

流量脉动对针栓式喷嘴雾化特性影响的仿真分析

谢 远, 聂万胜, 高玉超, 仝毅恒

(航天工程大学 宇航科学与技术系, 北京 101416)

摘要 针栓式喷嘴在变推力液体火箭中有重要应用。使用连续相到离散相方法和基于树形数据结构的自适应算法研究了气液针栓式喷嘴的雾化破碎过程, 重点关注了液体流量脉动的影响。通过施加周期性变化的质量流量入口边界来模拟上游流量脉动下的雾化过程, 对比了有无流量脉动条件下的雾化特性, 研究了脉动频率对针栓式喷嘴雾化特性的影响。结果表明: 当液体流量不变时, 在气体的撞击作用下, 液膜上剥落出较长的液丝, 长液丝二次破碎为小液丝和大量液滴, 破碎距离较长, 液膜破碎过程比较有序; 当流量脉动幅值为 0.15, 脉动频率的范围为 500 ~ 3 000 Hz 时, 液膜破碎距离会缩短, 液膜会形成明显的环状表面波, 破碎后在环形液丝周围出现液滴聚集现象, 雾化锥角受脉动频率影响较小; 脉动频率会显著降低液滴的粒径, 当频率较高 (3 000 Hz) 时, 可能会产生数目较少的极大液滴粒径; 液体流量脉动会使得液滴分布出现局部聚集现象, 喷雾形态出现明显的“鼓包”结构。

关键词 气液针栓式喷嘴; 连续相; 离散相; 数值模拟; 流量脉动; 雾化特性

中图分类号 V434 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)01-0054-11

Simulation analysis on the influence of flow pulsation on the atomization characteristics of a pintle injector

XIE Yuan, NIE Wansheng, GAO Yuchao, TONG Yiheng

(Department of Aerospace Science and Technology, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract Pintle injectors have important application in variable thrust liquid rockets. The continuous phase to discrete phase method and adaptive algorithm based on tree data structure were used to study the atomization and crushing process of a gas-liquid pintle injector, with emphasis on the effect of liquid flow pulsation. The atomization process under upstream flow pulsation was simulated by applying periodically varying mass flow inlet boundary, and the atomization characteristics with or without flow pulsation were compared. The influence of pulsation frequency on the atomization of the pintle injector was studied. The results show that when the liquid mass flow was constant, the long liquid filaments are separated from the liquid film under the impact of gas flow, and the long liquid filaments are broken into small liquid filaments and a large number of droplets. The broken distance is long, and the liquid film breaking process is

收稿日期: 2022-02-15; 修回日期: 2022-03-02

基金项目: 国家自然科学基金 (12002386)

作者简介: 谢远 (1997—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机喷雾、燃烧。

orderly. When the flow pulsation amplitude was 0.15 and the pulsation frequency ranges from 500 Hz to 3 000 Hz, the crushing distance is shortened, the liquid film forms an obvious annular surface wave, and droplets gather around the annular liquid filament after crushing, and the atomization cone angle is less affected by the pulsation frequency. Pulsation frequencies significantly reduce droplet sizes, and at high frequencies (3 000 Hz), a small number of large droplet may be produced. The liquid flow fluctuation makes the droplet distribution appear local aggregation phenomenon, and the spray shape appears obvious “bulge” structure.

Key words gas-liquid pintle injector; VOF; DPM; numerical simulation; liquid mass pulsation; atomization characteristics

0 引言

当前,可重复使用已成为液体动力技术中重要发展趋势之一^[1]。针栓式喷注器具有零部件数量较少、燃烧稳定、深度变推力强、成本低等显著优势^[2-3],是大范围变推力发动机的首要选择。美国已在该领域积累了丰富的工程经验,其登月采用的LMDE发动机最大推力为44.52 kN,具有10:1的推力调节能力^[4]。近年来,美国Space X公司采用针栓发动机成功实现火箭的多次回收^[5]。我国在这一领域与美国还存在一定差距,因此,围绕针栓式喷注器开展研究具有重要意义。

针栓式喷注器的雾化过程决定了下游燃料的掺混燃烧效率^[6],因此,围绕针栓式喷注器的喷雾混合过程,各国已经开展了不少研究。王凯等研究了针栓式喷注单元的喷雾混合特性,发现两种不同的喷雾扇结构^[7]。方昕昕等得到了针栓式喷嘴结构参数对SMD、粒径分布均匀度指数和雾化锥角的影响^[8]。Sakaki等使用乙醇/液氧针栓式喷嘴评估火箭发动机燃烧器的性能^[9]。Nardi团队设计了针栓发动机并进行了实验,但是大部分研究工作都未公开^[10]。Son等通过实验研究动量比和韦伯数对针栓式喷嘴喷雾锥角的影响,发现除了较低的液体喷注压降外,在所有实验条件下,喷雾半角都与动量比和韦伯数相关^[11];随后采用实验和仿真结合的方法分析了速度分布、喷雾锥角和液滴的空间分布,用DPM(discrete phase model)模型研究了喷注条件以及几何参数对雾化的影响,但采用的雾化破碎模型有一定的缺陷,不能捕捉到一次破碎的现象^[12]。

虽然气液针栓喷注器具有较好的燃烧稳定性,

但发动机实际工作中,火箭的剧烈振动会引起推进剂管的振动,因此推进剂供应管道中流量会存在一定形式脉动^[13],这可能会影响推进剂雾化过程,从而可能会导致燃烧室中出现压力脉动和不稳定热释放^[14-15],进而诱发燃烧不稳定^[9]。围绕流量脉动对针栓喷注器雾化过程的影响,Ahn等设计机械脉动器,利用高速摄像机获得了透明涡腔内、喷嘴内周期性变化的气芯直径以及出口喷嘴附近的喷雾^[16]。Chao等采用数值计算模拟了F1发动机横向压力脉动作用下冲击喷管的雾化过程,结果表明,液体流量脉动对喷嘴的喷雾形态、液滴粒径和分布存在明显影响^[17]。相对地,针对脉动流量对气液针栓式喷嘴雾化过程的影响还未开展过深入的研究,以往研究中,实验装置限制了对高频率流量脉动的研究。而仿真采用VOF的方法,液相丢失率较大,计算精度不足导致液膜捕捉不准确,尤其对液滴粒径的计算误差超过20%。

