doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.043

气泡雾化喷嘴泡状流喷雾特征试验与仿真

孙春华[1]　宁　智[1]　乔信起[2]　李元绪[1]　吕　明[1]

(1.北京交通大学机械与电子控制工程学院,北京 100044;2.上海交通大学内燃机研究所,上海 200240)

摘要:建立了气泡雾化喷射可视化试验系统及喷嘴内部和喷雾场中气液流动模型;采用试验和仿真方法对一特定可视化喷嘴的泡状流喷雾特征进行了研究。结果表明,喷雾表面存在气相膨胀凸起现象,气相膨胀凸起宽度随液相流量和气液质量比增加而增大,凸起间距随气液质量比增加而减小;在相同气液质量比下,喷雾锥角随液相流量增加而增大,较高液相流量时液相流量的影响变弱,喷雾贯穿距在较低气液质量比时随液相流量增加而增大,较高气液质量比时则减小;低气液质量比时,喷雾形态受气液质量比影响明显,喷雾锥角和贯穿距随气液质量比增加而增大;液滴碰撞率随喷雾轴向距离增加而减小并逐渐趋于稳定;喷孔出口气液流量脉动对喷孔出口截面附近液滴轴向速度的影响只局限于很短距离内;随着与喷孔出口轴向距离增加,液滴直径分布范围变宽、液滴峰值数量减少,液滴峰值直径和液滴直径分布向大直径方向移动;随着与喷孔出口轴向距离增加,大尺度液滴区内液滴粒径增大,大尺度液滴区的径向范围变宽。

关键词:气泡雾化喷嘴;泡状流;喷雾;可视化;仿真

中图分类号:O359⁺.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)10-0367-08

Experiment and Simulation on Spray Characteristics of Effervescent Atomizer within Bubbly Flow

SUN Chunhua[1]　NING Zhi[1]　QIAO Xinqi[2]　LI Yuanxu[1]　LÜ Ming[1]

(1. *School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044, *China*
2. *Institute of Internal Combustion Engine, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: A visual effervescent spray system and a gas-liquid flow simulation model of atomizer interior and spray field were established to investigate spray characteristics of bubbly flow. The results showed that there was a gas-phase expansion on spray surface, and the width of the gas-phase expansion was increased with the increase of liquid mass flow rate and gas-liquid mass ratio, distance between two expansions was decreased with the increase of gas-liquid mass ratio. At the same gas-liquid mass ratio, the spray cone angle was increased with the increase of liquid mass flow rate, and the influence of the liquid mass flow rate became weak at high liquid mass flow rate. The spray penetration distance was increased with the increase of liquid mass flow rate at low gas-liquid mass ratio, while decreased at high gas-liquid mass ratio. When the gas-liquid mass ratio was low, the spray shape was apparently influenced by the gas-liquid mass ratio, and the spray cone angle and penetration distance were increased with the increase of gas-liquid mass ratio. As axial distance of the spray was increased, the droplet collision frequency was decreased and gradually became stable. The influence of gas-liquid mass flow pulsation at atomizer outlet on the droplet axial velocity around the cross section of the atomizer outlet was limited to a very short distance. With the axial distance to the atomizer outlet increased, the distribution range of droplet size was widened, the number of peak droplets was decreased, and the peak size of droplet and droplet size distribution was moved to the direction of large size. With the increase of the axial distance to the atomizer outlet, droplet size in large scale droplet area was increased, the radial range of large scale droplet area was widened.

Key words: effervescent atomizer; bubbly flow; spray; visualization; simulation

收稿日期:2019-03-17　修回日期:2019-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51776016、51606006)、北京市自然科学基金项目(3172025)、中国博士后科学基金项目(2018M642014)和浙江省公益技术应用研究计划项目(GG19E060001)

作者简介:孙春华(1988—),男,助理研究员,博士,主要从事内燃机喷雾燃烧研究,E-mail:sunchunhua@sjtu.edu.cn

通信作者:宁智(1962—),男,教授,博士,主要从事内燃机燃烧与排放研究,E-mail:zhining@bjtu.edu.cn

0 引言

气泡雾化喷嘴是一种气液在内部混合的两相流喷嘴。通过喷嘴内外压差使气泡在流出喷孔前后经历加速、变形、膨胀等过程,对液体射流产生扰动,进而加速液体射流的破碎雾化。

气泡雾化喷嘴能够在低压下实现较好的雾化效果,且雾化效果对液体粘性不敏感,使得气泡雾化喷嘴能够很好适应不同液体雾化的要求[1-2]。目前,气泡雾化喷嘴已尝试应用在汽轮机、焚烧炉、喷涂、制药、内燃机、灭火等领域[2-4]。虽然气泡雾化喷雾方式尚处于研究阶段,但从目前的研究结果来看,气泡雾化喷雾具有良好的工程应用前景。

针对气泡雾化喷雾特性,国内外学者已进行过大量试验和仿真,取得了许多成果[3-16]。大量研究表明,与传统压力式喷嘴相比,气泡雾化喷嘴喷雾特性影响因素众多,且体现了许多新特点;喷雾形态、喷雾锥角、雾滴粒径、雾滴速度分布等重要喷雾特征参数的影响因素复杂,规律还不是很清晰,甚至不同研究得出相反的结论。

本文拟采用试验和仿真方法,研究一特定可视化气泡雾化喷嘴的泡状流喷雾特征。通过可视化方法,开展喷雾形态特征及形态特征参数随喷嘴运行参数-液相质量流量及气液质量比变化的试验研究;通过仿真方法,开展基于喷嘴内部气液两相流动的喷雾场中液束形态、液滴速度以及液滴尺度分布特征的研究。以期进一步深化对气泡雾化喷嘴喷雾特征的认识,为气泡雾化喷射技术研究与应用提供一定的理论和试验依据。

