

LSDW 速度随激光参数和环境气体压强 变化规律的实验研究*

李 倩, 洪延姬, 叶继飞, 文 明

(装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘 要: 对 LSDW 速度随入射激光能量、激光聚焦角度和环境气体压强变化的规律进行了实验研究。研究发现, 入射单脉冲激光能量越大, 聚焦角度越小, 环境气体压强越小, LSDW 的传播速度越大。实验测量得到的 LSDW 速度随入射激光能量、聚焦角度和环境气体压强的变化规律与一维理论公式中体现的规律完全一致。将相同条件下的实验数据与理论结果进行比较后发现, 二者在定性上取得了很好的一致性, 但在定量上有所差别, 因此需要对现有一维理论公式进行修正, 以便更深入地研究 LSDW 的传播演化规律和特性。

关键词: 吸气式激光推进; 激光维持的爆轰波 (LSDW); 波速; 实验研究

中图分类号: TN249 V439 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2010) 01-0123-06

Experimental study on effects of laser parameters and ambient air pressure on LSDW velocity

LI Qian, HONG Yan-ji, YE Ji-fei, WEN Ming

(Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract Effects of incident laser energy, focusing angle and ambient air pressure on LSDW velocity were studied experimentally. Results indicate that LSDW velocity increases with the increasing of incident single pulse laser energy, decreasing of laser focusing angle and ambient air pressure. Relations between LSDW velocity and incident laser energy, focusing angle and ambient air pressure obtained from experiment agree well with one-dimensional theoretical formula. Compared experimental data with theoretical result, it is found that there are quantitative differences between them. Therefore, it is necessary to amend current one-dimensional theoretical formula so as to get deeper understanding on the characteristic of LSDW propagation.

Key words Air-breathing laser propulsion; Laser supported detonation wave (LSDW); Wave velocity; Experimental study

1 引 言

吸气式激光推进中, 一旦激光强度达到空气的击穿阈值 (对于纯净空气, 击穿阈值大约为 10^9 W/cm^2), 便产生了激光维持的爆轰波 (LSDW)。针对吸气式激光推进中激光维持的爆轰波的研究目前报道得很多。Myrabo 等^[1]分析了 LSDW 和 LSCW (激光维持的燃烧波) 的结构及其相应的击穿阈值, 指出如果激光强度在 $10^6 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ 之间, LSCW 将转化为 LSDW, 同时列出了 LSDW 速度的理论公式。

Ushio 等^[2]研究了线聚焦激光束引致的 LSDW 的传播过程, 它们绘出了 LSDW 波前和等离子体波前传播距离的曲线, 并从波的传播特征估算出了二者的分离点 (LSD 状态的终止点)。Lu 等^[3]按照气体动力学方法分析了 LSDW 的点燃过程, 得到了 LSDW 的速度、压强以及内能的表达式。通常情况下, 研究者们会给出二维情况下 LSDW 的速度公式, 并得到相关规律^[4~6]; 或者针对 LSDW 的传播过程进行实验, 对实验结果的分析较为详细^[3, 7, 8]; 然而, 对实验数据与理论结果进行比较的报道所见较少, 尤其是一些参数

* 收稿日期: 2009-06-02 修订日期: 2009-08-24

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328); 国家自然科学基金项目 (90916015)。

作者简介: 李 倩 (1982-), 女, 硕士, 研究领域为先进推进技术。E-mail: liqian827@sohu.com

对 LSDW 速度的影响研究不多。本文就激光能量、聚焦角度以及环境气体压强对 LSDW 速度的影响进行了一系列实验,并比较了实验数据和用一维理论公式计算得到的结果,发现在 LSDW 速度随上述参数的变化规律方面二者吻合得很好,定性的变化规律也完全一致,但在定量上还是有所区别,期望本文的研究结论能够为 LSDW 的传播演化规律研究提供一些有用的信息。

