

离心式喷嘴一次破碎与二次雾化的数值模拟

徐 文¹, 高新妮², 胡保林², 杨建文², 杨 斌¹, 王 莹¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;

2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要:离心式喷嘴具有轴向较大的旋转速度分量,在其诱导下会产生空气芯,使得喷嘴出口处产生空心锥液膜。空心锥液膜会发生一次破碎和二次雾化,流动行为较为复杂。采用流体体积函数转换成离散相模型(VOF-to-DPM)这种结合了流体体积法和欧拉-拉格朗日方法的多相流模型,并结合自适应网格细化方法,针对双切向孔离心式喷嘴雾化流场特性展开研究。分析了空心锥液膜的产生、发展到发生一次破碎和二次雾化的全过程。结果表明:基于 VOF-to-DPM 多相流模型模拟所得喷嘴雾化角与实验所测得雾化角基本吻合,验证了所提数值模型的可靠性;计算过程中自适应网格的存在可以更加准确地模拟液膜的形成;空心锥液膜从发展到发生一次破碎的过程中,随着质量流量的增加而更加稳定;液膜二次雾化所产生的液体颗粒总数随着质量流量的增加而减少,且颗粒粒径大小分布更加均匀。

关键词:离心式喷嘴;数值模拟;VOF-to-DPM;空心锥液膜;一次破碎;二次雾化

中图分类号:V19 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2022)04-0013-08

Numerical simulation of primary breakup and secondary atomization for centrifugal nozzle

XU Wen¹, GAO Xinni², HU Baolin², YANG Jianwen², YANG Bin¹, WANG Ying¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The centrifugal nozzle has a large axial rotation velocity component, which induces an air core to produce a hollow conical liquid film at the nozzle outlet. The hollow conical liquid film will undergo the primary breakup and secondary atomization, and the flow behavior is complex. In this paper, a multiphase flow model named Volume of Fluid-to-Discrete Phase Model (VOF-to-DPM) is adopted and it combines the Volume of Fluid method and the Euler-Lagrange method. Combined with the adaptive mesh refinement method, the characteristics of atomization flow field of the centrifugal nozzle with double tangential holes are studied. The whole process from the generation, development to the primary breakup and

收稿日期:2022-04-22;修回日期:2022-06-06

基金项目:上海市自然科学基金(21ZR1462000)

作者简介:徐文(1996—),女,硕士,研究领域为气液两相流的数值模拟仿真。

通信作者:王莹(1984—),女,博士,副教授,研究领域为多相流和流动控制。

secondary atomization of the hollow conical liquid film is analyzed. The results show that the atomization angle of the nozzle simulated based on the VOF-to-DPM multiphase flow model is basically consistent with the atomization angle measured by the experiment, which verifies the reliability of the numerical model in this paper. The existence of adaptive grid in the calculation process can simulate the formation of the liquid film more accurately. The hollow conical liquid film is more stable with the increase of mass flow during the process from development to primary breakup. The total number of liquid particles produced by the liquid film secondary atomization decreases with the increase of mass flow rate, and the particle size distribution is more uniform.

Keywords: centrifugal nozzle; numerical simulation; VOF-to-DPM; hollow conical liquid film; primary breakup; secondary atomization

0 引言

离心式喷嘴结构简单,并具有良好的雾化性能,广泛应用于燃气轮机、液体火箭发动机、内燃机等工业领域^[1-6]。关于离心式喷嘴雾化场的研究,大多数学者使用 CFD 仿真技术对其流场流动特性进行了数值模拟^[7-9]。文献[10-11]均采用流体体积法(VOF)对不同类型离心式喷嘴内部流场的流动过程进行了数值模拟研究。Wang 等数值模拟研究了喷嘴内部流动特性与喷嘴外液膜破裂机理,指出了流场特性对液膜不稳定性的影响^[12]。潘华辰等对离心式喷嘴内部结构进行改进优化,结合数值模拟与实验研究了切向槽位置和倾斜角度对喷嘴雾化质量的影响^[13]。然而目前关于离心式喷嘴雾化特性的研究大多为喷嘴内部的流场或单一的液膜破碎过程,未考虑到液膜的二次雾化。因此本文决定寻找一种可同时研究液膜破碎和雾化的多相流模型对离心式喷嘴进行数值模拟研究。

