

# 水动力作用下低速射流碎化的数值模拟

沈正祥, 李金柱\*, 吕中杰, 黄风雷

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**为研究射流在水动力作用下的碎化特性,采用有限体积法对轴对称坐标下 Navier-Stokes 方程进行了求解,考虑重力和表面张力的影响,并通过 Volume-of-Fluid 法与 Level-Set 法成功捕捉到界面的不稳定发展、变形及射流碎化过程,分析了流场内部速度场和压力场分布,结果表明,射流碎化长度随  $Re/We^{0.5}$  数呈指数型增加,最后探讨了射流速度、直径及周围流体密度、粘性等参量对射流的碎化过程的影响规律。

**关键词:**射流;水动力;Volume-of-Fluid 方法;Level-Set 方法;碎化

**中图分类号:** O351.2      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7511/jslx201302023

## 1 引言

工业生产中高温流体与水直接接触将会导致蒸汽爆炸发生,形成爆炸性冲击波向周围传播并造成现场设备损坏和人员伤亡。为预防和降低这种爆炸反应造成的损失,国外学者对此进行了大量的研究并取得了一些成果<sup>[1,2]</sup>。Liu 等<sup>[3]</sup>认为射流在水动力作用下的碎化分解是形成蒸汽爆炸的关键过程,但目前尚未形成对其破碎机理的准确描述。

数值模拟<sup>[4,5]</sup>与实验研究相辅相成,是不可或缺的重要手段。目前常用的数值方法有:多相流模拟分析<sup>[6]</sup>和一维线性稳定性分析<sup>[7]</sup>,其中自由界面追踪法<sup>[8]</sup>可以对多相流中流体组分的变形和分解过程提供完整的数值描述,所以被作为研究射流瞬态变化过程的重要方法。

本文采用有限体积法并结合自由界面追踪法在轴对称坐标下对 Navier-Stokes 方程进行了求解,捕捉到 Wood 射流界面的不稳定发展、变形及碎化过程,最后分析了入射速度、射流直径、周围流体粘性和密度等因素的影响,为进一步研究奠定了基础。

## 2 数值分析方法

### 2.1 数值方法

有限体积法基本思想是将计算区域划分为一

系列不重复的控制体积,并使每个网格点周围有一个控制体积,将待解的微分方程对每一个控制体积积分,便得出一组离散方程<sup>[9]</sup>。这些离散方程要求因变量的积分守恒对任意一组控制体积都得到满足,对整个计算区域,自然也得到满足。

自由界面追踪法主要采用 VOF 法与 LEVEL-SET 法的耦合,并引入了表面张力的影响。其中,VOF 法<sup>[8]</sup>主要侧重于保持流体体积的守恒性,LEVEL-SET 法<sup>[8]</sup>则注重对流体界面运动的描述。同时假设该流动状态为轴对称,两种流体均为粘性不可压,且不涉及传热问题(不考虑温度的影响),轴对称坐标下 Navier-Stokes 方程<sup>[10]</sup>为

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u\right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \sigma \kappa \nabla F + \rho g \quad (1)$$

式中  $\rho$ 、 $u$ 、 $p$  和  $\mu$  分别为流体的密度、速度、压力和动力粘性系数,  $t$  为时间,  $\sigma$  为表面张力系数,  $g$  为重力加速度,  $F$  为体积标量函数,  $\kappa$  为界面曲率,它采用的是连续表面张力模型。

$$\kappa = -(\nabla \cdot \hat{n}), \quad \hat{n} = n/|n| \quad (2,3)$$

式中  $n$  为单位法向向量。

体积标量函数  $F$  的变化方程:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$F(x, y, t) = 0$ , 单位网格充满流体 1;  $0 < F(x, y, t) < 1$ , 单位网格包含流体 1 和流体 2 的界面;  $F(x, y, t) > 1$ , 单位网格充满流体 2; 式中  $u$  和  $v$  为轴向和径向速度。

### 2.2 数值模型

数值模拟中,整个模型的计算区域如图 1 所示,长度取 0.8 m,宽度取 0.055 m,采用结构化网

收稿日期: 2012-02-10; 修改稿收到日期: 2012-06-06.

