

液-液分散雾化非相溶两相流界面追踪模拟*

梁坤峰¹ 贾雪迎¹ 高春艳¹ 袁竹林²

(1. 河南科技大学高效换热与热工系统节能技术河南省工程实验室, 洛阳 471003; 2. 东南大学能源与环境学院, 南京 210096)

摘要: 基于 VOF 方法并考虑界面张力影响与界面重构, 分别建立不同喷射流率下的非相溶两相流界面追踪模型, 追踪液-液分散雾化过程中油-水两相界面变化, 模拟了射流破碎和液滴形成、生长与破碎等微观特征, 分析了准则数对射流破碎与液滴形成的影响机理。结果表明: 所建立的界面追踪模型能模拟不同喷射流率下液-液分散雾化形成液滴过程, 但高喷射速率时捕捉流场中小尺度涡破碎过程的能力仍有不足; 在不同的液滴形成模式下, 射流液体的破碎均具有随机性, 并随喷射流率的增大而增强, 射流破碎依靠两相界面的波动和失稳形成体积较小的液滴; Re 、 Ca 和 Bo 准则数对滴流和层流射流时形成的液滴与射流表面及其破碎处的形状的影响比较大, 而对于湍动射流而言, 则主要影响射流破碎程度和形成液滴的粒径。

关键词: 两相流 液-液雾化 射流 液滴 界面追踪 数值模拟

中图分类号: TQ027.3⁺5; TB126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0363-09

Interface Tracking Simulation of Immiscible Two-phase Flow in Liquid – Liquid Dispersion Atomization System

Liang Kunfeng¹ Jia Xueying¹ Gao Chunyan¹ Yuan Zhulin²

(1. Henan Engineering Laboratory of High Efficiency Heat Exchange and Thermal System Energy Saving Technology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. College of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Simulating the movement, deformation and break-up of immiscible two-phase flow interface was complex and difficult in the liquid – liquid dispersion atomization system. Based on the volume of fraction (VOF) with role of surface tension and interface reconstruction, a model of tracking the immiscible liquid – liquid interface was built with two modes of large and small jet flow rates. The change of oil – water interface was tracked in the process of liquid – liquid dispersion atomization, the micro characteristics of jet break-up and drop formation and growth were simulated, and the mechanism of influence of Re , Ca and Bo criterion numbers on jet break-up and drop formation was also discussed. The results showed that the process of liquid – liquid dispersion atomization can be simulated by the interface tracking model set-up under different jet flow rates, but the simulation capability was short of tracking the process of small scale vortex break-up. Under different modes of drop formation, jet break-up was characterized by randomness, and enhanced with increase of jet flow rate; small droplets were formatted by the volatility and instability of two phases' interface. Under the modes of drop formation of trickling and laminar jet, the shape of drop, jet surface and the section of jet break-up were mainly affected by the variation of Re , Ca and Bo criterion numbers, however, for the mode of drop formation of turbulent motion jet, these criterion numbers mainly influenced the extent of jet break-up and drop size.

Key words: Two-phase flow Liquid – liquid atomization Jet Drop Interface tracking Numerical simulation

收稿日期: 2014-09-17 修回日期: 2014-11-19

* 国家自然科学基金资助项目(U1304521)

作者简介: 梁坤峰, 副教授, 博士, 主要从事复杂多相系统建模、仿真与实验研究, E-mail: liangkunfeng@sohu.com

引言

通过喷嘴的液-液分散雾化形式具有结构简单紧凑、无运动部件、传质效率高等优势,受到广泛关注^[1-3]。由于一种液体在另外一种非相液体中雾化形成液滴过程涉及两相液体界面的运动、变形与破碎等复杂变化,使液-液雾化过程的两相流动与界面特性变得极其复杂。模拟相界面的位置和运动变化特征一直是液-液雾化数值模拟研究中的重点和难点。

关于非相溶相间界面的自由界面流模拟已涌现出多种数值计算方法^[4-14],流体体积(VOF)法^[5-8]和 Level-set 法^[9-10]是目前求解非相溶两相流问题的2种主要方法。VOF方法在每个时间步内都通过界面形态构造体积分数的输运量,具有很好的质量守恒性,并以其容易实现、计算量小和模拟精度高等优点,已在模拟射流破碎和气泡运动方面展示了强大的作用;但同时由于体积分不连续,难以精确计算相界面法向及曲率,尤其是表面张力的计算误差等,存在虚假流动问题^[13];Level-set方法的相界面虽可表示为连续函数,方便相界面法向及曲率的计算,且易于向高维推广,但是Level-set方法较差的质量守恒性直接导致质量的亏损或增加,在射流破碎问题中,这种不守恒性给数值模拟结果带来更大的误差^[14]。近来发展了一种将VOF方法与Level-set方法耦合的CLSVOF方法^[15-16],构造出守恒性高和界面光滑性好的数值算法,实现了2种方法的优势互补,但对计算量的考虑较为欠缺^[14]。

为研究大空间内射流液体在其他非相溶流动液体中全流态雾化形成液滴的工程问题,即滴流、层流射流和湍动射流3种形成液滴的流态,本文基于计算量优先的思路,建立非相溶液-液两相流VOF界面追踪模型,考虑界面张力影响与界面重构,追踪液-液分散雾化过程中油-水两相界面的运动变化特征,模拟射流破碎和液滴形成、生长与破碎等微观特征,分析准则数对射流破碎与液滴形成的影响机理。