VOF-to-DPM 多相流模型结合了流体体积法和欧拉-拉格朗日两种方法,不仅可以预测初始射流和初始破碎,同时可以跟踪离散液滴^[14-15]。目前已有部分学者将该模型应用到他们的研究领域,并证明了该模型的可靠性^[16-17]。Zhou 等采用 VOF-to-DPM 模型和自适应网格细化方法研究了不同径向喷孔射流速度下针栓式喷射器上的冲击形态以及在一次破碎下喷雾半锥角的形成、压力场分布、喷雾粒径分布和液速分布等^[18]。Fevralskikh 使用 VOF-to-DPM 方法对水陆两用飞机气垫船起落架溅射过程进行了数值模拟,验证了该技术在水陆两用飞机气垫船起落架布置方案的开发与设计中具有

广阔的应用前景^[19]。Nazeer 等采用 VOF-to-DPM 模型对内混式双流体 Y 型喷雾器多相流进行建模,研究了该喷雾器的内部流动特性和雾化机理,结果表明该多相流模型仿真结果可靠^[20]。综上所述,VOF-to-DPM 多相流模型可同时模拟液体的流动、破碎和离散,适用于离心式喷嘴雾化性能的研究,因此本文决定使用该多相流模型模拟离心式喷嘴完整的雾化场,证明该模型对喷嘴两相流研究的适用性与可靠性。

为同时研究离心式喷嘴的一次破碎与二次雾化过程,本文在 ANSYS Fluent 中采用 VOF-to-DPM 多相流模型模拟了喷嘴的雾化流场。首先对比分析了实验与数值模拟所得的雾化角度,验证了 VOF-to-DPM 多相流模型的可靠性;其次分析了不同工况下液膜的产生与发展规律;最后通过雾化场的三维图分析了不同工况下液膜的一次破碎过程以及二次雾化所产生的液滴颗粒情况。

1 数值计算模型

1.1 控制方程

在本文离心式旋流喷嘴两相流的研究中,工作介质为液态水和空气,均为牛顿流体,工作过程中与外界无热量交换,因此本文流场只需求解两相流的连续性方程和纳维-斯托克斯方程,即

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\nu} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \boldsymbol{\nu})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{\nu}^2) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{F} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体的密度; $\boldsymbol{\nu}$ 为流体的速度; t 为时间; p 为压力; μ 为流体黏度; \boldsymbol{F} 为气液接触面的表面

张力。

在数值模拟的过程中,气相和液相两者的体积分数之和为 1,可用 φ 表示流体体积比函数,即为流体体积与网格单元体积的比值。当 $\varphi = 0$ 时,表示区域内均为空气;当 $\varphi = 1$ 时,表示区域内均为液态水;当 $0 < \varphi < 1$ 时,表示区域内同时存在空气和液态水。

因此可用 φ 控制单元的物理性质,将密度和黏度插值为

$$\rho = \varphi \rho_l + (1 - \varphi) \rho_g \quad (3)$$

$$\mu = \varphi \mu_l + (1 - \varphi) \mu_g \quad (4)$$

式中: ρ_l 和 ρ_g 分别为液体和气体的密度; μ_l 和 μ_g 分别为液体和气体的黏度。

1.2 几何模型

本文计算所用喷嘴模型为双切向孔离心式喷嘴,其中两个切向口之间为中心旋转 180° 的关系,喷嘴内部流体域三维示意图如图 1 所示。喷嘴工作过程中,液态水通过两个切向孔逆时针旋转进入喷嘴旋流室,在离心力作用下经过收缩段到达喷嘴出口段,最终以锥形薄膜的形式喷出。锥形液膜到达喷嘴外部区域后会发生破碎和雾化,最终形成细小的液滴群。

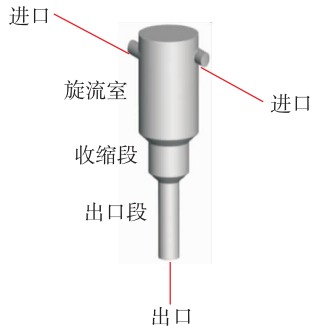


图 1 离心式喷嘴三维示意图

Fig. 1 3D schematic diagram of centrifugal nozzle

为使流体流出喷嘴后能够得到充分的发展,现将整体计算域设计成如图 2 所示的区域。其中喷嘴出口中心位于坐标原点,喷嘴外部流体域设计为直径为 30 倍的喷嘴出口直径、高度为 15 倍的喷嘴出口直径的圆柱形区域,并将接近喷嘴出口的区域进行分块,分割成直径为 10 倍的喷嘴出口直径、高度为 5 倍的喷嘴出口直径的圆柱形区域。

