

高速氩气流中水滴和电子氟化液滴变形破碎的实验研究

熊红平¹,刘金宏²,施红辉¹,章利特¹

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018;2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室,四川绵阳 621900)

摘 要:在竖直激波管中实验研究了液滴在高速气流中的变形破碎现象。使用高速相机直接拍摄法以及阴影法获得了两种不同的液滴在不同气相中变形破碎的形态特征图像,定量分析了液滴位移及横向变形随时间的变化关系。结果表明:液滴的表面张力越小,液滴越容易变形破碎,且变形破碎速率越快;气液密度比越大,液滴在气相中越不稳定,液滴开始变形和破碎的时间越早,且变形破碎程度更高;液滴的横向变形最大值随着激波马赫数的增大而增大。

关键词:激波;电子氟化液;液滴;变形;破碎;氩气

中图分类号: O359

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2017) 03-0409-08

0 引言

高速气流诱导的液滴变形破碎问题是一个典型的多相流体力学问题,该问题的研究在超音速雨滴侵蚀、多相混合物的燃烧和爆炸、液体雾化等方面均有着重要的应用价值。

1951年,Lane^[1]通过实验研究提出,液滴的破碎是一个边界层不断脱落的过程。Engel^[2]则认为,在高速气流中液滴表面上生成的不稳定波纹对液滴的破碎起着重要的作用。Ranger等^[3]提出,气流中的液滴破碎是液滴与激波过后形成的对流流场的相互作用的结果。Wierzbna等^[4]在液滴变形破碎的实验研究基础上,使用脉冲激光全息干涉技术确认了剥离类型的四个阶段:液滴表面的破裂、压缩变形、剥离破碎和二次剥离。Hisang等^[5-6]对不同类型的液滴进行了大量的实验研究,得到了不同初始状态下液滴的变形破碎模式,分析了韦伯数(We数)和奥内佐格数(Oh

数)对液滴变形破碎特性的影响。耿继辉等^[7]通过产生不同形状的液滴,发现初始液滴形状对激波与液滴的相互作用及液滴加速、变形和破碎过程有重要影响。肖毅等^[8]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,使用高速摄影仪详细记录了液滴的变化过程,探讨了液滴位移及横向直径随时间的变化关系。易翔宇等^[9]使用直接高速摄影方法,实验研究了在激波诱导高速流场中毫米尺寸的液滴的变形与破碎,指出液滴的发展过程可分为初期变形、剪切剥离以及破碎雾化三个典型阶段。金仁瀚等^[10]通过研究液滴初始直径对液滴变形破碎特性的影响,指出液滴初始直径的增加使得液滴破碎模式由单一的破碎模式转变为多种模式组合的混合型破碎模式。王超等^[11]对液滴在激波冲击下的破裂过程进行了实验研究和数值模拟,结果表明不同液滴直径、不同液滴介质等参数下的液滴变形破碎发展趋势一致,但其发展速度不同。

收稿日期:2016-10-13 网络出版日期:2017-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(11302201);国防科技重点实验室基金项目(9140C670801150C67292)

作者简介:熊红平(1990-),男,湖南郴州人,硕士研究生,主要从事流体机械及界面不稳定性研究。

通信作者:施红辉,E-mail:hhshi@zstu.edu.cn

液滴在高速气流中的变形破碎是一个非常复杂的过程,气场对液滴的加速或减速导致的 R-T 不稳定性等问题都对该研究带来了不小的挑战。虽然以往的研究得出了有价值的结论,但对于液滴破碎的机制仍没有统一的认识,因此还需要进行更深入的实验和数值研究。本文在竖直激波管中进行了激波冲击下液滴的变形破碎实验,使用高速相机直接拍摄法及阴影法记录了液滴的失稳变形破碎过程,观测到了液滴破碎分散的分布情况,定量分析了液滴的运动及横向变形与时间的关系。

