

激波冲击下液滴变形破碎的黏性特征

施红辉¹, 刘晨¹, 熊红平¹, 刘金宏², 董若凌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, 四川绵阳 621900)

摘 要: 为了获得不同黏度的液滴在高速气流中变形破碎的形态特征图像, 定量分析黏性对变形破碎过程的影响, 使用高速相机直接拍摄法在水平激波管中实验研究了液滴的变形破碎过程, 测量了液滴迎风面位移、横向变形宽度、破碎时间等特征参数。所得结果表明: 液滴的黏度较低时, 液滴尾部形成的尾迹形状为细长的尖锥形, 当液滴的黏度较高时, 尾迹形状呈现波纹状, 随着黏度的逐渐增大, 液滴的尾迹更加复杂且紊乱; 由于波后气流的作用, 液滴迎风面发生变形失稳并演变出“尖钉”结构; 黏性对液滴变形破碎过程起阻碍抑制作用; 随着液滴黏度的增加, Rayleigh-Taylor(RT)不稳定性发展速率减缓, “尖钉”的数量先增加后减小。

关 键 词: 激波; 液滴; 黏性; “尖钉”结构; Rayleigh-Taylor(RT)不稳定性

中图分类号: V211.751; O354.5

文献标志码: A

Viscosity characteristics of droplet deformation and breakup under shock wave

SHI Honghui¹, LIU Chen¹, XIONG Hongping¹,

LIU Jinhong², DONG Ruoling¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation,

Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Institute of Fluid Physics,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: In order to obtain the morphological feature images of different viscous droplets deformed and broken in high-speed airflow, the influence of viscosity in the process of deformation and fracture was quantitatively analyzed, and the high-speed camera direct shooting method was used to study the droplet deformation and crushing process in the horizontal shock tube. The characteristic parameters such as windward surface displacement, lateral deformation width, and crushing time were measured. Results showed that when the viscosity of the droplet was low, the shape of the trail formed by the tail of the droplet was an elongated pointed cone. When the viscosity of the droplet was high, the shape of the trail was corrugated, and the wake of the droplet was more complicated and disordered when the

收稿日期: 2019-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(11772309); 浙江省基础公益研究计划项目(LGG19A020002);

中国工程物理研究院创新发展基金(CX2019004); 装备预研基金(6142A03180304)

作者简介: 施红辉(1962—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事超空泡海战武器与气泡动力学、流体界面 RM 不稳定性、新型脉冲式消防器、水下推进及减阻技术等研究。

通信作者: 刘金宏(1980—), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事界面不稳定性 and 气粒二相流实验。E-mail: ljh292@163.com

引用格式: 施红辉, 刘晨, 熊红平, 等. 激波冲击下液滴变形破碎的黏性特征[J]. 航空动力学报, 2019, 34(9): 1962-1970. SHI Honghui, LIU Chen, XIONG Hongping, et al. Viscosity characteristics of droplet deformation and breakup under shock wave [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 1962-1970.

viscosity increased; the windward surface of the droplet was deformed and unstable under the action of the wave, and the " spike" structure was developed; the viscosity of the liquid hindered the deformation and fracture process; the lower viscosity of the drop led to the faster rate of development of Rayleigh-Taylor (RT) instability, and the number of " spikes" increased first and then decreased with the increase of viscosity.

Key words: shock wave; droplet; viscosity; “spike” structure; Rayleigh-Taylor (RT) instability

激波冲击下液滴变形破碎问题是多相流体力学的经典问题。在液体雾化、多相燃烧、离散多相流以及超声速雨滴侵蚀等方面均有着重要的应用及研究价值,同时未来高超声速飞行器动力装置由于飞行速度的提升使得燃烧室内将出现复杂的波系,不可避免地出现激波与燃料液滴相互作用的情况,激波作用后燃料液滴雾化情况直接关系到燃料的掺混和燃烧,进而影响发动机性能^[1]。因此,探索激波作用下液滴的变形破碎行为和机理将是高超声速飞行器动力领域急需解决的关键问题之一。

早在 1951 年,Lane^[2]便在激波管中对稳态与瞬态气流中液滴的破碎进行了实验研究,此后 Engel、Ranger 等、Wierzba 等^[3-5]都对液滴破碎过程进行了大量的实验研究。从 Hinze^[6]开始,通过增加奥内佐格数 Oh 对液滴黏性进行了研究。Hisang 等^[7-9]对不同类型的液滴进行了大量的实验,分析了韦伯数 We 与奥内佐格数 Oh 对液滴变形破碎的影响,并依据 We 及 Oh 得到了不同初始状态下液滴的破碎模式,绘制了可供查询的破碎模式图谱。Joseph 等^[10]对高速气流中黏性液滴和黏弹性液滴的变形破碎进行了实验研究,对其初始破碎进行了 Rayleigh-Taylor (RT) 不稳定性分析。Beavers 等^[11]对高 We 情况下黏弹性液滴的破碎过程进行了 RT 不稳定性分析,发现黏弹性液滴破碎时间短于黏性液滴。Theofanous 等^[12-14]通过激光诱导荧光技术(LIF)实验研究了黏性液滴的气动物理现象,获得了不同黏性条件下的破碎时间,同时观察到了液滴破碎的后期阶段及粒子云分布。国内方面,对于激波冲击下液滴黏性特征的研究较少。楼建锋等^[15]对液滴在气体介质中的剪切破碎进行了数值研究,计算结果表明 Oh 对液滴的变形破碎过程起阻碍抑制作用。王超等^[16]实验与数值研究了液滴在激波冲击下的破裂过程,发现黏度的增加抑制了液滴的破碎。

