

声学法判断金属铝板靶激光支持爆轰波的点燃阈值

刘天航 高 勋 刘泽昊 郝作强 孙长凯 林景全

(长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022)

摘要 基于声学法对 1064 nm 和 355 nm 激光脉冲作用金属铝板的激光支持爆轰波(LSDW)点燃阈值进行了研究, 理论分析了激光等离子体声波压强与冲击波的膨胀速度关系, 开展了 1064 nm 和 355 nm 激光作用铝板靶的实验研究。实验结果表明等离子体声波存在时间为毫秒量级, 其峰值强度呈指数衰减趋势。实验发现激光作用铝板产生的等离子体声波信号幅度随激光功率密度的增加而增加, 但是在激光功率密度增加的过程中等离子体声波峰值强度出现两次跃变, 由此判断出 1064 nm 和 355 nm 激光产生的 LSDW 的点燃阈值范围分别为 $(3.95 \sim 13.05) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 和 $(3.14 \sim 10.07) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。分析了激光波长因素对 LSDW 点燃阈值的影响。

关键词 激光技术; 激光等离子体; 激光支持爆轰波; 声学诊断; 点燃阈值

中图分类号 O536 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1103006

Determination of the Ignition Threshold of Laser Supported Detonation Wave of Aluminum Using Acoustic Method

Liu Tianhang Gao Xun Liu Zehao Hao Zuoqiang Sun Changkai Lin Jingquan

(School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The ignition threshold of laser supported detonation wave (LSDW) of aluminum generated by 1064 nm and 355 nm laser pulses is studied using acoustic method. The relation between the pressure of laser-induced plasma acoustic wave and the expansion velocity of shock wave is analyzed theoretically. Then the experimental research of aluminum target irradiated by the laser with the wavelength of 1064 nm and 355 nm is developed. The experimental results show that the lifetime of plasma acoustic wave is on the millisecond order, and the peak intensity of plasma acoustic wave decays exponentially. It is found in the experiment that the signal amplitude of plasma acoustic wave generated by the laser irradiation on aluminum target increases with laser power density increasing. However, the peak intensity of plasma acoustic wave appears jump stage twice while laser power density increases. From this it can be determined that the ignition threshold range of LSDW is $(3.95 \sim 13.05) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ for 1064 nm and $(3.14 \sim 10.07) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ for 355 nm laser pulse. Furthermore, the wavelength effect on the ignition threshold of LSDW is analyzed.

Key words laser technique; laser-induced plasma; laser supported detonation wave; acoustic diagnosis; ignition threshold

OCIS codes 280.3375; 280.5395; 350.5400

1 引 言

近年来,随着激光等离子体冲击波在激光沉积镀膜、激光冲击强化、激光推进技术等领域的广泛应用,人们越来越多地关注激光等离子体冲击波,特别是激光支持爆轰波(LSDW)的动力学特性。LSDW

的点燃一般认为有两种机制,一种是由激光支持燃烧波(LSCW)加速转变而成,另一种是直接由激光点燃。因为 LSDW 传播速度超声速,一般能够达到每秒几千米至上百千米,所以第一种机制认为当激光支持燃烧波形成后,不断地对其注入能量,当吸收

收稿日期: 2013-04-01; 收到修改稿日期: 2013-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(61178022)

作者简介: 刘天航(1985—),女,博士研究生,主要从事激光与物质相互作用、激光支持爆轰波等方面的研究。

E-mail: lth-720@163.com

导师简介: 林景全(1966—),男,博士,教授,主要从事飞秒激光与物质相互作用、极紫外光刻关键技术、光辐射电子显微术等方面的研究。E-mail: linjingquan@cust.edu.cn(通信联系人)

区集中于波的前沿并赶上波振面时, LSCW 就转化成 LSDW。另一种机制认为当大能量激光辐照到靶材表面时, 其电子被迅速加热到极高的温度, 产生热电离现象并向外发射电子, 电子导致靶材周围环境气体发生逆韧致吸收, 后发展为光学击穿, 导致 LSDW 点燃。