2 LSDW 速度的实验研究

2.1 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示。图 1 中激光器为高功率 TEA 脉冲 CO_2 激光器,激光波长 $10.6\ \mu\text{m}$,脉冲持续时间 $10\ \mu\text{s}$,频率 $25\ \text{Hz}$,最大输出脉冲能量约为 $100\ \text{J}$ 其波形如图 2 所示(图示为入射激光能量 $E = 32.5\ \text{J}$ 的波形,当能量值改变时,只是功率向上放大,其余不变)。激光器出光后直接通过透镜聚焦,击穿空气。高速相机拥有四个独立的拍摄通道,每个通道可以设置不同的延迟时间和曝光时间,相机触发一次就拍摄四个不同时刻的照片。当激光击穿空气形成等离子体发光时,光电二极管敏感光源输出的电信号给脉冲发生器,脉冲发生器以事先设置的延迟产生触发信号给相机,高速相机被触发,通过成像透镜直接拍摄等离子体发光及 LSDW 传播的照片,再从实验照片中获取 LSDW 的传播距离和波速随时间的变化特性。在单次实验中,先触发一次激光器,用能量计测量激光能量并记录下来,然后将能量计移开,进行正常实验过程。

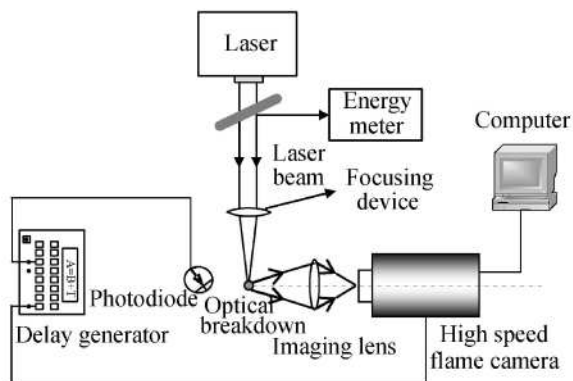


Fig 1 Sketch map of experimental set-up

2.2 实验结果

2.2.1 LSDW 速度随单脉冲激光能量的变化规律

入射激光光斑直径 $\phi = 50\ \text{mm}$, 焦距 $f = 200\ \text{mm}$, 由此算出激光聚焦角度 $\alpha \approx 7.13^\circ$, 在环境气体的压

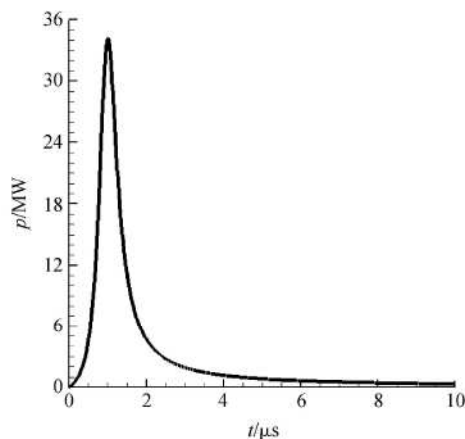


Fig 2 Waveform of incident laser pulse

强 $p_0 = 0.101\ \text{MPa}$ 的情况下, 对 $E_1 = 67\ \text{J}$, $E_2 = 81\ \text{J}$ 和 $E_3 = 95\ \text{J}$ 三种能量条件下的能量沉积过程进行了实验研究。实验得到三种能量下 LSDW 的传播距离 r 和速度 D 随时间 t 的变化曲线如图 3 所示。注意此处每种情况下都各自取空气发生光学击穿, 产生等离子体发光的时刻为 0 时刻, 以下求波速也都如此。

从图 3(a) 可知, 入射激光能量越大, 同一时刻 LSDW 的传播距离越远, 由此计算出的波速也越大, 如图 3(b) 所示。这一点与定性的认知也是一致的, 入射激光能量越大, 相同条件下等离子体区域沉积的能量也越多, 即 LSDW 越强, 波速肯定相对会高一些。但是, 由于本文中设定的三种能量值相差不大, 因此波速随激光能量的增长幅度并不是太大。

2.2.2 LSDW 速度随激光聚焦角度的变化规律

在环境气体压强 $p_0 = 0.101\ \text{MPa}$, 激光能量 $E = 72\ \text{J}$, 入射激光光斑直径 $\phi = 50\ \text{mm}$, 焦距 f 分别为 $200\ \text{mm}$ 和 $300\ \text{mm}$, 也即激光聚焦角度 α 分别为 7.13° 和 4.76° 的情况下, 对能量沉积过程进行了实验研究。两种聚焦角度下 LSDW 的传播距离 r 和速度 D 随时间 t 的变化曲线如图 4 所示。

