

文章编号:2095-6134(2016)02-0223-05

# 甘油/压缩空气两相喷雾动力学研究\*

王锐<sup>1</sup>, 景青<sup>2</sup>, 周致富<sup>1</sup>, 白飞龙<sup>1</sup>, 陈斌<sup>1†</sup>

(1 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049; 2 西安近代化学研究所, 西安 710065)

(2015 年 3 月 13 日收稿; 2015 年 6 月 1 日收修改稿)

Wang R, Jing Q, Zhou Z F, et al. Experimental study on characteristics of glycerol/compressed air two-fluid spray [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(2):223-227.

**摘要** 甘油喷雾在生产 and 生活中有诸多应用. 利用压缩空气辅助甘油喷雾可获得雾化性能良好的甘油液滴, 提高甘油的利用率. 本文采用双流体喷嘴在不同喷雾压力下进行甘油/压缩空气两相喷雾, 使用高速摄影仪拍摄稳态喷雾形态, 利用 PDPA 测量喷雾液滴的直径与速度的空间分布, 对两相喷雾动力学进行系统的实验研究. 结果表明, 在实验压力条件下, 甘油经压缩空气混合及二次雾化后, 雾化状况良好. 实验获得了液滴直径与速度的空间分布及其与喷雾压力的变化关系.

**关键词** 甘油; 压缩空气; 喷雾特性; 液滴动力学

中图分类号: O359 文献标志码: A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2016.02.012

## Experimental study on characteristics of glycerol/compressed air two-fluid spray

WANG Rui<sup>1</sup>, JING Qing<sup>2</sup>, ZHOU Zhifu<sup>1</sup>, BAI Feilong<sup>1</sup>, CHEN Bin<sup>1</sup>

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

2 Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract** Glycerol spray is widely encountered in daily life and industries. With the assistance of compressed air, the glycerol spray achieves good atomization performance which enhances the utilization efficiency of glycerol. We carried out an experimental study on the characteristics of glycerol/compressed air spray using a concentric two-fluid nozzle. The steady spray pattern was captured by the high-speed camera, and the droplet diameters and velocities were measured by phase Doppler particle analyzer. The experiment results showed that good atomization effects were achieved after the intensive mixing of glycerol droplets and compressed air and the secondary spray under the experiment condition. The spatial distributions of droplet diameters and velocities and their change relations with spray pressure were obtained in the experiments.

**Key words** glycerol; compressed air; spray characteristics; droplet dynamics

\* 国家自然科学基金(51336006)、陕西省国际科技合作重点项目(2013KW30-05)和中央高校基本科研业务费专项基金资助

† 通信作者, E-mail: chenbin@mail.xjtu.edu.cn

甘油喷雾在生产生活中有诸多应用. 例如, 美容护肤时, 使用喷雾瓶向皮肤均匀喷洒甘油, 具有维护肌肤水分、镇静安抚肌肤的功效. 在工业生产领域, 烟草行业将均匀喷洒的甘油涂抹在运动丝束与胶辊的接触面上生产滤棒. 优化的甘油雾化系统, 即具有小雾化颗粒及较高喷洒均匀度的系统, 可保证滤嘴硬度的稳定性<sup>[1]</sup>. 在医学领域, 采用 10% 甘油生理盐水喷雾法, 可解决经鼻蝶入路术后病人口渴的问题, 提高病人舒适度<sup>[2]</sup>.

为提高雾化性能, 使用气体辅助液体喷雾是近年来的研究热点. Chen 等<sup>[3]</sup>设计了具有直管混合腔的两相喷嘴, 对丙酮与空气两相喷雾进行实验研究, 采用 PDA 测量喷雾液滴的直径、速度及浓度的空间分布. Hoeg 等<sup>[4]</sup>采用环流空气辅助同轴喷雾器, 使用 PIV 测量气体辅助丙二醇喷雾的瞬时喷雾速度场. Akafuah 等<sup>[5]</sup>采用双流体喷雾器进行低压气体辅助油漆喷雾, 使用红外热像仪对喷雾场液滴特性进行可视化实验研究.

