

空心锥形喷雾与横流掺混特性研究*

盛刚浩¹, 张海滨¹, 白博峰²

(1. 西安交通大学 化学工程与技术学院, 陕西 西安 710049;
2. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 在空心锥形喷雾与横向气流掺混过程中, 大尺度对称旋涡对CVP (Counter-Rotating Vortex Pair) 是影响液滴扩散的主要机制, 为了研究CVP结构的演变特性, 本文开展了空心锥形喷雾与横向气流掺混过程的实验研究, 采用PIV可视化技术对不同喷雾状态与横流速度下掺混流场中液滴的扩散与分布特性进行了测量。结果表明: CVP的卷吸夹带作用使雾化液滴主要分布在掺混流场中上部; 初始雾化液滴动量较大时, CVP结构尺寸与涡心强度越大, 有利于液滴的扩散; 横流速度提高时, CVP结构位置上移, 尺寸减小, 掺混效果变差。采用涡心强度、涡心距与涡心高度三个参数来描述CVP结构强度特征, 基于实验测量结果给出了CVP结构上述特征参数的关联式。在横流速度、喷嘴压力和初始雾化粒径3个变量中, 初始雾化粒径对CVP结构影响最大, 而喷嘴压力和横流速度的影响较小。

关键字: 空心锥形喷雾; 横流; 液滴扩散; CVP结构

中图分类号: V211.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2018) 01-0100-07

DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2018. 01. 011

Study on Characteristics of Mixing of Hollow-Cone Spray and Crossflow

SHENG Gang-hao¹, ZHANG Hai-bin¹, BAI Bo-feng²

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The CVP (Counter-Rotating Vortex Pair) structure which is caused by the interaction between the hollow-cone spray and the crossflow exerts great influence on spray droplet dispersion. In order to study the characteristics of the CVP evolution, experimental investigations on the mixing flow field of the hollow-cone spray in a crossflow were conducted. The dispersion and distribution of spray droplets in the mixing flow field with different spray and crossflow conditions were measured by PIV system. The results show that the entrainment effect of the CVP contributes atomization droplets to distributing in the upper of the mixing field. The larger initial momentum of droplets, the larger the CVP structure size and the vortex intensity and it is beneficial to the dispersion of the droplets. When the crossflow velocity increases, the CVP moves up and the CVP structure size decreases, consequently the mixing effect becomes worse. The intensity characteristic of the CVP is described by three parameters: vortex core strength, vortex center distance and vortex core height, the correlations of the characteristic parameters of the CVP are given based on the experimental results. In the three variables of the crossflow velocity, atomization pressure and initial droplet diameter, the initial droplet diameter has greater influence on the CVP structure, while the atomization pressure and the crossflow velocity have less effect.

Key words: Hollow-cone spray; Crossflow; Droplet dispersion; CVP

* 收稿日期: 2016-09-23; 修订日期: 2016-11-18。

基金项目: 国家自然科学基金 (51306146)。

作者简介: 盛刚浩, 男, 硕士生, 研究领域为气液两相强化掺混。E-mail: ganghao@stu.xjtu.edu.cn

通讯作者: 张海滨, 男, 博士, 副教授, 研究领域为气液两相掺混与传热。E-mail: hb-zhang@mail.xjtu.edu.cn

1 引言

空心锥形喷雾具有很好的雾化效果,雾化距离较短,雾化液滴较小,空心锥形分散体大,液滴覆盖面积大等优点^[1-3],在工业及军事领域有很重要的应用。如在水反应金属燃料发动机中,其影响发动机整体性能关键的二次进水过程采用空心锥形喷雾与高温燃气进行掺混,以达到降低燃气温度和提升发动机比冲的目的^[4,5]。因此雾化液滴群与横流燃气的掺混效果将直接影响发动机的热工转换效率。在液体射流掺混研究领域,目前针对直喷式射流、圆环液膜射流等雾化及掺混过程^[6-15]已有大量的研究,但针对空心锥形喷雾与横流掺混的研究相对较少,对空心锥形喷雾与横流掺混特性及气液两相作用动力学机理尚不清楚。Prakash R Surya^[16]等对横流中旋流喷雾进行实验研究,分析了不同的韦伯数和气液动量比对喷雾扩散特性的影响,并引入了旋流数(Swirl number, SN)来表征对液滴二次雾化扩散、射流贯穿深度以及液滴平均索特尔直径(Sauter Mean Diameter, SMD)的影响。Eletribi^[17]采用PDPA分点测量方法,研究了横流中旋流喷雾的扩散特性,通过测量不同横流速度、喷口位置和气流中心的距离下,液滴的尺寸、速度和液滴流率分布,得出气速是横流喷雾扩散的决定性因素,并分析了喷雾贯穿深度、湍流涡结构变化与横流速度的关系,但没有分析整体流场和不同雾化粒径的影响。Amy Lynch^[18]等通过PDPA技术发现了横向气流中空心锥形喷雾下游雾化液滴垂直方向速度的双峰式结构,且粒径较小的雾化液滴速度较小而粒径较大的雾化液滴垂直方向速度较大。

