

激光诱导等离子体屏蔽冲击波演化过程

袁迪¹ 高勋¹ 李百慧¹ 宋超² 朱泠西¹

¹长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

²长春理工大学化学与环境工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 开展了激光诱导等离子体屏蔽冲击波演化过程研究。利用光学阴影成像诊断技术, 分析了纳秒激光透过玻璃聚焦在铝靶表面上分别产生的等离子体与冲击波碰撞的时间和空间演化过程。随着玻璃与铝靶间距增加, 冲击波碰撞时间增加。研究表明, 冲击波相互碰撞时本身并不发生相互作用, 而是等离子体与冲击波发生作用, 出现冲击波波前畸变甚至破碎现象, 存在等离子体屏蔽冲击波过程, 最后探讨分析了等离子体屏蔽冲击波物理机制。

关键词 激光技术; 冲击波碰撞; 等离子体屏蔽; 阴影成像

中图分类号 O539 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.071403

Evolution Process of Laser Induced Plasma Shielding Shock Wave

Yuan Di¹ Gao Xun¹ Li Baihui¹ Song Chao² Zhu Lingxi¹

¹ School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² School of Chemistry & Environmental Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The evolution processes of laser induced plasma shielding shock wave is studied. The temporal and spatial evolution processes of the plasma and shock wave are investigated, when nanosecond laser focused on the surface of the aluminum target through the glass, using optical shadow imaging diagnostic techniques. The collision time of the shock waves increases with the distance between the glass and the aluminum target. Experimental results demonstrate that the shock waves do not interact with each other but interact with the plasma in the collision, and the shock wave front distortion or even broken will exist, the shock wave is shielded by the plasma. And the physics mechanism of plasma shielding shock wave is analyzed.

Key words laser technique; collision of shock waves; plasma shielding; shadow imaging

OCIS codes 140.3440; 350.5400; 140.3430

1 引言

研究表明爆炸破坏作用主要是由爆炸过程中产生的冲击波导致的。冲击波是一种在介质中传播的不连续峰, 会导致介质中压强、温度、密度等物理性质发生跳跃式改变。无论是化学性爆炸还是物理性爆炸都会形成强大的空气冲击波向四周运动, 以高压作用在障碍物上, 给目标很大的冲量和超压, 使目标遭受到不同程度的破坏^[1-3], 所以冲击波屏蔽研究对国防和工程应用都具有重要意义。随着高能激光技术的发展, 激光诱导产生的冲击波对材料的破坏效应具有应用可能^[4], 因此激光等离子体冲击波的屏蔽防护研究成为了研究热点。邓荣兵等^[5]分析研究冲击波与固体玻璃幕墙的作用, 为实现玻璃幕墙对爆炸产生冲击波的屏蔽防护设计提供了重要参考。张翼等^[6]研究了两个冲击波的碰撞过程, 表明冲击波与冲击波之间不发生作用。

收稿日期: 2016-02-11; **收到修改稿日期:** 2016-03-15; **网络出版日期:** 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(61575030)

作者简介: 袁迪(1991—)男, 硕士研究生, 主要从事激光等离子体动力学方面的研究。E-mail: ydlaser@sina.com

导师简介: 高勋(1978—)男, 博士, 副教授, 主要从事激光诱导击穿光谱技术及其应用, 激光等离子体膨胀动力学, 激光与物质相互作用等方面的研究。E-mail: lasercust@163.com(通信联系人)

Zhang 等^[7]利用快速傅里叶变换(FFT)和 Abel 方法分析了等离子体对碰撞区域的电子密度与产生冲击后的分子密度,发现等离子体与冲击波相互作用后电子密度增加。近年来对冲击波的防护屏蔽研究处于实验理论阶段,等离子体对冲击波的屏蔽机制尚不清晰。

本文研究了激光透过玻璃聚焦在铝靶表面上分别产生的等离子体与冲击波碰撞的演化过程,得到了冲击波波前膨胀距离的时间演化以及随玻璃与铝靶之间的距离变化关系,分析了冲击波之间以及冲击波与等离子体之间的相互作用。实验结果表明,两个冲击波相互碰撞时不发生相互作用,而是一个冲击波与另一个冲击波内的等离子体发生作用,等离子体对冲击波的屏蔽作用效果主要由等离子体电子密度决定。

