

文章编号: 1001-4888(2011)04-0464-07

激波作用下水膜变形和雾化实验研究^{*}

李斌, 解立峰, 韩志伟, 朱英中, 张玉磊

(南京理工大学 化工学院, 江苏 210094)

摘要: 在激波与液滴作用研究的基础上, 开展了激波作用下水膜的变形和雾化过程研究。通过阴影照相技术捕捉激波与水膜作用的典型照片, 并以此分析其作用机理。通过改变激波强度观察水膜的变形和雾化情况。研究发现激波强度越大, 水膜雾化后抛撒的距离越远, 证明气动力在作用过程中起主导作用。使用 PDPA 系统对抛撒后水雾粒子的直径和速度进行测量, 结果发现激波作用后初期, 气动力仍起着主导作用。

关键词: 激波; 水膜; 变形; 雾化; 阴影照相

中图分类号: O359.1

文献标识码: A

0 引言

气溶胶云团的形成是一个典型的多相流问题, 具有极其重要的学术和应用价值。工农业上广泛使用的锅炉和喷雾装置, 气象学中云、雾、尘埃等自然现象, 汽车发动机燃烧室中的燃料破碎、雾化过程, 以及采石场、加工厂里固体粉尘的扬起扩散, 都属于气溶胶的范围, 由此可见, 气溶胶云团无处不在。在军事领域中, 液体燃料的抛撒和雾化可以有效提高云雾爆轰武器的爆炸当量和稳定性^[1], 近几十年来, 美俄等军事强国展示的新型武器中, 有相当数量与“云爆”有关, 即与介质分散和气溶胶形成有关。

液体在气流或激波作用下的抛撒和雾化在气溶胶云团形成过程中占据重要的位置, 其应用前景更为广阔, 同时也广受关注。A Wierzb 和 K Takayama 对气流中液滴破碎(气动雾化)的实验研究, 有一较全面的文献总结^[2]。M. Pilch 等人^[3]通过研究加速度驱动下液滴破碎时间和速度数据来预测液滴成雾后雾滴的最大直径。L. P. Hisang 和 G. M. Faeth 等人^[4-6]发表了对接近极限条件的液滴变形和后续破碎(二次破碎)的实验研究, 观察了在常温常压(NTP)条件下激波诱发扰动作用下液滴变形和二次破碎的特性。国外学者对激波作用下球形液滴的变形和破碎进行了较为全面的研究, 其研究成果总结了在不同动力学参数条件下球形液滴的变形、破碎及二次破碎的方式及现象, 从微观方面较好地解释了激波与球形液滴作用的机理。但是由于研究的较早, 其液滴模型局限于球形液滴, 同时激波马赫数在 1.01~1.30 之间的液滴变形破碎现象研究较多。国内学者吴德义等^[7-9]进行了激波作用下液体抛撒的系列实验, 研究了爆炸冲击波作用下液体抛撒不同阶段的运动规律。杨磊等人^[10-12]使用激波管装置进行了轴向气流作用下液体轴对称抛撒二次破碎及雾化现象及规律的研究。国内学者研究的侧重点放于激波作用后液体的抛撒过程, 给出了不同条件下液体抛撒的过程和规律, 而采用的研究对象主要是通过气流作用后喷射而形成的液核。

本文使用自制的激波管装置, 应用阴影照相技术, 研究了激波和既定厚度水膜间的相互作用。通过

^{*} 收稿日期: 2011-04-12; 修回日期: 2011-05-16

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(10676120)资助

通讯作者: 解立峰(1965—), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 安全技术及工程、工程力学、防火防爆技术。E-mail: xielifeng319@sina.com

实验得到了不同于球形液滴的液态膜状对象的变形及破碎情况,并拍摄了较为清晰的作用过程照片。通过图像处理技术,对水膜的抛撒情况进行了分析探讨。本文的研究成果将丰富膜状液体与激波作用的理论和实验内容,为气溶胶云团的形成过程进行补充。

