论文

冲击作用下液滴在环境液体中的演变过程及主导因素

廖斌^{1,2}, 朱雨建^{1*}, 杨基明¹

1. 中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230027;

2. 安徽工程大学建筑工程学院, 芜湖 241000

*联系人, E-mail: yujianrd@ustc.edu.cn

收稿日期: 2017-02-05; 接受日期: 2017-03-17; 网络出版日期: 2017-05-12

国家自然科学基金(编号: 11572313, 11621202)资助

摘要 采用实验与计算流体力学(CFD)相结合的方法对冲击作用下液滴在环境液体中的演变过程进行了研究, 重点针对液膜破碎之前液滴的4种典型演变模式所伴随的流场细节进行了较为深入的探讨. 结果表明, 液滴演变过程与涡强度有较强关联: 涡强度越大, 液滴演变模式越剧烈, 演变过程中出现环状射流持续翻转现象; 反之, 演变过程中无环状射流生成甚至出现液滴变形回复现象. 进一步对液滴内部环状射流的生成与发展机理进行研究发现, 涡的演变与界面约束之间存在一种竞争机制: 涡的演变促进界面的进一步变形, 而界面约束起着相反的抑制作用. 这一竞争机制通过有无界面张力条件下液滴变形的CFD结果得到了进一步揭示.

关键词 液滴变形, 环状射流, 涡, 界面约束

PACS: 47.11.-j, 47.32.C-, 47.55.D-, 47.55.dk

1 引言

液滴受环境液体动力学作用出现变形甚至破碎的演变现象在自然界和各类工程实践中广泛存在, 对此类演变现象的深入研究, 不仅有助于对工程实践的准确把握和引导预测, 同时也是对相关演变机理认识的有效补充^[1-3]. 为了尽可能降低环境液体的扰动影响并获取液滴演变过程详尽的实验数据, 本课题组^[4]借鉴气体激波冲击液滴的实验构思^[5-7], 自行设计了一套能施加短时间冲击作用的坠落实验装置率先对单个

水滴在环境油相中的冲击演变过程进行了实验研究. 该研究拍摄得到了清晰的液滴典型演变模式, 但前期工作缺乏对液滴演变机理的有效认识以及主导因素的深入探讨.

针对上述研究工作的不足, 在继承并改进其坠落实验装置基础之上, 本课题组^[8]进一步对影响液滴演变过程的相关参数进行了更为细致的实验测量和定量分析. 研究发现, 在所开展实验的Weber数(简称 We 数) ($1 < We < 700$)、Ohnesorge数(简称 Oh 数) ($0.001 < Oh < 0.005$)条件下, 液滴演变模式主要由 We 数

引用格式: 廖斌, 朱雨建, 杨基明. 冲击作用下液滴在环境液体中的演变过程及主导因素. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 094701
Liao B, Zhu Y J, Yang J M. Research on key factors for the drop evolution process in ambient liquid under an impact (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 094701, doi: 10.1360/SSPMA2017-00021

决定, 而与 Oh 数无明显依赖关系. 这一发现与Pilch和Erdman^[9]归纳的 $Oh < 0.1$ 条件下气体冲击液滴实验中液滴演变模式与 We 数和 Oh 数的依赖关系基本类似. 该研究虽然在液滴演变机理的有效认识上取得了一定进展, 但由于实验获得的信息受限, 仍基于对液滴演变表面现象的基本认识, 涉及演变过程的内在作用机制难以进一步挖掘. 另外, 计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法可提供丰富的流场信息, 包括速度、压力、涡量等, 这些流场信息给揭示物理现象的内在机理带来了便利. 当然, CFD方法的准确可靠模拟仍有漫长的路要走, 其中两相流中复杂界面演变过程无疑也是CFD方法所面临的挑战性问题之一^[10,11].

本文将实验与CFD方法相结合, 意在揭示冲击作用下单个液滴在环境液体中演变过程的内在机理. 针对CFD方法难以准确模拟液膜破碎现象的局限性, 重点关注液膜破碎之前的液滴演变过程. 通过对实验和CFD结果的综合分析, 对不同强度冲击作用下液滴详细的演变过程、液滴内部环状射流的生成与发展机理、涡强度和界面张力对液滴演变过程的影响等三方面内容进行探究.