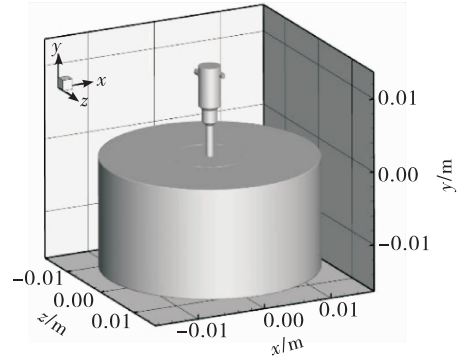


图 2 计算域三维图

Fig. 2 3D graph of computational domain

1.3 计算方法

数值模拟过程中将进口设置为质量流量进口,喷嘴壁面设置为无滑移壁面,喷嘴外部区域为敞口区域,边界条件设置为压力出口。计算采用 ANSYS Fluent 软件中的 VOF-to-DPM 多相流模型^[21],该模型结合了流体体积法和欧拉-拉格朗日方法。首先在足够细的网格上使用 VOF 模型模拟初始射流和液膜的初级破裂,随后 VOF-to-DPM 模型转换算法会在 VOF 解中自动找到从液相分离出来的致密液体质量,由 DPM 模拟分散喷雾的大量稀释区域^[21]。

在多相流模型设置中将第一相设置为空气,第二相设置为液态水,初始计算域均为气相,液相从进口进入并在气体中运动。为对液体破碎成液滴的高精度计算,计算过程中采用网格自适应方法自动细化和粗化流体变化迅速的位置,以解决这些区域的流动特征,并节约计算资源。

使用 VOF-to-DPM 模型计算喷嘴流场时,压力离散方法采用 PRESTO,压力速度耦合方法采用 PI-SO,动量方程均采用一阶迎风格式,湍流模型采用 SST $k-\varepsilon$ SBES 模型。

1.4 网格划分与无关性验证

多面体网格是一种混合网格划分方案,它在区域核心内部生成轴向直角网格,在边界附近生成四面体网格。笛卡尔单元上的悬挂节点细化使单元大小从边界到域内部有效过渡,并将曲面网格中的三角形面转化为六边形面。这可以有效处理复杂的几何形状、内壁和缝隙,并且网格总数会低于四面体网格和混合网格,使得解收敛通常更快,会节省一些计算费用。因此本文网格划分过程中采用

多面体网格,如图 3 所示。



图 3 三维计算域网格及喷嘴局部放大图

Fig. 3 3D computational domain grid and partial enlarged view of nozzle

为确定一套最佳的网格,现设置 4 组不同疏密程度的网格,网格量分别为 2.3×10^5 、 5.3×10^5 、 7.1×10^5 和 1.15×10^5 ,如表 1 所示。设置进口质量流量为 $0.007\ 31\ \text{kg/s}$,以喷嘴雾化角为判断依据。当网格量为 2.3×10^5 时,数值模拟所得雾化角为 $45.126\ 1^\circ$,而 5.3×10^5 、 7.1×10^5 和 1.15×10^5 网格计算出来的雾化角均超过 60° ,且彼此之间最大误差仅为 $0.16\ %$ 。因此在追求计算精度的同时,考虑到计算成本,最终选择 7.1×10^5 的网格进行后续计算。

表 1 网格无关性验证数据对比

Tab. 1 Data comparison of grid independence verification

| 网格量/ 10^5 | 2.3 | 5.3 | 7.1 | 1.15 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| 雾化角/ $(^\circ)$ | 45.126 1 | 60.038 7 | 60.137 1 | 60.105 6 |

2 结果与分析

2.1 模型验证

本文对两种不同工况的喷嘴分别进行了实验与数值模拟,并对比分析了实验与数值模拟的雾化角度。实验过程中采用流量计测得喷嘴进口的流量,使用京航相机和远心镜头对不同工况下的喷嘴雾化角进行拍摄。当喷嘴运行稳定后,每种工况随机选取 10 张图片,利用 MATLAB 对实验图像进行处理,计算出这 10 张图片中的液膜雾化角,最后求解不同工况下的喷嘴雾化角平均值。