2 实验装置

激光诱导等离子体屏蔽冲击波过程利用光学阴影成像法进行研究,实验装置如图 1 所示。输出波长为 1064 nm,频率为 10 Hz,脉冲宽度为 10 ns,光束直径为 8 mm 的调 Q Nd:YAG 激光器 1(Continuum, Power8000)辐射出激光能量为 800 mJ 的激光光束经石英平凸透镜 1($f=100$ mm)经过厚度为 1.1 mm 的玻璃片聚焦到铝合金表面,焦斑直径为 0.5 mm,在玻璃前后表面以及铝靶均烧蚀产生激光等离子体。铝靶放置在平移台上,保证每个激光脉冲对应新的作用表面。光学阴影成像探测光源为输出波长为 532 nm,频率为 10 Hz,脉冲宽度为 8 ns 的调 Q Nd:YAG 激光器 2(Continuum, Surellite II)。532 nm 激光光束通过由透镜 2($f=30$ mm)和透镜 3($f=300$ mm)组成的扩束系统穿过等离子体,经过透镜 4(75 mm)成像到科学 CCD 相机(PI, 1024 pixel \times 1024 pixel)上,在 CCD 相机和透镜 4 之间放置中性衰减片和 532 nm 干涉滤波片获取高质量的等离子体膨胀阴影图。通过两台延时发生器(Stanford Research, DG645)同步控制激光器 YAG1、YAG2 和 CCD 相机之间的延时,延时从 0 到 3000 ns 连续变化。实验环境为标准大气压,室温为 23 °C,相对湿度为 22%。

