DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0129-06

液滴在激波冲击下的破裂过程*

王 超,吴 宇,施红辉,肖 毅
(浙江理工大学机械与自动控制学院流体工程系,浙江 杭州 310018)

摘要: 对液滴在入射激波作用下的变形破碎过程进行了实验研究和数值模拟,得知数值模拟结果与实验结果基本吻合,以及在什么情况下两者出现分歧。结果显示,液滴在激波的作用下要经历从压缩变形、RM 不稳定性变形、细小液雾剥离到全部雾化破碎等过程。结果还表明,不同液滴直径、入射激波马赫数和液滴介质等参数下的液滴变形破碎的发展趋势是一致的,而其发展速度明显则不同。其中 Weber 数的增加加速了液滴的破碎,而 Ohnesorge 数和黏性的增加则抑制了液滴的破碎。

关键词: 流体力学;破碎;激波;液滴;变形;RM 不稳定性
中图分类号: O357.5 **国标学科代码**: 1302531 **文献标志码**: A

激波与液滴的相互作用问题,是一个与 Richtmyer-Meshkov(RM)不稳定性有关的、典型的可压缩性气液两相流问题[1],对该问题的深入研究在超音速雨滴侵蚀、燃气轮机燃烧室的设计、激波抛洒以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。

W. Lane[2]最早在激波管中对液滴在稳态和瞬态气流中的破碎进行了实验研究,并提出液滴的变形破碎是一个边界层不断脱落的过程。W. E. Krauss[3]随后也研究了边界层分离与液滴破碎雾化之间的关系。O. Engel[4]着重研究了激波对液滴的雾化作用,他认为高速气流在液滴表面生成不稳定波在液滴破碎过程中起重要作用。A. Ranger 等[5]在水平激波管中进行了激波马赫数 1.3~3.5 的实验,揭示了液滴在激波作用下出现压缩变形到破碎雾化的过程。发现入射激波马赫数较高时,液滴的压缩变形和破碎雾化几乎同时发生,液滴迅速形成薄雾状结构。C. Kauffman 等[6]研究了燃料液滴在氧气环境中与激波相互作用的过程:在入射激波马赫数 3~5 的情况下,液滴的燃烧先发生在从原始液滴脱落的雾状燃料上,在激波扫过一段时间后,整个燃料的燃烧过程才会发生。A. Wierzba 等[7]利用全息干涉技术研究了液滴在激波作用下的变形破碎过程,并把液滴脱落破碎分成 4 个阶段:压缩变形,横向直径增大至最大值,破碎雾化和横向直径减小至零。L. P. Hisang 等[8-9]给出了在液滴破碎模式与 We(Weber 数)的关系:随着 We 从零开始增加,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,并当 We 继续增加时会出现突发破碎(catastrophic breakup)情况。

陆守香等[10]研究了激波冲击后液滴变形和破碎的近似理论模型。耿继辉等[11]实验观测了液滴在激波作用下的加速、变形及破碎过程。蔡斌等[12]通过应用 VOF 方法和湍流模型对液滴在气流中的破碎过程进行了数值模拟,并分析了 We、Oh(Ohnesorge 数)以及气液密度比对液滴破碎过程的影响。姚雯等[13]通过求解二维 Euler 方程,并将表面张力转换为体积力,考察了激波流场中液滴变形与破碎过程。楼建峰等[14]将 VOF 方法和标准 k-ε湍流模型组合,进行了液滴在气流中变形破碎过程的数值模拟,并分析了几个关键参数(Weber 数、Ohnesorge 数、气液密度比)对液滴破碎过程的影响。其结果表明,We 对液滴变形破碎起促进作用,而 Oh 和液气密度比起阻碍抑制作用。

本文中,首先在水平激波管中进行激波与液滴作用的实验研究,然后利用数值模拟技术计算该实验条件下液滴破碎过程。再通过对比分析,详细描述液滴在激波作用下的变形破碎过程。

* **收稿日期**: 2014-06-09; **修回日期**: 2014-11-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(10802077)
第一作者: 王 超(1973—),男,博士,讲师; **通讯作者**: 施红辉,hhshi@zstu.edu.cn。