目前对甘油喷雾的研究较少, 本文针对不同

压力下的压缩空气/甘油两相喷雾, 系统研究喷雾动力学(喷雾形态、液滴直径及速度的空间分布), 旨在指导生产生活中的气体辅助液体喷雾.

## 1 实验系统及工况

甘油/压缩空气两相喷雾实验系统如图 1 所示. 甘油置于密闭容器中, 由高压气瓶提供压力以控制甘油流量. 甘油和压缩空气分别进入离心式同轴分布外部雾化的双流体喷嘴, 三维电动平移台上可精确控制测量点的空间位置, 调节精度  $8 \mu\text{m}$ . 采用连续氙灯光源直射甘油、压缩空气两相喷雾, 应用高速摄像机观察喷嘴出口附近的喷雾形态, 使用相位多普勒激光粒子分析仪(PDPA)测量喷雾液滴的速度与直径的空间分布. 本文采用 Sauter 平均直径( $D_{32}$ )作为液滴直径统计值,  $D_{32}$ 表示测得液滴的总体积与总表面积之比. 实验开始前使用加湿器对 PDPA 进行测量调试, 对水滴的速度及直径多次测量的结果显示, 速度测量的不确定度不超过  $\pm 3\%$ , 直径不确定度不超过  $\pm 7\%$ .

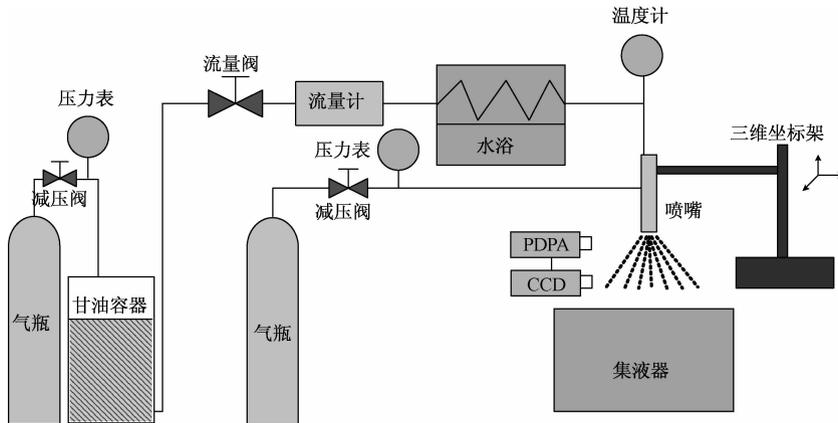


图 1 甘油/压缩空气两相喷雾实验系统

Fig.1 Experimental system of glycerol/compressed air spray

固定甘油流量为  $4 \text{ kg/h}$ , 分别调整压缩空气的绝对压力为  $0.2$ 、 $0.21$ 、 $0.22$ 、 $0.23$ 、 $0.24$ 、 $0.25$  及  $0.26 \text{ MPa}$ . 喷雾场 PDPA 测点位置布置在喷嘴出口  $5 \sim 50 \text{ mm}$  间 10 个等距截面的喷雾中心, 并在  $50 \text{ mm}$  截面上每  $2 \text{ mm}$  等距布置测点, 进行径向分布的测量.

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 喷雾形态的高速摄像

图 2 显示甘油/压缩空气两相喷雾的喷雾形态. 喷嘴出口处甘油与压缩空气发生强烈混合, 破

裂成甘油液滴并发生径向扩散. 靠近喷嘴出口位置的区域呈现亮白色, 这是由于稠密甘油液滴对光的强烈散射作用造成. 喷嘴出口附近甘油喷雾轮廓清晰, 这是因为出口附近外界空气扰动作用不显著. 喷雾一段距离后, 亮度随喷雾距离变化不显著, 这说明甘油已破碎雾化良好, 随距离增加, 液滴保持稳定状态不再破碎. 喷雾中心区域亮度沿径向方向变化也不显著, 说明实验中甘油雾化液滴径向分布均匀性较好. 长距离下喷雾轮廓不稳定, 说明在此区域喷雾场液滴与环境气体的相互作用强烈.

