

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201703002

幂律流体双股碰撞雾化特征的实验研究

王 辉¹, 刘彦甫¹, 曹 伟², 秦雪箭¹, 吴少华¹

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院 燃烧工程研究所, 哈尔滨 150001;
2. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘 要: 为深入研究双股射流碰撞系统的雾化特性, 基于双股射流碰撞雾化实验台, 采用 PIV 测速仪, 通过改变双股射流的射流不对称性、添加氮气气流扰动以及添加金属铝粒子, 来实验探究上述因素对于幂律流体雾化的影响。实验结果表明: 韦伯数较小时, 幂律流体以一定偏心度碰撞会形成链状液膜, 链结长度随偏心度增大而减小; 当双股射流以不同长度撞击时, 幂律流体会出现鱼骨模式, 该现象在 0.15% 卡波姆凝胶中较为明显; 添加气流扰动能增大幂律流体液膜表面波的强度, 导致液膜宽度变薄、液膜边缘提前破裂, 并且当韦伯数较小时, 液滴索太尔平均直径减小; 添加金属粒子使幂律流体强度变低, 最大破碎长度变小, 提前进入各个破碎模式, 更早达到液滴平均直径收敛值。采用一定的偏心度, 适当加入气流扰动和金属粒子, 有助于改善幂律流体雾化性能。

关键词: 双股射流; 幂律流体; 不对称度; 气流扰动; 金属粒子

中图分类号: V434 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)07-0052-07

Atomization characteristics experiment of impinging jets with power-law fluid

WANG Hui¹, LIU Yanfu¹, CAO Wei², QIN Xuejian¹, WU Shaohua¹

(1. Combustion Engineering Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Aero Engine Corporation of China, Commercial Aircraft Engine Co., Ltd, Shanghai 200241, China)

Abstract: On the impinging injector platform, the effects of jet asymmetry, airflow disturbances and metal particles on the atomization characteristics were studied by PIV (particle image velocimetry) technology. The experimental results indicate that when the two asymmetric jets impinges at low weber number, the chain sheet appears, and as the eccentricity increases, the link-length decreases. Fish bones regime can be found when the jet is with different length. Additional airflow disturbances can increase the atomization quality, because when the surface wave's intensity is increased, it will break up more easily, as a result, the width of fluid sheet and the SMD (sauter mean diameter) of droplets decrease. When power-law fluid contains aluminum particles, its strength is smaller and its max length decreases obviously. The droplets' SMD convergence does not change, as well, the SMD reaches convergence in shorter time. In conclusion, proper jet asymmetry, airflow disturbances and metal particles can improve impinging jets' atomization performance with power-law fluid.

Keywords: unlike impinging injector; power-law fluid; jet asymmetry; airflow disturbances; metal particle

传统的液体火箭发动机燃料灌装存储困难, 技术要求高, 有高挥发性和毒性。现代的液体火箭发动机采取凝胶化燃料和氧化剂来改善以上不足。通过凝胶化手段, 液体推进剂流变特性改变, 挥发性降低, 安全性提高; 添加有金属粒子的凝胶推进剂可以获得更好的燃烧特性。然而, 燃料凝胶化后会变得黏稠, 雾化质量变差, 需要研究改善其雾化性能的手段^[1]。

两股同轴射流碰撞产生液膜首先由 Savart 在 1833 年观察到并进行研究。此后, 越来越多的研究者对双股射流碰撞雾化进行了理论研究和实验验证^[2]。Heidmann 等^[3]以液流速度、射流长度、碰撞角度、喷嘴几何尺寸为变量研究了液膜破碎特征, 认为液膜破碎经历了 4 个过程, 分别为: 封闭边界模式、波纹出现模式、开放边界模式、完全破碎模式, 得出射流速度和碰撞角度对雾化特性有重要作用的结论。Dombrowski 等^[4]指出, 液膜破碎是水动力学作用和空气动力学作用共同耦合导致的。Anderson 等^[5]研究了处于高流速状态下的碰撞雾化, 结果表明液膜破碎长度随着射流速度的增大和碰撞角度的减小而增加。Ryan 等^[6]通过实验方法, 得出了分别处于层流和湍流模式下双股

收稿日期: 2017-03-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (HIT.NSRIF.2017048);
国家自然科学基金委创新研究群体: 热辐射传输与流动控制 (51421063)

作者简介: 王 辉 (1977—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 王 辉, wanghui_hb@hit.edu.cn