1 实验装置及方法

本文实验在竖直激波管(如图1所示)中进行,激波管由驱动段、被驱动段和实验段组成,驱动段与被驱动段间用塑料膜片隔开,实验选取的高压驱动气体为氦气,被驱动气体为空气和氩气,实验时通过改变驱动段高压气体压力,采用电热破膜方式破膜产生马赫数 1.28~1.30 的入射激波。实验段总长为 450 mm,内横截面尺寸为 100 mm×100 mm,实验段左右两侧开有光学玻璃窗口,高速相机放置在实验段右侧,用于拍摄记录液滴与激波相互作用过程及液滴变形破碎混合过程的形态特征,其拍摄幅频分别为 1/5000 fbs 和 1/7500 fbs,即相邻实验图片的时间间隔为 0.20 ms 和 0.13 ms。实验段左侧放置的冷光源形成背景光,使实验图像更为清晰并且更加符合液滴在变化过程中的真实情况。液滴产生装置由阀门、储液柱及细软管组成,储液柱通过螺纹连接固定在实验段上,其中心位置开有直径 1 mm 的小孔,用于生成具有一定直径的液滴。实验前通过使用注射器将液体注射到储液柱内;实验时,开启阀门产生液滴,因为储液柱内外的压差作用,从储液柱下方小孔处生成相对稳定的液滴,然后液滴在自身重力作用下滴落至实验观测流场区域。激波由激光与液滴的碰撞、接触产生,即当激光器发出的激光通过光学玻璃窗口进入实验流场区域时,与下落的液滴接触,此时触发破膜信号,膜片通过电热破膜方式瞬时破膜后,产生从上往下传播的平面激波,同时该触发信号可用来触发高速相机进行拍摄纪录。

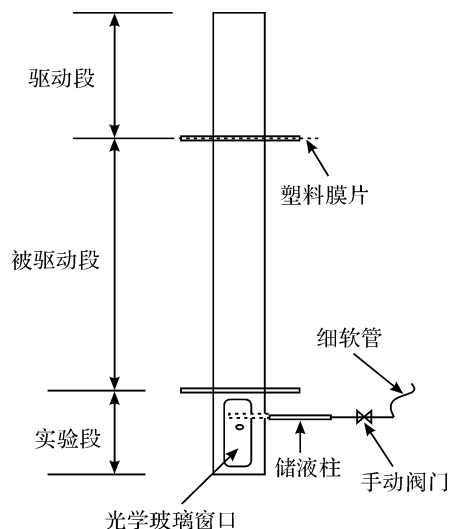


图1 竖直激波管实验装置示意图

图2为实验参数的测量原理示意图,由于实验受到各方面因素的影响,实际值与测量值之间存在一定的误差,经计算分析,其误差约为 3.2%。图2(a)为初始零时刻,初始时刻为激波未与液滴相互作用时的时刻,液滴的初始直径为 d_0 ,液滴的迎风面到图像左边线的距离为液滴的初始位移 S_0 。激波与液滴相互作用后,液滴加速运动,并开始发生变形和破碎,如图2(b)所示,此时液滴的位移、横向变形尺寸以及轴向变形尺寸分别记为 S 、 d 、 d_a 。因为液滴破碎之后的尺寸分布较为复杂,为了减少测量误差,针对每组数据分别测量三次,然后取三次数据的均值作为最后的实验数据。

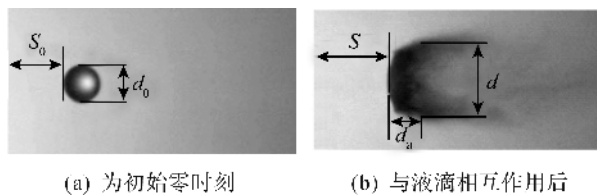


图2 实验参数的测量原理

实验参数及工况如表1所示,其中 We 数表示惯性力与表面张力之比, Oh 数表示黏性力与表面张力之比,其相应的计算公式为:

$$We = \rho_g d_0 u_g^2 / \sigma \quad (1)$$

$$Oh = \mu_l / (\rho_l d_0 \sigma)^{1/2} \quad (2)$$

式(1)、式(2)中: ρ_g 为波后气体密度, ρ_l 为液体密度, u_g 为波后气流速度, σ 为液体的表面张力, μ_l 为液体的动力黏度, d_0 是初始液滴直径。

表 1 实验参数及工况

实验编号	液滴直径 d_0/mm	气流速度 $u_g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	马赫数 M_a	液体密度 $\rho_l/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	表面张力 $\sigma/(10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	动力黏度 $\mu_l/(10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	We	Oh
1	2.48	143.81	1.28	1870	16.0	4.4140	5609.81	0.01620
2	2.31	127.96	1.30	1870	16.0	4.4140	5627.46	0.01668
3	3.46	143.81	1.28	997	70.6	0.8949	1738.05	0.00183
4	7.18	127.96	1.30	997	70.6	0.8949	3836.96	0.00127
5	3.12	143.81	1.28	997	70.6	0.8949	1656.26	0.00187
6	3.39	127.96	1.30	997	70.6	0.8949	1891.31	0.00181

