

液液针栓多喷注单元喷雾场数值模拟

王 凯¹, 唐 亮¹, 雷凡培², 杨岸龙¹, 周立新¹

(1. 西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100;

2. 中国船舶工业集团有限公司, 北京 100044)

摘要 为了研究相邻喷注单元间相互影响对针栓式喷注器喷雾场的影响, 以平面针栓多喷注单元为研究对象, 采用基于 AMR (adaptive mesh refinement) 技术和分相识别的 PLIC VOF (piecewise linear interface calculation VOF) 新方法, 实现了针栓式喷注器雾化过程的高保真数值模拟。给出了喷雾场典型的结构特征及液雾的分布特性, 对比了多喷注单元与单喷注单元喷雾场的差异, 揭示了相邻喷注单元间的相互影响机制。研究表明, 新的仿真方法在精细研究针栓式喷注器喷雾场方面具有较好的准确性。与单喷注单元相比, 多喷注单元喷雾场主要存在以下特殊结构: 相邻两雾扇相撞背部呈脊状结构, 使得雾化区域大于雾化角; 两雾扇相撞在中间对称面汇聚形成薄液膜, 使整个雾化角范围内均有液滴分布; 相邻两孔之间形成一定下漏率和下漏液膜宽度; 液膜路和液束路的液滴粒径均显著增大了约 35%, 流强和混合比沿径向分布更趋于均匀。相邻喷注单元间的相互影响机制为: 相邻喷雾扇相撞后原先各自向外展开的雾扇被挤回中心对称面, 其厚度是原雾扇的两倍, 其他未发生撞击位置的液膜厚度保持不变, 最终形成的喷雾扇结构呈扁平的多凹腔状。

关键词 液液针栓喷注器; 相邻喷注单元; 相互影响; 雾场结构; 自适应网格加密

中图分类号 V434.3 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)02-0015-12

Numerical simulation on spray field of liquid-liquid pintle multi-injector elements

WANG Kai¹, TANG Liang¹, LEI Fanpei², YANG Anlong¹, ZHOU Lixin¹

(1. Key Laboratory for Liquid Rocket Engine Technology, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China; 2. China State Shipbuilding Corporation, Beijing 100044, China)

Abstract In order to study the influence of the interaction between adjacent injector elements on the spray field in pintle injector, taking the plane pintle multi-injector element as the research object, based on a new method of AMR (adaptive mesh refinement) technology and PLIC VOF (piecewise linear interface calculation VOF) method in which each phase was individually identified, the spray process of pintle injector was simulated with high-fidelity. The typical structure characteristics and spatial distribution characteristics of the spray field were demonstrated quantitatively. The spray field were compared with that of the injector element, and the mechanism of interaction between adjacent injector elements was revealed.

收稿日期: 2022-06-13; 修回日期: 2022-07-12

基金项目: 国家自然科学基金 (11502186)

作者简介: 王凯 (1990—), 男, 博士, 研究领域为液体火箭发动机喷雾燃烧技术。

The results show that the new simulation method has good accuracy in studying the spray field of pintle injector. Compared with the injector element, the spray field of the multi-injector element mainly has the following special structures: two adjacent spray fans collide to form a ridge structure on the back, and causing the spray area to exceed the spray angle area. In addition, two spray fans collide and converge on the middle symmetry plane to form a thin liquid film, which makes the droplets distribute throughout the spray angle area. A certain leakage rate and leakage width of liquid sheet are formed between two adjacent radial orifices. The droplet diameters of liquid sheet path and liquid jet path increase significantly by about 35%, and the distribution of flow intensity and mixing ratio tends to be more uniform along the radial direction. The interaction mechanism between adjacent elements is as follows: after the collision of adjacent spray fans, the original outward deployed spray fans are pushed back to the central symmetry plane, whose thickness is twice that of the original spray fan. However, the thickness of the liquid film at other nonimpact positions remains unchanged. Finally, the structure of the spray fan is a flat multi-cavity structure.

Key words liquid-liquid pintle injector; adjacent injector elements; interaction; spray field structure; adaptive mesh refinement

0 引言

自 1970 年首次被提出以来,针栓式喷注技术就成为变推力技术研究的热点,并被成功应用于月球软着陆探测和火星软着陆探测。SpaceX 的 Tom Mueller 首次将针栓式喷注器技术应用于猎鹰 9 号火箭的 Merlin 系列发动机上。不到十年间发展了 3 个改进版本,使得猎鹰 9 成为商业航天市场上最具竞争力的火箭^[1]。正是由于梅林发动机喷注器结构简单,零组件可快速更换实现改进,固有燃烧稳定性好,变推力实现容易,为猎鹰火箭的可重复使用提供了坚定的动力技术支持。

以往的喷注器推力变比最大为 2.5:1,变比再增大时由于低工况喷注压降降低,会出现低频燃烧不稳定和燃烧效率显著降低的情况。与以往的直流撞击式及离心式喷注器不同,针栓式喷注器通过调节装置改变氧化剂和燃料的喷注面积,保持各个工况的喷注压降基本不变,进而保持高的燃烧效率和良好的燃烧稳定性,因而该喷注器技术成为深度变推力发动机的关键技术。针栓式喷注器具有独特的几何特性和喷注特性,它通过伸入推力室内部的针栓喷注器结构,使轴向的液膜与径向的液束(或液膜)垂直撞击形成喷雾扇雾化混合,其工作原理结构如图 1 所示^[2]。

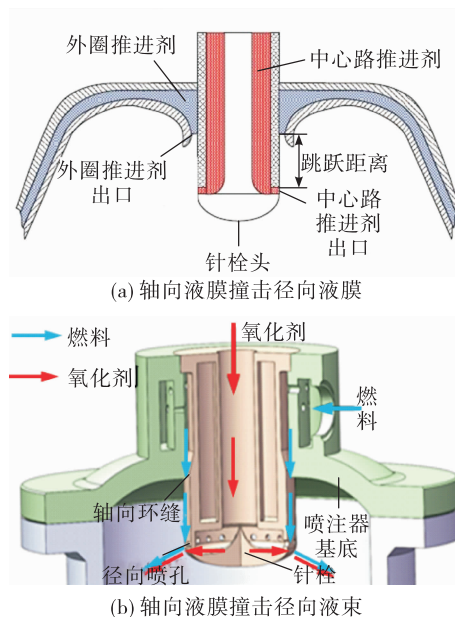


图 1 针栓式喷注器原理图

Fig.1 Schematic diagram of pintle injector

目前针栓式喷注器虽已成功应用于工程,然而相关的研究多见于工程研制,基础理论和数值研究很少。近年来,文献[3-6]针对轴对称针栓喷注器开展了很低速度或很低动量比下的喷雾水试验研究,然而仅能获得描述喷雾场宏观结构的雾化角信息,难以获得喷雾场内部的详细喷雾场结构,雾化角不能够反映喷雾场内部的详细信息。这是因