1 实验方法

水平激波装置示意图如图 1 所示。包括真空箱的激波管整体总长为 12 m。激波发生系统由高压气瓶、圆形高压段、圆形低压段及方形低压段组成，实验段通过法兰与方形低压段及真空箱连接，两个压力传感器安装在方形低压段，用于测量激波马赫数。高速摄影仪放置在实验段的侧面，在实验段的前后侧板上装有透明的有机玻璃板，上、下板开有液滴下落入口和排液孔。实验段内截面尺寸为 120 mm×120 mm，长为 500 mm。在实验段上方的液滴下落入口插入不同直径的尖针，以便形成一个在实验段自由下落的直径可控的液滴。控制破膜时间，使入射激波刚好扫过下降的液滴，用高速摄影仪拍摄整个液滴的变形破碎过程。

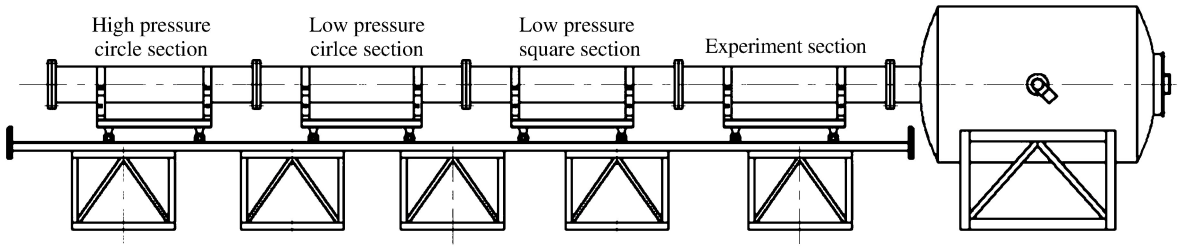

图 1 激波管装置示意图

Fig. 1 Sketch of shock tube

2 数学模型与计算方法

针对液滴在激波作用下的变形破碎，为了方便地模拟两相界面的变形情况，数值模拟中选用基于 VOF 模型的 RANS 方程，湍流模型使用标准 k-ε双方程模型。其二维控制方程组为如下通用形式：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)+S_\phi \tag{1}$$

式中：ρ 为两相平均密度，$\rho=\alpha_1\rho_1+(1-\alpha_1)\rho_2$，其中 α_1、ρ_1 和 ρ_2 分别表示气相质量分数、气相密度和液相密度；ϕ 为通用因变量，其取值为 1、u(x 方向速度)、v(y 方向速度)、E(总能)、k(湍流动能)和 ε(湍流耗散)时方程分别对应连续方程、动量方程、能量方程、湍流动能输运方程和湍流耗散方程；Γ_ϕ 为输运系数，包括黏性输运(根据气相质量分数加权计算[15])和湍流输运；S_ϕ 为源项，主要为重力项、压力作用项、湍流作用项和相间相互作用项等组成。方程中各项具体表达式及参数取值可参见文献[15-16]。

根据液滴在气流中破碎的结构特点，选取了如图 2 所示的计算区域。其中计算区域尺寸为 2 cm×8 cm，液滴直径根据实验数据分别为 1.64、2.16、2.46 mm。计算使用 ANSYS Fluent 软件中的 Coupled 求解器，数值离散使用二阶 MUSCL 格式，计算区域网格数目为 42 万。波后区域参数根据运动正激波解求得，也以此作为左边界入口边界参数，其他 3 个边界选自由出口边界。设定激波初始位置位于液滴前缘上游 2 mm 处。在与实验结果对比时，第 1 张图片的时刻均为激波通过后的 0.125 ms。

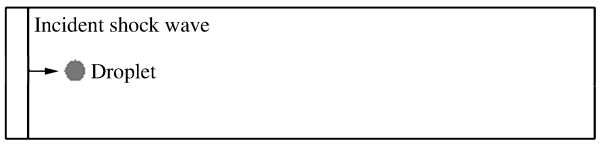

图 2 计算区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculating range

3 结果分析

实验采用 We(Weber 数)与 Oh(Ohnesorge 数)来分析液滴破碎变形，其具体计算公式分别为：$We=\rho_a u^2 d_0/\sigma_w$ 和 $Oh=\mu_w/\sqrt{\rho_w d_0\sigma_w}$，$We$ 表示惯性了力和表面张力之比，Oh 表示黏性力和表面张力之比。其中，ρ_a 为空气密度，u 为波后气流速度；ρ_w、σ_w 和 μ_w 分别为液滴的密度、表面张力和动力黏度；d_0 为液滴的初始直径。实验和计算中各参数的具体数值，如表 1 所示，表中 Ma 为入射激波马赫数。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