碰撞式射流的液膜破碎长度变化趋势. Lai 等^[7]发现,随着射流速度的增大,液膜的最大长度和宽度以二次多项式的形式增大. Yuan 等^[8]以射流环境压力和喷嘴直径为实验变量,研究发现,可以采用提高环境压力、使用大直径喷嘴的方法使液雾场分布更加均匀. Inoue 等^[9]采用向液流碰撞点添加气流来加强碰撞射流的雾化效果,结果表明在雾化效果不明显时,添加微小气流扰动可以明显加强雾化作用. Bai 等^[10]采用卡波姆 934 凝胶,研究射流速度、碰撞角度、液体黏度、喷嘴截面形状对液膜破碎模式的影响. Baek 等^[11]以水、卡波姆凝胶、纳米颗粒分别为实验变量,研究碰撞射流的破碎模式、破碎长度,最后对实验现象进行整合分析. 张蒙正等^[12-13]研究了撞击角、射流速度、射流初始状态和在液流中预混气体对凝胶水雾化性能的影响. 陈杰等^[14]通过改变射流碰撞角度、射流压差,使用 PIV、Dynamic Studio 研究撞击雾化速度场. 天津大学杜青等^[15]借助高速摄影、三维多相位多普勒分析技术,研究不同浓度的卡波姆凝胶在不同射流速度、射流压力下,破碎长度、喷雾锥角、雾化尺寸的变化趋势.

前人对双股射流碰撞雾化以及使用幂律流体作为雾化流体进行了较多分析实验,但是对于整合二者特点的以幂律流体为实验工质的双股射流碰撞雾化没有更为深入的探索.

本文基于自主搭建的双股射流碰撞雾化实验台,采用 PIV 粒子图像测速系统,实现对质量分数分别为 0.15%、0.25%、0.35% 卡波姆去离子水溶液的双股射流碰撞的雾化特征及粒度特征进行记录测量,着重探究偏心度、添加气流扰动、添加金属铝粒子等因素的影响,得出不同条件下双股射流碰撞系统的雾化性能,为液体火箭发动机燃烧系统的优化设计提供基础数据.

1 实验系统及实验方法

图 1 为射流碰撞雾化试验台系统,包括氮气供给系统、幂律流体供给系统、压力调节系统、射流喷嘴系统、气流扰动系统. 高压氮气源为实验驱动力,通过压力调节系统作用于幂律流体供给系统中的实验工质,使工质流经流量调节、方位调节和喷嘴喷射,最终以一定的流动速度、碰撞角度发生双股碰撞.

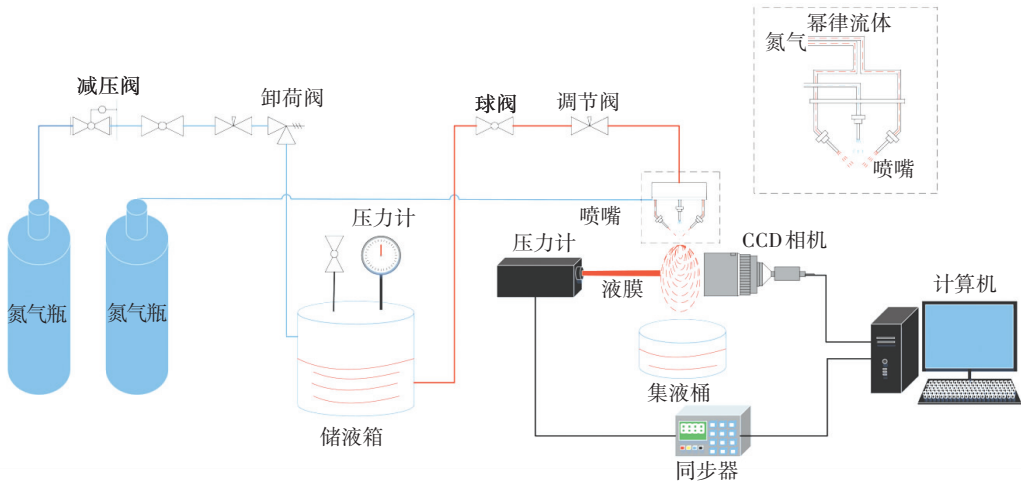


图 1 射流碰撞雾化实验台系统

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

实验图像记录、信息分析采用 PIV (Particle Image Velocimetry) 粒子图像测速仪,包括由计算机和同步器控制的激光器和 CCD 相机. 照片拍摄的频率、图片曝光的时间等参数由 INSIGHT3G 软件设定. 工作时,采用同步器能够接收 INSIGHT3G 预定的操作命令,同步时间信号,控制 YAG 激光器和 CCD 相机,使其能够与软件同步进行. 同步器型号为 610035, CCD 相机型号为 630059, Nikon50 mm/F1.8 镜头. 采用 INSIGHT3G 软件进行参数设定、信号控制、拍照测量、图像处理. 在很短的时间间隔内液滴被激光器产生的激光束照明两次,并被单帧图像或者双帧图像记录下来. 实验得到的图像通过 IPP6.0 软件进

行处理得到喷雾角和液滴粒径. 整个系统的技术指标如表 1 所示.