1 界面追踪模型的建立

1.1 控制方程

1.1.1 滴流与层流射流模型

在轴对称柱坐标系下,两相流动的控制方程为

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \rho g_z + \sigma \zeta \frac{\partial F_{vol}}{\partial z} \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \rho g_z + \sigma \zeta \frac{\partial F_{vol}}{\partial z} \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} \tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial r} & \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial z} \\ \tau_{rz} = \tau_{rz} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (4)$$

$$\zeta = -(\nabla n) \quad (5)$$

$$n = \frac{n}{|n|} \quad (6)$$

$$n = \nabla F$$

$$F(x, y, z, t) = \begin{cases} 1 & (\text{离散相区域}) \\ >0, <1 & (\text{两相交界面区域}) \\ 0 & (\text{连续相区域}) \end{cases} \quad (7)$$

式中 u, v ——径向和轴向速度
 ρ ——密度 p ——压力 t ——时间
 g ——重力加速度 r, z ——半径和高度
 ζ ——液-液相间界面曲率 F_{vol} ——体积力
 σ ——界面张力系数,取72.69 mN/m
 $\tau_{rr}, \tau_{rz}, \tau_{rz}, \tau_{zz}$ ——牛顿应力张量
 μ ——粘度 x, y, z ——坐标
 n ——相间界面法向单位矢量,指向第二相,文中指液滴相
 F ——标量函数,定义为第二相——离散相(水)在控制容积内所占的体积份额

随流体流动的界面函数 F ,通过自由界面动力学方程进行求解

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial r} + v \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

流体物性参数由控制容积内各相所占的体积份额通过线性插值获得

$$\rho = \rho_d F + \rho_c (1 - F) \quad (9)$$

$$\mu = \mu_d F + \mu_c (1 - F) \quad (10)$$

式中,下标 d 代表离散相, c 代表连续相。

1.1.2 湍动射流模型

在高喷射流率雾化中,射流处于充分发展的高雷诺数湍动流态,此时,若采用RANS模型将衰减射流湍动尺度,模拟结果只能反映射流界面上较大的扰动波形和界面波动,但无法模拟射流剧烈断裂与破碎现象^[17]。通过改良网格,也只能获得略好的模拟结果,与试验结果相比,仍相差甚远。文中针对试验中所获得的高喷射流率下的湍动射流雾化形态特性,基于大涡模拟LES方法,建立界面追踪模型,即能追踪具有复杂拓扑结构的界面形状(包括:破碎、聚合与二次破碎等),又能求解高速脉动的湍流场。

二维VOF-LES数学求解模型控制方程为

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \sigma \zeta \frac{\partial F}{\partial u_i} + \rho g \quad (12)$$

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u_i u_j} - \rho \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (13)$$

其中, τ_{ij} 为亚格子尺度应力, 表征了被过滤的小尺度涡运动对所求解运动方程的影响。

基于涡粘性假设的 Smagorinsky 模式计算亚格子尺度应力

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \overline{S_{ij}} \quad (14)$$

$$\text{其中} \quad \overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

$$\mu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 \overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}}} \quad (16)$$

式中 τ_{kk} ——同向亚格子尺度应力, 可忽略

δ_{ij} ——克罗内克函数

$\overline{S_{ij}}$ ——求解大尺度涡的应力张量

μ_t ——亚格子尺度的湍动粘度

C_s ——Smagorinsky 常数, 取 $C_s = 0.15$

Δ ——过滤函数的过滤尺度

1.2 PLIC 界面重构

界面追踪模拟的核心是求解控制容积中相的体积份额标量 F , 并通过某一种算法或规则依据 F 准确地构建相间的界面。Hirt 等^[18] 提出施主-受主模型 (Donor-acceptor schemes) 是较早的界面重构方法, 为一阶精度的迎风格式, 存在较大的数值耗散; 该模型只能将网格中的自由液面定义为水平和竖直两种, 当水平相邻的自由面网格中界面倾斜角都大于 45° 时, 将会在网格间产生非物理的空隙。在 Hirt 等的建模思路基础上, 后来的学者通过不同的技术改进了界面重构的质量, 如 Hong^[19] 利用斜线段来代替自由面, 其中斜线段方程中的系数由自由面网格周围 8 个网格的体积分数确定; Ashgriz 等^[20] 的 FLAIR (Flux line-segment model for advection and interface reconstruction) 方法则利用每两个水平相邻网格的体积分数求出斜线段来模拟自由液面, 但只适用于均匀网格情况; Rudman^[21] 对上述两类自由面重构技术进行了比较计算指出, 利用斜线段来逼近自由液面比其他方法精度更高。而文中采用 PLIC (Piecewise linear interface calculation) 方法^[22], 该模型通过计算自由面的法向及其与横轴的夹角, 根据夹角判断自由面类型, 并由此计算流过控制体积四周边界的流通量, 修改网格内的流体体积, 考虑了相邻界面流体的细微输运, 自由液面的重构结果

非常精细。

1.3 CSF 方法

一种液体在另一种非相溶液体中形成射流, 射流破碎形成液滴过程中, 相间界面张力的作用非常重要。本文基于 CSF (Continuum surface force) 方法, 将界面张力处理为流体计算单元体力直接加入动量方程的源项中, 可避免作为界面上的边界条件处理时引起的相间界面非连续问题^[5]。CSF 方法假设界面张力作用于一定厚度的相间界面过渡区域中的流体离散单元, 采用非连续性近似的方法, 减少因简化假设而造成的总误差。在连续的过渡区域中流体从一种液相过渡到另一种液相, 流体混合物性平均值呈连续光滑性转变。通过这种处理方法使界面张力存在于过渡区域的每一个计算单元, 然后将其等效为流体单元所受的体积力而添加于对应的求解控制方程的源项中。相间界面张力的计算式为

$$\mathbf{F}_{vol} = \sigma \frac{2\rho\zeta \nabla F}{\rho_d + \rho_c} \quad (17)$$

