

移动粒子半隐式方法 GPU 加速的 双股射流撞击雾化模拟^{*}

勾文进, 张 帅, 郑 耀

(浙江大学 航空航天学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 为实现双股射流撞击雾化过程的高效数值求解并探究射流速度和撞击角度对雾化特性的影响规律, 实现了移动粒子半隐式方法 (MPS) GPU 加速的双股射流撞击雾化模拟。GPU 加速程序的最大加速比为 16, 取得了较好的加速效果。将 GPU 加速 MPS 方法应用于典型工况下的双股射流撞击雾化模拟, 成功捕捉到了多尺度的液膜形成、液膜破碎成液丝继而破碎成液滴的瞬态过程, 模拟得到的液膜破碎长度及雾化角度与试验较为吻合, 误差分别为 11.7% 和 0.5%, 验证了 GPU 加速 MPS 方法在双股射流撞击雾化问题中处理能力。参数化分析了射流速度和撞击角度对液膜破碎长度、雾化角度及一次雾化液滴索尔直径的影响。结果表明撞击角度增加或者射流速度增加均会导致液膜破碎长度减小、雾化角度增加、一次雾化液滴索尔直径减小。

关键词: 雾化; 双股射流撞击; 移动粒子半隐式法; GPU 加速; 雾化角; 索尔直径

中图分类号: V434.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2019) 11-2554-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190089

Numerical Simulations of Impact Atomization of Two Jets Using Moving Particle Semi-Implicit Method with GPU Acceleration

GOU Wen-jin, ZHANG Shuai, ZHENG Yao

(School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to realize numerical simulation of impinging atomization of two jets and to investigate the effects of jet velocity and impinging angle on atomization characteristics, the GPU (Graphics Processing Unit) accelerated moving particle semi-implicit (MPS) method is carried out to simulate the atomization process. The maximum acceleration ratio of the GPU accelerated code is 16, which proves the validity of GPU acceleration. GPU accelerated code is applied to simulate the impact atomization of double jets under typical working conditions. The numerical simulations successfully capture the formation of liquid films, the breaking of liquid films into liquid filaments and the breaking of liquid filaments into droplets. The simulated liquid film breakup length and atomization angle are in good agreement with the experimental results, and the errors are 11.7% and 0.5%, respectively, which proves the validity of the GPU accelerated MPS method in the simulations of atomization problem. The parametric analysis of the effects of jet velocity and impact angle on breakup length, atomization angle and Sauter diameter of primary atomized droplets is carried out. The results show that the increase of impact

^{*} 收稿日期: 2019-01-30; 修订日期: 2019-04-10。

作者简介: 勾文进, 博士生, 研究领域为无网格方法及其并行加速。E-mail: wenjin_gou@zju.edu.cn

通讯作者: 张 帅, 博士, 副教授, 研究领域为计算流体力学。E-mail: shuaizhang@zju.edu.cn

引用格式: 勾文进, 张 帅, 郑 耀. 移动粒子半隐式方法 GPU 加速的双股射流撞击雾化模拟[J]. 推进技术, 2019, 40(11): 2554-2561. (GOU Wen-jin, ZHANG Shuai, ZHENG Yao. Numerical Simulations of Impact Atomization of Two Jets Using Moving Particle Semi-Implicit Method with GPU Acceleration [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(11): 2554-2561.)

angle or jet velocity will lead to the decrease of breakup length of liquid film, the increase of atomization angle and the decrease of Sauter diameter of primary atomized droplets.

Key words: Atomization; Impact of two jets; MPS method; GPU acceleration; Atomization angle; Sauter diameter

1 引言

液体火箭发动机中推进剂的雾化特性影响着燃烧稳定性和推力特性。由于结构简单,雾化性能较好,双股射流撞击雾化喷嘴广泛应用于液体火箭发动机当中^[1]。

目前对双股射流撞击式喷嘴雾化特性的研究以实验手段为主。Heidmann等^[2]对不同喷嘴直径、射流速度、撞击夹角、撞击点到喷口长度及不同液体属性对雾化性能的影响进行了实验分析。Jung等^[3]研究了双股射流撞击雾化的液膜破碎特征,对韦伯数、撞击角度等因素对破碎长度的影响进行了探讨。张蒙正等^[4]研究了在不同孔径比、撞击夹角及射流动量比情况下,两股互击式喷嘴雾化的喷雾扩散角、液滴尺寸、破碎长度、运动速度的变化。李龙飞等^[5]实验分析了不同喷嘴形式下的幂律型非牛顿推进剂的雾化性能。张蒙正等^[6]实验研究了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对其进行了分析,得到了一些定性结论。