本文在水平激波管中,运用高分辨率高速相机对激波冲击下不同黏度的单液滴变形破碎过程进行了实验研究,对实验图像数字化处理,得到液滴变形破碎过程的灰度图,同时分析了液滴的黏性对液滴运动及变形的影响。

1 实验装置及方法

如图 1 所示,横式激波管由驱动段、被驱动段和实验段组成。塑料膜片将充高压氮气的驱动段与充低压氮气的被驱动段隔开。激波管内腔截面尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,实验段两侧有光学玻璃窗口并安装光学通路,通过高速相机对激波冲击下液滴的变形破碎过程进行拍摄,高速相机拍摄幅频为 100 kHz ,即幅间隔为 $10\text{ }\mu\text{s}$ 。相机相对的窗口放置的 LED 冷光源,投射到白色半透明纸形成强光背景,变形破碎的液滴阴影成像。液滴由液滴发生器产生,主要装置包括电磁阀和储液柱,储液柱下部开有圆锥形小孔,便于黏性液滴的自由下落。液滴下落打断激光光路,致使光电管输出电压发生抖动,从而触发延时同步机,延时同步机适当延时触发激波管的破膜系统,使得激波与液滴在观察窗口相遇,实现激波冲击下液滴变形破碎的整个过程的实验研究。激波速度由实验段上的压力传感器测得。

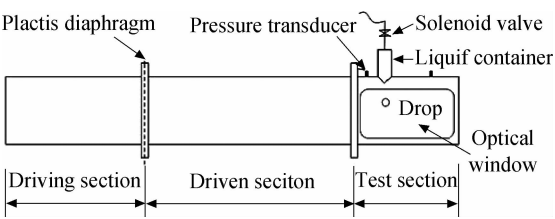


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

实验液滴选择水和 5 种黏度 ($0.02\sim 0.5\text{ Pa}\cdot\text{s}$) 的硅油,液滴直径在 1.10 mm 和 1.50 mm 之间,实验参数及工况如表 1 所示。

表 1 中, We 表示的是惯性力与表面张力之

比, Oh 表示的是黏性力与表面张力之比

$$We = \rho_g d_0 u_g^2 / \sigma$$

(1)

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

(2)

式中 ρ_g 为波后气体密度(本实验为 3.75 kg/m^3), d_0 是初始液滴直径, u_g 为波后气流速度, σ 为液体的表面张力, μ_l 为动力黏度, ρ_l 为液体密度。

表 1 实验参数及工况表

Table 1 Experimental parameters and working condition table

编号	液体	初始直径 d_0/mm	气流速度 $u_g/(\text{m/s})$	液体密度 $\rho_l/(\text{kg/m}^3)$	表面张力 $\sigma/$ (N/m)	动力黏度 $\mu_l/$ (Pa · s)	马赫数 Ma	We	Oh
SD-1	水	1.10	375.03	1000	0.0708	0.001	2.04	8195	0.00358
SD-2	硅油	1.34	375.03	969	0.0210	0.020	2.04	33655	0.12112
SD-3	硅油	1.40	372.03	969	0.0210	0.050	2.03	34602	0.29623
SD-4	硅油	1.22	375.03	969	0.0210	0.100	2.04	30641	0.63467
SD-5	硅油	1.50	372.03	969	0.0210	0.350	2.03	37073	2.00332
SD-6	硅油	1.40	369.02	969	0.0210	0.500	2.02	34044	2.96234

2 实验结果与分析

表 1 工况下,液滴变形破碎的典型时刻的时空分布实验图像,分别对应图 2~图 7,并对高速摄影的图片数字化。对低 Oh ($Oh < 0.1$) 下,当 $We > 350$ 液滴属于爆炸式破碎^[7-9]。对实验 SD-1, $We = 8195$,通过高速摄影观测激波冲击液

滴,时间 $t = 20\text{ }\mu\text{s}$ 时,液滴没有明显的剥离和变形,是激波与液滴作用和气流剪切在液滴表面生成表面波的阶段; $t = 40\text{ }\mu\text{s}$ 时,明显有微小的液滴在基体上剥离,在液滴背风处生成颗粒云,而母液滴横向宽度开始增长(图 2 中 X 正向为气流移动方向, Y 方向为垂直气流方向);液滴的横向变形加剧了剥离速度, $t = 70\text{ }\mu\text{s}$ 时,横向宽度较初始液