实验采用控制变量法,探究射流偏心度、氮气气流扰动、金属铝粒子对幂律流体雾化效果的影响,实验在 20 ℃ 环境温度下进行,环境压力为常压. 在探究黏度的影响时,实验组选用添加上述作用的质量分数为 0.15%、0.25%、0.35% 的卡波姆去离子水溶液中的一种或几种流体,所选流体满足 Power-law Model:

$$\eta = k\gamma^{(n-1)}, \quad \gamma = 8u/D_i. \tag{1}$$

式中: η 为流体黏度, k 为黏度系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$), n 为幂率指数, γ 为剪切变形速率 (s^{-1}), u 为射流速度 (m/s),

D_i 为喷嘴内径(m),相关的物理参数见表 2,对照组为无上述作用的对应质量分数卡波姆溶液. 喷嘴出

口内径 D 为 0.86 mm,喷嘴长径比都为 43,使得液体在内部流动时能够充分发展.

表 1 PIV 测量系统的技术指标

Tab.1 Technical indicators of PIV measurement system

CCD 相机 分辨率/pixel	帧率	跨帧时间/ ns	采集图像 格式/ bit	激光最大 频率/ Hz	实验激光 波长/ nm	激光器发射 能量/MJ	测速误差/%
2 048×2 048	15	200	12	15	532	200	<1

表 2 实验流体的物理参数

Tab.2 Physical property of experimental fluid

卡波姆 934 凝胶质量分数/%	剪切速率<10 m/s		剪切速率>10 m/s		密度/ (kg·m ⁻³)	表面张力/ (mN·m ⁻¹)
	稠度系数	幂律指数	稠度系数	幂律指数		
0.15	8.014	0.616 24	13.316	0.330 72	998	72.8
0.25	14.571	0.621 76	34.510	0.298 58	998	72.8
0.35	19.310	0.583 51	43.083	0.295 47	998	72.8

2 实验结果及分析

2.1 正常状态下幂律流体雾化模式

图 2 给出质量分数分别为 0.15%、0.25%、0.35% 的卡波姆凝胶在不同韦伯数 (We) 下的破碎模式.

由图 2 可以看出,以上 3 种质量分数的卡波姆凝

胶的破碎模式有所不同,卡波姆质量分数为 0.25% 和 0.35% 有五种雾化破碎过程,包括:封闭边界模式、开放边界模式、无边界模式、弓形液丝模式、完全发展模式,与杜青等^[15] 研究结果相符合,而卡波姆质量分数为 0.15% 时的实验结果没有出现无边界模式,这在前人文献中没有发现. 其中,韦伯数 We 表达式为

