

横流中单喷嘴雾化形态与两相掺混特性研究

张海滨, 刘利, 孙慧娟, 白博峰

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 搭建了冷态横流-喷雾掺混实验台, 采用粒子图像速度仪测量了方腔通道内离心喷雾在横流中的雾化形态和液气两相相互作用下的掺混过程, 获得了沿掺混流场不同横截面的液滴分布图像和流场结构特性. 对不同喷嘴压力、不同雾化粒径在不同横流速度下的掺混过程和流场结构进行了系统的研究, 分析了对称旋涡对结构形成的原因、结构特点及影响参数, 得到了单喷嘴布置下横流-喷雾系统的掺混规律. 结果表明, 液气动量比是影响掺混的重要因素, 选择合适的液气动量比能取得较好的掺混效果. 实验结果为揭示水冲压发动机掺混室内的掺混过程提供了参考, 也为工程中类似过程的掺混结构设计提供了依据, 同时为进一步研究高温高压下实际发动机掺混室内部的掺混过程奠定了基础.

关键词: 横流; 喷雾; 掺混

中图分类号: V211.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0104-05

Study on Single-Nozzle Spray Pattern in Crossflow and Two-Phase Mixing Characteristics

ZHANG Haibin, LIU Li, SUN Huijuan, BAI Bofeng

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The spray pattern in the crossflow and the gas-liquid mixing process of centrifugal spray in a rectangular duct were measured with PIV technology on a crossflow-spray mixing rig established. The droplets distribution and the flowfield construction at the cross-sections along the mixing flowfield were obtained, and the mixing process and the flowfield construction under different nozzle pressure, spray droplet, and crossflow velocity were explored. The formation process, the structural characters and the impact parameters of the counter-rotating vortex pair (CVP) were analyzed, and the mixing rule of the crossflow-spray with the single nozzle arrangement was achieved. The results show that the liquid-gas momentum ratio is an important factor affecting the mixing process, and choosing appropriate liquid-gas momentum ratio may result in a better mixing effect. Our experimental results should be useful in understanding the mixing process in the mixing chamber of water ramjet and in the structural design of the similar mixing process in engineering.

Keywords: crossflow; spray; mixing process

横流喷雾广泛应用于工程领域, 如水冲压发动机、燃气轮机、玻璃纤维制造等, 以达到尽快冷却的目的, 但有关其气液两相掺混过程的研究却很少. Kachhwaha 等人^[1-4]进行了风洞中的离心喷雾实

验, 研究了喷嘴和横流同轴时, 顺流和逆流两种情况下液滴的运动和蒸发特性, 但没有对液滴分布、扩散特性、流场结构等进行研究测量. 采用双相多普勒测试设备(DPDA)和粒子图像速度仪(PIV), Wang^[5]

研究了 HAT 系统中喷嘴和上升气流逆向布置时的气液两相作用,计算了对流条件下液滴的运动距离,并且测量了两相掺混场的微观特性如瞬态液滴速度场,获得了液滴尺寸分布的时-空变化规律、液滴速度-尺寸关联式等,但其对流场旋涡结构没有涉及. Porcheron^[6]利用 PIV 研究了逆向布置的冷却塔中喷雾与上升流的传热传质现象,对两相流特性进行了详细测量,分析了雾化液滴与上升气流的掺混现象,并且分析了雾化效果和喷嘴参数之间的关系. Eletribi^[7]研究了横流中离心式喷嘴的雾化掺混特性,但没有分析整体流场结构. Bai 等人^[8]研究了不同横流速度和喷嘴入射角度下,有限空间内的喷雾掺混及其流场结构,但内容多为双喷嘴,并没有对单喷嘴与横流相互作用下的掺混过程机理进行深入系统的分析.

由于离心喷雾与横流的作用非常复杂且相关实验研究非常少,本文主要研究了单喷嘴布置时,横流-喷雾系统的两相掺混流场及特性,得到了横流与喷雾系统的整体掺混规律,并对这一复杂过程进行了定性的分析.

1 实验装置和测量方法

实验系统装置如图 1 所示,主要包括水路、主气流、旁气路、实验段和 PIV 测试系统. 实验段侧面开缝并打光,为便于 PIV 拍摄,实验段内部涂黑,CCD 相机布置在实验段正后方以拍摄横截面液滴分布. 旁气路的作用是改变主气流方向,防止对 CCD 相机造成影响,更多具体结构和细节特点详见文献[8]. 掺混测试段如图 2a 所示,实验段本体为矩形腔,长 l 为 1 m,宽 w 为 95 mm,高 h 为 95 mm. 喷嘴布置在实验段上壁面的中心位置,实验中将喷嘴位置定为原点.

