

连续均匀热气流中液核/袋状破碎特性实验

金仁瀚¹, 刘勇², 王锁芳²

(1. 盐城工学院 汽车工程学院, 江苏 盐城 224001;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 为了获得热气流中单液滴液核/袋状破碎特性,采用高速摄像机对液滴变形、破碎过程进行了捕获。实验设计工况下所得结果表明:①液核/袋状破碎过程是液滴中液体流动与外界气动力共同作用下发生的,可以分为伞形破碎与勺形破碎;②液滴初始直径减小、气流温度增加,都可以降低液滴发生液核/袋状破碎所需最小气动力;③液滴破碎特征时间,随气动力增加呈负增长变化趋势,其值与变化梯度都随液滴初始直径增加而增大;④子液滴质量分数随气动力增加而增加,且随液滴初始直径增加而减小;⑤子液滴群质量分数的空间离散度都随气动力增加而增加。

关 键 词: 液滴破碎; 雾化; 热气流; 喷雾; 高速摄像机

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Experimental investigations on breakup characteristic of single droplet in the core/bag breakup regime in the continuous uniform heating airflow

JIN Ren-han¹, LIU Yong², WANG Suo-fang²

(1. College of Automotive Engineering,

Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224001, China;

2. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,

College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to obtain characteristics of single droplet deformation and breakage in a continuous and uniform air jet flow, the high-speed cameras were applied to measure the single droplet deformation and breakage. In the experimental conditions, experimental results show that: (1) The process of droplet deformation and breakage in the core/bag breakup regime is caused by the combination effects of liquid-flow and external aerodynamics. It can be divided into umbrella-type breakup regime and dipper-type breakup regime. (2) The reduction of original diameters of droplet and the increase of airflow temperature could decrease the minimum requirements of aerodynamic force on the core/bag breakup. (3) The characteristic time of droplet breakup has a negative relationship with the aerodynamics, while its value and change gradient are both positively associated with the original droplet diameter. (4) The percentage of sub-droplet quality raises with the increase of aerodynamics, but decreases with the increase of droplet original diameter. (5) The spatial dispersion of

收稿日期: 2015-06-01

作者简介: 金仁瀚(1985—),男,讲师,博士,研究领域为航空发动机燃烧室燃油雾化。E-mail: kingrenhan@163.com

引用格式: 金仁瀚,刘勇,王锁芳.连续均匀热气流中液核/袋状破碎特性实验[J].航空动力学报,2017,32(2):280-288. JIN Ren-han, LIU Yong, WANG Suofang. Experimental investigations on breakup characteristic of single droplet in the core/bag breakup regime in the continuous uniform heating airflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 280-288.

quality percentage of sub-droplet increases with the rise of aerodynamics.

Key words: droplet breakup; atomization; heated air flow; sprays; high-speed cameras

在航空发动机燃烧室中,通过燃油的二次雾化可以提高气相与液相的接触面积,从而增强了气相与液相之间的传热、传质作用,提高了燃料的燃烧效率.因此,单液滴在热气流中的破碎过程成为了燃油二次雾化过程研究中的重要课题之一.

目前主要通过激波管法^[1]与喷嘴射流法^[2]对气流中单液滴的破碎过程进行实验研究,实验结果显示^[3],常温气流中 Weber 数($We = \rho_a U_0^2 d_0 / \sigma$, 其中 ρ_a 为空气密度, d_0 为液滴的原始粒径, U_0 为液/气相对速度, σ 为液体表面张力系数)与 Ohnesorge 数($Oh = \mu_l / (\rho_l d_0 \sigma)^{1/2}$, μ_l 为液体的黏度)控制单液滴的破碎形态.当 $Oh < 0.1$, We 与单液滴破碎形态的关系如表 1 所示^[4].

表 1 不同液滴破碎模式的 We 范围 ($Oh < 0.1$)
Table 1 Transition We for newtonian drops ($Oh < 0.1$)

模式	数值范围
振荡破碎	$0 < We < 11$
袋状破碎	$11 < We < 35$
多模式破碎	$35 < We < 80$
剪切破碎	$80 < We < 350$
爆炸破碎	$We > 350$

单液滴多模式破碎机理方面的研究仍然存在着相互对立的观点:一部分研究人员认为多模式破碎形态发生于气流动力学作用与气流的剪切作用相当^[5-6];而一部分研究人员则指出空气动力作用的不同是多模式破碎形态形成的主要因素^[7-9].为了解释液滴在不同的气动力范围内分别发生袋状破碎形态与剪切破碎形态这一现象,又提出了不同的观点:①气动力、变形阻力作用下液滴中液体运动机理^[10];②Rayleigh-Taylor instability/Aerodynamic drag 机理^[11-12].相关研究表明 Rayleigh-Taylor instability/Aerodynamic drag 机理仍然有明显的缺陷:① We 较小时,气流作用下液滴的外部并没有捕获到明显的波动现象;②波长对液滴几何破碎形态的影响并不明显.由于实验设备的限制,目前还没有对液滴内液体流动机理的合理性进行实验验证.

文献[13]通过实验研究了液核/袋状破碎形

态下单液滴的破碎特性,建立了 We 、母液滴的速度与液滴破碎过程时间的经验关系,并阐述了韦伯数与液滴破碎后生成的子液滴群平均粒径的变化规律.文献[14]的研究表明,液滴粒径较大时,液滴先发生了液核/袋状的破碎形态,由于液核粒径仍然较大继续发生袋状的破碎形态.

