

同轴离心式单、双喷嘴喷雾特性对比实验

康金鑫, 仝毅恒, 高玉超, 谢家豪, 郭康康, 丰松江

(航天工程大学, 北京 101416)

摘要 对液体中心型同轴离心式单、双喷嘴喷雾特性开展了实验研究。采用高速摄影捕捉瞬态喷雾过程, 通过 Matlab 程序获取了相应雾化锥角并与单喷嘴进行对比; 采用激光粒度仪测量了双喷嘴近场区域液雾索泰尔平均直径(Sauter mean diameter, SMD), 借此分析了单喷嘴与双喷嘴雾化锥角产生差异的机理。结果表明: 随着气液比的增大, 双喷嘴较单喷嘴的雾化锥角增加; 双喷嘴间形成的复杂湍流区致使喷嘴间索泰尔平均直径小于喷嘴外侧; 喷嘴间粒径较小, 易受到湍流区的卷吸作用, 致使两喷嘴内侧喷雾锥角增大。

关键词 液体中心型; 同轴离心式喷嘴; SMD; 雾化锥角; 双喷嘴

中图分类号 V19 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)06-0038-08

Comparative experimental of spray characteristics for gas liquid coaxial swirl single and double injectors

KANG Jinxin, TONG Yiheng, GAO Yuchao, XIE Jiahao, GUO Kangkang, FENG Songjiang

(Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract Presents an experimental study of the spray characteristics of liquid-centred coaxial swirl single and double injectors. High-speed photography was applied to capture the transient spray process and the corresponding atomization cone angles were obtained by a Matlab program and compared with a single injector. And a laser particle analyzer was used to measure the Sauter mean diameter(SMD) in the near-field region of the dual injectors, which was used to analyze the variation mechanism in the atomization cone angle between the single and dual injectors. The results shows that with the increase of vapor liquid ratio, the atomisation cone angle of the double injectors increases compared to the single injector. The complex turbulence zone formed between the double injectors results in the sauter mean diameter between the injectors being smaller than the outer side of the injector. The smaller particle size between the injectors is susceptible to the winding and sucking effect of the turbulence zone, resulting in an increase in the spray cone angle inside the double injectors.

Key words liquid-centered; coaxial swirl injector; SMD; spray angle; double injectors

收稿日期: 2023-06-13; 修回日期: 2023-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(12002386)

作者简介: 康金鑫(1994—), 男, 硕士, 研究领域为航天实验与鉴定。

通信作者: 丰松江(1981—), 男, 博士, 副研究员, 研究领域为航天实验与鉴定。

0 引言

液体中心型同轴离心式(liquid-centered swirl coaxial, LCSC)喷嘴由于出口处直流气体对液膜的强烈作用,燃料雾化效果较好,且结构简单,可靠性高,广泛应用于液体火箭发动机^[14]。目前科学界对离心式喷嘴喷雾特性的研究主要关注单个喷嘴的液膜破碎形态、雾化锥角、破碎长度及喷雾场液滴的粒径大小和分布等^[5]。其中,雾化锥角表征了喷雾的空间分布范围,液滴的粒径大小和分布影响后续的蒸发、燃烧与释热,均是喷嘴设计过程中需要考虑的重要指标。Hautman 较早地对 LCSC 喷嘴的喷雾特性进行了实验研究,发现雾化锥角随着气体流率和环境压力的增大而减小,随着液体流率的增大而增大^[6]。Guildenbecher 等通过试验分析的手段,探讨了压力缩放与空气夹带对雾化锥角的影响,得出压力在一定范围内对雾化锥角的影响不大的结论^[7]。Whitlow 等进行了气液比(gas liquid ratio, GLR)对喷嘴雾化性能影响的试验,分析了喷嘴出口区域液相分布和雾滴直径的变化规律,并发现液体中心型气液同轴喷嘴所产生的喷雾锥角比平口喷嘴的大^[8]。Wei 等探究了喷嘴结构对喷雾特性的影响,提出了改进雾化锥角的半经验模型,提高了预测精度^[9]。其明确了雾化锥角与液膜厚度对粒径的影响关系,认为雾化锥角越小,液膜越厚,喷雾场液滴的 SMD 越大。徐文等通过仿真对离心式喷嘴的雾化过程进行模拟,发现质量流量的增加会使空心锥液膜从发展到一次破碎的过程更加稳定^[10]。Im 等通过实验发现,随着气液动量通量比的增大,液体向轴线聚集,雾化锥角先减小然后趋于稳定;其还根据气液动量守恒推导了 LCSC 喷嘴喷雾锥角的理论模型,与实验数据吻合较好^[11]。陈晨等通过实验发现气液比和相对速度的增加有利于促进喷雾场液滴尺寸的均匀性,在固定气体质量流率的前提下,存在一个最佳液体喷注压降,使雾化效果达到最佳^[12]。以上文献主要对单个 LCSC 喷嘴的雾化特性开展基础研究,并且说明喷注压降及 GLR 是影响单个喷嘴喷雾性能的重要因素。