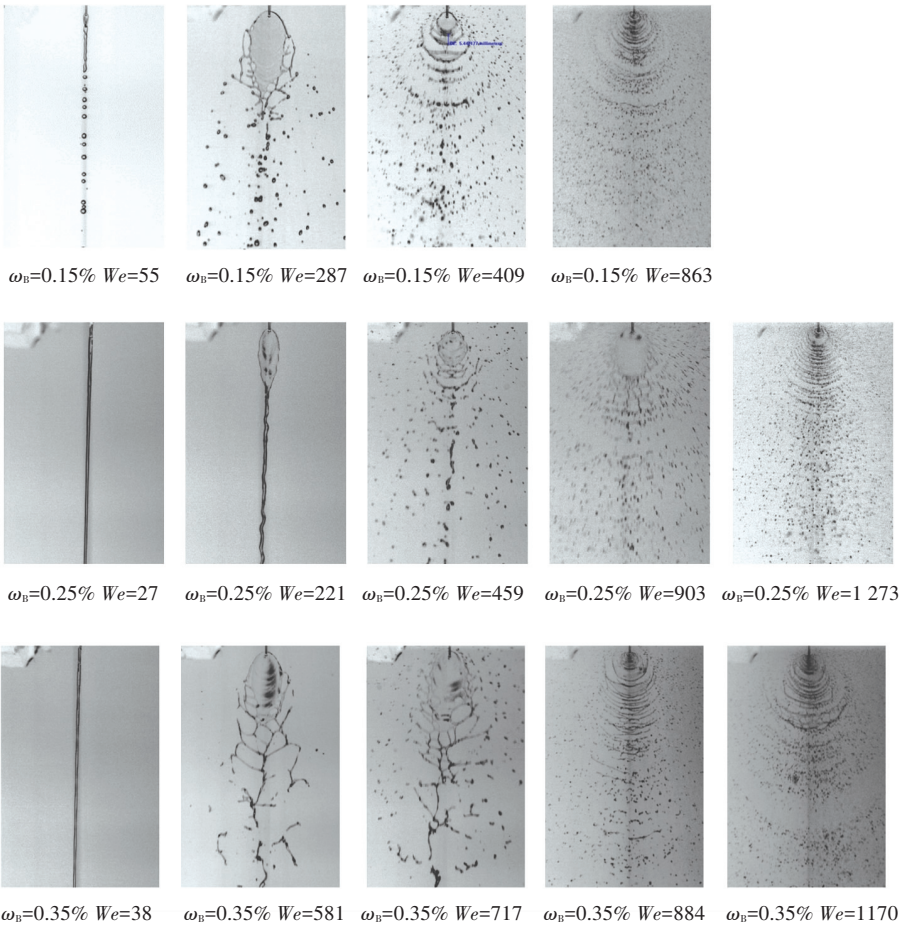


图 2 不同韦伯数 (We)、不同卡波姆质量分数 (ω_B) 下破碎模式

Fig.2 Picture of breakup mode at different Weber number (We) and carbomer mass fraction (ω_B)

$$We = \rho u^2 D_i / \sigma. \tag{2}$$

式中: ρ 为液体的密度 (kg/m^3), u 为液体的流速 (m/s), D_i 为喷嘴内径 (m), σ 为液体的表面张力 (mN/m).

2.2 射流偏心度对幂律流体雾化效果的影响

进行以幂律流体为实验工质的双股射流碰撞实验时, 观察到了李建军等^[16]发现的链状液膜; 但是, 本文所得到的实验结果与文献^[16]实验结论并非完全一致. 文献^[16]认为链状液膜是幂律流体在特定流速下出现的, 而本文通过实验还发现, 这种现象的出现还取决于液流的射流偏心度. 所谓液流的射流偏心度即 D_o/D_i , 其中 D_o 为在碰撞截面处射流液柱圆心距, D_i 为喷嘴内径. 卡波姆质量分数为 0.15%、0.25%、0.35% 的实验工质都出现了链状液膜现象, 图 3 为质量分数为 0.35% 的卡波姆凝胶水溶液得到的链状液膜.

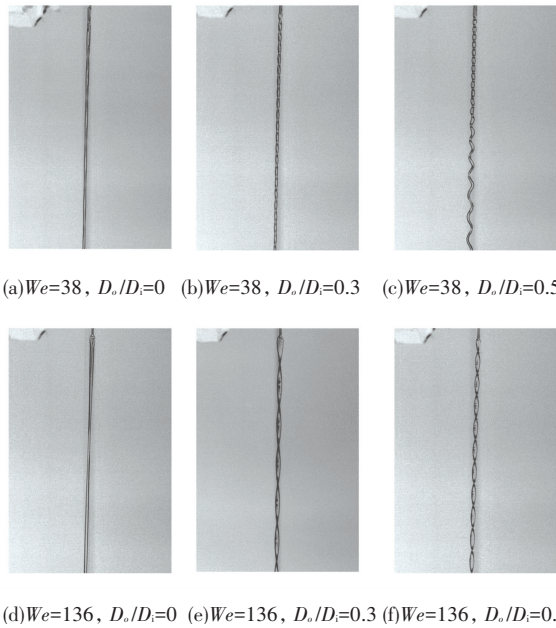


图 3 不同射流韦伯数、射流偏心度下的链状液膜

Fig.3 Chain sheet images at different weber number and jet eccentricity

由实验现象可以看出, 链状液膜出现的条件为: 较低射流韦伯数以及必要的射流偏心度. 当液流射流偏心度为 0 时 (即两股液流偏心距为 0), 液膜出现轻微的封闭边界, 整体表现稳定; 随着射流偏心度增大, 液膜边缘在底部发生碰撞, 表现为液膜出现翻转, 产生下一个链结, 于是, 链状液膜产生并且向后发展. 在链状液膜中, 每个链结长度近似相同, 但是在不同偏心度 D_o/D_i 和射流韦伯数 We 下, 链结长度 L_c 有所不同, 如图 4 所示.

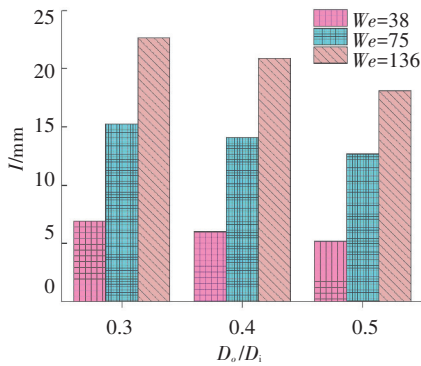


图 4 不同韦伯数下链结长度与射流偏心度的关系

Fig.4 Increasing effect of jet eccentricity on link length at various weber numbers

由图 4 可知, 链结长度与射流韦伯数、射流偏心度存在如下关系: 链结长度随射流韦伯数增大而增大, 当射流韦伯数相同时, 链结长度又随射流偏心度增大而减小, 直至两股射流不发生明显碰撞, 链结无法形成. 3 种质量浓度的卡波姆凝胶水溶液都会链结, 区别在于: 卡波姆质量浓度较低时, 幂律流体黏度低, 液膜强度低, 不稳定, 只在碰撞后较小区域产生链结, 后续部分由于液膜破碎, 无法观察到链结; 当卡波姆质量分数提高后, 幂律流体黏度提高, 液膜强度增大、更加稳定, 不会太早破裂, 可以观察到更多的链结.