注:1、2 号中的液体为电子氟化液;3、4、5、6 号中的液体为蒸馏水;当马赫数为 1.30 时,波后气体的密度分别为:空气 $\rho_g = 1.75 \text{ kg/m}^3$, 氩气 $\rho_g = 2.35 \text{ kg/m}^3$;实验室温为 298 K。

2 实验结果与分析

为了方便观察液滴的变形破碎过程,在图片处理过程中,将原来竖直的液滴实验图片改为水平方向,得到如图 3—图 5 的实验图片序列,图 6 未作处理。

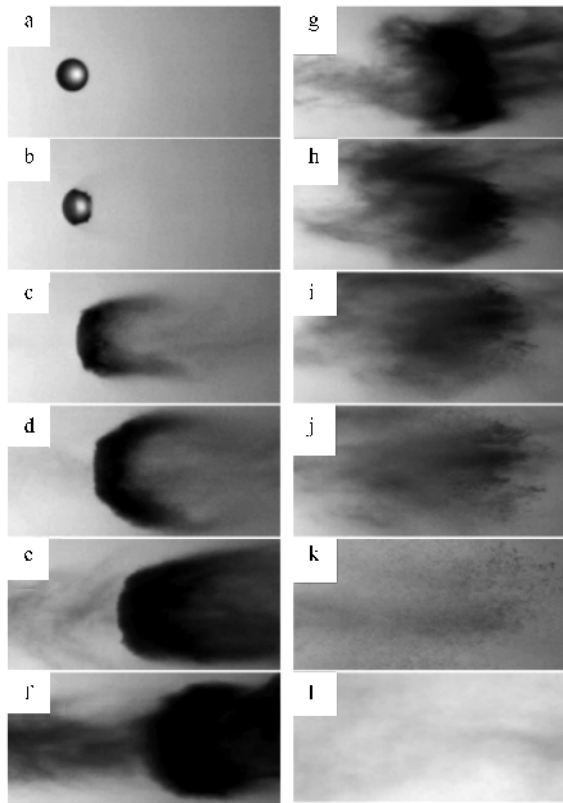


图 3 电子氟化液液滴在空气中变形破碎过程的实验图片序列

图 3 为采用高速相机直接拍摄方法得到的电子氟化液液滴在空气中变形破碎过程的实验图片序列,该实验的马赫数为 1.28,液滴直径为 2.48 mm,相邻图片的时间间隔为 0.20 ms。图 3(a)为初始零时刻,液滴能较好的保持球形形状,此时激波尚未与

液滴相互作用。在图 3(b)中,激波与液滴的相互作用已经完成,由于激波过后引起的压差作用,液滴开始压缩变形,此时液滴的迎风面保持半球状,而背风面变得扁平,并在液滴赤道位置边缘处有细小液滴开始剥离脱落,这意味着液滴表面边界层剥离的开始。在波后气流作用下,液滴的背风面开始剥离破碎,随着时间的推移,背风面的剥离破碎更加剧烈,在背风面一侧形成一道不均匀的尾迹,并且从图 3(c)—(d)中可以看出液滴的变形破碎是下对称的。紧接着,随着液滴大部分区域的剥离破碎,液滴的横向扩张达到最大,原始的球形液滴完全演化成云团状,如图 3(e)—(f)所示。最后在反射激波以及波后气流作用下,液滴继续破碎剥离形成颗粒状液滴,最终液滴因为雾化作用,雾化消失,如图 3(g)—(l)所示。

图 4 为电子氟化液在氩气中变形破碎过程的实验图片序列,该实验中的马赫数为 1.30,液滴直径为 2.31 mm,相邻图片的时间间隔为 0.20 ms。图 4(a)为初始时刻,从图中可以看到,液滴初始形状为椭球状,这与液滴在重力作用下会有一些的变形有关,同时因为变形的缘故,液滴在后续的变形过程是不对称的,表现为上窄下宽,如图 4(c)所示。从图 4 中可以看出,液滴在氩气中的变形破碎过程与在空气中的类似,前期首先经历压缩变形阶段,如图 4(b)—(c)所示。紧接着在液滴表面附近因为激波过后产生的对流剪切作用,表面开始剥离出小液滴并迅速破碎形成云雾,同时由于气动压力的影响导致液滴完全变形,如图 4(d)—(f)所示。最后在反射激波及高速气流作用后期阶段,液滴持续破碎剥离,变成液滴块,伴随着微小液滴不断从液滴块的剥离破碎,由于雾化和蒸发作用,液滴完全破碎雾化,如图 4(g)—(l)所示。