为针栓式喷注器的喷雾场非常独特,液雾极为稠密,且内部呈现复杂的分区结构特征。这给用现有光学测量设备进行试验观测带来了极大挑战,能获得的雾场特性参数非常有限。Sakaki 等率先提出了平面针栓喷注器单元的构想,并通过试验清楚观测到了喷雾场和燃烧火焰结构^[7]。后续 Sakaki 等又开展了同参数的轴对称喷注器对比研究,结果表明两者的特性一致,这为使用平面针栓式喷注器代替轴对称针栓式喷注器开展更深层次的研究提供了强有力的依据,表明平面针栓的研究方法非常有效^[8]。Kim 等借助平面针栓喷注单元的思路,针对径向圆孔的平面针栓多喷注单元开展了自燃推进剂的点火特性研究,结果表明阻塞率 0.65 的结构在中等动量比下的点火延迟时间最短^[9]。成鹏借助同样的思路主要针对径向圆孔的单喷注单元开展了较多的雾化特性试验研究及气氧酒精的平面针栓燃烧过程光学观测研究^[10]。王凯等也借助平面针栓喷注单元的思路开展了单喷注单元雾化过程高精度的数值模拟,首次分析了单喷注单元膜束撞击变形特征、流场涡结构特征及雾化混合分区结构特征等,为揭示针栓式喷注器喷雾燃烧精细过程奠定了基础^[11]。

然而以上研究未关注实际针栓式喷注器中相邻喷注单元间的相互影响。实际针栓式喷注器相邻喷注单元之间的间距较小,存在较强的相互影响,与单喷注单元形成的喷雾场结构不同,这使得单喷注单元得到的结果不能直接应用于实际针栓式喷注器。因此,需要对多喷注单元与单喷注单元喷雾场之间的差异性进行深入的研究。

综上所述,本文基于 AMR 技术和分相识别的 PLIC VOF 新方法,以液液平面针栓多喷注单元为研究对象,通过对径向和轴向两路液体分别追踪,开展液液针栓多喷注单元雾化过程的高精度数值模拟。首先通过数值仿真结果获得了多喷注单元喷雾场特有的结构特征;然后深入分析了相邻喷注单元喷雾扇的撞击变过程,揭示了单元间的相互影响机制;最后对比分析了多喷注单元与单喷注单元喷雾场结构及特性的差异。这对于将单喷注单元研究得到的结果应用于实际针栓式喷注器具有重要的意义。

1 数值仿真方法

1.1 控制方程

树状结构的自然分级特性非常适合多尺度网格的应用,而且四叉树/八叉树网格的灵活性与简单性在处理界面流动时有着巨大的优势。基于这种考虑,Popinet 提供了一种处理不可压、变密度、带有表面张力的 N-S 方程的数值方法,结合四叉树/八叉树离散、投影法与多级泊松求解器^[12]。通过使用面向对象的 C 语言编程实现后即为 Gerris 软件。Gerris 所采用的数值方法可表示为^[13]

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \mathbf{D}) + \sigma \kappa \delta_s \mathbf{n} \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u} = (u, v, w)$ 为液体的速度; $\rho = \rho(\mathbf{x}, t)$ 为液体的密度; $\mu = \mu(\mathbf{x}, t)$ 为液体的动力黏度; \mathbf{D} 为应变张量, $D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; δ_s 函数为表面张力仅集中作用在相界面上; κ 和 \mathbf{n} 分别为相界面曲率和法向方向^[14-15]。

本文主要为了研究撞击变形及流动过程,采用分三相 VOF 方法对两种液体推进剂和环境气体的相界面分别进行追踪。为了分别识别两路液体的变形运动过程,认为两种液体互不相溶,且两者之间存在液相界面。于是分别定义液相 1 的体积分数 $c_1(\mathbf{x}, t)$ 和液相 2 的体积分数 $c_2(\mathbf{x}, t)$, 对应得到的流体密度和动力黏性系数为

$$\begin{cases} \rho(c_1, c_2) = c_1 \rho_{l1} + c_2 \rho_{l2} + (1 - c_1 - c_2) \rho_g \\ \mu(c_1, c_2) = c_1 \mu_{l1} + c_2 \mu_{l2} + (1 - c_1 - c_2) \mu_g \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ_{l1}, ρ_{l2} 和 μ_{l1}, μ_{l2} 分别是液相 1 和液相 2 的密度和黏度; ρ_g 和 μ_g 分别为气相的密度和黏度^[16-18]。

Gerris 中各项采用相应的格式进行离散。时间采用经典的分裂投影法,达到二阶精度。空间采用四叉树/八叉树进行离散,达到二阶精度,这使得自适应加密算法实现更简易灵活,在不损失计算精度的情况下显著降低了计算量,非常适合处理存在多尺度流动的瞬态流场计算问题^[18]。PLIC VOF 几何重构方法非常适合用于包含破碎、聚合现象的多相流计算过程,图 2 为雾化过程仿真自适应生成的网

格。Francois 在采用连续表面张力模型 (continuum surface force, CSF) 计算液相表面张力的基础上, 通过将表面张力转化为相界面附近的连续体积力源项, 结合高度函数曲率估计实现了表面张力的精确求解, 并对压力进行修正, 确保表面张力和压力梯度之间的平衡^[19]。采用单调集成大涡模拟 MILES (又称隐式大涡模拟 ILES)^[20] 近似模拟亚格子 SGS 的能量传递。

