

研究论文

## 受限空间内空心锥形喷雾-横流掺混规律

张海滨, 白博峰, 刘 利, 孙慧娟

(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:** 在自建的冷态横流-旋流喷雾两相掺混系统实验台上, 采用 PIV 测量了掺混通道内气液两相掺混过程中液滴群的运动特性, 获得了掺混流场中不同位置的液滴分布图像与流场结构特性。实验段结构为方腔 (横截面尺寸为 95 mm×95 mm), 喷嘴采用空心锥形雾化喷嘴。对影响掺混效果的主要参数 (横流速度、喷嘴雾化压力、喷嘴雾化粒径) 进行了详细研究, 绘出了最佳掺混效果下各参数关系曲线。掺混过程主要受不同尺度的旋涡结构影响, 液滴多富集于旋涡边缘, 稳定的大尺度涡不利于掺混。提高掺混效果的途径即是避免流场中出现稳定的大尺度旋涡结构, 采用喷嘴前倾布置、增加喷嘴个数、确定合适的横流速度均是提高掺混效果的有效途径。分析方法与研究结果为工程实际应用中掺混室结构的设计及掺混性能的改进提供了依据和参考。

**关键词:** 掺混; 液滴分布; 旋涡结构; PIV

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2012.05.004

中图分类号: V 211.1

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2012) 05-1354-06

## Mixing characteristics of hollow cone spray with confined crossflow

ZHANG Haibin, BAI Bofeng, LIU Li, SUN Huijuan

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

**Abstract:** The dispersion and movement features of the hollow cone spray droplets in confined crossflow in a square duct were measured with PIV technology on a self-established cold mixing rig. The droplet dynamics and vortices structures induced in the confined mixing flow field were obtained. The droplet dispersion in the mixing process was mainly influenced by several large-scale vortex structures, such as the counter-rotating vortex pairs (CVPs). The CVPs had a greater centrifugal effect on droplet dispersion because of preferential concentration so the droplets tended to accumulate along the edges of vortex structures. The main parameters affecting the mixing, such as crossflow velocity, atomization pressure and size of spray droplets were discussed and the curves of relationship between them and the best mixing effect were established. The mixing for double nozzles was also investigated and the influences of different injection angles on the mixing were discussed. The results showed that the way to improve the mixing was to avoid the stable large-scale vortex structures which could lead to non-uniform droplet dispersion and concentrations in the mixing flow field by controlling local droplets' contribution and dispersion by convection. Mixing could be enhanced by turning the spray direction against the crossflow, increasing the nozzle number and choosing the appropriate crossflow velocity. The analytical approach and research findings have important practical significance for the mixing chamber design and performance improvement for relevant industrial applications.

**Key words:** mixing; droplet dispersion; vortex structures; PIV

2011-09-20 收到初稿, 2012-02-13 收到修改稿。

Received date: 2011-09-20.

联系人: 白博峰。第一作者: 张海滨 (1984—), 男, 博士研究生。

Corresponding author: Prof. BAI Bofeng, bfbai@mail.xjtu.edu.cn

### 引言

横流中的射流雾化广泛存在于各种工业应用中，如汽轮机液膜冷却、燃烧室燃料射流燃烧、核反应堆降压降温、雾化加湿、水冲压发动机中喷雾以及目前在重油工业中用于热量回收的高品质蒸气发生器等。根据射流形式的不同，国内外学者对于横流-射流的研究主要包括直喷式射流<sup>[1-3]</sup>（工质为水或气）、空气辅助式射流<sup>[4-5]</sup>、扇形喷雾射流<sup>[6-7]</sup>等。其中直喷式射流研究最广泛，对于掺混流场中旋涡结构形成与分布、发展演化<sup>[8-10]</sup>以及喷嘴入射角度对掺混的影响<sup>[11-12]</sup>均有详细的论述。但是大多数横流-射流掺混过程都是发生在大空间内。旋流雾化喷雾具有极好的雾化效果，目前已广泛应用在很多掺混领域。但对于旋流喷雾与横流的掺混过程却鲜有研究。特别是在受限空间内，由于壁面的影响，气液两相掺混过程更加复杂。Bai等<sup>[13-17]</sup>采用PIV等技术对横流中旋流雾化过程进行了研究，获得了流场掺混结构及入射角度对掺混效果的影响。但对于壁面的影响研究不足，没有获得整体掺混规律。本文拓宽了实验工况范围，对旋流喷雾-横流掺混规律进行了总结，分析了各参数的影响，并得出了最佳掺混效果下各参数的关系。

