

# 激光等离子体的声学诊断研究\*

邹 彪 陈建平 沈中华 卞保民 陆 建 倪晓武

(南京理工大学应用物理系, 南京 210094)

潘永东

(同济大学声学研究所, 上海 200019)

**摘 要** 提出了利用激光等离子体(冲击波衰减成的)声波对高功率激光与材料相互作用过程进行诊断的方法。实际测量了波长为  $0.53 \mu\text{m}$  激光与几种金属材料相互作用的过程, 其结果与采用其它方法得到的结果基本吻合。

**关键词** 激光等离子体, 声学, 诊断。

## 1 引 言

众所周知, 高功率激光与材料表面相互作用时, 将在空气中激起激光等离子体冲击波。该冲击波的强度和传播速度等参量与作用激光的特征、靶材的参数和空气的热力学特性都有密切关系, 它可用以状态方程、质量守恒、动量守恒和能量守恒为基础的解析式来表示<sup>[1]</sup>。

$$\frac{v_1 - v_0}{C_0} = \frac{2}{\gamma + 1} \left( M - \frac{1}{M} \right), \quad \frac{p_1}{p_0} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} M^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \quad (1)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)M^2}{2 + (\gamma - 1)M^2}, \quad \frac{T_1}{T_0} = 1 + \frac{2(\gamma - 1)}{(\gamma + 1)^2} \left( M - \frac{1}{M} \right) \left( \gamma + \frac{1}{M} \right) \quad (2)$$

式中  $M$  为激光等离子体冲击波运动的马赫数;  $C_0$  为空气介质中的声速;  $p_0$ 、 $v_0$ 、 $\rho_0$  和  $T_0$  分别为冲击波波前介质的压强、质点速度、密度和温度;  $p_1$ 、 $v_1$ 、 $\rho_1$  和  $T_1$  分别为冲击波波后介质的压强、质点速度、密度和温度;  $\gamma$  为介质绝热指数。这种在空气中运动的激光等离子体冲击波带有激光与材料相互作用过程的某些信息, 这些信息为探测激光与材料相互作用过程提供了条件。

由于冲击波的强度在初期衰减很快, 其半径扩展到厘米数量级后就衰减成声波<sup>[2]</sup>(有关理论将专文讨论), 而这种距离是能够进行探测的距离。在这种距离上通过对声波的探测、进而推算激光等离子体有关物理参数的方法称之为激光等离子体的声学诊断法。本文讨论了用声换能器探测声波, 然后计算激光等离子体参数的方法, 并对几种金属靶材进行了实验, 所得到的结果与参考文献[3, 4]给出的结论基本吻合。

\* 本文得到国家教委跨世纪优秀人才计划基金、霍英东教育基金会高校青年教师基金、江苏省自然科学基金资助。

## 2 激光等离子体的声学诊断原理

如果在激光等离子体声场中距源点距离为  $r_m$  的点  $m$  处测得激光等离子体声波的声压为  $P_m$ , 则由(1)式可求出该点相应的马赫数  $M_m$ 。而  $M_m$  与  $r_m$  和  $p_0$  之间的关系为<sup>[2]</sup>

$$\ln \frac{r_m e}{R_0} = \frac{1}{s a^2} R_0^2 \quad (3)$$

式中  $R_0$  为激光等离子体冲击波衰减为声波的临界点,  $s = (25/4) a r_m^2 (M_m - 1/M_m)^2$ 。(3)式可用迭代法解出  $R_0$ 。进而得到激光等离子体膨胀波运动的马赫数表达式

$$M_p = \frac{1}{5} \sqrt{\epsilon r^{-3/2}} + \frac{1}{5} (\epsilon r^{-3} + 25)^{1/2} \quad (4)$$

式中,  $\epsilon = (E/\gamma p_0)$ ,  $r$  为冲击波波面距激光作用点的距离,  $M_p$  为等离子体膨胀时波面的运动马赫数。

