

# 激光冲击在 LY12CZ 中形成冲击波的研究

戴蜀娟 刘富荣 杨 晓 邹鸿承 安承武\* 陆冬生\*

(华中理工大学塑性成型及模具技术国家重点实验室,\* 激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 应用 EMG201MSC 准分子激光器通过石英压力传感器和 2440 瞬态存储示波器并采用两种方式(瞬态存储法和滚动法)测定了激光冲击 LY12CZ 中产生的冲击波。激光器的波长为  $1.06\mu\text{m}$ , 脉宽为 28ns, 输出功率密度为  $1.06 \times 10^8 \text{W}/\text{cm}^2$ 。按照压电转化原理, 计算出 LY12CZ 中形成的瞬态冲击波的量值处于 MPa 级, 并分析和计算了冲击波的衰减方程。

关键词: 冲击波 功率密度 衰减方程

## Study on shock wave resulted from laser pulse shocking on surface LY12CZ

Dai Shujuan, Liu Furong, Yang Xiao, Zou Hongcheng, An Chengwu, Lu Dongsheng  
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074)

**Abstract** When a laser beam irradiates to the surface on a metal, the instantaneous energy accumulation makes a great number of metal atoms vaporous and form a shock wave propagating to the inner of materials. These reactions makes the microstructure and the properties of the materials improved. In order to experimentally research the shock wave, the system composed of a quartz pressure transducer and a EMG201MSC excimer laser operating at 1060nm, pulse width 28ns, power density  $1.06 \times 10^8 \text{W}/\text{cm}^2$ , is designed to measure the laser shock wave on the surface of LY12CZ aluminum alloy, using instantaneous storage method and rolling method with a 2440 instantaneous storage oscilloscope. The experimental results show that the pressure of laser shock wave is MPa order. Finally, the attenuating equation of laser shock wave has the expression of  $P = 13.4t^{-0.099}$ , here the unit of  $P$  and  $t$  is MPa and ns respectively.

**Key words:** shock wave powder density attenuating equation

### 一、引 言

当强激光束照射材料表面时, 在靶表面瞬态沉积大量的能量, 使表层原子被强烈地气化, 并脱离材料表面的同时, 形成一个较强的向材料内部传播的冲击波, 此冲击波与材料的相互作用, 从而改变材料内部显微结构的分布组态, 同时宏观上又表现为材料力学性能的改变。据文献[1, 2]等学者认为, 激光冲击后能大大地提高材料的表面性能, 尤其是材料的疲劳性能。

所以, 要想研究激光冲击后材料性能改变的程度, 首先应该研究激光与材料的交互作用(即激光冲击产生的冲击波的研究)具有很大的现实意义。国内, 由于激光技术起步较晚, 大功率的激光器尚未普遍, 限制了这项技术的发展。

### 二、激光冲击波测试实验

采用  $\phi 16\text{mm}$  的 0~1mm 不同厚度的一系列试样, 测出这些不同厚度试样背面处的冲击波的大小, 作出冲击波在不同厚度内传播的曲线, 进行反推, 可以获得激光冲击在试样表面形成的冲击波峰值压力。

在进行激光冲击之前试样要进行黑化处理,目的是使材料表面能够尽量多地吸收激光束的能量。本文实验采用化学磷化法对试样进行黑化处理。其方法为:将试样放入配制的化学试剂中加热磷化,溶液配方是 1g 酸式磷酸锰配 1L 水,要求 pH 值不大于 4,用 NaF 作催化剂,其用量控制在 1~ 2g/L 水,将溶液加热至 95~ 97℃,过 3~ 4h 即可。这样,在试样的表面就形成一层厚度小于 0.01mm 的灰黑色薄膜。采用水作为约束层,目的是约束气化的原子,使它们再次反冲回试样表面,保证更大峰值压力的形成。水膜厚度 1~ 2mm。

激光冲击是在瞬态内完成的,所以要求测量仪器具备频率响应高、记录速度快和抗干扰性好等优点。本实验采用石英压力传感器和 2440 瞬态存储示波器来测定冲击波的大小。石英压电传感器的压-电转化公式为<sup>[3]</sup>:

$$I = \begin{cases} (AKC/l)[\sigma(-ct) - \sigma(l-ct)] & t > l/c \\ (AKC/l)[\sigma(-ct)] & t \leq l/c \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $A$ ,  $l$  分别为压电石英片的表面积和厚度(这里  $\Phi=16\text{mm}$ ;  $l=1\text{mm}$ )。  $K$  为压电系数(对于铝合金  $K=2.011 \times 10^{-7} + 1.07 \times 10^{-9} \sigma$ , 单位  $\text{C}/\text{cm}^2 \cdot \text{GPa}$ )。  $c$  为声速  $c=5.72\text{mm}/\mu\text{s}$ 。  $I$  为形成的电流强度。