实际火箭发动机中极少仅采用单个喷嘴,一般的大推力发动机采用的是多喷嘴的喷注器。多喷嘴研究方面,Hardalupas 等对单喷嘴与多喷嘴的径向雾化性能进行了对比,发现随着液体质量流率的

增加,喷雾交汇区域相互作用增强,液膜破碎长度缩短^[13]。Song 等通过实验对气体中心式同轴离心多喷嘴相互作用进行研究,对实验拍摄图像进行动力学模态分解,发现喷嘴附近的区域为主要流场,相互作用区域为次要流场^[14]。陈曦等基于 Fluent 对多喷嘴的喷雾干涉进行了数值模拟分析,结果表明喷嘴数目的增加提高了雾滴颗粒之间相互碰撞聚合的概率^[15]。王凯等对相邻离心式喷嘴的液膜撞击过程进行了仿真研究,发现多液膜撞击会使得液滴空间分布发生大的变化^[16]。侯艳等对离心式多喷嘴喷雾场进行仿真研究,发现增加喷嘴数目可以明显改善喷雾粒径和速度分布均匀性^[17]。目前对于多喷嘴雾化特性实验及仿真方面的研究对象多为纯液相离心式喷嘴,以及气液同轴气体中心式离心喷嘴,而对 LCSC 多喷嘴的雾化特性研究鲜有文献发表。

综上所述,学界已对单喷嘴的雾化锥角等喷雾特性进行了较为完善的研究,并对多喷嘴雾化特性进行了初步的仿真研究。而液体火箭发动机实际使用中是多个喷嘴同时工作,因此研究多喷嘴情况下的雾化特性,对了解发动机中雾化过程具有重要的实际意义。本文通过实验对纯液相不同压降及气液双相不同 GLR 下 LCSC 单喷嘴、双喷嘴的雾化特性进行了对比分析,以揭示双喷嘴与单喷嘴的雾化特性差异,进而用于指导工程实际。

1 实验条件

1.1 喷雾实验系统

喷雾实验系统由 4 部分组成,分别为管路供应系统、测控系统、图像采集系统和台架系统,如图 1 所示。管路供应系统是由高压气源、输气管路、输液管路、液体推进剂罐等组成。液体推进剂罐通过高压气源增压,将液体送至集液腔;空气通过高压气源的另一路送至集气腔。测控系统中压力传感器、气液质量流量计和激光粒度仪(真理光学, Spraylink)分别用于测量记录集液腔和集气腔压力、控制模拟介质的质量流率、喷雾粒径数据。其中虹润精密仪器有限公司生产的 OHR-M3G-3-L-C-0-1.6 MPa 型压力传感器精度为 0.5 % FS;北京精量科技有限公司 ACU20FE 液体质量流率控制计精度为 0.2 % FS;高压气体通过调节管路中的减压阀后得到所需工况的气体质量流率,精度为 $\pm 1\%$ SP。图像

采集系统由高速摄像机、遮光板和矩形 LED 背景光源(HLS-30,功率为 350 W)组成。实验时将 LED 背景光源、遮光板、喷嘴轴线和高速摄像机依次布置在一条直线上,并合理调节各部件的距离以保证捕

捉精细的喷雾瞬态图像。高速摄像机帧频设定为 31 863 帧/s,曝光时间为 1/477 930 s,像素为 800 × 600。台架系统由实验件安装支架、收集槽和排水管系统组成。