在之前的研究^[19]中发现CVP是影响横流中空心锥形喷雾液滴扩散的主要机制。在近喷嘴区,由于空心锥形高浓度液滴群阻碍了横流的流动,在喷雾后方会形成一个低压区,喷雾两侧气流在压力驱动下向低压区流动,从而在流场截面上方形成CVP结构。一方面,由于CVP对液滴的卷吸携带作用,促进了液滴的扩散,有利于均匀掺混。另一方面,CVP结构的强卷吸作用也造成液滴的倾向性分布,使得流场中液滴主要分布在CVP结构的边缘,而截面下方液滴分布较少。

但目前对于横向气流与空心锥形喷雾掺混过程中CVP结构特性研究较少。张海滨^[20-23]等研究了受限空间内横向气流与空心锥形喷雾掺混过程,定性分析了不同条件下横流/喷雾/壁面三者作用下CVP的结构特征。但是由于先前的研究结果相对较少,

且掺混空间(横截面尺寸为95mm×95mm)较小,掺混流场中存在上下两个CVP结构,上方主CVP结构较大,是由于喷雾液滴群与横流相互作用而产生;下方CVP主要是由于高速液滴与侧壁及底部壁面撞击而产生,在掺混发展过程中,这两对CVP结构互相影响。

为了更好地分析获得空心锥形喷雾与横向气流作用下掺混流场形成的主CVP结构的演变特性,本文选择尺寸较大的掺混通道,从而避免了较小掺混空间情况下掺混流场下部CVP的形成及其对主CVP结构发展的影响。通过对不同掺混条件下CVP结构的测量与分析,获得了CVP结构特征与涡量强度随不同影响参数的系统变化规律,并在此基础上给出了CVP结构特征演变随横流速度、喷嘴压力和初始雾化粒径的特征关联式。研究结果拓宽了对横流与空心锥形喷雾掺混过程的认识,为工业生产中相关掺混过程组织提供了基础数据与理论指导。

2 实验装置和方法

图1为横向气流与空心锥形喷雾两相掺混实验系统示意图。系统主要包括主气路、支气路、水路和PIV测试系统。测试段长800mm,横截面尺寸为180mm×180mm,喷嘴布置在测试段上壁面中心处,并以喷嘴所在位置为原点建立掺混流场坐标系,在掺混段的侧面自喷嘴所在截面开始共开设14个条缝作为测量截面,缝间距为3cm(见图2)。横流空气由离心风机提供,空气流量通过变频器调节,从风机出来的气流经过整流段及稳流段后进入掺混测试段。冷态水储存在自行设计的高压储液罐中,由高压氮气瓶中的氮气将其压送至喷嘴后完成雾化进而与横向空气进行掺混,喷嘴雾化压力通过氮气瓶压力及喷嘴上游的调节阀共同控制。实验过程中,横向气流的速度与温度通过安装在稳流段中的皮托管测速仪测量,喷嘴上游安装有压力测量装置及调节阀,压力测量采用麦克压阻式压力传感器(量程为0~1.2MPa),压力传感器测量得到的电信号通过NI数据采集系统转变为压力数值输出。

采用PIV测试系统拍摄瞬态流场图像。在喷雾与横流掺混流场中添加示踪粒子,示踪粒子会粘附于雾化液滴,造成PIV测量的困难。另外本实验中液滴的 St 数为0.01~0.25,即液滴的响应时间小于流场中大尺度涡的特征时间,液滴具有良好的气体跟随性,液滴的运动能很好地体现其周围气流的运动规律,所以本实验中直接使用液滴作为示踪粒子。PIV激光器单脉冲能量为120mJ,频率15Hz,输出波长

532nm 的可见绿光。CCD 相机具有 14 位灰度显示，双帧跨帧间隔为 115ns，分辨率为 2048×2048。实验中对每个测量截面均进行 3 次独立测量，同时每次单个截面连续拍摄图像 40 张(对)，拍摄频率为每秒 5 张(对)。