这里,由于激光脉冲时间极短,冲击压力与电流的变化将按直线规律来处理。应力波测试装置如图 1。

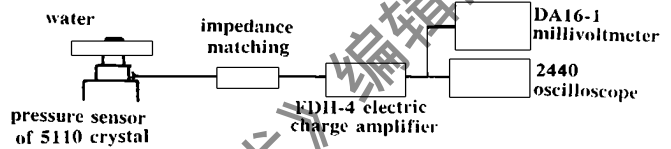


Fig. 1 Schematic diagram of measurement of shock wave

### 三、激光冲击波测试结果及分析

#### 1. 激光冲击波的频谱图

激光冲击材料表面,使表层原子吸热、气化、蒸发,脱离表面,被约束层反冲回表面的过程是一个复杂的瞬态过程,在极短的时间内形成的冲击波也是一个由不同频率的波叠加的复杂波。这里我们应用积分变换的方法来确定激光冲击波的频谱分布。设激光冲击波为单个矩形波,其频谱函数为:

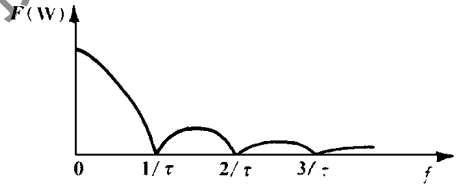


Fig. 2 Theoretical spectrum of single rectangle shock wave

$$F(W) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} E e^{-j\omega t} dt = E \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{-j\omega t} dt = \frac{2E}{W} \sin \frac{W\tau}{2}$$

根据振幅频谱  $|F(W)|$  作频谱图如图 2。

#### 2. 瞬时存储法

将示波器的时标设置为 50ns,应用示波器的瞬时存储功能,测出激光冲击



Fig. 3 Measured curves of laser shock wave using instantaneous storage method

击波的纳秒级的波形图。测试结果如图 3(试样厚度: a—0.1mm 200mV/div 50ns/div b—0.235mm 500mV/div 50ns/div c—0.33mm 500mV/div 50ns/div)。根据图 3 中的数据并利用公式(1),计算出不同厚度时材料中形成的冲击波的峰值压力  $\sigma$ ,并绘于图 4。

对上面的曲线进行反推,当试样厚度  $x \rightarrow 0$  时,所对应的压力值,即为激光冲击在材料表

面形成的瞬态峰值压力值。从图中可以得出激光产生的应力波峰值压力为 9.11MPa。据 Trainor<sup>[4]</sup> 等人的研究, 激光冲击波峰值压力  $P$  与激光功率密度  $I_0$  存在如下简单关系

$$P = BI_0^n \quad (2)$$

式中,  $B \approx 0.6 \sim 0.8$ ;  $n \approx 0.67 \sim 0.82$ ;  $P, I_0$  的单位分别为 T, Pa,  $10^{14} \text{W/cm}^2$ 。

验证上式, 取  $B = 0.6$ , 将  $P_{\text{max}}$  和  $I_0$  的数据代入(2)式, 得  $n = 0.806$ , 完全满足上式的要求。

### 3. 滚动法

示波器的滚动条件为时标  $> 100 \text{ms/div}$ , 在滚动的条件下, 可以将激光冲击波检测并存储起来, 然后再相应地转化时标, 以达到理想的可视效果。测试结果如图 5。



Fig. 5 Measured curves of laser shock wave using rolling method  
specimen thickness a—0.1mm 100mV/div 5ms/div b—0.154mm 100mV/div 5ms/div c—0.58mm 100mV/div 5ms/div d—0.805mm 100mV/div 5ms/div

同样对其进行处理得出其峰值压力为  $P_{\text{max}2} = 2.91 \text{MPa}$ 。比较这两种方法。两种方法计算出的激光冲击波峰值压力值属于同一数量级。文献 [5] 在与我们的冲击条件相似的条件下, 也得到了 MPa 级的激光冲击波压力峰值。从激光的冲击波频谱图中可以看出: 低频波的振幅较大而高频波的振幅较小, 几乎趋近于 0。本实验中分别测得的高频波 iv 和低频波 ㊟ (如图 6), 可以分别看作是同一频率的波叠加的结果。因此, 有许许多多的高频波进行叠加, 更进一步说明了激光冲击波主要是由高频波组成的事实。另外, 我们可以在上图中假想地再引入一条波形, 其峰值压力与波形周期都介于 iv, ㊟ 之间, 以此类推, 可以引入一系列的波 ㊟ ㊟ ..., 所有的波叠加的结果即为激光冲击材料产生的应力波。画出这一系列波峰值压力的包络线, 可以近似地作为激光冲击波处理。从图中可以看出, 可以用 iv 波的峰值压力近似地作为激光的冲击波峰值压力。激光冲击波上升沿比较陡, 与激光束的半高宽极为相近, 而衰减比较缓慢, 从  $50 \text{ns} \rightarrow 5 \text{ms}$ , 衰减了  $2/3$  的峰值压力。