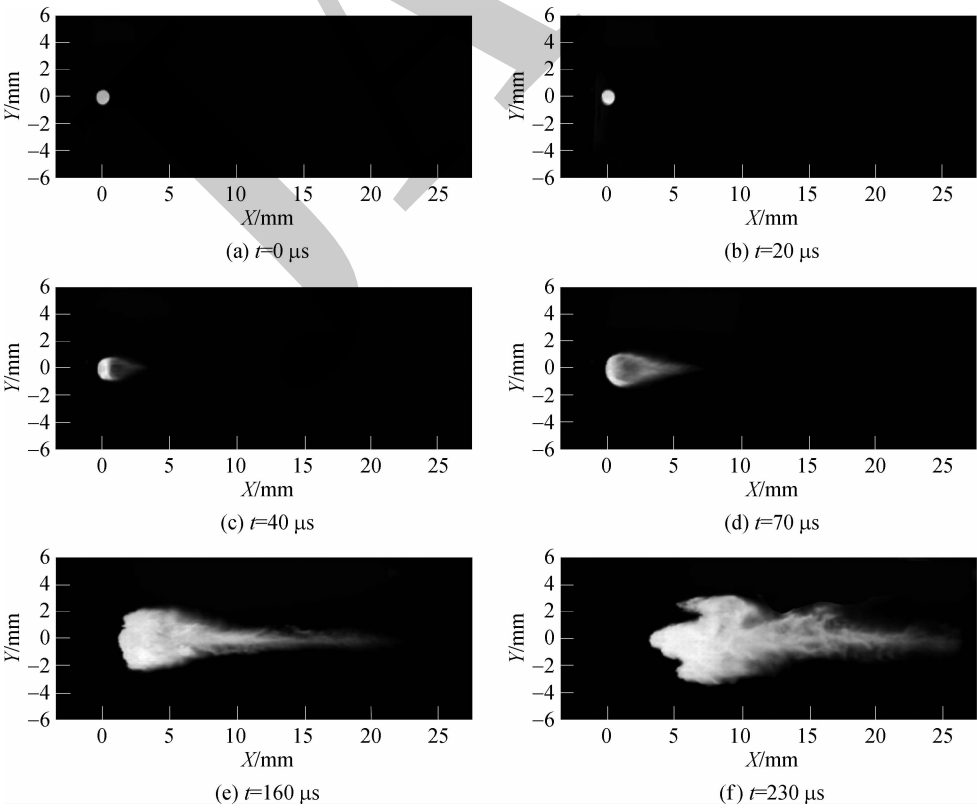


图 2 水液滴的变形破碎过程($d_0 = 1.10\text{ mm}$, $Ma = 2.04$, $\mu_l = 0.001\text{ Pa} \cdot \text{s}$)

Fig. 2 Deformation and breakup process of water droplets ($d_0 = 1.10\text{ mm}$, $Ma = 2.04$, $\mu_l = 0.001\text{ Pa} \cdot \text{s}$)

滴发生明显变化,同时纵向上(图 2 中 x 方向)液滴尾部形成尖锥状细长尾迹; $t=160\text{ }\mu\text{s}$ 时,迎风面变形形成扁平状,RT 不稳定性快速发展阶段;在 $t=230\text{ }\mu\text{s}$ 时,迎风面生成 RT 不稳定性大结构。由于测试方法的限制,实验上无法给出 $t=160\text{ }\mu\text{s}$ 迎风面的内部结构;可判断的整个物理过程是,高速气流下小液滴先从基体表面剥离,同时液滴变形形成不稳定薄片结构,RT 界面不稳定性造成整个结构的瞬间破碎,之后是破碎液滴在气流的挟带下的气粒输运。

图 3 所示,对 SD-2 实验, $Oh\approx 0.12$,硅油液滴的黏度较小,液滴的变形破碎过程,在时空关系上与 SD-1 实验相似,只是 $t\approx 230\text{ }\mu\text{s}$ 时刻迎风面的结构明显不同。图 4 所示,对 SD-3 实验, $Oh\approx 0.30$,液滴黏度相对 SD-1、SD-2 显著增加。 $t\approx 40\text{ }\mu\text{s}$ 时,硅油液滴仍处于压缩变形阶段,在液滴背风处并未生成颗粒云; $t=200\text{ }\mu\text{s}$ 时迎风面才形成扁平状,变形破碎过程相对 SD-1、SD-2 缓慢。 $t=200\sim 360\text{ }\mu\text{s}$,硅油液滴的迎风面开始变形失稳,出现“尖钉”结构,同时尖锥状细长尾迹沿横向扩张。

图 5 所示,对 SD-4 实验, $Oh\approx 0.63$,随着黏度的增大,硅油液滴要经历时间更长的变形破碎

过程,并形成波纹状尾迹(如图 5 中 $t=240\text{ }\mu\text{s}$ 所示)。 $t=200\sim 240\text{ }\mu\text{s}$,在波后气流作用下液滴尾部有尾涡存在。同时在液滴破碎后期发现低黏度情况下并不明显的尾迹与初始液滴分离的趋势。

图 6 所示,对 SD-5 实验, $Oh\approx 2.00$,硅油液滴的黏度较大。 $t=210\text{ }\mu\text{s}$ 时,液滴尾部的尾迹形态更加复杂且无序,在 $t=300\text{ }\mu\text{s}$ 时尾迹有向 x 轴负方向的“回流”运动。 $t=400\text{ }\mu\text{s}$ 时,破碎的液滴呈颗粒状分散分布。图 7 所示,对 SD-6 实验, $Oh\approx 2.96$,液滴破碎后期颗粒状液滴分散分布的趋势越发明显且并没有形成明显的云雾。

