科学通报
第41卷 第19期 CHINESE SCIENCE BULLETIN 1996年10月

铜中强激光冲击波衰减规律的实验研究*

李志勇 朱文辉 程经毅 周光泉
(中国科学技术大学力学系,合肥 230026)
郭大浩
(中国科学技术大学强激光实验室,合肥 230026)

关键词 激光冲击波 PVDF压电膜 衰减规律

强激光照射到固体材料靶面时,会在材料表面产生高温高压等离子体向外喷射,从而在固体中诱导一个高压冲击波. 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,并已用于惯性约束聚变[1]. 尽管强激光诱导的冲击波近年来引起了人们的广泛关注,顾援等也曾通过光学诊断技术间接估算过激光冲击波压力[2],然而由于冲击波衰减快,历时短,其在材料中衰减规律的多点实时直接测量结果迄今未见报道. 本文利用自行研制的PVDF压电膜传感器对强激光在铜中诱导的冲击波完成了多点实时直接测量,在实验中获得了激光冲击波的衰减规律. 这一结果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本构研究和动态断裂研究以及激光冲击强化工艺奠定了一定的实验基础.

1 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1.06 μm,脉宽33 ns,单次发射能量约5.75 J,光斑直径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,并在靶面涂有激光涂层. 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,其目的是使之同PVDF压电膜波阻抗相匹配,同PVDF并联的是一个阻值为25 Ω的电阻R. PVDF的压电信号和激光脉冲信号由Philip PM3320A数字示波器记录. 实验靶板材料选用的是黄铜,为了获得其衰减规律,我们选用了四种材料厚度:0.04 mm,0.1 mm,0.2 mm和0.3 mm. 在保持激光加载条件、约束窗口和涂层不变的条件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冲击波在铜中的衰减

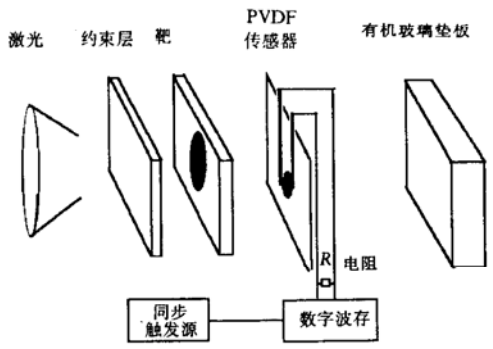

图1 靶体组装图

1996-01-29 收稿
* 国家"八六三"高技术基金资助项目

规律. 这里假设不同幅值的冲击波在铜和 PVDF 传感器之间的透反射规律保持不变.

2 结果与讨论

在强激光打靶实验过程中, PVDF 压电传感器是一种很理想的传感器[3,4]. 其测量范围大(0～20 GPa), 频响高(ns 量级), 动态标定简单方便. 在这里我们利用自己研制的这类传感器对强激光冲击波压力进行了实时测量. 根据动态标定的结果, PVDF 测得的压电信号 $V(t)$ 与压力 $P(t)$ 之间在 $P\in[0,3\times10^8\ \mathrm{Pa}]$ 的范围内满足以下关系:

$$P(t)=\frac{K}{A}\int_0^t\frac{V(t)}{R}\mathrm{d}t.$$

这里, K 为动态标定系数, 取值为 $(6.6\pm0.3)\times10^8\ \mathrm{Pa\cdot cm^2/\mu c}$, A 为 PVDF 的激活面积(直径为 6 mm), R 是与 PVDF 并联的电阻(25 Ω). 通过上述关系由记录到的电压波形可直接换算出激光冲击波压力波形(计算时 K 取为 $6.6\times10^8\ \mathrm{Pa\cdot cm^2/\mu c}$). 表 1 中列出的峰压测量值便为各次实验测到的冲击波最大压力.

表 1 四种不同厚度的黄铜背面用 PVDF 测得的压力峰值

靶厚/mm	0.04				0.1			0.2			0.3		
靶面辐照能量/J	5.75	5.64	5.75	5.68	5.75	5.87	5.75	5.68	5.52	5.29	5.75	5.87	5.98
峰压测量值×100/MPa	2.94	3.01	3.12	3.05	1.88	1.76	1.67	1.56	1.52	1.29	1.26	1.40	1.61
标准峰压×100/MPa	2.94	3.04	3.12	3.08	1.88	1.73	1.67	1.57	1.61	1.37	1.26	1.38	1.56

在具体实验过程中, 由于激光器每次输出的能量(或者作用在靶材表面的激光功率密度)略有波动, 为了保证对不同厚度的靶材其加载条件的一致性, 在此根据美国 Los Alamos 国家实验室 Phipps 等人建议的形式[5], 将不同能量下的激光冲击波峰值压力 $P_{\max}$ 在某一选定的标准能量下进行归一化处理, 其中峰值压力 $P_{\max}$ 与功率密度 I_0 之间满足如下关系:

$$P_{\max}\propto I_0^{3/4}.$$

这里, 我们选激光器输出能量 5.75 J 为标准, 将在 5.75 J 左右时测量得到的峰压通过以上关系转换成 5.75 J 时的结果, 经换算后的峰压以下称为标准峰压(见表 1). 考虑到测量和换算两方面的影响, 其标准压力的相对误差应小于 10%.

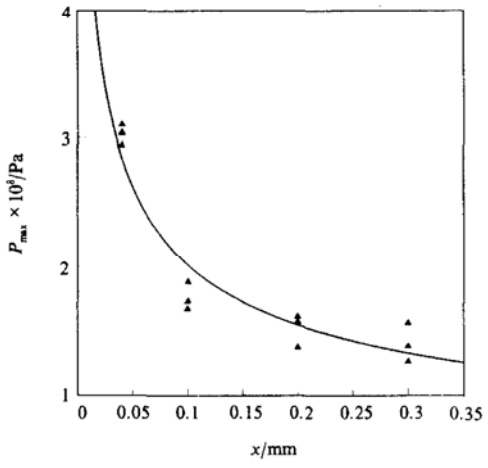

图 2 激光冲击波峰压的衰减规律

将以上实验数据用最小二乘拟合, 得到冲击波压力峰值的衰减规律满足

$$P_{\max}=0.84x^{-0.38}.$$

这里, $P_{\max}$ 为压力峰值($\times10^8$ Pa), x 为激光冲击波传播的距离(mm), 其压力峰值的衰减如图 2 所示.

这一衰减规律与文献[6]在考虑了表面烧蚀时所预测的形式完全相同, 只是指数略有差异, 这说明用指数规律的形式预测激光冲击波的衰减具有良好的普适性. 在更广泛的实验数据基础上, 可以进一

步获得材料在激光冲击波加载下的本构关系，预测材料的层裂强度，进而使材料动态断裂分析向定量化方向前进一步.

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：中国科学技术大学出版社，1992. 277～299

2 顾　援，倪元龙，王勇刚等. 激光驱动高压冲击波的实验观察. 物理学报，1988，37(10)：1 690～1 693

3 李欣增，唐志平，虞吉林. 绝缘膜组合式高聚物压电传感器. 中国专利，专利号 92242887.5

4 Romain J P. Measurements of laser induced shock pressures using PVDF gauges. In: Schmidt S C ed. High-Pressure Science and Technology-1993, America Institute of Physics, 1994. 1 915～1 919

5 Phipps C P. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO_2 single-pulse lasers. J Appl Phys, 1988, 64(3): 1 083～1 096

6 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)：307～312