

文章编号: 1001-3806(2016)06-0888-04

## CO<sub>2</sub> 激光诱导液滴射流等离子体的实验研究

陈子琪, 王新兵\*, 左都罗

(华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 40074)

**摘要:** 为了研究激光诱导射流等离子体特性, 了解激光诱导液滴等离子体的发展过程, 基于脉冲激光-液滴同步作用系统, 采用阴影法, 观测了激光作用液滴的阴影图像, 取得了液滴在 CO<sub>2</sub> 脉冲激光作用下的演化过程数据。对图像进行处理获得了激光诱导液滴等离子体冲击波膨胀范围随时间的变化, 并估算出了产生冲击波的激光能量。结果表明, 空气冲击波的膨胀半径在当前观测时间范围内线性膨胀, 约 32% 的激光能量用于产生冲击波。空气冲击波的变化规律对激光诱导液滴燃料点火的研究提供了一定的参考依据。

**关键词:** 激光物理; 激光诱导等离子体; 激光点火; 冲击波; 液滴射流

**中图分类号:** O535      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.023

### Experimental research of CO<sub>2</sub> laser-induced liquid droplet jet flow plasma

CHEN Ziqi, WANG Xinbing, ZUO Duluo

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science &amp; Technology, Wuhan 470074, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics and the evolution of laser-induced liquid droplet jet flow plasma, the behaviors of laser-induced liquid droplet plasma were investigated by the shadow method based on laser-droplet interaction system. Time-series images of CO<sub>2</sub> laser-induced plasma with liquid droplet were captured. The evolution of air shock wave was obtained and the energy of shockwaves was estimated by theoretical model. The results show that air shock wave occurs with laser-induced plasma and the radial expansion of shockwaves increases linearly under current time range. In addition, laser energy dissipated in the droplet was estimated to 32% for generating air shockwaves. The characteristics and the evolution of shockwaves generated by laser-induced droplet could provide a reference for laser induced fuel spray ignition.

**Key words:** laser physics; laser-induced plasma; laser ignition; shockwave; liquid droplet jet flow

### 引言

电火花点火的直喷式发动机中, 点火特性直接影响着燃料的燃烧过程<sup>[1-2]</sup>, 其通过压缩装置在火花塞周围提供充分的燃料。第 1 代商用直喷发动机采用壁面引导方式提供燃料。相比壁面引导, 采用喷雾会方式提供燃料具有更高的热效率<sup>[3-4]</sup>。燃料直接以喷雾的形式喷射至火花塞, 此过程中燃料喷雾会对火花塞的放电和点火稳定性产生影响, 也会对燃烧过程产生周期性的影响<sup>[4]</sup>。此时火花塞的位置对燃烧特性及燃料的混合有较大的影响<sup>[5]</sup>。为了避免这些存在的缺点, 激光诱导等离子体点火可被应用于代替火花点火。相比传统的电火花点火装置, 激光点火不会影响燃料喷雾, 点火位置也可以通过光路调节改变。激光点火装置本身也不会受到燃料喷雾的影响。这些优点使得

激光点火适用于使用喷雾燃料的发动机系统。尤其在贫燃系统中, 传统的电火花塞点火系统更是难以满足稳定可靠点火的需求<sup>[6]</sup>。

激光脉宽对于激光诱导等离子体形成过程中初始电子的产生和激光脉冲能量的沉积都具有重要的影响<sup>[7]</sup>。由于纳秒激光的能量沉积率远高于皮秒和飞秒激光<sup>[8]</sup>, 其在激光诱导等离子体点火领域得到了广泛应用。为了提高喷雾燃料中激光点火的可靠性, 一些研究主要集中在激光聚焦点火位置、等离子体冲击波的影响及最小点火能量等方面。KAWAHARA 等人对激光诱导空气等离子体进行了发射光谱测量研究<sup>[9]</sup>, 结果表明, 入射激光的能量对等离子体温度无明显影响, 且等离子体的发展符合激光冲击波模型。而后 BEDUNEAU 等人对激光诱导甲烷-丙烷与空气混合产生等离子体进行了研究<sup>[10]</sup>, 讨论了等离子体产生到燃料点燃的发展过程以及等离子体冲击波现象。另外, GROB 等人研究了非均匀燃料空气混合喷雾条件下的激光点火, 并研究了火花塞位置处脉冲激光点火的可靠性<sup>[11]</sup>。液态喷雾燃料的激光点火方面, PICK-