文献[3]指出,目前对液滴液核/袋状破碎机理认识仍然存在较大分歧,对热气流中单液滴变形、破碎过程以及破碎后子液滴分布特性方面的研究涉及较少.而热气流中单液滴变形、破碎过程及其子液滴分布特性又直接影响燃烧室内燃油二次雾化质量,进而影响燃烧室燃烧性能.因此,本文通过高速相机对均匀热气流中单液滴液核/袋状破碎模式的破碎过程及其破碎后生成的子液滴进行采集,运用图像数据处理的相关技术对液滴破碎后生成子液滴的图像进行数据提取^[15-16],获得热气流中单液滴液核/袋状破碎时间特性及其破碎区域中子液滴分布特性.

1 实验装置及测量方法

1.1 实验系统

压气机产生的常温气流通过水平并列布置的双管道加热装置,温度调节装置通过对电热丝的控制决定管道中气流的温度;热气流通过整流栅后进入图像数据采集区域(如图 1 所示).液滴以垂直于水平方向的方式进入图像数据采集区域,并发生了液核/袋的状破碎形态.高速相机捕获了液滴的液核/袋状破碎形态,通过对采集图像中的相关数据进行提取,从而获得液核/袋状破碎形态的时间特征量、子液滴的空间坐标及其粒径.

液滴输出管的出口直径、液滴输出管抖动的强度以及其中液体运动的快慢控制了管口处生成液滴的粒径,有如下关系^[17]:

$$d = \left(\frac{6Q}{\pi f} \right)^{1/3} \tag{1}$$

本文基于上述理论建立了能够产生不同粒径的液滴生成装置,其结构如图 2 所示.图中液滴输出管的抖动的强度由 1 电动机、2 偏心轮、3 速度调节装置共同调节;液滴输出管中液体流动速度由推动液体速度均匀的 4 微量输液泵决定;液滴

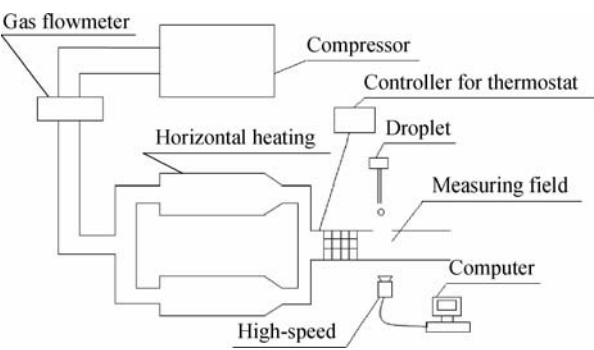


图 1 液滴破碎过程实验系统简图

Fig.1 System schematic of droplet deformation and breakup process

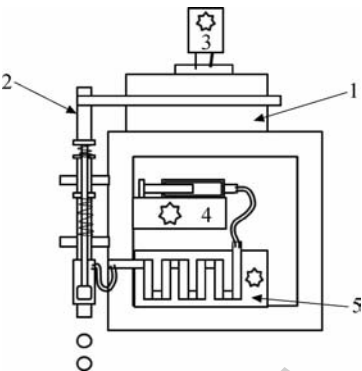


图 2 液滴生成装置简图

Fig.2 Droplet generator system schematic

输出管中液体温度由 5 电加热系统调节。

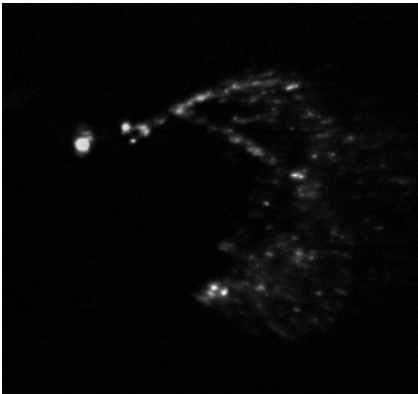
1.2 数据处理方法

捕获液滴变形、破碎过程时，高速摄影仪，像素为 2336×1728 ，最高每秒拍摄 1500 帧，最小曝光时间 $1\mu\text{s}$ 。为了获得不同状态下子液滴的空间粒径分布数据，采用单液滴图像数据提取程。

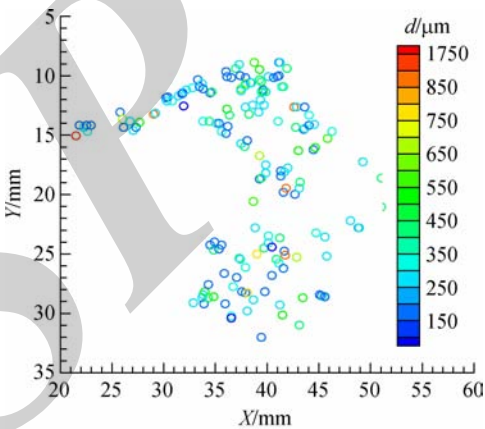
液滴的边缘分辨率；确定导入程序中的图像序对子液滴分布图像（如图 3(a) 所示）进行相关操作：运用线性的灰度拉伸方法增强图像中子的像素尺度标准，并通过罗伯茨算子获得图像中所有子液滴的边缘数据^[18]，通过计算获取破碎区域中子液滴群粒径的空间分布（如图 3(b) 所示）。