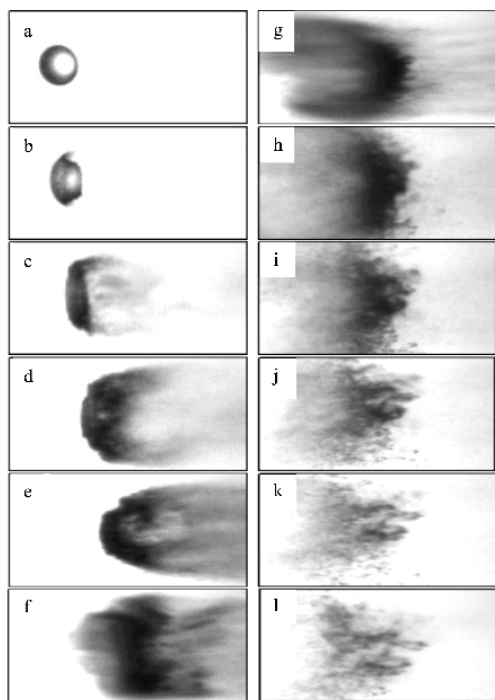


图4 电子氟化液液滴在氩气中变形破碎过程的实验图片序列

图5为液相为蒸馏水,气相为空气,采用直接拍摄方法得到的实验图片序列,该实验中的马赫数为1.28,液滴直径为3.46 mm,相邻图片的时间间隔为0.13 ms。初始零时刻,相比于电子氟化液,直径越大的水液滴在重力作用下的变形更为剧烈。从图5中可以看到,水液滴相比于电子氟化液液滴要经历更长的变形过程,其变形速度更慢。激波经过液滴之后,液滴表面出现了类似波纹状现象,液滴表面不断破碎形成系带状结构,从系带表面剥离脱落形成颗粒状液滴,但并未在液滴尾部形成明显的尾迹;随着时间的发展,在迎风面中心位置处出现一个凸起扁平的“尖钉”结构,如图5(e) — (j)所示,这是RM不稳定性的结果。因为当液滴的初始直径增大时,液滴的质量以及体积随之增大,其变形破碎速度要慢于较小的液滴,所以在图3和图4中并未发现该“尖钉”结构,液滴在还没来得及出现RM不稳定的结构就破碎了。