1 试验系统及仿真模型

1.1 试验系统

气泡雾化喷射试验系统原理图见图 1。试验系统主要由气泡雾化喷嘴、空气泵、液体泵、气体和液体流量计、高速摄像机等部分组成。

根据柴油机尿素水溶液喷射系统基本参数设计了一种可视化喷嘴,试验用液体为水,如图 2 所示。试验时,喷嘴气液充入压力 0 ~ 0.6 MPa,可实现液相 0 ~ 50 mL/s 的射流喷射。采用液相质量流量和气液质量比 G_{LR}(Gas to liquid mass ratio)表示工况,因不同工况对应于不同气、液压力,不同液相质量流量与充液压力的对应关系为:液相质量流量 $\dot{m}_l$ = 8.33 g/s,充液压力(表压)p_l = 0.2 MPa;$\dot{m}_l$ = 11.11 g/s,p_l = 0.25 MPa;$\dot{m}_l$ = 13.89 g/s,p_l = 0.3 MPa;$\dot{m}_l$ = 15.28 g/s,p_l = 0.35 MPa。

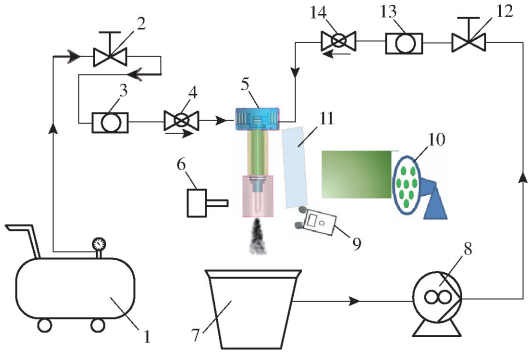
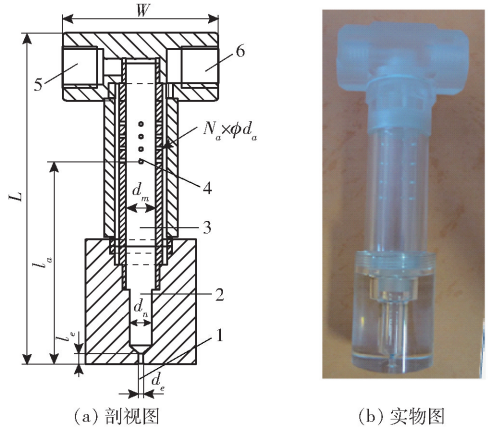


图 1 气泡雾化喷射试验系统原理图

Fig. 1 Experimental setup

1. 空气泵 2、12. 压力调节阀 3. 气体流量计 4、14. 单向阀 5. 气泡雾化喷嘴 6. 高速摄像机 7. 液体收集器 8. 液体泵 9. 线性 PCM 录音器 10. LED 绿光源 11. 匀光板 13. 液体流量计



(a) 剖视图 (b) 实物图

图 2 气泡雾化喷嘴剖视图及实物图

Fig. 2 Structure and composition diagrams of effervescent atomizer

1. 喷孔出口 2. 下游区混合室 3. 上游区混合室 4. 充气孔 5. 液相入口 6. 气相入口

1.2 仿真模型

喷雾场中的气液流动行为及液滴时空分布是喷嘴内部气液流型和外部气液流动共同作用的结果。本文借助 ANSYS Fluent 14.0 对喷嘴内部泡状流型时喷雾场中液滴分布特征进行研究。

1.2.1 喷嘴内部气液流动模型

采用构造相界面的 PLIC(Piecewise linear interface construction)方法和相界面追踪的 VOF(Void of fraction)方法对喷嘴内气液相界面重构和追踪,结合连续表面张力模型并联合连续性方程和动量方程对喷嘴内气液两相流动进行描述[17]。

连续性方程为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

基于 CSF 连续表面张力模型的动量方程为

$$\begin{cases}\rho\dfrac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=-\nabla p+\nabla\cdot(2\mu\boldsymbol{S})+\rho\boldsymbol{g}+\sigma_s k_s\boldsymbol{n}\\ \boldsymbol{n}=\nabla\alpha_i\\ k_s=\nabla\cdot(\boldsymbol{n}/|\boldsymbol{n}|)\end{cases}\tag{2}$$

式中　ρ——密度，kg/m^3

μ——粘度，Pa·s

$\boldsymbol{u}$——速度，m/s

p——压力，Pa

$\boldsymbol{S}$——界面变形张量，m^{-1}

$\boldsymbol{g}$——重力加速度，m/s^2

σ_s——表面张力系数，N/m

k_s——两相界面曲率

$\boldsymbol{n}$——垂直于相界面的体积分数梯度向量

式(2)中，等号右边最后一项为表面张力项，采用连续表面张力模型[18]计算；密度和粘度为加权物性参数，其值取决于气液两相的体积分数。

采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对湍流流动进行描述。

1.2.2　喷雾场中气液流动模型

气泡雾化喷雾仿真模型包括控制方程以及定解条件；其中，控制方程包括气相控制方程、液滴运动方程、液滴破碎和碰撞控制方程等。

将喷雾场中气相作连续相处理，用 Eulerian 描述；将液滴作离散相处理，用 Lagrangian 法描述。气液两相满足各自独立控制方程，同时考虑气液两相耦合；液滴破碎、膨胀等过程满足相应控制方程。

将气相作为连续相处理，其控制方程与式(1)和式(2)基本相同，主要区别在于动量方程中加入了液滴对气相的作用力源项 $\boldsymbol{F}$，即

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g\boldsymbol{u}_g)+\nabla\cdot(\rho_g\boldsymbol{u}_g\boldsymbol{u}_g)=-\nabla p+\nabla\cdot(2\mu\boldsymbol{S})+\rho_g\boldsymbol{g}+\boldsymbol{F}\tag{3}$$

采用颗粒轨道模型对喷雾场中的液滴运动进行描述，计算式为[19]

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}_{pi}}{\mathrm{d}t}=F_D(\boldsymbol{u}_{gi}-\boldsymbol{u}_{pi})+\frac{\boldsymbol{g}(\rho_p-\rho_g)}{\rho_p}+\boldsymbol{F}_i\tag{4}$$