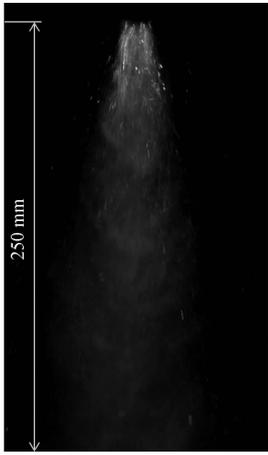


图 2 甘油/压缩空气的两相喷雾形态

Fig. 2 Spray pattern of glycerol/compressed air

## 2.2 喷雾液滴的直径分布

测量不同喷雾距离下喷雾中心处的直径  $D_{32}$ , 结果示于图 3. 随喷雾距离的增加, 甘油液滴直径呈递减趋势. 在喷嘴出口附近,  $D_{32}$  随喷雾距离的增加快速衰减, 如从喷雾距离 5 mm 到 15 mm,  $D_{32}$  值减少 20% ~ 30%; 喷雾距离继续增加,  $D_{32}$  继续减小但衰减速度逐渐减缓; 喷雾距离达 40 mm 后,  $D_{32}$  减小速度缓慢, 在本实验条件下皆维持在 20  $\mu\text{m}$  左右, 可认为甘油/压缩空气两相喷雾喷出 40 mm 距离后液滴直径趋于稳定.

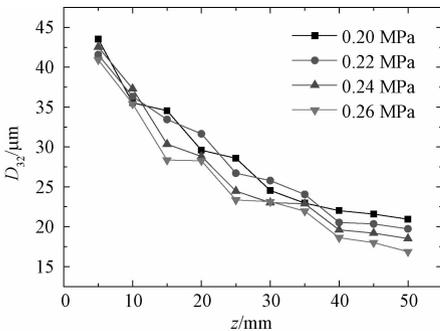


图 3 不同喷雾压力下喷雾中心处液滴直径随距离的变化

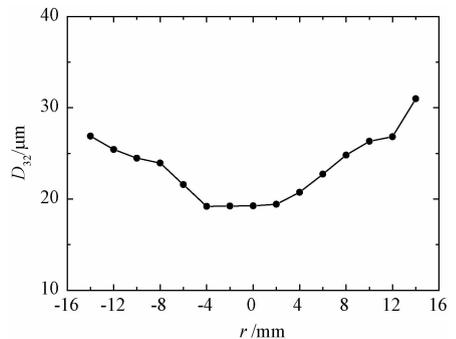
Fig. 3 Variation in droplet diameter along the spray central axis

甘油与压缩空气混合破碎形成液滴后, 在飞行过程中发生二次雾化<sup>[6]</sup>, 继续破碎成更小的液滴, 继而产生上文描述的直径减小现象. 影响液滴破碎的主要因素是液滴表面受到的气相曳力<sup>[7]</sup>. 喷嘴出口附近, 压缩空气与甘油速度差值较大, 甘油液滴表面受较大的气相曳力, 该力大于试图保持液滴稳定的表面张力及粘性力, 液滴将失稳而持续破碎, 表现为  $D_{32}$  的持续减小. 随喷雾距离的增加, 油气两相间相对速度逐渐减小, 液滴表面受

到的气相曳力随之减小, 当喷雾达到一定距离后, 气相曳力小于液滴的表面张力及粘性力时, 甘油液滴不再发生破碎, 即  $D_{32}$  趋于稳定.

对比图 3 中不同压缩空气压力下的曲线, 易知随压力的增加, 甘油液滴直径减小, 即雾化状况越好. 这是由于压力的增加使压缩空气速度提高, 较大的气相曳力使甘油液滴二次雾化更强烈, 液滴直径更小. 喷雾距离较小时, 不同压力下曲线差异很小, 这是由于本实验所采用的压缩空气压力均能保证液滴在短距离喷雾下受到较大气相曳力而持续雾化破碎. 喷雾距离增加时, 较高压缩空气压力可维持较长距离的二次雾化, 因而获得更好的雾化效果.

