

实验研究有机玻璃约束层对 激光冲击波的影响*

李志勇¹ 朱文辉^{1,2} 周光泉¹

(¹ 中国科学技术大学力学系 合肥 230026; ² 国防科学技术大学应用物理系 长沙 410073)

郭大浩 吴鸿兴

(中国科学技术大学强激光实验室 合肥 230026)

提要 利用自行研制的 PVDF 压电传感器研究了高功率密度激光冲击过程中有机玻璃约束窗口对激光冲击波压力的影响,实验表明有机玻璃(PMMA)约束层可大幅度提高冲击波压力和冲击波持续时间。

关键词 激光冲击波,有机玻璃约束层,增压技术

1 引 言

当高功率密度的激光束($> 10^8 \text{ W/cm}^2$)辐照到材料表面时,会使得材料表面一薄层发生爆炸性气化,产生动量脉冲,从而在靶材中形成一个高压冲击波,即激光诱导的冲击波。利用强激光产生的这种超高压已成为动高压技术的一种有效手段,并已应用于惯性约束聚变和激光冲击处理(Laser Shock Processing,简称LSP)等多种基础研究和工程应用领域。但是由于脉冲强激光诱导的冲击波幅值高(GPa~TPa量级)、脉宽窄(ns量级)、衰减快等特点,这样给实时测量冲击波压力的传感器提出了很高要求。约束层是一种在激光冲击波研究中常用的增压技术,国际上Fairand等人曾对透明熔凝石英和纯净蒸馏水进行过研究^[1],相比而言有机玻璃具有易获得、便宜、安装方便(相对于蒸馏水这一流体介质而言)等优点,在利用激光进行动高压加载实验中有着很广阔的应用前景。近年来PVDF(Polyvinyliden Fluoride,聚偏氟乙烯)压电薄膜传感器由于其频响高(ns量级)、测压范围大(0~20GPa)等特点而受到了国内外的广泛关注^[2]。本文采用自己研制的PVDF压电传感器,着重研究了在激光冲击过程中有机玻璃约束层对激光冲击波压力幅值的影响。这一定量的实验结果对利用强激光冲击波进行动高压加载的研究和应用有着极其重要的参考价值。

2 实验设计

实验在中国科学技术大学的强激光实验室进行。钕玻璃激光器的工作波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 。脉

* 国家 863 高技术激光技术领域基金资助项目。

宽为 33 ns, 单次发射能量约 6.0 J, 光斑直径为 7 mm, 激光功率密度为 10^9 W/cm² 量级, 靶面涂有激光涂层。实验的光路布置和靶试件的组装如图 1, 在 PVDF 压电传感器的背面固定了一块有机玻璃(PMMA)垫板, 使它同 PVDF 压电膜阻抗基本匹配以减少波的反射, 同时将 PVDF 压电膜传感器同一阻值为 25 Ω 的电阻相并联。PVDF 的压电信号和激光脉冲信号由 PHILIP PM 3320A 数字示波器记录, 而且激光脉冲同时也是示波器的外触发信号。实验靶板材料选用的是 0.2 mm 厚的铝。当激光加载条件和涂层不变的情况下通过比较有无有机玻璃(PMMA)约束窗口时的激光冲击波峰压和波形, 研究了有机玻璃约束层的影响。