综上,由于流量脉动的频率范围较大,采用实验的方法很难提供精确的液体流量脉动条件,并且捕捉脉动喷雾图像对高速相机的要求也很高,而数值计算不仅可以设定精确的流量条件,而且可以获得清晰的流动过程,因此本文采用数值计算的方式开展相关雾化研究。

1 数值方法及物理问题描述

1.1 数值方法

针栓式喷嘴在喷嘴附近就发生液膜破碎,液滴过于稠密,采用实验的方法很难分析内部流场的状况。因此,本文采用Realizable $k-\varepsilon$ 模型和VOF to DPM^[18](连续相到离散相)方法,并结合八叉树结构形式的自适应加密对气液界面进行捕捉,可以实

系数; D_i 为水滴直径。

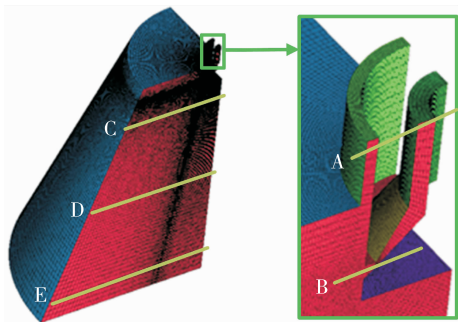


图 2 计算域

Fig. 2 Schematic of computational domain

表 1 流量脉动频率

Tab. 1 Disturbance frequency in five cases

单位:Hz				
工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
0	500	1 000	2 000	3 000

表 2 计算雾化物理特性的流动参数

Tab. 2 Flow parameters of calculating atomized physical properties

介质	$m/(g \cdot s^{-1})$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	$\sigma/(N \cdot m)$	D_i/mm
水	60	998.2	0.072	1.55
空气	3.036	1.225	—	1

2 仿真模型验证

模型准确性的验证思路如图 3 所示。

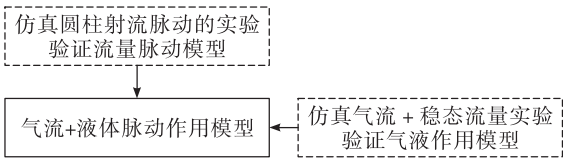


图 3 模型验证过程

Fig. 3 The process of validating the model

采用针栓在无脉动流量条件,即 $m_1 = 22.9\text{ g/s}$ 、 $m_g = 3.03\text{ g/s}$ (文献[23]中的工况 1) 的仿真雾化过程对模型进行验证。进行了各种收敛性测试来评估结果的准确性,并进行了必要的网格独立性检验。由于雾化结果显著取决于网格量,测试了 3 种不同的网格量,对应的喷雾结果如图 4 所示。粗网

格虽然能够模拟出喷雾场的轮廓,但不能捕捉到液膜破碎细节,满足不了研究需求。细网格(网络数为610 273和926 574)可以精确模拟液丝剥离和大量液滴,提高雾化过程的精细度,获得更加真实的液滴分布。考虑到实际的计算资源,同时保证计算精度,最终选取网格量为 610 273 的网格系统。将喷雾结果与参考文献[23]的实验和计算结果进行对比,两者对整体喷雾形态和喷雾锥角的分析基本保持一致,可以验证无脉动流量条件下流动模型的有效性。

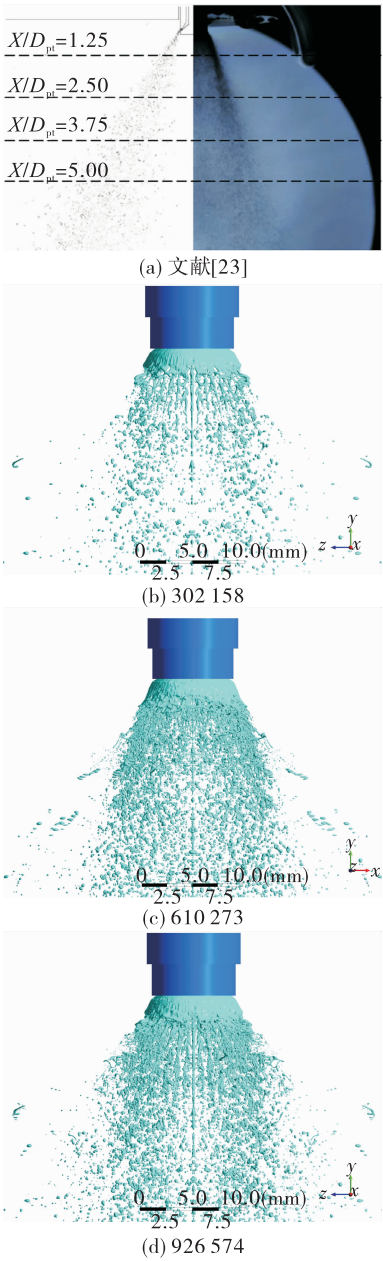


图 4 网格独立性验证

Fig. 4 Grids independence test

验证液体流量脉动模型,将参考文献[25]中脉动射流的边界条件代入,计算结果如图5所示。通过对比起伏的液膜波的个数和液膜波的大小,发现射流表面波动形态的计算结果和参考文献[25]结果吻合良好,验证了流量脉动模型的有效性。