点燃阈值是研究 LSDW 膨胀动力学的一个重要物理参数。对应一种靶材, LSDW 点燃阈值与激光波长、脉冲宽度有关。高速摄影法^[1-3]、光学干涉法^[4-6]、阴影成像法^[7-8]等都可以记录 LSDW 的产生和传播, 获得 LSDW 的点燃阈值和传播图像, 进而进行实验和理论研究。然而, 这些方法虽然能够得到 LSDW 的点燃阈值, 但是实验装置相对复杂, 且实验步骤较为繁琐, 若想快速得到 LSDW 点燃阈值则比较困难。因此, 需要寻找一种能够快速判断 LSDW 点燃阈值的实验方法。在 LSDW 膨胀过程中, 常伴随着声音的出现, 而声音的大小与 LSDW 膨胀速度的变化有着一定的联系。因此, 在以前的研究工作中就有利用声音的变化来判断激光烧蚀情况^[9-10]和激光诱导等离子体的形成及演化过程的报道^[11]。

本文开展了基于声学法判断 LSDW 的点燃阈值研究, 建立了 LSDW 点燃阈值声学诊断实验系统, 研究 1064 nm 和 355 nm 纳秒激光作用铝板时产生的 LSDW 的点燃阈值范围, 并对二者进行了比较和分析。

2 实验装置

LSDW 的声学诊断装置如图 1 所示。实验中使用一台 10 Hz 调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器 (Continuum, Powerlite Precision II) 分别输出波长为 1064 nm、脉宽为 8 ns 的基频光和波长为 355 nm、脉宽是 5 ns 的三倍频激光脉冲, 通过分光镜 1 后, 经由半波片和格兰棱镜组成的激光能量衰减系统连续改变激光脉冲能量, 经过分光镜 2 后通过焦距 250 mm 的石英透镜垂直聚焦到铝板表面。铝板表面的光斑直径为 140 μm 。靶表面产生的等离子体的声音信号被声音探头接收, 由数字示波器 (Tektronix TDS7254B) 显示出声音信号的波形。经分光镜 1 分出的部分激光由 PIN 二极管接收触发示波器, 从而探测声音信号。分光镜 2 分出的激光能量由能量计 (Coherent, FieldMax II) 实时监测。通过测量分光镜 2 的透反射比, 可以得到聚焦透镜前的实际激光能量, 进而算出铝板表面的激光

功率密度。

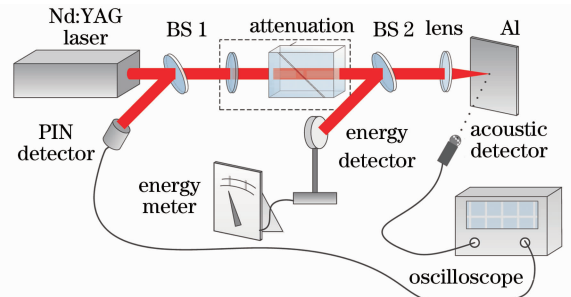


图 1 激光支持爆轰波点燃阈值声音诊断装置图
Fig. 1 Schematic diagram of acoustic diagnosis for ignition threshold of LSDW

实验中使用的铝板尺寸为 50 mm \times 30 mm \times 3 mm, 表面用标准粒度为 P1000 的砂纸打磨光滑以减少靶材表面不平整对实验结果的影响。铝板固定在三维平移台 (SIGMA, SGSP20) 上, 使每一个激光脉冲聚焦到新的靶材表面, 避免靶材表面过度烧蚀对声音信号探测的影响。固定声音探头在距激光聚焦靶材位置 10 cm 处, 通过对声音探头位置的调节, 将声音探头固定到与激光入射方向呈 45° 角的位置, 对 LSDW 膨胀过程中的声音信号进行采集。实验在温度为 24 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 40%、压强为 1.0×10^5 Pa 的空气环境中进行。

3 结果与讨论

冲击波向外膨胀时对周围介质产生的压强和其传播速度等参量与作用激光参数、靶材特性和环境介质的热力学特性密切相关。其表达式为^[12]

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} Ma^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1}, \quad (1)$$

式中 Ma 为激光等离子体冲击波运动马赫数, p_0 为冲击波波前介质的压强, p_1 为冲击波波后介质的压强, γ 为介质的绝热系数。由 (1) 式可以得知 p_0 、 p_1 和 Ma 的关系。