## 1 实验系统及方法

### 1.1 实验装置

实验装置主要包括水路、气路、实验测量段及辅助设备（空压机、水箱、调节阀等）。实验段材料为有机玻璃，长1000 mm，横截面尺寸95 mm×95 mm。为获得稳定横流条件，实验段入口安装滤网和蜂窝状细管束。喷嘴选用日本雾的池内公司的KB系列离心雾化喷嘴，雾化角为80°；水经喷嘴在实验段中完成雾化以及与横流空气的掺混。为实现掺混流场横截面与纵截面的测量，实验中设计了两套PIV拍摄方法（图1）。水路与气路分别安装电磁流量计和涡街流量计，以控制流量精度。喷嘴前段安装针阀与压力传感器，用于精确控制水的流量与雾化所需压力。采用ADLINK数据采集卡进行数据采集与存储。有关实验装置的具体结构见文献<sup>[13-16]</sup>。

本实验中，坐标方向如图1(a)所示，以喷嘴位置为坐标原点。喷嘴雾化角与喷嘴入射角度如图2所示，本文采用的喷嘴雾化角均为80°。对不同

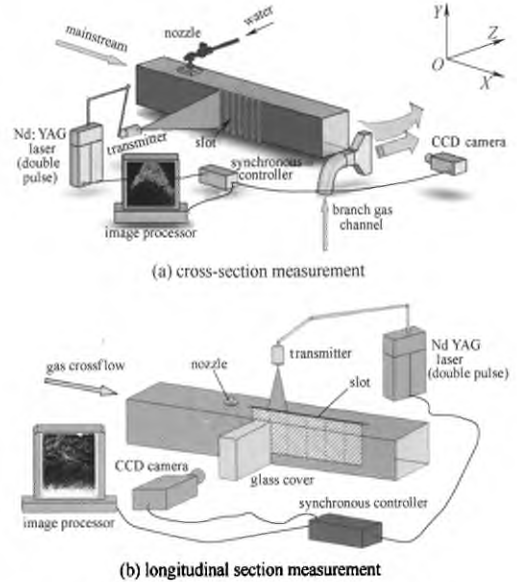


图1 压力旋流雾化-横流掺混实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of PIV measurement system

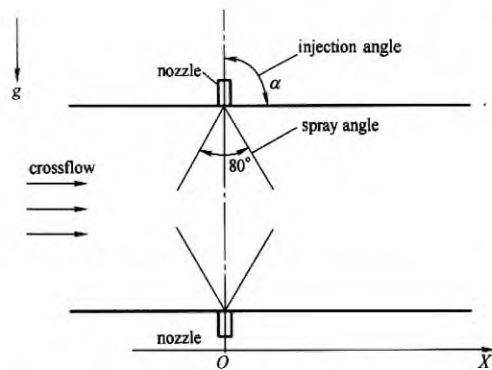


图2 喷嘴布置角度

Fig. 2 Schematic diagram of spray angle and injection angle

实验参数影响下的掺混流场进行了测量，各影响参数主要包括横流速度 ( $Re$ )、喷嘴雾化压力 ( $\Delta P$ )、雾化粒径 ( $D_{50}$ ，采用马尔文激光粒度仪 Malvern 2604LC 测得)、喷嘴入射角度 ( $\alpha$ )、喷嘴个数 ( $N$ )。具体实验工况见表1。

### 1.2 流场可视化测量系统

采用德国 Lavisision 公司的 FLOWMASTER PIV 对雾化液滴瞬时速度与空间分布进行测量。脉冲激光器为 Nd:YAG，单脉冲能量为 200 mJ，波长为 532 nm。掺混流场被激光片照亮，通过 CCD 相机 (Nikon ImagerPro4M, 2048×2048) 对液滴进行捕捉。实验中相机拍摄视场约为 0.15 m×0.15 m，用于图像处理的有效像素约 1700×1700，