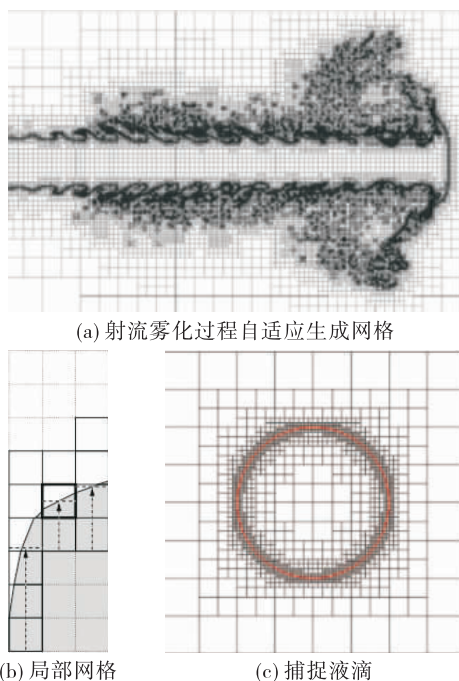


图 2 基于 PLIC VOF 方法的 AMR 技术
Fig. 2 AMR based on PLIC VOF method

1.2 气液相界面捕捉及表面张力

Gerris 使用 PLIC VOF 方法对界面进行重构。PLIC VOF 方法定义函数 c 作为第一相体积分数来描述相界面 (包含相界面的网格为 $0 < c < 1$, 充满第一相的网格为 $c = 1$, 不含第一相的网格为 $c = 0$)。相界面的运动追踪是通过求解 c 的输运方程来实现的^[21-22]。其优点是实现过程简单, 精度很高, 同时对计算资源的需求较低, 守恒性好。三维 PLIC VOF 方法在不同情况下描述的相界面如图 3 中的红色斜平面所示, 其中正方体为单位长度的网格单元, \mathbf{n} 为由液相一侧指向气相一侧的相界面的单位法向量, α 为斜平面和原点之间的距离, 于是 \mathbf{n} 和 α 可唯一确定液相体积分数 c , 图 3 中 $H(x)$ 为 Heaviside 阶跃函数^[23]。

Gerris 采用的 PLIC VOF 方法对气液相界面捕捉分两步进行: ①界面重构, 即如图 3 所示; ②几何通量计算和界面对流的处理^[13]。界面法向 \mathbf{n} 可以通过考虑相邻单元的体积分数, 在八叉树空间离散产生的 $3 \times 3 \times 3$ 模板中使用 Aulisa 等提出的 Mixed-Youngs-Centred (MYC) 格式进行计算^[24]。一旦实现界面重构, 在规则笛卡尔网格中采用交替方向方法很容易计算得到几何通量, 体积分数对流项采用文献[25]实现的方向交替格式计算, 进而对式 (2) 中体积分数输运方程进行离散计算。这种对流格式可以捕捉到锐利的界面, 并且已在实际应用中证明达到二阶精度。

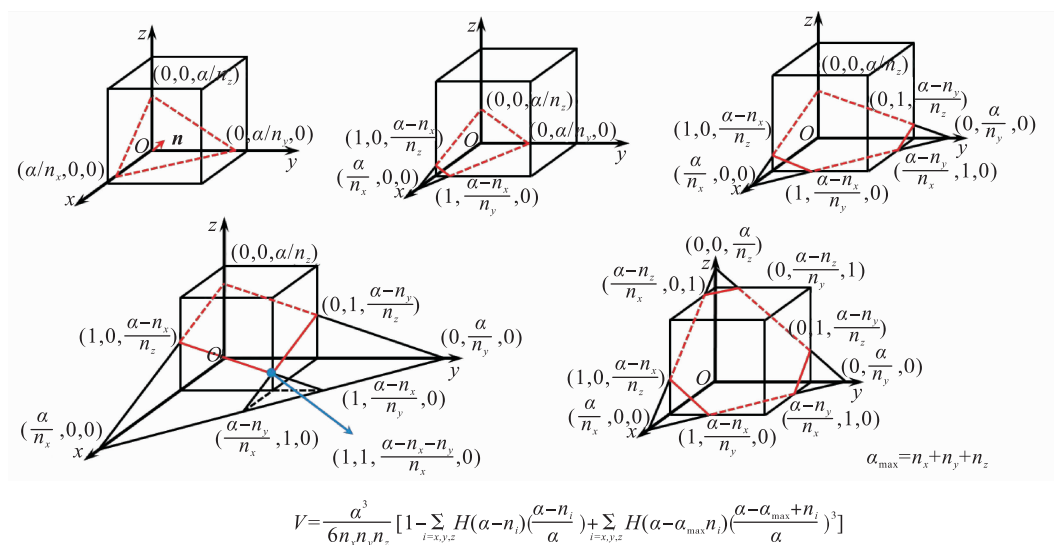


图 3 PLIC VOF 方法
Fig. 3 PLIC VOF method

1.3 计算模型

对于平面针栓多喷注单元,建立如图 4 所示计算域模型,至少选取 3 个喷注单元作为计算对象,径向孔间距根据阻塞率计算确定。其中 h 为轴向液膜厚度, u_1 为轴向速度, d 为径向液束直径, u_2 为径向速度。计算域由 10 ~ 46 个 $L \times L \times L$ 基本结构 Box 构成,根据计算需求选用不同的 Box 数量构成不同大小的计算域。计算域左部和底部分别为轴向与径向的速度入口边界。壁面均为无滑移壁面条件,两侧设置为对称面边界,其余为出口,采用 Outflow 边界条件,背压为大气环境。设置第一相和第二相均为水,对应两路液体,第三相为空气。计算域 Box 的长度为 $L = 10 \text{ mm}$,最高网格等级为 9,对应的最小网格约为 $19.5 \text{ }\mu\text{m}$,最低等级为 6,同时绝大部分区域网格不超过 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 。将两种液相的体积分数及其梯度设置为网格自适应函数,即网格会自动随着体积分数及其梯度大小而加密/粗化。具体结构参数如表 1 所示,工况参数为 $u_1 = 20 \text{ m/s}$, $u_2 = 25 \text{ m/s}$ 。

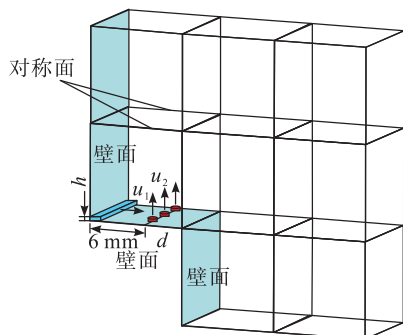


图 4 计算域模型

Fig. 4 Model of simulation zone

表 1 径向圆形孔的结构参数

Tab. 1 Geometry parameters of different radial circular orifices

喷嘴类型	孔数	孔径 d/mm	轴向液膜 厚度 h/mm	孔心间距 l/mm	阻塞率 C_{BF}
喷注单元	1	0.80	0.45	—	—
多喷注单元	3	0.80	0.45	2.00	0.40