声压定义为有声音存在时, 媒质中的压力与静压的差值, 也就是大气压受到扰动后产生的变化, 即为大气压强的余压, 它相当于在大气压强上叠加一个扰动引起的压强变化。对冲击波产生的声压来说, 可表示为

$$p_s = p_1 - p_0, \quad (2)$$

式中 p_s 为激光等离子体声波的声压。因此, 实验中用声音探头得到激光等离子体声波的声压后, 代入 (2) 式, 冲击波波前介质的压强 p_0 通常为已知常数, 这样即可求得冲击波波后介质压强 p_1 , 从而可得到

激光等离子体冲击波运动马赫数 Ma 。这就是利用声学法进行测试诊断的理论基础。

另外,冲击波波后的压强还可以由 Sedov 理论计算得到^[13]。冲击波波后介质压强和冲击波速度的关系式为

$$p_1 = \frac{2}{\gamma+1} \rho v^2 \left[1 - \frac{\gamma-1}{2\gamma} \frac{\alpha^2}{v^2} \right], \quad (3)$$

式中 ρ 是未受扰动的空气质量密度, v 是冲击波波前的速度, α 是可以由 $\alpha = \sqrt{\gamma p / \rho}$ 得到的声速。

实验中,激光经透镜聚焦到铝板上,产生等离子体。根据能量的不同,产生等离子体的剧烈程度也不同,反映的直观现象就是声音信号的强弱关系。根据激光等离子体声音信号峰值强度是否存在突然

跃变来判断 LSDW 的点燃阈值。

波长 1064 nm 的激光脉冲经过分光镜 1 和分光镜 2 后的能量从 0.33 mJ 提高到 9.14 mJ,对应的功率密度为 $(2.16 \sim 5.94) \times 10^9 \text{ W/cm}^2$,经透镜聚焦铝板产生的等离子体声波声音信号如图 2 所示。

图 2(a)~(d)中,激光能量分别为 0.7、0.9、1.0、1.1 mJ。实验发现,声波存在时间为毫秒量级,且声音信号峰值强度随时间呈指数衰减变化趋势。从图 2 也可看出:在固定铝板和透镜相对位置不变的条件下,随着激光能量增加,声音信号强度增强,并且声音存在的时间变长。

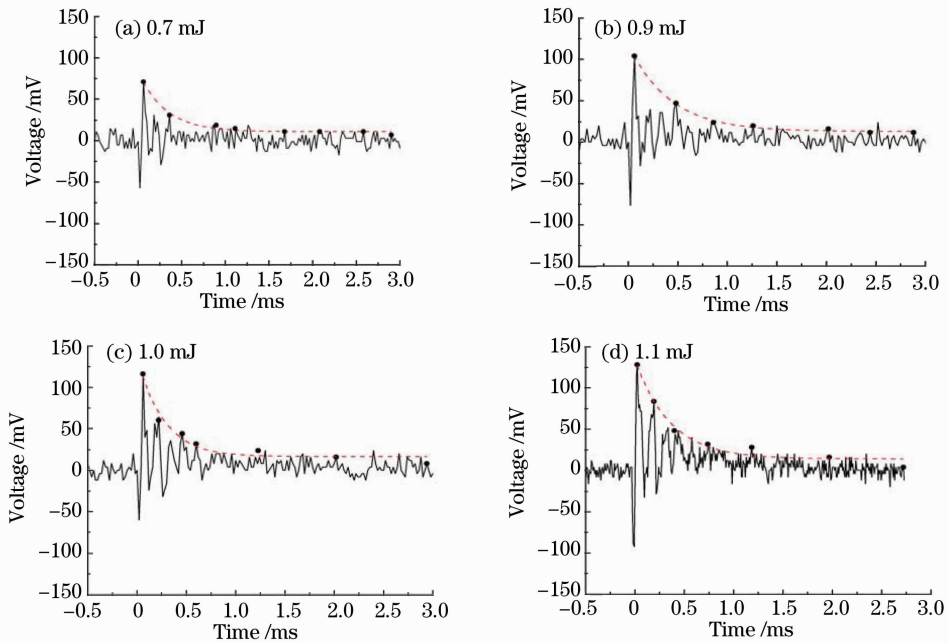


图 2 激光波长为 1064 nm 的脉冲在不同能量下的激光等离子体声波信号

Fig. 2 Acoustic wave signal of laser-induced plasma with different laser energies at laser wavelength of 1064 nm