同时, 激光冲击波衰减遵循着指数关系<sup>[6]</sup>, 对图 6 进行模拟, 可以得到冲击波的时间衰减方程为:

$$P = 13.4t^{-0.099} \quad (3)$$

式中,  $P, t$  的单位分别为 MPa 和 ns。

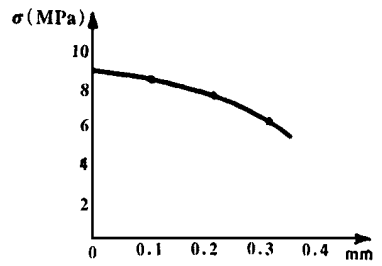


Fig. 4 The measured  $\sigma$ - $x$  curve. Here  $\sigma$  is peak value of pressure of laser shock wave and  $x$  is specimen thickness

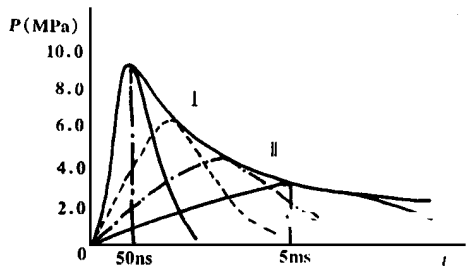


Fig. 6 The comparison of high frequency wave iv and low frequency wave ㊟ of laser shock wave

## 四、结 论

1. 应用瞬态存储法可以近似地测定激光冲击波的峰值压力。
2. 激光产生的冲击波是由

## 布基球 C<sub>60</sub>光限制效应研究进展

松涛

陈宗礼

(防化研究院, 北京, 100083) (军事医学科学院放射医学研究所, 北京, 100850)

摘要: C<sub>60</sub>的成功合成与分离为深入研究激光防护新材料打开了大门, 基于反饱和和吸收机理的光限效应是 C<sub>60</sub>的重要特性之一。本文就 C<sub>60</sub>的光限机制、特性、最新研究进展及应用前景作一概述。

关键词: 球布基 C<sub>60</sub> 光限制效应 反饱和吸收

### Review on the development of optical limiting effect of C<sub>60</sub>

Ding Songtao

(Institute of Chemical Defence, Beijing, 100083)

Chen Zongli

(Institute of Radiation Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Beijing, 100850)

**Abstract:** Fullerene-C<sub>60</sub>, as a kind of new materials used for laser protection, has been studied due to the fact that it is synthesised and separated successfully in recent years. Optical limiting effect is based on the principles of reverse saturable absorption in C<sub>60</sub> and it is one of the significant properties of this material. In this paper, some mechanisms, performances for optical limiting, new studying progresses of C<sub>60</sub> are introduced and the application of C<sub>60</sub> as an optical limiter material in future is discussed.

**Key words:** fullerene-C<sub>60</sub> optical limiting effect reverse saturable absorption(RSA)

光限制效应是指材料的透光率随入射光强的增加而降低, 从而使输出光限制在一定的能量阈值以下的一种光学效应。由此材料制成的光限制器件, 预期在眼睛及光学传感器的激光防护方面有重要的实用价值。近年来, 人们一直试图利用反饱和吸收、热透镜效应、非线性散射等非线性光学效应来实现光限制, 并取得一定进展。已经表明, 具有大  $\pi$  共轭电子体系的有

一系列不同频率的波叠加的结果, 其中高频波所占的比例较大。激光冲击波的上升沿比较陡, 与激光束的脉冲时间处于同一量级, 而衰减过程较为缓慢。通过数值模拟, 得到冲击波的衰减方程为  $P = 13.4t^{-0.099}$ 。

#### 参 考 文 献

- 1 Clauer A H, Walters C T, Ford S C. Lasers in Mater. Proc. Conf. Proceedings AMS, atzbow er EA ed Ohio, 1983
- 2 Fairand B P, Wilox B A. J A P, 1973; 43(9):
- 3 秦自楷编. 压电石英晶体. 北京: 国防工业出版社, 1980
- 4 Tranor J. Phys Fluids, 1982; 25: 1898
- 5 庄仕明, 王春彦, 罗 福 *et al.* 高压物理学报, 1993; 7(1): 61~ 65
- 6 张万甲, 王 悟, 曾之全 *et al.* 高压物理学报, 1994; 8(3): 205~ 212

\* \* \*

作者简介: 戴蜀娟, 女, 1947 年出生。副教授。现从事材料改性及微观研究。