以上公式表示不同的激光脉冲与不同材料相互作用时, 所产生的等离子体的温度、压力和密度均不相同, 对应的等离子体能量也不同。也就是说, 不同的光脉冲与不同材料相互作用时产生的声波能量不同, 这是用声学法测试的基础。

假设等离子体的最大膨胀半径为  $d$ , 则可令(4)式中  $r$  的范围为  $0 < r \leq d$ , 因而得到与  $r$  对应的等离子体膨胀波的马赫数  $M_p$ 。当然, 此时的  $\gamma$  值应取等离子体的绝热指数(一般为 1.2), 再将  $M_p$  代入(1)式、(2)式, 即可得等离子体膨胀波面的温度  $T_p$ 、压强  $P_p$ 、质点速度  $V_p$  和密度  $\rho_p$  的解析解。

## 3 实验条件与装置

### 3.1 实验条件

激光脉冲参数: 单脉冲激光能量 0~ 60 mJ; 波长  $0.53 \mu\text{m}$ ; 脉宽 15 ns; 聚焦透镜焦距 15 cm; 激光功率密度达  $10^9 \text{ W/cm}^2$ ; 光入射角 0 度。

实验靶材均加工成  $\Phi 20 \times 30 \text{ mm}$  的圆柱体, 端面平整, 材料有铝(Al)、铜(Cu)、铁(Fe)和锡(Sn)等金属。在  $25^\circ\text{C}$  空气中进行实验。

### 3.2 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示。激光器 1 输出的激光束经透镜 2 聚焦于靶材 4 表面, 中间经过变换激光能量的可变衰减器 3, 聚焦透镜散射光的部分光能被光电管 5 所接收, 并作为示波器同步信号; 当激光等离子体声波传至声换能器 6 时声能转变为电能送到示波器 8 显示, 并将数据传至计算机 9 进行处理。7 为光电管 5 的电源。

### 3.3 实验仪器

Philips PM 3394 200MHz, 记忆示波器用以显示和存储声电换能器得到的电压脉冲数据。空气声换能器为 Panametrics 2.25/1.125 MHz, 其工作原理是当声能作用于换能器接收面时, 压电晶体将机械能转换为电能。同步触发用 PIN 管, 所用电源为直流 + 45 V。

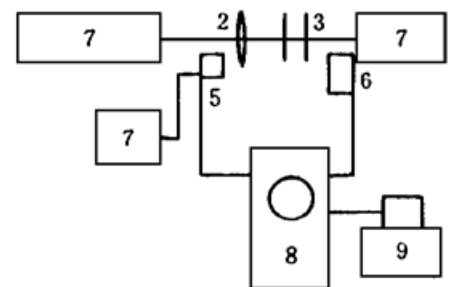


Fig. 1 Experiment setup. 1. Nd-YAG laser, 2. lens, 3. attenuates, 4. target, 5. photodiode, 6. sensor, 7. power source, 8. oscilloscope, 9. computer