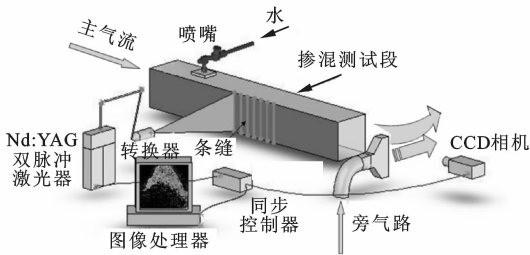


图 1 实验台布置示意图

与以往测试方法^[8]相同,利用测试段侧壁开缝的办法进行测量. 采用 LaVision 公司的二维 PIV 拍摄横截面瞬时液滴分布图像,每个截面拍摄图像 40

张,拍摄频率为 5 张/s. 采用 Tecplot 图像处理软件获得掺混场内的涡量信息,利用 MATLAB 图像处理软件获得时均图像.

本文对不同压力下,喷嘴在横流中的掺混过程进行了研究. 喷嘴选用日本雾的池内公司的 KB 系列离心雾化喷嘴. 采用 Malvern (2604LC) 粒度仪测量雾化粒径 (D_{32}),喷嘴雾化参数与具体实验工况见表 1、表 2. 本文研究的喷嘴均为垂直于横流布置,如图 2b 所示.

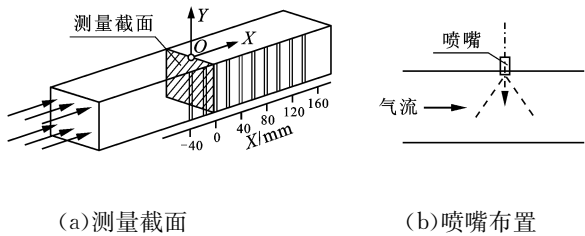


图 2 测量截面与喷嘴布置示意图

表 1 0.7 MPa 下不同喷嘴的雾化粒径

喷嘴编号	1	2	3
$D_{32}/\mu\text{m}$	70	100	120

表 2 实验工况

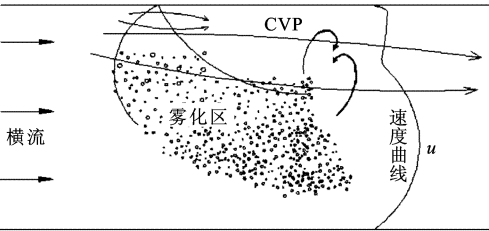
喷嘴压力 P/MPa	横流速度 $V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	喷嘴编号
0.4	4、7、10	2
0.7	4、7	1、2、3
1.0	4、7、10	2

实验采用涡街流量计测量横流速度,精度为 1%,空气流量波动范围在 3% 以内. 采用 Keller 压力传感器控制喷嘴压力,压力波动范围为 ± 0.02 MPa.

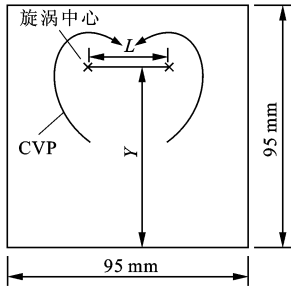
2 实验结果与讨论

2.1 掺混流场特性分析

当横流与离心喷雾相互作用时,近喷雾区后方会产生对称旋涡对(CVP),见图 3. CVP 形成的原因有二:一是喷雾初始段为连续液膜,横流经过时锥形液膜后方会形成低压区;二是喷雾所产生的高速液滴对气流的卷吸作用. 在这两个因素的共同作用下,造成了卷吸气流向低压区运动,形成尺度较大的 CVP. 实验发现,旋涡强度、尺寸以及持续距离等均与两相参数有关. 随流场发展,CVP 尺寸变大,强度逐渐减弱,之后变得不稳定并最终消失.