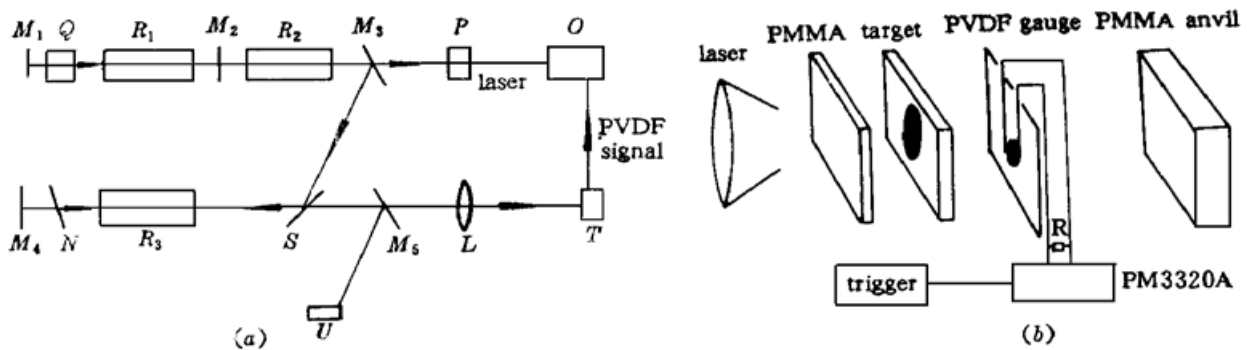


图 1 实验的光路布置 (a) 和靶试件 (b)

M_1, M_2, M_4 : 全反射镜; M_3, M_5 : 部分反射镜; $R_1 \sim R_3$: 工作物质; Q : Q 开关;

N : $\lambda/4$ 波片; P : PIN 管; O : 示波器; L : 透镜; T : 靶; U : 能量计

Fig. 1 Experimental configuration (a) and target assembly (b)

M_1, M_2, M_4 : total reflective mirrors; M_3, M_5 : partial reflective mirrors; R_1, R_2, R_3 : laser media; Q : Q switcher,

N : $\lambda/4$ wave plate; P : PIN tube; O : oscilloscope; L : lens; T : target; U : energy meter

3 实验结果与讨论

3.1 有机玻璃约束层对激光冲击波压力大小的影响

将 PVDF 压电膜传感器测量得到的激光冲击波压力峰值进行整理, 得到表 1 和表 2 中的结果。实验中选用的有机玻璃厚 3 mm, 表 1 为没有约束层时的实验结果, 表 2 为加上有机玻璃约束层之后的实验结果。

由于激光器每次输出的能量不可能完全一致, 因此辐照到靶试件表面的能量也随之有所波动。按照解析和数值研究, 激光诱导的冲击波压力峰值 P 与激光功率密度 I_0 (在这里, 由于激光脉宽和辐照激光光斑大小不变, 因此也可认为是激光能量) 之间存在如下简单关系^[3]

$$P \propto I_0^n \quad (1)$$

其中, $n \approx 0.67 \sim 0.82$, P, I_0 的单位分别为 TPa, 10^{14} W/cm²。从理论上讲, 应取同一激光辐照能量下的峰值压力进行对比, 或者将不同辐照能量下的压力通过以上简单关系转换到某一标准能量下才能有可比性。然而在本实验中由于激光辐照能量波动很小, 即使通过上述关系将所有结果转化为辐照能量为 6.0 J 时的值, 其压力峰值变化也十分小。因此可近似地认为以上结果是在相同激光辐照能量下获得的。

分别根据表 1 和表 2, 计算出无约束层时的激光冲击波平均峰压为 2.91×10^7 Pa, 有有机玻璃约束层时的激光冲击波平均峰压为 2.36×10^8 Pa。两者相比得到有机玻璃约束层的增压指数

$$N = \frac{P_{\text{PMMA}}}{P_{\text{uncon}}} = \frac{2.36 \times 10^8}{2.91 \times 10^7} = 8.1 \quad (2)$$

其中, $P_{\text{PMMA}}, P_{\text{uncon}}$ 分别为有无有机玻璃约束层时的激光冲击波压力。可见有机玻璃约束层可使激光冲击波压力提高到原来的八倍左右。

表 1 未加有机玻璃约束层时的最大压力

Table 1 Maximum pressure without PMMA confinement

Specimen No.	1	2	3	4	5	6
Irradiation energy on specimen surface (J)	6.33	5.98	5.98	6.10	5.64	5.98
Maximum pressure (0.1 GPa)	0.318	0.300	0.272	0.265	0.315	0.275