其中

$$F_D=\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2}\frac{C_D Re}{24}\tag{5}$$

$$Re\equiv\frac{\rho d_p|\boldsymbol{u}_{gi}-\boldsymbol{u}_{pi}|}{\mu}\tag{6}$$

式中　$\boldsymbol{u}_{pi}$、$\boldsymbol{u}_{gi}$——液滴和气相速度，m/s

F_D——曳力动量交换系数

ρ_p、ρ_g——液滴和气相密度

$\boldsymbol{F}_i$——其他单位质量作用力，N

d_p——液滴直径　　C_D——曳力系数

Re——相对雷诺数

曳力系数考虑了在液滴运动时形态变化，其表达式为[20]

$$C_D=C_{D,\mathrm{sphere}}(1+2.632y_p)\tag{7}$$

其中
$$C_{D,\mathrm{sphere}}=\begin{cases}0.424 & (Re\geqslant 1\,000)\\ \dfrac{24}{Re}\left(1+\dfrac{1}{6}Re^{\frac{2}{3}}\right) & (Re<1\,000)\end{cases}\tag{8}$$

式中　y_p——液滴畸变系数

$C_{D,\mathrm{sphere}}$——球形液滴曳力系数[20]

除了可通过上述方程预测液滴时均速度外，还需考虑气相脉动对液滴运动的影响。液滴脉动速度可通过离散随机游走模型进行确定[21]。

由于研究对象的 Weber 数较大，因此选择 Wave 破碎模型[22]对液滴二次破碎进行描述。该模型认为由 Kelvin－Helmholtz 不稳定性支配液滴的破碎时间和破碎后的粒径。

液滴碰撞率通过引入 O'Rourke 的碰撞体积概念进行计算。假设只有两个液滴在同一个计算网格时才会发生碰撞，则碰撞率可表示为[23]

$$r_d=\frac{\pi(r_1+r_2)^2 v_{rel}\Delta t}{V_c}\tag{9}$$

式中　r_1、r_2——大、小液滴半径

v_{rel}——液滴相对速度

Δt——计算时间步长

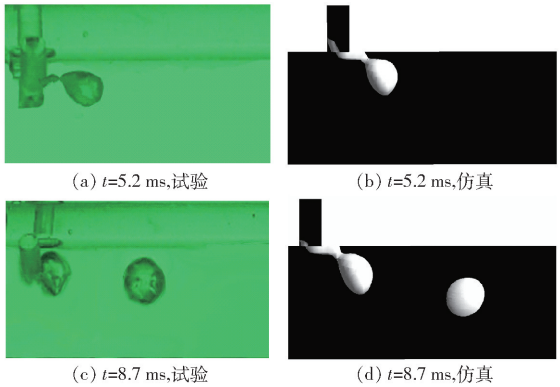
V_c——计算网格体积

根据喷嘴内部流场计算可得到喷雾场计算的入口边界条件，可避免一般计算时入口边界人为设定而带来的弊端。

1.2.3　模型验证

利用喷嘴内部气液流动模型对喷嘴混合室充气孔处气泡脱离前后的形态以及气泡流经喷孔时的形态进行计算，并与本文试验结果和文献[20]试验结果进行比较，如图 3、4 所示。

从图 3、4 可以看出，建立的喷嘴内部气液流动模型能够较好地仿真气泡雾化喷嘴混合室及喷孔内的气液两相流动。

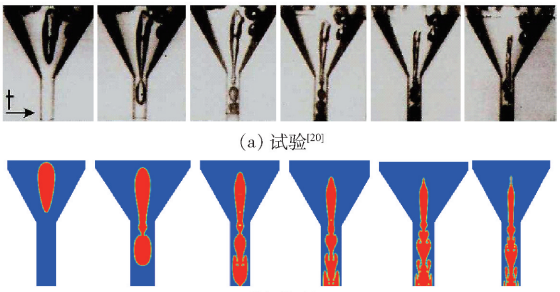


(a) t=5.2 ms,试验　(b) t=5.2 ms,仿真

(c) t=8.7 ms,试验　(d) t=8.7 ms,仿真

图 3　充气孔处气泡脱离前后气泡形态的比较

Fig. 3　Comparison of bubble shape



(a) 试验[20]

(b) 仿真

图 4 气泡流经喷孔时气泡形态的比较

Fig. 4 Comparison of numerical and experimental results

利用喷雾场中气液流动模型对喷雾场中的液滴直径进行计算,并与文献[24 – 25]中给出的试验和计算结果进行比较,如图 5 所示。

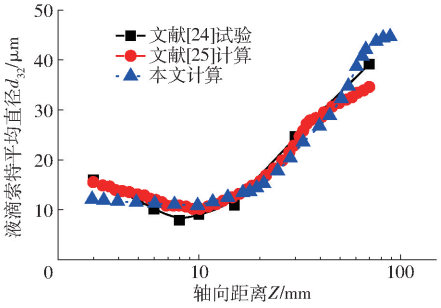


图 5 喷雾场中液滴索特平均直径的比较

Fig. 5 Comparison of simulation result with literature results

由图 5 可见,所建喷雾场气液流动模型能较好预测喷雾场中液滴直径的分布情况。

2 气泡雾化喷嘴泡状流喷雾特征试验

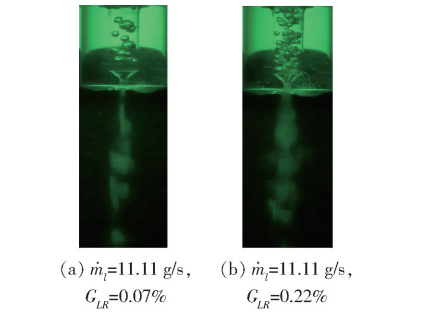
根据可视化试验观测结果,气泡雾化喷嘴内气液两相流型有泡状流、搅拌流和段塞流;在喷嘴结构一定下主要取决于气液流动参数。