热气流中，单液滴破碎实验工况如表 2 和表 3 所示。热气流作用下，液滴变形、破碎过程中液滴表面张力系数、黏度随液滴温度增加不断发生改变，而以现有测量技术，还难以获得其在变形过程中瞬时变化规律。以 We, Oh 为参考量已经不再适合用于热气流中液滴变形、破碎特性研究中去。基于 We 定义式，定义变量 $\gamma=\rho_a v^2 d$ ，（单位： N/m ），用于研究热气流中液核/袋状破碎过程中不同特征量随其变化规律，其大小可以反应液滴

所受气动力的大小。



(a) 子液滴的原始粒径空间分布图像



(b) 处理后子液滴粒径空间分布

图 3 子液滴空间粒径分布处理方法

Fig.3 Treatment of distribution of particle size

表 2 液滴参数

Table 2 Droplet parameters

液滴类型	液滴直径/mm	表面张力系数/(N/m)	密度/(kg/m ³)
航空煤油	2.2, 2.64, 3.03	0.024	775

表 3 气流参数 ($Oh<0.1$)

Table 3 Experimental parameters ($Oh<0.1$)

空气流量/(L/s)	气流温度/K
19.85~35.6	323, 373, 423, 473, 503

2 实验结果及分析

2.1 液核/袋状破碎过程及其分析

如图 4 及图 5 所示，在液核/袋状破碎阶段，根据几何形态学可以分为液核在中部的伞形破碎与液核在上端的勺形破碎。液核/袋状破碎过程可以分为 3 个阶段：①液滴由球体变成扁球体的变

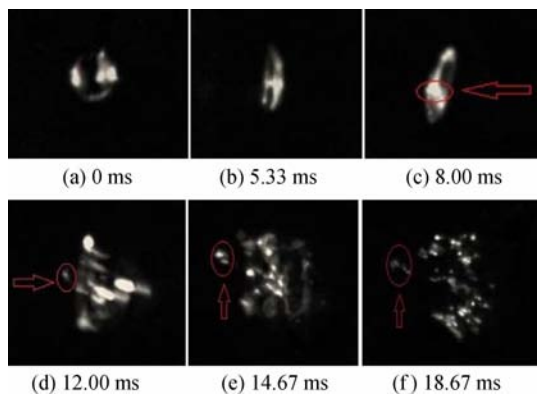


图 4 液滴伞形破碎变形、破碎过程

Fig. 4 Droplet deformation and breakup process in the umbrella-type breakup regime

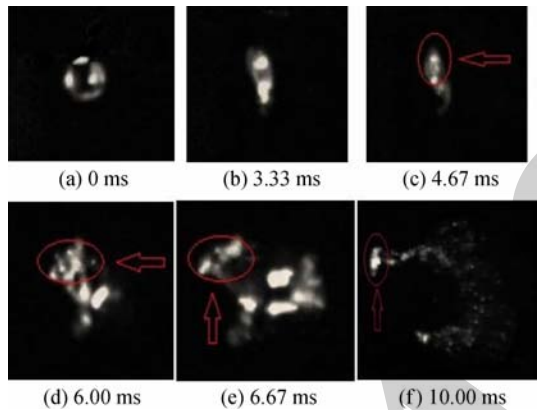


图 5 液滴勺形变形、破碎过程

Fig. 5 Droplet deformation and breakup process in the dipper-type breakup regime

形阶段;②在中部或下部形成袋状液膜,同时在中部或上部伴有液核生成的袋发展阶段;③袋状液膜破碎的袋破碎阶段。

图 6 和图 7 分别为伞形、勺形破碎模式下液滴处于扁球体时液体沿气流方向受力分布、加速度分布示意图。图中箭头方向表示液体受力方向、加速度方向,线长表示液体受力、加速度相对大小。在水平方向气动力挤压作用下,液体由液滴前沿流向边缘处^[10],在液滴边缘处形成液体堆积的环状结构;同时由于球形液滴几何结构特性,在扁球体中心位置处,沿气流方向液滴的厚度相对于其他区域要厚。因此,沿气流方向液滴厚度呈中间、边缘较厚,其他区域较薄的扁球形分布。液滴处于扁球体时,表面曲率较小,其表面受水平方向气动力相差不大。因此液滴表面沿气流方向加速度呈球心、边缘低,其他区域高的分布(如图 6 所示)。在加速度较高区域迅速形成袋状液膜,而在加速度较低区域形成液环、液核。当袋状液膜自身

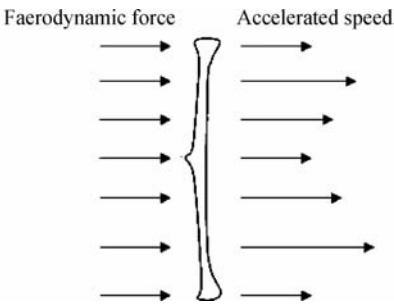


图 6 伞形破碎在扁球形时液体沿气流方向所受气动力、加速度分布示意图

Fig. 6 Distribution of droplet surface dynamics in the umbrella-type breakup regime