表 2 加上有机玻璃约束层后的最大压力

Table 2 Maximum pressure with PMMA confinement

Specimen No.	1	2	3	4	5	6
Irradiation energy on specimen surface (J)	6.67	6.21	6.44	5.98	6.10	7.13
Maximum pressure (0.1 GPa)	2.15	2.05	2.75	2.10	2.35	2.78

3.2 有机玻璃约束层对波形的影响

图 2 和图 3 分别为无约束和有约束层时测到的铝靶背面的激光冲击波随时间的演化波形。从中可以看到当有约束层时的压力脉宽约相当于没有约束层时的七倍。而且与没约束条件时相比, 有约束介质时靶从激光获得的动量大约可提高两个量级。

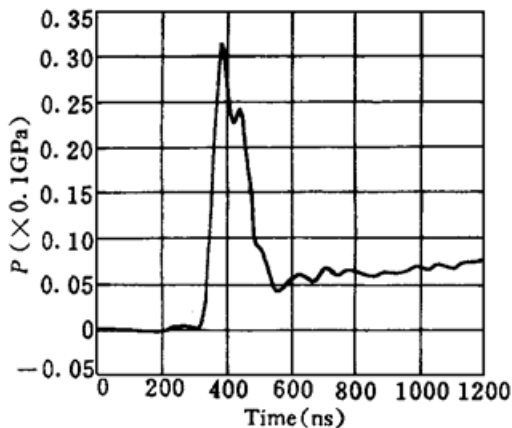


图 2 无有机玻璃约束层时的压力-时间演化波形 (激光能量: 6.33 J)

Fig. 2 Pressure-time evolution without PMMA confinement (laser energy: 6.33 J)

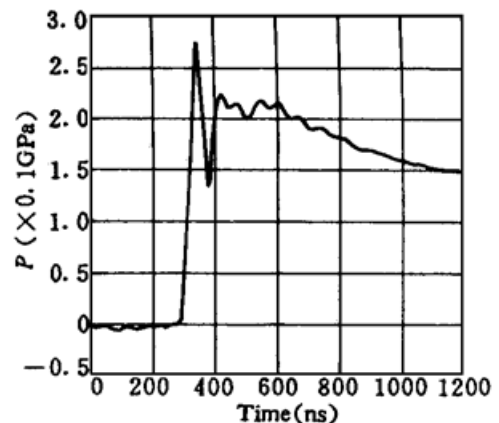


图 3 加有机玻璃约束层时的压力-时间演化波形 (激光能量: 6.44 J)

Fig. 3 Pressure-time evolution with PMMA confinement (laser energy: 6.44 J)

3.3 实验与理论的对比

激光与物质的相互作用是一个十分复杂的瞬态物理过程, 在极短的激光辐照时间内, 靶材表面会产生激光能量的热沉积, 以及相关的烧蚀、融化、气化和高温等离子体的快速膨胀与冷却等一系列物理过程, 特别是在有约束介质存在的条件下, 要用一个十分理想的理论模型去描述在约束层与靶材之间界面中发生的如此复杂的过程存在很大困难。当然可以利用数值计算模拟整个过程, 但压力结果可能与实际相差 2 倍。

为了讨论存在约束介质时的激光冲击波效应, 在简化能量传输过程的基础上, 可用一维的激光冲击波动力学模型去估算冲击波压力和增压指数^[4]。这里假设激光产生的高温等离子体同时在约束介质和靶材中诱导出冲击波, 而且对固体介质的约束层认为其冲击波阻抗均为常数, 对于大气环境则把它作理想气体计算。

存在 PMMA 约束介质时的冲击波峰值压力为

$$P'_{\text{PMMA}} = 0.10 \left[\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right]^{1/2} Z^{1/2} I_0^{1/2} \quad (3)$$

这里, P'_{PMMA} , Z , I_0 的单位分别为 10^8 Pa , $\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$ 和 GW/cm^2 。 I_0 为激光功率密度, 取 $I_0 = 0.47 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。 $\alpha \approx 0.1 \sim 0.2$ 。此外

