

单液滴破碎流动机理试验研究

刘 闯,金仁瀚,刘 勇,龚 勋

(南京航空航天大学 江苏省航空动力系统重点实验室,南京 210016)

摘要:为了研究单液滴破碎内部流动机理,采用高速摄像机对不同流场分布中的液滴变形、破碎过程进行了捕获。基于试验中获得的现像,分析了液滴环境流场结构对液滴变形、破碎过程的影响,对液滴破碎流动机理进行了相关验证,并对其做了进一步完善。研究表明:气流的作用强度及液滴内、外部液体的流动特性决定了液滴不同破碎模式的发生;在气流作用下,在液滴的外部,液体沿气流方向的前、后驻点向垂直于气流方向的中心截面极点处运动;而在液滴的内部,为了克服液滴沿气流方向被压缩、沿垂直于气流方向伸展,在阻碍液滴变形内力的作用下,液体沿垂直于气流方向的上、下 2 极点向液滴中心位置处运动,使得液滴仍然保持球形。

关键词:液滴破碎;燃油雾化;流动机理;燃烧室;航空发动机

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.04.017

Experimental Investigation on Flow Mechanism of Single Droplet Deformation and Breakage

LIU Chuang, JIN Ren-han, LIU Yong, GONG Xun

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the internal flow mechanism of single droplet breakup, the process of droplet deformation and breakup were obtained by using the high-speed cameras in different distribution of flow field. The influence of the droplet environment flow structure on droplet deformation and breakage process was analyzed based on the phenomena of experiment. The droplet breakup flow mechanism was verified and further perfected. The results show that the intensity of air flow and the flow characteristics of liquid droplet in both external and internal decide the droplet breakage modes. Under the effect of air flow, liquid flow from both forward and rear stationary points to the pole of center section across the flow outside of the droplet, while, inside of the droplet, from both upper and lower poles to the center of the droplet under the internal force against the droplet deformation, so that the droplets were not compressed along the flow and stretched across the flow, which remains the droplet spherical.

Key words: droplet breakup; fuel atomization; flow mechanism; combustor; aeroengine

0 引言

液滴的变形、破碎是航空发动机燃烧室燃油雾化所必须经历的过程。液滴破碎有效的增加了气/液间接触面积,并且强化了气/液间的传热传质。因此,单液滴的 2 次破碎机理具有极高的研究价值。

文献[1-2]通过直接数值模拟的方法对液滴的袋状破碎过程进行了研究,指出液滴附近气流的分离作

用使得沿气流方向前、后驻点的压力分布不同,从而生成了袋状结构的液膜;文献[3]认为袋状液膜破碎产生的液丝是沿气流方向,所以毛细不稳定不是造成袋状液膜破碎的主要原因;文献[4]认为气流中的扰动或流体中含有的小颗粒使得袋状液膜发生破碎。

对于液滴剪切破碎机理的认识存在 2 种相互对立的观点,分别为气流剪剥离方式^[5]液膜被稀释吹离。多模式破碎机理:气流的动力学因素与剪切因素都对

收稿日期:2015-11-22

作者简介:刘闯(1989),男,在读硕士研究生,研究方向为航空发动机程序设计和编写;E-mail:liuchuangsnail@163.com。

引用格式:刘闯,金仁瀚,刘勇,等.单液滴破碎流动机理试验研究[J].航空发动机,2016,42(4):87-92. LIU Chuang, JIN Renhan, LIU Yong, et al. Experimental investigation of flow mechanism of single droplet deformation and breakage[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 87-92.

