

# 激波与液滴作用的空气动力学现象的实验研究

肖毅, 施红辉, 吴宇, 章利特

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘要:** 在水平激波管中对激波与液滴的相互作用进行了实验研究。使用氮气作为高压驱动气体,进行了激波马赫数为 1.1 及 1.25 的实验,更换生成液滴的不锈钢针头获得了不同尺寸的液滴,用高速摄影仪详细记录了液滴从压缩变形到破碎雾化的过程。通过分析实验数据,探讨液滴位移及横向直径随时间的变化关系,液滴在激波作用之后会进行加速运动,随着液滴的不断变形,其横向直径先增大后减小,直至完全雾化。

**关键词:** 激波; 液滴; 加速; 变形; 雾化

**中图分类号:** O354.5; O359

**文献标识码:** A

## 0 引言

激波与液滴的相互作用是一个典型的两相流体力学问题,对该问题的深入研究在超音速雨滴侵蚀、燃气轮机的设计开发及爆轰发动机中燃料燃烧的稳定性等方面均有着重要应用。针对这一课题,早期的研究主要致力于设计不同的实验方案,并尝试激波作用后,对液滴的变形过程进行定性表述,研究人员发现不同的 Weber ( $We$ ) 数和 Ohnesorge ( $Oh$ ) 数会对液滴的变形模式产生重要影响,同时形成了两种关于液滴破碎机制的解释:其一,认为液滴的破碎是一个边界层不断脱落分离的过程;其二,强调高速气流在液滴表面生成不稳定波纹是液滴破碎的开始<sup>[1-5]</sup>。Hisang<sup>[6-7]</sup>在大量的实验研究和对比前人成果的基础上,认为在  $Oh$  数小于 0.1、 $We$  数小于 500 时,随着  $We$  数的增加,液滴会依次出现无变形、无振荡变形、振荡变形、袋式破碎、混合破碎和剪切破碎模式,并绘制了相应的图表以供查询,当  $We$  数继续增加时会出现突发破碎(catastrophic breakup)情况。2000 年,陆守香和秦友花<sup>[8]</sup>针对激波与液滴的相互作用,建立了液滴变形破碎的理论模型,该模型关于液滴破碎的判断与实验结果比较一致。2003

年,耿继辉等<sup>[9]</sup>使用不同的实验介质生成了不同形状的液滴,详细分析了激波与液滴的相互作用及液滴加速、变形和破碎过程,发现液滴的初始形状对该过程有重要的影响。2009 年,Kobiera 等<sup>[10]</sup>在大型水平激波管中进行了高马赫数激波与己烷液滴相互作用的实验,使用纹影及拍摄频率可达 12 000 帧/s 的高速摄影系统,详细记录了己烷液滴在强激波作用下早期的雾化过程,并测量绘制了液滴位移、横向直径及径向直径与时间的变化图谱。

激波与液滴的相互作用是一个非常复杂的过程,涉及到 Richtmyer-Meshkov 不稳定性<sup>[11]</sup>,同时该研究也为激波与固体颗粒相互作用的研究提供了参考<sup>[12]</sup>。本文在水平激波管中进行了低马赫数激波的实验,使用高速摄影仪记录了液滴从变形、破碎到雾化的详细过程,并对液滴的运动和变形进行了定量分析。

## 1 实验与测量方法

本文实验在如图 1 所示的水平激波管中进行,整个实验装置长为 10 m。高压气瓶 1、圆形高压段 2、圆形低压段 3 及方形低压段 4 组成激波发生装置,实验段 6 通过法兰与方形低压段 4 及真空箱 7

收稿日期: 2010-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51006091,10802077)