## 4 实验结果及处理

实验中所获取的每一组数据都是经过八次平均后得到的值。根据靶材、激光能量、探测距离的不同分为三种情况进行测量。

### 4.1 作用激光能量和探测距离都不变时, 对不同靶材的实验结果

实验时激光能量为 60 mJ, 探测距离为 5 cm, 不同材料的激光等离子体声波形如图 2 所示。

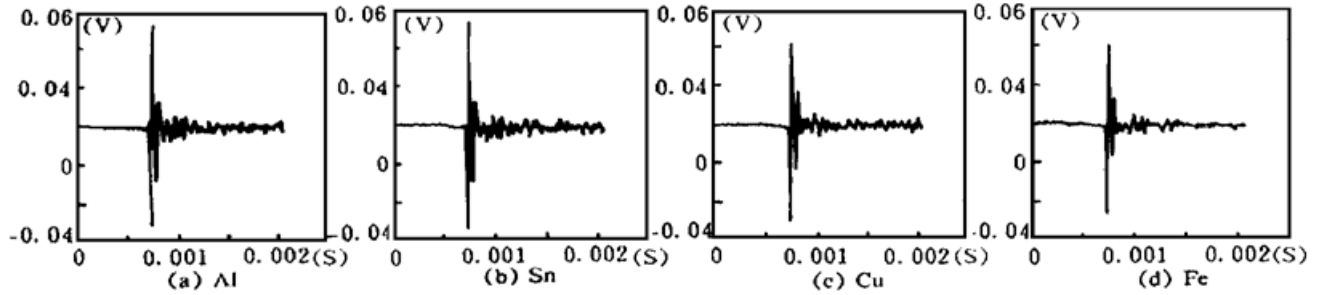


Fig. 2 Laser induced plasma acoustic wave forms at the surfaces of Al, Sn, Cu, and Fe.  $E = 60$  mJ;  $\lambda = 0.53$   $\mu\text{m}$ ;  $r_m = 5$  cm;  $\tau = 15$  ns

### 4.2 作用激光能量和靶材不变时, 在不同探测距离得到的实验结果

作用激光能量为 60 mJ 时, 探测距离分别为 3 cm、4 cm、5 cm、6 cm 时铝靶表面的激光等离子体声波如图 3 所示。

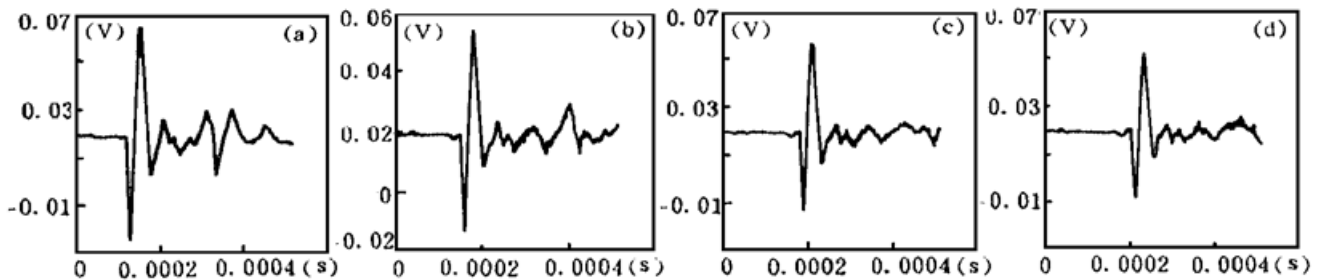


Fig. 3 Laser induced plasma acoustic waves at Al target surface at different detecting distance different detecting distance  $r_m$ : (a) 3 cm, (b) 4 cm, (c) 5 cm, (d) 6 cm;  $E = 60$  mJ;  $\lambda = 0.53$   $\mu\text{m}$ ;  $\tau = 15$  ns

### 4.3 探测距离和靶材不变时, 用不同作用激光能量得到的实验结果

当作用激光能量为 60 mJ、50 mJ、40 mJ、30 mJ, 探测距离为 6 cm 时, 铜靶表面的激光等离子体声波波形图如图 4 所示。

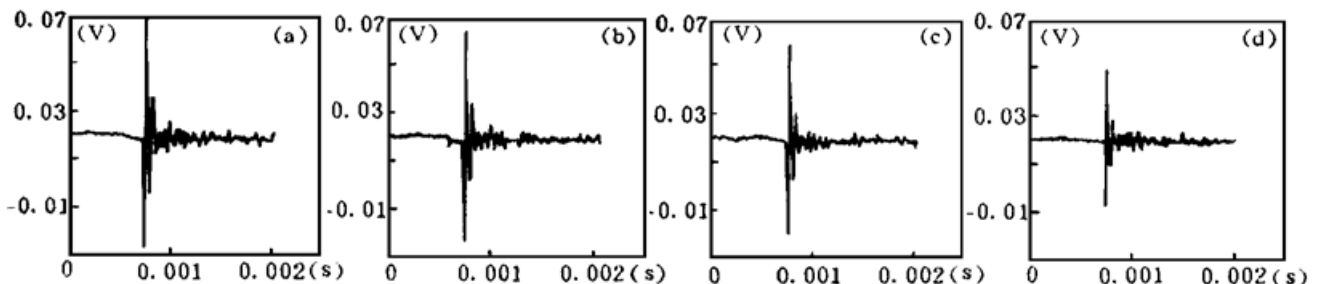


Fig. 4 Plasma-induced acoustic waves when laser pulses of different energy irradiate on a copper target laser energy  $E$ : (a) 60 mJ, (b) 50 mJ, (c) 40 mJ and (d) 30 mJ,  $r_m = 6$  cm