作者简介: 陈子琪(1988-), 男, 博士研究生, 从事激光诱导等离子体的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: xbwang@hust.edu.cn

收稿日期: 2015-11-20; 收到修改稿日期: 2016-01-11

ETT 等人研究了柴油喷雾中的激光点火,并讨论了燃料喷射稳定性对激光点火的影响<sup>[12]</sup>。较多的研究集中在激光诱导混合气体燃料的点火,对于激光诱导液滴喷雾燃料的点火方面报道较少,特别是激光与单个液滴燃料的作用对点火稳定性有直接的影响。

本文中用微孔喷射水液滴代替燃料液滴,研究了激光诱导单个液滴等离子体的发展过程。水滴能在大气环境下直接喷射,激光诱导水滴等离子体对进一步的激光诱导液态燃料等离子体点火的研究提供参考依据。使用阴影法快速成像,获得了激光诱导水滴的分裂过程,主要研究了冲击波在空气中的发展过程。

### 1 实验装置

为了研究激光诱导液滴等离子体的时间演化过程,使用了一套能产生均匀液滴的液滴靶发生器。通过脉冲激光与液滴同步作用,实现激光与单个液滴的重复作用。实验中使用去离子水,液滴靶发生器及所喷射水滴的稳定性由参考文献[13]中所述系统检测。根据瑞利射流不稳定理论,射流液柱在表面张力的作用下动力学不稳定,极易产生崩解<sup>[14]</sup>。给射流液柱施加一定的均匀震荡波,则射流将断裂成均匀的液滴。激光与单个液滴的作用装置如图 1 所示。在背景气压的驱动下,水通过发生器下喷孔竖直向下喷射,同时压电陶瓷产生的均匀振动通过金属振杆向下施加给射流,从而形成均匀的微小水滴流。再通过氦氖光聚焦检测液滴信号,经过光电二极管接收信号后,传到信号同步延时系统。信号经过整形形成方波后计数分频,匹配激光器或探测器工作频率输出信号。此信号外触发激光器工作,使激光能准确作用到水滴。

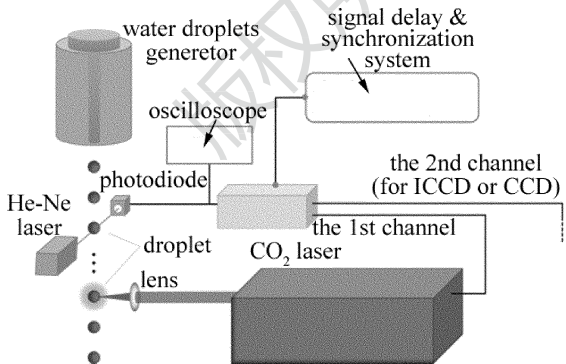


Fig. 1 Schematic diagram of pulse laser irradiated by droplet target synchronously

实验中用阴影法检测激光与液滴的作用过程,实验装置示意图如图 2 所示。532nm 激光器经过两个透镜组成的扩束系统,产生足够宽度的绿光平行光,穿过激光与液滴作用区域后投射阴影到毛玻璃。增强型电荷耦合器件(intensified charge coupled device, ICCD)放

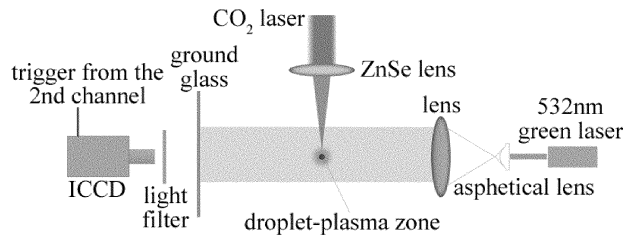


Fig. 2 Schematic diagram of plasma detected by shadow method

置于毛玻璃后,门宽设置为 10ns,拍摄间隔为 40ns,最大分辨率为 20 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 。ICCD 由延时同步系统的信号触发工作,使其拍摄时刻基于激光时刻,从而可获得激光作用液滴的时间演化过程。液滴喷射频率为 20kHz ~ 40kHz,本实验中计数分频为 1Hz,即某个液滴经过氦氖光后运动至下方被 1Hz 的激光脉冲准确作用到。本实验中使用 10.6 $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> 激光器,单个脉冲的半峰全宽约为 70ns;硒化锌(ZnSe)透镜聚焦焦距为 50mm,CO<sub>2</sub> 激光聚焦焦斑大小约为 225 $\mu\text{m}$ ,焦点处功率密度约为  $5 \times 10^9 \text{W}/\text{cm}^2$ ;液滴直径约为 150 $\mu\text{m}$ ,间距 375 $\mu\text{m}$ ,此时激光聚焦后只作用单个液滴。