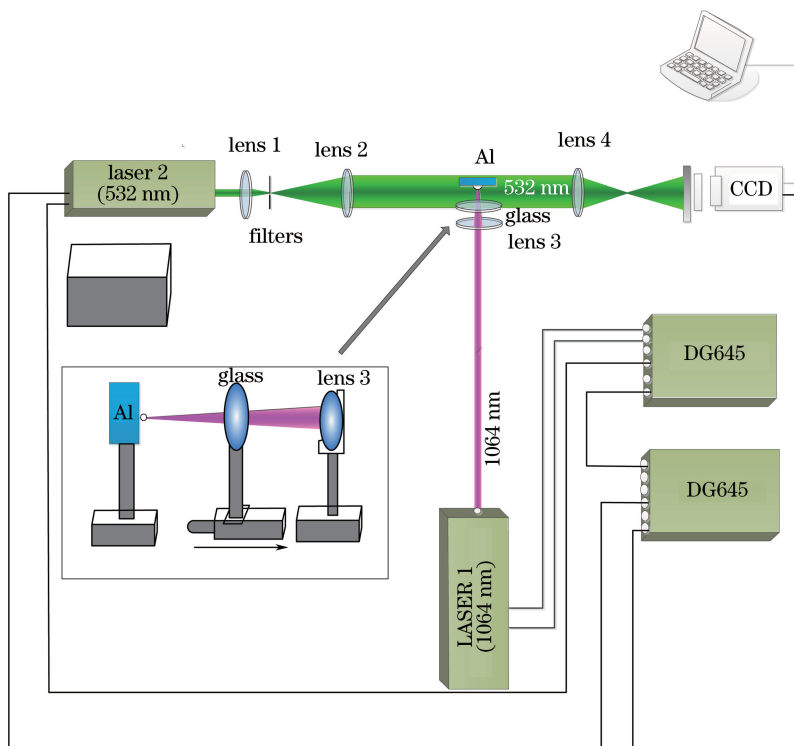


图 1 等离子体屏蔽冲击波阴影成像装置图

Fig. 1 Experimental setup for plasma shielding shock wave shadow imaging

3 实验结果与讨论

图 2 为玻璃片和铝靶间距为 3.5mm 情况下激光诱导等离子体屏蔽冲击波过程。图中烧蚀激光脉冲从

右向左入射,在玻璃前后表面和铝靶表面分别形成冲击波。激光最先烧蚀玻璃前表面,由于激光未完全聚焦,玻璃前表面处光斑直径较大,诱导产生半径较大的冲击波。激光进一步聚焦,在玻璃后表面处激光功率密度变大,可以明显地看到伴随冲击波膨胀过程烧蚀物质从玻璃表面喷出,冲击波层保持激光入射方向膨胀。激光通过玻璃后聚焦烧蚀铝靶产生冲击波逆激光入射方向膨胀,由于玻璃片吸收大部分能量,激光在铝的表面并未产生强烈烧蚀,所以未观察到铝靶烧蚀物喷溅,仅以球状方式的冲击波逆激光入射方向与玻璃后表面产生的冲击波相对膨胀。

当延迟时间为 400 ns 时,铝和玻璃诱导产生的冲击波未碰撞到一起,玻璃后表面产生的冲击波中可以看到激光等离子体的产生,延迟时间增加到 1200 ns 时,两个冲击波发生碰撞,但冲击波前均没有发生明显变化,玻璃冲击波波前保持不变进入铝冲击波内。延迟时间为 2000 ns 时,玻璃后表面的冲击波波前在铝靶冲击波内保持球状,而铝靶冲击波波前受到玻璃等离子体作用,使得波前变得略微不规则,但未发生明显凹陷。延迟时间为 3500 ns 时,在铝靶冲击波内的玻璃冲击波波前从球状变为平面,冲击波膨胀变缓,受到玻璃等离子体作用的铝靶冲击波波前出现破碎,甚至冲击波前沿已经消失。在冲击波碰撞区域,阴影成像变黑,表明此处电子密度变大^[7]。随着延时增加,冲击波碰撞区域出现了明显的平面间断分界区域,使铝靶冲击波波前破碎甚至消失,达到了冲击波屏蔽效果。

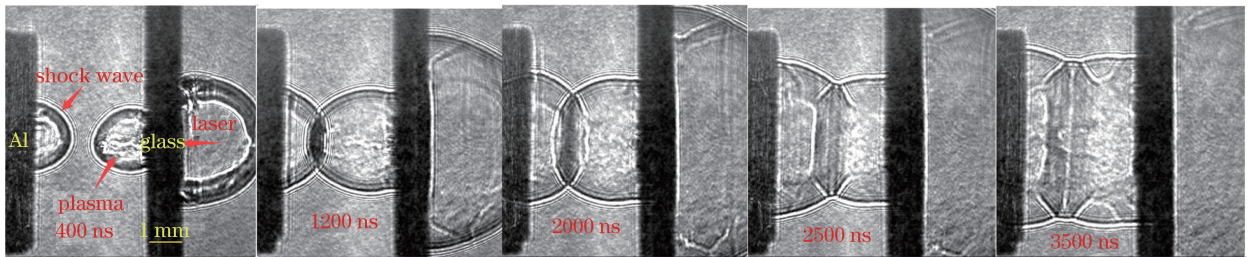


图 2 冲击波碰撞时间演化图

Fig. 2 Temporal evolution of shock waves collision

图 3 为在延迟时间均为 1000 ns 的情况下,通过改变玻璃片和铝靶之间的距离观察到的冲击波碰撞过程图,玻璃和铝靶间距分别为 2.3, 2.9, 3.5, 4.2 mm。从图中可以看到玻璃片和铝靶之间距离为 3.5 mm 和 4.2 mm 时,玻璃片和铝靶诱导产生的冲击波未碰撞到一起。当空间距离减小到 2.9 mm 时,两个冲击波刚好碰撞到了一起,但清楚地观察到玻璃后表面形成的冲击波依然保持球状沿激光传播方向在铝靶冲击波内继续传播。当玻璃片和铝靶之间的距离进一步减小到 2.3 mm 时,由于受到玻璃等离子体的作用,铝靶材冲击波波前发生畸变,由球状向平面变化,受到压缩靠近铝靶表面,铝靶冲击波横向扩散比刚碰撞时明显减小,相反玻璃冲击波的横向扩散明显增大。