实验	液滴	Ma	d_0/mm	We	Oh
1	水	1.10	1.64	94.48	0.002 9
2	水	1.10	2.16	124.44	0.002 6
3	水	1.10	2.46	141.72	0.002 4
4	水	1.25	1.68	518.75	0.002 9
5	甘油	1.10	2.46	167.23	3.450 0

实验 1 的实验与数值模拟结果如图 3(a)所示。左列为数值模拟结果，图示的是密度云图，右列为实验照片，上下两幅图时间间隔为 0.25 ms。从图中可以看到，实验与计算的液滴变化趋势是相近的，从开始的压缩变形为一个薄圆盘状结构，其后液滴的横向直径增大，轴向直径降低；紧接着，薄圆盘状结构逐渐扩展，更细小的液滴从上下两端不断脱落，原始的球形液滴演化成了云团状，并继续沿横向和轴向扩张。由前 4 幅对比可以看出，激波作用后刚开始数值模拟中液滴的横向变形没有实验中的剧烈，仍显得比较“胖”，第 4 幅左图数值模拟结果也就没能出现类似右图中的细棍状结构。最后两张对比图片中，虽然大致上两者的雾化扩张类似，但是，数值模拟中液滴中间已经只剩下一个点状水粒，而实验照片显示液滴中间是被打散的极小液滴密集而成的云团结构。最后一张对比图中，可以明显看到实验中液滴已经雾化成云团，而数值模拟结果仍然显示液滴有未破碎的内核存在，这是因为 VOF 模型中没有加入液滴的破碎机制。

图 3(b)给出了实验 2 的数值模拟结果和实验结果。由图可以明显看出，数值模拟的液滴变形演变速度比实验的慢。与图 3(a)不同，在图 3(b)的最后一幅图中，两相界面上出现了尖钉和气泡，这是 RM 不稳定性作用的结果。因为当初始液滴的直径增大时，由于液滴的体积和质量更大，其破碎变形肯定比小直径的液滴慢，所以在图 3(a)中液滴还没来得及出现 RM 不稳定的结构就破碎了。

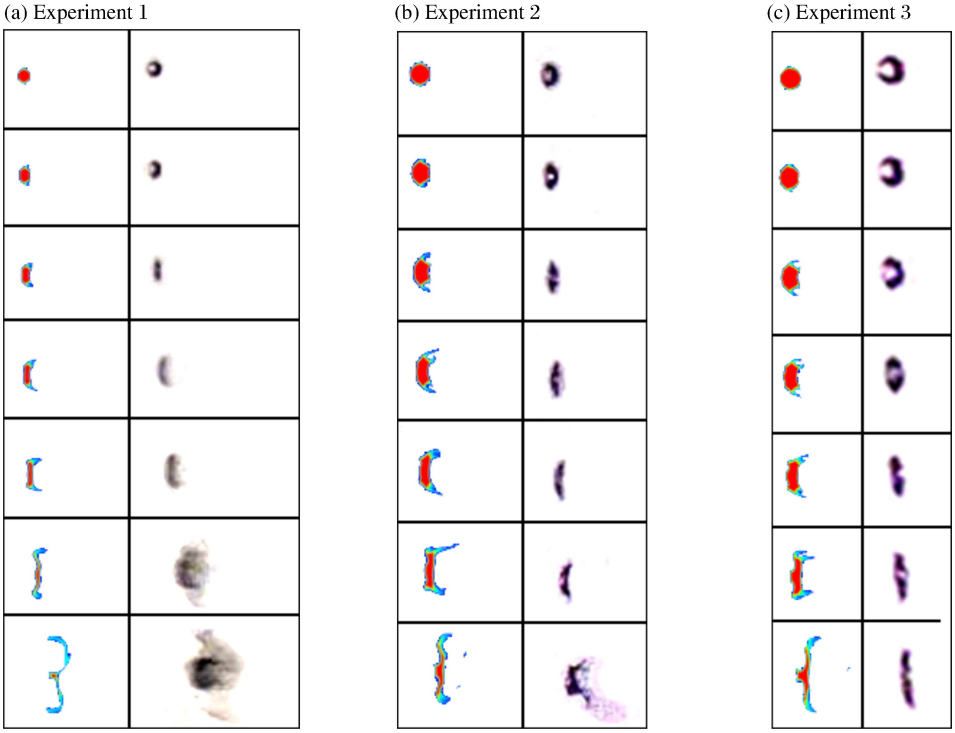

图 3 实验 1～3 的数值模拟结果(左)与实验照片(右)(Δt=0.25 ms)