作者简介: 肖毅(1989-),男,江西新余人,硕士研究生,主要从事流体控制技术及应用的研究。

通信作者: 施红辉,电子邮箱: hshshi@zstu.edu.cn

连接,用于测量激波马赫数的两个压力传感器 5 安装在方形低压段 4 上。图 2 为实验段示意图,长为 500 mm 的实验段内截面尺寸为 120 mm×120 mm,在实验段的前后侧板装有透明的有机玻璃板,上下板上开有对称的两个方孔,试件板 15 上开有上部为螺纹孔下部为通孔的结构,用于安装液滴接头 13,加长的不锈钢针头 14 装入接头内组成液滴试件,试件板 15 和排水下板 16 均使用螺钉固定。高速摄影仪放置在实验段的侧面,实验中选择拍摄频率为 4 000 帧/s 即相邻两张实验照片的时间间隔为 0.25 ms。本文的实验步骤如下:1)在高压段与圆形低压段之间安装一定厚度的铝膜;2)连接液滴接头与水管;3)调节水管阀门开度,形成稳定、尺寸一致的液滴;4)打开高速摄影系统并调节光源强度;5)打开激波测量系统;6)向高压段内充入气体使铝膜破裂产生运动激波;7)记录激波与液滴相互作用的过程并保存数据;8)打开试件板清理实验段内的液体。

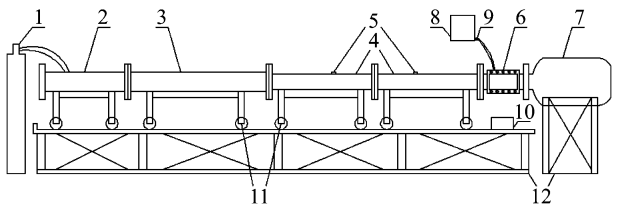


图 1 实验装置示意图

1. 高压气瓶,2. 高压段,3. 圆形低压段,4. 方形低压段,5. 压力传感器,6. 实验段,7. 真空箱,8. 水箱,9. 进水阀门,10. 集水容器,11. 小车,12. 支架

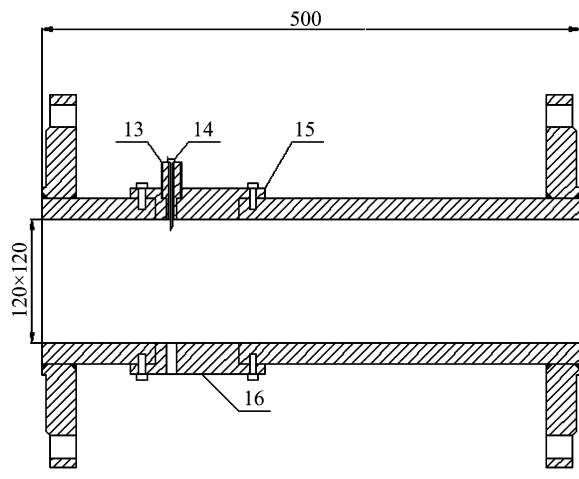


图 2 实验段截面图

13. 液滴接头,14. 不锈钢针头,15. 试件板,16. 排水下板

本文采用自然破膜的方法生成激波,使用不同厚度的铝膜可以获得不同的初始破膜压比进而获得马赫数不同的激波。实验中使用了 0.05 mm 及 0.2 mm 两种厚度的铝膜,分别获得了马赫数为 1.1

及 1.25 的激波。各实验参数如表 1 所示,其中  $We$  数和  $Oh$  数具体计算公式如下:

$$We = \frac{\rho_a V_a^2 d_0}{\sigma_w} \tag{1}$$

$$Oh = \frac{\mu_w}{\sqrt{\rho_w d_0 \sigma_w}} \tag{2}$$

式(1)、式(2)中:空气密度  $\rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $V_a$  为波后气流速度;水的密度  $\rho_w = 997 \text{ kg/m}^3$ ,其表面张力  $\sigma_w = 70.8 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ,动力粘度  $\mu_w = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $d_0$  为液滴的初始直径。实验室温为  $27^\circ\text{C}$ ,声速  $a = 347 \text{ m/s}$ 。按照文献[6]的关于液滴破碎机制的划分,表 1 中实验 1、实验 2、实验 3 属于剪切破碎模式,实验 4、实验 5、实验 6 属于突发破碎模式。

表 1 实验参数

实验编号	液滴直径 $d_0/\text{mm}$	激波马赫数 $M$	波后气流速度 $V_a/(\text{m/s})$	$We$	$Oh$
1	1.64	1.1	56.23	94.48	0.002 9
2	2.16	1.1	56.23	124.44	0.002 6
3	2.46	1.1	56.23	141.72	0.002 4
4	1.68	1.25	130.18	518.75	0.002 9
5	2.51	1.25	130.18	775.03	0.002 4
6	2.83	1.25	130.18	873.84	0.002 2