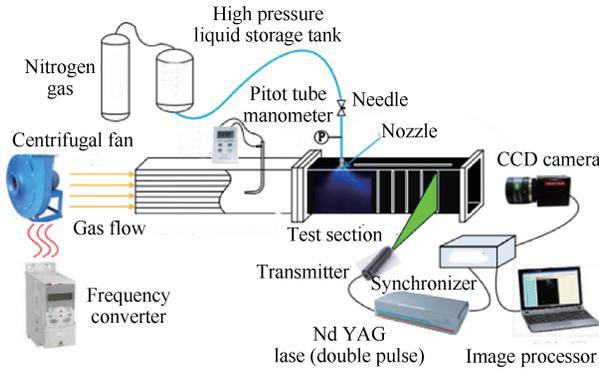


Fig. 1 Experiment system

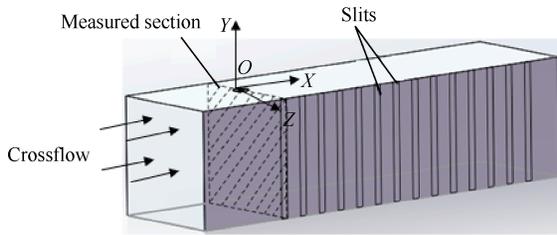


Fig. 2 Schematic of measured section

横流与空心锥形喷雾掺混过程是非常过程^[24,25]，但通过 PIV 多次测量发现在掺混充分发展后，流场结构(漩涡结构和液滴分布)具有很好的稳定性，所以本文可以通过对多组瞬态图像进行时均化处理来获得掺混流场和雾化液滴的分布特性，从而尽可能降低系统测量误差。采用 Matlab 图像处理工具对同一截面上多组不同时刻的瞬态图像进行时均化处理获得流场中液滴时均位置分布。通过后处理软件 In-

sight 4G 分析液滴瞬态图，得到流场中液滴瞬态速度矢量分布，然后通过 Tecplot 计算工具对多组液滴瞬态速度进行时均处理获得液滴运动时均速度。

实验中采用日本雾的池内公司的 KB80 系列空心锥形雾化喷嘴，喷嘴雾化锥角为 80°，雾化效果很好，液膜破碎距离小，可以近似认为液体离开喷嘴即雾化成液滴群，液膜破碎对横流影响可以忽略，故本文分析中不考虑液膜的破碎过程。为了研究不同喷雾条件下的两相掺混规律与流场特征，针对 5 种不同型号的喷嘴在不同雾化状态下的掺混流场进行测量。表 1, 2 分别给出了不同型号喷嘴的雾化性能参数与实验测试工况。

Table 1 Types and parameters of the nozzles

No.	$\Delta p=0.5\text{MPa}$		$\Delta p=0.7\text{MPa}$		$\Delta p=1\text{MPa}$	
	$V/(L/h)$	$D_{32}/\mu\text{m}$	$V/(L/h)$	$D_{32}/\mu\text{m}$	$V/(L/h)$	$D_{32}/\mu\text{m}$
1	3.89	65	4.6	61	5.5	56
2	8.96	79	10.6	73	12.7	68
3	15.7	93	18.6	86	22.3	80
4	22.6	107	26.7	99	31.9	92
5	35.2	130	41.6	121	49.8	112

Table 2 Experimental conditions

		$D_{32}/\mu\text{m}$					$\Delta p/\text{MPa}$		Re	
65	79	93	107	130	0.5	12800/25700/38400/51200				
61	73	86	99	121	0.7	12800/25700/38400/51200				
56	68	80	92	112	1.0	12800/25700/38400/51200				

3 实验结果与讨论

3.1 旋流喷雾与横向气流掺混过程

图 3, 4 分别为典型横流与空心锥形喷雾掺混流场不同横截面上液滴和矢量分布特征。其中 D 为掺

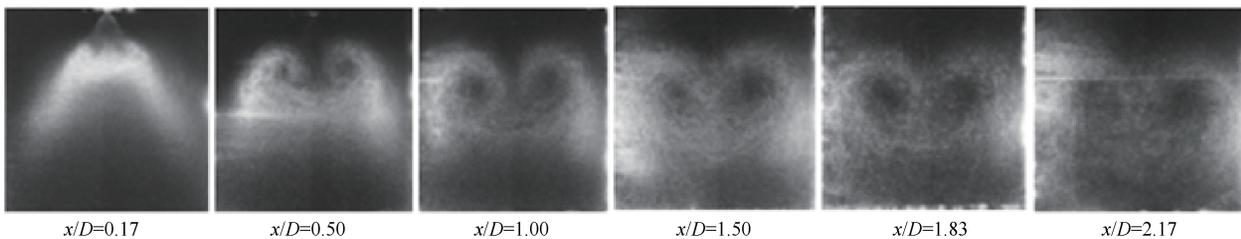


Fig. 3 Droplet distribution at different sections with $D_{32}=86\mu\text{m}$, $\Delta p=1\text{MPa}$, $Re=25700$