从图 4 可知, 聚焦透镜的焦距越长, 也即聚焦角度 α 越小, 传播距离 r 越远, 波速 D 也越大。为更加清楚地分析形成这种规律的原因, 下面给出激光聚焦角度为 7.13° 和 4.76° 时的等离子体发光及 LSDW 传播演化的照片, 分别如图 5 和图 6 所示, 其中激光束从图片右侧入射。

从图 5 和图 6 可以看出, 激光聚焦角度较小时, 迎着激光的 LSDW 的波阵面较“尖”, 也即速度较大, 没有大聚焦角度的波阵面平滑, 尤其是早一些的时刻 ($0.08\ \mu\text{s} \sim 1.48\ \mu\text{s}$)。这是由于聚焦角度越小, 迎着激光入射方向的 LSDW 波阵面面积越小, 因此对于

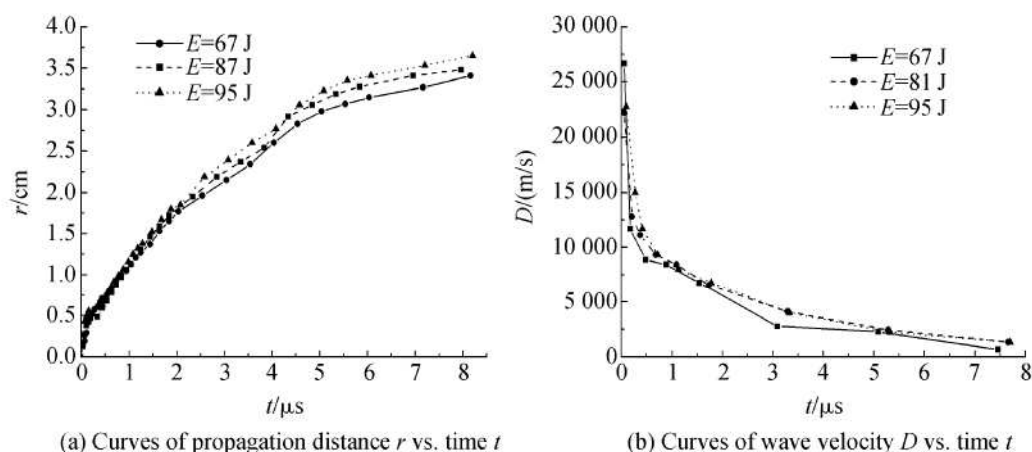


Fig 3 Curves of LSDW propagation distance and velocity vs time for different incident laser energy

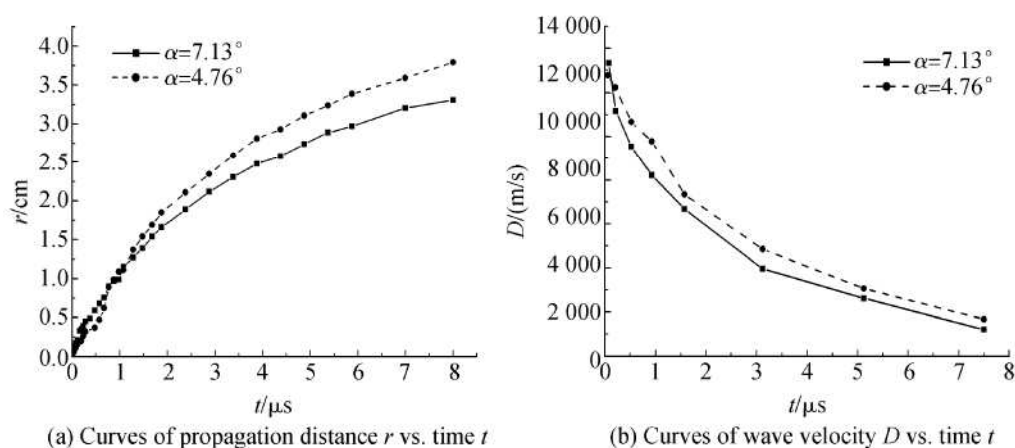


Fig 4 Curves of LSDW propagation distance and velocity vs time for different laser focusing angles