液滴破碎过程起重要作用时,液滴发生多模式破碎;气流的气动力因素导致液滴多模式破碎的发生。液膜稀释破碎机理又可分为瑞丽-泰勒不稳定破碎/气动曳力理论和液滴流动理论^[1]。

文献[13-15]以瑞丽-泰勒不稳定破碎/气动曳力理论为基础对液滴变形、破碎的过程展开了研究,取得了较好结果,但该理论中仍然存在着 2 点不足:在较低 We 下,液滴表面观察不到明显的不稳定表面波;不稳定波的波长对液滴破碎模式并没有起到相应的控制作用。目前对液滴流动的理论研究较少,需要进行深入的液滴流动的数值仿真与试验研究^[16,17]。

本文运用高速摄像机对不同气流分布中单液滴的变形、破碎过程进行了捕获,并结合油雾场图像分析软件^[8],分析气流分布对液滴变形、破碎过程的影响,以此对液滴流动机理展开进一步研究。

1 试验装置及测量方法

1.1 试验系统

连续气流中液滴变形破碎过程试验系统如图 1 所示。从图中可见,冷态空气由 1 台螺杆式空气压缩机提供,气流经整流进入进口截面为 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 的矩形管道中。液滴从测量段上方的液滴输入管道进入测量区域内,液滴进入方向与气流的方向分为垂直(图 1(a))与平行(图 1(b))2 种,在气流的作用下液滴发生了变形与破碎过程。

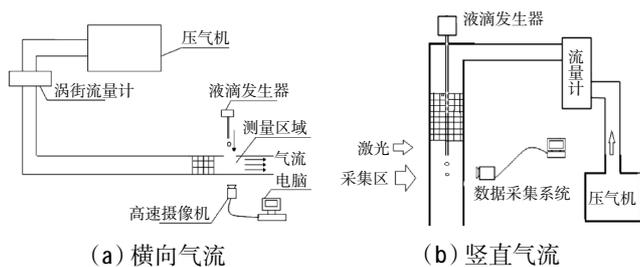


图 1 连续气流中液滴变形破碎过程试验系统

1.2 液滴保护套管头部结构

设计了 3 种矩形管道内液滴变形、破碎过程的试验方案,产生了 3 种不同的流场分布。方案 1 采用气流方向与液滴运动方向垂直的横向均匀气流的试验装置,该装置所产生的流场对变形过程中的液滴不起垂直于气流方向的挤压作用;方案 2 如图 2(a)所示,为 2 面开口的竖直液滴保护套管结构(外径为 1 cm),该结构下的流场分布可在液滴的变形过程中,在前、后 2 面对液滴产生垂直于气流方向的挤压作

用;方案 3 如图 2(b)所示,为 4 面开口的竖直液滴保护套管结构,该结构下的流场分布可在液滴的变形过程中,在 4 面对液滴产生垂直于气流方向的挤压作用,其挤压作用要强于方案 2 的。

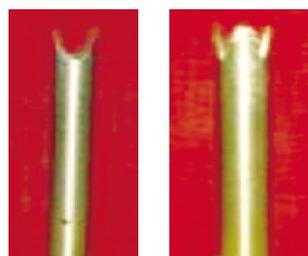


图 2 液滴保护套管结构

2 不同试验方案数值计算流场分布

方案 2、3 中液滴保护管附近的流场区域比较小,试验测量较为困难,所以主要通过对简单流场计算准确度较高的 CFD 计算软件(Fluent)分别对 2 种试验方案的流场进行数值仿真计算,从而获得 2 种方案液滴保护套管附近流场分布情况。

方案 2 通过数值计算获得的气流速度分布流线如图 3 所示。图中截面为气流挤压作用最强的中心截面,其中 X、Z 方向与主流 Y 方向垂直。从图中可见,气流挤压区域沿竖直方向逐渐向液滴保护管中部发展,2 股挤压气流在液滴保护管出口附近汇合。在液滴保护管中心位置处存在较小的回流区。在进口气流速度为 30 m/s 时,在对液滴产生挤压作用的区域中,沿 X 方向挤压速度为 $4 \sim 6\text{ m/s}$,而该截面处沿 Z 方向的挤压速度约为 0 。

