

文章编号: 1006-9941(2017)04-0342-06

# 煤油凝胶液滴破碎时空特性实验研究

曹钦柳, 封锋, 邓寒玉

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了探究煤油凝胶液滴破碎的时间和空间分布特性, 采用高速摄像机拍摄破碎过程, 获得在不同气流速度下煤油凝胶液滴的破碎特征、流动参数对破碎时间和破碎区域的影响。结果表明: 随着韦伯数( $We$ )增大, 煤油凝胶液滴依次发生与煤油(牛顿流体)液滴相同的破碎模态, 且模态转换  $We$  随着胶凝剂含量的增加而提高。三种煤油凝胶的总破碎时间和初始破碎时间的比值( $T_{tot}/T_{ini}$ )均随奥内佐格数( $Oh$ )的升高而降低, 且均趋近于牛顿流体的该值(3.125)。在破碎结束时, 横向破碎区域随着  $We$  数的升高而扩大, 且胶凝剂含量越低范围越大; 纵向破碎区域随着  $We$  数升高会扩大到一个极值, 胶凝剂含量为 1% 和 2% 的煤油凝胶, 破碎区域和初始液滴直径的比值趋于 20, 胶凝剂含量为 3% 时, 该值趋近 17。

**关键词:** 煤油凝胶; 二次雾化; 破碎模态; 破碎时间; 破碎区域

**中图分类号:** TJ55; V231.2

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.04.012

## 1 引言

凝胶推进剂与液体推进剂相比具有易储、低毒、高能量密度等优点, 其具有的推力可调能力非常合适在智能战术导弹、转向与姿控系统、飞行员座椅弹射系统及吸气式推进系统上应用<sup>[1]</sup>。与液体推进剂相似, 凝胶推进剂在组织燃烧之前需经过充分的雾化以提高其燃烧效率。单液滴的二次雾化在增加表面积、提高燃料和周围气体之间的热量与质量传递方面扮演着重要作用, 因此研究单液滴的破碎机理显得尤为重要<sup>[2]</sup>。Faeth 等分别对水、乙醇、甘油液滴破碎中的袋状破碎<sup>[3]</sup>、多模态破碎<sup>[4]</sup>和剪切破碎<sup>[5]</sup>进行了时间特性研究, 探究在不同破碎模态下液滴破碎后的直径分布, 分析了三种模态下索特平均直径(SMD)、液滴被剥离的质量分数和初始液滴的流向位置等参数随时间的变化。Hsiang<sup>[6]</sup>等总结了牛顿流体液滴破碎模态与韦伯数( $We$ )、奥内佐格数( $Oh$ )之间的关系。对于非牛顿流体, Arcoumanis<sup>[7-8]</sup>等对聚合物溶液进行实验研

究, 分析了液滴的几何形态变化和破碎时间。Joseph<sup>[9-10]</sup>采用激波管, 研究了粘弹性非牛顿流体液滴在马赫数 2-3 时的破碎过程, 分析比较了不同材料性质对液滴破碎的影响并进行了 Reyleigh-Taylor 不稳定性分析。Rivera<sup>[11]</sup>和 Snyder<sup>[12]</sup>分别对非弹性和弹性非牛顿流体液滴在较低  $We$  数下的破碎过程进行了实验研究, 并应用 Taylor-analogy-breakup(TAB)模型对液滴破碎过程进行了数值模拟。国内, 邓寒玉等<sup>[13]</sup>对 TAB 模型进行扩展并应用于凝胶液滴中, 计算了不同空气动力和物性参数条件下的初始破碎时间和临界特征。Zhao<sup>[14]</sup>分析了水煤浆的雾化特性, 提出了选择新的参数来区分破碎模态。以上研究对非牛顿流体液滴的研究尚不充分且集中于现象表述和建模仿真, 对其特殊的流变特性所导致的破碎特性的研究仍有待深入。