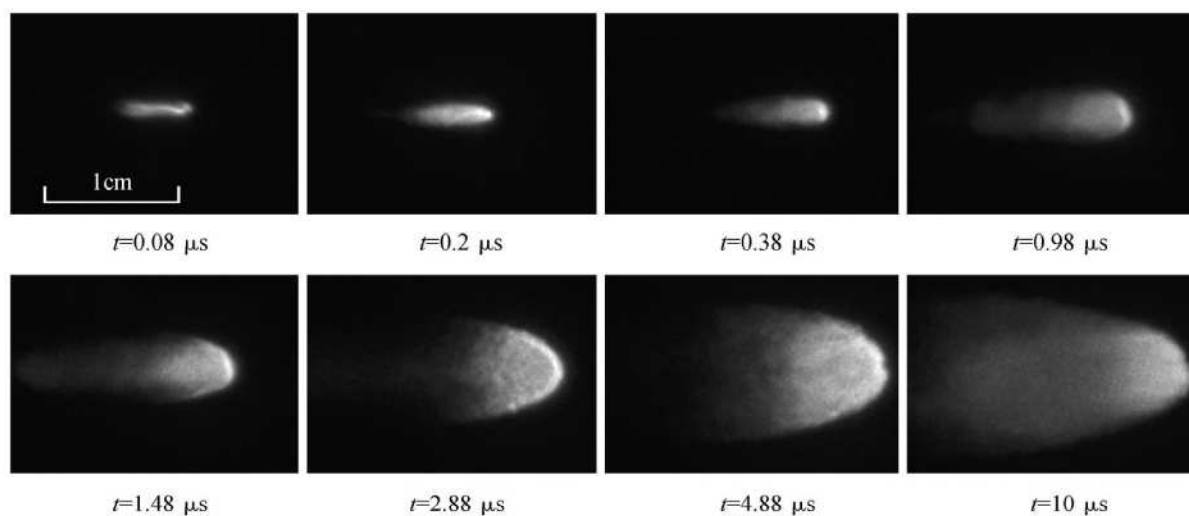


Fig 5 Photos of plasma luminescence and LSDW propagation with laser focusing angle $\alpha = 7.13^\circ$

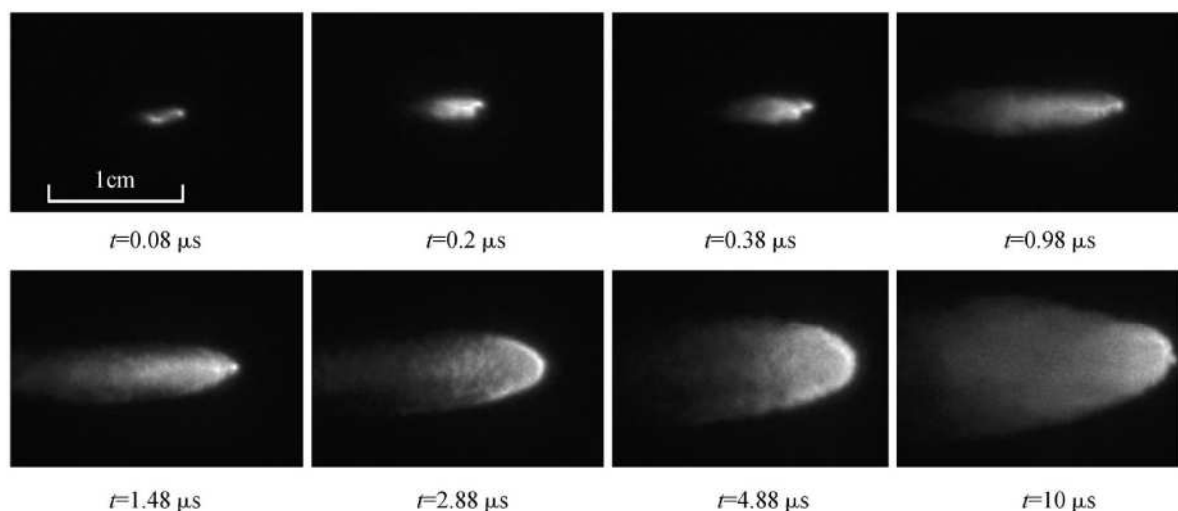


Fig 6 Photos of plasma luminescence and LSDW propagation with laser focusing angle $\alpha = 47.6^\circ$