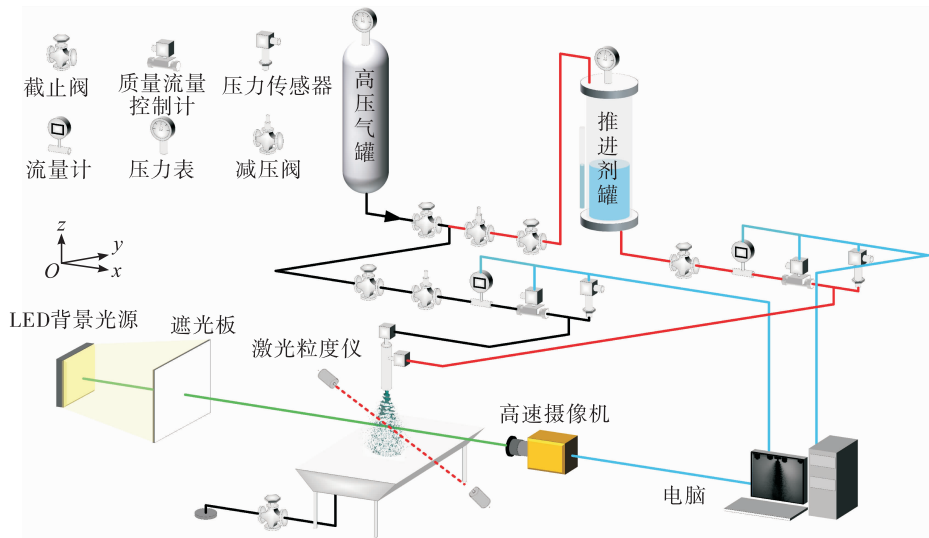


图 1 常压雾化实验系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of atomization experimental system under atmospheric pressure

1.2 喷嘴参数

喷嘴安装于上、中、下 3 层壳体之间,上层壳体与中层壳体之间形成集液腔,中层壳体与下层壳体构成集气腔,如图 2 所示。在进行单喷嘴实验时其余喷嘴出口通过特制堵头进行密封。表 1 为喷嘴具体尺寸参数。

表 1 喷嘴尺寸参数

Tab.1 Geometrical parameters of injector

参数	数值
D_z/mm	4.7
D_{g-in}/mm	8
D_{g-out}/mm	9
D_s/mm	10.2
L_s/mm	10.2
D_t/mm	2
R_s/mm	4
$\theta_2/(\text{^\circ})$	90
$\theta_1/(\text{^\circ})$	10
L_{sp}/mm	20
L_z/mm	40

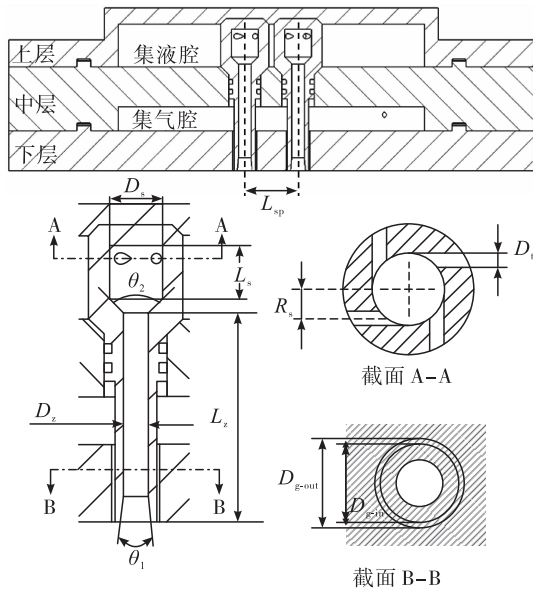


图 2 双喷嘴结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of double injectors structure

1.3 雾化锥角提取

通过聚类方法获取雾化锥角。首先对实验所得的喷雾图像进行时均处理,减去背景图像,消除

光照不均对数据影响,通过高斯算法得到时均加权滤波图;基于 K-MEANS^[18]分割通过形态学滤波得到背景二值图像;获取图像边界的坐标,获得喷雾边界,液喷嘴出口两点与喷嘴外径边缘两点共同拟合合成直线 l_1 与 l_2 ,通过程序获得雾化锥角^[19]。

$$l_1: y_1 = k_1 x + b_1, \alpha_1 = \arctan k_1 \quad (1)$$

$$l_2: y_2 = k_2 x + b_2, \alpha_2 = \arctan k_2 \quad (2)$$

$$\beta_s = 180^\circ - |\alpha_1 - \alpha_2| \quad (3)$$

式中: k_1 为直线 l_1 斜率; k_2 为直线 l_2 斜率; α_1 为直线 l_1 斜率反正切值; α_2 为直线 l_2 斜率反正切值; β_s 为单喷嘴的雾化锥角。

对于双喷嘴左右两喷嘴分别按照上述方法获取各自雾化锥角 β_l 与 β_r , 如图3所示。选取平均值 $\bar{\beta}$ 作为双喷嘴的雾化锥角取值, 流程如图3所示。