本研究以煤油凝胶为研究对象, 利用高速摄影系统对均匀气流作用下的煤油凝胶单液滴的破碎过程进行捕捉和记录, 获得了不同气流速度下液滴的破碎特征, 得到不同胶凝剂含量的凝胶液滴模态转换  $We$ , 拟合总破碎时间与初始破碎时间的比值和  $Oh$  数的关系, 探究  $We$  数对凝胶液滴破碎长度的影响。

## 2 实验系统及方法

### 2.1 实验系统

为本实验搭建的实验系统如图 1 所示。气罐中的

收稿日期: 2016-11-07; 修回日期: 2017-01-12

基金项目: 航天科技创新基金(CASC03-02); 中央高校基本科研业务费专项基金(30920140112001); 江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划(KYLX16\_0474)

作者简介: 曹钦柳(1993-), 男, 博士生, 主要从事凝胶推进剂的雾化与燃烧。e-mail: 115101000190@njjust.edu.cn

通信联系人: 封锋(1982-), 男, 副教授, 主要从事膏体(凝胶)推进技术研究。e-mail: nust203@aliyun.com

压缩气体流经控制阀和流量计后由喷管喷出,形成稳定气流。液滴生成器生成的煤油凝胶液滴自由落体进入横向气流中发生破碎。高速摄影机捕捉该过程并传输到计算机。高速摄像机型号为 SpeedSense 9072,其参数如下:图像分辨率为 1280×800,拍摄频率为 14435 Hz。

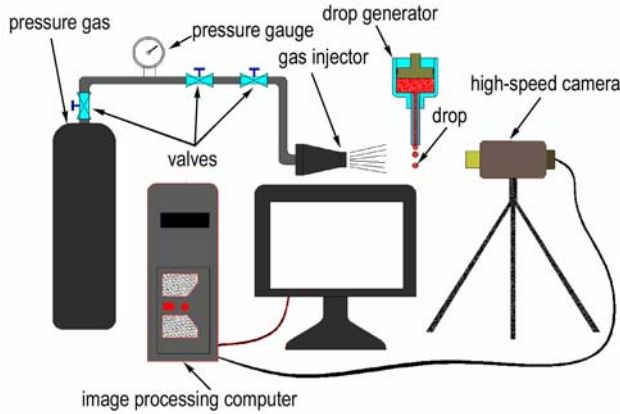


图1 实验装置系统原理图

Fig.1 System schematic of experimental devices

## 2.2 煤油凝胶及实验参数

本研究选取德国瓦克 T40 亲水性纳米  $\text{SiO}_2$  作为胶凝剂进行煤油凝胶的制备,其比表面积为  $360 \sim 440 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,平均粒径为 7 nm,在煤油中的分散采用高速剪切分散方式。将纳米  $\text{SiO}_2$  加入到煤油中,适当搅拌后,采用高速剪切分散 3~5 min,即可形成煤油凝胶<sup>[15]</sup>。

目前,较常采用幂律本构模型表征凝胶推进剂粘性与剪切速率的关系,其本构关系为<sup>[13]</sup>:

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

式中, $\eta$  为表观粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $K$  为稠度系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ ;

$\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $n$  为流动指数。

采用美国 Bookfield DV-3T 流变仪测定煤油凝胶的流变特性,图 2 给出了 1%、2% 和 3% 三种不同胶凝剂含量的煤油凝胶试样的表观粘度与剪切速率之间的关系。

煤油凝胶的表面张力  $\sigma$  可用滴重法进行测量。计算  $\sigma$  的公式可表示为<sup>[16]</sup>:

$$\sigma = \frac{mgF}{r} \quad (2)$$

式中, $r$  为管口半径,  $\text{m}$ ;  $F$  为修正系数,与液滴的大小和管口的半径有关。煤油凝胶的表面张力可以煤油为

基准,通过类比获取。

本实验采用的煤油及煤油凝胶液滴物性参数如表 1 所示。

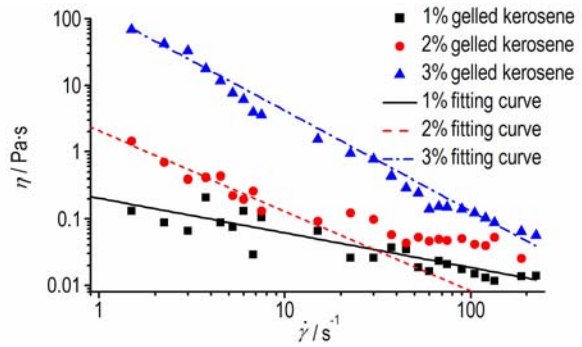


图2 不同剪切速率下煤油凝胶的表观粘度

Fig.2 Viscosity of gelled kerosene at various shear rates

表1 实验工质的物性参数

Table 1 Physical property parameters of working media

material	density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	viscosity / $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$	surface tension / $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	initial diameter / $\text{mm}$
kerosene	690.4	0.0024	0.0263	2.23-3.0
gelled kerosene	1% 698.1	$0.2 \cdot \dot{\gamma}^{-0.52}$	0.0289	2.23-3.0
	2% 716.4	$2.06 \cdot \dot{\gamma}^{-1.2}$	0.0262	2.26-3.0
	3% 722.5	$130.4 \cdot \dot{\gamma}^{-1.5}$	0.0244	2.3-3.0

$We$  数和  $Oh$  数是影响破碎形态和破碎特性的重要参数,其定义为<sup>[17]</sup>:

$$We = \frac{\rho_g U_0^2 d_0}{\sigma}, Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho_d d_0 \sigma}} \quad (3)$$

式中, $\rho_g$  和  $\rho_d$  分别为气流和液滴的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;

$U_0$  为初始气液相对速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $d_0$  为液滴直径,  $\text{m}$ 。

对煤油凝胶而言, $\eta$  是  $\dot{\gamma}$  的函数,赵辉在文献[18]中引入系数  $\varphi$ ,给出了水煤浆的剪切速率表达式:

$$\dot{\gamma} = \varphi \frac{U_0}{d_0} \quad (4)$$

其得到的拟合值为  $\varphi = 2.9 \times 10^{-3}$ 。在流变特性方面,煤油凝胶与水煤浆表现出相似的“剪切稀化”特性,本研究借用该值计算  $Oh$  数。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 液滴破碎形态

与煤油类似,随着  $We$  数的增加,煤油凝胶液滴依次经历了袋形破碎、多模态破碎、剪切剥离和灾型破碎

等阶段。这几种模态的破碎过程如图 3 所示。

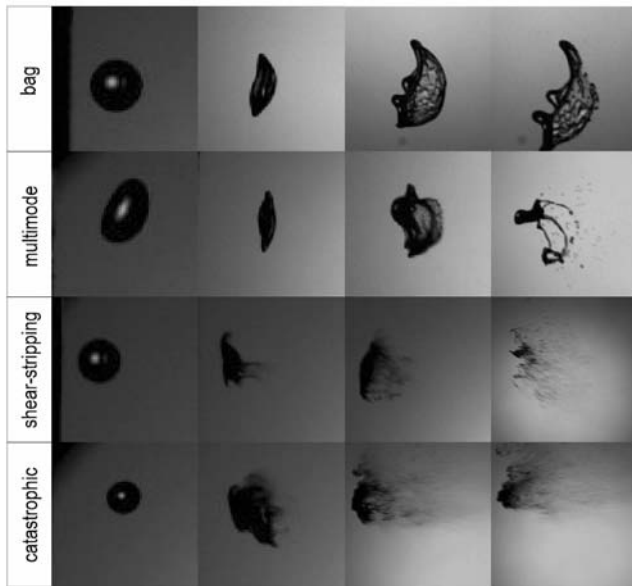


图 3 煤油凝胶液滴破碎的典型图像

Fig. 3 Typical shadowgraphs of gelled kerosene drop breakup

在横向气流中,球形液滴受到大于自身粘性力和表面张力的气动力作用下先发生形变后破碎成更小的液滴,并随着  $We$  数的提高依次呈现出上述几种破碎模态。实验主要分析煤油凝胶液滴与煤油液滴破碎形态的异同及归纳煤油凝胶的模式转换  $We$  数。