图 8 所示为 $t=70\text{ }\mu\text{s}$ 下不同黏度液滴的实验结果对比图。激波冲击液滴过后,水液滴已完成压缩变形过程,背风生成颗粒云,并形成细长的尖锥形细长尾迹;黏度为 $0.02、0.05\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的硅油液滴,在时空关系上变形破碎过程与水液滴实验相似,只是尾迹长度随黏度增加而减小;黏度为 $0.1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的硅油液滴,明显有微小的液滴在基体上剥离,在液滴背风生成轻微雾化的颗粒云;黏度为 $0.35、0.5\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的硅油液滴,仍处于压缩变形阶段,没有明显的微小液滴剥离。通过以上对比可以发现,不同黏度液滴变形破碎的难易程度不同,

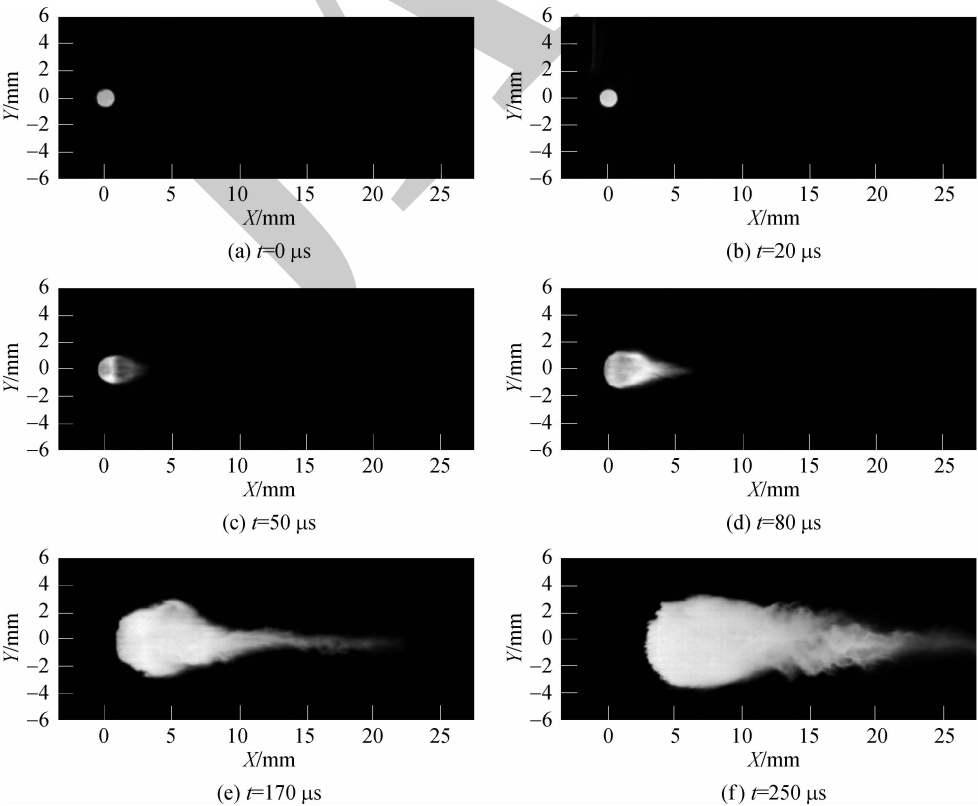


图 3 硅油液滴的变形破碎过程($d_0=1.34\text{ mm}, Ma=2.04, \mu_l=0.02\text{ Pa}\cdot\text{s}$)

Fig. 3 Deformation and breakup process of silicon oil droplets ($d_0=1.34\text{ mm}, Ma=2.04, \mu_l=0.02\text{ Pa}\cdot\text{s}$)