1 不同马赫数激波作用后雾化效果的理论研究

研究液滴变形和破碎的流场条件时,首先需引入 Weber 数(We)和 Ohnesorge(Oh)这两个无量纲数,因为不同 We 数和 Oh 数的条件下,液滴会有不同的变形和破碎模式。在 Oh 数较低的条件,随着 We 数的增加,液滴会依次出现振动破碎、袋状破碎、剥离破碎及混合破碎等破碎形式^[2]。在流场中, We 代表着惯性力与表面张力之比, Oh 代表着粘性力与表面张力之比,两者分别用式(1)、(2)进行计算^[2]:

$$We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma} \quad (1)$$

$$Oh = \frac{\mu_d}{(\rho_d D \sigma)^{0.5}} \quad (2)$$

激波诱导气流的速度 u 和密度 ρ 分别通过公式(3)和(4)计算而得:

$$u = 2a_0 \left(\frac{M_s - 1}{M_s} \right) / (\gamma + 1) \quad (3)$$

$$\rho = \rho_0 \frac{\gamma + 1}{2} \left[\frac{M_s^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_s^2} \right] \quad (4)$$

其中, ρ 为气体密度; ρ_0 为标准状态下空气密度; ρ_d 为液体密度; V 为气液相对速度; D 为液体直径; σ 为液体的表面张力; μ_d 为液体的粘性系数; a_0 为常压下声速; M_s 为激波马赫数; γ 为气体的绝热指数。

类似于激波与液滴的作用后的流场变化,不同马赫数激波与 2mm 水膜作用,将 2mm 厚度水膜换算成等体积球形水滴的直径,计算所得的物性参数和激波波后参数见表 1。

表 1 物性参数及激波波后参数列表

Tab. 1 List of parameters of materials and parameters behind the shock wave

液体类型	M_s	ρ_d	ρ	u	We	Oh
水	1.5	997	2.309	94.4	565.67	0.002346
水	1.75	997	2.826	121.4	1145	0.002346
水	2.0	997	3.307	141.7	1825.45	0.002346

由表 1 可知,三种马赫数的激波作用后, $We > 350$,对于单个液滴来说,其破碎状态为剥离破碎,在这种破碎状态中,一片片液滴薄片连续地从变形液滴的外围脱落,随后液滴薄片继续分裂成小片,其机理已被广泛研究。激波与水膜作用类似于激波与水滴作用,基于激波与水滴作用的研究内容,根据文献[2]可知,其作用过程一般分为两个阶段:一是变形期,即水膜在激波作用下发生变形,背离作用界面处产生突起;二是剥离破碎期,即水膜在重力、气动力、表面张力及空气阻力的综合作用下开始剥离破碎形成雾云。

而就水膜而言,不同于单个液滴,水膜的重力作用将在整个变形破碎乃至雾化过程中起到重要的影响。激波作用于水膜的过程不再简单为水膜剥落破碎雾化的过程,其在重力作用下不断拥有向下的加速度,在气动力作用下向前运动趋势更为明显,而在表面张力作用下,对于水膜整体来说有向作用中心收拢的趋势。与此同时,由于激波作用于水膜的面积相对其厚度要大得多,不同于球状水滴,激波作用于水膜后将会产生绕射、透射以及反射的过程,其中反射现象将更为明显。这是由于水膜的面积相对于激波的作用面积要大,相对于单个水滴,激波不再容易发生绕射;其次水膜拥有一定的厚度及在重力作用下有很强的连续性,当激波与水膜作用时,水膜作为一个整体,在表面张力作用下要向作用中心收缩,激波要从水膜中直接穿过不再容易,这也是作用初期激波反射易于透射发生的原因。

由于气动力依然是水膜变形、破碎、雾化起主导作用的因素,激波作用后, We 已经接近或超过 10^3 量级,根据文献[2]的结果,水膜发生完全破碎的时间将在几百个微秒左右,说明阴影照相基本捕捉到了水膜在激波作用后的整个过程,而限于研究手段,对可能存在的变形情况未能提供完整照片。

2 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示。矩形激波管直径 $0.06\text{m} \times 0.06\text{m}$,由高压段(1.34m)、膜片、低压段(3.5m)和空压机等组成,安装不同材质和厚度的膜片可产生不同强度的激波;低压段出口处安装水膜喷头,水膜厚度由不同的喷头出水槽宽度确定;口部为拍摄区,用于拍摄激波与液膜相互作用及随后发生的液膜变形和破碎过程。