Inoue等^[7]运用CIP-LSM方法模拟了双股液体射流的撞击雾化,采用Level-set和MARS相结合来追踪界面,成功模拟了液膜的形成过程,但模拟的液膜破碎与实验结果存在较大差距。Ma等^[8]和Chen等^[9]进行了双股液体射流撞击的雾化模拟,对比分析了不同雾化形式下液膜的破碎特性,计算使用VOF(volume of fluid)和自适应网格来提高界面分辨率,取得了较好的效果,但计算量很大。基于Gerris开源软件,李佳楠等^[10]对直流互击式喷嘴雾化现象进行了准直接数值模拟,对撞击波的形成机理和雾场液滴的尺寸分布规律进行了探讨和分析,对比分析了撞击夹角、孔径比、射流速度、动量比对雾化特性的影响规律。

无网格粒子法是一种纯Lagrange方法,在处理具有大变形、自由表面的问题时,具有网格方法无法比拟的巨大优势。强洪夫等^[11]将光滑粒子流体动力学(SPH)方法探索性地应用于凝胶推进剂一次雾化仿真研究,研究了撞击速度、撞击角度以及凝胶推进剂物性参数对雾化效果的影响。韩亚伟等^[12]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。强洪夫等^[13]运用SPH方法对典型的双股幂律型流体撞击雾化问题进行数值模拟与分析。刘虎等^[14]应用SPH方法进行了凝胶推进剂的射流撞击雾化仿真,并与实验结果进行了对比。勾文进^[15]探索性地将移动粒子半隐式(MPS)方法应用于双股撞击式喷嘴的雾化模拟,成功模拟了雾化的三个模态,但受限于MPS方法较大的计算量,缺乏定量分析。国内将MPS应用与射流撞击喷嘴雾化分析的文献较少。

为解决MPS方法计算量大的问题,Hori等^[16]率先实现了MPS方法的GPU并行,取得了较好的加速结果。朱小松^[17]实现了MPS方法的GPU加速,分析和对比了GPU上不同类型存储器的使用对加速效果的影响,并对二维和三维晃动问题进行了模拟。Kakuda等^[18]利用GPU加速MPS方法对二维和三维的溃坝模型进行了计算,取得了12倍的加速效果。李海州等^[19]对MPS方法中的邻域搜索和线性方程组两部分分别进行了GPU并行加速并分析加速效果,并以三维晃动和三维溃坝这两种典型的自由面大变形流动为例,比较了CPU+GPU相对于MLParticle-SJTU^[20]串行求解时的加速情况。Gou等^[21]实现了MPS方法的GPU并行,并模拟了等温多相燃料冷却剂相互作用流动,模拟结果与实验结果较为吻合。目前国内公开发表的资料中,采用GPU并行技术优化加速MPS方法的研究总体较少。

本文实现了MPS方法的GPU加速,并将其应用于两股液体射流撞击的雾化模拟;对典型工况下的雾化现象进行了模拟;分析了撞击角度、撞击速度对雾化角、液膜破碎长度和一次雾化液滴索尔直径的影响。

2 方法

2.1 基于GPU加速的MPS方法

MPS方法是一种完全拉格朗日粒子方法,其特点是连续介质流体用携带质量、密度、温度和能量等物理量的粒子来代替。控制方程中的各微分算子以粒子之间的相互作用的形式表达,粒子之间的相互作用通过“核函数”实现。粒子方法通过追踪各个粒子的运动变化规律获得整个流场的流动信息。由于连

续介质流体由粒子表示,界面始终清晰,克服了传统网格方法在模拟过程中存在的界面追踪问题,能够自然地模拟自由面、大变形流动等问题。

粒子法在自由面模拟和大变形流动的模拟方面有自己的优势,但计算量大。一方面,不同于基于欧拉观点的网格方法,MPS计算过程中粒子自由移动,每个时间步需要对邻域粒子进行检索;另一方面,不同于显式SPH方法,MPS方法的求解需要求解大型稀疏矩阵;这两部分在MPS方法求解过程中占据时间较长,同时也是并行的难点。GPU是一种新的可应用于大规模并行计算处理器和计算机集群的计算架构,最初主要作为游戏行业中的图形计算处理器,随着技术的发展,特别是浮点运算功能的实现,统一设备计算架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA)的发布,使得GPU逐渐适用与通用计算。基于GPU的高性能计算主要采用异构架构,即CPU+GPU模式,计算过程中使用CPU执行串行工作,控制主程序的复杂流程,将需要批量处理的向量数据传输给GPU存储器,由GPU的众多处理器执行快速的并行运算。为最大限度发挥GPU的优势,在程序开发时遵循了包括最小化GPU-CPU数据传输、最小化Warp内线程分支以及优化内存访问模式和多使用共享内存等原则。本文在文献[15]的基础上,实现了MPS方法的GPU并行,最大加速比为16,取得了较好的加速效果。

2.2 控制方程与离散

MPS法中,不可压缩控制方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$d\mathbf{u}/dt = -(1/\rho)\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (2)$$

