

文章编号: 1000-4750(2013)03-0017-07

双股液体射流撞击雾化的 SPH 方法数值模拟

韩亚伟, 强洪夫, 刘 虎

(第二炮兵工程大学 601 室, 陕西, 西安 710025)

摘 要: 双股液体射流撞击雾化过程存在复杂的界面运动, 传统网格法很难处理。运用 SPH 方法对双股液体射流撞击雾化问题进行三维数值模拟; 根据实际的双股液体射流撞击雾化过程提出了合理的简化模型; 弱可压缩状态方程中参考压强采用了新的计算公式; 利用有限差分与 SPH 一阶导数相结合的方法处理粘性项中的二阶导数; 对人工应力提出了新的参数值选择方案。将数值仿真结果与文献实验结果进行对比, 二者比较吻合, 表明 SPH 方法很适合解决射流撞击雾化等复杂的界面运动问题。

关键词: 光滑粒子流体动力学; 雾化过程; 液体射流撞击; 粘性; 人工应力

中图分类号: O358 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.10.0688

NUMERICAL SIMULATION OF TWO LIQUID IMPINGING JETS WITH SPH METHOD

HAN Ya-wei, QIANG Hong-fu, LIU Hu

(No.601 of The Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract: The atomization process of two liquid impinging jets has complex interface moving, which is difficult to solve with traditional grid-based methods. In this paper, the problem of two liquid impinging jets and atomization was simulated with three-dimensional Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method. A simplified model is proposed according to the practical process of two impinging jets and atomization, and a new formula of reference pressure is used to compute state equation. A hybrid expression, combining a standard SPH first derivative with a finite difference approximation of a first derivative, is used to replace the second derivative item in the viscosity, while the parameters in artificial stress are redefined. Compared with experimental results, the simulation results are found to be in good agreement with them. It is proved that this proposed method is suitable to solve the problems of complex interface moving such as liquid impinging jets.

Key words: Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method; atomization process; liquid impinging jets; viscosity; artificial stress

液体火箭发动机中, 推进剂的雾化特性对燃烧稳定性和推力特性有着巨大影响, 凝胶推进剂^[1]尤其如此, 雾化问题已成为阻碍凝胶推进技术发展的瓶颈。

液体推进剂的雾化问题一般可归结为双股液体射流撞击雾化问题, 国内外以此为基础进行了大量实验研究。张蒙正^[2]研究了 0.3mm 孔径的双股

液体射流撞击雾化过程, 得到了不同速度、不同撞击角度以及不同粘度的撞击雾化图像, 并获得了一些定性结论; Kline^[3]等给出了不同射流速度下双股液体射流撞击雾化图像, 并讨论了与之相应的雾化模式; Kihon^[4]等研究了双股液体射流撞击时液膜的破碎特征, 探讨了韦伯数、撞击角度等对破碎长度的影响; Kampen^[5]等对含铝成分不同的凝胶推进

收稿日期: 2011-10-19; 修改日期: 2011-11-18

基金项目: 国家教育部 NCET 项目(NCET-4138C2XB); 第二炮兵工程大学创新性探索研究项目(EPXY0806)

通讯作者: 韩亚伟(1985-), 男, 河南偃师人, 博士生, 主要从事计算力学研究(E-mail: han_ya_wei@163.com).

作者简介: 强洪夫(1965-), 男, 江苏武进人, 教授, 博士, 博导, 主要从事材料与结构的失效行为与高性能数值模拟研究(E-mail: Qiang@263.net);

刘 虎(1987-), 男, 山东莱芜人, 硕士生, 主要从事计算力学研究(E-mail: richardliu@163.com).

剂进行雾化实验研究,并根据雷诺数的不同将雾化划分为3种模式。但是,这些研究主要还是通过改变推进剂的组分、射流撞击速度、撞击角度等参数,得到雾化图像,从而分析凝胶推进剂的雾化特性。实际上,由于影响雾化过程的因素众多,实验条件难以精确控制,因此,目前的实验研究只能做到定性分析,尚不能建立一个较完善的数学模型对凝胶推进剂的雾化特性进行定量预测,此外,实验研究还存在耗资大、细节难捕捉等优点。