如图 3 中袋形破碎模态所示,煤油凝胶液滴破碎过程与煤油相似,即变形、袋子和袋口基环生成、袋子破碎、环破碎<sup>[3]</sup>。图 4 为煤油和煤油凝胶液滴在袋形破碎模态下袋子发生破碎前的图像。从图 4 可知,两者不同之处在于:凝胶液滴袋子发展程度较煤油不足,袋子未充分发展即发生破碎,且胶凝剂含量越高该现象越显著;凝胶液滴在袋子发展阶段,液膜上清晰呈现网状液丝,这与文献[17]描述的非牛顿流体在袋形破碎时形成的丝网结构相符。

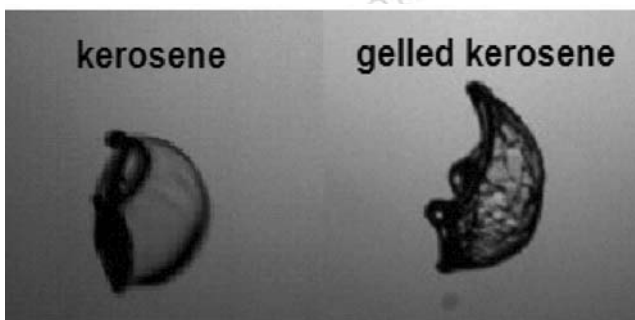


图 4 煤油和煤油凝胶的袋形破碎

Fig. 4 Bag breakup of kerosene and gelled kerosene

多模态破碎又称袋蕊形破碎,在如袋形破碎生成袋口基环后,在袋子中央形成一束蕊状液核,随后液核在袋子破碎后与之分离,大量液滴从液核上剥离,最终基环和液核破碎成小液滴<sup>[4]</sup>。图 5 为煤油和煤油凝胶液滴在多模态破碎中袋子破碎前的图像。从图 5 可以看到,除了存在和袋形破碎类似的发展不充分和丝网结构外,液核占初始液滴的体积分数比牛顿流体大,原因是凝胶液滴的表现粘性和屈服应力较大,使得其流动性较弱,大量的体积仍集聚在液核上。

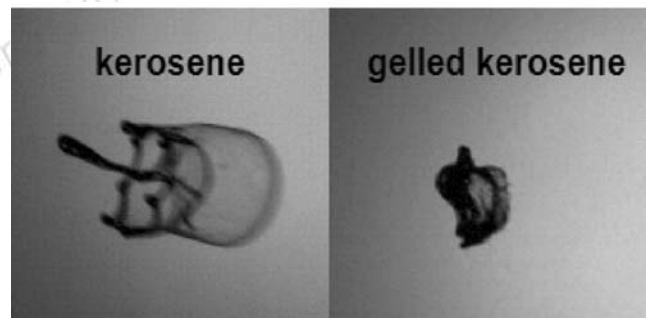


图 5 煤油和煤油凝胶的多模态破碎

Fig. 5 Multimode breakup of kerosene and gelled kerosene

煤油凝胶的剪切剥离和灾型破碎模态与煤油较为类似,此时与气动力相比,液滴粘性力和表面张力的影响相对较弱。而就这两种破碎模态而言,其初期阶段也无明显区别,都是在气流作用下,有小液滴从主液滴表面剥离出来。不同之处在于,剪切剥离模态下,这种剥离效应逐步发展,更多的小液滴剥离出来,直至中心液核发生破碎;灾型破碎模态下,在小液滴剥离的同时,主液滴迎风面上的 Reyleigh-Taylor 不稳定波在强气动力作用下快速发展,形成波纹状表面,不稳定波不断发展致使液滴破碎<sup>[9]</sup>。这也是本研究区分这两种模态的依据。