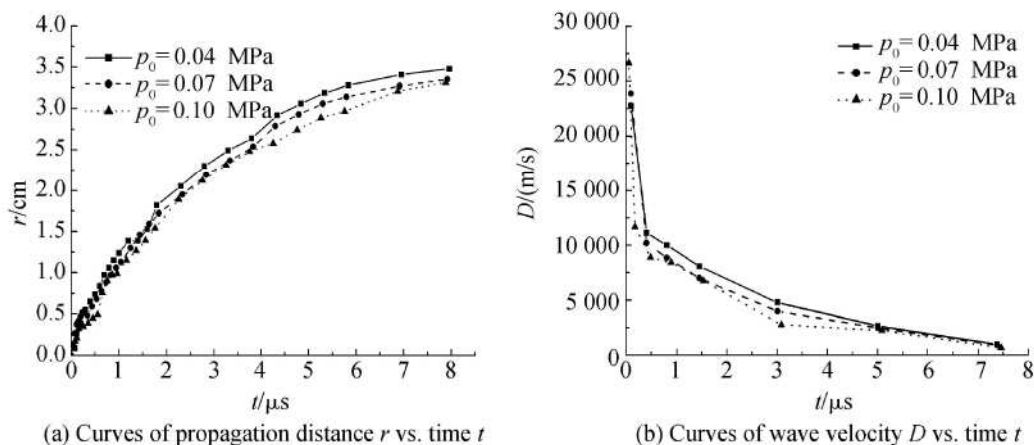


Fig 7 Curves of LSDW propagation distance and velocity vs time for different ambient air pressure

相同能量的入射激光来说,功率密度越大,从而造成传播速度越大。

2.2.3 LSDW 速度随环境气体压强的变化规律

当入射激光能量 $E = 67\text{ J}$ 聚焦角度 $\alpha = 7.13^\circ$ (焦距 $f = 200\text{ mm}$) 时,分别取气压 $p_0 = 0.041\text{ MPa}$ 、 0.071 MPa 和 0.101 MPa (其中气压 0.041 MPa 和 0.071 MPa 是对真空舱抽取真空得到的),经实验测量得到三种气压下 LSDW 的传播距离 r 和速度 D 随时间 t 的变化曲线如图 7 所示。从图 7 可知,气压越低,同一时刻下 LSDW 的传播距离 r 越远,速度 D 也越大。

3 实验数据与理论结果的比较

文献 [6] 中列出的一维 LSDW 的速度公式如下

$$D = 853 \left| \frac{I}{p_0} \right|^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中入射激光强度 I 的单位为 MW/cm^2 , p_0 为环境气体的压强,单位为 MPa 。

将 I 用激光功率 P , LSDW 的传播距离 r 以及激

光聚焦角度 α 表示,式 (1) 变为

$$D = \frac{dr}{dt} = 853 \left| \frac{P}{2\pi r^2 (1 - \cos\alpha) \cdot p_0} \right|^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

用系数 A 代替式 (2) 中的常量,其表达式为

$$A = \left| \frac{853}{2\pi (1 - \cos\alpha) \cdot p_0} \right|^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

于是得到

$$r = \left| \frac{5}{3} A \int_{t_1}^t dt \right|^{\frac{3}{5}} \quad (4)$$

$$D = A \cdot \left| \frac{P}{r^2} \right|^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

式中 t_1 是空气刚发生光学击穿的时刻。

下面根据以上公式说明第 2 节中实验测量结果的规律。

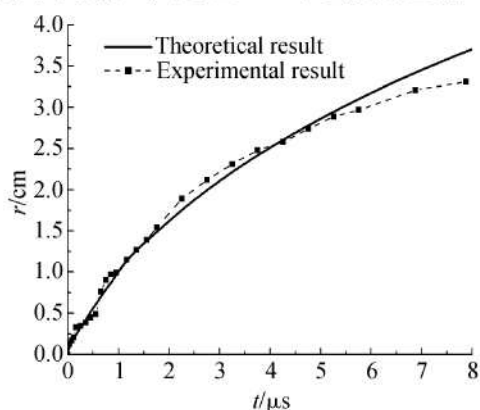
(1) 由于激光功率对时间的积分就是能量,而公式 (4) 包含功率的指数积分,因此其他条件相同的情况下激光能量越大,同一时刻 LSDW 的传播距离 r 越远,波速 D 也相应地越大。