式中 ρ 为流体的密度, $\mathbf{u}$ 为速度矢量, t 为时间, $\mathbf{F}$ 为体积力, p 为压力, ν 为运动黏度。MPS方法基于核函数对控制方程进行离散,其方程为

$$w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) = \begin{cases} r_e/r - 1 & (0 \leq r < r_e) \\ 0 & (r \geq r_e) \end{cases} \quad (3)$$

式中 r_e 为核函数影响域, r 为两个粒子之间的距离。粒子数值密度为

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \quad (4)$$

式中 $\mathbf{r}_j$ 和 $\mathbf{r}_i$ 分别为粒子 j 和粒子 i 的坐标。

MPS法采用梯度算子模型与拉普拉斯算子模型离散控制方程。梯度算子模型为

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (5)$$

式中 d 为空间维数, n_0 为初始粒子数密度, ϕ_i 为粒子 i 的物理量, ϕ_j 为邻居粒子 j 的物理量。拉普拉斯算子模型为

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n_0} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2}{w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)} \quad (7)$$

MPS方法采用了SMAC算法对控制方程进行求解。其压力泊松方程为

$$\langle \nabla^2 p^{n+1} \rangle = -\frac{\rho}{\Delta t^2} \cdot \frac{\langle n^* \rangle_i - n^0}{n^0} \quad (8)$$

式中 n^* 为显式阶段粒子移动后的粒子数密度, Δt 为时间步长, p^{n+1} 为下一时间步压力值。压力求解后,速度修正量为

$$\mathbf{u}_i' = -(\Delta t/\rho) \nabla p_i^{n+1} \quad (9)$$

最后更新速度和位置

$$\mathbf{u}_i^{n+1} = \mathbf{u}_i^* + \mathbf{u}_i' \quad (10)$$

$$\mathbf{r}_i^{n+1} = \mathbf{r}_i^* + \mathbf{u}_i' \Delta t \quad (11)$$

式中 $\mathbf{u}_i^*$ 、 $\mathbf{r}_i^*$ 分别为显式阶段的速度和位置。

利用前述的梯度模型和拉普拉斯模型将流体的控制方程离散并求解,求解流程如图1所示。如图所示,为减少设备端主机端数据传输,所有计算均在GPU上执行,数据只有需要保存时才会被传输到主机端。本文在进行显式计算时,加入表面张力的计算。

2.3 表面张力模型

本文采用一种基于自由能的表面张力模型^[22],该模型非常易于应用到MPS中。粒子 i 与其邻域粒子 j 之间的势能可表示为

$$E(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) = Ce(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (12)$$

式中

$$e(|\mathbf{r}_{ij}|) = \begin{cases} \frac{1}{3} (|\mathbf{r}_{ij}| - \frac{3}{2} \Delta l + \frac{1}{2} r_e) (|\mathbf{r}_{ij}| - r_e)^2 & (|\mathbf{r}_{ij}| < r_e) \\ 0 & (|\mathbf{r}_{ij}| \geq r_e) \end{cases} \quad (13)$$

式中 Δl 为粒子之间的初始距离, $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$ 为粒子之间的距离向量。参数 C 可以从表面张力系数估算而来。

表面张力系数表达式为

$$\sigma = \partial P / \partial S \quad (14)$$

式中 P 和 S 分别为自由表面自由能和表面积,在

粒子法中, S 可表示为 $(\Delta l)^2$, 根据式 (13), (14) 即可推导出 C 的计算公式为

$$C = 2 \frac{(\Delta l)^2}{\sum_{i \in A, j \in B} e(|r_{ij}|)} \sigma \quad (15)$$

则由于粒子间势能引起粒子间作用力, 可由下式计算

$$f_{ij} = -\frac{1}{\rho(\Delta l)^3} \frac{\partial E(|r_{ij}|)}{\partial |r_{ij}|} r_{ij} \quad (16)$$

最后可得到粒子 i 所受到的表面张力为

$$f_i = \sum_{j \neq i} f_{ij} \quad (17)$$

为解决上述表面张力模型在粒子分布不规律时易出现数值不稳定问题, 在本文计算中采用了以下光顺算法

$$f_i^{\text{smooth}} = f_i + C_{\text{smooth}} \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{(f_j - f_i) \cdot r_{ij}}{|r_{ij}|^2} r_{ij} w_{ij} \quad (18)$$