1.4 数据处理方法

数值仿真过程中通过 Gerris 的库函数 GfsOutputDropletSums 对全喷雾场捕捉到的所有液滴数目、体积、速度及质心位置进行统计输出,认为每个液滴近似呈球形,统计的液滴范围为 $10 \sim 500 \text{ }\mu\text{m}$,在距离撞击点约 20 mm 的轴向横截面设置统计区域。

通过 MATLAB 编程统计一段时间内(约 0.4 ms ,间隔时间约为 $10 \text{ }\mu\text{s}$)的液滴输出结果。对于同一工况,将全场所有的液滴集中统计可获得该工况的液滴粒径概率密度分布直方图,将液滴直径统计范围从小到大分成等间隔的 200 组,统计每个分组内的液滴数目,计算每组的液滴数目频率,最终可获得液滴粒径的数目概率密度分布。另外,在撞击点下游 20 mm 处沿径向等间隔设置统计区,并用最大雾化角对应的位置对径向位置无量纲化后作为横坐标($\bar{z} = \frac{z}{x \tan \theta^*}$),按照液滴质心位置对其进行分区统计得到该区域的液滴平均粒径,统计一段时间内的液滴平均粒径,进而获得液滴沿径向的分布信息(见图 5)。

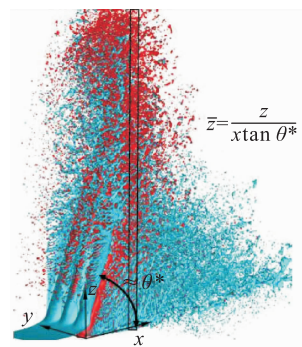


图 5 测点设置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of measuring point arranged

2 仿真验证与结果分析

2.1 多喷注单元喷雾场结构特征分析

为了降低多喷注单元数值仿真的计算量,同时又能说明多喷注单元特有的喷雾场结构,本节一开始先选用两个径向圆孔的喷注单元开展分析,重点关注喷注单元间相互影响造成的特征差异,后续将针对特征差异形成的原因开展分析。

从图 6 所示的多喷注单元的喷雾场数值仿真结果可以看到,与单喷注单元喷雾场仿真结果(如图 7 所示)相比,由于相邻喷注单元之间存在相互影响,多喷注单元的喷雾场主要存在以下几个特有结构:相邻两雾扇相撞背部呈脊状结构,该结构使得雾化区域大于雾化角;两个雾扇相撞会在中间截面汇聚成一道薄液膜,使得液滴在整个雾化角范围内均有分布;相邻两孔之间会有一定宽度的液膜下漏,下

漏液膜宽度和下漏率是重要的参数;液滴空间分布及混合比分布也发生变化。

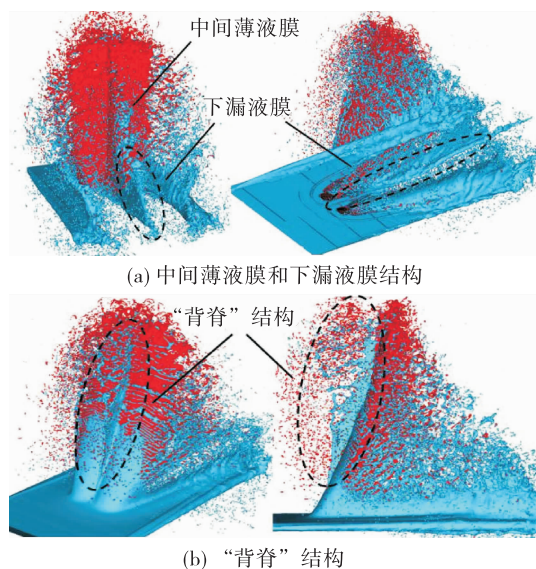


图 6 多喷注单元喷雾场结构特征

Fig. 6 Spray field structures of multi-injector elements

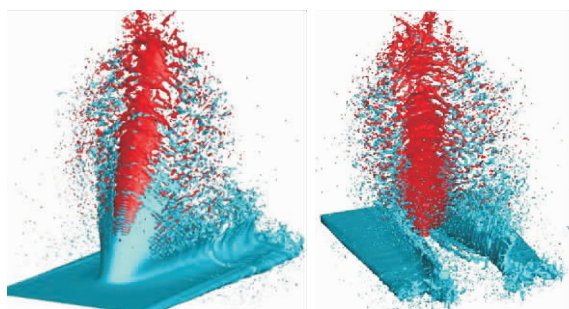
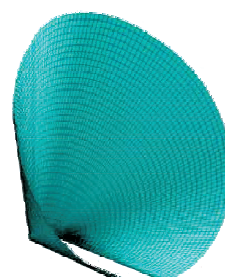


图 7 单喷注单元喷雾场结构

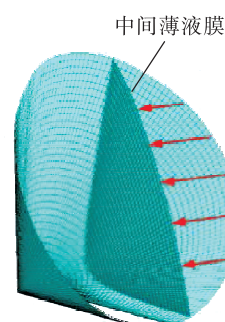
Fig. 7 Spray field structures of injector element

多喷注单元形成上述与单喷注单元不同的喷雾场结构主要是由于受到相邻喷注单元的相互影响,使得单喷注单元的“ Ω ”形喷雾扇发生了形状变化。形象地刻画多喷注单元间的相互作用过程,经过分析数值仿真结果,得到了如图 8、图 9 和图 10 所示的喷雾扇结构示意图。图 8 为受相邻喷注单元影响的喷雾扇变形过程示意图,图 9 为相邻两个喷注单元形成的喷雾扇结构示意图,图 10 为将其拓展至多喷注单元,最终形成的喷雾扇结构示意图。从上述结构示意图可以发现,相邻两个喷雾扇相撞后原先各自向外展开的雾扇被挤回中心对称面,从而变形形成薄液膜,且中间的液膜厚度可认为是原雾扇液膜厚度的两倍,其他未发生撞击的雾扇位置