### 2 结果及讨论

激光准确作用到单个液滴可通过普通 CCD 图像观测到,如图 3 所示。图中液滴序列中显示某位置单个液滴由激光准确作用到。实际上激光准确作用到液滴时是无明显可见光发出的,此处液滴位置的亮点是用于激光同步的指示光散射造成的。最上层的亮点是用于检测液滴信号的氦氖光照亮水滴造成的。激光的同步指示光也为氦氖光,波长 632.7nm。而检测等离子体的背光为 532nm 的绿光,且 ICCD 镜头前侧设置有 532nm 单色光的滤光片,故此指示光的存在不影响等离子体的检测。

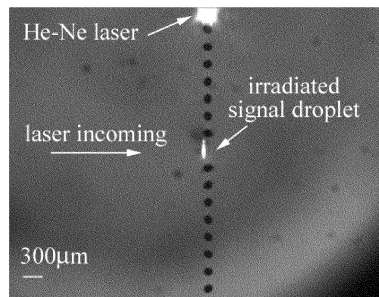


Fig. 3 Image of laser pulse hit by single droplet accurately

图 4 显示了激光作用液滴不同时刻的阴影图像,激光从图中左侧入射向右侧传播。由于绿光扩束后投影到毛玻璃上的光强密度有减弱,故图像中背景噪声较大。但液滴的阴影图像及产生的空气冲击波纹仍可清晰分辨。大约在激光作用液滴 0.8 $\mu\text{s}$  后能观测到液滴阴影较无激光作用时有所改变,此时也可以观察

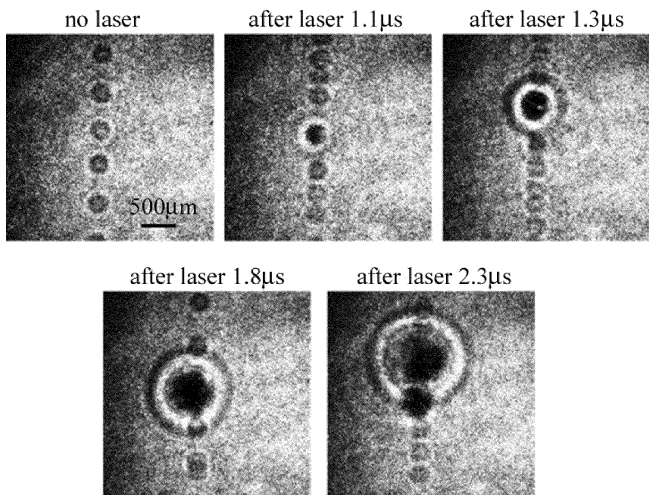


Fig. 4 ICCD images of laser irradiated by droplet at different time

到液滴周围已经形成一圈冲击波的阴影条纹。随着观测时间的增长,液滴开始膨胀变形,周围的冲击波条纹也逐渐清晰并且扩大。直至 1.8μs 时刻,冲击波扩散影响到相邻液滴。此时被激光作用的液滴也处于整体被轰散的边缘,形成一团水雾。冲击波膨胀的范围明显较液滴膨胀范围大。

水对 CO<sub>2</sub> 激光的吸收系数为 10<sup>3</sup> cm<sup>-1</sup>, 吸收长度约为 10μm<sup>[15]</sup>。对于本实验中水滴大小,其对激光的吸收主要为面吸收机制。而激光聚焦后光斑大于水滴直径,激光能量可快速沉积于液滴大部分表面,故未观察到如参考文献[16]中明显的面吸收机制(水滴单侧膨胀)。水滴表面吸收激光能量会首先形成过热蒸汽并被电离,形成高温高压等离子体向四周膨胀,在空气中形成冲击波。故水滴周围会产生一圈明暗相间的条纹。而水滴吸收激光能量后其中心区域很快达到过热状态,这时水滴中会出现气蚀空泡,伴随气蚀空泡的膨胀,水滴内部压力剧增,导致出现蒸汽爆炸现象,类似于 2.3μs 时刻中液滴的膨胀现象。