式中 C_{smooth} 为光顺系数, 本文取值为 1。

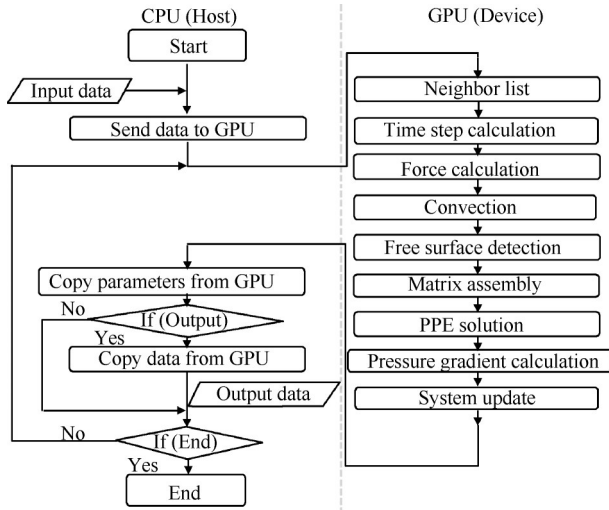


Fig. 1 Flow chart of GPU accelerated MPS method

3 结果与讨论

3.1 计算模型

本文所考虑的双股射流雾化计算模型如图 2 所示, 夹角为 θ 的两股圆柱形射流位于 XOY 平面, 以初始速度 V 沿各自轴线方向运动, 在 O 点处发生撞击, O 点称为撞击点, 进而在 YOZ 面附近形成液膜、液丝和液滴, 雾化角定义为液膜边缘与撞击点形成的夹角 $\angle AOB$ 。本文计算中的射流密度为 998.2 kg/m^3 , 粘性系数为 $1.002 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 表面张力系数为 $7.3 \times 10^{-2} \text{ N/m}$, 喷嘴直径为 1 mm , 雾化现象稳定后计算规模为 60 万

粒子左右。

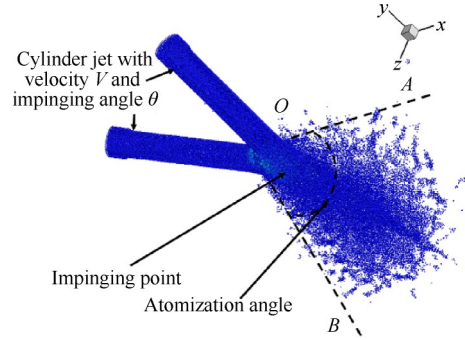


Fig. 2 Schematic diagram of direct impingement nozzle atomization

液滴直径的统计方法为在某一时刻, 统计位于撞击点下游 10 mm 与 20 mm 处厚度为 1 mm 的长方体区域内液滴的数目 N_i 及尺寸 D_i , 如图 3 所示。根据索尔平均直径 SMD 计算公式为

$$SMD = \frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2} \quad (19)$$

计算得到雾化区域的 SMD , 并近似认为这是该平面该时刻的 SMD 。对不同时刻该平面的 SMD 进行算术平均即认为是该平面的 SMD 。由于计算量的限制, 本文只统计了一次雾化中液滴的 SMD 。液膜的破碎长度定义为观察到的自撞击点到液膜完全破碎边缘的长度, 其中破碎边缘为液丝从液膜上完全剥离时的位置, 如图 3 所示。

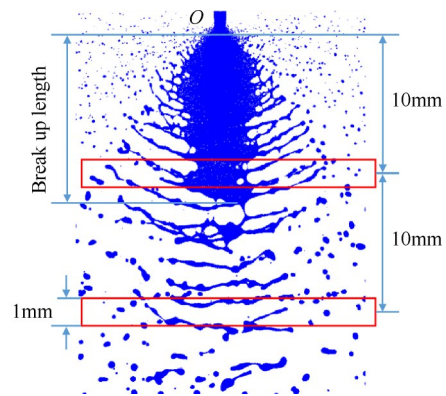


Fig. 3 Schematic diagram of breakup length and SMD measurement area

3.2 GPU 加速 MPS 方法验证

为验证 GPU 加速 MPS 方法对雾化问题的处理能力, 本文对典型的雾化现象进行了模拟。计算中撞击角 $\theta = 60^\circ$, 撞击速度为 $V = 12.75 \text{ m/s}$ 。

图 4 给出了模拟的不同时刻的雾化形态。射流

撞击后,在撞击方向两侧形成液膜。随着时间的推进,膜面积逐渐增大,液膜存在不稳定波,造成边缘破碎,出现不稳定的液丝和液丝网络。随后液丝从液膜边缘剥离,液丝进而断裂破碎成小液滴。因此,本文应用GPU加速MPS方法进行射流撞击雾化仿真,成功模拟了雾化过程中的液膜、液丝的形成及破碎以及液丝破碎成液滴的多尺度现象和瞬态过程。

