3.3 激光冲击波的衰减特性

为了避免更换太多不同厚度铝靶所带来的繁琐和实验条件的波动, 利用冲击波在铝靶中不断反射相当于冲击波经过不同的距离的特性, 方便地实现了多点实时测量, 提高了拟合出的衰减曲线的准确度。

激光冲击波在铝靶和 PVDF 薄膜接触面上发生透、反射, 小部分透射进 PVDF, 大部分反射回铝靶。由于 PVDF 薄膜与有机玻璃垫块声阻抗相近, 故 PVDF 中的冲击波基本上透射进有机玻璃, 不至于影响 PVDF 的测量值。并且由于有机玻璃垫块较厚, 冲击波在其中的反射在测量时间内也不会影响到测量结果。铝靶的前表面与空气接触, 而空气的声阻抗比铝的小 5 个数量级, 故前表面可视为自由端反射。反射后, 压力大小不变。铝的后表面与 PVDF 薄膜接触, 为了补偿由于透射引起压力损失, 对第 n 次在铝靶后表面反射时的冲击波实际峰压除以 $F^{n-1} \left[F = \frac{Z_{Al} - Z_{PVDF}}{Z_{Al} + Z_{PVDF}} \right]^{19}$, 则得到无透射损失峰压(下面简称无损峰压)。

表 2 激光冲击波在不同厚度铝靶中各次反射后的峰压

Table 2 Peak pressure P_{\max} of the laser-induced shock wave reflected in Al targets of different thicknesses

thickness /mm	number of reflections	propagation distance/mm	energy/J			standard $P_{\max}/10^8$ Pa			average $P_{\max}/10^8$ Pa		
0.77	1	0.77	8.1	8.4	0.44	0.44	0.44	0.44			
	2	2.31							0.37	0.36	0.37
	3	3.85							0.23	0.23	0.23
	4	5.39							0.18	0.18	0.18
1.25	1	1.25	8.5	8.6	8.8	0.38	0.39	0.42	0.40		
	2	3.75				0.32	0.33	0.33	0.33		
	3	6.25				0.21	0.19	0.19	0.20		
	4	8.75				0.16	0.13	0.12	0.14		
1.91	1	1.91	7.6	8.6	8.4	0.36	0.35	0.35	0.35		
	2	5.73				0.23	0.23	0.23	0.23		
	3	9.55				0.12	0.12	0.12	0.12		

峰压 P_{\max} 与功率密度 I_0 之间满足如下关系

$$P_{\max} \propto I_0^{3/4} \quad (5)$$

因为本实验条件下激光脉冲脉宽基本不变, 所以可用脉冲能量 E 代替功率密度 I_0 , 以将不同激光脉冲能量下的激光冲击波峰压 P_{\max} 在某一个选定的标准能量下进行归一化处理。选取 8 J 为标准能量, 将在 8 J 附近的无损峰压通过以上关系转换成 8 J 时的结果, 经换算后的峰压以下称为标准峰压。实验结果如表 2 所示。

用最小二乘法拟合, 得到激光冲击波压力峰值 P_{\max} (10^8 Pa) 在铝中的衰减规律为

$$P_{\max} = 0.48 \exp(-0.14X) \quad (6)$$

其中 X 为激光冲击波传播的距离(mm)。激光冲击波压力峰值衰减如图 4 所示。

由实验数据所拟合出的激光冲击波的衰减规律是指数型的。这说明冲击波峰压的减小率与传播距离的增加成线性关系(即 $\frac{dP}{P} = -bdx$), 进而表明铝材料内部的均一性较好, 对冲击波的衰减比较均匀。这与我们用激光冲击波无损评估铝内部均一性得出的结果一致。

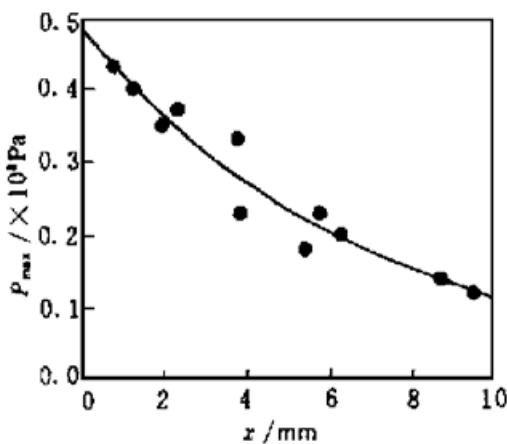


图 4 激光冲击波峰压 P_{\max} 随传播距离 X 的衰减曲线

Fig. 4 P_{\max} - X attenuation curve of the laser-induced shock wave

参 考 文 献

- 1 Deng Ximing, Yu Wenyan, Chen Shisheng *et al.*. The six-beam subnanosecond high power Nd³⁺ glass laser system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1981, **1**(4) : 289~ 298 (in Chinese)
- 2 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and applications. *Opt. and Quantum Electron.*, 1995, **27** : 1213~ 1219
- 3 Li Xinzeng, Tang Zhiping, Yu Jilin. Piezoelectricity gauge of insulation film and combined high polymer. *Chinese Patent*(中国专利), No. 92242887.5 (in Chinese)
- 4 J. P. Romain, F. Bauer, D. Zagouri *et al.*. Measurements of laser induced shock pressures using PVDF gauges. In: S. C. Schmidt eds., *High-pressure Science and Technology-1993*, American Institute of Physics, 1994. 1915~ 1919
- 5 F. Cottet, J. P. Romain. Formation and decay of laser-generated shock waves. *Phys. Rev. A*, 1982, **25** (1) : 576~ 579
- 6 Jack Blitz. *Ultrasonic Methods and Applications*. 1971, London, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd, 12
- 7 M. Gerland, M. Hallouin, H. N. Presles. Comparison of two new surface treatment processes, laser-induced shock waves and primary explosive: application to fatigue behaviour. *Materials Science and Engineering*, 1992, **A156** : 175~ 182
- 8 Ma Xiaoqing, *Shock Dynamics*. Beijing : Publishing House of Science and Technology of Beijing, 1992. 57 ~ 62 (in Chinese)
- 9 C. R. Phipps, Jr., T. P. Turner, R. F. Harrison *et al.*. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(3) : 1083~ 1096

Study of the Properties of the Shock Wave Induced by High-power Laser

Hong Xin¹ Wang Shengbo¹ Guo Dahao¹ Wu Hongxing¹ Yu Jilin²

(¹*Institute of High-power Laser Technology*, ²*Department of Mechanics and Mechanical Engineering*,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract Using a new piezoelectricity gauge of insulation film and combined-high-polymer of a short rise time and wide linear response range, together with a PIN optoelectric tube and PHILIPS PM 3320A oscilloscope, the real-time measurement of pressure of the laser-induced shock wave is realized. Based on this technology, the propagation velocity and attenuation coefficient of the laser-induced shock wave in aluminum are obtained. The average propagation velocity of the laser-induced shock wave in aluminum is 6.38×10^3 m/s. The attenuation of peak pressure of the laser-induced shock wave in Al is an exponential function: $P(x) = 0.48\exp(-0.14x)$.

Key words laser-induced shock wave, PVDF piezoelectricity gauge, propagation velocity, attenuation coefficient