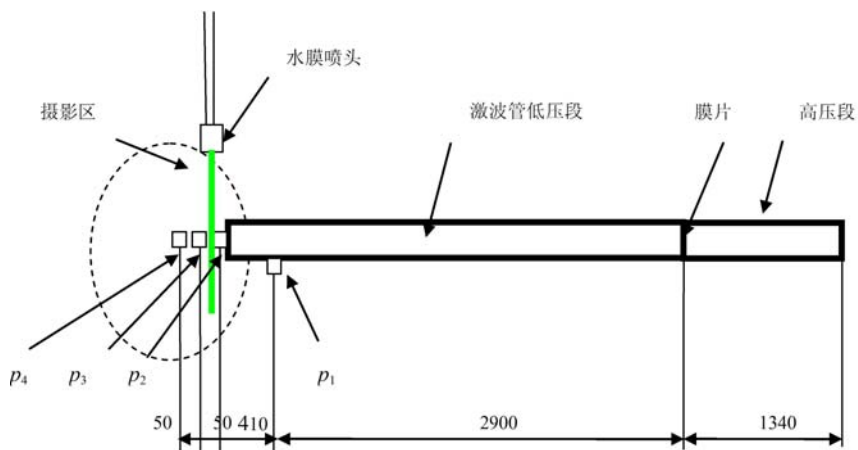


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Figure of experimental system

测试部分由测压系统、高速阴影照相机组成。测压系统由压电传感器、信号调理器及数据采集仪组成,激波管内外布置 4 个(p_1 、 p_2 、 p_3 和 p_4)压力测点,获取 p_2 、 p_3 、 p_4 的 $p-t$ 曲线,进而得到两中间点的激波速度和马赫数。

高速阴影照相采用 Y-16 高速分幅照相机。高速阴影照相系统由时序控制器、触发器、高压发生器、多闪光光源、凹镜反射镜和多镜头相机组成,时序控制器预先设置 16 个时序间隔(最小 $1\mu\text{s}$,每次曝光时间小于 $0.1\mu\text{s}$),接受 p_1 信号启动触发器,16 个火花光源按序闪光,光线经凹镜反射镜反射至实验区的 16 个相机镜头,实验区阴影成像于相机底片。

水膜系统由储水箱、水泵、管路及喷头组成。实验选用开口线槽 2mm 宽度的水膜喷头来获取水膜。

3 实验结果与讨论

3.1 破膜激波马赫数的确定

实验中激波管高压段与低压段之间的膜片为医用胶片制成的圆形膜片,直径略大于高压段口径,厚度为 0.125mm,膜片采用批量制作,保证实验条件的一致性。分别安装不同厚度的膜片进行出口压力测试以确定破膜激波的马赫数。通过 p_2 、 p_3 、 p_4 处压力曲线中的时间差计算出破膜激波的马赫数。实验中激波的马赫数分别为 1.5、1.75 和 2.0。

3.2 不同马赫数激波与水膜作用

选取 1.5、1.75 和 2.0 马赫数的激波与 2mm 水膜作用,得到的典型照片如图 2 所示。

由图 2 可以看出,随着激波马赫数的增大,水膜的变形和雾化效果有着明显的不同。选取 1.5 和 1.75 马赫数激波相同时刻的照片进行对比,发现在破膜激波产生后的相同时刻,1.75 马赫数激波作用后的水膜雾化效果要更为明显,表现在水膜成雾的雾团面积比 1.5 马赫数激波作用后的雾团面积大;至