基于实验结果比较了煤油和三种不同胶凝剂含量的煤油凝胶的模式转换  $We$  数,如图 6 所示,由图 6 可

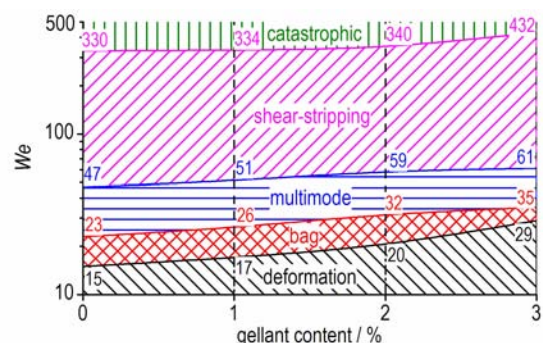


图 6 煤油和煤油凝胶转换  $We$  数的比较

Fig. 6 Comparison of transition  $We$  between kerosene and gelled kerosene



知,胶凝剂的加入使得煤油凝胶的流变特性发生改变,需要更高的气流速度才能转变破碎模态,胶凝剂含量越高,各个模态的转换  $We$  数均越高。特别是对于 3% 胶凝剂含量的煤油凝胶,其  $Oh$  数达到  $10^{-1}$  以上数量级后,模态转换  $We$  数迅速上升,破碎难度也越大。

### 3.2 $Oh$ 数与破碎时间的关系

液滴的破碎时间是表征液滴破碎过程的重要参数。其中初始破碎时间 ( $T_{ini}$ ) 指液滴变形超过扁平椭圆形所需要的时间,总破碎时间 ( $T_{tot}$ ) 指所有破碎终止的时间<sup>[19]</sup>。为研究液滴的破碎时间特征,Ranger 和 Nicholls 对时间进行了无量纲化处理<sup>[20]</sup>:

$$T = t \frac{U_0}{\varepsilon^{0.5} d_0} \quad (5)$$

式中,  $T$  为定义的无量纲时间;  $t$  为真实时间, s; 密度比  $\varepsilon = \rho_d / \rho_g$ ;  $d_0$  为液滴初始直径, m。

Hsiang 和 Faeth 给出了初始破碎时间和  $Oh$  数的关系<sup>[20]</sup>:

$$T_{ini} = 1.6 / (1 - Oh/7) \quad We < 10^3, Oh < 3.5 \quad (6)$$

式(6)表明,在一定范围内,初始破碎时间是  $Oh$  数的单值函数。相似的,文献[20]给出了总破碎时间与  $Oh$  数的关系:

$$T_{tot} = 5 / (1 - Oh/7) \quad We < 10^3, Oh < 3.5 \quad (7)$$

将式(7)与式(6)相除可知,对于牛顿流体,破碎总时间与破碎初始时间的比值为 3.125,是与  $Oh$  数无关的常数,即液滴在受不同剪切速率载荷下表观粘度不发生变化。而对于煤油凝胶这类非牛顿流体,因其“剪切稀化”的特性,在发生变形和破碎时,受到不断变化的气动力作用,表观粘度会不断变化,致使液滴发生变形的时间、液滴破碎的时间以及各自占破碎全程的比例,均会发生变化。

图 7 为煤油凝胶液滴破碎总时间与初始破碎时间的比值和  $Oh$  数之间关系的实验结果和拟合曲线,得到式(8)所示的  $T_{tot}/T_{ini}$  和  $Oh$  数经验关系式。

$$\begin{cases} 1\%: T_{tot}/T_{ini} = 9.92 \times 10^{-7} \times Oh^{-3.8} + 3.11 & (0.024 < Oh < 0.046) \\ 2\%: T_{tot}/T_{ini} = 4.51 \times 10^{-3} \times Oh^{-1.48} + 3.41 & (0.015 < Oh < 0.085) \\ 3\%: T_{tot}/T_{ini} = 0.026 \times Oh^{-2.93} + 2.96 & (0.23 < Oh < 3) \end{cases} \quad (8)$$

