

# 单喷嘴横流气雾两相流掺混实验研究

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, 陕西 西安 710049)

**摘要** 采用 PIV 设备测量了方腔通道内气体液雾两相交叉横向流的掺混, 液滴通过旋流雾化喷嘴产生, 获得了沿横流方向不同掺混横截面的液滴分布图和液滴运动流线图。比较了三种喷嘴布置角度 ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ) 在不同气流速度下的掺混效果。结果表明: 在横流作用和壁面约束的影响下, 流场中出现不同尺度的漩涡, 大涡的卷吸与离心作用导致液滴分布不均匀, 影响了雾滴与气相的掺混。随着掺混的发展, 大涡的强度和尺寸均减小, 对雾滴影响减弱, 掺混变好; 三种喷嘴布置角度下,  $60^\circ$  掺混最好,  $90^\circ$  次之,  $120^\circ$  最差。

**关键词** 横流; 掺混; 液滴分布; 漩涡; PIV

**中图分类号:** O359+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2009)10-1681-04

## EXPERIMENTAL STUDY OF TURBULENT MIXING OF SPRAY DROPLETS IN CROSSFLOW WITH A SINGLE NOZZLE

ZHANG Hai-Bin LIU Li SUN Hui-Juan BAI Bo-Feng

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

**Abstract** An experimental investigation of two-phase turbulent mixing of spray droplets with crossflow in a rectangular duct is presented. The liquid droplets are produced by a pressure swirl nozzle. The distribution of water droplets on the cross section and the flow vector field are measured with PIV technology. The effects of a nozzle injection angle ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$  or  $120^\circ$ ) and cross airflow velocities in the mixing process are addressed. We conclude that the entrainment and centrifugal force of large vortex leads to uneven droplet distribution and exerts influences on the mixing of droplets and cross flow. Both the strength and the size of large eddies decrease with the mixing development, resulting in weak impact on the droplet. Among three injection angles of nozzle, the nozzle with  $60^\circ$  has the best mixing effect, the nozzle with  $90^\circ$  take second place, and the nozzle with  $120^\circ$  is the worst.

**Key words** crossflow; mixing; droplets distribution; vortex; PIV

## 0 前言

水雾化广泛存在于各种工业应用中, 如工业除尘, 核反应堆降压降温, 雾化加湿, 炉膛冷却, 水冲压发动机中喷雾、颗粒的掺混, 液体发射药火炮的推进装置等。作为流体运动的一种重要类型, 雾化颗粒群—气体作用的研究涉及诸多领域, 如热力学、空气动力学、气象学、环境学、燃烧学等。由于喷雾的存在, 流场具有强三维特性, 并且在喷雾与气流, 喷雾、气流与壁面之间的相互作用下, 流场中同时存在卷吸、掺混、聚并、破碎、蒸发和化学反应等重要现象, 使得气液作用十分复杂, 对其深层机理的解释尚需完善。

文献中对于雾化液滴和气体的相互作用研究很多, 但大多限于封闭腔内, 如燃烧室, 冷却塔等。S

S Kachhwaha<sup>[1,2]</sup> 等对喷嘴方向与气流方向相同和相反两种情况下雾滴群的运动蒸发进行了研究, 提出了二维计算模型, 并与实验作了对比。Emmanuel Porcheron<sup>[3]</sup> 等利用 PIV 等设备研究了冷却塔中喷雾与上升热气流的传热传质现象。数值模拟方面对于喷雾—气体作用的模型计算相对较多, 如双欧拉模型、欧拉—拉格朗日模型等, 但大多为简化模型或带有某种假设, 或针对某一现象研究, 如液滴初始分布, 液滴破碎和聚并, 壁面作用等。对于雾化液滴群与横向交叉气流的掺混特性研究很少, 特别是近喷雾区的横流掺混流场研究更少, 为此, 本文设计了喷嘴雾化与横向交叉气流掺混的实验台, 研究了冷态条件下不同喷嘴布置角度、不同横流速度下

**收稿日期:** 2008-12-05; **修订日期:** 2009-09-13

**基金项目:** 国家自然科学基金创新群体 (No.50521604); 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (No.NCET-04-0923)

**作者简介:** 张海滨 (1984—), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事多相流掺混实验研究。

的气液掺混流场特征。为进一步研究热态气液掺混蒸发奠定了基础,同时也为相关数值模拟提供了实验依据。

## 1 实验系统及方法

### 1.1 实验装置

实验系统装置示意图如图 1 所示,主要包括水路,主气路和支气路,实验段和 PIV 测试系统。实验段为方腔,长 1000 mm,横截面尺寸 95 mm×95 mm。离心雾化喷嘴布置在实验段入口下游 500 mm 处。水经喷嘴在实验段中完成雾化以及和横流空气的掺混,掺混后的气流经敞口实验段末端排空。为便于利用 PIV 对不同的掺混截面进行打光以及消除环境光照的影响,实验段侧面开缝并内部涂黑。CCD 相机布置在实验段正后方拍摄内部流场。支气路出口方向与实验段出口气流方向垂直,作用是改变主气流方向,防止对 CCD 相机的影响。