(特别是雾扇的顶端)可认为液膜厚度保持不变。



(a) 原喷雾扇结构



(b) 原先向外展开的雾扇被挤回中心对称面



(c) 相邻喷雾扇撞击后的雾扇结构

图 8 受相邻喷注单元影响的喷雾扇变形过程

Fig. 8 Deformation process of spray fan affected by adjacent injector elements

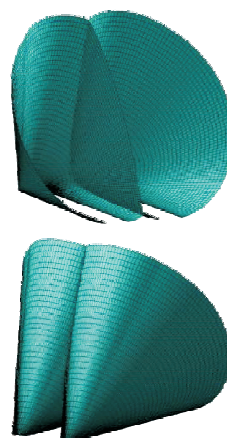


图 9 相邻两个喷注单元的喷雾扇结构

Fig. 9 Spray fan structure for adjacent two injector elements

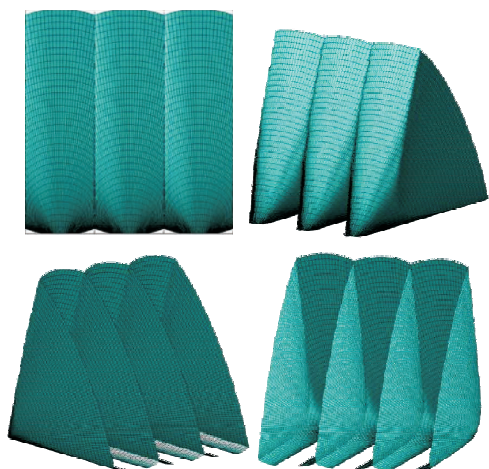
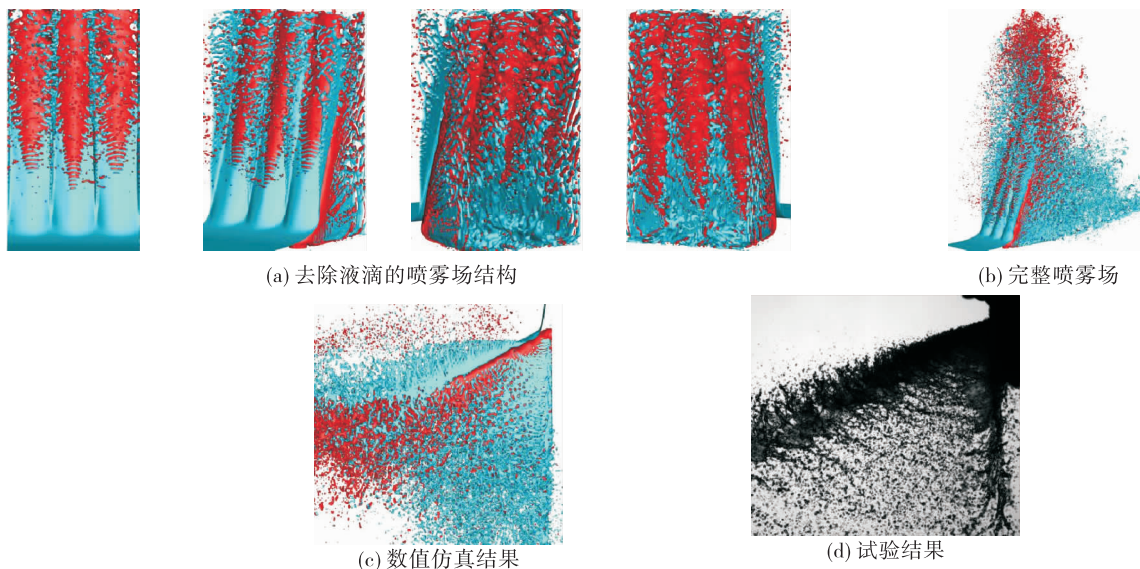


图10 多喷注单元的喷雾扇结构

Fig. 10 Spray fan structure for multi-pintle injector

图11和图12分别为表1中多喷注单元工况参数下的数值仿真和高速摄影试验拍摄的结果,可以看到三者外形非常相似。

笔者在之前的研究结果中还对试验和数值仿真测得的雾化角及单喷注单元的液滴平均粒径进行了定量对比验证^[26],相同工况下雾化角的试验测量值和仿真值分别为 72.88° 和 70.28° ,相对误差为3.57%;单喷注单元液滴平均粒径的试验测量值和仿真值分别为 $175\ \mu\text{m}$ 和 $158\ \mu\text{m}$,相对误差为9.71%。上述结果表明该仿真方法的准确性较高,也表明上述分析的变形过程及揭示的相邻喷注单元间相互影响的机制是准确合理的。



(a) 去除液滴的喷雾场结构

(b) 完整喷雾场

(c) 数值仿真结果

(d) 试验结果

图11 多喷注单元的喷雾扇数值仿真结果

Fig. 11 Numerical result of spray fan for multi-pintle injector



(a) 长曝光拍摄

(b) 倾斜视角瞬态图像

(c) 侧视瞬态图像

图12 多喷注单元的喷雾扇试验拍摄结果

Fig. 12 Experimental result of spray fan for multi-pintle injector

另外,从多喷注单元的结果可以看出,相邻喷雾扇由于受到相互影响被挤压,最终形成的喷雾场呈扁平的多凹腔状,每个喷注单元将整个喷雾场内部分隔成一个个相对独立的凹腔空间,而外围拼接成一个大雾锥,与单喷注单元的喷雾场不同;同时,液膜破碎后的液雾在空间也呈现相应的不规则曲面分布,从而使得喷雾场的液滴空间分布及混合比分布也发生相应变化。

2.2 单喷注单元与多喷注单元的对比如

针对表 1 相同结构参数 ($d = 0.8 \text{ mm}$, $h = 0.45 \text{ mm}$) 和工作参数 ($u_1 = 20 \text{ m/s}$, $u_2 = 25 \text{ m/s}$) 的单喷注单元和多喷注单元,通过数值仿真获得了喷雾场液滴粒径信息。获得的单喷注单元与多喷注单元的喷雾场计算结果对比如图 13 所示,对应的全场液滴粒径概率密度分布如图 14 所示,液滴粒径沿径向的空间分布如图 15 所示,相对流强(即流强概率密度分布)及混合比沿径向的空间分布分别如图 16 和图 17 所示。通过对比可以看到,正如 2.1 节所述,单喷注单元与多喷注单元的喷雾场存在显著不同。