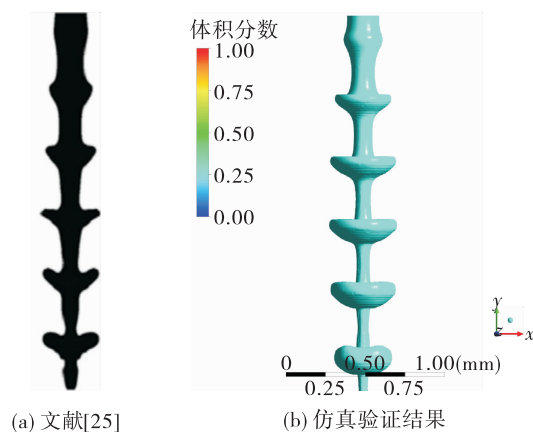


图5 射流计算结果对比

Fig. 5 Comparison of the spray field between the reported and current result

3 结果分析

3.1 恒定流量条件下的针栓式喷嘴雾化特性

选取工况1研究恒定流量条件下的针栓雾化特性,液膜破碎过程见图6,模拟结果可有效捕捉针栓式喷嘴液膜波动过程及整个破碎过程。环缝气流剪切液膜产生的周向 Kelvin-Hemoltz 不稳定和气流密度不同引起的横向 Rayleigh-Taylor 不稳定是液膜破碎的主要原因。液膜上游在气动力剪切作用下会产生微波脉动,脉动波以环形波和周向波的形式出现。由于环形波的作用,液膜会脱落后形成液丝。液丝周围聚集小液滴,液丝在气动力作用下会进一步破碎形成大量液滴。整体喷雾形态为锥形结构。

图7为恒定流量条件下的速度云图和流场图。在液膜中心区域存在一个回流区。分析原因是液膜外侧表面在气动力的作用下速度大于液膜内侧表面的速度,这一速度差引起液膜内外形成一个压力差,在压力差的作用下形成“卷吸”现象,外围液滴进入中心回流区。气体与液体撞击后,速度会从出口处的184 m/s迅速衰减为73 m/s左右,此过程气体与液体存在摩擦和动量交换,接触面形成剧烈

的涡旋结构。如图8局部放大图中的黑线所示,涡旋结构向下游发展会导致液膜表面出现波动,液膜厚度会迅速减小,促进液膜的破碎。

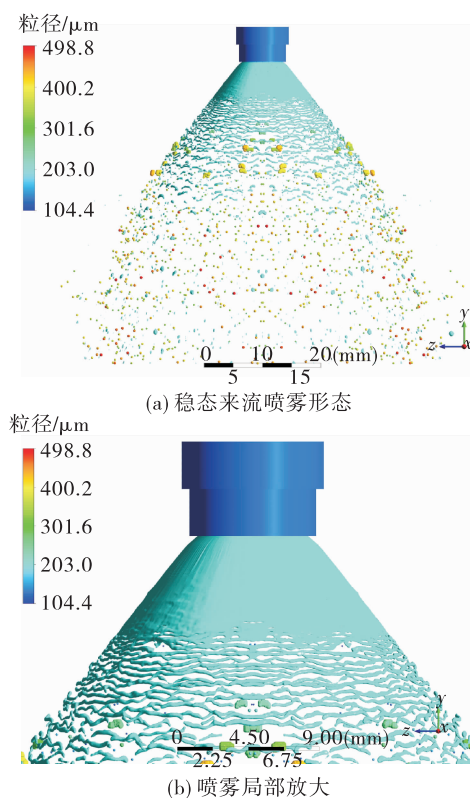


图6 工况1的喷雾图像($f=0$ Hz)

Fig. 6 The spray shape of case 1 ($f=0$ Hz)

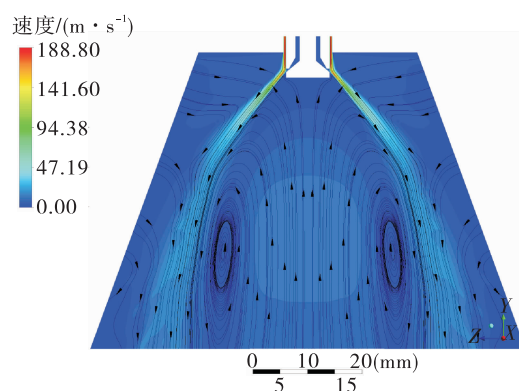


图7 工况1的速度和流场云图

Fig. 7 The velocity and streamline contour of case 1

图9显示恒定流量条件下的1/4区间的液滴粒径和速度的空间分布。液滴在 yOz 面和 xOy 面的投影边界比较规则,粒径分布范围为100~500 μm ,分布比较均匀,表明恒定流量条件下针栓雾化效果比

较均匀。上游液体在气体的冲击下形成的液滴速度较快,达到 30 m/s,形成的大液滴在气体的作用下会二次破碎。下游的液滴受到冲击作用较弱,容易受到空气拖拽,导致液滴速度迅速减小至 3 m/s 左右,此时气液相对速度较小,减弱了气动剪切作用。因此下游再次破碎的液滴较少,多数液滴继续向下流动,部分液滴会被“卷吸”进入中心回流区,与上游来的液滴相互作用,中心回流区的存在提高了位于喷雾中心区域的液滴雾化效果。

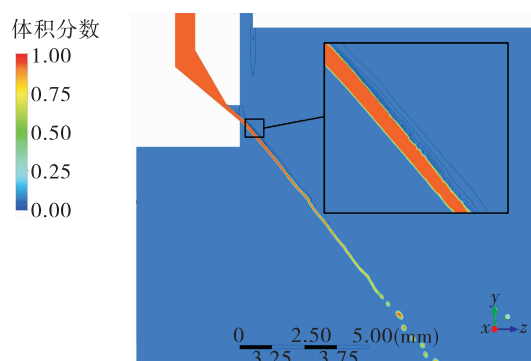


图8 yOz 截面处的体积分数(工况1)

Fig. 8 The water volume fraction distribution of yOz plane(case 1)