2 研究方法

2.1 实验装置与方法

实验装置如图1所示, 具体的实验构思和装置介绍参见文献[8]. 液滴演变过程连续照片采用背光拍摄获得, 曝光时间 $1/10000$ s, 每秒1000 fps, 照片分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$. 环境液体为1,2-丙二醇与水按配比生成的混合溶液, 液滴为全氯乙烯或全氯乙烯与Exxsol™ D110白油按配比生成的混合溶液, 产生的液滴直径范围控制在 $4.0\text{--}9.0$ mm. 密度和黏度测量分别采用浮子密度计和毛细管黏度计, 界面张力系数由悬滴法^[12]测得. 掉落箱体落地时的冲击时间约为 $t_0=6$ ms.

2.2 CFD方法

采用文献[13,14]中的Front-Tracking方法对冲击作用下液滴的演变过程进行数值模拟. 计算域选取轴对称计算模型, 其中左边界为对称轴, 其余边界为固壁, 具体几何条件如图2(a)所示. 设液滴直径为 D , 计算域

图1 (网络版彩图)实验装置示意图. (a) 正视图; (b) 侧视图
Figure 1 (Color online) Schematic of experimental setup. (a) Front view; (b) side view.

图2 (网络版彩图)计算模型示意图. (a) 计算域; (b) 液滴赤道、迎风面和背风面驻点位置
Figure 2 (Color online) Schematic of computational setup. (a) Computational domain; (b) equator, windward and leeward side stagnation points of the drop.

的径向长 $8D$, 纵向高 $16D$. 计算网格划分采用正方形结构化网格, 径向网格数512, 纵向网格数1024. 计算域初始速度场为零, 体积力场设置为

$$\begin{cases} a_z = v_t / t_0, & \text{if } t \leq t_0, \\ a_z = g, & \text{else,} \end{cases} \quad (1)$$

其中, v_t 为密封箱体下落过程中与缓冲装置接触时的速度; g 为重力加速度(取为 9.8 m/s^2). 由于箱体掉落近乎自由落体, $v_t \approx \sqrt{2gh}$, h 为箱体坠落高度.

为清晰刻画液滴的演变过程, 将初始时刻液滴的迎风面驻点、背风面驻点以及赤道等标志性位置予

以标记, 如图2(b)所示. 其中, 迎风面驻点所处的方位角为 0° , 背风面驻点所处的方位角为 180° .

3 结果与讨论

着重关注4种典型工况, 对应的实验、计算条件以及演变模式^[8]见表1 (其中, ρ_d , μ_d , ρ_a , μ_a , d_0 和 σ 分别为液滴密度、黏度, 环境液体密度、黏度, 液滴初始直径以及液滴与环境液体之间的界面张力系数). 4种演变模式按照演变过程的剧烈程度依次为振荡、袋状、帽状和蘑菇状模式. 其中, 振荡和袋状模式中液滴仅有凹陷、反弹等简单变形行为; 而帽状、蘑菇状模式中液滴内部出现汇聚环状射流、环状射流翻转等复杂变形行为. 演变模式的具体特征描述已在文献^[8]中详述, 这里不再重复, 可参见后文以获得对这4种演变模式的直观印象. 鉴于环状射流的生成与否不仅为表象上区分4种典型演变模式提供直观依据, 同时也是揭示液滴演变过程内在机理的关键一环, 先以射流特征较明显的帽状模式, 即以Case 3为例展开讨论.

3.1 液滴演变与涡发展的典型特征

将Case 3中典型时刻液滴实验图像与CFD结果进行比对, 如图3所示. 可以看出, CFD结果与实验图像吻合良好, 其中二者之间细节的些许差异主要由计算条件与实际存在一定的误差(如界面张力系数、冲击条件等测量误差)所引起. 总体来说, 数值模拟的可靠性得到了较好的佐证. 在此基础上, 借助CFD结果丰富的信息可展开进一步深入分析. 将Case 3中液滴演变过程分为冲击作用诱导涡生成、背风面向迎风面发展以及环状射流发展3个阶段进行讨论.