将界面张力系数处理为常数, 且通过毛细试验求的变压器油-水界面张力系数为 72.69 mN/m , 而不考虑界面张力梯度、界面膨胀效应以及剪切粘度等的影响。

1.4 计算方法

对低流速下的滴流与层流射流型雾化形态的模拟, 采用 2 维轴对称物理模型; 对高喷速下的湍动射流型雾化形态的模拟计算, 则采用 2 维物理模型。网格模型采用四边形结构网格, 在距模型中心轴线约 $10R$ 范围内加密网格, 网格尺度的标准为一个雾化液滴至少覆盖 $10 \sim 20$ 个网格, 网格纵向尺度与喷嘴附近密网格横向尺寸相等。图 1 给出了低流速下 2 维轴对称求解物理模型中喷嘴附近网格结构与尺度特征, 图中 X_L 为计算区域直径, R 为喷孔半径, Y_L

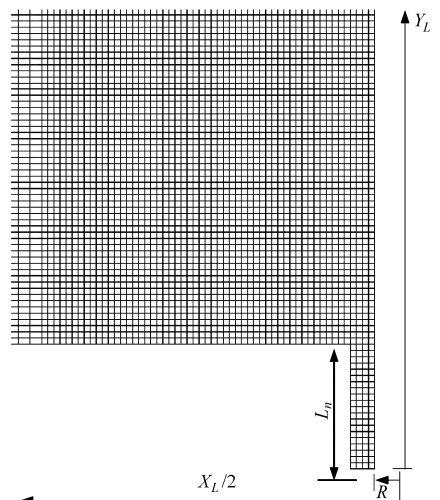


图1 数值计算中所使用的网格尺度

Fig. 1 Sketch map of meshing

为计算区域高度, L_n 为喷孔长度。高喷速下的网格模型采用与图 1 相同的网格尺度。但是 3 种不同的雾化形态的数值模拟计算, 所划分的网格尺度一致, 仅计算区域的尺寸不同。

假设喷嘴周界圆柱形容器的内径足够长 ($X_L/R > 25$), 以忽略计算边界对模拟计算的影响。具体的边界条件为

$$\begin{cases} u = v = 0 \\ u|_{r=0} = 0 \quad \frac{\partial v}{\partial r}|_{r=0} = 0 \\ u = 0 \quad v = 2\bar{v}(1 - r^{*2}) \\ \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \\ \mathbf{n} = \mathbf{n}_w \cos\theta_w + \mathbf{t}_w \sin\theta_w \end{cases} \quad (18)$$

其中

$$r^* = r/R$$

式中 r^* ——无量纲径向位置

\bar{v} ——喷嘴内雾化液体的平均速度

\mathbf{n}_w 、 \mathbf{t}_w ——壁面的法向与切向单元矢量

在开始计算之前, 喷嘴内部区域 ($L_n \times R$) 的 F 初始为 1, 且取 $L_n/R = 5$ 。液滴与壁面的接触角 θ_w 为 57° 。

计算在小型工作站(戴尔 T7400)上完成, 具体硬件配置为: 8 个计算单元, 3.0 GHz 主频, 1 333 MHz 前端总线, 12 MB 的二级缓存, 32 GB 内存, 292GB - SAS 硬盘存储空间 + RAID5 加速与安全技术, 512 MB 显存支持双 DVI 或双 VGA 显示器的显卡。计算过程基于 Fluent 完成, 模型求解中, 采用分离式迭代求解两相混合流场, 对方程组的离散求解方法主要有: 压力项采用 PRESTO! 格式, 动量方程采用二阶迎风格式, 而压力-速度间的耦合计算采用压力的隐式算子分割算法, 在使用较大的松弛因子时, 保持计算的稳定; 使用显式时间离散格式求解自由界面动力学方程。界面追踪模型的稳定求解受计算网格尺寸以及所采用的计算时间步长的影响较大, 计算中可以根据 Hirt 等^[18] 给出求解的线性数值稳定性条件来选取合适的时间步长。

2 试验验证

2.1 试验装置

液-液雾化试验装置系统如图 2 所示。试验过程中试验流体分 2 路进入流化床, 一路为循环液体 (25 号变压器油), 另一路为水 (加入红色颜料, 增大对比度, 便于拍照), 循环液体首先由 YG50-100 型离心泵进入流化床, 采用 LC-40 型齿轮流量计测量流速, 通过阀门将其调节到试验点, 待流动稳定之后, 打开 12wz-8 型增压泵抽取水箱的水, 水增压后

直接喷入循环液体内, 水的流量由 LZJ-10 型玻璃转子流量计读取, 用阀门将流量调节到试验点时, 打开采光室上部的强光源 (两组 500 W 灯), 光线通过透光口将床内液滴形成过程反射到 NIKON5000 型数码相机, 数码相机以 30 f/s 的频率对距离喷孔 50 mm 高度内液滴形成过程进行连续拍摄。

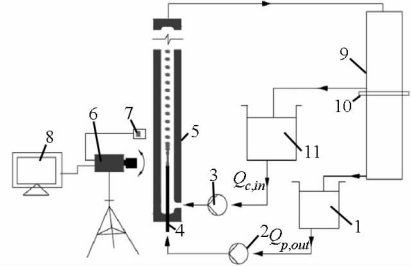


图 2 液-液雾化试验装置

Fig. 2 Testing system of liquid-liquid atomization

1. 蓄水槽 2. 增压泵 3. 离心泵 4. 喷头 5. 流化床 6. 数码相机 7. 光源 8. 计算机 9. 油水分离器 10. 油水界面浮子 11. 贮油槽

基于高分辨率数码 CCD 采集的试验图像, 建立了图像采集与处理系统。所获原始图像首先需要进行灰度处理, 调整其灰度等级, 提高图像的信噪比, 经过处理的图像, 液滴的轮廓清晰, 利用液滴边缘的灰度差, 对液滴进行边缘检测, 获得液滴直径在水平方向上的像素差值。基于这种图像处理方案在 Matlab 环境下编写了图像读取与处理程序, 得到了不同工况下的射流长度与液滴粒径信息。