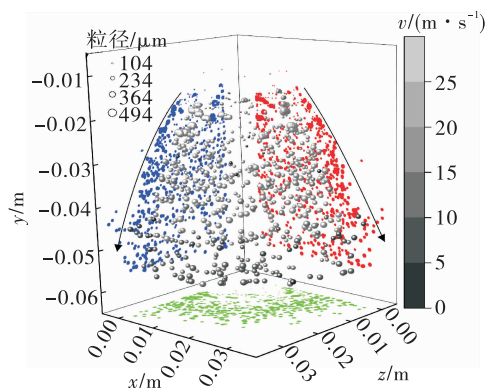


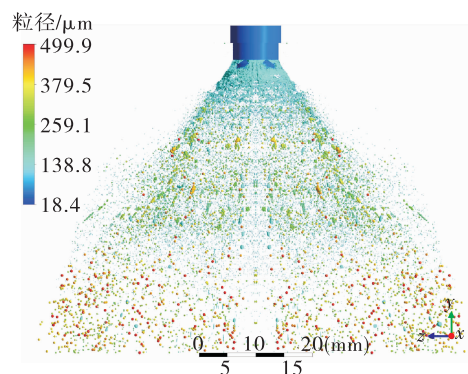
图9 工况1的液滴的速度和粒径分布

Fig. 9 The velocity and diameter distribution of droplets for case 1

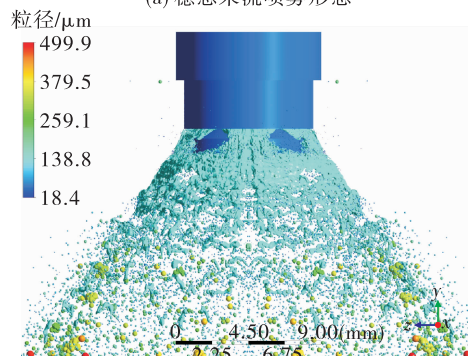
3.2 流量脉动条件下的针栓式喷嘴雾化特性

选取工况2($f=500$ Hz)研究流量脉动条件下的针栓雾化特性,液膜破碎形态见图10。在上游液体流量脉动的作用下,出口处的液膜表面产生褶皱和局部破碎,液膜厚度会迅速减小。液膜破碎主要有两种形式:一是上游流量脉动、气体作用力和表面张力共同作用,液膜产生一些不规则的孔洞,孔

洞附近会产生细小的液滴,孔洞的大小和数量进一步发展,最后液膜破碎;二是在表面波的作用下,液膜褶皱程度变强,气液界面强作用的涡旋结构促使液膜不稳定发生破碎,产生液丝和大液块。液丝和液块在气动力的作用下发生二次破碎,产生小液滴。对不同时刻的雾化锥角进行统计,发现流量脉动条件下的雾化锥角变化不大,整体雾化区域较为稳定。



(a) 稳态来流喷雾形态



(b) 喷雾局部放大

图10 工况2的喷雾图像($f=500$ Hz)

Fig. 10 The spray shape of case 2($f=500$ Hz)

图11显示流量脉动条件下的速度云图和流场图。与恒定流量条件下的流场相比,中心区域流场较为紊乱。分析原因是上游少部分气体通过液膜表面的孔洞进入中心区域,在中心区域上方形成部分回流区;同时由于液膜破碎提前(见图12),较早出现的细小液滴会由于“倒吸”作用进入回流区,在中心区域中下方形成新的回流区。

图13显示流量脉动条件下1/4区间的液滴粒径和速度的空间分布。液滴在 yOz 面和 xOy 面的投影边界有明显的“鼓包”结构。分析主要原因是液体流量周期性变化,出口处的液膜速度也会周期变

化,上游速度较快的液滴会追赶上较慢的液滴,导致出现液滴集中分布的区域。

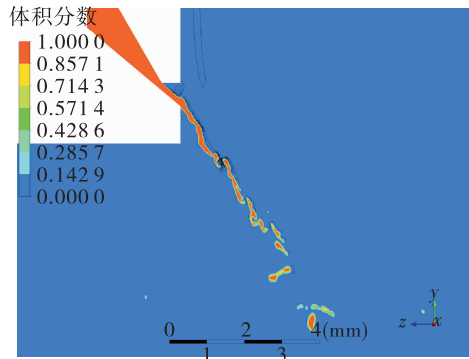


图 11 YOZ 截面处的体积分数(工况 2)

Fig. 11 The water volume fraction distribution of YOZ plane (case 2)

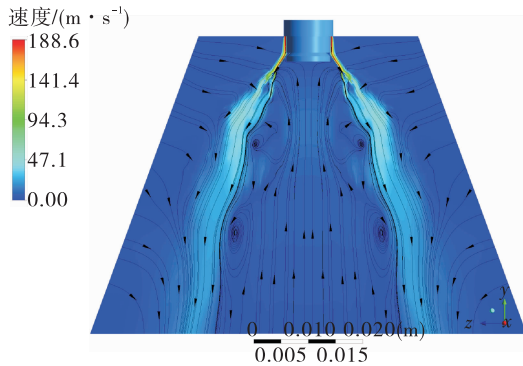


图 12 工况 2 的速度和流场云图

Fig. 12 The velocity and streamline contour of case 2

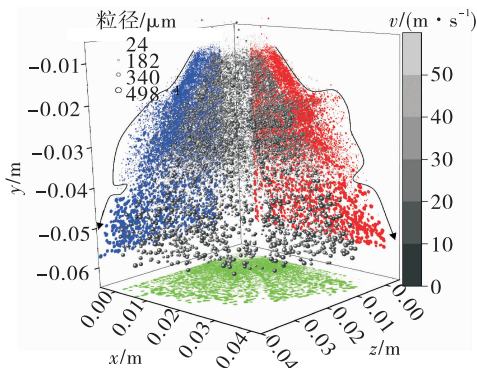


图 13 工况 2 的液滴的速度和粒径分布

Fig. 13 The velocity and diameter distribution of droplets (case 2)