这一产生空气冲击波的能量来自于激光作用水滴的能量耗散。由此可知,在激光作用喷雾燃料的过程中,燃料液滴吸收激光能量膨胀,达到一定温度后燃料被点燃。然而其周围产生的冲击波膨胀范围较燃料液滴大。膨胀的冲击波若将周围的其他燃料液滴“吹散”,则会对燃料的点火稳定性产生直接影响。在本实验中,液滴周围冲击波半径随时间的变化如图 5 所示。冲击波半径由液滴半径归一化。由图可见,冲击波半径随时间逐渐增大,其膨胀的速度可近似的线性估算为 225m/s。

激光作用液滴后,有一部分能量消散产生冲击波,这部分能量与冲击波膨胀半径的关系可用谢多夫-泰勒冲击波方程来描述<sup>[17-18]</sup>。方程具体为:

$$R = A(E/\rho)^{1/(2+\beta)} t^{2/(2+\beta)} \quad (1)$$

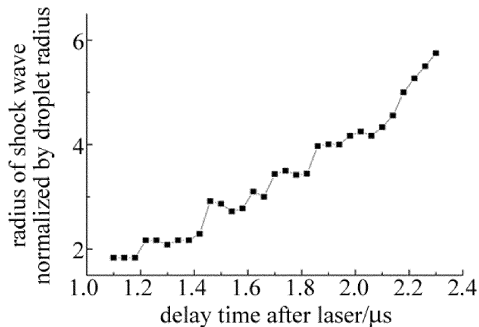


Fig. 5 Relationship between shockwave radius and delay time

式中,  $R$  为冲击波半径,  $A$  为无量纲的常数,  $E$  是消散在液滴中用于产生冲击波的激光能量,  $\rho$  是冲击波传播介质的密度,  $t$  为冲击波的发展时间。参量  $\beta$  代表了冲击波传播的维度信息,球形传播时  $\beta = 3$ ;圆柱形传播时  $\beta = 2$ ;平面传播时  $\beta = 1$ 。此时产生冲击波的能量可以估算为 20.8mJ。本实验中水滴直径为 150μm,接收激光辐照的液滴截面占激光焦斑面积的 44%,可估算激光作用到水滴的能量约有 32% 用于产生了空气冲击波。根据(1)式的描述,半径增长率会随时间逐渐减缓。参考飞秒激光作用单个液滴产生冲击波的膨胀过程<sup>[19]</sup>,当前的实验观测时间相对较窄,属于冲击波发展的早期阶段。与飞秒激光穿透液滴、在液滴内部产生等离子体相比,纳秒的 CO<sub>2</sub> 激光诱导水滴等离子体主要产生于水滴表面。在早期的研究中<sup>[20]</sup>,功率密度为 10MW/cm<sup>2</sup> ~ 30MW/cm<sup>2</sup> 的 CO<sub>2</sub> 激光作用水滴产生的冲击波持续时间可达数十微秒。本实验中,冲击波膨胀还未受到有效的减速机制,故表现为线性增长。随着冲击波的膨胀,波前沿内侧的介质密度和压力会逐渐减小<sup>[21]</sup>,冲击波内外的压差逐渐减小(冲击波气体压力通常大于环境气体压力),导致膨胀逐渐减缓。当前研究的时间尺度只持续至冲击波开始影响到周围液滴,这对于激光诱导雾滴燃料的点火有一定的指导意义。另外,燃料点火成功的激光能量阈值可做进一步的研究。

### 3 结论

基于激光点火应用于喷雾燃料,使用水滴代替燃料液滴,搭建了激光与液滴同步作用系统。通过 532nm 绿光扩束结合 ICCD 搭建了等离子体阴影观测系统,可直接观测激光与液滴作用的膨胀过程。实验获得了 CO<sub>2</sub> 激光作用单个水滴的膨胀过程,同时观测了激光诱导水滴等离子体产生的空气冲击波膨胀过程,并获得了冲击波膨胀半径随时间的变化。根据冲击波膨胀理论模型估算出约有 32% 的激光能量耗散于产生冲击波,这对激光诱导液态燃料直接点火的研究具有一定的参考。