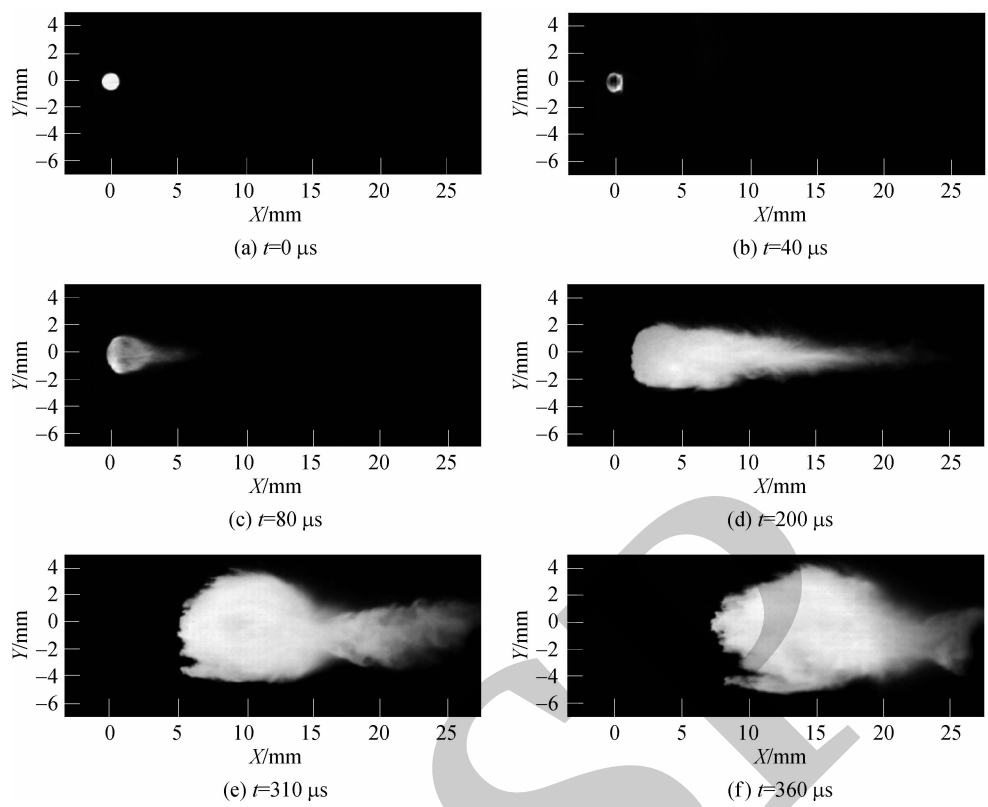


图 4 硅油液滴的变形破碎过程($d_0=1.40\text{ mm}, Ma=2.03, \mu_l=0.05\text{ Pa}\cdot\text{s}$)

Fig. 4 Deformation and breakup process of silicon oil droplets ($d_0=1.40\text{ mm}, Ma=2.03, \mu_l=0.05\text{ Pa}\cdot\text{s}$)

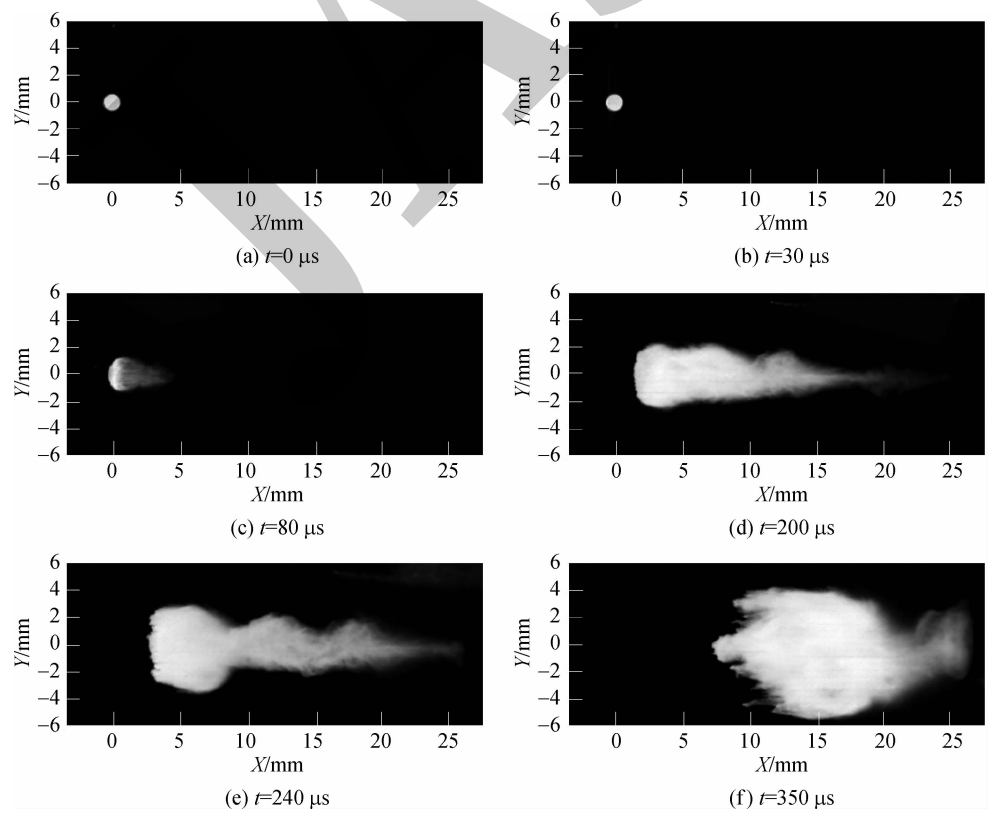


图 5 硅油液滴的变形破碎过程($d_0=1.22\text{ mm}, Ma=2.04, \mu_l=0.1\text{ Pa}\cdot\text{s}$)

Fig. 5 Deformation and breakup process of silicon oil droplets ($d_0=1.22\text{ mm}, Ma=2.04, \mu_l=0.1\text{ Pa}\cdot\text{s}$)