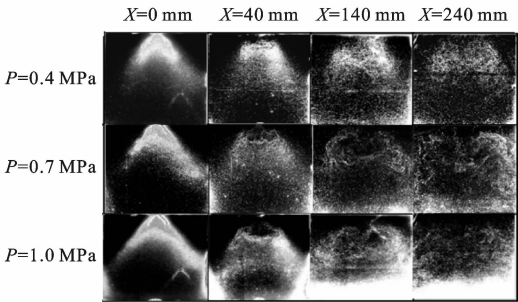
(a)横流中近喷雾区喷嘴雾化形态与流场结构



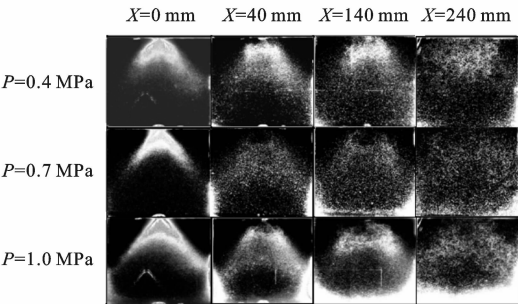
(b)CVP 横截面

图 3 掺混流场结构与 CVP 结构示意图

不同工况下的两相掺混流场液滴分布如图 4、5 所示。从图中可以看出，横流速度与雾化液滴初始状态均对掺混有着重要影响，这种影响体现在液气两相动量比上。液滴初始动量与喷嘴压力和雾化粒径有关，对同一喷嘴来说，压力是影响雾化液滴动量的主要因素，压力越大，雾化液滴动量越大。液气动量

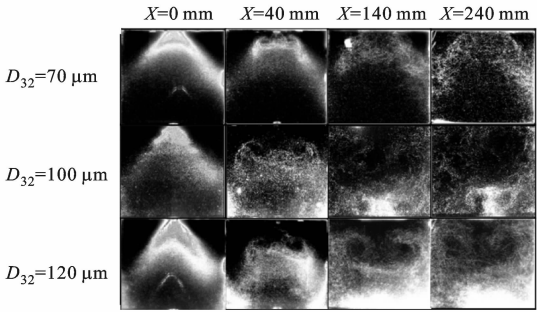


(a)横流速度为 7 m/s

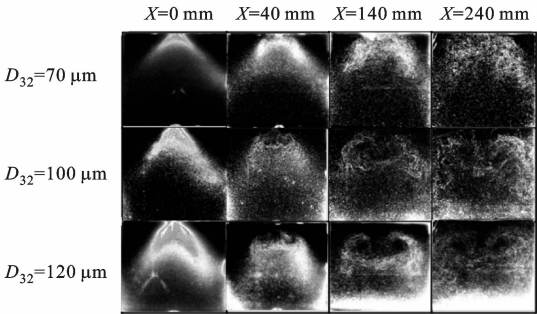


(b)横流速度为 10 m/s

图 4 喷嘴 2 在不同压力下的掺混流场液滴分布图



(a)横流速度为 4 m/s



(b)横流速度为 7 m/s

图 5 不同喷嘴在 0.7 MPa 下的掺混流场液滴分布图

比较小时，液滴易于被横流携带，液滴群穿透深度较小，在近喷雾区液滴多集中在截面上方，随掺混发展液滴群逐渐扩散。随着液气动量比增大，两相作用下形成的 CVP 结构逐渐明显，由于其卷吸作用，小液滴多聚集在旋涡边缘，形成浓度区，沿流场方向，随着 CVP 的减弱，液滴群逐渐扩散。同时，液气动量比增大时，较大的液滴穿透深度增大，有较多的液滴撞击壁面和底部，并在截面下方形成旋涡，在旋涡的作用下截面下方易形成粒子浓度区，见图 5a 和图 6。当动量比继续增大时，掺混场喷嘴后方不易造成明显的卷吸气流，液滴穿透深度增大，存在大量液滴碰壁沉积，壁面附近较多液滴发生反弹破碎，小液滴被气流携带，另外截面下方形成对称旋涡，在旋涡的作

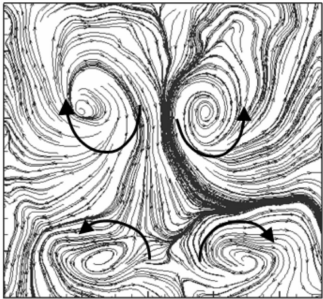


图 6 横流速度为 4 m/s 时喷嘴 2 在 X=140 mm 处的截面旋涡结构图

用下出现液滴的富集区,动量比越小,下方形成的旋涡尺度越小,截面下方粒子富集现象越弱.典型的工况比较见图 7.

实验中还发现,选择合适的动量比可以使掺混

效果变好,如图 4 中压力为 0.7 MPa 和图 5 中雾化粒径为 100 μm 时的液滴分布. 粒径的影响与雾化压力的影响相似,均是影响液滴初始动量从而影响掺混结构.