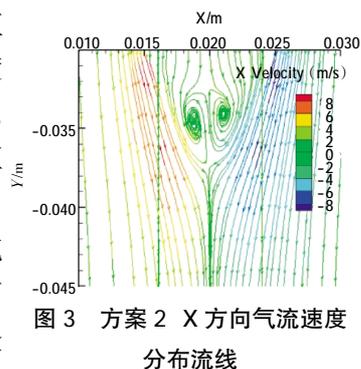


图 3 方案 2 X 方向气流速度分布流线

方案 2 数值计算获得的竖直气流速度沿气流方向的速度分布流线如图 4 所示。图中截面为气流挤压作用最弱的中心截面。从图中可见,在该截面处气流沿垂直于 Y 方向的分速度约为 0 ,因此与图 3 所在截面相比,该截面处气流的挤压作用可以忽略不计。

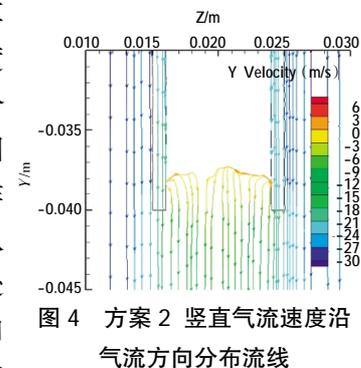


图 4 方案 2 竖直气流速度沿气流方向分布流线

方案 2 数值计算获得的竖直气流速度沿气流方

向的速度分布流线如图 5 所示。图中截面为气流挤压作用最强的中心截面。从图中可见,进口气流速度为 30 m/s 时,在液滴保护管附近区域的任何位置,沿 Y 方向的主流速度都远远大于沿 X、Z 方向的气流速度。因此,在液滴所经过的区域中,受到沿 Y 方向气流的作用都远远的大于其他方向气流的作用。

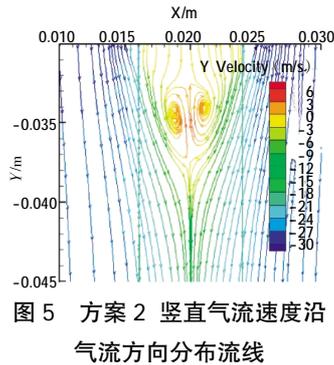


图 5 方案 2 竖直气流速度沿气流方向分布流线

从图 3~5 中可见,在试验方案 2 中,液滴在保护套管的作用下可以顺利的进入到测量区域,在保护套管出口附近,气流对液体沿垂直液滴运动方向上的挤压作用主要沿 X 方向。液滴虽然受到气流沿垂直其运动方向上的挤压作用,但在液滴保护管附近区域的任何位置,沿 Y 方向的主流速度都远远大于沿 X、Z 方向的气流速度,因此在液滴经过的区域中,沿 Y 方向气流的挤压作用都远远大于其他方向的。达到了试验方案 2 的设计要求,即液滴在竖直气流作用下发生变形,同时在气流作用下降低了液体沿垂直液滴运动方向的流动速度。

方案 3 通过数值计算获得的 Z、X 方向气流速度沿竖直方向的速度分布流线分别如图 6、7 所示。图中截面为气流挤压作用最强的中心截面。从图中可见,流场结构的变化趋势与方案 2 的相似,但其在挤压作用区域内沿水平方向的气流分速度整体较大,气流沿水平方向挤压作用比方案 2 的强。

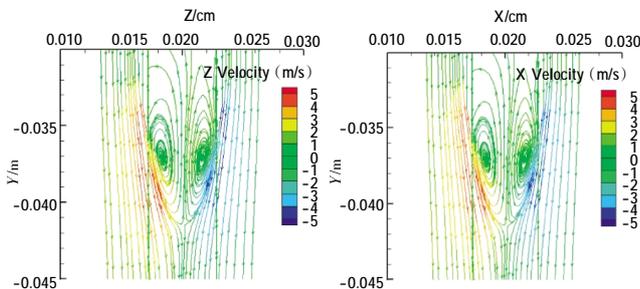


图 6 方案 3 Z 方向气流速度分布流线 图 7 方案 3 X 方向气流速度分布流线

方案 3 通过数值计算获得的竖直气流速度沿气流方向的速度分布流线如图 8 所示。从图中可见,进口气流速度为 30 m/s 时,在液滴保护管附近区域的任何位置,沿 Y 方向的主流速度都远远的大于沿 X、