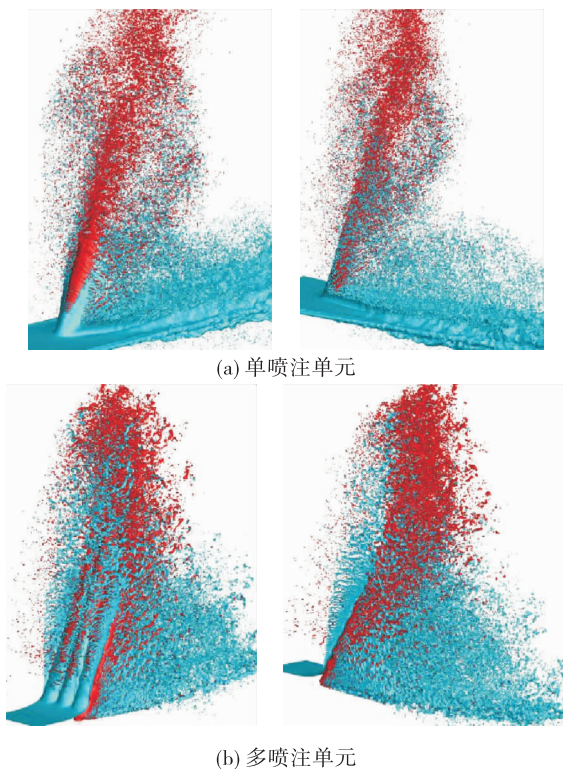


图 13 喷雾场计算结果

Fig. 13 Simulation results of spray field

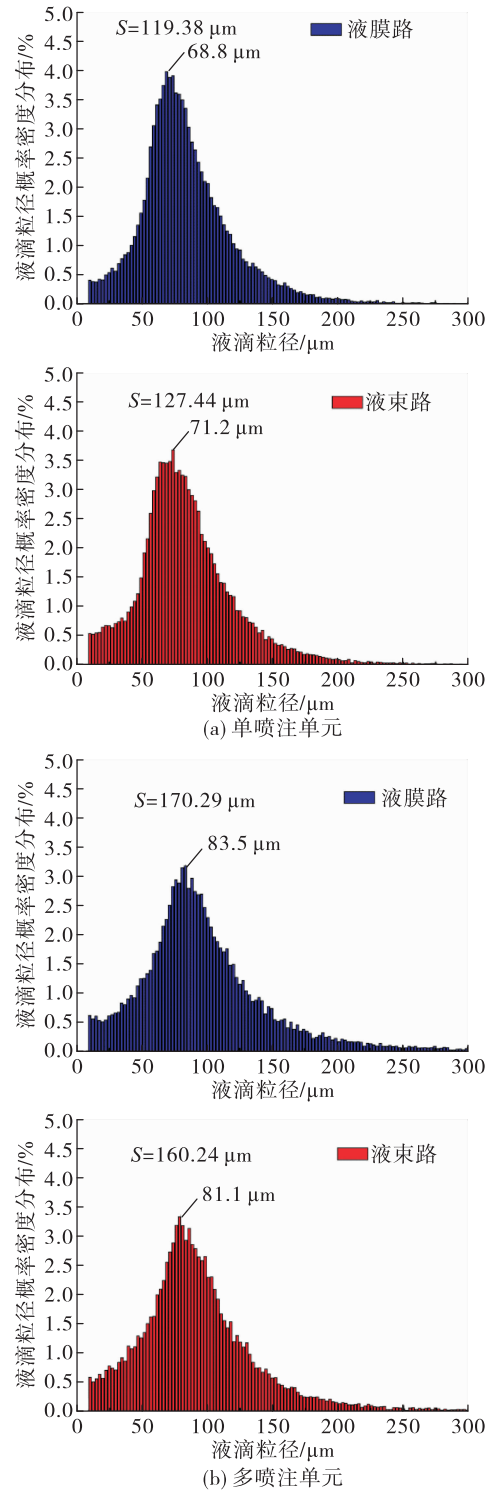


图 14 全场液滴粒径概率密度分布

Fig. 14 Droplet diameter probability density distribution in the whole spray field

从图 14 可以看出,与单喷注单元相比,多喷注单元液膜路和液束路的液滴分布峰值均偏向更大

粒径方向,大液滴数目占比明显增加,液滴平均粒径 S 均明显增大,分别从 $119.38\ \mu\text{m}$ 和 $127.44\ \mu\text{m}$ 增大至 $170.29\ \mu\text{m}$ 和 $171.73\ \mu\text{m}$,分别增大了 42.6% 和 34.8% 。

液滴粒径沿径向的空间分布如图15所示,图15中实线是文献[26]中单喷注单元的理论模型结果,虚线是直接将雾扇液膜厚度加倍获得的理论结果,散点是数值仿真获得结果。以文献[26]中提出的单喷注单元液滴粒径沿径向分布的理论预估模型为参考,可以看到:在 $\bar{z} < 1.0$ 时,单喷注单元液膜路的液滴粒径与液滴粒径预估模型吻合较好,平均粒径沿径向变化不大,单喷注单元液束路的液滴粒径与预估模型趋势吻合较好,随径向位置增大而增大;在 $\bar{z} > 1.0$ 时,液滴粒径快速减小。然而多喷注单元的液滴粒径沿径向分布均相比增大,与单喷注单元的相差较远[以图15(a)和图15(b)中实线作为对比参考]。