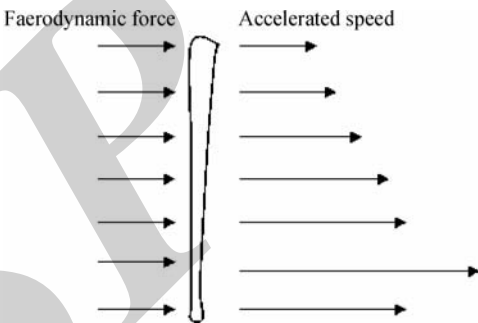


图 7 勺形破碎在扁球形时液体沿气流方向所受气动力、加速度分布示意图

Fig. 7 Distribution of droplet surface dynamics in the dipper-type breakup regime

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,最终导致伞形破碎过程的发生。

由于重力加速度、以及进入气流场先后差异,使得液滴下半部分液体由前沿流向边缘处的速度比上半部分要快。气动力进一步增加,上、下两部分液体流动速度不同造成的液滴沿气流方向厚度分布差异被扩大,从而形成了上部厚、下部薄的扁球形结构(如图 5(b)所示)。因此,在扁球体的下部迅速生成袋状结构液膜,同时下部生成的液膜阻碍了上部液膜的生成与发展,最终导致了勺形破碎模式的发生。

液滴伞形破碎与勺形破碎的变形、破碎过程说明了,液滴内液体流动对液核/袋状破碎模式发生起着重要的作用。瑞丽—泰勒不稳定破碎理论不能合理解释在液核/袋状破碎不同阶段存在的两种不同形态破碎模式,同时子液滴破碎运动方向与气流方向相同,并不与气流方向垂直,也说明了瑞丽—泰勒不稳定破碎不是使得液滴液核/袋状破碎形态发生的主要因素。

液核/袋状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(多模式破碎分为类似袋状破碎与类似剪切破碎两个阶段).由图 8 可知, $d=2.20,2.64\text{ mm}$,液滴发生液核/袋状破碎模式的 We 范围为 $20<We<40$; $d=3.03\text{ mm}$,液滴发生液核/袋状破碎模式的 We 范围为 $22<We<50$. 文献[13]中该模式发生的 We 范围为 $20\leq We\leq 32$ ($d=0.5\sim 0.8\text{ mm}$,采用激波管法),而文献[19]中该模式发生的 We 范围为 $29\leq We\leq 48$ ($d=4.2\sim 4.4\text{ mm}$,采用喷嘴连续射流法).同时,文献[13]中液核/袋状破碎模式主要表现为伞形破碎,仅在 We 上限值,即 $We=32$ 时才出现勺形破碎;而文献[14]中液核/袋状破碎模式主要表现为勺形破碎,在 We 下限值,即 $We=29$ 时就出现了勺形破碎,因其袋状破碎后液核继续发生袋状破碎,文献中将其称为双袋状破碎.因此,并没有根据变形过程中液核位置的不同将液核/袋状破碎模式分为伞形破碎与勺形破碎.结合文献[13-14]中,可知液滴直径减小、气流温度增加都会降低 We 的上、下临界值;液滴初始直径的取值区间不同,液核/袋状破碎模式的表现形式存在较大差异.

气流温度增加,气/液间换热作用增强,减弱了液体表面张力、黏性力对液滴剪切破碎过程发生的阻碍作用,因此气流温度增加,会降低液滴发生液核/袋状破碎的临界 We . 相同气动力下,液滴初始直径增加,气/液相对速度则减小,一方面减弱了气/液间换热作用,从而降低了气流温度对液滴表面张力、黏性力的减弱作用;另一方面增加了液体沿液滴前沿运动到液滴边缘的距离,降低了液滴的变形速率,研究表明气流中液滴破碎模式随液滴变形速率增加依次发生转变^[10]. 因此液滴初始直径减小,同样会降低液滴发生液核/袋状破碎的所需气动力的下界限.

由图 8 还可知,在实验设计的直径范围内,在液核/袋状破碎阶段,随着 We 增加依次发生了伞形破碎、勺形破碎,且伞形破碎存在范围较窄,

勺形破碎发生范围较宽. 气动力较小时,液滴上、下部液体运动速度差异对液滴厚度分布影响较小,所以发生了伞形破碎;在气动力较大阶段,上、下部液滴运动差异对液滴厚度影响较大,从而发生了勺形破碎. 伞形破碎模式、勺形破碎模式的分布进一步说明了气动力与液滴内液体流动差异共同作用是造成液核/袋状破碎的主要原因.

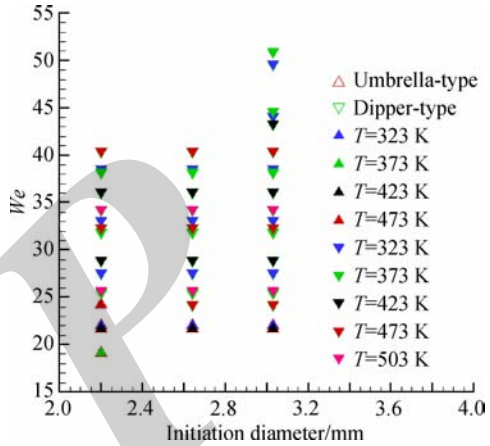


图 8 液滴破碎模式分布图

Fig. 8 Distributions of breakup modes

2.2 γ 对液滴变形、破碎时间的影响

液滴破碎过程的特征时间对液滴运动特性、子液滴群空间分布有着重要影响. 液滴发生液核/袋状破碎过程中的特征时间可分为:①变形时间,液滴进入气流开始到液滴破碎发生所需时间;②破碎时间,液膜开始从液滴表面不断被剥离到该过程结束所需时间;③破碎总时间,液滴进入气流到液滴破碎过程结束所需总时间.