固定压缩空气压力  $p = 0.22 \text{ MPa}$ 、喷雾距离  $z = 50 \text{ mm}$ , 测量各径向位置的液滴直径, 结果示于图 4. 由图可知, 液滴雾化对称性较好, 喷雾中心区域雾化效果均匀、效果优于边缘区域. 对于这种气体辅助无蒸发液体的喷雾, 液体在喷嘴出口处破碎形成初始液滴. 由前述分析可知, 中心区域液滴因发生二次雾化破裂成更细小液滴; 而对于喷雾边缘位置的液滴, 喷雾扰动外界空气形成的紊流对液滴的曳力作用, 远小于中心区域压缩空气对液滴的曳力, 所以边缘液滴难以发生二次雾化, 具有较大的直径<sup>[8]</sup>. 对于近喷嘴其他轴向位置的直径分布, 本实验未做测量. 这是由于本文采用了离心式旋流喷嘴, 喷雾边缘集中较多的大直径液滴; 甘油液滴表面张力较大, 而喷雾边缘液滴速度较小, 液滴不能获得足够的破碎能量, 雾化效果较差, 在近边缘区域存在大尺寸液滴及未破碎液丝 (如图 2 所示), 对实验测量干扰严重, 难以测量绘制出液滴直径的径向分布.



$p = 0.22 \text{ MPa}$ ,  $z = 50 \text{ mm}$ .

图 4 喷雾液滴直径的径向分布

Fig. 4 Radial distribution of droplet diameter

## 2.3 喷雾液滴的速度分布

测量不同喷雾距离下喷雾中心处的轴向速度  $w$  及径向速度  $v$ , 结果示于图 5. 液滴轴向速度随喷雾距离的增加呈现先增后减的趋势. 在近喷嘴距离下, 喷嘴喷出的高速压缩空气对甘油液滴具有加速作用, 液滴持续加速到 20 mm 左

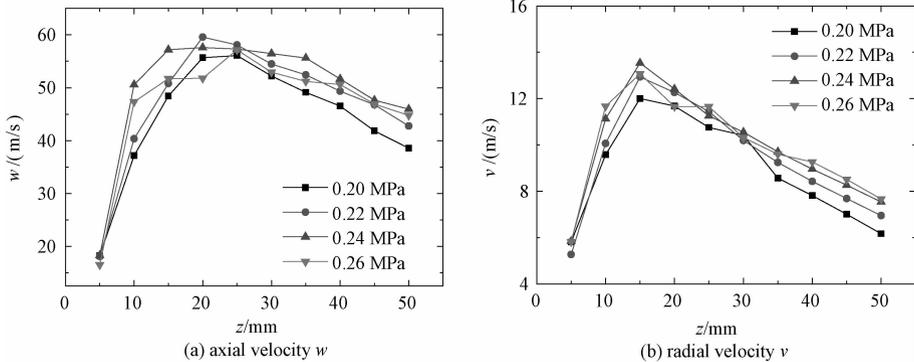


图 5 不同喷雾压力下喷雾中心处液滴速度随距离的变化

Fig. 5 Variation in droplet velocity along the spray central axis

此外, 由图 5 可看出喷雾压力对液滴速度有一定的影响. 比较 10, 30 和 50 mm 处 4 个喷雾压力下的速度值可知, 轴向速度随喷雾压力的增加呈现先增后减, 在喷雾压力 0.24 MPa 时取得轴向速度最大值, 径向速度随喷雾压力的增加几乎均增加. 喷雾压力增加, 喷出压缩空气速度增大, 对液滴有更大的推动作用. 由图 3 可知, 液滴直径随喷雾压力的增加而减小, 气体曳力作用减小, 所以存在使轴向速度达到最大的喷雾压力. 径向速度主要受二次雾化的影响, 喷雾压力越大, 二次雾化越剧烈, 所以径向速度与喷雾压力呈近似单调递增关系.