表 1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

<i>N</i>	$\alpha/(\circ)$	$\Delta P/\text{MPa}$	$D_{32}/\mu\text{m}$	<i>Re</i>			
1	90	0.7	50/69/121 <sup>①</sup>	25700	45000	—	
		0.4	120	25700	45000	—	
		0.7	104	25700	45000	64300	
		1.0	96	25700	45000	—	
2	60	0.7	104	25700	—	64300	
		90	0.7	104	—	45000	64300
		120	0.7	104	25700	—	64300

① Three different nozzles (sizes of spray droplets are 50, 69, 121  $\mu\text{m}$  respectively).

尺度因子 55.7  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 。实验段视窗采用单帧模式拍摄，相邻照片的时间间隔 50  $\mu\text{s}$ ，通过互相关分析处理。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 掺混规律研究

在喷雾入射角度不变的情况下，影响喷雾与横流掺混效果的因素主要有掺混距离 ( $L$ )、雾化粒径 ( $D_{32}$ )、雾化压力 ( $\Delta P$ ) 与横流速度 ( $V_g$ )。因此，最佳掺混效果可以表示成上述 4 个参数的函数

$$f(\text{best mix effect}) = f(L, D_{32}, \Delta P, V_g)$$

在实际应用中，掺混室的尺寸一般是不变的，因此，在特定掺混距离下，最佳掺混效果是雾化粒径、喷雾压力与横流速度的函数

$$f_L(\text{best mix effect}) = f(D_{32}, \Delta P, V_g)$$

图 3 给出了掺混流场中的液滴分布随横流速度与喷嘴雾化压力的变化规律。从图中可以看出，当  $Re=25700$ ，雾化压力  $\Delta P=0.4 \text{ MPa}$  时，掺混较好，随着雾化压力的增大，雾化液滴粒径变小，流场后方下壁面出现液滴富集，截面上液滴分布不均匀。当横流速度增大时，较低雾化压力下的液滴由于动量较小，易于被气流携带，多分布在流场截面上方；雾化压力增大时，液滴穿透能力增强，液滴分布下移；但相对于较低横流速度时，掺混流场中下壁面富集现象逐渐减弱。当  $Re=64300$ ，雾化压力  $\Delta P=0.7 \text{ MPa}$  时，掺混较好。可以看出，随着横流速度的增大，达到最佳掺混效果所需要的雾化压力逐渐增大。

图 4 给出了掺混流场中的液滴分布随雾化粒径与横流速度的变化规律。从图中可以看出，雾化粒径较小时 ( $D_{32}=50 \mu\text{m}$ )，液滴多分布在流场截面上方；雾化粒径增大时，液滴动量增大，穿透及扩散能力增强，截面液滴分布逐渐增大，掺混效果变