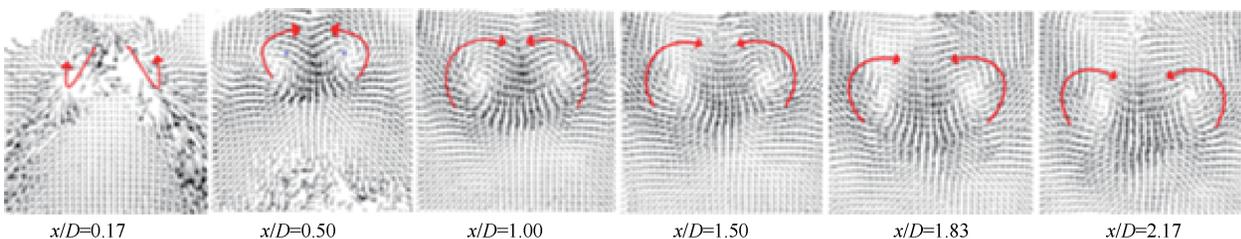


Fig. 4 Velocity vector fields at different sections with $D_{32}=86\mu\text{m}$, $\Delta p=1\text{MPa}$, $Re=25700$

混流场截面特征直径,为180mm。从图中可以看出,气液掺混过程中,流场截面中上方出现明显的大尺度CVP结构。在CVP影响下,雾化液滴随卷吸气流夹带而进一步扩散,CVP的外缘卷吸气流区域液滴浓度较高,CVP涡心区、流场上部和底部则粒子稀少。在掺混初期,CVP结构较小,雾化液滴具有较大的初始动量,流场中液滴群分布呈空心锥形,横截面上液滴分布明显不均;随着横向气流与垂直入射喷雾进一步作用,流场出现明显CVP结构并随着掺混的发展结构逐渐增大,在CVP作用区域,横截面上方粒子分布呈现旋涡状结构分布;随CVP影响区域的增大,更多液滴被卷吸气流所夹带,促进了液滴在截面上的扩散,流场中部的液滴逐渐向截面两侧移动,截面两侧液滴浓度逐渐增加;此外,CVP结构增大的同时,其涡心位置逐渐下移。在掺混后期,随着CVP卷吸气流能量逐渐耗散,CVP旋涡强度逐渐衰减,结构变得模糊。液滴在横截面上分布较为分散,流场截面上液滴分布均匀性变好。

3.2 不同因素对CVP结构的影响

宏观上来讲,保持喷嘴布置方式不变的情况下(喷嘴位置和喷嘴入射角恒定),要改变喷雾与横流掺混效果的途径有三个:(1)改变横流的速度, Re ; (2)保持喷嘴不变,改变喷雾雾化压力, Δp ; (3)保持雾化压力不变,改变喷嘴(雾化效果不同,这里主要以雾化粒径, D_{32} , 来表征雾化效果)。这里本文从上述三方面研究各影响因素对掺混效果的影响。为了更直观地表征掺混流场中CVP结构的变化规律,本文选用以下三个参数来表征CVP,即CVP涡量值(W)、涡心距(L)和涡心高度(Y),结构参数 L, Y 如图5所示。

其中,将PIV拍摄得到的流场速度分布信息,导入Tecplot处理软件中计算得出流场截面涡量($\Omega = \text{dd}X(v) - \text{dd}Y(u)$)分布,并通过截面上涡量值(涡心处涡量值最大)的分布来确定涡心位置。

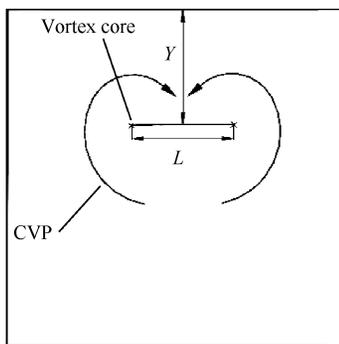


Fig. 5 Parameters of CVP at the cross section of mixing field

3.2.1 横流速度的影响

图6为不同横流速度下掺混流场中CVP特性变化曲线。从图中可以看出,在不同横流速度下,随着横流与空心锥形喷雾掺混的发展,CVP涡心距(L)均逐渐增大,涡心高度(Y)也逐渐增大,旋涡涡心位置逐渐下移;同时CVP涡量值逐渐减小。对比不同工况结果可以看出,随着横流速度的增大,CVP涡量值逐渐增大,而旋涡中心距和CVP高度则减小。

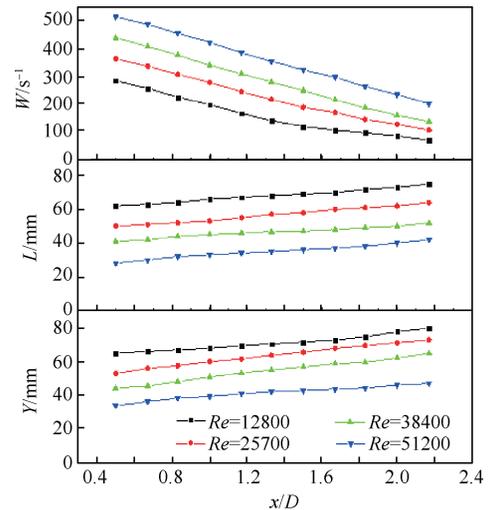


Fig. 6 Size and structural changes of CVP under different crossflow velocity with $D_{32}=86\mu\text{m}, \Delta p=1\text{MPa}$