$\bar{\beta}$ 计算式为

$$\bar{\beta} = \frac{\beta_l + \beta_r}{2} \quad (4)$$

式中: β_l 为左侧喷嘴雾化锥角; β_r 为右侧喷嘴雾化锥角。

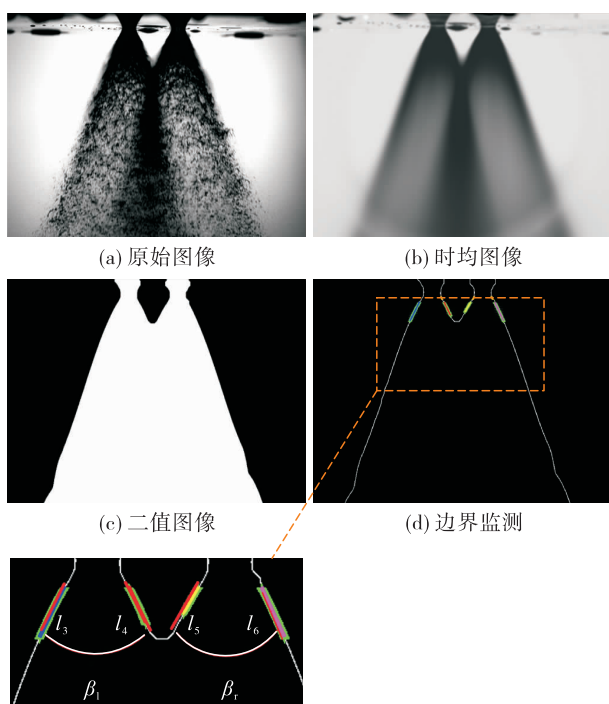


图3 双喷嘴雾化锥角提取示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spray angle extraction for double injectors

2 实验工况设置

实验主要对比不同工况下 LCSC 单喷嘴与双喷嘴雾化特性, 实验中每个喷嘴工况设置如表2所示(其中 Δp 为喷注压降, \dot{m} 为质量流率)。其中气体与液体质量流率测量误差 ε 不超过4.2%和6.7%。

表2 实验工况

Tab. 2 Experimental operating conditions

模拟气体推进剂(空气)		模拟液体推进剂(水)		$\varepsilon/\%$
$\Delta p/\text{MPa}$	$\dot{m}_1/(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta p/\text{MPa}$	$\dot{m}_g/(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	
0.864	140	0.07	4	2.8
		0.09	5	3.6
		0.12	6	4.3
0.285	80	0.07	4	5.0
		0.09	5	6.3
		0.12	6	7.5
0.119	50	0.07	4	8.0
		0.09	5	10.0
		0.12	6	12.0

3 结果与讨论

3.1 纯液膜单、双喷嘴雾化锥角特性

定义双喷嘴锥角间的误差为 α , 计算式为

$$\alpha = \frac{|\beta_l - \beta_r|}{\beta_l} \quad (5)$$

提取无气体作用($\varepsilon=0$)、不同液体质量流率下的雾化锥角 β 、双喷嘴的左、右两侧的雾化锥角(如表3所示), 可以看出双喷嘴的左右两侧的雾化锥角之间相差不超过3%。因此, 可选取两者的平均值作为双喷嘴的雾化锥角, 研究喷嘴间相互作用对雾化锥角的影响。

$\varepsilon=0$ 时, 提取单喷嘴与双喷嘴的雾化锥角进行对比, 结果如图4所示。由图4可知, 随着液体质量流率的增加, 无论是单喷嘴还是双喷嘴, 喷嘴的雾化锥角都随着 \dot{m}_l 的增加呈增大的趋势。

表 3 纯液相工况及左右喷嘴雾化锥角

Tab. 3 Pure liquid operating condition and spray angle of left/right injector

编号	喷嘴数目	$\dot{m}_l / (\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	$\dot{m}_g / (\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	$\beta / (^\circ)$	$\beta_l / (^\circ)$	$\beta_r / (^\circ)$	误差/%
1	1	50	0	53.27	—	—	—
2	1	80	0	55.94	—	—	—
3	1	140	0	60.55	—	—	—
4	2	100	0	—	54.45	53.11	2.47
5	2	160	0	—	56.97	57.27	0.52
6	2	280	0	—	60.68	60.96	0.46