2.3 射流长度不对称对幂律流体雾化效果的影响

使用质量分数为 0.15% 卡波姆凝胶水溶液进行双股射流长度 L_j 不等碰撞试验, 发现如图 5 所示的鱼骨模式. 该模式最早由 Jung 等^[17]提出, 它发生在封闭边界模式以后, 主要特征在于封闭边界外围产生连续性脱落液滴, 此时液膜呈鱼骨状, 故名为鱼骨模式. 在鱼骨模式中, 两侧对称液滴脱落形成直线夹角称为鱼骨角. 研究发现, 鱼骨角与射流长度不对称度有关: 使一侧射流长度 L_{j1} 恒为 5 mm, 鱼骨角在随另一侧射流长度 L_{j2} 的增大而出现先扩大后缩小的趋势. 并且, 鱼骨角现象在质量分数为 0.25%、0.35% 卡波姆凝胶水溶液的实验过程中没有出现.

2.4 氮气气流扰动对幂律流体雾化效果的影响

可以尝试添加微小气流扰动来获得更好的雾化场. 通过额外的气流扰动, 增大了液膜表面的不稳定性, 使液膜更容易发生破碎, 从而达到最佳的雾化效果, 使液雾分布均匀, 液滴尺寸更小. 试验中所采用的流体为质量分数 0.35% 的卡波姆凝胶水溶液, 氮气与液流输送都采用内径为 0.86 mm 的直管喷嘴, 扰动气流氮气的射流长度为 10 mm, 卡波姆液柱射流长度为 8 mm, 液流夹角为 90° , 氮气气流与两侧液柱夹角均为 45° . 氮气气流流速分别设定为 0、86.08、172.15 m/s, 观察相同液流射流韦伯数下的雾化效果 (见图 6).