由图 9~图 11,可知,不同直径下,特征时间都随气动力增加呈梯度逐渐减小的下降趋势;气动力相近,气流温度较高状态下,特征时间稍低;气动力相同,液初始直径较大的液滴,特征时间相对较大^[19];液滴变破碎时间小于其形时间. 对液滴破碎过程中特征时间与 γ 进行对数拟合,其关系式如式(2)~式(4)所示

$$\begin{cases} t_{\text{tot}} = -3.15 \ln \gamma + 16.479 \\ t_{\text{bre}} = -2.11 \ln \gamma + 11.594 \\ t_{\text{def}} = -1.7 \ln \gamma / 10 + 4.885 \end{cases} \quad (0.46 \text{ N/m} \leq \gamma \leq 0.97 \text{ N/m}, \quad d_0 = 2.20 \text{ mm}) \quad (2)$$

$$\begin{cases} t_{\text{tot}} = -3.79 \ln \gamma + 18.71 \\ t_{\text{bre}} = -2.61 \ln \gamma + 12.94 \\ t_{\text{def}} = -1.14 \ln \gamma + 5.77 \end{cases} \quad (0.51 \text{ N/m} \leq \gamma \leq 0.97 \text{ N/m}, \quad d_0 = 2.64 \text{ mm}) \quad (3)$$

$$\begin{cases} t_{\text{tot}} = -5.16\ln\gamma + 23.67 \\ t_{\text{bre}} = -3.19\ln\gamma + 15.17 \\ t_{\text{def}} = -1.97\ln\gamma + 8.5 \end{cases} \quad (0.52 \text{ N/m} \leq \gamma \leq 1.22 \text{ N/m}, \quad d_0 = 3.03 \text{ mm}) \quad (4)$$

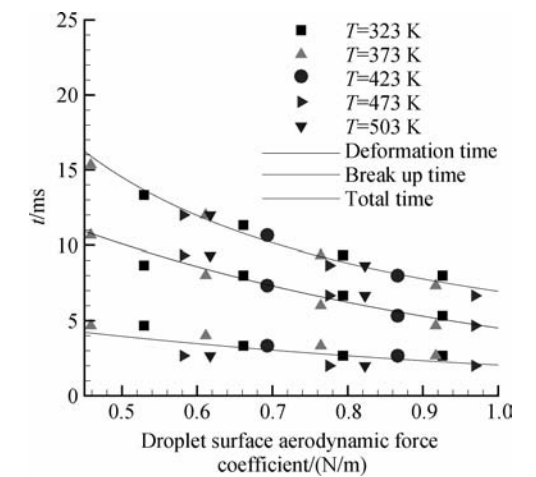


图 9 $d=2.20 \text{ mm}$ 液滴破碎特征时间随 γ 变化关系
Fig. 9 Characteristic time as a function of γ at $d=2.20 \text{ mm}$

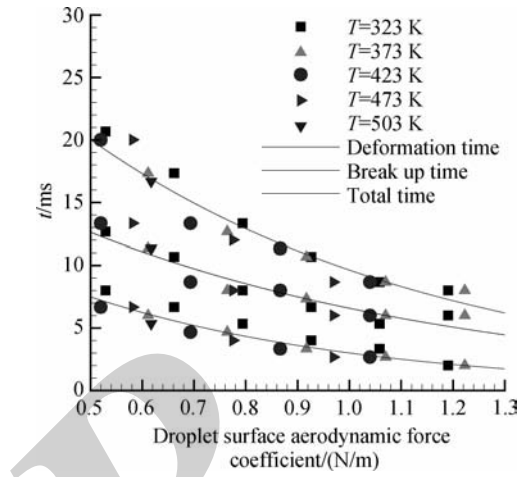


图 11 $d=3.03 \text{ mm}$ 液滴破碎特征时间随 γ 变化关系
Fig. 11 Characteristic time as a function of γ at $d=3.03 \text{ mm}$

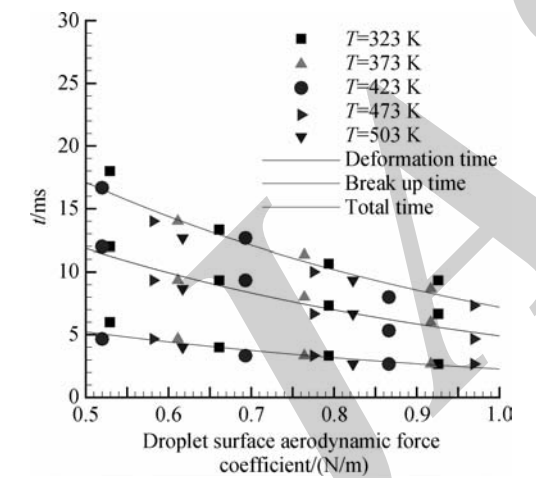


图 10 $d=2.64 \text{ mm}$ 液滴破碎特征时间随 γ 变化关系
Fig. 10 Characteristic time as a function of γ at $d=2.64 \text{ mm}$

动力增加的减小速度也就有所减小. 液滴变形过程处于热气流对液滴的预热阶段,同时液滴处于不断变形过程,气流温度对液滴的物性影响较小,因此气流温度对特征时间影响较小.