3.1.1 冲击作用诱导涡生成阶段

箱体落地冲击过程中, 箱内液体受到远高于重力的瞬时体积力作用, 从而产生铅垂方向冲击型压力梯度. 这种压力梯度与球形液滴界面相互作用, 在密度存在差异的两相界面产生斜压效应^[15]. 斜压效应在液滴界面临近区域产生涡量, 如图4所示, 从涡量的表达式 $\omega = \Delta p \times \Delta \rho$ 可知, 由于液滴赤道位置密度梯度与压

表1 4种液滴演变典型工况所对应的实验和计算条件
Table 1 Typical experimental and computational conditions for four modes of drop evolution

Cases	d_0 (mm)	ρ_d (g cm ⁻³)	μ_d (mPa s)	ρ_a (g cm ⁻³)	μ_a (mPa s)	σ (mN m ⁻¹)	We	Oh	h (m)	$a_z^{(a)}$ (m s ⁻²)	Modes
Case 1	7.2	1147.0	1.993	1016.0	2.826	25.01	10.59	0.0044	0.3	370.31	Oscillatory
Case 2	6.0	1207.0	1.308	1032.0	4.416	18.25	64.74	0.0038	1.0	642.45	Bag
Case 3	6.0	1207.0	1.308	1032.0	4.416	16.50	105.76	0.0038	1.5	761.72	Cap
Case 4	4.7	1617.0	0.628	1032.0	4.416	14.69	536.01	0.0019	1.3	654.82	Mushroom

a) 冲击时间 t_0 内的体积力大小

图3 (网络版彩图) Case 3典型时刻液滴实验图像(a)与CFD结果(b)
Figure 3 (Color online) Typical time of experimental images (a) and CFD results (b) of drop evolution process in Case 3.

图4 (网络版彩图)冲击作用诱导涡生成示意图。(a)斜压效应诱导涡生成;(b)冲击结束瞬时(6 ms)液滴流场信息;(c)6 ms时涡量大小随方位角分布

Figure 4 (Color online) Schematic diagrams of vortex induced by impact loading. (a) Vortex induced by baroclinic effect; (b) flow field information at 6 ms; (c) vorticity distribution with angle at 6 ms.

力梯度相互垂直, 故此处涡量最大. 在此涡诱导下, 液滴背风面(图4(a))逐步坍塌变平, 进而向液滴迎风面持续发展.

图4(b)为冲击作用结束时刻(6 ms), CFD模拟得到的流线(左)和涡量云图(右). 可以看出, 此时流场分布以一个主涡为主要特征, 涡心位于液滴赤道附近, 涡量分布主要集中于液滴界面临近区域. 进一步提取涡量随方位角分布曲线(图4(c))可知, 赤道位置(90°)附近涡量较大, 这与斜压效应产生的涡量分布较为相符. 为揭示冲击作用阶段产生的涡对液滴演变模式的影响, 提取4种演变典型工况体积平均涡量随时间的演化曲线, 如图5所示. 从图5中可以得知, 随着平均涡量的增加, 即涡强度的逐渐增大, 液滴演变渐趋剧烈; 冲击作用阶段($t \leq 6$ ms)体积平均涡量呈明显增长趋势, 冲击结束之后($t > 6$ ms)涡量变化则明显趋缓.

3.1.2 背风面向迎风面发展阶段

提取Case 3中液滴迎风面和背风面驻点的速度 v_f , v_b 以及两点之间的距离 Δz 随时间的变化, 如图6所示. 从图6中可以得知, 液滴变形的前期阶段(6–34 ms), 背风面驻点速度 v_b 始终大于迎风面驻点速度 v_f , 致使两驻点间的距离 Δz 不断减小. 在这个过程中, 液滴背风面由初始球形的上凸逐渐变平(图3 (10 ms)), 然后向液滴内部凹陷发展(图3 (16, 25 ms)), 直至 Δz 接近于零(图3 (34 ms)), 即形成液膜时, 背风面向迎风面发展阶段基本结束. 其间几个典型时刻的流场信息如图7(a)–(c)所示. 从图中可以看出, 涡心始终保持在初始液滴赤道

图5 (网络版彩图)4种典型工况体积平均涡量随时间演化曲线

Figure 5 (Color online) Curves of volumetric averaged vorticity with time evolution under four typical conditions.