2.2 数值模拟与试验结果对比

2.2.1 雾化过程

图 3 为液-液分散雾化的模拟与试验结果的对比, 图 3a 是采用界面追踪模型的模拟计算结果, 模拟结果分滴流、层流射流和湍动射流 3 种不同的液滴形成模式分别展示; 图 3b 是与模拟结果相同操作参数下的试验结果照片, 每组结果均由 4 幅连续的时间间隔 0.01 s 的图片组成。由图可知, 模拟结果与试验结果有很好的一致性, 即使是在滴流、层流射流和湍动射流 3 种不同的液滴形成模式下, 本文所建立的界面追踪模型均能较为准确地预测雾化形成液滴过程。

在滴流形成液滴模式下, 模拟结果再现了液滴在喷嘴处形成、长大、变形以及断裂脱离的微观过程。而在层流射流形成液滴模式下, 射流形成后, 射流的破碎与液滴的形成主要由射流流体力学机制决定, 两相界面呈非线性变化, 受射流初始扰动波幅度以及射流轴向与径向的速度波动影响, 导致射流动态、随机地断裂破碎形成液滴; 模拟结果不仅可以再现导致射流最终断裂的射流界面扰动波形的发展运

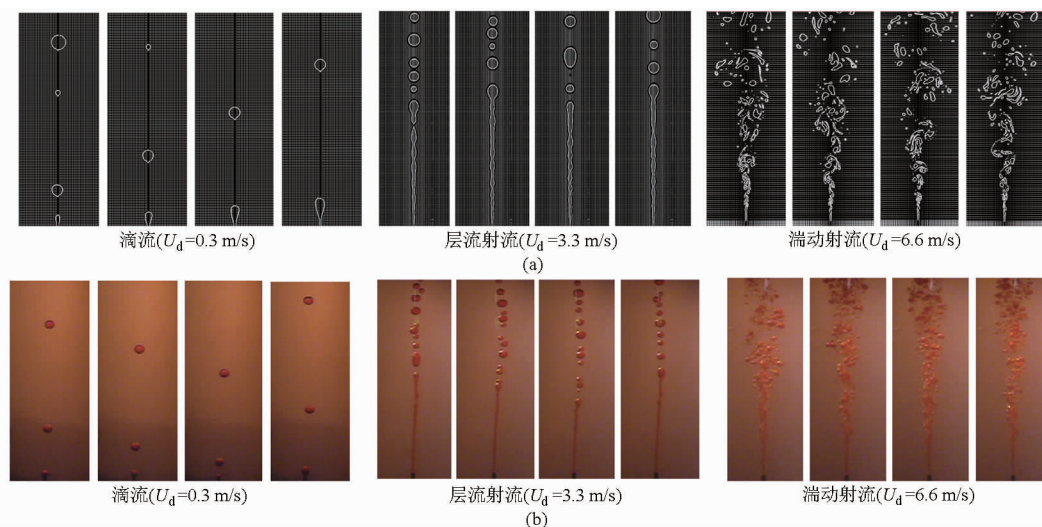


图 3 雾化过程的模拟与试验结果(周围流体平均流速 $U_c = 0.27 \text{ m/s}$, $\mu_c/\mu_d = 48$, 喷嘴内半径与外半径比 $R_n/R_o = 0.8$)

Fig. 3 Simulation and experimental results of atomization process

(a) 模拟结果 (b) 试验结果

动,还可反映射流破碎点位置的动态变化与随机性。由此可见,本文所建立的滴流与层流射流模型,在模拟连续相流动状态比较稳定的滴流和层流射流形成液滴方面,所获模拟结果准确、可信。

在湍动射流形成液滴模式下,分散液体射流从喷孔高速喷出形成圆湍射流,与周围流体发生强剪切作用,其内部径向与轴向剧烈的动量交换,射流表面呈现显著的拟序涡结构,卷起的涡在射流的起始和扩散发展中,不断地使射流表面失稳,流体间的掺混作用极大地增强,分散液体以小液滴的形式分散到周围流体中。由图可知,基于湍动射流模型得到的模拟结果能再现湍动射流起始段的涡结构和扩散段涡结构的发展和变化;但与试验结果相比,模拟所得到的雾化液滴的形状较不规则,尤其是体积较大的液滴。原因在于模拟湍动射流的二维模型;因为根据涡动力学的时均结果,二维和三维模型虽均能给出各时均量的自相似性^[23],但二维流动的涡量控制方程是一对流扩散方程,没有涡的生成项,不存在涡的拉伸机制;而对于湍动射流的模拟计算而言,要准确捕捉流场中小尺度涡的破碎过程,网格的尺寸须在可能产生的最小液滴尺寸的 1/10 以下,同时由于界面追踪模型对网格尺寸以及计算时间步的依赖性,建立三维模型的计算网格量将极为庞大,对计算机的硬件要求太高。

2.2.2 液滴粒径

图 4 为不同喷射流率下雾化液滴粒径的模拟与试验结果对比。由图可知,模拟结果与试验数据的变化规律基本一致,雾化模拟形成液滴的粒径随喷射流率的增加而呈现出先增加后减小的趋势,粒径最大值出现在滴流向层流射流过渡的区

域,湍动射流形成的粒径最小。模拟与试验结果之间出现一定误差的原因有:①模拟采用的物性参数会与试验时有差别。②液滴粒径信息提取过程中,所有不同形状的液滴均按等效直径计算粒径。③在湍动射流阶段,由于二维模型中没有涡的生成项,不存在涡的拉伸机制,由此当射流破碎形成体积较小的液滴的同时,也形成了少量体积较大、未完全破碎的液滴,使得模拟得到的液滴平均粒径大于试验结果。