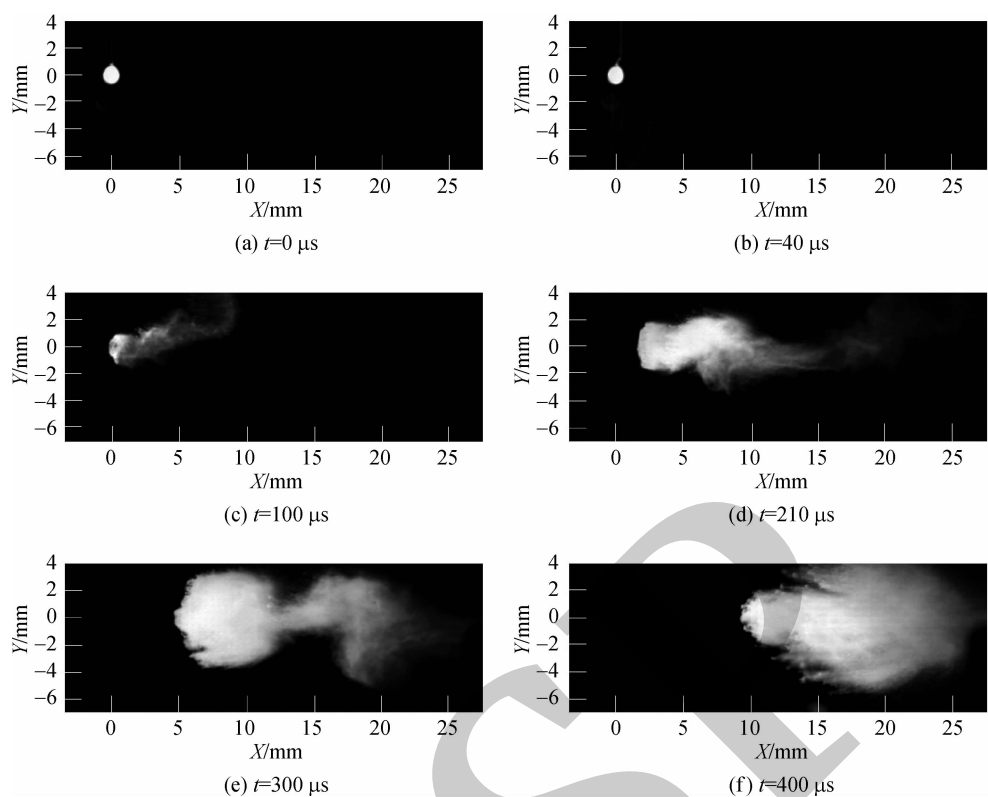


图 6 硅油液滴的变形破碎过程($d_0=1.50\text{ mm}, Ma=2.03, \mu_1=0.35\text{ Pa}\cdot\text{s}$)

Fig. 6 Deformation and breakup process of silicon oil droplets ($d_0=1.50\text{ mm}, Ma=2.03, \mu_1=0.35\text{ Pa}\cdot\text{s}$)

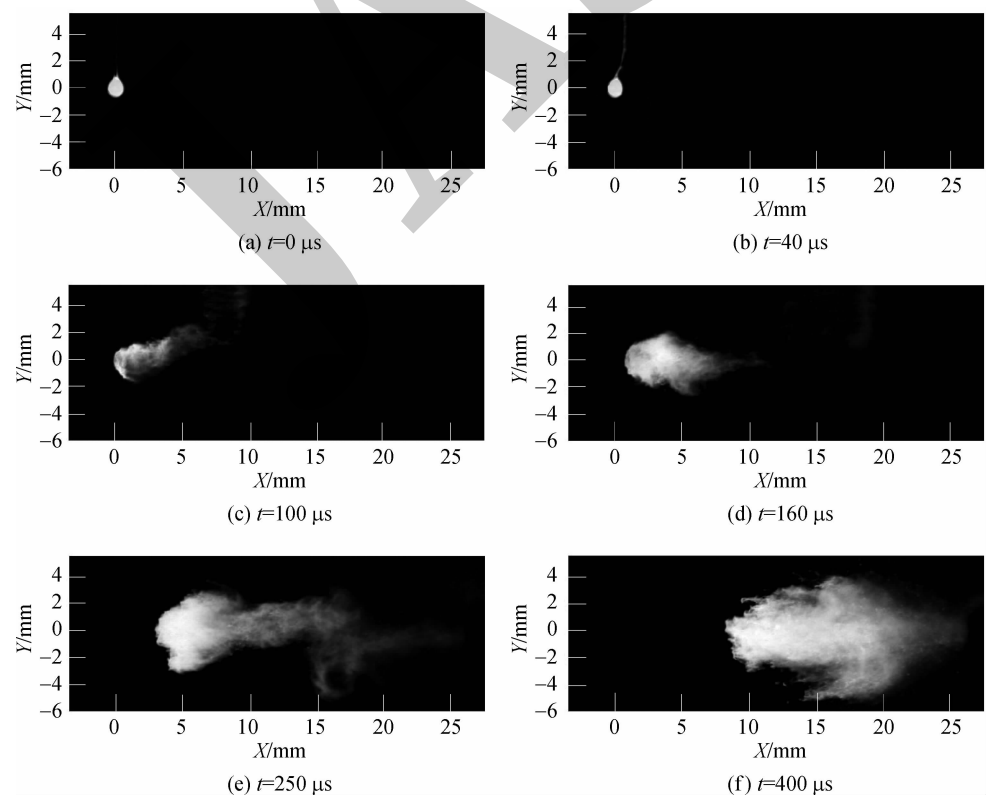


图 7 硅油液滴的变形破碎过程($d_0=1.40\text{ mm}, Ma=2.02, \mu_1=0.5\text{ Pa}\cdot\text{s}$)

Fig. 7 Deformation and breakup process of silicon oil droplets ($d_0=1.40\text{ mm}, Ma=2.02, \mu_1=0.5\text{ Pa}\cdot\text{s}$)

黏度越大越难发生变形破碎。这是因为当液滴与激波相互作用时,激波管中高速气流提供的气动力促使液滴快速变形破碎,液滴表面张力和内部黏性力则阻碍液滴变形,内部黏性力会随着黏度的增大而增大,从而使液滴变形破碎的阻力增大。从另一个角度分析,液滴的变形破碎与无量纲参数 Oh 数有关, Oh 是用来度量黏性力与惯性力和表面张力的相互关系的无量纲数,对液滴的变形破碎过程起阻碍抑制作用^[15],而 Oh 数会随着黏度的增大而增大,导致抑制作用更加明显。