图6 (网络版彩图)液滴迎风面驻点和背风面驻点速度以及两驻点的间距随时间的演化曲线

Figure 6 (Color online) Curves of velocities of the windward or leeward stagnation point and distance between the two stagnation points.

附近, 流线较为密集的位置出现负压区. 值得注意的是, 由于涡心始终保持在初始液滴赤道附近, 涡卷起演变使得液滴内流体持续向该位置附近聚集, 并在旋涡驱动和界面自维持的共同作用下形成下向射流.

为进一步揭示液滴内部环状射流的生成机理, 采用网格示踪方法将液滴划分为多个示踪区域(图8(a)), 进而实现对液滴内部不同区域流体质点的全程示踪. 这些区域在液滴变形过程中不同的时刻分布如图8(b)–(e)所示. 从图中可以看出, 10 ms时液滴背风面受压缩作用, 而迎风面受拉伸作用, 越靠近外边缘的液滴受剪切作用越强, 这与涡量主要分布于液滴界面临近区域

图7 (网络版彩图) Case 3 16 ms (a), 25 ms (b), 34 ms (c), 50 ms (d)液滴周围流场信息(左侧为流线, 右侧为压力云图)

Figure 7 (Color online) Flow field information of the drop (streamline (left); contour of pressure (right)) at 16 ms (a), 25 ms (b), 34 ms (c) and 50 ms (d) in Case 3.

图8 (网络版彩图)背风面向迎风面发展阶段0 ms (a), 10 ms (b), 16 ms (c), 25 ms (d), 34 ms (e)液滴内部体积分布

Figure 8 (Color online) Drop's internal volume distribution in the stage of development of windward and leeward side at 0 ms (a), 10 ms (b), 16 ms (c), 25 ms (d) and 34 ms (e).

相符(图4(b)). 随着背风面持续向迎风面发展, 液滴内部体积分布明显朝涡心方向聚集(图7)在初始液滴的赤道附近. 具体表现在: 涡卷起演变首先使得外层的液滴部分(红黄蓝三色区域)逐渐在涡心附近聚集(16 ms). 后续内层的液滴部分(黑绿二色区域)持续往该处聚集, 并伴随有生成环状射流的趋势(25 ms). 由于涡卷起演变的持续发展, 内层的液滴部分(粉红色区域)亦逐渐向外层跟随(25 ms), 液滴内大量流体的聚集并在旋涡的持续驱动下形成环状射流(34 ms). 这一直观的数值显示结果表明, 环状射流的形成是液滴内流体向赤道附近持续聚集所引起的, 而涡卷起则是液滴往赤道附近聚集并形成射流的主导因素.

3.1.3 环状射流发展阶段

此阶段液滴周围流场信息与上一阶段基本类似(图7(d)). 由前文讨论可知, 射流的形成过程中涡的卷起作用扮演着重要角色, 而由液滴界面构成的射流在后续发展中却又独立于旋涡而具有自维持的能力. 由此可见, 在液滴变形演变过程中, 旋涡的驱动与界面张力的自维持之间存在着微妙的竞争机制. 从图3所示的液滴变形演变过程可以看出, 在Case 3的条件下, 下向环状射流形成后, 基本以不变的倾角向对称轴逐渐靠近. 数值结果表明, 该角度大致维持在 75° (图9). 也就是说, 随着时间的发展, 该射流头部将会汇聚到一起. 实验上观察到的这种汇聚后的形状因其形似一倒置帽子而称之为帽状变形^[1,5]. 略感遗憾的是, 实验中此时射流下方的液膜已经破碎, 而数值模拟结果却难以刻画液膜破碎过程. 鉴于液膜是否破碎对后续进一步演变影响十分显著, 因此本文讨论仅局限于液膜破碎之前的变形过程.