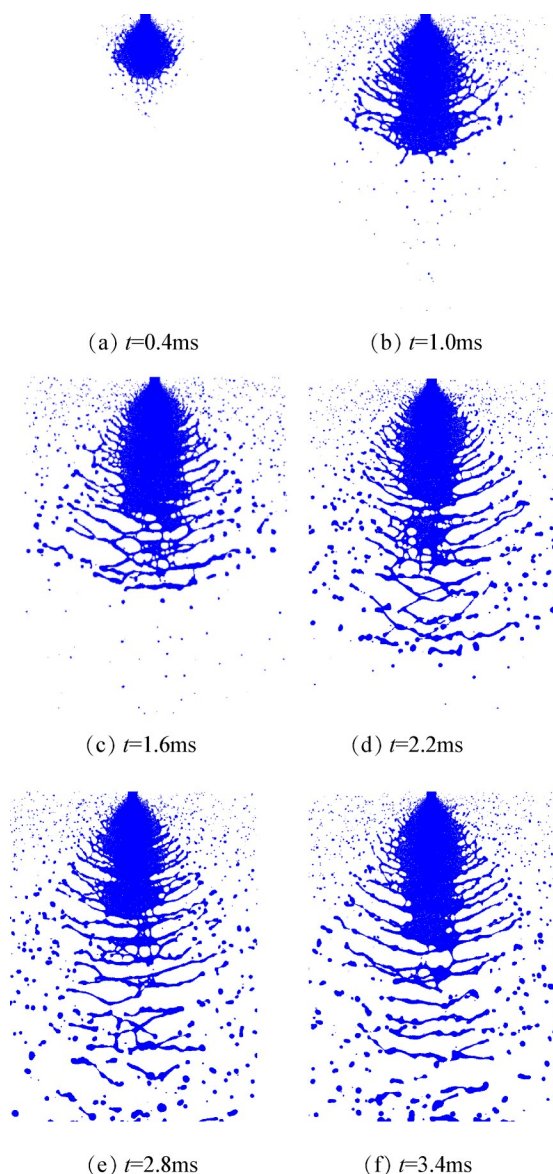


Fig. 4 Numerical results of sequential atomization process

当液膜破碎可以形成周期性脱落的液丝时,认为雾场达到稳定状态。图5为数值计算结果与文献[10]中的实验结果照片对比。由图可知,两者的雾场结构相似,根据文献[10],实验所得雾化角为 100.5° ,破碎长度为14mm。本文计算所得雾化角和液膜破碎长度分别为 99.98° 和12.35mm。与试验结

果相比,模拟的雾化角和液膜破碎长度误差分别为0.5%和11.7%,比文献[10]模拟的分别为4.9%和21%的误差要小。

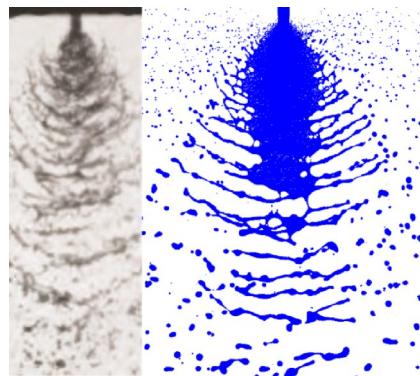


Fig. 5 Comparison between numerical and experimental results

由上面的分析可知,本文开发的GPU加速MPS方法成功模拟出了两股射流撞击形成液膜,液膜波动破碎成液丝,液丝进一步破碎成液滴的典型雾化过程,并且模拟得到的雾化角及液膜破碎长度与试验吻合较好。证明了GPU加速MPS具有有效处理射流撞击雾化问题的能力。

3.3 撞击角的影响

撞击角度是双股射流撞击式喷嘴的重要工作参数,对撞击后的液膜破碎长度、雾化角度和液滴尺寸都有较大影响,本文计算了一系列不同撞击角的雾化过程,射流速度定为 $V=12.75\text{m/s}$,撞击角 $\theta=50^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 。

图6为不同撞击角雾化过程的计算结果,每个算例均给出了正面和侧面的雾场图片,总体来说,各工况下雾化过程及雾场的结构相似,但撞击角度的变化对雾化角、液膜破碎长度和一次雾化液滴SMD有较明显的影响。

如果将射流速度分解为雾化平面与垂直于雾化平面两个分量,参与撞击的为垂直于雾化平面的分量。随着撞击角度的增加,参与撞击的分量增加,射流不稳定加剧,流体内部波动更大,表现为撞击波的波动幅值更大,这从图6左半部分可以清晰地看出。更大的波动幅度导致液膜在更短的距离内达到其破碎临界点,从而使液膜破碎长度变小,如图7所示,撞击角度较小时,模拟的破碎长度与试验结果吻合较好,随着撞击角度增大,液膜变化更加剧烈,误差增大,撞击角为 90° 时误差最大至23%。同时,撞击分量