与实验研究不同,数值仿真不仅成本低、不受实验条件限制,而且可以捕捉流动细节、分析影响射流撞击雾化的主要因素。

然而,传统的网格法如 FVM、FDM,在求解诸如此类界面复杂运动的问题时存在很大困难,目前对双股液体射流撞击雾化问题的数值模拟国内尚未见报道;国外 Chihiro^[6]等运用 CIP-LSM 方法进行了双股液体射流撞击的数值模拟,采用 Level-set 和 MARS 相结合来追踪界面,仿真得到了液膜的形成过程,但液膜的破碎与实验存在较大差距;Ma Dongjun^[7]等进行了双股液体射流撞击的雾化形式和液膜的破碎特性的数值模拟,通过使用 VOF 和自适应网格来提高界面分辨率,达到了较好的效果,但计算量很大。

SPH 方法^[8]是一种完全拉格朗日粒子方法,在计算过程中不需要网格,能够自然地模拟大变形、复杂界面运动^[9]等问题,用 SPH 方法来模拟双股液体射流撞击雾化问题具有很大优势,但相关研究国内外尚未见报道。

本文用 SPH 方法对双股液体射流撞击雾化过程进行数值模拟。通过分析影响雾化过程的各种因素,提出了简化的计算模型;在数值仿真过程中,为避免粒子聚集采用了 Monaghan^[10]提出的人工应力方法,物理粘性采用 Morris^[11]提出的粘性项公式,但是直接使用 Monaghan 所给出的人工应力参数值进行计算会产生很大误差,出现“粘性失真”现象,本文对人工应力参数值进行了重新选择。最后,将本文数值仿真结果与文献实验结果进行对比,二者比较吻合,在雾化模式、液膜形成和破裂等方面与实验都比较一致,对液丝的破碎,本文也有较好的预示。

1 SPH 基本方程及离散

1.1 物理模型及其简化

根据目前的实验^[1-2]及数值模型^[6]分析可知,影

响双股液体射流撞击雾化的主要因素为:射流速度、撞击角度、粘度以及表面张力和气动力。其中,撞击角度通过影响射流的方向,进而改变雾化角影响雾化效果;粘度大小对液膜破裂成液丝以及液滴的大小有很大影响;表面张力和气动力对液丝的断裂及液滴的形成有一定影响。综合分析后认为,惯性力和粘性力是影响雾化过程的主导因素,在物理模型中必须考虑;表面张力和气动力在雾化过程中居于次要地位,考虑到计算量的问题,本文暂不考虑。数值算例表明,这样的简化是合理的。

考虑流体的惯性力和粘性力,同时将流体看作为弱可压缩流体,不考虑热传导,采用拉格朗日形式下的方程组作为其控制方程组,形式如下:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v} \quad (3)$$

其中: ρ 为密度; \mathbf{v} 为速度; t 为时间; P 为压强; $\boldsymbol{\tau}$ 是偏应力张量; \mathbf{g} 为重力加速度; \mathbf{x} 为位置矢量; d/dt 表示物质导数。

为有效计算方程式(2)中的压力项 P ,引入弱可压缩状态方程描述密度与压强的关系,如下式:

$$P = P_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (4)$$

参数 P_0 为参考压强, $\gamma = 7$, γ 和 P_0 共同用于控制计算中流体密度在其常态密度附近的震荡幅度。Monaghan^[8]提出 P_0 的近似计算式 $P_0 = 100\rho_0 v_{\max}^2 / \gamma$, ρ_0 为液体的初始密度, v_{\max} 为流体最大速度。但如果直接将此式用于本文计算,发现由于 v_{\max} 较大,导致 P_0 很大,较小的密度变化会产生很大的压力,粒子运动会不稳定,致使计算失败。本文的 P_0 近似计算式为 $P_0 = 10\rho_0 v_{\max}^2 / \gamma$,数值实验表明,对 P_0 的改进可提高数值稳定性及计算效率。

1.2 本构方程

为使控制方程组式(1)~式(3)封闭,还必须引入偏应力张量 $\boldsymbol{\tau}$ 的本构模型,对牛顿流体,本构方程为:

$$\boldsymbol{\tau} = \eta \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (5)$$

其中: $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ 为剪切速率张量, $\dot{\boldsymbol{\gamma}} = \nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T$; η 为剪切粘度。对非牛顿流体,采用幂定律模型,即:

$$\boldsymbol{\tau} = \eta(\dot{\boldsymbol{\gamma}}) \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (6)$$