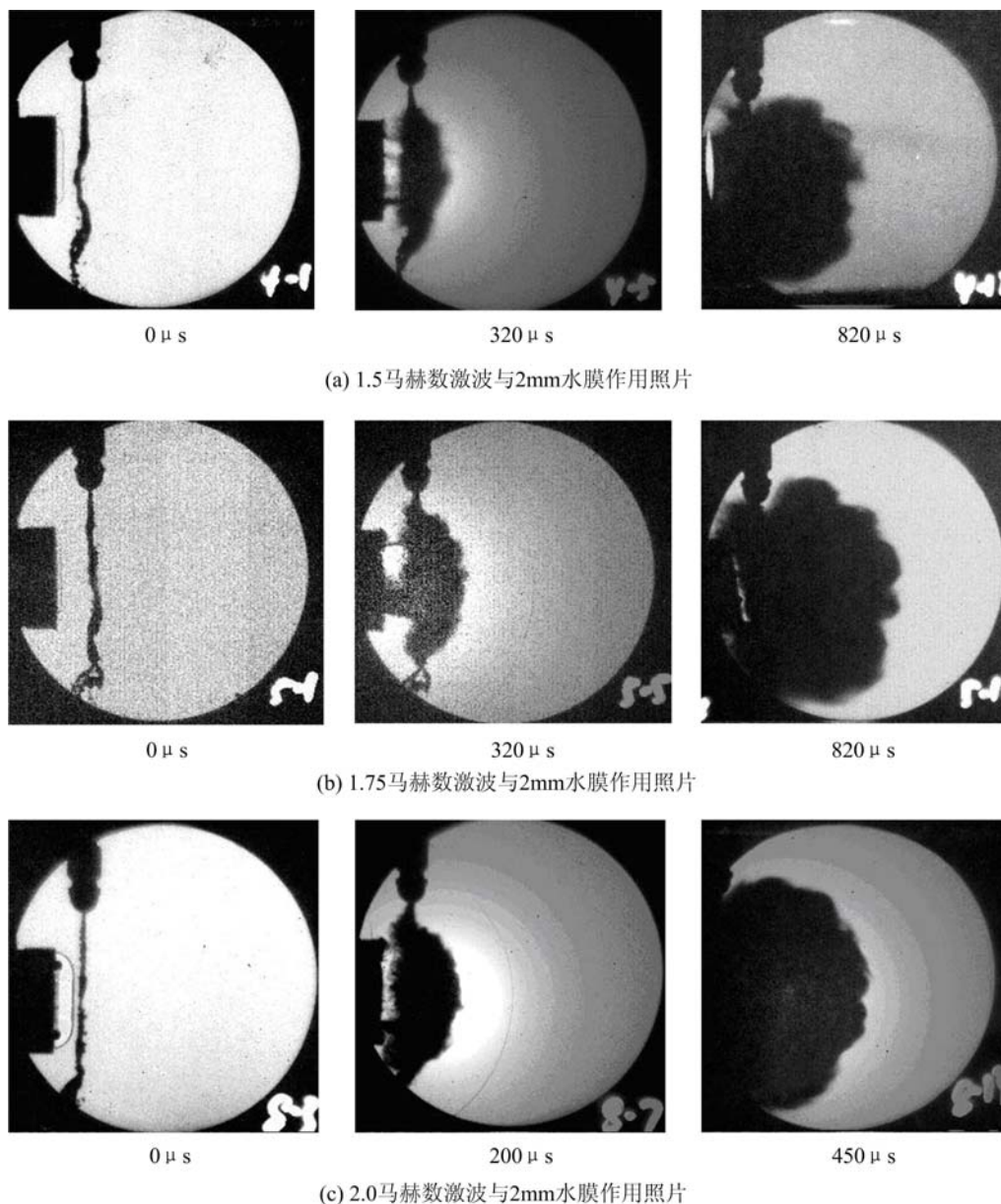


图2 不同马赫数激波与2mm水膜作用

Fig. 2 Reaction photos between shock waves with different mach numbers and water films with 2mm thickness

820 μ s时,雾团面积几乎为1.5马赫数激波作用后的1.5倍。比较1.75马赫数激波和2.0马赫数激波作用后的水膜成雾效果可以看出,在雾团面积相同的条件下,2.0马赫数激波形成相同的雾团分别比1.75马赫数激波快120 μ s和370 μ s,再次验证了激波马赫数的增大加快了水膜变形及缩短了成雾时间。这是由于激波马赫数的增大,与水膜作用后水膜中的水滴受气动力的主导作用,具有较高的运动速度,加速了水膜的变形和雾化。但由于水雾滴速度的加快,其受到的空气阻力也越大,同时在表面张力的作用下,Rayleigh-Taylor不稳定性表现的也越明显。这也是对比1.75马赫数激波和2.0马赫数激波作用后水膜雾化照片时,发现2.0马赫数激波作用后雾团的边界更为光滑的原因。