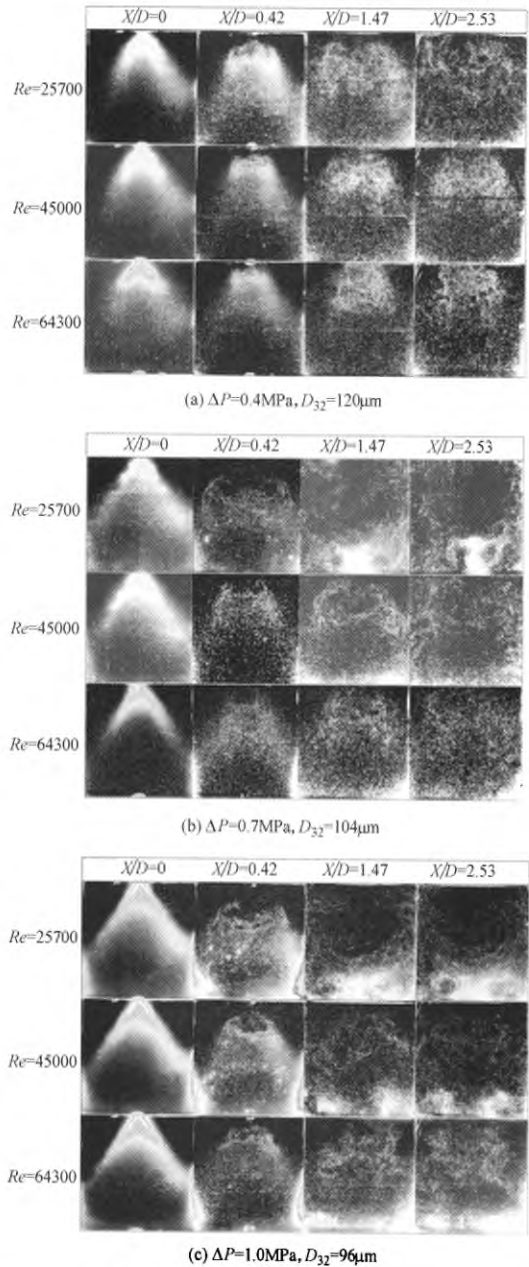
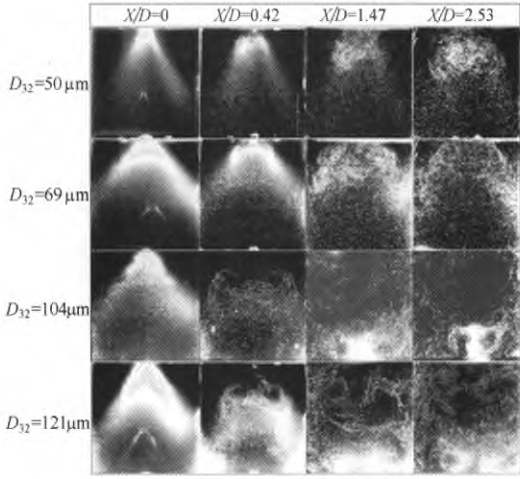
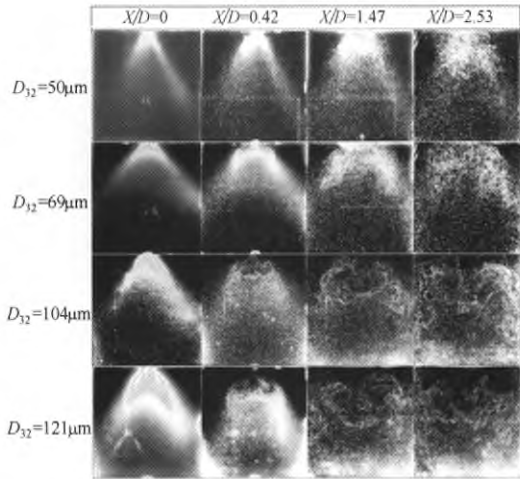


图 3 不同喷嘴雾化压力、横流速度下掺混流场液滴分布  
Fig. 3 Droplets distribution at different cross-section with different crossflow velocity

好；随着雾化粒径进一步增大，液滴与侧壁及下壁面相互作用下，截面下方会出现粒子富集，分布逐渐不均匀。另外横流速度的增大能有效减弱和避免底面液滴富集现象。因此，可以看出，当喷嘴雾化压力一定时，随着雾化粒径的增大，达到最佳掺混效果所需要的横流速度逐渐增大。



(a)  $Re=25700$



(b)  $Re=45000$

图 4 不同喷雾雾化粒径、横流速度下掺混流场液滴分布  
Fig. 4 Droplets distribution at different cross-section with different  $D_{32}$  of spray droplets ( $\Delta P=0.7$  MPa)

在上述两组图中，可以得到最佳掺混效果下，几组近似的参数组合

$$f_1^1(\text{best mix effect}) = f(104, 0.7, Re \approx 64300)$$

$$f_1^2(\text{best mix effect}) = f(104, 0.4, Re \approx 25700)$$

$$f_1^3(\text{best mix effect}) = f(69 < D_{32} < 104, 0.7, Re \approx 25700)$$

根据雾化粒径 ( $D_{32}$ )、雾化压力 ( $\Delta P$ ) 与横流速度 ( $V_g$ ) 对掺混效果的影响规律，得出在达到最佳掺混时三者的关系如图 5 所示。图 5 和本文研究方法为工程实际应用中掺混室的尺寸设计及性能优化提供了参考和依据。