其中: $\eta(\dot{\gamma})$ 称为表观粘度, $\eta(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1}$; k 为稠度系数; n 为流变指数; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率大小, $\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma} : \dot{\gamma}}$ 。

1.3 粘性流 SPH 离散方程组

在 SPH 方法中, 连续的流场离散成为一系列相互作用的粒子, 通过核函数估计技术在这些粒子上离散控制方程组, 得到一组描述各粒子物理量随时间变化的常微分方程组, 即 SPH 基本方程组, 再对这组方程采用相应的常微分方程组求解方法来推进时间进程的求解, 详见文献[8,12]。

SPH 控制方程的离散有多种形式^[12], 最常用的是 Monaghan^[13]提出的传统 SPH 离散方程式(7)~式(9):

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (7)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + \mathbf{g} \quad (8)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathbf{v}_i \quad (9)$$

其中: N 、 ρ_i 、 \mathbf{v}_i 、 \mathbf{x}_i 、 P_i 分别表示粒子 i 的临近粒子数、密度、速度、位置、压强; $W_{ij} = W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h)$ 为核函数, 它的选取直接影响计算的误差和稳定性, 通常选用三次样条核函数; h 是光滑长度, 表示 W 不显著为零的取值范围, 控制着 SPH 粒子的影响域; $\nabla_i W_{ij}$ 表示核函数对 i 粒子坐标的空间导数, $\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j$; Π_{ij} 为人工粘性项, 用于消除由于数值不稳定造成的粒子间非物理穿透, 表达式为:

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ij} \mu_{ij} + \beta \mu_{ij}^2}{\bar{\rho}_{ij}}, & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij} < 0 \\ 0, & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\mu_{ij} = \frac{h_{ij} \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij}}{|\mathbf{x}_{ij}|^2 + \varphi^2}$; $\varphi = 0.1h_{ij}$ 。 \mathbf{v} 为粒子的速度矢量, c 为粒子声速, \mathbf{x} 为粒子位置矢量, $\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$, $\bar{c}_{ij} = (c_i + c_j)/2$, $\bar{\rho}_{ij} = (\rho_i + \rho_j)/2$, $h_{ij} = (h_i + h_j)/2$, α 和 β 为常数, 与模拟的问题有关, α 和 β 的取值见文献[14]。

为了使粒子分布更加有序, 消除由于分布不均匀引来的粒子非物理聚集的问题, Monaghan 又提出了 XSPH 方法和人工应力^[10]方法, 研究表明, 运用 XSPH 方法和人工应力方法修正后的 SPH 离散方程式能有效避免拉伸不稳定现象, 修正后式(8)和式(9)分别变为:

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} + f_{ij}^n R_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + \mathbf{g} \quad (11)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathbf{v}_i - \varepsilon \sum_{j=1}^N m_j \frac{\mathbf{v}_{ij}}{\bar{\rho}_{ij}} W_{ij} \quad (12)$$

其中: $f_{ij} = W(\mathbf{x}_{ij})/W(\Delta p)$, \mathbf{x}_{ij} 为粒子 i 和 j 的距离, Δp 是初始粒子间距, 本文取 $\Delta p = h$, $n = 4$ 。在 SPH 计算中, 比率 $h/\Delta p$ 是常数, 因此 $W(\Delta p)$ 也是常量。 $R_{ij} = R_i + R_j$, 当压力 $P_i < 0$ 时: $R_i = -\lambda_1 P_i / \rho_i^2$; 当压力 $P_i \geq 0$ 时, $R_i = \lambda_2 P_i / \rho_i^2$, R_j 的计算方法同 R_i , λ_1 和 λ_2 为常数, Monaghan 建议的取值为 $\lambda_1 = 0.2$, $\lambda_2 = 0.01$ 。 ε 是一个常数, 通过施加临近粒子的影响使自身的运动速度与临近粒子的平均速度相近, 本文 $\varepsilon = 0.3$ 。

由于粘性力在射流撞击雾化过程中是不可忽略的因素, 因此, 在计算过程中必须采用流体真实的物理粘性, 而非人工粘性。在计算物理粘性时, 需要对速度的二阶导数进行空间离散, 采用直接离散的方法计算精度不高^[12], 并且造成粒子秩序较差。 Morris^[11]等人用有限差分与 SPH 一阶导相结合的方法来模拟低雷诺数 ($Re \leq 1$) 不可压缩流动问题, 取得了较好的效果, 但对于较高雷诺数的不可压缩流动问题却没有给出解决方法。