Z 方向的气流速度。因此,在液滴所经过的区域中,受到沿 Y 方向气流的作用与方案 2 的相似,都远远大于其他方向气流的作用。

从图 6~8 中可见,在试验方案 3 中,在保护套管出口附近,气流对液体沿垂直液滴运动方向上沿 X、Z 方向具有相同的挤压作用。液滴虽然受到气流沿垂直其运动方向上的挤压作用,但在液滴保护管附近区域的任何位置,沿 Y 方向的主流速度都远远大于沿 X、Z 方向的气流速度,因此在液滴经过区域中,Y 方向气流的作用都远远大于其他方向的。达到了试验方案 3 的设计要求,即液滴在竖直气流作用下发生变形,在气流挤压作用下降低了液体沿垂直液滴运动方向的流动速度,且气流对液体沿垂直于液滴运动方向的挤压作用要强于方案 2 的。

由上述数值计算流场分布可知,在不同试验方案中,液滴沿垂直其运动方向上液体流动速度不同导致了液滴不同破碎形态的发生。

3 试验结果及分析

在 3 种气流分布下,液滴变形、破碎过程的试验工况见表 1。

表 1 试验工况(Oh<0.1)

液滴类型	直径/mm	表面张力系数/(N/mm)	密度/(kg/m ³)	We
航空煤油	2.6	0.024	775	15~60

3.1 横向气流对液滴变形破碎过程的影响

在 We=20 时,d=2.6 mm 液滴变形破碎过程如图 9 所示。从图中可见,液滴在横向气流作用下发生了典型的袋状变形与破碎过程,在横向气流的作用下,液滴首先由球形变成了薄盘形(如图 9 中的 a-c 所示);在薄盘形中部,液体沿气流方向变薄,形成了黏附于边缘液环,且沿气流方向不断生长的袋状液膜(如图 9 中的 d 所示);袋状液膜不断变薄,在沿气流方向运动速度最快的中心位置处,液膜首先破碎,生成了大量小尺寸液滴(如图 9 中的 e 所示);液膜破碎后,沿垂直气流方向液环持续扩展,直至在液环中液

体较薄的位置发生断裂,生成数量较少且尺寸相对较大的液滴(如图 9 中的 f 所示)。

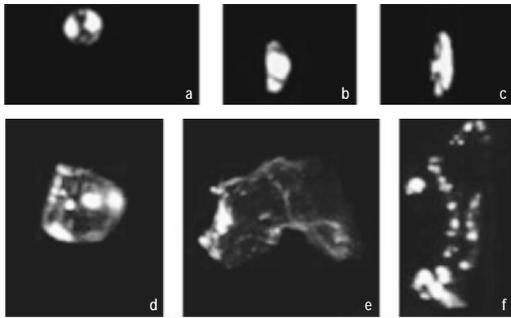


图 9 $We=20, d=2.6 \text{ mm}$ 液滴变形破碎过程

在 $We=30$ 时, $d=2.6 \text{ mm}$ 液滴变形破碎过程如图 10 所示。从图中可见,液滴在横向气流作用下发生了袋状/蕊心破碎,该破碎模式属于多模式破碎的第 1 阶段,即类似于袋状破碎的多模式破碎。液滴首先由球形变成了薄盘形(如图 10 中的 a~c 所示);薄盘形液滴进一步变形,形成了 1 个袋状液膜(如图 10 中的 d 所示),但在其中心位置处形成了尺寸相对较大的液核(如图 10 中的 e 所示);液膜首先破碎,生成了大量小尺寸液滴(如图 10 中的 e 所示);液膜破碎后,中部的液柱与边缘处的液环分别沿气流方向与垂直气流方向持续扩展,直至在液柱、液环中液体较薄的位置发生断裂,生成数量较少且尺寸相对较大的液滴,破碎后生成的子液滴空间分布类似于伞形结构(如图 10 中的 f 所示)。因此,根据几何形态学,又可将其称为伞形破碎。