3.3 不同激波作用后水膜抛撒距离随时间变化的曲线

根据阴影照相的结果,绘制不同激波作用后水膜抛撒距离随时间变化的曲线,见图3。

由图3可知,随着激波马赫数的增大,同一时刻水膜抛撒距离有增大的趋势,但在作用初始阶段(0~250 μ s)发现马赫数为1.75的激波作用后,水膜抛撒距离反而小于1.5马赫数激波作用后的抛撒距

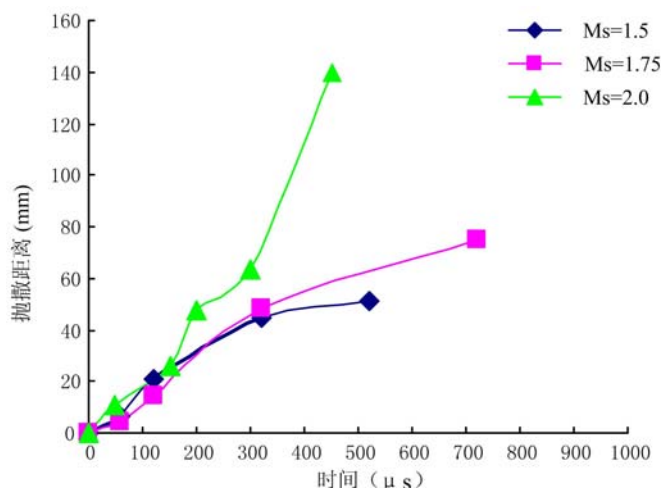


图 3 不同马赫数激波作用后水膜抛撒距离随时间变化图

Fig. 3 Relationship between dispersal distances of water films and time under shock waves with different mach numbers

离,这可能是因为初始阶段不同马赫数激波作用下水膜的抛撒距离相近,由于图像处理技术的局限性和误差度,造成结果的偏差;另外,从图 3 可以看出,由于水膜的厚度相对于其作用面较薄,激波易发生透射,激波作用后容易使作用中心的水膜产生涡旋,表现为激波作用后短时间内水膜抛撒的距离较近,致使不同强度激波作用下抛撒的距离差异不明显,甚至有强激波作用后抛撒距离反而更近的现象发生。而在 $400\mu\text{s}$ 后,图像中不同马赫数激波作用下水膜抛撒距离已有较大差异,此时,水膜抛撒距离随马赫数增大而增大的趋势愈发明显,再次证实了气动力在水膜破碎、雾化过程中仍起主导的作用。

3.4 激波作用后的水雾粒子速度与尺寸测量

使用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)测定激波抛撒水膜过程中的粒子速度和直径分布。测试系统的基本结构见图 4。

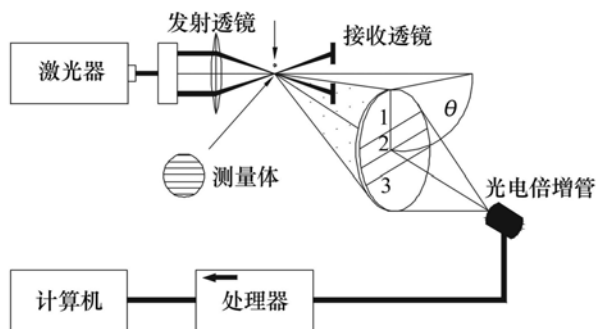


图 4 PDPA 系统基本结构图

Fig. 4 Structural drawing of PDPA system

使用 PDPA 系统测量了 1.5 马赫数激波与 2mm 水膜作用后,水膜抛撒过程中的粒径和粒子速度情况,见图 5 和图 6。

由图 5 可以看出,雾化时间由 3ms 增长到 12ms,水雾粒子的平均直径从 $42\mu\text{m}$ 左右下降到 $10\mu\text{m}$ 左右,可见二次破碎的现象较为明显。当雾化时间为 4ms~10ms 时,水雾粒子直径下降的趋势不大,这可能是由于水雾粒子在二次破碎过程中相互撞击又结合形成大粒子所致。