后采用上述计算方法和网格数值模拟了与实验相同两种工况下的喷嘴雾化场。当液膜充分发展,且计算域内部液滴颗粒总数变化小于 $1\ %$ 时,认

为计算已经收敛。统计此时的喷嘴雾化锥角,与实验值进行对比,如表 2 所示。由于在实验过程中水从出口流出时与壁面具有一定的黏性作用,而数值模拟简化了部分物性参数,因此数值模拟得到的雾化锥角略低于实验值。但数值模拟结果与实验值大小接近,且两者之间的误差均低于 $5\ %$,因此认为本文数值模拟结果可靠,所以可采用本文数值模拟方法研究喷嘴的雾化特性。

表 2 喷嘴雾化角对比

Tab. 2 Comparison of nozzle atomization angle

| 进口质量 流量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$ | 实验 雾化角/ $(^\circ)$ | 数值模拟 雾化角/ $(^\circ)$ | 误差/ $\%$ |
|---|-----------------------|-------------------------|----------|
| 0.007 31 | 62.41 | 60.14 | 3.64 |
| 0.012 80 | 69.90 | 66.42 | 4.98 |

2.2 液膜的形成

不同的质量流量进口会使喷嘴进口流速不同,但流体运动方式相同。当液态水以一定的轴向速度向喷嘴出口方向推进时,由于出口段壁面收缩而在喷嘴出口处附近形成旋转薄液层,如图 4 所示。同时由于壁面收缩,出口段的切向速度会大幅增加,使得喷嘴中心形成了一个低压区,导致空气被拉入低压区,形成诱导空气芯。由于空气芯的存在,当水从喷嘴出口喷出之时,形成了锥形液膜。但由于离开了壁面,且喷嘴出口处的网格不够细,造成了液膜无法连续。因此本文采用了网格自适应的方法,使得网格会在流体流动的区域被选择性地细化,从而形成连续的液膜并准确捕捉小颗粒。如图 4 所示,当没有网格自适应时,液膜表现为断断续续的液滴形式,这与实际情况不相符。当应用网格自适应时,在图 5 中,网格会顺着液态水的流动在气液交界处自动细化,使得液膜连续。

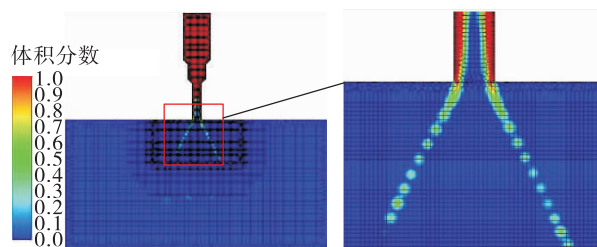


图 4 无网格自适应时中心截面水的体积分数图

Fig. 4 Volume fraction of water in the center section without mesh adaptation

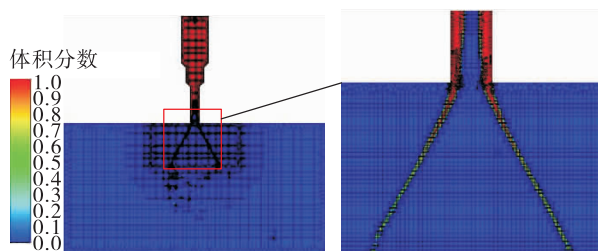


图 5 有网格自适应时中心截面水的体积分数图

Fig. 5 Volume fraction of water in the center section with mesh adaptation

2.3 不同工况下液膜发展规律

在不同的进口质量流量下,喷雾场运动形式相似,但由于液膜流动速度的不同,使得不同工况下的液膜变化和发展规律有所差异。首先液膜在发展过程中,其扩张范围逐渐变广,厚度逐渐减小,且液膜之中的空气含量上升,导致水的体积分数为 1 的区域也逐渐减小。同时由于周围气体的气动稳定性变差,液膜开始发生一次破碎。在图 6 中可以看到不同进口质量流量下的液膜从产生到发生一次破碎的具体过程,随着进口质量流量的增加,雾化场的扩张程度逐渐增大,且液膜更加稳定,边界弯曲程度减小。