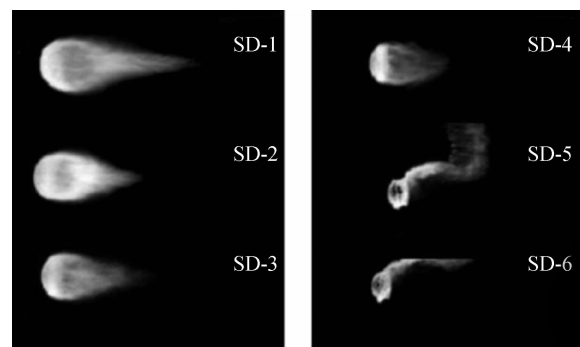


图 8 $t=70\mu\text{s}$ 时不同黏性液滴的实验结果对比
Fig. 8 Comparison of experimental results of different viscous droplets at $t=70\mu\text{s}$

如图 9 所示为 $t=240\mu\text{s}$ 液滴迎风面形态结构图,气液两相界面初始扰动随着时间演变发展,液滴的迎风面出现了“尖钉”结构,这是 RT 不稳定性的结果。“尖钉”结构发展演变的速率随黏性增加而降低,而“尖钉”结构的数量随黏度增加出现先增加后减小的变化趋势。当液滴黏度较低的时候,会产生 RT 不稳定性大结构,高黏度条件下并未观察到,这是因为高黏度液滴变形破碎的速率较低,给 RT 不稳定性的发展演变提供了充足的时间。

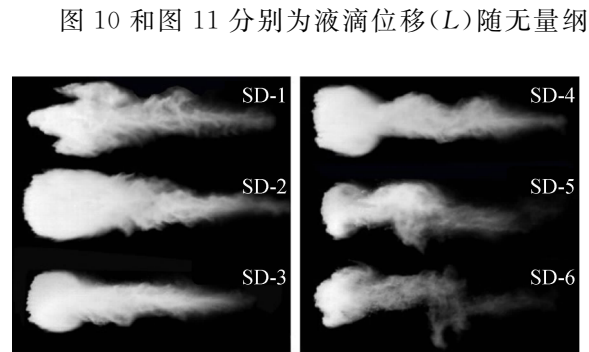


图 9 $t=240\mu\text{s}$ 时液滴迎风面形态结构图
Fig. 9 Morphological structure of liquid drop windward surface at $t=240\mu\text{s}$

时间 (τ) 的变化关系曲线图和横向最大宽度 $d_{w,\max}/d_0$ 随无量纲时间的变化关系曲线图。

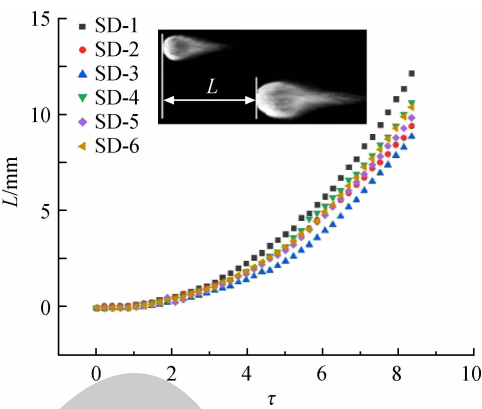


图 10 液滴位移-无量纲时间变化关系曲线
Fig. 10 Droplet displacement-dimensionless time relationship curve

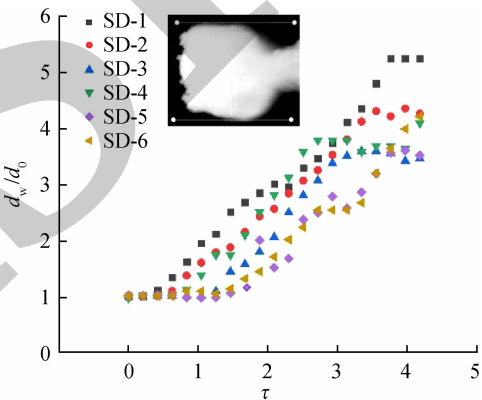


图 11 d_w/d_0 -无量纲时间变化关系曲线
Fig. 11 d_w/d_0 -dimensionless time relationship curve

时间 t 进行无量纲化^[17]

$$\tau = t \frac{u_g \sqrt{\rho_g/\rho_l}}{d_0} \tag{3}$$

液滴初始加速度进行无量纲化

$$a^* = \frac{a \rho_l d_0}{u_g^2 \rho_g} \tag{4}$$

相关实验数据处理结果如表 2 所示。

通过液滴位移-无量纲时间变化关系曲线,观察到同一黏性液滴的初始加速度(a)值近似为常数,与时间无关,经计算后得到初始加速度为 10^5 量级。当液滴突然暴露于高速气流中时,气流所提供的气动能主要转换为液滴变形所需的能量,很少一部分转换为液滴运动所需的能量,导致了液滴初始阶段的运动发展并不明显,因此加速度近似为常数。