一般情况下,相比于段塞流和搅拌流来说,泡状流时气液混合较为均匀、喷雾形态连续性较好、不稳定喷雾现象相对较弱、雾化效果较好;因此,本文将在喷嘴内泡状流时的气液流动参数变化范围内,进行特定气泡雾化喷嘴喷雾特征研究。

喷雾形态会受到气相膨胀的扰动作用。图 6 为喷嘴内泡状流时的喷雾形态。

从图 6 可以看到,受气相膨胀扰动作用的影响,喷嘴内泡状流时喷雾形态在空间上表现出一定的非连续性,有可能在喷雾表面出现明显的“气相膨胀凸起”现象。气相膨胀凸起是由气相急剧膨胀扰动引起的喷雾表面呈现的局部形态剧烈波动的现象,是气泡雾化喷雾重要的形态特征。

图 6 结果显示,喷嘴内为泡状流时,受喷嘴运行工况影响,喷雾中气相膨胀凸起的形态随喷嘴内气泡尺寸和数量密度的不同会发生明显的变化;在气



(a) $\dot{m}_l$=11.11 g/s, G_{LR}=0.07%　(b) $\dot{m}_l$=11.11 g/s, G_{LR}=0.22%

(c) $\dot{m}_l$=13.89 g/s, G_{LR}=0.40%　(d) $\dot{m}_l$=13.89 g/s, G_{LR}=0.34%　(e) $\dot{m}_l$=15.28 g/s, G_{LR}=0.28%

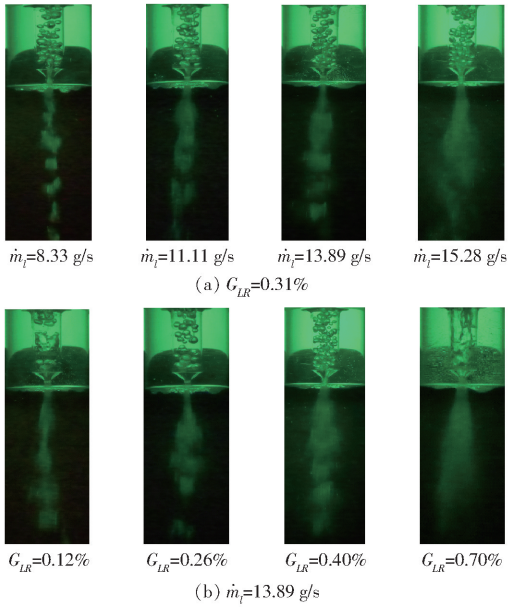
图 6 不同条件时气相膨胀扰动作用下的喷雾形态

Fig. 6 Spray forms disturbed by gas expansion

泡数量密度达到一定程度后,气相膨胀凸起消失。

为表征气相膨胀对喷雾形态的影响,定义“气相膨胀凸起宽度”和“气相膨胀凸起间距”两个气相膨胀凸起形态特征参数。气相膨胀凸起宽度定义为多个气相膨胀凸起的平均宽度;气相膨胀凸起间距定义为相邻两个气相膨胀凸起中心间的平均距离。

图 7 为相同气液质量比(G_{LR} = 0.31%)不同液相质量流量以及相同液相质量流量($\dot{m}_l$ = 13.89 g/s)不同气液质量比时喷雾的形态。



$\dot{m}_l$=8.33 g/s　$\dot{m}_l$=11.11 g/s　$\dot{m}_l$=13.89 g/s　$\dot{m}_l$=15.28 g/s

(a) G_{LR}=0.31%

G_{LR}=0.12%　G_{LR}=0.26%　G_{LR}=0.40%　G_{LR}=0.70%

(b) $\dot{m}_l$=13.89 g/s

图 7 不同气液质量流量时的喷雾形态

Fig. 7 Spray forms under various operating conditions

从图 7 可以看到,随着液相质量流量和气液质量比的增加,喷雾半锥角增大;在气相膨胀凸起宽度

增大的同时，气相膨胀凸起间的界限逐渐模糊甚至消失，不稳定喷雾现象减弱。

图 8 为不同液相质量流量下喷雾平均半锥角和喷雾平均贯穿距随气液质量比的变化曲线。

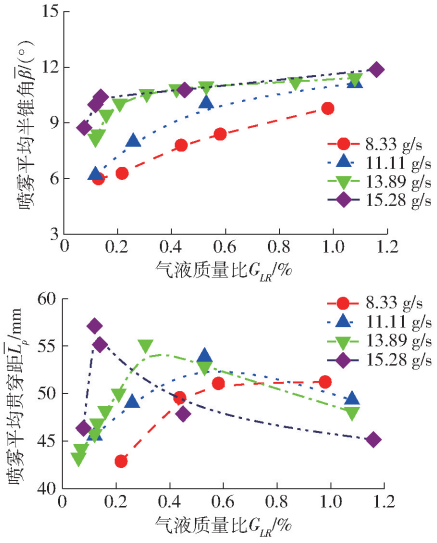


图 8　喷雾平均半锥角和平均贯穿距随气液质量比的变化曲线

Fig. 8　Variation of spray parameters with operating conditions

从图 8 可以看到，在相同气液质量比下，液相质量流量越大，喷雾平均半锥角越大；但较高液相质量流量时，液相质量流量对喷雾平均半锥角的影响变弱。喷雾平均贯穿距只在较低气液质量比时随液相质量流量的增加而增大，在较高气液质量比时则随液相质量流量增加而减小。

从图 8 还可见，低气液质量比时，喷雾形态受气液质量比的影响较明显，喷雾平均半锥角和平均贯穿距随气液质量比增加而快速增大；高气液质量比时，喷雾形态参数对气液质量比的敏感性减弱。随气液质量比增加，喷雾平均半锥角缓慢增大，喷雾平均贯穿距增加缓慢减小。在较低气液质量比时喷雾平均半锥角就可达较高水平。