当横流速度较小时,由于初始喷雾液滴具有较大的初始动量,空心锥形喷雾液滴群对横流的阻碍作用增强,造成更多气流绕过锥形分布液滴群从而形成CVP结构,动量较小的液滴在卷吸气流作用下随CVP的发展而扩散,动量较大的液滴则向流场下方沉积(见图7)。随着横流速度的提高,横向气流动量增大,对雾化液滴群的携带能力增强,截面中下部液滴随气流向下游运动,截面上部液滴群对横流阻碍作用减弱,横流经空心锥形液滴群绕流后形成的CVP结构较小,但相对横流速度较小的情况,此时CVP涡量强度变大。此外也可以看出,当横流速度较小时,流场CVP结构尺寸越大。同时CVP结构持续时间也更长,雾化液滴群在截面上扩散程度更明显;横流速度较大时,CVP结构尺寸较小,位置进一步上移,不利于液滴在截面上的扩散,雾化液滴多分布在截面中上部,截面下方粒子稀少,掺混效果较差。

3.2.2 喷嘴压力的影响

图8为不同喷嘴雾化压力下掺混流场CVP结构变化曲线。从图中可以看出,随着喷嘴压力的增加,CVP涡量值、涡心距及涡心高度均增大。

当喷嘴雾化压力较小时,初始雾化液滴动量较

小,液滴群对横流阻碍能力减弱,截面上方形成的CVP结构较小。在流场下方动量较小的液滴在主气流携带下向下游运动,造成截面下部液滴分布稀少,如图9掺混流场粒子图所示。随着喷嘴雾化压力增大,液滴初始动量增大,横流与喷雾液滴群相互作用增强,更易诱导产生涡量强度与结构尺寸更大的CVP结构,CVP强度的增大,意味着卷吸气流对液滴的携带能力增强,更多的液滴在CVP的影响下在流场轴向方向上扩散。同时,液滴初始动量的增大使得其在气流中的贯穿能力增强,CVP涡心位置下移,流场下方液滴浓度增加,气液两相掺混效果变好。

3.2.3 喷嘴初始雾化粒径的影响

图10为不同喷嘴雾化粒径下流场中CVP大小和

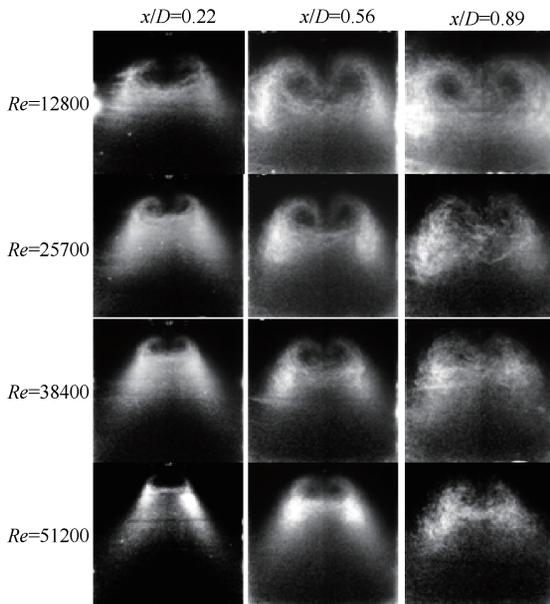


Fig. 7 Droplet distribution under different crossflow velocity with $D_{32}=86\mu\text{m}$, $\Delta p=1\text{MPa}$

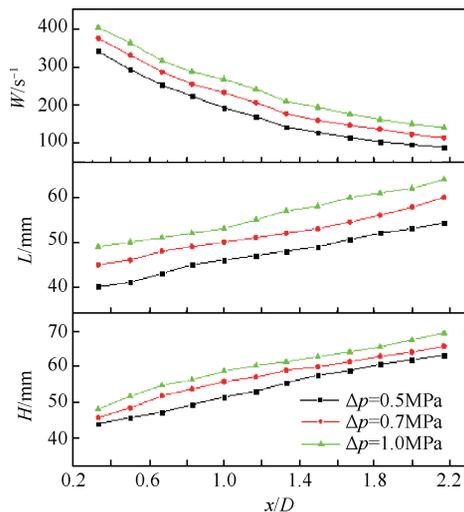


Fig. 8 Size and structural changes of CVP under different jet pressure with $D_{32}=86\mu\text{m}$, $Re=25700$