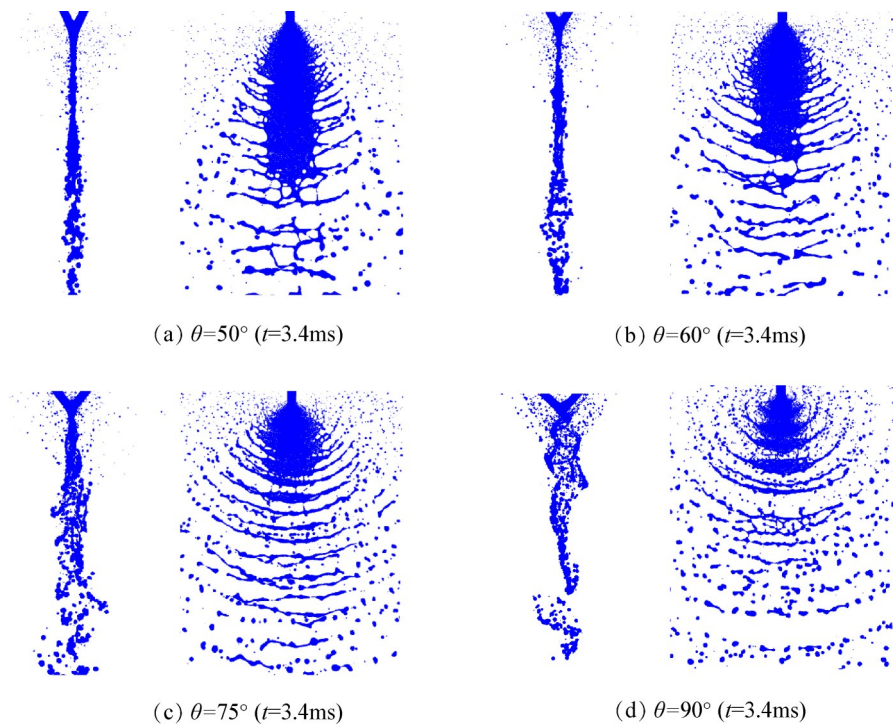


Fig. 6 Numerical results at different impinging angles

的增加会增大流体向四周流动的趋势,造成雾化角度的增加,如图 8 所示。对各撞击角度下的一次雾化液滴 SMD 进行了统计,由图 9 可知,随着撞击角度的增加,一次雾化的 SMD 减小。

以上分析可知,增加撞击角度有助于改善雾场。但是从图 6(d) 可以看出,撞击角度为 90° 时,有大量液滴向喷嘴的反向流动,不利于发动机的正常工作,因此撞击角不宜取值过大。

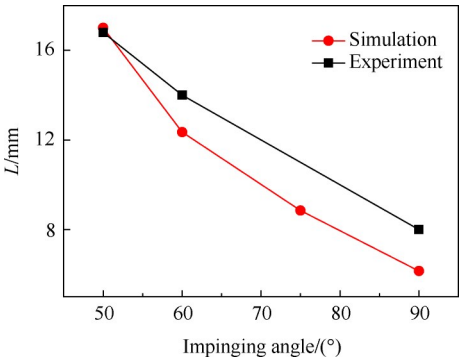


Fig. 7 Variation of breakup length of liquid sheet at different impinging angles

3.4 射流速度的影响

射流速度是直流撞击式喷嘴单元重要的工作参数,当射流密度与喷嘴直径相同时,改变射流速度可改变射流的质量流量。为研究射流速度对雾化特性的影响,本

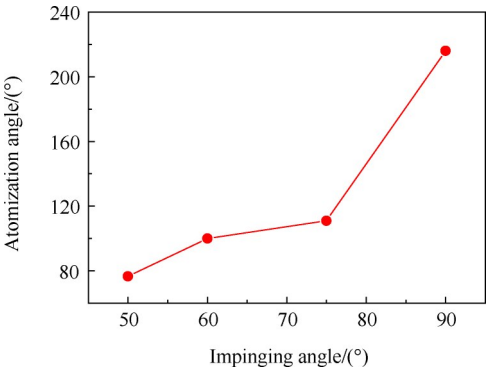


Fig. 8 Variation of atomization angles at different impinging angles

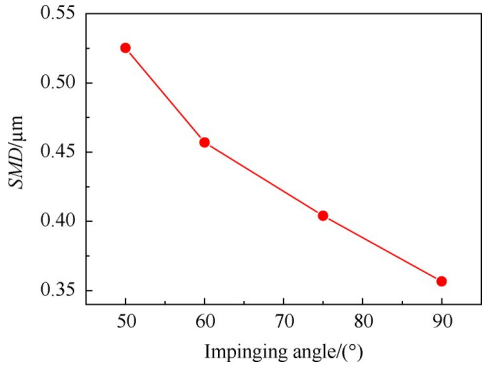


Fig. 9 Variation of primary atomized SMD of various impinging angles

文计算了一系列不同射流速度的雾化过程。撞击角度 $\theta=60^\circ$, 射流速度 $V=6.38\text{m/s}, 9.37\text{m/s}, 12.75\text{m/s}$ 。