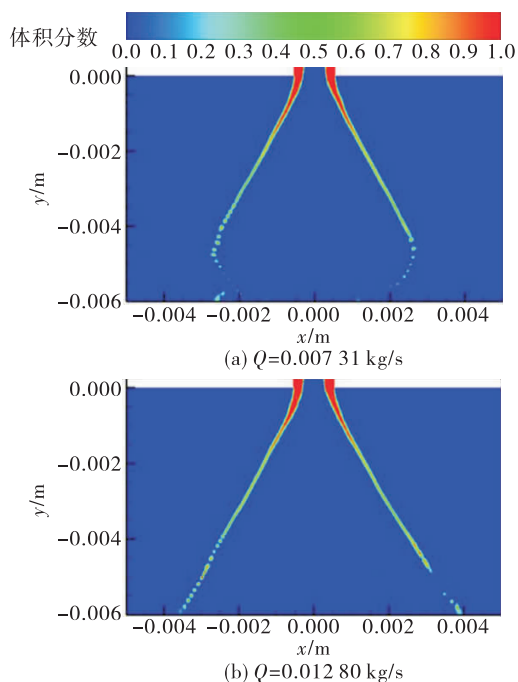
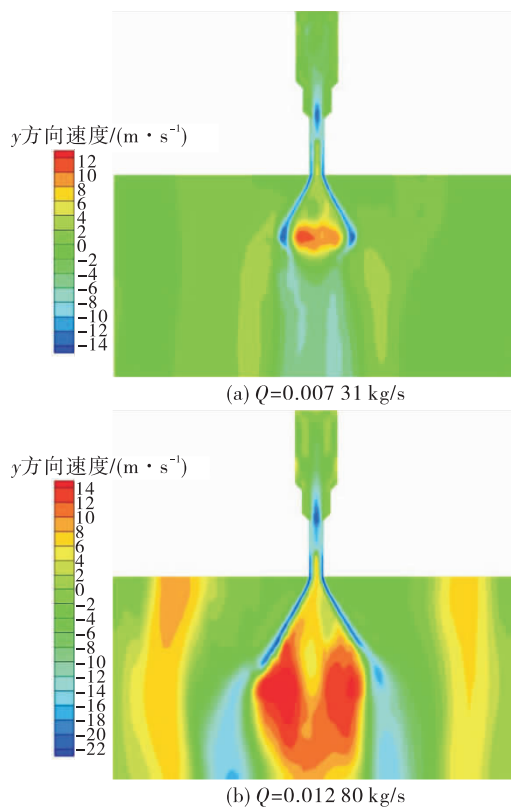


图 6 不同工况下的液膜变化情况

Fig. 6 Variation of liquid film under different working conditions

同时,在较小的质量流量下,液膜末端开始出现向内收缩的现象,这是由于当液膜运动速度较小时,重力与周围气体的回流对其影响较大。而随着流动速度的增大,这种影响逐渐减弱,因此在质量流量为 0.012 80 kg/s 时,液膜形态接近为两条直线。

图 7 对比分析了质量流量分别为 0.007 31 kg/s 和 0.012 80 kg/s 时喷嘴中心截面在 y 轴方向上的速度分布,即轴向速度分布。在图中可以看到当液态水到达喷嘴出口段时,其轴向速度明显增大,并且空气芯的存在使得锥形液膜中心气体产生了向上的回流。对比分析发现高质量流量下液膜中间空心位置处的回流区域相对较大,且液膜流速明显高于低质量流量下的液膜流速,同时也明显高于反方向的空气回流速度,这不仅有利于液膜的扩张,也有效削弱了液膜末端向内的收缩。

图 7 不同质量流量下 y 方向上的速度分布Fig. 7 Velocity distribution in the y -direction at different mass flow rates

2.4 液膜的破碎

为具体分析离心式喷嘴雾化场的变化过程,并对比最小质量流量和最大质量流量下的喷嘴雾化

场的差异,图 8 和图 9 中呈现两种质量流量下的喷嘴雾化场的三维图。雾化场的三维图同时显示了液膜的一次破碎和二次雾化结果,其中锥形液膜设置为水的体积分数为 0.2 的等表面。