### 2.2 流场旋涡结构与粒子分布规律

典型的旋流雾化喷嘴与横流掺混过程如图 6 所示。横流经过空心锥形喷雾时，喷雾后方会形成低

万方数据

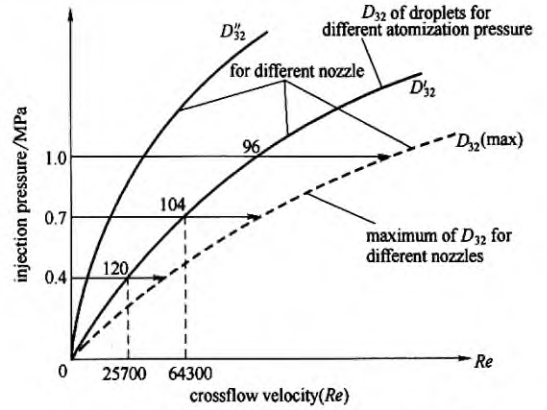


图 5 最佳掺混效果下，横流与喷雾两相参数关系  
Fig. 5 Curve of the best mixing effect

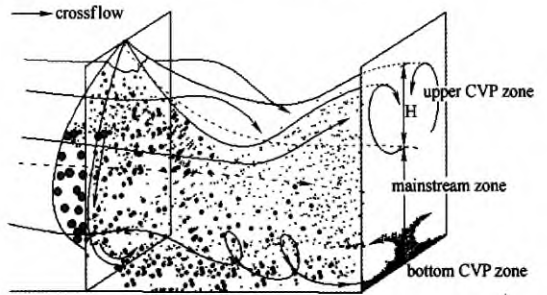


图 6 空心锥形喷雾-横流掺混流场

Fig. 6 Schematic drawing of large-scale flow field structures produced by hollow cone spray into crossflow

压区，从而产生 CVP (counter-rotating vortex pair) 旋涡结构。另外，在受限空间内，两侧壁面附近，初始雾化动量较大的液滴与壁面发生碰撞出现粘壁、反弹、飞溅等现象，导致横向气流发生旋转从而在两侧壁面下方出现 CVP 旋涡。掺混流场结构主要受两对 CVP 结构影响。在这两对 CVP 旋涡影响下，喷嘴后方流场横截面可分为 3 个区域：顶部 CVP 区域，中部主流区，下部 CVP 区域。横流速度的增大会使上部 CVP 区域位置上移，尺寸减小，下部 CVP 区域逐渐减小。

图 7 为典型的掺混流场中心纵截面液滴分布与涡量分布 ( $Z=0$ )。从图 3、图 4、图 6、图 7 可以看出，旋涡结构对液滴分布影响很大，由于离心力的作用，雾化液滴出现趋向性分布，多集中在旋涡结构附近。稳定的大尺度涡 (上部 CVP 与下部 CVP) 是造成液滴截面分布不均匀的主要因素。较小尺度的涡多存在于流场纵截面上，如不同区域交界面上出现的剪切层涡，这些小尺度涡会导致大尺度涡 (流场上部 CVP 与下部 CVP 结构) 的不稳



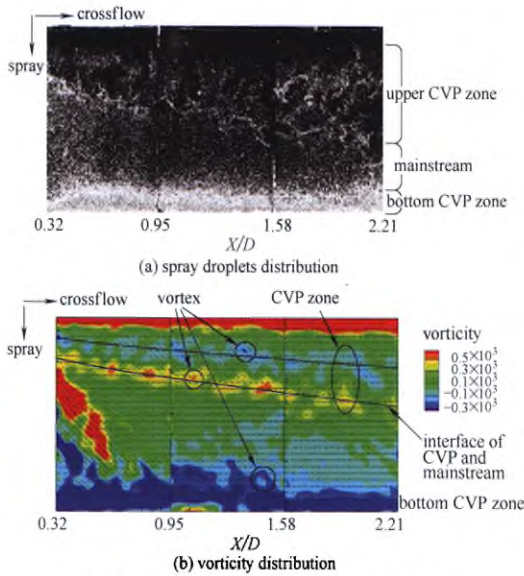


图 7 掺混流场纵截面液滴分布与涡量分布  
Fig. 7 Spatial distributions of droplets vorticity field at longitudinal section for  $\alpha=90^\circ$  ( $Re=32100$ )