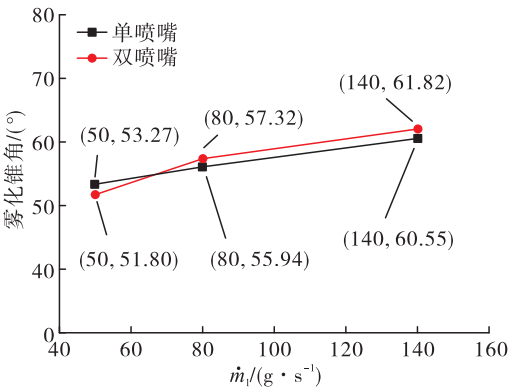


图 4 $\varepsilon = 0$ 时单喷嘴与双喷嘴雾化锥角对比

Fig. 4 Comparison of spray angle for single injector spray angle and double injectors while $\varepsilon = 0$

定义单喷嘴与双喷嘴雾化锥角的平均值 β_0 的计算式为

$$\beta_0 = \frac{\beta_{s0} + \bar{\beta}_0}{2} \tag{6}$$

式中： β_{s0} 为 $\varepsilon = 0$ 时喷注面板上只安装单个喷嘴时的雾化锥角； $\bar{\beta}_0$ 为 $\varepsilon = 0$ 时喷注面板安装双喷嘴时的平均雾化锥角。

相同工况下,单喷嘴与双喷嘴的雾化锥角的差值不超过单喷嘴雾化锥角的 1.5%。说明在无环缝气相加入时($\varepsilon = 0$),双喷嘴的雾化锥角相互间不受影响,与单喷嘴相似,在喷嘴下游近壁区,两股液膜未产生相互作用的区域,液膜的扩散范围几乎未受另外一个喷嘴的影响。故可选单喷嘴与双喷嘴雾化锥角的平均值 β_0 作为此工况下的基准雾化锥角,进而对气液双相下雾化锥角进行无量纲化,比较气

体作用对雾化锥角的影响程度。

3.2 环缝气体作用下单、双喷嘴雾化锥角特性

以上述 $\varepsilon = 0$ 时的雾化锥角作为基准值,计算出每个喷嘴液体质量流率为 50 g/s 时 $\beta_0 = 53.53^\circ$;每个喷嘴液体质量流率为 80 g/s 时 $\beta_0 = 56.81^\circ$;每个喷嘴液体质量流率为 140 g/s 时 $\beta_0 = 60.94^\circ$ 以基准值作为参照,对 $\varepsilon \neq 0$ 的工况进行归一化处理。定义无量纲数 $\beta_\gamma = \beta/\beta_0$,表示有环缝气体加入相对于无环缝气体加入的雾化锥角的变化程度。按 1.3 节所述雾化锥角提取程序提取不同 ε 下的雾化锥角,单喷嘴无量纲公式中的 β 对应于按程序提取的雾化锥角 β_s ,双喷嘴左右两喷嘴的喷雾锥角如图 5 所示,误差不超过 8%,故以左右喷嘴的喷雾锥角的平均值作为 β 。

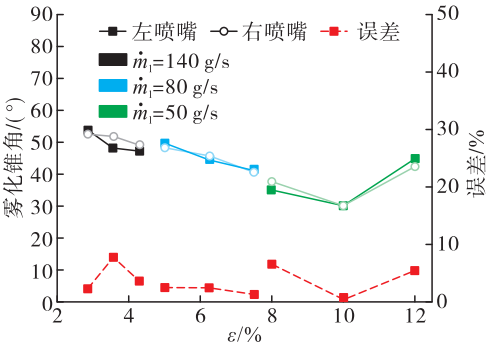


图 5 双喷嘴左、右喷嘴雾化锥角实验对比

Fig. 5 Experimental comparison of atomization spray angle between left and right injectors of double injectors

图 6 为不同 ε 下单喷嘴无量纲数 β_γ 随 ε 的变化情况。由图 6 可得随着 ε 的增加,无量纲数 β_γ 逐

渐减小。即对于单喷嘴,随着 ε 的逐渐增大,在气动力的作用下液膜轴向速度增加,径向速度减小,喷雾的雾化锥角减小。

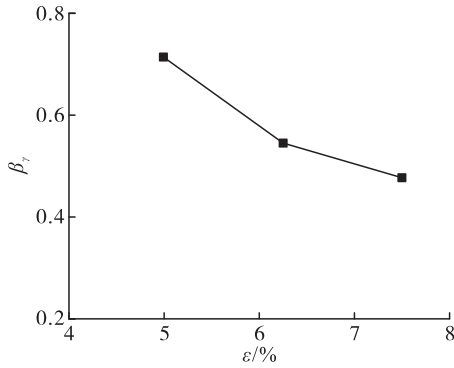


图6 单喷嘴 β_γ 随 ε 的变化情况

Fig. 6 Variation of single injector β_γ with ε

有环缝气体作用时雾化锥角的稳态理论计算式为^[20]

$$\tan \frac{\beta}{2} = \frac{\omega}{\mu} = \frac{\dot{m}_l \omega_l + \dot{m}_g \omega_g}{\dot{m}_l v_l + \dot{m}_g v_g} = \frac{\dot{m}_l v_l \tan \frac{\beta_l}{2} + \dot{m}_g v_g \tan \frac{\beta_g}{2}}{\dot{m}_l v_l + \dot{m}_g v_g} \quad (7)$$