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室基金  
(YBKT10-02)资助项目.

作者简介: 沈正祥(1984-),男,博士生;

李金柱\*(1972-),男,博士,副教授

(E-mail: lijinzhu@bit.edu.cn).

表1 计算中使用的材料参数

Tab.1 The material parameters in simulation

	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	黏性系数 $\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}$	表面张力系数 $\sigma/\text{dyn}\cdot\text{cm}^{-1}$	入射速率 $w/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Wood	$9.383\times 10^3$	$2\times 10^{-7}$	$1.0\times 10^3$	3.2
射流				2.2
水	$0.998\times 10^3$	$1.003\times 10^{-3}$	73.5	0



图1 射流碎化模型

Fig.1 The model of jet breakup

格,数量为38880,离散法则为QUICK高阶差分法,时间步长为0.00001s,压力松弛因子为0.3,动量松弛因子为0.7,Level-set因子设为0.3,湍流效应由标准k-ε模型描述,同时引进表面张力模型。

边界条件为速度入口边界,压力出口边界,其余无滑移固壁条件。假设水为不可压缩流体,不考虑传热影响,Wood射流以不同速度从入口边界进入水中,从而实现对在水动力作用下低速射流的破碎分解过程的模拟。

### 3 数值计算结果及分析

#### 3.1 水液柱在空气中下落过程模拟

为验证模型及算法的准确性,对小段水液柱在空气环境中自由下落过程进行了计算,结果如图2所示,计算值与实验值<sup>[4]</sup>一致性较好。

#### 3.2 射流破碎分解的模拟结果

##### 3.2.1 射流的破碎过程

初始速度为3.2 m/s时,Wood射流在水中的破碎分解过程如图3所示。当t=0.05 s时,射流前端在惯性力和黏性力作用下呈树冠状向外翻转;当t=0.07 s时,射流前端的变形程度不断增加出现较

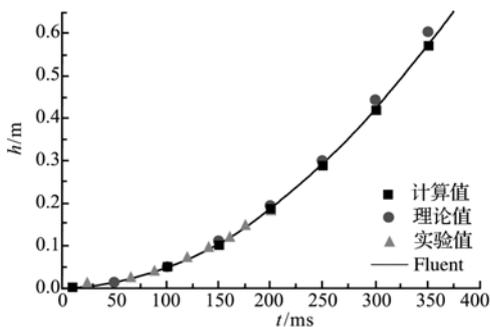


图2 空气中水液柱下落高度随时间的变化关系  
Fig.2 The relation between the dropping height of water column in air and time

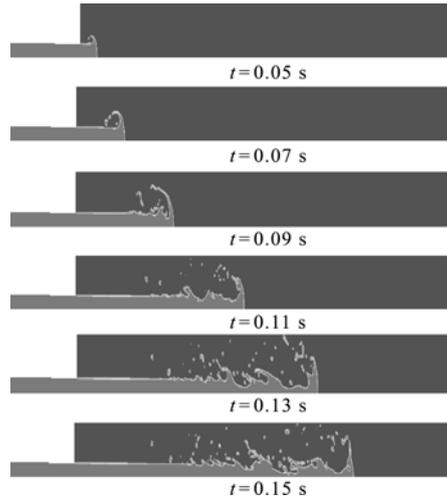


图3 Wood射流在水中的破碎分解过程

Fig.3 The process of breakup of wood jet in water

为明显的回流区,并分解成少量的Wood液滴;当t=0.09 s时,由于射流与水的速度差的不断变大,形成的扰动波使射流表面碎化成小液滴;当t=0.11 s时,碎化程度开始加剧,使得射流周围液滴的体积分数增大;当t=0.13 s和0.15 s时,随着扰动波不断侵蚀,射流主体体积分数减小,碎化作用越发明显。