对于射流撞击雾化问题, 雷诺数较高 ($Re \gg 1$), 如何在较高雷诺数条件下施加粘性力就成为必须研究解决的问题, 本文将动量方程式(11)修正为:

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + f_{ij}^n R_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + \sum_{j=1}^N m_j \frac{\eta_i + \eta_j}{\rho_i \rho_j} \mathbf{v}_{ij} \left(\frac{1}{x_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_{ij}} \right) + \mathbf{g} \quad (13)$$

对牛顿流体, 式(13)中 η_i 为粒子 i 的剪切粘度; 对非牛顿流体, 实验研究^[2]表明, 在双股射流撞击雾化过程中, 流体的剪切速率很大, 达到了极限剪切速率, 因此, 可以用流体的极限剪切粘度代替表观粘度来简化计算, η_i 为粒子 i 的极限剪切粘度。

对比式(13)中粒子对 i 和 j 之间的人工应力和粘性力可知, 当粒子受到压缩, 密度变化较大时, 粒子对 i 和 j 之间的人工应力就会远大于粘性力, 此时, 过大的人工应力会造成“粘性失真”现象。 本文将人工应力项中的常数修正为 $\lambda_1 = 0.01$, $\lambda_2 = 0.001$, 此时, 既可以在一定程度上的防止粒子聚集, 又能体现粘性力的作用。

最终, 本文用于双股射流撞击雾化问题的 SPH

方程组包括式(7)、式(12)、式(13)。

2 数值算例及仿真结果分析

本文数值算例以 Kline^[3]等的实验为基础,计算的几何模型如图 1 所示。两股圆柱形射流夹角为 60° , 设置射流所在的面为 $x-y$ 平面, 液膜及液丝主要在垂直于 $x-y$ 平面的方向(即 $x-z$ 平面)形成和运动; 射流直径为 2mm; 流体初始密度为 998.2kg/m^3 , 初始速度大小为 4.7m/s、13.6m/s、32.6m/s 这 3 种, 方向沿圆柱轴线方向, 流体本构模型采用牛顿流体本构模型, 剪切粘度为 $0.001017\text{Pa}\cdot\text{s}$; 粒子数目为 140000, 粒子尺寸为 0.15mm, 计算时间步长^[15]遵循 CFL 条件。

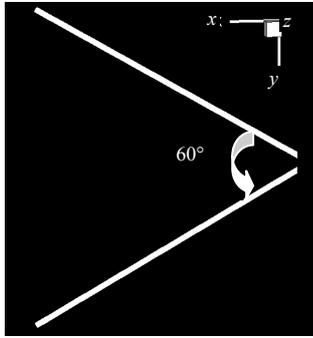
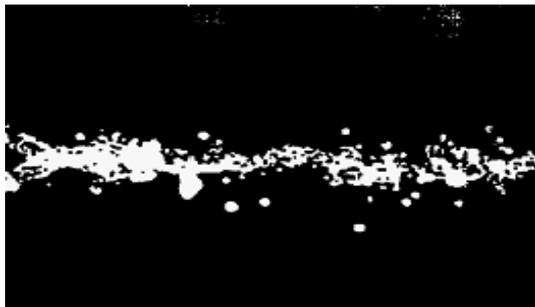