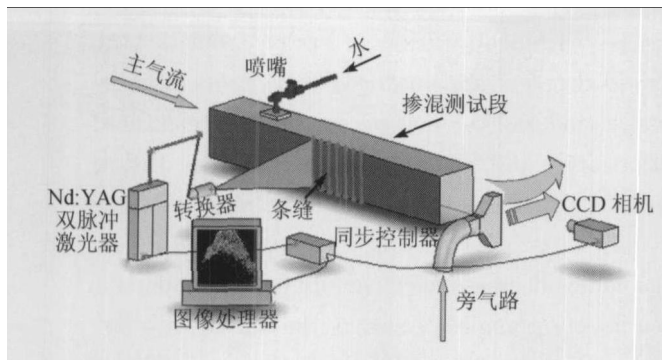


图 1 实验台布置示意图

Fig. 1 Experimental schematic

喷嘴选用日本雾的池内公司的 KB 系列离心雾化喷嘴,0.7 MPa 压力下水的体积流量为 0.0226 m<sup>3</sup>/h,雾化索太尔直径 104 μm,雾化角 80°;水路流量测量采用电磁流量计;喷嘴之前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。气路流量测量采用涡街流量计;流量计前端和实验段入口处均安装压力传感器和热电偶,用于测量空气压力和温度。通过 ADLINK 数据采集卡和电脑相连对各仪表进行数据采集与存储。实验工况参数如表 1。实验测量截面坐标和喷嘴布置角度如图 2。

表 1 工况参数信息

Table 1 Work conditions

喷嘴布置角度度	气流速度 (m/s)		
60°	2	4	7
90°	2	4	7
120°	2	4	7

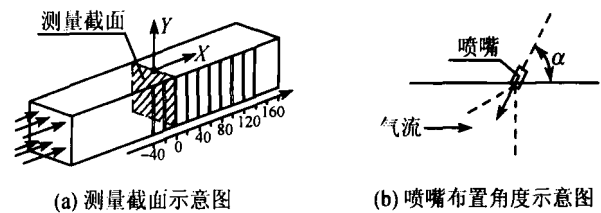


图 2 测量截面与喷嘴布置角度示意图

Fig. 2 Schematic of measurement cross-section and nozzle injection angle

### 1.2 PIV 测量系统

实验应用德国 Lavision 公司的 FLOWMASTER PIV 系统进行测量。激光器采用 Nd:YAG Gemini 200-15 激光器单脉冲能量为 200 mJ,波长为 532 nm 的绿光。CCD 相机为 Nikon Imager-Pro4M, 2048×2048 像素,保证了拍摄达到最佳效果。实验照相机拍摄视场约为 0.15 m×0.15 m,用于图像处理的有效像素约 1700×1700,尺度因子 55.7 μm/pixel。实验段视窗采用单帧模式拍摄,相邻照片的时间间隔 50 μs,通过互相关分析处理。

## 2 实验结果与分析

实验过程中,保持 CCD 相机和激光片光的位置不变,通过调节可移动实验台来变换拍摄截面,对其中任一截面拍摄时,其它开缝位置密封,以保证开缝对主流场的影响最小。最终得到截面粒子分布如图 3~5。

### 2.1 截面粒子分布规律

不同工况下雾化掺混瞬态图像如图 3~5 所示。喷嘴 90° 布置,气速 2 m/s 时,沿流场掺混截面下方先出现粒子富集 ( $X < 80$  mm),而后粒子富集现象逐渐消失,截面粒子分布趋于均匀;气速 4 m/s 下,下游截面 ( $X > 60$  mm) 下方出现粒子