从图 7 中可以看到,三种煤油凝胶的  $T_{tot}/T_{ini}$  值分别都随着  $Oh$  数的增大而减小,  $T_{tot}/T_{ini}$  值的减小即从  $T_{ini}$  时刻到  $T_{tot}$  时刻这段时间相对缩短,与凝胶液滴的“粘性越大越难雾化”和“剪切稀化”理论相符。随着  $Oh$  数的增大,  $T_{tot}/T_{ini}$  值会减小到一个的极值,即上式

中的 3.11、3.41 和 2.96,这三个值与文献[20]中牛顿流体的  $T_{tot}/T_{ini}$  值 3.125 很接近。由此说明,凝胶液滴不能无限被稀化,存在一个从  $T_{ini}$  时刻到  $T_{tot}$  时刻的最短时间来完成液滴的破碎过程;同时,该结论也可以用来推测煤油凝胶液滴发生破碎后,其流变特性是更趋近于煤油的。

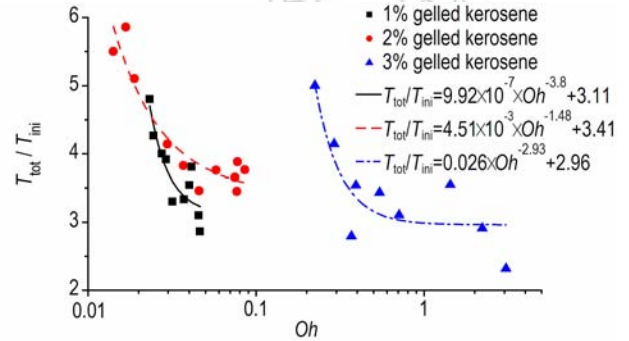


图 7 不同  $Oh$  数下  $T_{tot}$  和  $T_{ini}$  的比值

Fig. 7 The ratio of  $T_{tot}$  and  $T_{ini}$  at various  $Oh$

### 3.3 $We$ 数对液滴破碎区域的影响

液滴在气动力作用下发生破碎的过程中,其顺气流方向和垂直于气流方向的液滴分布不断变化。为考察  $We$  数对液滴破碎分布区域的影响,本研究选取破碎结束时的液滴分布区域作为研究对象,如图 8 所示。

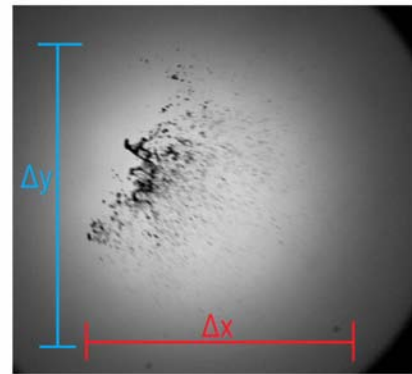


图 8  $T_{tot}$  时刻液滴分布区域

Fig. 8 Particle distribution region at  $T_{tot}$

图 9 为顺气流方向液滴分布区域与  $We$  数之间关系的实验结果。从图 9 中可以看出,三种胶凝剂含量的凝胶随着  $We$  数的升高,横向破碎区域范围均增大,且增长速率保持一致。就不同胶凝剂含量的凝胶而言,含量越低,横向破碎区域越长。文献[3]探究了袋形破碎中破碎后最远的液滴 (most remote drop) 和初始液滴 (parent drop) 随破碎时间运动的横向距离,这两个距离的差值即本文讨论的横向破碎长度。

文献[3]中,液气密度比  $\rho_d/\rho_g$  分别为 890 和 630 时,在破碎结束时,横向距离分别约为初始液滴直径的 20 倍和 18 倍。本文研究的液气密度比在 540 ~ 560 之间,低于文献[3]的值,所得结果也相对较低,趋势基本一致,具有一定参考价值。