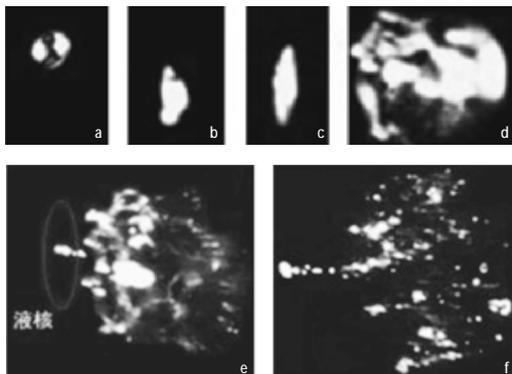


图 10 $We=30, d=2.6 \text{ mm}$ 液滴变形破碎过程

在 $We=35$ 时, $d=2.6 \text{ mm}$ 液滴变形破碎过程如图 11 所示。从图中可见,在薄盘形上、下部,液体沿气流方向的厚度明显小于其中部,但其上、下部液体厚度明显不对称,下部液体较薄区域沿垂直气流方向上的长度相对较长(如图 11 中的 b 所示)。在气流的作用

下,在薄盘形下部生成了袋状液膜(如图 11 中的 c 所示),而在上部产生了液核(如图 11 中的 d 所示)。破碎后生成的子液滴空间分布类似于勺形结构(如图 11 中的 e 所示),因此,根据几何形态学,可将其称为勺形破碎。

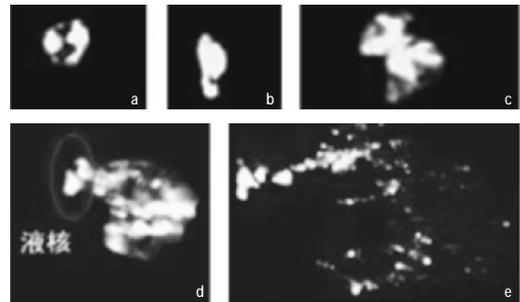


图 11 $We=35, d=2.6 \text{ mm}$ 液滴变形破碎过程

在 $We=50$ 时, $d=2.6 \text{ mm}$ 液滴变形破碎过程如图 12 所示。从图中可见,液滴先发生了类似于剪切破碎的多模式破碎,该破碎模式属于多模式破碎的第 2 阶段。在薄盘形上、下部,液体沿气流方向的厚度,明显小于其中部(如图 12 中的 a~c 所示);在薄盘形下部边缘附近的较小区域内,首先生成了非袋状结构的液膜,其后迅速破碎(如图 12 中的 d 所示);在薄盘形大部分区域,在厚度较薄位置处生成的液膜破碎产生了大量的小尺寸液滴(如图 12 中的 e 所示)。在该破碎过程中,液膜首次发生破碎的区域在薄盘形的边缘,该破碎方式与液滴的剪切破碎模式相似。但在薄盘形液滴破碎的过程中,液膜生成与破碎的过程并不是由边缘向中心方向逐次发生,且在破碎完成后,液滴中部并没有明显尺寸较大的液核生成,因此,该破碎过程被称之为类似于剪切破碎的多模式破碎。

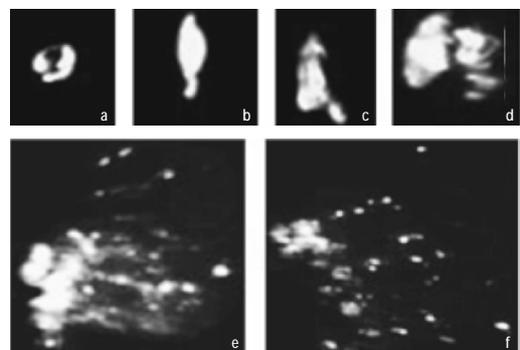


图 12 $We=50, d=2.6 \text{ mm}$ 液滴变形破碎过程

在 $We=20$ 时, $d=2.6 \text{ mm}$ 液滴变形破碎过程如图 13 所示。从图中可见,在竖直挤压气流作用下,液滴并没有发生如图 9 所示的袋状破碎过程,而只发生了