结构变化曲线。从图中可以看出,随着初始雾化粒径的增大,CVP涡量值、涡心距及涡心位置均逐渐增大。

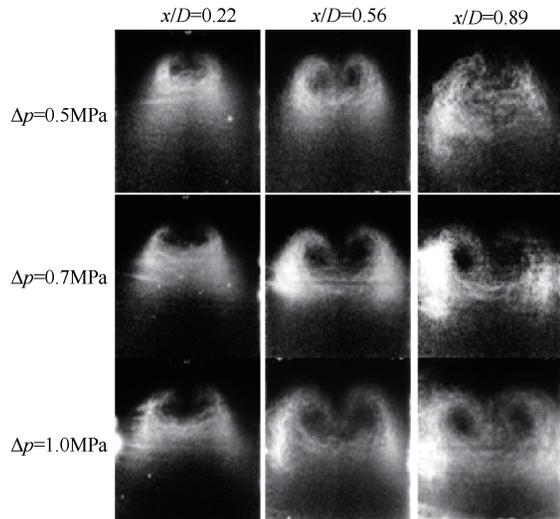


Fig. 9 Droplet distribution under different jet pressure with $D_{32}=86\mu\text{m}$, $Re=25700$

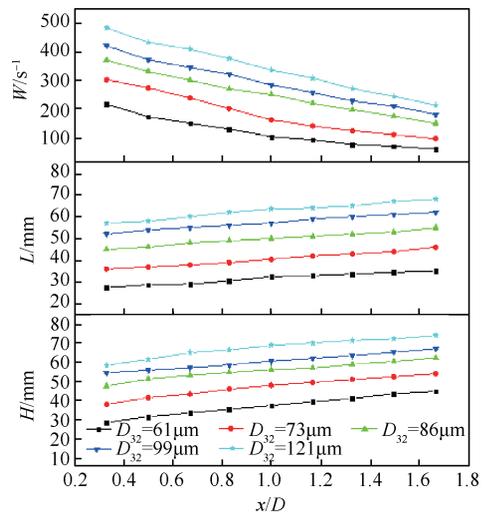


Fig. 10 Size and structural changes of CVP under different initial droplet size with $\Delta p=0.7\text{MPa}$, $Re=25700$

图11给出了相同喷雾压力与横流速度下,不同喷雾粒径条件下流场截面液滴分布。较小的雾化液滴粒径意味着初始雾化液滴的动量也较小,喷雾液滴的在横流中的贯穿深度越小。从图中可以看出,当雾化粒径较小时($D_{32}=61\mu\text{m}$),CVP结构也较小,强度较弱,大部分液滴集中在流场截面上方CVP影响区,流场中下部液滴稀少,掺混效果较差。随着初始雾化粒径的增大,流场中CVP结构尺寸变大的同时旋涡强度也增大,卷吸气流对液滴的携带能力增强,促进了液滴在截面上进一步扩散。同时较大的初始雾化粒径使得空心锥形液膜贯穿深度增大,CVP涡心位置下移,流场下部液滴浓度增大,流场整体掺混效果变好。

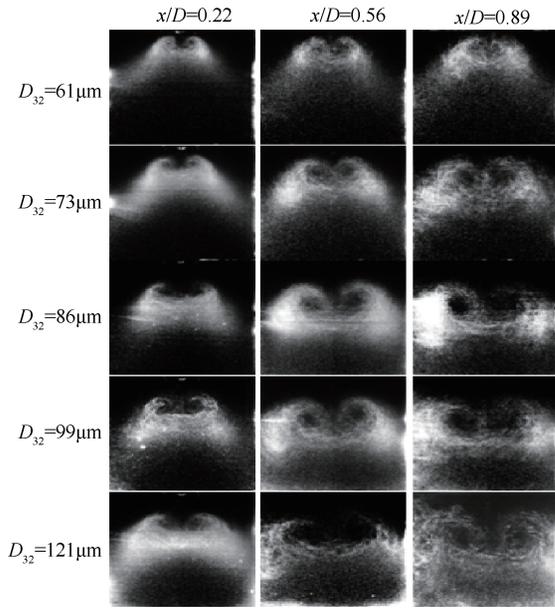


Fig. 11 Droplet distribution under different initial droplet size with $\Delta p=0.7\text{MPa}$, $Re=25700$

3.3 CVP特征量计算关联式

横向气流与空心锥形喷雾掺混是一种典型的非稳态多相流动过程。掺混流场中CVP结构的变化和雾化液滴的扩散不仅受到横流速度、喷嘴压力和喷嘴初始雾化粒径的影响,而且很大程度上也取决于初始雾化液滴的速度和液相质量流率。掺混影响因素较多而且各个影响因素之间又相互影响,目前很难通过理论分析建立掺混状态与初始横流和喷雾状态之间准确的数学描述。