对计算域内的液滴粒径分布进行统计,结果如图 14 所示。当上游流量存在脉动时,大液滴所占的

比例下降,小液滴所占的比例提高。表明在上游流量脉动的作用下,计算域内的液滴平均尺寸会减小,主要原因是上游脉动增强了液膜流动的不稳定性,遇到气体冲击后,更早地发生破碎产生液滴,液滴受到气液剪切的作用时间变长,液滴会变得更小;另一方面,流量脉动条件下的中心区域内流场更加复杂,液滴相遇的概率明显增加,会发生撞击破碎。由仿真计算结果可知,当上游流量存在脉动时,雾化场局部区域的液滴数目会显著增多,并且液滴粒径会减小。

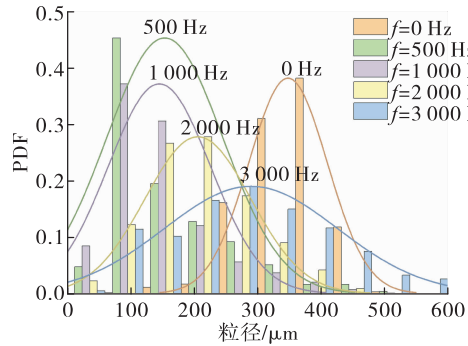


图 14 不同脉动频率下的粒径概率分布

Fig. 14 Probability density function (PDF) distribution of droplet diameter in different frequencies

与恒定流量条件下的结果相比,喷雾发生雾化的位置提前,长液丝数目较少,液滴的形态更加多样化,出口处的小液滴数量更多,液膜破碎长度明显变短,部分液滴会更向外分布,喷雾区域变大。整个雾化过程进展变快,比恒定流量条件下的雾化区域更加均匀,小液滴数目明显增多。虽然脉动对粒径和形态影响较大,但喷雾锥角较为稳定,喷雾区域较为固定,这可能是针栓式发动机燃烧稳定的原因之一。

3.3 流量脉动频率对雾化特性的影响

这一部分将分析流量脉动频率对针栓式喷嘴雾化的影响,设定脉动幅值为 0.15,脉动频率的大小 f 依次为 500 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz 与 3 000 Hz。图 15 为对应的不同脉动频率条件下的喷雾场图像。可以看出在喷嘴下游位置都会出现液滴周期性聚集现象,表明针栓式喷嘴的雾化对较宽的流量脉动频率范围都会作出响应。宏观上看,流量脉动下的喷雾场出现了少量大尺度的丝状结构,在丝状结构附近聚集较多的液滴。随着脉动频率的增大,大尺

度丝状结构轴向距离在减小,液滴群出现的次数增加,表明大尺度的丝状结构从液膜上脱落的频率在提高,脱落频率与流量脉动频率保持一致。

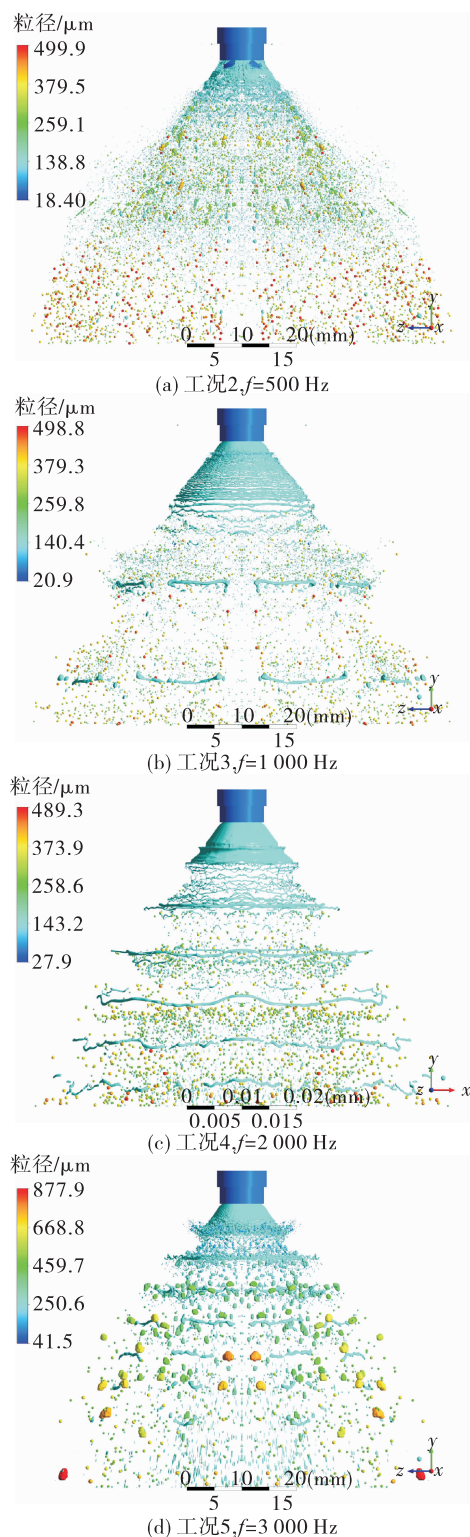


图 15 不同脉动频率下的喷雾图像

Fig. 15 The spray shape under different distribution frequencies

在图 2 位置处监测液体的面流量,结果如图 16 所示。从监测流量曲线波形方面来看,恒定流量条件下,A、B、C 面流量几乎恒定,D、E 面流量在平均值上下均匀波动,表明喷雾场内液滴分布较均匀,没有液滴局部聚集现象。存在流量脉动时,A 面流量曲线为正弦波形,B、C 面流量曲线轻微变形,D、E 面流量曲线转变成陡峰波形。位于正弦曲线上方的波动值远大于下方的波动值,表明液滴集中区域在脉动周期内相对较短的时间段经过监测面。从监测面流量曲线波动频率方面来看,喷雾区域内各处雾化对上游流量脉动的响应与脉动频率保持一致。但雾化响应与上游流量脉动存在相位差,即存在一个时滞 τ ,如图 16(d) 所示。从图中可以看出脉动频率对相位差影响很大。以 A 面和 C 面流量曲线相位差为例进行分析。脉动频率为 500 Hz 和 1 000 Hz 时,相位差较小;脉动频率为 2 000 Hz 时,相位差为 45° ;脉动频率为 3 000 Hz 时,相位差增大至 180° 附近。相位差的大小和脉动频率成正相关。根据瑞利准则^[27],燃烧室压力和燃烧放热脉动相位相同时,可能会激发燃烧不稳定。喷雾场的液滴聚集分布会导致燃烧放热的空间脉动,因此特殊脉动频率的上游流量可能会激发燃烧不稳定。

