

# 实验参数对激光冲击强化效果的影响

刘世伟 郭大浩 王声波 段志勇 吴鸿兴 戴宇生 夏小平

(中国科技大学强激光技术研究所 合肥 230026)

**提要** 测量了冲击波的压电波形、压力波形和工件上所形成的凹坑深度,并讨论了约束层及涂层对冲击波的影响.

**关键词** 强激光脉冲,激光冲击强化,等离子体

为了使激光冲击强化技术(LSP, Laser shock processing)<sup>[1-2]</sup>达到实用的目的,必需选择适宜的实验条件,使冲击强化达到预期效果.

当强激光照射工件表面时,会形成冲击波作用于工件上.若冲击波足够强,可引起工件塑性变形,大大提高工件强度.冲击波的形成可分为三个过程.第一步,在激光脉冲的持续时间内,由于强激光的烧灼使约束层与工件之间形成等离子体,由等离子体的喷射对工件施加一个冲击压力.第二步是等离子体的绝热膨胀过程,它发生在激光熄灭以后,在这个阶段等离子体对工件的冲击压力逐渐下降.第三步是等离子体的绝热复合过程,此过程中等离子体对工件的冲击压力很小并最终降为零<sup>[3]</sup>.

## 1 实验装置

### 1.1 激光

实验中采用钕玻璃高功率脉冲激光装置.激光波长  $1.06 \mu\text{m}$ ,典型脉宽(FWHM) 35 ns,典型输出能量 10 J.输出激光以焦距为 110 cm 的透镜聚焦,典型光斑大小为  $\phi 7 \text{ mm}$ .实验时,以硅光二极管(PIN diode)将激光波形转换成电信号输入示波器,并用 PT-IC 激光能量计测量每次激光的输出能量(见图 1).

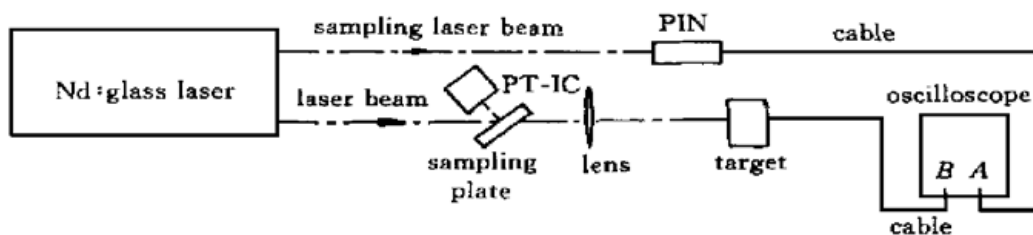


图 1 激光冲击强化实验装置

Fig. 1 Scheme of LSP experiment

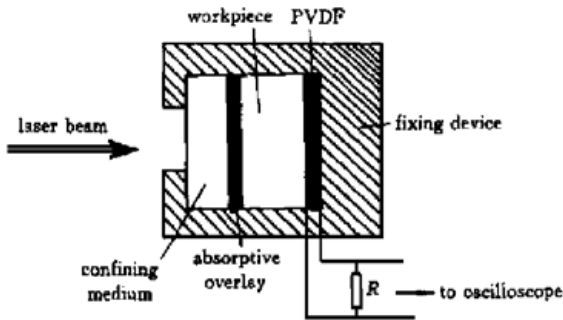


图 2 靶具结构

Fig. 2 Structure of target

## 1.2 靶具

靶具由工件、吸收涂层、约束层和固定件组成(见图 2),以高聚物压电传感器(PVDF, polyvinylidene fluoride)<sup>[4]</sup>置于工件背面将压电信号  $V(t)$  输入示波器.若压力为  $P(t)$ ,冲击动量为  $M(t)$ ,则有

$$P(t) = \frac{K}{A} \int_b \frac{V(t)}{R} dt$$

$$M(t) = \int_b P(t) dt$$

其中  $t$  为时间,  $A$  为作用区面积,  $R$  为电阻,  $K$  为比例系数<sup>[5]</sup>.工件采用铝合金、铜等金属材料,并用细砂纸将其表面抛光,以便清楚地观察到受激光冲击强化后所留下的凹坑.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验结果

图 3 (a) 为典型的压电信号  $V(t)$  (A 通道) 及激光信号波形 (B 通道), (b) 为典型的压力波形 (上) 及动量波形 (下).