2.3 γ 对破碎区域及其中子液滴的影响

如图 12 所示,不同液滴直径下 $d_{\text{croe}}/d_{\text{drop}}$ (液核与液滴直径的比)随气动力增加而增加,且其变化梯度随液滴初始直径增加而减小.

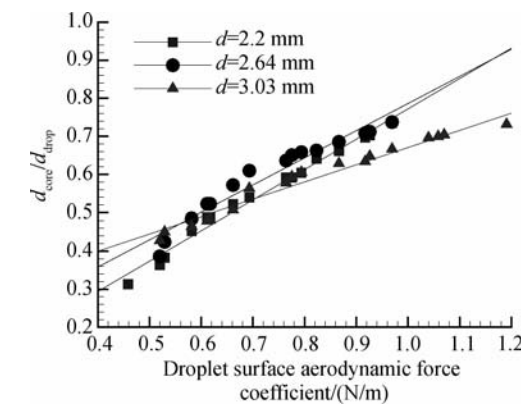


图 12 不同液滴初始直径下 $d_{\text{croe}}/d_{\text{drop}}$ 随 γ 变化关系
Fig. 12 Variation tendency of $d_{\text{croe}}/d_{\text{drop}}$ with γ in different initial diameter

液滴变形、破碎的特征时间随气动力增加,呈梯度变化逐渐减小的负增长变化趋势,且液滴初始直径越大,特征时间随气动力下降越快. 液滴初始直径增加,对液滴液核/袋状破碎起到一定程度的滞后作用,因此在相同气动力范围内,对液滴特征时间进行对数拟合,液滴直径越大,其随气动力的变化梯度就越大. 另一方面,液滴液核/袋状破碎过程不是瞬时过程,而是一个能量传递的连续过程,因此存在一个时间临界值,液滴破碎特征时间越接近该值,其变化速度也就越小. 液滴直径越小,其特征时间值就越小,液滴破碎特征时间随气

气动力增加量相同,初始直径较小的液滴,气/液相对速度增加较大,单位面积液体所受气动力变化较大,同时相同条件下液滴初始直径越小其变形速率越快,沿垂直气流方向厚度分布不同

所造成的液体沿气流方向加速度分布差异被扩大程度较大,从而提高了液核增加速度与袋状液膜减小速度. 因此,液核直径随初始 We 数的变化梯度随液滴初始直径的增加而减小.

单液滴破碎后子液滴分布密集区域定义为液滴破碎区域(如图 13 所示). 油雾场中液滴分布特性主要由液滴分布密集区域以及尺寸较大的液滴控制,而单液滴破碎区域,是形成液滴分别密集区域的基础单元. 因此对单液滴破碎区域进行研究具有重要的意义.

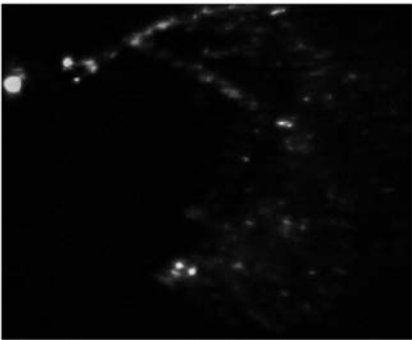


图 13 破碎区域示意图

Fig. 13 Diagram of broken area

如图 14 所示,不同初始直径下,液滴破碎区域面积随气动力增加呈先增加后减小的变化趋势. 在液核/袋状破碎初始阶段,液核直径较小,袋状液膜占液滴比例较大,袋状液膜变形、破碎时间较长且生成子液滴数目较多,随着气动力增加,袋状液膜产生的子液滴运动速度增加,增加了子液滴的抛洒面积;气动力进一步加大,液核直径增

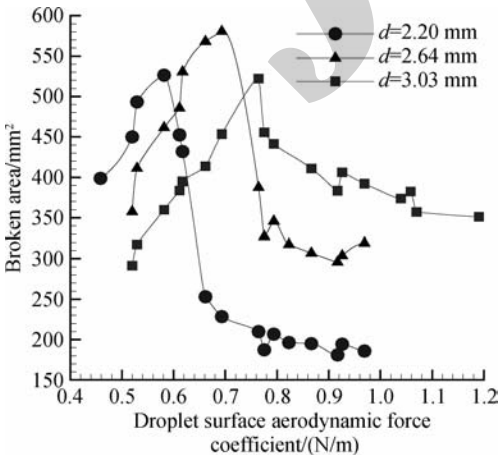


图 14 不同直径下破碎区域面积随 γ 变化关系

Fig. 14 Variation tendency of the broken area with γ in different initial diameter

加,袋状液膜所占液滴比例迅速减小,袋状液膜变形、破碎时间较短,虽然气动力增加使得子液滴运动速度有所增加,但因液滴破碎时间较短且生成子液滴数目较少,子液滴的抛洒面积呈减小的变化趋势.

