

实验研究脉冲强激光在铝靶中诱导的冲击波*

李志勇 朱文辉 程经毅 郭大浩 吴鸿兴

(中国科学技术大学力学系 合肥 230026)

提要 利用自行研制的 PVDF 压电膜传感器实时测量了高功率密度脉冲激光辐照到铝材料表面时在靶材中诱导的激光冲击波压力,通过对不同厚度靶板背面冲击波压力的测量获得了激光冲击波在铝材料中的衰减规律,并在 GW/cm^2 量级的范围内研究了激光冲击波峰压随激光功率密度的关系。

关键词 激光冲击波, PVDF 压电膜, 衰减规律

1 引 言

当脉冲强激光照射到固体材料靶面时,由于在材料表面产生的高温高压等离子体向外喷射,这样会诱导一个短脉冲的高压冲击波在固体靶材中传播。由于强激光能在实验室条件下获得极高的冲击波压力(可达 TPa 量级),因此强激光诱导的冲击波已成为国防和民用技术研究领域中一个很有潜力的研究课题。目前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,并已用于惯性约束聚变^[1]和激光冲击处理(Laser Shock Processing)这一材料表面改性加工技术中。尽管强激光诱导的冲击波近年来引起了人们的广泛关注,而且国内外也有学者通过理论模型和数值模拟对这种高压短脉冲的衰减做过初步研究^[2,3],然而由于受到实验条件的限制,对脉冲强激光诱导的高压短脉冲在材料中的传播和衰减规律的实验研究国内外均无进展。实验研究的主要障碍在于激光冲击波压力高(GPa~ TPa 量级),脉冲窄(几十或上百个纳秒),衰减快,普通的传感器测量方法和光学诊断技术均很难满足这一要求。近年来发展起来的 PVDF 压电传感器,其频响高(ns 量级),测压范围宽(可达 20 GPa 以上),因此是一种较理想的激光冲击波实验测试元件^[4]。本文利用自己研制的 PVDF 压电膜传感器对强激光在铝中诱导的冲击波进行了实时测量,关于强激光诱导的冲击波,目前国际上只有很少的实验数据是在考虑透明约束层时获得的^[5],而且仅对熔凝石英和蒸馏水做过研究和比较,本文在实验中获得了激光冲击波在铝材料中的衰减参数以及在有机玻璃作约束层时激光冲击波峰压与入射激光强度之间的定量关系,这一结果不仅是对国际上这一研究方向实验数据的补充,而且为利用强激光冲击波进行超高压、超高应变率条件下的材料结构和动态断裂以及激光冲击强化工艺研究均有重要的理论和实际应用价值。

* 国家 863 高技术激光技术领域基金资助项目。

2 实验方法

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 $1.06 \mu\text{m}$, 脉宽为 33 ns , 光斑直径为 7 mm , 激光功率密度为 10^9 W/cm^2 量级。为了提高材料入射表面的激光冲击波压力, 在靶材表面安装了一层 3 mm 厚的有机玻璃约束窗口。图 1 为利用 PVDF 传感器测量激光冲击波压力时的原理图, 在 PVDF 压电传感器的背面固定了一块有机玻璃 (PMMA) 垫板, 为了基本同 PVDF 压电膜阻抗匹配以减少波的反射, 同 PVDF 并联的是一个阻值为 25Ω 的电阻 R 。PVDF 的压电信号和激光脉冲信号由 PHILIP PM 3320A 数字示波器记录。靶体的组装如图 2 所示, 其中压板、压紧螺钉、靶体支座均用钢材做成, 实验时通过压板将靶体牢牢固定在支座上。实验靶板材料为铝, 为了获得其衰减规律参数, 我们选用了两种材料厚度: $40 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$ 。当激光加载条件、窗口约束条件不变的情况下通过改变靶板的厚度得到不同厚度情形下的靶背面冲击波压力, 从而得出强激光诱导的高压短脉冲冲击波在铝中的衰减规律。

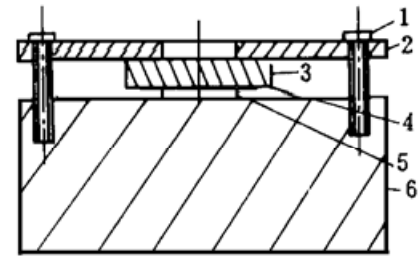
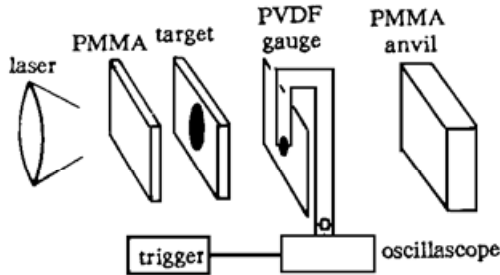