图 3 为激光波长为 1064 nm 的脉冲作用铝板时激光功率密度与声音信号峰值强度关系的曲线图。为更清楚地显示出 LSDW 点燃阈值的范围,插图为范围在 $0 \sim 30 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 的激光功率密度与声音信号峰值强度关系曲线。由图 3 可知,入射激光功率密度与声音信号强度不是线性变化关系,而是随激光功率密度增加经历了一个快速上升后又呈现缓慢上升的变化趋势。激光功率密度与声音信号峰值强度关系曲线上存在两个拐点,分别在 $3.95 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 和 $13.05 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 处。入射激光功率密度从开始到第一个拐点范围内,声音信号强度随功率密度变化相对缓慢,可认为由于入射激光功率密度较小,只形成了激光支持燃烧波。第一个拐

点到第二个拐点之间这段范围,声音信号强度迅速

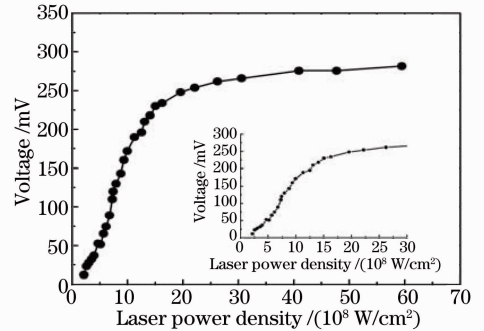


图 3 激光波长为 1064 nm 脉冲的激光功率密度与声波信号峰值强度关系曲线

Fig. 3 Relation of laser power density with peak intensity of acoustic wave signal at laser wavelength of 1064 nm

上升。这是由于激光支持燃烧波的波后粒子状态超越 C-J 点(Chapman-Jouquet-point)^[14],此时 LSDW 被点燃,向外膨胀速度突然增大,导致声音信号突然增强。而在第二个拐点之后,声音信号峰值强度随激光功率密度的变化变为平缓,可认为此时 LSDW 已被完全点燃。因此可判断 1064 nm 激光作用铝板产生 LSDW 点燃阈值的范围为 $(3.95 \sim 13.05) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。此 LSDW 点燃阈值的数量级与参考文献中的点燃阈值基本相符^[15]。

为了研究入射激光波长对 LSDW 点燃阈值的影响,还利用声学法判断了 355 nm 激光作用在铝板的 LSDW 点燃阈值。355 nm 激光脉冲作用铝板的声波信号峰值强度随激光功率密度的变化如图 4 所示,并与波长为 1064 nm 作用下的情况进行对比。

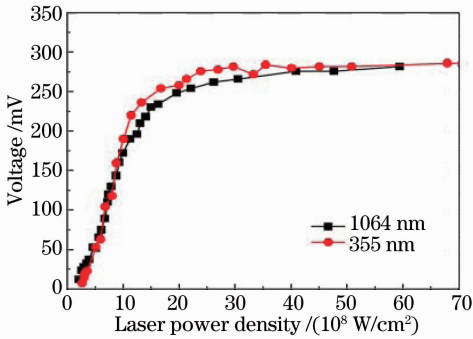


图 4 激光波长为 355 nm 和 1064 nm 脉冲的激光功率密度与声波信号峰值强度关系曲线

Fig. 4 Relation of laser power density with peak intensity of acoustic wave signal at laser wavelength of 355 nm and 1064 nm

从图 4 可以看出,355 nm 和 1064 nm 激光产生等离子体的声音信号峰值强度随激光功率密度变化曲线具有相似的变化趋势,均有一个快速上升的阶段,随后逐渐变得平缓。铝板在 355 nm 激光作用下 LSDW 的点燃阈值范围是 $(3.14 \sim 10.07) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$,与 1064 nm 的点燃阈值相比偏小。相比于 1064 nm 激光而言,355 nm 波长的单光子能量较大,击穿铝板产生电子密度相同的等离子体需要的光子数较少,因而点燃 LSDW 的激光功率密度较低,从而点燃阈值偏小。