图 9 为不同液相质量流量下喷雾气相膨胀凸起宽度和气相膨胀凸起间距随气液质量比的变化曲线。

从图 9 可以看到，气相膨胀凸起宽度随液相质量流量和气液质量比的增加而增大；气相膨胀凸起间距随气液质量比的增加而减小，而受液相质量流量的影响相对较小。

气相膨胀凸起宽度随气液质量比增加而增大，气相膨胀凸起间距随气液质量比增加而减小，反映了气相膨胀对喷雾的扰动作用随喷雾中气相的增加而增强；而气相膨胀凸起宽度随液相质量流量增加而增大则反映了喷嘴内压力的升高进一步促进了喷雾中气相的膨胀。

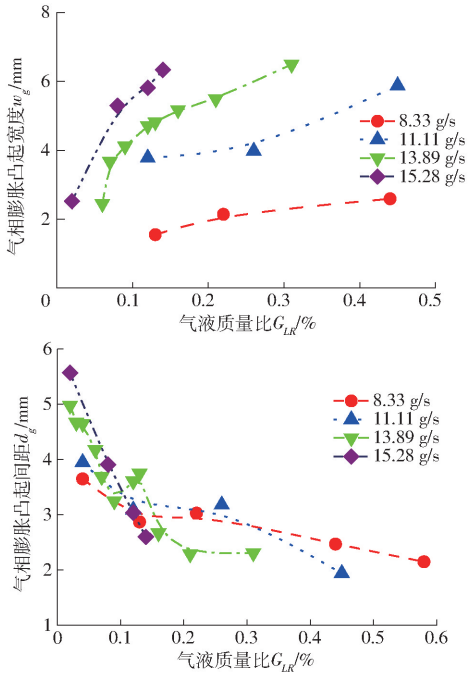


图 9　气相膨胀凸起形态参数随气液质量比的变化曲线

Fig. 9　Variation of gas expansion convex structure parameters with operating conditions

表征气泡雾化喷雾形态特征的参数——喷雾半锥角与喷雾气相膨胀凸起宽度之间应该存在一定的关系。图 10、11 进一步给出了气相膨胀凸起形态参数与喷雾平均半锥角的关系。

由图 10、11 可知，喷嘴内泡状流时喷雾平均半锥角与气相膨胀凸起宽度间呈正相关关系。

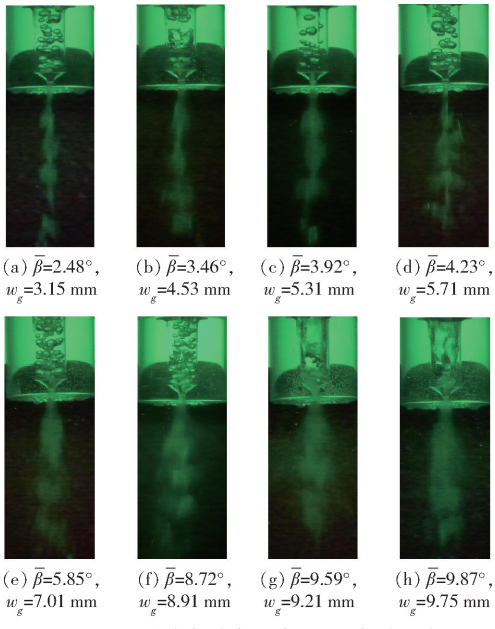


图 10　不同喷雾半锥角时的喷雾形态

Fig. 10　Spray morphologies of different spray half cone angles

3　气泡雾化喷嘴泡状流喷雾特征仿真

喷嘴内气泡群通过喷孔前会发生多个气泡间聚

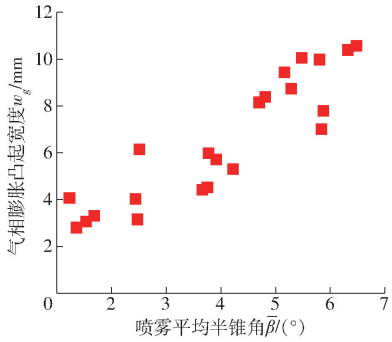


图 11 气相膨胀凸起宽度与喷雾平均半锥角关系

Fig. 11 Relationship between gas expansion convex width and spray half cone angle

合、通过喷孔时会发生气泡拉伸变形等现象,并造成喷孔出口截面处气液流动的脉动。当 $\dot{m}_l = 16$ g/s, $G_{LR} = 0.07\%$,利用仿真模型计算得到的喷嘴内泡状流时喷孔出口截面处气相质量流量随时间的脉动情况如图 12 所示。

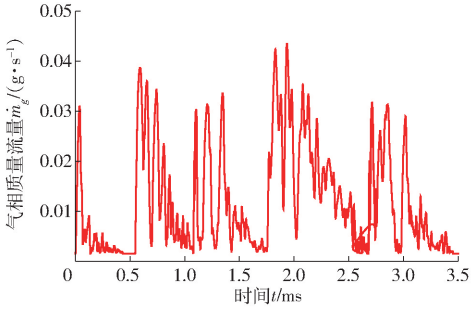


图 12 泡状流时喷孔出口处气相质量流量的脉动

Fig. 12 Variation of fluid parameters at nozzle exit

由图 12 可见,泡状流时喷孔出口截面处的气相质量流量随时间呈波段变化,且在每个波段中气相流量呈振荡衰减变化,流动参数脉动剧烈,这必然对喷雾及雾化液滴产生影响。已有气泡雾化喷雾仿真研究通常将喷孔出口截面处的气液两相流动简单处理为定常流动,而忽视了喷嘴出口处的气液流动脉动对喷雾场中喷雾及液滴运动的影响。

利用喷嘴内部气液流动仿真模型对喷孔出口截面处的气液流动参数进行计算,在此基础上,利用喷雾场中气液流动仿真模型对喷雾场中液束形态、液滴速度以及液滴尺度分布特征进行计算。当 $\dot{m}_l = 16$ g/s, $G_{LR} = 0.07\%$ 时,考虑泡状流时喷孔出口截面流动参数脉动条件下不同时刻喷雾形态的结果如图 13 所示。