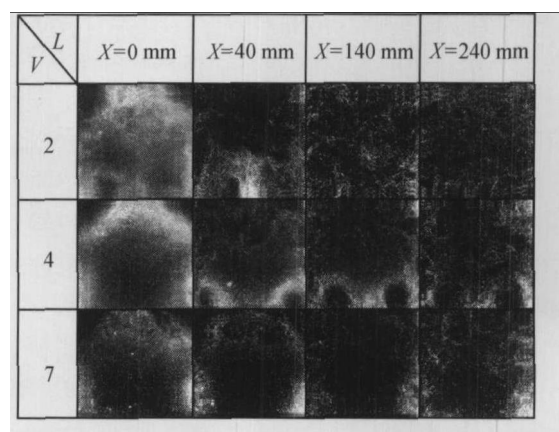


图 3 60° 布置沿流场截面粒子分布图

Fig. 3 Instantaneous images for  $\alpha = 60^\circ$

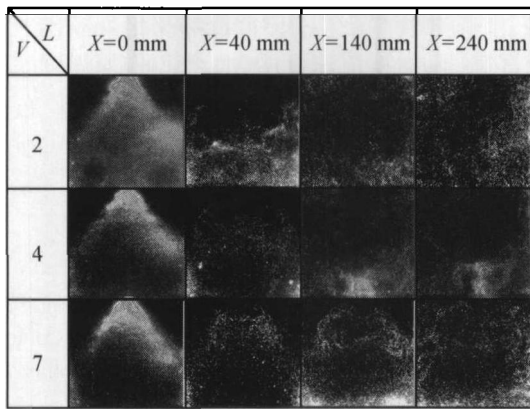


图 4 90° 布置沿流场截面粒子分布图  
Fig. 4 Instantaneous images for  $\alpha = 90^\circ$

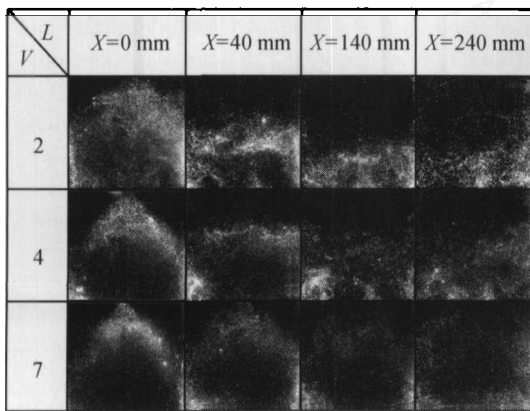


图 5 120° 布置沿流场截面粒子分布图  
Fig. 5 Instantaneous images for  $\alpha = 120^\circ$

的富集。60° 布置时, 风速 2 m/s, 近喷雾区下方截面存在粒子富集区, 之后掺混均匀; 风速 4 m/s, 喷嘴下游截面均存在粒子空心区。120° 布置时, 2 m/s 和 4 m/s 风速下, 粒子多集中在掺混截面下方, 只有在最后几个截面, 截面上方才出现稀薄粒子。三种布置角度, 7 m/s 风速时, 流场掺混情况相对稳定, 趋势大体相同。不同条件下, 随着掺混距离的增大, 截面粒子分布愈均匀。

分析截面粒子矢量流线图可以看出, 交叉横流喷雾情况下, 喷雾的介入增强了流场的湍流度, 使流场出现不同尺度的漩涡, 如图 6。漩涡的存在直接影响了雾化液滴的分布。一方面漩涡有利于对颗粒的携带, 但同时强漩涡的存在也在一定程度上造成了雾化液滴的分布不均匀。离心力的作用使粒子趋向涡的边缘<sup>[5]</sup>, 造成漩涡中心粒子浓度低, 边缘浓度高, 相邻漩涡之间位置易于造成粒子的富集。

### 2.2 不同喷嘴布置角度对掺混的影响

为了定量表示气体和液滴群混合的均匀性, 即表达横截面上液滴分布均匀程度, 这里采用掺混度

来定量描述。把拍摄截面分成若干小区域, 采用方差的方法计算所有区域的粒子浓度值, 得到整个截面的粒子浓度均匀度, 即为掺混度。这里用光强浓度分布近似代替粒子浓度分布, 计算每个小区域的光强浓度, 从而求得整个截面的掺混度。数学表达式如下:

$$\xi = 1 - \frac{S^2}{\bar{X}^2} = 1 - \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\bar{X}^2}$$

其中,  $X_i$  为  $i$  区域所有像素点灰度值之和,  $\bar{X}$  为截面平均灰度值。掺混度  $\xi$  越趋近于 1, 粒子分布越理想。