2 实验结果与分析

图 3 所示的是直径为 1.64 mm 的液滴在马赫数为 1.1 的激波作用下的运动变形照片。从图 3 (1)至图 3(3),液滴首先在激波带来的压差的作用下,变形为一个薄圆盘,横向直径增大,径向直径降低至最小值;从图 3(4)至图 3(8),薄圆盘逐渐扩展,更细小的液滴从上下两端不断脱落,原始的球形液

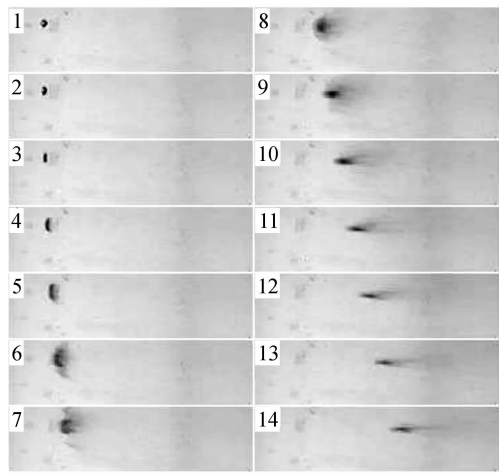


图 3 实验 1 高速摄影照片

注:激波马赫数  $M = 1.1$ ,液滴初始直径  $d_0 = 1.64 \text{ mm}$ ,相邻两张照片时间间隔为 0.25 ms。

滴演化成了云团状,并继续在横向和径向扩张;在高速气流作用的后期阶段,由于云团上下两端及尾部的雾化和蒸发不断深入,云团横向的尺寸开始减小,逐渐发展成细条状结构,并与空气融为一体。

图4所示的是直径为2.16 mm的液滴在马赫数为1.1的激波作用下的运动变形照片。如图4(1)至图4(7)所示,尺寸更大的液滴会经历更长的压缩过程;如图4(8)至图4(11)所示,细小的液滴首先从圆盘的上下两端开始脱落分离,圆盘下游的尾迹出现了交替的左右摆动,原始的液滴变形成了云团状结构;从图4(12)开始,在云团的上游出现了一个尖钉结构;从图4(13)至图4(16),云团以上述尖钉为中心脱落雾化,初始的尖钉结构变形成了圆顶状;在高速气流作用的后期,云团开始剧烈雾化,其横向尺寸开始减小,直至完全雾化。实验中液滴的变形破碎过程与文献[5,9]的实验结果比较相似,但本文中的尖钉状结构在文献[5,9]中并没有出现,这可能与液滴的初始形状并非绝对球形在重力作用下会有一定变形有关。