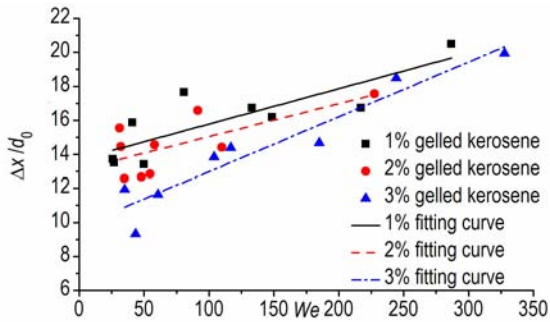


图 9 不同 We 数下顺气流方向的破碎区域

Fig. 9 Streamwise breakup region at various We number

对于垂直于气流方向的尺寸,文献[3]给出了袋形破碎中,在袋环破碎时,环口的直径约为初始液滴直径的 7 倍,这与本实验中煤油液滴破碎时的数据相符,说明实验有一定可信度。在煤油凝胶破碎中,由于凝胶较大的粘性,袋子发展不充分,破碎时环口直径均小于该值。图 10 给出了在破碎结束时,垂直于气流方向的液滴分布区域。从图 10 可以看出,三种凝胶的纵向破碎范围都随 We 数的升高而扩大,但与横向破碎区域不同的是,纵向的区域并非无限扩大。对于 1% 和 2% 胶凝剂含量的煤油凝胶,破碎区域和初始液滴直径的比值趋于 20, 3% 胶凝剂含量的煤油凝胶由于其 Oh 数较大,粘性力较强,该值趋近 17。

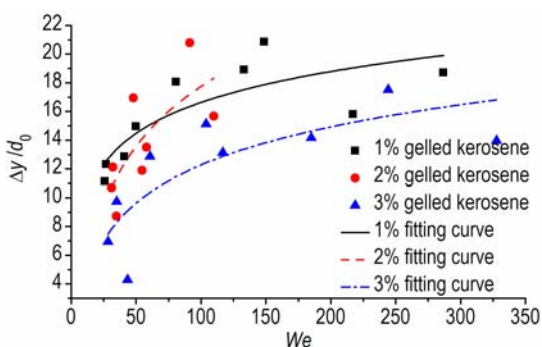


图 10 不同 We 数下垂直气流方向的破碎区域

Fig. 10 Cross-stream breakup region at various We number

## 4 结 论

实验分析了不同胶凝剂含量的煤油凝胶液滴的破

碎过程,得到如下结论:

(1) 随着 We 数增大,煤油凝胶液滴依次发生与煤油(牛顿流体)液滴相同的袋形、多模态、剪切剥离、灾型破碎等破碎模态,且模态转换 We 数随着胶凝剂含量的增加而提高。

(2) 对于三种不同胶凝剂含量的煤油凝胶,总破碎时间和初始破碎时间的比值  $T_{tot}/T_{ini}$  随着 Oh 数的升高而减小,并且均趋向于一个与牛顿流体相同的值  $T_{tot}/T_{ini}=3.125$ 。

(3) 在  $T_{tot}$  时刻,横向破碎区域均随着 We 数的升高而扩大,且胶凝剂含量越低范围越大,纵向破碎区域也随 We 数的升高而扩大但是存在一个极值,胶凝剂含量为 1% 和 2% 的煤油凝胶,破碎区域和初始液滴直径的比值趋于 20,胶凝剂含量为 3% 时,该值趋近 17。