变形过程。由于在保护管出口附近处,液滴已经进入到气流挤压区域,在 X、Z 方向受到了气流挤压作用(沿 X 方向相对较强),液体由中心位置向边缘流动速度相对于横向气流要小。因此,气流沿 X、Z 方向对液体的挤压作用,一方面增加了薄盘形中液体沿垂直方向的厚度(如图 9 中的 c、图 13 中的 b 所示);另一方面也增加了球形液滴转变成薄盘形所需的时间。当气流对液滴的作用力不足以克服表面张力、黏性阻力作用使得液滴继续变薄时,在阻力的作用下,逐渐向球形液滴转变(如图 13 中的 c、d 所示)。液滴由薄盘形向球形转变的过程中,液体的表面张力逐渐减小,因此,当液滴表面积减小到某一值时,气动力又足以使得液滴由球形向薄盘形转变(如图 13 中的 e 所示)。随着液滴表面积的增加,液体表面张力增大,液滴又由薄盘形向球形转变(如图 13 中的 f 所示)。

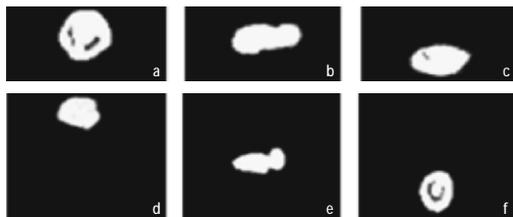


图 13 We=20, d=2.6 mm 液滴变形破碎过程

在 We=20 时, d=2.6 mm 液滴变形破碎过程如图 14 所示。从图中可见,液滴并未发生如图 12 所示的多模式破碎过程,而是发生了袋状破碎。随着气流速度的增加,一方面液滴的变形速率增加;另一方面也增强了挤压区域中气流对液体沿水平方向的挤压作用,降低了液滴在该区域中液体由中心位置向边缘流动的速度,减小了薄盘形液滴边缘处与其他区域液体在垂直方向上的厚度差异。因此,无法在薄盘形液滴边缘处首先产生液膜。在高速气流的作用下,液膜沿气流方向运动速度快速增大,液体内部用于克服液膜

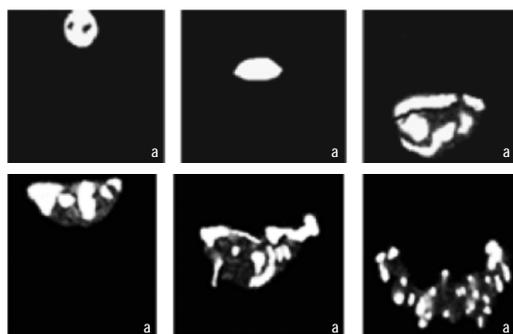


图 14 We=60, d=2.6 mm 液滴变形破碎过程

变形的弛豫时间则迅速减小,当袋状液膜自身变形量不足以克服因气动力引起的变形量,液膜将被沿气流方向吹破,发生袋状破碎(如图 14 中的 d~f 所示)。

3.3 方案 3 气流对液滴变形破碎过程的影响

在 We=20 时, d=2.6 mm 液滴变形过程如图 15 所示。从图中可见,与图 13 相似,液滴也只发生了变形过程。由获得的流场分布可知,在保护管 4 面开口结构下,气流在 X、Z 方向上对液体的综合挤压强度要强于 2 面开口的,因此,液滴出现了由垂直方向压缩转变为水平方向压缩(如图 15 中的 b、c 所示)。在垂直方向上压缩力远远大于水平挤压力的状态下,要使得液滴由垂直压缩转变为水平压缩,液滴由球形转变为薄球形的过程中,在表面张力、液体黏性力使液体收缩成球形力的作用下,液滴内部液体必然存在由薄盘形边缘处向球心中部运动的速度。