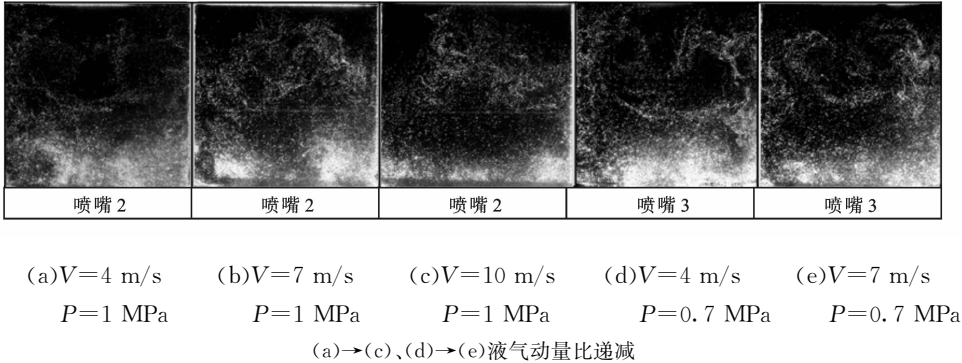


图 7 不同工况下掺混场后方液滴分布瞬时图像($X=180\text{ mm}$)

从流体力学分析可知,当气流经过圆柱时,圆柱后方流体速度降低.由于喷雾成锥形,所以形成的影响区域大小不同,锥形上方体积较小,对后方气流的影响区域较小,流体速度能很快恢复,而锥形下方体积较大,对气流的影响区域也较大.这种差异造成了在喷雾后方主流场内速度曲线呈先下降后上升的趋势(见图 3),这在实验中^[9]也得到了验证.

2.2 涡量强度变化曲线

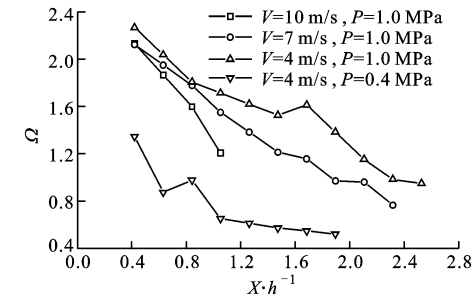
用 Tecplot 对每张图像中 CVP 的涡量强度进行计算,涡量强度 $\Omega = \text{dd}X(v) - \text{dd}Y(u)$,其中 u 、 v 分别为截面上横向和纵向速度,下面分析截面上最大涡量强度及位置的变化规律.

不同喷嘴与横流参数下的涡量强度曲线如图 8 所示.多数情况下涡量强度随流场发展而减弱,但也存在喷嘴附近涡量强度先增强后减弱的情况(见图 8b).从图 8a 可以看出:横流速度不变时,增大喷嘴压力,涡量强度增强且持续距离变长;喷嘴压力不变时,提高横流速度,涡量强度减弱,且持续距离缩短.从图 8b 可以看出,横流速度和喷嘴压力不变时,增大雾化液滴直径,涡量强度也增强.这从粒子分布图上也可以看出,见图 5.

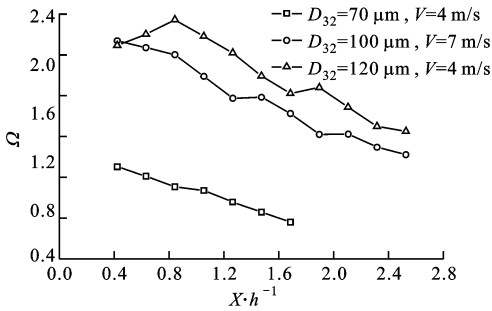
值得注意的是,单喷嘴布置下流场涡量强度变化趋势与此前研究的双喷嘴不同^[8],双喷嘴情况下涡量强度在近喷雾区下降很快并在很短距离内保持稳定,而单喷嘴情况下,涡量强度是逐渐降低的,说明喷嘴之间的相互影响可以改变旋涡特性.