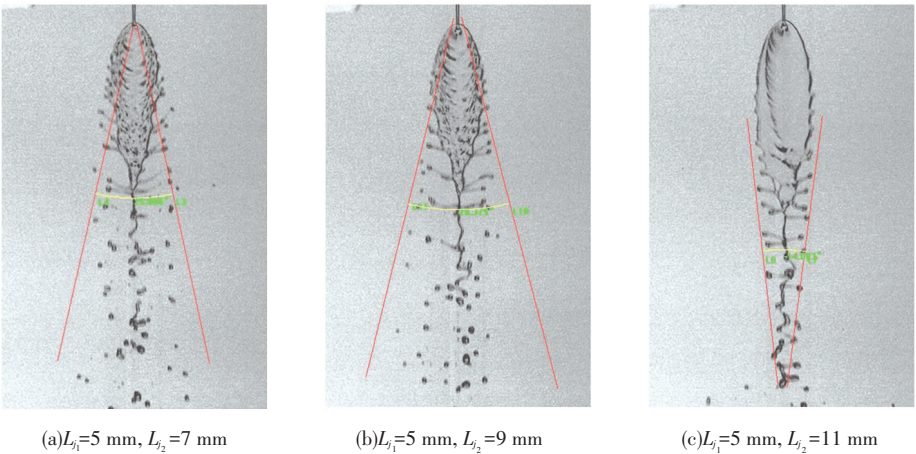


图 5 质量分数 0.15%卡波姆凝胶形成鱼骨模式

Fig.5 Fishbone pattern of 0.15% carbomer gel

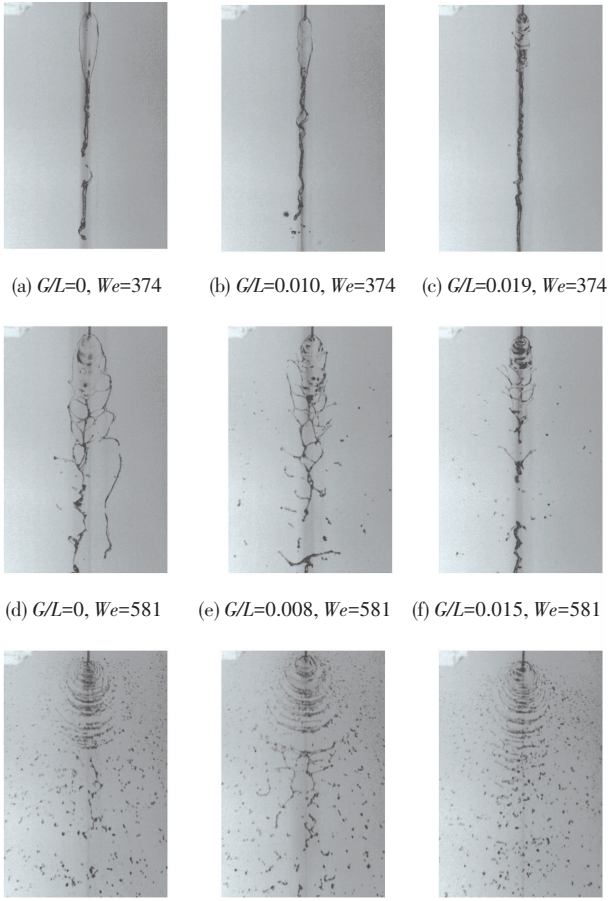


图 6 质量分数 0.35%卡波姆凝胶在不同液气比、不同韦伯数下喷雾场图像

Fig.6 Picture of 0.35% carbomer Gel at different liquid-gas ratios and different Weber numbers

由图 6 可知,有无气流扰动对于幂律流体雾化效果影响较大:添加氮气扰动后,液膜表面出现波动,破碎长度减小,进一步增大气体流速后,液膜上的扰动变强,稳定性变差,破碎长度明显减小.并且液膜宽度减小,这主要是由于气体的动量增大了竖直方向的速度造成的. 试验中,用 IPP6.0 图像处理

软件记录喷雾场、采集液滴尺寸,结合索太尔平均直径定义: $d_{SMD} = \sum (n_i d_i^3) / \sum (n_i d_i^2)$, 可以得出不同气体流量下的液滴索太尔平均直径随韦伯数的变化规律如图 7 所示.

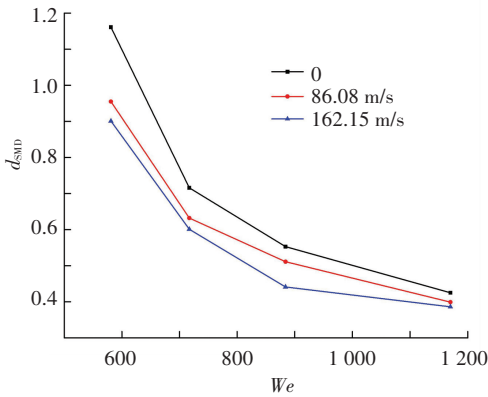


图 7 不同气体流量下液滴索太尔平均直径

Fig.7 The mean diameter of the Sauter of the droplets with gas flow at different velocity

由图 7 可知,在不同流速氮气气流扰动下,随韦伯数增大,液滴索太尔直径均减小,最后收敛于一个定值. 当液流处于形相同韦伯数下,随着扰动气流增大,液滴 d_{SMD} 都会减小,并且这种影响在液流流速较低(韦伯数较小)时更加明显,即此时扰动作用更大. 当液流韦伯数较大时,不同流速气流扰动下产生的液滴 d_{SMD} 没有较为明显的区别.

所以,适当的微小气流扰动可以改善碰撞射流的雾化效果,当液体射流处于低韦伯数时,这种作用更加显著.

2.5 金属铝粒子对幂律流体雾化效果的影响

通过向液体燃料中添加金属粒子,可以调高燃料的燃烧效率,减小燃料的点火延迟,从而达到减少燃料体积、获得更大推进力、更早着火发动的目的. 同时,由于金属粒子与推进剂密度的差异,金属粒子

会发生沉降现象;由于凝胶化推进剂的高黏性,也会使金属粒子在其内部无法均匀分散,最终造成雾化变差、着火不均的弊端. 本部分实验采用质量分数为 0.35%卡波姆凝胶水溶液,通过向其中添加平均粒径为 1 μm 质量分数分别为 2%、5%、10%的金属铝粒子,研究碰撞雾化效果,结果见图 8.