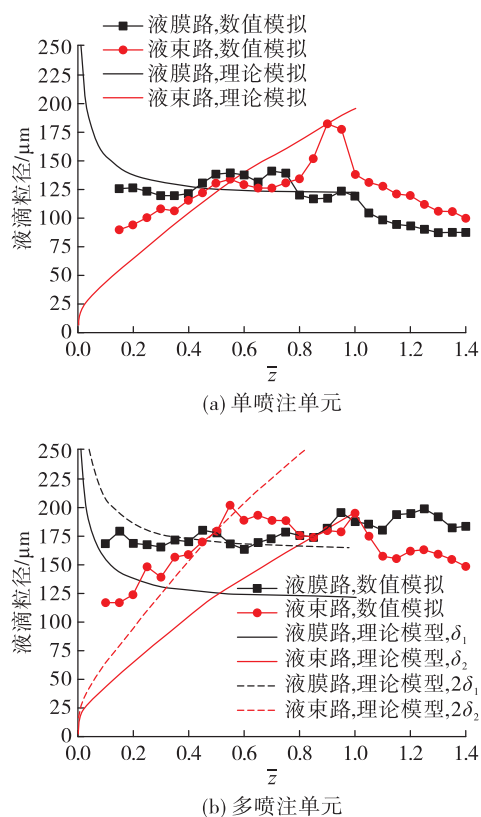


图15 液滴粒径沿径向的空间分布

Fig. 15 Radial distribution of droplet diameter

在 $\bar{z} < 0.5 \sim 0.6$ 时,两路液滴粒径均与原雾扇

液膜厚度加倍的理论预测结果(图15中虚线)吻合较好,液束路在 $0.8 < \bar{z} < 1.0$ 时与原雾扇液膜厚度的预测结果(图15中实线)吻合较好,在 $0.6 < \bar{z} < 0.8$ 时液滴粒径处于两种预测结果之间,这也正好印证了2.1节关于多喷注单元雾扇结构变形及中间液膜厚度加倍的假设。多喷注单元的液膜路主要受到了“背脊”结构的影响,使其在 $\bar{z} > 0.8$ 时液滴粒径未减小至与原雾扇预测结果一致,反而随着径向位置增大而稍微增大。液束路受“背脊”结构的影响很小,故在 $\bar{z} > 1.0$ 时,液滴粒径减小。总体来看,在 $0.6 < \bar{z} < 1.0$ 时,受两路之间强的相互作用影响,液滴粒径接近,且粒径分布呈平台状,粒径变化不大。需要说明的是,多喷注单元间相互作用造成雾扇液膜厚度加倍,同时雾扇撞击损失使得液膜速度减小,综合考虑这两种因素后粒径约增大了 35% [即图15(b)中虚线相比实线约增大了 35%]。

如图16所示,实际的多喷注单元喷雾扇仅有较小半径处的部分发生重叠,液膜厚度加倍。在较小半径位置采用虚线液膜厚度加倍的理论结果,在大半径位置采用实线单喷注单元原来液膜厚度的理论结果,中间半径位置介于两种结果之间。由于中间过渡区雾场结构十分复杂,目前还没更好的理论模型进行解析描述,还不能形成一个统一的解析表达式。目前只能用实线和虚线组合起来描述多喷注单元。这样的模型虽存在不足,但相对简单,可以满足一定精度要求下的理论预估使用需求。

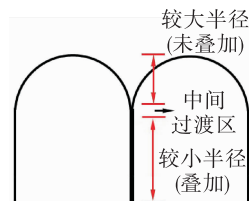


图16 相邻雾扇的相互影响

Fig. 16 Interaction between adjacent spray fans

对上述分区统计结果进一步分析,根据同一时间段相同空间区域内分别统计的液膜路和液束路液滴质量可以计算出两路液体的相对流强及混合比沿径向的大致分布。此处使用统计横截面上每

一路液体的总流强对每个统计分区的流强无量纲化得到相对流强,相对流强描述的是流强沿径向的分布均匀性规律,这样可消除总流量不同带来的数值上的影响。从图 17 可以看出,对于单喷注单元和多喷注单元,两路液体沿径向的分布大体相似,液膜路在 \bar{z} 很小的位置分布较多,液束路在 \bar{z} 接近 1.0 的雾扇外缘分布较多。不同的是,单喷注单元液膜路主要分布在雾扇下半部分(即 $\bar{z} < 0.3$),在 \bar{z} 很小的位置雾化很差,实际的流强分布更大,且随径向位置增大逐渐减小;多喷注单元液膜路除了 \bar{z} 很小的位置存在下漏外,沿径向整体分布较为均匀,且“背脊”使得液膜路在 $\bar{z} > 1.0$ 的较大范围内仍有较多分布,从图 13 也可以明显看出。

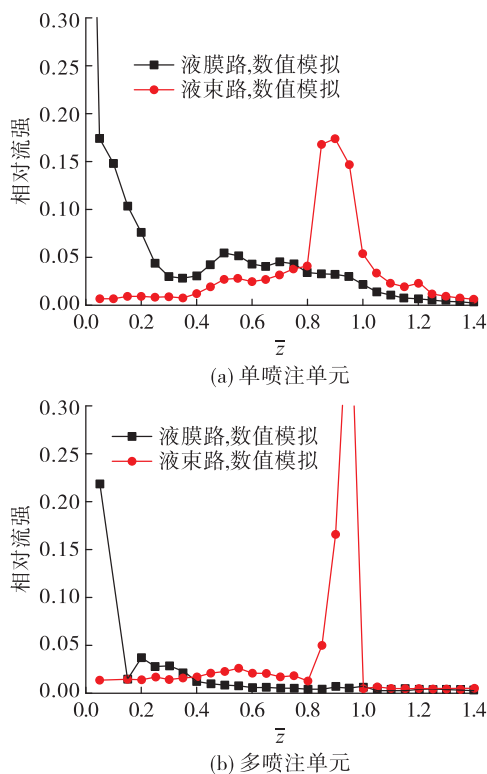


图 17 相对流强沿径向的空间分布

Fig. 17 Radial distribution of relative mass flow rate flux

从图 18 的混合比分布可以看到,两者的混合比均随着径向位置增大而增大。两者的混合比分布均在 $0.8 < \bar{z} < 1.0$ 区间达到峰值(即在稍小于雾化角的区域),此处中心氧化剂路分布较多,混合比严重偏富氧;在 $0.4 < \bar{z} < 0.8$ 区间混合比在 $0.5 \sim 2.0$

之间,接近当量混合比(如 NTO 和 MMH 经常采用混合比约为 1.65^[7],考虑水的密度与真实推进剂组合密度比的差异,调整后的混合比约为 1.1,当量比为 1.6),多喷注单元的混合比分布在此区域呈平台状,分布更均匀;在 $\bar{z} < 0.1 \sim 0.2$ 区间混合比很低,混合比偏富燃;在 $\bar{z} > 1.0$ 时,单喷注单元由于液束穿透液膜,液束路分布较多,混合比仍较高。然而多喷注单元由于同时又有“背脊”结构造成液膜路向外侧输送液体,使得混合比降低,这也是多喷注单元混合比峰值比单喷注单元高的原因之一。总体而言,多喷注单元使得相对流强和混合比沿径向分布范围增大,分布趋于均匀(除峰值附近外)。

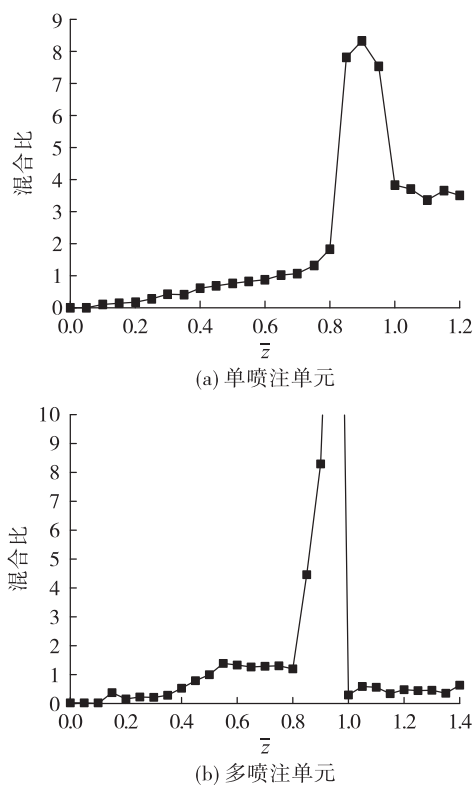


图 18 混合比沿径向的空间分布

Fig. 18 Radial distribution of mixture ratio

3 结论

为了研究相邻喷注单元间相互影响对针栓式喷注器喷雾场的影响,基于 AMR 技术和分相识别的 PLIC VOF 新方法,实现了针栓多喷注单元雾化过程的高保真数值模拟,并对比了其与喷注单元喷