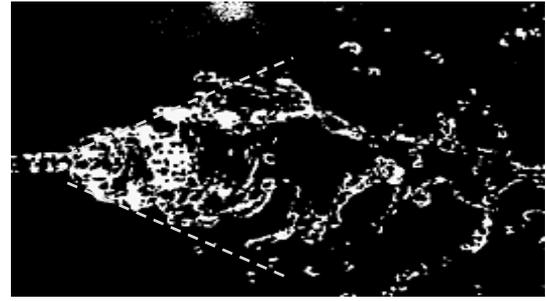
图 1 双股射流撞击几何模型

Fig.1 Geometry of a pair of liquid jets

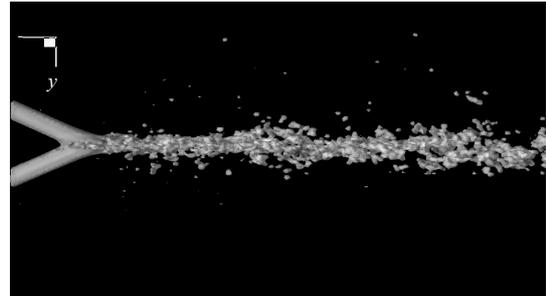
速度为 4.7m/s、13.6m/s 和 32.6m/s 的双股液体射流撞击实验和计算结果分别如图 2、图 3 和图 4 所示,图 2、图 3、图 4 的(a)和(b)为文献实验结果, (c)和(d)为数值模拟结果。其中左上方为从 z 方向拍摄的射流撞击后的图像, 右上方为与之对应的仿真结果; 左下方为垂直于射流平面的实验结果, 右下方为与之对应的仿真结果; 图 2、图 3 和图 4 中虚线所形成的夹角为雾化角, 根据此虚线计算出的不同速度时数值仿真所得的雾化角与实验结果的对比如表 1。



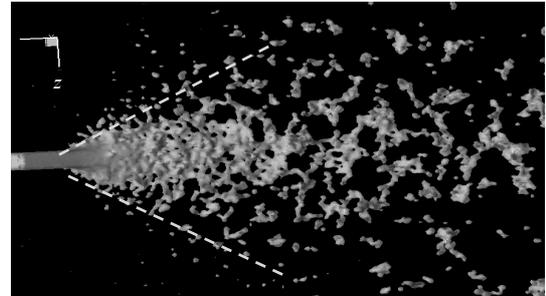
(a)



(b)



(c)



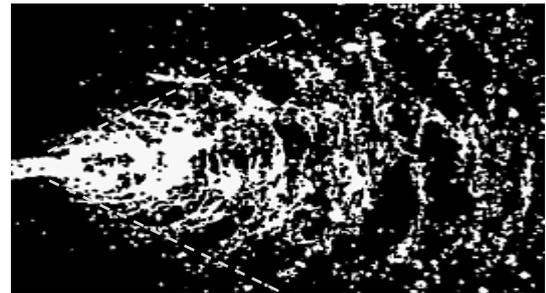
(d)

图 2 速度 $V=4.7\text{m/s}$, 实验结果(a)和(b); SPH 仿真结果(c)和(d)

Fig.2 Velocity of impingement jets $V=4.7\text{m/s}$, results of experiment (a) and (b); results of SPH simulation (c) and (d)



(a)



(b)

丝的波动现象,这可能与实验的拍摄方式有关,实验图像只能呈现二维状态,而仿真结果却可以体现射流撞击的三维特征。

速度为 32.6m/s 时的实验及仿真结果如图 4。从实验结果(图 4(b))可以看出,由于速度的进一步增大,雾化形式进一步改变,液膜边缘的液丝减少,主要以液滴的形式存在,随着液滴的运动,较大的液滴逐渐破碎成较小的液滴,液滴数目和 4.7m/s 及 13.6m/s 时相比也明显增加,说明射流速度对雾化效果有很大影响。仿真结果的雾化模式和实验比较吻合,但液滴破碎不够均匀。

对比不同速度下实验所得的 x - y 平面流体分布状态可知,随着速度增加,液膜厚度不断增大,撞击作用所产生的不稳定逐渐增强,仿真结果也体现了这一特征。

从表 1 中文献实验结果可知,随着射流速度的增加,雾化角总体呈增大的趋势,本文数值仿真结果与实验基本一致(最大误差约为 9.35%);但是,当速度从 13.6m/s 增大到 32.6m/s 时,实验所得的雾化角有所减小,而本文所得的雾化角有所增大,但误差不大(误差为 8.4%),这主要是由于本文采用的实验流体的粘度很小,远小于幂律型流体,从文献[1-2]的研究结论可知,对高粘度流体,撞击速度越大,雾化角越大,但这个结论是否完全适用于低粘度流体还有待进一步研究。可以确定的是,随着撞击速度的增加,雾化效果越好,本文数值仿真及文献实验都证明了这一点。

不足之处:

1) 由于实验图像只能呈现流体的二维状态,从某一方向上拍摄会产生叠加效应,拍摄方向的微小变化都会使实验所得的图像有差异;即使流场处于相对稳定的状态,不同时刻所得的实验结果也会有差异,这种差异可能导致仿真结果与实验的差别。