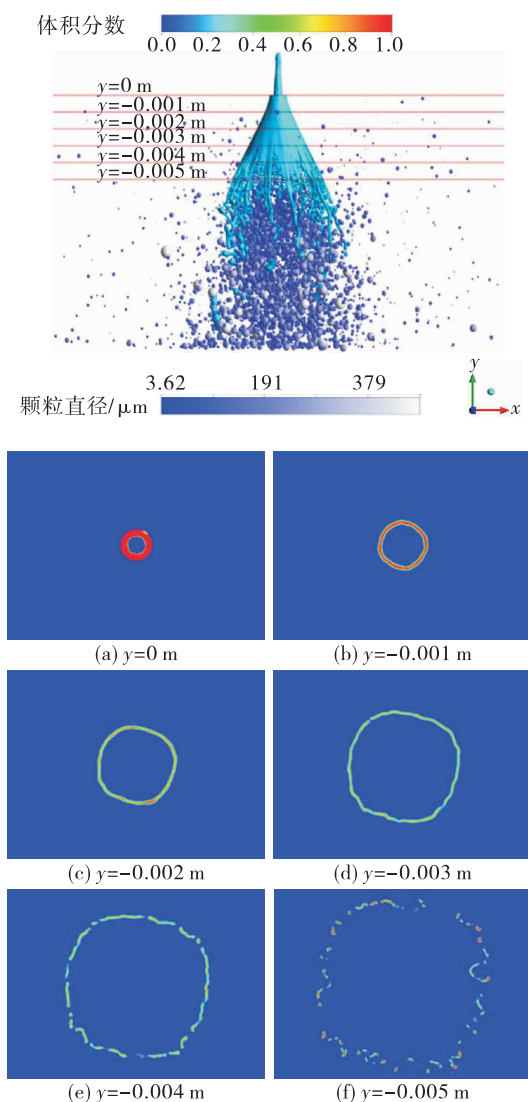


图 8 $Q = 0.007\ 31\ \text{kg/s}$ 时喷嘴雾化场示意图

Fig. 8 Atomization field diagram of nozzle at $Q = 0.007\ 31\ \text{kg/s}$

结合图 8 和图 9 发现,三维锥形液膜表面有明显的旋转痕迹,当液膜发生一次破碎时,产生了大小形状各不相同的、离散的液块、液丝和大液滴。当喷嘴进口质量流量为 $0.007\ 31\ \text{kg/s}$ 时,液膜分裂出较多的八爪鱼状的纵向大液丝,纵向大液丝之间由横向小液丝连接,同时远离喷嘴出口的区域有较多的大液块产生。由于纵向液丝尾部向内部的凹陷使得二次雾化产生的液滴颗粒主要集中在雾场

中心区域,且中心区域的液滴主要为直径较小的颗粒,同时由于液膜的不稳定发展使得较多的小颗粒飞溅到液膜以外的区域。而当质量流量为 $0.012\ 80\ \text{kg/s}$ 时,液膜表面比较光滑,一次破碎时分裂出许多较为均匀的横向小液丝,且基本没有大液块的产生。此时雾化产生的液滴颗粒沿着液膜的发展方向较为均匀地分布在液丝下方,图中可以明显看出此工况下颗粒数目明显低于 $Q = 0.007\ 31\ \text{kg/s}$ 的工况,并且大多数液滴为粒径较大的颗粒,同时只有少数的颗粒飞溅到液膜以外的区域。