因此,为了更好地对比不同参数对掺混的影响,进而为工程实际掺混过程提供直接有效的参数选取指导方法,本文从影响掺混过程的宏观参数出发,基于横流速度、喷嘴压力和喷嘴初始雾化粒径3个变量建立了CVP特征参量(涡量、涡心距与涡心高度)沿掺混流场发展的计算关联式。在分析中,本文选取一组参考工况 $D_{32}=61\mu\text{m}$, $\Delta p=0.5\text{MPa}$, $Re=12800$,该工况下CVP形成截面($x/D=0.1$, x 为截面到喷嘴的距离)上CVP特征量为参考值。获得不同工况下各掺混参数和CVP特征参量与参考工况下相应参数和特征量的比值,从而得到一系列相对应的特征参量与掺混参数的无量纲数值组合。将这些对应的无量纲数值采用幂函数进行关联式拟合,从而得到了不同工况下CVP涡量值、对称旋涡中心距和CVP高度相对于参考工况的计算关联式如下:

(1) 涡量值 \bar{W}

$$\bar{W} = 0.592(\overline{Re})^{0.449}(\overline{\Delta p})^{0.516}(\overline{D_{32}})^{1.161}\left(\frac{x}{D}\right)^{-0.525} \quad (1)$$

拟合相关系数(Adj. R-Square系数)为0.930

(2) 对称旋涡中心距 \bar{L}

$$\bar{L} = 1.513(\overline{Re})^{-0.403}(\overline{\Delta p})^{0.501}(\overline{D_{32}})^{1.037}\left(\frac{x}{D}\right)^{0.160} \quad (2)$$

拟合相关系数(Adj. R-Square系数)为0.925。

(3) CVP高度 \bar{Y}

$$\bar{Y} = 2.018(\overline{Re})^{-0.342}(\overline{\Delta p})^{0.320}(\overline{D_{32}})^{0.810}\left(\frac{x}{D}\right)^{0.176} \quad (3)$$

拟合相关系数(Adj. R-Square系数)为0.880。

其中, \bar{W} 为当前工况下CVP涡量值与参考工况涡量值的比值, \bar{L} 为当前工况下对称旋涡中心距与参考工况中心距的比值, \bar{Y} 为当前工况下CVP高度与参考工况高度的比值, \overline{Re} 为当前工况下横流速度与参考工况横流速度的比值, $\overline{\Delta p}$ 为当前工况下喷嘴压力与参考工况压力的比值, $\overline{D_{32}}$ 为当前工况下液滴初始雾化粒径与参考工况粒径的比值。

通过以上3个CVP特征量计算关联式,可以直观地了解横流速度、喷嘴压力和喷嘴初始雾化粒径对CVP结构和强度的影响。对比上面3个关联式中可以看出,在横流速度、喷嘴压力和液滴初始雾化粒径3个变量中,初始雾化粒径对CVP结构影响最大,而喷嘴压力和横流速度的影响相对较小。

本关联式给出了CVP结构特征量与横流速度、喷嘴压力和喷嘴初始雾化粒径的关系,从关系式中可以分析不同参数对CVP的影响程度。由于目前的工作仅对一种掺混空间结构进行了研究,因此关系式的普适性还需要更多实验进行验证,目前该部分工作正在开展。

4 结论

(1) 获得了空心锥形喷雾与横向气流掺混流场内液滴分布特征和CVP结构变化规律。掺混初期,液滴集中于流场的中上部,随着两相掺混过程的进行,CVP的两旋涡中心距离逐渐增大,CVP结构尺寸增大,涡心逐渐下移,流场中上部的液滴逐渐向流场下部和两侧扩散。同时随着卷吸气流能量逐渐耗散,CVP旋涡强度逐渐衰减,CVP结构变得模糊,整个流场中液滴分布均匀性明显增强。

(2) 较大的喷嘴压力和液滴初始雾化粒径下,掺混流场中形成的CVP结构尺寸和涡量强度较大,液滴在卷吸气流的作用下向流场下部和两侧运动,流场截面液滴空间分布均匀性增强;但是横流速度较大时,CVP结构上移,结构尺寸减小,雾化液滴主要集中于掺混流场上部,流场均匀性较低,掺混效果较差。

(3) 采用涡心强度、涡心距与涡心高度三个参数来描述CVP结构强度特征,基于实验测量结果给出

了CVP结构特征量的计算关联式。在横流速度、喷嘴压力和喷嘴雾化粒径3个变量中,初始雾化粒径对CVP结构影响最大,而喷嘴压力和横流速度的影响较小。

参考文献:

- [1] Marchione T, Allouis C, Amoresano A. Experimental Investigation of a Pressure Swirl Atomizer Spray[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(5): 1096-1101.
- [2] Chang K C, Wang M R, Wu W J, et al. Experimental and Theoretical Study on Hollow-Cone Spray[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1993, 9(9): 28-34.
- [3] Marchione T, Allouis C, Amoresano A, et al. Experimental Investigation of a Pressure Swirl Atomizer Spray [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 23 (5): 1096-1101.
- [4] 田维平, 蔡体敏, 陆贺建, 等. 水冲压发动机热力计算[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(2): 95-98.
- [5] 杨亚晶, 何茂刚, 徐厚达. 水冲压发动机的热力循环性能预示[J]. 推进技术, 2009, 30(4): 474-478. (YANG Ya-jing, HE Mao-gang, XU Hou-da. Thermodynamic Cycle Performance for Water Ramjet Motors[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(4): 474-478.)
- [6] Adelberg M. Breakup Rate and Penetration of a Liquid Jet in a Gas Stream [J]. *AIAA Journal*, 2015, 5 (8): 1408-1415.
- [7] Lam K M, N K O. Investigation of Flow Structures of a Basic Annular Jet [J]. *AIAA Journal*, 2015, 24 (9): 1488-1493.
- [8] Costa M, Melo M J, Sousa J M M, et al. Spray Characteristics of Angled Liquid Injection into Subsonic Crossflows[J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(3): 646-653.
- [9] Philips J C, Miller P C H, Thomas N H. Air Flow and Droplet Motions Produced by the Interaction of Flat-Fan Spray and Cross Flows [J]. *Atomization and Spray*, 2000, 10(1): 83-104.
- [10] 邢小军, 徐 行, 郭志辉, 等. 模型燃烧室冷态喷雾场的实验研究[J]. 推进技术, 2000, 21(5): 61-65. (XING Xiao-jun, XU Hang, GUO Zhi-hui, et al. Experimental Study on Spray Field in Combustor by Phase Doppler Analyzer[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(5): 61-65.)
- [11] 刘阳阳, 何国强, 魏祥庚, 等. 内直外旋气液同轴式喷嘴流量及雾化特性[J]. 推进技术, 2016, 37(7):1280-1286. (LIU Yang-yang, HE Guo-qiang, WEI Xiang-geng, et al. Flow Rate and Spray Characteristics of Gas Centered Swirl Gas-Liquid Coaxial Injector[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(7): 1280-1286.)
- [12] 刘 焜, 余永刚, 赵 娜, 等. 小尺度空间内对撞射流雾化场特性实验研究[J]. 推进技术, 2015, 36(4): 595-600. (LIU Kun, YU Yong-gang, ZHAO Na, et al. Experimental Study on Spray Characteristic of Impinging Nozzle in Small Scale Chamber[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(4): 595-600.)
- [13] Ghosh S, Hunt J. Spray Jet in a Cross-Flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 365(1): 109-136.
- [14] Wang Y Z, Li Y X, Weng S L. Experimental Investigation on Inner Two-Phase Flow in Counter-Flow Sprays Aturator for HAT Cycle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(17): 2417-2424.
- [15] Ming Y, Hang X U, Yang M L, et al. Study on Breakup of Conical Liquid Sheet under Varying Flow Conditions [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2003, 16(1): 12-14.
- [16] Surya R P, Gadgil H, Raghunandan B N. Breakup Processes of Pressure Swirl Spray in Gaseous Cross-Flow International [J]. *Journal of Multiphase Flow*, 2014, 66 (7): 79-91.
- [17] Eletribi S. Dispersion of Water Spray in a Transverse Air Jet and the Aging of Spray Nozzles [D]. *New York: State University of New York at Stony Brook*, 1997.
- [18] Lynch A, Batchelor R G. Spray Characteristics of a Pressure-Swirl Fuel Injector Subjected to a Crossflow [J]. *Atomization and Sprays*, 2011, 21(8): 625-643.
- [19] Bai B F, ZHANG H B, LIU L, et al. Experimental Study on Turbulent Mixing of Spray Droplets in Crossflow [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, 33 (6): 1012-1020.
- [20] 孙慧娟, 刘 利, 张海滨, 等. 横流中喷雾掺混流场结构研究[J]. 推进技术, 2012, 33(2): 221-226. (SUN Hui-juan, LIU Li, ZHANG Hai-bin, et al. Investigation of Mixing Flow Field of Spray Droplets in Crossflow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(2):221-226.)
- [21] 刘 利, 张海滨, 孙慧娟, 等. 矩形通道内横流喷雾掺混流场的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32 (2): 233-238.
- [22] 张海滨, 白博峰, 刘 利, 等. 受限空间内空心锥形喷雾—横流掺混规律[J]. 化工学报, 2012, 63(5): 1354-1359.
- [23] ZHANG H, BAI B, LIU L, et al. Mixing of Hollow-Cone Spray with a Confined Crossflow in Rectangular Duct[J]. *AIAA Journal*, 2015, 51(3): 615-622.
- [24] 李继保, 岳 明, 杨茂林. 锥形液膜 Kevin-Helmholtz 波不稳定性的实验研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22 (3): 337-341.
- [25] Durdina L, Jedelsky J, Jicha M. Investigation and Comparison of Spray Characteristics of Pressure-Swirl Atomizers for a Small Sized Aircraft Turbine Engine[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 78 (7): 892-900.

(编辑:梅 瑛)