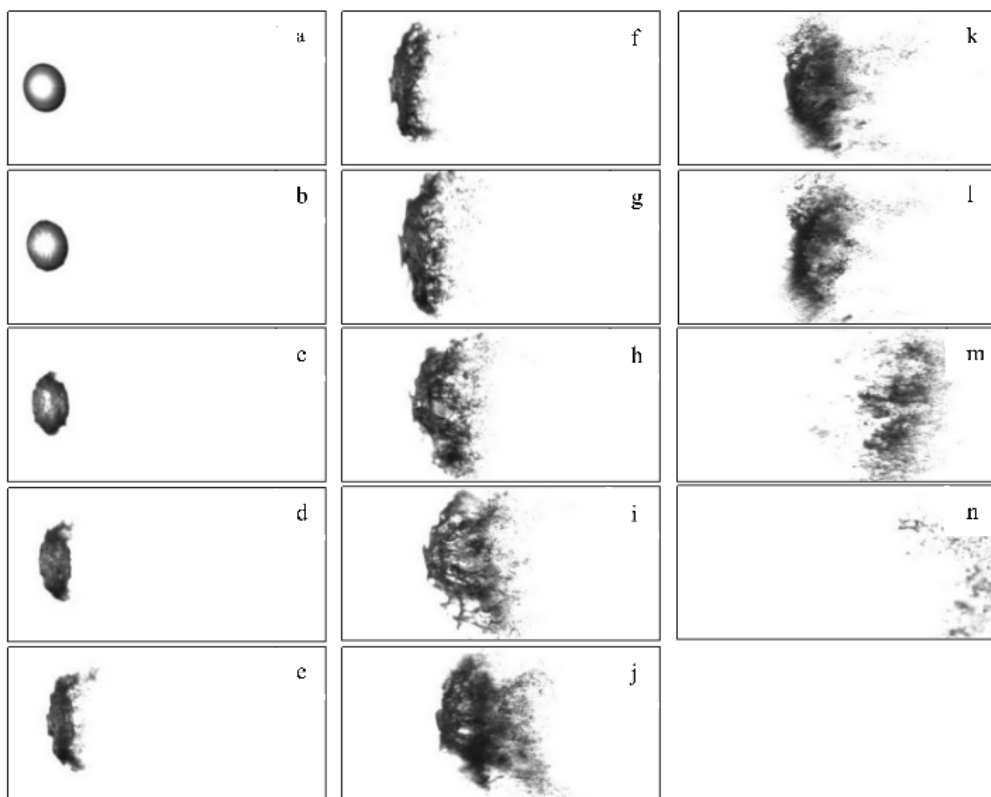


图5 水滴在空气中变形破碎过程的实验图片序列

图6为液相为蒸馏水,气相为氩气,采用阴影方法得到的实验图片序列,该实验中的马赫数为1.30,液滴直径为3.48 mm,相邻图片的时间间隔为0.13 ms,图中下半区域的黑色物质为相机镜头及透镜镜

片上的杂质。图6(a)为初始时刻,液滴在自身重力作用下向下运动,液滴尚未与激波接触,保持较好的球形形状。从图6(b) — (e)中可以清楚地看到平面激波,并且可以看到激波相交现象,即图6(c)中交

叉的细线。液滴在与激波相互作用后,液滴开始变形,背风面变得扁平,并开始有细小液滴剥离,迎风面能保持半球状,液滴在横向方向扩张,轴向方向压缩,在图 6(e)中,液滴的形状类似于月牙状。从图 6(f)~(h),液滴连续变形并且背风面液滴剥离更

加剧烈,并在横向方向继续扩张。在图 6(i)下方可以看到反射激波,即图中的粗黑线,其横向尺寸达到最大。从图 6(j)~(o)开始,在反射激波及高速气流作用后期,液滴急剧破碎雾化,之后完全雾化消失。