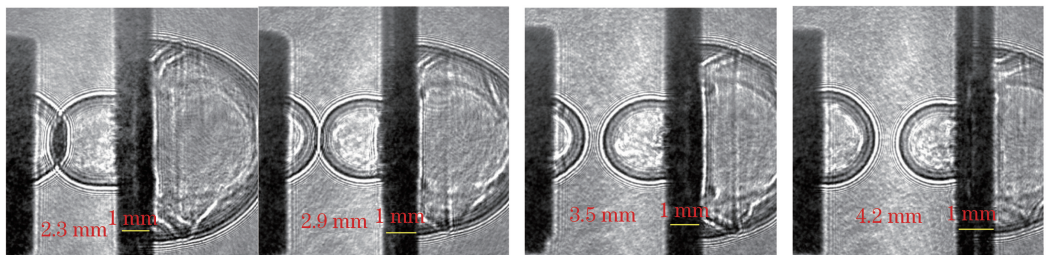


图 3 不同玻璃片和铝靶之间距离时的冲击波碰撞图

Fig. 3 Shock waves collision graph under different distances between the glass and aluminum target

等离子体屏蔽冲击波膨胀与冲击波的扩展速度有关,而冲击波膨胀速度大小与入射激光能量有关系^[8-9]。根据点爆炸 Sedov 理论可知,球面冲击波波阵面半径随时间变化表示为^[10]

$$R = k (E/\rho)^{1/5} t^{2/5}, \quad (1)$$

式中 R 为冲击波波阵面半径, E 为冲击波的能量, ρ 为冲击波前大气密度, k 为与冲击过程有关无量纲的积分常数,其数值接近于 1。冲击波波阵面的半径 R 随延时 t 的演化关系可从测到的冲击波光学阴影图中获

得。铝靶和玻璃间距为 3.5 mm 时,对应的铝靶和玻璃冲击波膨胀距离随延时变化曲线如图 4 所示。

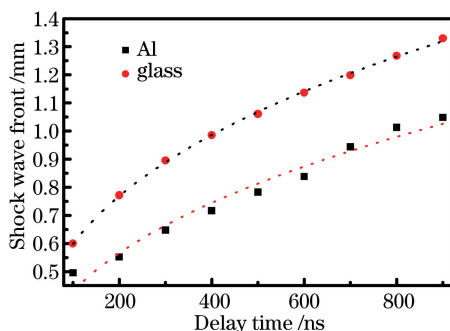


图 4 铝靶和玻璃冲击波膨胀距离随延时变化曲线

Fig. 4 Change curves of the expansion distance between aluminum target and glass shock wave along with the time of delay

在铝靶材与玻璃后表面间距为 3.5 mm 时,利用点爆炸 Sedov 理论估算得到玻璃片后表面产生的冲击波的能量为 $E_{\text{after}} \approx 205$ mJ,铝靶前表面冲击波的能量约为 $E_{\text{Al}} \approx 125$ mJ(激光烧蚀总能量为 800 mJ), $E_{\text{after}} > E_{\text{Al}}$ 。由图 2 和图 3 可知,当铝靶冲击波与玻璃冲击波碰撞后,玻璃冲击波波前基本不发生变化而进入铝靶冲击波内,铝靶冲击波波前在遇到玻璃所产生的等离子体时发生冲击波波前畸变而出现破碎现象,甚至消失,这说明冲击波能量大小起到了一定的作用。实验结果表明冲击波碰撞时不发生作用,而是冲击波与等离子体之间的相互作用导致冲击波前畸变破碎,即冲击波屏蔽作用。