图 6 示出固定的压缩空气压力及喷雾距离下液滴速度的径向分布. 由图 6 可看出, 液滴轴向速度与径向速度最大值都出现在中心点位置, 从中心点往外, 速度沿径向距离增加而迅速减小, 变化曲线沿中心轴基本对称, 近似呈高斯分布. 而图 4 的直径分布未呈现高斯分布, 这可能是由于离心式喷嘴的喷雾中心液滴径向速度较大, 其数值接近 10 m/s, 中心小直径液滴迅速径向扩散, 形成液滴直径均匀分布的中心区域.

右的距离达到峰值; 喷雾距离继续增加后, 由于液滴直径的迅速减小、压缩空气速度的降低及周围空气的卷吸阻碍作用, 液滴速度持续降低. 液滴径向速度远小于轴向速度, 但与轴向速度存在着类似的变化趋势, 随距离增加先快速上升然后缓慢下降.

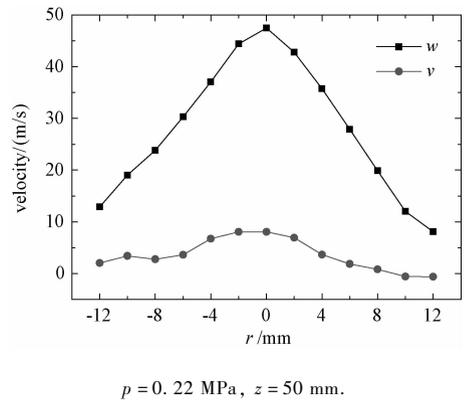


图 6 喷雾液滴速度的径向分布

Fig. 6 Radial distribution of droplet velocity

## 3 结论

本文搭建甘油/压缩空气两相喷雾实验系统, 使用高速摄像机及 PDPA 对喷雾液滴动力学进行实验研究. 高速摄像机对喷雾稳态形态的研究结果表明, 采用实验条件下的喷嘴及压缩空气压力, 甘油雾化状况良好. PDPA 测量液滴直径的研究结果表明, 近喷嘴区域, 液滴因发生二次雾化, 直径随距离的增加快速下降; 喷雾距离继续增加, 液滴直径缓慢下降至趋于稳定; 喷雾液滴直径与喷

雾压力呈负相关性;液滴雾化达到稳定的区域,在喷雾中心附近区域液滴直径几乎不随径向距离变化,而喷雾边缘区域液滴直径高于中心区域.速度测量的研究表明,甘油喷雾液滴由于受到喷嘴出口高速气体的加速作用,液滴速度随距离增加呈现先增后减的变化趋势;液滴轴向速度在喷雾压力 0.24 MPa 时取得最大值,而径向速度与喷雾压力呈正相关性;液滴雾化稳定区域,液滴速度沿径向近似呈高斯分布.本文得到的研究结果有助于加深对气相辅助液体喷雾的液滴动力学特征的认识,为实际生产生活中的喷雾应用提供参考.

### 参考文献

- [ 1 ] 刘汝强. KDF2 甘油喷雾系统的应用[J]. 科技创新导报, 2012, 26: 86-87.
- [ 2 ] 李珊瑚,石赞华,刘燕. 10% 甘油生理盐水喷雾在经鼻蝶入路术后病人口渴护理中的应用[J]. 护理研究, 2012, 26(26): 2459.
- [ 3 ] Chen Y C, Starner S H, Masri A R. A detailed experimental investigation of well-defined turbulent evaporating spray jets of acetone[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2006, 32: 389-412.
- [ 4 ] Hoeg D P, Wang Z, Friedman P D, et al. Investigation of a coaxial air-blast atomizer using particle image velocimetry and computational fluid dynamics[J]. *Atomization and Sprays*, 2008, 18(8): 739-759.
- [ 5 ] Akafuah N K, Salazar A J, Saito K. Infrared thermography-based visualization of droplet transport in liquid sprays[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2010, 53(3): 218-226.
- [ 6 ] Guildenbecher D R, Lopez R C, Sojka P E. Secondary atomization[J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 46(3): 371-402.
- [ 7 ] Pilch M, Erdman C A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1987, 13(6): 741-757.
- [ 8 ] Lasheras J C, Villermaux E, Hopfinger E J. Break-up and atomization of a round water jet by a high-speed annular air jet [J]. *J Fluid Mech*, 1998, 357: 351-379.