## 5 实验结果讨论

1) 由图 2 可见, 在作用激光能量相同时, 探测距离相同时不同金属材料表面产生的激光等离子体声波波形图不尽相同。其中的峰值声压各不相同, 且从图 2(a)~图 2(d) 的峰值电压逐渐减小。考虑到 Al、Sn、Cu 和 Fe 的第一离化能分别为 5.97 eV、7.30 eV、7.72 eV 和 7.83 eV, 因而可得一般规律为: 第一离化能较低的物质表面的激光等离子体声波的峰值声压较大, 反之亦然。这是因为在相同的激光能量作用下, 离化能较低的物质所产生的激光等离子体较强, 对应的声波也较强。

2) 由图 3 可见, 作用激光能量相同时, 随着探测器距离的变化所得到的峰值声压不同, 随着探测距离的增加其峰值声压按线性规律衰减如图 5 所示。

3) 图 3 中声波初始处距纵轴的距离表示了激光作用到形成激光等离子体声波之间的时间, 如图 3(d) 中该值为 0.0002 s。由图 3 可见, 等离子体声波到达探测器的时间是随着探测距离的增大而增大的, 其关系曲线如图 6 所示的线性关系。这一结果表明: 等离子体声波在传播距离大于厘米的数量级以后, 其传播速度基本不变。

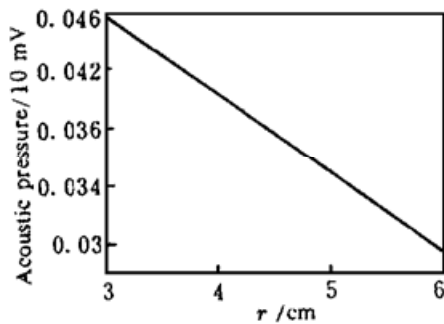


Fig. 5 The peak value of laser induced plasma acoustic pressure at Al target surface at different detecting distance.  $E_p = 60 \text{ mJ}$ ;  $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ ;  $\tau = 15 \text{ ns}$

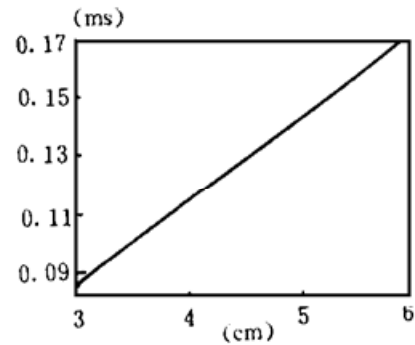


Fig. 6 The propagation distance change of laser induced plasma acoustic wave versus propagation time.  $E_p = 60 \text{ mJ}$ ;  $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ ;  $\tau = 15 \text{ ns}$

4) 由图 4 可见, 当作用激光能量不同时, 铜表面产生的等离子体声波到达探测器的时间几乎相同; 而不同的作用激光能量在铜靶表面产生的激光等离子体声波峰值声压不同, 其关系曲线如图 7 所示呈非线性变化。

5) 将与图 2(a) 中有关的实验数据代入(1)式和(2)式即可得到作用激光能量为 60 mJ, 探测距离分别为 5 cm 铝靶表面的激光等离子体膨胀波面上的马赫数、相对压强、相对密度和相对温度随距离的变化曲线, 如图 8 所示, 这些曲线与文献[3, 4]给出的结果基本相同。

利用本文所提出的方法可以测量激光等离子体膨胀波面上的压强、密度、温度、质点速度及波面运动速度, 其方法简单, 物理概念清晰易懂, 不失为探测激光与材料相互作用过程的有效方法之一。