2) 由于本文没有考虑气动力和表面张力的作用,使得本文的仿真结果在液丝破碎成液滴的阶段与实验有部分差异,主要表现在:液滴过大,破碎不够充分;从 x - y 平面观察,流体波动不够明显。这些都与气动力及表面张力有关,是下一步需要重点解决的问题。

3) 无论对牛顿流体还是幂律型非牛顿流体,射流撞击雾化时,液丝都是重要的存在状态,尤其对幂律型非牛顿流体的雾化,液丝更是最主要的存在状态^[2],如何描述和表征液丝对实现数值仿真与实验定

量对比具有重要的实际意义,是需要解决的重要问题。

3 结论

本文用 SPH 方法模拟了双股射流撞击雾化问题,研究了 SPH 方法求解较高雷诺数粘性流体的可行性,同时验证了双股射流撞击雾化问题简化物理模型的合理性,所得的结论如下:

(1) SPH 方法很适合射流撞击雾化等复杂界面运动问题,是解决液体射流撞击雾化问题的一种可行新方法。

(2) 将粘性流 SPH 方法应用于实际问题时,必须处理好人工应力与粘性力之间的关系,否则会导致“粘性失真”现象。

(3) 将双股射流撞击雾化过程的仿真结果与文献实验结果对比发现,SPH 仿真结果与实验在雾化角度、液膜形成、液丝分离及破碎成液滴等方面都比较吻合,验证了本文 SPH 方法的可行性。

(4) 本文数值结果与实验还缺乏定量对比,尤其对液丝的特征方法还需进一步研究;同时,定量研究还有待实验水平及测量水平的提高。

当然,本文用 SPH 方法对射流撞击雾化问题的研究还是初步的,还存在很多不足之处,如没有考虑气动力和表面张力的作用,没有考虑喷嘴对射流截面初速度的影响,这些都造成了仿真结果与文献实验结果的差异,这些问题还有待于在今后的工作中进一步解决。

参考文献:

- [1] 杨伟东,张蒙正.凝胶推进剂流变及雾化特性研究与进展[J].火箭推进,2005,31(5):37-42.
Yang Weidong, Zhang Mengzheng. Research and development of rheological and atomization characteristics of gelled propellants [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005, 31(5): 37-42. (in Chinese)
- [2] 张蒙正,陈炜,杨伟东,李军.撞击式喷嘴凝胶推进剂雾化及表征[J].推进技术,2009,30(1):46-51.
Zhang Mengzheng, Chen Wei, Yang Weidong, Li Jun. Atomization and characteristics of gelled propellant with impinging injector [J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(1): 46-51. (in Chinese)
- [3] Kline M C, Woodward R D, Burch R L, Cheung F B, Kuo K K. Experimental observation of impinging jet breakup utilizing laser-sheet illuminated photography [R]. AIAA-91-3569, 1991.
- [4] Kihoon J, Tacock K, Youngbin Y. The breakup characteristics of liquid sheets formed by like-doublet injectors [R]. AIAA-2002-4177, 2002.
- [5] Kampen J, Alberio F, Ciezki H K. Spray and combustion characteristics of aluminized gelled fuels with an impinging jet injector [J]. Aerospace Science and

丝的波动现象,这可能与实验的拍摄方式有关,实验图像只能呈现二维状态,而仿真结果却可以体现射流撞击的三维特征。

速度为 32.6m/s 时的实验及仿真结果如图 4。从实验结果(图 4(b))可以看出,由于速度的进一步增大,雾化形式进一步改变,液膜边缘的液丝减少,主要以液滴的形式存在,随着液滴的运动,较大的液滴逐渐破碎成较小的液滴,液滴数目和 4.7m/s 及 13.6m/s 时相比也明显增加,说明射流速度对雾化效果有很大影响。仿真结果的雾化模式和实验比较吻合,但液滴破碎不够均匀。

对比不同速度下实验所得的 x - y 平面流体分布状态可知,随着速度增加,液膜厚度不断增大,撞击作用所产生的不稳定逐渐增强,仿真结果也体现了这一特征。

从表 1 中文献实验结果可知,随着射流速度的增加,雾化角总体呈增大的趋势,本文数值仿真结果与实验基本一致(最大误差约为 9.35%);但是,当速度从 13.6m/s 增大到 32.6m/s 时,实验所得的雾化角有所减小,而本文所得的雾化角有所增大,但误差不大(误差为 8.4%),这主要是由于本文采用的实验流体的粘度很小,远小于幂律型流体,从文献[1-2]的研究结论可知,对高粘度流体,撞击速度越大,雾化角越大,但这个结论是否完全适用于低粘度流体还有待进一步研究。可以确定的是,随着撞击速度的增加,雾化效果越好,本文数值仿真及文献实验都证明了这一点。