##### 3.2.2 流场的速度分布

射流入水后流场内的轴向和径向速度分布如图4和图5所示。初始速度为2.2 m/s时,流场内的轴向速度沿着垂直方向不断增加直至射流前端处达到最大速度,且该极值点位置和绝对值随入射深度的增加而不断下移和变大;与之相对应,流场内径向速度在总体上也随入射深度的增加而不断变大,振荡频率也逐渐提高;当径向速度变化至足够突破摆脱表面张力束缚时,射流表面即开始碎化形成小液滴。

当初始速度提高至3.2 m/s后,如图6和图7所示,流场的速度变化整体趋势一致,但变化幅度明显提高,这是因为入射速度的提高使射流的湍动能增加,流场中的小漩涡从而能得到更多的能量,最后导致流场发生剧烈的变化。

##### 3.2.3 流场的压力场分布

射流表面碎化区的压力分布如图8所示。当t=0.04 s时,射流前端压力峰值明显高于周围环境的压力,表面碎化处则形成了一个负压区;当t=0.06 s时高压区与负压区均随射流下移,同时在射流表面形成一个新的高压区;当t=0.08 s和0.1 s时,负压区范围增大,对应的射流表面碎化区

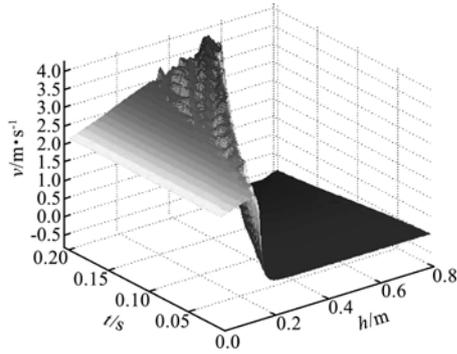


图4 流场中轴向速度分布( $v=2.2$  m/s)  
Fig. 4 The axial velocity distributions in flow( $v=2.2$  m/s)

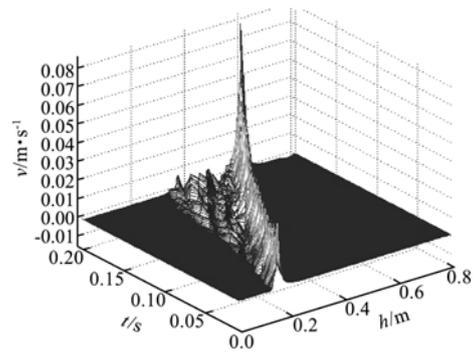


图5 流场中径向速度分布( $v=2.2$  m/s)  
Fig. 5 The radial velocity distributions in flow( $v=2.2$  m/s)

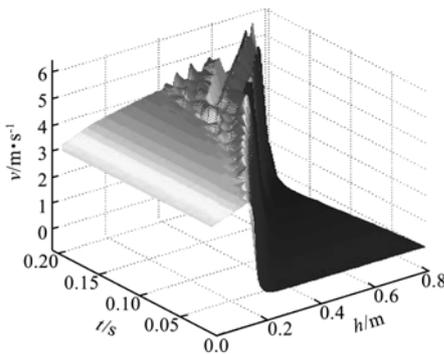


图6 流场中轴向速度分布( $v=3.2$  m/s)  
Fig. 6 The axial velocity distributions in flow( $v=3.2$  m/s)

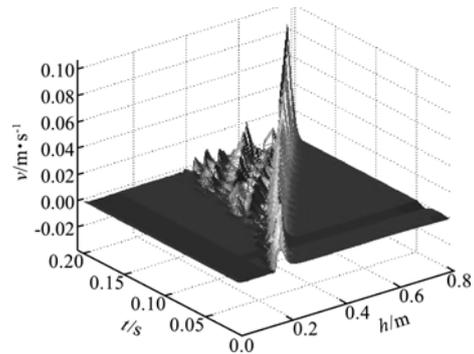


图7 流场中径向速度分布( $v=3.2$  m/s)  
Fig. 7 The radial velocity distributions in flow( $v=3.2$  m/s)