式中: v 为气液双相混合物轴向速度; ω 为两相混合物周向速度; β 为雾化锥角。

雾化锥角取决于气液之间的动量传递,在相同液体质量流率下液膜在出口的周向速度 ω_l 与轴向速度 v_l 基本不变,无气体加入时,气体从气喷嘴环缝喷出周向速度 ω_g 与轴向速度 v_g 为0,无论是单喷嘴还是双喷嘴其他各项参量未发生改变,所以雾化锥角未发生改变。有环缝气体作用时,由环缝喷出的高速气流对气液双相混合物轴向速度影响较大,随着气流射出,液膜轴向速度 v 增加,雾化锥角减小。与单喷嘴不同,双喷嘴之间的环缝气流相互间存在影响,从而造成轴向及周向速度的改变,影响雾化锥角。

图7分别为低、中、高3种 ε 下无量纲数 β_γ 的变化情况。通过对比观察到,在低 ε 的情况下($2\% < \varepsilon < 4.5\%$),单喷嘴与多喷嘴无量纲数 β_γ 相差不大。在中等 ε 的情况下($4.5\% < \varepsilon < 7.5\%$),随着 ε 的增加,单喷嘴与多喷嘴无量纲数 β_γ 差距逐渐增大。分

析认为,随着 ε 的增加,气液动量交换加剧,破碎长度逐渐减小,在喷嘴出口处就破碎为细小液滴,由于细小液滴动量较小,易受到双喷嘴间湍流气流的裹挟,从而导致喷雾嘴角增大。在高 ε 情况下($7.5\% < \varepsilon < 12\%$),单、双喷嘴喷雾的无量纲数之间的差距趋于稳定。分析认为,当出口处气液动量比达到一定程度时,液滴无法再破碎成为更小的液滴,致使每个喷嘴外侧小液滴随气体流率的增加动量变化不大,液滴被裹挟的范围即液滴径向扩展范围不再增加,且随着气体质量流率的增加,环缝气体射流轴向速度增加,进一步减小了液滴的径向扩展范围,所以单喷嘴与双喷嘴的无量纲数 β_γ 在 $\varepsilon = 10\%$ 时会有减小的趋势。当 ε 增加为12%时,无量纲数 β_γ 差距急剧增大,是因为此时喷雾出现自激振荡现象^[21],喷雾范围扩大,为非稳态下的破碎(见图8)。

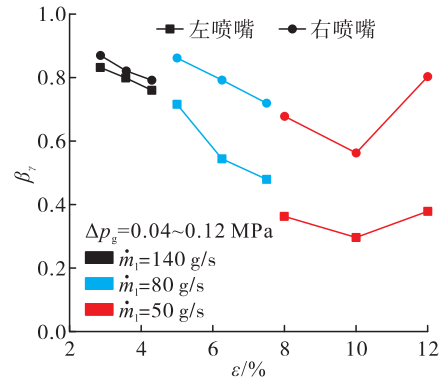


图7 不同气流率比单喷嘴与双喷嘴无量纲数变化

Fig. 7 Dimensionless variation of single injector and double injector with different gas-liquid flow ratios

$\varepsilon = 7.5\%$ 时双喷嘴工作时的喷雾图像及液滴粒径测量位置关系如图9所示。将距离喷嘴出口下游10 mm处选为测量平面,测量点间隔5 mm,以右侧喷嘴中心作为原点,在径向方向上均匀分布,采样时间设置为10 s,每个采样点采集20组数据,对粒径数据时均化,得到如图10所示结果。从图10中可以看出,右喷嘴喷雾两侧粒径小于中间粒径,喷雾相互作用区域上游即横坐标为 $-5 \sim -10$ mm处粒径小于非相互作用区域 $5 \sim 10$ mm处的粒径。