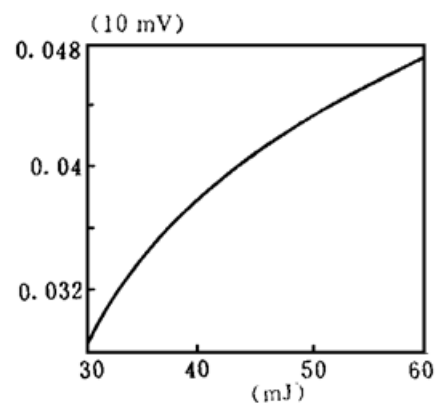


Fig. 7 The peak value change of laser induced plasma acoustic waves at copper surface versus laser energy.  $r_m = 6 \text{ cm}$

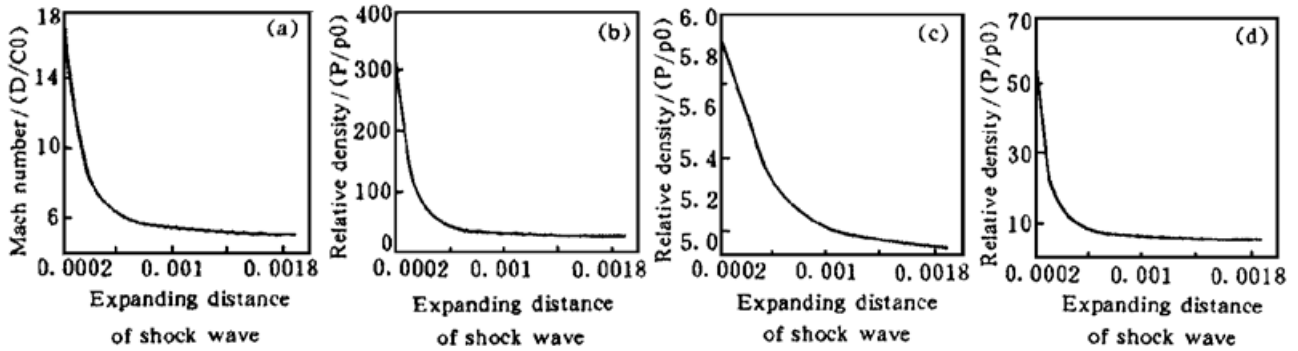


Fig. 8 The change of (a) Mach number (b) relative pressure (c) relative density (d) relative temperature of laser induced plasma expand wave plane versus distance. ( $E = 60 \text{ mJ}$ ;  $r_m = 6 \text{ cm}$ )

### 参 考 文 献

- [1] 张连玉, 汪令羽, 苗瑞生编著, 爆炸气体动力学基础. 北京, 北京工业学院出版社, 1986: 317~ 319
- [2] 邹 彪, 高功率激光与材料相互作用机理的声学诊断(硕士学位论文). 南京, 南京理工大学, 1996: 46
- [3] Jian Lu, Xaio-Wu Ni, An-Zhi He, An interferometric investigation of ignition of a laser-supported detonation wave and its propagation. *Opt. Commun.*, 1995, **120**(2): 144~ 148
- [4] 唐霞辉, 朱海红, 朱国富等, 高功率激光焊接光致等离子体的检测. 激光技术, 1996, **20**(5): 312~ 316

## Mechanism of Laser Induced Plasma Acoustic Wave

Zou Biao    Chen Jianping    Shen Zhonghua    Bian Baoming  
Lu Jian    Ni Xiaowu

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094)

Pan Yongdong

(Acoustic Institute, Tongji University, Shanghai 200092)

(Received 1 February 1997)

**Abstract** The process of laser induced plasma shock wave turning into acoustic wave is discussed. It is concluded that the weak limitation of the laser induced plasma shock wave is just the acoustic wave. The laser induced plasma acoustic wave is defined, and its forms are obtained through experiment.

**Key words** laser induced plasma acoustic wave, shock wave, acoustic wave.