同样存在扩展的趋势,这是因为计算中水被当做理想不可压缩流体最小,对应的压力就最大;而射流表面碎化区由于流场速度变化非常剧烈,消耗了较多的能量,所以在此形成了负压区。

### 3.2.4 射流的碎化长度

射流的碎化长度  $l$  定义为入口处至射流表面出现第一个扰动波点之间的距离,当入射深度高于该值时,形成的不稳定扰动波会导致射流表面发生碎化。

引入无量纲  $Re$  数与  $We$  数为

$$Re = \rho_l u d / \mu, We = \rho_l u^2 d / \sigma \quad (5)$$

式中  $\rho_l$  和  $\rho_j$  分别为水和射流的密度,  $u$  为相对速率,  $d$  为射流直径,  $\sigma$  为表面张力系数,  $\mu$  为射流的粘性系数,  $Re/We^{0.5}$  数描述射流表面张力与粘性力的影响。

如图9所示,随着  $Re/We^{0.5}$  数增加,碎化长度与直径比  $L/D$  逐渐变大,这是由于射流自身湍动能的增加能够不断抵消射流与水之间的水动力作用,故射流的碎化点位置逐渐下移;当  $Re$  数足够大时,  $L/D$  存在着稳定的趋势,这与文献[11]结果一致。

### 3.2.5 射流自身特性的影响

射流碎化的直接结果将导致流场内射流的体积分数发生变化,如图10所示。当入射速度由  $2.2$  m/s 提高至  $3.2$  m/s 后,射流的碎化程度加剧,体积分数变化率变大,这是因为其他条件不变,入射速度的增加使射流自身湍动能变大,其表面更容易剥离碎化成小液滴,从而提高流场内射流体积分数变化率,与文献[11]结果一致。

入射速度保持  $3.2$  m/s 不变,不同初始直径对射流碎化的影响如图11所示。当射流直径  $D_j$  由  $0.02$  m 提高至  $0.04$  m,其体积分数变化率也相应的变大,这是因为相同条件下射流初始直径越大,周围水对其剪切作用面也越大,对应的碎化液滴量也随之增多,所以射流体积分数增加率变大。

### 3.2.6 周围流体特性的影响

周围流体特性的影响主要体现在粘性和密度两方面。当入射速度保持  $3.2$  m/s 不变,如图12所示流体的密度由射流密度的  $0.25$  倍提高至  $0.5$  倍时,射流体积分数的变化率同样变大。因为相同条件下周围流体密度变大时,对应的  $We$  数也变大,这说明射流受到周围水的剪切力变大,而表面

张力不变,所以其表面会更容易地碎化成液滴,从而使流场内射流体积分数变化率变大。

当入射速度保持 3.2 m/s 不变,水的粘性增加对射流碎化的影响如图 13 所示,水的粘性比  $\mu/\mu_0$  由 1 提高至 100 后,射流的体积分数变化率减小,说明水粘性的提高对射流表面的不稳定性有较为