图 5 为相同延时 1000 ns 时,铝靶和玻璃冲击波波前膨胀距离随铝靶和玻璃间距变化图。从图中可以看出,随着铝靶与玻璃间距变大,铝靶表面冲击波波前膨胀距离变大,但玻璃片冲击波波前膨胀距离变小。图 6 为铝靶和玻璃冲击波的碰撞时间随玻璃与铝靶间距变化图。随着铝靶材与玻璃片的间距增加,冲击波碰撞时间随之增加。出现这种现象是因为脉冲激光聚焦到铝靶表面,在玻璃前表面以及后表面产生烧蚀以及等离子吸收等现象,造成到达铝靶表面的激光脉冲能量降低。随着玻璃片的不断前移,在玻璃后表面处诱导产生等离子体的激光能量密度降低,到达铝靶表面的激光能量密度增大。在铝靶材与玻璃后表面间距为 3.5 mm 时,利用点爆炸 Sedov 理论估算得到玻璃片后表面产生的冲击波的能量为 $E_{\text{after}} \approx 205$ mJ,铝靶前表面冲击波的能量约为 $E_{\text{Al}} \approx 125$ mJ。而在铝靶材与玻璃后表面间距为 4.2 mm 时,玻璃片后表面产生的冲击波的能量为 $E_{\text{after}} \approx 173$ mJ,铝靶前表面冲击波的能量约为 $E_{\text{Al}} \approx 158$ mJ(激光烧蚀总能量为 800 mJ)。冲击波膨胀距离与诱导激光能量密度有关系,因此随着铝靶和玻璃间距变大,铝靶冲击波膨胀距离增加,而玻璃冲击波膨胀距离变小,从而造成两个冲击波碰撞时间变长。

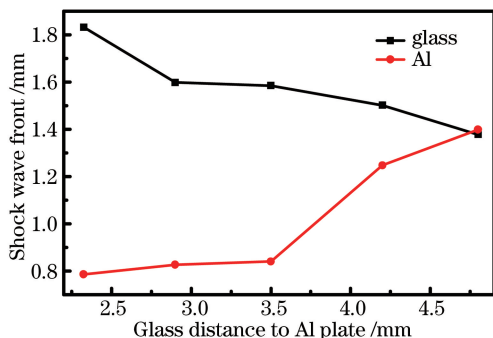


图 5 铝靶和玻璃冲击波膨胀距离随间距变化曲线

Fig. 5 Change curves of the expansion distance between aluminum target and glass shock wave along with the distance

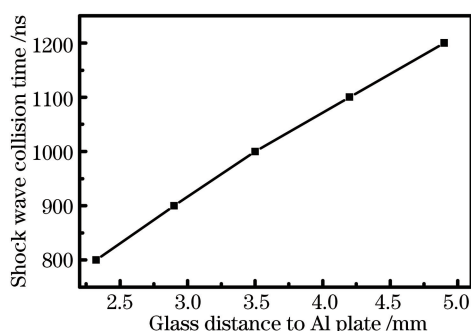


图 6 碰撞时间随玻璃与铝靶间距变化曲线

Fig. 6 Change curves of collision time along with the distance between glass and aluminum target

当铝靶和玻璃冲击波碰撞时,在碰撞区域形成平面间断重叠层,平面间断重叠层空间位置处的电子密度增加^[11]。玻璃后表面冲击波激光能量相对较高,冲击波压强大^[12-13],并且烧蚀产生的等离子体羽体膨胀速度大,而铝靶冲击波内激光能量低,冲击波压强较小,因此铝靶冲击波穿过玻璃冲击波后与电子密度较高的

玻璃等离子体相互作用时,受到玻璃等离子体冲击作用后的铝靶冲击波波前发生畸变,出现破碎甚至消失,产生冲击波屏蔽现象,而玻璃后表面冲击波前沿与电子密度较低的铝靶等离子体相互作用时,等离子体不能起到屏蔽约束作用。

4 结 论

利用阴影成像法,对激光烧蚀玻璃片与铝靶两个冲击波的碰撞过程进行了研究。分别观察了等间距不同延迟时间和等延迟时间不同间距下的冲击波与等离子体的碰撞过程。通过比较这两个过程的冲击波在不同膨胀距离、时间和相互作用情况下的冲击波波前变化,得出结论:两个冲击波相互作用时,冲击波本身并不发生相互作用,而是冲击波与等离子体之间发生相互作用。当冲击波与等离子体碰撞时,由于受到等离子体的约束屏蔽,冲击波前沿发生畸变甚至消失;由于玻璃片后表面能量密度不同,等离子体的电子密度与粒子的运动速度也会不同,所以等离子体与冲击波相互作用的效果不同。由此解释了玻璃片后表面等离子体对铝靶材冲击波存在屏蔽约束作用,而铝靶材表面等离子体与玻璃后表面冲击波屏蔽约束作用不明显的现象。