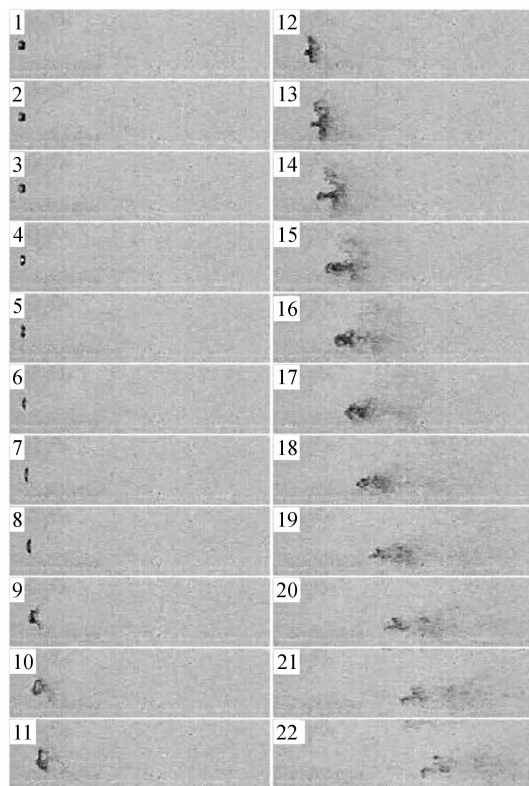


图4 实验2高速摄影照片

注:激波马赫数  $M=1.1$ ,液滴初始直径  $d_0=2.16$  mm,相邻两张照片时间间隔为0.25 ms。

图5所示的是直径为2.46 mm的液滴在马赫数为1.1的激波作用下的运动变形照片。如图5(1)至图5(8)所示,尺寸稍大的液滴经历了与图4

相近的压缩过程,但是实验中液滴的发展受重力影响更加明显,使得图5(8)中薄圆盘出现了一定角度的倾斜;从图5(9)至图5(11)中可以发现,云团上下两端的破碎雾化是不平衡的,下端首先出现了脱落雾化;从图5(12)至图5(16),类似于图4中的尖钉结构并没有出现,云团在径向的扩展逐渐占主导地位,尾部的雾化更加剧烈;图5(17)至图5(20)出现了与图3、图4不同的发展模式,云团分裂成了大小各异的几个部分,然后各自继续发展,直至完全雾化,横向尺寸的下降现象没有被观察到。

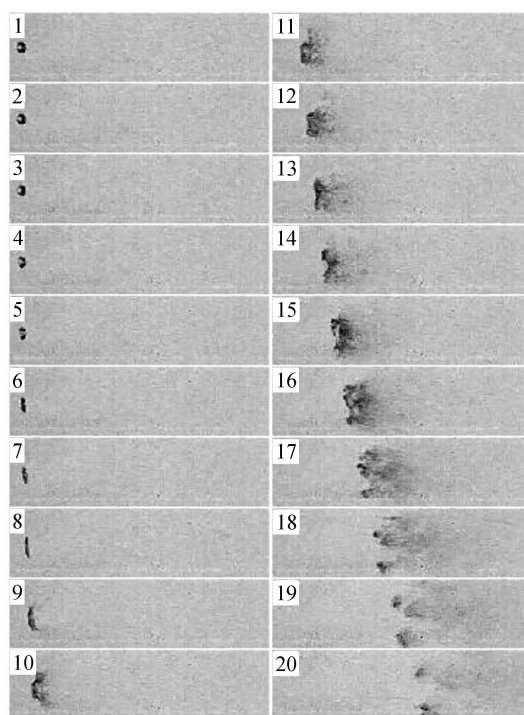


图5 实验3高速摄影照片

注:激波马赫数  $M=1.1$ ,液滴初始直径  $d_0=2.46$  mm,相邻两张照片时间间隔为0.25 ms。

图6所示的是直径为1.68 mm的液滴在马赫数为1.25的激波作用下的发展照片。文献[3,10]均进行了马赫数超过2的强激波实验,实验中液滴的压缩变形和破碎雾化不再明显分开,压缩变形甚至不会出现。笔者观测到了类似的实验结果,在  $We$  数较高的情况下,液滴出现了突发破碎。在马赫数较大的激波及液滴尺寸很小的情况下,液滴的压缩变形没有被观察到,与图3、图4、图5相比,液滴破碎和雾化的过程会更加剧烈,液滴在经历了很短暂的压缩后呈喷发状急剧破碎,之后很快完全雾化。在液滴尺寸为2.51 mm及2.83 mm的实验中,激波作用之后,液滴会出现非常短暂的压缩,之后呈现出与图6相似的破碎雾化过程。

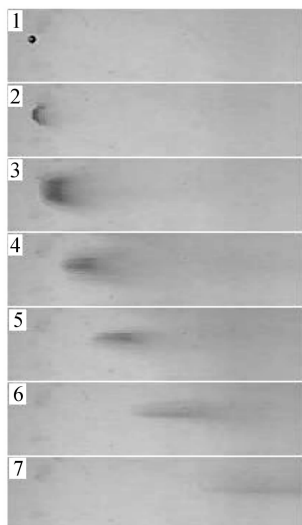
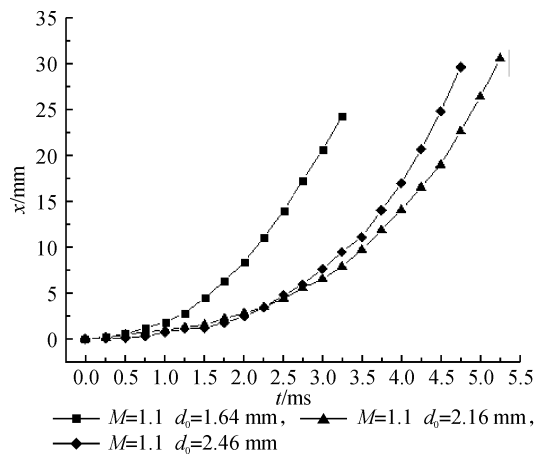