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (4)$$

这里 Z_1 , Z_2 分别是 PMMA 和铝的冲击波阻抗。计算中取 $Z = 7.6 \times 10^4 \text{ g}/(\text{cm}^2\text{s})$, $\alpha = 0.1$ 。将以上具体数据代入(3) 得 $P'_{\text{PMMA}} = 6.67 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。

无约束介质时的冲击波峰值压力为

$$P'_{\text{uncon}} = 32.2 \left[\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right]^{2/3} \rho_0^{1/3} I_0^{2/3} \quad (5)$$

这里 $\frac{2}{\rho_0^{1/2}} = \frac{1}{\rho_1^{1/2}} + \frac{1}{\rho_2^{1/2}}$, 其中 ρ_1 , ρ_2 分别是大气和铝的密度(g/cm^3)。在此取 $\rho_0 = 4.95 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{cm}^3$, $\alpha = 0.2$, $I_0 = 0.47 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。由(5) 式可得 $P'_{\text{PMMA}} = 0.52 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。

根据以上理论计算预测的有机玻璃约束层的增压指数为

$$N' = \frac{P'_{\text{PMMA}}}{P'_{\text{uncon}}} = \frac{6.67 \times 10^8}{0.52 \times 10^8} = 12.8$$

实验数据 P_{PMMA} , P_{uncon} 与理论估算的 P'_{PMMA} , P'_{uncon} 有一定差别, 这主要是由于激光冲击波在材料中有极快的衰减^[5], 而理论模型里根本没有考虑冲击波在靶材表面的衰减规律。另外 N' 比 N 也要大一些, 这一方面说明这一冲击波动力学模型可对增压效应作大致的估测, 同时也说明现有模型过于简化。

4 结 论

利用自己研制的 PVDF 压电膜传感器成功地获得了脉冲强激光在铝靶中诱导的冲击波压力演化波形。文中着重研究了有机玻璃约束层给激光冲击波带来的影响。发现有机玻璃是一种极好的增压约束层, 它可将激光冲击波压力提高到原来的八倍左右, 并大大提高冲击波的持续时间。由于有机玻璃是一种常用的工业材料, 而且相比水等流体约束介质而言在实验中能更方便地进行控制, 因此有机玻璃是一种在强激光动高压加载技术研究和激光冲击强化工艺中极有实用价值的约束层材料。并发现现有理论能大致预估约束层的增压效应, 但也需要发展更完善的理论模型。

参 考 文 献

- 1 Fairand B. P., Clauer A. H.. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(3) : 1497~ 1502
- 2 Romain J. P., Bauer F., Zagouri D. *et al.*. Measurements of laser induced shock pressure using PVDF gauges, high-pressure science and technology-1993, edited by S. C. Schmidt. *American Institute of Physics*, 1994 : 1915~ 1919
- 3 Trainor R. J., Y. T. Lee. Analytic models for design of laser-generated shock-wave experiments. *Phys. Fluids*, 1982, **25** : 1898~ 1907
- 4 Fabbro R., Fournier J., Ballard P. *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2) : 775~ 784
- 5 李志勇, 朱文辉, 程经毅 等. 铜中强激光冲击波衰减规律的实验研究. 科学通报, 1996, **41**(19) : 1747~ 1749

Experimental Study of the Effects of PMMA Confinement on Laser-induced Shock Waves

Li Zhiyong¹ Zhu Wenhui^{1,2} Zhou Guangquan¹

(¹Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026;

²Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Guo Dahao Wu Hongxing

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

Abstract The effects of PMMA confinement windows on laser induced shock waves are studied with the use of PVDF gauges made by ourselves. These experimental results demonstrate that confinement of the surface with a PMMA overlay provides an effective method to generate laser induced shock waves of high amplitude and long time duration.

Key words laser induced shock waves, PMMA confinement, pressure increasing