参 考 文 献

- 1 Cooper G J. Protection of the lung from blast overpressure by thoracic stress wave decouplers[J]. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 1996, 40(3S): 105S-110S.
- 2 Wen S B, Mao X, Greif R, *et al.*. Laser ablation induced vapor plume expansion into a background gas. II. Experimental analysis[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(2): 023115.
- 3 Cao Yupeng, Feng Aixin, Xue Wei, *et al.*. Experimental research and theoretical study of laser shock wave induced dynamic strain on 2024 aluminum alloy surface[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0903004.
曹宇鹏, 冯爱新, 薛伟, 等. 激光冲击波诱导 2024 铝合金表面动态应变特性试验研究及理论分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0903004.
- 4 Zhou Zihao, Li Xiaohong, Xie Changxin, *et al.*. Silicon surface topography by laser-induced plasma shock waves in the air and under water[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 52(10): 101405.
周子豪, 李晓红, 谢长鑫, 等. 空气中和水下激光等离子体冲击波对硅表面形貌的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 101405.
- 5 Deng Rongbing, Jin Xianlong, Chen Jun, *et al.*. Application of ALE multi-material formulation for blast analysis of glass curtain wall[J]. *Journal of High Pressure Physics*, 2010, 24(2): 81-87.
邓荣兵, 金先龙, 陈峻, 等. 爆炸冲击波对玻璃幕墙破坏作用的多物质 ALE 有限元模拟[J]. *高压物理学报*, 2010, 24(2): 81-87.
- 6 Zhang Yi, Zheng Zhiyuan, Li Yutong, *et al.*. Collision process of two shockwaves[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(10): 5931-5936.
张翼, 郑志远, 李玉同, 等. 两个冲击波相互碰撞的演化过程[J]. *物理学报*, 2007, 56(10): 5931-5936.
- 7 Zhang H, Lu J, Ni X, *et al.*. Optical interferometric analysis of colliding laser produced air plasmas[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(6): 063308.
- 8 Zhang Yuzhu, Wang Guang'an, Zhu Jinrong, *et al.*. Influence of distance on mechanical effect of plasma shock wave induced by laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(3): 318-322.
章玉珠, 王广安, 朱金荣, 等. 离焦量对等离子体冲击波力学效应的影响[J]. *中国激光*, 2007, 34(3): 318-322.
- 9 Bian Baomin, Chen Xiao, Xia Ming, *et al.*. The investigation of laser-induced plasma shock wave propagation in liquids[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 53(2): 508-513.
卞保民, 陈笑, 夏铭, 等. 液体中激光等离子体冲击波波前传播特性研究及测试[J]. *物理学报*, 2005, 53(2): 508-513.
- 10 Zeng X, Mao X L, Greif R, *et al.*. Experimental investigation of ablation efficiency and plasma expansion during femtosecond and nanosecond laser ablation of silicon[J]. *Applied Physics A*, 2005, 80(2): 237-241.
- 11 Zheng Peichao, Liu Hongdi, Wang Jinmei, *et al.*. Study on time evolution process of laser-induced aluminum alloy plasma[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1015001.
郑培超, 刘红弟, 王金梅, 等. 激光诱导铝合金等离子体的时间演化过程研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1015001.

- 12 Bian Baomin, Yang Ling, Chen Xiao, *et al.*. Study of the laser-induced plasmas and the kinematics of shock waves in air by away intense explosion[J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(4): 809-813.
卞保民, 杨玲, 陈笑, 等. 激光等离子体及点爆炸空气冲击波波前运动方程的研究[J]. 物理学报, 2002, 51(4): 809-813.
- 13 Doukas A G, Zweig A D, Frisoli J K, *et al.*. Non-invasive determination of shock wave pressure generated by optical breakdown[J]. Applied Physics B, 1991, 53(4): 237-245.