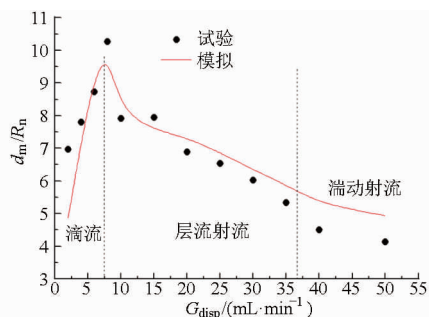


图 4 液滴的平均粒径(周围流体体积流量 $G_{\text{cont}} = 0.227 \text{ L/s}$, 周围流体温度 $T_{c,\text{in}} = 22^\circ\text{C}$, $\mu_c/\mu_d = 48$, $R_n/R_o = 0.8$)

Fig. 4 Average particle size of droplet

3 准则数的影响

对于液-液雾化体系的研究,射流破碎与液滴形成的雾化特性受到很多因素的影响。根据 Buckingham 定理,可将控制非相溶两相流动的 Navier-Stokes 方程及其对应的边界条件简化为 8 组无量纲量。其中,表征液-液雾化流体动力学特性的有雷诺数 Re ,表征惯性力和粘性力的相对重要性;毛细数 Ca ,表征粘性力与界面张力的相对重要性;重力结合数 Bo ,表征重力与界面张力的相对重要性。

$$\begin{cases} Re = \frac{\rho u X}{\mu} \\ Ca = \frac{\mu u}{\sigma} \\ Bo = \frac{|\rho_c - \rho_d| R^2 g}{\sigma} \end{cases} \quad (19)$$

式中 X ——特征长度

3个无量纲量均以射流液体相计算,采用喷孔内径 R 作为特征长度尺度,喷头内部射流的表观速度作为特征速度。

3.1 Re 的影响

图5为不同雾化模式下 Re 数对液-液分散雾化过程的影响图,图5a、5b、5c分别对应滴流、层流射流和湍动射流液-液分散雾化模式。在滴流模式下,如图5a所示,随着 Re 的增加,雾化液滴的体积显著增大,而液滴断裂点处残留液体的外部形状则会快速收缩形成球形顶部;液滴形成后, Re 较小时形成的液线以及液线断裂而产生卫星液滴的现象,与 Re 较大时相比较为明显;因为 Re 较大时,射流液体具有较大的惯性力,其顶部未形成较大界面曲率梯度前,射流液体已喷入顶部,顶部呈较光滑的过渡曲面,难以出现液线及其二次破碎产生卫星液滴的现象。

在层流射流模式下,如图5b所示,随着 Re 的增大,射流液体界面扰动波数量增多,且波长变小,表明扰动频率增大,而雾化液滴的体积和形状均有较大变化;而射流液体的惯性力增大时,射流界面的扰动增强,射流顶部的细颈处会产生毛细压力峰值,使断裂点处液滴的速度有所增大,增加的相间相对速度又使两相粘性剪切作用力变大,会在液滴与射流液体的连接处形成一段较长的液线;当液线在其上端与液滴发生断裂时,断裂点处的局部压力变大,使液滴的形状发生内凹,关于液滴形成时的内凹现象,已有文献报道^[5-6];但是,当 Re 继续增大,液滴向上运动的惯性力更大,射流界面扰动明显增强,使射流在细颈处快速断裂,无液线产生,液滴形状发生内凹的现象削弱。

在湍动射流模式下,如图5c所示,此时为射流液体高喷速下的雾化过程。可以看出,随着 Re 的增加,射流破碎程度明显加剧,在相同的时间内雾化形成数量较多的小液滴。 Re 较小时,射流处于未充分发展的湍流状态,雾化模式介于层流射流与湍动射流的过渡区域,射流破碎程度弱,雾化液滴的体积相对较大; Re 较大时,射流内部呈高速湍流状态,径向与轴向动量交换剧烈,射流沿径向的速度急剧增大,同时射流运动的速度增大,相间界面间的粘性剪切应力增加,