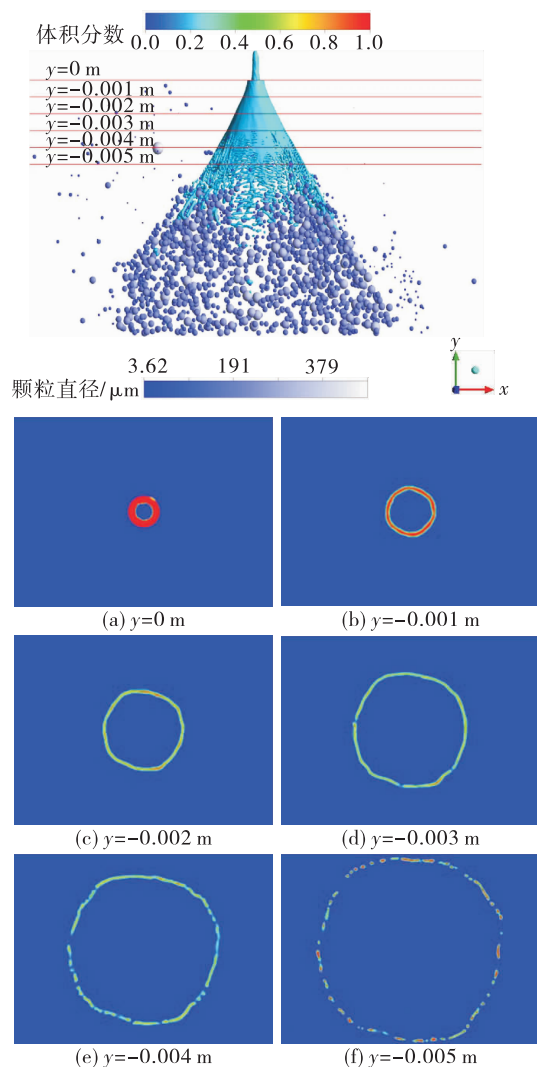


图 9 $Q = 0.012\ 80\ \text{kg/s}$ 时喷嘴雾化场示意图

Fig. 9 Atomization field diagram of nozzle at $Q = 0.012\ 80\ \text{kg/s}$

在液膜产生到发生一次破碎的过程中,等距离截取了 6 个横向截面,提取了这 6 个横截面上水的

体积分数分布图,如图8和图9所示。在图中可以看到,当液膜刚开始发展时,横向截面上呈现出分布较为均匀的圆环,当 $y = -0.003$ m时,圆环开始产生缺口,意味着液膜开始破碎,当 $y = -0.005$ m时,液膜基本已经完全破碎。对比两种工况下液膜横截面上的液相分布图发现,当 $Q = 0.01280$ kg/s时,由于液膜发展较为稳定,即使液膜破碎,该工况下横截面上的环形液膜形状也更接近于正圆。

2.5 颗粒统计

为进一步分析不同进口质量流量下喷嘴二次雾化所产生的液滴颗粒情况,现将上述两种工况下雾化场中所有的液滴颗粒根据粒径大小的不同汇总于图10所示的柱状图中。如图所示,在小质量流量下,液滴颗粒数目明显多于大质量流量下的液滴颗粒数目,尤其是在颗粒粒径低于0.15 mm的3个区间内。之后随着颗粒粒径的增大,两种工况下的颗粒数目相对接近。当 $Q = 0.00731$ kg/s时,超过80%的液滴颗粒为粒径低于0.15 mm的小颗粒,其中有将近一半的颗粒粒径位于0.05~0.10 mm之间;当 $Q = 0.01280$ kg/s时,液滴颗粒数量随着粒径范围的增大先缓慢增多后逐渐减少,其中粒径位于0.15~0.20 mm范围内的液滴颗粒占比最多。

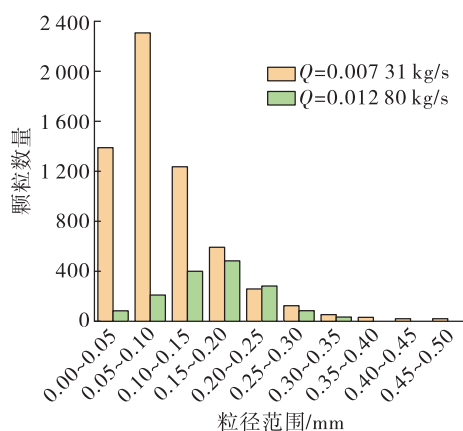


图10 不同工况下雾场颗粒数量对比

Fig. 10 Comparison of particle number in atomization field under different working conditions

3 结论

本文使用VOF-to-DPM多相流模型对双切向孔离心式喷嘴雾化场进行了数值模拟,得出以下结论:

1) 本文数值模拟所得的雾化角与实验值接近,并保持相同的变化趋势,两者之间误差低于5%,表明VOF-to-DPM多相流模型适用于本文所选用喷嘴的两相流研究;

2) 在较小的进口质量流量下,由于液膜流速较小以及中心区域的空气回流,其末端出现了向内凹陷的状况,且液膜表面产生了较多的纵向大液丝和大液块,同时雾化场中液滴颗粒数量较多,大多为粒径低于0.15 mm的小颗粒;

3) 当 $Q = 0.01280$ kg/s时,空心锥液膜表面相对稳定,只有较为均匀的横向小液丝产生,且空心锥液膜的横截面更接近于圆形,同时雾化场中液滴颗粒数量较少,大多为粒径位于0.10~0.25 mm范围内的中等颗粒。