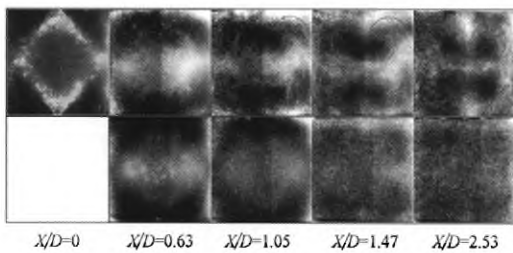


图 8 双喷嘴布置下掺混流场液滴分布  
Fig. 8 Droplets distribution at different cross-section along mixing flow field with double nozzle ( $\alpha=90^\circ$ ,  $Re=45000/Re=64000$ ,  $\Delta P=0.7$  MPa,  $D_{32}=104$   $\mu\text{m}$ )

定, 有利于液滴的扩散。

### 2.3 双喷嘴不同角度掺混效果比较

图 8 为双喷嘴布置下, 喷嘴入射角为  $90^\circ$  时, 不同横流速度下流场横截面液滴分布。可以看出,  $Re=45000$  时, 由于 CVP 结构的存在, 掺混流场后期截面粒子呈“田”字形分布, 旋涡中心粒子稀少, 截面分布不均。横流速度增大时, 有效地抑制了 CVP 结构的产生, 流场横截面粒子分布均匀。

图 9 为不同横流速度下, 流场液滴分布随喷嘴入射角度的变化规律。可以看出, 双喷嘴布置有利于液滴的扩散。不同入射角度下, 流场中均存在明显的 CVP 结构, CVP 结构的存在造成了截面粒子的趋向性分布, 粒子富集于旋涡边缘而旋涡中心粒子稀少。其中,  $\alpha < 90^\circ$  时, CVP 旋涡结构出现的

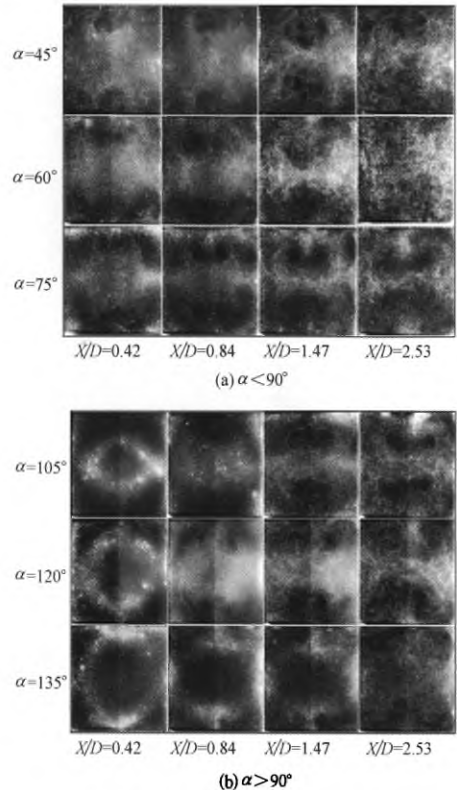


图 9 双喷嘴布置下掺混流场液滴分布  
Fig. 9 Droplets distribution with different injection angle ( $Re=25700$ )

位置相对提前, 即两相掺混初始位置提前, 有利于气液两相相互作用, 有利于掺混。入射角度越接近于  $90^\circ$ , CVP 结构影响越明显。在  $\alpha < 90^\circ$  和  $\alpha > 90^\circ$  两种情况下, CVP 结构持续距离均缩短。

横流速度的增大能有效抑制 CVP 结构的产生 (图 10)。在较大的横流速度下, 喷雾后方 CVP 结构很快消失, 掺混效果变好。其中, 在  $\alpha < 90^\circ$  时, 流场掺混效果要好于  $\alpha > 90^\circ$ 。