如图 15 所示,不同液滴直径、气流温度下,液滴破碎区域中子液滴质量分数(破碎区域中子液滴群质量与初始液滴质量比值)随气动力增加,呈梯度逐渐减小的波动式增加;子液滴质量分数随液滴初始直径增加而减小.

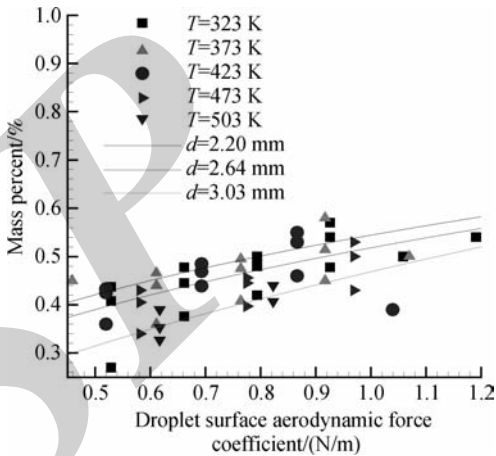


图 15 不同直径下质量分数随 γ 变化关系

Fig. 15 Variation tendency of the quality percentage with γ in different initial diameter

破碎区域中子液滴质量分数,由液体逃逸质量决定. 液体逃逸质量定义为逃逸出破碎区域的子液滴质量与被热气流蒸发的液体质量. 液滴破碎时间越长,一方面增加了逃逸出破碎区域的子液滴质量;另一方面也增加了子液滴的蒸发时间,增加了液体蒸发量. 在液核/袋状破碎阶段,随气动力增加,一方面液核直径迅速增加,袋状液膜迅速减小,液滴破碎时间也随之减小,从而降低了液体逃逸质量,子液滴质量分数随气动力增加而增加. 液滴初始直径较大,液滴破碎时间则较长,液体逃逸质量相对较多,因此随液滴初始直径增加,子液滴质量分数减小,且其随气动力变化梯度也随之减小. 子液滴质量分数随气动力变化的波动性,主要是由气流温度不同对子液滴蒸发效应的差异所导致的,由图可知,在气动力相近处,气流温度越高,子液滴质量分数相对较低. 袋状液膜破碎产生的子液滴尺寸下,且已历过加热时间较长的预热阶段,因此气流温度对子液滴质量分数影响较大.

2.4 气动力对破碎区域中子液滴质量分数离散度的影响

目前主要采用双参数 Rosin-Rammler 分布公式对液滴尺寸分布均匀性进行研究,该公式只用于获取整个破碎区域中液滴群在粒径尺寸方面均匀性分布,并不涉及不同区域内粒径分布的差异对粒径空间均匀性分布的影响,而液滴群在不同区域质量分数分布直接影响燃油在空间燃烧的均匀性.因此,为了研究液滴破碎后液滴群空间分布均匀性,建立相应均匀性指标的数学模型尤为必要.考虑子区域与整个破碎区域中液滴群在质量分布方面的差异,基于概率统计中反映组内个体间离散程度的标准离差率数学模型,建立了可用于衡量单液滴破碎后子液滴群空间分布均匀性的索太尔平均直径(SMD)、质量分数空间离散度模型.公式(5)为标准离差 σ 同期望值 E 之比

$$V = \sigma/E \tag{5}$$

$$\sigma(\mu) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \tag{6}$$

式中 x_i 表示为 1 组为 $x_1, \dots, x_N$ 的数据,则 μ 为这组数据的平均值,标准差 $\sigma(\mu)$ 表征了 1 组数据离散度的一个“自然”测度.因此为了衡量液滴在二维空间质量分布均匀性时,把颗粒群在两个维度上的分布分割成一定数目的矩形区域(如图 16 所示),统计每一矩形区域内对应的子液滴粒径与数目,计算出相应区域内的子液滴质量分数,这样就定义了破碎区域内 N (本文取 $N=25$) 个子区域的 m 值与整个液滴群的 $\bar{m}$ 的离散程度

$$V_{\text{mass}} = \frac{\sigma(\bar{m})}{\bar{m}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2} / \bar{m} \tag{7}$$

离散度越小,说明液滴群空间分布均匀性越好.由不同区域子液滴质量分数离散度计算方法可知,含有子液滴的矩形子区域越多,其离散度值越小,子液滴分布就越均匀;破碎区域面积越大,子液滴分布密集程度越低,其离散度值就越大,子液滴分布均匀性就越差.