当液滴转变为水平压缩的薄球形时,液滴在垂直气流、液滴内力的共同作用下,又转变成垂直压缩(如图 15 中的 d、e 所示)。

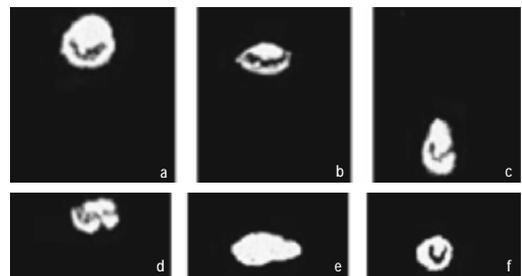


图 15 We=20, d=2.6 mm 液滴变形过程

在 We=30 时, d=2.6 mm 液滴变形破碎过程如图 16 所示。从图中可见,液滴发生与图 9 相似的袋状破碎过程,仅是在液滴的变形过程中出现了 1 次由垂直压缩转变成水平压缩的变化过程。

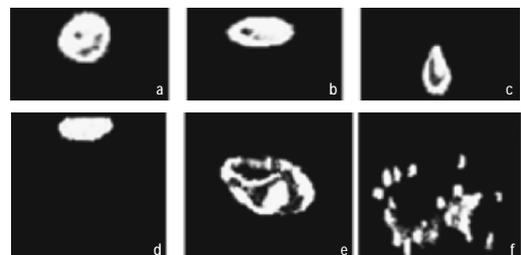


图 16 We=30, d=2.6 mm 液滴变形破碎过程

在 We=60 时, d=2.6 mm 液滴变形破碎过程如图 17 所示。从图中可见,液滴沿垂直方向,发生了上、下 2 个袋状破碎。液滴以垂直方向被压缩的薄盘形,由于为了克服液滴变成薄盘形,内部液体形成了具有一

定的由边缘向球心运动的速度,在较高的水平方向挤压外力作用下,液体向中部运动的速度迅速增大。因此,在形成水平方向被压缩的薄盘形液滴时,液滴中部的液体厚度比上、下2部分液体厚度要薄,如图17中的c、d所示),而不是水平方向挤压外力较低时的普通薄盘形(如图15中的c、图16中的c所示)。该变化过程进一步说明,液滴在沿气流方向被压缩时,液滴内部液体具有由薄盘形边缘向球心运动的特点。

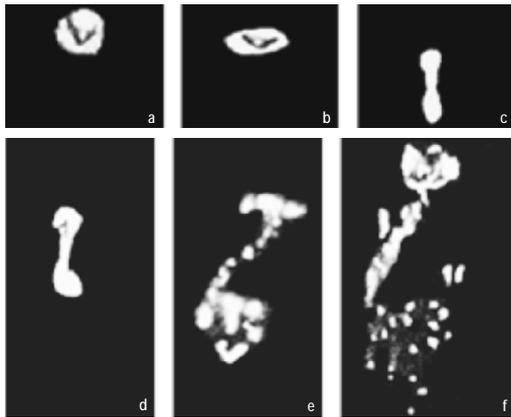


图17 $We=60, d=2.6\text{ mm}$ 液滴变形破碎过程

经过挤压区域形成的哑铃型液滴,气流对液滴沿竖直方向的压缩力主要作用在液块上。液块尺寸小于初始液滴直径的一半,同时,液块也具有一定的竖直方向速度,液块的 $We < 30$ 。因此,液块发生了袋状破碎(如图17中的e、f所示)。