2.3 旋涡位置和尺寸变化曲线

从图 9 可以看出,不同工况下,沿流场方向,旋涡中心下移,结构尺寸(对称旋涡中心距)变大.旋涡



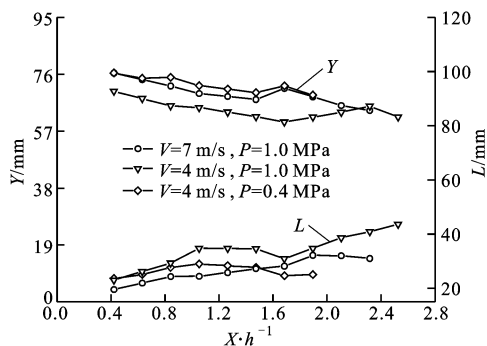
(a)横流速度与喷嘴压力的影响



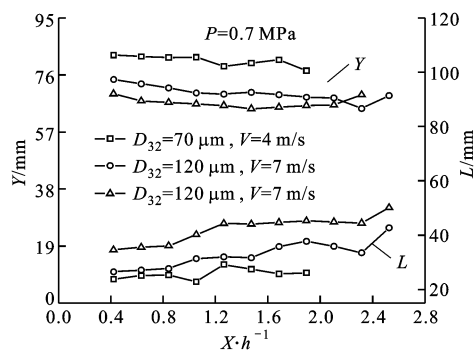
(b)粒径与横流速度的影响

图 8 不同参数下的涡量强度曲线

位置及旋涡中心距的定义见图 3b.从图 9a 可以看出:横流速度一定时,喷嘴压力增大,旋涡整体位置下移,中心距变大(旋涡尺寸变大);喷嘴压力保持不变时,提高横流速度,旋涡整体位置上移,中心距变小(旋涡尺寸变小).从图 9b 可以看出:不同粒径下,速度对旋涡位置和尺寸的影响是一致的;当喷嘴压力一定时,粒径变小,旋涡位置上移且尺寸变小,持续距离缩短.



(a) 横流速度与喷嘴压力的影响(喷嘴 2)



(b) 粒径与横流速度的影响(喷嘴 1、3)

图9 不同参数下的旋涡位置和尺寸变化曲线

3 结 论

(1) 两相作用下, 初始液膜和雾化液滴与横流的共同作用造成了 CVP 的形成。

(2) CVP 的强度沿流场方向逐渐降低, 尺寸变大, 粒径较小的液滴被卷吸。不同参数下, CVP 的位置、结构大小和持续距离不同。CVP 影响两相掺混效果, 较强的 CVP 结构造成液滴的分布不均匀。

(3) 喷嘴压力和初始雾化粒径影响液滴动量。横流速度不变时, 随液滴动量增大, 掺混效果先变好后逐渐变差, 因此选择合适的液气动量比, 可以获得较好的掺混效果。

本文的测试方法和实验成果为研究实际发动机内部高温高压下的掺混过程奠定了基础, 目前我们已经搭建了热态高温横流-喷雾掺混实验台, 高温下的掺混规律和机理正在进一步的探索和研究之中。

参考文献:

[1] KACHHWAHA S S, DHAR P L, KALE S R. Experimental studies and numerical simulation of evaporative cooling of air with a water spray, I: horizontal

parallel flow [J]. Heat Mass Transfer, 1998, 41(2): 447-464.

[2] KACHHWAHA S S, DHAR P L, KALE S R. Experimental studies and numerical simulation of evaporative cooling of air with a water spray, II: horizontal counter flow [J]. Heat Mass Transfer, 1998, 41(2): 465-474.

[3] SURESHKUMAR R, KALE S R, DHAR P L. Heat and mass transfer processes between a water spray and ambient air, I: experimental data [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5/6): 349-360.

[4] SURESHKUMAR R, KALE S R, DHAR P L. Heat and mass transfer processes between a water spray and ambient air, II: simulations [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5/6): 361-371.

[5] WANG Y Z, LI Y X, WENG S L. Experimental investigation on inner two-phase flow in counter-flow spray saturator for HAT cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(17/18): 2417-2424.

[6] EMMANUEL P, PASCAL L. Experimental investigation in the TOSQAN facility of heat and mass transfers in a spray for containment application [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(15/17): 1862-1871.

[7] ELETRIBI S. Dispersion of water sprays in a transverse air jet and the aging of spray nozzles [D]. New York, USA: State University of New York at Stony Brook. Mechanical Engineering, 1997.

[8] BAI Bofeng, ZHANG Haibin, LIU Li, et al. Experimental study on turbulent mixing of spray droplets in crossflow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(6): 1012-1020.

[9] 刘利, 张海滨, 孙慧娟, 等. 横流-喷雾掺混中液滴运动研究[C/CD]//中国工程热物理学会多相流学术年会论文集. 北京: 中国工程热物理学会, 2009: 096169.

[本刊相关文献链接]

低质量流速垂直和倾斜并联内螺纹管两相流不稳定性研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 17-21.

双拉格朗日模型气固两相双圆柱绕流. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 77-80.

高温燃气中单个液滴的蒸发特性. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 833-837.

(编辑 荆树蓉)