## 3 结 论

(1) 获得了在给定掺混距离下, 最佳掺混效果与雾化粒径、喷雾压力与横流速度的关系, 并绘出了最佳掺混效果各参数关系曲线。

(2) 掺混流场液滴分布主要受上部和下部 CVP 结构影响; 流场可分为 3 个区域, 上部 CVP 区域、中部主流区、下部 CVP 区域。由于离心力的作用, 液滴多富集于旋涡边缘, 造成旋涡中心粒子稀少。横流速度的增大会使上部 CVP 区域位置上移, 尺寸减小, 下部 CVP 区域逐渐减小。

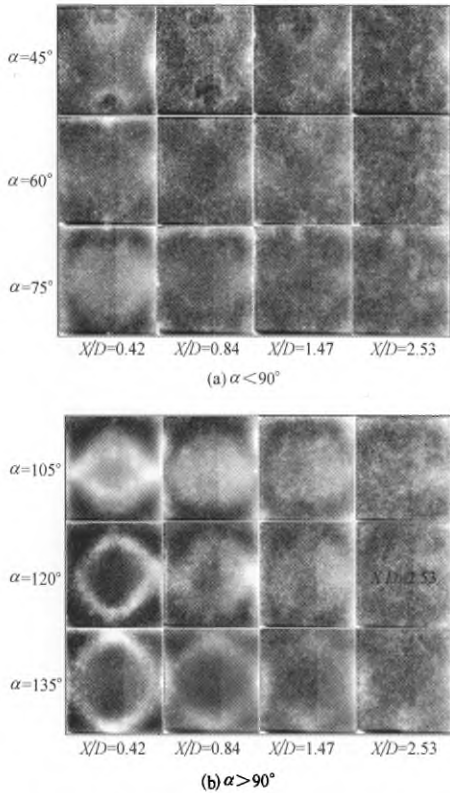


图10 双喷嘴布置下掺混液滴分布

Fig. 10 Droplets distribution with different injection angle  
( $Re = 64300$ )




(3) 双喷嘴布置时, 较低横流速度下, 入射角度越接近于  $90^\circ$ , CVP 结构影响越明显。在  $\alpha < 90^\circ$  和  $\alpha > 90^\circ$  两种情况下, CVP 结构持续距离均缩短; 横流速度的增大能有效抑制 CVP 结构的产生, 有利于掺混效果的提高。

掺混过程主要受不同尺度的旋涡结构影响, 液滴多富集于旋涡边缘, 稳定的大尺度涡不利于掺混。提高掺混效果的途径即是避免流场中出现稳定的大尺度旋涡结构, 采用喷嘴前倾布置、增加喷嘴个数、确定合适的横流速度均是提高掺混效果的有效途径。

## References

[1] Wu P K, Fuller R P, Kirkendall K A, Nejad A S. Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1997, **13** (1): 63-74