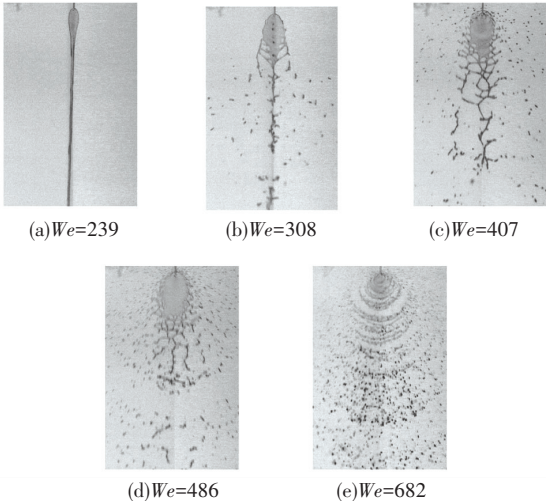


图 8 添加质量分数 10%金属铝粒子的质量分数为 0.35%卡波姆在不同韦伯数下破碎模式

Fig. 8 Break up of 0.35% carbomer with 10% aluminum particles added at different Weber numbers

从图 8 可以看出,添加质量分数为 10% 铝粒子的 0.35%卡波姆凝胶水溶液在不同韦伯数下的破碎模式. 对比上文的 0.35%卡波姆凝胶水溶液破碎模式,可以发现,有无金属粒子并不会对于液体破碎模式产生明显影响,都会产生 5 种破碎模式,包括:封闭边界模式、开放边界模式、无边界模式、液丝模式、完全发展模式. 有无金属粒子对于破碎模式的作用主要在于:a) 加入金属粒子后,幂律流体可以提前进入各个破碎模式,即金属粒子降低了液滴的稳定性,使其更易发生破碎;b) 添加金属铝粒子后,卡波姆凝胶水溶液在各破碎模式下的破碎长度未发生明显变化,且相比添加前破碎长度明显减小,而不添加金属粒子的凝胶水溶液存在破碎长度先增大后减小的现象. 本部分实验结果与 Baek 等^[11]相吻合,液膜破碎长度减小的原因在于,加入的金属粒子密度较大,增大了射流动量,液膜强度减小、液膜表面不稳定性增强,更加利于液膜破碎. 实验中还观察到了鱼骨模式如图 8(b)所示,这种现象在不添加金属离子的质量分数 0.35%卡波姆凝胶水溶液中并未出现,产生的原因在于金属粒子降低了幂律流体的强度,液膜稳定性降低,外围出现连续性液滴脱落,形成鱼骨模式.

图 9 给出了不同卡波姆质量分数的幂律流体破碎长度随韦伯数的变化规律,可以发现,随射流韦伯

数增大,幂律流体的破碎长度都表现为先增大后减小. 添加金属铝粒子后破碎长度分布范围变小,其中在封闭边界模式、开放边界模式、无边界模式下与之前基本保持一致,最终的破碎长度明显减小,需要的射流韦伯数大幅减小.

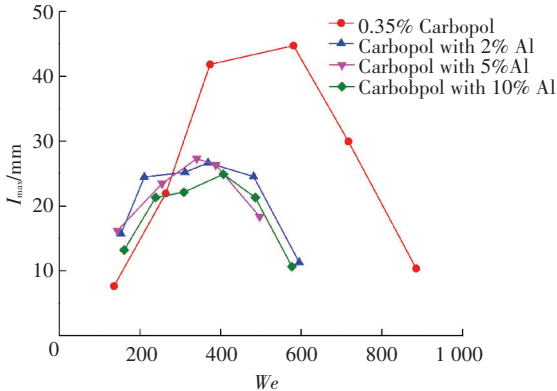


图 9 不同流体的破碎长度随韦伯数的变化关系

Fig. 9 The fractal length of fluids at different Weber numbers

由图 10 可知,随着射流韦伯数的增大,液滴 d_{SMD} 都会逐渐减小,初始减小幅度较大,后逐渐趋于零,液滴 d_{SMD} 不再变化,并且无论添加金属粒子与否,该收敛值不发生改变,但是添加铝粒子后,幂律流体强度增大,可以提前达到该收敛值,即在更小的射流韦伯数下就能达到良好的雾化效果.

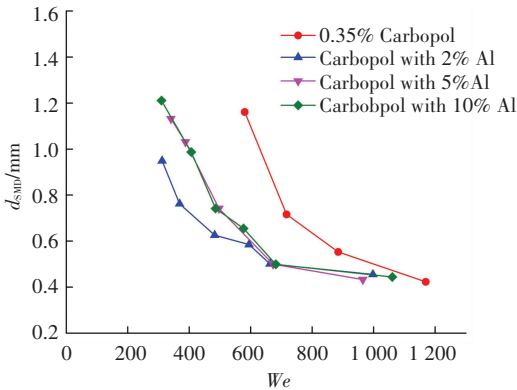


图 10 不同流体液滴的索太尔平均直径随韦伯数的变化关系

Fig. 10 The mean diameter of Sauter of fluid droplets at different Weber number

3 结 论

1) 在低射流韦伯数、适当的射流偏心度下,幂律流体双股碰撞会形成链状液膜,随着射流偏心度的增大,链结长度会减小最终消失.

2) 在双股射流两侧液柱长度不等时,质量分数为 0.15%卡波姆凝胶水溶液会出现鱼骨模式,而其他两种浓度的凝胶水溶液不会出现该现象. 随着射流长度的不对称度的增大,形成的鱼骨角先增大后减小.