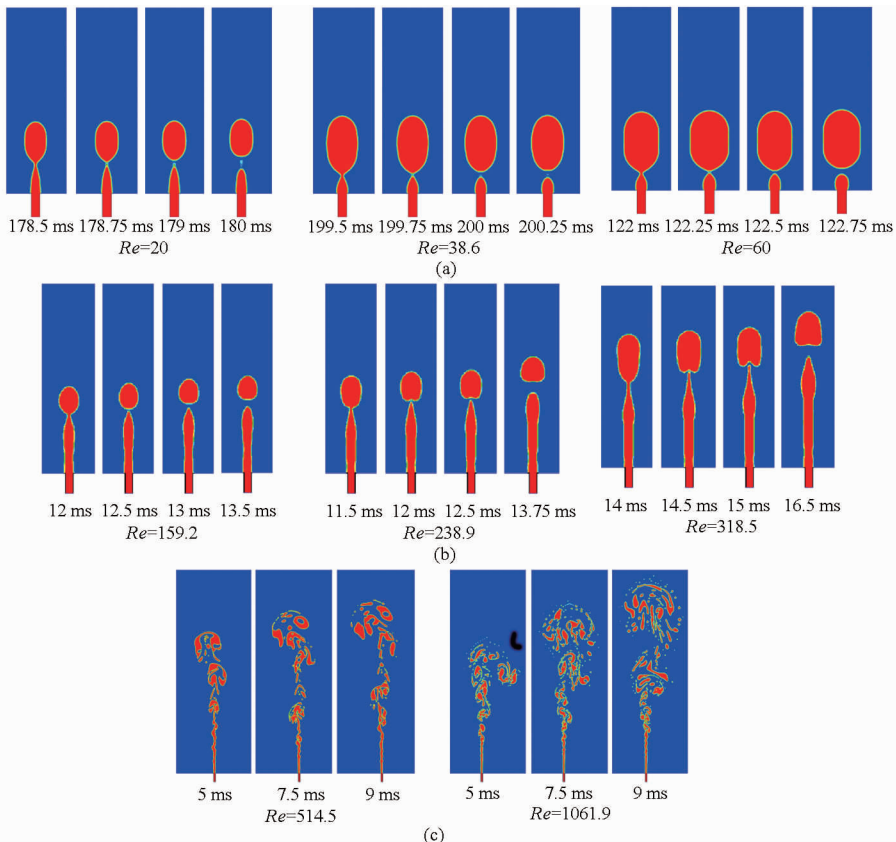


图5 Re 对液-液分散雾化过程的影响 ($\lambda = 48$, $\alpha = 0.8$)

Fig. 5 Effect of Re on the process of liquid-liquid dispersion atomization

(a) 滴流 ($Ca = 0.004$, $Bo = 0.002$) (b) 层流射流 ($Ca = 0.0166$, $Bo = 0.0006$) (c) 湍动射流 ($Ca = 0.13$, $Bo = 0.0002$)

均加剧了射流破碎,形成了体积更小的液体。

3.2 Ca 的影响

图 6 为不同雾化模式下 Ca 对液-液分散雾化过程的影响图,图 6a、6b、6c 分别对应滴流、层流射流和湍动射流液-液分散雾化模式。在滴流模式下,如图 6a 所示,随着 Ca 的增大,液滴的体积逐渐减小,

而液滴断裂点处的高度则有所增加。 Ca 较小时,相间粘性力较小,难以形成相对较长的液线,液滴向上的运动惯性力则相对较大,界面张力的作用较小,液滴未完全收缩成球形时,已与射流的主体断裂,致使液滴的形状呈扁圆形,且液线的产生受到抑制,卫星液滴出现的机会较小。

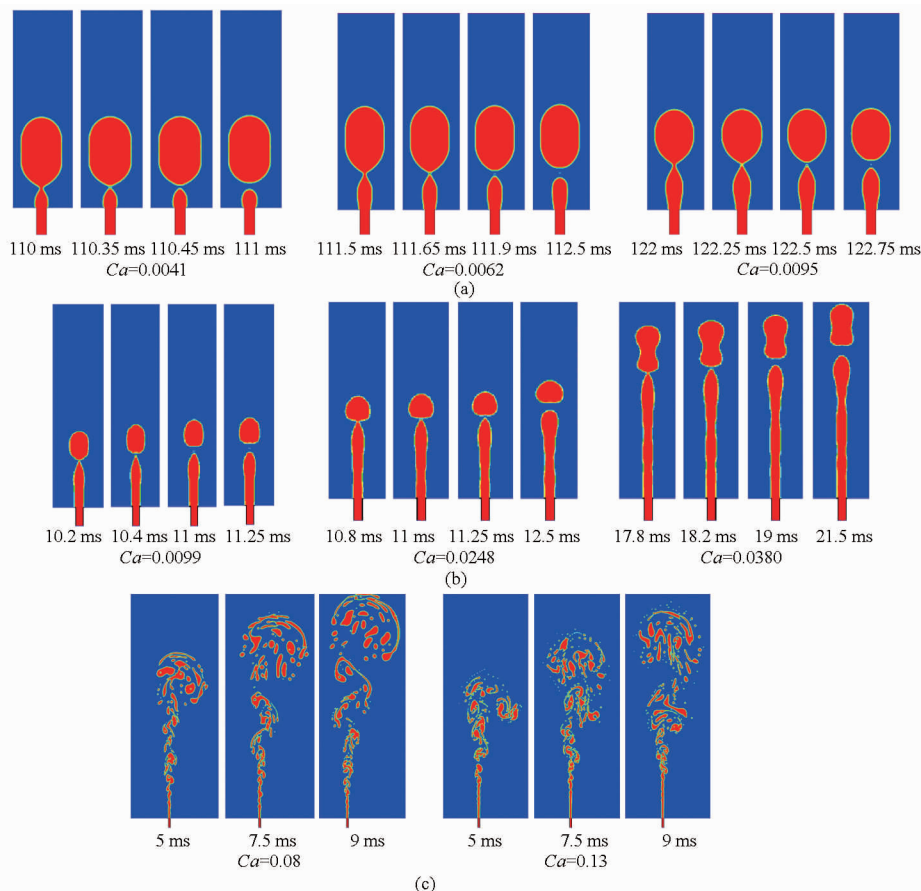


图 6 Ca 对液-液分散雾化过程的影响 ($\alpha = 0.8$)

Fig. 6 Effect of Ca on the process of liquid-liquid dispersion atomization

(a) 滴流 ($Re = 59.7$, $Bo = 0.0006$, $\zeta = 0.3$) (b) 层流射流 ($Re = 238.1$, $Bo = 0.0006$, $\zeta = 0.25$)

(c) 湍动射流 ($Re = 1061.9$, $Bo = 0.0002$, $\zeta = 0.03$)

在层流射流模式下, Ca 对液滴的形成过程具有较大的影响,如图 6b 所示,在 Ca 较小时,相间粘性作用力较小,液滴受惯性力和相对较大的界面张力共同作用,与射流液体的主体之间会形成较细的液线,使得液线断裂形成卫星液滴的机会较大;随着 Ca 的增大,相间粘性作用力增大,界面张力相对减小,射流在惯性力作用下,不断向上扩展,而此时射流顶部未断裂的液滴仍受到周围粘性流体的阻力作用,向上继续运动的速度增加的幅度减小,致使液滴在断裂时底部较平;当 Ca 进一步增大时,相间界面张力逐渐减小,液滴的断裂难以在射流界面的第一个波谷处发生,在随后的波谷处断裂,形成双头状的液滴。