Fig. 3 Numerical simulation (left) and experimental (right) results of experiments 1－3

图 3(c)给出了实验 3 的数值结果和实验结果。在前 5 幅图中,液滴的变化和实验照片一致。在第 6 幅图中,计算与实验结果都出现了 RM 不稳定性引起的尖钉和气泡结构,计算结果中向左侧突起的尖钉结构比较明显,而实验结果的右侧包裹有明显的气泡结构,可是计算与实验中液滴的横向直径增加趋势仍然是一致的。实验结果的前 4 幅图中,液滴中偏左位置的白色圆孔不是气泡结构,而是由于液滴反光造成的拍摄干扰。

图 4 给出了液滴横向直径与初始直径之比 d/d_0 随时间的变化关系。在激波作用后液滴变形的初始线性增长阶段和中期非线性发展阶段,数值结果与实验结果符合很好,而在后期的破碎发展阶段,数值结果与实验结果偏离。尤其是实验 1 中最后一组数据,实验观测到液滴核心的横向直径已经因液滴周围突发破碎而减小,而数值结果则相反,原因是数值计算中没有加入突发破碎模型。

图 5 给出了实验 4 的数值计算和实验结果对比图。实验 4 与实验 1 具有相同的 Oh,而两者的 We 差别较大。从实验中可以看出,在激波扫过后,液滴几乎没有出现明显的压缩变形就发生突然破碎,这说明随着 We 增大到一定程度,液滴的破碎模式发生了根本性改变:We 较小时液滴经历由变形到破碎的剪切破碎模式,而当 We 增大到一定值时,为突发破碎模式。一般而言,破碎模式的临界 We 在 500 左右,本文中实验也验证了这一点。图 5 中的计算结果没有出现液滴突发破碎模式,说明在数值模拟中应该加入突发破碎的机制,而其他研究者还没有指出这一点。

综合上面的讨论可知,当 Oh 相同时,We 越大,破碎速度越快。实验 1 的液滴经过 1.5 ms 后,横向直径才达到最大而开始裂解破碎。而实验 4 的液滴经过 0.25 ms,就完成了横向扩张,开始裂解破碎。这表明 We 在液滴破碎过程中加强了液滴的不稳定,为不稳定因素。

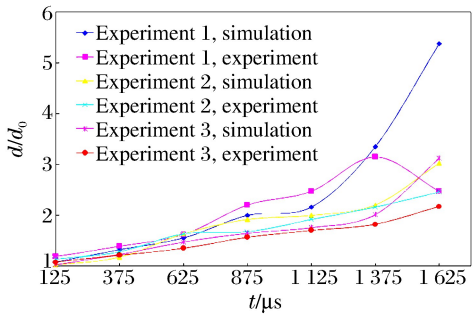

图 4 实验 1～3 液滴横向直径与初始直径之比

Fig. 4 Ratio of transverse diameter and initial diameter of experiments 1－3

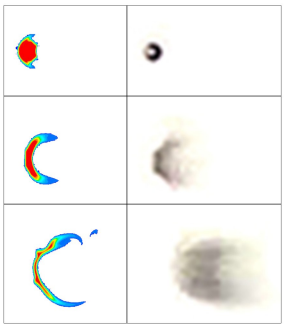

图 5 实验 4 的数值模拟结果(左)与实验照片(右)(Δt=0.25 ms)

Fig. 5 Numerical simulation (left) and experimental (right) results of experiment 4