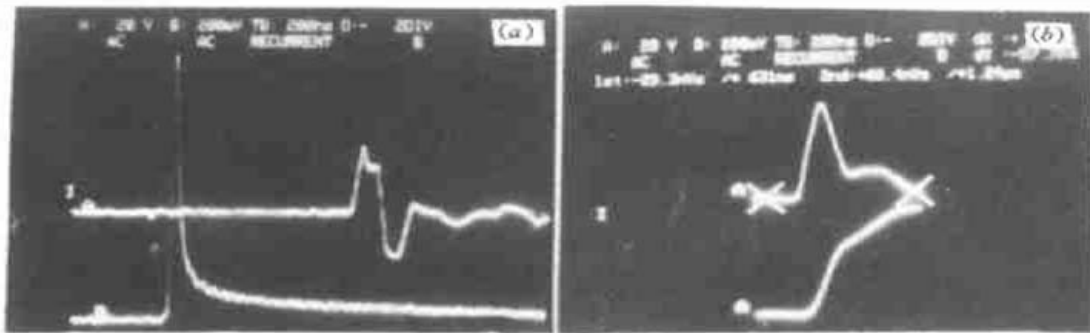


图 3 (a) 激光脉冲 (B 通道) 和压电脉冲 (A 通道) 波形; (b) 冲击波压力 (上) 和动量 (下) 波形

Fig. 3 (a) laser pulse (channel B) and piezoelectrical (channel A) wave;

(b) shock pressure (above) and momentum (below) wave

### 2.2 约束层的影响

约束层的作用是限制等离子体的膨胀.一方面,它强迫等离子体对工件施加一更大的冲击压力,同时又可加大等离子体的密度,增强其对激光的吸收.常采用对激光波长透明的 K9 玻璃、普通玻璃和石英玻璃等材料.首先,实验中采用不同厚度的 K9 玻璃作为约束层,并为消除涂层厚度变化所造成的影响而不使用涂层,让激光直接烧灼工件产生等离子体,同时测量其冲击波形,实验数据见表 1.实验发现,约束层厚度增大时,压力波形的峰值略有增长.这是容易理解的,约束层增厚,其强度增大,在等离子体的喷射过程中不完全破碎或较晚破碎,这就增强了对等离子体的限制作用,从而强迫等离子体给工件施加一个更大的压力.实验发现,约束层的破碎是从与涂层接触的内表面开始的,这有另外的益处,可防止后续激光在约束层内表面反射所造成的能量损失.当约束层达到一定厚度后,等离子体喷射时已不足将其完全冲碎,再增

加厚度也不会增大冲击压力. 然后, 通过测量工件表面的凹坑深度, 以比较不同材料作约束层的冲击效果, 实验数据见表 2. 数据表明, 普通玻璃不如 K9 玻璃, 形成的凹坑较浅. 若假定激光脉冲是脉宽为  $\tau$  的方波, R. Fabbro 等<sup>[3]</sup> 已给出冲击波压力大小  $P$  与材料声阻抗  $Z$  的关系

$$P(\text{kbars}) = 0.10 \left[ \frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right]^{1/2} Z^{1/2} (\text{g/cm}^2\text{s}) \times I_0^{1/2} (\text{GW/cm}^2) \quad (1)$$

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

其中,  $\alpha$  为等离子体热能对内能的比值, 典型值为  $\alpha = 0.1$ ,  $Z_1$  和  $Z_2$  分别是工件和约束层的声阻抗. 对 K9 玻璃其值为  $1.14 \times 10^6 \text{ g/cm}^2\text{s}$ , 对普通玻璃其值为  $0.47 \times 10^6 \text{ g/cm}^2\text{s}$ . 因前者阻抗较大, 产生较强冲击波, 故可得到较好的冲击效果. 因此, 选取约束层时, 最好能使其在冲击中不会完全破碎, 而且应具有较大的声阻抗. 采用较厚的 K9 玻璃能基本达到这一要求.

表 1 不同约束层厚度下的冲击效果(以 K9 玻璃作为约束层, 不使用涂层, 并采用 5 mm 厚的铝合金工件)

Table 1 Shock effects of confining medium of different thickness. This experiment uses K9 glass as confining medium (no absorptive overlay) and aluminum alloy as workpiece (5 mm in thickness)

Laser pulse energy/J	Laser pulse FWHM/ns	Confining Medium thickness/mm	Piezoelectrical pulse maximum/V	Piezoelectrical pulse FWHM/ns	Pressure pulse maximum/ $\mu\text{V} \cdot \text{s}$	Pressure pulse FWHM/ns
11.0	36	6.8	22.0	89	2.0	211
10.1	36	4.3	22.5	70	1.7	192
10.1	36	1.9	22.1	46	1.3	197