## 参 考 文 献

- [1] ZHAO F, HARRINGTON D L, LAI M C D. Automotive gasoline direct-injection engines [J]. *Revolution*, 2002, 2004(1): 3-8.
- [2] WIJETUNGE R S, BRACE C J, HAWLEY J G, *et al.* Dynamic behaviour of a high speed direct injection diesel engine [R]. Detroit, USA: SAE International, 1999:1-829.
- [3] HONDA T, KAWAMOTO M, KATASHIBA H, *et al.* A study of mixture formation and combustion for spray guided DISI [R]. Detroit, USA: SAE International, 2004:1-46.
- [4] DAHMS R, FANSLER T D, DRAKE M C, *et al.* Modeling ignition phenomena in spray-guided spark-ignited engines [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2743-2750.
- [5] KAWAHARA N, TOMITA E, KADOWAKI T, *et al.* In situ fuel concentration measurement near a spark plug in a spray-guided direct-injection spark-ignition engine using infrared absorption method [J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 49(4): 925-936.
- [6] GUPTA S. Technologies for gaseous fueled advanced reciprocating engine systems [C]//US DOE Industrial Distributed Energy Portfolio Review Meeting, Washington DC, USA: United States Department of Energy, 2011: DE-AC02-06CH 11357.
- [7] CREMERS D A, YUEH F Y, SINGH J P, *et al.* Laser-induced breakdown spectroscopy, elemental analysis [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2006:53-62.
- [8] SINGH J P, THAKUR S N. Laser-induced breakdown spectroscopy [M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2007:42-53.
- [9] KAWAHARA N, BEDUNEAU J L, NAKAYAMA T, *et al.* Spatially, temporally, and spectrally resolved measurement of laser-induced plasma in air [J]. *Applied Physics*, 2007, B86(4): 605-614.
- [10] BEDUNEAU J L, KAWAHARA N, NAKAYAMA T, *et al.* Laser-induced radical generation and evolution to a self-sustaining flame [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(3): 642-656.
- [11] GROB V, KUBACH H, SPICHER U, *et al.* Influence of laser-induced ignition on spray-guided combustion-experimental results and numerical simulation of ignition processes [R]. Detroit, USA: SAE International, 2009:1-2623.
- [12] PICKETT L M, KOOK S, PERSSON H, *et al.* Diesel fuel jet lift-off stabilization in the presence of laser-induced plasma ignition [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2793-2800.
- [13] CHEN Z Q, WANG X B, ZUO D L, *et al.* Detecting tin droplet used for EUV source [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(12): 39-43 (in Chinese).
- [14] RAYLEIGH L. On the instability of jets [J]. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1878, S1/10(1):4-13.
- [15] LI X Q, HONG Y J, HE G Q, *et al.* Status of study on the effect of laser radiation to water droplet [J]. *Laser Journal*, 2007, 28(4): 70-72 (in Chinese).
- [16] KAFALAS P, FERDINAND A P. Fog droplet vaporization and fragmentation by a 10.6 $\mu$ m laser pulse [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(1): 29-33.
- [17] JEONG S H, GREIF R, RUSSO R E. Shock wave and material vapour plume propagation during excimer laser ablation of aluminium samples [J]. *Journal of Physics*, 1999, D32(19): 2578-2585.
- [18] ADEN M, KREUTZ E W, WISSENBACH K. The applicability of the Sedov-Taylor scaling during material removal of metals and oxide layers with pulsed and excimer laser radiation [J]. *Journal of Physics*, 1997, D30(6): 980-989.
- [19] JEON C, HARPER D, LIM K, *et al.* Interaction of a single laser filament with a single water droplet [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(5): 055502.
- [20] KAFALAS P, HERRMANN J. Dynamics and energetics of the explosive vaporization of fog droplets by a 10.6 $\mu$ m laser pulse [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(4): 772-775.
- [21] TIANHANG L, ZUOQIANG H, XUN G, *et al.* Shadowgraph investigation of plasma shock wave evolution from Al target under 355nm laser ablation [J]. *Chinese Physics*, 2014, B23(8): 085203.