(2) 激光聚焦角度 α 越小, $\cos\alpha$ ($0 < \alpha < 90^\circ$) 就越大, 又因为式 (3) 的分母随着 $\cos\alpha$ 的增大而减小, 因此系数 A 会随着 α 的减小而增大, 从而由式 (4) 和式 (5) 可知传播距离 r 和波速 D 会随着 α 的减小而增大。

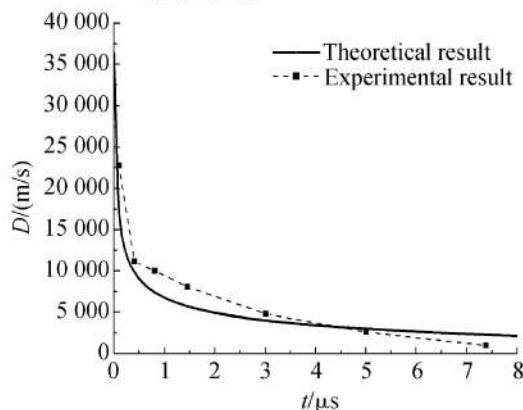
(3) 公式 (4) 和 (5) 中的系数 A 的表达式 (3) 中, 气压 p_0 在分母上, 也即 A 与 p_0 成反比, 又从式 (4) 和 (5) 知, 传播距离 r 和波速 D 与系数 A 成正比, 因此 r 和 D 与 p_0 成反比, 也即环境气体压强越小, 波速越大。

从以上对比分析可知, LSDW 的速度随入射激光能量、聚焦角度和环境气体压强的变化规律在理论和实验上取得了很好的一致性。图 8 给出了入射激光能量 $E = 67 \text{ J}$ 聚焦角度 $\alpha = 7.13^\circ$, 环境气体压强 $p_0 = 0.041 \text{ MPa}$ 时根据公式 (4) 和 (5) 算出的传播距离和波速的理论结果及相同条件下的实验结果。

从图 8 可以看出, 实验结果与理论结果在定性的变化趋势上吻合得很好, 但在定量上还是有所差别。



(a) Curves of propagation distance r vs. time t



(b) Curves of wave velocity D vs. time t

Fig 8 Curves of LSDW propagation distance and velocity vs time obtained from theoretical and experimental results

4 结 论

通过对不同入射激光能量、聚焦角度及环境气体压强下 LSDW 的传播距离和速度进行实验研究, 并将实验结果与理论公式计算得到的结果进行比较, 初步得出以下结论:

(1) 入射单脉冲激光能量越大, 聚焦角度越小, 环境气体压强越小, 同一时刻 LSDW 的传播距离越远, 传播速度越大;

(2) 实验测量得到的 LSDW 的速度随入射激光能量、聚焦角度和环境气体压强的变化规律与理论公式中体现的规律完全一致;

(3) 虽然 LSDW 速度的实验测量结果与理论公

在击穿后的极短时间内, LSDW 的波形为球形, 其传播距离和波速与理论值基本吻合; 随着时间的推移, LSDW 吸收激光能量, 迎着入射激光方向成为传播的优势方向, LSDW 成为长椭球形, 轴向速度与径向速度相比减小幅度较小, 而一维理论模型认为 LSDW 向各个方向的传播速度相等, 没有优势方向, 因而在 $0.2 \mu\text{s} \sim 4.5 \mu\text{s}$ 内, r 和 D 的实验值和计算值大于理论值; 随着时间的进一步推移, LSDW 虽然仍有激光能量支持, 但由于激光功率下降很多 (如图 2 所示), 迎着入射激光方向不再是优势方向, 实验照片表明长椭球形的 LSDW 在无约束时, 其长短轴的长度差距随时间推移逐渐缩小 (图 5 和图 6), 总体趋势向球形发展, 使轴向速度的减小幅度明显大于理论曲线的下降幅度, 从而使 r 和 D 的实验值小于理论值。由以上分析可知, 一维理论模型与实际的三维情况有所区别, 有必要针对实际情况建立三维 LSDW 的理论模型, 以便更深层次地研究空气被激光击穿后形成的 LSDW 传播规律。