脉动频率不仅影响相位差,还对流量曲线的峰值产生影响。以 C 面流量曲线为例分析,随着脉动频率的增加,流量曲线的峰值显著变大。与脉动频率 1 000 Hz 相比,2 000 Hz 和 3 000 Hz 条件下的流量峰值分别提高了 27.8% 和 73%,表明了频率越高,在周期性区域内的大液丝体积越大(从图 15 中也可以看出)。D 面和 E 面多数流量曲线也符合这种趋势,然而图 16(e) 的 E 面流量峰值小于上游的流量峰值,主要原因是高频脉动条件下液膜产生大液丝的时间更早,大液丝到达 E 面之前发生部分破碎,导致液滴聚集程度相对减小,因此 E 面流量峰值减小。

流量脉动频率对粒径的定量影响如图 17 所示。宏观上看,流量脉动会显著降低粒径的大小。在脉动幅值为 0.15,脉动频率范围为 500 ~ 3 000 Hz 之间的条件下,随着流量脉动频率的增加,SMD、平均粒径、中位粒径均会增加。分析原因是由于脉动频率的增加,相同的喷雾区域会产生更多的大液丝结

构,受到同样的气体冲击后,高脉动频率产生大液滴粒径。比较特殊的是脉动频率为 3 000 Hz 的 SMD 值大于其余所有工况,如图 14 所示,分析原因

是出现数目较少的大液滴,因此 SMD 值急剧变大。随频率的增加,粒径的 PDF 分布曲线趋于平缓,表明液体粒径分布更加广泛。

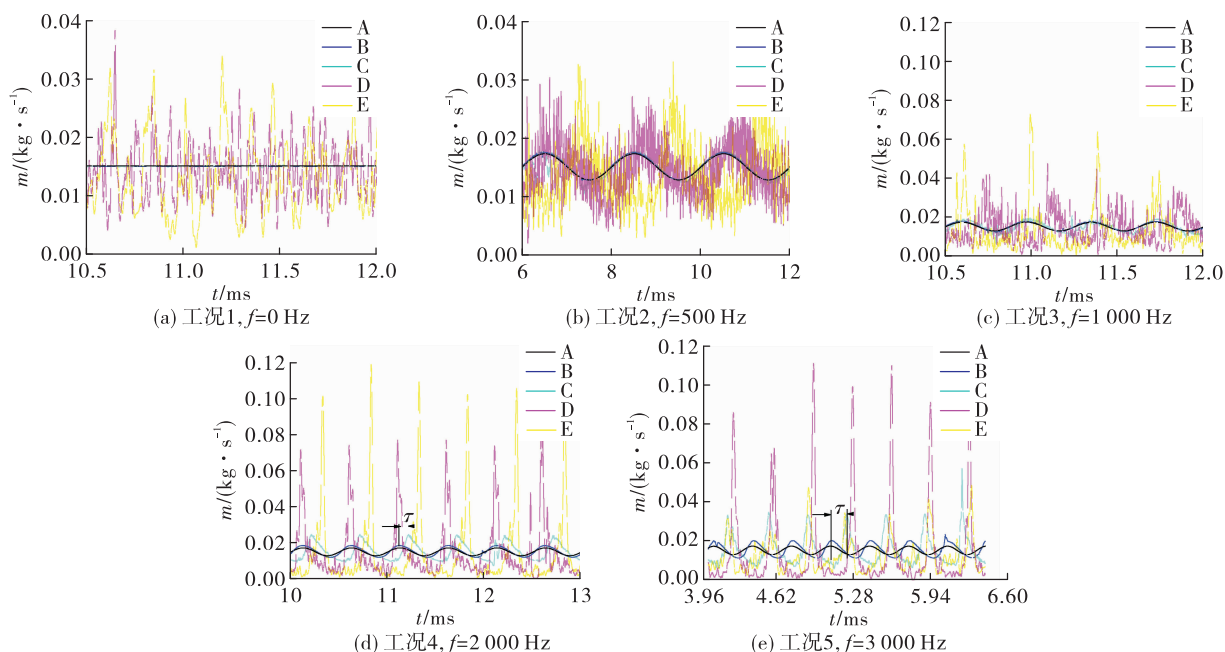


图 16 不同脉动频率下的液体流量随时间的变化

Fig. 16 Time varying mass flow rate at different distribution frequencies

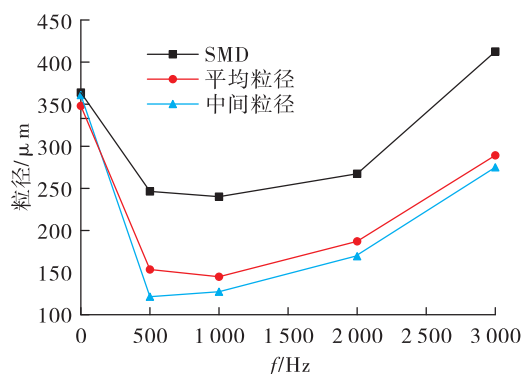


图 17 不同脉动频率下的粒径变化

Fig. 17 Diameter in different frequencies

流量脉动频率对液滴速度概率分布影响如图 18 所示。随着脉动频率的增加,液滴速度概率分布曲线会变平缓,表明液滴速度分布更加均匀,主要原因是流量脉动条件下喷雾区域的流场比较紊乱,如图 7 和图 12 所示,流量脉动条件下喷雾场的中心回流区数目较多,较多的中心回流区使得液滴的速度分布比较均匀。