图 1 PVDF 量计测量激光冲击波压力的试件组装图

Fig. 1 Sketch of the experimental set-up for measuring laser induced shock pressure using PVDF gauges

图 2 靶体安装示意图

1: 螺钉; 2: 压板; 3: 约束层; 4: 靶材;
5: 有机玻璃垫块; 6: 支撑钢座
Fig. 2 Experimental set-up for pressure measurements
1: screw; 2: control plate; 3: PMMA overlay;
4: aluminum foil; 5: PMMA anvil; 6: support

3 实验与结果

在脉冲强激光与物质的相互作用过程中, 冲击波的形成总需要一个过程, 从理论和数值分析可以得到^[2], 冲击波的峰值压力一般在距离靶面 $40 \mu\text{m}$ 左右达到最大。因此在实验中我们选取了 $40 \mu\text{m}$ 厚的铝膜作为靶材来研究脉冲强激光在铝中诱导的冲击波演化波形。当利用 PVDF 压电膜测量激光冲击波压力时, 由于铝和 PVDF 之间存在阻抗不匹配的问题, 在这里采用 Puig 测量激光冲击波压力时类似的阻抗转换关系^[6]可以得到激光冲击波在铝靶中的压

$$P_{\text{Al}} = \frac{P_{\text{PVDF}}}{2} \left[1 + \frac{Z_{\text{Al}}}{Z_{\text{PVDF}}} \right]$$

力这里 P_{Al} 为激光冲击波在铝靶中的压力, P_{PVDF} 为 PVDF 压电膜测得的压力, $Z_{\text{Al}}, Z_{\text{PVDF}}$ 分别为铝靶和 PVDF 薄膜的声阻抗。在此我们取 $Z_{\text{Al}} = 1.37 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $Z_{\text{PVDF}} = 0.25 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此 $P_{\text{Al}} = 3.24 P_{\text{PVDF}}$ 。图 3 就是 $40 \mu\text{m}$ 厚铝靶背面的冲击波压力和辐照激光脉冲波形, 比较两者可以看出当存在有机玻璃约束窗口时脉冲强激光在铝靶中诱导的冲击波脉宽约为激光脉宽的两倍, 这一结果与 Fabbro^[5] 利用光学玻璃作为约束层时得到的结果完全吻合。

根据理论和数值模拟的结果^[1], 激光冲击波在材料中的衰减应满足如下关系:

$$P_{\max} = AX^n$$

其中, P_{\max} 为激光冲击波的峰值压力, X 为冲击波的传播距离, A, n 为材料常数。为了便于使本实验研究的结果具有更广泛意义上的参考价值, 将上述关系进行无量纲化, 可得到以下无量纲形式的衰减规律:

$$\frac{P_{\max}}{P_0} = \left[\frac{X}{X_0} \right]^n$$

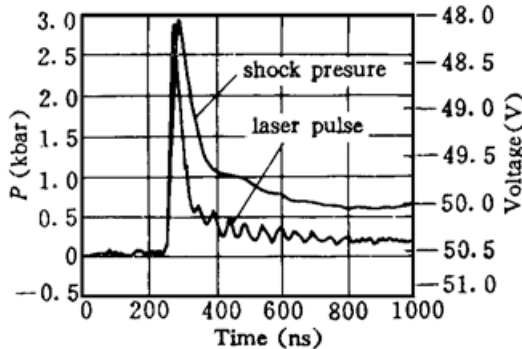


图3 0.04 mm 铝靶背面的冲击波压力与激光冲击波波形

Fig. 3 Shock pressure evolution at the rear face of a 40 μm aluminum foil and incident laser pulse profile