参考文献:

- [1] 薛帅杰,刘红军,洪流,等. 厚液膜敞口型离心喷嘴自激振荡特性试验[J]. 航空学报,2018,39(9):122198.
- [2] BANG B H, KIM Y I, AHN C S, et al. Theoretical model of swirling thick film flow inside converging nozzles of various geometries[J]. Fuel, 2020, 280:118215.
- [3] NOURI-BORUJERDI A, KEBRIAEE A. Numerical simulation of laminar and turbulent two-phase flow in pressure-swirl atomizers[J]. AIAA Journal, 2012, 50(10):2091-2101.
- [4] AMINI G. Liquid flow in a simplex swirl nozzle[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 79:225-235.
- [5] 申力鑫,邢菲,秦腊,等. 双层旋转锥形液膜一次破碎特性数值研究[J]. 航空学报,2021,42(12):98-110.
- [6] DOMBROWSKI N, HASSON D. The flow characteristics of swirl (centrifugal) spray pressure nozzles with low viscosity liquids[J]. AIChE Journal, 1969, 15(4):604-611.
- [7] 宋大亮,凌前程,章荣军. 双组元离心式喷嘴外喷嘴流动数值模拟分析[J]. 火箭推进,2018,44(4):10-15.
- [8] SONG D L, LING Q C, ZHANG R J. Numerical analysis on flow characteristics of outer nozzle of bipropellant pressure-swirl injector[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(4):10-15.
- [9] NATARAJAN V, UNNIKRISHNAN U, HWANG W S, et al. Numerical study of two-phase flow dynamics and atomization in an open-type liquid swirl injector[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2021, 143:103702.

- [9] BATTISTONI M, GRIMALDI C N. Numerical analysis of injector flow and spray characteristics from diesel injectors using fossil and biodiesel fuels [J]. *Applied Energy*, 2012, 97:656-666.
- [10] 吴高杨, 郑刚, 聂万胜, 等. 螺旋离心式喷嘴内部流动过程数值仿真研究[J]. *火箭推进*, 2015, 41(4):13-18.
WU G Y, ZHENG G, NIE W S, et al. Numerical simulation of flow process in screw centrifugal nozzle [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2015, 41(4):13-18.
- [11] 王凯, 杨国华, 李鹏飞, 等. 离心式喷嘴内部流动过程数值仿真分析[J]. *火箭推进*, 2016, 42(4):14-20.
WANG K, YANG G H, LI P F, et al. Numerical simulation of internal flow process in pressure swirl injector [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2016, 42(4):14-20.
- [12] WANG L, CHEN L F, FANG B. Numerical simulation of internal flow and external atomization in pressure swirl nozzle [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1300(1):012082.
- [13] 潘华辰, 周泽磊, 刘雷. 关键结构参数对离心式雾化喷嘴雾化效果的影响研究 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(2):199-206.
- [14] KUOSMANEN N. Black liquor spray Simulation [Z]. 2021.
- [15] BALASUBRAMANIAN A K, KUMAR V, NAKOD P, et al. Multiscale modelling of a doublet injector using hybrid VOF-DPM method [C]//AIAA Scitech 2020 Forum. Reston, Virginia: AIAA, 2020.
- [16] NODA J, MIYAZAKI K, AOKI K, et al. Combustion technology of oil-fired combustors for dual fuel-fired gas turbines [J]. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 2020, 57(1):1.
- [17] VANDERFLOW B, SOLOVIEV A V, DEAN C W, et al. Potential effect of bio-surfactants on sea spray generation in tropical cyclone conditions [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10:19057.
- [18] ZHOU R, SHEN C B, JIN X. Numerical study on the morphology of a liquid-liquid pintle injector element primary breakup spray [J]. *Journal of Zhejiang University: SCIENCE A*, 2020, 21(8):684-694.
- [19] FEVRALSKIKH A V. Numerical simulation of splashing landing gear on an amphibious aircraft air cushion [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1027(1):012005.
- [20] NAZEER Y H, EHMANN M, SAMI M, et al. Atomization mechanism of internally mixing twin-fluid Y-jet atomizer [J]. *Journal of Energy Engineering*, 2021, 147(1):04020075.
- [21] Ansys Inc. ANSYS fluent theory guide (2020 R2) [Z]. 2020.