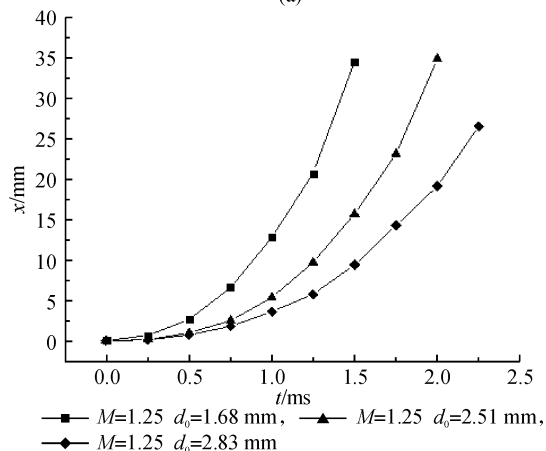
图6 实验4高速摄影照片

注:激波马赫数  $M=1.25$ , 液滴初始直径  $d_0=1.68$  mm, 相邻两张照片时间间隔为  $0.25$  ms。

图7所示的是6组实验中液滴运动的位移与时间关系曲线,  $x$  为液滴(包括后期阶段云团)最左端离照片左边线的距离, 所测得的数据减去第一张照片的初始距离即可获得图7曲线中的数据点。在激



(a)

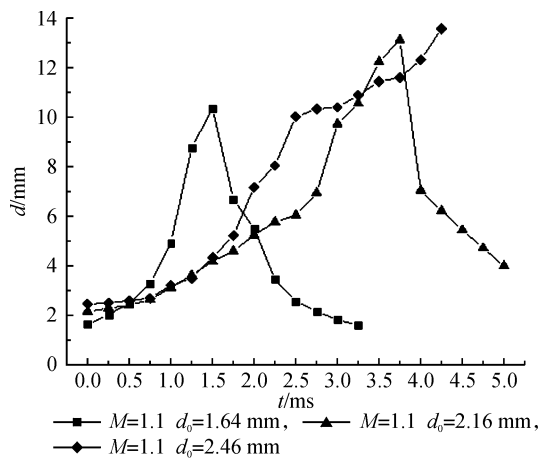
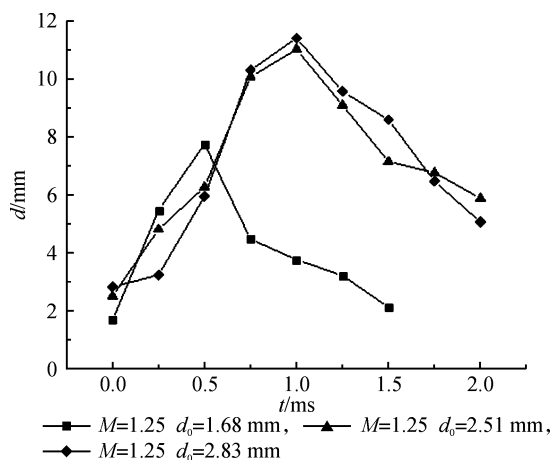


(b)

图7 液滴位移与时间关系曲线

波的作用下,液滴加速向右运动;如图7(b)所示,相同的激波马赫数下,尺寸较小的液滴将获得更大的加速度;比较图7(a)和7(b)可以发现,增加激波马赫数会增加液滴的加速度,这与文献[10]是一致的;比较图7(a)中实验2和实验3的液滴位移曲线可以发现,实验3中尺寸稍大的液滴在初始阶段运动滞后于实验2中尺寸小的液滴,但从  $2.5$  ms 开始实验3中液滴的运动速度超过了实验2。造成这种现象的原因是:实验3中液滴在激波作用后逐渐开始分散,并在后期阶段分离成了更小的几部分,而实验2中液滴在激波作用后以一个尖钉状结构为中心进行了脱落雾化,质量较实验3更加集中,因此速度相对而言会更小。