从图 6 可以看出,雾化的初始阶段,粒子的纵向运动速度要明显高于横向速度,这时,激波过后的气动力对粒子运动起主要作用,在惯性力作用下,水雾粒子的运动方向主要沿主导激波方向,即纵向运动。随着雾化时间的推移,纵向速度逐渐减小而横向速度有增大的趋势,在 4.5ms 左右,横向速度和纵向速

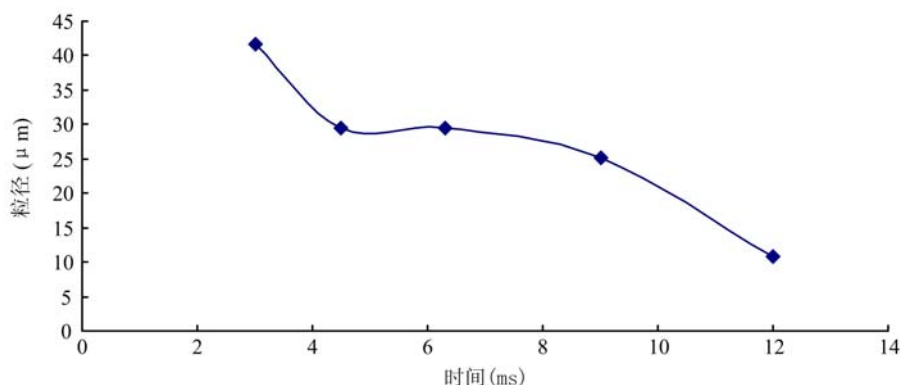


图5 激波作用后水雾粒子平均直径随雾化时间变化图

Fig. 5 Mean diameter of water particle varies with time after the reaction of shock wave

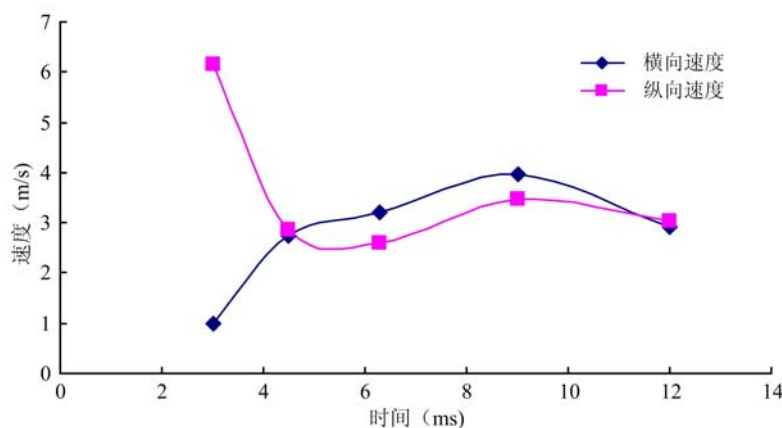


图6 激波作用后水雾粒子速度随雾化时间变化图

Fig. 6 Velocities of water particle vary with time after the reaction of shock wave

度大小基本一致,而后,纵向速度和横向速度都保持在一个相对稳定的状态,纵向速度要略微小于横向速度。这是由于在激波抛撒的瞬间,由于空气阻力的作用,粒子的纵向运动速度高,遇到的空气阻力也就越大,所以衰减要比横向运动的速度略快。随着粒子直径的变小、时间的推移,纵向速度和横向速度不再受气动力作用主导,致使两个方向的速度差异不再明显。

4 结论

(1) 激波与水膜作用后,作用界面上 Rayleigh-Taylor 不稳定性表现明显,在气动力、空气阻力、表面张力和重力作用下,水膜发生变形、破碎、雾化,但在整个过程中气动力仍占据主导作用;

(2) 随着激波马赫数的增大,水膜破碎后抛撒的距离增加,雾化范围增大;

(3) 在 1.5 马赫数激波作用后,通过 PDPA 系统测定粒子直径和速度发现,水雾粒子直径随雾化时间增加而减小,其中二次破碎现象明显;而雾化阶段初期,粒子的纵向速度明显大于横向速度,随着时间推移,二者趋于稳定,说明气动力在激波过后的初始阶段起到主导作用。

参考文献:

- [1] 丁珏,刘家骥. 液体的爆炸抛撒和云雾形成全过程的数值研究[J]. 火炸药学报, 2001(1): 20—23 (Ding Jue, Liu Jiacong. Numerical Study on the Whole Process of Explosive Dispersal for Forming Liquid-air Cloud [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001(1): 20—23(in Chinese))
- [2] Wierzb A, Takayama K. Experimental Investigation on Liquid Droplet Breakup in a Gas Stream[R]. Reports of

- the Institute of High Speed Mechanics, Tohoku University, n53, 1987: 1—99.
- [3] Pilch M, Erdman C A. Use of Breakup Time Data and Velocity History Data to Predict the Maximum Size of Stable Fragments for Acceleration-induced Breakup of a Liquid Drop [J]. *Fluid Mech.*, 1987, 13(6): 741—757.
- [4] Hisang L P, Faeth G M. Near-Limit Drop Deformation and Secondary Breakup [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1992, 18(5): 635—652.
- [5] Hisang L P, Faeth G M. Drop Properties after Secondary Breakup [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1993, 19(5): 721—735.
- [6] Hisang L P, Faeth G M. Drop Deformation and Breakup Due to Shock Wave and Steady Disturbance [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1995, 21(4): 545—560.
- [7] 吴德义, 杨基明. 强冲击波作用下液体抛撒的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2003(1): 91—95 (Wu Deyi, Yang Jiming. Experimental Investigation on Liquid Dispersal Induced by Explosions [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003(1): 91—95(in Chinese))
- [8] 吴德义, 杨基明. 爆炸冲击波作用下液体抛撒初期射流形成的实验研究[J]. *流体力学实验与测量*, 2003, 17(3): 36—38 (Wu Deyi, Yang Jiming. Experimental Investigation of Liquid Jet at initial stage of Liquid Dispersal with Blast [J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2003, 17(3): 36—38(in Chinese))
- [9] 吴德义. 爆炸冲击波作用下液体抛撒不同阶段运动规律分析[J]. *爆破器材*, 2005, 34(2): 4—7 (Wu Deyi. Study on Specialty of Liquid Dispersal with Blast [J]. *Explosion Materials*, 2005, 34(2): 4—7(in Chinese))
- [10] 杨磊, 韩肇元. 在轴向气流作用下液体轴对称抛撒二次破碎的实验研究[J]. *实验力学*, 2005, 20(2): 186—191 (Yang Lei, Han Zhaoyuan. Experimental Study on the Secondary Breakup of Axisymmetrical Dissemination of Liquid in Axial Air Flow [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(2): 186—191(in Chinese))
- [11] 杨磊, 黄中伟, 韩肇元. 运动状态下液体轴对称抛撒首次破碎的实验研究[J]. *实验力学*, 2007, 22(2): 125—130 (Yang Lei, Huang Zhongwei, Han Zhaoyuan. Experimental Study on the Primary Breakup of Axisymmetrical Dissemination of Liquid in Motion [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(2): 125—130(in Chinese))
- [12] 杨磊, 韩肇元, 黄中伟. 液体轴对称抛撒破碎和雾化的实验研究[J]. *实验流体力学*, 2007, 21(2): 50—55 (Yang Lei, Han Zhaoyuan, Huang Zhongwei. Experimental Study on Breakup and Atomization of Axisymmetrical Dissemination of Liquid [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(2): 50—55(in Chinese))

Study on Deformation and Atomization of Water Films Induced by Shock Wave

LI Bin, XIE Li-feng, HAN Zhi-wei, ZHU Ying-zhong, ZHANG Yu-lei

(Chemical School of Nanjing University of Science and Technology, Jiangsu 210094, China)

Abstract: On the basis of the investigation about the reaction between shock wave and liquid drops, experiments for the deformation and atomization of water films under the reaction of shock wave are carried out. Shadow photography technology is used to capture the typical photos of the reaction processes and the mechanism is analyzed. The intensity of shock wave is changed to observe the variation of the reaction processes. The results indicate that the higher the intensity of shock wave, the farther the dispersal distance, which proves that the aerodynamic force plays the leading part in the reaction processes. The diameter and velocities of water particles are measured by PDPA system, and the results indicate that the aerodynamic force also is the main force in the initial time period under the reaction of shock wave.

Keywords: shock wave; water film; deformation; atomization; shadow photography