## 参考文献:

- [1] Rahimi S, Hasan D, Peretz A. Development of laboratory-scale gel propulsion technology[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2015, 20(1): 93-100.
- [2] Cao X K, Sun Z G, Li W F, et al. A new breakup regime of liquid drops identified in a continuous and uniform air jet flow[J]. *Physics of Fluids*, 2007, 19(5): 057103.
- [3] Choua W H, Faeth G M. Temporal properties of secondary drop breakup in the bag breakup regime[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1998, 24(6): 889-912.
- [4] Dai Z, Faeth G M. Temporal properties of secondary drop breakup in the multimode breakup regime[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27(2): 217-236.
- [5] 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.
- [6] Hsiang L P, Faeth G M. Drop deformation and breakup due to shock wave and steady disturbances[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1995, 21(4): 545-560.
- [7] Arcoumanis C, Khezzar L, Whitelaw D S, et al. Breakup of newtonian and non-newtonian fluids in air jets[J]. *Experiments in Fluids*, 1994, 17(6): 405-414.
- [8] Whitelaw D S, Whitelaw J H, Arcoumanis C. Breakup of droplets of newtonian and non-newtonian fluids[J]. *Atomization & Sprays*, 1996, 6(3): 245-256.
- [9] Joseph D D, Beavers G S, Funada T. Rayleigh-Taylor instability of viscoelastic drops at high weber numbers[J]. *J Fluid Mech*, 2002, 453: 109-132.
- [10] Joseph D D, Belanger J, Beavers GS. Breakup of a liquid drop suddenly exposed to a high-speed airstream[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1999, 25: 1263-1303.
- [11] Rivera C L. Secondary breakup of inelastic non-newtonian liquid drops[D]. West Lafayette: Purdue University, 2010.
- [12] Snyder S, Sojka P E. Secondary atomization of elastic non-newtonian drops[C]//Nashville: 24th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2011.
- [13] 邓寒玉, 封锋, 武晓松, 等. 基于扩展 TAB 模型的凝胶液滴二次雾化特性研究[J]. *推进技术*, 2015, 36(11): 1734-1740.

- DENG Han-yu, FENG feng, WU Xiao-song, et al. Characteristics of second atomization for gelled droplet based on extended TAB model[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(11): 1734-1740.
- [14] Zhao H, Liu H F, Xu J L, et al. Secondary breakup of coal water slurry drops[J]. *Physics of Fluids*, 2011, 23(11): 113101.
- [15] 曹琪, 封锋, 武晓松, 等. RP-1 煤油凝胶的制备与性能表征[J]. 推进技术, 2016, 37(5): 979-984.
- CAO Qi, FENG Feng, WU Xiao-song, et al. Preparation and performance characterization of RP-1 jet fuel gel[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(5): 979-984.
- [16] 郭瑞. 表面张力测量方法综述[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(4): 62-64.
- GUO Rui. Summarization of surface tension measurement[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2009, 36(4): 62-64.
- [17] Guildenbecher D R, López-Rivera C, Sojka P E. Secondary atomization[J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 46(3): 371-402.
- [18] 赵辉. 同轴气流式雾化机理研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- ZHAO Hui. Study on the mechanism of coaxial air-blast atomization[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.
- [19] Nicholls J A, Ranger A A. Aerodynamic shattering of liquid drops[J]. *Aiaa Journal*, 1969, 7(2): 285-290.
- [20] Hsiang L P, Faeth G M. Near-limit drop deformation and secondary breakup[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, 18(5): 635-652.

## Temporal and Spatial Characteristics of Gelled Kerosene Droplet Breakup

CAO Qin-liu, FENG Feng, DENG Han-yu

(School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to investigate the temporal and spatial distribution characteristics of gelled kerosene, a high speed camera was used to shoot the breakup process. The breakup characteristics of gelled kerosene at various gas velocities, the effects of flow parameters on breakup time and breakup region were obtained. Results indicate that the same breakup morphology as kerosene (Newtonian fluid) droplet occurs to gelled kerosene droplet with the increase of Weber number ( $We$ ) and the transition  $We$  elevates with the increase of gellant content. For each kind of gelled kerosene, the ratio of total breakup time and initial breakup time ( $T_{tot}/T_{ini}$ ) decreases with the increase of Ohnesorge number ( $Oh$ ) and tends towards the value of Newtonian fluid(3.125). At the end of breakup, streamwise breakup region widens with the increase of  $We$  and the region is wider with the lower gellant content. Cross-stream breakup region widens to a maximum value with the increase of  $We$  number. The ratio of cross-stream breakup region and initial diameter tends towards 20 for the gelled kerosene of 1% and 2% gellant content, while the value tends to 17 when gellant content is 3%.

**Key words:** gelled kerosene; secondary atomization; breakup morphology; breakup time; breakup region

**CLC number:** TJ55; V231.2

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.04.012