3.2 不同演变模式的比较

3.2.1 袋状模式

随着冲击强度(涡强度)的减弱, Case 2中液滴的演变模式转化为袋状模式, 典型时刻实验图像与CFD结果如图10所示. 从图10中可以看出, 袋状模式与上一节中的帽状模式前期发展类似, 但后期帽状模式中出现的环状射流在袋状模式中并没有出现.

为考察二者产生差异的原因, 从流场演变的角度出发, 提取Case 2中56和57 ms液滴周围整体和局部流线分布, 如图11所示. 从图11中可以看出, 56 ms时液滴原赤道附近的流线分布仍然保持一个主涡A, 但在57 ms时主涡A涡心的上部生成了一个二次涡B, 形

图9 (网络版彩图)环状射流角 θ . (a) θ 示意图; (b) θ 随时间演化

Figure 9 (Color online) Annular jet angle θ . (a) Schematic of θ ; (b) distribution of θ with time.

图 10 (网络版彩图) Case 2 典型时刻液滴实验图像(a)与CFD结果(b)

Figure 10 (Color online) Typical time of experimental images (a) and CFD results (b) of drop evolution process in Case 2.

图 11 (网络版彩图) Case 2 56 ms (a), 57 ms (b)液滴周围整体及局部流线分布

Figure 11 (Color online) Global and local streamline distribution around the drop at 56 ms (a) and 57 ms (b) in Case 2.

成两个涡分布在液滴外缘界面附近(图11右部局部放大图). 与Case 3比较可以发现, 对涡强度略低的Case 2来说, 液滴中大量流体向涡心聚集的现象仍然得以实现, 但此时旋涡的驱动作用却已不足以驱动射流的产生. 与之相反, 变形和聚集后的液滴界面已逐渐显露出对涡的约束, 这从图11中涡B的形成以及后续过程中涡B的逐渐增强与涡A的逐渐减弱(图12)可以得到很直观的体现.

3.2.2 振荡模式

随着涡强度的进一步减弱, Case 1中的液滴演变模式转化为振荡模式, 典型时刻液滴的实验图像和对应的CFD结果如图13所示, 其中实验图像与CFD结果在演变时刻上存在些许差异. 从图13中可以看出, 振

荡模式的前期发展过程, 尤其是背风面向迎风面的快速接近过程与袋状和帽状模式仍然类似, 但与前两者明显不同的是, 变形后期液滴的背风面并没有与迎风面接触形成液膜, 而是出现回弹和振荡, 并随着振荡的衰减而逐渐回复成近似球形. 为考察振荡模式中液滴变形过程所伴随的流场演变情况, 提取典型时刻的流线分布, 如图14所示. 从图14中可以得知, 液滴变形回复过程中, 涡心逐渐远离液滴界面, 表明此阶段涡结构难以对液滴界面发展构成影响, 界面约束主导了液滴的变形回复.

为了进一步揭示涡驱动与界面约束之间的竞争机制, 数值模拟特意将界面张力设置为0并保持其他条件相同, 来考察有无界面张力的影响. 两种条件下, Case 1中液滴演变过程的CFD结果和体积平均涡量随时间演化曲线, 如图13和15所示. 从图中可以得知, 两种条件下Case 1中体积平均涡量差异不大, 说明有无界面张力对涡强度影响并不明显, 仅在演变后期界面约束对涡量产生些许影响. 但液滴演变过程却存在明显差异: 有界面张力情况下, 液滴受界面约束作用出现变形回复现象, 而无界面张力条件下液滴界面在涡卷起演变的持续作用下生成环状射流并持续翻转. 可见, 界面张力是界面约束抑制液滴进一步变形的重要因素, 液滴演变过程中涡强度与界面张力之间存在明显的竞争关系.

3.2.3 蘑菇状模式

随着涡强度的逐渐增大, Case 4中的液滴演变模式转化为蘑菇状模式, 典型时刻液滴的实验图像和对应的CFD结果如图16所示. 值得注意的是, 蘑菇状模式与无界面张力条件下振荡模式的演变过程非常相似, 两个演变过程中都有环状射流生成并出现射流持

图 12 (网络版彩图) Case 2 57 ms (a), 67 ms (b), 77 ms (c)液滴周围局部涡量云图及流线分布

Figure 12 (Color online) Local vorticity contour and streamline distribution around the drop at 57 ms (a), 67 ms (b), and 77 ms (c) in Case 2.