如图 17 所示,不同初始直径下, V_{mass} 值随气动力增加而增加,且气流温度较大时其值也相对较大,与破碎区域子液滴质量分数随气动力增加的变化趋势相似.在液核/袋状破碎阶段,破碎区域子液滴质量分数随气动力增加而增加,主要是由于液核质量增加以及袋状液膜迅速减小,从而使得液体逃逸质量减小而引起的.随着气动力逐渐增加,除了液核所在子区域的液滴质量分数与

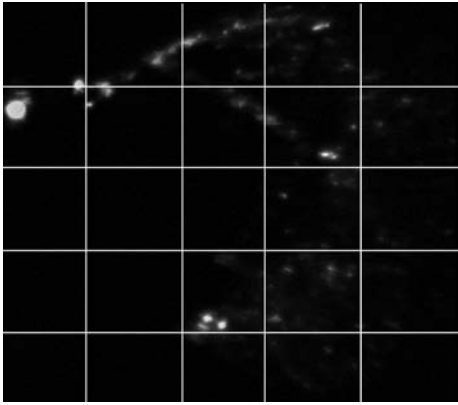


图 16 子区域划分示意图

Fig. 16 Diagram of subarea

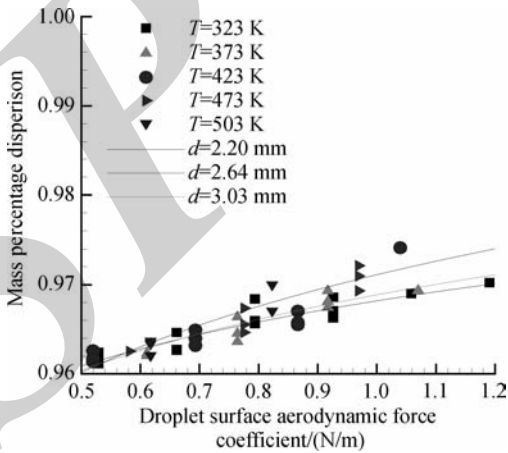


图 17 不同液滴初始直径 V_{mass} 随 γ 变化关系

Fig. 17 V_{mass} as a function of γ in different initial diameter

破碎区域子液滴质量分数的差值减小,其他子区域的质量分数差值都在增加.因此,破碎区域质量分数的离散程度随气动力增加而增加.

标准离差率数学模型即反映了子液滴在空间位置分布差异,也反了粒径分布差异,可以作为研究液滴分布均匀性一种新的数学处理方法.

3 结 论

本文对热气流中单液滴的液核/袋状破碎过程进行了实验研究,在实验设计条件下,结果表明:

- 1) 气流温度增加,增加了气/液间的换热作用,通过减小液体物性对液滴变形的阻力作用,降低了液滴发生剪切破碎所需气动力的下界限.
- 2) 液滴的特征时间,都随气动力增加而减小,其变化梯度、相同气动力下液滴变形、破碎特征时间也都随液滴初始直径增加而增加.气动力

相近,气流温度较高状态下,液滴特征时间稍低,说明了气流温度增加可以减小液滴变形、破碎特征时间,但对其影响不大.不同气流温度下,子液滴质量分数都随气动力的增加而增加;在相同气动力附近,热气流对破碎后子液滴的蒸发作用,使得子液滴的质量分数未达到蒸发温度的小很多,热气流的蒸发作用对破碎区域中子液滴的质量分数影响较大.

3) 标准离差率数学模型能够较好的适用于子液滴群质量分数分布均匀性方面的研究.在液核/袋状破碎模式下,子液滴群质量分数的空间离散度主要受液核直径的影响较大,都随气动力增加而增加.

参考文献:

- [1] Theofanous T G, Li G J, Dinh T N. Aerobreakup in rarefied supersonic gas flows[J]. *Journal of Fluids Engineering-Transactions*, 2004, 126(4): 516-527.
- [2] Guildenbecher D R, Sojka P E. Secondary breakup of electrically charged newtonian drops[R]. IMECE 2007-4189, 2007.
- [3] Guildenbecher D R, Lopez-Rivera C, Sojka P E. Secondary atomization[J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 46(3): 371-402.
- [4] Hsiang L P, Faeth G M. Near-limit drop deformation and, secondary breakup[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, 18(5): 635-652.
- [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] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Khosla S, Smith C E, Throckmorton R P. Detailed understanding of drop atomization by gas cross flow using the volume of fluid method[R]. Toronto, Canada: 19th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2006.
- [11] Theofanous T G, Li G J, Dinh T N. Aerobreakup in rarefied supersonic gas flows[J]. *Journal of Fluids Engineering-Transactions*, 2004, 126(4): 516-527.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Cao X K, Sun Z G, Li W F, et al. A new breakup regime for liquid drops identified in a continuous and uniform air jet flow[J]. *Physics of Fluids*, 2007, 19(5): 057103.
- [15] 金仁瀚, 张铮, 刘勇, 等. 横向加热气流中直射式喷嘴侧喷雾化特性研究[J]. *推进技术*, 2013, 34(5): 658-663.
JIN Renhan, ZHANG Zheng, LIU Yong. Experimental study on atomization characteristics of simple nozzle in heating cross flow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(5): 658-663. (in Chinese)
- [16] 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, FENG Zhipeng, et al. Experimental investigations of spray characteristic of single head of dual-swirl dup combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(2): 250-258. (in Chinese)
- [17] Sung W, Sayop P, Lee C S. Effect of mixing ratio of biodiesel on breakup mechanisms of monodispersed droplets[J]. *Energy and Fuels*, 2006, 20(4): 1709-1715.
- [18] 杨淑莹. VC++图像处理程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [19] 金仁瀚, 刘勇, 朱冬清, 等. 初始直径对单液滴破碎特性影响的实验[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(10): 2401-2409.
JIN Renhan, LIU Yong, ZHU Dongqing, et al. Experimental investigations of impact of the initial diameter for breakup characteristic of single droplet[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(10): 2401-2409. (in Chinese)

(编辑: 叶 青)