雾场结构及特性的差异,揭示了相邻喷注单元间的相互影响机制,得出以下结论。

1)数值仿真获得多喷注单元喷雾扇结构与高速摄影试验拍摄的结果对比,两者外形非常相似,试验与数值仿真的雾化角相对误差为3.57%,液滴平均粒径相对误差为9.71%,表明新的仿真方法在精细研究针栓式喷注器喷雾场方面具有较好的准确性,也表明受相邻喷注单元影响的喷雾扇变形过程分析是准确合理的。

2)与单喷注单元相比,多喷注单元喷雾场主要存在以下特殊结构:相邻两雾扇相撞背部呈脊状结构,使得雾化区域大于雾化角;两雾扇相撞在中间对称面汇聚形成薄液膜,使整个雾化角范围内均有液滴分布;相邻两孔之间形成一定下漏率和下漏液膜宽度;液滴空间分布均发生显著变化。

3)相邻喷注单元间的相互影响机制为:相邻喷雾扇相撞后原先各自向外展开的雾扇被挤回中心对称面,变形成薄液膜,其厚度是原雾扇的两倍,其他未发生撞击位置的液膜厚度保持不变,最终形成的喷雾扇结构呈扁平的多凹腔状。

4)单喷注单元与多喷注单元的喷雾场特性存在显著不同。受相邻喷注单元间相互作用影响,多喷注单元液膜路和液束路的液滴粒径均显著增大了约35%,流强和混合比沿径向分布更趋于均匀。

参考文献

- [1] 张雪松. 猎鹰火箭的基础:不断升级的梅林发动机[J]. 卫星与网络,2017(6):40-41.
- [2] 刘昌波. 针栓式喷注器雾化特性的多尺度仿真研究[D]. 西安:西安航天动力研究所,2014.
- [3] LEE K, NAM J, KOO J. Experimental research about combustion of multi-hole pintle injector using LOX/GCH₄[C]//27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Beijing, China: IDERS, 2019.
- [4] RYU H, YU I, KIM W, et al. Experimental investigation on combustion performance of a pintle injector engine with double-row rectangular slot[J]. Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 2017, 21(3): 25-33.
- [5] LEE S, KIM D, KOO J, et al. Spray characteristics of a pintle injector based on annular orifice area[J]. Acta Astronautica, 2020, 167: 201-211.
- [6] CHEN H Y, LI Q L, CHENG P. Experimental research on the spray characteristics of pintle injector[J]. Acta Astronautica, 2019, 162: 424-435.
- [7] 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, 2017, 33(2): 514-521.
- [8] SAKAKI K, KAKUDO H, NAKAYA S, et al. Performance evaluation of rocket engine combustors using ethanol/liquid oxygen pintle injector[C]//52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2016.
- [9] KIM H, KANG H, KWON S. Liquid sheet-sheet impinging structure for pintle injector with nontoxic hypergolic bipropellant[J]. Journal of Propulsion and Power, 2020, 36(2): 302-307.
- [10] 成鹏. 变推力火箭发动机喷雾燃烧动态过程研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2018.
- [11] 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.
- [12] POPINET S. Gerris: A tree-based adaptive solver for the incompressible Euler equations in complex geometries[J]. Journal of Computational Physics, 2003, 190(2): 572-600.
- [13] FUSTER D, POPINET S. Simulation of primary atomization with an octree adaptive mesh refinement and VOF method[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(6): 550-565.
- [14] CHEN X D, XUE C D, ZHANG L, et al. Inertial migration of deformable droplets in a microchannel[J]. Physics of Fluids, 2014, 26(11): 112003.
- [15] CHEN X D, SUN Y N, XUE C D, et al. Tunable structures of compound droplets formed by collision of immiscible microdroplets[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2017, 21(6): 1-14.
- [16] 王凯, 雷凡培, 杨岸龙, 等. 针栓式喷注器液膜下漏率预估模型[J]. 航空动力学报, 2020, 35(10): 2223-2234.
- [17] 王凯, 雷凡培, 杨岸龙, 等. 径向孔形状对针栓式喷注器液膜下漏率的影响[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 124384.
- [18] 王凯, 雷凡培, 张波涛, 等. 针栓式喷注单元雾化角模型分析[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 123622.

- [19] FRANCOIS M, CUMMINS S. A balanced-force algorithm for continuous and sharp interfacial surface tension models within a volume tracking framework [J]. *Journal of Computational Physics*, 2006, 213(1): 141-173.
- [20] 阎超, 于剑, 徐晶磊, 等. CFD 模拟方法的发展成就与展望[J]. *力学进展*, 2011, 41(5): 562-589.
- [21] 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.
- [22] 杨国华, 张波涛, 周立新, 等. 液气动量比对内混式直流气液喷嘴雾化特性影响[J]. *火箭推进*, 2019, 45(5): 66-73.
- YANG G H, ZHANG B T, ZHOU L X, et al. Effects of momentum ratio on atomization characteristics of internal mixing gas-liquid injector[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2019, 45(5): 66-73.
- [23] GUEYFFIER D, LI J, NADIM A, et al. Volume-of-fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for three-dimensional flows [J]. *Journal of Computational Physics*, 1999, 152(2): 423-456.
- [24] AULISA E, MANSERVISI S, SCARDOVELLI R, et al. Interface reconstruction with least-squares fit and split advection in three-dimensional Cartesian geometry[J]. *Journal of Computational Physics*, 2007, 225(2): 2301-2319.
- [25] DEBAR R. Fundamentals of the KRAKEN code[R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1974.
- [26] 王凯. 针栓式喷注器液膜液束相互作用机制及喷雾场特性研究[D]. 西安: 西安航天动力研究所, 2021.