明显的抑制作用,并影响碎化后的液滴在流场内的分布。

如图 14 所示相同条件下水的粘性比变大后,射流所受的粘滞力也变大,流场的流通性降低,使射流表面液滴的脱离难度变大,所以周围流体粘性的增加可抑制射流的碎化分解。

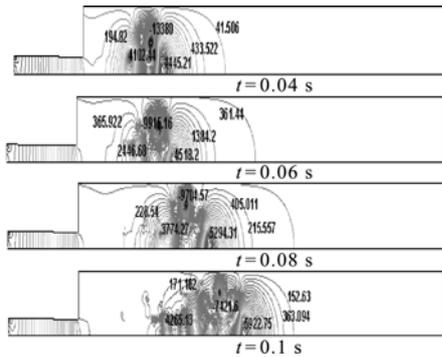


图 8 射流表面碎化区压力分布

Fig. 8 The pressure distributions in jet breakup region

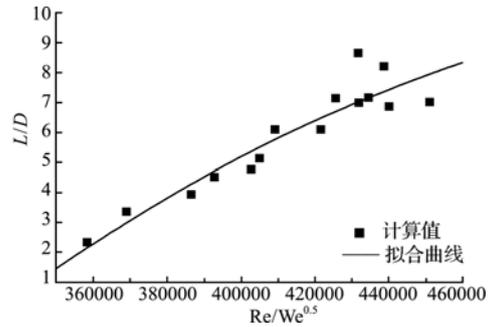


图 9 Wood 射流碎化长度的变化

Fig. 9 The variation on breakup length of wood jet

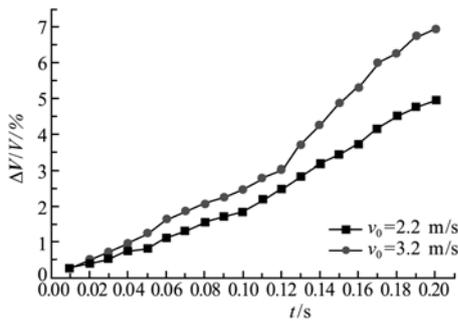


图 10 入射速度对射流体积分数的影响

Fig. 10 The effect of velocity on volume fraction of jet

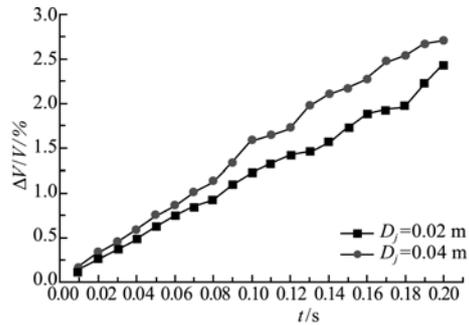


图 11 初始直径对射流体积分数的影响

Fig. 11 The effect of diameter on volume fraction of jet

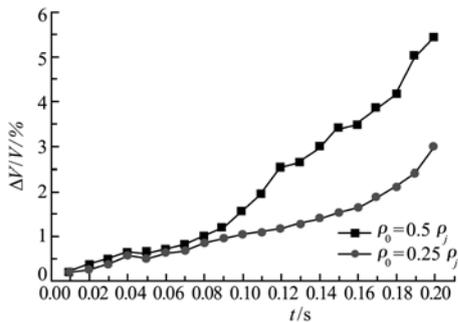


图 12 空隙率对射流体积分数的影响

Fig. 12 The effect of coolant voiding on volume fraction of jet

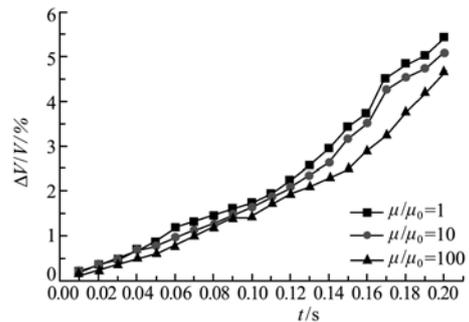


图 13 水的粘性对射流体积分数的影响

Fig. 13 The effect of viscosity on volume fraction of jet

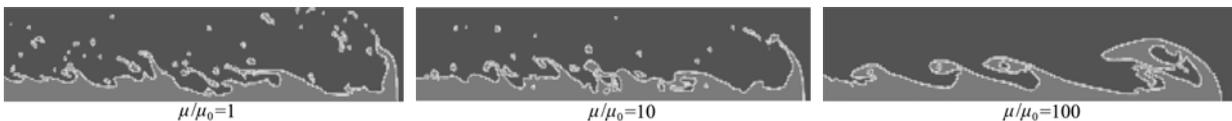


图 14 水的粘性提高对射流体积分数的影响

Fig. 14 The effect of different viscosity on the breakup of wood jet

## 4 结 论

本文采用有限体积法,并结合 Volume-of-Fluid 法与 Level-Set 法在轴对称坐标系下模拟了低速 Wood 射流的碎化分解过程,在考虑表面张力和重力的前提下,比较清楚地捕捉到射流界面不稳定发展、变形及碎化过程。计算结果表明,当入射速度较低,流场内轴向速度随入射深度增加而变大,射流表面碎化范围内径向速度变化比较剧烈,对应的压力场为负压。射流的碎化长度与无量纲数  $Re/We^{0.5}$  呈指数型关系,最后分析了射流的入射速度、直径和周围水的密度、粘性等因素对射流体积分数变化率的影响。

## 参考文献(References):

- [1] LONG, G. Explosion of molten aluminum in water-cause and prevention [J]. *Metal Progress*, 1957, **71**(5):107-112.
- [2] P D Hess, K J Brondyke. Cause of molten aluminum-water explosions and their preventions [J]. *Metal Progress*, 1969, **95**(4):93-100.
- [3] Liu J, Seiichi Koshizuka. Relationship between the structure of vapor explosion and fragmentation mechanisms [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2002, **216**(1-3):121-137.
- [4] G J Storr, M Behnia. Comparisons between experiment and numerical simulation using a free surface technique of free-falling liquid jets[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, **22**(1-2):79-91.
- [5] L Strubelj, I Tiselj. Two-fluid model with interface sharpening[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2011, **85**:575-590.