不足之处:

1) 由于实验图像只能呈现流体的二维状态,从某一方向上拍摄会产生叠加效应,拍摄方向的微小变化都会使实验所得的图像有差异;即使流场处于相对稳定的状态,不同时刻所得的实验结果也会有差异,这种差异可能导致仿真结果与实验的差别。

2) 由于本文没有考虑气动力和表面张力的作用,使得本文的仿真结果在液丝破碎成液滴的阶段与实验有部分差异,主要表现在:液滴过大,破碎不够充分;从 x - y 平面观察,流体波动不够明显。这些都与气动力及表面张力有关,是下一步需要重点解决的问题。

3) 无论对牛顿流体还是幂律型非牛顿流体,射流撞击雾化时,液丝都是重要的存在状态,尤其对幂律型非牛顿流体的雾化,液丝更是最主要的存在状态^[2],如何描述和表征液丝对实现数值仿真与实验定

量对比具有重要的实际意义,是需要解决的重要问题。

3 结论

本文用 SPH 方法模拟了双股射流撞击雾化问题,研究了 SPH 方法求解较高雷诺数粘性流体的可行性,同时验证了双股射流撞击雾化问题简化物理模型的合理性,所得的结论如下:

(1) SPH 方法很适合射流撞击雾化等复杂界面运动问题,是解决液体射流撞击雾化问题的一种可行新方法。

(2) 将粘性流 SPH 方法应用于实际问题时,必须处理好人工应力与粘性力之间的关系,否则会导致“粘性失真”现象。

(3) 将双股射流撞击雾化过程的仿真结果与文献实验结果对比发现,SPH 仿真结果与实验在雾化角度、液膜形成、液丝分离及破碎成液滴等方面都比较吻合,验证了本文 SPH 方法的可行性。

(4) 本文数值结果与实验还缺乏定量对比,尤其对液丝的特征方法还需进一步研究;同时,定量研究还有待实验水平及测量水平的提高。

当然,本文用 SPH 方法对射流撞击雾化问题的研究还是初步的,还存在很多不足之处,如没有考虑气动力和表面张力的作用,没有考虑喷嘴对射流截面初速度的影响,这些都造成了仿真结果与文献实验结果的差异,这些问题还有待于在今后的工作中进一步解决。

参考文献:

- [1] 杨伟东,张蒙正.凝胶推进剂流变及雾化特性研究与进展[J].火箭推进,2005,31(5):37-42.
Yang Weidong, Zhang Mengzheng. Research and development of rheological and atomization characteristics of gelled propellants [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005, 31(5): 37-42. (in Chinese)
- [2] 张蒙正,陈炜,杨伟东,李军.撞击式喷嘴凝胶推进剂雾化及表征[J].推进技术,2009,30(1):46-51.
Zhang Mengzheng, Chen Wei, Yang Weidong, Li Jun. Atomization and characteristics of gelled propellant with impinging injector [J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(1): 46-51. (in Chinese)
- [3] Kline M C, Woodward R D, Burch R L, Cheung F B, Kuo K K. Experimental observation of impinging jet breakup utilizing laser-sheet illuminated photography [R]. AIAA-91-3569, 1991.
- [4] Kihoon J, Taeock K, Youngbin Y. The breakup characteristics of liquid sheets formed by like-doublet injectors [R]. AIAA-2002-4177, 2002.
- [5] Kampen J, Alberio F, Ciezki H K. Spray and combustion characteristics of aluminized gelled fuels with an impinging jet injector [J]. Aerospace Science and