4 结论

通过对不同流场分布结构中液滴发生的变形、破碎过程进行捕获与分析,验证并完善了液体流动理论。研究表明:在液滴的变形过程中,液滴外部液体由前、后驻点向中部边缘处运动,使得液滴沿气流方向被压缩、沿垂直气流方向被拉伸;而液滴内部液体则由薄盘形边缘向球心运动,使得液滴向球形转变;液滴由球形转变为薄盘形的过程中,液体流动速度影响了液滴的破碎模式。

参考文献:

- [1] Han J, Tryggvason G. Secondary breakup of axisymmetric liquid drops (I): acceleration by a constant body force [J]. *Physics of Fluids*, 1999, 11(12):3650-3667.
- [2] Han J, Tryggvason G. Secondary breakup of axisymmetric liquid drops (II): impulsive acceleration [J]. *Physics of Fluids*, 2001, 13(6): 1554-1565.

- [3] Hwang S S, Liu Z, Reitz R D. Breakup mechanisms and drag coefficients of high-speed vaporizing liquid drops [J]. *Atomization Spray*, 1996, 6(3): 353-376.
- [4] Liu Z, Reitz R D. An analysis of the distortion and breakup mechanisms of high speed liquid drops[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1997, 23(4): 631-650.
- [5] Ranger A A, Nicholls J A. Aerodynamic shattering of liquid drops[J]. *AIAA Journal*, 1969, 7(2): 285-290.
- [6] Chou W H, Hsiang L P, Faeth G M. Temporal properties of drop breakup in the shear breakup regime[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1997, 23(4): 651-669.
- [7] Igra D, Takayama K. Investigation of aerodynamic atomization spray[J]. *Atomization Spray* 2001, 11(2): 167-185.
- [8] Igra D, Ogawa T, Takayama K. A parametric study of water column deformation resulting from shock wave loading [J]. *Atomization Spray*, 2002, 12(5-6): 577-591.
- [9] Lee C H, Reitz R D. Modeling the effects of gas density on the drop trajectory and breakup size of high-speed liquid drops [J]. *Atomization Spray*, 1999, 9(5): 497-517.
- [10] Lee C S, Reitz R D. Effect of liquid properties on the breakup mechanism of high-speed liquid drops[J]. *Atomization Spray*, 2001, 11(1): 1-19.
- [11] Khosla S, Smith C E, Throckmorton R P. Detailed understanding of drop atomization by gas crossflow using the volume of fluid method[C] //ILASS Americas, 19th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Toronto, Canada,2006.
- [12] Simmons H C. The correlation of drop-size distributions in fuel nozzle sprays part I: the dropsize/volume-fraction distribution [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1977, 99(3):309-314.
- [13] Theofanous T G, Li G J, Dinh T N. Aerobreakup in rarefied supersonic gas flows [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, 126(4): 516-527.
- [14] Joseph D D, Belanger J, Beavers G S. Breakup of a liquid drop suddenly exposed to a high-speed airstream [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1999, 25(6):1263-1303.
- [15] Zhao H, Liu H F, Cao X K, et al. Breakup characteristics of liquid drops in bag regime by a continuous and uniform air jet flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*,2011, 37(5):530-534.
- [16] Guildenbecher D R, Lopez-Rivera C, Sojka P E. Secondary atomization[J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 46(3):371-402.
- [17] 金仁瀚,刘勇,朱冬清,等.连续均匀气流中单液滴破碎特性试验[J].*推进技术*,2016,37(2):273-280.
JIN Renhan, LIU Yong, ZHU Dongqing, et al. Experimental investigations of breakup characteristic of single droplet in continuous uniform airflow [J]. *Journal of Propulsion Technology*,2016,37(2): 273-280.(in Chinese)
- [18] 金仁瀚,刘勇,冯志鹏,等.双旋流燃烧室单头部油雾特性实验研究[J].*航空动力学报*,2014,29(2):250-258.
JIN Renhan, LIU Yong, FEN Zhipeng. Experimental investigations of spray characteristic of single head of dual-swirl cup combustor [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014,29(2):250-258.(in Chinese)

(编辑:张宝玲)