为了得到相同 We 条件下,不同 Oh 对液滴变形和破碎的影响,对实验 5 进行了模拟计算,其 We 与实验 3 相近,而 Oh 则相差较大,结果如图 6 所示。甘油液滴从初始变形上就不同于水滴,甘油液滴在波后气流的作用下,先是迎风面开始扁平化,背风面仍然保持原先的半圆状结构,同时两侧也在伸长,但后部的弧形结构明显很完整。相对而言,水滴受到波后气流作用下,其右侧半圆结构很快向内凹陷,形成开口状结构。这两个明显的差异,应该是由于甘油的黏性系数远大于水的黏性系数而造成。相同初始直径的水滴,在实验 3 的模拟结果中,刚到第 4 张图就可以观察到,水滴的微滴剥离非常明显,并且在后续图片中,已经出现了表示 RM 不稳定性的尖钉状结构。而在图 6 中,随着甘油液滴横向扩张结束,两翼开始向后弯曲变形,但整体结构仍然保持完整,没有出现大规模的微滴剥离。并且在数值模拟结果中,整体液滴的变形演化速度慢于水滴。由此可见,Oh 的减小使破碎速度显著加快,说明 Oh 对破碎起抑制作用。

图 7 为实验 3(水滴)与实验 5(甘油液滴)的数值计算结果的涡量云图对比图。由图可以看出,甘油液滴算例中的涡量从开始就处于不对称的状态,之后出现了类似于卡门涡街的现象,不断有涡旋一上一下地从液滴后方脱落,向下游传播,一直持续到液滴大规模破碎为止。水滴的算例中则没有这个现象。这是因为甘油的黏性远大于水滴的黏性,其破碎速度比水滴的慢很多。

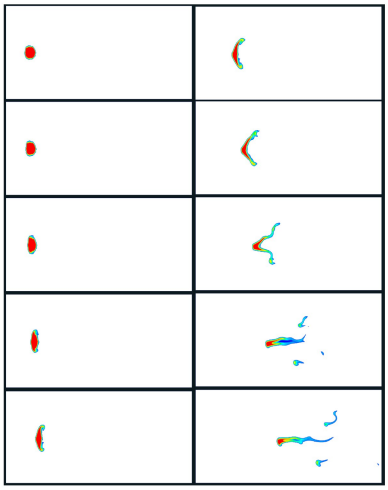

图 6　实验 5 的数值模拟结果($\Delta t=0.25$ ms)

Fig. 6　Numerical simulation results of experiment 5

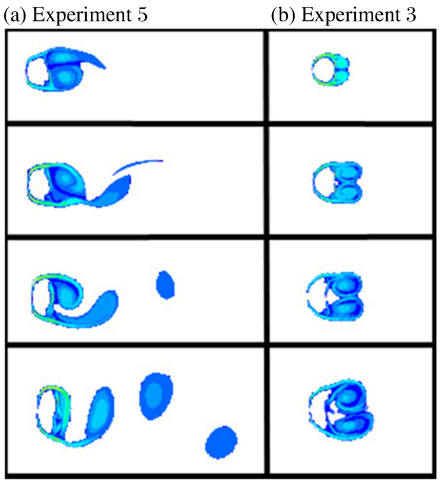

图 7　实验 5 和 3 的数值模拟涡量图($\Delta t=0.25$ ms)

Fig. 7　Vorticity cloud of experiments 5 and 3

4　结　论

实验观测和数值计算结果表明：(1)液滴在激波的作用下，要经历从压缩变形、RM 不稳定性变形、细小液雾剥离到雾化破碎等过程。不同参数下的结果显示，液滴变形破碎的发展趋势一致，但发展速度明显不同。数值模拟结果与实验结果基本吻合。(2)实验数据与数值模拟结果显示，在液滴破碎过程中 We 的增加促进液滴的破碎，为不稳定因素。当 We 增加到一定值后，液滴破碎模式由剪切破碎转变为突发破碎。Oh 的增加对液滴的破碎起抑制作用，黏性同样会抑制液滴的破碎。

对比分析指出，在液滴变形的初期及中期，数值计算与实验结果吻合较好。在液滴变形的后期，需要在数值计算中考虑雾化模型；而随着激波马赫数的提高，还要考虑突发破碎机制，其中包括激波冲击气/液界面引起的扰动。根据计算的速度云图[17]，可知液滴的上下承受着高剪应力(由速度梯度造成)，所以液滴的变形破碎不仅与 RM 不稳定性有关，还与 Kelvin-Helmholtz(KH)不稳定性有关。图 6～7 所示的对甘油液滴的计算结果，对于寻找 RM 不稳定性的实验方法有重要参考价值，即如果使用黏弹性流体(如果冻)，那就应该考虑增加激波强度，以保证其本构方程与 Navier-Stokes 方程相似。

参考文献：

[1]　施红辉，罗喜胜. 可压缩性和高速多相流动[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2014：404-443.