表 2 实验数据处理结果

Table 2 Experimental data processing results

实验编号	Ma	$a/10^4\text{ (m/s}^2\text{)}$	a^*	τ
SD-1	2.04	17.58	0.369	3.75
SD-2	2.04	13.16	0.329	2.95
SD-3	2.03	14.32	0.372	2.64
SD-4	2.04	15.92	0.350	2.48
SD-5	2.03	14.79	0.414	2.31
SD-6	2.02	15.72	0.424	2.13

Lane、Wierzba 等的实验表明^[2,5]:液滴变形破碎过程中,横向宽度与初始直径之比时间先增长达最大值再开始剥离破碎减小到零。由于 RT 不稳定性大结构会干扰横向宽度的测量,本文选取液滴基体未产生 RT 不稳定性大结构阶段研究,通过横向宽度 d_w/d_0 -无量纲时间(τ)变化关系曲线,观察到不同黏性的液滴横向宽度与无量纲时间初期近似成线性关系,之后存在一段平坦震荡区域的现象,不同黏性液滴到达平坦区域的无量纲时间随着黏性的增加变短,而平坦震荡区域是前人实验研究中鲜有发现的。同时 d_w/d_0 的最大值和达到最大值无量纲时间与 Wierzba 等^[5]的实验数据存在差异,Wierzba 实验进行了马赫数 Ma 在 1.3~1.5 范围内直径为 1.03 mm 水液滴的变形破碎过程,发现最大横向宽度 d_0 范围为 2.4~2.9,无量纲时间约为 1.0;而本文 SD-1 中水液滴直径为 1.1 mm,最大横向宽度 d_0 范围为 5.2~5.5,无量纲时间约为 3.75,而马赫数 Ma 为 2.04,所以实验数据存在差异。

从液滴位移-无量纲时间变化关系曲线还可以观察到,不同黏度开始发生横向变形的时间不同,随着黏度增加,液滴开始发生横向变形的时间增加,这也从另一个角度解释了黏性延缓了液滴的变形破碎。

3 结 论

本文通过高分辨率高速相机对激波冲击下不同黏性的单液滴变形破碎过程进行了实验研究,对实验图像灰度化处理,得到了更精确的不同黏性液滴变形破碎的形态特征,分析了液滴的迎风面位移、初始加速度及横向宽度,得出结论如下:

1) 通过实验获得的实验图像,当液滴的黏度较低时,液滴尾部形成的尾迹形状为细长的尖锥形,当液滴的黏度较高时,尾迹形状呈现波纹状,

随着黏度的逐渐增大,液滴的尾迹更加复杂且紊乱。

2) 通过对液滴的运动分析,发现液滴的初始加速度为一个定值, d_w/d_0 与无量纲时间初期近似成线性关系,之后存在一段平坦震荡的现象,且不同黏性液滴到达平坦区域的无量纲时间随着黏度的增加变短。

3) 通过分析液滴的黏性对变形破碎过程的影响,得出液体的黏性在液滴的变形破碎过程中起阻碍抑制作用;随着时间的发展,液滴的迎风面出现“尖钉”结构,它是 RT 不稳定性的结果,并且 RT 不稳定性发展的速率随着黏度的增加而减小。

参考文献:

[1] 王振国,梁剑寒,丁猛,等.高超声速飞行器动力系统研究进展[J].力学进展,2009,39(6):716-739.
WANG Zhenguo, LIANG Jianhan, DING Meng, et al. A review on hypersonic airbreathing propulsion system[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(6): 716-739. (in Chinese)

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

[3] 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.

[4] RANGER A A, NICHOLLS J A. Aerodynamics shattering of liquid drops[J]. AIAA Journal, 1969, 7(2): 285-290.

[5] WIERZBA A, TAKAYAMA K. Experimental investigation of aero dynamic breakup of liquid drops[J]. AIAA Journal, 1988, 26(11): 1329-1335.

[6] HINZE J O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes[J]. AIChE Journal, 1955, 1(3): 289-295.

[7] HSIANG L P, FAETH G. Near-limit drop deformation and second ary breakup[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1992, 18(5): 635-652.

[8] HSIANG L P, FAETH G. Drop properties after secondary breakup[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1993, 19(5): 721-735.

[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] JOSEPH D D, BELANGER J, BEAVERS G S. Breakup of a liquid suddenly exposed to a high-speed airstream[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(6/7): 1263-1303.

[11] BEAVERS G S, JOSEPH D D, FUNADA T. Rayleigh-Taylor instability of viscoelastic drops at high weber numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 453(6): 109-132.

[12] THEOFANOUS T G, LI G J. On the physics of aerobreakup[J]. *Physics of Fluid*, 2008, 20(5): 2599-2604.

[13] THEOFANOUS T G. Aerobreakup of Newtonian and viscoelastic liquids[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2011, 43: 661-690.

[14] THEOFANOUS T G, MITKIN V V, NG C L, et al. The physics of aerobreakup: II viscous liquids[J]. *Physics of Fluid*, 2012, 24(2): 022104. 1-022104. 39.

[15] 楼建锋, 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 shear ring breakup of liquid droplet in gas medium[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, 28(2): 210-213. (in Chinese)

[16] 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.
WANG Chao, WU Yu, SHI Honghui, et al. Breakup process of drop let under the impact of a shock wave[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(1): 129-134. (in Chinese)

[17] GULDENBECHER D R, LOPEZ-RIVERA C, SOJKA P E. Secondary atomization[J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 46: 371-402.

(编辑: 李岩梅、张 雪)