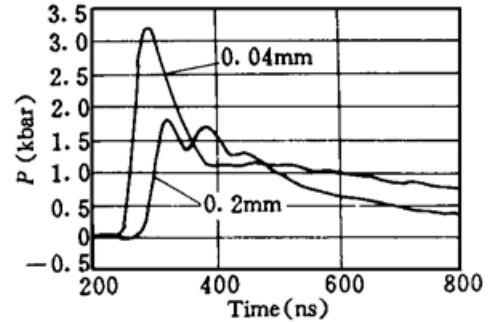


图4 比较 0.04 mm 和 0.2 mm 两种厚度的靶背面的冲击波演化过程

Fig. 4 The decay of shock peak pressure

其中, P_0, X_0 分别为激光冲击波在靶材中形成时的峰值压力和此时冲击波阵面与靶材表面的距离。在本实验中取 $X_0 = 40 \mu\text{m}$, P_0 取相应厚度铝靶中激光冲击波峰压的平均值 10.4 kbar。为了得到激光冲击波的衰减规律, 在激光加载条件和约束条件均不变的条件下分别对 40 μm 和 200 μm 厚的铝靶背面的冲击波压力进行了测量, 实验结果如图 4 所示。其中激光辐照到靶材表面时的功率密度为 $0.45 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。通过实验数据拟合得到了铝中的衰减指数为 $n = -0.371$, 这一指数 n 与目前进行了若干假设得出的理论衰减指数略有差异。在更广泛的实验数据基础上, 可以获得各种材料中的激光冲击波衰减规律, 从而使得在激光冲击波加载下材料动态结构关系的研究, 材料动态断裂分析和激光冲击处理工艺的研究向定量化方向前进一步。同时这一结果也给高压短脉冲在材料中的传播和衰减规律的理论研究奠定了实验基础。

在强激光与物质的相互作用过程中, 激光诱导的冲击波峰值压力与入射激光功率密度之间的关系一直受到人们的高度重视。由于其峰压与靶体材料的性质、激光波长、激光脉宽等激光和物质的诸多因素有关, 所以要得到对这一关系的统一描述的确十分困难。特别是由于这一领域的研究主要来源于人们对惯性约束聚变的兴趣, 而往往不去考虑约束层的影响, 但约束层恰好是

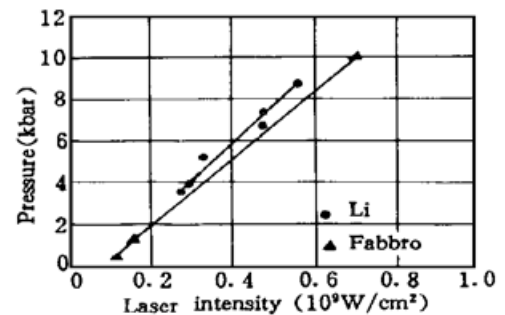


图5 激光冲击波压力随功率密度的关系
Fig. 5 Induced peak pressure in aluminum targets versus incident laser intensity (Li: 33 ns laser pulse duration, confined by PMMA; Fabbro: 30 ns laser pulse duration, confined by glass)

增压的一种极有效途径,在激光冲击处理和动高压加载技术的研究中均是一个十分重要的因素。本文研究了存在有机玻璃约束层时的激光冲击波峰压随激光功率密度的变化,其变化关系如图 5 所示。可以看出在所研究的激光功率密度范围之内,激光冲击波峰值压力基本上随激光功率密度线性变化。Fabbro 利用光学玻璃作约束介质时,在本文所涉及的功率密度范围之内,激光冲击波峰压也是随激光功率密度线性变化的(如图 5)。将本文的实验结果与 Fabbro 的结果进行比较可以得出,有机玻璃作为约束介质时的增压效果比光学玻璃还好,而且有机玻璃的成本相对低廉。从冲击波峰压随结果功率密度变化的趋势来看,两者基本一致。

参 考 文 献

- 1 陈大年,经福谦. 强激光的冲击力学效应. 见王礼立等编,冲击动力学进展,合肥:中国科技大学出版社,1992,277~ 299
- 2 Cottet F., Romain J. P.. Formation and decay of laser-generated shock waves. *Phys. Rev. A*, 1982, **25** (1): 576~ 579
- 3 袁 钢,周光泉,唐志平等. 高压短脉冲激波的传播及衰减. 爆炸与冲击,1992, **12**(4): 307
- 4 Romain J. P. *et al.*. Measurements of laser induced shock pressures using PVDF gauges, in Proceedings of High-Pressure Science and Technology-1993
- 5 Fabbro R. *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~ 784
- 6 Puig T., Decamps B., Bourda C. *et al.*. Deformation of a Y/Y' waspaloy after laser shock. *Materials Science and Engineering*, 1992, **A154**: 183~ 191

Experimental Study of High-power Pulsed Laser Induced Shock Waves in Aluminum Targets

Li Zhiyong Zhu Wenhui Cheng Jingyi Guo Dahao Wu Hongxing

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract High-power pulsed laser induced shock wave pressures in aluminum targets are measured with the use of PVDF gauges made by ourselves. The pressure decay of laser induced shock in aluminum is obtained by measuring the pressure on the rear faces of different thickness targets. The shock peak pressures as a function of laser intensity of about GW/cm^2 are reported.

Key words laser induced shock, PVDF gauges, attenuation