4 结 论

建立了一套 LSDW 点燃阈值声学诊断的实验装置,得到波长为 1064 nm 和 355 nm 的激光辐照铝板的声波信号峰值强度与入射激光功率密度的关系曲线,判断出 1064 nm 激光产生 LSDW 的点燃阈

值范围为 $(3.95 \sim 13.05) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$,略大于 355 nm 激光产生 LSDW 的点燃阈值范围 $(3.14 \sim 10.07) \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。相比于 LSDW 点燃阈值的其他测试方法而言,采用的声学诊断方法具有实验装置简单、操作简便的特点,能够较为快速地得到靶材 LSDW 的点燃阈值范围,为物理研究及工业应用提供了快速简单的实验方法和依据,可以作为研究激光与物质相互作用的有效途径之一。

参 考 文 献

- 1 W E Maher, R B Hall, R R Johnson. Experimental study of ignition and propagation of laser supported detonation waves[J]. J Appl Phys, 1974, 45(5): 2138-2145.
- 2 Chen Lang, Lu Jianying, Feng Changgen. Experimental and theoretical investigation on laser supported detonation waves in air[J]. Chinese J High Pressure Physics, 2010, 24(2): 154-160.
陈 朗, 鲁建英, 冯长根. 空气中激光支持爆轰波实验及理论分析[J]. 高压物理学报, 2010, 24(2): 154-160.
- 3 Wen Ming, Li Qian, Jin Xing, et al.. Effects of focusing angle on laser-supported detonation wave in air[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(9): 1571-1575.
文 明, 李 倩, 金 星, 等. 聚焦角度对空气中激光维持爆轰波的影响[J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1571-1575.
- 4 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Investigation of ignition and propagation features of laser-supported-detonation wave using interference pattern [J]. Laser Technology, 1996, 20(2): 74-77.
陆 建, 倪晓武, 贺安之. LSD 波点燃和初始阶段传播的光学干涉研究[J]. 激光技术, 1996, 20(2): 74-77.
- 5 A Fukuda, Y Hirooka, K Mori, et al.. Electron density measurement of laser supported detonation waves [C]. 35th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2004, 2565.
- 6 M Villagrán-Muniz, H Sobral, E Camps. Shadowgraphy and interferometry using a CW laser and a CCD of a laser-induced plasma in atmospheric air [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2001, 29(4): 613-616.
- 7 C-h Kim, J J Yoh. Surface chemical reaction of laser ablated aluminum sample for detonation initiation [J]. J Appl Phys, 2011, 109(9): 093510.
- 8 S-B Wen, X L Mao, R Greif, et al.. Laser ablation induced vapor plume expansion into a background gas. II. Experimental analysis [J]. J Appl Phys, 2007, 101(2): 023115.
- 9 C Stauter, P Gerard, J Fontaine, et al.. Laser ablation acoustical monitoring [J]. Appl Surf Sci, 1997, 109-110: 174-178.
- 10 M Navarrete, M Villagrán-Muniz, L Ponce, et al.. Photoacoustic detection of microcracks induced in BK7 glass by focused laser pulses [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003, 40(1-2): 5-11.
- 11 S Conesa, S Palanco, J J Laserna. Acoustic and optical emission during laser-induced plasma formation [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2004, 59(9): 1395-1401.
- 12 J Piprek, E S Bjorlin, J E Bowers. Optical gain-bandwidth product of vertical-cavity laser amplifiers [J]. Electron Lett, 2001, 37(5): 298-299.
- 13 L I Sedov. Similarity and Dimensional Methods in Mechanics, Tenth Edition [M]. Boca Raton: The Chemical Rubber Company Press, 1993.
- 14 G D Cole, E S Bjorlin, C S Wang, et al.. Widely tunable bottom-emitting vertical-cavity SOAs [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(12): 2526-2528.
- 15 Yang Bo, Zhu Jinrong, Yang Yannan, et al.. Determination of the laser supported detonation wave ignition threshold from impulse coupling between laser and target [J]. Chinese J lasers, 2007, 34(1): 137-142.
杨 波, 朱金荣, 杨雁南, 等. 由激光靶冲量耦合实验结果判定激光支持爆轰波点燃阈值 [J]. 中国激光, 2007, 34(1): 137-142.