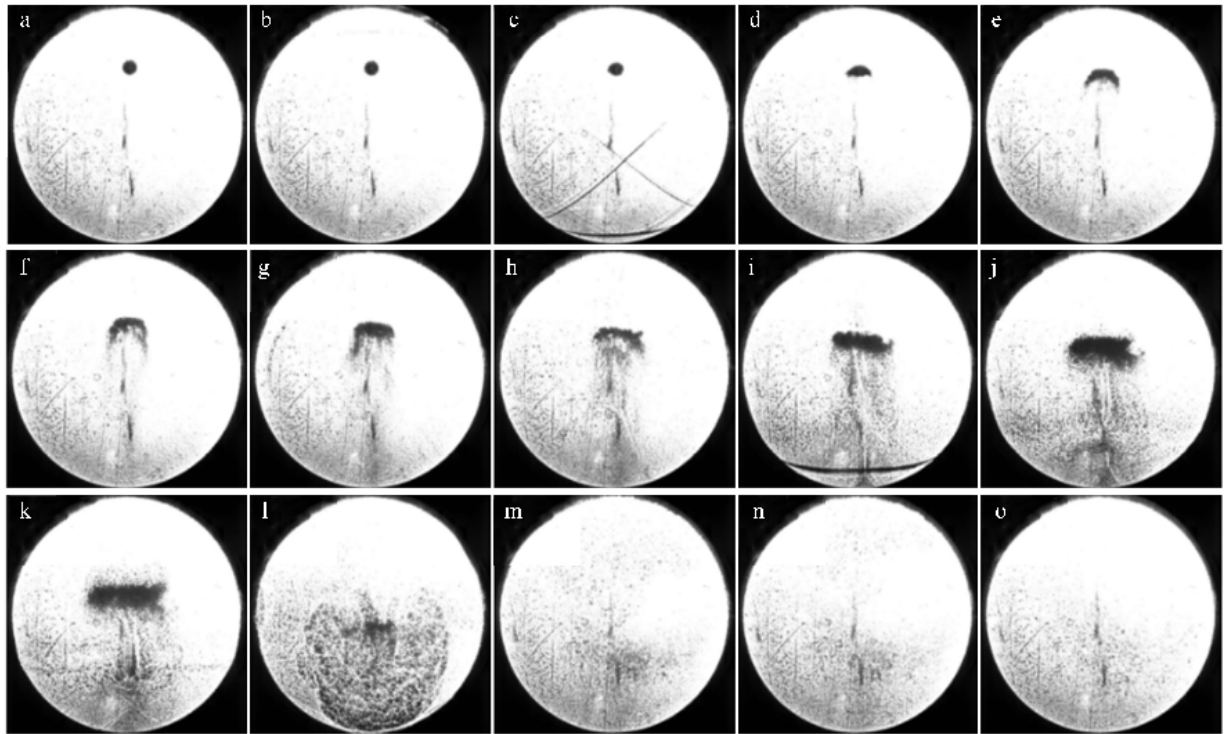


图6 水滴在氩气中变形破碎的实验图片序列

两种不同的液滴在不同气相中变形破碎程度的对比如图 7 所示,图 7(a)~(b)为同一时刻电子氟化液在不同气相中的变形破碎情况,从图中可以看出,液滴在氩气中的变形破碎要快于空气中的,且变形破碎程度更高;图 7(c)~(d)为水液滴在不同气相中的变形情况,达到相似的变形程度,在空气中所用的时间要大于在氩气中的时间。从两组实验对比中发现,在马赫数和液滴初始直径可比较的情况下,液滴在氩气中的变形破碎要快于空气中的变形破碎速度,且变形破碎程度更高。激波过后气相密度均有一定的提高,通过计算两者波后的气液密度比,电子氟化液在氩气中的气液密度比为 1.26×10^{-3} ,在空气中的气液密度比为 9.36×10^{-4} ,在氩气中的气液密度比要大于在空气中的,气体介质的密度越大,液滴所受的气动力也越强,它促进了液滴的变形和破碎。因此气液密度比越大,液滴越容易变形破碎,气液密度比在液滴变形破碎过程中加强了液滴的变形破碎,为不稳定性因素。

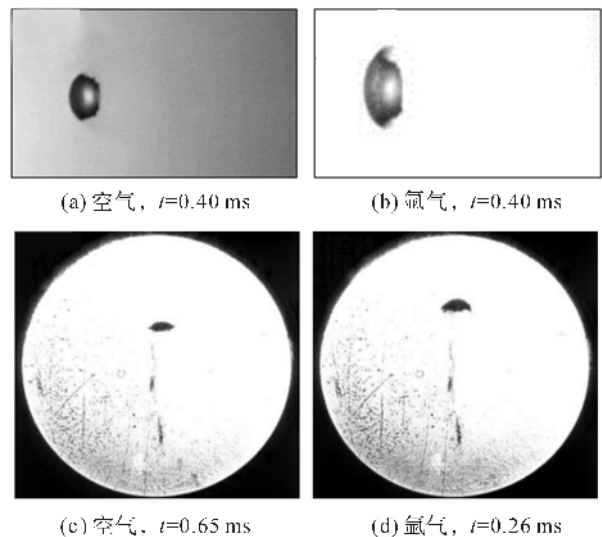
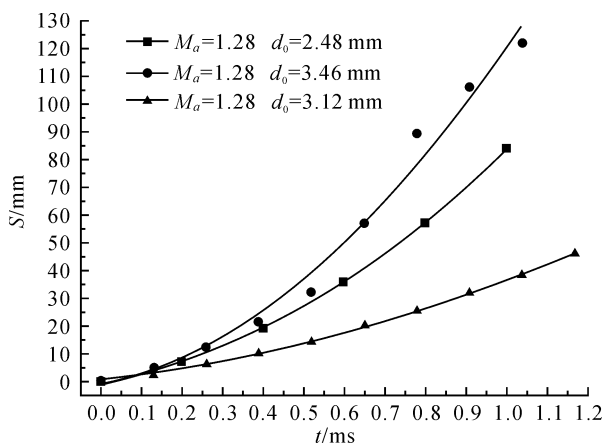


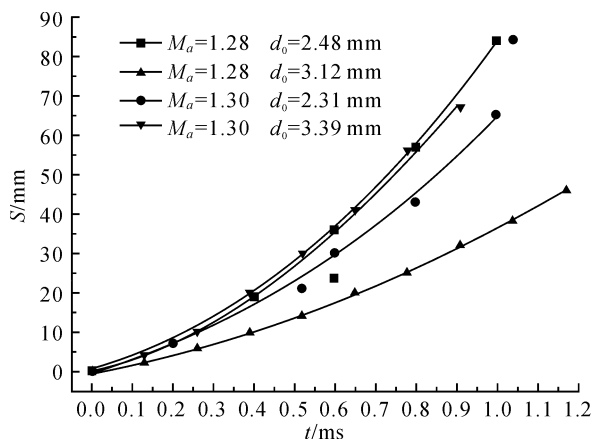
图7 不同的液滴在不同气相中的实验对比图

图 8 为液滴位移与时间关系曲线图,从图中可以清楚地发现液滴在激波作用之后,沿激波传播方向,即激波管轴线方向发生了运动,产生了位移。液滴运动的位移 S 是液滴最左端的迎风面离实验图