- [2] Sallam K A, Aalburg C, Faeth G M. Breakup of round non-turbulent liquid jets in gaseous crossflow [J]. *AIAA Journal*, 2004, **42** (2): 2529-2540
- [3] Jacob N S, Jong G L, Domenic A S. Penetration of liquid jets in a crossflow [J]. *Atomization Sprays*, 2006, **16** (8): 887-906
- [4] Eroglu H, Chigier N. Initial drop size and velocity distributions for airblast coaxial atomizers [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1991, **113** (3): 453-459
- [5] Leong M Y. Mixing of an airblast-atomized fuel spray injected into a crossflow of air [D]. California: University of California, Irvine, 2000
- [6] Ghosh S, Hunt J C R. Spray jets in a cross-flow [J]. *J. Fluid Mech.*, 1998, **365**: 109-136
- [7] Phillips 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 Sprays*, 2000, **10** (1): 83-104
- [8] Fric T F. Structure in the near field of the transverse jet [D]. California: California Institute of Technology, 1990
- [9] Kelso R M, Lim T T, Perry A E. An experimental study of round jets in cross-flow [J]. *J. Fluid Mech.*, 1996, **306**: 111-144
- [10] Liscinsky D S. Experimental study of cross flow mixing in cylindrical and rectangular ducts//National Aeronautics and Space Administration [M]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 1993: 32-45
- [11] Han D, Orozco V, Mungal M. Gross-entrainment behavior of turbulent jets injected obliquely into a uniform crossflow [J]. *AIAA Journal*, 2000, **38** (9): 1643-1649
- [12] Plesniak M, Cusano D. Scalar mixing in a confined rectangular jet in crossflow [J]. *J. Fluid Mech.*, 2005, **524**: 1-45
- [13] Bai B F, Zhang H B, Liu L, Sun H J. Experimental study on turbulent mixing of spray droplets in crossflow [J]. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2009, **33**: 1012-1020
- [14] Zhang Haibin (张海滨), Liu Li (刘利), Sun Huijuan (孙慧娟), Bai Bofeng (白博峰). Experimental study of turbulent mixing of spray droplets in crossflow with a single nozzle [J]. *Journal of Engineering Thermophysics (工程热物理学报)*, 2009, **30** (10): 1681-1684
- [15] Zhang Haibin (张海滨), Liu Li (刘利), Sun Huijuan (孙慧娟), Bai Bofeng (白博峰). Study on single-nozzle spray pattern in crossflow and two-phase mixing characteristics [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (西安交通大学学报)*, 2010, **44** (7): 104-108
- [16] Liu Li (刘利), Zhang Haibin (张海滨), Sun Huijuan (孙慧娟), Bai Bofeng (白博峰). Mixing of spray in crossflow in rectangle tube [J]. *Journal of Engineering Thermophysics (工程热物理学报)*, 2011, **32** (2): 233-238

作者: [张海滨](#), [白博峰](#), [刘利](#), [孙慧娟](#), [ZHANG Haibin](#), [BAI Bofeng](#), [LIU Li](#), [SUN Huijuan](#)  
作者单位: [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](#)  
刊名: [化工学报](#)     
英文刊名: [CIESC Journal](#)  
年, 卷(期): 2012, 63(5)

## 参考文献(16条)

1. WuPK;Fuller RP;KirkendallK A;Nejad AS [Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows](#) 1997(01)
2. Sallam K A;Aalburg C;Faeth G M [Breakup of round non turbulent liquid jets in gaseous crossflow](#) 2004(02)
3. Jacob N S;Jong G L;Domenic A S [Penetration of liquid jets in a crossbow](#) 2006(08)
4. Eroglu H;Chigier N [Initial drop size and velocity distributions for airblast coaxial atomizers](#) 1991(03)
5. Leong M Y [Mixing of an airblast-atomized fuel spray injected into a crossflow of air](#) 2000
6. Ghosh S;Hunt J C R [Spray jets in a cross flow](#) 1998
7. Phillips 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](#) 2000(01)
8. Fric T F [Structure in the near field of the transverse jet](#) 1990
9. Kelso R M;Lim T T;Perry A E [An experimental study of round jets in cross flow](#) 1996
10. Liscinsky D S [Experimental study of cross flow mixing in cylindrical and rectangular ducts//National Aeronautics and Space Administration](#) 1993
11. Han D;Orozco V;Mungal M [Gross-entrainment behavior of turbulent jets injected obliquely into a uniform crossflow](#) 2000(09)
12. Plesniak M;Cusano D [Scalar mixing in a confined rectangular jet in crossflow](#) 2005
13. Bai B F;Zhang H B;Liu L;Sun H J [Experimental study on turbulent mixing of spray droplets in crossflow](#) 2009
14. [张海滨](#); [刘利](#) [Sun Huijuan \(孙慧娟\)](#), [Bai Bofeng\(白博峰\)](#) [Experimental study of turbulent mixing of spray droplets in crossflow with a single nozzle](#) 2009(10)
15. [张海滨](#); [刘利](#); [孙慧娟](#); [白博峰](#) [Study on single-nozzle spray pattern in crossflow and two-phase mixing characteristics](#) [期刊论文]-[西安交通大学学报](#) 2010(07)
16. [刘利](#); [张海滨](#); [孙慧娟](#); [白博峰](#) [Mixing of spray in crossflow rectangle tube](#) 2011(02)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hgxb201205004.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hgxb201205004.aspx)