从图 13 可以看到,喷雾液束中出现的凸起结构

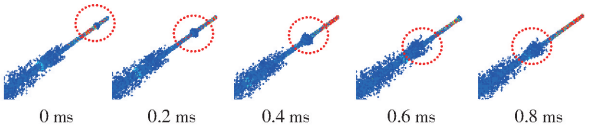


图 13 泡状流时不同时刻喷孔附近喷雾液束形态

Fig. 13 Spray patterns of bubbly flow nearby nozzle exit

随时间逐渐向喷雾场下游移动,并在移动过程中逐渐增大。因喷孔处气相质量流量随时间呈振荡衰减变化;喷雾液束内的液滴在空间上的数量密度存在差异,从而造成液滴在局部区域出现集聚并形成凸起结构。随着喷雾发展,凸起结构内集聚的液滴向周围扩散,凸起结构逐渐增大。经一定时间后,喷孔附近的喷雾液束中又会出现新的凸起结构(图 13 只给出了一个周期内的变化情况)。

液滴碰撞率可反映液滴数量密度的分布情况,图 14 为泡状流时液滴碰撞率沿喷雾轴向的变化。

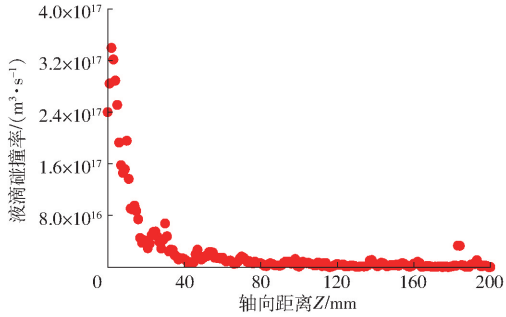


图 14 泡状流时喷雾场中液滴碰撞率的轴向分布

Fig. 14 Aixs distribution of droplet collision rates bubbly flow

由图 14 可见,喷雾液束逐渐向外发展,液滴由喷雾中心轴线附近向外扩散,液滴碰撞率亦即液滴数量密度随轴向距离增加而减小,并趋于稳定。喷孔出口截面处气相流量的大幅脉动会引起附近液滴出现局部集聚现象,液滴数量密度较大,液滴碰撞率较高,液滴间的动量和质量交换剧烈。

喷雾场中的液滴速度分布可反映喷雾场中液滴的空间运动情况。图 15 为液滴速度沿喷雾轴线的分布;由于泡状流喷雾时速度脉动较大,给出了两个不同时刻喷雾场轴线上的速度分布。结果表明,喷孔出口截面气液流量脉动对喷孔出口附近液滴轴向速度的影响非常显著,但这种影响只限于很短的轴向距离内,超过喷孔出口 10 mm 后,气液流量脉动对液滴速度的影响基本消失。

喷雾液滴直径分布是表征气泡雾化喷嘴喷雾效

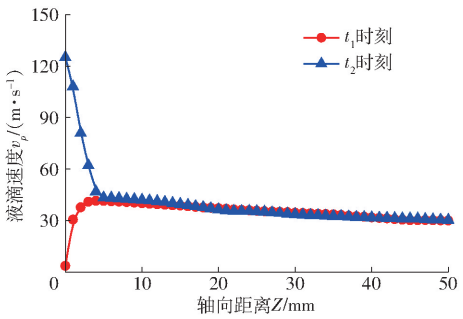


图 15 泡状流时喷雾场中液滴速度沿轴向距离的变化

Fig. 15 Aixs distribution of droplet velocities under bubbly flow

果的重要参数。图 16 为喷嘴内泡状流时喷雾不同轴向位置处液滴直径分布的情况。可见，因在喷雾中存在液滴碰撞、凝并、二次破碎等过程，随着与喷孔出口轴向距离的增加，液滴直径分布范围逐渐变宽、液滴峰值数量逐渐减少，液滴峰值直径和液滴直径整体分布逐渐向大直径方向移动。