3) 双股射流夹角 90°,添加与两射流喷嘴夹角

均为 45° 的氮气气流扰动能够改变幂律流体的雾化效果。气流扰动通过增大液膜表面的不稳定性,使液膜提前破裂,同时也降低了同等射流韦伯数下的液滴粒径。另外,由于垂直方向速度分量的增大,液膜宽度也会有一定的减小。

4) 在幂律流体双股射流碰撞雾化试验中,加入金属铝粒子可以提高幂律流体的射流强度,降低液膜表面稳定性,减小液膜破碎长度,提前进入各个破碎模式。虽然加入金属粒子无法减小雾化最终的液滴索太尔平均直径,但是可以在较低射流韦伯数下达到相同的雾化效果,这可以一定程度上降低喷嘴压力输出要求。

参考文献

- [1] 曹伟. 幂律流体双股射流碰撞雾化的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [2] HUANG J C P. The break-up of axisymmetric liquid sheets[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970, 43(2): 305-319.
- [3] HEIDMANN M F, PRIEM R J, HUMPHREY J C. A study of sprays formed by two impinging jets[J]. *World Literature Today*, 1957(4): 681-682.
- [4] DOMBROWSKI N D, HOOPER P C. A study of the sprays formed by impinging jets in laminar and turbulent flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, 18(3): 392-400.
- [5] ANDERSON W E, RYAN H M, PAL S, et al. Fundamental studies of impinging liquid jets[J]. Reston: AIAA Press, 1992: 92-0458.
- [6] RYAN H M, ANDERSON W E, PAL S, et al. Atomization characteristics of impinging liquid jets[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(1): 135-145.
- [7] LAL W H, HUANG W, JIANG T L. Characteristic study on the like-doublet impinging jets atomization[J]. *Atomization and Sprays*, 1999, 9(3): 277-289.
- [8] YUAN T, CHEN C, CHEN Y D, et al. The observation of the atomization and mixing of doublet-jets impinging sprays at elevated ambient pressures[C]//12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Heidelberg: Institute for Liquid Atomization and Spray Systems(ILASS), 2012: 184-190.
- [9] INOUEC, WATANABE T, HIMENO T, et al. Impinging atomization enhanced by microjet injection—effect, mechanism and optimization[C]//49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. San Jose: American Institute of Aeronautics and Astronautics(AIAA), 2013-3705.
- [10] BAI F, DIAO H, ZHANG M, et al. Breakup characteristics of power-law liquid sheets formed by two impinging jets[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2014, 46(5): 055506.
- [11] BAEK G, KIM S, HAN J, et al. Atomization characteristics of impinging jets of gel material containing nanoparticles[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2011, 166(21): 1272-1285.
- [12] 张蒙正, 张泽平, 李鳌, 等. 两股互击式喷嘴雾化性能实验研究[J]. *推进技术*, 2000, 21(01): 58-60.
ZHANG Mengzheng, ZHANG Zeping, LI Ao, et al. Experimental research on spray properties of unlike impinging injectors[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(01): 58-60.
- [13] 张蒙正, 杨伟东, 王玫. 双股互击式喷嘴凝胶水雾化特性试验[J]. *推进技术*, 2008, 29(1): 22-24+61.
ZHANG Mengzheng, YANG Weidong, WANG Mei, et al. Test of unlike impinging injector atomization characteristic with gelled water[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(1): 22-24+61.
- [14] 陈杰, 封锋, 马虎, 等. 基于 PIV 的凝胶模拟液撞击雾化速度场实验研究[J]. *推进技术*, 2014(4): 565-569.
CHEN Jie, FENG Feng, MA Hu, et al. Experimental study on impinging velocimetry of gel simulants based on PIV[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014(4): 565-569.
- [15] 杜青, 马永翠, 白富强, 等. 幂律流体撞击式射流破碎特征试验[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016(2): 158-163.
DU Qing, MA Yongcui, BAI Fuqiang, et al. Experiment on the breakup characteristics of impinging jets of power law fluid[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2016(2): 158-163.
- [16] 李建军, 李珍妮, 夏振炎, 等. 幂律流体撞击射流液膜破碎特征实验研究[C]//中国力学学会—2015 论文摘要集. 上海: 中国力学学会, 2015: 194.
LI Jianjun, LI Zhenni, XIA Zhenyan, et al. Experiment on the breakup characteristics of impinging jets of power law fluid[C]//Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics—2015 meeting abstract book. Shanghai: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2015: 194.
- [17] JUNG S, HOATH S D, MARTIN G D, et al. Atomization patterns produced by the oblique collision of two Newtonian liquid jets[J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22(4): 557-563.

(编辑 杨 波)