- [6] ANSYS FLUENT. User Manual[R]. ANSYS Inc, 2010.
- [7] FURUYA M, Matsumura. A linear stability analysis of a vapor film in terms of the triggering of vapor explosion[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2002, **39**(10):1026-1032.
- [8] A Cervone, S Manservigi. Simulation of axisymmetric jet with a finite element Navier-Stokes solver and a multilevel VOF approach[J]. *Journal of Computational Physics*, 2010, **229**(19-20):6853-6873.
- [9] 杨海天. 有限体积法在二维固体力学问题中的应用[J]. 计算力学学报, 1996, **13**(3):333-341. (YANG Hai-tian. Application of finite volume method in 2-dimensional problems of solid mechanics[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 1996, **13**(3):333-341. (in Chinese))
- [10] 赖锡军, 王志东, 等. 用任意不规则网格求解 N-S 方程[J]. 计算力学学报, 2004, **21**(3):379-384. (LAI Xi-jun, WANG Zhi-dong, et al. Solution method for Navier-Stokes equations using highly irregular control volumes[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2004, **21**(3):379-384. (in Chinese))
- [11] Kwang Hyun BANG, Jong Myung KIM. Experimental study of melt jet breakup in water[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2003, **40**(10):807-813.

## Numerical simulation of breakup in low-velocity liquid jet due to hydrodynamics

SHEN Zheng-xiang, LI Jin-zhu\*, LÜ Zhong-jie, HUANG Feng-lei

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To investigate the characteristics of breakup for liquid jet due to hydrodynamics, the time-dependent axisymmetric equations of motion and continuity were solved by the finite volume algorithm, considering the influence of gravity and surface tension. With Volume of Fluid and Level Set method, the development of instability of interface and jet breakup were captured successfully, the results showed the exponential relations between the breakup length of jet and  $Re/We^{0.5}$ , and velocity and pressure distributions were obtained, the effects of jet velocity, diameter and ambient fluid viscosity, density were analyzed finally.

**Key words:** liquid jet; hydrodynamics; volume of fluid method; level set method; breakup