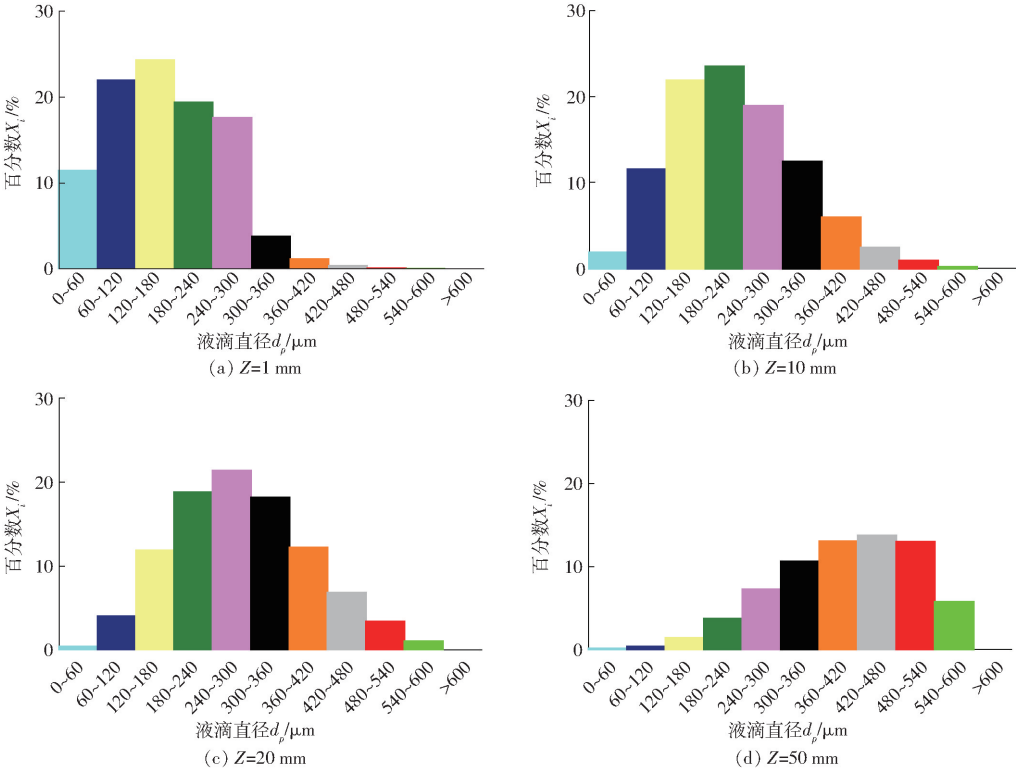


图 16　泡状流时不同喷雾轴向位置处液滴直径分布

Fig. 16　Droplet diameter distribution of bubbly flow at various axial distances

图 17 为喷雾液滴平均(算术平均)直径及其标准差沿喷雾轴向距离的变化。可以看到，对于本文所研究的气泡雾化喷嘴来说，随着距喷孔出口轴向距离的增加，喷雾液滴平均直径呈先增大后逐渐趋于平稳的变化，而喷雾液滴直径标准差则呈现先增大后略有降低然后又逐渐增大的变化。

图 18 为喷嘴内泡状流时喷雾不同轴向位置处液滴平均(算术平均)直径沿径向的分布。

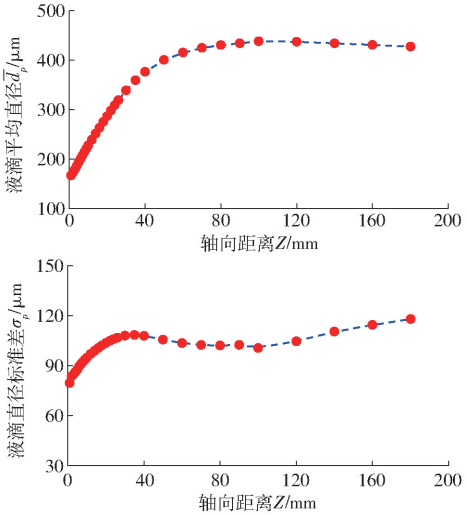


图 17　泡状流液滴平均直径及其标准差沿轴向距离的变化

Fig. 17　Variation of droplet size distribution under bubbly flow

从图 18 可以看到，沿喷雾径向方向可将空间区域分成大尺度液滴区和小尺度液滴区。由于液滴扩散、碰撞、凝并、二次破碎等作用，随着与喷孔出口轴向距离的增加，大尺度液滴区内的液滴直径逐渐增大，大尺度液滴区的径向范围略有增加。

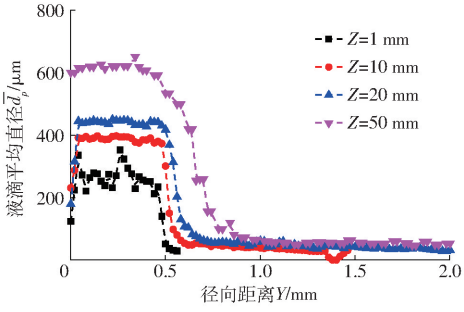


图 18　泡状流时不同轴向位置处液滴直径的径向分布

Fig. 18　Radial distribution of droplet size of bubbly

4　结论

(1)建立了气泡雾化喷射可视化试验系统以及喷嘴内部气液流动仿真模型和喷雾场中气液流动仿真模型；仿真与试验结果表明，所建模型能够较好仿真气泡雾化喷嘴混合室及喷孔内的气液两相流动以

及喷雾场中液滴粒径的分布。

(2)喷雾形态表现出一定非连续性,在喷雾表面存在气相膨胀凸起现象;随着液相质量流量和气液质量比增加,气相膨胀凸起宽度增大,凸起间界限逐渐模糊甚至消失;气相膨胀凸起宽度随液相质量流量和气液质量比增加而增大;凸起间距随气液质量比增加而减小,受液相质量流量影响较小。

(3)在相同气液质量比下,喷雾锥角随液相质量流量增加而增大;较高液相质量流量时液相质量流量对喷雾锥角影响变弱;喷雾贯穿距在较低气液质量比时,随液相质量流量增加而增大,在较高气液质量比时,随液相质量流量增加而减小。低气液质量比时,喷雾形态受气液质量比影响明显,喷雾锥角和贯穿距随气液质量比增加而增大;高气液质量比时,喷雾形态参数对气液质量比的敏感性减弱。喷雾锥角与气相膨胀凸起宽度呈正相关关系。

(4)随着与喷孔出口轴向距离的增加,液滴碰撞率随喷雾轴向距离增加而减小,液滴直径分布范围变宽、液滴峰值数量减少,液滴峰值直径和液滴直径分布向大直径方向移动,喷雾液滴直径呈先增大后趋于平稳,喷雾液滴直径标准差呈先增大后略有降低然后又逐渐增大的变化。

(5)沿喷雾径向方向可将空间区域分成大尺度液滴区和小尺度液滴区;随着与喷孔出口轴向距离的增加,大尺度液滴区内的液滴直径增大,大尺度液滴区的径向范围略增加。

参 考 文 献

[1] NASSER A. Handbook of atomization and sprays: theory and application [M]. New York: Springer Verlag, 2011.

[2] KONSTANTINOV D, MARSH R, BOWEN P, et al. Effervescent atomization for industrial energy-technology review [J]. Atomization and Sprays, 2010, 10(6): 525 - 552.

[3] SOVANI S D, SOJKA P E, LEFEBVRE A H. Effervescent atomization [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2001, 27(4): 483 - 521.