图8、图9所示分别为激波马赫数为  $1.1$ 、 $1.25$  液滴(包括后期阶段的云团)横向直径随时间的变化关系。众多的研究人员均认为,随着液滴压缩变形,液滴的横向直径先增大至最大值,由于雾化的作用,该参数会逐渐减小至  $0$ <sup>[2,5-7,9]</sup>。从图8、图9中,我们也得到了相似的规律,但文献[5,9]中所提出的线性变

图8 液滴横向直径变化图( $M=1.1$ )图9 液滴横向直径变化图( $M=1.25$ )

化过程与本文实验数据并不完全相同。在激波马赫数较大的实验中,液滴横向直径的增大会有一个突跃的过程,之后该参数变小的速度同样更大;在激波马赫数较小液滴直径为 2.46 mm 的实验中,由于液滴在发展的后期阶段分裂成了大小各异的几部分,所以横向直径典型的下降过程没有出现,当然分裂后的几部分同样会经历雾化的过程,它们也最终会完全雾化与周围环境相平衡。

### 3 结 论

本文在水平激波管中进行了激波与液滴相互作用的实验,研究了液滴从压缩变形到破碎雾化的过程,对液滴在激波作用下的发展进行了定量分析,并与国内外研究成果进行了比较。在激波的作用下,液滴会进行加速运动,马赫数越大,加速度越大;当激波马赫数较低时,液滴的发展并不稳定,液滴尺寸较大时,会出现液滴分裂的情况;增加激波马赫数,会加剧液滴的变形雾化。

#### 参考文献:

- [1] Lane W. Shatter of drops in streams of air[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1951, 43: 1312-1317.
- [2] Engel O. Fragmentation of waterdrops in the zone behind an air shock[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1958, 60(3): 245-280.
- [3] Ranger A, Nicholls J. Aerodynamics shattering of liquid drops[J]. AIAA J, 1969, 7(2): 285-290.
- [4] Kauffman C, Nicholls J. Shock-wave ignition of liquid fuel drops[J]. AIAA J, 1971, 9(5): 880-885.
- [5] Wierzbna A, Takayama K. Experimental investigation of aerodynamic breakup of liquid drops [J]. AIAA J, 1988, 26(11): 1329-1335.
- [6] Hsiang L P, Faeth G. Near-limit drop deformation and secondary breakup[J]. J Multiphase Flow, 1992, 18(5): 635-652.
- [7] Hsiang L P, Faeth G. Drop deformation and breakup due to shock wave and steady disturbances[J]. Int J Multiphase Flow, 1995, 21(4): 545-560.
- [8] 陆守香, 秦友花. 激波诱导的液滴变形和破碎[J]. 高压物理学报, 2000, 14(2): 151-154.
- [9] 耿继辉, 叶经方, 王健, 等. 激波诱导液滴变形和破碎现象实验研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5): 797-800.
- [10] Kobiera A, Szymczyk J. Study of the shock-induced acceleration of hexane droplets [J]. Shock Waves, 2009, 18: 475-485.
- [11] 施红辉, 肖毅, 杜凯, 等. 用垂直激波管研究多层流体界面上的 Richtmyer-Meshkov 不稳定性[C]//第15届全国激波与激波管学术会议论文集. 杭州: 353-358.
- [12] Zhang L T, Shi H H, Wang C, et al. Aerodynamic characteristics of solid particles' acceleration by shock waves[J]. Shock Waves, 2011, 21(3): 243-252.

## Experimental Study on Aerodynamic Phenomenon of Interaction between Shock Wave and Liquid Drop

XIAO Yi, SHI Hong-hui, WU Yu, ZHANG Li-te

(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** This paper conducts experimental study on the interaction between shock wave and liquid drop in horizontal shock tube; conducts the experiment with shock Mach number 1.1 and 1.25 with nitrogen as high pressure driving gas; replaces the stainless steel needle head producing liquid drop and obtains liquid drops with different sizes; records the process of liquid drop from compressive deformation to crushing atomization in detail by using a high-speed camera; obtains the relationship between liquid drop displacement and horizontal diameter and time by analyzing experimental data. After shock wave action, liquid drops will have accelerated motion. With the constant deformation of liquid drop, its horizontal diameter first increases and then decreases till complete atomization.

**Key words:** shock wave; liquid drop; acceleration; deformation; atomization

(责任编辑: 张祖尧)