- Technology, 2007, 11: 77—83.
- [6] Chihiro Inoue, Toshinori Watanabe, Takehiro Himeno. Study on atomization process of liquid sheet formed by impinging jets [R]. AIAA-2008-4847, 2008.
- [7] Ma Dongjun, Chen Xiaodong, Khare Prashant, Yang Vigor. Atomization patterns and breakup characteristics of liquid sheets formed by two impinging jets [R]. AIAA-2011-97, 2011.
- [8] Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics [J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1992, 30: 543—574.
- [9] 强洪夫, 陈福振, 高巍然. 修正表面张力算法的 SPH 方法及其实现[J]. 计算物理, 2011, 28(3): 375—384.
Qiang Hongfu, Chen Fuzhen, Gao Weiran. Smoothed particle hydrodynamics method with modified surface tension and its implementation [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2011, 28(3): 375—384. (in Chinese)
- [10] Monaghan J J. SPH without a tensile instability [J]. Journal of Computational Physics, 2000, 159: 290—311.
- [11] Morris J P, Patrick J Fox, Yi Zhu. Modeling low reynolds number incompressible flows using SPH [J]. Journal of Computational Physics, 1997, 136: 214—226.
- [12] Liu G R, Liu M B. 光滑粒子流体力学——一种无网格粒子法[M]. 韩旭, 杨刚, 强洪夫, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005: 124—125.
Liu G R, Liu M B. Smoothed particle hydrodynamics: A meshfree particle method [M]. Translated by Han Xu, Yang Gang, Qiang Hongfu. Changsha: Hunan University Press, 2005: 124—125. (in Chinese)
- [13] Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics [J]. Reports on Progress in Physics, 2005, 68: 1703—1759.
- [14] 强洪夫, 韩亚伟, 王坤鹏, 高巍然. 基于罚函数 SPH 新方法的水模拟充型过程的数值分析[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 245—250.
Qiang Hongfu, Han Yawei, Wang Kunpeng, Gao Weiran. Numerical simulation of water filling process based on new method of penalty function SPH [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 245—250. (in Chinese)
- [15] Adami S, Hu X Y, Adams N A. A new surface-tension formulation for multi-phase SPH using a reproducing divergence approximation [J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229: 5011—5021.

(上接第 16 页)

参考文献:

- [1] 沈祖炎, 陈杨骥, 陈学潮. 钢管结构极限承载力计算的力学模型[C]. 空间网格结构论文集. 上海: 同济大学出版社, 1991: 124—136.
Shen Zuyan, Chen Yangji, Chen Xuechao. A mechanical model for the analysis of ultimate strength of tubular structures [C]. Symposiums on Space Grid Structures and Reticulated Shells. Shanghai: Tongji University Press, 1991: 124—136. (in Chinese)
- [2] 哈敏强. 普通和新型抑制屈曲支撑的力学性能及应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2004: 5—6.
Ha Minqiang. Study on the mechanical performances and applications of conventional and innovative buckling restrained braces [D]. Shanghai: Tongji University, 2004: 5—6. (in Chinese)
- [3] Uang C-M, Nakashima M. Earthquake engineering: From engineering seismology to performance-based engineering [M]. USA: CRC Press, 2004: 450—453.
- [4] Sridhara B N. Sleeved compression member [P]. USA: 5175972, 1993.
- [5] Prasad B K. Experimental investigation of sleeved column [C]// American Institute of Aeronautics and Astronautics. Proceedings of the 33rd AIAA/ASCE Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Dallas USA: AIAA/ASCE, 1992: 991—999.
- [6] Domokos G, Holmes P, Royce B. Constrained Euler buckling [J]. Journal of Nonlinear Science, 1997, 7(3): 281—314.
- [7] Chai H. The post-buckling response of a bi-laterally constrained column [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46(7): 1155—1181.
- [8] 申波, 邓长根. 双钢管构件由点接触到线接触的连续过渡[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 154—160.
Shen Bo, Deng Changgen. Continuous transition from point contact to line contact between the axially compressed inner core and the flexible sleeve in a sleeved column [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 154—160. (in Chinese)
- [9] 申波, 邓长根. 套管构件中轴压内核与柔性套筒线接触的屈曲[J]. 工程力学, 2007, 24(11): 63—69.
Shen Bo, Deng Changgen. Buckling of line-contact segment between axially compressed inner core and flexible sleeve in a sleeved column [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11): 63—69. (in Chinese)
- [10] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 76—81.
Chen Ji. Stability of steel structures theory and design [M]. Beijing: Science Press, 2003: 76—81. (in Chinese)
- [11] 申波. 轴压套管构件静力稳定性的理论与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
Shen Bo. Theoretical and experimental investigations on the static stability of a sleeved column under axial compression [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [12] 姚谦峰, 陈平. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 20—23.
Yao Qianfeng, Chen Ping. Structure test of civil engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001: 20—23. (in Chinese)