图 13 (网络版彩图) Case 1典型时刻液滴实验图像(a), 有界面张力CFD结果(b)与无界面张力CFD结果(c)

Figure 13 (Color online) Typical time of experimental images (a) and CFD results with (b) or without (c) interfacial tension of drop evolution process in Case 1.

图 14 (网络版彩图) Case 1变形回复阶段75 ms (a), 115 ms (b), 155 ms (c)液滴周围整体流线分布

Figure 14 (Color online) Typical time of global streamline distribution around the drop in the stage of deformation recovery at 75 ms (a), 115 ms (b) and 155 ms (c) in Case 1.

续翻转现象。

为了弄清蘑菇状模式中环状射流持续翻转的原

因, 提取Case 4中典型时刻液滴周围整体流线分布,

如图17所示。从图17中可以看出, Case 4中涡的演变在

图 15 (网络版彩图)有无界面张力条件下Case 1体积平均涡量随时间演化曲线

Figure 15 (Color online) Curves of volumetric averaged vorticity with time evolution with or without interfacial tension in Case 1.

与界面约束的竞争关系中一直处于主导地位. 与Case 3中射流以基本恒定方向向内汇聚明显不同的是, 此

时射流在其形成乃至后续发展过程中, 一直处于强涡的主导之下, 环状射流跟随涡的演变持续翻卷发展而呈现典型的蘑菇状特征.

4 结论

本文采用实验和CFD相结合的方法重点对冲击作用下, 液膜破碎之前液滴的演变过程进行了较为详细的探讨, 得出以下结论. (1) 冲击作用产生的涡强度较大时, 液滴呈现较为剧烈的演变模式, 液滴内部会出现持续翻转的环状射流; 而涡强度较小时, 液滴演变较为温和, 液滴内部无环状射流生成, 甚至出现变形回复现象. (2) 以帽状模式为例详细阐述了液滴内部环状射流的生成与发展机理. 其中, 环状射流的生成与涡的演变有较强关联; 而环状射流的发展与涡的演变和界面约束都明显相关; 射流的形成与否是区分袋状模式与帽状模式的关键, 而射流向内汇聚还是向

图 16 (网络版彩图) Case 4典型时刻液滴实验图像(a)与CFD结果(b)

Figure 16 (Color online) Typical time of experimental images (a) and CFD results (b) of drop evolution process in Case 4.

图 17 (网络版彩图) Case 4 15 ms (a), 18 ms (b), 24 ms (c)液滴周围整体流线分布

Figure 17 (Color online) Typical time of global streamline distribution around the drop at 15 ms (a), 18 ms (b) and 24 ms (c) in Case 4.

外卷起则是区分帽状模式与蘑菇状模式的关键. (3) 有无界面张力对冲击产生的涡强度影响并不明显, 但对液滴变形的影响则十分显著, 界面张力是界面约束抑制液滴变形的重要因素, 液滴变形不同模式的出现

同涡强度与界面张力之间的竞争机制密切相关. 需要指出的是, 这一结论主要限于变形液滴破碎之前的情况. 因为一旦出现破碎, 界面张力则会起着促进失稳的作用.