[4] 孙春华, 宁智, 吕明,等. 气泡雾化喷嘴气体溢出过程声波信号的时频特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 315 - 322.
SUN Chunhua, NING Zhi, LÜ Ming, et al. Time-frequency characteristics of acoustic signal in gas flowing process of effervescent spray nozzle [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 315 - 322. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150144& flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.044. (in Chinese)

[5] WHITLOW J D, LEFEBVRE A H. Effervescent atomizer operation and spray characteristics [J]. Atomization and Sprays, 1993, 3(2): 137 - 155.

[6] WADE R A, WEERTS J M, SPKLA P E, et al. Effervescent atomization at injection pressure in the MPa range [J]. Atomization and Sprays, 1999, 9(6): 651 - 667.

[7] ROESLER T C. An experimental study of aerated-liquid atomization [D]. West Lafayette: Purdue Univesity, 1988.

[8] ROESLER T C, LEFEBVRE A H. Photographic studies on aerated-liquid atomization, combustion fundamentals and applications [C]// Proceedings of the Central States Section of the Combustion Institute Meeting, Indianapolis, 1988.

[9] CHIN J S, LEFEBVRE A H. Design procedure for effervescent atomizers [J]. ASME Transactions Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995, 117(2): 266 - 271.

[10] PETERSEN F J, WORTS O, SCHAEFER T, et al. Design and atomization properties for an inside-out type effervescent atomizer [J]. Drug Development and Industrial Pharmacy, 2004, 30(3): 319 - 326.

[11] NIELSEN A F, POUL B, KRISTENSEN H G, et al. Investigation and comparison of performance of effervescent and standard pneumatic atomizer intended for soluble aqueous coating [J]. Pharmaceutical Development and Technology, 2006, 11(2): 243 - 253.

[12] WADE R A. Combustion applications of effervescent atomization [D]. West Lafayette: Purdue University, 1996.

[13] CHEN S K, LEFEBVRE A H. Spray cone angles of effervescent atomizers [J]. Atomization and Sprays, 1994, 4(3): 291 - 301.

[14] BUSH S G, BENNETT J B, SOJKA P E, et al. Momentum rate probe for use with two-phase flows [J]. Review of Scientific Instruments, 1996, 67(5): 1878 - 1885.

[15] LIN K C, KENNEDY P J, JACKSON T A. Structures of aerated-liquid jets in high-speed crossflows [C]// 40th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, Reno, 2002.

[16] LIN K C, KENNEDY P J, JACKSON T A. Spray structures of aerated-liquid jets in subsonic crossflows [C]// 39th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, Reno, 2001.

[17] 孙春华. 气泡雾化喷射中气液两相作用及射流喷雾的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
SUN Chunhua. Study on interactions between gas liquid two phases and jet spray in effervescent sprays [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)

(下转第 409 页)

HU Guoliang, ZHONG Fang, ZHANG Haiyun. Structure design and dynamic performance analysis of a two-stage radial type magnetorheological valve with meandering fluid flow paths [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 376 - 382. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161049&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.049. (in Chinese)

[12] ICHWAN B, MAZLAN S A, IMADUDDIN F, et al. Development of a modular MR valve using meandering flow path structure [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(3): 037001.

[13] ICHWAN B, MAZLAN S A, IMADUDDIN F, et al. Performance simulation on a magnetorheological valve module using three different commercial magnetorheological fluid[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1123:35 - 41.

[14] IMADUDDIN F, MAZLAN S A, RAHMAN M A A, et al. A high performance magnetorheological valve with a meandering flow path[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(6): 1 - 11.

[15] NGUYEN Q H, CHOI S B, WERELEY N M. Optimal design of magnetorheological valves via a finite element method considering control energy and a time constant[J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(2): 1 - 12.

[16] NGUYEN Q H, CHOI S B, LEE Y S, et al. An analytical method for optimal design of MR valve structures[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(9): 1088 - 1100.

[17] 胡国良, 钟芳, 廖明科. 混合流动式磁流变阀结构设计与压降性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 389 - 397.
HU Guoliang, ZHONG Fang, LIAO Mingke. Design and pressure drop analysis of a hybrid fluid flow magnetorheological valve [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 389 - 397. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160952&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.052. (in Chinese)

[18] HU G L, LIAO M K, LI W H. Analysis of a compact annular-radial-orifice flow magnetorheological valve and evaluation of its performance[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017, 28(10): 1322 - 1333.

[19] HU G L, ZHANG J W, LIAO M K, et al. Effect of radial resistance gap on the pressure drop of a compact annular-radial-orifice flow magnetorheological valve[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2018, 27(4): 535 - 546.

[20] 胡国良, 钟芳. 磁场结构对径向流磁流变阀动态性能的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 411 - 420.
HU Guoliang, ZHONG Fang. Influence of magnetic field structure on dynamic performance of radial magnetorheological valve [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 411 - 420. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170952&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.052. (in Chinese)

(上接第 374 页)

[18] BYAKOVA A V. Influence of wetting conditions on bubble formation at orifice in an inviscid liquid: transformation of bubble shape and size[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem, 2003, 218(1): 73 - 87.

[19] Ansys Fluent 14.5 user's guide [M]. Ansys Inc., 2012.

[20] LIU A B, MATHER D, REITZ R D. Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays [J]. SAE Transactions, 1993, 102: 83 - 95.

[21] GOSMAN A D, IOANNIDES E. Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors [J]. Energy, 1983, 7(6): 482 - 490.

[22] REITZ R D. Mechanisms of atomization processes in high-pressure vaporizing sprays [J]. Atomization and Spray Technology, 1987,3(4): 309 - 337.

[23] O'ROURKE P J. Collective drop effects on vaporizing liquid sprays [D]. Princeton: Princeton University, 1981.

[24] LIU L S, FU M L, WU J X. The distribution of SMD downstream the discharge orifices of effervescent atomizers [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(5): 653 - 656.

[25] QIAN L J, LIN J Z, XIONG H B. Simulation of droplet-gas flow in the effervescent atomization spray with an impinging plate [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009, 17(1): 8 - 19.