式计算结果在定性上取得了很好的一致性, 但由于本文使用的是一维理论公式, 因此在定量上有所区别, 下一步需要对现有的一维理论公式进行修正, 使之符合实际的三维情况, 以便更好地研究 LSDW 的传播规律, 为实验中的参数设计提供理论支撑。

参考文献:

- [1] Myrabo L N, Borkowski C A, Kaminski D A. Analytical investigation of an airbreathing repetitively pulsed LSC-wave thruster Part 1[C]. *Nara: Proceeding of 4th International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2006: 58~71.
- [2] Masato Ushio, Koichi Kawanura, Kimiya Komurasaki et

- al Blast wave energy conversion process in a line-focusing laser supported detonation waves [R]. *AAA* 2006-1356
- [3] Jian Lu, Xiao-Wu Ni, An-Zhi He. An interferometric investigation of ignition and propagation of laser-supported-detonation wave at initial stage [C]. *SPIE*, 2004 100~106
- [4] Raizer Yu P. Laser-induced discharge phenomena studies in soviet science [M]. *New York: Consultants Bureau*, 1977.
- [5] Thomas P D. Jet flow field behind a laser supported detonation wave [R]. *AAA* 77-28
- [6] Apollonov V V, Tishchenko V N. Stable generation and merging of shock waves for “lightcraft” applications Part 1 [C]. *New York Proceeding of 3rd International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2005 205~215
- [7] Donati V, Garifo L, Pandarese F, et al On the ignition of laser supported waves from solid targets by CW CO₂ laser radiation [R]. *AAA* 84-1573
- [8] Akhiro Fukui, Keigo Hatai, Shinatora chq, et al Supporting structure of the LSD wave in an energy absorption perspective [C]. *Hawaii Proceeding of 5th International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2008 403~410
- (编辑: 张荣莉)

(上接第 118 页)

持续几百 μs 才会溃灭, 发生溅射, 所以溅射也不是产生推力的原因。而空穴迅速发展的时间段与推力持续时间基本重合, 因而可以推断, 推力的形成与空穴的发展有密切关系。

参考文献:

- [1] Dongsik Kim. Pulsed laser-induced evaporation of liquids and its applications [D]. *California: University of California*, 1998
- [2] Sigrist Markus W, Kneubühl Fritz K. Laser-generated stress waves in liquids [J]. *J Acoust Soc Am.*, 1978 64 (6): 1652~1663
- [3] Sigrist Markus W, Laser generation of acoustic waves in liquids and gases [J]. *J. Appl Phys*, 1986 60(7).
- [4] Schoeffmann H, Schindt-Klober H, Reichel E. Time-resolved investigations of laser-induced shock waves in water by use of polyvinylidene fluoride hydrophones [J]. *J. Appl Phys*, 1987 63(1), 46~51
- [5] Kawaguchi Y, Ding X, Narazaki A. Transient pressure induced by laser ablation of toluene: a highly laser-absorbing liquid [J]. *Appl Phys A.*, 2003 1~7
- [6] Oraevsky Alexander A, Jacques Steven L. Mechanism of laser ablation for aqueous media irradiated under confined-stress conditions [J]. *J. Appl Phys* 1995 78(2): 1281~1290
- [7] Andrews J G, Athey D R. Hydrodynamic limit to penetration of a material by a high-power beam [J]. *J. Phys D: Appl Phys*, 1976 9
- [8] 倪晓武, 陈笑, 陆建. 激光与液态物质相互作用机理的研究进展 [J]. *激光技术*, 2002 26(4): 258~261
- [9] John Sinko, Lisa Kodgis, Simon Porter, et al Ablation of liquids for laser propulsion with TEA CO₂ laser [C]. *Proceedings of Fifth International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2007.
- [10] 恽寿榕, 赵衡阳. 爆炸力学 [M]. 国防工业出版社, 2005
- (编辑: 姚懿巧)