参考文献

- 1 Patel P D, Theofanous T G. Hydrodynamic fragmentation of drops. *J Fluid Mech*, 1981, 103: 207–223
- 2 Yang J W, Yang H S. Liquid-liquid mixing for the breakup of accelerating drops. *Korean J Chem Eng*, 1990, 7: 22–30
- 3 GuILDENBECHER D R, LÓPEZ-RIVERA C, SOJKA P E. Secondary atomization. *Exp Fluids*, 2009, 46: 371–402
- 4 Xiong R H, Xu M, Li Y F, et al. The deformation and breakup of a drop-in-liquid under an impact loading (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2010, 40: 773–780 [熊燃华, 许明, 李耀发, 等. 液-液两相介质中液滴在冲击作用下的演变过程. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40: 773–780]
- 5 Theofanous T G, Li G J, Dinh T N. Aerobreakup in rarefied supersonic gas flows. *J Fluids Eng*, 2004, 126: 516–527
- 6 Theofanous T G, Li G J, Dinh T N, et al. Aerobreakup in disturbed subsonic and supersonic flow fields. *J Fluid Mech*, 2007, 593: 131–170
- 7 Theofanous T G, Li G J. On the physics of aerobreakup. *Phys Fluids*, 2008, 20: 052103
- 8 Liao B, Zhang G F, Wang L H, et al. Deformation and breakup behaviors of a drop in ambient fluid under impact (in Chinese). *J Exper Fluid Mech*, 2016, 30: 9–16 [廖斌, 张桂夫, 王鲁海, 等. 冲击作用下液滴在环境液体中的变形破碎行为. 实验流体力学, 2016, 30: 9–16]
- 9 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. *Int J Multiphase Flow*, 1987, 13: 741–757
- 10 Gurtin M E, Jabbour M E. Interface evolution in three dimensions with curvature-dependent energy and surface diffusion: Interface-controlled evolution, phase transitions, epitaxial growth of elastic films. *Archive Rational Mech Anal*, 2002, 163: 171–208
- 11 Prosperetti A, Tryggvason G. Computational Methods for Multiphase Flow. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 12 Andreas J M, Hauser E A, Tucker W B. Boundary tension by pendant drops. *J Phys Chem*, 1938, 42: 1001–1019
- 13 Han J, Tryggvason G. Secondary breakup of axisymmetric liquid drops. I. Acceleration by a constant body force. *Phys Fluids*, 1999, 11: 3650–3667
- 14 Han J, Tryggvason G. Secondary breakup of axisymmetric liquid drops. II. Impulsive acceleration. *Phys Fluids*, 2001, 13: 1554–1565
- 15 Zhang G F, Zhu Y J, Li Y C, et al. Bubble and jet induced by underwater wire explosion in a narrow tube (in Chinese). *Expl Shock Wave*, 2015, 35: 609–616 [张桂夫, 朱雨建, 李元超, 等. 狭长直管约束条件水下电爆炸所产生的气泡运动和界面射流. 爆炸与冲击, 2015, 35: 609–616]

Research on key factors for the drop evolution process in ambient liquid under an impact

LIAO Bin^{1,2}, ZHU YuJian^{1*} & YANG JiMing¹

¹ *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;*

² *College of Civil Engineering and Architecture, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China*

A mixed flow of two immiscible liquids may form drops of one liquid in another. Deformation and breakup of a drop will occur when there is sufficiently severe interaction between the drop and the ambient liquid. In this paper, the drop evolution process in ambient liquid under an impact was studied based on an experimental method combined with computational fluid dynamics (CFD). In the experiment conducted on a free-falling drop-tower facility, four typical drop deformation modes, namely oscillatory mode, bag mode, cap mode, and mushroom mode, sorting in order of deformation severity, were captured with high speed photography. In the numerical simulation, the Front-Tracking method was adopted to predict the drop evolution process, and a satisfactory agreement was obtained between the experimental and numerical results. After the verification a further numerical analysis was carried out for the mechanism of the four types of drop deformation modes before the breakup of liquid film, for which the key factors that dominate the drop evolution process were also discussed. It is found that the drop evolution is strongly affected by vortex strength, namely the greater the vortex strength is, the more severe the evolution mode will be, during which an annular jet will be generated and continues to turn over; on the contrary, there is no annular jet formation or even drop deformation recovery phenomenon occurs. After a further research on the generation and development of the annular jet inside the drop, we find that there is a competition mechanism between vortex evolution and interfacial constrain, in which deformation of the interface is promoted by vortex evolution, while interface constrain plays an inhibitory role. Finally, the competitive mechanism has been further revealed by the numerical results of drops deformation under the conditions with/without interfacial tension.

drop deformation, annular jet, vortex, interface constrain

PACS: 47.11.-j, 47.32.C-, 47.55.D-, 47.55.dk

doi: [10.1360/SSPMA2017-00021](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00021)