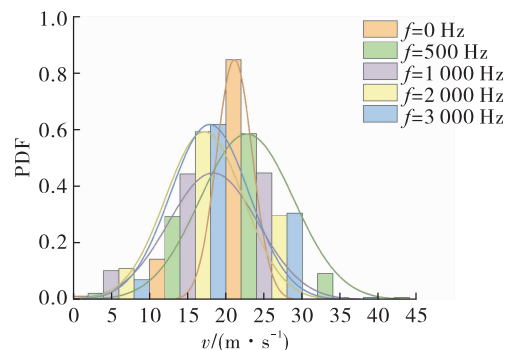


图 18 不同脉动频率下的液滴速度概率分布

Fig. 18 Probability density function (PDF) distribution of droplet velocity in different frequencies

流量脉动频率对液滴空间和速度分布影响如图 19 所示。相同的计算域,出现的“鼓包”个数依次为 0、1、2、4、7。“鼓包”结构数目和脉动频率为线性相关,表明喷雾对上游流量脉动频率响应为线性响应。可以明显看出位于喷雾区中心区域的液滴粒径较小,外部液滴粒径较大,表明内部回流区可以减小液滴粒径,起到改善雾化质量的作用。随着

脉动频率的增加,液滴出现的位置提前,表明脉动频率越高,液膜越容易破碎产生液滴。从图19中可以看出颜色较深的液滴颗粒多数位于下游和外部,表明下游液滴的速度小于上游液滴的速度,外部

液滴的速度小于中心回流区的液滴速度,分析原因是小液滴由于“卷吸”作用进入中心回流区,速度会增加;下游的大液滴由于空气的摩擦力减速很快。

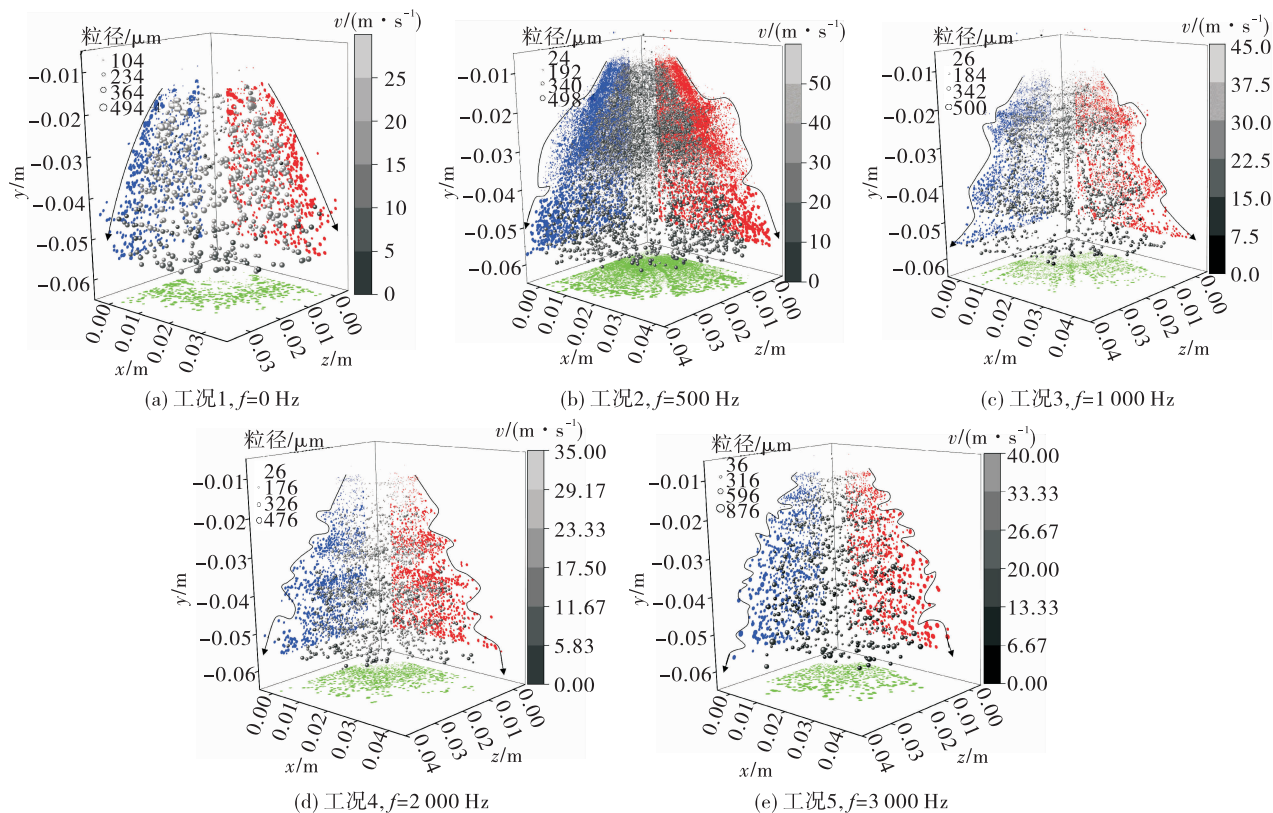


图19 不同脉动频率条件下液滴的速度和粒径分布

Fig. 19 The velocity and diameter distribution of droplets at different distribution frequencies