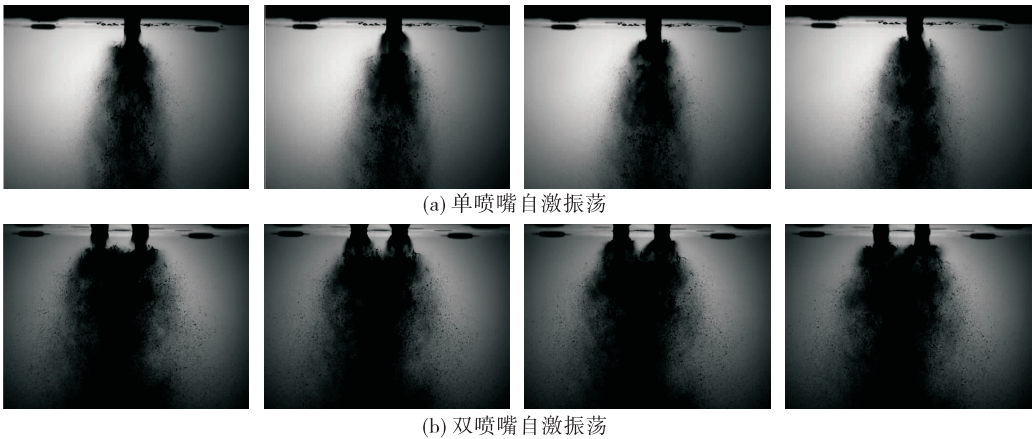


图 8 非稳态破碎

Fig. 8 Unsteady crushing

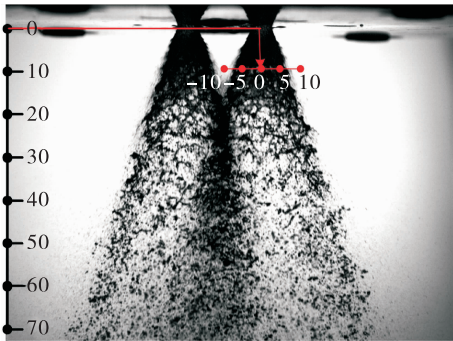


Fig. 9 Diagram of measurement position (unit:mm)

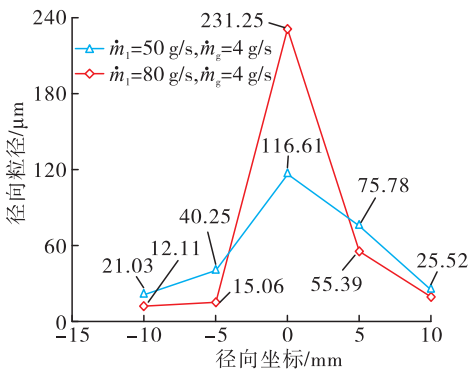


Fig. 10 Radial particle size data

分析认为,在相互作用区域上游,气液形成复杂的湍流区。在气液相互作用下,喷雾边缘处的液滴二次雾化,形成液雾,在液体质量流率为 80 g/s、气体质量流率为 4 g/s 的工况下,非交汇

区域平均粒径与交汇区域相比分别增大 80 %、267 %,说明交汇区域对液滴破碎效果更明显。湍流区气流的卷吸裹挟使得喷雾向内偏移,即雾化锥角变大,其原理如图 11 所示。两种测量工况下,在 $\pm 10\text{ mm}$ 处粒径相差不大,这是因为此处的液滴主要是由于喷雾卷吸作用所引起,液滴破碎为更小液滴。图 10 中心处红色线段的粒径大于蓝色线段粒径,是因为所测量位置距离喷嘴出口较近,液膜并未充分扩张,液膜以一次破碎为主,中心处的粒径主要是由液体质量流率决定,所以 80 g/s 工况下的粒径大于 50 g/s 的粒径,而边缘处的粒径是气液强烈相互作用二次破碎所导致,气体质量流率为 6 g/s 时的粒径小于 4 g/s 时的粒径。

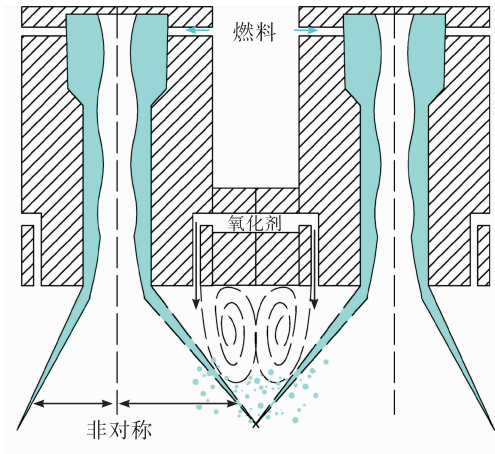


图 11 雾化锥角变化原理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of change principle for atomization cone angle