片左边线的距离与初始时刻液滴的初始距离之差,该差值即为图8曲线中的数据点,位移是时间 t 的函数。



(a) 相同马赫数下液滴位移与时间关系曲线



(b) 不同工况下液滴位移与时间关系曲线

图8 液滴位移与时间关系曲线

在图8(a)中,液滴在激波过后将加速运动,其运动趋势是一个加速度先增大后趋于不变的变化过程,同时在激波马赫数相同的情况下,初始液滴的直径越小,液滴运动的越快,达到相同位移的时间也越少。实验数据较好的满足抛物线曲线关系式,且与拟合抛物线之间的一致性较好,但直径为3.46 mm的水液滴却出现了分散,一致性并没有保持。比较三者的位移时间曲线可以发现,直径为3.46 mm的水液滴直径比直径为2.48 mm和直径为3.12 mm的液滴大,但运动却比两者的快,这主要与破碎之后液滴的质量分布有关。初始阶段液滴发生变形而并未破碎,较小的液滴在激波作用下更容易加速;后期阶段,直径为3.46 mm的液滴破碎之后会逐渐与原始液滴分离,质量比较分散,而直径为2.48 mm和

直径为3.12 mm的液滴剥离破碎之后形成的云雾与未剥离破碎的原始液滴相连,质量更为集中,因此运动相对而言更慢。

在图8(b)中,通过比较可以发现激波马赫数越大,液滴运动的越快,这种趋势在水液滴破碎中尤其明显,然而在电子氟化液液滴中却有所不同。在0.40 ms以内,直径为2.48 mm的液滴运动要滞后于直径为2.31 mm的,但从0.40 ms以后,直径为2.48 mm的液滴运动反而更快。这是因为激波经过液滴之后,较大马赫数激波产生的气流对于小液滴的加速更快,因此前期直径为2.31 mm的液滴在氩气中的运动要快于空气;后期,随着液滴质量与气液相对速度的减小,气流对于液滴的作用减弱,但是在空气中的波后气流速度更大,气液相间的相对速度差要大于在氩气中的,而气液相间的相对速度越大,气动力越强,气体对液滴的推动力也越大,促进了液滴运动,因此液滴运动得更快。

图9所示为液滴的横向变形与无量纲时间的关系曲线图。液滴的横向变形可以用液滴变形后的横向尺寸与原始液滴的直径之比确定,即 d/d_0 ,其中液滴的横向直径 d 可根据前文提到的数据处理方法得到,时间 t 经过无量纲化处理,得到其无量纲表达式,即 $T=t(u_g/d_0)(\rho_g/\rho_l)$ 。从图9中曲线发现液滴的横向变形尺寸是一个先增大至最大值后逐渐减小的变化过程,这与之前学者的研究结果一致,但是在文献[4]和[7]中所提出的液滴的横向变形是一个线性变化过程,在当前实验研究中并没有发现相似的规律变化。对于同类型液体的液滴,激波马赫数越大,变形破碎的速度越快,横向变形能达到的最大值也越大,这与文献[4]的实验结果一致,如当马赫数为1.28时,直径为3.12 mm的水液滴的最大值在3.8~4.2之间,当马赫数为1.30时,直径为3.39 mm的水液滴最大值在4.2~4.5之间。同时,在相同激波马赫数下,同类型的液滴的横向变形最大值随初始液滴直径的增加而增大。这里需指出的是:在本文所有的实验中,液滴在达到最大横向变形之后,由于反射激波的作用,其在横向方向仍然会继续扩张,横向直径的增大会达到一个峰值,如图7所示的各条曲线的最高点,之后横向直径会逐渐减小,直至为零。但在当前研究中,本文并不关注激波反射之后的液滴变形破碎特征,因此该峰值并不作为

当前实验研究液滴的最大横向变形值,本文定义该峰值前的第一个瞬间的横向变形值为液滴的最大横向变形值。

通过图9中两种不同的液滴横向变形曲线以及实验图片,发现电子氟化液液滴在高速气流中更容易变形破碎,且变形破碎速率比水的要快,比如达到最大横向变形程度所需的时间,对于电子氟化液液滴来说只需0.80 ms,而对于水液滴来说却需要1.17 ms,甚至更长,在可比较的实验条件下,两者所表现出来的差异主要取决于两者的表面张力。电子氟化液的表面张力约为水液滴的1.0/4.4,表面张力越大,液滴越不容易破碎,表明表面张力对液滴的变形破碎起抑制作用。