在湍动射流模式下,如图 6c 所示,在 Ca 较小

时,射流发展过程中受到的毛细力较大,使射流极易发生破碎,射流高度缩短,但破碎程度没有 Ca 较大时剧烈,射流破碎形成的液滴尺寸较大,数密度相对较小;此时,在射流湍动作用下,涡结构的产生和发展均不充分,形成的涡结构体积相对较大,射流破碎形成的液滴体积也相对较大;而且周围粘性流体的粘性剪切应力相对较小,一旦形成较大体积的液滴,难以再次破碎形成更小体积的液滴。

3.3 Bo 的影响

图 7 为不同雾化模式下 Bo 对液-液分散雾化过程的影响图,图 7a、7b、7c 分别对应滴流、层流射流和湍动射流液-液分散雾化模式。在滴流模式下,如图 7a 所示, Bo 较小时,重力的影响较小,而相间界面张力则相对较大,断裂点处形成了较大的界面曲

率,加剧了液滴形成的速度,液滴的形状也呈现规则的球形;随着 Bo 的增大,重力作用抑制了液滴的断裂,且较小的相间界面张力不能使液滴很快收缩成球形,在相对较大的惯性力作用下逐渐被拉长。

在层流射流模式下,如图 7b 所示,射流的破碎与断裂主要受到射流界面非稳定性动力学机制控制,重力作用的影响相对较小。图中液滴粒径与射流破碎高度随 Bo 数的增大呈小幅度地增大,原因在于 Bo 较大时,射流受到方向向下的重力作用增加,延迟了液滴的断裂,使更多的雾化液体进入未断裂的雾化液滴中,从而液滴体积变大。

在湍动射流模式下,如图 7c 所示,当 Bo 较小时,射流在较大的界面张力作用下,射流在喷嘴上方较短的一段液柱顶端便发生破碎,射流高度较小;此时,射流受到向下的重力作用较小,而向上运动的惯性力增加,加剧了液-液相界面的相互掺混,射流在周围粘性流体的粘性剪切力作用下,不仅发生二次破碎,形成了更多体积较小的卫星液滴,而且射流会向四周扩散,离散液滴分散的区域较宽。相反,当 Bo 较大时,由于重力作用的影响,射流与周围粘性流体的耦合作用削弱,射流向四周扩散的程度相对较小,离散液滴分散的区域相对较窄。

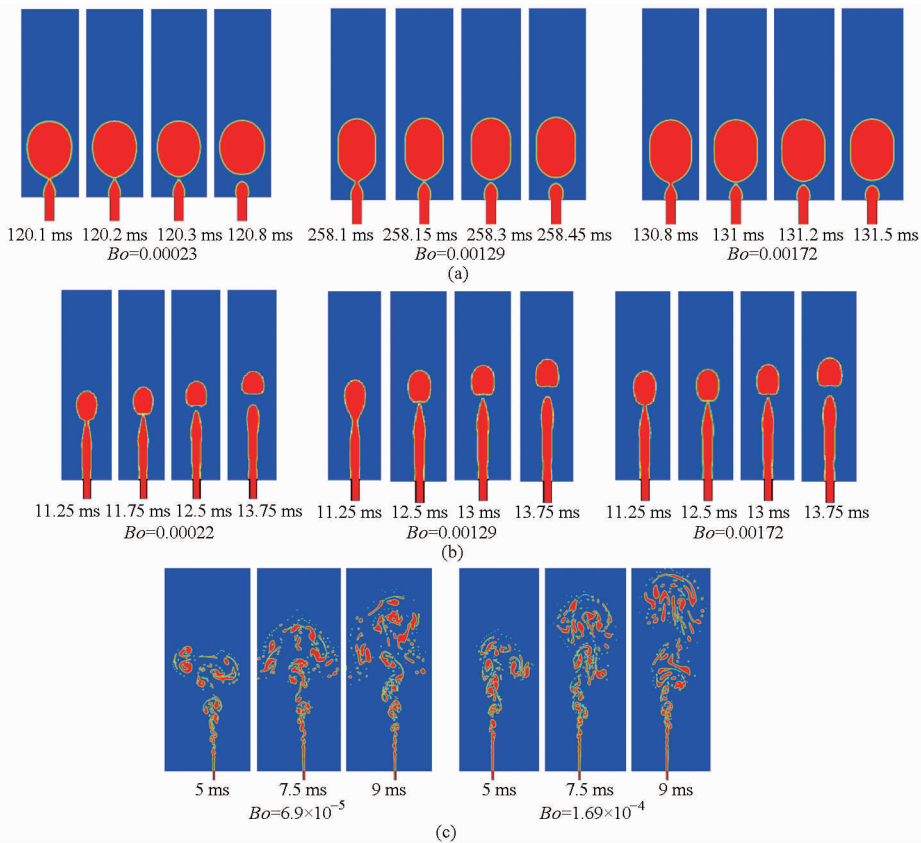


图 7 Bo 对液-液分散雾化过程的影响 ($\lambda = 48$, $\alpha = 0.8$)

Fig. 7 Effect of Bo on the process of liquid-liquid dispersion atomization

(a) 滴流 ($Re = 59.7$, $Ca = 0.004$, $\zeta = 0.3$) (b) 层流射流 ($Re = 238.9$, $Ca = 0.02$, $\zeta = 0.25$)
(c) 湍动射流 ($Re = 1\ 061.9$, $Ca = 0.13$, $\zeta = 0.03$)