[2]　Lane W. Shatter of drops in streams of air[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1951, 43(6): 1312-1317.

[3]　Krauss W E. Deformation fragmentation of water drops due to shock wave impact[R]. AIAA 71-392, 1971.

[4]　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.

[5]　Ranger A, Nicholls J. Aerodynamics shattering of liquid drops[J]. AIAA Journal, 1969, 7(2): 285-290.

[6]　Kauffman C, Nicholls J. Shock-wave ignition of liquid fuel drops[J]. AIAA Journal, 1971, 9(5): 880-885.

[7]　Wierzba A, Takayama K. Experimental investigation of aerodynamic breakup of liquid drops[J]. AIAA Journal, 1988, 26(11): 1329-1335.

[8]　Hsiang L P, Faeth G. Near-limit drop deformation and secondary breakup[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1992, 18(5): 635-652.

[9]　Hsiang L P, Faeth G. Drop deformation and breakup due to shock wave and steady disturbances[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(4): 545-560.

[10]　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.
Lu Shouxiang, Qin Youhua. Deformation and breakup of droplets behind shock wave[J]. Chinese Journal of High

Pressure Physics, 2000,14(2):151-154.

[11] 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.
Geng Jihui, Ye Jingfang, Wang Jian, et al. Experimental investigation on phenomena of shock wave induced droplet deformation and breakup[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003,24(5):797-800.

[12] 蔡斌,李磊,王照林.液滴在气流中破碎的数值分析[J].工程热物理学报,2003,24(4):613-616.
Cai Bin, Li Lei, Wang Zhaolin. Numerical analysis of liquid drop breakup in airflow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003,24(4):613-616.

[13] 姚雯,冯其京,郝鹏程,等.欧拉网格中基于 VOF 方法的表面张力项处理方法[J].北京理工大学学报,2010,30(3):361-363;368.
Yao Wen, Feng Qijing, Hao Pengcheng, et al. Investigation of surface tension solver based on VOF method in Euler meshes[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010,30(3):361-363;368.

[14] 楼建峰,洪滔,朱建士.液滴在气体介质中剪切破碎的数值模拟研究[J].计算力学学报,2011,28(2):210-213.
Lou Jianfeng, Hong Tao, Zhu Jianshi. Numerical study on shearing breakup of liquid droplet in gas medium[J]. Chinese Journal Computational Mechanics, 2011,28(2):210-213.

[15] Ubbink O. Numerical prediction of two fluid system with sharp interfaces[D]. London: Imperial College of Science, Technology & Medicine, 1997.

[16] 王福军.计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:15-45.

[17] 吴宇.液滴和液柱在激波诱导的高速气流作用下变形破碎过程的数值计算[D].杭州:浙江理工大学,2014.

Breakup process of a droplet under the impact of a shock wave

Wang Chao, Wu Yu, Shi Honghui, Xiao Yi

(*Department of Fluids Engineering, College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *Zhejiang China*)

Abstract: In this work we carried out an experimental study along with a numerical simulation of the processes of a droplet deformation and breakup induced by an incident shock wave. The numerical results basically agreed with the experimental results but also identified the conditions under which discrepancies might occur. The results provide a full show of the whole processes of the droplet deformation and breakup: first, the droplet is deformed due to the shock wave compressing and RM instability, then small fogdrops are divorced from the deformed droplet, and in the end the droplet is completely broken up into fogdrops. Due to differences in such flow parameters as droplet diameter, the incident shock wave number, droplet varieties, etc., the development processes of droplets may have markedly different speed although they share similar trends. The results also show that the increase of Weber number accelerates the breakup of the droplet whereas that of Ohnesorge number and viscosity contains it.

Key words: fluid mechanics; breakup; shock wave; droplet; deformation; RM instability

(责任编辑 丁 峰)