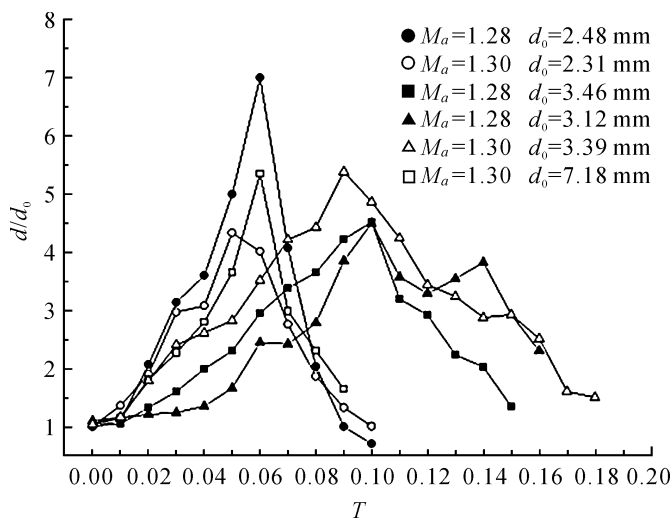


图9 液滴横向变形与无量纲时间关系曲线

3 结论

a) 在液滴的变形破碎过程中,液滴的表面张力越小,阻碍抑制液滴变形破碎的能力越低,使得液滴更易变形破碎,且液滴变形破碎的速率越快。

b) 气液密度比越大,液滴在气相中受到的气动力越强,液滴越不稳定,液滴倾向于更快地变形破碎,且变形破碎程度更高。气液密度比的增大促进了液滴的变形破碎,在液滴的变形破碎过程中为不稳定性因素。

c) 激波马赫数相同时,初始液滴直径越小,液滴运动的越快;液滴横向变形的最大值随着初始液滴直径的增大而增大。对于相同类型的液滴,激波马赫数越大,液滴的横向变形最大值也越大。

本文实验受到高速相机拍摄幅频的限制,不能拍摄记录更多液滴变形破碎过程的实验图片,所以要深入研究液滴在高速气流中变形破碎的机理,必须使用更高拍摄幅频的高速相机。

参考文献:

- [1] LANE W. Shatter of drops in stream of air [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1951, 43 (6): 1312-1317.
- [2] ENGEL O G. Fragmentation of water drops 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 A, NICHOLLS J A. Aerodynamics shattering of liquid drops [J]. Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1969, 7 (2): 285-290.
- [4] WIERZBA A, TAKAYAMA K. Experimental investigation of aerodynamic breakup of liquid drops [J]. Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988, 26(11): 1329-1335.
- [5] HSIANG L P, FAETH G. Near-limit drop deformation and secondary breakup [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1992, 18(5): 635-652.
- [6] 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.
- [7] 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]. 工程热物理论, 2003, 24(5): 797-800.
- [8] 肖毅,施红辉,吴宇,等. 激波与液滴作用的空气动力学现象的实验研究[J]. 浙江理工大学学报, 2013, 30(2): 203-207.
- [9] 易翔宇,郭帅涛,朱雨建,等. 高速气流中液滴破碎实验研究[C]//第十六届全国激波与激波管学术会议论文集. 河南洛阳, 2014: 360-365.
- [10] 金仁瀚,刘勇,朱冬清,等. 初始直径对单液滴破碎特性影响的试验[J]. 航空动力学报, 2015, 30(10): 2401-2409.
- [11] 王超,吴宇,施红辉,等. 液滴在激波冲击下的破裂过程[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(1): 129-134.

Experiments on Deformation and Breakup of Water and Electronic Fluoride Droplets in High-Speed Argon Stream

XIONG Hongping¹, LIU Jinhong², SHI Honghui¹, ZHANG Lite¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Experiments were carried out to investigate deformation and breakup of liquid droplets in high-speed stream in a vertical shock tube. The direct high-speed camera shooting technique and shadowgraph method were used to gain the morphological characteristics of the two different types of liquid droplets in different gas phases. The relationship between the droplet displacement and lateral deformation change with time was analyzed quantitatively. The experimental results show that the smaller the surface tension of the droplet, the easier the deformation and breakup of droplets, the faster the deformation and breakup rate. The greater the gas-liquid density ratio, the more unstable the droplets in the gas phase, the earlier the droplet begins to deform and break up, the higher the degree of deformation and fracture. The maximum value of lateral deformation of the droplet increases with the increase of shock wave Mach number.

Key words: shock wave; electronic fluoride; liquid droplet; deformation; breakup; Argon gas

(责任编辑: 康 锋)