4 结论

本文通过仿真研究上游有/无脉动流量时针栓式喷嘴的雾化特性,得到的主要结论如下。

1) 利用 VOF to DPM 模型有效捕捉恒定流量条件下针栓喷嘴液膜波动过程及整个破碎过程,整体喷雾形态为锥形结构,内部中心回流区的存在提高了位于喷雾中心区域的液滴雾化效果。

2) 流量脉动条件下针栓式喷嘴雾化特性发生改变,长液丝数目较少,液滴的形态更加多样化,出口处的小液滴数量更多,液膜破碎长度明显变短,中心区域流场较为紊乱,整体形态出现“鼓包”现象。

3) 脉动频率的范围为 500 ~ 3 000 Hz 时,随着脉动频率的增大,大尺度丝状结构轴向距离减小,液滴群出现的次数增加,大液丝脱落频率与流量脉

动频率保持一致;喷雾区域内各处雾化对上游流量脉动的响应与脉动频率保持一致,但雾化响应与上游流量脉动存在相位差,即存在一个时滞 τ ,时滞随流量脉动频率的增加而增加;流量脉动频率增加会使流量曲线峰值增加,主要原因是增加流量脉动频率会使得液滴聚集现象明显;脉动频率会显著降低液滴的粒径;液体流量脉动会使得液滴分布出现局部聚集现象,喷雾形态出现明显的“鼓包”结构,对液滴的空间分布产生影响。

参考文献

- [1] 哈杰,里尔登. 液体推进剂火箭发动机不稳定燃烧[M]. 朱宁昌,张宝炯,译. 北京:国防工业出版社,1980.
- [2] DRESSLER G. Summary of deep throttling rocket engines with emphasis on Apollo LMDE[C]//42nd AIAA/ASME/

- SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Reston, Virginia; AIAA, 2006.
- [3] 石璞, 朱国强, 李进贤, 等. 液体火箭发动机针栓喷注器雾化燃烧技术研究进展[J]. 火箭推进, 2020, 46(4): 1-13.
- SHI P, ZHU G Q, LI J X, et al. Advances in atomized combustion technology research of pintle injector for liquid rocket engines[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(4): 1-13.
- [4] CASIANO M J, HULKA J R, YANG V. Liquid-propellant rocket engine throttling: A comprehensive review[J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(5): 897-923.
- [5] DRESSLER G, BAUER J. TRW pintle engine heritage and performance characteristics[C]//36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Reston, Virginia; AIAA, 2000.
- [6] 王振国. 液体火箭发动机燃烧过程建模与数值仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [7] 王凯, 雷凡培, 杨岸龙, 等. 针栓式喷注单元膜束撞击雾化混合过程数值模拟[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 123802.
- [8] 方昕昕, 沈赤兵, 成鹏, 等. 针栓式喷注器雾化特性试验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(8): 1853-1860.
- [9] SAKAKI K, KAKUDO H, NAKAYA S, et al. Combustion characteristics of ethanol/liquid-oxygen rocket-engine combustor with planar pintle injector[J]. Journal of Propulsion and Power, 2016, 33(2): 514-521.
- [10] NARDI R, PEREZ V, PIMENTA A. Experiments with pintle injector design and development[C]//51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Reston, Virginia; AIAA, 2015.
- [11] SON M, YU K, KOO J, et al. Effects of momentum ratio and Weber number on spray half angles of liquid controlled pintle injector[J]. Journal of Thermal Science, 2015, 24(1): 37-43.
- [12] SON M, YU K, RADHAKRISHNAN K, et al. Verification on spray simulation of a pintle injector for liquid rocket engine[J]. Journal of Thermal Science, 2016, 25(1): 90-96.
- [13] YANG A L. Periodic atomization characteristics of simplex swirl injector induced by klystron effect[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(5): 1066-1074.
- [14] MILLER K, SISCO J, NUGENT N, et al. Combustion instability with a single-element swirl injector[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(5): 1102-1112.
- [15] POMEROY B, ANDERSON W. Transverse instability studies in a subscale chamber[J]. Journal of Propulsion and Power, 2016, 32(4): 939-947.
- [16] AHN B, ISMAILOV M, HEISTER S D. Experimental study swirl injector dynamic response using a hydromechanical pulsator[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(3): 585-595.
- [17] CHAO C C, HEISTER S D. Contributions of atomization to F-1 engine combustion instabilities[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2004, 28(9): 1045-1053.
- [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] KIM D, OLIVIER D, MARCUS H, et al. The primary breakup of a round liquid jet by a coaxial flow of gas[EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/251839_860_Toward_two-phase_simulation_of_the_primary_breakup_of_a_round_liquid_jet_by_a_coaxial_flow_of_gas, 2006.
- [20] CHADHA S. A high-fidelity simulation of the primary breakup within suspension high velocity oxy fuel thermal spray using a coupled volume of fluid and discrete phase model[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 133: 103445.
- [21] 徐小文. AMR自适应结构网格上辐射流体力学显隐耦合时间积分算法[C]//中国工程物理研究院科技年报2011年论文集. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2011.
- [22] 张磊. 界面不稳定性的数值模拟[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2003.
- [23] RADHAKRISHNAN K. Effect of injection conditions on mixing performance of pintle injector for liquid rocket engines[J]. Acta Astronautica, 2018, 150: 105-116.
- [24] 李佳楠, 雷凡培, 杨岸龙, 等. 强迫扰动下的射流撞击雾化特性[J]. 航空学报, 2020, 41(12): 124027.
- [25] PARK G, LEE J, OH S, et al. Characteristics of gas-centered swirl coaxial injector with acoustic excitation of gas flow[J]. AIAA Journal, 2016, 55(3): 894-901.
- [26] PARK G, OH S, YOON Y, et al. Characteristics of gas-centered swirl-coaxial injector with liquid flow excitation[J]. Journal of Propulsion and Power, 2019, 35(3): 624-631.
- [27] 李国能, 周昊, 尤鸿燕, 等. 黎开管自激热声不稳定的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 50-54.