4 结论

(1) 模拟结果与试验结果有很好的一致性,即使是在滴流、层流射流和湍动射流 3 种不同的液滴形成模式下,所建立的界面追踪模型均能较为准确地模拟雾化形成液滴过程,但与低喷射速率下的 2 维滴流与层流射流模型的模拟能力相比,高喷射速率下的 2 维湍动射流模型在准确捕捉流场中小尺度涡的破碎过程方面仍显不足。

(2) 滴流时,射流液体在喷嘴处破碎形成液滴

具有随机性,液滴的形状和破碎点的位置受到准则数的影响较大。层流射流时,液-液两相界面波动的发生与发展,导致射流的破碎,射流破碎时液线的出现对液滴的形状以及卫星液滴的形成均有重要影响;与滴流时相比,射流破碎的高度具有更大的波动特征,射流破碎的随机性更显著。

(3) 湍动射流时,射流的发展与破碎表现出更大的非稳定性与随机性;射流表面呈现显著的拟序涡结构,不断地使射流表面失稳,流体间的掺混作用极大地增强,形成大量体积较小的液滴,并呈非轴对

称、离散地分散到周围流体中。

(4) 准则数 Re 、 Ca 和 Bo 对于滴流和层流射流时形成的液滴与射流表面及其破碎处的形状的影响比较大,会出现扁圆形、内凹形和双头形液滴,波动

的两相界面以及液线和卫星液滴等复杂情况;而对于湍动射流而言,准则数主要影响射流破碎程度和形成液滴的粒径。

参 考 文 献

- Francisco José López-Jiménez, Soledad Rubio, Dolores Pérez-Bendito. Single drop coacervative microextraction of organic compounds prior to liquid chromatography: theoretical and practical considerations [J]. *Journal of Chromatography A*, 2008, 1195(1-2): 25-33.
- 宋云超,王春海,宁智. 追踪不可压缩两相流相界面的 CLSVOF 方法[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(7): 26-31. Song Yunchao, Wang Chunhai, Ning Zhi. Computation of incompressible two-phase flows by using CLSVOF method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(7): 26-31. (in Chinese)
- Peng Zhengbiao, Yuan Zhulin, Wu Xuan, et al. Experimental study on drop formation in liquid-liquid fluidized bed [J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(6): 1249-1259.
- Khatri Shilpa, Tornberg Anna-Karin. An embedded boundary method for soluble surfactants with interface tracking for two-phase flows [J]. *Journal of Computational Physics*, 2014, 256: 768-790.
- Richards J R, Beris A N, Lenhoff A M. Drop formation in liquid-liquid systems before and after jetting [J]. *Physics of Fluids*, 1995, 7(11): 2617-2630.
- Zhang X. Dynamics of drop formation in viscous flows [J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54(12): 1759-1774.
- Liovic P, Rudman M, Liow J L. Numerical modeling of free surface flows in metallurgical vessels [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2002, 26(2): 113-140.
- Soleymani A, Laari A, Turunen I. Simulation of drop formation in a single hole in solvent extraction using the volume-of-fluid method [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, 86(7): 731-738.
- 刘儒勋,王志峰. 数值模拟方法和运动界面追踪 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- Wang Z, Yang J, Stern F. An improved particle correction procedure for the particle level set method [J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228(16): 5819-5837.
- Mansour N N, Lundgren T S. Satellite formation in capillary jet breakup [J]. *Physics of Fluids A*, 1990, 2(7): 1141-1144.
- Kao P H, Chen Y H, Yang R J. Simulations of the macroscopic and mesoscopic natural convection flows within rectangular cavities [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(15): 3776-3793.
- 宁智,王春海,宋云超. 气液两相流数值求解过程中虚假流动问题研究 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(2): 192-197. Ning Zhi, Wang Chunhai, Song Yunchao. Spurious currents during numerical simulation of gas-liquid two-phase flow [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(2): 192-197. (in Chinese)
- 杨强,周进,吴海燕. 界面捕捉中耦合 Level-set 与 VOF 算法 [J]. *航空计算技术*, 2012, 42(4): 14-19. Yang Qiang, Zhou Jin, Wu Haiyan. An investigation on coupled Level-set and VOF algorithm in interface capturing [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2012, 42(4): 14-19. (in Chinese)
- Guo Yali, Wei Lan, Liang Gangtao, et al. Simulation of droplet impact on liquid film with CLSVOF [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, 53: 26-33.
- 宋云超,王春海,宁智. 求解不可压缩两相流的复合 Level Set - VOF 方法 [J]. *燃烧科学与技术*, 2011, 17(5): 443-450. Song Yunchao, Wang Chunhai, Ning Zhi. Level Set - VOF method used in the computation of incompressible two-phase flows [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2011, 17(5): 443-450. (in Chinese)
- Ishimoto J, Hoshina H, Tsuchiyama T, et al. Intergrated simulation of the atomization process of a liquid jet through a cylindrical nozzle [J]. *Interdisciplinary Information Science*, 2007, 13(1): 7-16.
- Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- Hong F W, Zhao F. A new free surface reconstruction method in VOF [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 1999, 3(3): 8-12.
- Ashgriz N, Poo J Y. FLAIR: flux line-segment model for advection and interface reconstruction [J]. *Journal of Computational Physics*, 1991, 93(2): 449-468.
- Rudman M. Volume-tracking methods for interfacial flow calculation [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, 1997, 24(7): 671-691.
- Ito Kei, Kunugi Tomoaki, Ohshima Hiroyuki, et al. A volume-conservative PLIC algorithm on three-dimensional fully unstructured meshes [J]. *Computers & Fluids*, 2013, 88: 250-261.
- 杨武兵,张会强,王希麟,等. 空间发展平板混合层流动的大涡模拟 [J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(6): 1046-1048. Yang Wubing, Zhang Huiqiang, Wang Xilin, et al. Large eddy simulation of plant spatially evolving mixing layer [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(6): 1046-1048. (in Chinese)