表 2 使用吸收涂层的不同材料约束层的冲击效果

Table 2 Shock effects of different confining medium. This experiment uses absorptive overlay

Laser pulse energy/J	Laser pulse FWHM/ns	Aluminum alloy thickness/mm	Confining medium	Confining medium thickness/mm	Pit depth/ $\mu\text{m}$
7.05	36	2.96	Common glass	2.0	34
7.50	35	2.97	K9 glass	2.0	56

表 3 不同涂层厚度的冲击效果

Table 3 Shock effects of the overlay of different thickness

Laser pulse energy/J	Laser pulse FWHM/ns	Confining medium thickness/mm	Liquid drop number of overlay	Pressure pulse maximum/ $\mu\text{V} \cdot \text{s}$	The rest of overlay	Pit status
10.6	36	5.60	0	1.8	No	Coarse
10.8	36	5.76	3	1.6	Very Little	Slick
11.0	36	5.78	5	1.4	Much	Shining
10.5	36	5.76	8	1.1	Very much	Shining

### 2.3 涂层的影响

涂层对冲击强化的效果起着至关重要的作用. 它一方面吸收激光能量形成等离子体, 另一方面又防止激光产生的高热烧灼工件材料, 对工件起到保护作用. 实验中以对激光有很好的吸收作用的吸收涂料滴于约束层背面作为涂层. 表 3 列出不同涂层厚度的冲击效果. 数据表明涂层厚度有一临界值, 超过此值, 黑色涂层不会被完全烧灼掉, 可在工件表面看到光亮的凹坑. 此时, 一方面被烧灼的部分用以形成等离子体, 另一方面剩余部分又对冲击波产生损耗, 涂层

越厚,测到的压力峰值越低,冲击效果也越差.当涂层厚度低于临界值时,涂层未吸收掉足够的激光能量,以至激光直接烧灼工件而产生等离子体.这两部分等离子体喷射时都对工件产生冲击压力,一方面铝合金工件升华能较低,有利于高温、高压等离子体的产生(反映在(1)式中,则 $\alpha$ 较大),但另一方面,铝对激光能量的吸收不如吸收涂料,这对高温、高压等离子体的产生不利.在本实验中,发现前者占优,因而冲击压增大.但在这种情况下,涂层对工件已起不到保护作用,在工件表面就会形成粗糙的凹坑,这是激光烧灼的结果.这对工件强化会产生负效果.因此,选取涂层时,要求其激光有较高的吸收率,升华能较低,并且厚度应以略大于临界值为佳.临界值以涂层刚好被烧灼掉为准.

### 3 讨 论

为使激光冲击强化装置达到实用水准,装置所输出的激光功率密度应达到预期的数值并有足够的作用区面积,应该稳定耐用且操作方便.在实际应用中,采用较厚的K9玻璃虽可减轻其四处喷射,但玻璃内层不可避免地发生破裂,以至不可重复使用,尤其是玻璃碎屑会严重影响工作环境和工作效率,应该使玻璃碎屑不飞扬开来.此外,受冲击处可能是飞机、轮船、坦克和发动机等的各个部位,这要求激光脉冲能方便地传输至各处,使用光纤可达到这一要求,但难以承受高功率密度激光,这是其致命弱点.这些问题的最终解决都有待进一步实验.

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Y. K., Zhang S. Y., Yu C. Y. *et al.*. Laser shock-processing for fatigue and fracture resistance. *Science in China*, Ser. E, 1997, **40**(2): 170~ 177
- 2 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and applications. *Opt. and Quantum Electron.*, 1995, **27**(12): 1213~ 1229
- 3 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~ 784
- 4 Li X. Z., Tang Z. P., Yu J. L. *et al.*. Piezoelectricity gauge of insulation film and combined high polymer. *Chinese Patent*, No. 92242887.5 (in Chinese)
- 5 Xin Hong, Shengbo Wang, Dahao Guo *et al.*. Confining medium and absorptive overlay: their effects on a laser-induced shock wave. *Opt. and Lasers in Eng.*, 1998, **29**: 447~ 455

### Effects of Experimental Parameters on LSP

Liu Shiwei Guo Dahao Wang Shengbo Duan Zhiyong

Wu Hongxing Dai Yusheng Xia Xiaoping

(Institute of High Power Lasers, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

**Abstract** The shock piezoelectrical wave, pressure wave and the pit's depth were measured in the laser shock-processing experiment. The effects of confining medium and overlay on shock wave were discussed.

**Key words** high intensity laser pulse, laser shock-processing, plasma