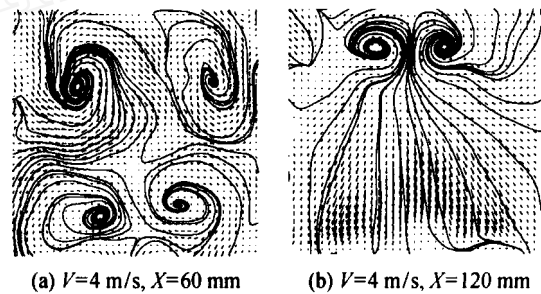


图 6 矢量流线图  
Fig. 6 Vector and streamline diagrams

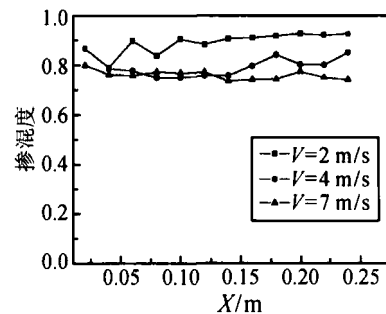


图 7 喷嘴 60° 布置, 不同风速下掺混度曲线  
Fig. 7 The mixing degrees of different velocities for  $\alpha = 60^\circ$

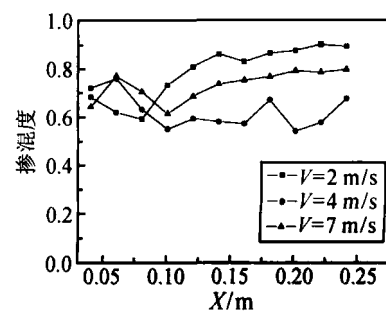


图 8 喷嘴 90° 布置, 不同风速下掺混度曲线  
Fig. 8 The mixing degree of different velocities for  $\alpha = 90^\circ$

由于 120° 布置时, 粒子一直没有充满整个截面,

因此这里只给出了 60° 和 90° 布置时的掺混度。不同横流速度下, 喷嘴 60° 布置时, 距离喷嘴很短距离, 掺混度就趋于稳定, 之后掺混度波动很小, 因而掺混效果最好, 90° 布置次之, 120° 布置最差。

喷嘴入射角为 60° 时, 喷雾方向为迎风, 一方面降低了迎风面雾滴群纵向 ( $Y$  方向) 速度分量, 增大了  $X$  负方向速度分量, 延长了液滴在气流中的停留时间, 增加了喷嘴射流对主气流的卷吸作用, 使射流与主气流掺混得更快; 增大了背风面的纵向速度分量, 加剧了液滴与下壁面的作用, 有利于液滴的碰壁破碎反弹。另一方面相当于提前了气液初始掺混截面。喷嘴入射角为 120° 时, 相当于把初始气液掺混截面后移, 气液作用减弱。喷嘴 90° 布置时, 气液两相作用强度处于 60° 和 120° 之间。这一掺混情况可以与射流掺混相类比, Han 等<sup>[6]</sup> 利用 PIV 可视技术和图像采集系统对横向紊动射流中不同喷嘴入射角度的流场进行了测量, 得出负的入射角使射流与主气流掺混得更快, 掺混效果更好的结论。

### 3 结 论

在雾化液滴与横流以及壁面的相互作用和喷嘴入射角度的影响下, 流场出现不同尺度的漩涡, 大涡的卷吸与离心作用导致液滴分布不均匀, 影响了雾滴与气相的掺混。随着掺混的发展, 大涡的强度和尺寸均减小, 对雾滴影响减弱, 掺混效果明显变好。

低速下, 两相作用强烈, 掺混流场易出现漩涡, 造成粒子富集。随着横流速度增大, 气相作用增强, 不易形成局部强漩涡, 掺混形态较稳定。喷嘴 60° 布置掺混所需距离最短, 效果最好。90° 布置优于 120° 布置。

### 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. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, 41: 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. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, 41: 465-474
- [3] Porcheron E, Lemaitre P, Nuboer A, et al. Experimental Investigation in the TOSQAN Facility of Heat and Mass Transfers in a Spray for Containment Application. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, 237: 1862-1871
- [4] Orme M. Experiments on Droplet Collisions, Bounce, Coalescence and Disruption. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1997, 23: 65-79
- [5] 张会强, 华丽君. 气粒两相湍流中颗粒倾向性分布现象的研究. *工程热物理学报*, 2008, 29(3): 443-446  
ZHANG Hui-Qiang, HUA Li-Jun. Investigation on Particles' Preferential Concentration in Gas-Particle Turbulent Flow. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(3): 443-446
- [6] Han D, Orozco V, Mungal M G. Gross-Entrainment Behavior of Turbulent Jets Injected Obliquely into a Uniform Crossflow. *AIAA Journal*, 2000, 38(9): 1643-1649