4 结论

本文分析了不同 ε 值下单喷嘴与双喷嘴液膜雾化锥角变化规律,并通过理论分析与粒径测量探究了产生差异的机理,主要结论如下。

1)中、高 ε 值的情况下,相同工况下双喷嘴的雾化锥角大于单喷嘴。与单喷嘴相比,双喷嘴喷雾向两喷嘴间偏移。

2)气相加入后双喷嘴间复杂的湍流区促使喷嘴间的液膜破碎为更小的液滴。

3)由于喷嘴液滴间粒径较小,导致其易受到喷嘴间湍流的卷吸作用影响,从而造成喷雾向内偏移,致使雾化锥角变大。

参考文献

- [1] 楚威,李修乾,全毅恒,等.液体中心式同轴离心喷嘴液膜破碎特性仿真研究[J].推进技术,2021,42(7):1522-1533.
- [2] 游云霞,侯力,易宗礼,等.气液同轴离心式喷嘴雾化性能及优化设计研究[J].机械工程学报,2022,58(1):201-211.
- [3] 姜传金,任永杰,全毅恒,等.液体火箭发动机离心式喷嘴振荡喷雾特性现状和发展趋势[J].国防科技大学学报,2023,45(3):1-19.
- [4] 康忠涛.气液同轴离心式喷嘴非定常雾化机理和燃烧特性研究[D].长沙:国防科学技术大学,2016.
- [5] 曹建明.液体喷雾学[M].北京:北京大学出版社,2013.
- [6] HAUTMAN D J. Spray characterization of liquid/gas coaxial injectors with the center liquid swirled[J]. Atomization and Sprays,1993,3(4):373-387.
- [7] GULDENBECHER D R, RACHEDI R R, SOJKA P E. Pressure-scaling of pressure-swirl atomizer cone angles[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2008,130(6):1.
- [8] WHITLOW J D, LEFEBVRE A H. Effervescent atomizer operation and spray characteristics[J]. Atomization and Sprays,1993,3(2):137-155.
- [9] WEI X A, YONG H A. Improved semiempirical correlation to predict sauter mean diameter for pressure-swirl atomizers[J]. Journal of Propulsion and Power,2014,30(6):1628-1635.
- [10] 徐文,高新妮,胡保林,等.离心式喷嘴一次破碎与二次雾化的数值模拟[J].火箭推进,2022,48(4):13-20.
XU W, GAO X N, HU B L, et al. Numerical simulation of primary breakup and secondary atomization for centrifugal nozzle[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(4):13-20.
- [11] IM J H, CHO S, YOON Y, et al. Comparative study of spray characteristics of gas-centered and liquid-centered swirl coaxial injectors[J]. Journal of Propulsion and Power,2010,26(6):1196-1204.
- [12] 陈晨,晏至辉,唐志共,等.气液同轴离心式喷嘴雾化特性试验研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2020,34(6):50-55.
- [13] HARDALUPAS Y, WHITELAW J H. Interaction between sprays from multiple coaxial airblast atomizers[J]. Journal of Fluids Engineering,1996,118(4):762-771.
- [14] SONG W, KOO J. Spray patterns of multi-element swirl coaxial injector of interacting spray under different injection conditions[J]. AIP Advances,2021,11(7):75030.
- [15] 陈曦,葛少成,张忠温,等.基于Fluent多喷嘴喷雾干涉数值模拟分析[J].环境工程学报,2014,8(6):2503-2508.
- [16] 王凯,李鹏飞,杨国华,等.相邻离心式喷嘴液膜撞击雾化过程仿真[J].推进技术,2017,38(2):408-415.
- [17] 侯燕,陶毓伽,淮秀兰.多喷嘴喷雾场数值模拟分析[J].工程热物理学报,2012,33(8):1362-1366.
- [18] GABOW H. Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on discrete algorithms[M]. Philadelphia, PA:Society for Industrial and Applied Mathematics,2007.
- [19] ARTHUR D, VASSILVITSKII S. K-means++:The advantages of careful seeding[C]//18th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. New Orleans, Louisiana:[s. n.],2007.
- [20] 姜传金.气体中心式同轴离心喷嘴非定常雾化特性研究[D].北京:航天工程大学,2021.
- [21] 白晓.气液同轴离心式喷嘴自激振荡过程及对喷雾燃烧特性的影响研究[D].长沙:国防科技大学,2020.