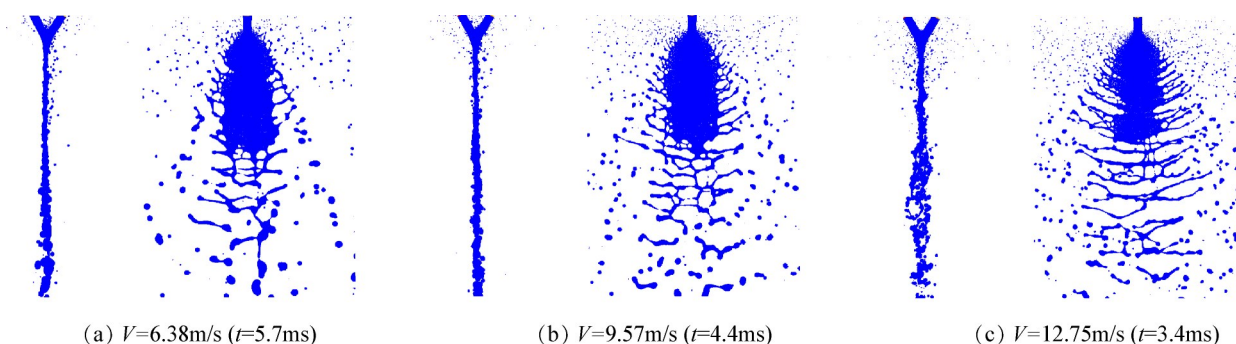


Fig. 10 Numerical results of various jet velocity

图 10 为不同射流速度下雾化过程的计算结果, 分别给出了各工况正面和侧面雾场图片。由图可知, 射流速度对液膜破碎长度, 雾化角度和一次雾化液滴 SMD 均有影响。撞击角度不变, 随着射流速度增加, 射流的撞击分量会增加, 由 3.3 节的分析可知, 这会导致液膜破碎长度的减小和雾化角度的增加, 如图 11 和图 12 所示。统计了不同射流速度下一次雾化液滴的 SMD , 结果如图 13 所示, 由图可知, 撞击角度不变的情况下, 一次雾化的液滴 SMD 随着射流速度的增加而减小。

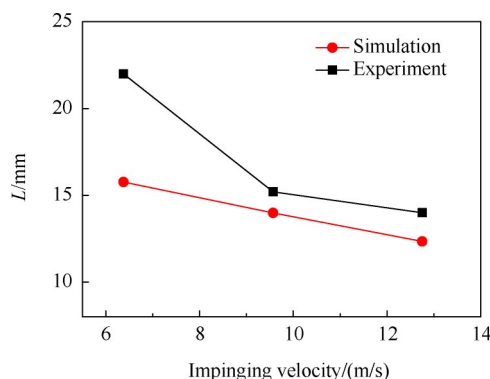


Fig. 11 Variation of breakup length of liquid sheet at different jet velocities

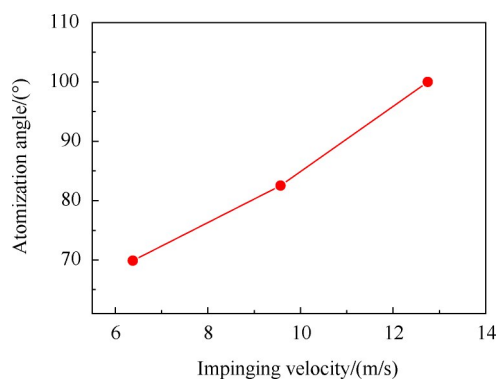


Fig. 12 Variation of atomization angle at different jet velocities

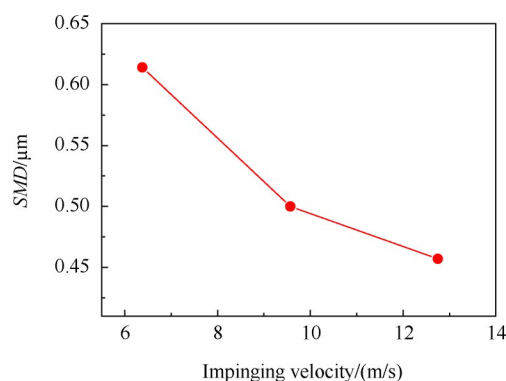


Fig. 13 Variation of primary atomized SMD at different jet velocities

4 结 论

(1) 本文开发的 GPU 加速 MPS 方法最大加速比为 16, 取得了较好的加速效果。

(2) 典型工况下, MPS 方法可有效处理存在界面大变形、多尺度的射流撞击雾化问题, 可清晰地捕捉到一次雾化中液膜和液丝的形成与破碎, 计算得到的液膜破碎长度、雾化角度与试验吻合较好, 误差分别为 11.7% 和 0.5%。

由于当前计算资源的限制, 只比较了一次雾化液滴的 SMD , 后续需要开展相关大规模模拟, 对典型工况下二次雾化液滴 SMD 及其分布规律进行数值与实验的对比。

参考文献:

- [1] 张蒙正, 张泽平, 李 鳌, 等. 两股互击式喷嘴雾化性能实验研究[J]. 推进技术, 2000, 21(1): 57-59. (ZHANG Meng-zheng, ZHANG Ze-ping, LI Ao, et al. Experimental Research on Spray Properties of Unlike Impinging Injectors[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(1): 57-59.)
- [2] Heidmann M F, Priem R J, Humphrey J C. A Study of Sprays Formed by Two Impinging Jets [C]. *Cleveland*:

- National Advisory Committee for Aeronautics, 1957.
- [3] Jung K, Khil T, Yoon Y. The Breakup Characteristics of Liquid Sheet Formed by Like-Douplet Injectors[C]. *Indianapolis: 38th American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2013.
- [4] 张蒙正, 傅永贵, 张泽平, 等. 两股互击式喷嘴雾化研究及应用[J]. 推进技术, 1999, 20(2): 73-76. (ZHANG Meng-zheng, FU Yong-gui, ZHANG Ze-ping, et al. Spray Property Research and Application of Unlike Impinging Injector [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(2): 73-76.)
- [5] 李龙飞, 张蒙正, 杨伟东, 等. 喷嘴形式对幂律型非牛顿推进剂雾化特性的影响[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2987-2992.
- [6] 张蒙正, 陈 炜, 杨伟东, 等. 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 Meng-zheng, CHEN Wei, YANG Wei-dong, et al. Atomization and Characteristics of Gelled Propellant with Impinging Injector [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(1): 46-51.)
- [7] Inoue C, Watanabe T, Himeno T. Study on Atomization Process of Liquid Sheet Formed by Impinging Jets [C]. *Hartford: 44th American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2008.
- [8] Ma D J, Chen X D, Khare P. Atomization Patterns and Breakup Characteristics of Liquid Sheets Formed by Two Impinging Jets[C]. *Orlando: 49th American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2011.
- [9] Chen X D, Ma D J, Yang V. Mechanism Study of Impact Wave in Impinging Jets Atomization[C]. *Nashville: 50th American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2012.
- [10] 李佳楠, 费 俊, 杨伟东, 等. 直流互击式喷注单元雾化特性准直接数值模拟[J]. 推进技术, 2016, 37(4): 713-725. (LI Jia-nan, FEI Jun, YANG Wei-dong, et al. Quasi-Direct Numerical Simulation on Atomization Characteristics Impinging Jets Injector [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(4): 713-725.)
- [11] 强洪夫, 刘 虎, 韩亚伟, 等. 基于 SPH 方法的凝胶推进剂一次雾化仿真研究[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(1): 61-66.
- [12] 韩亚伟, 强洪夫, 刘 虎. 双股液体射流撞击雾化的 SPH 方法数值模拟[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 17-23.
- [13] 强洪夫, 韩亚伟, 王 广, 等. 幂律型流体雾化 SPH 方法数值分析[J]. 推进技术, 2013, 34(2): 240-247. (QIANG Hong-fu, HAN Ya-wei, WANG Guang, et al. Numerical Analysis of Atomization Process of Liquid with Power Law Model Based on SPH Method [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(2): 240-247.)
- [14] 刘 虎, 强洪夫, 韩亚伟, 等. 幂律型凝胶推进剂射流撞击雾化 SPH 模拟[J]. 推进技术, 2015, 36(9): 1416-1425. (LIU Hu, QIANG Hong-fu, HAN Ya-wei, et al. SPH Simulation of Atomization Characteristics of Power-Law Gelled Propellant Formed by Two Impinging Jets [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(9): 1416-1425.)
- [15] 勾文进. 基于 MPS 方法的直流撞击式喷嘴雾化模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [16] Hori C, Gotoh H, Ikari H, et al. GPU-Acceleration for Moving Particle Semi-Implicit Method [J]. *Computers & Fluids*, 2011, 51(1): 174-183.
- [17] 朱小松. 粒子法的并行加速及在液体晃荡研究中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [18] Kakuda K, Nagashima T, Hayashi Y. Particle-Based Fluid Flow Simulations on GPGPU Using CUDA [J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2012, 88(1): 17-28.
- [19] 李海州, 唐振远, 万德成. 三维自由面流动模拟中 GPU 并行计算技术[J]. 海洋工程, 2016, 34(5): 20-29.
- [20] Tang Z, Wan D. Numerical Simulation of Impinging Jet Flows by Modified MPS Method [J]. *Engineering Computations*, 2015, 32(4): 1153-1171.
- [21] Gou W, Zhang S, Zheng Y. Simulation of Isothermal Multi-Phase Fuel-Coolant Interaction Using MPS Method with GPU Acceleration [J]. *Kerntechnik*, 2016, 81(3): 330-336.
- [22] 张 帅, 解利军, 郑 耀. 基于移动粒子半隐式法的表面张力模拟[J]. 计算力学学报, 2011, 28(3): 345-349.

(编辑: 梅 瑛)